



全国高等教育自学考试指定教材 建筑工程专业(独立本科段)

钢 结 构

附：钢结构自学考试大纲

课程代码
2442
[2005年版]

组编/全国高等教育自学考试指导委员会
主编/钟善桐

武汉大学出版社

组 编 前 言

当您开始阅读本书时,人类已经迈入了 21 世纪。

这是一个变幻难测的世纪,这是一个催人奋进的时代。科学技术飞速发展,知识更替日新月异。希望、困惑、机遇、挑战,随时随地都有可能出现在每一个社会成员的生活之中。抓住机遇,寻求发展,迎接挑战,适应变化的制胜法宝就是学习——依靠自己学习、终生学习。

作为我国高等教育组成部分的自学考试,其职责就是在高等教育这个水平上倡导自学、鼓励自学、帮助自学、推动自学,为每一个自学者铺就成才之路。组织编写供读者学习的教材就是履行这个职责的重要环节。毫无疑问,这种教材应当适合自学,应当有利于学习者掌握、了解新知识、新信息,有利于学习者增强创新意识、培养实践能力、形成自学能力,也有利于学习者学以致用、解决实际工作中所遇到的问题。具有如此特点的书,我们虽然沿用了“教材”这个概念,但它与那种仅供教师讲、学生听,教师不讲、学生不懂,以“教”为中心的教科书相比,已经在内容安排、形式体例、行文风格等方面都大不相同了。希望读者对此有所了解,以便从一开始就树立起依靠自己学习的坚定信念,不断探索适合自己的学习方法,充分利用已有的知识基础和实际工作经验,最大限度地发挥自己的潜能,以达到学习的目标。

欢迎读者提出意见和建议。

祝每一位读者自学成功。

全国高等教育自学考试指导委员会

1999 年 10 月

编者的话

钢结构课程是全国高等教育自学考试土木建筑类建筑工程专业(独立本科段)的专业课,是为培养和检测自学应考者在建筑钢结构方面的基本理论知识和应用设计能力而设置的一门课程。

本书是按照钢结构设计规范 GBJ—17—88 编写的,但钢材牌号则根据碳素结构钢 GB700—88 和低合金高强度结构钢 GB/T 1591—94 等国家标准作了改动。

全书共分七章。第一、二、四章由哈尔滨工业大学钟善桐教授执笔,第三章由哈尔滨工业大学张连一副教授执笔,第五、六章由华南理工大学王仕统教授执笔,第七章由沈阳建筑工程学院周广师副教授执笔。钟善桐主编。清华大学王国周教授主审,浙江大学夏志斌教授和东南大学张寿庠教授参审,谨此表示感谢。

为了配合 2003 年 12 月 1 日颁布实施的《钢结构设计规范》GB 50017—2003,本书由钟善桐教授和张连一副教授对 1999 年版本的有关章节进行了修改,并经哈尔滨工业大学张耀春教授主审,清华大学石永久教授和苏州科技学院顾强教授参审,谨此表示感谢。

由于水平所限,有不当之处,望读者指正。

作者谨识

2004.8

目 录

第一章 概 述	1
第一节 钢结构在我国的发展概况	1
第二节 钢结构的特点和合理应用范围	5
第三节 钢结构的设计方法	10
第四节 钢结构的发展	14
习题一	19
第二章 结构钢材及其性能	20
第一节 结构钢材一次拉伸时的力学性能	20
第二节 结构钢材的力学性能指标	22
第三节 结构钢材的脆性破坏	32
第四节 钢材种类和规格	35
习题二	39
第三章 钢结构的连接	41
第一节 钢结构连接的种类和特点	41
第二节 对接焊缝及其连接	47
第三节 角焊缝及其连接	55
第四节 焊接应力和焊接变形	78
第五节 普通螺栓连接	83
第六节 高强度螺栓连接	98
第七节 连接的疲劳计算	106
习题三	108
第四章 轴心受力构件	113
第一节 轴心受力构件的特点和截面形式	113
第二节 轴心受拉构件	114
第三节 实腹式轴心受压构件	116
第四节 格构式轴心受压构件	139
第五节 柱头和柱脚	153
习题四	166

第五章 受弯构件	169
第一节 梁的种类和梁格布置	169
第二节 梁的强度与刚度的计算	170
第三节 梁的整体稳定	177
第四节 梁的局部稳定和加劲肋设计	186
第五节 梁腹板的屈曲后强度	200
第六节 型钢梁设计	205
第七节 焊接梁设计	208
第八节 梁的拼接、支座和主、次梁的连接	218
习题五	221
第六章 拉弯和压弯构件	225
第一节 拉弯、压弯构件的截面形式和特点	225
第二节 拉弯、压弯构件的强度和刚度计算	226
第三节 实腹式压弯构件的整体稳定	229
第四节 压弯构件的局部稳定	238
第五节 格构式压弯构件的计算	241
第六节 压弯构件的柱脚设计	244
习题六	249
第七章 屋盖结构	251
第一节 屋盖结构组成的种类、特点和用途	251
第二节 屋盖结构的支撑体系	252
第三节 檩条	259
第四节 普通钢屋架设计	266
习题七	306
附录 I	308
附一 强度设计指标	308
表 1.1 钢材的强度设计值(N/mm^2)	308
表 1.2 钢铸件的强度设计值(N/mm^2)	309
表 1.3 焊缝的强度设计值(N/mm^2)	309
表 1.4 螺栓连接的强度设计值(N/mm^2)	310
表 1.5 铆钉连接的强度设计值(N/mm^2)	310
表 1.6 焊条规格 GB/T 5117—1995	311
表 1.7 疲劳计算时构件和连接分类	312
附二 稳定系数	315
表 2.1 a 类截面轴心受压构件的稳定系数 φ	315

表 2.2	b 类截面轴心受压构件的稳定系数 φ	316
表 2.3	c 类截面轴心受压构件的稳定系数 φ	317
表 2.4	d 类截面轴心受压构件的稳定系数 φ	318
表 2.5	H 形钢和等截面工字形简支梁的系数 β_b 值	319
表 2.6	双轴对称工字形等截面(含 H 形钢)悬臂梁的系数 β_b 值	319
表 2.7	轧制普通工字形钢简支梁的 φ_b 值	320
表 2.8	均匀弯曲的受弯构件,当 $\lambda_y \leq 120 \sqrt{235/f_y}$ 时,整体稳定系数 φ_b 的近似计算公式	320

附三 型钢和螺栓规格..... 321

表 3.1	普通工字形钢	321
表 3.2	普通槽钢	323
表 3.3	热轧等边角钢截面特性表(YB166—65)	325
表 3.4	热轧不等边角钢截面特性表(YB167—65)	329
表 3.5	双角钢 T 形截面特性	333
表 3.6	热轧 H 形钢和剖分 T 形钢(GB/T11263—1998)	337
表 3.7	普通螺栓的有效面积	341
表 3.8	角钢上螺栓或铆钉线距表(mm)	342
表 3.9	工字形钢和槽钢腹板上的螺栓规距(也适用于铆钉)	342
表 3.10	工字形钢和槽钢翼缘上的螺栓规距(也适用于铆钉)	342

附四 截面回转半径的近似值..... 343

附录 II 钢结构自学考试大纲..... 345

第一章 概述

第一节 钢结构在我国的发展概况

当我们开始学习钢结构课程时,应该对这种结构在我国的发展历史,当前在社会主义建设进程中所起的作用和地位,以及今后的发展方向有一个概要的了解。

在钢结构的应用和发展方面,我们的祖先曾经拥有光辉的历史。我国东面临海,惟有西面经陆路可与外界相通。据历史记载,在公元1世纪50~60年代,为了与西方国家通商和进行文化及宗教上的交流,在我国西南地区通往南亚诸国的通道上,跨越激流深谷,成功地建造了一些铁索桥。例如,我国云南省景东地区澜沧江上的兰津桥,建于公元58~75年,是世界上最早的一座铁索桥,它比欧洲最早出现的铁索桥要早70年。随后陆续建造的有云南省的沅江桥(建于400多年前)、贵州省的盘江桥(建于300多年前)以及四川的大渡河桥等,无论在工程规模上还是建造技术上,当时都处于世界领先水平。

我国著名的四川省泸定县大渡河铁链桥建于1696年,比英国1779年用铸铁建造的第一座31m跨度的拱桥早83年,比美洲1801年建造的70英尺(21.34m)跨度的第一座铁索桥早105年。大渡河桥由九根桥面铁链、四根桥栏铁链构成,净长100m,桥宽2.8m,可同时通行两辆马车。桥下是奔腾的激流,两岸是陡峭的山崖,铁链锚定在直径为20cm、长4m的锚桩上。每根铁链重达1.5t。很难想象,在当时没有现代化起重设备的技术条件下,该桥是如何架成的。

此外,我国古代在各地还建造了不少铁塔。如湖北省当阳的玉泉寺铁塔,计13层,高17.5m,建于1061年;江苏省镇江的甘露寺铁塔,原为9层,现存4层,建于1078年;山东省济宁的铁塔寺铁塔,建于1105年等。有的一直保存到现在。

人类采用钢铁材料建造各类结构工程的历史,显然和冶金技术的发展有着密切的关系。我国古代采用钢铁结构的光辉史绩,充分说明了我国古代在冶金技术方面是领先的。但是,到了18世纪欧洲兴起工业革命以后,由于钢铁冶炼技术的迅速发展,钢结构在欧美一些国家的应用较广泛,不断地出现采用钢结构的工业与民用建筑物。不但在数量上日渐增多,而且应用范围也不断扩大。可是,在那一时期,我国则长期处于封建落后状态,特别是1840年鸦片战争以后,沦为半封建半殖民地,备受帝国主义、封建主义和官僚资本主义的压迫和剥削,生产十分落后。那一时期,在全国只建造了少量的民用与工业建筑(如上海18层的国际饭店)和一些公路和铁路钢桥,远远落后于一些工业国。

值得一提的是:1937年建成的杭州钱塘江大桥,这是我国自行设计和建造的第一座公路铁路两用钢桥,安全使用到现在。

新中国成立后,生产力获得解放,各项建设事业都有了飞速的发展,包括冶金工业的发展

和钢铁产量的增长,为我国钢结构的发展创造了条件

第一个五年计划期间,我国建设了各类工业企业,包括冶金,重型机械制造,航空,汽车制造,动力设备制造,造船和一些轻、化工业等。在这一伟大的社会主义建设事业中,钢结构的采用起了很大的作用。在短短的几年时间内,建造了大批钢结构厂房和矿场,其中主要的有:新建的太原和富拉尔基重型机器制造厂,哈尔滨三大动力厂,长春第一汽车制造厂,洛阳拖拉机厂,沈阳和哈尔滨的一些飞机制造厂等;扩建和恢复的有鞍山钢铁公司,武汉钢铁公司和大连造船厂等。此外,还新建了汉阳铁路桥和武汉长江大桥等。这一时期,可称为我国钢结构的发展时期。

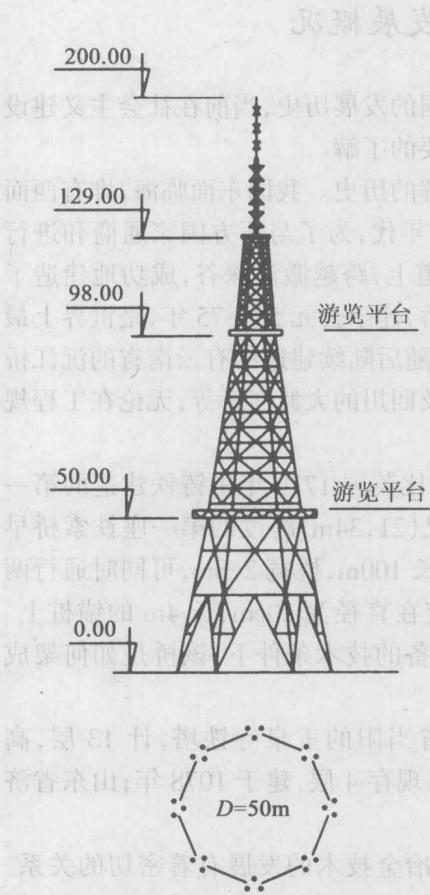


图 1.1 广州电视塔

上面已经提到过,钢结构的应用和钢产量有关。新中国成立后,我国的冶金工业虽有了较大发展,但钢产量并不高,钢结构的建造主要靠进口钢材。因而,到了20世纪60年代,受到客观条件的限制,不得不控制钢结构的采用,而以钢筋混凝土结构为主。国家作出明确规定,为了节约钢材,严格限制建筑中采用钢结构,只在必须采用钢结构的重要或重型工程中才能采用。例如,1959年在北京建成的人民大会堂,采用了跨度达60.9m、高达7m的钢屋架和分别挑出15.5m和16.4m的看台箱形钢梁。1961年建成的北京工人体育馆,屋盖采用了直径为94m的车辐式悬索结构,能容纳观众15000人。1965年在广州建成的第一座高200m的电视塔,截面为八角形,八根立柱各由三根圆钢组成,缀条也采用了圆钢组合截面,用了国产16Mn钢(现Q345钢),全部为焊接结构。由于采用了圆钢组合杆件,减小了风荷载,用钢量不到600t,在世界上同类结构中是用钢量较少的(见图1.1)。1967年建成的首都体育馆,屋盖采用了平板网架结构,跨度达99m,可容纳观众15000人。

随后,在“文化大革命”时期,我国的基本建设几乎陷于完全停滞状态。这期间,只建成少数几个钢结构工程。如1968年建成的南京长江大桥,采用了三跨连续桁架,并适当降低中间支座,调整桁架内力,取得了节约钢材10%的经济效果。1973年建成的上海万人体育馆,屋盖采用了直径达110m的圆形平板网架。1978年建成的武汉钢铁公司一米七轧钢厂,采用的钢结构用钢量达5万t。在这十年中,我国无论是钢结构的理论研究,还是工程应用,基本上处于停滞状态,进展缓慢。

1978年党的十一届三中全会以后,国家的工作重点转移到经济建设上来,从此,我国的社会主义建设进入了改革开放的新时代,各行各业都出现了蓬勃发展的新形势。特别是钢产量逐年迅速增长,从1985年的4666万t,1987年的5602万t,到1997年达到1亿t,并连续7年超1亿t。到2003年,全国的钢产量已超过2亿t,成为世界第一产钢大国,由此大大地促进

了钢结构的应用和发展。由于钢结构本身具有的优点,如科技含量高,建造速度快,符合环保要求,以及可再生利用等,因而应用日渐广泛。我国有关部门对采用钢结构的政策,也由严格控制,限制采用,转变为综合考虑,合理采用,进而又改变为鼓励采用。2000年5月,建设部和国家冶金工业局建筑用钢协调组召开了全国建筑钢结构技术发展研讨会,成立了全国钢结构专家组,讨论了国家建筑钢结构产业“十五”计划和2010年建筑钢结构用材分别达到钢材产量的3%和6%的目标,争取达到世界发达国家目前的水平。专家们还提出把建筑钢结构归纳为:高层重型钢结构,空间大跨度钢结构,轻型钢结构,钢—混凝土组合结构和住宅钢结构等五大类。“十五”期间则以住宅钢结构为发展重点。

在生产发展需要和国家技术政策的指导下,钢结构在我国的应用步入了新时期。从20世纪80年代起,建成的主要大型钢结构工程有:上海宝山钢铁公司一期、二期工程,北京香格里拉饭店,高82.75m(1986年)。深圳发展中心大厦,高154m(1987年)。北京京广中心,高208m(1990年)。北京京城大厦,高182m(1991年)。上海世界金融大厦,高189m(1996年)。上海浦东金茂大厦,高420m(1998年)。深圳赛格广场大厦,高291.6m(1999年)。金茂大厦是当前世界第三高的高层建筑,2004年初在台北市建成的101层台北金融大楼,高508m,已成为当前世界第一高楼。据不完全统计,自20世纪80年代迄今,全国各地兴建的百米以上的高层建筑已有数十座,其中大都采用钢结构。图1.2为上海金茂大厦外貌。

应该指出的是,由于科学技术的进步,在钢结构的理论研究和设计方面也有较快的发展。高层建筑钢结构的耗钢量已由20世纪50年代的 $160\sim 180\text{kg}/\text{m}^2$,降到当前的 $110\sim 120\text{kg}/\text{m}^2$,已经接近高层钢筋混凝土结构的耗钢量,而且还在不断改进中。

此外,各地的体育馆建筑,采用了各种新型大跨空间结构体系。如北京石景山体育馆,建筑面积 $8\,429\text{m}^2$,可容纳3000名观众;北京朝阳体育馆,屋盖由两片预应力索网组成,索网悬挂在中央的索拱结构及外侧边缘构件之间(见图1.3(a)),以及四川攀枝花体育馆(见图1.3(b))等不下40座。



图1.2 上海金茂大厦

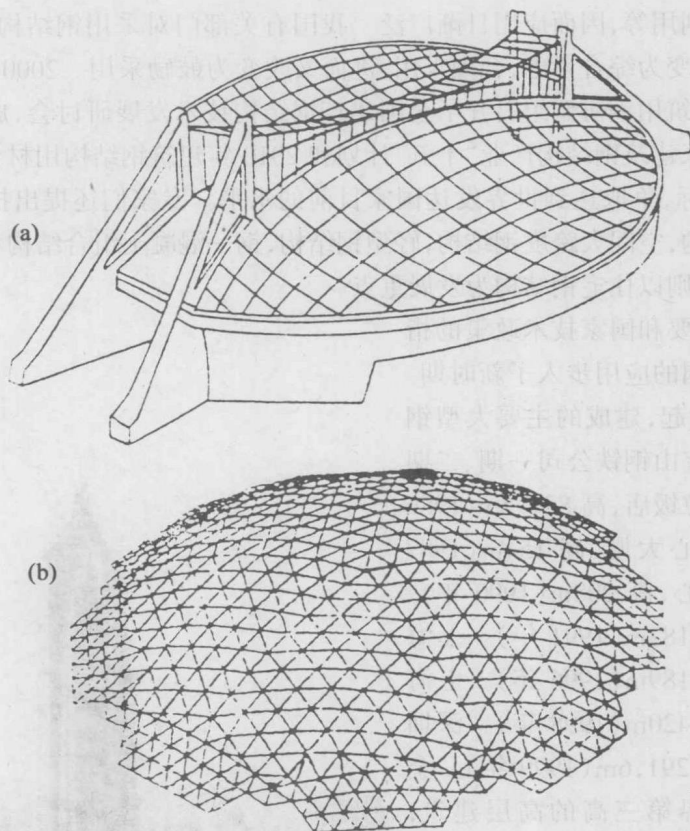


图 1.3 朝阳体育馆和攀枝花体育馆屋盖结构

攀枝花体育馆是外形呈八角花瓣形的钢网壳结构,跨度 60m,支承在标高为 16.35m 的八根钢筋混凝土柱上,还将屋盖向柱外悬挑 2.4~7.4m,并采用了预应力技术。建筑面积 4 130m²,能容纳 3 800 多名观众。

为了迎接 2008 年将在我国举行的奥运会,北京还将兴建大批体育场馆,这些体育场馆都将采用大跨空间钢结构。

图 1.4 是 2000 年建成的哈尔滨电视塔,连天线总高 336m,是目前我国最高的钢电视塔,也是迄今世界第二高的钢电视塔。

此外,轻型钢结构的发展也很快,据不完全统计,进入 20 世纪 90 年代后期,每年建成的工程多达 300 万 m²。

综上所述,钢结构虽然造价较高,但由于本身的特点,如轻质高强,抗震性能好,建造速度快,工期短,综合经济效益好等而获得广泛应用。可以预期,随着我国经济建设的不断发展,钢结构的应用将日益广泛,并将进入新的更高的发展阶段。正如建设部原总工程师姚兵同志在世纪之交时曾经指出的:“21 世纪的建筑结构是金属结构的世纪。”这是对钢结构在我国发展的科学预见和肯定,要求从事建筑工程工作的广大技术人员重视钢结构的学习,打好专业基础。



图 1.4 哈尔滨电视塔

第二节 钢结构的特点和合理应用范围

钢结构是用钢板和各种型钢,如角钢、工字钢、槽钢、钢管和薄壁型钢等制成的结构,在钢结构制造厂中加工制造,运到现场进行安装。

一、钢结构的特点

和其他结构相比,钢结构具有下列特点。

(1) 钢结构自重轻而承载力高 钢材的容重虽比其他建筑材料大,但强度却高得多,属于轻质高强材料。在相同的荷载条件下,采用钢结构时,结构自重常较小。例如,当跨度和荷载相同时,钢屋架的重量只有钢筋混凝土屋架重量的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$;若采用薄壁型钢屋架,则将更轻,便于运输和吊装。因此,钢结构能承受更大的荷载,跨越更大的跨度。

据北京市的统计,百米左右的高层建筑,和钢筋混凝土结构相比,钢结构的自重可减 $\frac{1}{3}$,

每根柱子的轴心压力可减小 6 000~7 000kN,因而地震作用反应可减小 30%~40%,同时对地基压力可减少 25%以上。显然,在地震区,特别是软弱地基的地区,采用钢结构可以取得很大的经济效益。

此外,钢柱的承载力高,柱子截面比钢筋混凝土柱小。据统计,在高层建筑中采用钢柱,比采用钢筋混凝土柱可增加有效使用面积 3%~6%。

(2)钢材最接近于**匀质等向体** 把钢材分割成细微小块,每小块都将具有大致相同的力学性能,而且在各方向的性能也大致一样。这种匀质等向性是固体力学的基础。

在使用应力阶段,钢材属于理想弹性体,弹性模量高达 $206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$,因而变形很小,可应用应力叠加原理,简化计算。这些性能和力学计算中采用的假定符合程度很好,所以钢结构的实际受力情况和力学计算结果最相符合。

(3)钢材的**塑性和韧性好** 由建筑钢材标准拉伸试件的应力应变图(参看图 2.1 和图 2.2)可见,在静力荷载作用下,钢材具有很好的塑性变形能力。达屈服点应力时,可有 2%~3%的应变,达拉伸极限而破坏时,应变可达 20%~30%。所以,在一般情况下,钢结构不会因偶然超载或局部超载而突然断裂破坏。在冲击荷载作用下,带有缺口的试件能吸收相当大的冲击功,保证钢材有一定的抗冲击脆断的能力,说明钢材的韧性也很好(参看第二章第二节和图 2.7)。

(4)钢材具有**良好的焊接性能** 由于焊接技术的发展,焊接结构的采用,使钢结构的连接大为简化,还可满足制造各种复杂形状结构的需要,这是促进近代钢结构发展的重要因素之一。

所谓“焊接性能”好,是指钢材在焊接过程中和焊接后,都能保持焊接部分不开裂的完整性的性质。钢材的这种性质为采用焊接结构创造了条件。

(5)钢结构具有**不渗漏的特性** 不论采用焊接、铆接或螺栓连接,钢结构都可做到密闭而不渗漏。因而钢材是制造各种容器,特别是高压容器的良好材料。

(6)钢结构**制造工厂化、施工装配化** 钢结构是由各种型材组成的一些构件组成的,构件在专业化的金属结构制造厂中制造,加工简便,成品的精确度高。制成的构件运到现场吊装,采用螺栓或焊接连接,构件又较轻,故施工方便,现场占地小,施工周期也短,还便于拆除、加固和改扩建。

(7)钢材**耐腐蚀性差**,应采取防护措施 钢材在湿度大、有侵蚀介质的环境中,易锈蚀,截面不断削弱,使结构受损,影响使用寿命,因而钢结构需要定期维护。为了减少维护费用,应采用高效能防护漆,其防锈效果和喷(镀)锌差不多,可维持 20 年以上,可节约维护费用。如 JM 高渗透性带锈防锈漆,只要除去表面浮锈和油污,可带锈涂刷,方便而高效。近年来,在一些钢桥中开始采用喷涂玻璃钢,如四川武隆县峡门口的乌江大桥(采用了钢管混凝土集束拱),可维持 40 年以上。然而,这些防锈蚀方法由于造价高,尚未能广泛应用。

1983 年我国已研制成功焊接结构耐候钢和高耐候结构钢,防腐能力比低碳钢提高了 2~4 倍,而强度却相同,但产量不多,价格也较高。

(8)钢结构**耐热性能好,但防火性能差** 实验证明,钢材从常温到 150℃ 时,性能变化不大,超过 150℃ 后,强度和塑性变化都很大;到达 600℃ 时,强度降至零,完全失去承载力。因此,钢结构耐热,却不耐火。规范规定:当结构的表面长期受辐射热达 150℃ 以上,或在短时间内可能受到火焰作用时,应采用有效的防护措施,如加隔热层或水套等。

如一旦发生火灾,无防护的钢结构的耐火时间只有 15~30min,时间一长就会发生崩溃坠毁。为了提高钢结构的耐火等级,一般常用混凝土或砖把结构包裹起来。这样既增加了结构所占空间,又增大了结构自重。1985 年公安部四川消防科学研究所制成了 TN+LG 钢结构防火隔热涂料,按 GN15—82 标准试验,当防火涂层厚 15mm 时,钢构件的耐火极限达 1.5h。对一级耐火要求的高层建筑中的钢柱,则需涂层厚度为 50mm。近年来,四川消防科学研究所又研制成功了一种薄型防火涂料,但耐火时间最多 1.5h。

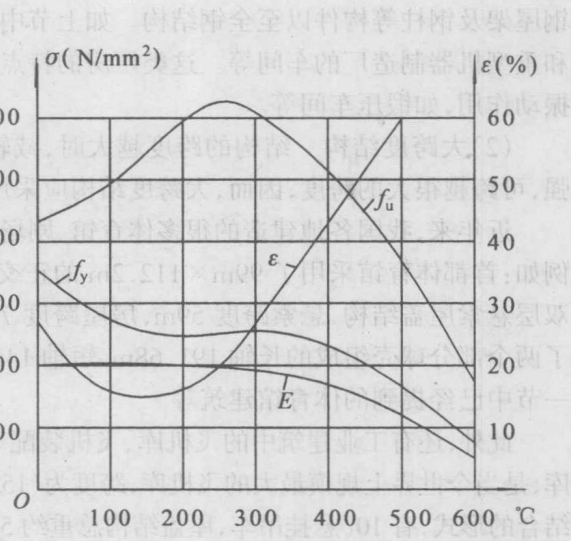


图 1.5 和表 1.1 所示为温度对钢材性能的影响。

图 1.5 温度对钢材性能的影响

表 1.1 温度对钢材性能的影响

温 度 °C		20	100	200	300	400	500	600
屈服点 %		100	95	82	65	40	10	0
弹性模量	Q235	206	195	185	176	160	—	—
$E \times 10^3 \text{ N/mm}^2$	Q345	206	200	200	190	185	—	—
线膨胀系数	Q235	1.18	1.22	1.28	1.34	1.38	—	—
$\times 10^{-5}$	Q345	1.12	1.20	1.26	1.33	1.37	—	—

上海宝山钢铁公司和武汉钢铁公司都已生产出一种高性能耐火耐候建筑用钢,如武钢的 WGJ510C2 钢,力学性能相应于 Q345 钢。它的抗锈性是普通钢材的 2~8 倍,600°C 时的屈服强度仍保持 $2f_y/3$ 以上,而价格只比普通钢高约 15%,目前已在建筑中采用(如上海中福城高层住宅建筑)。

低温时,钢材的强度提高,而塑性减小,呈脆性,因而钢材具有低温脆性、高温软化的性能。使用时应加以注意。

二、钢结构的合理应用范围

根据上述钢结构具有的特点,钢结构的合理应用范围如下。

(1) 重型工业厂房 跨度和柱距都比较大,或设有繁重工作制吊车或大吨位吊车①,或具有 2~3 层吊车的厂房,以及某些高温车间,例如炼钢、轧钢和均热炉车间等,宜采用钢吊车梁、

① 《起重机设计规范》GB/T 3811 规定吊车工作级别为 A1~A8 级。A1~A3 级对应于轻级工作制, A4 级和 A5 级对应于中级工作制, A6~A8 级对应于重级工作制,其中 A8 级为特重级。

钢屋架及钢柱等构件以至全钢结构。如上节中提到的宝山钢铁公司的很多车间、各冶金工厂和重型机器制造厂的车间等。这类厂房的特点是荷载大,房屋高,有的还受温度作用或设备的振动作用,如锻压车间等。

(2)大跨度结构 结构的跨度越大时,减轻结构自重就有明显的经济效果。钢材轻质高强,可跨越很大的跨度,因而,大跨度结构应采用钢结构。

近年来,我国各地建造的很多体育馆、剧场和大会堂等,就采用了钢网架结构或悬索结构。例如:首都体育馆采用了 $99\text{m} \times 112.2\text{m}$ 的正交平板网架;1986 年建造的吉林滑冰馆,采用了双层悬索屋盖结构,悬索跨度 59m ,房屋跨度 70m ;1998 年为冬运会建造的长春体育馆,采用了两个部分球壳组成的长轴 191.68m ,短轴 146m 的方钢管拱壳屋盖结构,高 40.67m ,以及第一节中已经提到的体育馆建筑等。

此外,还有工业建筑中的飞机库、飞机装配车间等。如 1995 年建造的首都机场四机位飞机库,是当今世界上规模最大的飞机库,跨度为 $(153 + 153)\text{m}$ 。屋盖采用大桥和多层四角锥网架相结合的形式,有 10t 悬挂吊车,屋盖结构总重约 $5\,400\text{t}$ 。图 1.6 为网架平面图(单位:mm)。

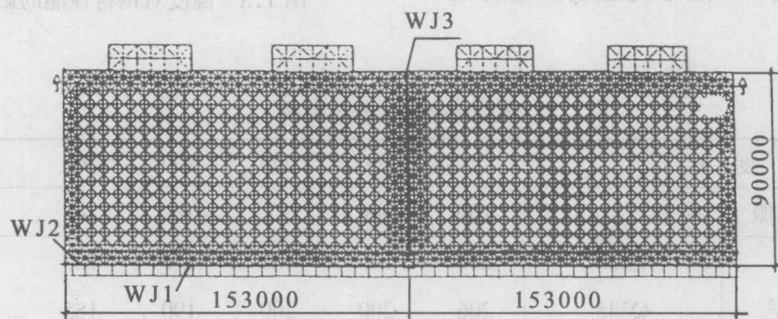


图 1.6 首都机场四机位飞机库

另外,北京地毯厂、长春第一汽车制造厂、天津钢厂无缝钢管厂以及上海宝钢管坯连铸主厂房等在厂房屋盖中,也都采用了网架结构,建筑总面积超过 300万 m^2 。

(3)高耸结构和高层建筑 高耸结构包括高压输电线路塔、变电架构、广播和电视发射塔架和桅杆等,如上节已经提到的广州电视塔(1965 年),高 200m ;哈尔滨电视塔(2000 年),高 336m 。此外,还有 1972 年建成的上海电视塔,高 211m ;1977 年建成的北京环境气象桅杆,高 325m ,以及遍布全国各地的电视塔和输电线塔等。这些结构主要承受风荷载,采用钢结构除了自重轻、便于安装施工外,还因钢材的轻质高强,构件截面小,减小了风荷载,从而取得更大的经济效益。

前面已经提到,自改革开放以来,我国建造了不少高层钢结构建筑。如深圳发展中心大厦,有 5 根巨大箱形钢柱,截面尺寸为 $1\,070\text{mm} \times 1\,070\text{mm}$,钢板厚度达 130mm 。1996 年建成的深圳地王大厦,地下 3 层,地上 81 层,高 383.95m (到桅杆顶),采用的箱形钢柱最大截面为 $2\,500\text{mm} \times 1\,500\text{mm}$,钢板厚 70mm ,如图 1.7 所示。近年来,钢管混凝土柱的应用也已进入了高层建筑领域。图 1.8 为 1999 年建成的深圳赛格广场大厦(全部柱子为钢管混凝土柱),地下 4 层,地上 72 层,高 291.6m (计入桅杆全高为 353.8m)。

(4)受动力荷载作用的结构 由于钢材的动力性能好,韧性好,可用作直接承受起重量较



图 1.7 深圳地王大厦



图 1.8 深圳赛格广场大厦

大或跨度较大的桥式吊车的吊车梁。一般重级工作制吊车的吊车梁,都应采用钢结构。

(5)可拆卸和移动的结构 流动式展览馆和活动房屋等,最宜采用钢结构。钢结构重量轻,便于搬迁;采用螺栓连接时,又便于装配和拆卸。建筑机械为了减轻结构自重,则必须采用钢结构。

(6)容器和管道 因钢材的强度高,且密闭性好,因而高压气罐和管道、煤气罐和锅炉等都采用钢材制成。

(7)轻型钢结构 采用单角钢或薄壁型钢组成的轻型钢结构以及门式刚架结构,具有自重小、建造快又较省钢材等优点,近年来得到了广泛运用。例如一些轻型屋面的钢屋盖,耗钢量比普通钢屋盖可节约钢材 25%~50%,自重减小了 20%~50%,其用钢量和采用钢筋混凝土的接近,而自重却比后者减小了 70%~80%。

安徽芜湖 951 一期工程的厂房(长 315m,宽 240m,建筑面积达 7.56 万 m^2)、浙江吉利集团在前两年修建的临海机车工业公司厂房(计 14.5 万 m^2)等工程均采用了轻型钢结构。

此外,前面已经提到过,建设部已经确定“十五”期间以住宅钢结构为发展重点,并在北京、天津、马鞍山和山东莱芜等地建造了一批试点工程,取得了良好的经济效益,必将在全国得到

推广应用。

(8)其他建筑物 运输通廊、栈桥、各种管道支架以及高炉和锅炉构架等,通常也都采用钢结构。近年来,在很多大城市中兴建一些人行立交桥,也有不少采用了钢结构。

以上是当前我国钢结构应用范围的一般情况。在确定采用钢结构时,应从建筑物或构筑物的使用要求和具体条件出发,考虑综合经济效益来确定。总的来说,根据我国现实情况,钢结构适用于高、大、重型和轻型结构。

第三节 钢结构的设计方法

在进行钢结构设计时,必须在满足使用功能要求的基础上,做到技术先进、经济合理、安全适用和确保质量。

众所周知,结构设计中采用的各种数据常和实际情况有出入。例如,各种荷载值和设计采用值不可能完全一致,钢材强度(屈服点 f_y)和设计取值也不可能正好相同,构件的截面尺寸、长度和材料的容重等也都和设计采用值会有或多或少的差异。所有这些区别和差异统称为变异性。因而,设计中的数据,如各种荷载值和材料强度等,都是随机变量,即量的大小有随机性。为了达到设计安全适用、确保质量而又经济合理的要求,必须充分而又合理地考虑这些实际情况与设计条件之间的差别,也就是要求所设计的结构具有一定的可靠度。

结构的可靠性是指结构在规定的时间内^①、规定的条件下(正常设计、正常施工、正常使用和正常维护),完成预定功能的概率,是结构安全性、适用性和耐久性的概称,用来度量结构可靠性的指标称可靠指标,它比安全度的概念更为广泛。

钢结构设计规范采用了以概率理论为基础的极限状态设计法,它是从结构可靠度设计法转变而来的。简要介绍如下。

根据结构或构件(包括连接)能否满足预定功能的要求来确定它们的极限状态。一般规定有两种极限状态。第一种是**承载能力极限状态**,包括:构件和连接的强度破坏,疲劳破坏和因过度变形而不适于继续承载,结构和构件丧失稳定,结构转变为机动体系和结构倾覆等。第二种是**正常使用极限状态**,包括:影响结构、构件和非结构构件正常使用或外观的变形,影响正常使用的振动,影响正常使用或耐久性能的局部损坏等。各种承重结构都应按照上述两种极限状态进行设计。

极限状态设计法的基本内容如下。

设结构或构件的承载力(又称抗力)为 R ,它取决于材料的强度(或构件的稳定临界应力)和构件的截面面积或截面刚度等几何因素。如前所述,这些参数都是独立的随机变量,并非确定值,应根据它们各自的统计数值运用概率法来确定它们的设计取值。这些设计值确定后,结构或构件的抗力 R 也就确定了。

作用是荷载、温度变化、基础不均匀沉降和地震等的统称,它对结构或构件产生的效应,就是同时施加于结构或构件的若干种作用分别引起结构或构件中产生的内力,这些内力的总和称为作用效应,一般习惯称之为荷载效应,用 S 来表示。当然,各种作用也都是随机变量,并非确定值。同理,也应根据它们各自的统计数值运用概率法来确定它们各自的设计值。当这

^① 普通房屋和构筑物的设计使用年限为 50 年。

些设计值选定后,总作用效应 S 也就确定了。

根据极限状态的定义,当结构或构件的抗力等于各作用引起的作用效应时,此结构或构件达极限状态。极限状态方程可写成

$$Z = g(R, S) = R - S = 0 \tag{1.1}$$

当 $R > S$ 时,结构或构件处于可靠状态,即设计有效; $R < S$ 时,结构或构件处于失效状态; $R = S$ 时,为结构或构件的极限状态,如图 1.9 所示。

根据实际结构或构件的统计资料,得到极限状态方程 $Z = R - S$ 的统计结果,绝大多数的 Z 值大于 0 ($R > S$),也有少数的 Z 值小于 0。

例如,当任一结构或构件的失效概率为 0.000 7 时,可靠概率为 0.999 3。也就是说,一万个设计中,在规定的时期内、规定的条件下,能满足预定功能而有效使用的设计为 9 993 个。

确定了结构或构件的失效概率 (P_f),就得到了可靠概率 (P_r),因为它们之和等于 1.0。但计算失效概率比较复杂,故引入了可靠指标 β ,它和失效概率 P_f 是对应的,见表 1.2。

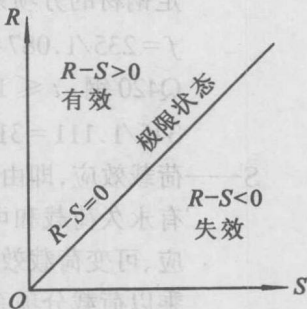


图 1.9 R 和 S 的关系

表 1.2 β 值与 P_f 的对应关系

β	2.0	2.5	3.0	3.2	3.5	4
P_f	2.28×10^{-2}	6.2×10^{-3}	1.35×10^{-3}	6.9×10^{-4}	2.33×10^{-4}	3.17×10^{-5}

计算 β 值远比直接计算 P_f 值简单,因此我们可以用 β 值的计算来确定结构或构件的可靠度。钢结构设计要求满足可靠度指标 $\beta = 3.2$,允许上浮 0.25,即设计出来的结构的失效概率为 $(6.9 \sim 2.3) \times 10^{-4}$,而有效的可靠概率为 0.999 77~0.999 31。

这种运用概率理论的极限状态设计法称为概率极限状态设计法,是一种较先进的设计方法。但是,采用概率极限状态设计法时,必须拥有各个随机变量的统计数值,而迄今我们掌握的统计资料还不完整,主要掌握了钢材的屈服点、风荷载、雪荷载和一些活荷载等,还存在着不足之处,因而现行钢结构设计规范采用的设计方法可称为近似概率极限状态设计法。

同时,直接按照可靠指标进行结构和构件设计时,对很多设计工作者来说还不习惯,也不易掌握。因而现行设计规范将极限状态设计公式等效地转化为大家熟悉的分项系数设计公式。对承载能力极限状态,由极限状态方程式(1.1),保证结构、构件有效可靠时,应满足下列公式:

$$\gamma_0 S \leq R \tag{1.2}$$

式中: γ_0 ——结构重要性系数。例如对于使用年限为 50 年的结构,根据结构发生破坏时可能产生后果的严重程度,把建筑结构分成一、二、三级三个安全等级,规定不同的可靠指标,分别取 1.1、1.0 和 0.9。一般工业与民用建筑钢结构,经分析,安全等级多为二级;但对跨度等于或大于 60m 的大跨度结构,如大会堂、体育馆和飞机库等的屋盖主要承重结构的安全等级宜取为一级。对于使用年限为 25 年的结构