

钢结构的连接

学习目标

- (1) 了解钢结构连接的种类和各种连接的特点。
- (2) 了解常用焊接方法和焊条的选用。
- (3) 了解焊接连接的形式,掌握焊接符号及标注方法。
- (4) 掌握对接焊缝的构造和计算。
- (5) 掌握角焊缝的形式、构造和计算。
- (6) 了解焊接残余应力和焊接残余变形的产生原因,以及对构件工作性能的影响。
- (7) 熟悉普通螺栓的规格、受力性能和破坏形式。
- (8) 掌握普通螺栓的计算方法。
- (9) 掌握高强度螺栓连接的工作性能和计算方法。

3.1 钢结构连接概述

钢结构是由钢板、型钢等钢材在工厂加工成构件,再运输到工程现场拼装组合而成的一种结构。钢结构构件的制作(如采用组合截面的构件)或构件与构件的拼装均需通过连接组合成一体。因此,连接在钢结构中占有很重要的地位。钢结构连接设计的好坏,将对钢结构的使用性能、施工难易程度、寿命长短和工程造价等产生直接影响。在进行连接设计时,应选择合理的连接方法,既要做到传力明确、安全可靠,又要保证构造简单、施工简便。

钢结构的连接方法可分为焊缝连接、铆钉连接和螺栓连接等,如图 3-1 所示。铆钉连接和螺栓连接统称紧固件连接。

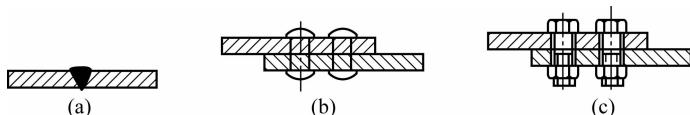


图 3-1 钢结构的连接方法
(a) 焊缝连接 (b) 铆钉连接 (c) 螺栓连接

3.1.1 焊缝连接

焊缝连接也称焊接连接,是目前钢结构最常用的连接方法,除了少数承受动力荷载的结构因易产生疲劳不宜采用外,其他任何形状的钢结构材料都可以用焊接进行连接。焊缝连接的操作原理是通过电弧产生的高温使焊件局部和填充金属熔融结合,冷却后形成牢固连接的焊缝,从而使两个焊件连成一体。

焊缝连接的优点较多,如对焊件几何形体的适应性强,焊件可不设连接板而直接相连,构造比较简单;连接时,焊件无须开孔,不削弱截面,不需要额外的连接件,构造简单,用料经济;一定条件下可实现自动化操作,焊缝质量较为稳定,制作加工较为方便省工,生产效率较高;连接的密闭性好,连接刚度大,整体性好;等等。目前,焊缝连接在钢结构连接中占有绝对的优势。但是,焊缝连接也存在一定的缺点,如焊缝附近高温熔融形成的热影响区使钢材的金相组织和力学性能发生变化,导致材质变脆;焊接过程中产生的焊接残余应力将降低受压构件的承载力,残余变形使结构的形状、尺寸发生变化;焊接结构刚度大,对裂纹敏感,一旦局部存在裂纹很容易扩展到整体,低温冷脆问题较为突出。同时,焊接质量受材料及操作过程的影响较大,焊接程序严格,焊接后期的检验工作量较大。

3.1.2 铆钉连接

利用铆钉把两个或多个零件或部件连接成一个整体,称为铆钉连接,简称铆接。铆接属于不可拆卸连接。铆钉由铆钉杆和铆钉头组成。铆钉按铆钉头的形状可分为半圆头铆钉、高头铆钉、埋头铆钉和半埋头铆钉4种,钢结构中一般多采用半圆头铆钉。

铆接的应用已有上百年的历史,虽然其连接刚度大,传力可靠,塑性和韧性较好,且连接变形小,承受动力荷载时抗疲劳性能好,质量易于检查,但是制造费工费钢,劳动强度大,施工速度慢,因此随着焊接和高强度螺栓连接技术的发展,铆钉连接的应用正逐渐减少。目前,铆接仅用在少数受严重冲击和振动荷载的金属结构上,如桥梁、船舶、重型机械及飞机等。铆接的性能与螺栓连接类似,其构造和计算可参照螺栓连接。

3.1.3 螺栓连接

根据螺栓所使用钢材的性能等级的不同,螺栓连接可分为普通螺栓连接和高强度螺栓连接。

1. 普通螺栓连接

《六角头螺栓》(GB/T 5782—2016)和《六角头螺栓 C级》(GB/T 5780—2016)将普通螺栓分为A、B和C三个等级。螺栓材料均采用碳素结构钢。

A级和B级为精制螺栓,采用钢材性能等级为5.6级(小数点前的5表示抗拉强度 $f_u \geq 500 \text{ N/mm}^2$,小数点后的6表示屈强比为0.6,其他几个等级的表示方法类似)或8.8级制造,螺栓表面应用车床加工光滑,配套的栓孔为精度较高的I类孔,螺栓设计孔径和螺杆直径相同。普通A级、B级螺栓连接有良好的受剪性能,但对栓孔的加工精度要求较高,且制作和安装费时费工,价格较高,目前在钢结构连接中已很少采用。

C级为粗制螺栓,采用钢材性能等级为4.6级或4.8级制造,螺栓表面无须加工,配套的栓孔为精度一般的Ⅱ类孔(一次冲成或不用钻模钻成设计孔径),栓孔与螺杆直径之差为1.0~1.5 mm,加工方便,价格较低。由于螺栓的材料强度不大,因此栓杆所能承受的紧固预拉力不能过大。当螺栓受剪时,板叠间的摩擦力较易被克服,从而产生较大的滑移变形,故受剪性能较差。普通C级螺栓一般可用于承受静力荷载或间接动力荷载的次要受剪连接或安装时的临时固定。此外,普通C级螺栓沿杆轴方向有良好的受拉性能,可用于受拉连接。

2. 高强度螺栓连接

高强度螺栓由中碳钢或合金钢等经热处理后制作而成,强度有10.9S和8.8S两种等级。以10.9S为例,小数点前的10表示抗拉强度不小于1 000 N/mm²,小数点后的9表示屈强比为0.9,S表示高强度螺栓。10.9S级高强度螺栓常采用的材料为20MnTiB和35VB钢,8.8S级高强度螺栓常采用的材料为40B钢、45号钢或35号钢。10.9S级配套螺母采用45号钢、35号钢或15MnVB钢,8.8S级配套螺母采用35号钢。两种等级的螺栓所用的配套垫圈为45号钢或35号钢。由于高强度螺栓所采用的材料的强度较高,因此其栓杆可承受较大的紧固预拉力,使连接的接触面有较大的预压力。

通常,高强度螺栓可分为高强度螺栓摩擦型连接和高强度螺栓承压型连接两类。这两类高强度螺栓对螺栓材质、预拉力大小及安装施工等的要求完全相同,但两者的传力方式和设计准则不同。高强度螺栓摩擦型连接依靠板叠间的摩擦力传递剪力,当摩擦力被克服时即认为螺栓失效,因此将摩擦力刚要被克服作为连接承载能力极限状态。高强度螺栓摩擦型连接的特点是变形小,连接紧密,耐疲劳,动力性能好。为了增大摩擦,提高连接的承载能力,应对连接处的板件接触面进行处理。高强度螺栓承压型连接是以板叠间的摩擦力被克服并产生相对滑移,利用孔壁承压和螺杆受剪来传递剪力的,当螺杆或钢板刚被破坏时,螺栓连接处于承载能力极限状态。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定,高强度螺栓摩擦型连接可采用标准孔、大圆孔和槽孔,孔型尺寸可按表3-1采用。当高强度螺栓承压型连接采用标准孔时,其螺栓孔径也可按表3-1采用。高强度螺栓承压型连接的工作性能同普通C级螺栓,但高强度螺栓的材料强度和预拉力均优于普通C级螺栓,所以其承载力高于普通C级螺栓。

表 3-1 高强度螺栓连接的孔型尺寸匹配

单位:mm

螺栓公称直径		M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	
孔型	标准孔	直径	13.5	17.5	22	24	26	30	33
	大圆孔	直径	16	20	24	28	30	35	38
	槽孔	短向	13.5	17.5	22	24	26	30	33
		长向	22	30	37	40	45	50	55

3.2 焊接方法、焊缝类型、焊接连接的形式和焊缝质量等级

3.2.1 焊接方法

焊接方法种类繁多。钢结构中焊缝连接主要采用的方法有手工电弧焊、自动或半自动埋弧焊、二氧化碳气体保护焊。

1. 手工电弧焊

图 3-2 为手工电弧焊的原理。电焊机的两个电极通过导线分别与焊件和焊钳相连,施焊时,手持焊钳夹住焊条,将焊条末端瞬间与焊件接触形成短路后移开,产生的高温电弧使焊条和焊件局部熔化,待其冷却后即可形成焊缝金属。焊条表面的药皮熔化后会在焊缝表面产生大量的气体和熔渣,这些覆盖在表面的气体和熔渣可以起到隔绝空气的作用,防止空气中的氧、氮等有害气体侵入焊缝使之变脆,同时,药皮熔化后可补充部分对焊缝有益的合金元素,改善焊缝的质量。当焊件较厚时,一般采用正接(正极接焊件、负极接焊条)。

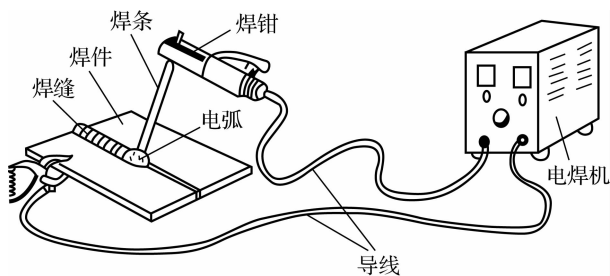


图 3-2 手工电弧焊的原理

手工电弧焊的优点是:电焊设备简单,操作灵活方便,使用时不受空间方位的限制,应用极其广泛,尤其适用于现场的安装焊缝。其缺点也较为明显:焊接过程需要依赖人工操作,生产效率较低,工人劳动条件差,劳动强度大,焊接质量主要取决于焊接工人的技术水平,容易产生一定的波动。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定,在施焊时,应选用与母材相匹配的焊条。当焊件为 Q235 钢时,应选用 E43××型系列焊条;当焊件为 Q345 钢时,应选用 E50××型系列焊条;当焊件为 Q390 钢和 Q420 钢时,应选用 E55××型系列焊条;当焊件选用不同强度的钢材时,宜选用与低强度焊件相适应的焊条,如焊件分别为 Q345 钢和 Q390 钢,宜选用 E50××型系列焊条。焊条型号中的 E 表示焊条,后面的两位数字(43、50、55)表示焊条内钢丝的抗拉强度最小值(单位为 kgf/mm^2),××为两个数字(表示电流种类、药皮及焊接位置)。

2. 自动或半自动埋弧焊

图 3-3 为自动埋弧焊的原理,使用到的焊接设备为自动电焊机。电焊机通电后,送丝器将焊丝通过焊丝转盘传送至与焊件接触,此时,在焊丝和焊件间产生电弧,同时,焊剂

漏斗沿焊接方向不断将焊剂铺在焊接表面,高温电弧将焊丝、焊件和焊剂熔化。焊剂熔化所形成的熔渣覆盖在焊缝金属表面,起到隔绝空气的作用,同时可以很好地补充必要的合金元素,改善焊缝的质量。在焊接过程中,电焊机以一定的速度向焊缝前进的方向移动,焊丝也在焊丝转盘的作用下下降进行补充,同时焊剂从焊剂漏斗中落下盖住电弧,俗称埋弧焊。当电焊机自动移动时,称为自动埋弧焊;当电焊机靠人工移动时,称为半自动埋弧焊。

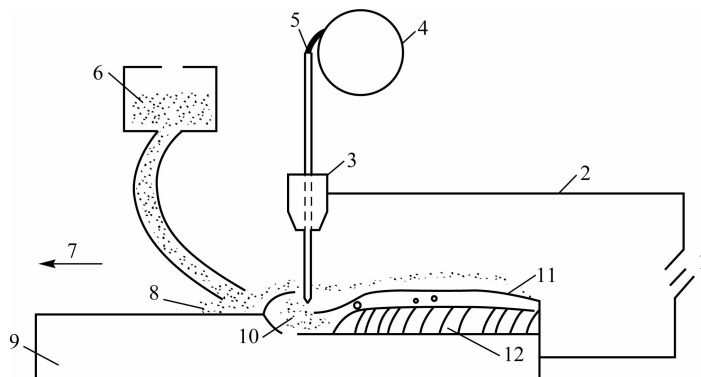


图 3-3 自动埋弧焊的原理

1—电源; 2—导线; 3—夹具; 4—焊丝转盘; 5—焊丝; 6—焊剂漏斗; 7—移动方向;
8—溶剂; 9—焊件; 10—电弧; 11—熔化的溶剂; 12—焊缝

自动或半自动埋弧焊在选用焊丝和焊剂时,应遵循与焊件主体金属相适应的原则,焊丝的选择应符合国家标准《熔化焊用钢丝》(GB/T 14957—1994)、《非合金钢及细晶粒钢药芯焊丝》(GB/T 10045—2018)及《热强钢药芯焊丝》(GB/T 17493—2018)等相关规范的规定,焊剂的选择应符合《埋弧焊用非合金钢及细晶粒钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》(GB/T 5293—2018)和《埋弧焊用热强钢实心焊丝、药芯焊丝和焊丝-焊剂组合分类要求》(GB/T 12470—2018)等规范的规定。

由于埋弧焊使用的电流较大,因而焊件的熔深较大,焊缝内部的缺陷较少,焊缝质量容易控制,焊缝较手工焊更均匀,塑性和冲击韧性更好。另外,埋弧焊的自动化程度高,焊接速度快,生产效率高,劳动强度低。但是,埋弧焊设备投资大,且施工位置受限(一般适用于平焊和水平角焊缝),故主要用于大批量的工厂焊缝。

3. 二氧化碳气体保护焊

二氧化碳气体保护焊的焊接原理(见图 3-4)与埋弧焊相同,只是焊接时不再使用焊剂,而是采用喷枪喷出的二氧化碳气体来保护电弧和焊缝金属,使之与空气隔绝。由于二氧化碳遇高温时易分解成一氧化碳和氧气,因此在焊丝选择上应选用含亲氧元素(Mn和Si)较多的焊丝。二氧化碳气体保护焊在焊接时没有熔渣,焊接速度快,熔深大,焊缝质量好,且可手工或自动化操作,焊缝强度较手工电弧焊的高,是一种较好的焊接方法。然而这种方法对焊缝周围的风速要求较高(防止二氧化碳保护气体被吹散),一般应在室内操作,因此其使用范围受到限制,没有前面两种方法应用广泛。

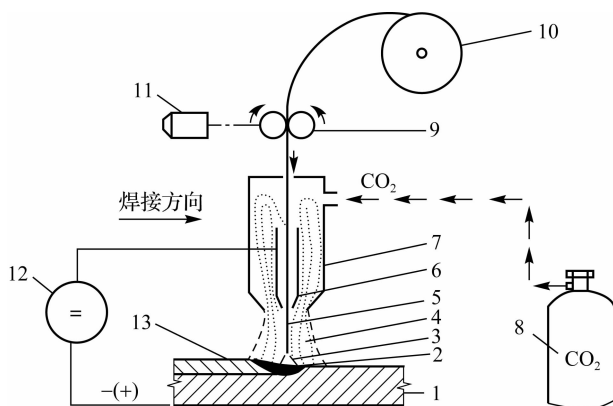


图 3-4 二氧化碳气体保护焊的焊接原理

- 1—母材；2—熔池；3—电弧；4—CO₂ 保护区；5—焊丝；6—导电嘴；
7—喷嘴；8—CO₂ 气瓶；9—送丝滚轮；10—焊丝盘；
11—送丝电动机；12—直流电源；13—焊缝

3.2.2 焊缝类型

钢结构的焊缝类型主要有对接焊缝和角焊缝两种。

对接焊缝(坡口焊)传力明确、用料经济、构造简单,不会产生明显的应力集中,但常需对焊件边缘开坡口,加工精度要求较高。角焊缝受力较复杂,传力不直接,但构造简单,加工精度没有对接焊缝要求的高,目前应用广泛。

对接焊缝按受力方向与焊缝长度方向之间的关系可分为正对接焊缝和斜对接焊缝。当受力方向与焊缝长度方向垂直时为正对接焊缝[见图 3-5(a)],当受力方向与焊缝长度方向斜交时为斜对接焊缝[见图 3-5(b)]。

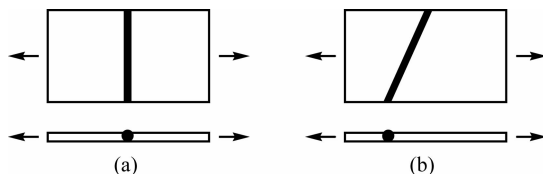


图 3-5 对接焊缝

(a)正对接焊缝 (b)斜对接焊缝

角焊缝按受力方向与焊缝长度方向之间的关系可分为正面角焊缝、侧面角焊缝和斜焊缝,如图 3-6 所示。当受力方向与焊缝长度方向垂直时为正面角焊缝,当受力方向与焊缝长度方向平行时为侧面角焊缝,当受力方向与焊缝长度方向斜交时为斜焊缝。

角焊缝按沿长度方向的布置不同,可分为连续角焊缝和断续角焊缝,如图 3-7 所示。连续角焊缝的受力性能相对较好,是基本的焊缝形式。断续角焊缝在单条短焊缝的两端应力集中很严重,一般仅用于受力不大的次要焊缝连接。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定断续角焊缝焊段的长度不应小于 10 倍焊脚尺寸或 50 mm,其净距 l 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。这种构造要求

是为了避免间隙过大导致连接不够紧密,潮气进入使构件锈蚀。腐蚀环境中不宜采用断续角焊缝。

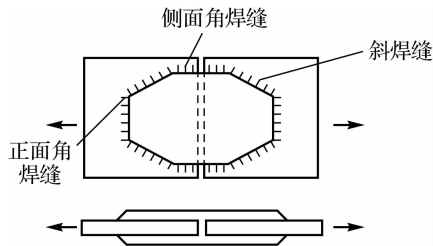


图 3-6 角焊缝

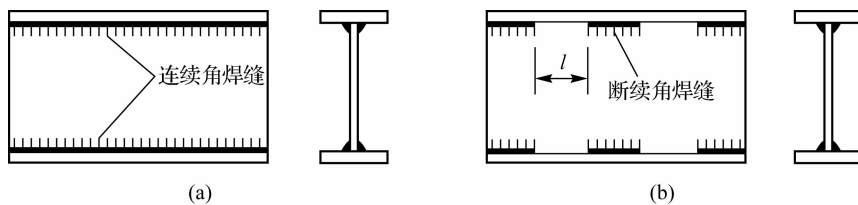


图 3-7 连续角焊缝和断续角焊缝

(a)连续角焊缝 (b)断续角焊缝

根据施焊时焊接位置的不同,焊缝连接可分为平焊、立焊、横焊和仰焊,如图 3-8 所示。平焊也称俯焊,焊接时,焊工俯视操作不易疲劳,是一种最有利于焊接操作的空间位置。平焊施工简便,生产效率高,质量最易保证,有条件时应尽量采用。立焊和横焊的施工难度较平焊大,质量较平焊也差些。仰焊是焊工从下而上仰视施焊的一种方位,其施工难度最大,焊缝质量最差,一般应尽量避免使用。

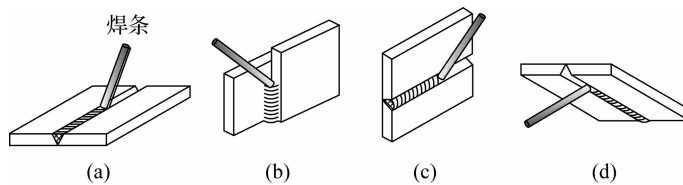


图 3-8 焊缝连接

(a)平焊 (b)立焊 (c)横焊 (d)仰焊

3.2.3 焊接连接的形式

根据被连接件之间的相对位置不同,钢结构焊接连接的形式有对接连接、搭接连接、T形连接、角接连接等,如图 3-9 所示。

图 3-9(a)为采用对接焊缝的对接连接,其特点是用料经济,传力简单且均匀,受力性能好,但焊缝加工精度要求严格,较为费工。

图 3-9(b)为采用拼接盖板并利用角焊缝连接的对接连接,其特点是传力不明确,用料较多,焊缝连接处的应力集中较明显,但对焊件边缘尺寸的要求较低,施工较为便捷。

图 3-9(c)为搭接连接,其特点和图 3-9(b)所示的对接连接类似,但构造相对更为简单,施工更为方便,目前被广泛采用。

图 3-9(d)为采用角焊缝的 T 形连接,此种连接受力性能较差,但构造较简单,目前也得到较多应用。

图 3-9(e)为采用对接焊缝的 T 形连接,其特点和对接连接类似,且动力性能好,耐疲劳,尤其适用于需要验算疲劳的结构。

图 3-9(f)为采用角焊缝的角接连接,其特点与采用角焊缝的 T 形连接类似。

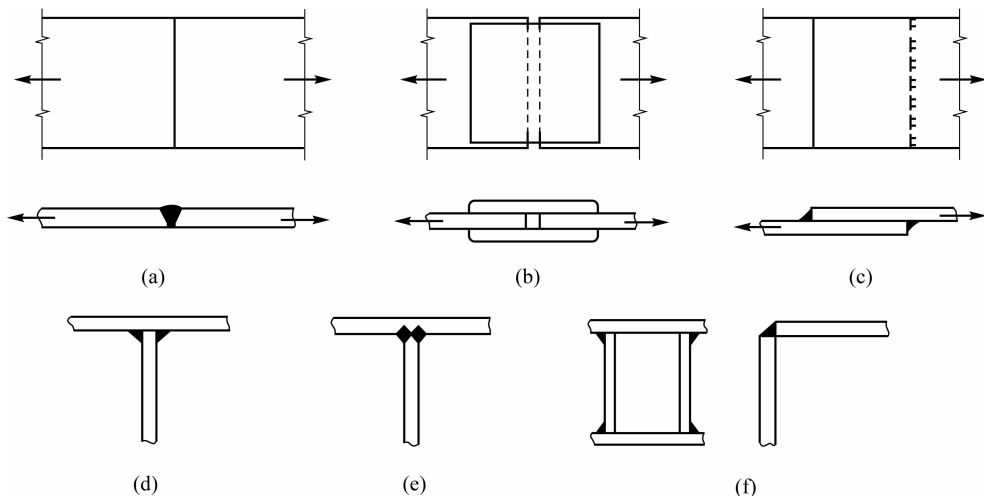


图 3-9 焊接连接的形式

(a)采用对接焊缝的对接连接 (b)采用拼接盖板并利用角焊缝连接的对接连接 (c)搭接连接
(d)采用角焊缝的 T 形连接 (e)采用对接焊缝的 T 形连接 (f)采用角焊缝的角接连接

3.2.4 焊缝质量等级

焊接时,应根据焊件的钢材种类和施工条件选择合适的焊接工艺,并严格按照焊接相关技术规范进行操作,最后对成品焊缝进行质量检验。焊缝质量往往会直接影响到连接的强度,焊缝质量不达标可能会导致连接破坏。

1. 焊缝缺陷

常见的焊缝缺陷有裂纹(包括热裂纹和冷裂纹)、气孔、烧穿、夹渣、根部未焊透、未熔合、咬边、焊瘤等,如图 3-10 所示。其中,能通过肉眼或低倍放大镜观察到且位于焊缝表面的缺陷称为外观缺陷,如咬边、裂纹、气孔、焊瘤、夹渣等;其他不能通过前述方法观察到的焊缝缺陷称为内部缺陷。

(1)裂纹。裂纹是指焊缝中原子结合被破坏所形成的缝隙。一般在焊接过程中即出现的裂纹,称为热裂纹。焊接完毕一段时间(几小时、几天或更长时间)后才出现的裂纹,称为冷裂纹,也称延迟裂纹。裂纹的产生主要与钢材的化学成分不当、不合适的焊接工艺和不合适的焊接程序有关。裂纹易导致脆性破坏,后果严重。

(2)气孔。气孔是指在焊接过程中气泡未能在焊缝凝固前逸出而形成的孔洞。焊条

不良或潮湿、焊接速度过快、焊件厚度大而金属冷却过快等影响因素均可能导致气孔产生。气孔的存在会导致焊缝的有效截面减小,焊缝的致密性受到影响,容易造成泄漏。为避免产生气泡,可以采取选择适当的焊条并烘干、降低焊接速度、使用建议电流、焊接前适当预热等措施。

(3)烧穿。烧穿是熔化的金属在焊接过程中自坡口背面流出形成穿孔的一种缺陷。产生烧穿的主要原因是焊接电流过大、焊接速度过慢、装配间隙过大或钝边尺寸过小。

(4)夹渣。夹渣是指微粒焊渣在焊缝金属凝固时来不及浮至金属表面而残留在焊缝中的熔渣。导致夹渣产生的原因有很多,如焊缝间隙有异物、运条速度过快或过慢、焊接电流过低、焊条选择不当等。

(5)根部未焊透。根部未焊透是指焊件接头处的根部未完全熔透,其产生的主要原因是焊接电流过小、焊接速度过快、焊接角度不当、焊件冷却过快或坡口形状和间隙不合适等。

(6)未熔合。未熔合是指焊接时焊缝金属与坡口处母材之间或焊缝金属内部层间未完全熔合的部分。其产生的主要原因是焊接电流过小和焊接速度过快而引起焊接线能量不够或坡口处内壁有污物等。

(7)咬边。咬边是指焊缝两侧与母材金属交界处形成的凹槽。咬边主要是由焊接参数选择不当或母材不洁、母材过热引起的。咬边会减小母材金属的有效截面,降低连接的强度,且在咬边处存在应力集中现象,在荷载作用下可能产生裂纹甚至导致结构破坏。

(8)焊瘤。焊瘤是指熔化的金属在焊接时流淌到焊缝以外未熔化的母材上冷却后形成的金属瘤。焊缝间隙过大、电流过大、焊接速度过快、焊条位置不当均有可能引起焊瘤的产生。焊瘤不仅影响焊缝外观,而且焊瘤附近的焊缝内部可能存在未焊透缺陷,影响焊缝强度。

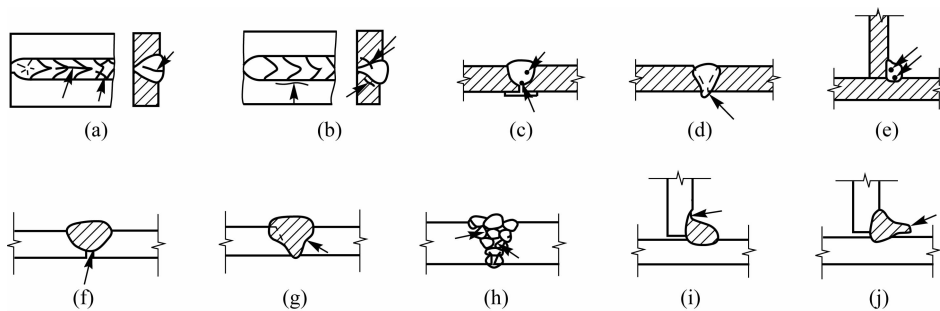


图 3-10 焊缝缺陷

(a)热裂纹 (b)冷裂纹 (c)气孔 (d)烧穿 (e)夹渣
(f)根部未焊透 (g)、(h)未熔合 (i)咬边 (j)焊瘤

焊缝缺陷的严重程度及危害性与缺陷的大小、所处部位和性质等有关。其中,裂纹、未熔合和根部未焊透属严重缺陷,一般不允许存在。受拉区的焊缝缺陷危害比受压区的更严重,受动力荷载作用的构件焊缝缺陷危害比受静力荷载作用的更严重。

2. 焊缝的质量等级及质量检验

《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205—2001)规定:焊缝按其检验方法和质量要求分为一级、二级和三级。三级焊缝只要求对全部焊缝做外观检查(检查外观缺陷和几何尺寸)且符合三级质量标准;一、二级焊缝除对全部焊缝做外观检查并符合相应级别的质量标准外,尚要求一定数量(一级要求 100%焊缝长度,二级要求 20%焊缝长度)的超声波探伤检验,当超声波探伤不能对缺陷做出判断时,应采用射线探伤检验,并应符合国家相应质量标准的要求。

《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定,焊缝的质量等级应根据结构的重要性、荷载特性、焊缝形式、工作环境及应力状态等情况,按下列原则选用:

(1)在承受动荷载且需要进行疲劳验算的构件中,凡要求与母材等强连接的焊缝应焊透,其质量等级应符合下列规定:

①作用力垂直于焊缝长度方向的横向对接焊缝或 T 形对接与角接组合焊缝,受拉时应为一级,受压时不应低于二级。

②作用力平行于焊缝长度方向的纵向对接焊缝不应低于二级。

③重级工作制(A6~A8)和起重量 $Q \geq 50$ t 的中级工作制(A4、A5)吊车梁的腹板与上翼缘之间以及吊车桁架上弦杆与节点板之间的 T 形连接部位焊缝应焊透,焊缝形式宜为对接与角接的组合焊缝,其质量等级不应低于二级。

(2)在工作温度等于或低于 -20 °C 的地区,构件对接焊缝的质量不得低于二级。

(3)不需要疲劳验算的构件中,凡要求与母材等强的对接焊缝宜焊透,其质量等级,受拉时不应低于二级,受压时不宜低于二级。

(4)部分焊透的对接焊缝、采用角焊缝或部分焊透的对接与角接组合焊缝的 T 形连接部位,以及搭接连接角焊缝,其质量等级应符合下列规定:

①直接承受动荷载且需要疲劳验算的结构和吊车起重量等于或大于 50 t 的中级工作制吊车梁以及梁柱、牛腿等重要节点不应低于二级。

②其他结构可为三级。

3.3 焊缝符号及标注方法

钢结构施工图中的焊缝应按《建筑结构制图标准》(GB/T 50105—2010)和《焊缝符号表示法》(GB/T 324—2008)的相关规定采用焊缝符号进行标注。

1. 焊缝符号

焊缝符号主要由指引线和表示焊缝截面形状的基本符号组成,必要时可添加辅助符号(如现场安装焊缝)和其他补充符号。

(1)指引线。指引线由箭头线和基准线组成。基准线有两条,其中一条为细实线,另一条为细虚线,如图 3-11 所示。基准线一般平行于图纸底边,特殊情况时也可与底边垂直。图 3-11(a)和图 3-11(c)表示的意义相同,均表示图 3-11(b)所示的单面角焊缝。为引线方便,有必要时箭头线允许弯折一次。《建筑结构制图标准》(GB/T 50105—2010)中

将基准线简化为一条实线,即取消虚线基准线。

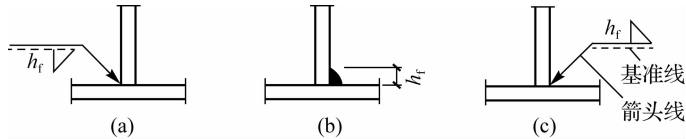


图 3-11 指引线的画法

(2)基本符号。基本符号可以很直观地表示出焊缝截面的形状。常见的焊缝基本符号如表 3-2 所示。

表 3-2 常见的焊缝基本符号

名称	封底焊缝	对接焊缝					角焊缝	塞焊缝或槽焊缝	点焊缝
		I形焊缝	V形焊缝	单边V形焊缝	带钝边的V形焊缝	带钝边的U形焊缝			
符号			V	∨	Y	U	△	□	○

注 1:基本符号的线条宜粗于指引线。

注 2:单边 V 形焊缝和角焊缝符号的竖线永远在左边。



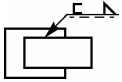


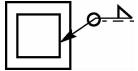

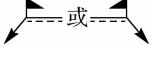


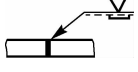


基本符号和指引线(包括箭头线和基准线)的相对位置不同,所表示的焊缝位置也不同。一般,当基本符号在基准线实线侧时,表示焊缝在箭头所指的一侧;当基本符号在基准线虚线侧时(或无虚线基准线,基本符号在实线基准线下方),表示焊缝在箭头所指的另一侧(或非箭头侧)。双面焊缝只有一条实线基准线,基本符号在基准线的上方和下方对称标注;对于单面对接焊缝,箭头所指侧为开坡口侧。

(3)辅助符号和补充符号。焊缝符号中常用的辅助符号和补充符号如表 3-3 所示。辅助符号主要用来表示焊缝表面的形状特征,如对接焊缝表面余高部分需要加工成与焊件表面齐平,则可在对接焊缝符号上加画一短划,此短划即为辅助符号。补充符号用来补充说明焊缝的某些特征。补充符号均绘制在指引线的转折处,如工地现场的安装焊缝用涂黑的三角形旗号来表示,相同焊缝用 3/4 圆弧来表示,等等。

表 3-3 焊缝符号中常用的辅助符号和补充符号

名称	焊接示意	符号	示例
辅助符号	平面符号		
	凹面符号		

(续表)

名 称	焊接示意	符 号	示 例
三面焊缝符号			
周围焊缝符号			
补充符号 现场焊缝符号			
焊缝底部有垫板的 符号			
尾部符号			

注 1: 现场焊的旗尖指向基准线的尾部。

注 2: 尾部符号用以标注需说明的焊接工艺方法和相同焊缝数量。

2. 焊缝尺寸的标注方法

- (1) 焊缝横向尺寸(如焊脚尺寸 h_f)标注在基本符号的左侧。
- (2) 焊缝纵向尺寸(如焊缝长度 l_w)标注在基本符号的右侧。
- (3) 对接焊缝的坡口角度、坡口面角度、根部间隙等尺寸标注在基本符号的上侧或下侧。
- (4) 相同焊缝数量标注在尾部。
- (5) 当尺寸较多不易分辨时,可在尺寸数据前标注相应的尺寸符号。
- (6) 当箭头线方向改变时,上述规则不变。

3.4 对接焊缝的构造和计算

3.4.1 对接焊缝的构造

当焊件采用对接焊缝连接时,为了能够让焊缝焊透,保证焊接质量,常需要在焊件边缘开坡口。坡口形式与焊件的厚度有关。常见的坡口形式有 I 形缝(垂直坡口)、单边 V 形缝、Y 形缝、U 形缝、双单边 V 形缝、双 Y 形缝等,如图 3-12 所示。

当焊件厚度很小时(手工焊,焊件厚度 $t \leq 6$ mm;埋弧焊,焊件厚度 $t \leq 10$ mm),可不开坡口,即坡口形式采用 I 形缝。当焊件厚度一般时(手工焊,焊件厚度 $t > 6 \sim 16$ mm;埋弧焊,焊件厚度 $t > 10 \sim 20$ mm),宜采用单边 V 形缝或 Y 形缝。当焊件厚度较厚时(手工焊,焊件厚度 $t > 16$ mm;埋弧焊,焊件厚度 $t > 20$ mm),宜采用 U 形缝、双单边 V 形缝或双 Y 形缝。对于特厚焊件($t \geq 50$ mm),宜采用 U 形缝。对于 Y 形缝和 U 形缝的根部,还需进行清根并补焊。无条件清根补焊的 Y 形或 U 形焊缝,需要事先加垫板来保证焊

透。双单边 V 形缝或双 Y 形缝均应清根并双面施焊。坡口形式的选用和具体尺寸要求可参照《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)。

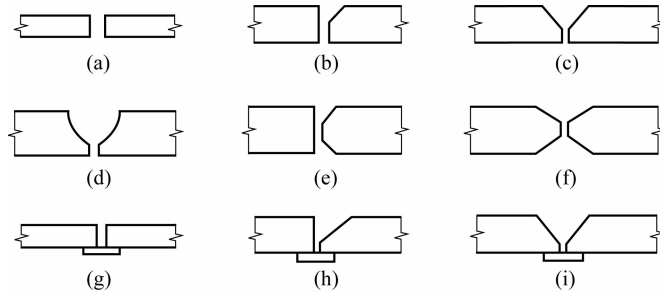


图 3-12 对接焊缝的坡口形式

(a) I 形缝 (b) 单边 V 形缝 (c) Y 形缝 (d) U 形缝 (e) 双单边 V 形缝 (f) 双 Y 形缝
(g) 加垫板的 I 形缝 (h) 加垫板的单边 V 形缝 (i) 加垫板的 Y 形缝

在对接焊缝的拼接处,当焊件的宽度不同或厚度在一侧相差 4 mm 以上时,应分别在宽度方向或厚度方向从一侧或两侧做成坡度不大于 1 : 2.5 的斜坡[见图 3-13(a)、(b)、(c)和图 3-14],使结构平缓过渡,减少应力集中;当焊件厚度相差不大于 4 mm 时,可不切斜坡,直接利用焊缝表面的倾斜来过渡[见图 3-13(d)];当焊件厚度不同时,焊缝坡口形式应根据较薄焊件厚度按《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)的要求取用。

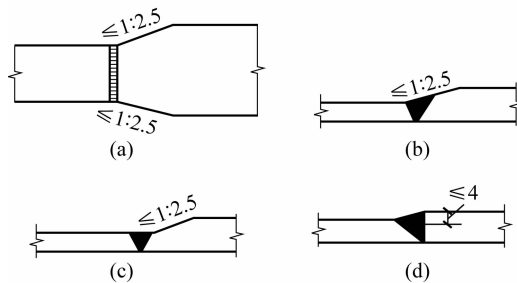


图 3-13 不同宽度或厚度的钢板的拼接

(a) 宽度不同 (b)、(c) 厚度不同 (d) 不切斜坡

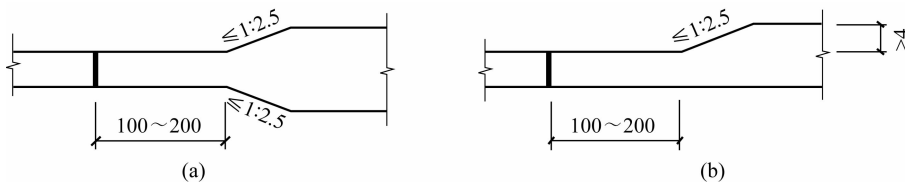


图 3-14 不同宽度或厚度的铸钢件的拼接

(a) 不同宽度对接 (b) 不同厚度对接

对接焊缝的起弧和落弧处常出现弧坑等缺陷,易引起应力集中,从而对结构不利。因此,在焊接时一般应在焊缝的两端设置引弧板和引出板(见图 3-15)。引弧板和引出板的材质及坡口形式应与焊件相同,焊接完毕后将将其割除,并将焊件边缘磨平。当采用引

弧板和引出板时,对接焊缝的计算长度等于焊件实际宽度。对于某些承受静力荷载的结构,若设置引弧板和引出板有困难,则可不设置;但在计算时,每条焊缝的计算长度应等于实际长度减去 $2t$ (t 为焊件厚度)。

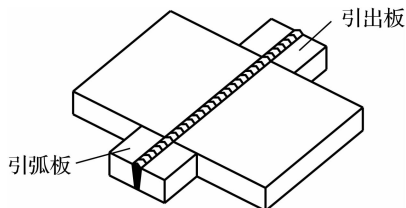


图 3-15 引弧板和引出板

对于承受动荷载的对接连接,严禁采用断续坡口焊缝。对于承受动荷载且需要进行疲劳验算的连接,当拉应力与焊缝轴线垂直时,严禁采用部分焊透的对接焊缝。

3.4.2 对接焊缝的计算

一般情况下,对接焊缝的有效截面与焊件截面相同,焊缝的受力也与构件相似,质量等级为一级或二级的焊缝强度设计值与母材等同,因此其焊缝强度可不做验算。

1. 需验算强度的对接焊缝

对于以下几种情况的对接焊缝应验算其强度:

(1)焊接时没有采用引弧板和引出板。考虑起弧和落弧的质量缺陷影响,焊缝的计算长度等于实际长度减去 $2t$,焊缝的有效截面比实际截面小。

(2)焊缝质量等级为三级的受拉焊缝。因三级焊缝的缺陷较多,故焊缝的强度设计值通常只能达到构件强度的 0.85 倍,即 $f_w^t = 0.85f$ 。

(3)施工条件较差的高空安装焊缝。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定焊缝强度设计值应乘以折减系数 0.9。

(4)进行无垫板的单面施焊对接焊缝的连接。《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定其强度设计值应乘以折减系数 0.85。

2. 轴心力作用时的对接焊缝的计算

对接焊缝受垂直于焊缝的轴心力(拉力或压力)作用时(见图 3-16),其强度应按式(3-1)计算。

$$\sigma = \frac{N}{l_w h_e} \leq f_w^t \text{ 或 } f_w^c \quad (3-1)$$

式中, N 为轴心拉力或轴心压力; l_w 为焊缝的计算长度,当未采用引弧板和引出板时,应取实际长度减去 $2t$; h_e 为对接焊缝的计算厚度,在对接连接节点中取连接件的较小厚度,在 T 形连接节点中取腹板的厚度; f_w^t 、 f_w^c 为对接焊缝的抗拉、抗压强度设计值,按表 3-4 选用。

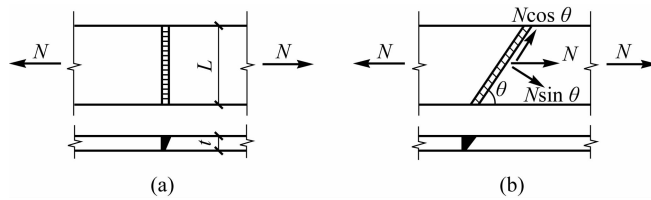


图 3-16 轴心力作用时的对接焊缝

(a) 正对接焊缝 (b) 斜对接焊缝

表 3-4 焊缝的强度设计值

单位: N/mm^2

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝			角焊缝	
	牌号	厚度或直径/mm	抗压 f_c^w	焊接质量为下列 等级时, 抗拉 f_t^w		抗剪 f_v^w	抗拉、抗压 和抗剪 f_t^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自 动焊和 E43 型 焊条的手工焊	Q235 钢	≤ 16	215	215	185	125	160
		$> 16, \leq 40$	205	205	175	120	
		$> 40, \leq 100$	200	200	170	115	
自动焊、半自 动焊和 E50、 E55 型焊条的 手工焊	Q345 钢	≤ 16	305	305	260	175	200
		$> 16, \leq 40$	295	295	250	170	
		$> 40, \leq 63$	290	290	245	165	
		$> 63, \leq 80$	280	280	240	160	
	Q390 钢	≤ 16	345	345	295	200	200(E50) 220(E55)
		$> 16, \leq 40$	330	330	280	190	
		$> 40, \leq 63$	310	310	265	180	
		$> 63, \leq 100$	295	295	250	170	
自动焊、半自 动焊和 E55、 E60 型焊条的 手工焊	Q420 钢	≤ 16	375	375	320	215	220(E55) 240(E60)
		$> 16, \leq 40$	355	355	300	205	
		$> 40, \leq 63$	320	320	270	185	
		$> 63, \leq 100$	305	305	260	175	
自动焊、半自 动焊和 E55、 E60 型焊条的 手工焊	Q460 钢	≤ 16	410	410	350	235	220(E55) 240(E60)
		$> 16, \leq 40$	390	390	330	325	
		$> 40, \leq 63$	355	355	300	205	
		$> 63, \leq 100$	340	340	290	195	

(续表)

焊接方法和 焊条型号	构件钢材		对接焊缝			角焊缝	
	牌号	厚度或直径/mm	抗压 f_c^w	焊接质量为下列 等级时,抗拉 f_t^w		抗剪 f_v^w	抗拉、抗压 和抗剪 f_t^w
				一级、二级	三级		
自动焊、半自 动焊和 E55、 E60 型焊条的 手工焊	Q345GJ	$>16, \leq 35$	310	310	265	180	200
		$>35, \leq 50$	290	290	245	170	
		$>50, \leq 100$	285	285	240	165	

注 1:手工焊用焊条、自动焊和半自动焊所采用的焊丝和焊剂,应保证其熔敷金属的力学性能不低于母材的性能。

注 2:焊缝质量等级应符合《钢结构焊接规范》(GB 50661—2011)的规定。其中,厚度 $t < 6$ mm 钢材的对接焊缝,不应采用超声波探伤确定焊缝质量等级。

注 3:对接焊缝在受压区的抗弯强度设计值取 f_c^w ,在受拉区的抗弯强度设计值取 f_t^w 。

注 4:表中厚度系指计算点的钢材厚度,对轴心受拉和轴心受压构件系指截面中较厚焊件的厚度。

注 5:对于施工条件较差的高空安装焊缝,表中的焊缝强度设计值应乘以折减系数 0.9,无垫板的单面施焊对接焊缝则应乘以 0.85。

当采用正对接焊缝经计算不满足强度要求时,可改用斜对接焊缝。当斜对接焊缝和作用力夹角 θ 符合 $\tan \theta \leq 1.5$ 时,其强度超过母材,可不计算焊缝强度。

3. 弯矩和剪力共同作用时的对接焊缝的计算

(1)矩形截面。当截面为矩形的对接焊缝受到弯矩和剪力共同作用时[见图 3-17(a)],其最大正应力和最大剪应力应分别满足下列要求:

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_w} \leq f_t^w \quad (3-2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{VS_w}{I_w t} \leq f_v^w \quad (3-3)$$

式中, M 为焊缝截面上的弯矩; W_w 为焊缝截面的截面模量; V 为焊缝截面上的剪力; S_w 为焊缝截面计算剪应力处以上部分对中和轴的面积矩; I_w 为焊缝截面对中和轴的惯性矩; t 为板厚; f_v^w 为对接焊缝的抗剪强度值,按表 3-4 选用。

(2)工字形或 T 形截面。当截面为工字形或 T 形的对接焊缝受到弯矩和剪力共同作用时[见图 3-17(b)],应按式(3-2)和式(3-3)的要求计算截面上的最大正应力和最大剪应力,同时还应按式(3-4)计算翼缘和腹板交界处的折算应力。

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau_1^2} \leq 1.1f_t^w \quad (3-4)$$

其中,

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} \frac{h_0}{h} \quad (3-5)$$

$$\tau_1 = \frac{VS_1}{I_w t_w} \quad (3-6)$$

式中, σ_1 、 τ_1 为腹板与翼缘交界点处的正应力和剪应力; S_1 为受拉翼缘对中和轴的面积

矩; h_0 为腹板计算高度; t_w 为腹板厚度; 1.1 为考虑到最大折算应力只在焊缝的局部产生, 而将焊缝强度设计值提高的系数; 其他参数含义同前。

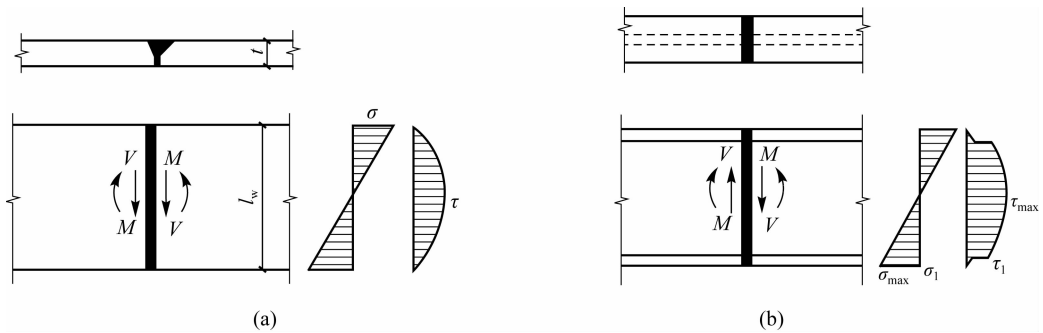


图 3-17 弯矩和剪力共同作用下的对接焊缝

(a) 矩形截面 (b) 工字形截面

工字形或 T 形截面梁在弯曲时, 弯曲正应力主要由翼缘承担, 剪应力主要由腹板承担, 这使得截面上各处的材料均能被充分利用。对于梁柱节点处的牛腿, 一般假定弯矩由整个截面焊缝承受, 剪力全部由腹板焊缝承受, 且剪应力均匀分布, 则其计算公式为

$$\tau = \frac{V}{A_w} \leq f_v^w \quad (3-7)$$

式中, A_w 为牛腿处腹板的焊缝计算面积。

【例 3-1】 验算如图 3-18 所示的牛腿与钢柱采用的对接焊缝的强度。集中荷载设计值 $F=580 \text{ kN}$, 偏心距 $e=200 \text{ mm}$, 钢材为 Q235B, 焊条为 E43 型, 手工焊, 不采用引弧板, 焊缝质量等级为三级。

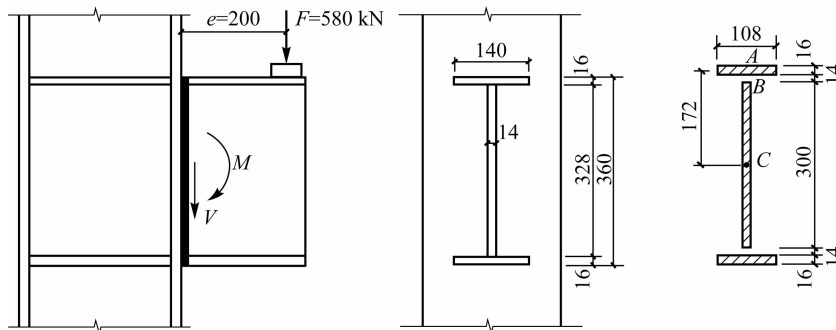


图 3-18 例 3-1 图

【解】 (1) 将力 F 向焊缝截面的形心简化, 可得

$$V = F = 580 \text{ kN}$$

$$M = Fe = 580 \times 200 \times 10^{-3} = 116 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

(2) 焊缝计算截面的几何特性。不设引弧板, 焊缝计算长度取实际长度减去 $2t$ 。焊缝截面如图 3-18 所示。

$$I_w = \frac{1}{12} \times 14 \times (328 - 2 \times 14)^3 + 2 \times (140 - 2 \times 16) \times 16 \times (180 - 8)^2 = 1.34 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

由于翼缘焊缝厚度较小,因此计算时忽略了对自身的惯性矩。

$$W_w = \frac{I_w}{h/2} = \frac{1.34 \times 10^8}{180} = 7.43 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

$$A_w = 14 \times (328 - 2 \times 14) = 4.2 \times 10^3 \text{ mm}^2$$

(3) 焊缝强度计算。

① 计算 A 点的正应力。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{W_w} = \frac{116 \times 10^6}{7.43 \times 10^5} = 156 \text{ N/mm}^2 < f_t^w = 185 \text{ N/mm}^2$$

② 计算 C 点的剪应力。翼缘因竖向刚度较低一般不宜考虑承受剪力,计算时假定剪力全部由腹板承担。

$$\tau = \frac{V}{A_w} = \frac{580 \times 10^3}{4.2 \times 10^3} = 138.1 \text{ N/mm}^2 > f_v^w = 125 \text{ N/mm}^2$$

③ 计算 B 点的折算应力。

$$\sigma_1 = \frac{M}{W_w} \cdot \frac{h_0}{h} = 156 \times \frac{300}{360} = 130 \text{ N/mm}^2$$

$$\sqrt{\sigma_1^2 + 3\tau^2} = \sqrt{130^2 + 3 \times 138.1^2} = 272.2 \text{ N/mm}^2 > 1.1 f_t^w = 1.1 \times 185 = 203.5 \text{ N/mm}^2$$

(4) 结论。对接焊缝的强度不满足要求。

3.5 角焊缝的构造和计算

角焊缝按截面形式的不同可分为直角角焊缝(两焊脚边的夹角为 90°)和斜角角焊缝。直角角焊缝的受力性能较斜角角焊缝好,且应用广泛,后面提到的角焊缝均指直角角焊缝。直角角焊缝的截面形式有普通型、平坦型和凹面型,如图 3-19 所示。钢结构一般常用表面微凸的普通型截面,焊脚尺寸的比例为 $1:1$,如图 3-19(a)所示。对于直接承受动力荷载的结构,常用焊脚尺寸比例为 $1:1.5$ 的平坦型截面[见图 3-19(b)];侧面角焊缝通常选用焊脚尺寸比例为 $1:1$ 的凹面型截面,如图 3-19(c)所示。

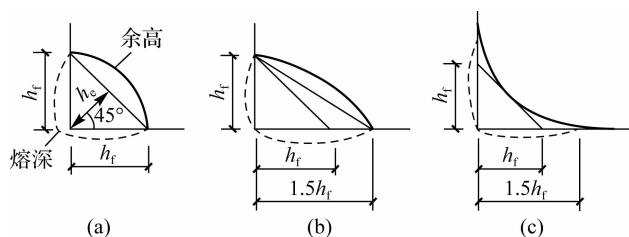


图 3-19 直角角焊缝的截面形式

(a) 普通型 (b) 平坦型 (c) 凹面型

3.5.1 角焊缝的构造

1. 角焊缝尺寸的一般要求

角焊缝的尺寸应符合下列规定：

(1)最小焊脚尺寸。焊脚尺寸 h_f 是指焊缝根脚至焊缝外边缘的尺寸。焊脚尺寸的大小与焊件的厚度密切相关。对较厚的焊件施焊时,过小的焊脚尺寸会使焊缝金属内部冷却速度过快,从而产生淬硬组织,易使焊缝变脆,产生裂纹。因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定角焊缝最小焊脚尺寸宜按表 3-5 取值,承受动荷载时角焊缝焊脚尺寸不宜小于 5 mm。

表 3-5 角焊缝最小焊脚尺寸 单位:mm

母材厚度 t	角焊缝最小焊脚尺寸 h_{fmin}
$t \leq 6$	3
$6 < t \leq 12$	5
$12 < t \leq 20$	6
$t > 20$	8

注 1:采用不预热的非低氢焊接方法进行焊接时, t 等于焊接连接部位中较厚件厚度,宜采用单道焊缝;采用预热的非低氢焊接方法或低氢焊接方法进行焊接时, t 等于焊接连接部位中较薄件厚度。

注 2:焊脚尺寸 h_f 不要求超过焊接连接部位中较薄件厚度的情况除外。

(2)最小计算长度。当角焊缝焊脚尺寸大而长度过小时,焊件局部会受热严重,且焊缝起落弧的弧坑相距太近,以及可能产生的其他缺陷,使得焊缝不够可靠。此外,焊缝长度过小易引起焊件的应力集中较大。因此,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定角焊缝的最小计算长度应为其焊脚尺寸 h_f 的 8 倍,且不应小于 40 mm;焊缝计算长度应为扣除引弧、收弧长度后的焊缝长度。当采用断续角焊缝时,其焊段的最小长度不应小于最小计算长度。

(3)最大计算长度。在角焊缝的搭接焊接连接中,当角焊缝的计算长度大于 $60h_f$ 时,其超过部分在计算焊缝强度时可以不予考虑,也可对全长焊缝的承载力进行折减,折减系数 $\alpha_f = 1.5 - l_w / 120h_f$ (且不小于 0.5),以考虑长焊缝内力分布不均匀的影响,但有效焊缝的计算长度不应超过 $180h_f$ 。

(4)被焊构件中较薄板厚度不小于 25 mm 时,宜采用开局部坡口的角焊缝。

(5)采用角焊缝焊接连接,不宜将厚板焊接到较薄板上。

(6)承受动荷载时,角焊缝尺寸应满足下列规定:

①不需要进行疲劳验算的构件端部搭接连接的纵向角焊缝长度不应小于两侧焊缝间的垂直间距 a ,且在无塞焊、槽焊等其他措施时,间距 a 不应大于较薄件厚度 t 的 16 倍,如图 3-20 所示。

②不得采用焊脚尺寸小于 5 mm 的角焊缝。

③严禁采用断续坡口焊缝和断续角焊缝。

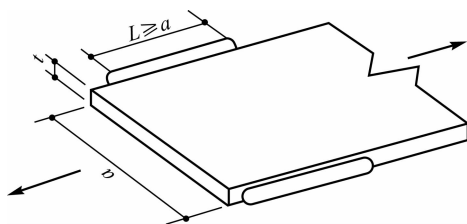


图 3-20 承受动荷载不需进行疲劳验算时构件端部纵向角焊缝长度及间距要求

2. 搭接连接角焊缝的尺寸及布置要求

(1) 当采用搭接连接的两板件的端部只采用纵向角焊缝连接时(见图 3-21), 为了避免应力传递的过分弯折而使构件中的应力不均匀, 《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 规定型钢杆件每一侧纵向角焊缝的长度 l_w 不应小于型钢杆件的宽度 b , 即 $l_w \geq b$ 。为了避免焊缝收缩引起板件拱曲过大, 型钢杆件的宽度 b 不应大于 200 mm, 当宽度 b 大于 200 mm 时, 应加横向角焊缝或中间塞焊。

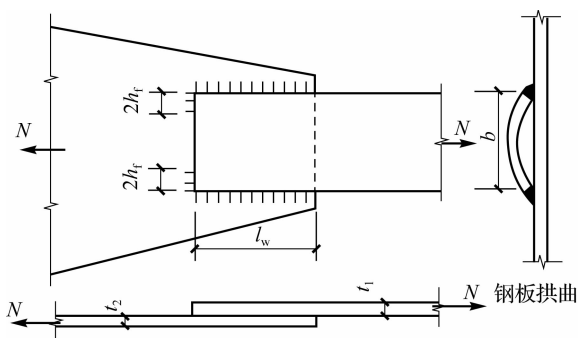


图 3-21 搭接连接的尺寸限制

(2) 型钢杆件搭接连接采用围焊时, 为了避开起落弧发生在转角处的应力集中, 在转角处必须连续施焊。当杆件端部搭接角焊缝做绕焊时(见图 3-21), 绕焊长度不应小于 $2h_f$, 并应连续施焊。

(3) 搭接焊缝沿母材棱边的最大焊脚尺寸 h_{fmax} , 当板厚 $t \leq 6$ mm 时, 应为母材厚度; 当板厚 $t > 6$ mm 时, 应为母材厚度减去 1~2 mm, 如图 3-22 所示。

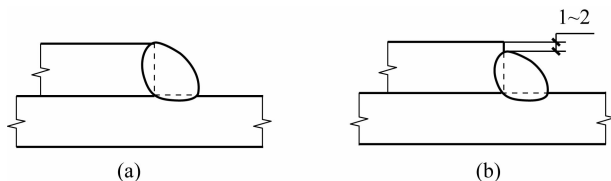


图 3-22 搭接焊缝沿母材棱边的最大焊脚尺寸

(a) 母材厚度小于或等于 6 mm 时 (b) 母材厚度大于 6 mm 时

(4) 在搭接连接中, 为了减少收缩应力以及因偏心在钢板与连接件中产生的次应力, 《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 规定最小搭接长度应为较薄件厚度的 5 倍, 且不应

小于 25 mm(见图 3-23), 并应施焊纵向或横向双角焊缝。

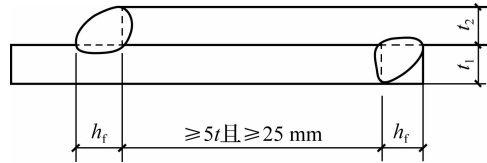


图 3-23 搭接连接双角焊缝的要求

t — t_1 和 t_2 中较小者; h_f —焊脚尺寸, 按设计要求

3.5.2 角焊缝的计算

1. 角焊缝的受力性能

在轴心力的作用下, 侧面角焊缝主要承受剪力作用, 在弹性阶段, 应力沿焊缝长度方向分布不均匀, 两端大而中间小。焊缝越长, 剪应力分布越不均匀。由于侧面角焊缝的塑性较好, 因此当其两端出现塑性变形时会产生应力重分布, 在《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定的长度范围内应力分布趋于均匀。

正面角焊缝的应力状态比侧面角焊缝复杂, 其破坏强度比侧面角焊缝高, 但塑性变形要差一些。在外力作用下, 因力线弯折而产生较大的应力集中, 焊缝根部的应力集中最为严重, 故破坏总是从焊缝根部出现裂缝, 然后扩展至整个截面。正面角焊缝的焊脚截面上有正应力和剪应力, 且分布不均匀, 但沿焊缝长度的应力分布比较均匀, 两端的应力略比中间低。

2. 角焊缝的强度计算公式

角焊缝截面如图 3-24 所示。在计算角焊缝时, 一般不计入熔深和凸度, 直接将焊缝截面简化为一直角三角形, 截面的两条直角边长即为焊脚尺寸 h_f 。试验表明, 直角角焊缝在受力时, 易沿有效厚度方向(45°喉部截面)发生破坏, 该破坏面称为角焊缝有效截面, 其面积 $A_e = h_e l_w$, 其中, h_e 为焊缝有效厚度(计算厚度), l_w 为焊缝计算长度。计算时假定角焊缝有效截面上应力均匀分布, 且角焊缝抗拉、抗压和抗剪强度采用同一强度设计值(见表 3-4)。

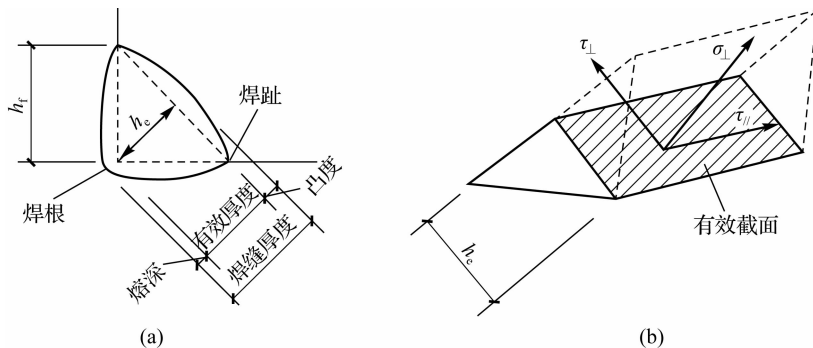


图 3-24 角焊缝截面

如图 3-25 所示的 T 形连接直角角焊缝承受着互相垂直的 N_y 和 N_x 两个轴心力的作用, N_y 垂直于焊缝长度方向而产生平均应力 σ_f , 其在有效截面上引起的应力值为

$$\sigma_f = \frac{N_y}{h_e l_w} \quad (3-8)$$

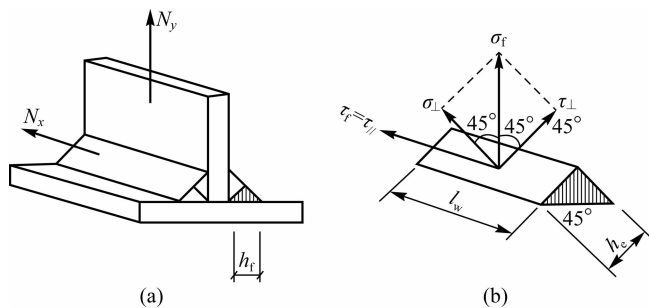


图 3-25 角焊缝有效截面上的应力分量

沿焊缝长度方向的力 N_x 在有效截面上引起平行于焊缝长度方向的剪应力 $\tau_{//}$ 为

$$\tau_{//} = \frac{N_x}{h_e l_w} = \tau_{//} \quad (3-9)$$

直角角焊缝在各种应力综合作用下的计算公式为

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f}{\beta_f}\right)^2 + \tau_{//}^2} \leq f_f^w \quad (3-10)$$

式中, β_f 为正面角焊缝的强度设计值增大系数, 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, 则不考虑其强度增大, 直接取 $\beta_f = 1.0$; f_f^w 为角焊缝的抗拉、抗压和抗剪强度设计值, 可查表 3-4; h_e 为直角角焊缝的计算厚度 (见图 3-26), 当两焊件间隙 $b \leq 1.5 \text{ mm}$ 时, $h_e = 0.7h_f$, 当 $1.5 \text{ mm} < b \leq 5 \text{ mm}$ 时, $h_e = 0.7(h_f - b)$ 。

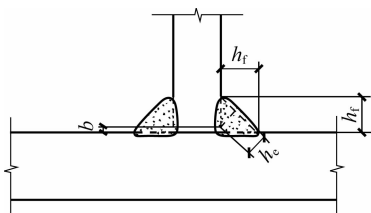


图 3-26 直角角焊缝及搭接角焊缝计算厚度

式(3-10)是《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定的角焊缝的基本计算式, 可用于角焊缝在受拉、受压和受剪或其他任何受力状态下的强度计算。当焊缝受力与焊缝有效截面不垂直也不平行时, 可先将力沿焊缝有效截面的垂直方向和平行方向进行分解, 再分别计算正应力和剪应力, 最后代入式(3-10)中计算强度。在计算角焊缝的强度时, 角焊缝还应满足规范规定的各种尺寸限制及构造要求。

3. 轴心力作用时角焊缝的计算

当作用力通过角焊缝或角焊缝群的形心时, 可假定作用在焊缝有效截面上的应力均

匀分布。根据作用力与焊缝长度方向的关系不同,计算强度时可将式(3-10)进行简化。

当作用力与角焊缝长度方向垂直时,相当于正面角焊缝受力($\tau_f=0$)。

$$\sigma_f = \frac{N}{h_e \sum l_w} \leq \beta_f f_f^w \quad (3-11)$$

当作用力与角焊缝长度方向平行时,相当于侧面角焊缝受力($\sigma_f=0$)。

$$\tau_f = \frac{N}{h_e \sum l_w} \leq f_f^w \quad (3-12)$$

当角焊缝受两个方向的力的综合作用时(见图 3-27),可利用式(3-10)计算角焊缝在综合力作用下的强度,即

$$\sigma_f^N = \frac{N}{h_e \sum l_w} \quad (3-13)$$

$$\tau_f^V = \frac{V}{h_e \sum l_w} \quad (3-14)$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_f^N}{\beta_f}\right)^2 + (\tau_f^V)^2} \leq f_f^w \quad (3-15)$$

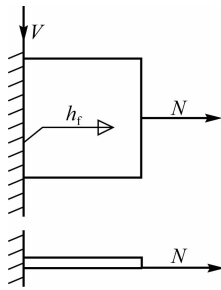


图 3-27 受两个方向的力综合作用的角焊缝

轴心力作用下采用角焊缝连接的常见形式有角钢与节点板的连接、双盖板的对接连接。

(1)角钢与节点板的连接(见图 3-28)。当角钢与节点板连接时,《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)规定宜采用两面侧焊,也可采用三面围焊或 L 形围焊。当采用围焊时,为了避免转角处起弧和落弧引起的应力集中影响,转角处应连续施焊。另外,为避免偏心受力,焊缝传递的合力作用线应与角钢杆件的轴线重合。当采用单角钢与节点板连接时,焊缝的强度设计值应乘以折减系数 0.85。

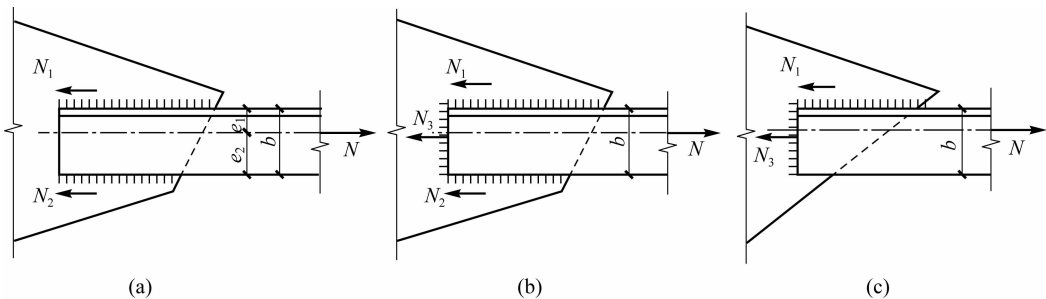


图 3-28 角钢与节点板的连接

(a)两面侧焊 (b)三面围焊 (c)L形围焊