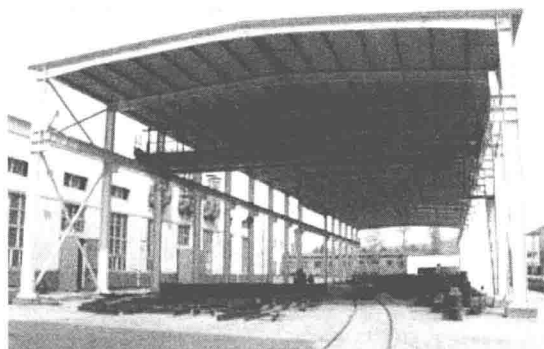


1 课程概述

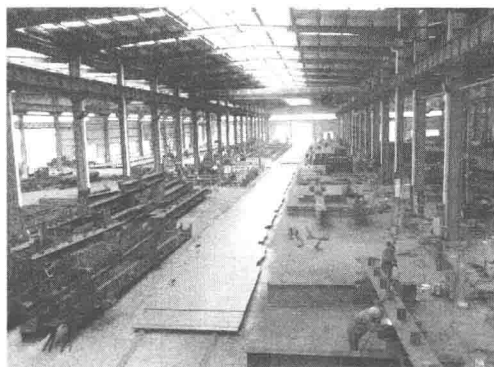
钢结构因其自身的轻质高强、工业化生产、造型丰富、材料环保和工期较短等特点,在当今工程中被广泛应用。本课程将着重介绍钢结构工程施工计划与组织的相关知识,为此先了解一下钢结构常见体系的组成、材料和钢结构工程施工的相关内容。

1.1 钢结构常见结构体系及组成

钢结构的结构体系丰富多样,目前,应用最多、最常见的结构体系主要包括应用在厂房和仓储建筑中的轻钢门式刚架结构(图 1-1),应用在机场、展览馆等大跨和大空间建筑中的空间网格结构(图 1-2),以及应用在高层和超高层建筑中的钢框架结构(图 1-3)。本书将围绕这三种结构体系进行相关内容的介绍,本节将首先介绍三种结构体系的构造组成。

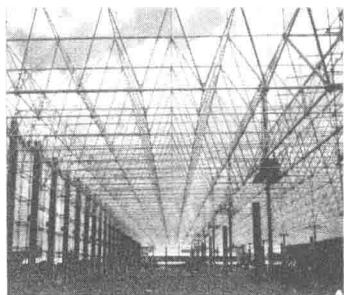


(a) 单跨厂房

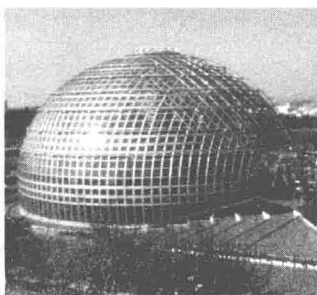


(b) 多跨厂房

图 1-1 轻钢门式刚架结构



(a) 网架结构



(b) 网壳结构



(c) 管桁架结构

图 1-2 空间网格结构

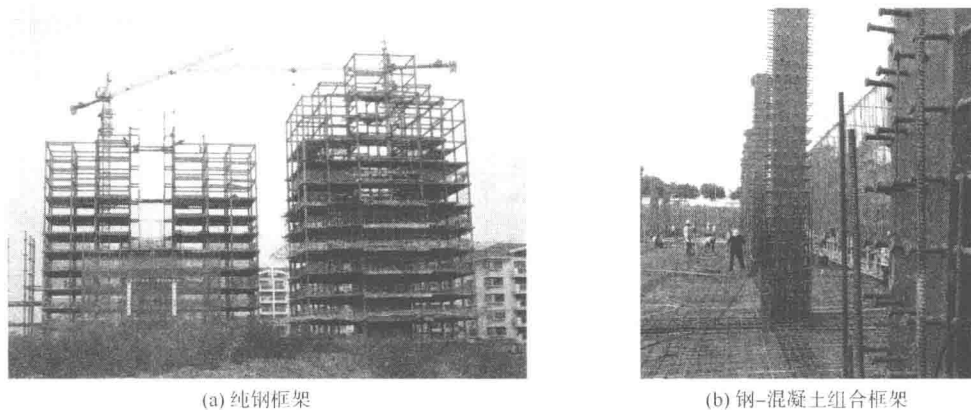


图 1-3 钢框架结构

1.1.1 轻钢门式刚架结构体系组成

轻钢门式刚架结构厂房由轻钢结构骨架、围护结构檩条、彩色压型钢板或复合夹芯板墙屋面及其他配套设施(门窗、采光带、通风口等)等部分组成。轻钢门式刚架结构厂房的结构形式可根据用户的具体工艺要求,除门式刚架结构形式外,还可选择单跨、多跨等高或多跨不等高排架结构等。

轻钢门式刚架的结构体系包括以下组成部分:

- (1)主结构:横向刚架(包括中部和端部刚架)、楼面梁、托梁、支撑体系等;
- (2)次结构:屋面檩条和墙面檩条等;
- (3)围护结构:屋面板和墙板;
- (4)辅助结构:楼梯、平台、扶栏等;
- (5)基础。

轻钢门式刚架结构厂房的组成如图 1-4 所示。

平面门式刚架和支撑体系再加上托梁、楼面梁等组成了轻钢门式刚架的主要受力骨架,即主结构体系。屋面檩条和墙面檩条既是围护材料的支承结构,又为主结构梁柱提供了部分侧向支撑作用,构成了轻钢门式刚架的次结构。屋面板和墙面板起整个结构的围护和封闭作用,由于蒙皮效应事实上也增加了轻钢门式刚架的整体刚度。

外部荷载直接作用在围护结构上。其中,竖向和横向荷载通过次结构传递到主结构的横向门式刚架上,依靠门式刚架的自身强度和刚度抵抗外部作用。纵向风荷载通过屋面和墙面支撑传递到基础上。

1.1.2 空间网格结构体系组成

空间网格结构体系常见的结构类型主要有桁架结构和网架结构。

桁架结构是指由杆件在端部相互连接而组成的格子式结构,目前最常见的桁架类型为管桁架结构,管桁架即是指结构中的杆件均为圆管或矩形管杆件。单榀管桁架由上弦杆、下弦杆和腹杆组成。管桁架结构一般由主桁架、次桁架、系杆和支座共同组成,如图 1-5 和图 1-6 所示。

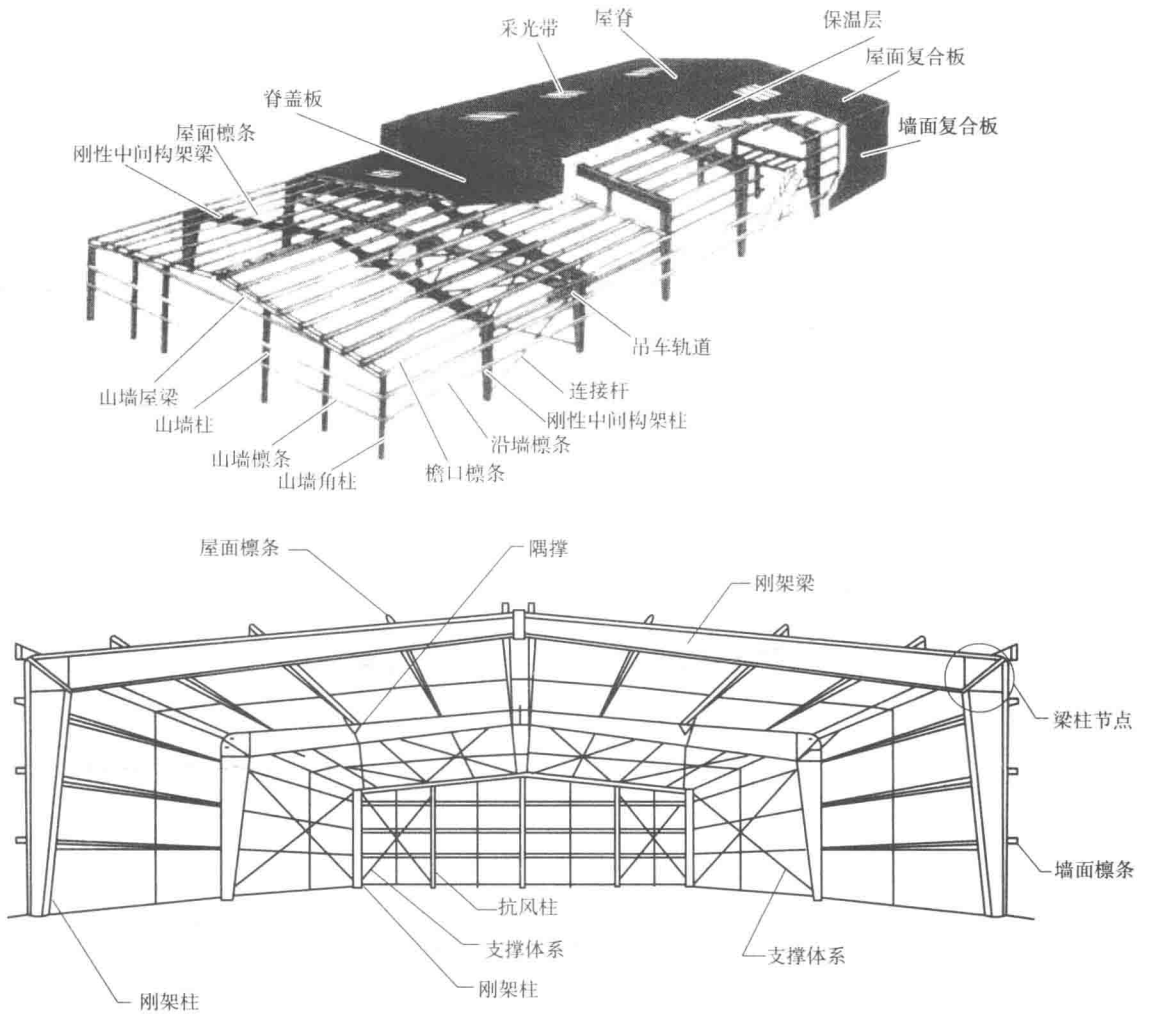


图 1-4 轻钢门式刚架结构厂房的组成

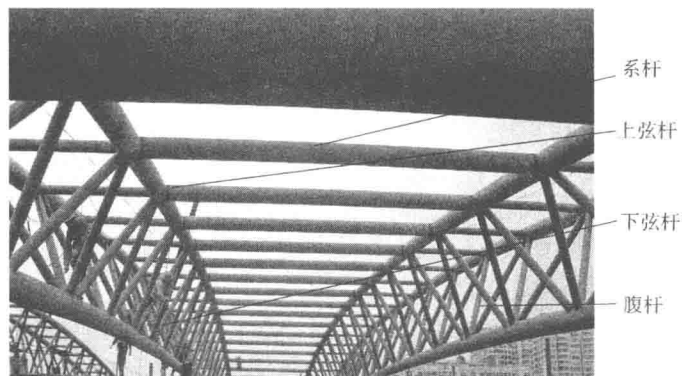


图 1-5 单榀管桁架结构组成

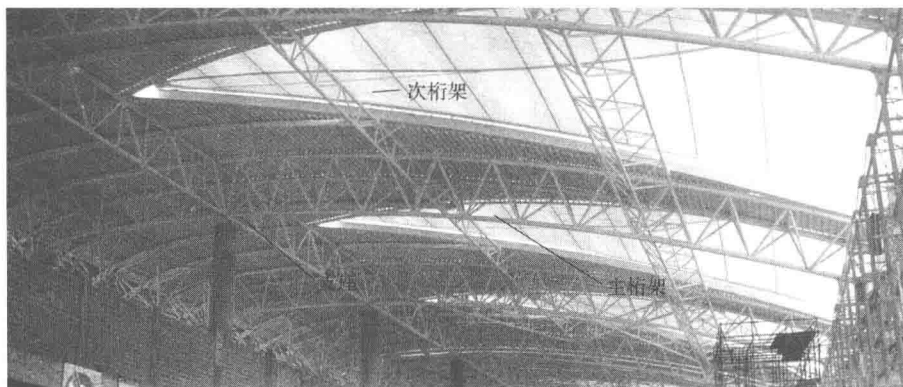
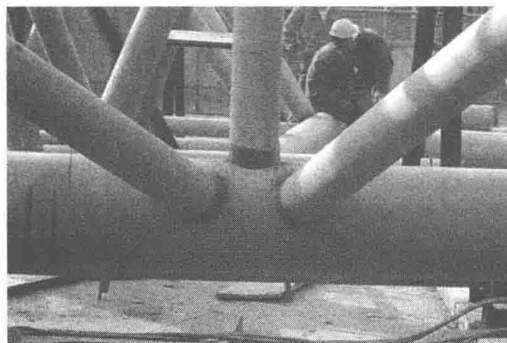
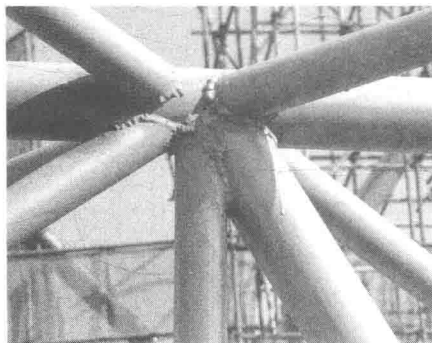


图 1-6 某机场航站楼屋盖

管桁架结构在节点处采用杆件直接焊接的相贯节点(或称管节点)。相贯节点处,只有在同一轴线上的两个主管贯通,其余杆件(即支管)通过端部相贯线加工后,直接焊接在贯通杆件(即主管)的外表,非贯通杆件在节点部位可能有一定间隙(间隙型节点),也可能部分重叠(搭接型节点),如图 1-7 所示。



(a) 间隙型节点



(b) 搭接型节点

图 1-7 管桁架杆件相贯节点形式

网架结构可以看作是平面桁架的横向拓展,也可以看作是平板的格构化。网架结构是由很多杆件通过节点,按照一定规律组成的空间杆系结构。网架结构根据外形可分为平板网架和曲面网架。通常情况下,平板网架称为网架,曲面网架称为网壳,如图 1-8 所示。网架和网壳结构是由许多规则的几何体组合而成,这些几何体就是网架结构的基本单元,常用的有三角锥和四角锥等。

网架和网壳的杆件一般采用普通型钢和薄壁型钢,有条件时应尽量采用薄壁管形截面。其尺寸应满足下列要求:普通型钢一般不宜采用小于 $\angle 45 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 或 $\angle 56 \text{ mm} \times 36 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的角钢;薄壁型钢厚度不应小于 2 mm。

网架和网壳的杆件节点分为焊接钢板节点、焊接空心球节点和螺栓球节点。

焊接钢板节点一般由十字节点板和盖板组成。十字节点板由两块带企口的钢板对插焊接而成,也可由 3 块焊成,如图 1-9 所示。焊接钢板节点多用于双向网架和四角锥体组成的网架,焊接钢板节点常用的结构形式如图 1-10 所示。

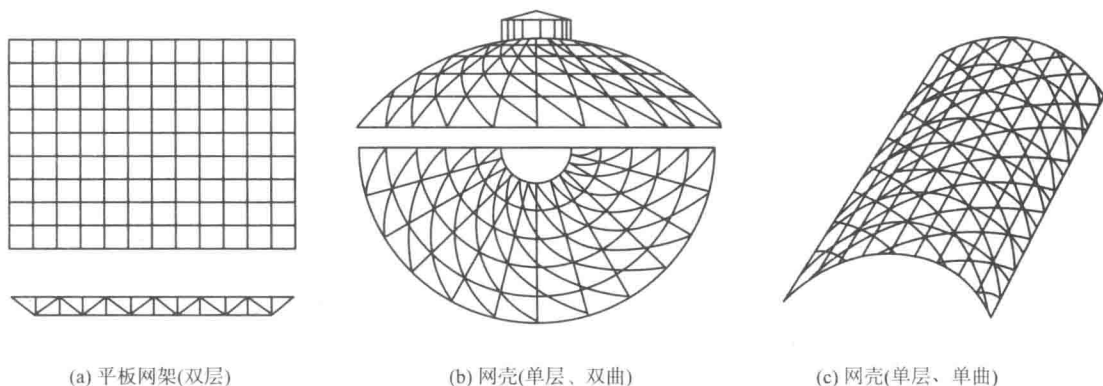


图 1-8 网架、网壳形式

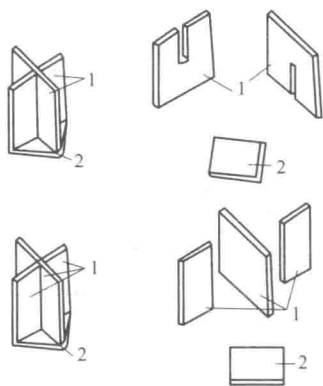


图 1-9 焊接钢板节点
1—十字节点板; 2—盖板

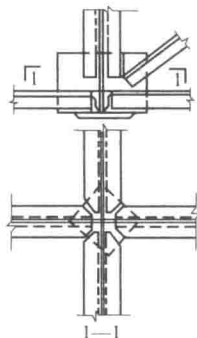


图 1-10 双向网架的节点构造

焊接空心球节点中,空心球是由两个压制的半球焊接而成,分为加肋和不加肋两种,如图 1-11 所示,适用于钢管杆件的连接。当空心球的外径大于 300 mm 时,且杆件内力较大需要提高承载能力时,可在球内加肋,当空心球的外径大于等于 500 mm 时,应在球内加肋,肋板必须设在轴力最大杆件的轴线平面内,且其厚度不应小于球壁厚。球节点与杆件相连接时,两杆件在球面上的净距离不得小于 10 mm,如图 1-12 所示。

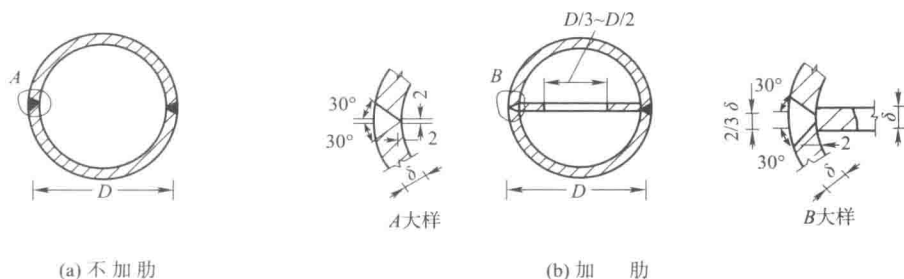
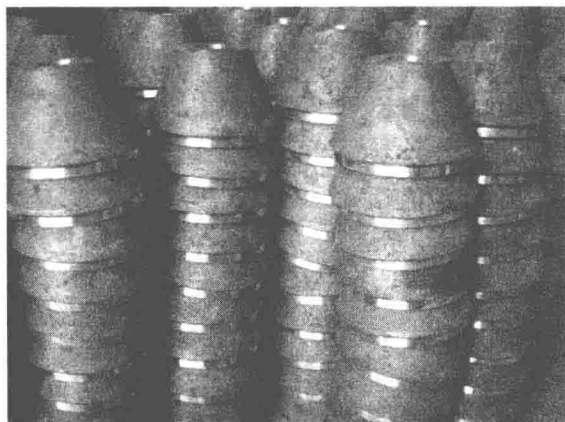


图 1-11 空心球剖面

螺栓球节点系通过螺栓将管形截面的杆件和钢球连接起来的节点,一般由螺栓、钢球、销子、套管和锥头或封板等零件组成,如图 1-13 和图 1-14 所示。



(c) 加工好的锥头

图 1-14 高强度螺栓与螺栓球和圆钢管杆件的连接

1.1.3 钢框架结构体系组成

钢框架结构体系是指沿房屋的纵向和横向用钢梁和钢柱组成的框架结构来作为承重和抵抗侧力的结构体系。随着层数及高度的增加,除承受较大的竖向荷载外,抗侧力(风荷载、地震作用等)要求也成为多高层框架的主要特点,其基本结构体系一般可分为三种:纯框架体系、框架-支撑体系(图 1-15)和钢-混凝土组合结构体系。

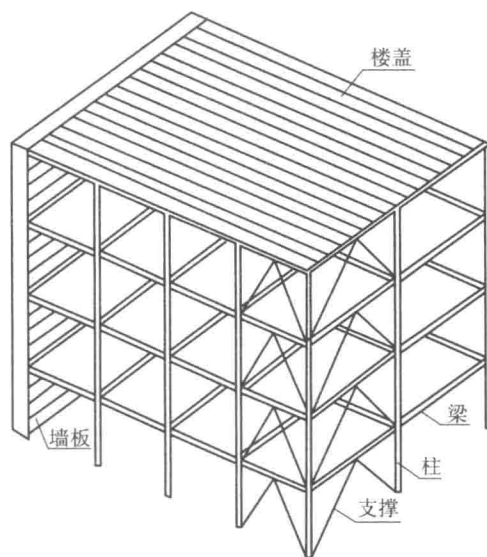
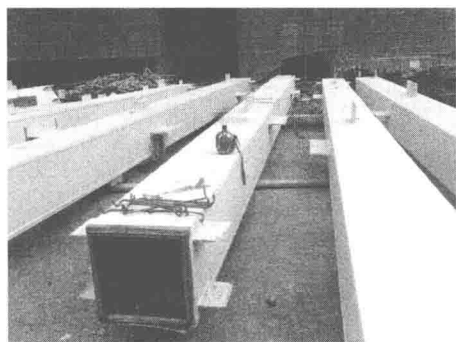


图 1-15 框架-支撑体系

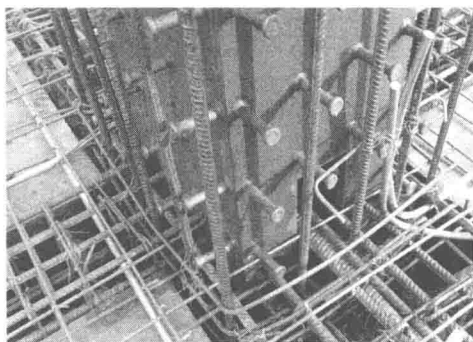
钢框架结构体系基本结构组成包括框架柱、框架梁、楼板、墙板、支撑体系、基础以及之间的连接节点。

钢柱常用截面形式有 H 型钢柱、焊接箱型或方钢管截面柱、钢管及钢管混凝土柱和十字柱,如图 1-16 所示。

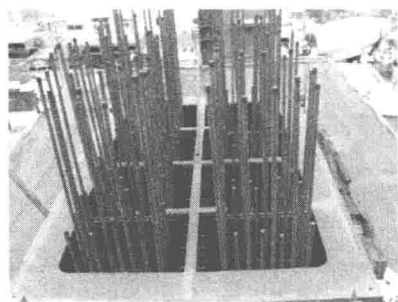
对于柱距较小的钢框架结构,其钢梁一般采用 H 型钢,其强轴平行于水平面设置。对于柱距特别大的钢框架结构,其钢梁一般采用焊接箱型截面,其强轴平行于水平面设置。



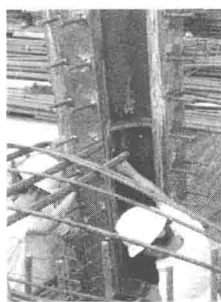
(a) 焊接箱型截面柱



(b) 埋入混凝土的焊接箱型截面柱



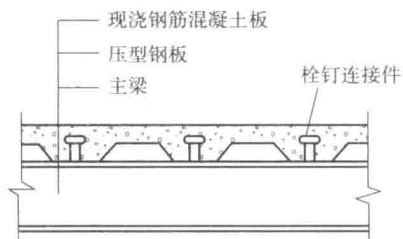
(c) 钢管混凝土柱



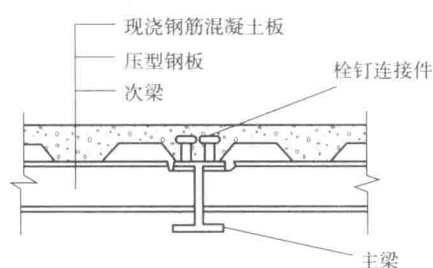
(d) 十字柱

图 1-16 各种钢框架柱

在钢框架结构建筑中楼板的型式也呈现多样性。近年来,采用较多的楼板形式主要有压型钢板混凝土楼盖、现浇整体混凝土楼盖、SP 预应力空心板楼盖、混凝土叠合板楼盖、自承式钢筋桁架压型钢板组合楼盖等,如图 1-17~图 1-19 所示。

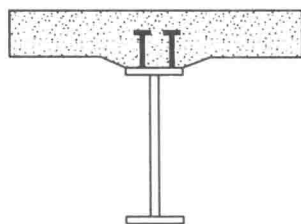


(a) 板肋垂直于主梁(不设次梁)

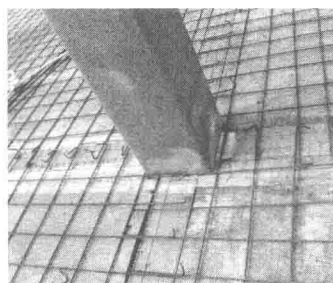


(b) 板肋平行于主梁(设有次梁)

图 1-17 压型钢板组合楼盖



(a) 断面

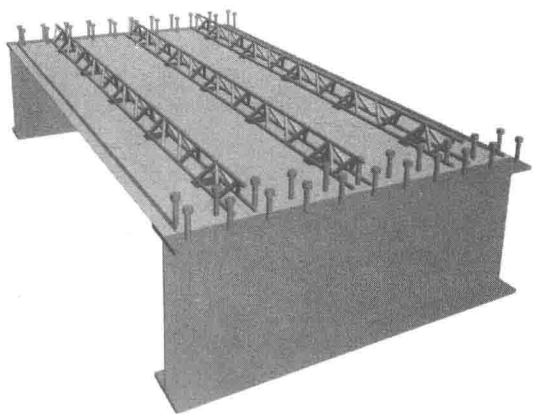


(b) 楼板配筋

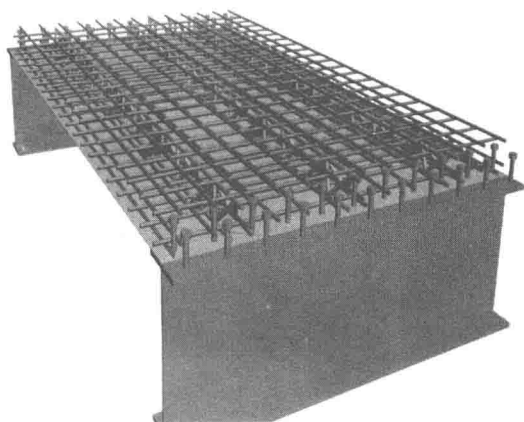


(c) 下部支设模板

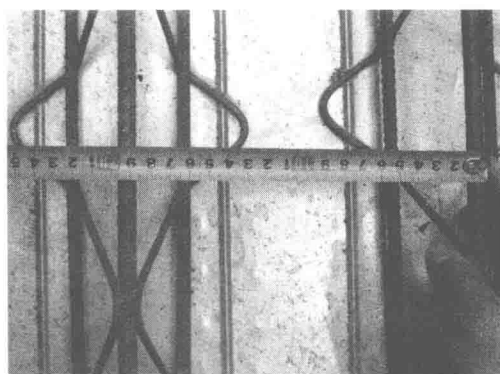
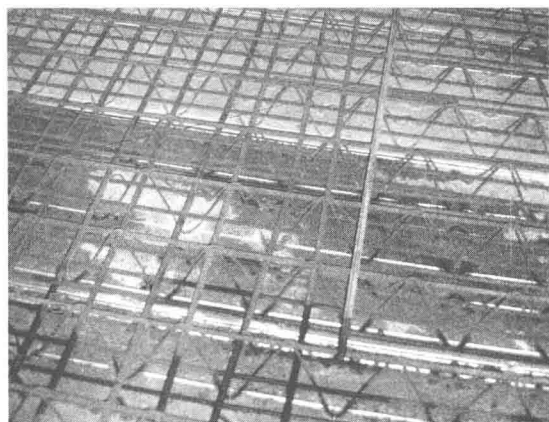
图 1-18 现浇整体混凝土楼盖



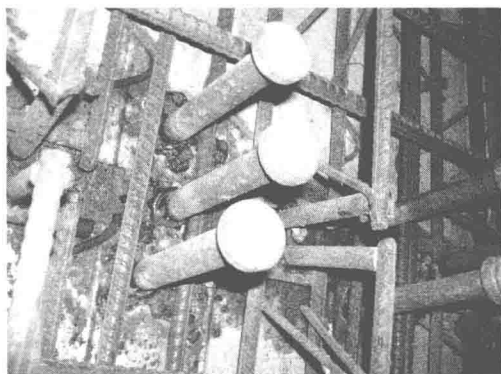
(a) 钢筋绑扎前



(b) 钢筋绑扎后



(c) 自承式钢筋桁架压型钢板

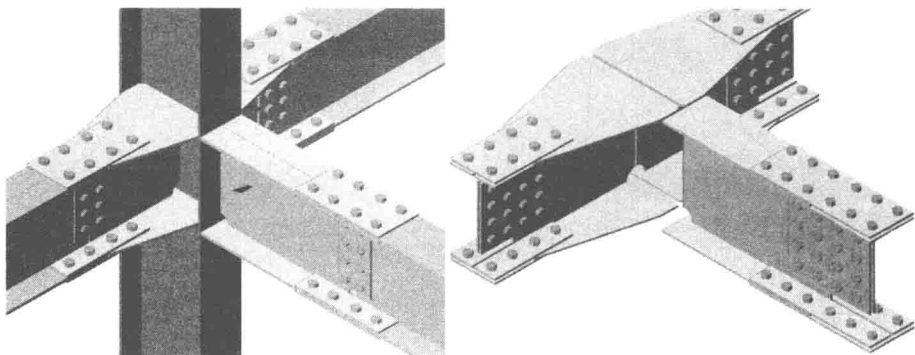


(d) 栓钉与钢梁的栓焊连接

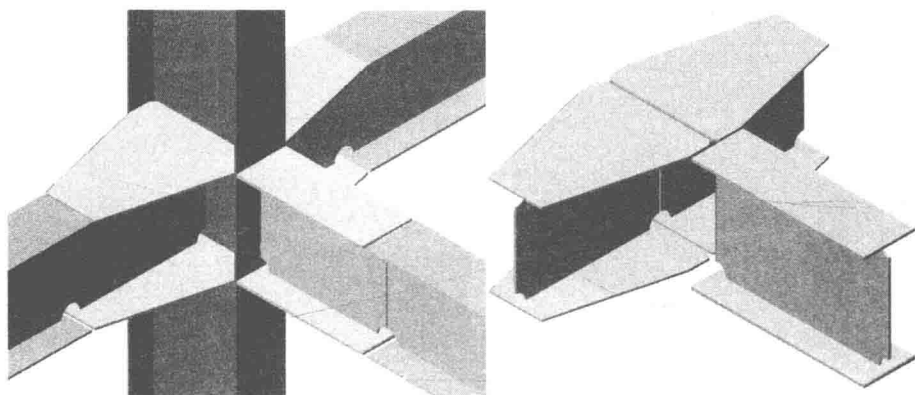
图 1-19 自承式钢筋桁架压型钢板组合楼面

钢框架结构节点形式包括梁-柱节点、梁-梁节点、柱-柱节点、柱脚节点以及支撑节点等。

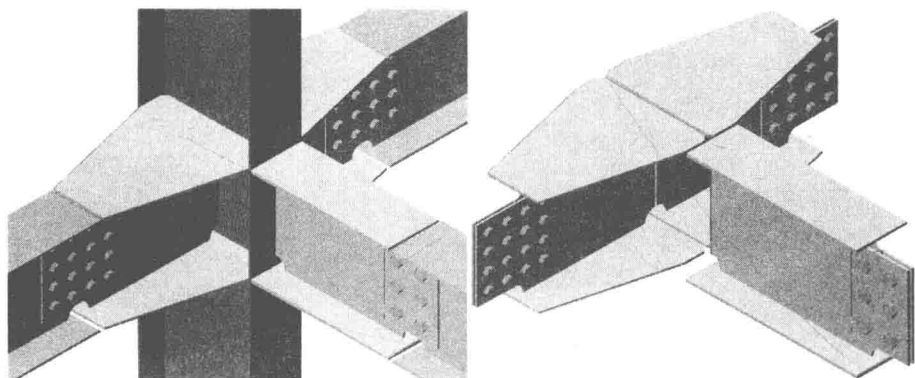
梁柱刚接节点有短梁刚接(螺栓连接梁)、短梁刚接(焊接连接梁)、短梁刚接(栓焊混接梁)等常见节点形式,如图 1-20 所示。



(a) 短梁刚接(螺栓连接梁)



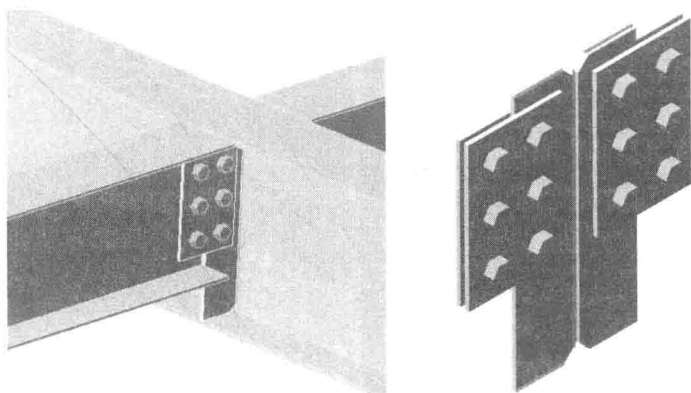
(b) 短梁刚接(焊接连接梁)



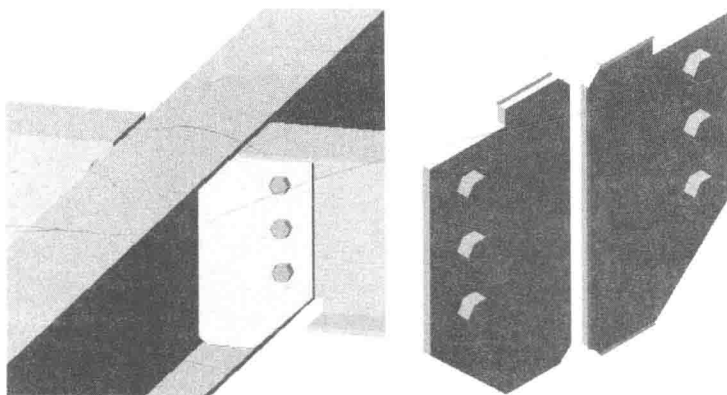
(c) 短梁刚接(栓焊混接梁)

图 1-20 型钢梁柱刚接节点形式

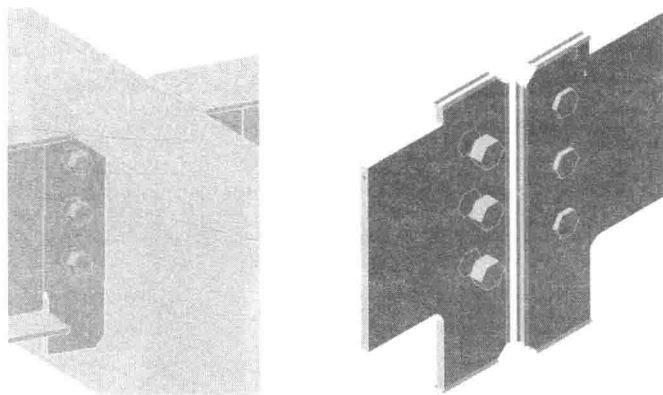
钢框架中梁-梁节点通常把型钢主次梁设计成铰接节点,型钢主次梁铰接节点形式如图 1-21 所示。



(a) 主次梁铰接节点形式1(主次梁不等高)



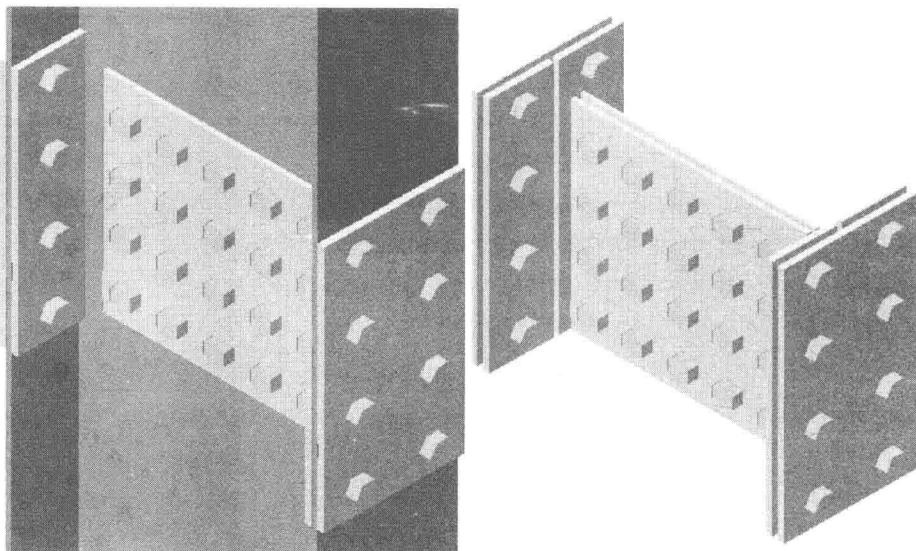
(b) 主次梁铰接节点形式2(主次梁不等高)



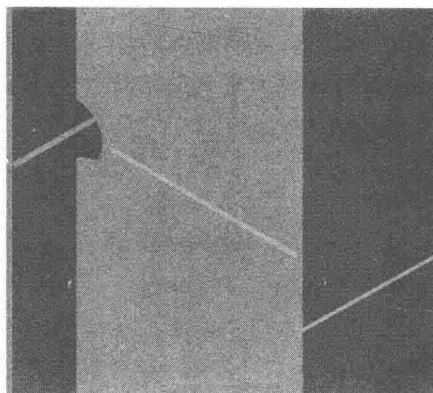
(c) 主次梁铰接节点形式3(主次梁不等高)

图 1-21 主次梁铰接节点形式

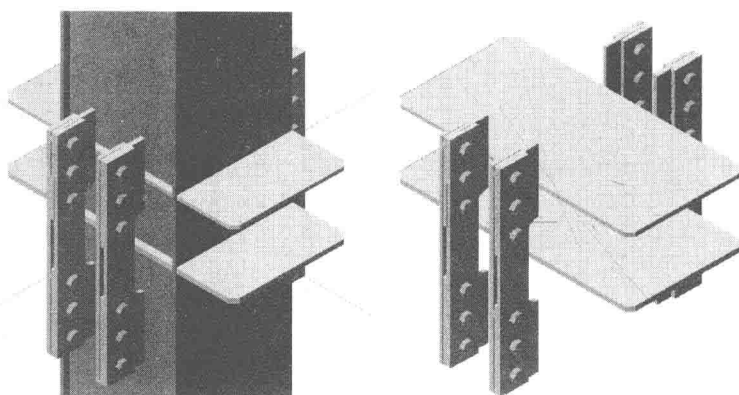
为进行柱子的接长,钢框架结构还需要有柱-柱节点,柱-柱节点有螺栓连接和焊接两种形式,钢管柱一般采用焊接连接,如图 1-22 所示。



(a) H型钢截面柱的螺栓连接

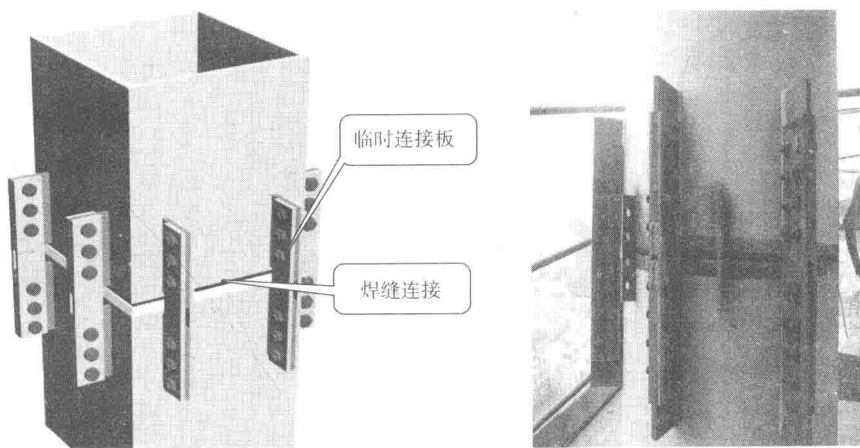


(b) H型钢柱的焊接连接



(c) 箱型截面柱的螺栓连接

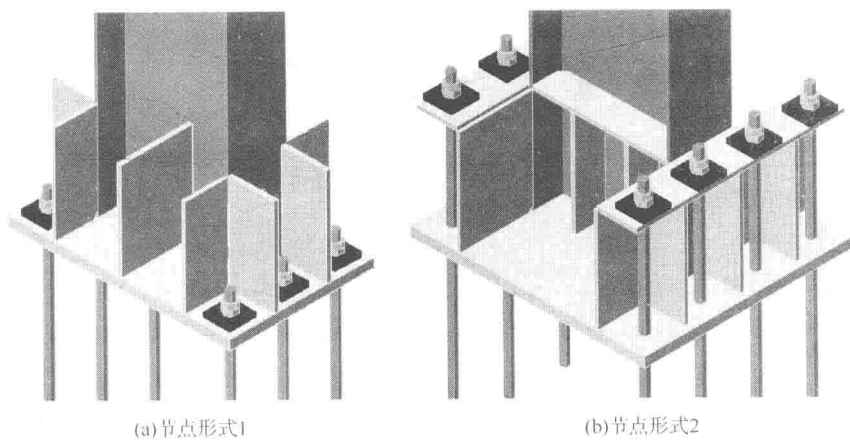
图 1-22



(d) 箱型截面柱的焊接连接

图 1-22 柱-柱节点连接示意

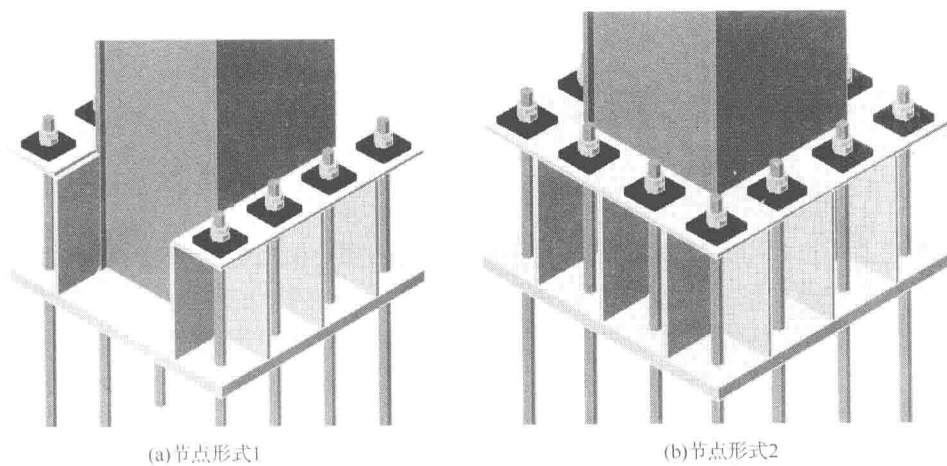
钢框架柱脚节点通常设计为刚性柱脚,不同的型钢将采用不同的柱脚节点,如图 1-23~图 1-25 所示。



(a) 节点形式1

(b) 节点形式2

图 1-23 H 型钢刚接柱脚节点形式



(a) 节点形式1

(b) 节点形式2

图 1-24 焊接箱型截面柱脚刚接节点形式

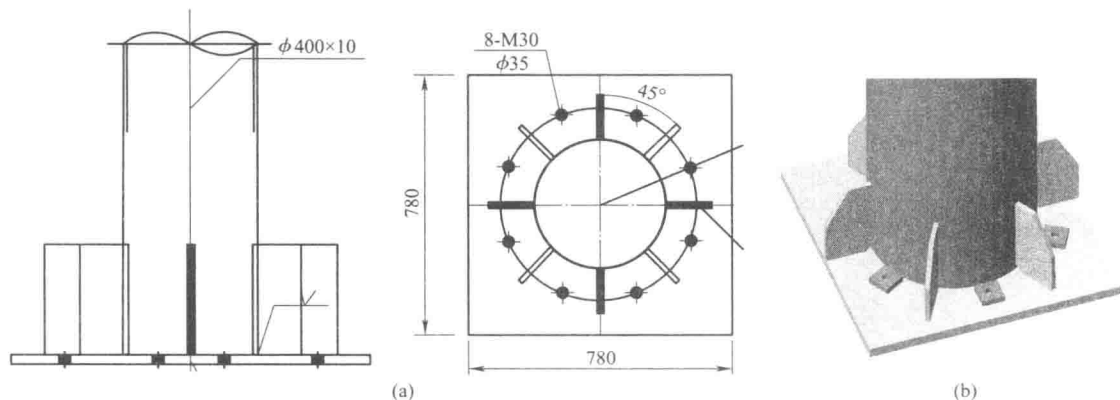


图 1-25 钢管截面柱柱脚节点形式(单位:mm)

在带支撑的钢框架结构中,支撑往往与在梁柱节点位置处设置的连接板进行连接,如图 1-26 所示。

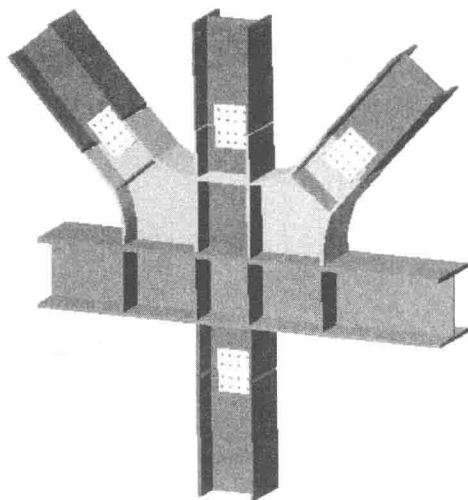


图 1-26 钢框架中支撑节点

1.2 钢结构材料

1.2.1 钢结构对材料性能的要求

钢结构在使用过程中常常需要在不同的环境和条件下承受各种荷载,所以对钢材的材料性能提出了明确要求。我国《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)规定:承重结构采用的钢材应具有抗拉强度、伸长率、屈服强度和硫、磷含量的合格保障,对焊接结构尚应具有碳含量的合格保证。焊接承重结构以及重要的非焊接承重结构采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证。

钢结构的种类繁多,性能要求差别很大,适用于承重结构的钢只有少数的几种,如:碳素钢中的 Q235,低合金钢中的 Q345、Q390、Q420 等牌号的钢材。

钢材的力学性能通常指钢材受力时,所提供的强度、伸长率、冷弯性能和冲击韧性等。这些性能指标是钢结构设计的重要依据,它们主要由试验来测定,如拉弯试验、冷弯试验和冲击试验等。

1. 钢材的强度

钢材的主要强度指标和多项性能指标就是通过单向拉伸试验获得的。试验一般是在标准条件进行,即采用符合国家标准规定形式和尺寸的标准试件,在室温 20°C 左右,按规定的加载速度在拉力试验机上进行。

低碳钢和低合金钢(含碳量和低碳钢相同)一次拉伸时的应力—应变曲线,简化得到的光滑曲线如图 1-27 所示。

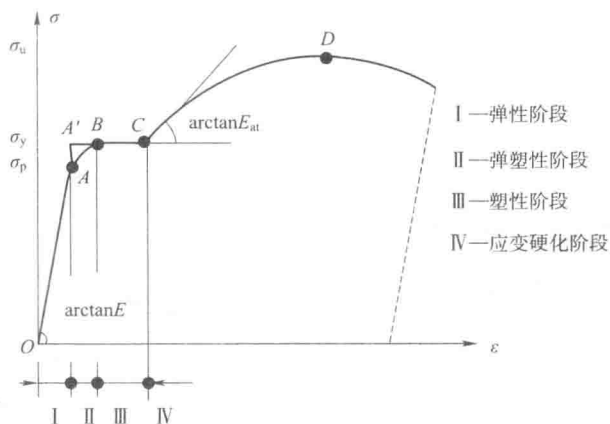


图 1-27 钢材一次拉伸应力—应变曲线

比例极限 σ_p 是应力—应变图中直线段的最大应力值。严格地说,比 σ_p 略高处还有弹性极限,但弹性极限与 σ_p 极其接近,所以通常略去弹性极限的点,把 σ_p 看作是弹性极限。这样,应力不超过 σ_p 时,应力与应变成正比关系,即符合虎克定律,且卸载后变形完全恢复。这一阶段是图 1-27 中的弹性阶段 OA。

材料的比例极限与焊接构件整体试验所得的比例极限往往有差别,这是因构件中残余应力的影响所致。构件应力超过比例极限后,变形模量 E_t 逐渐下降,对构件刚度有不利影响。

屈服点 σ_y 是应变 ϵ 在 σ_p 之后不再与应力成正比,而是渐渐加大,应力—应变间成曲线关系,一直到屈服点。这一阶段是图 1-27 中的弹塑性阶段 AB。

图 1-27 中 B 点的应力为屈服点 σ_y ,在此之后应力保持不变而应变持续发展,形成水平线段即屈服平台 BC。这一阶段是塑性流动阶段。

应力超过 σ_p 以后,任一点的变形中都将包括有弹性变形和塑性变形两部分,其中的塑性变形在卸载后不再恢复,故称残余变形或永久变形。

实际上,由于加载速度及试件状况等试验条件的不同,屈服开始时总是形成曲线的上下波动,波动最高点称为上屈服点,最低点称为下屈服点。下屈服点的数值对试验条件不敏感,并形成稳定的水平线,所以计算时以下屈服点作为材料抗力的标准(用符号 f_y 表示)。

屈服点是建筑钢材的一个重要力学特性,其意义在于以下两个方面:

- (1) 作为结构计算中材料强度标准,或材料抗力标准。
- (2) 形成理想弹塑性体模型,为发展钢结构计算理论提供基础。

低碳钢和低合金钢有明显的屈服点和屈服平台,而热处理钢材(如 σ_y 高达 690 N/mm^2 的美国 A514 钢)可以有较好的塑性性质但没有明显的屈服点和屈服平台,应力-应变曲线形成一条连续曲线。对于没有明显屈服点的钢材,规定永久变形为 $\epsilon=0.2\%$ 时的应力作为屈服点,有时用 $\sigma_{0.2}$ 表示。为了区别起见,把这种名义屈服点称作屈服强度,如图 1-28 所示。

钢材的拉伸试验所得的屈服点 f_y 、抗拉强度 f_u 和伸长率 δ 是钢结构设计中钢材力学性能要求的三项重要指标。

钢结构设计中常把屈服点 f_y 定位构件应力可以得到的限值,即把钢材达到屈服强度 f_u 作为承载能力极限状态的标志。这是因为当 $\sigma \geq f_y$ 时,钢材暂时失去了继续承载的能力并伴随产生很大的不适于继续受力或使用的变形。

钢材的抗拉强度 f_u 是钢材抗破坏能力的极限。抗拉强度 f_u 是钢材塑性变形很大且即将破坏时的强度,此时已无安全储备,只能作为衡量钢材强度的一个指标。

钢材的屈服点与抗拉强度之比 f_y/f_u 称为屈强比,它是表明设计强度储备的一项重要指标, f_y/f_u 愈大,强度储备愈小,不够安全;反之, f_y/f_u 愈小,强度储备愈大,结构愈安全,但强度利用率低且不经济。因此,设计中要选用合适的屈强比。

2. 钢材的塑性

钢材的伸长率 δ 是反映钢材塑性的指标,是试件拉断后,标距长度的伸长量与原标距长度的百分比。伸长率愈大,则塑性越好;需要指出,试件标距长度与试件截面直径之比,对伸长率有较大的影响,试件标距长度与试件截面直径之比越大,伸长率就越小。标准试件的该项比值一般为 5。

3. 钢材的冷弯性能

钢材的冷弯性能是衡量钢材在常温下弯曲加工产生塑性变形时引起裂纹的抵抗能力的一项指标,钢材的冷弯性能由冷弯试验确定。试验时,根据钢材牌号和板厚,按国家相关标准规定的弯心直径,在试验机上把试件弯曲 180° ,如图 1-29 所示,以试件侧面不出现裂纹和分层为合格,冷弯试验不仅能检验材料承受规定的弯曲变形能力的大小,还能显示其内部的冶金缺陷,因此是判断钢材塑性变形能力和冶金质量的综合指标。焊接承重结构以及重要的非焊接承重结构采用的钢材还应具有冷弯试验的合格保证。

4. 钢材的冲击韧性

钢材的冲击韧性是衡量钢材在冲击荷载作用下,抵抗脆性断裂能力的一项力学指标。冲击韧性也叫做缺口韧性,是评定带有缺口的钢材在冲击荷载作用下抵抗脆性破坏能力的指标。钢材的冲击韧性通常采用在材料试验机上对标准试件进行冲击荷载试验来测定。常用的标准试件形式有梅氏 U 型缺口(Mesnager U-notch)和夏比 V 型缺口(Charp V-notch)两种。U 型缺口试件的冲击韧性用冲击荷载下试件断裂所吸收或消耗的冲击功除以横截面面积的量值表达。V 型缺口试件的冲击韧性用试件断裂时所吸收的功 C_{kv} 或 A_{kv} 来表示,其单位为 J。由于 V 型缺口试件对冲击尤为敏感,更能反映结构类裂纹性缺陷的

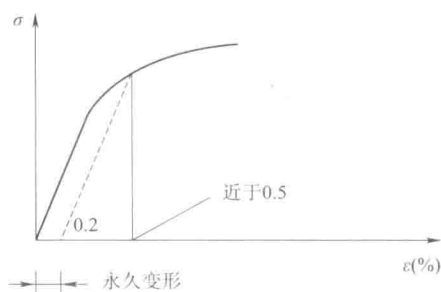


图 1-28 名义屈服点

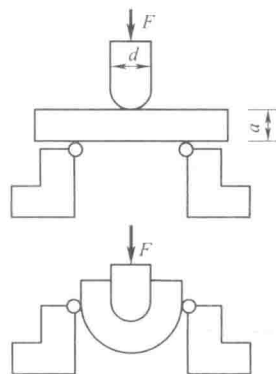


图 1-29 冷弯试验

影响,我国规定钢材的冲击韧性按 V 型缺口试件冲击功 C_{kv} 或 A_{kv} 表示,试验如图 1-30 所示。

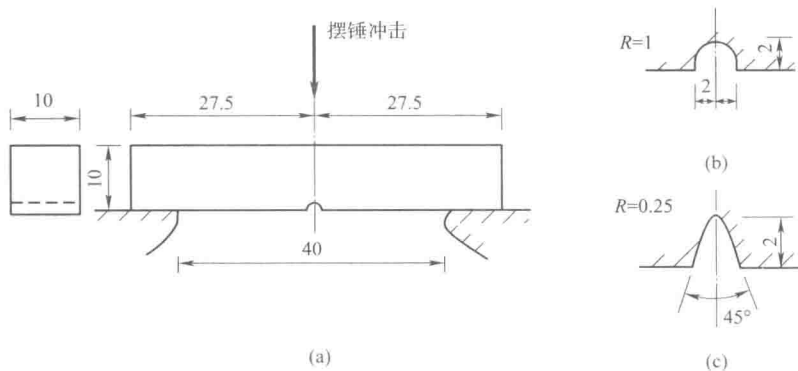


图 1-30 冲击试验(单位:mm)

钢材的冲击韧性与钢材的质量、缺口形状、加载速度、厚度、温度有关,其中温度的影响最大。试验表明,钢材的冲击韧性值随温度的降低而降低,但不同牌号和等级质量的钢材降低规律又有很大的不同。因此,在寒冷地区承受动力荷载作用的重要承重结构,应根据工作温度和所用钢材牌号,对钢材提出相应温度下的冲击韧性指标要求,以防脆性破坏的发生。

5. 钢材的焊接性能

钢材的焊接性能是指在一定的焊接工艺条件下,获得性能良好的焊接接头。焊接过程中要求焊缝及焊缝附近金属不产生热裂纹或冷却收缩裂纹;在使用过程中焊缝处的冲击韧性和热影响区内塑性良好。我国钢结构设计规范中除了 Q235A 不能作为焊接构件外,其他的几种牌号的钢材均具有良好的焊接性能。在低合金钢中低合金元素大多对可焊性有不利的影响,我国的行业标准《建筑钢结构焊接技术规程》(JGJ—2002)推荐使用碳当量来衡量低合金钢的可焊性,其计算公式如下:

$$C_E = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{5} \quad (1-1)$$

式中, C、Mn、Cr、Mo、V、Ni、Cu 分别为碳、锰、铬、钼、钒、镍和铜的百分含量。当 C_E 不超过 0.38% 时,钢材的可焊性很好,可以不采取措施直接施焊;当 C_E 在 0.38%~0.45% 范围内时,钢材呈现淬硬倾向,施焊时要控制焊接工艺、采用预热措施并使热影响区缓慢冷却,以免发生淬硬开裂;当 C_E 大于 0.45% 时,钢材的淬硬倾向更加明显,需严格控制焊接工艺和预热温度才能获得合格的焊缝。

钢材焊接性能的优劣除了与钢材的碳当量有直接关系外,还与母材的厚度、焊接的方法、焊接工艺参数以及结构形式等条件有关。

6. 钢材的破坏形式

钢材有两种性质完全不同的破坏形式,即塑性破坏和脆性破坏。钢结构所用的钢材在正常使用条件下,虽然有较高的塑性和韧性,但在某些条件下,仍然存在发生脆性破坏的可能性。

塑性破坏也称延性破坏,其特征是构件应力达到抗拉极限强度后,构件产生明显的变形并断裂。破坏后的端口呈纤维状,色泽发暗。由于塑性破坏前总有较大的塑性变形发生,且变形持续时间较长,容易被发现和抢修加固,因此不至于发生严重后果。

脆性破坏在破坏前无明显塑性变形,或根本就没有塑性变形,而突然发生断裂。破坏后的断口平直,呈有光泽的晶粒状。由于破坏前没有任何预兆,破坏速度又极快,无法及时察觉和