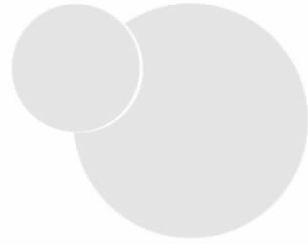
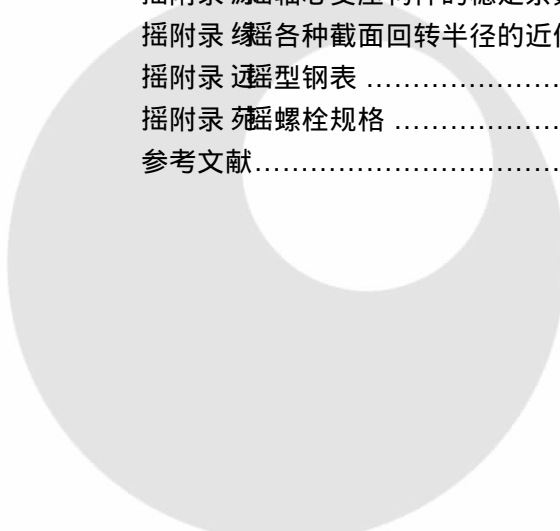


第 1 章 绪论	1
1.1 钢结构的特点	1
1.2 钢结构的应用及发展简况	1
1.3 本课程的任务和特点	1
第 2 章 钢结构的材料	2
2.1 钢结构对材料的要求	2
2.2 钢材的种类和规格	2
2.3 钢材的主要性能	2
2.4 影响钢材性能的因素	2
2.5 钢结构用钢材的选择	2
第 3 章 钢结构的连接	3
3.1 钢结构的连接方法和特点	3
3.2 焊缝连接的形式和焊缝的质量等级	3
3.3 对接焊缝的构造要求和计算	3
3.4 角焊缝的构造要求和计算	3
3.5 焊接残余应力和焊接残余变形	3
3.6 螺栓连接的排列和构造要求	3
3.7 普通螺栓连接的工作性能和计算	3
3.8 高强度螺栓连接的工作性能和计算	3
3.9 混合连接	3
第 4 章 轴心受力构件的设计	4
4.1 概述	4
4.2 轴心受拉构件的受力性能和计算	4
4.3 轴心受压构件的计算	4
4.4 实腹式轴心受压构件的截面设计	4
4.5 格构式轴心受压构件的截面设计	4
第 5 章 受弯构件的设计	5
5.1 梁的类型	5
5.2 梁的强度	5
5.3 梁的刚度	5



摇缘梁的整体稳定 .....	员缘
摇缘梁的局部稳定 .....	员怨
摇缘型钢梁的设计 .....	员缘
摇缘组合梁的设计 .....	圆圆
摇缘考虑腹板屈曲后强度的组合梁承载力计算 .....	圆怨
摇缘梁的拼接和连接 .....	圆愿
第 远章 摇拉弯和压弯构件设计 .....	圆原
摇远概述 .....	圆原
摇远拉弯和压弯构件的强度 .....	圆缘
摇远拉弯和压弯构件的刚度 .....	圆苑
摇远实腹式压弯构件的整体稳定 .....	圆苑
摇远实腹式压弯构件的局部稳定 .....	圆苑
摇远实腹式压弯构件的设计 .....	圆猿
摇远格构式压弯构件的计算 .....	圆苑
附摇录 .....	圆缘
摇附录 员 摇钢材和连接强度设计值 .....	圆缘
摇附录 圆 摇受弯构件的挠度容许值 .....	圆愿
摇附录 猿 摇梁的整体稳定系数 .....	圆怨
摇附录 源 摇轴心受压构件的稳定系数 .....	圆圆
摇附录 缘 摇各种截面回转半径的近似值 .....	圆苑
摇附录 远 摇型钢表 .....	圆苑
摇附录 苑 摇螺栓规格 .....	圆怨
参考文献 .....	圆圆





## 第 1 章 绪论

### 1.1 钢结构的特点

钢结构是采用钢板、型钢通过连接而成的结构。与其他材料的结构相比,钢结构具有如下优点。

(1) 钢材强度高,材性好。与混凝土、砖石和木材等建筑材料相比,钢材强度高,钢材由钢厂生产,质量控制严格,材质均匀性好,且具有良好的塑性和韧性。钢材强度高的特性使钢材适合于建造大跨度、承载重的结构。钢材材质均匀性好和塑性好的特点,使钢结构在一般条件下不会因超载而突然破坏,可以依靠变形增大调整内力并进行重分配,为结构补强加固提供了缓冲余地。钢材韧性好的特点,使钢结构适宜在动力荷载下工作,其良好的耗能能力和延性使钢结构具有优越的抗震性能,特别适宜于建造抗震设防强震区的各类结构。

(2) 钢结构的重量轻。与混凝土、砖石和木材等建筑材料相比,钢材虽然密度较大,但其强度则高很多,材料的质量密度和强度的比值为 $(78.5/235)$ ,而钢筋混凝土的比值约为 $(25/16.7)$ ,所以建造的结构比较轻。以相同跨度的结构承受相同的荷载,钢屋架的重量为钢筋混凝土屋架的 $1/3$ 左右,冷弯薄壁型钢屋架甚至接近于钢筋混凝土屋架的 $1/4$ 。钢结构建筑的自重约为同高度混凝土结构建筑的 $1/2$ 左右,且钢结构柱截面面积较混凝土结构柱的截面面积减少一半左右,有效增加了建筑的使用面积。钢结构重量轻,为其安装、运输提供了便利条件,同时减轻基础的负荷,降低地基、基础部分的造价。

(3) 钢结构制作工业化程度高,施工工期短。钢结构所用材料均为工厂制作,由钢板和各种型材加工而成的构件一般是在金属结构厂制作,具备成批生产加工的条件,制作准确度和精密度均较高。运往施工现场后通过连接整体组装,安装简便,施工机械化程度高,周期短,可以全天候施工作业,其施工速度可提高到混凝土结构的 $3$ 倍左右,从而降低施工管理成本。对采用螺栓连接的钢结构,易于拆装搬迁,适宜于结构加固、改建和拆迁。

(4) 钢结构密闭性好。钢结构的材料和焊接连接可以做到完全密封,适宜建造对气密性和水密性有一定要求的高压容器、大型油库、油罐、输油或输水压力管道等。

(5) 钢结构造型美观,具有轻盈灵巧的效果。钢结构可以较大程度地超越结构形式的束缚,通过各种线形的构件组合出多种形式的空间和新奇优美的形象,其强大的造型潜力是砌体结构所难以企及的。



(10) 钢结构符合可持续发展的需要。钢结构产业对资源和能源的利用相对合理,对环境破坏相对较少,是一项绿色环保型建筑产业。钢材是具有很高再循环利用价值的材料,边角料都可以回收利用。对同样规模的建筑物,钢结构建造过程中有害气体的排放量只相当于混凝土结构的 $1/5$ 。钢结构建筑物由于很少使用砂、石、水泥等散料,从而在根本上避免了扬尘、废弃物堆积和噪声等污染问题。

但是,钢结构也存在着可能会影响其选择应用的一些缺点,主要有:

(11) 失稳和变形过大造成破坏。钢结构质量轻的优点来自于其构件一般截面小而薄,受压时易为稳定承载力和刚度要求所控制,使强度难以得到充分发挥。所以设计时需要附设加劲肋或缀材达到增强结构的稳定承载力、减小结构使用阶段变形的目的,从而相应增加了构件连接的工作量和繁杂程度。

(12) 钢结构耐腐蚀性差。钢材容易腐蚀,对钢结构特别是薄壁构件必须注意防腐保护,因此其维护费用较高。处于较强腐蚀性介质内的建筑物不宜采用钢结构。在施工过程中应避免使结构受潮、淋雨,构造上应尽量避免存在难于检查、维修的死角。

(13) 钢材耐热但不耐火。钢材受热时,当温度在 $400^{\circ}\text{C}$ 以内时,其主要力学性能(如屈服点和弹性模量)降低不多。温度超过 $400^{\circ}\text{C}$ 以后,材质发生较大变化,强度逐步降低。温度达 $500^{\circ}\text{C}$ 时,钢材已不能继续承载。因此,《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)规定钢材表面温度超过 $150^{\circ}\text{C}$ 后即需加以隔热防护,对需防火的结构,应按相关的规范采取防护和保护措施。

(14) 钢结构可能发生脆性断裂。钢结构在低温和某些条件下,可能发生脆性断裂,还有厚板的层状撕裂,都应引起设计者的特别注意。

## 1.1 钢结构的应用及发展简况

钢结构是土木工程的主要结构形式之一。随着我国国民经济的迅速发展,其发展极为迅速,钢结构在土木工程各个领域得到了广泛的应用,高层和超高层建筑、多层房屋、工业厂房、体育场馆、会展中心、火车站候车大厅、飞机场航站楼、大型客机检修库、自动化高架仓库、城市桥梁和大跨度公路桥梁、粮仓以及海上采油平台等都已采用钢结构。为了克服钢结构的缺点,发挥其优势,以适应社会建设不断发展的需要,对钢结构的材料、结构型式、结构设计计算理论等方面的研究也在不断地发展。

### 1.1.1 钢结构应用领域及结构型式的发展

(1) 高层及超高层钢结构。国外在20世纪70年代建造了多幢高层和超高层钢结构建筑,如美国芝加哥西尔斯大厦,110层,高度344m,毁于“9·11”事件的美国纽约世贸中心,双塔分别为110层,高度344m。我国从20世纪80年代开始,在上海、深圳、北京等城市相继建成了十几幢高层建筑,在90年代又建成了以深圳地王大厦(115层,高384m)、大连国贸中心(108层,高353m)为代表的高层钢结构建筑,其建筑高度、结构型式、施工速度和施工管理水平均已进入世界先进行列。到2000年,全国已建和在建的高层及超高层钢结构建筑有40余幢,总建筑结构约1.2亿 $\text{m}^2$ 。



高层和超高层建筑的建造,促进了钢结构与混凝土结构的复合结构、钢板与混凝土或钢筋混凝土、型钢与混凝土组成的钢—混凝土组合结构等新型式和建造技术的发展。例如,上海金茂大厦的建筑总高度为 420.5m,主楼地上 88 层、地下 3 层,为框筒结构体系,核心筒为现浇钢筋混凝土,外框为钢结构与混凝土结构复合成巨型框架,成为钢结构与混凝土结构复合建造超高层建筑的典范。

在钢管内浇筑混凝土形成的钢管混凝土结构,由于管内混凝土在纵向压力作用下处于三向受压状态并起到抑制钢管的局部失稳,因而使构件的承载力和变形能力大大提高;由于钢管即为混凝土的模板,施工速度较快。例如,目前世界上最高的全钢管混凝土高层建筑—深圳赛格广场大厦,地上 70 层,高 438m。

以型钢或以型钢和钢筋焊成的骨架做筋材的钢骨混凝土结构,由于其筋材刚度大,施工时可用其来支撑模板和混凝土自重,可以简化支模工作。因此,成为 20 世纪 80 年代以来高层和超高层建筑结构的主要结构形式之一。例如,马来西亚吉隆坡悦来酒店的双塔大厦,为钢骨混凝土结构,88 层,高 418m。

此外,压型钢板—混凝土板组合楼板、压型钢板轻型墙体、型钢与混凝土组合梁楼盖体系、外包钢混凝土柱也得到了比较广泛的应用。这些高性能新型组合结构具有充分利用材料强度、较好的适应变形能力(延性)、施工较简单等特点,从而大大拓宽了钢结构和钢筋混凝土结构的应用范围。

(四) 轻型钢结构住宅 轻型钢结构住宅是以经济钢型材构件作为承重骨架,以轻型墙体材料作为维护结构所构成的居住类建筑。与传统的住宅结构相比,轻型钢结构住宅除具有一般钢结构的优点外,还具有建筑空间布置灵活、可有效增大建筑使用面积、降低建造成本等方面的优越性。在美国、日本、澳大利亚等发达国家,轻型钢结构住宅占总住宅建造面积的比例已达 10% 以上。我国的轻型钢结构住宅研究起步于 20 世纪 80 年代末,目前还处于研究和试点工程阶段,但发展态势非常好,目前建造的试点工程的钢结构体系采用了框架结构体系、框支结构体系、框架—剪力墙结构体系、错列桁架体系、钢—混凝土组合结构体系等。轻型钢结构住宅的发展促进了经济钢型材包括冷弯型钢、热轧或焊接 H 型钢、Z 型钢、焊接或无缝钢管及其组合构件的研发和生产,也促进了轻质墙体材料包括压型钢板及其组合板材、夹芯板、蒸压轻质加气混凝土板(蒸压板)及稻草板等材料的开发和生产。住宅建筑量大面广,是 21 世纪我国发展轻型钢结构的主要领域。

(五) 大跨度空间钢结构 大跨度空间钢结构主要是指网架、网壳结构及其组合结构(两种或两种以上不同建筑材料组成)和杂交结构(两种或两种以上不同结构形式构成),在体育场馆、大型展览场馆、火车站候车大厅、机场机库、机场航站楼、工业厂房、大跨度屋盖或楼层结构、散料仓库、公路收费站篷等方面得到广泛应用。

首都体育馆的屋盖为正交斜放的平面桁架系网架,平面尺寸 113m×113m,网架高远,网格 9m,采用 H 型钢以高强度螺栓连接。上海体育中心的万人体育馆和游泳馆,都采用了由圆钢管与焊接空心球节点组成的三向网架,体育馆平面为直径 113m 的圆形,周边挑檐 12m,总尺寸为 135m;游泳馆的平面为不对称的六边形,外包尺寸为 113m×113m。天津体育馆为直径 113m,挑檐 12m,总直径达 135m 的球面网壳,矢高为 12m,双层网壳厚 12m。长春体育馆的网壳结构平面为 113m×113m 枣形,连同支架的



平面为圆形或椭圆形。大型体育场的挑篷采用空间网壳结构的工程也逐年增多,实例有:深圳体育场周围挑篷(沿环向分为6段),宽度100m,悬挑15m,采用变高度螺栓球节点双层正放四角锥网壳结构;昆明拓东体育场挑篷,宽度100m,悬挑15m,采用周圈连续的变厚度双层正放四角锥网壳结构。各大中城市积极兴建大型体育场馆,以及北京2008年奥运会比赛场馆的建设,将在结构设计、材料、施工技术和科研等领域内,为空间钢结构技术的发展提供重大机遇。

据不完全统计,从1989年至2008年的20年内,国内多个形态各异的大规模会展中心建筑都选用了空间结构形式,如上海国际会议中心、广州会展中心展览大厅、上海新国际博览中心和南京国际展览中心等。一些中等城市如西安、成都、郑州、兰州、乌鲁木齐、重庆等的大型展览场馆和会展中心建筑也在近年内落成,钢结构在这个领域的市场潜力很大。此外,南京火车站、上海浦东机场航站楼、广州白云机场航站楼、深圳机场航站楼等均采用空间钢结构建造。高速公路收费站篷有约一半的比例采用各种形式的空间钢结构。

对于飞机库来说,建筑物的一边需要敞开以便设置机库大门,同时在屋盖下还要求悬挂吊车,因此采用三边支承、一边自由的网架是一种合理的结构形式。例如:北京首都机场的四机位机库,跨度为100m双跨,进深100m,可同时容纳四架波音737客机进行维修。网架为三层斜放四角锥式,采用圆钢管与焊接空心球节点,屋盖下设置100多个支点悬挂吊车,整个网架有杆件10000个、节点1000多个,屋盖钢结构耗用钢材约10000t。长沙黄花机场机库屋盖,平面尺寸100m×100m,网架高15m,开口边为高15m的四层网架。

以钢筋混凝土上弦板代替钢上弦杆的组合网架结构是近十几年来开发的结构体系,它可充分发挥混凝土受压、钢材受拉两种不同材料的强度优势,使结构的承重和围护作用合二为一,既用于屋盖结构,也用于多层和高层建筑的楼层结构,其形式之多、跨度之大、应用范围之广在世界上是领先的。工程实例有:徐州夹河煤矿大食堂屋盖为平面圆形伊尔索的蜂窝形三角锥组合网架,江西抚州体育馆屋盖为平面圆形伊尔索的组合网架,新乡百货大楼加层改造(增加四层)采用伊尔索的组合网架楼层结构,长沙纺织大厦(地下1层,地上15层)采用柱网圆形伊尔索和圆形伊尔索的组合网架楼层及平面圆形伊尔索的组合网架屋盖结构。

在单层钢网壳结构上敷设预制带肋混凝土面板再连接灌缝形成整体后组合而成的新型空间结构—组合网壳,大大改善了单层钢网壳的性能,克服了其设计由稳定性控制的缺点。工程实例有:山西汾西矿务局工程处食堂屋盖为圆形伊尔索三向型双曲组合扁网壳,山西潞安矿务局常村矿井选煤厂倒圆锥台煤仓的顶盖为直径100m的肋环型组合球面网壳。

预应力大跨度网架和网壳结构是近年发展起来的一种新型空间结构,在传统网架和网壳结构中引入现代预应力技术,可起到提高整个结构的刚度、减小结构挠度、改善内力分布、降低应力峰值的作用,从而可降低材料耗量,具有明显的技术经济效益。工程实例有:上海国际购物中心的七、八层楼,采用在下弦平面下圆形处增设预应力高强钢丝铸锚束的预应力正放四角锥组合网架,平面尺寸圆形伊尔索,截去一个腰长为圆形的等腰三角形,采用预应力后节省钢材用量10%。四川攀枝花体育馆,采用八支点预应力短程线型球面网壳,平面尺寸圆形伊尔索缺角八边形,对角柱跨度100m,周边设八道预



应力拉索,比非预应力钢网壳节省用钢量 10% 左右。广东清远市体育馆,采用六支点预应力六块组合型三向扭曲壳,平面尺寸为 100m 的正六边形,对角柱跨度 100m,周边设六道预应力拉索。据不完全统计,最近十多年来,在体育场馆、机场候机大厅或机库、大型剧院、会展中心等领域,我国已建造了 100 余座预应力空间钢结构,使现代预应力技术与钢结构的发展形成了有机结合与快速发展的新格局,目前我国在预应力钢结构技术领域从预应力拉索体系开发、预应力张拉设备研制、预应力张拉施工方式、结构体系与分析方法等方面取得了成熟经验。

(源)桥梁钢结构交通建设是当前我国重点发展的基础设施领域,钢结构轻型高强优点对于大跨度桥梁结构特别适合。1993 年修建的公铁两用南京长江大桥,最大跨度 1601m;1995 年建成的公铁两用九江长江大桥,主跨跨长(1601m);1993 年建成的上海杨浦大桥,采用双塔双索面斜拉桥,主跨跨长为 1710m;1995 年建成的江阴长江大桥,主跨采用悬索桥,跨度 1385m。2005 年建成的南京长江第二大桥南汊主桥,为双塔双索面扇形布置拉索的斜拉桥,主跨达 1418m。这些成就均表明我国在现代化桥梁建设上的水平已进入世界先进行列。

同时,钢管混凝土在大跨拱桥及斜拉桥和悬索桥塔柱建造中的应用得到迅速发展,工程实例不胜枚举。代表性桥梁有四川旺苍东河桥,主孔跨度 1300m,四川涪陵长江大桥主跨 1000m,浙江象山铜瓦门大桥主跨 1000m,武汉汉江三桥主跨 1000m,浙江千岛湖南浦大桥主跨 1000m,广州丫髻沙大桥主跨 1000m,四川万县长江公路桥主跨 1000m,郑州黄河二桥的主桥为 3 孔,每孔跨度 1000m 等。

(缘)压力管道及容器水工压力钢管是水电站建设高压引水管道的主要结构形式之一。伴随着“西气东输”和“西油东引”工程的建设,也大量采用了高压输气(油)管线及中转站、终点站的大容量储油(气)罐、库、塔等容器金属设备。城市污水处理厂的沼气罐也基本上采用钢结构。

(远)特种钢结构徐州电视塔塔楼采用直径 1000mm 单层联方型全球网壳,并采用地面组装、整体提升到 200m 设计标高就位的施工安装方法。上海东方明珠电视塔,选取装饰用的单层联方型全球网壳。大连友谊广场中心采用直径 1000mm,镶嵌镜面的水晶球网壳。杭州市地标,采用总高度 1000m,跨度 1000m 的螺栓球节点网架结构。

## 5.1 钢材和焊接与防护技术方面的发展

(员)钢材和钢结构的广泛应用推动了我国钢铁产量的持续和快速发展,据统计,继 1996 年首次突破亿吨大关后,1999 年达到了 1.2 亿吨的高水平,2000 年全国建筑行业用钢 1.2 亿吨,其中钢结构用钢 1000 万吨左右,到 2003 年分别达到了 1.5 亿吨和 1.2 亿吨。

目前,建筑钢结构用钢材的主要品种有中厚板、薄板、镀锌卷板、彩色涂层卷板、中小型钢(工字钢、槽钢、角钢)、热轧或焊接 H 型钢、焊管(直缝管和螺旋管)、冷弯型钢及无缝钢管等,特别是热轧 H 型钢的生产对钢结构发展起到推动作用。随着钢结构建筑的大量兴建,建筑钢材的需求呈多样化趋势,发展趋势是以中厚板为主,H 型钢、冷弯型钢、钢管、彩色涂层卷板需求增加,大中型角钢、工字钢、槽钢用量减少。采用控温控轧技术生产



低焊接预热温度的厚钢板(贼缘皂皂)、不随厚度变化固定屈服点的钢材、超厚高强钢板、高韧性和高耐寒性能钢、高线能量输入焊接和抗撕裂钢、耐候钢(包括抗盐腐蚀)等高性能钢材的研发和生产,是今后钢材的发展方向。如连接京九铁路的九江长江大桥,采用员缘次晕高强度、高韧性钢,钢板焊接最大厚度达到缘皂皂;芜湖长江大桥采用了员缘次晕新钢种。我国热强化钢材的品种和数量还有限,需要进一步研发。

提高钢结构耐火能力的根本方法是提高钢材的耐火能力,因此耐火钢的研发成为钢材新的发展方向。耐火钢性能的关键是高温强度,同时具有良好的焊接性能,要求其能够在猿缘益~远益温度下保持员猿澡后的强度不低于室温强度的圆缘。日本在圆世纪愿年代开始研发并在工程中得到广泛应用,我国近年来对耐火钢的研制有较快发展,宝钢、武钢等大型钢厂已有生产并初步得到工程应用。

发展薄片、美观、廉价又能与混凝土牢固结合的钢模板,将使模板可以作为结构的一部分参与受力,还可省去装修工序。

(圆)焊接技术摇焊接技术的发展与钢结构产业水平的提高密切相关,当前我国焊接材料产量跃居世界首位,但品种明显落后于先进国家,大部分产品集中在普通焊条等低端产品的生产上,焊丝及特种焊条、焊接成套设备等高附加值产品的市场被国外占领。因此,研究先进的高效焊接方法和焊接新能源的应用,研制新型高效优质焊接材料,研制焊接过程自动化、智能化和组焊焊接一体化的焊接设备及专用工艺设备,以及焊接结构的寿命评估与延寿技术是当前钢结构产业焊接技术的重要课题。

(猿)防腐涂料摇在钢结构表面涂敷防腐涂料是提高钢结构抗腐蚀性能的重要技术措施。水性富锌、无机富锌和环氧富锌底漆均是长效的底漆,以高模数的硅酸钾为基数的水性无机富锌底漆和面漆是高性能防腐防污材料,具有发展潜力,其中底漆必须解决底材“闲蚀”和耐水性差的难题,带锈防腐是目前研究的热点之一,面漆主要在保证保护性能的前提下,提高其装饰性和耐久性。此外,将纳米技术应用于防腐涂料的开发、电弧喷涂锌复合涂层体系、热喷涂金属阶梯涂层等也得到了发展。

大连振邦氟碳涂料股份有限公司采用代表国际先进水平的国外标准,自主研发出常温固化氟碳金属漆和罩面清漆,以环氧富锌底漆和环氧云铁中间漆为配套涂层组成钢结构长效氟碳金属漆配套涂料,已投入工业化生产,并在大连猿万吨原油码头、大连世界博览广场、郑州黄河二桥得到应用,正在建设的北京奥运国家主体育场鸟巢钢结构工程也选用了这种涂料。

(源)防火涂料摇在钢结构表面涂敷防火涂料是提高钢结构耐火性能的重要技术措施。根据《钢结构防火涂料通用技术条件》(员缘缘缘)的规定,用于提高钢结构耐火能力的防火涂料按涂层厚度可分为厚涂型(涂层厚度不大于圆缘皂皂,耐火极限不低于圆澡)、薄涂型(涂层厚度不大于缘皂皂,耐火极限不低于员澡)和超薄涂型(涂层厚度不大于圆皂皂,耐火极限不低于员澡)等,其中厚涂型和薄涂型为传统的防火涂料,施工一般采用喷涂技术。厚涂型涂料一般为无机物,在火灾中涂层不膨胀,依靠材料的不燃性、低导热性或涂层中材料的吸热性,延缓钢材的升温,保护钢构件,由于这种防火涂料组分的颗粒较大,涂层外观不平整,影响建筑的整体美观,多用于耐火极限要求圆澡以上的室内外隐蔽钢结构及多层厂房钢结构。薄涂型涂料通常是用合适的水性乳胶聚合



物作基料再配以阻燃剂和添加剂等组成,受火时能膨胀发泡,以膨胀发泡所形成的耐火隔热层延缓钢材的升温,保护钢构件,一般用于耐火极限要求不超过 1.5h 的钢结构,该涂料一般分为底层(隔热层)和面层(装饰层),其装饰性优于厚涂型防火材料。超薄型涂料是近几年研发的新品种,可采用喷涂、刷涂或辊涂施工,一般为溶剂型,具有优越的黏结强度,耐候耐水性好,在受火时缓慢膨胀发泡形成致密坚硬的防火隔热层,该防火层具有很强的耐火冲击性,延缓了钢材的温升,有效保护钢构件,一般用于耐火极限要求不超过 1.5h 的钢结构,施工简便,装饰性更好。研制开发高耐候性、耐火性能更高、装饰性能优良的超薄型防火涂料是今后钢结构防火涂料的发展方向。目前国内外已出现了耐火性能达到或超过 1.5h 的超薄型防火涂料,在各种轻钢结构、网架等工程中得到了应用,是市场上大力推广的品种。

此外,粉末防火涂料、弹性防火涂料、色彩防火涂料、多功能性防火涂料均为当前和今后一个时期的重要研发领域,纳米技术和填料表面处理技术、先进的聚合物生产技术、高自动化水平的涂料生产工艺和先进的涂料检测技术也是相关产业水平得以提高的研究课题。

目前,一项新的钢结构防火保护技术—绝热纤维喷涂材料护层得到了越来越多的应用。绝热纤维喷涂材料是一种不燃、柔软超细无机纤维与专用粘结剂的混合物,将该材料采用配套喷涂设备喷涂到钢结构表面后形成一定厚度的整体封闭绝热层,不受钢结构复杂程度和基体表面异型程度的限制,一次性施工完成既可同时具有绝热、防火、隔音、防腐、密封、抗冷凝及装饰等功能。

## 5.1 绪论设计计算理论方面的发展

钢结构的设计理论,经历了从把材料看作弹性体的容许应力古典理论(结构内力和构件截面计算均套用弹性理论,采用容许应力设计方法),发展为考虑材料塑性的极限强度理论,到成为按极限状态设计的理论体系等三个阶段。目前在工程结构设计规范中已采用基于概率论和数理统计分析的极限状态可靠度理论。但很多数据的研究分析及理论阐述尚需进一步的完善和发展,体系的可靠度、疲劳计算的极限状态等问题还没有解决。对于板间屈曲后的强度、压弯构件的弯扭屈曲、空间结构的稳定、钢材的断裂理论、钢—混凝土组合结构的设计方法等,尚需进一步深入研究。

随着钢结构应用领域的扩大,我国及时开展了相应的科研与工程实践经验总结工作,现行的有关规范包括:国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017-2003)、《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018-2002)、《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50205-2001)、《粮食钢板筒仓设计规范》(GB 50071-2001)、《立式圆筒形钢制焊接油罐设计规范》(GB 50128-2002)、《立式圆筒形钢制焊接储罐施工及验收规范》(GB 50129-2002);行业标准《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99-2008)、《网壳结构技术规程》(JGJ 151-2008)、《网架结构设计与施工规程》(JGJ 101-2002)、《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138-2001)、《建筑钢结构焊接技术规程》(JGJ 81-2002)、《钢结构高强度螺栓连接的设计、施工及验收规程》(GB 50755-2007)、《网架结构工程质量检验评定标准》(GB 50206-2003)等,同时制订有钢结构相关的材料规范或技术标准等。



在水利水电和桥梁工程领域,也制订有相应的钢结构行业标准,例如《水电站压力钢管设计规范》(GB 50107-2004)、《水利水电工程钢闸门设计规范》(GB 50183-2005)、《水利水电工程钢闸门制造安装及验收规范》(GB 50183-2005)、《公路桥涵钢结构及木结构设计规范》(JTJ 025-2008)、《公路斜拉桥设计规范》(JTJ 025-2008)、《公路桥涵施工技术规范》(JTJ 041-2000)等。

## 课程基本课程的任务和特点

尽管钢结构的应用领域广泛,但从各种钢结构的主要形式来看,除了容器和管道类钢结构采用钢板壳体结构外,一般都由杆件系统和索组成。分析这些杆件的受力可以归纳为拉索、拉杆、压杆、受弯杆件、受拉受弯杆件(简称拉弯杆件)、受压受弯杆件(简称压弯杆件)、拱、刚架等。由于这些杆件是组成各种结构形式的最基本单元,因此成为钢结构的基本构件。

为了能够学习掌握钢结构各种结构形式的受力性能,首先必须掌握钢结构基本构件的工作性能及其设计分析的基本理论,这便是本课程的主要任务。与此同时,为了保持所学知识的完整性和连续性,本课程还安排了钢结构材料和连接的相关知识。通过本课程的学习,将为后续的钢结构专业课程和从事钢结构建筑的设计和基础研究奠定基础。

实际上,结构设计是一个综合性的问题,包含了结构方案、材料选择、截面形式选择、结构承载力计算和构造等各方面,需要综合考虑安全、适用、经济和施工的可行性等各方面的因素。同一构件在给定荷载作用下,可以有不同的截面,需经过分析比较,才能作出合理的选择。因此,要搞好工程结构设计,往往还需要结合具体情况进行适用性、材料用量、造价、施工等项指标的综合分析,以获得良好的技术经济效益。

学习本课程需要注意以下特点:

(1)材料力学课程是本课程的重要理论基础。钢材在冶炼和轧制过程中质量可以严格控制,钢材内部组织比较均匀,材质波动性小,接近各向同性,且在一定的应力幅度内材料为弹性。因此,钢结构实际受力情况和材料力学计算结果比较符合,在计算中采用的经验公式不多,从《材料力学》课程学得的理论知识和分析方法将在本课程中反复应用,但由于本课程的实用性决定了不是所有钢结构构件的设计方法完全遵循《材料力学》课程的理想状况,必要时需结合试验或工程实践经验对理论公式加以修正。在学习时应注意它们之间的异同点,体会并灵活运用《材料力学》课程中分析问题的基本原理和基本思路,即由材料的物理关系、变形的几何关系和受力的平衡关系建立的理论分析方法,对学习本课程是十分有益的。

(2)学会运用设计规范至关重要。为了贯彻国家的技术经济政策,保证设计质量,达到设计方法上必要的统一化、标准化,国家制定了钢结构设计规范,对钢结构构件的设计方法和构造细节都作了具体规定。规范反映了国内外钢结构的研究成果和工程经验,是理论与实践的高度总结,体现了该学科在当前一个时期的技术水平。对于规范特别是其规定的强制性条文,设计人员一定要遵循,并能熟练应用。因此,要注意在本课程的学习中,有关基本理论的应用最终都要落实到规范的具体规定中。本课程涉及到的规范标准



主要有《建筑结构荷载规范》(GB 50009)、《钢结构设计规范》(GB 50017)和《钢结构工程施工质量验收规范》(GB 50755)等。

由于受到学制和教学课程安排的限制,本课程后续的专业课程主要学习一般民用建筑或构筑物的设计方法,对于其他领域的钢结构设计以及施工和验收方法则不能一一涉及。如前所述,除与本课程涉及到的规范标准以外,根据钢结构的应用领域,国家有关部门还制订有相应的行业标准,在学习本课程的过程中,应积极主动地查阅这些行业标准的相关规定,以便尽可能的扩充专业知识面。

由于科学技术水平和生产实践经验是在不断发展的,设计规范也必然要不断进行修订和补充。因此,要用发展的眼光来看待设计规范,在学习和掌握钢结构理论和设计方法的同时,要善于观察和分析,不断进行探索和创新。由于设计工作是一项创造性工作,在遇到超出规范规定范围的工程技术问题时,不应被规范束缚,而需要充分发挥主动性和创造性,经过试验研究和理论分析等可靠性论证后,积极采用先进的理论和技术。

钢结构构造知识和构造规定具有重要地位。钢结构重量轻的优点既是以钢材高强度为基础,也取决于钢结构构件截面的宽翼薄壁特点,因此钢结构的承载极限状态常常不是以材料强度控制,而是以构件变形过大或失稳破坏为控制条件。这样一来,在钢结构及其构件的设计过程中,根据结构和构件的形式和受力特点合理地进行加劲肋和各种缀材的敷设,对于钢结构的总体优化具有重要意义。因此,要充分重视对各类构件构造知识的学习。



### 思考题

- 1. 钢结构有哪些优缺点?如何克服其缺点?
- 2. 简述钢结构的主要应用范围和发展方向?
- 3. 简述钢材和焊接及保护材料的主要发展方向?



## 第 10 章 钢结构材料

### 10.1 钢结构对材料的要求

钢材的种类繁多,性能差别很大,适用于钢结构的钢材只是其中的一小部分。用作钢结构的钢材必须满足下列要求。

#### 10.1.1 强度要求

用作钢结构的钢材必须具有较高的抗拉强度和屈服点。钢结构设计中常把钢材应力达到屈服点作为承载能力极限状态的标志,因此其值高可以减小截面,从而减轻自重,节约钢材,降低造价。而抗拉强度是钢材塑性变形很大且将破坏时的强度,其值高可以增加结构的安全保障。

#### 10.1.2 变形能力

钢材有两种完全不同的破坏形式:塑性破坏和脆性破坏。

塑性破坏的主要特征是破坏前具有较大的塑性变形,常在钢材表面出现明显的相互垂直交错的锈迹剥落线;只有当构件中的应力达到抗拉强度后才会发生破坏,破坏后的断口呈纤维状,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,因此不至发生严重后果。钢材塑性破坏前的较大塑性变形能力,可以实现构件和结构中的内力重分布,使结构中原先受力不等的部分应力趋于均匀,因而提高了结构的承载能力,钢结构的塑性设计就是建立在这种足够的塑性变形能力上。

脆性破坏的主要特征是破坏前塑性变形很小,或根本没有塑性变形,而突然迅速断裂。计算应力可能小于钢材的屈服点,断裂从应力集中处开始,破坏后的断口平直,呈有光泽的晶粒状或有人字纹。由于破坏前没有任何预兆,破坏速度又极快,无法察觉和补救,而且一旦发生常引发整个结构的破坏,后果非常严重,因此在钢结构的设计、施工和使用过程中,要特别注意防止这种破坏的发生。

#### 10.1.3 加工性能

加工性能包括冷、热加工和可焊性能。钢材应具有良好的加工性能,以保证其不但易于加工成各种形式的结构,而且不致因加工对强度、塑性及韧性带来较大的不利影响。

此外,根据结构的具体工作条件,在必要时还要求钢材具有适应低温和腐蚀性环境、抵抗冲击及疲劳荷载作用的能力。



## 8.1 钢结构的种类和规格

### 8.1.1 钢结构的种类

钢结构的种类(简称钢种)按用途可分为结构钢、工具钢和特殊用途钢等,其中结构钢又分建筑用钢和机械用钢;按化学成分可分为碳素钢和合金钢;按冶炼方法可分为平炉钢、转炉钢和电炉钢等;按脱氧方法可分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢和特殊镇静钢;按成型方法可分为轧制钢(热轧和冷轧)、锻钢和铸钢;按硫、磷含量和质量控制分类,有高级优质钢、优质钢和普通钢等。

我国的建筑用钢主要为碳素结构钢和低合金高强度结构钢两种,优质碳素结构钢在冷拔碳素钢丝和连接用紧固件中也有应用。另外,厚度方向性能钢板、焊接结构用耐候钢、铸钢等在某些情况下也有应用。

#### (1) 碳素结构钢

碳素结构钢的质量等级按由低到高的顺序分为 Q195、Q235、Q275 四级。质量的高低主要是以对冲击韧性的要求区分的,对冷弯性能的要求也有所区别。碳素结构钢交货时,应有化学成分和力学性能的合格保证书。化学成分要求碳、锰、硅、硫、磷含量符合相应级别的规定,Q235 级钢的碳、锰含量可以不作为交货条件。力学性能要求屈服点、抗拉强度、伸长率和冷弯性能合格,Q275 级钢的冷弯性能只在需方要求时才提供,Q195 级钢应分别保证屈服点、抗拉强度、伸长率的冲击韧性合格。

碳素结构钢有 Q195、Q235、Q275、Q275、Q275 五种,前四位是屈服点的汉语拼音的首位字母,数字代表钢材厚度(直径)≤16mm 时的屈服点(屈服点)。数字的由低到高,不仅代表了钢材强度的由低到高,在较大程度上也代表了钢材含碳量的由低到高和塑性、韧性、可焊性的由好变差。建筑结构用碳素结构钢主要应用 Q235 级钢,其碳的质量分数为 0.25%~0.38%,强度、塑性和焊接性能均适中,冶炼方法一般由供方自行决定,设计者不再另行提出,如需方有特殊要求时可在合同中加以注明。

碳素结构钢的牌号由代表屈服点的字母 Q、屈服点数值、质量等级、脱氧方法符号等四部分按顺序组成。对 Q235 级钢来说,Q195 和 Q235 两级的脱氧方法可以是沸腾钢(F)、半镇静钢(B)和镇静钢(Z),Q275 级为镇静钢(Z),Q275 级为特殊镇静钢(TZ)。

#### (2) 低合金高强度结构钢

低合金高强度结构钢是在冶炼碳素结构钢时加入一种或几种适量的合金元素(锰、硅、钒等)而炼成的钢种,可提高强度、冲击韧性、耐腐蚀性又不太降低塑性。由于合金元素的总质量分数低于 3%,故称为低合金高强度结构钢。根据钢材厚度(直径)≤16mm 时的屈服点(屈服点),分为 Q345、Q390、Q420、Q460、Q500 五种。其中 Q345、Q390 和 Q420 三种钢材均有较高的强度和较好的塑性、韧性和焊接性能,被《钢结构设计规范》选为承重结构用钢。

钢的牌号仍有质量等级符号,分为 Q195、Q235、Q275、Q345、Q390 五个等级,和碳素结构钢一样,不同质量等级是按对冲击韧性的要求区分的,Q235 级主要是要求屈服点的冲击韧性。低合金高



强度结构钢的粤,月级属于镇静钢,悦,阅,耘级属于特殊镇静钢,因此钢的牌号中不注明脱氧方法。冶炼方法也由供方自行选择。低合金高强度结构钢交货时,应有化学成分和屈服点、抗拉强度、冷弯等力学性能的合格保证书。当需要时,还应提出 圆益,园益,原园益或 原园益的冲击韧性合格的附加交货条件。

#### (猿) 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢与碳素结构钢的主要区别在于钢中含杂质元素较少,磷、硫等有害元素的质量百分数均不大于 园园豫,其他缺陷的限制也较严格,具有较好的综合性能。按照国家标准《优质碳素结构钢技术条件》(粤月载之悦原怨怨)生产的钢材共有两大类,一类为普通含锰量的钢,另一类为较高含锰量的钢,两类的钢号均用两位数字表示,它表示钢中的平均含碳量的万分数,前者数字后不加 酝灶,后者数字后加 酝灶,如 源缘号钢,表示平均含碳量为 园源豫的优质碳素钢,源缘灶号钢,则表示同样含碳量、但锰的含量也较高的优质碳素钢。可按不进行热处理或热处理(正火、淬火或高温回火)状态交货,要求热处理状态交货的应在合同中注明,未注明者按不进行热处理交货。由于价格较高,钢结构中使用较少,仅用经热处理的优质碳素结构钢冷拔高强度钢丝或制作高强度螺栓、自攻螺钉等。

#### (源) 在型钢和耐候钢

在型钢是在某一级结构钢(母级钢)的基础上,经过特殊冶炼、处理的钢材。在型钢在厚度方向有较好的延展性,有良好的抗层状撕裂能力,适用于高层建筑和大跨度钢结构的厚钢板结构。我国生产的在型钢板的标记为在母级钢牌号后面加上在型钢板等级标记,如在缘,在园,在猿等,数字分别表示沿厚度方向的断面收缩率分别大于或等于 员豫,园豫,猿豫。

耐候钢是在低碳钢或低合金结构钢中加入铜、铬、镍等合金元素冶炼成的一种耐腐蚀钢材,在大气作用下,表面自动生成一种致密的防腐薄膜,起到抗腐蚀的作用。这种钢材适用于外露环境,且对耐腐蚀有特殊要求的或在腐蚀性气体和固态介质作用下的承重结构。

### 圆园园 型钢的规格

钢结构采用的型材主要为热轧成型的钢板和型钢,以及冷弯(或冷压)成型的薄壁型钢。由工厂生产供应的钢板和型钢等有成套的截面形状和一定的尺寸间隔,称为钢材规格。

#### (员) 热轧钢板

热轧钢板包括厚钢板、薄钢板和扁钢等。厚钢板的厚度为 源缘~ 源园皂,宽度为 源园~ 猿园园皂,长度为 源~ 员皂,被广泛用于组成焊接构件和连接钢板。薄钢板的厚度为 园缘~ 源皂,宽度为 缘园~ 员缘园皂,长度为 园缘~ 源皂,是冷弯薄壁型钢的原料。扁钢的厚度为 源~ 源皂,宽度为 员园~ 员园皂,长度为 猿~ 怨皂。

钢板的表示方法为在钢板横断面符号“原”后加“厚伊宽伊长”(单位为皂),如: 原园伊源园伊源园。

#### (圆) 热轧型钢

热轧型钢包括角钢、工字钢、匀型钢、槽钢和钢管等(图 圆园园)。



面等构件。

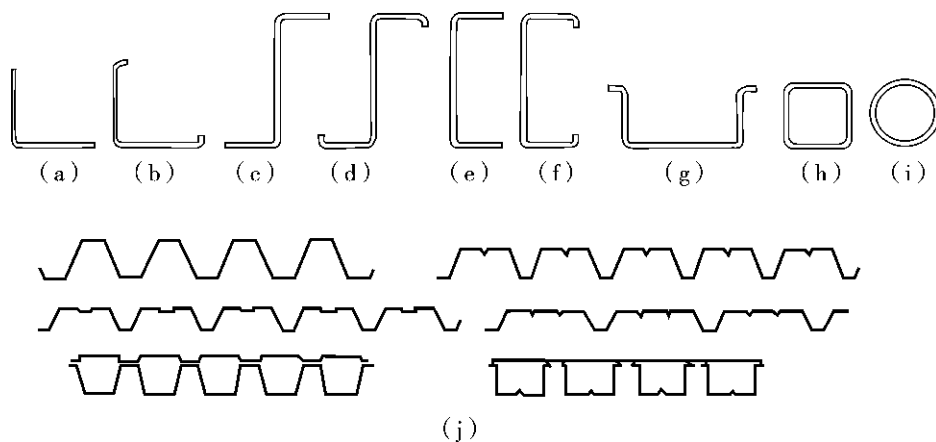


图 1-1 薄壁型钢的截面形式

(a) 等边角钢 (b) 不等边角钢 (c) 槽钢 (d) 卷边槽钢 (e) 薄槽钢  
(f) 卷边槽钢 (g) 导向外卷边槽钢(帽形钢) (h) 方管 (i) 圆管 (j) 压型板

## 薄壁钢材的主要性能

### 薄壁单向均匀拉伸时钢材的性能

钢材的多项性能指标可通过单向一次(也称单调)拉伸试验获得。试验一般都是在标准条件下进行的,即采用规定形式和尺寸的标准试件,其表面光滑,没有孔洞、刻槽等缺陷,在常温、静力、单向的条件下,荷载分级逐次增加,直到试件破坏,由于加载速度缓慢,又称静力拉伸试验。图 1-2 给出了相应钢材的一次拉伸应力( $\sigma$ )~应变( $\epsilon$ )曲线。其中低碳钢和低合金高强度结构钢简化的光滑曲线示于图 1-3,曲线可分为五个阶段:弹性阶段(Ⅰ)、弹塑性阶段(Ⅱ)、塑性阶段(Ⅲ)、应变硬化阶段(Ⅳ)、颈缩阶段(Ⅴ)。由此曲线可获得钢材的性能指标。

(1) 弹性阶段:图 1-3 中  $\sigma$ ~ $\epsilon$  曲线的Ⅰ段为直线,表示钢材具有完全弹性性质,即应力与应变呈线性关系,且卸荷后变形完全恢复。这时应力可由弹性模量  $E$  定义,即  $\sigma = E\epsilon$ ,而  $E$  为该直线的斜率,点应力  $\sigma_p$  称为比例极限。曲线Ⅱ段仍具有弹性,但呈非线性,即为非线性弹性阶段,点应力  $\sigma_e$  称为弹性极限。弹性极限和比例极限相距很近,实际上很难区分。故通常略去弹性极限的点,把  $\sigma_p$  看作弹性极限。

随着荷载的增加,曲线出现Ⅲ段,这时表现为非弹性性质,卸荷曲线成为与Ⅰ段平行的直线,此时钢材的变形包括卸荷后可恢复的弹性变形和不可恢复的塑性变形两部分,我们把不可恢复的塑性变形称为残余变形或永久变形。进入该阶段后,曲线波动较大,以后逐渐趋于平稳,其最高点和最低点分别称为上屈服点和下屈服点。下屈服点的数值对试验条件不敏感,所以计算时以下屈服点为依据(用符号  $\sigma_s$  表示)。



对于低碳钢和低合金高强度结构钢,当应力达到屈服点后,将出现明显的屈服台阶现象,即在应力保持不变的情况下,应变却持续增长。

钢材经屈服阶段的较大塑性变形,内部晶粒结构重新排列后,恢复重新承载的能力,曲线呈上升趋势,如图 4-10 所示的硬化阶段。该段曲线最高点的应力称为抗拉强度或极限强度。当应力达到峰值点时,试件出现局部横向收缩变形,即发生颈缩现象,至断裂点而断裂。

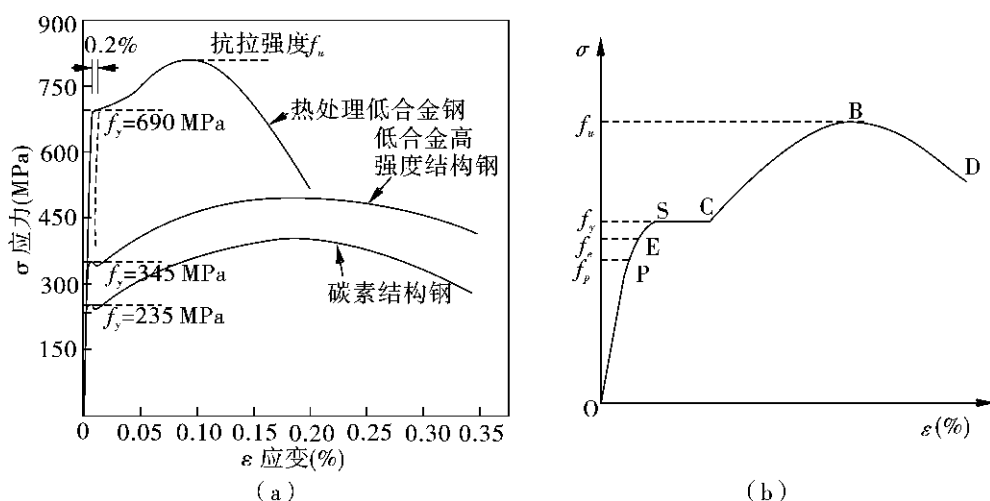


图 4-10 钢材的单调拉伸应力-应变曲线

对于没有缺陷和残余应力影响的试件,比例极限和屈服点比较接近,达到相应应力值时的应变也较接近,且数值很小。因此为了简化计算,通常假定屈服点前钢材为完全弹性的,而屈服点后则为完全塑性的,这样就可把钢材视为理想的弹塑性体,其应力-应变曲线表现为如图 4-11 所示的双直线。当应力达到屈服点后,将使结构产生很大的在使用上不容许的残余变形,因此设计时应取屈服点作为钢材可以达到的最大应力,而抗拉强度则成为材料的强度储备。钢材的抗拉强度与屈服点之比称为强屈比,它是表明钢材设计强度储备的一项重要指标,该值愈小,强度储备愈小;反之,该值愈大,强度储备愈大,但强度利用率低且不经济。因此设计中要选定适当的强屈比。塑性设计虽然把钢材看作理想弹塑性体,忽略应变硬化的有利因素,却是以高出屈服点为条件的。如果没有硬化阶段,或是高出屈服点不多,就不具备塑性设计应有的转动能力。因此规定钢材必须有强屈比  $\geq 1.2$  的强屈比。

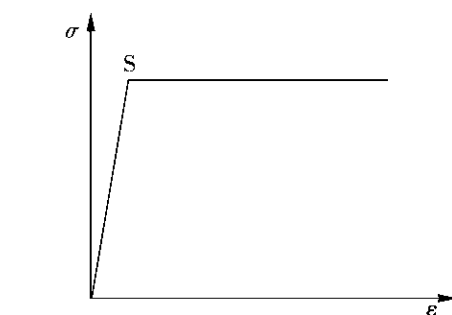


图 4-11 理想弹塑性体的应力-应变曲线

热处理钢材虽然有较好的塑性但没有明显的屈服点和屈服平台,这类钢材的屈服点