

## 第 3 章 钢结构的连接

### 3.1 本章重点内容提要

#### 3.1.1 钢结构连接方法概述

钢结构常用的连接方法有三种：焊接、铆钉连接和螺栓连接。螺栓连接又分为普通螺栓连接和高强度螺栓连接。

焊接连接是钢结构普遍采用的一种方法，其优点是不削弱截面、节省钢材、构造简单加工方便，连接的密封性好；刚度大，整体性好，易于采用自动化作业、生产率效率高。缺点：焊缝附近热影响区材质变脆，在焊件中产生焊接残余应力和残余变形，对结构工作有不利影响，低温下易于发生脆断。

铆钉连接塑性、韧性好，传力可靠，质量易于检查，动力性能好。但其构造和施工复杂，现已较少采用。

普通螺栓连接装卸方便，施工设备简单，但对于钢结构常用的 C 级螺栓而言其抗剪承载力低，不适合直接受剪的连接。

高强度螺栓连接安装简单，可拆换，连接紧密，对摩擦型连接来讲，能承受动力荷载，耐疲劳，塑性好，韧性好。不过构件摩擦面需要特殊处理，安装工艺略为复杂，造价略高。目前，高强度螺栓连接已经广泛使用，替代了铆钉连接。

#### 3.1.2 钢结构焊接连接

##### 1. 焊缝连接概述

###### (1) 焊接方法。

常见的焊接方法有电弧焊、电阻焊和气焊。电弧焊又分手工焊、自动焊和半自动焊，是最常用的钢结构焊接方法；而电阻焊和气焊一般只用作构造焊缝。

###### (2) 焊接形式。

按两焊件的相对位置，分为平接、搭接和顶接；对接焊缝按受力方向与焊缝长度方向的关系，分为直缝和斜缝；角焊缝按受力方向与焊缝长度方向的关系，分为端缝和侧缝；按焊缝连续性，分为连续焊缝和断续焊缝；按施工位置，分为俯焊、立焊、横焊、仰焊。

###### (3) 焊缝缺陷。

常见的焊缝缺陷有裂纹、气孔、夹渣、咬边、烧穿、弧坑、焊瘤、未焊透、未焊合等。

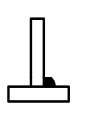
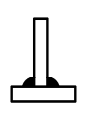
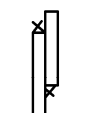

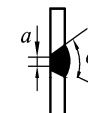
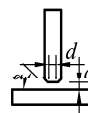

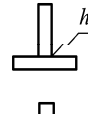
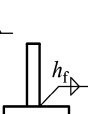
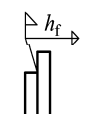
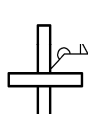
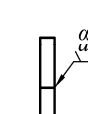
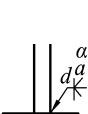
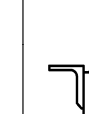
(4) 焊缝质量检验。

焊缝质量检验一般采用外观检查和内部无损探伤两种。外观检查主要检查外观缺陷和几何尺寸；无损探伤采用超声波检测、X 射线或  $\gamma$  射线透照或拍片，检查焊缝内部缺陷。

《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205) 中规定焊缝按检验方法和质量要求分为一、二、三级。三级焊缝只要求对焊缝作外观检查且符合三级质量标准；一级、二级焊缝除外观检查应符合相应标准外，还要求超声波检验并符合相应级别的质量标准，若超声波探伤不能对缺陷性质做出判断时，还应采用射线探伤。另外，外观检查、探伤检查的位置和数量都有专门规定。

(5) 焊缝的图纸表达 (见表 3.1)。

表 3.1 常用焊缝图示

		角 焊 缝				对接焊缝	塞焊缝	三面围焊
		单面焊缝	双面焊缝	安装焊缝	相同焊缝			
形	式							
标	注							

2. 对接焊缝的构造和计算

(1) 对接焊缝的构造。

① 对接焊缝的构造。

采用对接焊缝时，为保证质量，常需在焊件边缘开成各种形式的坡口，常见的有：直边缝、单边 V 形、双边 V 形、U 形、K 形和 X 形。根据焊件厚度和施工条件确定。

② 对接焊缝的优缺点。

对接焊缝的优点为用料经济、传力均匀、无明显的应力集中，利于承受动力荷载；其缺点为需坡口，焊件长度要精确。

③ 对接焊缝的构造处理。

a. 起落弧处易有焊接缺陷，所以要用引弧板。但采用引弧板施工复杂，因此除承受动力荷载外，一般不用引弧板，而是计算将焊缝长度两端各减去 5 mm。

b. 对于变厚度 (或变宽度) 板的对接，在板的一面 (一侧) 或两面 (两侧) 切成坡度不

大于 1 : 4 的斜面，避免应力集中。

c. 钢板拼接，当采用对接焊接时，纵横两方向的对接焊缝可采用“十”字形交叉或“T”形交叉。当用 T 形交叉时，交叉点的间距不得小于 200 mm。

d. 对接焊缝的强度。

对接焊缝的抗压、抗剪强度与母材相等，受拉时焊缝的抗拉强度则与焊缝质量等级有关：一、二级焊缝的抗拉强度与母材相同，三级焊缝只有母材的 85%。

(2) 对接焊缝的计算。

一般认为，对接焊缝的应力分布与焊件原来的应力分布基本相同。计算时，焊缝中最大应力（或折算应力）不能超过焊缝的强度设计值。

① 轴心受力的对接焊缝。

轴心受力的对接焊缝见图 3.1，其中图（a）为平接，图（b）为顶接。

当外力作用于焊缝的垂直方向，且合力通过焊缝的形心时，其强度计算为

$$\sigma = \frac{N}{l_w t} \leq f_t^w \text{ 或 } f_c^w$$

式中  $N$  ——轴心拉力或压力；

$l_w$  ——焊缝计算长度（无引弧板时，焊缝长度取实长减去  $2t$ ；有引弧板时，取实长）；

$t$  ——平接时为焊件的较小厚度，顶接时取腹板厚；

$f_t^w, f_c^w$  ——对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值。

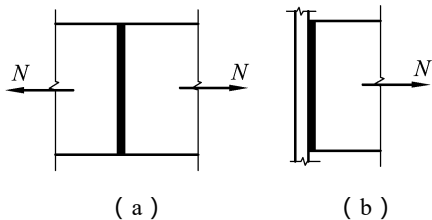


图 3.1 轴心受力的对接焊缝连接

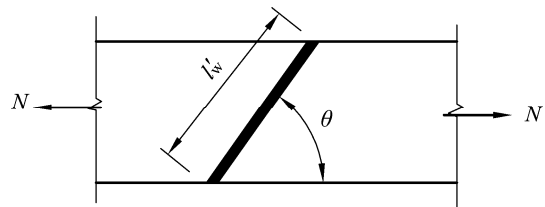


图 3.2 对接斜焊缝承受轴心力

② 对接斜焊缝的计算。

如果受力与焊缝长度方向垂直的对接焊缝强度不够，可采用如图 3.2 所示斜焊缝的形式。其计算为

$$\sigma = \frac{N \sin \theta}{l_w' t} \leq f_t^w, \quad \tau = \frac{N \cos \theta}{l_w' t} \leq f_v^w$$

式中  $f_v^w$  ——对接焊缝抗剪强度设计值。

斜焊缝的优点为抗动力荷载性能较好，但较费材料。

当  $\tan \theta \leq 1.5$ ，即  $\theta \leq 56.3^\circ$  时，可不验算焊缝强度。

③ 钢梁的对接焊缝计算。

钢梁对接焊缝连接形式见图 3.3，焊缝中的应力分布同母材。当钢梁同时受弯、剪时，需分别验算最大正应力、

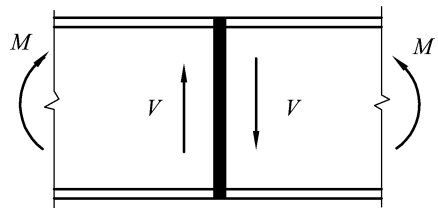


图 3.3 钢梁对接焊缝形式

最大剪应力。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_x} \leq f_t^w (f_c^w), \quad \tau_{\max} = \frac{VS_w}{I_w t_w} \leq f_v^w$$

式中  $W_x$  ——焊缝截面低抗矩；

$S_w$  ——焊缝截面上计算点处以上（以下）截面对中和轴的面积矩。

对于腹板和翼缘的交界点，正应力、剪应力虽不是最大，但都比较大，所以需验算折算应力，即

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \leq 1.1f_v^w$$

式中  $\sigma_1, \tau_1$  ——腹板与翼缘交界点处的正应力和剪应力；

1.1 ——考虑到最大折算应力只在部分点出现，因而将强度设计值适当提高。

#### ④ 牛腿与柱翼缘的对接焊缝。

牛腿和柱的对接焊缝，剪力全部由腹板焊缝承受并均匀分布，弯矩、拉力由全截面承担，与梁计算相同。截面形式和截面上各种应力分布见图 3.4。

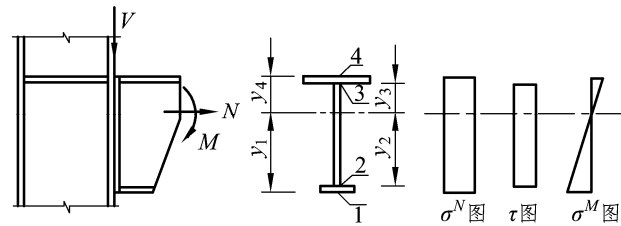


图 3.4 牛腿与柱翼缘对接焊缝形式及应力分布

图 3.4 中牛腿截面为非对称，在拉力作用下，全截面均匀受拉；在剪力作用下，整个腹板截面按均匀抗剪考虑；在弯矩作用下，中和轴以上受拉，中和轴以下受压。因此，图中 1、2、3、4 点均需强度验算。点 1 为下翼缘最外缘的点，点 2 为下翼缘与腹板的交界点，点 3 为上翼缘与腹板的交界点，点 4 为上翼缘最外缘的点。各点计算如下：

$$\text{点 1: } \sigma_1 = \frac{N}{A_w} - \frac{My_1}{I_w} \leq f_t^w (f_c^w)$$

$$\text{点 2: } \sigma_2 = \frac{N}{A_w} - \frac{My_2}{I_w}, \quad \tau_2 = \frac{V}{A'_w} \leq f_v^w, \quad \sqrt{\sigma_2^2 + 3\tau_2^2} \leq 1.1f_t^w$$

$$\text{点 3: } \sigma_3 = \frac{N}{A_w} + \frac{My_3}{I_w}, \quad \tau_3 = \frac{V}{A'_w} \leq f_v^w, \quad \sqrt{\sigma_3^2 + 3\tau_3^2} \leq 1.1f_t^w$$

$$\text{点 4: } \sigma_4 = \frac{N}{A_w} + \frac{My_4}{I_w} \leq f_t^w$$

式中  $A'_w$  ——焊缝有效抗剪面积， $A'_w = h_0 t_w$  ( $h_0$ 、 $t_w$  分别为腹板焊缝高度与厚度)；

$A_w$  ——整个焊缝截面的截面面积；

$I_w$  ——整个焊缝截面的惯性矩；

$y_i$  ——各计算点到中和轴的距离。

对接焊缝只有三级焊缝受拉或未设引弧板的情况下才要求检算强度。

### 3. 角焊缝的构造和计算

(1) 角焊缝的构造。

① 角焊缝的截面形式和有效厚度。

角焊缝的截面形式有直角角焊缝和斜角角焊缝两种。

根据焊缝长度方向与受力方向的关系，角焊缝又分为端缝和侧缝两类。端缝的焊缝长度方向垂直于受力方向，亦称正面角焊缝，其特点为受力后应力状态较复杂，应力集中严重，焊缝根部形成高峰应力，易于开裂，端缝破坏强度要高一些，但塑性差。侧缝的焊缝长度方向与受力方向平行，亦称侧面角焊缝，其特点为应力分布简单些，但分布并不均匀，剪应力两端大、中间小，侧缝强度低，但塑性较好。

角焊缝的有效厚度用  $h_e$  表示，其值与两焊脚边的夹角有关。

$$h_e = h_f \cos \frac{a}{2} (a > 90^\circ), \quad h_e = 0.7h_f (a \leq 90^\circ)$$

式中  $a$  ——两焊脚边夹角；

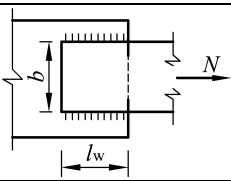
$h_f$  ——焊脚尺寸。

② 角焊缝的构造要求。

为保证角焊缝的质量，焊缝除强度满足计算要求外，还需满足构造要求，见表 3.2。

表 3.2 角焊缝的构造要求

部位	项目	构造要求	原因	备注
焊脚尺寸 $h_f$	上限	$h_f \leq 1.2t_1$ (钢管结构除外)； 对板边： $t \leq 6$ 时， $h_f \leq t$ $t > 6$ 时， $h_f \leq t - (1 \sim 2)\text{mm}$	焊脚尺寸过大时易使母材产生“过烧”现象，且产生较大的焊接残余应力和残余变形	$t_1$ 为较薄焊件厚度， $t$ 为板边角焊缝的板件厚度
	下限	$h_f \geq 1.5\sqrt{t_2}$ ； 当 $t \leq 4$ 时， $h_f = t$	若板件较厚而焊缝过小，则施焊时焊缝冷却速度过快，易使焊缝附近主体金属产生收缩裂纹	$t_2$ 为较厚焊件厚度，对自动焊 $h_f$ 可减 1 mm；对单面 T 形焊缝 $h_f$ 应加 1 mm。 $t$ 为焊件厚度
焊缝长度 $l_w$	上限	$40h_f$ (受动力荷载)； $60h_f$ (静力荷载或间接承受动力荷载)	对侧缝来讲，焊缝沿长度方向受力不均，呈两头大、中间小的规律，焊缝越长，不均程度越明显，当焊缝长度超过一定限值时，焊缝两端可能因应力过大先行破坏	内力沿侧缝全长均匀分布者不限； 端缝亦不受限
	下限	8 $h_f$ 和 40 mm	焊缝长度小时，焊件局部加热严重，焊缝起落弧缺陷相距太近，加上可能存在的其他缺陷，焊缝质量可靠性严重降低。另外，太短的	

			焊缝意味着应力集中现象严重	
杆端与节点板用两侧面角焊缝连接, 如左图	长度 $l_w$	$l_w \geq b$	为避免应力传递过分弯折使构件中应力不均	
	距离 $b$	$b \leq 16t$ ( $t_1 > 12 \text{ mm}$ 时) $b \leq 190 \text{ mm}$ ( $t_1 \leq 12 \text{ mm}$ 时)	为避免焊缝横向收缩时引起板件的拱曲太大	
搭接连接	搭接最小长度	$5t_1$ 和 $25 \text{ mm}$	搭接长度过小导致焊缝相距越近, 收缩应力越大	$t_1$ 为较薄焊件厚度

其他构造要求：

a. 对于杆件和节点板的连接焊缝，一般宜用两面侧焊缝，也可用三面围焊，对于角钢杆件，可采用“L”形围焊。所有围焊在转角处需连续施焊；当角焊缝在端部作绕角焊时，绕角长度为  $2h_f$ ，且需连续施焊。

b. 承受动力荷载的结构中，垂直于受力方向的焊缝不宜采用不焊透的对接焊缝。

c. 在直接承受动力荷载的结构中，角焊缝表面应做成直线形或凹形，焊脚尺寸的比例：对正面角焊缝宜为 1 : 1.5，长边顺内力方向；对侧面角焊缝可为 1 : 1。

d. 在次要构件或次要焊接连接中，可采用断续角焊缝。断续角焊缝之间的净距，不应大于  $15t$ （对受压构件）或  $30t$ （对受拉构件），其中  $t$  为较薄焊件的厚度。

## (2) 角焊缝的计算。

### ① 端缝、侧缝在轴向力作用下的计算。

a. 端缝：

$$\sigma_f = \frac{N}{\sum h_e l_w} \leq \beta_f f_f^w$$

式中  $\sigma_f$ ——垂直于焊缝长度方向的应力；

$h_e$ ——角焊缝有效厚度；

$l_w$ ——角焊缝计算长度，每条角焊缝取实际长度减去  $2h_f$ （每端减去  $h_f$ ）；

$f_f^w$ ——角焊缝强度设计值；

$\beta_f$ ——端缝的强度增大系数（对承受静力荷载和间接承受动力荷载的结构， $\beta_f = 1.22$ ；对直接承受动力荷载的结构， $\beta_f = 1.0$ ）。

b. 侧缝：

$$\tau_f = \frac{N}{\sum h_e l_w} \leq f_f^w$$

式中  $\tau_f$ ——沿焊缝长度方向的剪应力。

### (2) 角钢杆件与节点板焊接连接，承受轴向力 $N$ 。

角钢端部与节点板连接可采用两侧面角焊缝、三面围焊和“L”形围焊几种形式，见图 3.5。

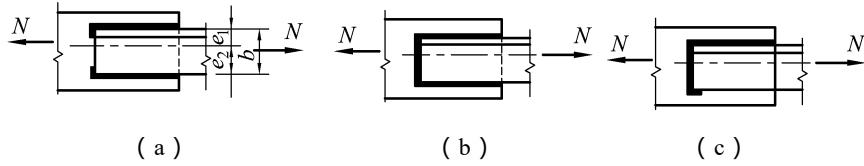


图 3.5 角钢端部与节点板的连接

a. 角钢用两侧焊缝与节点板连接的焊缝计算。

角钢端部用两侧面角焊缝与节点板连接见图 3.5 ( a ), 角钢肢背、肢尖传递的内力分别为  $N_1$ 、 $N_2$ , 其值的大小与到角钢形心的距离有关。

$$\begin{cases} N_1 = \frac{e_2}{b} N = K_1 N \\ N_2 = \frac{e_1}{b} N = K_2 N \end{cases}$$

式中,  $K_1$  和  $K_2$  为焊缝内分配系数, 可查表得到。

算得  $N_1$  和  $N_2$  后可据下式得到肢背、肢尖所需焊缝的长度:

$$l_{w1} \geq \frac{N_1}{h_e f_f^w}, \quad l_{w2} \geq \frac{N_2}{h_e f_f^w}$$

b. 角钢三面围焊与节点板连接的焊缝计算。

角钢端部用三面围焊与节点板连接见图 3.5 ( b ), 先选定焊缝的焊脚尺寸  $h_f$ , 则角钢端部正面角焊缝能传递的内力为

$$N_3 = \beta_f \sum h_e l_{w3} f_f^w$$

假定  $N_3$  作用在  $\frac{b}{2}$  处, 侧由内力平衡可得到  $N_1$  和  $N_2$ :

$$N_1 = K_1 N - \frac{1}{2} N_3, \quad N_2 = K_2 N - \frac{1}{2} N_3$$

肢背、肢尖的焊缝长度计算则与之前相同。

c. 角钢端部用“L”形焊缝与节点板连接角焊缝。

角钢端部用“L”形焊缝与节点板的连接见图 3.5 ( c ), 正面角焊缝为满焊, 肢尖受力为零。由  $N_2 = 0$  得,  $N_3 = 2K_2 N$ , 进而

$$N_1 = (K_1 - K_2) N$$

③ 弯矩、剪力、轴力共同作用下的顶接连接角焊缝。

在弯矩、剪力、轴力共同作用下的顶接连接角焊缝形式见图 3.6, 计算时可先分别计算出在  $M$ 、 $V$ 、 $N$  作用下所产生的应力, 求出可能最危险点的应力分量, 并将同类应力分量代数相加。

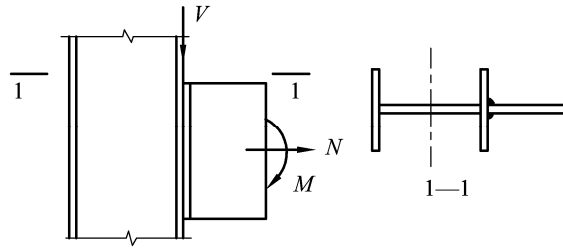


图 3.6 角焊缝连接受弯矩、剪力、轴力共同作用

弯矩  $M$  作用下,  $x$  方向最大应力:  $\sigma_{fx}^M = \frac{6M}{2h_e l_w^2}$

剪力  $V$  作用下,  $y$  方向应力:  $\tau_f^V = \frac{V}{2h_e l_w}$

轴力  $N$  作用下,  $x$  方向应力:  $\sigma_{fx}^N = \frac{N}{2h_e l_w}$

$M$ 、 $V$  和  $N$  共同作用下, 检算焊缝上或下端最危险处强度:

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w$$

式中,  $\sigma_f = \sigma_{fx}^M + \sigma_{fx}^N$ 。

④ 扭矩、剪力、轴力共同作用下的搭接连接角焊缝形式见图 3.7。计算时先确定三面围焊角焊缝计算截面的形心位置  $O$ , 确定该处的扭矩、剪力和轴力; 判断焊缝中最危险点, 算出该点在各方力作用下的应力分量, 并进行代数相加。如图 3.7 所示,  $A$  点为最危险点。

扭矩  $T$  作用下该点应力:

$$\tau_{fx}^T = \frac{Tr_y}{I_x + I_y}, \quad \sigma_{fy}^T = \frac{Tr_x}{I_x + I_y}$$

式中  $I_x + I_y$  —— 焊缝计算截面对形心的极惯性矩;

$r_x, r_y$  —— 焊缝角点  $A$  到焊缝形心的坐标距离。

剪力  $V$  作用下  $A$  点应力:

$$\sigma_{fy}^V = \frac{V}{\sum h_e l_w}$$

轴力  $N$  作用下  $A$  点应力:

$$\sigma_{fx}^N = \frac{N}{\sum h_e l_w}$$

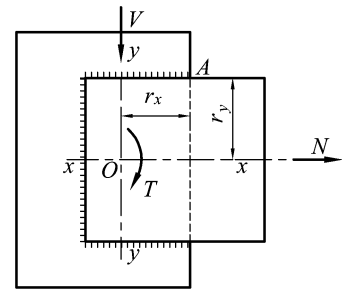


图 3.7 三面围焊搭接连接

在  $T$ 、 $N$  和  $V$  共同作用下, 焊缝中最危险点应力应满足



$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_f^2} \leq f_f^w$$

此时

$$\sigma_f = \sigma_{fy}^T + \sigma_{fy}^V, \quad \tau_f = \tau_{fx}^T + \tau_{fx}^N$$

#### 4. 焊接残余应力和焊接残余变形

钢材焊接时，在焊件上产生局部高温的不均匀温度场。高温部分钢材有较大的膨胀伸长，但受到邻近钢材的约束，因此在焊件内引起较高的温度应力，并在焊接过程中随时间和温度而不断变化，这种应力称为焊接应力。焊接应力较高的部位将达到钢材的屈服强度而发生塑性变形，因而钢材冷却后将有残存于焊件内的应力，称为焊接残余应力。在焊接和冷却过程中，由于焊件受热和冷却都不均匀，除产生内应力外，还会产生变形。焊接和冷却过程中焊件产生的变形称为焊接变形，冷却后残存于焊件的变形称为焊接残余变形。

从根本上讲，只要构件受热温度不均匀并使部分钢材产生塑性变形，就会在冷却至常温后产生残余应力和残余变形。

##### (1) 焊接残余应力的成因与分布。

焊接残余应力有纵向、横向和沿厚度方向的应力。纵向应力是指焊缝长度方向的应力；横向应力是垂直于焊缝长度方向且平行于构件表面的应力；沿厚度方向的应力则是垂直于焊缝长度方向且垂直于构件表面的应力。由于厚度方向温度大致均匀，残余应力很小，只在厚度较大的焊接结构中，厚度方向的应力才达到较高的数值。

##### ① 纵向焊接残余应力。

钢材焊接时，焊件上产生了不均匀的温度场，焊缝及其附近温度最高，达 1 600 °C 及以上，其邻近区域则温度相对很低。高温处的钢材膨胀大，由于受到两侧温度较低、膨胀较小的钢材的限制，产生了热状态的塑性压缩，故产生了如图 3.8 所示的纵向焊接应力。

焊缝冷却时，被塑性压缩的焊缝区趋向于缩得比原始长度稍短，这种缩短变形受到两侧钢材的限制，使焊缝区产生纵向拉应力，在焊件上产生了如图 3.8 所示的残余应力。

焊接加热还有一个特点就是钢材中有相当部分高温超过 600 °C，使钢材处于高温热塑状态，这时变形模量为零，钢材可自由膨胀或收缩而完全不受邻近钢材约束，并且内应力完全消失至零。这部分钢材冷却到 600 °C 以下时，进一步冷缩将受邻近温度较低钢材的限制，则应力将由零立即转为受拉（250 ~ 600 °C 部分的钢材虽然不是完全处于热塑性状态，但因高温下屈服强度和变形模量的严重降低，受热时产生的压应力也是较低的，冷却时将很快转为拉应力）。

残余应力是构件未受荷载时的应力，因而是自相平衡的内应力体系，即在任何截面上残余应力均有拉有压，内力和内力矩平衡。

纵向焊接残余应力的分布规律：焊缝及其附近区域在高温时发生塑性压缩变形，因而冷却后产生残余拉应力；离焊缝较远区域中则出现与之相平衡的残余压应力。H 形、箱形截面杆件的焊接残余应力分布如图 3.9 所示。

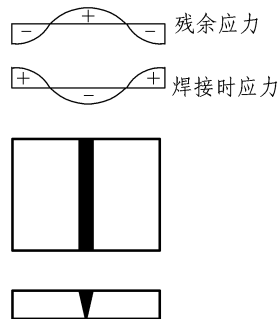


图 3.8

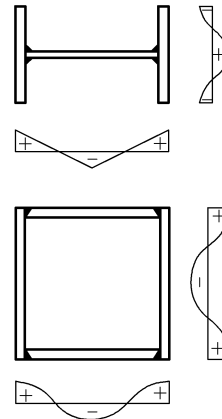


图 3.9 纵向焊接残余应力分布

② 横向焊接残余应力。

横向焊接残余应力由两部分组成：一是焊缝纵向收缩，使两块钢板趋向于形成反方向的弯曲变形，实际上焊缝将两块板连成整体，于是两块板中间产生横向拉应力，两端则产生压应力；二是由于焊缝在施焊过程中冷却时间的不同，先焊的焊缝已经凝固，且具有一定强度，会阻止后焊的焊缝在横向自由膨胀，使后焊的焊缝发生横向塑性压缩变形，当先焊部分凝固后，中间焊缝部分逐渐冷却，后焊部分开始冷却，这三部分产生杠杆作用，结果后焊部分收缩而受拉，先焊部分因杠杆作用也受拉，中间部分受压。这两种横向应力叠加成最后的横向焊接残余应力。

③ 沿厚度方向的焊接残余应力。

厚钢板进行焊接时，焊缝与钢板接触面、与空气接触面散热较快而先冷却，而内部的焊缝后冷却，后冷却的焊缝收缩变形受到外面已冷却焊缝的阻碍，因而形成中间受拉、四周受压的应力状态。

(2) 焊接残余应力的影响。

① 对结构构件静力强度的影响。

如图 3.10 所示受拉钢板，为便于分析，假定纵向拉、压残余应力均达到屈服强度  $f_y$ 。外拉力  $N$  只由压应力区承受，在该区先抵消残余压应力，然后受拉达到  $f_y$ ，即

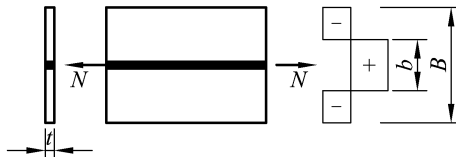


图 3.10 纵向残余应力简化

$$N = (B - b)t[f_y - (-f_y)] = (B - b)tf_y + (B - b)tf_y$$

因为残余应力是自相平衡的内力，所以：

$$(B - b)tf_y = btf_y$$

则 
$$N = (B - b)tf_y + btf_y = Btf_y$$

可见构件的承载力与无残余应力时相同，所以，焊接残余应力对结构的静力强度无影响。

(2) 对结构构件刚度的影响。

仍以图 3.10 所示钢板为例，在外拉力作用下，残余拉应力塑性区不再具有抵抗变形的能力，构件的拉应变为

$$\varepsilon' = \frac{N}{EA} = \frac{N}{(B - b)tE}$$

无残余应力时，全截面受力，这时的拉应变为

$$\varepsilon = \frac{N}{EA} = \frac{N}{BtE}$$

显然， $\varepsilon' > \varepsilon$ ，即：存在焊接残余应力时，构件的变形增大了，也就是刚度减小了。

(3) 对结构构件稳定性的影响。

构件受压时，残余压应力区不能再承压，只有残余拉应力区截面抵抗外力作用，构件的有效截面和有效惯性矩减小了，所以构件的稳定性必然降低。

(4) 对结构疲劳强度的影响。

残余拉应力加快疲劳裂纹开展的速度，从而降低了焊缝及其附近主体金属的疲劳强度。

(5) 对低温冷脆的影响。

焊接结构中存在着双向或三向拉应力场，使其塑性变形受阻，焊缝变脆，低温时变得更脆。

### 3. 焊接残余变形

焊接残余变形包括纵向变形、横向变形、弯曲变形、角变形、折皱变形、凹凸变形、扭曲变形等。焊接残余变形影响结构的尺寸精度和外观，并导致构件的初弯曲、初扭曲、初偏心等，使结构受力时产生附加的弯矩、扭矩和变形，从而降低其强度和稳定的承载力。

### 4. 减小或消除焊接残余应力和焊接残余变形的的方法

多数焊接残余应力和焊接残余变形是由于构造不当或焊接工艺欠妥引起的，为了减少其对结构构件造成的不利影响，应从设计和焊接工艺两方面采取适当措施。

(1) 设计措施。

① 尽量减少焊缝的数量和尺寸，采用适宜的焊脚尺寸和长度。搭接角焊缝宜采用细长焊缝，不用粗短焊缝，以避免焊接热量过于集中。

② 焊缝尽可能对称布置，连接尽量平滑，对于不同宽度或厚度的焊件，采用一定坡度的过渡，避免截面突变而引起过大的应力集中。

③ 避免焊接过分集中或多方向焊缝相交于一点，以免相交处形成多向同号应力场，使钢材变脆。为防止多方向焊缝相交，常采用使次要焊缝断开，而主要焊缝连续通过的构造。

④ 搭接连接中搭接长度应不小于  $5t_{\min}$  和 25 mm，且不应只采用一条正面角焊缝传力。

⑤ 焊缝应布置在焊工便于施焊的位置，尽量避免仰焊。

## (2) 焊接工艺。

① 采用合理的焊接顺序和方向，如对称焊、分段焊、厚度方向分层焊等。

② 先焊收缩量较大的焊缝，后焊收缩量小的焊缝，先焊错开的短缝，后焊通直的长缝，使其有较大的横向收缩余地。

③ 先焊使用时受力较大的主要焊缝，后焊受力较小的次要焊缝，这样可使受力较大的焊缝在焊接和冷却过程中有一定范围的伸缩余地，可减小焊接残余应力。

④ 反变形法施焊前使构件有一个与焊接残余变形相反的预变形，以减小最终的总变形。但在施焊时添加约束的做法是不对的，因为如果焊件在施焊时受到外界约束，焊接变形因受到约束的限制而减小，但会产生更大的残余应力。

⑤ 预热即施焊前先将构件整体或局部预热至  $100 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，焊后保温一段时间，以减小焊接和冷却过程中温度的不均匀程度，从而降低焊接残余应力并减少发生裂纹的危险。

⑥ 高温回火（退火）在施焊后进行高温回火，即加热至  $600 \sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，保持一段时间恒温后缓慢冷却。对较小焊件可进行整体高温回火，由于加热已达到钢材的热塑温度，可消除大部分残余应力；对较大焊件有时可对焊缝附近或残余应力较大部位附近进行局部高温回火，以减小焊接残余应力。

⑦ 用头部带小圆弧的小锤轻击焊缝，使焊缝得到延展，也可降低焊接残余应力。