

UDC

中华人民共和国国家标准



P

GB 50429 - 2007

---

# 铝合金结构设计规范

Code for design of aluminium structures

2007 - 10 - 23 发布

2008 - 03 - 01 实施

---

中华人民共和国建设部  
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局

联合发布

中华人民共和国国家标准

铝合金结构设计规范

Code for design of aluminium structures

**GB 50429 - 2007**

主编部门:上海市建设和交通委员会  
批准部门:中华人民共和国建设部  
施行日期:2008年3月1日

中国计划出版社

2008 北 京

# 中华人民共和国建设部公告

第 726 号

## 建设部关于发布国家标准 《铝合金结构设计规范》的公告

现批准《铝合金结构设计规范》为国家标准,编号为 GB 50429—2007,自 2008 年 3 月 1 日起实施。其中,第 3.3.1、4.1.2、4.1.3、4.1.4、4.2.2、4.3.4、4.3.5、4.3.6、10.4.3、10.5.1 条为强制性条文,必须严格执行。

本规范由建设部标准定额研究所组织中国计划出版社出版发行。

中华人民共和国建设部  
二〇〇七年十月二十三日

## 前 言

根据建设部建标〔2003〕102号文《关于印发“2002~2003年度工程建设国家标准制订、修订计划”的通知》要求,本规范由同济大学、现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司会同有关单位编制而成。

在编制本规范过程中,进行了系统的试验研究和理论分析,调查总结了近年来国内外在铝合金结构设计和施工方面的实践经验,参考了欧洲、美国和日本的有关设计规范和设计手册,考虑了我国现有的技术水平和经济条件,在力争做到技术先进、经济合理、便于实践、与其他标准协调的基础上,经过反复讨论、修改充实和试设计,最后经审查定稿。

本规范共有11章3个附录,主要内容是:总则,术语和符号,材料,基本设计规定,板件的有效截面,受弯构件的计算,轴心受力构件的计算,拉弯构件和压弯构件的计算,连接计算,构造要求,铝合金面板。

本规范以黑体字标识的条文为强制性条文,必须严格执行。

本规范由建设部负责管理和对强制性条文的解释,由同济大学和现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司负责具体内容的解释。在执行本规范过程中,请各单位结合工程实践总结经验。对本规范的意见和建议,请寄至同济大学土木工程学院《铝合金结构设计规范》国家标准管理组(地址:上海市四平路1239号;邮编:200092;传真:021-65980644)。

本规范主编单位、参编单位和主要起草人:

**主 编 单 位:** 同济大学

现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司

**参编单位：**同济大学建筑设计研究院

上海远大铝业工程有限公司

长江精工钢结构(集团)股份有限公司

上海精锐国际建筑系统有限公司

广东金刚幕墙工程有限公司

上海高新铝质工程股份有限公司

上海亚泽金属屋面装饰工程有限公司

中南建筑集团有限公司装饰幕墙公司

**主要起草人：**张其林 杨联萍 姚念亮 吴明儿

(以下按姓氏笔画排列)

丁洁民 王平山 吕西林 杨仁杰 李静斌

吴水根 吴亚舸 吴志平 吴芸 何卫良

邱枕戈 张铮 张军涛 陈国栋 金鑫

屈文俊 孟根宝力高 赵华 胡全成

倪月 徐国军 黄庆文 黄明鑫 董震

焦瑜 谢子孟

# 目 次

1	总 则 .....	( 1 )
2	术语和符号 .....	( 2 )
2.1	术语 .....	( 2 )
2.2	符号 .....	( 4 )
3	材 料 .....	( 9 )
3.1	结构铝 .....	( 9 )
3.2	连接 .....	( 9 )
3.3	热影响区 .....	( 10 )
4	基本设计规定 .....	( 12 )
4.1	设计原则 .....	( 12 )
4.2	荷载和荷载效应计算 .....	( 12 )
4.3	设计指标 .....	( 14 )
4.4	结构或构件变形的规定 .....	( 17 )
4.5	构件的计算长度和容许长细比 .....	( 17 )
5	板件的有效截面 .....	( 22 )
5.1	一般规定 .....	( 22 )
5.2	受压板件的有效厚度 .....	( 22 )
5.3	焊接板件的有效厚度 .....	( 27 )
5.4	有效截面的计算 .....	( 28 )
6	受弯构件的计算 .....	( 30 )
6.1	强度 .....	( 30 )
6.2	整体稳定 .....	( 31 )
7	轴心受力构件的计算 .....	( 33 )
7.1	强度 .....	( 33 )
7.2	整体稳定 .....	( 34 )

8	拉弯构件和压弯构件的计算 .....	(37)
8.1	强度 .....	(37)
8.2	整体稳定 .....	(37)
9	连接计算 .....	(40)
9.1	紧固件连接 .....	(40)
9.2	焊缝连接 .....	(43)
10	构造要求 .....	(47)
10.1	一般规定 .....	(47)
10.2	螺栓连接和铆钉连接 .....	(47)
10.3	焊缝连接 .....	(49)
10.4	防火、隔热 .....	(50)
10.5	防腐 .....	(50)
11	铝合金面板 .....	(52)
11.1	一般规定 .....	(52)
11.2	强度 .....	(54)
11.3	稳定 .....	(55)
11.4	组合作用 .....	(57)
11.5	构造要求 .....	(58)
附录 A	结构用铝合金材料力学性能 .....	(60)
附录 B	轴心受压构件的稳定系数 .....	(64)
附录 C	受弯构件的整体稳定系数 .....	(65)
	本规范用词说明 .....	(68)
附:	条文说明 .....	(69)

# 1 总 则

**1.0.1** 为在铝合金结构设计中贯彻执行国家的技术经济政策,做到技术先进、经济合理、安全适用、确保质量,制定本规范。

**1.0.2** 本规范适用于工业与民用建筑和构筑物的铝合金结构设计,不适用于直接受疲劳动力荷载的承重结构和构件设计。

**1.0.3** 本规范的设计原则是根据现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 制定的,按本规范设计时,尚应符合《建筑结构荷载规范》GB 50009、《建筑抗震设计规范》GB 50011、《中国地震动参数区划图》GB 18306 和《构筑物抗震设计规范》GB 50191 的规定。

**1.0.4** 设计铝合金结构时,应从工程实际情况出发,合理选用材料、结构方案和构造措施,满足结构构件在运输、安装和使用过程中的强度、稳定性和刚度要求,并符合防火、防腐蚀要求。

**1.0.5** 铝合金结构的设计,除应符合本规范外,尚应符合国家现行有关标准的规定。



## 2 术语和符号

### 2.1 术 语

#### 2.1.1 强度 strength

构件截面材料或连接抵抗破坏的能力。强度计算是防止结构构件或连接因材料强度被超过而破坏的计算。

#### 2.1.2 强度标准值 characteristic value of strength

国家标准规定的铝材名义屈服强度(规定非比例伸长应力)或抗拉强度。

#### 2.1.3 强度设计值 design value of strength

铝合金材料或连接的强度标准值除以相应抗力分项系数后的数值。

#### 2.1.4 屈曲 buckling

杆件或板件在轴心压力、弯矩、剪力单独或共同作用下突然发生与原受力状态不符的较大变形而失去稳定。

#### 2.1.5 承载能力 load-carrying capacity

结构或构件不会因强度、稳定等因素破坏所能承受的最大内力,或达到不适应于继续承载的变形时的内力。

#### 2.1.6 一阶弹性分析 the first order elastic analysis

不考虑结构二阶变形对内力产生的影响,根据未变形的结构建立平衡条件,按弹性阶段分析结构内力及位移。

#### 2.1.7 二阶弹性分析 the second order elastic analysis

考虑结构二阶变形对内力产生的影响,根据位移后的结构建立平衡条件,按弹性阶段分析结构内力及位移。

#### 2.1.8 弱硬化 weak hardening

状态为 T6 的铝合金材料为弱硬化合金。

**2.1.9 强硬化 strong hardening**

状态为除 T6 以外的其他铝合金材料为强硬化合金。

**2.1.10 有效厚度 effective thickness**

考虑受压板件屈曲后强度以及焊接热影响区效应对构件承载力进行计算时,板件的折减计算厚度。

**2.1.11 加劲板件 stiffened elements**

两纵边均与其他板件相连的板件。

**2.1.12 非加劲板件 unstiffened elements**

一纵边与其他板件相连,另一纵边为自由的板件。

**2.1.13 边缘加劲板件 edge stiffened elements**

一纵边与其他板件相连,另一纵边由符合要求的边缘卷边加劲的板件。

**2.1.14 中间加劲板件 intermediate stiffened elements**

中间加劲板件是指带中间加劲肋的加劲板件。

**2.1.15 子板件 sub-elements**

子板件是指一纵边与其他板件相连,另一纵边与中间加劲肋相连或两纵边均与中间加劲肋相连的板件。

**2.1.16 腹板屈曲后强度 post-buckling strength of web plates**

腹板屈曲后尚能继续保持承受荷载的能力。

**2.1.17 整体稳定 overall stability**

在外荷载作用下,对整个结构或构件能否发生屈曲或失稳的评估。

**2.1.18 计算长度 effective length**

构件在其有效约束点间的几何长度乘以考虑杆端变形情况和所受荷载情况的系数而得的等效长度,用以计算构件的长细比。计算焊缝连接强度时采用的焊缝长度。

**2.1.19 长细比 slenderness ratio**

构件计算长度与构件截面回转半径的比值。

**2.1.20 换算长细比 equivalent slenderness ratio**

在轴心受压构件的整体稳定计算中,按临界力相等的原则,将弯扭或扭转失稳换算为弯曲失稳时采用的长细比。

### 2.1.21 钨极氩弧焊 gas tungsten arc welding

使用钨极的氩弧焊,又称非熔化极氩弧焊、TIG 焊。

### 2.1.22 熔化极氩弧焊 gas metal arc welding

使用熔化电极的氩弧焊,又称 MIG 焊。

### 2.1.23 焊接热影响区 heat affected zone

母材受焊接热影响效应作用的范围,简称 HAZ。

## 2.2 符 号

### 2.2.1 作用及作用效应设计值:

$F$ ——集中荷载;

$H$ ——水平力;

$M$ ——弯矩;

$N$ ——轴心力;

$P$ ——一个高强度螺栓的预拉力;

$Q$ ——重力荷载;

$V$ ——剪力。

### 2.2.2 计算指标:

$E$ ——铝合金材料的弹性模量;

$G$ ——铝合金材料的剪变模量;

$N_t^b, N_v^b, N_c^b$ ——一个螺栓的抗拉、抗剪和承压承载力设计值;

$N_v^r, N_c^r$ ——一个铆钉的抗剪和承压承载力设计值;

$N_{tp}^b$ ——螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力设计值;

$R_w$ ——铝合金压型面板中的腹板局部受压承载力设计值;

$f$ ——铝合金材料的抗拉、抗压和抗弯强度设计值;

$f_v$ ——铝合金材料的抗剪强度设计值;

$f_{0.2}$ ——铝合金材料的规定非比例伸长应力,也称名义屈服强度;

- $f_u$ ——铝合金材料的抗拉极限强度；  
 $f_{u,haz}$ ——铝合金材料焊接热影响区的抗拉、抗压和抗弯强度设计值；  
 $f_{v,haz}$ ——铝合金材料焊接热影响区的抗剪强度设计值；  
 $f_t^b, f_v^b, f_c^b$ ——螺栓的抗拉、抗剪和承压强度设计值；  
 $f_v^r, f_c^r$ ——铆钉的抗剪和承压强度设计值；  
 $f_t^w, f_v^w, f_c^w$ ——对接焊缝的抗拉、抗剪和抗压强度设计值；  
 $f_t^w$ ——角焊缝的抗拉、抗剪和抗压强度设计值；  
 $\alpha$ ——铝合金材料的线膨胀系数；  
 $\nu$ ——铝合金材料的泊松比；  
 $\rho$ ——铝合金材料的质量密度；  
 $\sigma$ ——正应力；  
 $\sigma_{cr}, \tau_{cr}$ ——受压板件的弹性临界应力、板件的剪切屈曲临界应力；  
 $\sigma_t$ ——按焊缝有效截面计算，垂直于焊缝长度方向的应力；  
 $\sigma_{haz}$ ——作用在临界失效面，垂直于焊缝长度方向的正应力；  
 $\sigma_N$ ——垂直于焊缝有效截面的正应力；  
 $\tau_t$ ——按焊缝有效截面计算，沿焊缝长度方向的剪应力；  
 $\tau_{haz}$ ——作用在临界失效面，平行于焊缝长度方向的剪应力；  
 $\tau_N$ ——有效截面上垂直于焊缝长度方向的剪应力；  
 $\tau_S$ ——有效截面上平行于焊缝长度方向的剪应力。

### 2.2.3 几何参数：

- $A$ ——毛截面面积；  
 $A_e$ ——有效截面面积；  
 $A_{en}$ ——有效净截面面积；  
 $B$ ——铝合金面板的波距；  
 $I$ ——毛截面惯性矩；  
 $I_w$ ——毛截面扇性惯性矩；  
 $I_t$ ——毛截面抗扭惯性矩；  
 $W_e$ ——有效截面模量；

- $W_{en}$ ——有效净截面模量；
- $S$ ——计算剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩；
- $b$ ——截面或板件的宽度；
- $b_{haz}$ ——板件的焊接热影响区宽度；
- $c$ ——加劲肋等效高度；
- $d$ ——螺栓杆直径；
- $d_e$ ——螺栓在螺纹处的有效直径；
- $d_0$ ——铆钉孔直径；螺栓孔直径；
- $d_m$ ——为下列两者中较小值：
- (a)螺栓头或螺母外接圆直径与内切圆直径的平均值；
- (b)当采用垫圈时为垫圈的外径；
- $e_a$ ——荷载作用点至弯心的距离；
- $h$ ——截面或板件的高度；框架结构每层的高度；
- $h_e$ ——角焊缝计算厚度；
- $h_f$ ——角焊缝的焊脚尺寸；
- $i$ ——回转半径；
- $i_0$ ——截面对剪心的极回转半径；
- $k$ ——受压板件的局部稳定系数；
- $l$ ——长度或跨度；
- $l_0$ ——计算长度；
- $l_w$ ——扭转屈曲的计算长度；
- $l_y$ ——梁的侧向计算长度；
- $l_w$ ——焊缝计算长度；
- $t$ ——板件厚度；对接焊缝计算厚度；
- $t_e$ ——板件有效厚度；
- $t_w$ ——腹板厚度；
- $t_p$ ——螺栓头或螺母下构件的厚度；
- $t_1$ ——铝合金面板 T 形支托腹板的最小厚度；
- $t_2$ ——铝合金面板 T 形支托腹板的最大厚度；

$\Sigma t$ ——在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值；

$y_0$ ——截面形心至剪心的距离；

$\theta$ ——夹角；

$\lambda$ ——长细比；

$\bar{\lambda}$ ——板件的换算柔度系数；受弯构件的弯扭稳定相对长细比；轴心受压构件的相对长细比；

$\lambda_w$ ——扭转屈曲换算长细比。

#### 2.2.4 计算系数及其他：

$n_v$ ——受剪面数目；

$n_f$ ——传力摩擦面数目；

$n_c$ ——框架结构每层内柱的数目；

$n_s$ ——框架结构的层数；

$n$ ——在节点或拼接处，构件一端连接的高强度螺栓数目；

$n_1$ ——所计算截面（最外列螺栓处）上高强度螺栓数目；

$\Delta u$ ——框架结构的层间位移；

$\alpha_1, \alpha_2$ ——Winter 折算系数；

$\alpha_{2i}$ ——考虑二阶效应时第  $i$  层杆件的侧移弯矩增大系数；

$\beta_1$ ——临界弯矩修正系数；

$\beta_2$ ——荷载作用点位置影响系数；

$\beta_3$ ——荷载形式不同时对单轴对称截面的修正系数；

$\beta_f$ ——正面角焊缝的强度设计值增大系数；

$\beta_m$ ——等效弯矩系数；

$\gamma_R$ ——铝合金结构构件的抗力分项系数；

$\gamma_0$ ——结构的重要性系数；

$\gamma$ ——截面塑性发展系数；

$\eta$ ——修正系数；

$\mu$ ——摩擦面的抗滑移系数；柱的计算长度系数；

$\rho_{haz}$ ——焊接热影响区范围内材料的强度折减系数；

- $\varphi$ ——轴心受压构件的稳定系数；
- $\bar{\varphi}$ ——轴心受压构件的稳定计算系数；
- $\varphi_b$ ——受弯构件的整体稳定系数；
- $\psi$ ——应力分布不均匀系数。

## 3 材 料

### 3.1 结 构 铝

**3.1.1** 用于承重结构的铝合金应采用轧制板、冷轧带、拉制管、挤压管、挤压型材、棒材等锻造铝合金。

**3.1.2** 应根据结构的重要性、荷载特征、结构形式、应力状态、连接方式、材料厚度等因素,选用合适的铝合金牌号、规格及其相应状态,并应符合现行国家标准的规定和要求。

铝合金结构材料型材宜采用 $5\times\times\times$ 系列和 $6\times\times\times$ 系列铝合金;板材宜采用 $3\times\times\times$ 系列和 $5\times\times\times$ 系列铝合金。板材力学性能应符合现行国家标准《铝及铝合金轧制板材》GB/T 3880和《铝及铝合金冷轧带材》GB/T 8544的规定;型材及棒材应符合现行国家标准《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191、《铝及铝合金拉(轧)制无缝管》GB/T 6893、《铝及铝合金热挤压管》GB/T 4437、《铝合金建筑型材》GB 5237、《工业用铝及铝合金热挤压型材》GB/T 6892的规定。

### 3.2 连 接

**3.2.1** 铝合金结构的螺栓连接应符合下列要求:

1 普通螺栓材料宜采用铝合金、不锈钢,也可采用经热浸镀锌、电镀锌或镀铝等可靠表面处理后的钢材。

2 铝合金结构的螺栓连接不宜采用有预拉力的高强度螺栓,确需采用时应满足本规范相应条款的规定。

3 普通螺栓应符合现行国家标准《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1、《紧固件机械性能 有色金属制造的螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3098.10、《紧固件机械性能 不锈钢螺



母》GB/T 3098.15、《六角头螺栓 C 级》GB/T 5780 和《六角头螺栓》GB/T 5782 的规定。

**3.2.2** 铝合金结构的铆钉材料应采用铝合金或不锈钢,并应符合现行国家标准《半圆头铆钉(粗制)》GB/T 863.1 和《半圆头铆钉》GB 867 的规定。

**3.2.3** 铝合金结构焊接用焊丝应符合现行国家标准《铝及铝合金焊丝》GB 10858 的规定,宜选用 SAIMG-3 焊丝(Eur 5356)及 SAlSi-1 焊丝(Eur 4043)。焊接工艺可采用熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG 焊)和钨极惰性气体保护电弧焊(TIG 焊)。

注:TIG 焊适用于厚度小于或等于 6mm 构件的焊接。

### 3.3 热影响区

**3.3.1** 采用焊接铝合金结构时,必须考虑热影响区材料强度降低带来的不利影响。热影响区范围内强度的折减系数  $\rho_{\text{haz}}$  应按表 3.3.1 采用。

表 3.3.1 热影响区范围内材料强度的折减系数  $\rho_{\text{haz}}$

合金牌号	状 态	$\rho_{\text{haz}}$
6061、6063、6063A	T4	1.00
	T5/T6	0.50
5083	O/F	1.00
	H112	0.80
3003	H24	0.20
3004	H34/H36	0.20

注:表中数值适用于材料焊接后存放的环境温度大于 10℃,存放时间大于 3d 的情况。

**3.3.2** 热影响区范围应符合下列规定:

1 当板件端部距焊缝边缘长度小于  $3b_{\text{haz}}$  时,热影响区(图 3.3.2)扩展至板件末端。

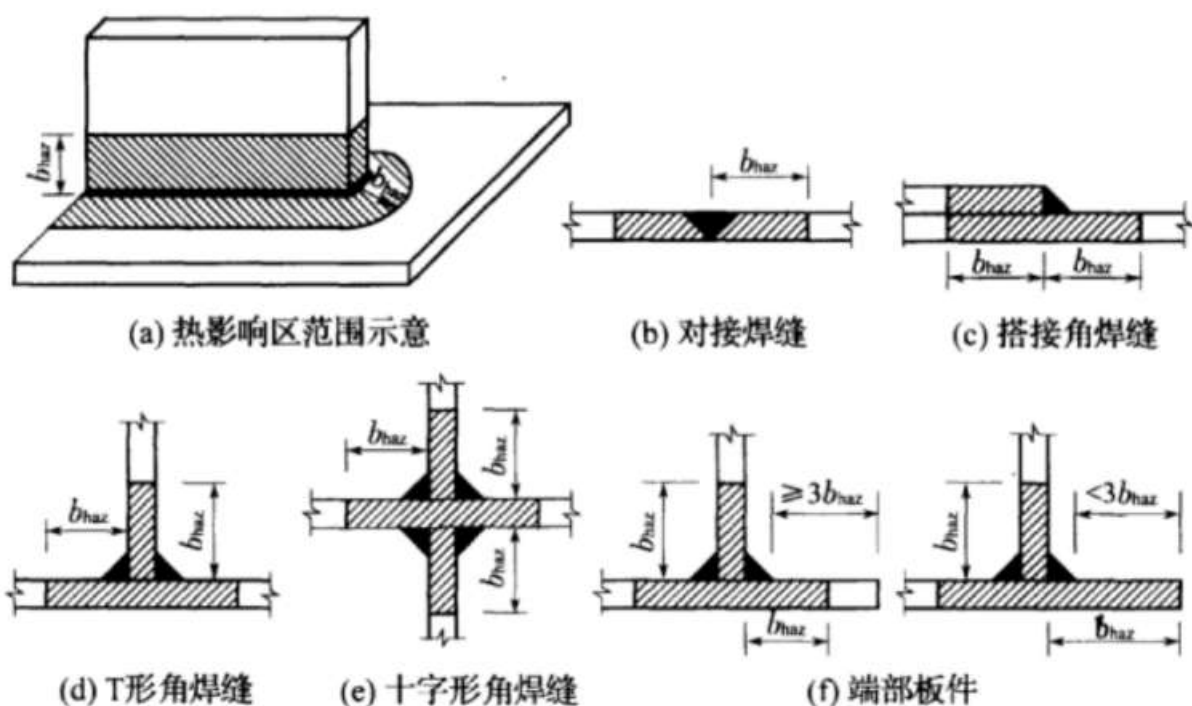


图 3.3.2 焊接热影响区范围

$b_{haz}$  为板件的焊接热影响区宽度

2 采用熔化极惰性气体保护电弧焊(MIG 焊)和钨极惰性气体保护电弧焊(TIG 焊)焊接连接的  $6\times\times\times$  系列热处理合金或  $5\times\times\times$  系列冷加工硬化合金,热影响区宽度  $b_{haz}$  应符合表 3.3.2 的规定。

表 3.3.2 热影响区宽度  $b_{haz}$

退火温度( $^{\circ}\text{C}$ )	对于焊接件厚度(mm)	$b_{haz}$ (mm)
$T_1 \leq 60$	$t \leq 8$	30
	$8 < t \leq 16$	40
	$t > 16$	应根据硬度试验结果确定
$60 < T_1 \leq 120$	$t \leq 8$	$30\alpha$
	$8 < t \leq 16$	$40\alpha$
	$t > 16$	应根据硬度试验结果确定

注:1  $\alpha$  为参数;  $\alpha = 1 + (T_1 - 60)/120$ 。

2 表中  $t$  为焊接件的平均厚度。当焊接件厚度相差超过一倍时,  $b_{haz}$  值应根据硬度试验结果确定。

3.3.3 在连接计算中,应对焊件强度进行折减;在构件承载力计算中,应对截面进行折减。

## 4 基本设计规定

### 4.1 设计原则

4.1.1 本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用分项系数设计表达式进行计算。

4.1.2 在铝合金结构设计文件中,应注明建筑结构的安全等级、设计使用年限、铝合金材料牌号及供货状态、连接材料的型号和对铝合金材料所要求的力学性能、化学成分及其他的附加保证项目。

4.1.3 铝合金结构应按下列承载能力极限状态和正常使用极限状态进行设计:

1 承载能力极限状态包括:构件和连接的强度破坏和因过度变形而不适于继续承载,结构和构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆。

2 正常使用极限状态包括:影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形,影响正常使用的振动,影响正常使用或耐久性能的局部损坏。

4.1.4 按承载能力极限状态设计铝合金结构时,应考虑荷载效应的基本组合,必要时尚应考虑荷载效应的偶然组合。按正常使用极限状态设计铝合金结构时,应按规定的荷载效应组合。

4.1.5 铝合金结构的计算模型和基本假定宜与构件连接的实际性能相符合。

4.1.6 铝合金结构的正常使用环境温度应低于  $100^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.2 荷载和荷载效应计算

4.2.1 设计铝合金结构时应考虑永久荷载、可变荷载、支承结构

的变形或沉降、施工荷载、安装荷载、检修荷载等及地震作用、温度变化作用。

**4.2.2** 设计铝合金结构时,荷载的标准值、荷载分项系数、荷载组合值系数等,应按现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 的规定采用。

结构的重要性系数  $\gamma_0$  应按现行国家标准《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的规定采用,其中对设计年限为 25 年的结构构件,  $\gamma_0$  不应小于 0.95。

**4.2.3** 框架结构中,梁与柱的刚性连接应符合受力过程中梁柱间交角不变的假定,同时连接应具有充分的强度,承受交汇构件端部传递的所有最不利内力。梁和柱铰接时,应使连接具有充分的转动能力,且能有效地传递横向剪力与轴向力。梁与柱的半刚性连接只具有有限的转动刚度,在承受弯矩的同时会产生相应的交角变化,在内力分析时,必须预先确定连接的弯矩-转角特性曲线,以便考虑连接变形的影响。

**4.2.4** 框架结构内力分析宜符合下列规定:

1 框架结构内力分析可采用一阶弹性分析。

2 对  $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} > 0.1$  的框架结构宜采用二阶弹性分析,此时应在每层柱顶附加考虑由式(4.2.4-1)计算的假想水平力  $H_{ni}$ 。

$$H_{ni} = \frac{1}{200} k_c k_s Q_i \quad (4.2.4-1)$$

式中  $\Delta u$ ——按一阶弹性分析求得的所计算楼层的层间侧移;

$h$ ——所计算楼层的高度;

$\sum N$ ——所计算楼层各柱轴心压力设计值之和;

$\sum H$ ——产生层间侧移  $\Delta u$  的所计算楼层及以上各层的水平力之和;

$Q_i$ ——第  $i$  层的总重力荷载设计值;

$k_s = \sqrt{0.5 + 1/n_s}, k_s \leq 1; n_s$ ——框架总层数;

$k_c = \sqrt{0.5 + 1/n_c}, k_c \leq 1; n_c$ ——第  $i$  层内柱的数目。

对无支撑的框架结构,当采用二阶弹性分析时,各杆件杆端的弯矩  $M_{II}$  可用下列近似公式进行计算:

$$M_{II} = M_{Ib} + \alpha_{2i} M_{Is} \quad (4.2.4-2)$$

$$\alpha_{2i} = \frac{1}{1 - \frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h}} \quad (4.2.4-3)$$

式中  $M_{Ib}$ ——假定框架无侧移时按一阶弹性分析求得各杆杆端弯矩;

$M_{Is}$ ——框架各节点侧移时按一阶弹性分析求得各杆杆端弯矩;

$\alpha_{2i}$ ——考虑二阶效应第  $i$  层杆件的侧移弯矩增大系数。

注:当按式(4.2.4-3)计算的  $\alpha_{2i} \geq 1.33$  时,宜增加框架结构的刚度。

**4.2.5** 大跨度空间结构内力分析时宜考虑几何非线性效应的影响,应计算结构的整体稳定承载力。

### 4.3 设计指标

**4.3.1** 铝合金材料的强度设计值等于强度标准值除以抗力分项系数。

**4.3.2** 铝合金结构构件的抗力分项系数  $\gamma_R$  在抗拉、抗压和抗弯情况下应取 1.2,在计算局部强度时应取 1.3。

**4.3.3** 铝合金材料的强度标准值应按现行国家标准《铝及铝合金轧制板材》GB/T 3880、《铝及铝合金冷轧带材》GB/T 8544、《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191、《铝及铝合金拉(轧)制无缝管》GB/T 6893、《铝及铝合金热挤压管》GB/T 4437、《铝合金建筑型材》GB 5237、《工业用铝及铝合金热挤压型材》GB/T 6892 采用。

**4.3.4** 铝合金材料的强度设计值应按表 4.3.4 采用。

表 4.3.4 铝合金材料强度设计值(N/mm<sup>2</sup>)

铝合金材料			用于构件计算		用于焊接连接计算	
牌号	状态	厚度 (mm)	抗拉、抗压和抗弯 $f$	抗剪 $f_v$	焊件热影响区抗拉、抗压和抗弯 $f_{v, haz}$	焊件热影响区抗剪 $f_{v, haz}$
6061	T4	所有	90	55	140	80
	T6	所有	200	115	100	60
6063	T5	所有	90	55	60	35
	T6	所有	150	85	80	45
6063A	T5	≤10	135	75	75	45
		>10	125	70	70	40
	T6	≤10	160	90	90	50
		>10	150	85	85	50
5083	O/F	所有	90	55	210	120
	H112	所有	90	55	170	95
3003	H24	≤4	100	60	20	10
3004	H34	≤4	145	85	35	20
	H36	≤3	160	95	40	20

4.3.5 铝合金结构普通螺栓和铆钉连接的强度设计值应按表 4.3.5-1和表 4.3.5-2 采用。

表 4.3.5-1 普通螺栓连接的强度设计值(N/mm<sup>2</sup>)

螺栓的材料、性能等级和构件铝合金牌号			普通螺栓								
			铝合金			不锈钢			钢		
			抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$	抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$	抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$
普通螺栓	铝合金	2B11	170	160	—	—	—	—	—	—	—
		2A90	150	145	—	—	—	—	—	—	—
	不锈钢	A2-50、A4-50	—	—	—	200	190	—	—	—	—
		A2-70、A4-70	—	—	—	280	265	—	—	—	—
钢	4.6、4.8级	—	—	—	—	—	—	170	140	—	
构件	6061-T4		—	—	210	—	—	210	—	—	210
	6061-T6		—	—	305	—	—	305	—	—	305
	6063-T5		—	—	185	—	—	185	—	—	185
	6063-T6		—	—	240	—	—	240	—	—	240

续表 4.3.5-1

螺栓的材料、性能等级和构件铝合金牌号		普通螺栓								
		铝合金			不锈钢			钢		
		抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$	抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$	抗拉 $f_t^b$	抗剪 $f_v^b$	承压 $f_c^b$
构件	6063A-T5	—	—	220	—	—	220	—	—	220
	6063A-T6	—	—	255	—	—	255	—	—	255
	5083-O/F/H112	—	—	315	—	—	315	—	—	315

表 4.3.5-2 铆钉连接的强度设计值(N/mm<sup>2</sup>)

铝合金铆钉牌号及构件铝合金牌号		铝合金铆钉	
		抗剪 $f_v^i$	承压 $f_c^i$
铆钉	5B05-HX8	90	—
	2A01-T4	110	—
	2A10-T4	135	—
构件	6061-T4	—	210
	6061-T6	—	305
	6063-T5	—	185
	6063-T6	—	240
	6063A-T5	—	220
	6063A-T6	—	255
	5083-O/F/H112	—	315

4.3.6 铝合金结构焊缝的强度设计值应按表 4.3.6 采用。

表 4.3.6 焊缝的强度设计值(N/mm<sup>2</sup>)

铝合金母材牌号及状态	焊丝型号	对接焊缝			角焊缝
		抗拉 $f_t^w$	抗压 $f_c^w$	抗剪 $f_v^w$	抗拉、抗压和抗剪 $f_t^w$
6061-T4	SALMG-3(Eur 5356)	145	145	85	85
6061-T6	SAlSi-1(Eur 4043)	135	135	80	80
6063-T5 6063-T6	SALMG-3(Eur 5356)	115	115	65	65
6063A-T5 6063A-T6	SAlSi-1(Eur 4043)	115	115	65	65
5083-O/F/H112	SALMG-3(Eur 5356)	185	185	105	105

注:对于两种不同种类合金的焊接,焊缝的强度设计值应采用较小值。

4.3.7 铝合金材料的物理性能指标应按表 4.3.7 采用。

表 4.3.7 铝合金的物理性能指标

弹性模量 $E$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	泊松比 $\nu$	剪变模量 $G$ ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	线膨胀系数 $\alpha$ (以每 $^{\circ}\text{C}$ 计)	质量密度 $\rho$ ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
70000	0.3	27000	$23 \times 10^{-6}$	2700

#### 4.4 结构或构件变形的规定

4.4.1 为了不影响结构和构件的正常使用和观感,设计时应对接结构或构件的变形进行控制。

1 受弯构件挠度的容许值不宜超过表 4.4.1 的规定。

表 4.4.1 受弯构件挠度的容许值

序号	构件类别	容许值
1	主体结构的构件	$l/250$
2	檩条和横隔板(在恒载作用下)	$l/200$
3	围护结构的构件和压型面板	$l/180$

注: $l$ 为跨度或支点间距离,悬臂构件可取挑出长度的 2 倍。

2 在风荷载标准值作用下,框架柱顶水平位移不宜超过  $H/300$ 。 $H$ 为自基础顶面至柱顶的总高度。

4.4.2 计算结构或构件的变形时,可不考虑螺栓(或铆钉)孔引起的截面削弱。

4.4.3 为改善外观和使用条件,可将横向受力构件预先起拱,起拱大小应视实际需要而定,可为恒载标准值加  $1/2$  活载标准值所产生的挠度值。构件挠度可取在恒荷载和活荷载标准值作用下的挠度计算值减去起拱度。

#### 4.5 构件的计算长度和容许长细比

4.5.1 确定桁架弦杆和单系腹杆(用节点板与弦杆连接)的长细比时,其计算长度  $l_0$  应按表 4.5.1 采用。



表 4.5.1 桁架弦杆和单系腹杆的计算长度  $l_0$

序号	弯曲方向	弦杆	腹杆	
			支座斜杆和支座竖杆	其他腹杆
1	在桁架平面内	$l$	$l$	$0.8l$
2	在桁架平面外	$l_1$	$l$	$l$
3	斜平面	—	$l$	$0.9l$

注:1  $l$  为构件的几何长度(节点中心间距离);  $l_1$  为桁架弦杆侧向支承点之间的距离。

2 斜平面系指与桁架平面斜交的平面,适用于构件截面两主轴均不在桁架平面内的单角铝腹杆和双角铝十字形截面腹杆。

3 无节点板的腹杆计算长度在任意平面内均取其等于几何长度(铝管结构除外)。

当桁架弦杆侧向支承点之间的距离为节间长度的 2 倍(图 4.5.1)且两节间的弦杆轴心压力不相同,则该弦杆在桁架平面外的计算长度,应按下式确定,但不应小于  $0.5l_1$ :

$$l_0 = l_1 \left( 0.75 + 0.25 \frac{N_2}{N_1} \right) \quad (4.5.1)$$

式中  $N_1$ ——较大的压力,计算时取正值;

$N_2$ ——较小的压力或拉力,计算时压力取正值,拉力取负值。

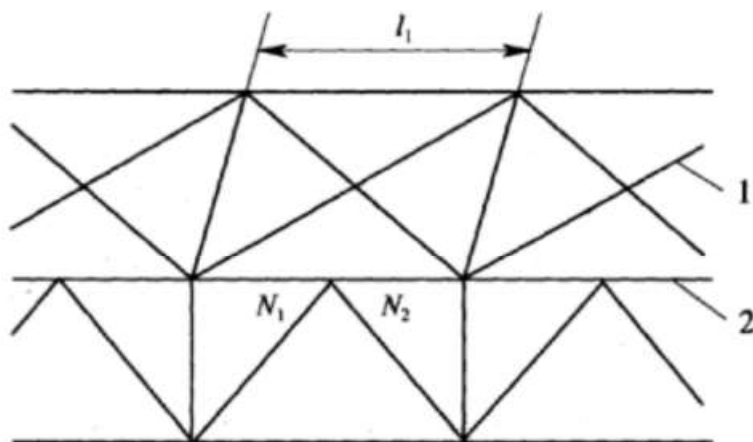


图 4.5.1 弦杆轴心压力在侧向支承点间有变化的桁架简图

1—支撑;2—桁架

桁架再分式腹杆体系的受压主斜杆及 K 形腹杆体系的竖杆等,在桁架平面外的计算长度应按式(4.5.1)确定,受拉主斜杆仍取  $l_1$ ;在桁架平面内的计算长度则应取节点中心间距离。

**4.5.2** 单层或多层框架等截面柱,在框架平面内的计算长度应等于该层柱的高度乘以计算长度系数  $\mu$ 。框架可分为无支撑的纯框架和有支撑框架,有支撑框架根据抗侧移刚度的大小,可分为强支撑框架和弱支撑框架,并应符合下列规定:

**1** 无支撑纯框架。

- 1)当采用一阶弹性分析方法计算内力时,框架柱的计算长度系数  $\mu$  应按国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 附录 D 表 D-2 规定的有侧移框架柱的计算长度系数确定。
- 2)当采用二阶弹性分析方法计算内力且在每层柱顶附加考虑公式(4.2.4-1)的假想水平力  $H_{ni}$  时,框架柱的计算长度系数  $\mu$  应取 1.0。

**2** 有支撑框架。

- 1)当(支撑桁架、剪力墙、电梯井等)支撑结构的侧移刚度  $S_b$  满足式(4.5.2-1)的要求时,应为强支撑框架,框架柱的计算长度系数  $\mu$  应按《钢结构设计规范》GB 50017 附录 D 表 D-1 规定的无侧移框架柱的计算长度系数确定。

$$S_b \geq 3(1.2 \sum N_{bi} - \sum N_{oi}) \quad (4.5.2-1)$$

式中  $N_{bi}, N_{oi}$ ——第  $i$  层层间所有框架柱用无侧移框架柱和有侧移框架柱计算长度系数算得的轴压构件稳定承载力之和。

- 2)当支撑结构的侧移刚度  $S_b$  不满足式(4.5.2-1)的要求时,为弱支撑框架,框架柱的轴压构件稳定系数  $\varphi$  按式(4.5.2-2)计算。

$$\varphi = \varphi_0 + (\varphi_1 - \varphi_0) \frac{S_b}{3(1.2 \sum N_{bi} - \sum N_{oi})} \quad (4.5.2-2)$$

式中  $\varphi_0, \varphi_1$ ——按附录 B 得到的轴压构件稳定系数,查表时分别

采用《钢结构设计规范》GB 50017 附录 D 中规定的无侧移框架柱和有侧移框架柱的计算长度系数。

4.5.3 平板网架、曲面网架和单层网壳杆件的计算长度应按表 4.5.3-1、表 4.5.3-2 取值。

表 4.5.3-1 平板和曲面网架杆件计算长度  $l_0$

杆 件	计算长度
弦杆及支座腹杆	$l$
腹 杆	$l$

注： $l$  为杆件几何长度（节点中心间距离）。

表 4.5.3-2 单层网壳杆件计算长度  $l_0$

计 算 面	计算长度
壳体曲面内	$0.9l$
壳体曲面外	$1.6l$

注： $l$  为杆件几何长度（节点中心间距离）。

4.5.4 受压构件的长细比不宜超过表 4.5.4 的容许值。

表 4.5.4 受压构件的容许长细比

序号	构件名称	容许长细比
1	柱、桁架的杆件	150
	柱的缀条	
2	支撑	200
	用以减小受压构件长细比的杆件	

注：1 包括空间桁架在内的桁架的受压腹杆，当其内力等于或小于承载能力的 50% 时，容许长细比值可取 200。

2 计算单角铝受压构件的长细比时，应采用角铝的最小回转半径，但计算在交叉点相互连接的交叉杆件平面外的长细比时，可采用与角铝肢边平行轴的回转半径。

3 跨度等于或大于 60m 的桁架，其受压弦杆和端压杆的容许长细比宜取 100，其他承受静力荷载的受压腹杆可取 150。

4 由容许长细比控制截面的杆件，在计算其长细比时，可不考虑扭转效应。

**4.5.5 受拉构件的长细比不宜超过表 4.5.5 的容许值。**

**表 4.5.5 受拉构件的容许长细比**

序号	构件名称	一般建筑结构(承受静力荷载)
1	桁架的杆件	350
2	其他拉杆、支撑、系杆等 (张紧的拉杆除外)	400

注:1 承受静力荷载的结构中,可仅计算受拉构件在竖向平面内的长细比。

2 受拉构件在永久荷载与风荷载组合下受压时,其长细比不宜超过 250。

3 跨度等于或大于 60m 的桁架,其受拉弦杆和腹杆的长细比不宜超过 300 (承受静力荷载)。

**4.5.6 网架、网壳杆件的长细比不宜超过表 4.5.6-1 和表 4.5.6-2 的容许值。**

**表 4.5.6-1 网架杆件的容许长细比**

杆 件		平板网架	曲面网架
受压杆件		150	150
受拉杆件	一般杆件	350	350
	支座附近处杆件	300	300

**表 4.5.6-2 网壳杆件的容许长细比**

网壳类别	压弯杆件	拉弯杆件
单层网壳	150	300

## 5 板件的有效截面

### 5.1 一般规定

5.1.1 对于可能出现受压局部屈曲的薄壁构件,可利用板件的屈曲后强度,并在确定构件有效截面的基础上进行强度及整体稳定验算。

5.1.2 设计焊接铝合金构件时,应考虑焊接热影响效应对截面的折减,并在确定构件有效截面的基础上进行强度及整体稳定验算。

5.1.3 有效截面的计算应采用有效厚度法。

5.1.4 构件截面的板件类型(图 5.1.4)应符合国家有关标准规定。

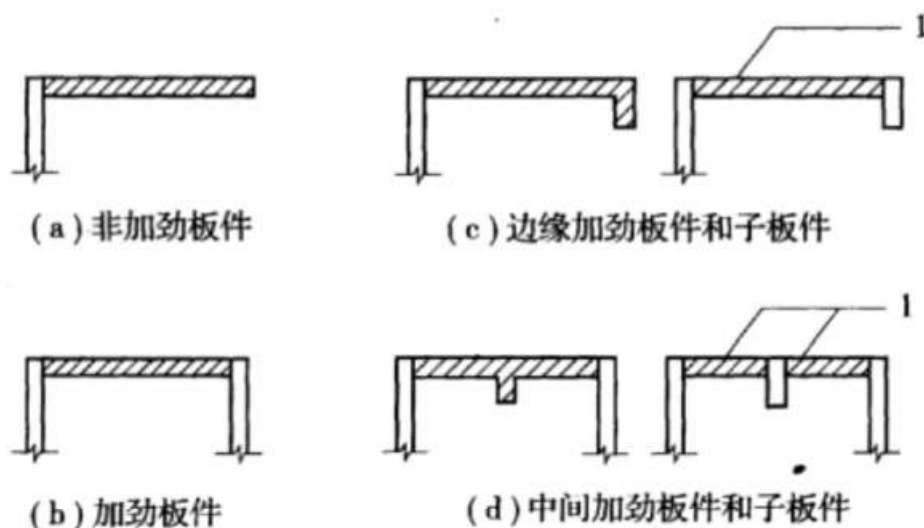


图 5.1.4 板件类型

1—子板件

### 5.2 受压板件的有效厚度

5.2.1 当构件截面中受压板件宽厚比小于表 5.2.1-1 的限值时,

板件应全截面有效。圆管截面的外径与壁厚之比不应超过表 5.2.1-2 的限值。

表 5.2.1-1 受压板件全部有效的最大宽厚比

硬化程度	加劲板件、中间加劲板件		非加劲板件、边缘加劲板件	
	非焊接	焊接	非焊接	焊接
弱硬化	$21.5\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$17\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$6\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$5\epsilon \sqrt{\eta k'}$
强硬化	$17\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$15\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$5\epsilon \sqrt{\eta k'}$	$4\epsilon \sqrt{\eta k'}$

注:1 表中  $\epsilon = \sqrt{240/f_{0.2}}$ ,  $f_{0.2}$  应按附录 A 确定。

- 2  $\eta$  为加劲肋修正系数, 应按第 5.2.6 条采用, 对于不带加劲肋的板件,  $\eta=1$ 。  
 3  $k'=k/k_0$ , 其中  $k$  为不均匀受压情况下的板件局部稳定系数, 应按第 5.2.5 条采用。对于均匀受压板件,  $k'=1.0$ 。对于加劲板件或中间加劲板件,  $k_0=4$ ; 对于非加劲板件或边缘加劲板件,  $k_0=0.425$ 。

表 5.2.1-2 受压圆管截面的最大径厚比

硬化程度	非焊接	焊接
弱硬化	$50(240/f_{0.2})$	$35(240/f_{0.2})$
强硬化	$35(240/f_{0.2})$	$25(240/f_{0.2})$

5.2.2 计算板件宽厚比时, 板件宽度应采用板件净宽。板件净宽应为扣除了相邻板件厚度后的剩余宽度(图 5.2.2)。

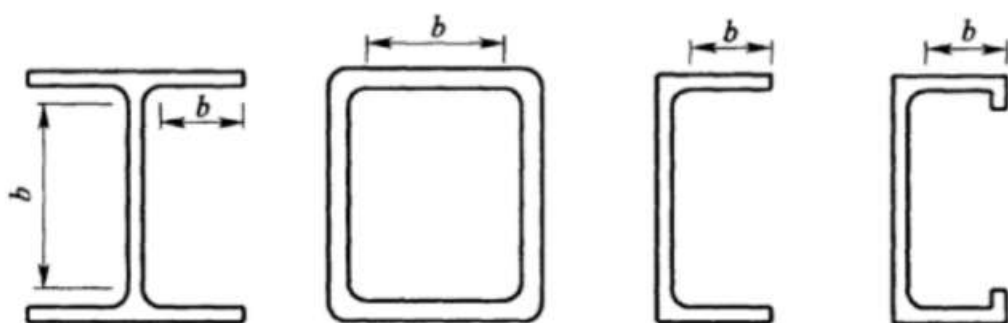


图 5.2.2 不同类型截面的板件净宽  $b$

5.2.3 当构件截面中受压板件宽厚比大于表 5.2.1-1 规定的限值时, 加劲板件、非加劲板件、中间加劲板件及边缘加劲板件的有效厚度应按下式计算:

$$\frac{t_e}{t} = \alpha_1 \frac{1}{\lambda} - \alpha_2 \frac{0.22}{\lambda^2} \leq 1 \quad (5.2.3-1)$$

对于非双轴对称截面中的非加劲板件或边缘加劲板件,  $t_e$  除按式(5.2.3-1)计算外, 尚应满足:

$$\frac{t_e}{t} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \quad (5.2.3-2)$$

式中  $t_e$ ——考虑局部屈曲的板件有效厚度;

$t$ ——板件厚度;

$\alpha_1, \alpha_2$ ——计算系数, 应按表 5.2.3 取值;

$\bar{\lambda}$ ——板件的换算柔度系数,  $\bar{\lambda} = \sqrt{f_{0.2}/\sigma_{cr}}$ ;

$\sigma_{cr}$ ——受压板件的弹性临界屈曲应力, 应按第 5.2.4 条和第 5.2.6 条采用。

表 5.2.3 计算系数  $\alpha_1, \alpha_2$  的取值

系数	硬化程度	加劲板件、中间加劲板件		非加劲板件、边缘加劲板件	
		非焊接	焊接	非焊接	焊接
$\alpha_1$	弱硬化	1.0	0.9	0.96	0.9
	强硬化	0.9	0.8	0.9	0.77
$\alpha_2$	弱硬化	1.0	0.9	1.0	0.9
	强硬化	0.9	0.7	0.9	0.68

5.2.4 受压加劲板件、非加劲板件的弹性临界屈曲应力应按下列式计算:

$$\sigma_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2) \cdot (b/t)^2} \quad (5.2.4)$$

式中  $k$ ——受压板件局部稳定系数, 应按第 5.2.5 条计算;

$\nu$ ——铝合金材料的泊松比,  $\nu=0.3$ ;

$b$ ——板件净宽, 应按图 5.2.2 采用;

$t$ ——板件厚度。

5.2.5 受压板件局部稳定系数可按下列公式计算:

1 加劲板件:

当  $1 \geq \psi > 0$  时,

$$k = \frac{8.2}{\psi + 1.05} \quad (5.2.5-1)$$

当  $0 \geq \psi \geq -1$  时,

$$k = 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2 \quad (5.2.5-2)$$

当  $\psi < -1$  时,

$$k = 5.98(1 - \psi)^2 \quad (5.2.5-3)$$

式中  $\psi$ ——压应力分布不均匀系数,  $\psi = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ;

$\sigma_{\max}$ ——受压板件边缘最大压应力(N/mm<sup>2</sup>),取正值;

$\sigma_{\min}$ ——受压板件另一边缘的应力(N/mm<sup>2</sup>),取压应力为正,拉应力为负。

## 2 非加劲板件:

### 1) 最大压应力作用于支承边:

当  $1 \geq \psi > 0$  时,

$$k = \frac{0.578}{\psi + 0.34} \quad (5.2.5-4)$$

当  $0 \geq \psi > -1$  时,

$$k = 1.7 - 5\psi + 17.1\psi^2 \quad (5.2.5-5)$$

### 2) 最大压应力作用于自由边:

当  $1 \geq \psi \geq -1$  时,

$$k = 0.425 \quad (5.2.5-6)$$

**5.2.6 均匀受压的边缘加劲板件、中间加劲板件的弹性临界屈曲应力计算应符合下列规定:**

### 1 弹性临界屈曲应力应按下式计算:

$$\sigma_{cr} = \frac{\eta k_0 \pi^2 E}{12(1 - \nu^2) \cdot (b/t)^2} \quad (5.2.6-1)$$

式中  $k_0$ ——均匀受压板件局部稳定系数;对于边缘加劲板件,

$k_0 = 0.425$ ;对于中间加劲板件  $k_0 = 4$ ;

$\eta$ ——加劲肋修正系数,用于考虑加劲肋对被加劲板件抵抗局部屈曲(或畸变屈曲)的有利影响。

### 2 加劲肋修正系数应按下列规定计算:



1) 对于边缘加劲板件:

$$\eta = 1 + 0.1(c/t - 1)^2 \quad (5.2.6-2)$$

2) 对于有一个等间距中间加劲肋的中间加劲板件:

$$\eta = 1 + 2.5 \frac{(c/t - 1)^2}{b/t} \quad (5.2.6-3)$$

3) 对于有两个等间距中间加劲肋的中间加劲板件:

$$\eta = 1 + 4.5 \frac{(c/t - 1)^2}{b/t} \quad (5.2.6-4)$$

式中  $t$ ——加劲肋所在板件的厚度,也即加劲肋的等效厚度;

$c$ ——加劲肋等效高度;等效的原则是:加劲肋对其所在板件中平面的截面惯性矩与等效后的截面惯性矩相等,如图5.2.6所示,虚线表示等效加劲肋。

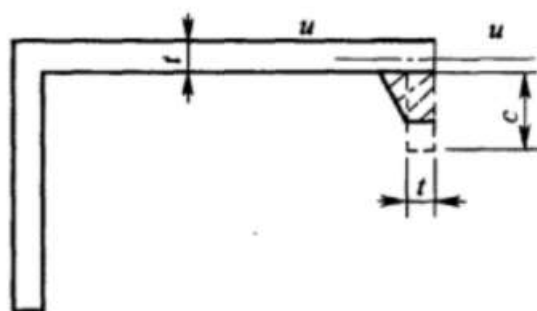


图 5.2.6 加劲肋等效原则

$u-u$  为板件中面

4) 对于有两道以上中间加劲肋的中间加劲板件,宜保留最外侧两道加劲肋,并忽略其余加劲肋的加劲作用,按有两道加劲肋的情况计算。

5) 对于其他带不规则加劲肋的复杂加劲板件:

$$\eta = \left( \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{cr0}} \right)^{0.8} \quad (5.2.6-5)$$

式中  $\sigma_{cr}$ ——假定加劲边简支情况下,该复杂加劲板件的临界屈曲应力,宜按有限元法或有限条法计算;

$\sigma_{cr0}$ ——假定加劲边简支情况下,不考虑加劲肋作用,同样尺寸的加劲板件的临界屈曲应力。可按式(5.2.6-1)计算,并取  $\eta = 1.0$ 。

5.2.7 不均匀受压的边缘加劲板件、中间加劲板件及其他带不规则加劲肋的复杂加劲板件,其临界屈曲应力 $\sigma_{cr}$ 宜按有限元法计算,计算中可不考虑相邻板件的约束作用,按加劲边简支情况处理(图 5.2.7)。当缺乏计算依据时,可忽略加劲肋的加劲作用,按不均匀受压板件由第 5.2.4 条和第 5.2.5 条计算其临界屈曲应力 $\sigma_{cr}$ ,再由第 5.2.3 条计算板件的有效厚度,但截面中加劲肋部分的有效厚度应取板件的有效厚度和对加劲部分按非加劲板件单独计算的有效厚度中的较小值。

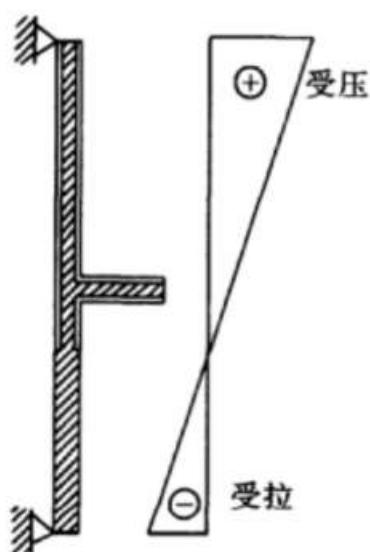


图 5.2.7 带加劲肋的不均匀受压板件

5.2.8 对于边缘加劲板件和中间加劲板件,除应将其作为整体按第 5.2.3 条计算外,尚应按加劲板件和非加劲板件根据第 5.2.3 条分别计算各子板件及加劲肋的有效厚度 $t_e$ ,并取各板件的最小有效厚度。

### 5.3 焊接板件的有效厚度

5.3.1 对于焊接铝合金构件,应考虑热影响区内因材料强度降低造成的截面削弱,并应用有效截面概念计算截面的削弱程度。有效截面应根据有效厚度法进行计算,材料强度设计值不再进行折减。

5.3.2 热影响区范围内的板件有效厚度(图 5.3.2)应按下列公式计算:

$$t_{e,haz} = \rho_{haz} t \quad (5.3.2)$$

式中  $\rho_{haz}$  按表 3.3.1 取值,  $b_{haz}$  按第 3.3.2 条确定。

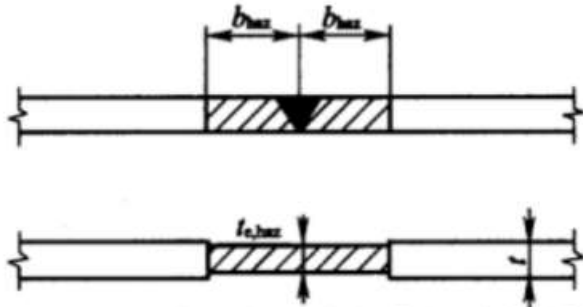


图 5.3.2 热影响区内板件的有效厚度

## 5.4 有效截面的计算

5.4.1 应按下述三种情况确定构件有效截面：

1 对于不满足第 5.2.1 条宽厚比限值的非焊接受压板件,应计算考虑局部屈曲影响的板件有效厚度  $t_e$ ,并在板件受压区范围内以有效厚度  $t_e$  取代板件厚度  $t$ ,但各板件根部连接区域或倒角部位应按全部有效处理(图 5.4.1-1)。

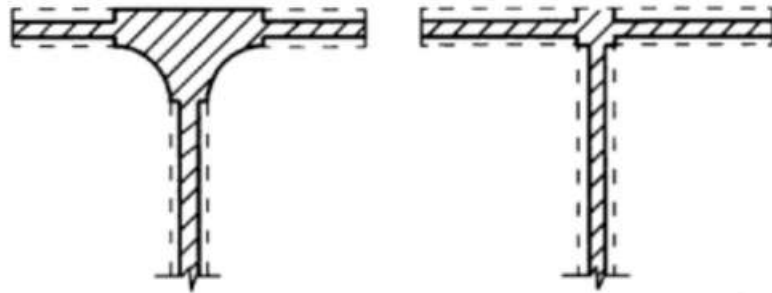


图 5.4.1-1 非焊接板件根部连接区域或倒角部位的有效截面

2 对于焊接受拉板件或满足第 5.2.1 条宽厚比限值的焊接受压板件,仅需按第 5.3.2 条计算有效厚度  $t_{e,haz}$ ,并在热影响区内应以有效厚度  $t_{e,haz}$  取代板件厚度  $t$ 。

3 对于不满足第 5.2.1 条宽厚比限值的焊接受压板件,应同时考虑局部屈曲和热影响效应:在非热影响区的受压区范围内应以有效厚度  $t_e$  取代板件厚度  $t$ ;在受拉区范围的热影响区内应以有效厚度  $t_{e,haz}$  取代板件厚度  $t$ ;在受压区范围的热影响区内应以有效厚度  $t_{e,haz}$  和有效厚度  $t_e$  中的较小值取代板件厚度  $t$  (图 5.4.1-2)。

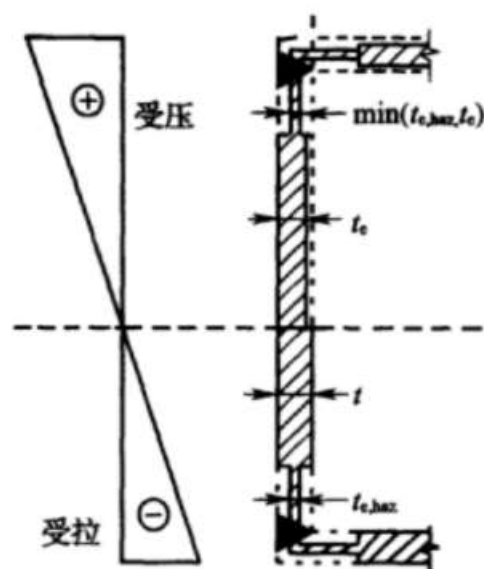


图 5.4.1-2 同时考虑局部屈曲和热影响效应的板件有效厚度

**5.4.2** 轴压构件的有效截面应按第 5.4.1 条确定的各板件有效厚度计算〔图 5.4.2(a)〕。

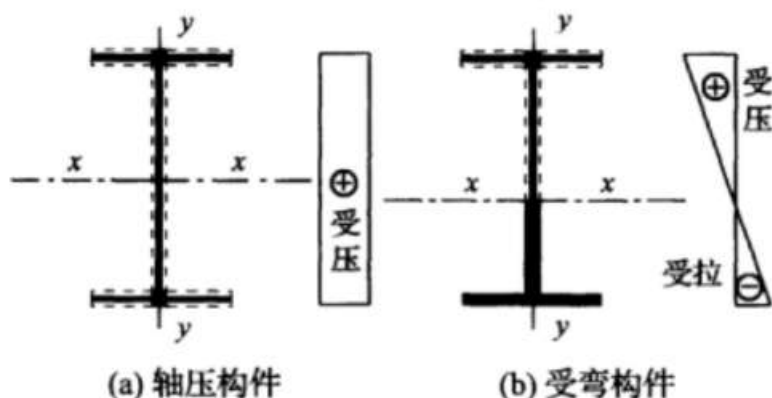


图 5.4.2 有效截面的计算

$x-x$  为根据有效截面确定的中和轴

**5.4.3** 受弯构件及压弯构件的有效截面应按第 5.4.1 条确定的各板件有效厚度计算〔图 5.4.2(b)〕。

## 6 受弯构件的计算

### 6.1 强 度

6.1.1 在主平面内受弯的构件,其抗弯强度应按下列式计算:

$$\frac{M_x}{\gamma_x W_{enx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{eny}} \leq f \quad (6.1.1)$$

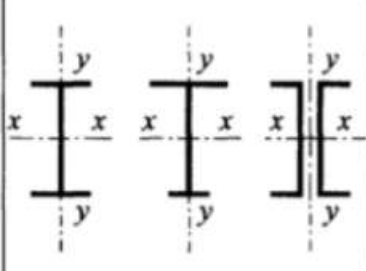
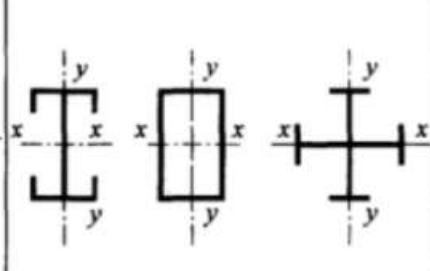
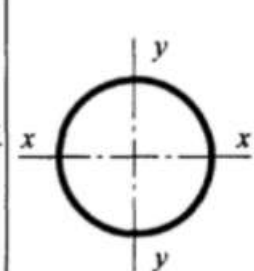
式中  $M_x, M_y$ ——同一截面处绕  $x$  轴和  $y$  轴的弯矩(对工字形截面: $x$  轴为强轴, $y$  轴为弱轴);

$W_{enx}, W_{eny}$ ——对截面主轴  $x$  轴和  $y$  轴的较小有效净截面模量,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区以及截面孔洞的影响;

$\gamma_x, \gamma_y$ ——截面塑性发展系数,应按表 6.1.1 采用;

$f$ ——铝合金材料的抗弯强度设计值。

表 6.1.1 截面塑性发展系数  $\gamma_x, \gamma_y$

截面形式				
弱硬化	$\gamma_x$	1.00	1.00	1.00
	$\gamma_y$	1.05	1.00	1.00
强硬化	$\gamma_x$	1.00	1.00	1.00
	$\gamma_y$	1.00	1.00	1.00

续表 6.1.1

截面形式					
弱硬化	$\gamma_x$	1.05	$\gamma_{x1} = 1.00$ $\gamma_{x2} = 1.05$	$\gamma_{x1} = 1.00$ $\gamma_{x2} = 1.05$	1.10
	$\gamma_y$	1.05	1.00	1.05	1.10
强硬化	$\gamma_x$	1.00	$\gamma_{x1} = 1.00$ $\gamma_{x2} = 1.00$	$\gamma_{x1} = 1.00$ $\gamma_{x2} = 1.00$	1.05
	$\gamma_y$	1.00	1.00	1.00	1.05

6.1.2 在主平面内受弯的构件,其抗剪强度应按下式计算:

$$\tau = \frac{V_{\max} S}{I t_w} \leq f_v \quad (6.1.2)$$

式中  $V_{\max}$ ——计算截面沿腹板平面作用的最大剪力;

$S$ ——计算剪应力处以上毛截面对中和轴的面积矩;

$I$ ——毛截面惯性矩;

$t_w$ ——腹板厚度;

$f_v$ ——材料的抗剪强度设计值。

## 6.2 整体稳定

6.2.1 符合下列情况时,可不计算梁的整体稳定性:

1 有铺板密铺在梁的受压翼缘上并与其牢固相连,能阻止梁受压翼缘的侧向位移时。

2 等截面工字形简支梁受压翼缘的自由长度  $l$  与其宽度  $b$  之比不超过表 6.2.1 所规定的数值时。

表 6.2.1 等截面工字形简支梁不需要计算整体稳定性的最大  $l/b$  值

跨中无侧向支承点的梁		跨中受压翼缘有侧向支承点的梁,不论荷载作用于何处
荷载作用在上翼缘	荷载作用在下翼缘	
$7.8 \sqrt{240/f_{0.2}}$	$12.0 \sqrt{240/f_{0.2}}$	$9.5 \sqrt{240/f_{0.2}}$

对跨中无侧向支承点的梁， $l$  为其跨度；对跨中有侧向支承点的梁， $l$  为受压翼缘侧向支承点间的距离（梁的支座处视为有侧向支承）。

**6.2.2** 当不满足第 6.2.1 条时，在最大刚度平面内，受弯构件的整体稳定性应按下式计算：

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_{ex}} \leq f \quad (6.2.2)$$

式中  $M_x$ ——绕强轴作用的最大弯矩；

$W_{ex}$ ——对强轴受压边缘的有效截面模量；

$\varphi_b$ ——梁的整体稳定系数，应按附录 C 计算。

**6.2.3** 梁的支座处，应采取构造措施防止梁端截面的扭转。

## 7 轴心受力构件的计算

### 7.1 强 度

7.1.1 轴心受拉构件的强度应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq f \quad (7.1.1)$$

式中  $\sigma$ ——正应力；

$f$ ——铝合金材料的抗拉强度设计值；

$N$ ——轴心拉力设计值；

$A_{en}$ ——有效净截面面积，对于受拉构件仅考虑焊接热影响区和截面孔洞的影响。

7.1.2 轴心受压构件的强度应按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq f \quad (7.1.2)$$

式中  $\sigma$ ——正应力；

$f$ ——铝合金材料的抗压强度设计值；

$N$ ——轴心压力设计值；

$A_{en}$ ——有效净截面面积，对于受压构件应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区和截面孔洞的影响。

7.1.3 轴心受力构件中，高强度摩擦型螺栓连接处的强度应按下列公式计算：

$$\sigma = \left(1 - 0.5 \frac{n_1}{n}\right) \frac{N}{A_{en}} \leq f \quad (7.1.3-1)$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq f \quad (7.1.3-2)$$

式中  $n$ ——在节点或拼接处，构件一端连接的高强度螺栓数目；

$n_1$ ——所计算截面最外排螺栓处的高强度螺栓数目；



A——毛截面面积。

## 7.2 整体稳定

7.2.1 实腹式轴心受压构件的稳定性应按下式计算：

$$\frac{N}{\bar{\varphi}A} \leq f \quad (7.2.1)$$

式中  $\bar{\varphi}$ ——轴心受压构件的稳定计算系数(取截面两主轴计算系数中的较小者),应按第 7.2.2 条和第 7.2.3 条的规定进行计算;

A——毛截面面积。

7.2.2 双轴对称截面轴心受压构件的稳定计算系数应按下式计算：

$$\bar{\varphi} = \eta_e \eta_{\text{haz}} \varphi \quad (7.2.2-1)$$

式中  $\eta_e$ ——修正系数,对需考虑板件局部屈曲的截面进行修正;截面中受压板件的宽厚比小于等于表 5.2.1-1 及表 5.2.1-2 规定时,  $\eta_e = 1$ ;

截面中受压板件的宽厚比大于表 5.2.1-1 规定时,  $\eta_e = A_e/A$ ,  $A_e$  为仅考虑局部屈曲影响的有效截面面积;

$\eta_{\text{haz}}$ ——焊接缺陷影响系数,按表 7.2.2 取用,若无焊接时,  $\eta_{\text{haz}} = 1$ ;

$\varphi$ ——轴心受压构件的稳定系数,应根据构件的长细比  $\lambda$ 、铝合金材料的强度标准值  $f_{0.2}$  按附录 B 取用。

表 7.2.2 系数  $\eta_{\text{haz}}$ 、 $\eta_{\text{as}}$

		弱硬化合金	强硬化合金
$\eta_{\text{haz}}$	沿构件长度方向纵向焊接	$\eta_{\text{haz}} = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \frac{A_1}{A}\right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})}$ <p>其中 <math>A_1 = A - A_{\text{haz}}(1 - \rho_{\text{haz}})</math>, <math>A_{\text{haz}}</math> 为焊接热影响区面积</p>	当 $\bar{\lambda} \leq 0.2$ 时: $\eta_{\text{haz}} = 1$ 当 $\bar{\lambda} > 0.2$ 时: $\eta_{\text{haz}} = 1 + 0.04(4\bar{\lambda})^{(0.5-\bar{\lambda})} - 0.22\bar{\lambda}^{1.4(1-\bar{\lambda})}$

续表 7.2.2

		弱硬化合金	强硬化合金
$\eta_{\text{haz}}$	沿截面方向横向焊接	$\eta_{\text{haz}} = \rho_{\text{haz}}$	$\eta_{\text{haz}} = \rho_{\text{haz}}$
$\eta_{\text{as}}$		$\eta_{\text{as}} = 1 - 2.4\psi^2 \frac{\bar{\lambda}^2}{(1+\bar{\lambda}^2)(1+\bar{\lambda})^2}$	$\eta_{\text{as}} = 1 - 3.2\psi^2 \frac{\bar{\lambda}^2}{(1+\bar{\lambda}^2)(1+\bar{\lambda})^2}$
		$\psi = \frac{y_{\text{max}} - y_{\text{min}}}{h}$ 。其中 $y_{\text{max}}$ 及 $y_{\text{min}}$ 为截面最外边缘到截面形心的距离， $y_{\text{max}} \geq y_{\text{min}}$ ； $h$ 为截面高度， $h = y_{\text{max}} + y_{\text{min}}$	

注：表中  $\bar{\lambda}$  为相对长细比： $\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{\eta_c f_{0.2}}{E}}$ ，其中长细比  $\lambda$  应按式(7.2.2-2)计算。

构件长细比  $\lambda$  应按下式确定：

$$\lambda_x = \frac{l_{0x}}{i_x} \quad \lambda_y = \frac{l_{0y}}{i_y} \quad (7.2.2-2)$$

式中  $\lambda_x, \lambda_y$ ——构件对截面主轴  $x$  轴和  $y$  轴的长细比；

$l_{0x}, l_{0y}$ ——构件对截面主轴  $x$  轴和  $y$  轴的计算长度；

$i_x, i_y$ ——构件毛截面对其主轴  $x$  轴和  $y$  轴的回转半径。

7.2.3 非焊接单轴对称截面的轴心受压构件的稳定计算系数应按下式计算：

$$\bar{\varphi} = \eta_c \eta_{\text{as}} \varphi \quad (7.2.3-1)$$

式中  $\eta_{\text{as}}$ ——截面非对称性系数，应按表 7.2.2 取用。

单轴对称截面的构件，绕非对称轴的长细比  $\lambda_x$  仍应按式(7.2.2-2)计算，但绕对称轴应取计及扭转效应的下列换算长细比  $\lambda_{y_w}$  代替  $\lambda_y$ ：

$$\lambda_{y_w} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \lambda_y^2 + \lambda_w^2 + \sqrt{(\lambda_y^2 + \lambda_w^2)^2 - 4\lambda_y^2 \lambda_w^2 (1 - y_0^2 / i_0^2)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7.2.3-2)$$

$$\lambda_{\omega} = \sqrt{\frac{i_0^2 A}{\frac{I_t}{25.7} + \frac{I_{\omega}}{l_{\omega}^2}}} \quad (7.2.3-3)$$

$$i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + y_0^2} \quad (7.2.3-4)$$

- 式中  $\lambda_y$ ——构件绕对称轴的长细比；  
 $\lambda_{\omega}$ ——扭转屈曲换算长细比；  
 $i_0$ ——截面对剪心的极回转半径；  
 $y_0$ ——截面形心至剪心的距离；  
 $I_{\omega}$ ——毛截面扇性惯性矩；  
 $I_t$ ——毛截面抗扭惯性矩；  
 $l_{\omega}$ ——扭转屈曲计算长度，应按附录 C 中表 C-1 的规定计算。

**7.2.4** 对于铝合金材料状态除 O、F 和 T4 以外的端部焊接的构件，其计算长度取值时应按端部铰接考虑。

## 8 拉弯构件和压弯构件的计算

### 8.1 强 度

8.1.1 弯矩作用在截面主平面内的拉弯构件和压弯构件,其强度应按下式计算:

$$\frac{N}{A_{en}} \pm \frac{M_x}{\gamma_x W_{enx}} \pm \frac{M_y}{\gamma_y W_{eny}} \leq f \quad (8.1.1)$$

式中  $N$ ——轴心拉力或轴心压力;

$M_x, M_y$ ——同一截面处绕截面主轴  $x$  轴和  $y$  轴的弯矩(对工字形截面,  $x$  轴为强轴,  $y$  轴为弱轴);

$A_{en}$ ——有效净截面面积,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区以及截面孔洞的影响;

$W_{enx}, W_{eny}$ ——对  $x$  轴和  $y$  轴的有效净截面模量,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区以及截面孔洞的影响;

$\gamma_x, \gamma_y$ ——截面塑性发展系数,应按表 6.1.1 采用;

$f$ ——铝合金材料的抗拉、抗压和抗弯强度设计值。

### 8.2 整体稳定

8.2.1 弯矩作用在截面对称轴平面内(绕  $x$  轴)的压弯构件,其稳定性应按下列规定计算:

1 弯矩作用平面内的稳定性:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{lex} (1 - \eta_1 N/N'_{Ex})} \leq f \quad (8.2.1-1)$$

式中  $N$ ——所计算构件段范围内的轴心压力;

$A$ ——毛截面面积;

$N'_{Ex}$ ——参数,  $N'_{Ex} = \pi^2 EA / (1.2\lambda_x^2)$ ;

$\bar{\varphi}_x$ ——弯矩作用平面内的轴心受压构件稳定计算系数,按第 7.2.1 条确定;

$M_x$ ——所计算构件段范围内的最大弯矩;

$W_{lex}$ ——在弯矩作用平面内对较大受压纤维的有效截面模量,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区的影响;

$\eta_1$ ——弱硬化合金取 0.75,强硬化合金取 0.9;

$\beta_{mx}$ ——等效弯矩系数。

2 等效弯矩系数  $\beta_{mx}$ ,应按下列规定采用:

1) 框架柱和两端支承的构件:

a 无横向荷载作用时:  $\beta_{mx} = 0.65 + 0.35 \frac{M_2}{M_1}$ ,  $M_1$  和  $M_2$  为

端弯矩,使构件产生同向曲率(无反弯点)时取同号;使构件产生反向曲率(有反弯点)时取异号,  $|M_1| \geq |M_2|$ ;

b 有端弯矩和横向荷载同时作用时:使构件产生同向曲率时,  $\beta_{mx} = 1.0$ ;使构件产生反向曲率时,  $\beta_{mx} = 0.85$ ;

c 无端弯矩但有横向荷载作用时:  $\beta_{mx} = 1.0$ 。

2) 悬臂构件和分析内力未考虑二阶效应的无支撑纯框架和弱支撑框架柱,  $\beta_{mx} = 1.0$ 。

3 对于单轴对称截面(T形和槽形截面)压弯构件,当弯矩作用在对称轴平面内且使翼缘受压时,除应按式(8.2.1-1)计算外,尚应按下列式计算:

$$\left| \frac{N}{A_e} - \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{2ex} (1 - \eta_2 N/N'_{Ex})} \right| \leq f \quad (8.2.1-2)$$

式中  $W_{2ex}$ ——对无翼缘端的有效截面模量,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区的影响;

$\eta_2$ ——弱硬化合金取 1.15,强硬化合金取 1.25;

$A_e$ ——有效截面面积,应同时考虑局部屈曲和焊接热影响区的影响。

4 对于双轴对称工字形(含 H 形)和箱形(闭口)截面的压弯

构件,其弯矩作用平面外的稳定性应按下式计算:

$$\frac{N}{\bar{\varphi}_y A} + \frac{\eta M_x}{\varphi_b W_{lex}} \leq f \quad (8.2.1-3)$$

式中  $\bar{\varphi}_y$ ——弯矩作用平面外的轴心受压构件稳定计算系数,应按第 7.2.1 条确定;

$\varphi_b$ ——受弯构件整体稳定系数,应按附录 C 计算;对闭口截面为 1.0;

$M_x$ ——所计算构件段范围内的最大弯矩;

$\eta$ ——截面影响系数,闭口截面为 0.7,开口截面为 1.0。

**8.2.2** 弯矩作用在两个主平面内的双轴对称工字形(含 H 形)和箱形(闭口)截面的压弯构件,其稳定性应按下列公式计算:

$$\frac{N}{\bar{\varphi}_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{ex} (1 - \eta_1 N / N'_{Ex})} + \frac{\eta M_y}{\varphi_{by} W_{ey}} \leq f \quad (8.2.2-1)$$

$$\frac{N}{\bar{\varphi}_y A} + \frac{\eta M_x}{\varphi_{bx} W_{ex}} + \frac{\beta_{my} M_y}{\gamma_y W_{ey} (1 - \eta_1 N / N'_{Ey})} \leq f \quad (8.2.2-2)$$

式中  $\bar{\varphi}_x, \bar{\varphi}_y$ ——对强轴  $x-x$  和弱轴  $y-y$  的轴心受压构件稳定计算系数;

$\varphi_{bx}, \varphi_{by}$ ——受弯构件整体稳定系数,应按附录 C 计算,对闭口截面均取 1.0;

$M_x, M_y$ ——所计算构件段范围内对强轴和弱轴的最大弯矩;

$N'_{Ex}, N'_{Ey}$ ——参数,  $N'_{Ex} = \pi^2 EA / (1.2\lambda_x^2)$ ,  $N'_{Ey} = \pi^2 EA / (1.2\lambda_y^2)$ ;

$W_{ex}, W_{ey}$ ——对强轴和弱轴的有效截面模量,应同时考虑局部屈曲、焊接热影响区的影响;

$\beta_{mx}, \beta_{my}$ ——等效弯矩系数,应按第 8.2.1 条弯矩作用平面内稳定计算的有关规定计算。

## 9 连接计算

### 9.1 紧固件连接

9.1.1 普通螺栓和铆钉连接应按下列规定计算：

1 在普通螺栓或铆钉受剪的连接中，每个普通螺栓或铆钉的承载力设计值应取受剪和承压承载力设计值中的较小者。

受剪承载力设计值应按下列公式计算：

普通螺栓(受剪面在栓杆部位)

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d^2}{4} f_v^b \quad (9.1.1-1)$$

普通螺栓(受剪面在螺纹部位)

$$N_v^b = n_v \frac{\pi d_e^2}{4} f_v^b \quad (9.1.1-2)$$

铆钉

$$N_v^r = n_v \frac{\pi d_0^2}{4} f_v^r \quad (9.1.1-3)$$

承压承载力设计值应按下列公式计算：

$$\text{普通螺栓} \quad N_c^b = d \sum t \cdot f_c^b \quad (9.1.1-4)$$

$$\text{铆钉} \quad N_c^r = d_0 \sum t \cdot f_c^r \quad (9.1.1-5)$$

式中  $n_v$ ——受剪面数目；

$d$ ——螺栓杆直径；

$d_e$ ——螺栓在螺纹处的有效直径；

$d_0$ ——铆钉孔直径；

$\sum t$ ——在不同受力方向中一个受力方向承压构件总厚度的较小值；

$f_v^b, f_c^b$ ——螺栓的抗剪和承压强度设计值；

$f_v^r, f_c^r$ ——铆钉的抗剪和承压强度设计值。

2 铝合金铆钉不应用于杆轴方向受拉的连接中。

3 当普通螺栓承受沿杆轴方向的拉力时,螺栓同时应能承受由于撬力引起的附加拉力。

4 在普通螺栓杆轴方向受拉的连接中,每个普通螺栓包括撬力引起附加力的承载力设计值,应取螺栓抗拉承载力设计值和螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力设计值中的较小者。

螺栓抗拉承载力设计值应按下列式计算:

$$N_t^b = \frac{\pi d_e^2}{4} f_t^b \quad (9.1.1-6)$$

螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力设计值应按下列式计算:

$$N_{tp}^b = 0.8\pi d_m t_p f_v \quad (9.1.1-7)$$

式中  $d_e$ ——螺栓在螺纹处的有效直径;

$d_m$ ——为下列两者中较小值:螺栓头或螺母外接圆直径与内切圆直径的平均值;当采用垫圈时为垫圈的外径;

$t_p$ ——螺栓头或螺母下构件的厚度;

$f_t^b$ ——普通螺栓的抗拉强度设计值;

$f_v$ ——连接构件的抗剪强度设计值。

5 同时承受剪力和杆轴方向拉力的普通螺栓,应符合下列公式的要求:

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (9.1.1-8)$$

$$N_v \leq N_v^b \quad (9.1.1-9)$$

$$N_t \leq N_{tp}^b \quad (9.1.1-10)$$

式中  $N_v, N_t$ ——某个普通螺栓所承受的剪力和拉力;

$N_v^b, N_t^b, N_{tp}^b$ ——一个普通螺栓的抗剪、抗拉和承压承载力设计值。

9.1.2 高强度螺栓摩擦型连接应按下列规定计算:

1 在抗剪连接中,每个高强度螺栓的承载力设计值应按下列式计算:



$$N_v^b = 0.8n_t\mu P \quad (9.1.2-1)$$

式中  $n_t$ ——传力摩擦面数目；

$\mu$ ——摩擦面的抗滑移系数；

$P$ ——一个高强度螺栓的预拉力，应按表 9.1.2 采用。

表 9.1.2 一个高强度螺栓的预拉力  $P$ (kN)

螺栓的性能等级	螺栓公称直径(mm)		
	M16	M20	M24
8.8 级	80	125	175
10.9 级	100	155	225

2 在螺栓杆轴方向受拉的连接中，每个高强度螺栓的承载力设计值应按下式计算：

$$N_t^b = 0.8P \quad (9.1.2-2)$$

并应满足：
$$N_t^b \leq N_{tp}^b \quad (9.1.2-3)$$

式中  $N_{tp}^b$ ——螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力设计值。

3 当高强度螺栓摩擦型连接同时承受摩擦面间的剪力和螺栓杆轴方向的外拉力时，其承载力按下式计算：

$$\frac{N_v}{N_v^b} + \frac{N_t}{N_t^b} \leq 1 \quad (9.1.2-4)$$

并应满足：
$$N_t \leq N_{tp}^b \quad (9.1.2-5)$$

式中  $N_v, N_t$ ——某个高强度螺栓所承受的剪力和拉力；

$N_v^b, N_t^b$ ——一个高强度螺栓的受剪、受拉承载力设计值。

9.1.3 高强度螺栓承压型连接应按下列规定计算：

1 承压型连接高强度螺栓的预拉力  $P$  可按照表 9.1.2 采用。应清除连接处构件接触面上的油污。

2 在抗剪连接中，承压型连接高强度螺栓承载力设计值的计算方法可与普通螺栓相同。

3 在杆轴方向受拉的连接中，承压型连接高强度螺栓承载力设计值的计算方法可与普通螺栓相同。

4 同时承受剪力和杆轴方向拉力的承压型连接的高强度螺

栓,应符合下列公式的要求:

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b}\right)^2} \leq 1 \quad (9.1.3-1)$$

$$N_v \leq N_c^b/1.2 \quad (9.1.3-2)$$

$$N_t \leq N_{tp}^b \quad (9.1.3-3)$$

式中  $N_v, N_t$ ——某个高强度螺栓所承受的剪力和拉力;

$N_v^b, N_t^b, N_c^b$ ——一个高强度螺栓的受剪、受拉和承压承载力设计值。

**9.1.4** 在构件的节点处或拼接接头的一端,当螺栓或铆钉沿轴向受力方向的连接长度  $l_1$  大于  $15d_0$  时,应将螺栓或铆钉的承载力设计值乘以折减系数  $\left(1.1 - \frac{l_1}{150d_0}\right)$ 。当  $l_1$  大于  $60d_0$  时,折减系数为 0.7。

注: $d_0$  为螺栓或铆钉的孔径。

**9.1.5** 当受剪螺栓或铆钉穿过填板或其他中间板件与构件连接,且填板或其他中间板件的厚度  $t_p$  大于螺栓直径  $d$  或铆钉孔径  $d_0$  的  $1/3$  时,由式(9.1.1-1)、(9.1.1-2)及(9.1.1-3)计算所得的受剪承载力设计值应分别乘以折减系数  $\left(\frac{9d}{8d+3t_p}\right)$  或  $\left(\frac{9d_0}{8d_0+3t_p}\right)$ 。

**9.1.6** 当采用搭接或拼接板的单面连接传递轴心力时,因荷载偏心引起连接部位发生弯曲,不应采用铆钉连接;采用螺栓连接时,螺栓头及螺母下都应加垫圈以避免拉出破坏,且螺栓的数目应按计算增加 10%。

**9.1.7** 螺栓连接的夹紧厚度或铆钉连接的铆合总厚度不宜超过螺栓直径或铆钉孔径的 4.5 倍。

**9.1.8** 采用自攻螺钉、钢拉铆钉(环槽铆钉)、射钉等的连接计算应符合有关标准的规定。

## 9.2 焊缝连接

**9.2.1** 铝合金结构焊缝连接设计时,应验算焊缝的强度、临近焊

缝的铝合金构件焊接热影响区的强度。焊缝的强度设计值宜大于铝合金构件焊接热影响区的强度设计值。

### 9.2.2 对接焊缝的强度计算应符合以下规定：

1 在对接接头和 T 形接头中，垂直于轴心拉力或轴心压力的对接焊缝，其强度按下式计算：

$$\sigma = \frac{N}{l_w t} \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w \quad (9.2.2-1)$$

式中  $N$ ——轴心拉力或轴心压力；

$l_w$ ——焊缝计算长度；采用引弧板时，计算长度为焊缝全长；未采用引弧板时，计算长度为焊缝全长减去 2 倍焊缝计算厚度；

$t$ ——对接焊缝计算厚度；在对接接头中为连接件的较小厚度；在 T 形接头中为腹板的厚度；

$f_t^w, f_c^w$ ——对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值。

2 在对接接头和 T 形接头中，平行于轴心拉力或轴心压力的对接焊缝，其强度应按下式计算：

$$\tau = \frac{N}{l_w t} \leq f_v^w \quad (9.2.2-2)$$

式中  $f_v^w$ ——对接焊缝的抗剪强度设计值。

3 在对接接头和 T 形接头中，承受弯矩和剪力共同作用的对接焊缝，其正应力和剪应力应分别验算；对同时受有较大正应力和剪应力的位置，还应验算折算应力，并按下列公式验算：

$$\sigma \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w \quad (9.2.2-3)$$

$$\tau \leq f_v^w \quad (9.2.2-4)$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq f_t^w \quad (9.2.2-5)$$

### 9.2.3 直角角焊缝的强度计算应符合以下规定：

1 直角角焊缝的设计承载力应满足下列公式：

$$\sqrt{\sigma_N^2 + 3(\tau_N^2 + \tau_S^2)} \leq \sqrt{3} f_t^w \quad (9.2.3-1)$$

式中  $\sigma_N$ ——垂直于焊缝有效截面的正应力；

- $\tau_N$ ——有效截面上垂直焊缝长度方向的剪应力；  
 $\tau_S$ ——有效截面上平行于焊缝长度方向的剪应力；  
 $f_i^w$ ——角焊缝的强度设计值。

2 在通过焊缝形心的拉力、压力或剪力作用下，可采用下列公式验算角焊缝的强度：

正面角焊缝（作用力垂直于焊缝长度方向）：

$$\sigma_t = \frac{N}{h_e l_w} \leq \beta_i f_i^w \quad (9.2.3-2)$$

侧面角焊缝（作用力平行于焊缝长度方向）：

$$\tau_t = \frac{N}{h_e l_w} \leq f_i^w \quad (9.2.3-3)$$

- 式中  $\sigma_t$ ——按焊缝有效截面计算，垂直于焊缝长度方向的应力；  
 $\tau_t$ ——按焊缝有效截面计算，沿焊缝长度方向的剪应力；  
 $h_e$ ——角焊缝计算厚度，直角角焊缝等于  $0.7h_f$ ， $h_f$  为焊脚尺寸；  
 $l_w$ ——角焊缝计算长度，对每条焊缝取其实际长度减去  $2h_f$ ；  
 $\beta_i$ ——正面角焊缝的强度设计值增大系数：对承受静力荷载的结构， $\beta_i = 1.22$ 。

3 在通过焊缝形心的拉力、压力和剪力的综合作用下，可采用下式验算角焊缝的强度：

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_t}{\beta_i}\right)^2 + \tau_t^2} \leq f_i^w \quad (9.2.3-4)$$

#### 9.2.4 焊接热影响区的强度计算应符合以下规定：

1 对接焊缝焊接热影响区的临界失效面应为焊缝焊趾处平行于焊缝轴线方向沿构件厚度的剖切面，角焊缝焊接热影响区的临界失效面应为焊缝焊趾处平行于焊缝方向沿构件厚度的剖切面及角焊缝的焊脚熔合面（图 9.2.4）。

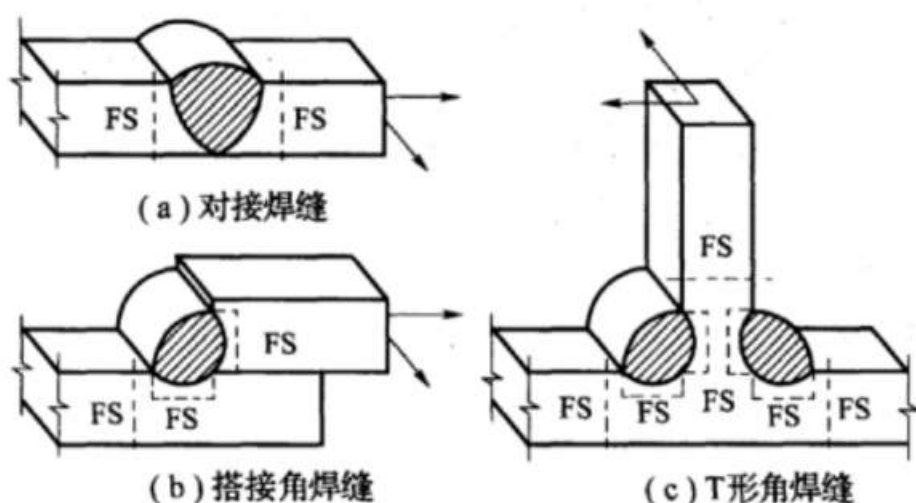


图 9.2.4 临界失效面 FS

2 焊接热影响区的设计强度应符合下述规定：

轴心拉力(压力)垂直于焊接热影响区的临界失效面：

$$\sigma_{\text{haz}} \leq f_{\text{u,haz}} \quad (9.2.4-1)$$

式中  $\sigma_{\text{haz}}$ ——作用在临界失效面,垂直于焊缝长度方向的正应力；

$f_{\text{u,haz}}$ ——构件焊接热影响区的抗拉、抗压和抗弯强度设计值。

剪力平行于焊接热影响区的临界失效面：

$$\tau_{\text{haz}} \leq f_{\text{v,haz}} \quad (9.2.4-2)$$

式中  $\tau_{\text{haz}}$ ——作用在临界失效面,平行于焊缝长度方向的剪应力；

$f_{\text{v,haz}}$ ——构件焊接热影响区的抗剪强度设计值。

轴心拉力(压力)和剪力共同作用在焊接热影响区的临界失效面：

$$\sqrt{\sigma_{\text{haz}}^2 + 3\tau_{\text{haz}}^2} \leq f_{\text{u,haz}} \quad (9.2.4-3)$$

## 10 构造要求

### 10.1 一般规定

10.1.1 铝合金结构的构造应使结构受力简单明确,减少应力集中,并便于制作、安装、维护。

10.1.2 应采取必要的结构和构造措施以抵消或释放温度效应。

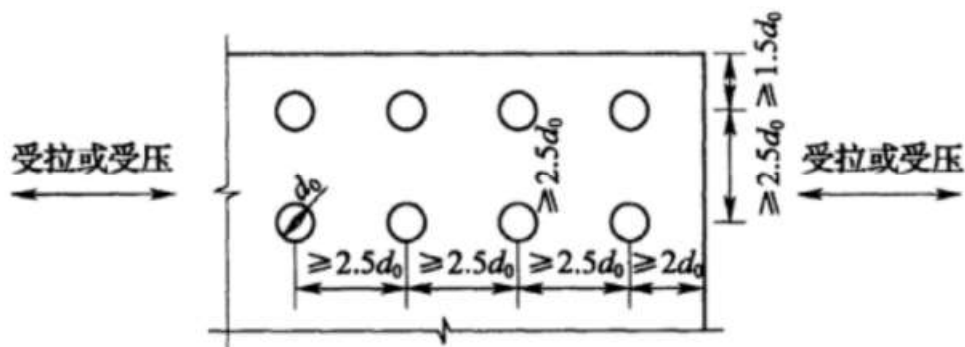
10.1.3 节点构造必须符合分析计算模型的假定,必要时应进行节点分析或试验验证。

10.1.4 构件在节点处的轴线宜汇交于一点,当不交于一点时应考虑偏心影响。

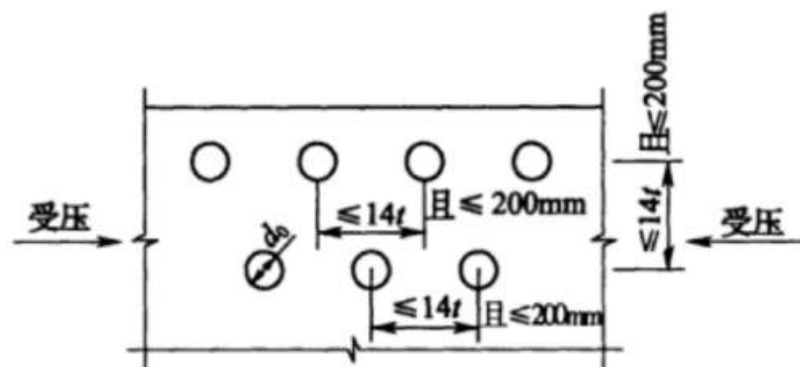
10.1.5 铝合金结构的连接宜采用紧固件连接。当采用焊接连接时,宜采取措施减少热影响效应对结构和构件强度降低的影响,焊接位置宜靠近构件低应力区。

### 10.2 螺栓连接和铆钉连接

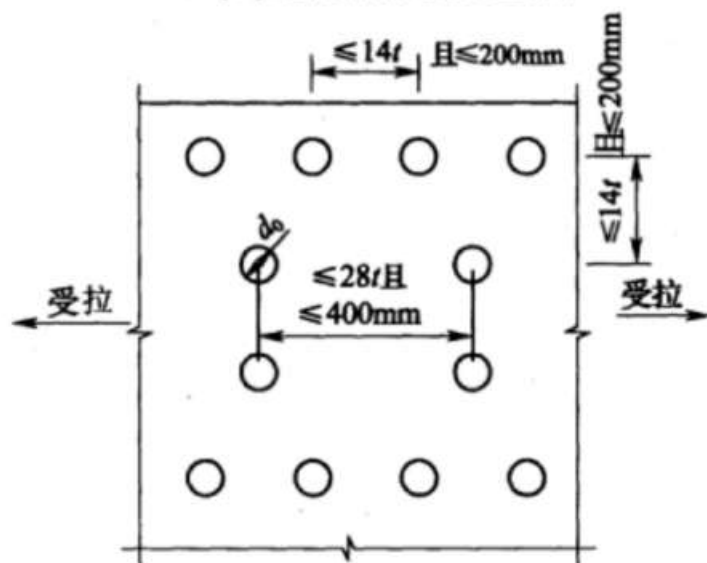
10.2.1 螺栓或铆钉的距离(图 10.2.1)应符合表 10.2.1 的要求。



(a) 最小容许间距



(b) 最大容许间距 (压力)



(c) 最大容许间距 (拉力)

图 10.2.1 螺栓或铆钉的容许距离

表 10.2.1 螺栓或铆钉的最大、最小容许距离

名称	位置和方向		最大容许距离 (mm)		最小容许距离		
			暴露于大气或腐蚀环境下	非暴露于大气或腐蚀环境下			
中心间距	中间排	垂直内力方向		14t 或 200 (取两者的较小值)	14t 或 200 (取两者的较小值)	2.5d <sub>0</sub>	
		顺内力方向	构件受压力	14t 或 200 (取两者的较小值)	14t 或 200 (取两者的较小值)		
			构件受拉力	外排	14t 或 200 (取两者的较小值)		1.5 倍 [14t 或 200 (取两者的较小值)]
				内排	28t 或 400 (取两者的较小值)		1.5 倍 [28t 或 400 (取两者的较小值)]
中心至构件边缘距离	顺内力方向		4t + 40	12t 或 150 (取两者的较大值)	2d <sub>0</sub>		
	垂直内力方向				1.5d <sub>0</sub>		

注: d<sub>0</sub> 为螺栓或铆钉的孔径, t 为外层较薄板件的厚度, 单位: mm。

10.2.2 用于螺栓连接或铆钉连接的板件厚度不应小于螺栓或铆钉直径的  $1/4$ 。

10.2.3 在连接构件上确定螺栓孔及铆钉孔的位置应避免出现腐蚀和局部屈曲,并应便于螺栓及铆钉的安装。

10.2.4 每一杆件在节点上以及拼接接头的一端,永久性的螺栓或铆钉数不宜少于 2 个。

10.2.5 沿杆轴方向受拉的螺栓连接中的端板,宜适当增强其刚度,以减少撬力对螺栓抗拉承载力的不利影响。

10.2.6 螺栓、铆钉连接件的抵抗中心宜与荷载中心重合。

### 10.3 焊缝连接

10.3.1 焊缝连接设计时不得任意加大焊缝,避免焊缝立体交叉和在一处集中大量焊缝,同时焊缝的布置宜对称于构件形心轴。

10.3.2 在受力构件中应采用完全熔透对接焊缝。在焊接质量得到保证的情况下,完全熔透焊缝的计算厚度可采用连接构件的厚度,当焊接构件的厚度不同时,应采用较小值。

10.3.3 在非受力构件中可采用部分熔透对接焊缝。

10.3.4 角焊缝高度  $h_f$  不应小于两焊件中较薄焊件母材厚度的 70%,且不应小于 3mm。

角焊缝符合下列情况时,焊缝计算长度  $l_w$  可采用全长范围(图 10.3.4):

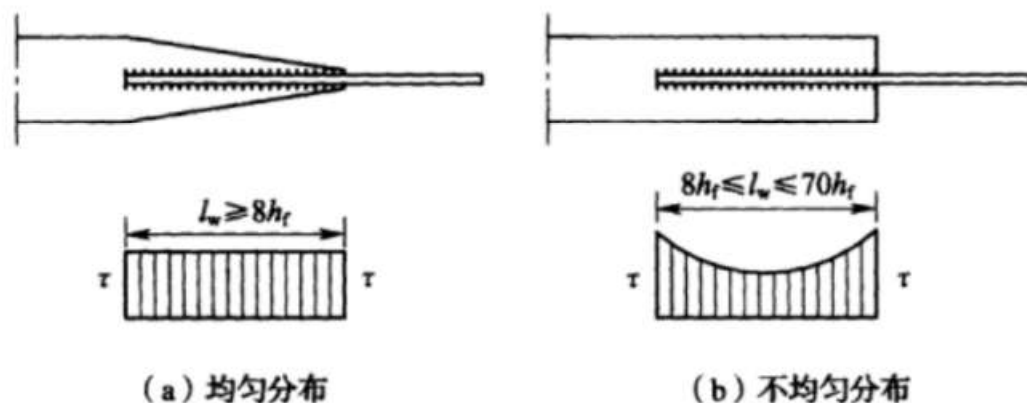


图 10.3.4 角焊缝内力分布



- 1 角焊缝内力沿焊缝全长均匀分布,且符合  $l_w \geq 8h_f$  时;
- 2 角焊缝内力沿焊缝全长不均匀分布,且符合  $8h_f \leq l_w \leq 70h_f$  时。

10.3.5 连接构件的刚度差别很大时,焊缝计算长度  $l_w$  应考虑折减。

## 10.4 防火、隔热

10.4.1 铝合金结构应根据建筑物的耐火等级来确定耐火极限。

10.4.2 铝合金结构的防火措施可采用有效的水喷淋系统进行防护或消防部门认可的防火喷涂材料。

10.4.3 铝合金结构的表面长期受辐射热温度达  $80^\circ\text{C}$  以上时,应加隔热层或采用其他有效的防护措施。

## 10.5 防 腐

10.5.1 当铝合金材料与除不锈钢以外的其他金属材料或含酸性或碱性的非金属材料接触、紧固时,应采用隔离材料,防止与其直接接触。

10.5.2 铝合金结构、构件应进行表面防腐处理,可采用阳极氧化、电泳涂漆、粉末喷涂、氟碳漆喷涂等防腐处理措施,并应按《铝合金建筑型材》GB 5237 的规定执行。

10.5.3 阳极氧化性能应由氧化膜外观、颜色、最大厚度、反射率、耐磨性、耐蚀性、耐附着性及击穿电压等内容决定。阳极氧化膜的检测方法应按《铝合金建筑型材》GB 5237 的规定执行。

氧化膜厚度级别应按结构的使用环境和条件而定,应符合表 10.5.3 的规定。用于铝合金结构构件的氧化膜级别不应小于 AA15。对于大气污染条件恶劣的环境或需要耐磨时氧化膜级别应选用 AA20、AA25。

表 10.5.3 氧化膜厚度级别

级 别	最小平均膜厚( $\mu\text{m}$ )	最小局部膜厚( $\mu\text{m}$ )
AA15	15	12
AA20	20	16
AA25	25	20

**10.5.4** 铝合金结构表面进行维护清洗时应符合以下规定：

- 1 不得使用对铝合金保护膜有腐蚀作用的清洗剂，清洗剂应在有效期限内。
- 2 不宜用不同的清洗剂同时清洗同一个铝合金构件。
- 3 不宜用滴、流等方式清洗铝合金构件。
- 4 不宜在铝合金的节点等部位留有残余的清洗剂。

# 11 铝合金面板

## 11.1 一般规定

11.1.1 本章铝合金面板的计算和构造规定适用于直立锁边板、波纹板、梯形板冲压成型的屋面板或墙面板(图 11.1.1)。

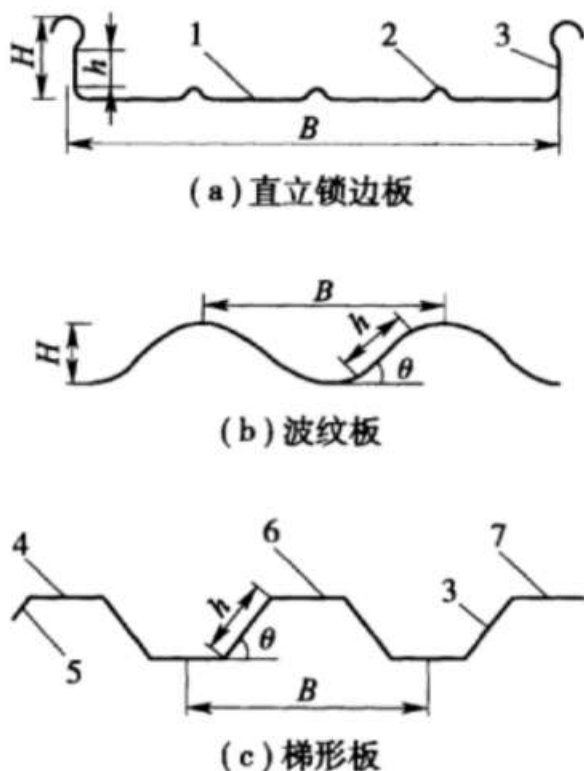


图 11.1.1 铝合金屋面板、墙面板

1—中间加劲板件;2—中间加劲肋;3—腹板;4—边缘加劲板件;

5—边加劲肋;6—加劲板件;7—非加劲板件

$B$ —波距; $H$ —板高; $h$ —腹板净长; $\theta$ —腹板倾角

当腹板为曲面时,腹板净长  $h$  为腹板起弧点间的直线长度;腹板倾角  $\theta$  为腹板起弧点连线和底面的夹角。

11.1.2 直立锁边铝合金面板可采用 T 形支托(图 11.1.2)作为连接支座。

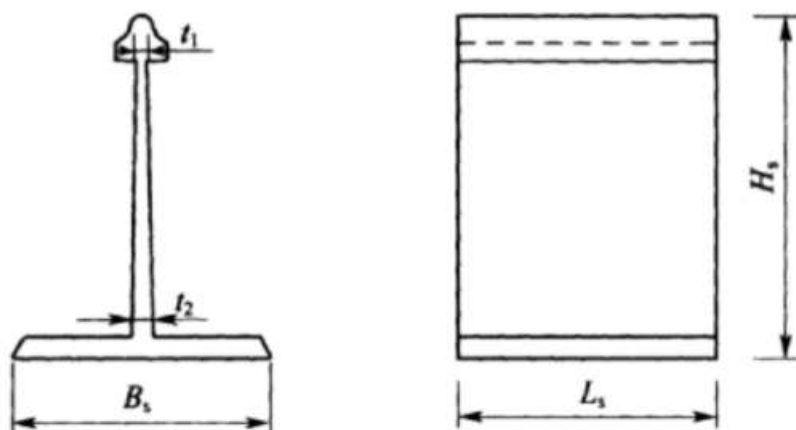


图 11.1.2 T形支托

$H_s$ —支托高度； $B_s$ —支托宽度； $L_s$ —支托长度； $t_1$ —支托腹板最小厚度；

$t_2$ —支托腹板最大厚度

**11.1.3** 铝合金面板受压翼缘的有效厚度计算应按下列规定采用：

1 两纵边均与腹板相连且中间没有加劲的受压翼缘(图 11.1.1c)，可按加劲板件(图 5.1.4b)由本规范第 5.2.3 条确定其有效厚度。

2 两纵边均与腹板相连且中间有加劲的受压翼缘(图 11.1.1a)，可按中间加劲板件(图 5.1.4d)由本规范第 5.2.3 条确定其有效厚度。当加劲肋多于两个时，可忽略中间部分加劲肋的有利作用(图 11.1.3)。



图 11.1.3 加劲肋的简化图

3 一纵边与腹板相连且有边缘加劲的受压翼缘(图 11.1.1c)，可按边缘加劲板件(图 5.1.4c)由本规范第 5.2.3 条确定其有效厚度。

4 一纵边与腹板相连且没有边缘加劲的受压翼缘(图 11.1.1c)，可按非加劲板件(图 5.1.4a)由本规范第 5.2.3 条确定其有效厚度。

**11.1.4** 一纵边与腹板相连的弧形受压翼缘(图 11.1.1b)，应根据试验确定其有效厚度。

**11.1.5** 铝合金面板中腹板的有效厚度应按本规范第 5.2 节的规定进行计算。

11.1.6 铝合金面板的挠度应符合表 4.4.1 的规定。

## 11.2 强 度

11.2.1 在铝合金面板的一个波距的板面上作用集中荷载  $F$  时 (图 11.2.1a), 可按下式将集中荷载  $F$  折算成沿板宽方向的均布线荷载  $q_{re}$  (图 11.2.1b), 并按  $q_{re}$  进行单个波距的有效截面的弯曲计算。

$$q_{re} = \eta \frac{F}{B} \quad (11.2.1)$$

式中  $F$ ——集中荷载;

$B$ ——波距;

$\eta$ ——折算系数, 由试验确定; 无试验依据时, 可取  $\eta=0.5$ 。

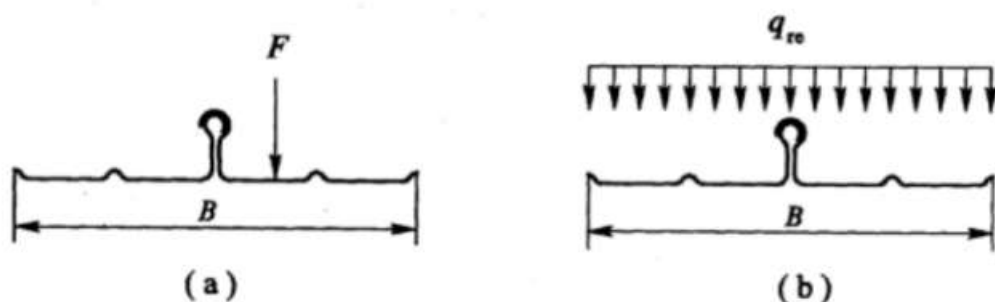


图 11.2.1 集中荷载下铝合金面板的简化计算模型

11.2.2 铝合金面板的强度可取一个波距的有效截面, 作为受弯构件按下列规定计算。檩条或 T 形支托作为连续梁的支座。

$$M/M_u \leq 1 \quad (11.2.2-1)$$

$$M_u = W_e f \quad (11.2.2-2)$$

式中  $M$ ——截面所承受的最大弯矩, 可按图 11.2.2 的面板计算模型求得;

$M_u$ ——截面的弯曲承载力设计值;

$W_e$ ——有效截面模量, 应按第 5.4 节的规定计算。

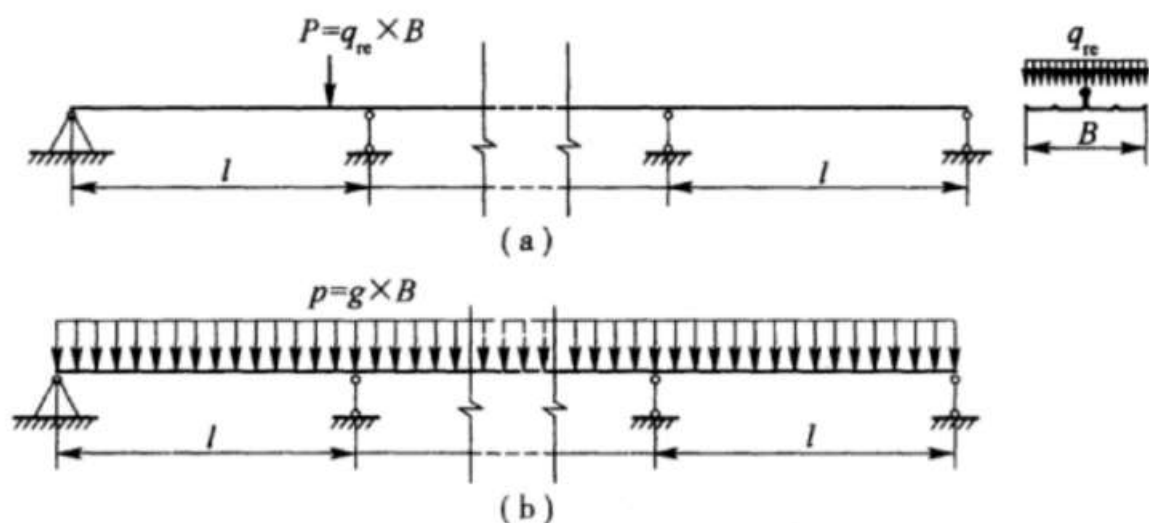


图 11.2.2 铝合金面板的强度计算模型

$P$ —集中荷载产生的作用于面板计算模型上的集中力; $B$ —波距;

$g$ —板面均布荷载; $p$ —由  $g$  产生的作用于面板计算模型上的线均布力

### 11.2.3 铝合金面板 T 形支托的强度应按下式计算:

$$\sigma = \frac{R}{A_{en}} \leq f \quad (11.2.3-1)$$

$$A_{en} = t_1 L_s \quad (11.2.3-2)$$

式中  $\sigma$ ——正应力;

$f$ ——支托材料的抗拉和抗压强度设计值;

$R$ ——支座反力;

$A_{en}$ ——有效净截面面积;

$t_1$ ——支托腹板最小厚度;

$L_s$ ——支托长度。

11.2.4 铝合金面板和 T 形支托的受压和受拉连接强度应进行验算,必要时可按试验确定。

## 11.3 稳 定

11.3.1 铝合金面板中腹板的剪切屈曲应按下列公式计算:

$$\text{当 } h/t \leq \frac{875}{\sqrt{f_{0.2}}} \text{ 时, } \begin{cases} \tau \leq \tau_{cr} = \frac{320}{h/t} \sqrt{f_{0.2}} \\ \tau \leq f_v \end{cases} \quad (11.3.1-1)$$

$$\text{当 } h/t \geq \frac{875}{\sqrt{f_{0.2}}} \text{ 时, } \tau \leq \tau_{cr} = \frac{280000}{(h/t)^2} \quad (11.3.1-2)$$

式中  $\tau$ ——腹板平均剪应力(N/mm<sup>2</sup>);

$\tau_{cr}$ ——腹板的剪切屈曲临界应力;

$f_v$ ——抗剪强度设计值,应按表 4.3.4 取用;

$f_{0.2}$ ——名义屈服强度,应按附录表 A-1、A-2 取用;

$h/t$ ——腹板高厚比。

**11.3.2** 铝合金面板支座处腹板的局部受压承载力,应按下式验算:

$$\frac{R}{R_w} \leq 1 \quad (11.3.2-1)$$

$$R_w = \alpha t^2 \sqrt{fE} (0.5 + \sqrt{0.02l_c/t}) [2.4 + (\theta/90)^2] \quad (11.3.2-2)$$

式中  $R$ ——支座反力;

$R_w$ ——一块腹板的局部受压承载力设计值;

$\alpha$ ——系数,中间支座取 0.12;端部支座取 0.06;

$t$ ——腹板厚度;

$l_c$ ——支座处的支承长度,  $10\text{mm} < l_c < 200\text{mm}$ , 端部支座可取 10mm;

$\theta$ ——腹板倾角 ( $45^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ );

$f$ ——铝合金面板材料的抗压强度设计值。

**11.3.3** 铝合金面板 T 形支托的稳定性可简化为等截面柱模型(图 11.3.3b),简化模型应按下式计算:

$$\frac{R}{\varphi A} \leq f \quad (11.3.3)$$

式中  $R$ ——支座反力;

$\varphi$ ——轴心受压构件的稳定系数,应根据构件的长细比、铝合金材料的强度标准值  $f_{0.2}$  按附录 B 取用;

$A$ ——毛截面面积,  $A = tL_s$ ;

- $t$ ——T形支托等效厚度,按 $(t_1+t_2)/2$ 取值;  
 $t_1$ ——支托腹板最小厚度;  
 $t_2$ ——支托腹板最大厚度。

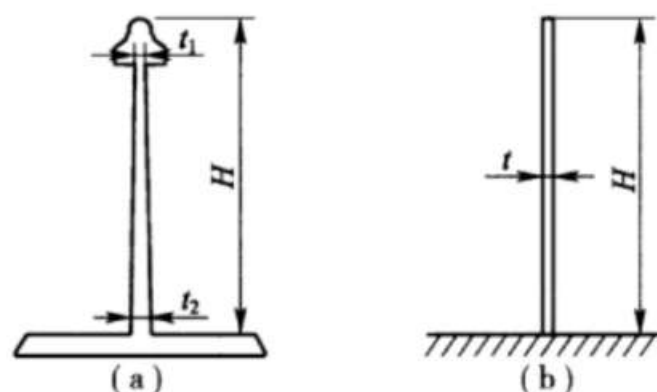


图 11.3.3 支托的简化模型

$H$ —T形支托高度

**11.3.4** 计算铝合金面板 T 形支托的稳定系数时,其计算长度应按下式计算:

$$l_0 = \mu H \quad (11.3.4)$$

式中  $\mu$ ——支托计算长度系数,可取 1.0 或由试验确定;  
 $l_0$ ——支托计算长度。

## 11.4 组合作用

**11.4.1** 铝合金面板同时承受弯矩  $M$  和支座反力  $R$  的截面,应满足下列要求:

$$\begin{cases} M/M_u \leq 1 \\ R/R_w \leq 1 \\ 0.94(M/M_u)^2 + (R/R_w)^2 \leq 1 \end{cases} \quad (11.4.1)$$

式中  $M_u$ ——截面的弯曲承载力设计值,  $M_u = W_e f$ ;

$W_e$ ——有效截面模量,应按第 5.4 节的规定计算;

$R_w$ ——腹板的局部受压承载力设计值,应按公式(11.3.2)计算。

**11.4.2** 铝合金面板同时承受弯矩  $M$  和剪力  $V$  的截面,应满足下列要求:



$$(M/M_u)^2 + (V/V_u)^2 \leq 1 \quad (11.4.2)$$

式中  $V_u$ ——腹板的抗剪承载力设计值,取  $(ht \cdot \sin\theta)\tau_{cr}$  和  $(ht \cdot \sin\theta)f_v$  中较小值,  $\tau_{cr}$  应按公式(11.3.1)计算。

## 11.5 构造要求

**11.5.1** 铝合金屋面板和墙面板的厚度宜取 0.6~3.0mm。铝合金面板宜采用长尺寸板材,以减少板长方向的搭接。

**11.5.2** 铝合金面板长度方向的搭接端必须与檩条、支座、墙梁等支承构件有可靠的连接(图 11.5.2),搭接部位应设置防水堵头,搭接处可采用焊接或泛水板,搭接部分长度方向中心宜与支承构件形心对齐,搭接长度  $a$  不宜小于下列限值:

波高不小于 70mm 的高波屋面铝合金板:350mm;

波高小于 70mm 的屋面铝合金板:屋面坡度小于 1/10 时,取 250mm;屋面坡度不小于 1/10 时,取 200mm;

墙面铝合金板:120mm。

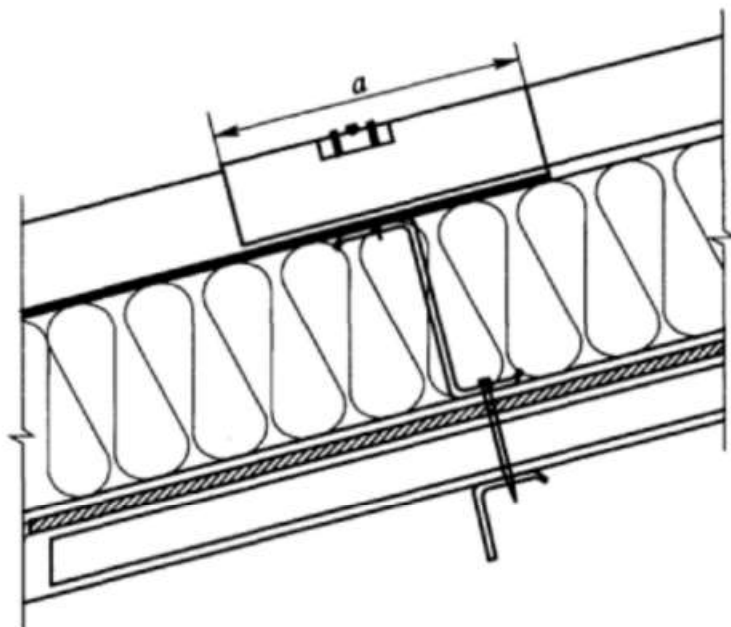


图 11.5.2 铝合金面板搭接图

**11.5.3** 铝合金屋面板侧向可采用搭接、扣合或咬合等方式进行连接。当侧向采用搭接式连接时,连接件宜采用带有防水密封胶垫的自攻螺钉。宜搭接一波,特殊要求时可搭接两波。搭接处应

用连接件紧固,连接件应设置在波峰上。对于高波铝合金板,连接件间距宜为 700~800mm;对于低波铝合金板,连接件间距宜为 300~400mm。采用扣合式或咬合式连接时,应在檩条上设置与铝合金板波形板相配套的专门固定支座,固定支座和檩条用自攻螺钉或射钉连接,铝合金板应搁置在固定支座上(图 11.5.3)。两片铝合金板的侧边应确保在风吸力等因素作用下的扣合或咬合连接可靠。

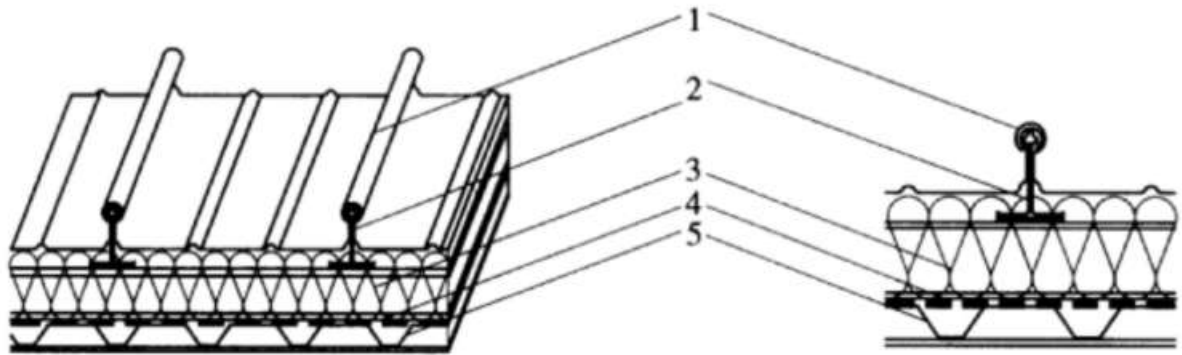


图 11.5.3 固定支座连接

1—铝合金面板;2—支托;3—绝热保温层;4—隔气层;5—压型钢板

**11.5.4** 铝合金墙面板之间的侧向连接宜采用搭接连接,宜搭接一个波峰,板与板的连接件可设在波峰,亦可设在波谷。连接件宜采用带有防水密封胶垫的自攻螺钉。

## 附录 A 结构用铝合金材料力学性能

常见结构用铝合金板、带材力学性能(标准值)可按表 A-1 采用,结构用铝合金管材、型材力学性能(标准值)可按表 A-2 采用。结构用铝合金板、带材、管材、型材的化学成分可按表 A-3 采用。凡采用的材料在表中未给出规定非比例伸长应力  $f_{0.2}$  值或抗拉强度  $f_u$  值的,应通过试验确定其标准值。

表 A-1 结构用铝合金板、带材力学性能标准值

合金牌号	状态	产品类型	厚度 (mm)	规定非比例伸长应力 $f_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	伸长率 (%)50mm (5D)
3003	O	轧制板、冷轧带	0.2~10.0	$\geq 35$	95~125	$\geq 18\sim 23$
	H12/H22	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 85$	120~155	$\geq 2\sim 6$
	H14/H24	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 115$	135~175	$\geq 1\sim 5$
	H16/H26	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 145$	165~205	$\geq 1\sim 4$
	H18	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 165$	$\geq 185$	$\geq 1\sim 4$
	H112	轧制板	4.5~12.5	$\geq 70$	$\geq 115$	$\geq 8$
12.5~80.0			$\geq 40$	$\geq 100$	$\geq (12)$	
3004	O	轧制板、冷轧带	0.2~10.0	$\geq 60$	150~195	$\geq 9\sim 16$
	H12/H22/H32	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	$\geq 145$	190~240	$\geq 1\sim 5$
	H14/H24/H34	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 170$	220~265	$\geq 1\sim 4$
	H16/H26/H36	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 190$	240~285	$\geq 1\sim 4$
	H18/H38	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 215$	$\geq 260$	$\geq 1\sim 4$
	H112	轧制板	4.5~80.0	$\geq 60$	$\geq 160$	$\geq 6$
5005	O	轧制板、冷轧带	0.5~10.0	$\geq 35$	105~145	$\geq 16\sim 22$
	H12/H22/H32	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	$\geq 85$	120~155	$\geq 3\sim 7$
	H14/H24/H34	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	$\geq 110$	135~175	$\geq 1\sim 3$

续表 A-1

合金牌号	状态	产品类型	厚度 (mm)	规定非比例伸长应力 $f_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	伸长率 (%) 50mm (5D)
5005	H16/H26/H36	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	$\geq 125$	155~175	$\geq 1\sim 3$
	H18/H38	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	—	$\geq 175$	$\geq 1\sim 3$
	H112	轧制板	4.5~80.0	—	$\geq 100$	$\geq 8$
5052	O	轧制板、冷轧带	0.2~10.0	$\geq 65$	170~215	$\geq 14\sim 18$
	H12/H22/H32	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 155$	215~265	$\geq 3\sim 7$
	H14/H24/H34	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 175$	235~285	$\geq 3\sim 6$
	H16/H26/H36	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 200$	255~305	$\geq 3\sim 4$
	H18/H38	轧制板、冷轧带	0.2~4.5	$\geq 220$	$\geq 270$	$\geq 3\sim 4$
	H112	轧制板	4.5~12.5	$\geq 110$	$\geq 195$	$\geq 7$
12.5~80.0			$\geq 65$	$\geq 175$	$\geq (10)$	
5083	O	轧制板、冷轧带	0.5~4.5	$\geq 125$	275~350	$\geq 16$
	H22/H32	冷轧带	0.5~4.0	$\geq 215$	305~375	$\geq 8\sim 12$
	H112	轧制板	4.5~40.0	$\geq 125$	$\geq 275$	$\geq 11\sim 12$
			40.0~50	$\geq 115$	$\geq 275$	$\geq (10)$
6061	O	冷轧带	0.4~2.9	$\leq 85$	$\leq 145$	$\geq 14\sim 16$

表 A-2 结构用铝合金管材、型材力学性能标准值

合金牌号	产品类型	状态	直径 (mm)	壁厚 (mm)	规定非比例伸长应力 $f_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	伸长率 (%) 50mm
3003	挤压棒	O/H112	$\leq 150$	—	$\geq 30$	90~130	$\geq 22$
	拉制管	O	—	0.63~5.0	—	95~130	$\geq 20\sim 25$
	拉制管	H14	—	0.63~5.0	$\geq 115$	$\geq 140$	$\geq 3\sim 4$
	挤压管、挤压型材	O/H112	—	所有	$\geq 30$	$\geq 90$	$\geq 22$
5052	挤压棒	O/H112	$\leq 150$	—	$\geq 70$	$\geq 175$	$\geq 20$
	拉制管、挤压管、型材	O	—	所有	$\geq 70$	170~240	—
	拉制管	H14	—	所有	$\geq 180$	$\geq 235$	—

续表 A-2

合金 牌号	产品类型	状态	直径 (mm)	壁厚 (mm)	规定非比例 伸长应力 $f_{0.2}$ (MPa)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	伸长率(%) 50mm
5083	拉制管、 挤压管	O/H112	—	所有	$\geq 110$	270~350	$\geq 12$
	拉制管	H32	—	所有	$\geq 235$	$\geq 315$	$\geq 5$
5454	挤压管	O/H112	—	所有	$\geq 85$	$\geq 215$	$\geq 12$
6060	挤压型材	T5	—	$\leq 3.2$	$\geq 110$	$\geq 150$	$\geq 8$
6061	挤压棒	T6	$\leq 150$	—	$\geq 240$	$\geq 260$	$\geq 9$
		T4	$\leq 150$	—	$\geq 110$	$\geq 180$	$\geq 14$
		T4	—	0.63~5.0	$\geq 100$	$\geq 205$	$\geq 14$
		T6	—	0.63~5.0	$\geq 240$	$\geq 290$	$\geq 8$
	挤压管、 挤压型材	T4	—	所有	$\geq 110$	$\geq 180$	$\geq 16$
	挤压管、 挤压型材	T6	—	所有	$\geq 240$	$\geq 265$	$\geq 8$
6063	挤压棒	T6	$\leq 25$	—	$\geq 170$	$\geq 205$	$\geq 9$
		T5	12.5~25	—	$\geq 105$	$\geq 145$	$\geq 7$
		T6	—	0.63~5.0	$\geq 195$	$\geq 230$	$\geq 8$
	挤压管	T4	—	$\leq 25$	$\geq 60$	$\geq 125$	$\geq 12$
		T6	—	所有	$\geq 170$	$\geq 205$	$\geq 10$
	挤压型材	T4	—	所有	$\geq 65$	$\geq 130$	$\geq 12$
		T5	—	所有	$\geq 110$	$\geq 160$	$\geq 8$
		T6	—	所有	$\geq 180$	$\geq 205$	$\geq 8$
	6063A	挤压型材	T4	—	所有	$\geq 90$	$\geq 150$
T5			—	所有	$\geq 150$	$\geq 190$	$\geq 5$
T6			—	所有	$\geq 180$	$\geq 220$	$\geq 4$
6082	挤压型材	T4	—	所有	$\geq 110$	$\geq 205$	$\geq 14$
		T6	—	所有	$\geq 260$	$\geq 310$	$\geq 10$

表 A-3 结构用铝合金板、带材、管材、型材的化学成分

合金 牌号	化学成分(%)										
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他		Al
									单个	合计	
3003	0.6	0.7	0.05~0.20	1.0~1.5	—	—	0.10	—	0.05	0.15	余量
3004	0.30	0.7	0.25	1.0~1.5	0.8~1.3	—	0.25	—	0.05	0.15	余量
5005	0.30	0.7	0.20	0.20	0.50~1.1	0.10	0.25	—	0.05	0.15	余量
5052	0.25	0.40	0.10	0.10	2.2~2.8	0.15~0.35	0.10	—	0.05	0.15	余量
5083	0.40	0.40	0.10	0.40~1.0	4.0~4.9	0.05~0.25	0.25	0.15	0.05	0.15	余量
5454	0.25	0.40	0.10	0.50~1.0	2.4~3.0	0.05~0.20	0.25	0.20	0.05	0.15	余量
6060	0.30~0.6	0.10~0.30	0.10	0.10	0.35~0.6	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15	余量
6061	0.40~0.8	0.7	0.15~0.40	0.15	0.8~1.2	0.04~0.35	0.25	0.15	0.05	0.15	余量
6063	0.20~0.6	0.35	0.10	0.10	0.45~0.9	0.10	0.10	0.10	0.05	0.15	余量
6063A	0.30~0.6	0.15~0.35	0.10	0.15	0.6~0.9	0.05	0.15	0.10	0.05	0.15	余量
6082	0.7~1.3	0.50	0.10	0.40~1.0	0.6~1.2	0.25	0.20	0.10	0.05	0.15	余量

## 附录 B 轴心受压构件的稳定系数

**表 B-1 弱硬化合金构件的轴心受压稳定系数  $\phi$**

$\lambda \sqrt{\frac{f_{0.2}}{240}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996
10	0.993	0.989	0.985	0.981	0.977	0.973	0.969	0.964	0.960	0.956
20	0.951	0.947	0.942	0.937	0.932	0.927	0.921	0.916	0.910	0.904
30	0.898	0.891	0.885	0.878	0.871	0.863	0.855	0.847	0.838	0.830
40	0.820	0.811	0.801	0.791	0.780	0.769	0.758	0.746	0.735	0.722
50	0.710	0.698	0.685	0.672	0.660	0.647	0.634	0.621	0.608	0.596
60	0.583	0.571	0.558	0.546	0.534	0.523	0.511	0.500	0.489	0.479
70	0.468	0.458	0.448	0.438	0.429	0.419	0.410	0.402	0.393	0.385
80	0.377	0.369	0.361	0.354	0.347	0.340	0.333	0.326	0.320	0.313
90	0.307	0.301	0.295	0.290	0.284	0.279	0.274	0.269	0.264	0.259
100	0.254	0.250	0.245	0.241	0.237	0.233	0.228	0.225	0.221	0.217
110	0.213	0.210	0.206	0.203	0.200	0.196	0.193	0.190	0.187	0.184
120	0.181	0.179	0.176	0.173	0.171	0.168	0.166	0.163	0.161	0.158
130	0.156	0.154	0.152	0.149	0.147	0.145	0.143	0.141	0.139	0.137
140	0.136	0.134	0.132	0.130	0.128	0.127	0.125	0.123	0.122	0.120
150	0.119	—	—	—	—	—	—	—	—	—

**表 B-2 强硬化合金构件的轴心受压稳定系数  $\phi$**

$\lambda \sqrt{\frac{f_{0.2}}{240}}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	0.996	0.989	0.983	0.976
10	0.970	0.963	0.957	0.950	0.943	0.936	0.930	0.923	0.916	0.909
20	0.902	0.894	0.887	0.879	0.872	0.864	0.856	0.848	0.839	0.831
30	0.822	0.813	0.804	0.795	0.786	0.776	0.766	0.756	0.746	0.736
40	0.725	0.715	0.704	0.693	0.682	0.671	0.660	0.649	0.638	0.626
50	0.615	0.604	0.593	0.582	0.571	0.560	0.549	0.538	0.528	0.517
60	0.507	0.497	0.487	0.477	0.467	0.458	0.448	0.439	0.430	0.422
70	0.413	0.405	0.397	0.389	0.381	0.373	0.366	0.359	0.352	0.345
80	0.338	0.331	0.325	0.319	0.313	0.307	0.301	0.295	0.290	0.285
90	0.279	0.274	0.269	0.264	0.260	0.255	0.251	0.246	0.242	0.238
100	0.234	0.230	0.226	0.222	0.218	0.215	0.211	0.208	0.204	0.201
110	0.198	0.195	0.192	0.189	0.186	0.183	0.180	0.177	0.175	0.172
120	0.169	0.167	0.164	0.162	0.160	0.157	0.155	0.153	0.151	0.149
130	0.147	0.145	0.143	0.141	0.139	0.137	0.135	0.133	0.131	0.130
140	0.128	0.126	0.125	0.123	0.121	0.120	0.118	0.117	0.115	0.114
150	0.113	—	—	—	—	—	—	—	—	—

## 附录 C 受弯构件的整体稳定系数

受弯构件的整体稳定系数应按下式计算：

$$\varphi_b = \frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2} - \sqrt{\left(\frac{1 + \eta + \bar{\lambda}^2}{2\bar{\lambda}^2}\right)^2 - \frac{1}{\bar{\lambda}^2}} \quad (\text{C-1})$$

式中  $\eta$ ——构件的几何缺陷系数，应按下式计算：

$$\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) \quad (\text{C-2})$$

对于弱硬化合金： $\alpha = 0.20$ ， $\bar{\lambda}_0 = 0.36$ ；

对于强硬化合金： $\alpha = 0.25$ ， $\bar{\lambda}_0 = 0.30$ 。

$\bar{\lambda}$ ——弯扭稳定相对长细比，应按下式计算：

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{W_{ex} f}{M_{cr}}} \quad (\text{C-3})$$

$M_{cr}$ ——弯扭稳定临界弯矩，应按下式计算：

$$M_{cr} = \beta_1 \frac{\pi^2 EI_y}{l_y^2} \left[ \beta_2 e_a + \beta_3 \beta_y + \sqrt{(\beta_2 e_a + \beta_3 \beta_y)^2 + \frac{I_w}{I_y} \left(1 + \frac{GI_t l_w^2}{\pi^2 EI_w}\right)} \right] \quad (\text{C-4})$$

式中  $I_y$ ——绕弱轴  $y$  轴的毛截面惯性矩；

$I_w$ ——毛截面扇性惯性矩，对于 T 形截面、十字形截面、角形截面可近似取  $I_w = 0$ ；

$I_t$ ——毛截面扭转惯性矩，若截面是由长度为  $h_i$  和厚度为

$t_i$  的  $n$  个矩形块组成则可取  $I_t$  为： $I_t = \sum_{i=1}^n I_{ti} =$

$$\frac{1}{3} \sum_{i=1}^n b_i t_i^3；$$

$l_w$ ——扭转屈曲计算长度，取决于构件端部的约束条件，

$l_w = \mu_w l$ ， $\mu_w$  为扭转屈曲计算长度系数，应按表 C-1 取用；

$l_y$ ——梁的侧向计算长度， $l_y = \mu_b l$ ， $\mu_b$  为侧向计算长度系



数;在跨间无侧向支撑时取 1;跨中设一道侧向支撑或跨间有不少于两个等距布置的侧向支撑时取 0.5;

$e_a$ ——横向荷载作用点至剪心的距离,如图 C-1 所示;当横向荷载作用在剪心时  $e_a=0$ ;当荷载不作用在剪心且荷载方向指向剪心时  $e_a$  为负,离开剪心时  $e_a$  为正;

$\beta_y$ ——截面不对称系数,应按下式计算:

$$\beta_y = \frac{\int_A y(x^2 + y^2) dA}{2I_x} - y_0 \quad (C-5)$$

$I_x$ ——绕主轴  $x$  轴的毛截面惯性矩;

$y_0$ ——剪心至形心的竖向距离,当剪心到形心的指向与挠曲方向一致时取负,相反时取正;

$\beta_1$ ——临界弯矩修正系数,取决于受弯构件上的荷载作用形式,应按表 C-2 取值;

$\beta_2$ ——荷载作用点位置影响系数,应按表 C-2 取值;

$\beta_3$ ——荷载形式不同时对单轴对称截面的修正系数,应按表 C-2 取值。

表 C-1 构件的扭转屈曲计算长度系数  $\mu_w$

序号	支撑条件	$\mu_w$
1	两端支承	1.0
2	一端支承,另一端自由	2.0

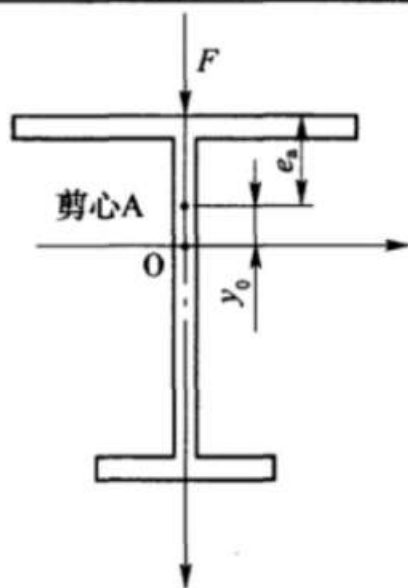
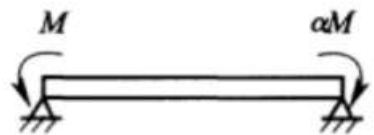
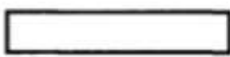




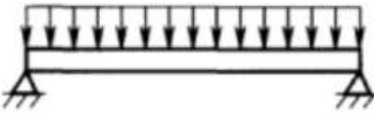

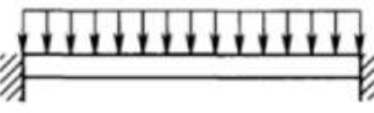

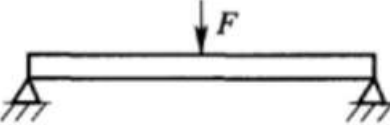

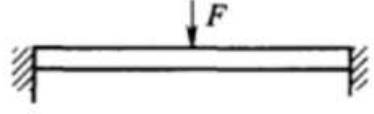

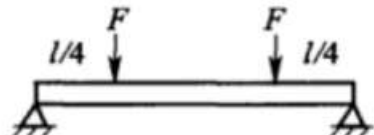
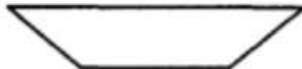


图 C-1 单轴对称截面  
表 C-2 计算系数  $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$  的确定

弯矩作用平面内荷载及 支承情况	弯矩图	计算长 度系数 $\mu_b$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$
	 $\alpha=1$	1.0	1.000	—	1.000
		0.5	1.000	—	1.144
	 $\alpha=1/2$	1.0	1.323	—	0.992
		0.5	1.514	—	2.271
	 $\alpha=0$	1.0	1.879	—	0.939
		0.5	2.150	—	2.150
	 $\alpha=-1/2$	1.0	2.704	—	0.676
		0.5	3.093	—	1.546
	 $\alpha=-1$	1.0	2.752	—	0.000
		0.5	3.149	—	0.000
		1.0	1.132	0.459	0.525
		0.5	0.972	0.304	0.980
		1.0	1.285	1.562	0.753
		0.5	0.712	0.652	1.070
		1.0	1.365	0.553	1.730
		0.5	1.070	0.432	3.050
		1.0	1.565	1.267	2.640
		0.5	0.938	0.715	4.800
		1.0	1.046	0.430	1.120
		0.5	1.010	0.410	1.890

## 本规范用词说明

1 为便于在执行本规范条文时区别对待,对要求严格程度不同的用词说明如下:

1)表示很严格,非这样做不可的用词:

正面词采用“必须”,反面词采用“严禁”。

2)表示严格,在正常情况下均应这样做的用词:

正面词采用“应”,反面词采用“不应”或“不得”。

3)表示允许稍有选择,在条件许可时首先应这样做的用词:

正面词采用“宜”,反面词采用“不宜”;

表示有选择,在一定条件下可以这样做的用词,采用“可”。

2 本规范中指明应按其他有关标准、规范执行的写法为“应符合……的规定”或“应按……执行”。

中华人民共和国国家标准

铝合金结构设计规范

**GB 50429 - 2007**

条文说明

白 紙

# 目 次

1	总 则 .....	(73)
2	术语和符号 .....	(74)
2.1	术语 .....	(74)
2.2	符号 .....	(74)
3	材 料 .....	(75)
3.1	结构铝 .....	(75)
3.2	连接 .....	(75)
3.3	热影响区 .....	(79)
4	基本设计规定 .....	(81)
4.1	设计原则 .....	(81)
4.2	荷载和荷载效应计算 .....	(82)
4.3	设计指标 .....	(85)
4.4	结构或构件变形的规定 .....	(95)
4.5	构件的计算长度和容许长细比 .....	(95)
5	板件的有效截面 .....	(97)
5.1	一般规定 .....	(97)
5.2	受压板件的有效厚度 .....	(98)
5.3	焊接板件的有效厚度 .....	(101)
5.4	有效截面的计算 .....	(102)
6	受弯构件的计算 .....	(103)
6.1	强度 .....	(103)
6.2	整体稳定 .....	(105)
7	轴心受力构件的计算 .....	(108)
7.1	强度 .....	(108)
7.2	整体稳定 .....	(109)

8	拉弯构件和压弯构件的计算 .....	(114)
8.1	强度 .....	(114)
8.2	整体稳定 .....	(114)
9	连接计算 .....	(118)
9.1	紧固件连接 .....	(118)
9.2	焊缝连接 .....	(124)
10	构造要求 .....	(127)
10.1	一般规定 .....	(127)
10.2	螺栓连接和铆钉连接 .....	(127)
10.3	焊缝连接 .....	(128)
10.4	防火、隔热 .....	(128)
10.5	防腐 .....	(128)
11	铝合金面板 .....	(130)
11.1	一般规定 .....	(130)
11.2	强度 .....	(130)
11.3	稳定 .....	(130)
11.4	组合作用 .....	(132)
11.5	构造要求 .....	(132)

# 1 总 则

**1.0.2** 本条文中工业与民用建筑系指不包括高温、有强烈腐蚀性气体及有强烈振源的工业与民用建筑。



## 2 术语和符号

本章所用的术语和符号是参照我国现行国家标准《工程结构设计基本术语和通用符号》GBJ 132 和《建筑结构设计术语和符号标准》GB/T 50083 的规定编写的,并根据需要增加了相关内容。

### 2.1 术 语

本规范给出了 23 个有关铝合金设计方面的专用术语,并从铝合金结构设计角度赋予其特定的涵义,但不一定是其严谨的定义。所给出的英文译名是参考国外某些标准确定的,不一定是国际上的标准术语。

### 2.2 符 号

本规范给出了 110 个常用符号并分别作出了定义,这些符号都是本规范各章节中所引用的。

**2.2.1** 本条所用符号均为作用和作用效应的设计值,当用于标准值时,应加下标  $k$ ,如  $Q_k$  表示重力荷载的标准值。

**2.2.2**  $f_{0.2}$  相当于铝合金材料国家标准中的  $\sigma_{p0.2}$ 。

## 3 材 料

### 3.1 结 构 铝

3.1.1、3.1.2 本条是根据我国冶金部门编制的国家标准中所包括的变形铝及铝合金的各类规格及其可能在结构上的应用制订的,铝合金结构材料的选用充分考虑了结构的承载能力和防止在一定条件下结构出现脆性破坏的可能性。

关于铝合金名称的术语及其定义见国家标准《变形铝及铝合金牌号表示方法》GB/T 16474、《变形铝及铝合金状态代号》GB/T 16475、《铝及铝合金术语》GB 8005 中的相关规定。与本规范相关铝合金材料的基础状态定义见表 1。

表 1 基础状态代号、名称及说明与应用

代号	名 称	说明与应用
F	自由加工状态	适用于在成型过程中,对于加工硬化和热处理条件无特殊要求的产品,该状态产品的力学性能不作规定
O	退火状态	适用于经完全退火获得最低强度的加工产品
H	加工硬化状态	适用于通过加工硬化提高强度的产品,产品在加工硬化后可经过(也可不经过)使强度有所降低的附加热处理
T	热处理状态 (不同于 F、O、H 状态)	适用于热处理后,经过(或不经过)加工硬化达到稳定状态的产品

### 3.2 连 接

3.2.1 本条为铝合金结构螺栓连接材料要求。

1 根据现行国家标准,螺栓的品种、规格及技术要求见表 2。

表 2 螺栓的品种、规格及技术要求

国家标准	规格范围	产品等级	材料及性能等级	表面处理
《六角头螺栓 C 级》 GB/T 5780	M5~M64	C 级	钢: $d \leq 39\text{mm}$ : 3.6、4.6、4.8; $d > 39\text{mm}$ : 按协议	① 不经处理 ② 电镀 ③ 非电解锌粉覆盖层
《六角头螺栓》GB/T 5782	M1.6~M64	A 级 B 级*	钢: $d < 3$ : 按协议; $3 \leq d \leq 39\text{mm}$ : 5.6、8.8、10.9; $3 \leq d \leq 16\text{mm}$ : 9.8; $d > 39\text{mm}$ : 按协议	① 氧化 ② 电镀 ③ 非电解锌粉覆盖层
			不锈钢: $d \leq 24\text{mm}$ : A2-70、A4-70; $24\text{mm} < d \leq 39\text{mm}$ : A2-50、A4-50; $d > 39\text{mm}$ : 按协议	简单处理
			有色金属: Cu2、Cu3、Al4	

注: \* A 级用于  $d \leq 24\text{mm}$  和  $l \leq 10d$  或  $l \leq 150\text{mm}$ (按较小值)的螺栓;

B 级用于  $d > 24\text{mm}$  或  $l > 10d$  或  $l > 150\text{mm}$ (按较小值)的螺栓。

2 国外几种主要的铝合金结构规范关于螺栓材料选用的规定:欧洲铝合金结构设计规范(prEN 1999-1-1:2002,下文简称欧规)允许使用铝合金螺栓、不锈钢螺栓和钢螺栓,并规定了这 3 类材料的力学性能值;英国铝合金结构设计规范(BS 8118:1991,下文简称英规)允许使用铝合金螺栓、不锈钢螺栓和钢螺栓,但未规定不锈钢螺栓和钢螺栓的力学性能值;美国铝合金结构设计规范(Specifications and guidelines for aluminum structures:1994,下文简称美规)仅允许使用铝合金螺栓。参考以上国外规范,本规范规定宜采用铝合金、不锈钢螺栓,也可采用钢螺栓。由于未作表面保护的钢螺栓同铝合金构件之间会发生电化学腐蚀,故使用钢螺栓时,必须做好表面处理,且表面镀层应保证具有一定的厚度。

3 铝合金结构连接中采用有预拉力的高强度螺栓应符合一定的适用条件,欧规和英规均规定了构件材料的名义屈服强度  $f_{0.2}$  的最低值,欧规为  $200\text{N/mm}^2$ ,英规为  $230\text{N/mm}^2$ 。如不符合

这一条件,则高强度螺栓连接节点的强度就应由试验来测定。而在美规中只允许使用普通螺栓,对高强度螺栓未作相应规定。

根据有关文献研究,当高强度螺栓的抗拉强度  $f^b$  超过铝合金构件抗拉强度  $f_a$  的 3 倍时,如不采取特别的构造措施(如采用较大直径的硬质垫圈),则螺栓内强大的预拉力会造成与螺栓头或螺母相接触的铝合金构件表面损伤,进而引起螺栓松弛和预拉力损失。在极端温度变化或连接较长时,由于铝合金构件与钢螺栓具有不同的热传导系数,将会引起摩擦面抗滑移系数的变化,进而影响连接节点的强度。此外,不作任何处理的铝合金构件表面的抗滑移系数很低,根据有关文献研究约为 0.10~0.15;而对铝合金材料摩擦面的处理方法目前尚无相应的国家标准,也缺乏试验数据和统计资料。

因此,综合以上原因,本规范不推荐使用有预拉力的高强度螺栓连接。如在实际应用中确有条件,高强度螺栓应符合现行国家标准《栓接结构用大六角头螺栓》GB/T 18230.1、《栓接结构用大六角螺母》GB/T 18230.3、《栓接结构用平垫圈》GB/T 18230.5 的规定。当铝合金构件材料的名义屈服强度  $f_{0.2} \geq 200\text{N/mm}^2$  时,可采用第 9.1.2~9.1.3 条中的设计公式计算连接节点的强度。当不符合这一条件时,应通过试验测定连接节点的强度。此外,在极端温度变化或连接较长时,无论铝合金构件材料的名义屈服强度  $f_{0.2}$  是否大于等于  $200\text{N/mm}^2$ ,均应通过试验来测定连接节点的强度。

4 遵照以上原则,列入本规范条文并规定其强度设计值的螺栓材料、级别有:普通螺栓宜采用 2B11、2A90 铝合金螺栓和 A2-50、A4-50、A2-70、A4-70 不锈钢螺栓,也可采用具有可靠表面处理的 4.6 级、4.8 级 C 级钢螺栓。高强度螺栓可采用具有可靠表面处理的 8.8 级、10.9 级钢螺栓,但在规范条文中对其强度设计值不作具体规定,当需采用时可参照相应的规范、标准。应注意,A2-50 和 A4-50 不锈钢螺栓不应用于游泳池结构及直接与海

水接触的结构。

### 3.2.2 本条为铝合金结构铆钉连接材料要求。

1 有国家标准的铆钉可分为 3 种类型:普通铆钉、抽芯铆钉和击芯铆钉。根据国内应用现状,抽芯铆钉和击芯铆钉主要应用在厚度很薄的铝合金面板连接中,用于铝合金承重结构连接的铆钉主要为普通铆钉。目前制定国家标准的普通铆钉有 12 个品种,半圆头铆钉的应用最为广泛,其他种类的铆钉例如沉头铆钉、平头铆钉,用于结构连接需考虑强度折减,由于缺乏试验资料和统计数据,因此暂不列入规范条文中。

2 根据国家标准《铆钉技术条件》GB 116,普通铆钉可用以下材料制成:碳素钢、特种钢、铜及其合金、铝及其合金。国外铝合金结构规范中关于铆钉材料选用的规定:欧规和美规仅允许使用铝合金铆钉;英规允许使用铝合金铆钉、不锈钢铆钉和钢铆钉,但未规定不锈钢铆钉和钢铆钉的力学性能值。参考国外规范,本规范仅允许采用铝合金铆钉用于结构连接。

3 列入本规范条文并规定其强度设计值的铆钉级别为:铝合金铆钉 5B05-HX8、2A01-T4、2A10-T4。《铆钉用铝及铝合金线材》GB 3196 中规定的另两种铆钉材料 1035-HX8、3A21-HX8 由于其抗剪强度过低,不予选用。

### 3.2.3 本条为铝合金结构焊丝材料及焊接工艺要求。

1 铝合金焊丝材料的选用,国家标准《铝及铝合金焊丝》GB 10858提供了较多种类的选择。结合国内外应用,对于 5×××和 6×××系列合金,应用最为广泛的焊丝主要有 2 种:含镁 5%的标准型铝镁焊丝 5356 和含硅 5%的铝硅焊丝 4043,即国家标准《铝及铝合金焊丝》GB 10858 中的 SAIMG-3 (5356) 和 SAlSi-1 (4043),故推荐优先选用。

2 根据国内外应用现状,在铝合金结构焊接中,通常采用两种惰性气体保护电弧焊,即 MIG 焊和 TIG 焊。由于 TIG 焊使用永久钨极,电流大小受钨极直径的限制,故仅适用于较薄构件的焊

接连接;而 MIG 焊电极为焊丝本身,可以使用比 TIG 焊大得多的电流,对于构件的厚度就没有限制,可用于厚度 50mm 以内构件的焊接连接。本条参照欧规的相关条文,规定 TIG 焊仅适用于厚度小于或等于 6mm 的构件焊接。

### 3.3 热影响区

**3.3.1** 本条是强制性条文,规定了焊接热影响区的一般设计要求。根据国内外研究资料,对于除 O、T4 或 F 状态的铝合金焊接结构,由于热输入的影响,在临近焊缝的区域存在材料强度降低的现象,该区域称为焊接热影响区。焊接热影响效应对焊接结构的承载力将带来非常不利的影响。

热影响区材料强度的降低可采用单一的折减系数  $\rho_{\text{haz}}$  来考虑,该系数代表热影响区范围内材料强度同母材原始强度的比值。一般来说,热影响区材料的名义屈服强度  $f_{0.2}$  的折减程度比抗拉强度  $f_u$  的折减程度更大一些。根据同济大学所完成的采用 MIG 和 TIG 焊接工艺,母材为 6061-T6 合金的对接焊缝硬度试验,得到的折减系数平均值为 0.59,由拉伸试验得到的  $f_{0.2}$  的折减系数平均值为 0.43,  $f_u$  的折减系数平均值为 0.62。欧洲规范给出的 6061-T6 合金  $f_{0.2}$  及  $f_u$  的折减系数分别为 0.48 和 0.60。英国规范对  $f_{0.2}$  及  $f_u$  的折减不作区分,6061-T6 合金的热影响区折减系数取 0.50。由此可见,对于 6061-T6 合金,试验结果同欧规和英规的规定符合较好。因缺乏其他合金材料的试验数据,并由于英规的规定比欧规偏于安全,故表 3.3.1 中 6××× 系列合金及 5083 合金的  $\rho_{\text{haz}}$  主要根据英规的规定值给出。在 10℃ 以上的环境温度下至少存放 3d 的要求,是保证材料有最低限度的自然时效。

3××× 合金在焊接后强度折减非常严重,根据工程经验焊接后热影响区的强度仅能达到初始强度的 20%,因此表 3.3.1 中 3003 及 3004 合金的  $\rho_{\text{haz}}$  取 0.20。建议 3××× 系列合金不宜采用焊接连接。

对于表 3.3.1 未列出的其他材料,可由试验或参考其他国家设计规范确定其  $\rho_{\text{haz}}$  值。

### 3.3.2 本条规定了铝合金结构焊接热影响区的范围。

1 规定了对接焊缝和几种角焊缝连接的热影响区范围,因缺乏相关研究资料,对较厚焊件热影响区沿厚度方向的分布,偏保守地一律取热影响区边界垂直于焊件表面。

2 本条规定主要依据同济大学完成的对接焊缝连接试验结果,该结果稍大于欧规的规定。对于采用 6061-T6 合金的对接焊缝连接,当采用 MIG 焊接工艺时,随焊件厚度增大,热影响区范围也随之增大;采用 TIG 焊接工艺的焊件,其热影响区范围和同厚度的采用 MIG 焊接工艺的焊件基本相同,因此本条规定同样适用于 MIG 焊和 TIG 焊。由于试验焊件的最大厚度为 16mm,因此仅规定了厚度在 16mm 以内焊件的热影响区范围。对于厚度超过 16mm 的焊件,实际应用中如需采用,可根据硬度试验结果确定。当退火温度较高时,热影响区的范围会随之增大,增大系数  $\alpha$  的规定来自欧规。

### 3.3.3 本条规定了铝合金结构中考虑焊接热影响效应的设计计算方法。

在焊缝连接计算中,需要校核热影响区范围内的应力不得超过其强度设计值,因此通常采用强度折减的方法来考虑热影响效应。在焊接构件承载力计算中,热影响区范围内材料强度降低带来的不利影响,通常采用将热影响区范围内材料强度取值同母材,但对截面进行折减的方法来考虑。

## 4 基本设计规定

### 4.1 设计原则

**4.1.1** 遵照《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068,本规范采用以概率理论为基础的极限状态设计方法,用分项系数设计表达式进行计算。对于铝合金结构的疲劳计算,本规范不予考虑。

**4.1.2** 本条提出的在设计文件中应注明的内容,是与保证工程质量密切相关的。其中铝合金材料的牌号应与有关铝合金材料的现行国家标准或其他技术标准相符;对铝合金材料性能的要求,凡我国铝合金材料标准中各牌号能基本保证的项目可不再列出,只提附加保证和协议要求的项目,而当采用其他尚未形成技术标准的铝合金材料或国外铝合金材料时,必须详细列出有关铝合金材料性能的各项要求。

**4.1.3** 承载能力极限状态可理解为结构或构件发挥允许的最大承载功能的状态。正常使用极限状态可理解为结构或构件达到使用功能上允许的某个限值的状态。

**4.1.4** 荷载效应的组合原则是根据《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的规定,结合铝合金结构的特点提出的。对荷载效应的偶然组合,统一标准只作出原则性的规定,具体的设计表达式及各种系数应符合专门规范的有关规定。对于正常使用极限状态,铝合金结构一般只考虑荷载效应的标准组合,当有可靠依据和实践经验时,亦可考虑荷载效应的频遇组合,当考虑长期效应时,可采用准永久组合。

**4.1.6** 铝合金材料具有优良的负温工作性能,在低温条件下其强度及延性均有所提高,所以不必规定铝合金结构的负温临界工作温度。但铝合金耐高温性能差,150℃以上时迅速丧失强度,这也



是可以通过挤压工艺生产型材的主要原因。文献《铝及铝合金材料手册》(武恭等编,科学出版社,1994)给出了常用建筑型材6063-T6和6061-T6合金在不同温度下的典型抗拉力学性能,见表3所示。

表3 6061-T6合金与6063-T6合金在不同温度下的典型抗拉性能

温度 (°C)	6061-T6			6063-T6		
	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	名义屈服强度 $f_{0.2}$ (MPa)	伸长率 $\delta$ (%)	抗拉强度 $f_u$ (MPa)	名义屈服强度 $f_{0.2}$ (MPa)	伸长率 $\delta$ (%)
-196	414	324	22	324	248	24
-80	338	290	18	262	228	20
-28	324	283	17	248	221	19
24	310	276	17	241	214	18
100	290	262	18	214	193	15
149	234	214	20	145	133	20
204	131	103	28	62	45	40
260	51	34	60	31	24	75
316	32	19	85	23	17	80
371	24	12	95	16	14	105

## 4.2 荷载和荷载效应计算

**4.2.1** 国内外目前对铝合金结构抗震设计的研究还不深入。铝合金结构抗震设计时,对幕墙结构可以按照现行有关国家行业标准的规定执行;对其他结构,抗震设计参数可以按照现行抗震规范中的钢结构的有关参数取用。

**4.2.3** 梁柱连接一般采用刚性和铰接连接。半刚性连接的弯矩-转角关系较为复杂,它随连接形式、构造细节的不同而异。进行结构设计时,这种连接形式的实验数据或设计资料必须足以提供较为准确的弯矩-转角关系。

**4.2.4** 一阶分析是针对未变形的结构进行平衡分析,不考虑变形对外力效应的影响。在分析结构内力以进行强度计算时,除少数特殊结构外,按一阶分析通常可以获得足够精确的结果。二阶效应是指结构变形对力的效应,如结构水平位移对竖向力的效应  $P-\Delta$ ,杆件挠度对轴力作用的效应  $P-\delta$ ,杆件伸长或缩短产生的效应,弯曲使弦长减小的效应以及初始弯曲、初始倾斜产生的效应等。结构的变形将会在结构中引起附加内力,而附加内力的产生将会导致进一步的附加变形,如此往复。考虑二阶效应的方法是用二阶分析考虑变形对外力效应的影响,针对已变形的结构来进行平衡分析。铝合金框架结构的精确分析应考虑二阶效应。

对于侧移不是很大的框架或者计算精度要求不是很高的框架,其内力计算均可采用一阶弹性分析的方法。一阶弹性计算的结果对于一般的结构足够精确。

对于侧移很大的框架或者计算精度要求很高的框架,其内力计算应当采用二阶弹性分析的方法。

本条对铝合金框架结构的内力分析方法作出了具体规定,即所有框架结构(不论有无支撑结构)均可采用一阶弹性分析方法计算框架杆件的内力,但对于  $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} > 0.1$  的框架结构则推荐采用二阶弹性分析确定,以提高计算精度。

当采用二阶弹性分析时,为配合计算精度,不论是精确计算或近似计算,亦不论有无支撑结构,均应考虑结构和构件的各种缺陷(如柱子的初倾斜、初偏心 and 残余应力等)对内力的影响。其影响程度可通过在框架每层柱的柱顶作用有附加的假想水平力(概念荷载)  $H_{ni}$  来综合体现,见图 1。

研究表明,框架层数越多,构件缺陷的影响越小。通过数值分析及与国外规范比较,本规范采用了公式(4.2.4-1)计算  $H_{ni}$ 。

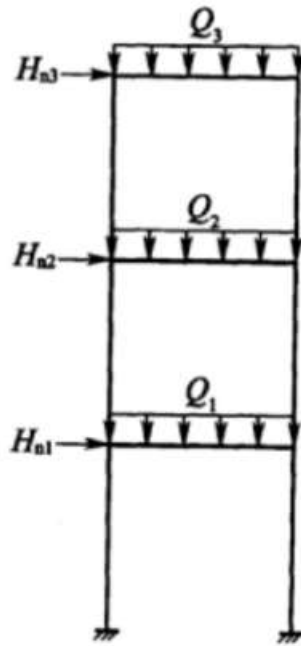


图 1 假想水平力  $H_{ni}$

本条对无支撑纯框架在考虑侧移对内力影响采用二阶弹性分析时,提出了框架杆件端弯矩的计算方法。

当采用一阶分析时(图 2),框架杆端弯矩  $M_I$  为:

$$M_I = M_{Ib} + M_{Is} \quad (1)$$

当采用二阶分析时,框架杆端弯矩  $M_{II}$  为:

$$M_{II} = M_{Ib} + \alpha_{2i} M_{Is} \quad (2)$$

式中  $M_{Ib}$ ——假定框架无侧移时(图 2b)按一阶弹性分析求得  
的各杆杆端弯矩;

$M_{Is}$ ——框架各节点侧移时(图 2c)按一阶弹性分析求得  
的各杆杆端弯矩;

$\alpha_{2i}$ ——考虑二阶效应第  $i$  层杆件的侧移弯矩增大系数  $\alpha_{2i}$

$$= \frac{1}{1 - \frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h}}。其中 \sum H 系指产生层间侧移 \Delta u$$

的所计算楼层及以上各层的水平荷载之和,不包括  
支座位移和温度的作用。

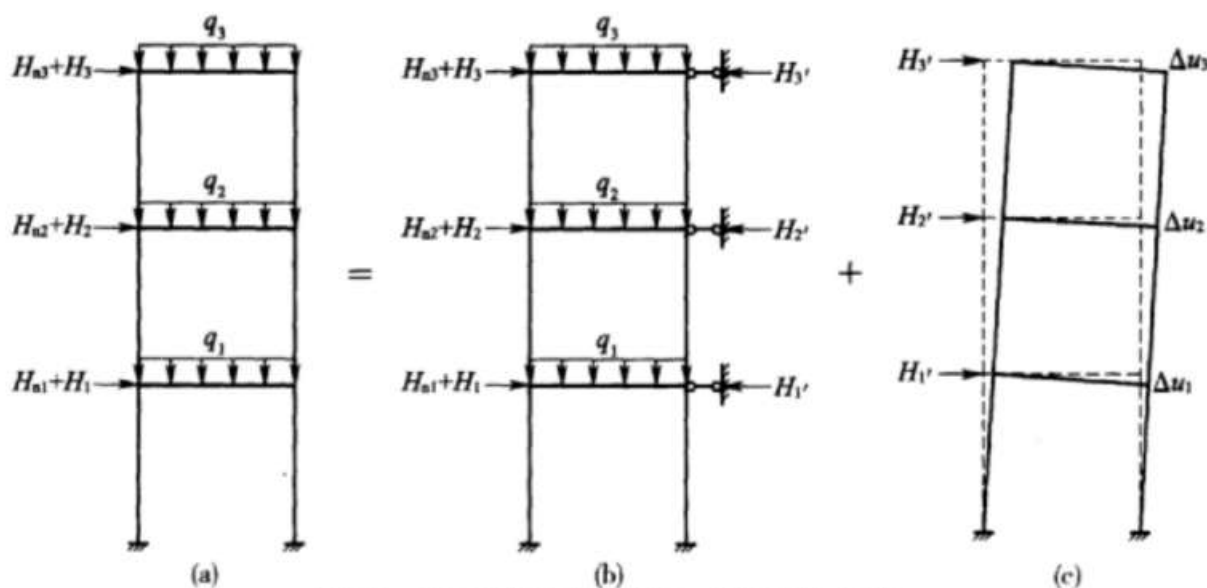


图2 无支撑纯框架的一阶弹性分析

上述二阶弹性分析的近似计算方法与国外的规定基本相同。该计算方法不仅可用于二阶弯矩的计算,还可以用于二阶轴力及剪力的计算。经过大量具体实例验算证明该方法具有较高的精度。数值计算表明,当  $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} \leq 0.25$  时,该近似方法比较精确,弯矩的误差不大于 10%;而当  $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} > 0.25$  (即  $\alpha_{2i} > 1.33$ ) 时,误差较大,应适当增加框架结构的侧移刚度,使  $\alpha_{2i} \leq 1.33$ 。

另外,当  $\frac{\sum N \cdot \Delta u}{\sum H \cdot h} \leq 0.1$  时,说明框架结构的抗侧移刚度较大,可忽略侧移对内力分析的影响,故可采用一阶分析法来计算框架内力,当然也不必考虑假象水平力  $H_{ni}$ 。

### 4.3 设计指标

**4.3.1、4.3.2** 本条遵照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009 和《建筑结构可靠度设计统一标准》GB 50068 的规定,铝合金强度设计值根据强度标准值除以抗力分项系数求得,其中抗力分项系数根据以概率理论为基础的极限状态设计方法确定。

考虑到目前铝合金材料力学性能指标的统计资料尚不充分,且大部分经过热处理和冷加工硬化处理后的合金材料强屈比较

低,破坏时极限伸长率较小,安全储备普遍低于钢材,在计算铝合金结构构件的抗力分项系数时目标可靠指标参照钢结构构件承载能力极限状态并相应提高一个等级,按 $\beta=3.7$ 采用。

按文献《建筑结构概率极限状态设计》(李继华等,中国建筑工业出版社,1990),采用概率方法计算时,极限状态方程为:

$$R - S_G - S_Q = 0 \quad (3)$$

式中  $R$ ——结构抗力;

$S_G$ ——恒载效应;

$S_Q$ ——可变荷载效应(可为楼面活载效应  $S_L$  或风荷载效应  $S_w$  等)。

影响结构构件抗力  $R$  的因素主要有:材料性能的不确定性  $\Omega_m$ ,几何参数的不确定性  $\Omega_a$ ,计算模式的不确定性  $\Omega_p$ 。其中:

1 材料性能的不确定性。主要取决于:

1) 试件的材料性能,按试件实测数据采用;

2) 构件材料性能与试件材料性能的差异。根据本规范编制组提供的 1042 根 6061-T6 合金试件以及来自日本的 28 根 5083-H112 合金试件的拉伸试验结果,经分析后得出其材性统计参数为:

合金 6061-T6:  $\mu_{\Omega_m} = 1.0738, \delta_{\Omega_m} = 0.0992$ ;

合金 5083-H112:  $\mu_{\Omega_m} = 1.2985, \delta_{\Omega_m} = 0.1374$ 。

2 几何参数的不确定性。主要取决于现有型材的生产工艺水平;由于缺乏充分的统计资料,计算中主要参考《铝合金建筑型材》GB/T 5237 对截面尺寸允许偏差要求,按普通级标准,取方管和 H 形两种型材计算截面几何参数统计特性,得  $\mu_{\Omega_a} = 1.00, \delta_{\Omega_a} = 0.05$ 。

3 计算模式的不确定性。考虑到铝合金结构计算理论与钢结构计算理论的近似性,计算模式  $\Omega_p$  的统计特性可取:

轴心受拉:  $\mu_{\Omega_p} = 1.05, \delta_{\Omega_p} = 0.07$ ;

轴心受压:  $\mu_{\Omega_p} = 1.03, \delta_{\Omega_p} = 0.07$ ;

偏心受压： $\mu_{\Omega p} = 1.12, \delta_{\Omega p} = 0.10$ 。

综合上述三种主要因素，挤压铝合金构件抗力的统计参数可按下式计算：

抗力均值： $\mu_R = \mu_{\Omega p} \cdot \mu_{\Omega m} \cdot \mu_{\Omega a}$

抗力变异系数： $\delta_R = \sqrt{\delta_{\Omega p}^2 + \delta_{\Omega m}^2 + \delta_{\Omega a}^2}$

由此计算得到的不同材料、不同受力状态下的抗力统计特性见表 4 所示。

表 4 铝合金构件抗力统计特性

材料 \ 受力状态	轴心受拉		轴心受压		偏心受压	
	$\mu_R$	$\delta_R$	$\mu_R$	$\delta_R$	$\mu_R$	$\delta_R$
6061-T6	1.127	0.1313	1.106	0.1313	1.203	0.149
5083-H112	1.3634	0.1621	1.3375	0.1621	1.4543	0.177

作用效应  $S$  的统计参数参照现行国家标准《建筑结构荷载规范》GB 50009—2001，设计基准期为 50 年，表 5 列出了部分调整后的常见荷载统计参数。

表 5 荷载统计参数

荷载分类	平均值/标准值	变异系数	分布类型
永久荷载 $G$	1.06	0.07	正态
楼面活载 $L$ (办)	0.524	0.288	极值 I 型
楼面活载 $L$ (住)	0.644	0.2326	极值 I 型
风荷载 $W$	0.908	0.193	极值 I 型
雪荷载	1.139	0.225	极值 I 型

结构计算中，恒+活是基本荷载组合。目标可靠指标主要是在分析  $G+L$ (办)， $G+L$ (住)和  $G+W$  三种荷载效应组合的基础上经优化方法确定的；其中  $G$  表示恒载， $L$  表示活载， $W$  表示风荷载。由于办公楼和住宅活荷载的统计参数不同，所以分开考虑。表 6 列出了采用优选法按不同合金牌号、不同受力状态计算的抗力分项系数  $\gamma_R$ 。计算中考虑了  $G+L$ (办)， $G+L$ (住)和  $G+W$  三种荷载效应组合，荷载效应比值取  $\rho = S_{QK}/S_{GK} = 0.25, 0.5, 1.0$ ,

## 2.0 四种情况。

表 6 抗力分项系数  $\gamma_R$

铝合金牌号	轴心受拉	轴心受压	偏心受压
6061-T6	1.1755	1.1978	1.1574
5083-H112	1.0613	1.0819	1.0412

考虑到铝合金材性实验的统计数据有限,为安全起见,统一取铝合金结构构件的抗力分项系数  $\gamma_R$  为 1.2。

考虑到在计算局部强度时计算模式不确定性的变异性更大,并且目标可靠指标也应适当提高,偏于安全地取抗力分项系数  $\gamma_R$  为 1.3。

**4.3.3** 现行国家标准给出的各牌号及状态下铝合金板材、带材、棒材、挤压型材(管材)、拉制管材的材料强度标准值可能略有不同,设计中可根据具体情况按附录 A 采用,或按相应的国家标准采用。

附录 A 表 A-1 中铝合金的力学性能参照以下国家标准:《铝及铝合金轧制板材》GB/T 3880—1997;《铝及铝合金冷轧带材》GB/T 8544—1997。附录 A 表 A-2 中铝合金的力学性能参照以下国家标准:《铝及铝合金挤压棒材》GB/T 3191—1998;《铝及铝合金拉(轧)制无缝管》GB/T 6893—2000;《铝及铝合金热挤压管》GB/T 4437—2000;《铝合金建筑型材》GB 5237—2000;《工业用铝及铝合金热挤压型材》GB/T 6892—2000。附录 A 表 A-3 中铝合金的化学成分参照《变形铝及铝合金化学成分》GB/T 3190—1996。

**4.3.4** 表 4.3.4 中的材料强度设计值是根据材料的力学性能标准值除以抗力分项系数得到的,为便于设计应用,将得到的数值取 5 的整数倍。当采用附录 A 中的其他锻造铝合金材料时,强度设计值应按附录 A 给出的材料力学性能标准值按以下各式计算后取 5 的整数倍采用:

$$\text{抗拉、抗压和抗弯强度设计值: } f = f_{0.2} / 1.2$$

抗剪强度设计值:  $f_v = f/\sqrt{3}$

热影响区抗拉、抗压和抗弯强度设计值:  $f_{u, haz} = \rho_{haz} f_u / 1.3$

热影响区抗剪强度设计值:  $f_{v, haz} = f_{u, haz} / \sqrt{3}$

#### 4.3.5 本条规定了铝合金结构普通螺栓、铆钉连接的强度设计值。

1 关于铝合金结构普通螺栓、铆钉连接的可靠度研究由于资料和试验数据的缺乏,尚无法进行统计分析,因此也无法直接按统计方法得出连接的各项强度设计值。制定钢规时,对于连接的强度设计值是采用旧规范 TJ 17—74 的容许应力进行转化换算而得到的,同时根据当时的研究成果并参照前苏联 1981 年钢结构规范进行了局部调整。因为国内没有关于铝合金结构的规范,连接材料的种类、级别相当繁杂,原始资料和试验数据几乎没有,确定出适当的连接强度设计值就更为困难。因此,本规范中铝合金结构普通螺栓、铆钉连接强度设计值的确定方法,是采用比较国外几种主要的铝合金结构规范,即欧规、英规、美规以及钢规设计公式的形式和设计强度指标的取值,并通过比较普通螺栓、铆钉的强度设计值与材料机械性能值的关系式得出的。

2 普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能值的相关关系式:

1) 钢规:普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能值的关系,如表 7 所示。

表 7 普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能关系(钢规)

连接类型 材料级别	普通螺栓(钢)			铆钉(钢)	
	C级 4.6、4.8	A、B级 5.6	A、B级 8.8	I类孔	II类孔
抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	$0.35 f_b^b$	$0.38 f_b^b$	$0.40 f_b^b$	$0.55 f_u^r$	$0.46 f_u^r$
抗拉强度设计值 $f_t^{b(r)}$	$0.42 f_b^b$	$0.42 f_b^b$	$0.50 f_b^b$	$0.36 f_u^r$	$0.36 f_u^r$
承压强度设计值 $f_c^{b(r)}$	$0.82 f_u$	$1.08 f_u$	$1.08 f_u$	$1.20 f_u$	$0.98 f_u$

注:1  $f_b^b$ 普通螺栓抗拉强度(公称值); $f_u^r$ 铆钉抗拉强度; $f_u$ 钢材抗拉强度(最小值)。

2 因钢规设计公式未考虑撬力的影响,表中  $f_v^{b(r)}$  的取值考虑了 20% 的折减。

3  $f_c^{b(r)}$  与构件受力性质和螺栓(铆钉)孔洞端距有关,钢规是根据受拉构件且端距  $= 2d_0$  确定的。



2) 欧规: 参照欧规内容, 经调整得出与钢规相同的形式。欧规中各项强度设计值与材料机械性能值的关系式, 如表 8 所示。

表 8 普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能关系  
(欧规变换为钢规设计公式形式)

连接类型 材料级别或牌号	普通螺栓			铆钉	
	钢		不锈钢	铝合金	
	4.6 5.6 6.8 8.8	10.9	A4-50 A4-70	5019 5754 6082	
抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	$0.48f_u^b$	$0.40f_u^b$	$0.40f_u^b$	$0.40f_u^b$	$0.48f_u^r$
抗拉强度设计值 $f_t^{b(r)}$	$0.58f_u^b$	$0.58f_u^b$	$0.38f_u^b$	$0.38f_u^b$	不推荐使用
承压强度设计值 $f_c^{b(r)}$	$1.16f_u$	$1.16f_u$	$1.16f_u$	$1.16f_u$	$1.16f_u$

注: 1  $f_u^b$  普通螺栓抗拉强度(最小值);  $f_u^r$  铆钉抗拉强度(最小值);  $f_u$  铝合金抗拉强度(最小值)。

2 欧规在计算沿杆轴方向受拉的连接时, 除需要验算螺栓的抗拉强度外, 还需验算螺栓头、螺母对铝合金构件的抗冲切强度; 由于铝合金构件的强度可能会比螺栓的强度低很多, 因此抗冲切验算是很有必要的。但为了仍可采用类似钢规设计公式的形式, 本次规范条文将抗冲切验算单独提出, 并且为便于同表 7 中各项进行比较, 将表中  $f_t^{b(r)}$  也作了 20% 的折减以补偿未考虑撬力的不利影响。

3 欧规中构件承压强度的计算较为复杂, 同螺栓(铆钉)孔洞端距、中距, 以及螺栓(铆钉)和铝合金构件的抗拉强度比值有关; 一般情况下螺栓(铆钉)的抗拉强度均远大于铝合金的抗拉强度, 可不必考虑这一因素的影响; 表中  $f_c^{b(r)}$  取值是按照构造要求的最小容许距离: 即端距 =  $2d_0$ 、中距 =  $2.5d_0$  确定的。

3) 英规: 参照英规内容, 经调整得出与钢规相同的形式。英规中各项强度设计值与材料机械性能值的关系式, 如表 9 所示。

表 9 普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能关系  
(英规变换为钢规设计公式形式)

连接类型 材料级别或牌号	普通螺栓				铆钉	
	钢		不锈钢	铝合金	钢	铝合金
	C 级	A、B 级	A、B 级	A、B 级		
抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	$0.50f_y^b$	$0.55f_y^b$	$0.55f_p^b$	$0.27f_u^b$	$0.58f_y^s$	$0.28f_u^s$
抗拉强度设计值 $f_t^{b(r)}$	$0.83f_y^b$	$0.83f_y^b$	$0.83f_p^b$	$0.28f_u^b$	$0.83f_y^s$	$0.28f_u^s$
承压强度设计值 $f_c^{b(r)}$	$1.25f_p$	$1.25f_p$	$1.25f_p$	$1.25f_p$	$1.25f_p$	$1.25f_p$

- 注:1  $f_u^{b(r)}$  铝合金螺栓(铆钉)抗拉强度(最小值);  $f_y^{b(r)}$  钢螺栓(铆钉)屈服强度(最小值);  $f_p^b$  不锈钢螺栓强度代表值,  $f_p^b = \min[0.5(f_{0.2}^b + f_u^b), 1.2f_{0.2}^b]$ 。  
 2  $f_p$  铝合金强度代表值,  $f_p = \min[0.5(f_{0.2} + f_u), 1.2f_{0.2}^b]$ 。  
 3 英规中抗拉强度设计值取值较低,是因为其中已经考虑了撬力作用的不利影响。  
 4 英规中构件承压强度的计算较为复杂,同螺栓(铆钉)孔洞端距、构件与螺栓(铆钉)杆直径比值有关;当端距  $= 2d_0$  时,表中所列为  $f_c^{b(r)}$  的最小值。

4) 美规:参照美规内容,经调整得出与钢规相同的形式。根据美规 Part-1 铝合金结构设计:容许应力设计法,包括荷载分项系数在内的螺栓、铆钉抗剪承载力和抗拉承载力的总安全系数为 2.34。根据我国荷载规范,如作用在结构上的荷载分项系数平均值取 1.35,则可以得出螺栓、铆钉抗剪和抗拉强度的材料分项系数为 1.73。螺栓、铆钉的抗剪强度设计值与抗拉强度设计值与材料机械性能值的相关关系,如表 10 所示。

表 10 普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能关系  
(美规变换为钢规设计公式形式)

连接类型 材料牌号	普通螺栓(铝合金)	铆钉(铝合金)
		2024-T4 6061-T6 7075-T73
抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	$0.58f_y^b$	$0.58f_y^s$
抗拉强度设计值 $f_t^{b(r)}$	$0.46f_u^b$	无规定

- 注:1  $f_u^b$  普通螺栓抗拉强度;  $f_y^b$  普通螺栓抗剪强度;  $f_y^s$  铆钉抗剪强度。  
 2  $f_t^{b(r)}$  取值作了 20% 的折减以补偿未考虑撬力的不利影响。

3 欧规明确规定铆钉连接应设计为可传递剪力和压力,并要求尽量避免使铝合金铆钉承受拉力;英规明确规定铝合金铆钉不得承受拉力荷载;美规中仅给出了铝合金铆钉的抗剪强度设计值。因此,参考以上国外规范,本规范规定铝合金铆钉只可用于受剪连接中,故对铝合金铆钉的抗拉强度设计值不作规定。

4 根据表 7~表 10 各国规范中普通螺栓、铆钉连接强度设计值与材料机械性能值的计算式,本规范按表 11 计算普通螺栓、铆钉的强度设计值。表中铝合金、不锈钢螺栓强度设计值计算式依据欧规,钢螺栓强度设计值计算式依据钢规,铝合金铆钉强度设计值计算式依据美规,构件承压强度设计值计算式取值依据欧规。表 11 中的材料机械性能指标取自表 4.3.4 铝合金材料的室温力学性能值以及现行国家标准《紧固件机械性能 有色金属制造的螺栓、螺钉、螺柱和螺母》GB/T 3098.10、《紧固件机械性能 不锈钢螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.6、《紧固件机械性能 螺栓、螺钉和螺柱》GB/T 3098.1、现行国家标准《铆钉用铝及铝合金线材》GB 3196,计算所得的强度设计值均取 5 的整数倍。6063A-T5 和 6063A-T6 的抗拉强度均取厚度大于 10mm 时的较小值。

表 11 普通螺栓、铆钉连接的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)

螺栓的材料、性能等级和构件铝合金的牌号		抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	抗拉强度设计值 $f_t^b$	承压强度设计值 $f_c^{b(r)}$	
普通螺栓	铝合金	2B11	$0.40f_u^b$	$0.38f_u^b$	—
		2A90	$0.40f_u^b$	$0.38f_u^b$	—
	不锈钢	A2-50 A4-50	$0.40f_u^b$	$0.38f_u^b$	—
		A2-70 A4-70	$0.40f_u^b$	$0.38f_u^b$	—
	钢	4.6 4.8 级	$0.35f_u^b$	$0.42f_u^b$	—
铆钉	铝合金	5B05-HX8	$0.58f_u^b$	—	—
		2A01-T4	$0.58f_u^b$	—	—
		2A10-T4	$0.58f_u^b$	—	—

续表 11

螺栓的材料、性能等级和构件铝合金的牌号		抗剪强度设计值 $f_v^{b(r)}$	抗拉强度设计值 $f_t^b$	承压强度设计值 $f_c^{b(r)}$	
构件	铝合金	6061-T4	—	—	$1.16 f_u$
		6061-T6	—	—	$1.16 f_u$
		6063-T5	—	—	$1.16 f_u$
		6063-T6	—	—	$1.16 f_u$
		6063A-T5	—	—	$1.16 f_u$
		6063A-T6	—	—	$1.16 f_u$
		5083-O/H112	—	—	$1.16 f_u$

#### 4.3.6 本条规定了铝合金结构焊缝的强度设计值。

1 欧规中规定的焊缝金属特征强度值如表 12 所示,焊缝金属特征强度的抗力分项系数为 1.25。英规中规定的焊缝金属特征强度值如表 13 所示,表中未区分焊缝金属的不同:对 6061、6063 合金,表中值是采用 4043A 或 5356 焊丝得到的焊缝金属特征强度值;对 5083 合金,表中值是采用 5556A 或 5356 焊丝得到的焊缝金属特征强度值,焊缝金属特征强度的抗力分项系数为 1.3。英规中还规定,如焊接工艺及过程不符合 BS 4870 标准的要求,则抗力分项系数应提高到 1.6。以上两种规范均未区分 MIG 和 TIG 焊接工艺对焊缝强度的影响。

表 12 焊缝金属特征强度值 ( $N/mm^2$ ) (欧规)

特征强度	焊缝金属	母材合金牌号								
		3103	5052	5083	5454	6060	6005A	6061	6082	7020
$f_w (N/mm^2)$	5356	—	170	240	220	160	180	190	210	260
	4043A	95	—	—	—	150	160	170	190	210

- 注:1 对于采用 6060-T5 合金的挤压型材及厚度  $5mm < t < 25mm$  的材料,上述值应减小为  $140 N/mm^2$ 。  
 2 对于 5754 合金可采用 5454 合金的设计值,对于 6063 合金可采用 6060 合金的设计值。  
 3 如果焊缝金属为 5056A, 5556A, 或 5183 合金可采用焊缝金属为 5356 合金的设计值。  
 4 如果焊缝金属为 4047A 或 3103 合金可采用焊缝金属为 4043A 合金的设计值。  
 5 对于两种不同种类合金的焊接,焊缝金属的特征强度应采用较小值。

表 13 焊缝金属特征强度值 (N/mm<sup>2</sup>) (英规)

特征强度	母材合金牌号								
	非热处理合金						热处理合金		
	1200	3103 3105	5251	5454	5154A	5083	6063	6061 6082	7020
$f_w$ (N/mm <sup>2</sup> )	55	80	200	190	210	245	150	190	255

注：对于两种不同种类合金的焊接，焊缝金属的特征强度应采用较小值。

2 对于特定的母材与焊缝金属的组合，欧规和英规仅规定了焊缝金属的强度特征值，并通过具体的设计公式来体现对接焊缝与角焊缝设计强度的区别。本规范在形式上以参照钢规为基本原则，因此分别给出对接焊缝和角焊缝的强度设计值。

3 同一种铝合金母材选用不同的焊缝金属，焊缝的强度设计值是不同的。对于 6061、6063 及 6063A 合金，通常情况下按强度要求宜选用 SAIMG-3(5356)焊丝，该种焊接组合焊缝强度较高。但由于 6×××系列合金具有较强的裂纹热敏感性，当首先需要考虑控制裂纹数量和尺寸，以及耐腐蚀的要求较高时，宜选用抗热裂性能较好的 SAlSi-1(4043)焊丝。但应注意，选用 4043 焊丝，焊缝金属在阳极氧化后呈灰黑色，铝合金母材在阳极氧化后呈银白色，二者色差较为明显，当要求结构美观时应慎用。而当母材为 5083 合金时，焊接时只能采用 SAIMG-3(5356)焊丝。

4 根据同济大学完成的母材为 6061-T6，焊丝分别采用 5356 及 4043 的铝合金结构对接焊缝和角焊缝试验，得到的焊缝特征强度平均值均稍大于欧规及英规的规定值。这说明在国内的材料生产和焊接加工条件下，采用欧规或英规的焊缝特征强度值，是可以保证安全的。因此，参考表 12 和表 13，可得焊缝的强度设计值，如表 14 所示。表中强度设计值取欧规和英规的较小值，并取 5 的整数倍。

表 14 焊缝的强度设计值 (N/mm<sup>2</sup>)

铝合金母材 牌号及状态	焊丝型号	对接焊缝强度设计值 $f_w^c$		
		欧规	英规	本规范取值
6061-T4 6061-T6	5356	190/1.25=152	190/1.3=146	145
	4043	170/1.25=136	190/1.3=146	135
6063-T5 6063-T6 6063A-T5 6063A-T6	5356	160/1.25=128	150/1.3=115	115
	4043	150/1.25=120	150/1.3=115	115
5083O/F/H112	5356	240/1.25=192	245/1.3=188	185

注:1 对接焊缝抗压强度设计值  $f_w^c = f_w^c$ ;

2 对接焊缝抗剪强度设计值  $f_w^v = f_w^c / \sqrt{3}$ ;

3 角焊缝抗拉、抗压和抗剪强度设计值  $f_w^t = f_w^v$ 。

5 关于焊缝质量等级和工艺评定可参考现行国家行业标准《铝及铝合金焊接技术规程》HGJ 222。

#### 4.4 结构或构件变形的规定

4.4.1 本条规定了结构或构件变形的容许值。欧规中规定承受高标准装修的梁的变形容许值为  $L/360$ 。欧规中规定在风荷载标准值作用下,框架柱顶水平位移不宜超过  $H/300$ 。钢规中规定在风荷载标准值作用下,框架柱顶水平位移不宜超过  $H/400$ 。因此,本条规定在风荷载标准值作用下,框架柱顶水平位移不宜超过  $H/300$ 。围护结构构件的容许值是根据行业标准《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ 102 采用的,铝合金屋面板和墙面板是指连续支承的大面积结构面板,其挠度控制值是根据板的强度和建筑要求,同时结合我国实践经验给出的限值。墙面装饰铝板不在本规范范围内,其挠度控制值根据《玻璃幕墙工程技术规范》JGJ 102 和《金属与石材幕墙工程技术规范》JGJ 133 的规定取值。

#### 4.5 构件的计算长度和容许长细比

4.5.1、4.5.2 构件的计算长度与构件的支承条件有关,在材料弹

性状态下,铝合金结构的构件计算长度参照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中有关内容编写。

**4.5.3** 铝合金平板网架和曲面网架是指采用铰接节点的网格结构,铝合金单层网壳是指采用刚接节点的网格结构。

**4.5.4、4.5.5** 条文参照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 中有关内容编写。

**4.5.6** 在铝合金结构中,当构件长细比大于 150 时,稳定系数  $\varphi$  值很小,在网架结构的实际工程中,构件长细比大于 150 的情况比较少。考虑到以上情况并参照国家标准《钢结构设计规范》GB 50017 关于柱、桁架的受压构件容许长细比,本规范规定平板网架杆件的容许长细比为 150。

## 5 板件的有效截面

### 5.1 一般规定

**5.1.1** 因铝合金弹性模量小,局部稳定问题突出。若限制受压板件的宽厚比,保证构件整体破坏前不发生局部屈曲,即不利用板件的屈曲后强度,则受压板件应满足较小的宽厚比限值(约为钢板件宽厚比的 1/2,参考条文第 5.2.1 条),设计出的截面不很经济;另外,考虑到目前国内多数厂家提供的铝合金幕墙型材均较薄,不能满足上述宽厚比限值。在借鉴发达国家铝合金结构设计规范编制经验的基础上(如欧规和英规都容许利用板件的屈曲后强度),本规范容许利用受压板件的屈曲后强度,并按有效截面法考虑局部屈曲对构件整体承载力的影响,以便更好地发挥材料性能。

**5.1.2** 本规范采用有效截面法考虑焊接热影响效应对构件承载力的不利影响。

**5.1.3** 铝合金构件多为挤压型材,截面形状复杂,加劲形式多样,采用有效宽度法计算有效截面时涉及到有效宽度在截面中如何分布的问题,这将导致计算更加复杂,所以本规范参考欧规和英规的编制经验,采用有效厚度法计算铝合金构件的有效截面。另外,采用有效厚度法便于统一计算原则,因为板件有效厚度的概念既可以用于考虑局部屈曲的影响,也可以用于考虑焊接热影响效应。但是应该指出:对于非轴心受压构件,即使采用同样的有效截面折算系数  $\rho = t_c/t = b_c/b$ ,由于按各自简化模型确定的截面中和轴位置和有效截面模量等参数有所不同,求得的截面承载力也会略有差异,如图 3 所示;经比较,按有效厚度法计算出的构件承载力略高于有效宽度法的计算结果,但两者均低于数值分析的结果。



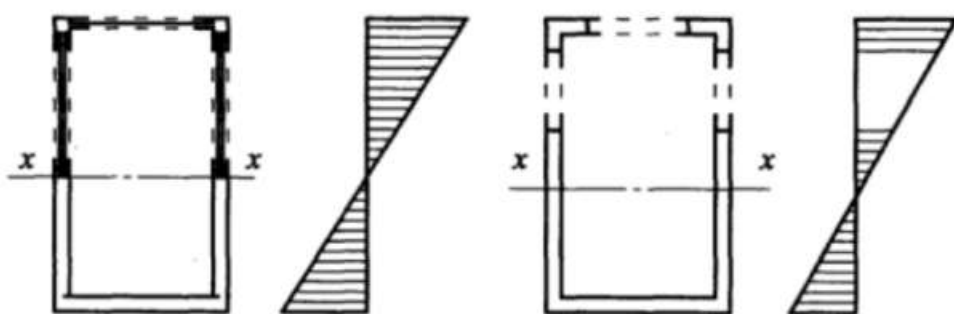


图3 分别按有效厚度法(左)及有效宽度法(右)确定的有效截面

5.1.4 板件分类主要依据《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 的板件分类法,并参考了欧规的相关规定。

## 5.2 受压板件的有效厚度

5.2.1 本条给出了受压板件全部有效的宽厚比限值,当板件宽厚比小于上述限值时,板件全截面有效,构件承载力不受局部屈曲的影响。该限值主要受材料硬化性能、名义屈服强度、板件应力梯度、加劲肋形式的影响。

目前,铝合金材料的本构关系广泛采用 Ramberg-Osgood 模型,该模型中的指数  $n$  是描述应变硬化的参数, $n$  值越小应变硬化程度越高。国内外的研究成果表明, $n$  值可以较好地反映铝合金材料的力学特性,因此可利用参数  $n$  将铝合金材料分为弱硬化合金和强硬化合金以考虑铝合金材性对构件力学性能的影响。本规范在受压板件宽厚比限值、有效厚度、受弯构件整体稳定、轴心受压构件稳定和压弯构件稳定等计算中验证了这种分类方法。欧规也采用弱硬化合金和强硬化合金的分类方法。

$n$  值应由材性试验确定,目前各国规范一般都不提供  $n$  值。这样,直接利用  $n$  值来区分弱硬化合金和强硬化合金很难实现。不过, $n$  值主要是由铝合金材料的状态决定的,热处理合金的  $n$  值一般较大。本规范采用欧规的相应公式计算了附录 A 中各种铝合金材料的  $n$  值,结果表明以铝合金材料的状态代替  $n$  值来区分弱硬化合金和强硬化合金是较为合适的,即规定状态为 T6 的铝合金材料为弱硬化合金,状态为除 T6 以外的其他铝合金材料为

强硬化合金。

**5.2.3** 本条中式(5.2.3-1)由受压板件有效宽度的 winter 公式转换推导而得。根据国外研究成果并参考欧规,确定了计算系数  $\alpha_1, \alpha_2$ ; 通过与国外的铝合金薄壁短柱试验数据和大量的数值分析结果比较,表明该公式完全适用于铝合金受压板件的计算。考虑到轴压非双轴对称构件中的非加劲板件或边缘加劲板件(例如槽形截面或 C 形截面的翼缘以及角形截面的外伸肢)受压屈曲后,截面形心及剪心均有所偏移,形成次弯矩促进构件稳定承载力的进一步降低,故本规范不考虑利用该类板件的屈曲后强度,其有效厚度按本条式(5.2.3-2)计算。

参考国外铝合金结构设计规范,本规范没有给出受压板件的最大宽厚比限值。

**5.2.4、5.2.5** 受压板件局部稳定系数计算公式参考了《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018 和《欧洲钢结构设计规范》EC3。需要指出的是:涉及到如何考虑应力梯度对不均匀受压板件有效厚度的影响时,本规范与欧规及英规的处理方法略有差异。本规范采用以压应力分布不均匀系数  $\psi$  计算屈曲系数  $k$  的方法;而在欧规及英规中采用以压应力分布不均匀系数  $\psi$  计算换算宽厚比的方法。两种方法只是在公式表述形式上有所不同,本质上仍是一致的。

**5.2.6、5.2.7** 加劲肋修正系数  $\eta$  用于计算加劲肋对受压板件局部屈曲承载力的提高作用。第 5.2.6 条给出了常见三种加劲形式  $\eta$  的计算公式,该公式来自于  $\eta = \sigma_{cr} / \sigma_{cr0} = k / k_0$ , 其中  $\sigma_{cr}$  为带加劲肋单板的弹性屈曲应力理论解,  $k$  为屈曲系数。以边缘加劲板件为例,图 4 绘出了加劲肋厚度与板件厚度相同时板件宽厚比  $\beta = 15$  和  $\beta = 30$  两种情况下,屈曲系数  $k$  与加劲肋高厚比  $c/t$  的关系。由图可见,屈曲系数与板件屈曲波长有关。当屈曲半波较长时,增大加劲肋的高厚比,不能显著地提高边缘加劲板件的屈曲系数,也即不能显著提高板件的临界屈曲应力。然而,考虑到实际构件中

板件屈曲的相关性,其屈曲半波长度一般不超过 7 倍板宽,通常可以取屈曲半波长度与宽度的比值  $l/b=7$  来确定边缘加劲板件的屈曲系数  $k$ 。图 5 是板件屈曲半波长度等于 7 倍板宽时,板件宽厚比等于 10、20、30、40 四种情况下,边缘加劲板件的屈曲系数与加劲肋高厚比的关系。由图可见,式(5.2.6-2)给出了相对保守的计算结果。

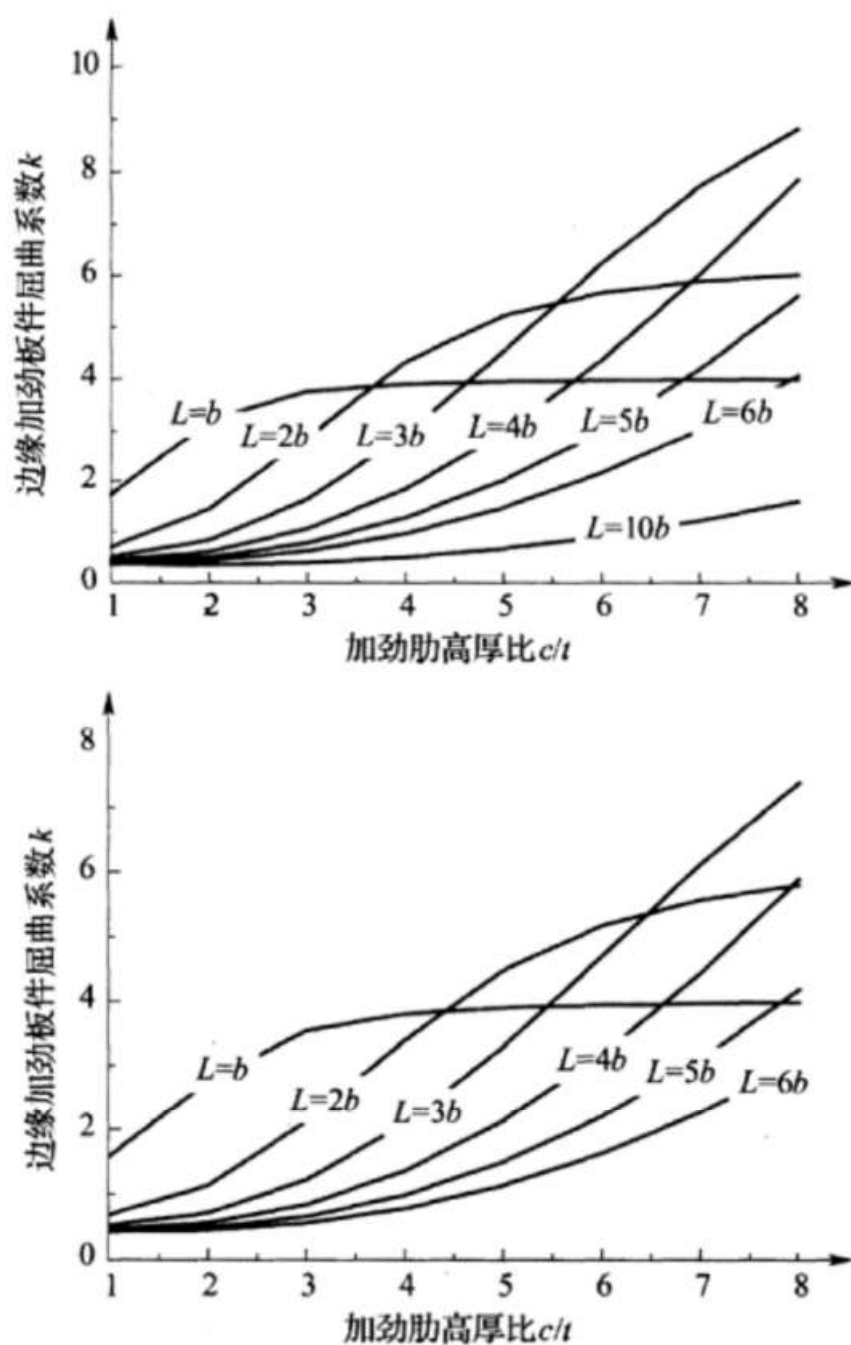


图 4 加劲肋高厚比与加劲系数的关系  
(上图板件宽厚比  $\beta=15$ , 下图板件宽厚比  $\beta=30$ )

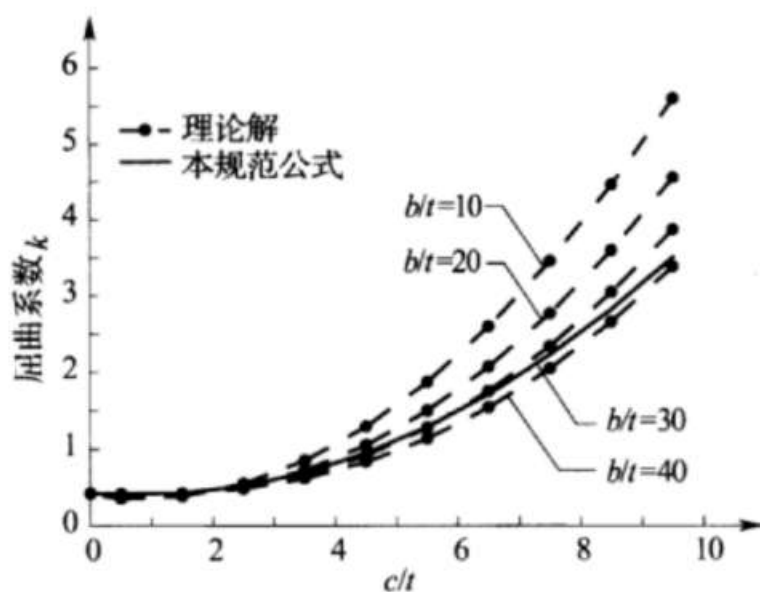


图5 边缘加劲板件在不同宽厚比情况下的屈曲系数

对于更复杂的加劲形式,一般很难通过弹性屈曲理论分析获得屈曲系数  $k$  和加劲肋修正系数  $\eta$ 。在此情况下,  $\eta$  应按式(5.2.6-5)计算,其中  $\sigma_{cr}$  为假定加劲边简支的情况下,该复杂加劲板件的临界屈曲应力;可以按有限元法或有限条分法计算。 $\sigma_{cr0}$  为假定加劲边简支的情况下,不考虑加劲肋作用,同样尺寸的加劲板件的临界屈曲应力,可按公式(5.2.6-1)计算,并取  $\eta=1.0$ 。在公式(5.2.6-5)中取指数为 0.8 而非 1.0,这样做是偏于保守的。在缺乏计算依据或不能按式(5.2.6-5)计算时,建议忽略加劲肋的加劲作用,即取  $\eta=1.0$ 。

**5.2.8** 当中间加劲板件或边缘加劲板件的加劲肋高厚比过大时,加劲肋本身可能先于板件局部屈曲,这时应将加劲肋视为非加劲板件,将子板件视为加劲板件分别计算其有效厚度  $t_e$ ,加劲肋和子板件的最终有效厚度应取上述有效厚度和将其作为整体按第 5.2.3 条计算的有效厚度这两者中的较小值。

### 5.3 焊接板件的有效厚度

**5.3.1、5.3.2** 对于焊接铝合金构件,采用有效厚度法计算有效截面时,通常采用假定热影响区内母材强度不变而折减厚度的方法考虑热影响区内的材料强度降低效应。

## 5.4 有效截面的计算

5.4.3 受弯构件或压弯构件中,不均匀受压加劲板件的有效厚度依赖于压应力分布不均匀系数 $\psi$ ,而计算 $\psi$ 首先应确定截面中和轴位置,但中和轴位置又取决于各板件有效厚度在全截面中的分布,因此,需要通过迭代计算确定中和轴位置后才可以计算其他有效截面参数。当中和轴位于截面形状发生变化部分的附近时(例如工字形截面腹板和翼缘交界处),迭代计算可能发生振荡不易收敛。因中和轴附近受压区域的板件实际应力很小,不易发生局部屈曲,迭代计算时可不考虑该区域板件的厚度折减以保证计算的收敛性。

有效截面特性按下述迭代方法进行计算:

- 1 计算受压翼缘的有效截面。
- 2 假定腹板全部有效(不考虑局部屈曲影响,但对于焊接情况,仍应考虑焊接热影响效应,按第 5.4.1 条第 2 款确定腹板有效截面)确定中和轴位置。
- 3 根据中和轴位置计算腹板的压应力分布不均匀系数 $\psi$ ,并按第 5.4.1 条第 3 款确定腹板的有效截面。
- 4 根据第 3 步确定的腹板有效截面再次计算中和轴位置。
- 5 重复步骤第 3、4 步直至两次计算的腹板有效截面厚度及中和轴位置近似相等。
- 6 根据最后确定的中和轴位置及各受压板件的有效截面计算有效截面惯性矩  $I_e$  及有效截面模量  $W_e$ ,  $W_e$  为距中和轴较远的受压侧有效截面模量。

## 6 受弯构件的计算

### 6.1 强 度

6.1.1 计算梁的抗弯强度时,考虑截面可以部分地发展塑性,故式(6.1.1)中引进了截面塑性发展系数 $\gamma_x, \gamma_y$ 。但是应该指出:对于铝合金结构而言,截面抵抗弯矩不仅取决于截面塑性抵抗矩,还与材料的非弹性性能有关。文献《铝合金结构》(意大利 马佐拉尼 著)的研究认为: $\gamma_x, \gamma_y$ 的取值原则应是:保证梁在均匀弯曲作用下,跨中残余挠度 $\nu_r$ 小于其跨长的1%。当采用材料名义屈服强度计算截面抵抗弯矩时,即按下式

$$M = \gamma' W f_{0.2} = \gamma' M_{0.2} \quad (4)$$

确定的截面塑性发展系数 $\gamma'_x, \gamma'_y$ 往往小于1。这是因为根据铝合金材料的 $\sigma \sim \epsilon$ 关系,应力区间 $f_p < \sigma < f_{0.2}$ 是在非弹性范围内的。当截面边缘应力达到 $f_{0.2}$ 再卸载时,结构已经发生残余变形。按上述原则确定的工字截面的塑性发展系数 $\gamma'$ 如图6、图7所示。图中 $L$ 为梁长, $h$ 为梁高度, $\alpha_p = W_p/W$ 为截面形状系数, $W_p$ 为塑性截面模量, $W$ 为弹性截面模量。由图可见,在跨高比较大,形状系数较小和材料为弱硬化合金的情况下,满足跨中残余挠度要求的 $\gamma'_y$ 往往小于1。但考虑到式(6.1.1)中采用了强度设计值 $f = f_{0.2}/\gamma_R$ ,而变形验算针对正常使用极限状态,通常采用强度标准值,故最后确定的截面塑性发展系数可适当放宽,即当塑性发展系数小于1时取1。

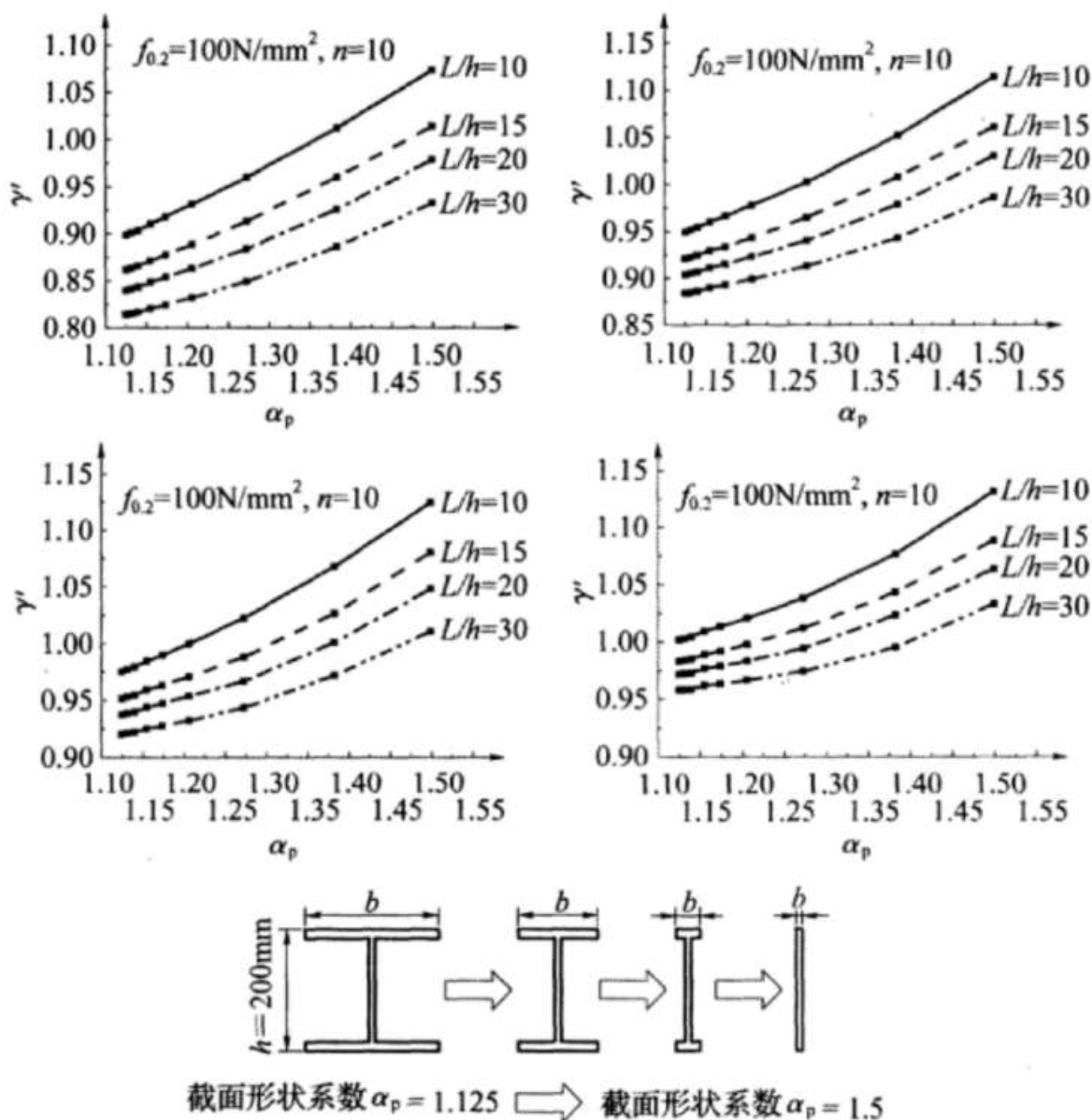
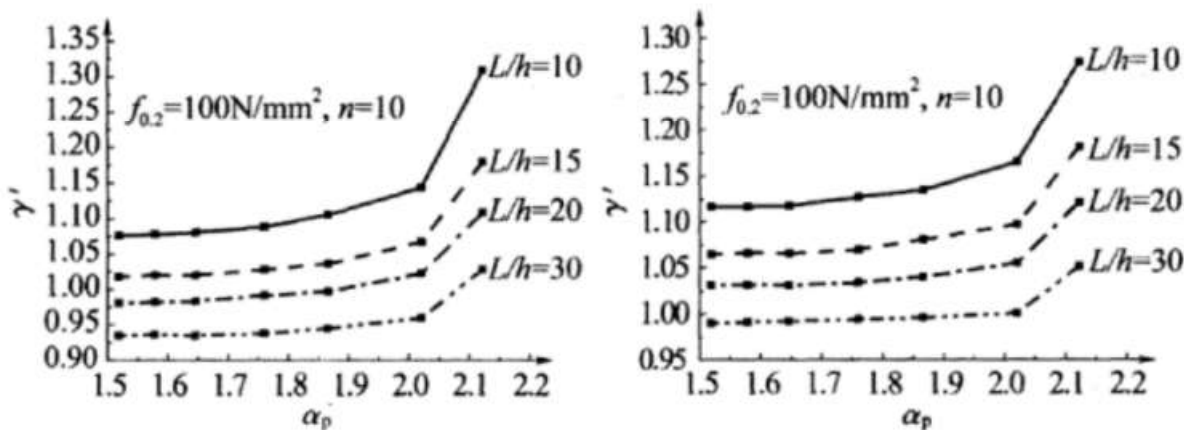


图6 工字形截面绕强轴的塑性发展系数  $\gamma'_x$



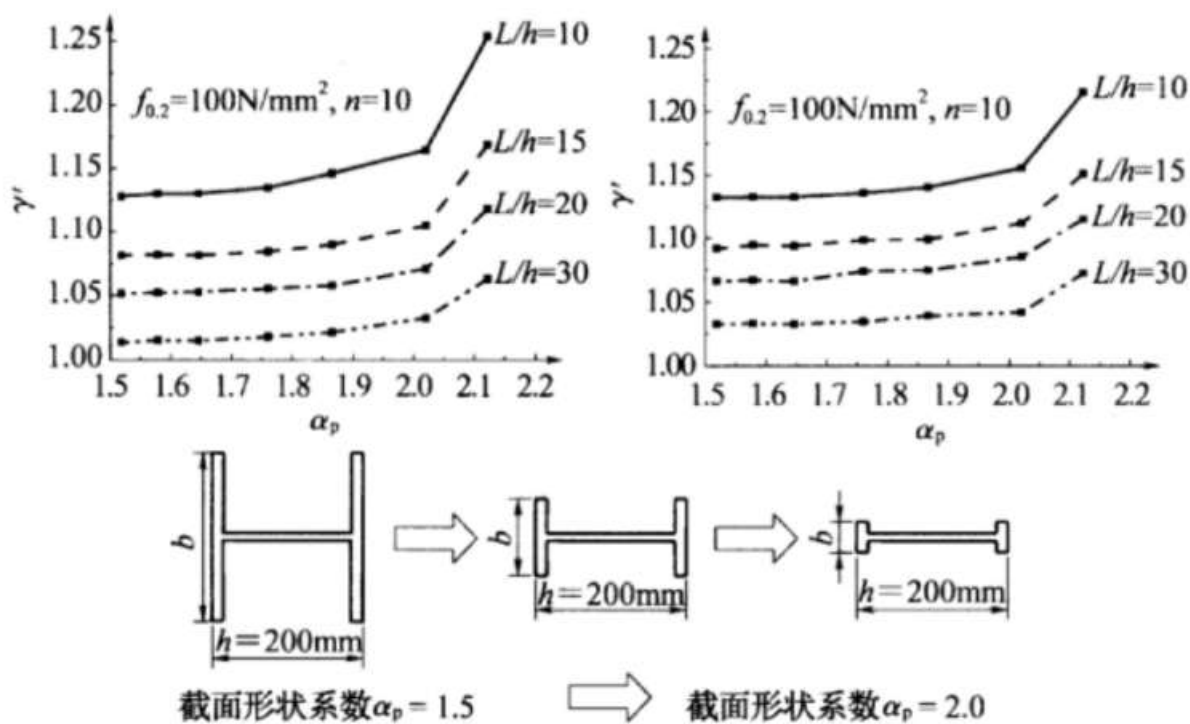


图7 工字形截面绕弱轴的塑性发展系数  $\gamma_y'$

## 6.2 整体稳定

**6.2.1** 当有铺板密铺在梁的受压翼缘上并与其牢固连接,能阻止受压翼缘的侧向位移时,梁就不会丧失整体稳定,因此也不必计算梁的整体稳定性。对于工字形截面不需要验算整体稳定时的  $l/b$  值主要参考钢规并结合铝合金材料性能给出。

**6.2.2** 铝合金梁的弯扭稳定系数  $\varphi_b$  为弯扭屈曲应力与材料名义屈服强度的比值,由 Perry 公式给出,这样梁与柱的稳定曲线有统一的表达形式;式中  $\eta$  为计及构件几何缺陷的 Perry-Robertson 系数,可以采用不同的取值方法,其中欧规建议的缺陷系数形式为:

$$\eta = \alpha_b (\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{0,b}) \quad (5)$$

式中,参数  $\alpha_b$ 、 $\bar{\lambda}_{0,b}$  对稳定系数  $\varphi_b$  有着不同的影响:当  $\alpha_b$  不变时, $\bar{\lambda}_{0,b}$  越大,受弯构件在较小长细比情况下的稳定系数越高;而当  $\bar{\lambda}_{0,b}$  不变时, $\alpha_b$  越小,构件在中等长细比情况下的稳定系数越高。

分析表明,影响弯扭屈曲应力的因素主要有:①合金材料性能,②构件的截面形状及其尺寸比,③荷载类型及其在截面上的作



用点位置,④跨中是否有侧向支承和端部约束情况,⑤初始变形、加载偏心 and 残余应力等初始缺陷,⑥截面的塑性发展性能等。本规范根据不同合金材料、不同荷载作用形式下各类工字形截面、槽形截面、T形截面梁的数值模拟计算结果,经统计分析后得出 $\alpha$ 、 $\bar{\lambda}_0$ 的取值,从而确定梁的弹塑性弯扭稳定系数计算公式。图8和图9给出了同济大学完成的10根跨中集中力作用下工字形截面梁和10根槽形截面梁的弯扭稳定试验结果、有限元计算值、本规范公式以及欧规公式的计算结果。对于槽形梁,考虑其截面受压部分局部屈曲的影响,按有效截面模量进行计算。由图可知:本规范给出的公式与有限元计算值和试验实测值基本吻合并偏于安全;对于工字形截面,由于本规范在计算其弯扭稳定时未考虑截面的塑性发展,故给出的计算结果较欧规计算结果偏小。

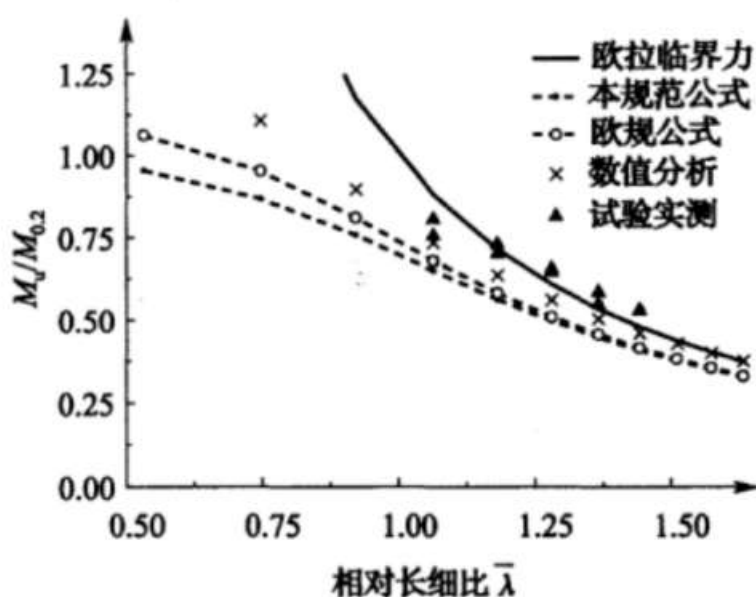


图8 工字形截面梁弯扭稳定极限承载力曲线比较

本条给出的临界弯矩计算公式适用于对称截面以及单轴对称截面绕对称轴弯曲的情况。但对于绕非对称轴弯曲的截面,如单轴对称工字形截面绕强轴弯曲时,临界弯矩计算式中 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 的取值存在一定争议,见《薄壁钢梁稳定性计算的争议及其解决》(童根树,建筑结构学报,2002)。本条给出的 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 均参考欧规。

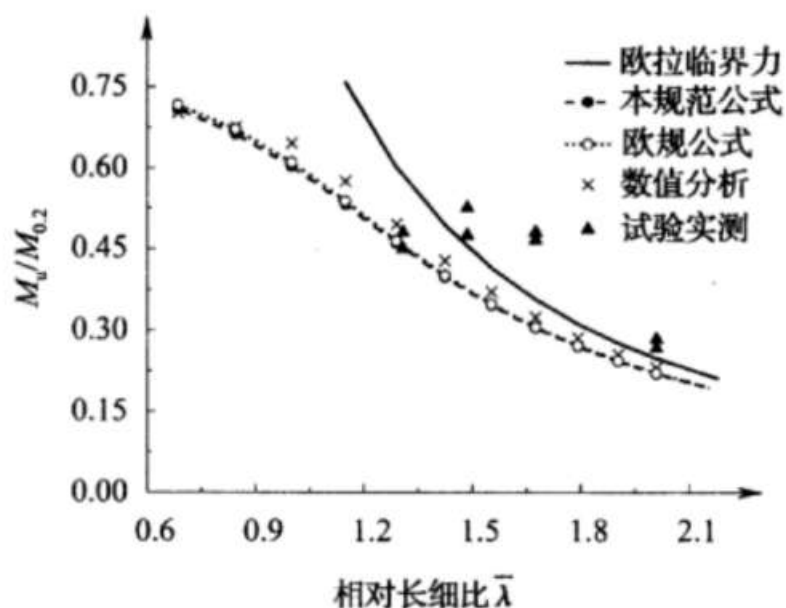


图9 槽形截面梁弯扭稳定极限承载力曲线比较

本条中给出的翘曲计算长度系数  $\mu_w = 1.0$  适用于端部夹支的边界约束条件；对于端部有端板固定或端部支座有加劲肋板的情况，虽然翘曲约束有所增强，但根据文献《钢结构设计原理》（陈绍蕃）的分析以及欧规的规定，除非端部加劲板的厚度用得很大，否则其对梁端翘曲的约束作用在计算中可以忽略，故这里仍采用  $\mu_w = 1.0$ 。

用作减小梁侧向计算长度的跨间侧向支撑应具有足够的侧向刚度并与受压翼缘相连，以提供足够的支撑力阻止受压翼缘的侧向位移。采用多道支撑时，偏于安全按跨中一道支撑考虑，取计算长度系数为 0.5。

**6.2.3 铝合金梁整体失稳时，梁将发生较大的侧向弯曲和扭转变形，因此为了提高梁的稳定承载能力，任何梁在其端部支承处都应采取构造措施，以防止其端部截面的扭转。**

## 7 轴心受力构件的计算

### 7.1 强 度

7.1.1 本条为轴心受拉构件的强度计算要求。

从轴心受拉构件的承载能力极限状态来看,可分为两种情况:

1 毛截面的平均应力达到材料的名义屈服强度,构件将产生很大的变形,即达到不适于继续承载的变形的极限状态。其计算式为:

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq \frac{f_{0.2}}{\gamma_R} = f \quad (6)$$

式中抗力分项系数  $\gamma_R$  按第 4.3.2 条取 1.2。

2 考虑焊接热影响的净截面的平均应力达到材料的抗拉强度  $f_u$ ,即达到最大承载能力的极限状态,其计算式为:

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq \frac{f_u}{\gamma_{uR}} = \frac{\gamma_R}{\gamma_{uR}} \cdot \frac{f_u}{f_{0.2}} \cdot \frac{f_{0.2}}{\gamma_R} \approx \left(0.923 \frac{f_u}{f_{0.2}}\right) \cdot \frac{f_{0.2}}{\gamma_R} \quad (7)$$

式中  $\gamma_{uR}$  为局部强度计算情况下的抗力分项系数,按第 4.3.2 条取 1.3。

对于附录 A 中所列的铝合金材料,其屈强比均小于或很接近于 0.923,为简化计算,本规范偏于安全地采用了净截面处应力不超过名义屈服强度的计算方法,采用下式[即本规范式(7.1.1)]:

$$\sigma = \frac{N}{A_{en}} \leq \frac{f_{0.2}}{\gamma_R} = f \quad (8)$$

如果采用了屈强比更大的铝合金材料,宜用式(6)和式(7)来

计算,以确保安全。

**7.1.2** 当轴心受压构件截面有所削弱(如开孔或缺口等)时,应按式(7.1.2)计算其强度,式中  $A_{en}$  为有效净截面面积,应根据考虑局部屈曲及焊接影响的有效厚度计算有效截面,再减去截面孔洞面积得到有效净截面面积  $A_{en}$ 。

**7.1.3** 摩擦型高强度螺栓连接处,构件的强度计算公式是从连接的传力特点建立的。规范中的式(7.1.3-1)为计算最外排螺栓处由螺栓孔削弱的截面,在该截面上考虑了内力的一部分已由摩擦力在孔前传递。式中的系数 0.5 即为孔前传力系数。孔前传力系数大多数情况可取为 0.6,少数情况为 0.5。为了安全可靠,本规范取 0.5。某些情况下,构件强度可能由毛截面应力控制,所以要求同时按式(7.1.3-2)计算毛截面强度。

## 7.2 整体稳定

**7.2.1、7.2.2** 本条为轴心受压构件的稳定性计算要求。

1 轴心受压构件的稳定系数  $\varphi$  是根据构件的长细比  $\lambda$  按规范附录 B 的各表查出,表中  $\lambda\sqrt{f_{0.2}/240}$  为考虑不同铝合金材料对长细比  $\lambda$  的修正。采用非线性函数的最小二乘法将各类截面的理论  $\varphi$  值拟合为 Perry-Roberson 公式形式的表达式:

$$\varphi = \left( \frac{1}{2\bar{\lambda}^2} \right) \left\{ (1 + \eta + \bar{\lambda}^2) - [(1 + \eta + \bar{\lambda}^2)^2 - 4\bar{\lambda}^2]^{1/2} \right\}, \text{且 } \varphi \leq 1 \quad (9)$$

式中  $\eta = \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0)$  为构件考虑初始弯曲及初偏心的系数。对于弱硬化材料构件:  $\alpha = 0.2, \bar{\lambda}_0 = 0.15$ ; 对于强硬化材料构件:  $\alpha = 0.35, \bar{\lambda}_0 = 0.1$ 。  $\bar{\lambda} = (\lambda/\pi)\sqrt{f_{0.2}/E}$  为相对长细比。

图 10 为弱硬化合金柱子曲线与国内试验值的比较情况。图 11 为强硬化合金柱子曲线与试验值的比较情况,由于国内未进行强硬化合金的试验研究,该试验值来自于国外的试验结果。从试验值与公式计算结果的比较看,两者吻合较好。

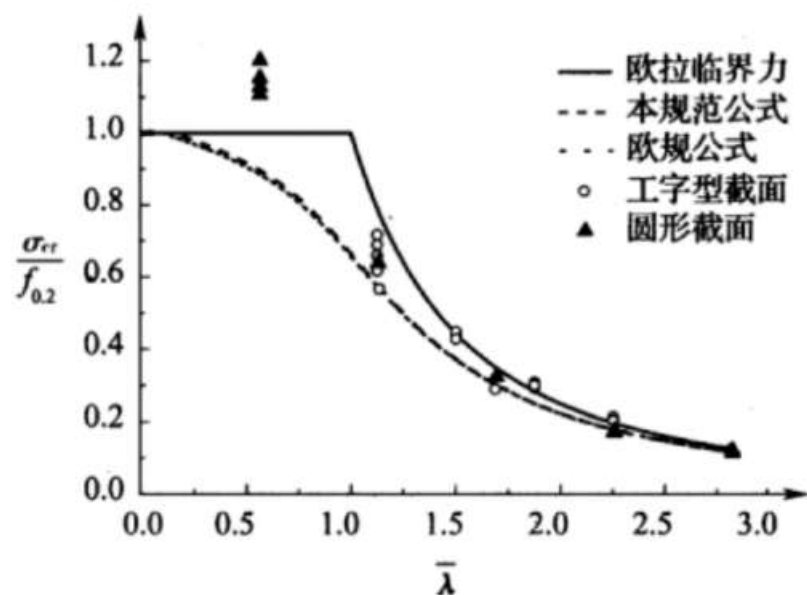


图 10 柱子曲线与试验值(弱硬化合金)

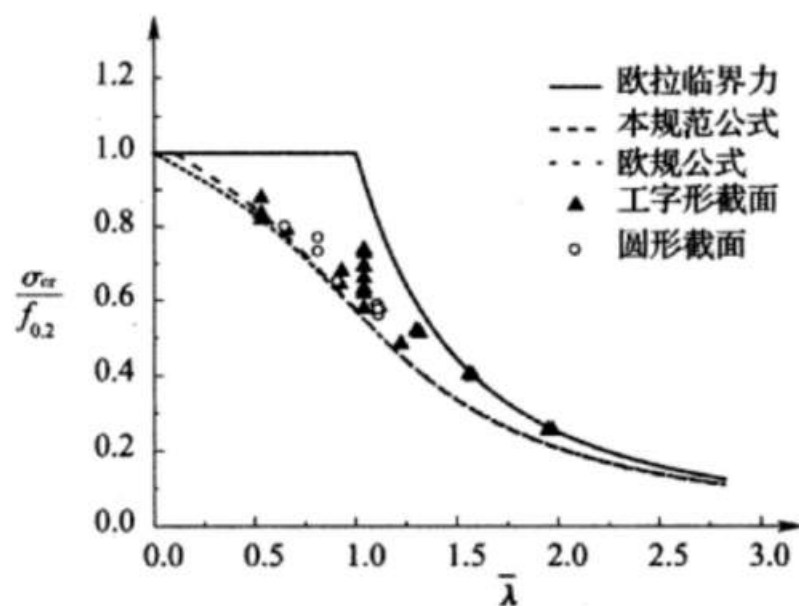


图 11 柱子曲线与试验值(强硬化合金)

2 焊接缺陷影响系数  $\eta_{\text{haz}}$  考虑了焊接对受压构件承载力的降低作用。 $\eta_{\text{haz}}$  是根据 F. M. 马佐拉尼等人大量的数值模拟结果及在列日大学所进行的试验研究的基础上得出的;并经过了在同济大学结构试验室所进行的几十根焊接受压构件的试验验证。从试验值与公式计算结果的比较看,两者吻合较好,并偏于安全(见图 12)。

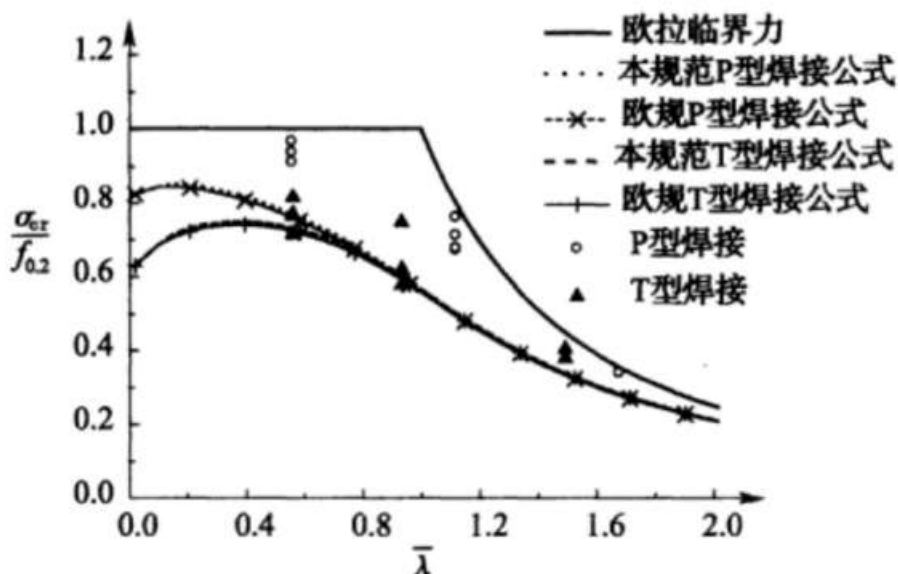


图 12 修正柱子曲线与试验值(弱硬化合金)

注:P型焊接:将两块挤压T型截面和一块作为腹板的轧制平板焊接组成H型截面;T型焊接:将三块轧制平板焊接组成H型截面。

3 当截面中受压板件宽厚比较大,不满足全截面有效的宽厚比要求时,应采用修正系数  $\eta_e$  对截面进行折减。

4 对于十字形截面轴压构件,除应按本条进行验算外,尚应考虑其扭转失稳,设计中应采用必要的构造措施防止其发生扭转失稳。

7.2.3 鉴于工程上不会采用轴压焊接单轴对称截面构件以及轴压不对称截面构件,因此本规范仅给出了非焊接单轴对称截面的稳定计算公式。

系数  $\eta_{as}$  为构件截面非对称性影响系数,该系数是在欧规相应计算公式基础上经数值分析验证给出的。

根据弹性稳定理论,对于两端简支的轴心受压构件,其弯扭屈曲荷载为:

$$P_{y\omega} = \frac{(P_y + P_\omega) - \sqrt{(P_y + P_\omega)^2 - 4P_y P_\omega [1 - (e_0/i_0)^2]}}{2[1 - (e_0/i_0)^2]} P_y \quad (10)$$

构件发生弹性弯扭屈曲的条件是  $P_{y\omega}$  应小于绕截面非对称轴

的弯曲屈曲荷载  $P_x = \pi^2 EI_x / l^2$ ，而且截面的应力小于比例极限。

将  $P_y = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_y^2}$ ， $P_\omega = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_\omega^2}$  和  $P_{y\omega} = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_{y\omega}^2}$  代入公式(10)，可得：

$$\lambda_{y\omega} = \left\{ \frac{1}{2} \left[ \lambda_y^2 + \lambda_\omega^2 + \sqrt{(\lambda_y^2 + \lambda_\omega^2)^2 - 4\lambda_y^2 \lambda_\omega^2 (1 - e_0^2 / i_0^2)} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

上式即为规范公式(7.2.3-2)，其中，

$\lambda_y$ ——构件绕对称轴长细比， $\lambda_y = l_{0y} / i_y$ ；

$\lambda_\omega$ ——扭转屈曲等效长细比，由式  $P_\omega = \frac{\pi^2 EA}{\lambda_\omega^2}$  及弹性扭转屈

曲承载力公式  $P_\omega = \frac{1}{i_0^2} \left( \frac{\pi^2 EI_\omega}{l_\omega^2} + GI_t \right)$  可得： $\lambda_\omega =$

$$\sqrt{\frac{i_0^2 A}{\frac{GI_t}{\pi^2 E} + \frac{I_\omega}{l_\omega^2}}}$$

图 13 为单轴对称截面弱硬化合金柱子曲线与我国试验值的比较情况。从试验值与公式计算结果的比较看，总体上在考虑弯扭失稳后两者吻合较好。在中等长细比情况下，构件的试验值偏高。

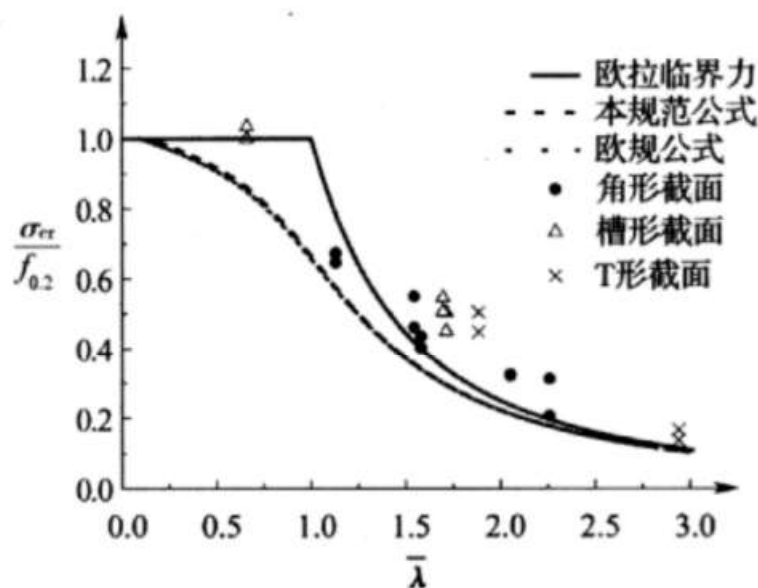


图 13 构件弯扭稳定试验值与规范公式比较

7.2.4 对于端部为焊接连接的构件，即使其端部连接为刚接，但

由于焊接热影响效应的存在使其刚度大大降低,故在计算受压构件长细比时,其计算长度取值应偏保守的按铰接考虑。由于状态 O、F 和 T4 的铝合金材料焊接后强度不下降,因此不用考虑焊接热影响效应对构件计算长度产生的影响。



## 8 拉弯构件和压弯构件的计算

### 8.1 强 度

8.1.1 在轴力和弯矩的共同作用下,如按边缘纤维屈服准则, $N-M$  相关曲线应为直线。考虑截面内的塑性发展后,截面强度计算值大于按边缘纤维屈服准则得到的值,即  $N-M$  相关曲线呈凸曲线。这时,按线性相关公式计算是偏于安全的。本规范采用塑性发展系数来考虑截面的部分塑性发展,取值与受弯构件相一致。

### 8.2 整体稳定

8.2.1 压弯构件的整体稳定要进行弯矩作用平面内和弯矩作用平面外稳定计算。

1 弯矩作用平面内的稳定。压弯构件的稳定承载力极限值,不仅与构件的长细比  $\lambda$  和偏心率  $\epsilon$  有关,且与构件的截面形式和尺寸、构件轴线的初弯曲、截面上残余应力的分布和大小、材料的应力-应变特性、端部约束条件以及荷载作用方式等因素有关。因此,本规范采用了考虑上述各种因素的数值分析法,并将承载力极限值的理论计算结果作为确定实用计算公式的依据。

考虑抗力分项系数并引入弯矩非均匀分布时的等效弯矩系数后,由弹性阶段的边缘屈服准则可以导出下式:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} (1 - \varphi_x N / N'_{Ex})} \leq f \quad (12)$$

式中  $N'_{Ex}$ ——参数,  $N'_{Ex} = N_{Ex} / 1.2$ ; 相当于欧拉临界力  $N_{Ex}$  除以抗力分项系数  $\gamma_R = 1.2$ 。

对于满足截面宽厚比限值的压弯构件可以考虑截面部分塑性发展。此时压弯构件采用下式较为合理:

$$\frac{N}{\varphi_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{1x} (1 - \eta_1 N/N'_{Ex})} \leq f \quad (13)$$

式中  $\eta_1$ ——修正系数。

对于单轴对称截面(即 T 形和槽形截面)压弯构件,当弯矩作用在对称轴平面内且使翼缘受压时,无翼缘端有可能由于拉应力较大而首先屈服。对此种情况,尚应对无翼缘侧采用下式进行计算:

$$\left| \frac{N}{A} - \frac{\beta_{mx} M_x}{W_{2x} (1 - \eta_2 N/N'_{Ex})} \right| \leq f \quad (14)$$

式中  $\eta_2$ ——压弯构件受拉侧的修正系数。

修正系数  $\eta_1$  和  $\eta_2$  值与构件长细比、合金种类、截面形式、受弯方向和荷载偏心率等参数有关。针对上述各种参数进行大量数值计算,并将承载力极限值的理论计算结果代入式(13)和式(14),可以得到一系列  $\eta_1$  和  $\eta_2$  值。分析表明, $\eta_1$  和  $\eta_2$  值与铝合金的材料类型关系较大,根据弱硬化合金和强硬化合金对  $\eta_1$  和  $\eta_2$  分别取值较为合适。

与轴压构件相同,压弯构件当截面中受压板件的宽厚比大于表 5.2.1-1 或表 5.2.1-2 规定时,还应考虑局部屈曲的影响。本规范还考虑了截面非对称性和焊接缺陷的影响。在引入轴压构件稳定计算系数  $\bar{\varphi}_x$  后,相关式(13)和式(14)成为:

$$\frac{N}{\bar{\varphi}_x A} + \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{1ex} (1 - \eta_1 N/N'_{Ex})} \leq f \quad (15)$$

$$\left| \frac{N}{A_e} - \frac{\beta_{mx} M_x}{\gamma_x W_{2ex} (1 - \eta_2 N/N'_{Ex})} \right| \leq f \quad (16)$$

式(15)和式(16)即为规范式(8.2.1-1)和式(8.2.1-2)。

同济大学针对铝合金压弯构件弯矩平面内的稳定做了相关试验,包括 6 根绕弱轴受弯的偏压试件和 6 根绕强轴受弯的偏压试件,均为双轴对称 H 形截面弱硬化合金。图 14 为上述试验所得稳定承载力与数值计算结果的比较情况,可见两者吻合得较好。图 15 为规范式(8.2.1-1)与数值计算结果和欧洲规范相应公式的比较情况,可见本规范公式是偏于安全的。

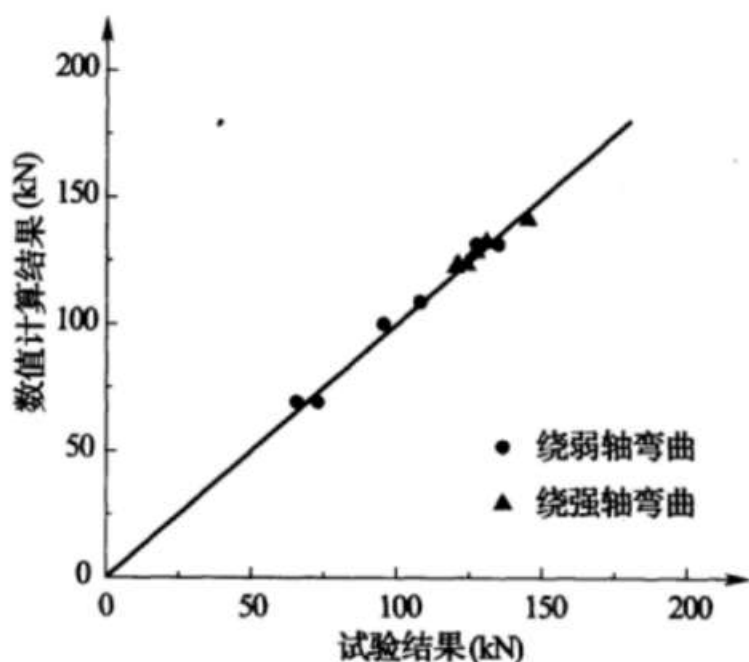


图 14 面内失稳试验结果与数值计算结果的对比

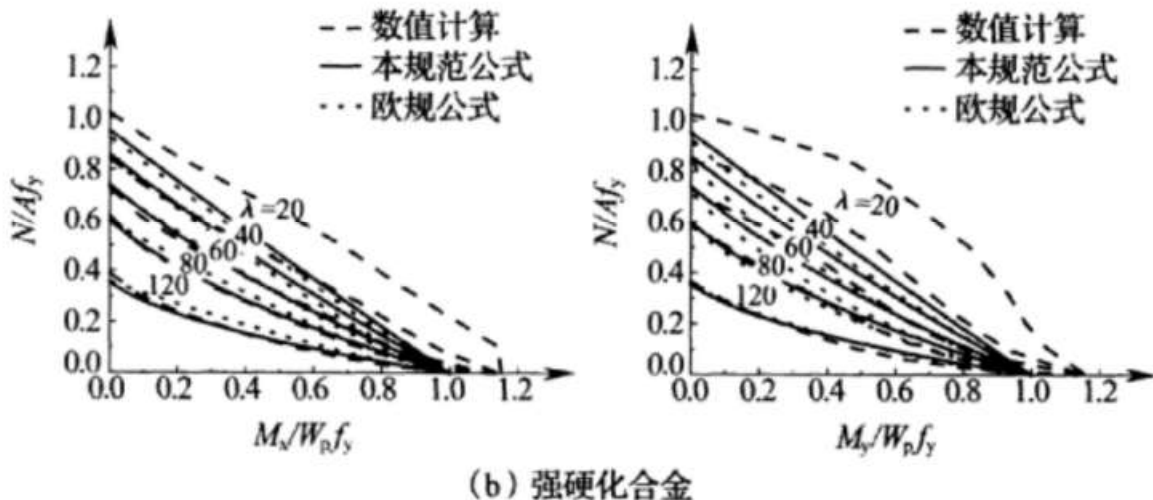
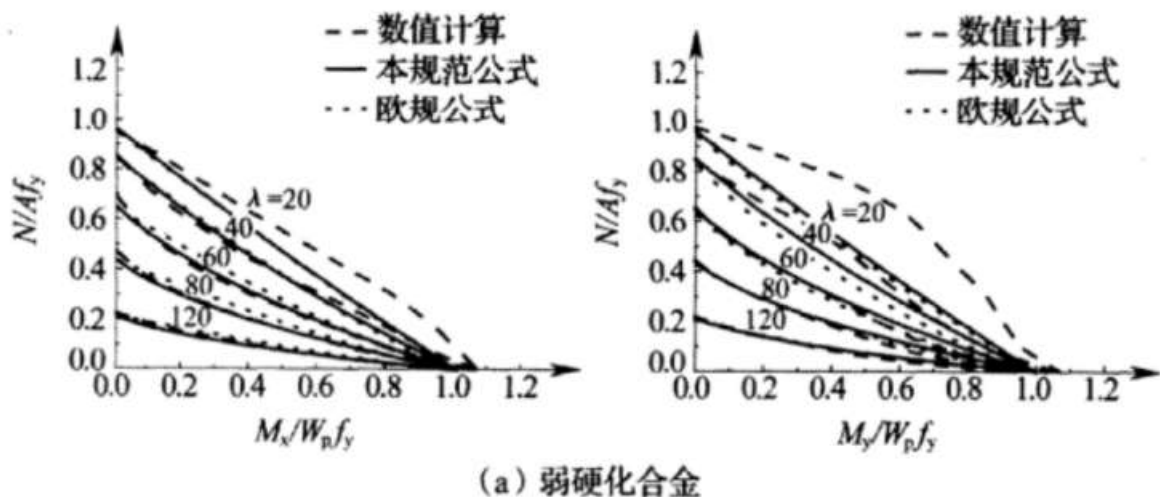


图 15 本规范结果与数值计算结果和欧规结果的对比  
( $x$  为强轴,  $y$  为弱轴)

2 弯矩作用平面外的稳定。双轴对称截面的压弯构件,当弯矩作用在最大刚度平面内时,应校核其弯矩作用平面外的稳定性。规范采用的由弹性稳定理论导出的线性相关公式是偏于安全的,与轴心受压构件和受弯构件整体稳定计算相衔接,并与理论分析结果和同济大学做的试验结果作了对比分析后确定的。

同济大学针对铝合金压弯构件弯矩平面外的稳定做了相关试验,为6根绕强轴受弯的双轴对称H形截面弱硬化合金偏压试件。图16为该试验所得稳定承载力与数值计算结果和欧洲规范相应公式的比较情况,可见本规范公式是偏于安全的。

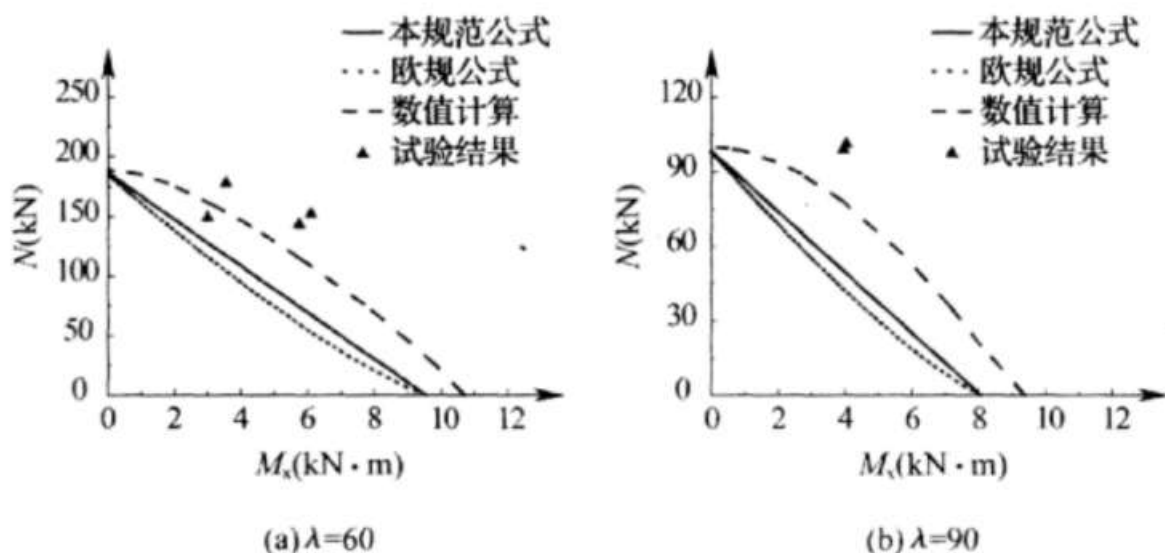


图 16 本规范结果与试验结果、数值计算结果以及欧规结果的对比

鉴于对单轴对称截面压弯构件弯矩作用平面外稳定性的研究还不充分,暂定规范式(8.2.1-3)仅适用于双轴对称实腹式工字形(含H形)和箱形(闭口)截面的压弯构件。

8.2.2 双向弯曲的压弯构件,其稳定承载力极限值的计算较为复杂,一般仅考虑双轴对称截面的情况。规范采用的半经验性质的线性相关公式形式简单,可使双向弯曲压弯构件的稳定计算与轴心受压构件、单向弯曲压弯构件以及双向弯曲受弯构件的稳定计算都能互相衔接,并经研究表明是偏于安全的。

## 9 连接计算

### 9.1 紧固件连接

9.1.1 本条规定了铝合金结构普通螺栓和铆钉连接的计算方法。

1 关于普通螺栓或铆钉受剪连接的计算,欧规和英规的计算公式均可转化为同钢规相同的形式,即分别计算紧固件的受剪承载力和连接构件的承压承载力,并取其较小值作为受剪连接的承载力设计值。钢规中规定的单个螺栓抗剪强度设计值是由实验数据统计得出的,未区分受剪面是在栓杆部位还是在螺纹部位。而本规范条文中单个螺栓抗剪强度设计值是参照国外铝合金结构规范并比较强度设计值与材料机械性能值的相关关系式得出的,因此在计算公式中必须区分不同受剪部位剪切面积不同的影响。欧规中,连接构件承压承载力计算公式中考虑了紧固件端距与孔洞直径比值、中距与孔洞直径比值、紧固件抗拉强度与连接构件抗拉强度比值等参数的影响,计算公式较为复杂。如将欧规中规定的最小端距  $2d_0$ 、常用中距  $2.5d_0$  代入,则计算得到的连接构件承压强度设计值为连接材料抗拉强度的 1.16 倍,基本相当并略高于钢规的规定。钢规的构件承压强度设计值是根据受拉构件且端距为  $2d_0$  得到的试验统计值,因此可从简仍采用钢规的公式形式,不再考虑以上参数的影响,并规定  $2d_0$  为允许端距的最小值。英规关于承压承载力的计算不仅要验算连接构件的承压强度,还要求验算紧固件的承压强度,按照该公式对本次规范中所规定的几种紧固件材料进行验算,由于紧固件的抗拉强度一般均大于铝合金连接构件的抗拉强度,因此不会发生紧固件先于构件被挤压坏的现象,故此,本规范计算公式中也不考虑验算紧固件承压强度。综合

所述,受剪连接的计算公式,采用钢规的形式,可保证满足欧规、英规相应规定的安全性要求。

2 见条文说明第 4.3.5 条第 3 款,此处单独列出以强调其重要性。

3 关于普通螺栓杆轴方向受拉连接的计算,欧规明确要求在设计中应考虑因撬力作用引起的附加力的影响,即应采用适当的方法分析计算撬力的大小。在钢规中,不要求计算撬力,而仅将螺栓的抗拉强度设计值降低 20%,这相当于考虑了 25%的撬力。这样虽然简化了设计计算,但在某些情况下撬力与节点承受的轴向拉力的比值很可能会超过 25%,在设计中不考虑撬力作用是不安全的,因此作出本条规定。同时考虑到缺乏充分的理论和实验研究,为保证结构的安全,螺栓抗拉强度设计值仍按降低 20%取值。

撬力作用是否显著,主要与连接板抗弯刚度和螺栓杆轴向抗拉刚度的比值有关,该比值越小,则撬力引起的不利影响越大。此外,撬力大小还与受拉型连接节点的形式、螺栓数目和位置等因素有关。对于如图 17 所示的双 T 形轴心受拉连接,给出其极限承载力的计算公式,以供参考。

图 17 中所示的由 4 个螺栓连接的双 T 形节点,在轴心拉力  $P$  的作用下,随 T 形构件翼缘板抗弯刚度和螺栓杆轴抗拉刚度比值的不同,可能会发生 3 种不同的破坏模式,见图 18。图 18 中黑色圆点代表翼缘出现塑性铰的位置,下面所示为翼缘板的弯矩图。

破坏模式 1: T 形构件螺栓孔洞处及 T 形构件腹板与翼缘交接处产生塑性铰破坏。极限承载力为:  $P_1 = 4M_p/a_1$ 。其中,  $M_p = 0.25Bt^2f$  为 T 形构件翼缘板的塑性抵抗弯矩,  $f$  为翼缘材料的抗弯强度设计值,其余符号参见图 17。

破坏模式 2: T 形构件腹板与翼缘交接处产生塑性铰,同时螺栓被拉断。极限承载力为:  $P_2 = (2M_p + \sum N_t^0 \cdot c)/(c + a_1)$ 。其

中,  $c \leq 1.25a_1$ ,  $\sum N_i^b$  为全部螺栓的受拉承载力。

破坏模式 3: 螺栓被拉断。极限承载力为:  $P_3 = \sum N_i^b$ 。

连接节点的承载力应取  $P_1$ 、 $P_2$  和  $P_3$  的最小值。当 T 形构件的翼缘板较薄时, 节点容易发生模式 1 的破坏, 撬力  $Q$  是非常显著的。上述公式来源于《欧洲钢结构规范》EC3, 并经在同济大学完成的铝合金双 T 形受拉节点试验研究, 证明同样适用于铝合金结构的计算。对于其他类型的受拉型螺栓连接, 在设计中应结合实际情况采用适当的方法分析计算撬力的大小。

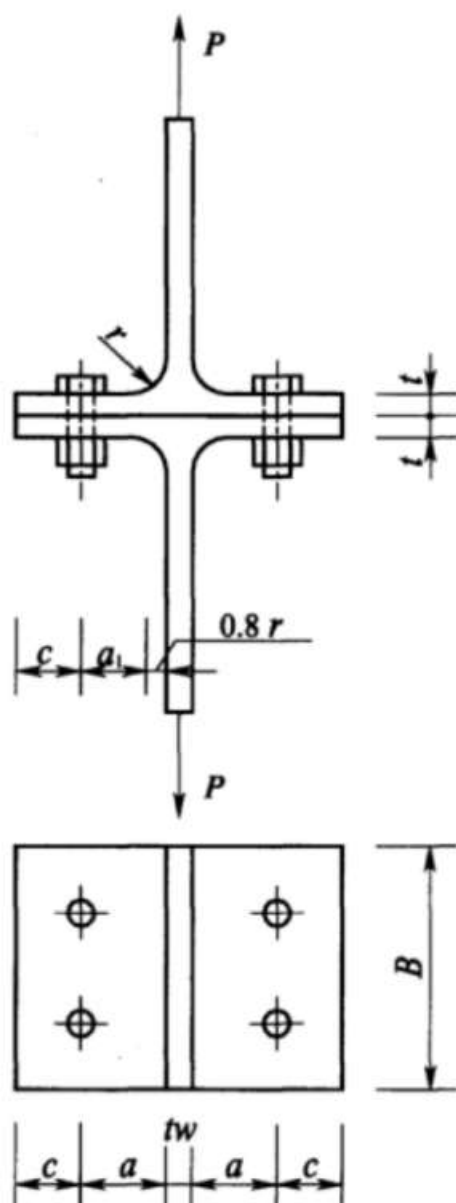


图 17 双 T 形受拉连接

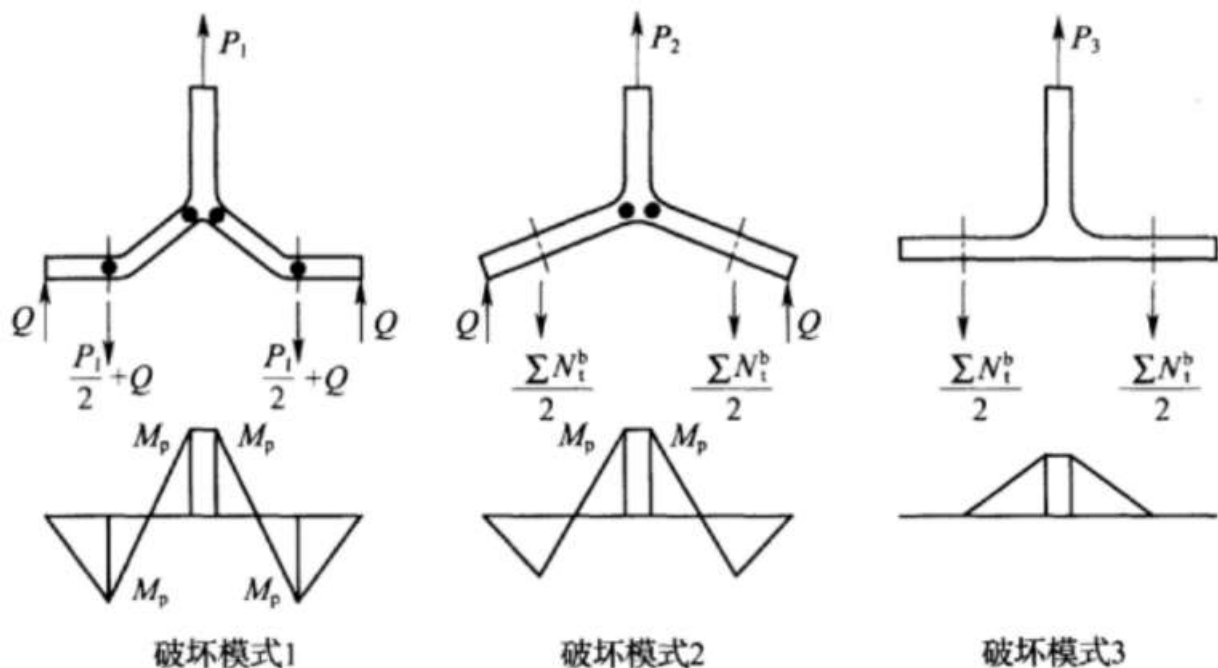


图 18 双 T 形受拉连接的破坏模式

4 关于普通螺栓沿杆轴方向受拉连接的计算,欧规中除规定应验算螺栓的抗拉承载力外,还提出应验算螺栓头及螺母下构件的抗冲切承载力,并将二者中的较小值作为受拉螺栓连接的承载力设计值。英规中不考虑构件抗冲切承载力的验算,美规也无此项要求。对铝合金结构而言,当所采用螺栓材料的抗拉强度超出铝合金连接构件的名义屈服强度较多时,如螺栓杆中的拉应力较大,螺栓头或螺母对连接构件的压紧应力有可能引起构件表面损伤进而使构件发生冲切破坏。因此,考虑构件抗冲切的验算是必要的。参考欧规公式,螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力为  $B_{p, RD} = 0.6\pi d_m t_p f_{0.2} / \gamma_{M2}$ , 其中  $\gamma_{M2} = 1.25$  为抗力分项系数。由于构件抗冲切实质上是验算构件的抗剪强度,故经变换后提出式(9.1.1-7), 式中 0.8 来源于  $0.6\sqrt{3} / \gamma_{M2} = 0.831$  的取整值。

5 关于同时承受剪力和杆轴方向拉力的普通螺栓计算,英规为圆形相关公式,同钢规一致;欧规为直线相关公式  $N_v / N_v^b + N_t / 1.4 N_t^b \leq 1$ 。本规范依据英规的设计形式,这样也可同钢规保持一致,同时应验算满足连接构件的承压承载力设计值和螺栓头及螺



母下构件抗冲切承载力设计值。

**9.1.2** 本条规定了铝合金结构高强度螺栓摩擦型连接的计算方法。

1 设计公式采用与钢规相同的形式。表 9.1.2 中一个高强度螺栓的预拉力取值来源于钢规的相应规定,该预拉力值略小于欧规及英规中规定的预拉力值。经公式变换,该设计公式满足欧规及英规的安全度要求。式(9.1.2-1)中的系数 0.8 是考虑了抗力分项系数 1.25 得到的。

2 关于铝合金结构高强度螺栓摩擦型连接的抗滑移系数取值,欧规仅规定了“未作表面保护的标准轻度喷砂处理摩擦面”的抗滑移系数值,该值与连接板的总厚度有关,具体数值见表 15。采用表中数值时,摩擦面的表面处理应符合 ISO 468/1302 N10a 的规定。对于采用其他的表面处理方法,欧规规定均应通过标准试件试验得出抗滑移系数值。

表 15 铝合金摩擦面抗滑移系数(N10a 标准轻度喷砂处理)

连接板总厚度(mm)	$12 \leq \sum t < 18$	$18 \leq \sum t < 24$	$24 \leq \sum t < 30$	$30 \leq \sum t$
$\mu$	0.27	0.33	0.37	0.40

英规仅规定了符合英国标准 BS 2451 规定要求的“喷铝砂处理摩擦面”的抗滑移系数值;对于其他的表面处理方法,规定均应通过标准试件试验得出抗滑移系数值。美规中只允许使用普通螺栓,对采用有预拉力的高强度螺栓未作相应规定。日本《铝合金建筑结构设计规范(2002年)》规定:当摩擦面的表面处理符合日本铝合金建筑结构协议会制定的《铝合金建筑结构制作要领》的要求,并且板厚在螺栓直径的 1/4 以上时,抗滑移系数可取 0.45。对于单面摩擦的连接,板厚在螺栓直径的 1/4 以上 1/2 以下时,抗滑移系数取 0.3。此处的板厚指上下两压板厚度之和与中间板的厚度中的较小值。无表面处理以及采用其他表面处理方法时,单面摩擦、双面摩擦的抗滑移系数都取 0.15。

由于铝合金材料种类繁多,已有的试验数据表明不同材料在

同一种摩擦面处理条件下其抗滑移系数和摩擦抗力是有差别的。因此,摩擦连接时不论其处理方法如何,事先进行摩擦抗力试验,确保设计的安全度是一条基本原则。因缺乏充足的试验数据和统计资料,对铝合金构件的表面处理方法也缺少相应的国家标准,国外规范中的摩擦面处理方法在实际应用中也很难具体实施,故对高强度螺栓摩擦型连接的抗滑移系数,本规范未作出具体规定,如需采用应根据标准试件的试验测定结果确定。

**9.1.3** 本条规定了铝合金结构高强度螺栓承压型连接的计算方法,设计公式采用同钢规相同的形式。同普通螺栓相同,也要求验算螺栓头及螺母下构件抗冲切承载力设计值。

**9.1.4** 当构件的节点处或拼接接头的一端,螺栓或铆钉的连接长度  $l_1$  过大时,螺栓或铆钉的受力很不均匀,端部的螺栓或铆钉受力最大,往往首先破坏,并将依次向内逐个破坏。因此对长连接的抗剪承载力应进行适当折减。关于折减系数的规定,欧规为  $\beta_{L1} = 1 - \frac{L_1 - 15d}{200d}$  且  $0.75 \leq \beta_{L1} \leq 1.0$ ,长连接的折减区段为  $15d \sim 65d$ 。

该公式来源于《欧洲钢结构规范》EC3,同钢规公式相比,稍偏于不安全,因此,本条款参照钢规公式制定。应注意本条规定不适用于沿连接的长度方向受力均匀的情况,如梁翼缘同腹板的紧固件连接。

**9.1.5** 关于借助填板或其他中间板件的紧固件连接,当填板较厚时,应考虑连接的抗剪承载力折减。本条款参照欧规公式制定。

**9.1.6** 单面连接会引起荷载的偏心,使紧固件除受剪力之外还受到拉力的作用,因此明确规定不得采用铆钉连接形式,且对螺栓连接应进行适当的抗剪承载力折减,螺栓数目按计算增加 10% 的规定参考了钢规相应条款。

**9.1.7** 当紧固件的夹紧厚度过大时,由于紧固件弯曲变形引起的抗剪承载力折减不应被忽视。英规明确规定,铆钉连接的铆合总厚度不得超过铆钉孔径的 5 倍。钢规对铆合总厚度超过铆钉孔径

5 倍时,规定应按计算适当增加铆钉的数目,且铆合总厚度不得超过铆钉孔径的 7 倍。美规规定的夹紧厚度过大时的强度折算不仅适用于铆钉连接,也适用于螺栓连接,规定当紧固件的夹紧厚度超过铆钉孔径或螺栓直径的 4.5 倍时,紧固件的抗剪承载力应当乘以折减系数 $\left(\frac{1}{0.5+G/(9d)}\right)$ ,其中  $G$  为紧固件的夹紧厚度, $d$  为铆钉孔径或螺栓直径,并规定一般情况下夹紧厚度不应超过  $6d$ 。

## 9.2 焊缝连接

**9.2.1** 本条规定了焊缝连接计算的一般原则。

1 同钢结构相比,焊接铝合金结构在热影响区内材料强度的降低在设计中是不容忽视的。铝合金焊缝连接的破坏,很可能发生在热影响区。因此,在焊缝连接计算中,必须验算热影响区的强度。

2 根据同济大学完成的铝合金对接焊缝连接的试验结果,当焊缝连接的破坏发生在热影响区处,试件破坏前有较大的变形,属于延性破坏;当焊缝连接的破坏发生在焊缝区域,试件破坏前的变形较小,属于脆性破坏。因此,铝合金构件与焊缝金属之间合理的组合宜满足焊缝的强度设计值大于铝合金构件热影响区的强度设计值。这样可明显改善焊接节点在荷载作用下的变形性能。

**9.2.2** 本条规定了对接焊缝的强度计算。

1 不采用引弧板时,焊缝有效长度为焊缝全长减去 2 倍焊缝有效厚度,是考虑到焊缝起、落弧处的缺陷对强度的影响。

2 折算应力强度验算公式(9.2.2-5)参考欧规和英规的相关规定。

**9.2.3** 本条规定了直角角焊缝的强度计算。

1 角焊缝两焊脚边夹角为直角的称为直角角焊缝,两焊脚边夹角为锐角或钝角的称为斜角角焊缝。鉴于铝合金焊接斜角角焊缝试验数据和统计资料的缺乏,且欧规、美规中均未规定斜角角焊缝。因此,本规范也暂不列入斜角角焊缝的强度计算公式。

2 关于直角角焊缝的计算,欧规、英规的计算公式实质上同钢规一致。以上规范均认为角焊缝的强度非常接近  $45^\circ$  焊喉截面(焊缝有效截面)的强度,即在进行角焊缝设计时把  $45^\circ$  焊喉截面作为设计控制截面。在大量试验的基础上,国际标准化组织推荐的角焊缝抗拉强度公式为  $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + k_w(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} = f_w$ , 式中  $k_w$  是与金属材料有关的值,一般在  $1.8 \sim 3$  之间变化,  $f_w$  为焊缝金属的特征强度。欧规和英规均采用  $k_w = 3$ , 这样略偏于安全并且可同母材金属的强度理论相一致。在引入抗力分项系数后,并注意到  $f_t^w = f_t^w / \sqrt{3}$ , 因此可得规范式(9.2.3-1)。式中有有效截面上的应力  $\sigma_{\perp}$ 、 $\tau_{\perp}$ 、 $\tau_{//}$  如图 19 所示。

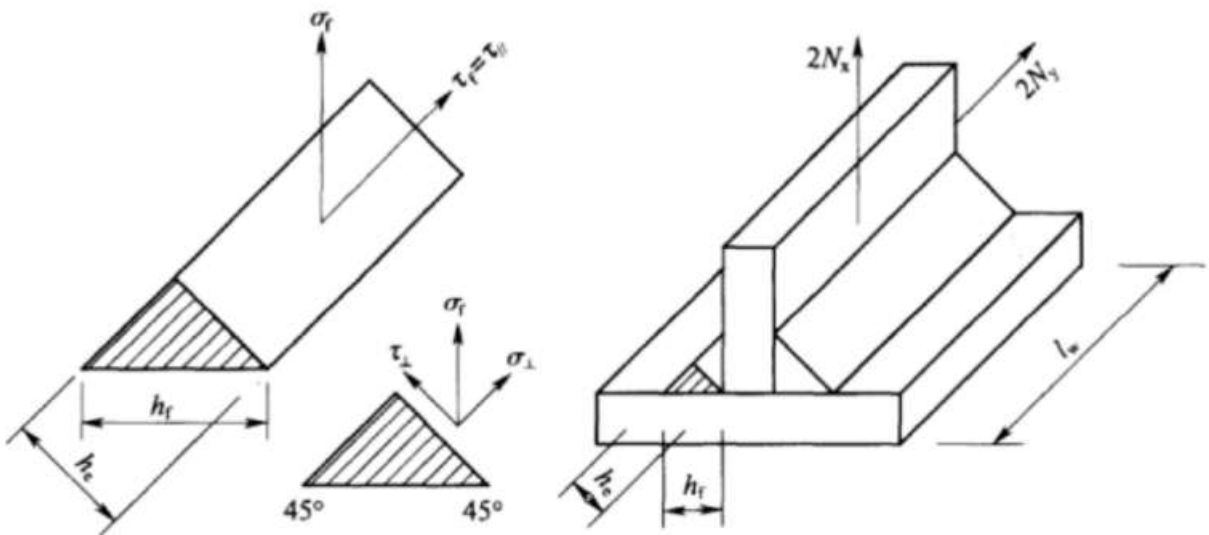


图 19 角焊缝有效截面应力分布

3 由式(9.2.3-1)可推导出在特定荷载作用下的角焊缝设计公式(9.2.3-2)~式(9.2.3-4)。如图 19 所示,令  $\sigma_f$  为垂直于焊缝长度方向按焊缝有效截面计算的应力:  $\sigma_f = \frac{N_x}{h_e l_w}$ 。  $\sigma_f$  既不是正应力也不是剪应力,但可分解为:  $\sigma_{\perp} = \sigma_f / \sqrt{2}$ ,  $\tau_{\perp} = \sigma_f / \sqrt{2}$ 。又令  $\tau_f$  为沿焊缝长度方向按焊缝有效截面计算的剪应力,显然:  $\tau_{//} = \tau_f = \frac{N_y}{h_e l_w}$ 。将上述  $\sigma_{\perp}$ 、 $\tau_{\perp}$ 、 $\tau_{//}$  代入公式(9.2.3-1),可得:  $\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2}$

$\leq f_i^w$ , 即公式(9.2.3-4), 式中  $\beta_i = 1.22$ , 称为正面角焊缝强度的增大系数。

对正面角焊缝,  $N_y = 0$ , 只有垂直于焊缝长度方向的轴心力  $N_x$  作用, 可得:  $\sigma_t = \frac{N_x}{h_e l_w} \leq \beta_i f_i^w$ , 即公式(9.2.3-2)。

对侧面角焊缝,  $N_x = 0$ , 只有平行于焊缝长度方向的轴心力  $N_y$  作用, 可得:  $\tau_t = \frac{N_y}{h_e l_w} \leq f_i^w$ , 即公式(9.2.3-3)。

4 关于直角角焊缝的计算厚度  $h_e$ , 欧规和英规中均规定若整条焊缝能保证具有统一、确定的熔深时, 深熔角焊缝的计算厚度可以加上熔深。在焊接质量较高的自动焊中, 熔深较大, 考虑熔深将计算厚度增大, 无疑会带来较大的经济效益。钢规中对直角角焊缝不考虑熔深的作用, 计算偏于保守。但由于国内铝合金结构的焊接经验尚少, 故本次规范制定暂不考虑熔深对焊缝计算的有利影响。

5 钢规中允许采用部分焊透的对接焊缝和 T 形对接与角接组合焊缝, 并按直角角焊缝的公式计算。而欧规中明确规定, 铝合金受力构件的连接应采用完全焊透的对接焊缝, 部分焊透的对接焊缝仅能用于次要的受力构件或非受力构件中。由于对部分焊透的对接焊缝和 T 形对接与角接组合焊缝在铝合金结构中尚缺乏足够的试验研究, 因此, 本规范暂不考虑这两类焊缝形式。

9.2.4 构件在临近焊缝的焊接热影响区发生强度弱化现象, 因此需对该处的强度进行验算。计算公式参考欧规相关条款。

## 10 构造要求

### 10.1 一般规定

**10.1.5** 由于铝合金结构焊接热影响效应使构件强度降低很大,因此,铝合金结构的连接宜优先采用紧固件连接。焊接后经过人工时效或较长时间的自然时效,某些合金热影响区内材料的强度会有一定程度的恢复,因此可通过该方法改善某些合金热影响区强度降低的影响。此外,由于热影响效应的存在,即使将次要部件焊接在结构构件上也会严重降低构件的承载力。例如对于梁的设计,次要部件的焊接位置宜靠近梁的中和轴,或低应力区,并尽量远离弯矩较大的位置。

### 10.2 螺栓连接和铆钉连接

**10.2.1** 关于螺栓和铆钉的最大、最小容许距离,主要参考国内外有关规范的相关条款并结合我国钢结构设计规范的形式而制定。

**10.2.2** 在普通螺栓、高强度螺栓或铆钉连接中,当板厚过小时,在局部压力作用下板件会发生面外变形从而导致承压承载力下降。高强度螺栓连接时,板厚过小还会导致板件局部应力过大,摩擦面处理过程中板件容易发生变形而使得摩擦系数下降。本规范参考日本《铝合金建筑结构设计规范(2002年)》,规定了用于螺栓连接和铆钉连接的板件最小厚度。

**10.2.4** 本条规定了连接节点的最少紧固件数,要求紧固件宜不少于2个,理由为:仅有一个紧固件将使连接处产生转动并给安装带来极大困难,但对于小型非结构构件允许采用一个紧固件。

**10.2.5** 增强刚度的措施可采用设加劲肋、增加板厚等方法。

### 10.3 焊缝连接

10.3.1~10.3.5 本节关于焊缝连接的构造要求,主要参考国内外有关规范的相关条款制定。

### 10.4 防火、隔热

10.4.2 铝合金结构的防火措施,目前通常采用有效的水喷淋系统来进行防护,防火涂料对铝合金材料影响较大,铝合金材料容易与其他材料发生电化腐蚀,一般采用较少。

10.4.3 铝合金结构在受辐射热温度达到 80℃时,铝合金材料的强度开始下降,超过 100℃时,铝合金材料的强度明显下降,故要控制辐射热的温度。

### 10.5 防 腐

10.5.1 当铝合金材料同其他金属材料(除不锈钢外)或含酸性或碱性的非金属材料连接、接触或紧固时,容易同相接触的其他材料发生电偶腐蚀。这时,应在铝合金材料与其他材料之间采用油漆、橡胶或聚四氟乙烯等隔离材料。

10.5.2 当铝合金材料处于海洋环境、工业环境等腐蚀性环境中时易发生电化学腐蚀,应在铝合金表面进行防腐绝缘处理。

10.5.3 阳极氧化是用电化学的方法在铝合金表面形成一层具有一定厚度和硬度的  $Al_2O_3$  膜层,该膜层能防止自然界有害因素对铝合金的腐蚀,其耐腐蚀性能与氧化膜的厚度成正比。粉末涂层是静电喷涂,经规定的方法形成的漆膜具有良好的抗腐蚀、抗冲击、耐磨等特点。由于近年来新型的防腐涂料不断出现和推广应用,产品不断更新发展,因此对防腐涂料和防腐方法不做具体规定,只要求进行有效的防腐处理,可按《铝合金建筑型材》GB 5237 的规定执行。

10.5.4 铝合金表面的清洗,在选用清洗剂时,要注意清洗剂的有

效期、适用范围,避免由此而产生对铝合金表面膜的不良影响。在清洗过程中不允许用混合清洗剂清洗铝合金表面,避免清洗剂之间产生不良化学反应。用滴、流方式清洗会使铝合金表面出现由于清洗的厚度不一,清洗的浓度不同而影响清洗的结果。在清洗中如果温度超过控制范围,会影响清洗效果。在清洗过程中应避免清洗剂长时间接触铝合金表面,在节点、接缝处要彻底清除清洗剂,避免清洗剂在节点和接缝处对材料表面的影响。



# 11 铝合金面板

## 11.1 一般规定

11.1.1 本规范仅考虑起结构作用的面板,不考虑仅起建筑装饰作用的板材。

11.1.6 近年来,出现了不少新的铝合金面板板型,对特殊异形的铝合金面板,建议通过实验确定其承载力和挠度。

## 11.2 强 度

11.2.1 集中荷载  $F$  作用下的铝合金面板计算与板型、尺寸等有关,目前尚无精确的计算方法,一般根据试验结果确定。规范给出的将集中荷载  $F$  沿板宽方向折算成均布线荷载  $q_n$ 〔式(11.2.1)〕是一个近似的简化公式,该式取自国外文献和《冷弯薄壁型钢结构技术规范》GB 50018,式中折算系数  $\eta$  由试验确定,若无试验资料,可取  $\eta=0.5$ ,即近似假定集中荷载  $F$  由两个槽口承受,这对于多数板型是偏于安全的。

铝合金屋面板上的集中荷载主要是施工或使用期间的检修荷载。按我国荷载规范规定,屋面板施工或检修荷载  $F=1.0\text{kN}$ ;验算时,荷载  $F$  不乘以荷载分项系数,除自重外,不与其他荷载组合。但如果集中荷载超过  $1.0\text{kN}$ ,则应按实际情况取用。

11.2.4 T形支托和面板的连接强度受材料性质及连接构造等许多因素影响,目前尚无精确的计算理论,需根据试验分别确定面板在受面外拉力和压力作用下的连接强度。

## 11.3 稳 定

11.3.1 式(11.3.1-1)和(11.3.1-2)分别为腹板弹塑性和弹性剪

切屈曲临界应力设计值。

### 1 腹板弹性剪切屈曲应力。

根据弹性屈曲理论,腹板弹性剪切屈曲应力公式如下:

$$\tau_{cr} = \frac{k_s \pi^2 E}{12(1-\nu^2)(h/t)^2} \quad (17)$$

式中  $h/t$ ——腹板的高厚比;

$k_s$ ——四边简支板的屈曲系数,按如下取值:

$$\text{当 } a/h < 1 \text{ 时, } k_s = 4 + \frac{5.34}{(a/h)^2} \quad (18)$$

$$\text{当 } a/h > 1 \text{ 时, } k_s = 5.34 + \frac{4}{(a/h)^2} \quad (19)$$

当腹板无横向加劲肋时,板的长宽比将是很大的,屈曲系数可取  $k_s = 5.34$ ,代入公式(17)并考虑抗力分项系数  $\gamma_R = 1.2$ ,可得:

$$\tau_{cr} \approx \frac{280000}{(h/t)^2} \quad (20)$$

### 2 腹板塑性剪切屈曲应力。

根据结构稳定理论,弹塑性屈曲应力可按下式计算:

$$\tau'_{cr} = \sqrt{\tau_p \tau_{cr}} \quad (21)$$

式中  $\tau_p$ ——剪切比例极限,取  $0.8\tau_y$ ;

$\tau_y$ ——剪切屈服强度,取  $f_{0.2}/\sqrt{3}$ 。

将式(17)代入式(21),同时取  $k_s = 5.34$ ,并考虑抗力分项系数  $\gamma_R = 1.2$ ,可得:

$$\tau'_{cr} \approx 320 \frac{\sqrt{f_{0.2}}}{h/t} \quad (22)$$

**11.3.2** 腹板局部承压涉及因素较多,很难精确分析。 $R_w$  的计算式(11.3.2)是取  $r=5t$  代入欧规公式得出的。

**11.3.3、11.3.4** 铝合金面板 T 形支托的稳定性可按等截面模型进行简化计算。支托端部受到板面的侧向支撑,根据面板侧向支撑情况,支托的计算长度系数  $\mu$  的理论值范围为  $0.7 \sim 2.0$ 。同济

大学进行的 0.9mm 厚、65mm 高、400mm 宽的铝合金面板(图 11.1.1a)实验中,量测了 T 形支托破坏时的支座反力值,表 16 为按本规范公式(11.3.3)计算得到的承载力标准值(取  $\mu$  为 1.0、 $f$  为  $f_{0.2}$ )和试验值。考虑到实验得到的支托破坏数据有限,而板厚板型对支托侧向支撑的影响又比较复杂,本规范建议根据实验确定计算长度值。

表 16 T 形支托承载力标准值和试验值的比较(kN)

	承载力标准值 $\mu$ 取 1.0	试验值 1	试验值 2	试验值 3	试验值 4	试验值 5	试验值 6
承载力	6.38	6.585	5.819	6.154	6.341	5.15	5.29
状态	—	破坏	未破坏	未破坏	未破坏	未破坏	未破坏

## 11.4 组合作用

11.4.1 支座反力处同时作用有弯矩的验算相关公式取自欧规。

## 11.5 构造要求

11.5.1 铝合金屋面板和墙面板的基本构造如图 20。

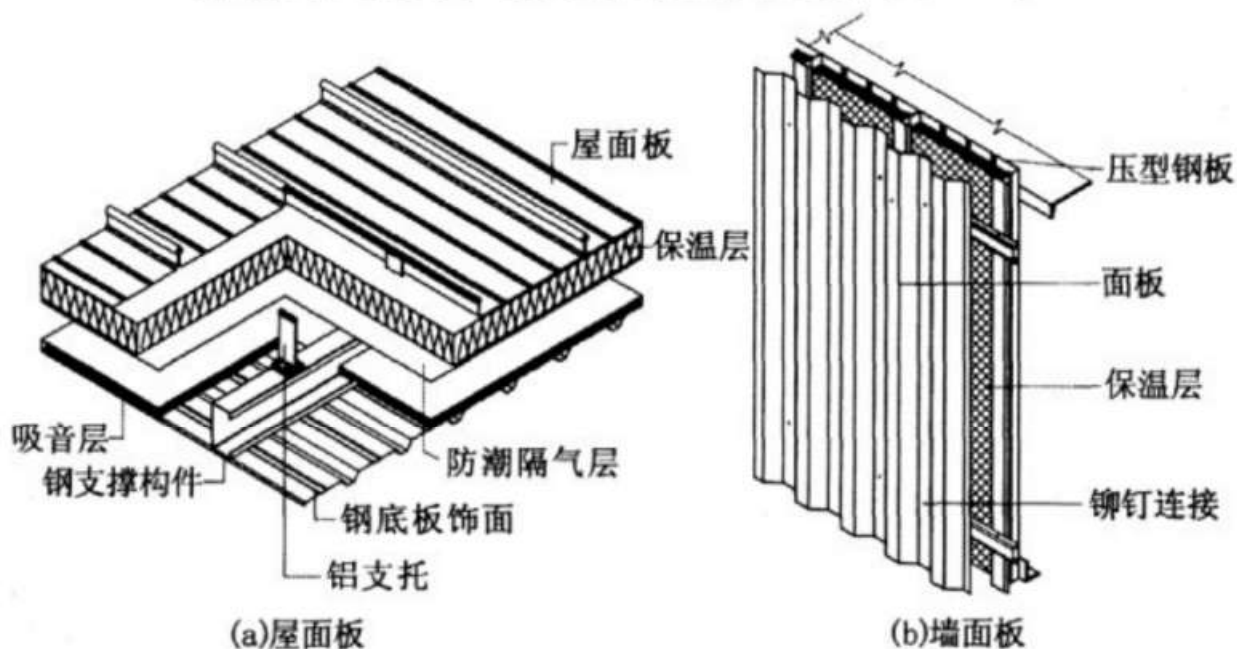


图 20 铝合金面板基本构造

铝合金挤压板件的厚度一般为 0.6~1.2mm,而非挤压板件的厚度目前可以达到 3.0mm。因此,本规范规定铝合金屋面板和墙面板的厚度宜取 0.6~3.0mm。

为了避免出现焊接搭接,铝合金面板应尽量通长布置。若面板确需焊接搭接,为了避免火灾隐患,焊接部位下的垫块应满足一定耐火等级的要求。

铝合金屋面板可通过自身的强度承受竖向荷载,也可通过屋面板下满铺的附加面支撑承受荷载。屋面板宜根据受力、防水、立面装饰等方面的要求,采用不同的承载方式。对于挤压成形的铝合金屋面板,当波高较小、板宽较大时,为保证施工及使用阶段的受力要求和屋面板的平整性,建议采用附加面支撑受力体系。

**11.5.2~11.5.4** 这些条文均是关于铝合金屋面、墙面的构造要求规定。条文中增加了近年来在实际工程中采用的铝合金板扣合式和咬合式连接方式,这两种连接方法均隐藏在铝合金板下面,可避免渗漏现象。对于使用自攻螺栓和射钉的连接,必须带有较好的防水密封胶垫材料,以防连接处渗漏。

中华人民共和国国家标准  
**铝合金结构设计规范**

GB 50429-2007

☆

上海市建设和交通委员会 主编

中国计划出版社出版

(地址:北京市西城区木樨地北里甲11号国宏大厦C座4层)

(邮政编码:100038 电话:63906433 63906381)

新华书店北京发行所发行

世界知识印刷厂印刷

---

850×1168毫米 1/32 4.5印张 113千字

2008年1月第一版 2008年1月第一次印刷

印数1—20100册

☆

统一书号:1580058·968

定价:22.00元