



新世纪高职高专土建类系列教材

钢 结 构

G A N G

J I E

G O U

李洪岐 主编

曲淑萍 李秀杰 副主编



403

76391-43
L32

新世纪高职高专土建类系列教材

钢 结 构

李洪岐 主 编
曲淑萍 副主编
李秀杰

科 学 出 版 社

2002

《新世纪高职高专土建类系列教材》

编 委 会

主任委员 沈养中

副主任委员 (以姓氏笔画为序)

王志军 邓庆阳 司马玉洲 李继业

李维安 董 平 童安齐

委 员 (以姓氏笔画为序)

王长永 王振武 石 静 史书阁

付玉辉 田云阁 刘正保 刘念华

李洪岐 李树枫 肖 翥 陈守兰

张力霆 张丽华 张献奇 孟胜国

郝延锦 郭玉起 袁雪峰

出版说明

当前,高职高专教育中土建类及其相关专业已成为各高职高专学校的主要专业之一,专业人数不断扩大,教学要求越来越高,以往出版的教材已难以满足教学需要。为促进高职高专教学改革,加强高职高专教材建设,我们组织了《新世纪高职高专土建类系列教材》。与同类教材相比,本套教材有以下几个显著特点:

1. 针对性强,适合高职高专的培养目标;
2. 吸收了我国近 10 年来教学改革的阶段性成果,并以我国现行建筑行业的最新政策、法规为依据;
3. 内容更新,重点突出,注意整体的逻辑性、连贯性,具有适用性、实用性。

参加本套教材编写的主要单位有:邢台职业技术学院、河北工程技术高等专科学校、山东农业大学土木工程学院、华北矿业高等专科学校、华北航天工业学院、山西阳泉煤炭专科学校、南阳理工学院。

由于时间仓促,错漏之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

《新世纪高职高专土建类
系列教材》编委会
2001 年 8 月

前 言

遵照教育部关于高职、高专教学的基本要求,在明确了教学目标之后,确定了本教材的编写指导思想。本书反映我国钢结构应用现状,不求理论高深,要求学以致用,力求内容编排精炼、实用、条理清晰。

轻钢结构技术是建设部推广新技术项目,住宅钢结构为“十·五”期间重点发展项目。《钢结构住宅建筑产业化技术导则》已由建设部颁布实施,我国钢结构建筑的发展必将走上健康发展的道路。轻型钢结构与传统混凝土结构相比在造价和建造速度上具有优势,由此可见,轻型钢结构的应用会更广泛。

本书除介绍普通钢结构的连接、钢构件的设计外,还全面地介绍了轻型钢结构的特点、设计方法。本书取消了以往教材中都有的桁架一章,增加了门式刚架设计内容,并把门式刚架房屋作为课程设计题目。鉴于本书是专科教材,且受篇幅的限制,对多层、高层、重型厂房结构本书没作详细讲解。这是本专科教材的特点,即不搞大而全。通过本课程的学习,读者能掌握钢结构的基本连接方法和基本构件设计,为从事轻型钢结构房屋的设计与施工奠定基础。

全书共分七章。编写分工如下:河北工程技术高等专科学校李洪岐(第一、二、七章,附录);华北航天工业学院曲淑萍(第五、六章);山西阳泉煤炭专科学校李秀杰(第三章);华北航天工业学院冯秀苓(第四章)、刘国勇(第 5.2、6.2 节)。芮娟绘制了书中实例附图。全书由沈巽之主审,由李洪岐统稿。张跃峰、张瑞祥、庞全高级工程师对本书提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于时间仓促,编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

目 录

出版说明

前言

第一章 绪论	1
1.1 钢结构发展概况	1
1.2 钢结构的特点和应用	4
1.3 钢结构的发展趋势	5
思考题.....	7
第二章 钢结构的材料	8
2.1 钢材在单向均匀应力作用下的工作性能	8
2.2 钢材在复杂应力作用下的工作性能.....	10
2.3 钢材的疲劳.....	11
2.4 钢结构对材料性能的要求.....	14
2.5 影响钢材力学性能的因素.....	17
2.6 钢材种类及选择.....	21
2.7 钢结构的设计方法.....	25
思考题	29
第三章 钢结构的连接	30
3.1 钢结构的连接方法.....	30
3.2 焊缝构造及计算.....	33
3.3 焊接残余应力和残余变形.....	58
3.4 普通螺栓连接构造及计算.....	61
3.5 高强度螺栓连接的构造及计算.....	76
思考题	85
习 题	86
第四章 受弯构件(梁)	89
4.1 受弯构件的类型.....	89
4.2 梁的强度和刚度.....	91
4.3 梁的整体稳定	96
4.4 梁的局部稳定	105
4.5 钢梁的设计	110

思考题.....	135
习 题.....	136
第五章 轴心受力构件	138
5.1 轴心受力构件的类型	138
5.2 轴心受力构件的强度、刚度.....	139
5.3 轴心受压构件的整体稳定	141
5.4 实腹式轴心受压构件的局部稳定	152
5.5 实腹式轴心受压构件的截面设计	153
5.6 格构式轴心受压构件的设计	157
思考题.....	167
习 题.....	167
第六章 拉弯、压弯构件	169
6.1 拉弯、压弯构件的强度、刚度	169
6.2 实腹式压弯构件的整体稳定	171
6.3 实腹式压弯构件的局部稳定	180
6.4 实腹式压弯构件的截面设计	181
6.5 格构式压弯构件的设计	185
6.6 柱顶、柱脚设计.....	189
思考题.....	202
习 题.....	202
第七章 轻型钢结构房屋设计	205
7.1 轻型钢结构房屋特点、组成.....	205
7.2 轻型钢结构房屋设计原则	207
7.3 轻型钢结构房屋结构布置	207
7.4 门式刚架设计	216
7.5 门式刚架设计实例	234
附录	243
一、疲劳计算的构件和连接分类	243
二、钢结构材料特性	246
三、普通钢结构轴心受压构件截面分类	249
四、轴心受压构件的稳定系数	251
五、梁的两端及跨间侧向均为简支时的 ξ_1 、 ξ_2 和 μ_b 值	257
六、常用钢材截面特性表	258
参考文献	303

第一章 绪 论

钢结构是目前广泛应用的一种建筑结构,随着钢结构理论研究和技术的不断进步,钢结构将在更多的工业与民用建筑工程中采用。本章主要介绍钢结构的特点、应用范围等。

1.1 钢结构发展概况

钢结构的应用在我国已有悠久的历史。中国是最早用铁建筑承重结构的国家。

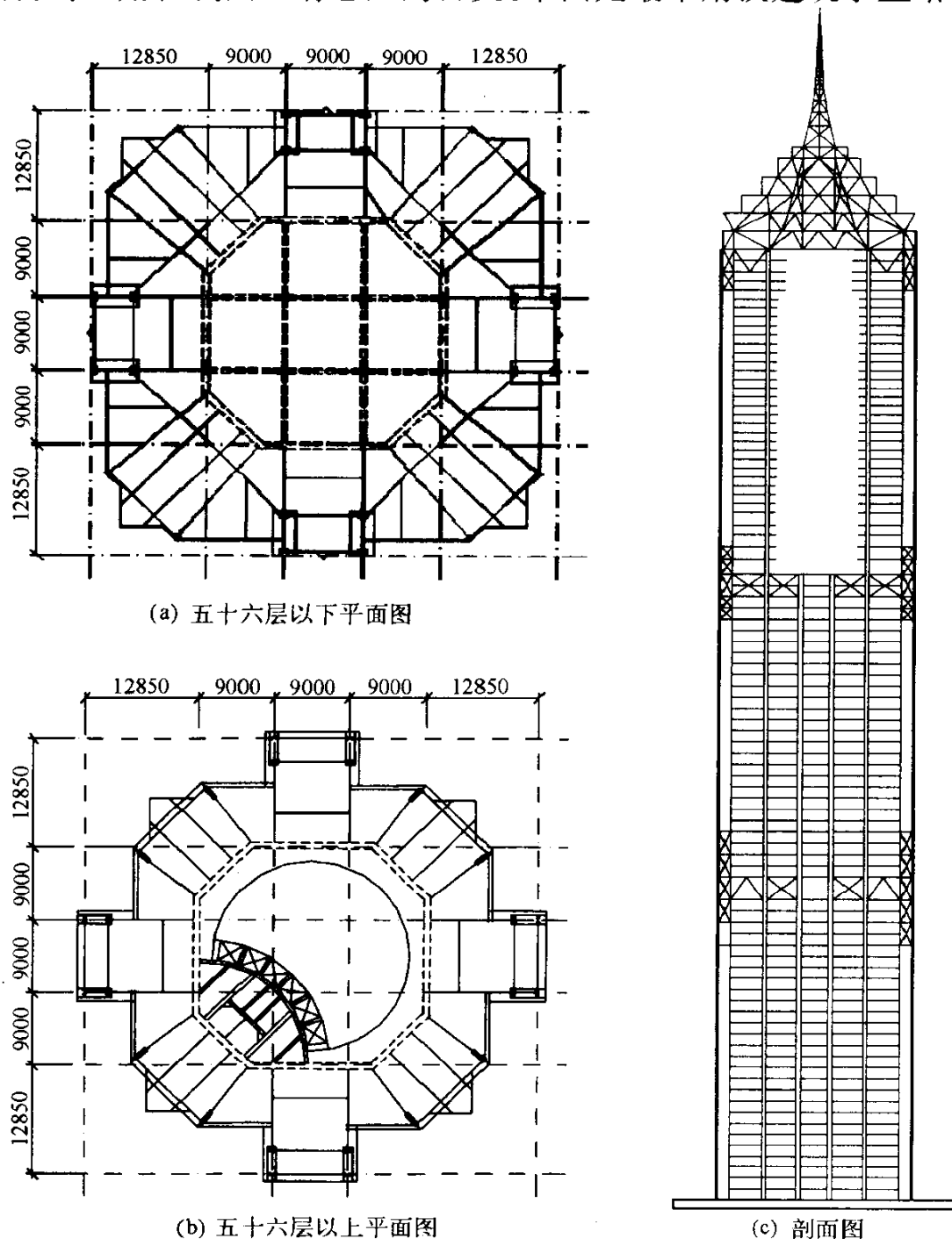


图 1.1 金茂大厦平面及剖面图

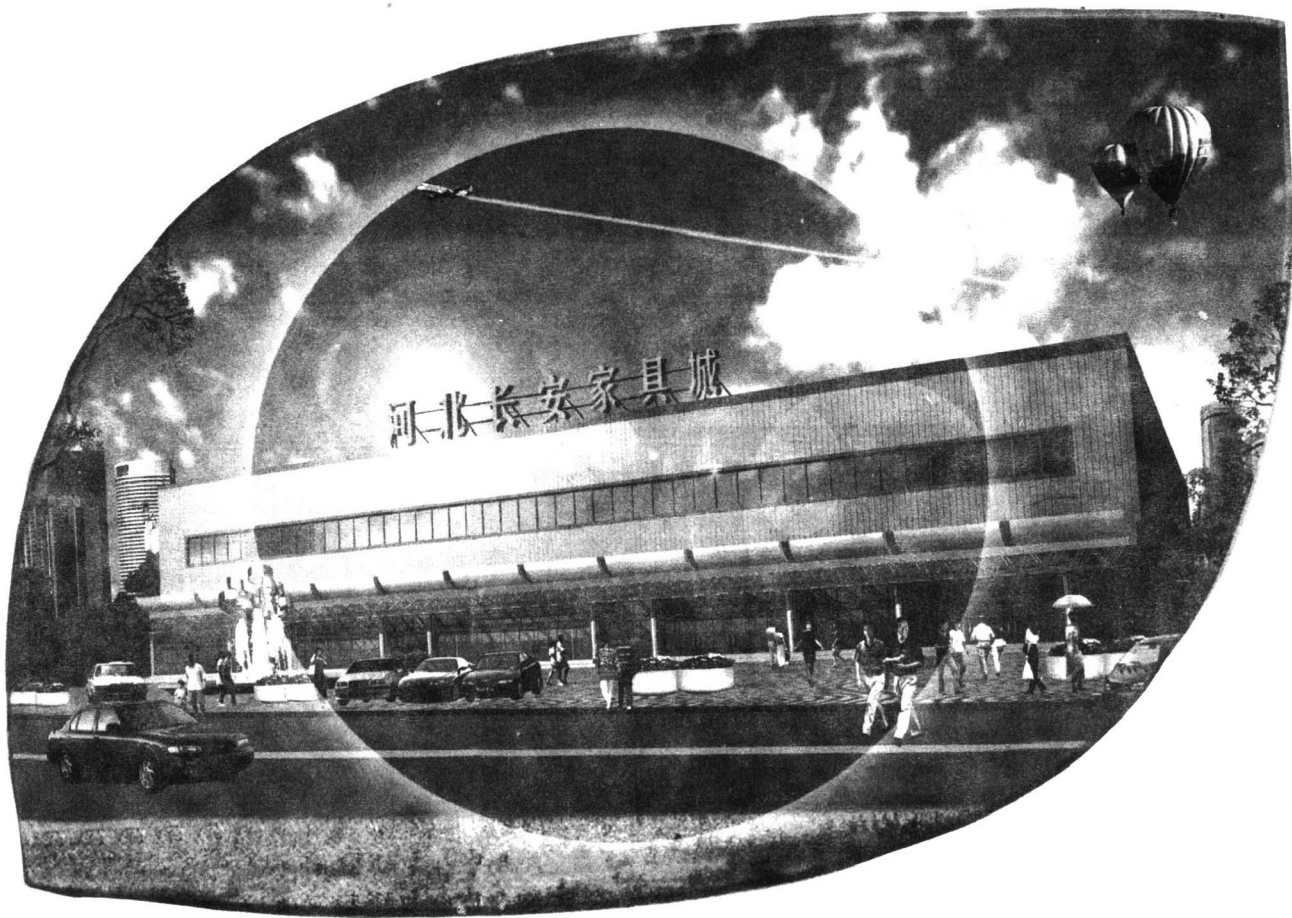


图 1.2 河北长安家具城

世界上建造最早的一座铁链桥是公元 58~75 年建造的兰津桥。在建造技术和建筑设计规模上最著名的是 1705 年建造的四川泸定大渡河桥。现存的建于梁代的湖北荆州玉泉寺 13 层铁塔、镇江的甘露寺铁塔、济宁的铁塔寺,都以其建筑造型和冶金技术的高超水平,表明了我国古代在金属结构方面的卓越的成就。

1949 年中华人民共和国成立后,钢结构在我国的应用有了较大的发展,1968 年南京长江大桥的建成标志着我国桥梁建设技术水平已跨入世界先进行列。在工业建筑中,鞍钢、武钢、宝钢等冶金联合企业的许多车间,都采用了规模巨大的钢结构厂房。

进入 20 世纪 90 年代,我国钢结构更是进入了一个蓬勃发展的新时期。在桥梁建设中,建造了一批特大跨桥梁,例如广东虎门大桥(单跨跨度 880m)、西陵长江大桥(单跨跨度 900m)、江阴长江大桥(跨度达 1385m)。在超高层建筑中也是钢结构应用最多的领域。北京的京广中心高达 208m,深圳的地王中心高达 342.95m(桅杆高 383.95m)。上海的金茂大厦高达 420.5m(见图 1.1),仅次于美国芝加哥的西尔斯大厦。天津新体育馆采用了圆形平面球面网壳,直径 108m。

钢结构在工程领域中应用越来越广泛,轻型钢结构厂房已逐步成为中小企业厂房的首选结构形式,钢结构的大空间商业用房近年来发展迅猛,如长安家具城(见图 1.2)和英国伦敦千禧穹顶(见图 1.3)。

我国的钢管混凝土结构的理论研究、应用技术水平已走到世界的前列,其代表工程是天津今晚报大厦(高 139m)和深圳赛格广场大厦(高 291.6m)。

随着我国经济建设的迅速发展,钢产量已跃居世界首位,钢材的品质不断提高,钢结构也将得到更广泛的应用。钢结构的应用研究技术水平也必将达到世界先进水平。

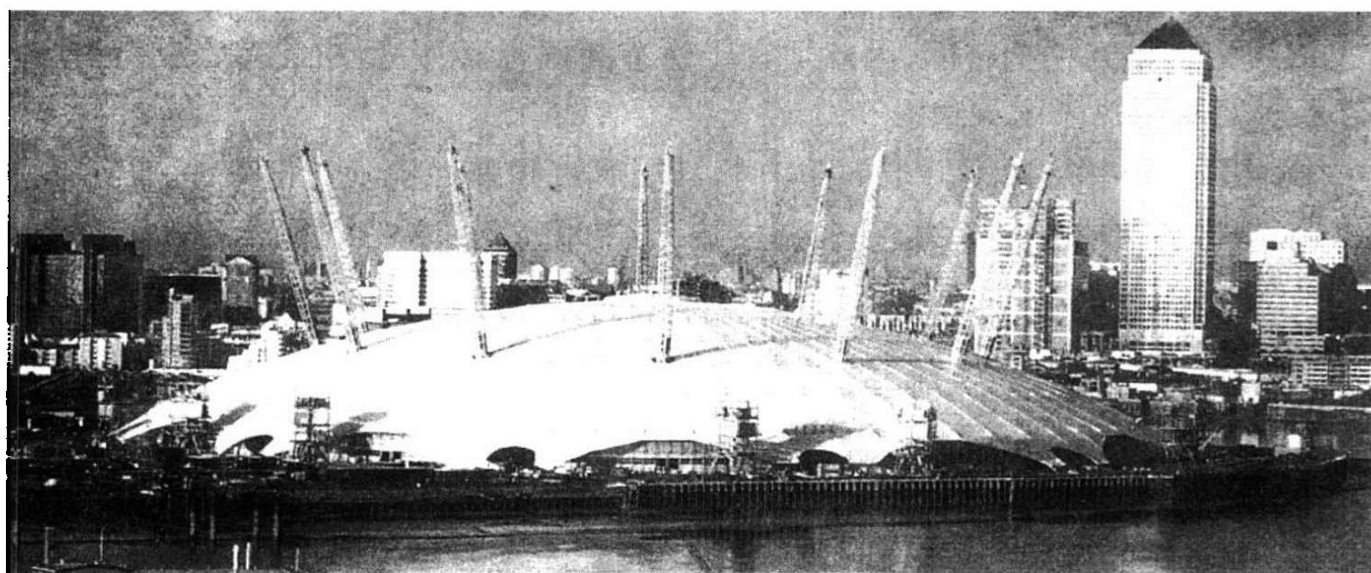


图 1.3 伦敦千禧穹顶

1.2 钢结构的特点和应用

1.2.1 钢结构的特点

钢结构是钢板、热轧型钢或冷弯薄壁型钢制造而成的。和其他材料结构相比,钢结构具有如下特点:

(1) 强度高,自重轻

钢材和钢筋混凝土、砌体等材料相比,容重大,但强度却高得多,当承受的荷载和条件相同时,钢结构要比其他结构轻得多,由于自重轻,因而便于运输和安装,可相应地减轻下部结构及基础的负荷,可降低地基、基础部分的造价。

(2) 钢材的塑性和韧性好

钢材具有良好的塑性,钢结构一般不会因偶然超载或局部超载而发生突发破坏。钢材的韧性好,使钢结构对动力作用的适应性较强,对冲击和振动的作用有较强的耐受能力。

(3) 材质均匀,各向同性

钢材的产品质量较稳定,组织均匀,非常接近于匀质和各向同性,因而力学性能稳定,有较大的弹性工作区域和较明显的塑性工作区域,实际受力状态和力学计算的结果比较符合,因而有可靠的计算精度。所以钢结构可靠性高。

(4) 钢结构制造简便,工业化程度高

钢结构构件可以在专业化的金属结构加工厂制造,然后运至工地安装。连接可以采用螺栓连接和焊接。构件制造精度高,安装方便,工效高,施工周期短,并且便于拆、卸、加固或改建,是工业化程度最高的一种结构。

(5) 钢材可以制造密封性好的结构

钢结构可做到完全密闭,因此适宜于建造高压容器、大型油气库等板壳结构。

(6) 钢材耐热不耐火

当周围的辐射热温度低于 100°C 时,其屈服点和弹性模量变化很小。但温度超过 250°C 时,其材质变化较大;结构温度达到 600°C 以上时,它可能全部崩溃。当受热温度达 150°C 以上时须采取隔热和防火措施。

(7) 钢材耐腐蚀性差

钢材在温度高、有侵蚀性介质的环境中易于锈蚀,使结构受到损害,影响使用寿命。钢结构必须定期维护、涂刷油漆等,因此维护费用较高。

1.2.2 钢结构的合理应用范围

由于钢结构的特点,它在建筑工程中的应用范围如下:

(1) 高层及超高层建筑

由于钢结构自重轻,具有较好的塑性、韧性,因而高层建筑宜选用钢结构,尤其超高层建筑几乎全是钢结构体系。

(2) 大跨度结构

钢结构自重轻,这在大跨结构中表现特别突出,因而大跨建筑如体育场、馆、影剧院、展示场馆、飞机库、大型散品仓库等都可采用大跨的钢结构。

(3) 厂房结构

厂房钢结构用于重型厂房,如钢铁企业的初轧车间、混铁炉车间,重型机器厂的铸钢车间、锻压车间,造船厂的船台车间,飞机制造厂的装配车间,这类结构的特点是有较大跨度的屋盖、车间有较大起重量的吊车、有较大的动力设备或振动设备。

(4) 塔桅结构

塔桅钢结构用于高度较高的微波塔、电视塔、高压电输电线路塔、塔吊、化工排气塔、石油钻井塔、火箭发射塔、环境气象塔等。这类结构的特点是高度大,主要承受风荷载,采用钢结构可以减轻自重,方便架设和安装,并因构件截面小而使风荷载大大减小。

(5) 板壳结构

板壳钢结构用于建造大型储液库、煤气库,其密闭性好。

(6) 轻型钢结构

跨度小、屋面轻的工业、民用或商业房屋、广告牌架,常采用轻型钢结构。这种结构是采用小角钢、圆钢或冷弯薄壁型钢作为构件。采用轻钢屋盖,用钢量比普通钢结构省 25%~50%,自重减少 20%~50%。

(7) 可拆装移动结构

可拆装移动的钢结构适用装配活动房屋或构筑物,如移动式混凝土搅拌站、桥式吊车、塔吊、流动式展览馆等。其特点是利用钢构件的标准化,可装配,拆装方便,自重轻等。

(8) 适于许多结构类型

钢结构可构筑的结构类型有:框架结构、排架结构、门式刚架结构、网架结构、悬索结构、桥架结构、塔架结构,以及钢与混凝土组合构件如钢管混凝土结构等。

1.3 钢结构的发展趋势

20 世纪末,我国钢结构的生产和应用有较大的增长和发展,1997 年钢产量跃居世界首位(1 亿吨),但与国际钢结构应用及理论研究水平比较,在许多领域有较大的差距。钢结构在我国的发展应用主要有以下几方面。

1.3.1 高强度钢材的研制和应用

应用高强度钢材,可以用较低的用钢量做成高效的结构,尤其对大跨度、高耸

结构、重型结构极为有利。我国目前普遍应用的钢材是碳素结构钢中的 Q235 和低合金钢中的 Q345 (16Mn、12MnV、14MnNb、16MnRE、18Nb) 钢, 屈服点分别为 235N/mm^2 和 345N/mm^2 ;《钢结构设计规范》(GB50017-2002 修订稿) 将 Q390 (15MnV、15MnTi、16MnNb) 和 Q420 (15MnVN、14MnVTiRE) 钢作为推荐钢材, 其屈服点仅有 390N/mm^2 , 而且仅在有数的几个工程中应用。而美国早在 1969 年, 前苏联在 1975 年就分别把屈服点为 700N/mm^2 和 750N/mm^2 的钢材列为规范应用钢材。在我国, 高强钢材的生产应用取得了一定的进展, 如高强螺栓 (20MnTiB) 得到了普遍应用。我国在高强钢材的生产、应用方面还有许多需要解决的课题。

1.3.2 新品种型钢

1. H 型钢

同等截面积的 H 型与普通热轧工字钢相比, 其回转半径要大, 故其稳定承载力有较大的提高, 因而可以有效降低用钢量指标。目前我国马鞍山钢铁公司可以生产高度达 600mm 的 H 型钢。

2. 冷弯薄壁型钢

冷弯薄壁型钢是用厚 1.5~5mm 薄钢板冷弯成口(方)型、[(C)型和 Z 型, 由于壁薄, 其开展性比热轧 H 型钢更好, 在轻型房屋中应用前景广泛。

3. 压型钢板

压型钢板多是彩涂压型钢板和镀锌压型钢板。彩涂压型钢板主要用于房屋的屋面板和墙板。镀锌压型钢板多用作钢承板, 即钢板混凝土组合楼板的底板, 它既是楼盖的模板, 同时又承受拉力, 施工效率大大提高。

武钢与宝钢的彩色涂层薄壁钢板的投产, 使我国彩涂板的应用得到了极大的发展。压型钢板的断面型式是由轧板机辊轧成型。近几年新断面不断出现, 例如大波峰的无骨架彩板拱屋顶、不漏锁缝屋面板等形式。新颖、高效、美观、合理的断面形式是未来研究的课题。

彩涂钢板的彩涂层的变色问题及钢板的锈蚀问题、配件的通用性问题, 都有必要进一步研究。

1.3.3 改进设计方法

现行规范采用了以概率理论为基础的极限状态设计法。如疲劳计算采用容许应力幅法, 而未采用极限状态法, 影响结构可靠度的变量统计有相当的近似性。对这些问题仍有待进一步研究发展。

1.3.4 新结构体系

1. 组合结构

钢构件与混凝土组合起来协同工作可以发挥各自的优点。钢管混凝土柱、钢承

板混凝土楼盖,在我国已有应用,在计算理论研究及应用上已走到世界前列,但还没推广应用,节点构造计算有待进一步研究。

2. 大跨度结构

网架结构在我国已得到广泛应用,新网架形式是研究发展内容。用钢量很低的悬索结构,在我国多是应用在特大跨桥梁中,工业民用建筑应用很少。

1.3.5 钢结构民品化

1. 多层钢结构民用建筑应用

钢结构在我国的应用多是超高层建筑、大跨建筑,再就是临时性建筑,而大量性的多层民用建筑应用较少。我国钢产量已跃至世界首位,为推广应用钢结构提供了一定的基础。钢结构特有的优点,使之在多层建筑中同样适用。钢结构建筑内外墙体的构造较复杂,需要进一步研究结构合理、施工方便、经济实用的构造及作法。

2. 钢结构构件系列化

将一些应用量较大的构件(网架、杆件、住宅梁柱、檩条)定型化、标准化,组织加工厂批量生产,使之安装施工方便、高效,降低造价,有利于推广使用。

3. 钢结构的防护技术

钢材的锈蚀及不耐火是钢结构应用的不利因素,因而研究高效、低成本的钢结构防护技术又是一重要科研课题。

小 结

1) 钢结构的特点是强度高,材质均,弹性、塑性、韧性好,施工速度快。

2) 钢结构适应于高耸、大跨度、重型、轻型结构,在将来也会推广应用至大量性民用建筑。

3) 钢结构的发展方向是节约钢材,降低工程造价,高效钢材的开发研究,新设计方法和理论计算研究,新结构体系的研究,采用钢结构大量性民用建筑的推广应用研究。

思 考 题

1.1 钢结构的特点有哪些?

1.2 钢结构的应用范围怎样?

1.3 钢结构适宜的结构形式有哪些?

第二章 钢结构的材料

本章主要介绍钢结构用材的力学性能、如何选用钢结构材料。

钢材的品种很多,性能各异。适用于机械设备的钢材应有较高的强度、较好的耐磨性和中等的韧性。机械加工用的刀具要求钢材有很高的强度和硬度。建筑结构用钢材须具有较高的强度,较好的塑性和韧性,同时应有良好的加工工艺性,还要求价格低、来源广。因此,能满足建筑结构用钢材的品种仅是上千种钢材中的几种碳素钢和低合金钢。

钢构件在破坏时,表现为塑性破坏和脆性破坏两种特征,脆性破坏是应严加防止的。研究和掌握钢材产生脆性破坏的原因、机理和影响因素,是非常重要的,有利于全面深入掌握钢材的力学性能及影响钢材性能的因素,从而在实际工程中合理且科学地进行结构设计和选用钢材。

2.1 钢材在单向均匀应力作用下的工作性能

钢材在外力作用下所表现出来的各种特征,如弹性、塑性、韧性、强度等称为力学性能指标。钢材的力学性能指标是结构设计的重要依据,这些指标主要是通过试验来测定的。单向拉伸试验是钢材力学性能最基本,也是最重要的试验方法。在室

温 20°C 的条件下,把低碳钢标准试件放在拉伸试验机上,进行一次缓慢拉伸试验,直到拉断破坏,可以绘出应力-应变曲线图,如图 2.1 所示。由图可知,低碳钢一次拉伸工作可分为四个阶段。

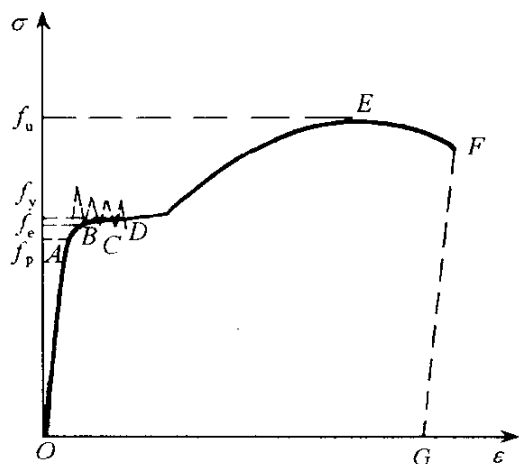


图 2.1 应力-应变曲线图

1. 弹性阶段

在应力-应变曲线中 OA 段是一直线,应力与应变成正比,完全符合胡克定律。 A 点对应的应力 f_p 为比例极限。应力超过 f_p ,即 AB 段,应力-应变不再成直线,在 OAB 任意一点卸载时,应力-应变状态将沿着原线路返 O 点,即不存在残余应变。在 OAB 段钢材工作处于弹性阶段。 B 点对应的应力 f_e 称为弹性极限。

2. 屈服阶段

当继续加载使应力超过 f_e 时,应力稍有增加,应变就增加很快,曲线呈锯齿形

波动,甚至应力不增加而应变继续增加,这就是钢材的工作达到了屈服阶段。波动部分的下限,为屈服极限 f_y 。BCD 段为屈服阶段。试件除弹性变形外,还出现了塑性变形。此阶段如完全卸载弹性变形消失,而塑性变形保留下来,即出现了残余应变,也称永久应变。整个屈服阶段对应的应变称为流幅,流幅越大说明钢材的塑性越好,流幅的大小因钢材品种而异。屈服极限 f_y 和流幅是钢材两个很重要的力学性能特征值。

3. 强化阶段

屈服阶段过后,钢材又恢复了抵抗外荷载的能力。要使应变增加,必须使应力增大。但是应力-应变曲线却变得很平缓,其斜率远小于弹性阶段,且塑性特征非常明显,曲线略有上升即达到顶点 E ,这个阶段称为强化阶段。顶点 E 所对应的应力 f_u 称为抗拉强度极限。

4. 颈缩阶段

当应力到达抗拉强度时,试件在材质较差处截面出现显著的局部横向收缩,截面面积迅速缩小,塑性变形大大增加,这种现象称作颈缩现象。以后试件的拉力不断下降,变形却继续发展,直到 F 点试件断裂。 EF 段称为钢材工作的颈缩阶段。出现颈缩后应力值仍按试件原横截面积计算,故得到的 EF 曲线为下降曲线段。如果改按颈缩处的截面面积计算,则断裂前应力仍为不断上升的。颈缩现象是反映钢材塑性性能的主要特征。是塑性破坏的又一重要标志。粗短钢试件在单向受压时的力学性能,基本上跟上述单向受拉时相同。

为了结构分析计算上的方便,对上述力学性能分析简化:

1) 由于比例极限、弹性极限和屈服强度三者很接近,而在屈服强度之前的应变又很小(Q235 在 0.15% 以内),故通常可把这三个特性点归并成一个屈服点,作为钢材弹性工作阶段和塑性工作阶段的分界点。在整个弹性工作阶段,应力和应变成正比,即钢材可视作理想弹性体。

2) 钢材的流幅很大(Q235 钢的流幅约 2.5%),已足够用来考虑结构或构件的塑性变形发展,即当应力到达屈服强度后,钢材可视作理想塑性体。这样一来,钢材的力学性能就可以简化为图 2.2 所示的理想弹-塑性体的应力-应变曲线。

钢材有两种性质完全不同的破坏形式,一种叫塑性破坏,另一种叫脆性破坏。塑性破坏是由于变形过大,应力达到了极限强度后发生的。普通碳素钢 Q235,塑性变形约是弹性变形的 200 余倍,说明结构构件在破坏前将出现很大变形,很容易及时发现和采取适当的补救措施。结构体系中某部分塑性变形会使结构出现内力重分布,使结构或构件中某些原受力不等

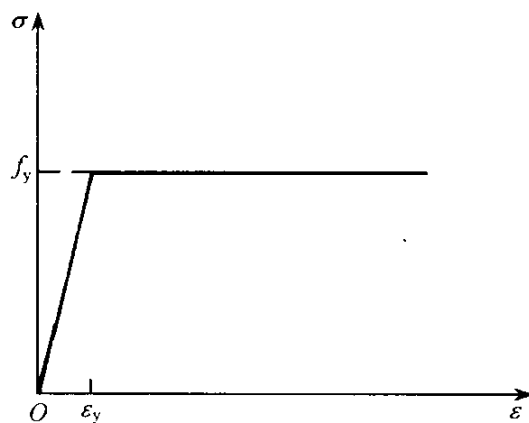


图 2.2 理想弹塑性体的
应力-应变曲线

部分的应力趋于均匀发展,提高结构的承载力。

脆性破坏则相反,破坏前构件变形很小,计算应力可能小于钢材的屈服点 f_y ,断裂从应力集中处开始。构件破坏前没有预兆,突然发生破坏,无法及时出现和采取补救措施,危及生命财产的安全,后果严重,损失重大。在设计施工应用中,应避免构件出现脆性破坏。

在单向拉伸试件的一周刻上槽,进行拉伸试验,试件表现为脆性破坏,断口平直并呈有光泽的晶粒状。在冶金和机械加工过程中产生的缺陷,特别是缺口和裂纹,常是断裂的发源地。

2.2 钢材在复杂应力作用下的工作性能

如前所述,在单向应力作用下,当应力达到屈服点 f_y 时,钢材屈服而进入塑性状态。但当钢材处于复杂应力作用下,钢材是否进入塑性状态,当然不能按其中某一项应力是否达到屈服强度 f_y 来判定。由于钢材是比较理想的弹-塑性体,应该根据能量强度理论来确定这个屈服条件,这已被实验所证实,按能量强度理论,判定准则是用折算应力 σ_{red} 和单向拉伸时的屈服强度 f_y 相比较。

$$\sigma_{red} < f_y, \text{ 钢材处在弹性状态} \quad (2.1)$$

$$\sigma_{red} \geq f_y, \text{ 钢材处在塑性状态} \quad (2.2)$$

在三向应力的一般情况下,折算应力 σ_{red} 通过主应力, σ_1 、 σ_2 和 σ_3 用式(2.3)表示:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.3)$$

或者通过应力分量用式(2.4)表示:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \quad (2.4)$$

由式(2.3)可见:当 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为同号且数值相接近时,即使它们都远大于 f_y ,但折算应力 σ_{red} 仍小于 f_y ,说明钢材还没进入塑性状态。当三向均为拉应力时,直到破坏也没有产生明显的塑性变形,即钢材处于脆性状态,破坏属于脆性断裂。当三向均为压应力且数值相近时,材料既不进入塑性状态,也不断裂,而是几乎不可能破坏。

从式(2.3)和式(2.4)还可看到:当三个主应力中有一个异号,且其他两个同号应力相差较大时,钢材比较容易进入塑性状态,破坏将呈塑性破坏的特征。

在许多情况下中,三向应力往往有一向应力很小或等于零,即可按平面应力状态考虑。此时式(2.3)和式(2.4)可分别写为

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (2.5)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x\sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \quad (2.6)$$

当 $\sigma_y=0$ 时,式(2.7)变为