

21世纪 高职高专教育统编教材

水工钢结构

王建伟 彭明 主编



黄河水利出版社

21 世纪高职高专教育统编教材

水工钢结构

王建伟 彭明 主编

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书是根据高等职业技术教育水利水电类《水工钢结构》教学大纲,主要依据国家标准《钢结构设计规范》(GB50017—2003)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74—95)编写的。本书共分7章,主要包括钢结构的材料和设计方法、钢结构的连接、钢梁、轴心受力构件、拉弯和压弯构件、平面钢闸门等。为便于教学和强化基本技能的训练,书中增加了有关例题、习题和思考题,书后附有相关附录。本书适用于高职高专院校水利水电类专业教学,也适用于电大、职大同类专业的教学,同时可供相关专业技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工钢结构/王建伟,彭明主编. —郑州:黄河水利出版社,2006.8

ISBN 7-80734-113-0

I. 水… II. ①王…②彭… III. 水工结构:钢结构 IV. TV34

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第095066号

策划组稿:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:wlp@yrcp.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940 传真:0371-66022620

E-mail:hhsclcs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:12

字数:275千字

印数:1—4100

版次:2006年8月第1版

印次:2006年8月第1次印刷

书号:ISBN 7-80734-113-0/TV·470

定价:20.00元

前 言

本书是根据高等职业技术教育水利水电类《水工钢结构》教学大纲编写的,是高职高专水利水电工程专业《水工钢结构》课程的通用教材。全书共分7章和附录,主要包括钢结构设计的基本知识、基本理论、基本构件和连接计算与构造规定,以及水工钢闸门等。

本书主要依据国家标准《钢结构设计规范》(GB50017—2003)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL74—95)编写。

本书从高职教育的实际特点出发,在内容上加强了知识的针对性和实用性,注重学生实践能力的培养,并注意反映技术发展的最新成果,理论与实际相结合;减少理论推导,注重有关结论和构造规定,以“适度、够用”为准则,不苛求学科的系统性和完整性,充分体现高等职业教育的特色。在阐述上力求做到由浅到深,循序渐进。为便于教学和强化基本技能的训练,书中增加了有关例题、习题和思考题,书后附有相关附录。

参加本书编写的有:黄河水利职业技术学院王建伟(第一、三章,第四章第六、七节);黄河水利职业技术学院郭遂安(第二章);沙颍河工程管理局周向阳、汪军(第五章、附录)黄河水利职业技术学院李梅华(第四章一至五节);黄河水利职业技术学院彭明(第六、七章)。全书由王建伟、彭明主编,黄河水利职业技术学院刘纯义主审。

本书在编写过程中参考并引用了国内同行的著作、教材和有关资料,在此对所有文献的作者深表谢意。由于作者水平有限,书中错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2006年6月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
思考题	(5)
第二章 钢结构的材料 and 设计方法	(6)
第一节 建筑钢材的两种破坏形式	(6)
第二节 钢材的主要工作性能	(6)
第三节 钢材的疲劳	(9)
第四节 影响钢材性能的主要因素	(12)
第五节 钢材的种类与规格	(16)
第六节 钢结构的设计方法	(20)
思考题	(24)
第三章 钢结构的连接	(25)
第一节 连接方法及特点	(25)
第二节 焊接方法及焊缝强度	(26)
第三节 对接焊缝连接的构造和计算	(29)
第四节 角焊缝连接的构造和计算	(33)
第五节 焊接应力和焊接变形	(41)
第六节 螺栓连接	(44)
思考题	(55)
计算题	(55)
第四章 钢 梁	(56)
第一节 钢梁的种类和截面形式	(56)
第二节 钢梁的强度和刚度	(58)
第三节 钢梁的整体稳定	(64)
第四节 型钢梁设计	(68)
第五节 焊接组合梁	(70)
第六节 梁的局部稳定和加劲肋的设置	(75)
第七节 梁的拼接、连接和支座	(78)
思考题	(82)
计算题	(82)
第五章 轴心受力构件	(84)
第一节 概 论	(84)
第二节 轴心受力构件的强度和刚度	(86)
第三节 轴心受压构件的整体稳定计算	(87)

第四节	实腹式轴心受压构件的局部稳定	(91)
第五节	实腹式轴心受压柱的设计	(92)
思考题	.....	(96)
计算题	.....	(96)
第六章	拉弯和压弯构件	(97)
第一节	拉弯和压弯构件的类型与应用	(97)
第二节	拉弯、压弯构件的强度和刚度	(98)
第三节	压弯构件的整体稳定	(100)
第四节	实腹式压弯构件的局部稳定	(104)
第五节	实腹式压弯构件的设计	(106)
思考题	.....	(107)
计算题	.....	(108)
第七章	平面钢闸门	(110)
第一节	概 述	(110)
第二节	平面钢闸门的组成和结构布置	(112)
第三节	平面钢闸门的结构计算与设计	(118)
第四节	行走支承	(128)
第五节	止水与吊耳	(132)
第六节	启闭机与启闭力	(134)
思考题	.....	(137)
附录一	钢材和连接的强度设计值和容许应力	(138)
附录二	疲劳计算的构件和连接分类	(144)
附录三	梁的整体稳定系数	(147)
附录四	轴心受压构件的稳定系数	(151)
附录五	型钢表	(155)
附录六	型钢的螺栓(铆钉)准线表	(176)
附录七	螺栓和锚栓的规格	(177)
附录八	矩形弹性薄板弯矩系数	(178)
附录九	钢闸门自重估算公式	(181)
附录十	材料的摩擦系数	(182)
附录十一	轴套的容许应力和混凝土的容许应力	(183)
参考文献	.....	(184)

第一章 绪 论

用型钢或钢板通过焊接或螺栓连接组成的承重结构称为钢结构。钢结构在实际工程中的应用极为广泛,下面简要介绍钢结构的概况。

一、钢结构的特点

(一)钢结构的优点

1. 强度高,重量轻

钢材的重度(76.9kN/m^3)比其他建筑材料大,但钢材的强度很高,在相同的荷载条件下,钢结构的自重较小。钢结构与钢筋混凝土结构相比,构件体积小,重量轻,运输和安装方便,适用于跨度大、建筑物高、荷载大,以及要求装拆和移动的结构。

2. 钢材内部组织比较均匀,塑性、韧性好

与混凝土和其他材料相比,钢材的内部组织比较均匀,各方向的物理力学性能基本相同,接近匀质各向同性体,钢材的弹性模量较大($E = 2.06 \times 10^5 \text{N/mm}^2$),具有良好的塑性和韧性,这些性能最符合目前采用的结构分析中的基本假定和结构计算方法。所以,钢结构的实际受力情况与结构分析计算结果最接近,在使用中最为安全可靠。

3. 可焊性好

可焊性是指钢材在焊接过程中和焊接后,能保持焊接部分不开裂的性质。钢材的这种性能为采用焊接结构创造了条件。焊接连接简单方便,适应于制造各种复杂结构形状的需要。

4. 制造简便,施工方便,装配性好

钢结构由各种型钢和板材组成,在金属结构制造厂中加工制造,制作简便,生产效率高,速度快。制成的构件在现场拼接,安装常用螺栓连接或焊接,施工方便,施工周期短,便于拆卸、加固或改建。

5. 密封性好

钢材具有不渗漏性,可以采用焊接制成安全密封的焊接密闭结构。例如气密性和水密性要求较高的高压容器、大型油库、大型管道、煤气柜等板壳结构。

(二)钢结构的缺点

1. 耐热但不耐高温

钢材耐热但不耐高温,随着温度的升高,其强度和弹性模量都将降低,而伸长率和线膨胀系数增大。当环境温度在 150°C 以上时,需要采取防护措施。在火灾中,钢结构的耐火时间较短;在温度达到 500°C 以上时,结构会丧失承载力。因此,应根据建筑物的耐火极限时间,对承重构件采取有效的防护措施,如涂刷防火涂料等。

2. 耐腐蚀性差

钢结构在湿度大、有侵蚀介质的环境中容易被腐蚀,为了防止锈蚀,不仅在初建时需

要采取除锈、油漆、镀锌等防锈措施,而且建成后需要定期维护。在水工钢闸门上也可采用电化学效应的阴极保护法。

3. 在低温和其他条件下容易发生脆性断裂

钢材在低温和其他条件下容易发生脆性断裂,实际工程中应注意这方面的问题。

二、钢结构的应用

钢结构在桥梁、水利、水运、海洋采油等工程中的合理应用范围大致如下。

(一)大跨度结构

结构的跨度越大,减轻结构自重越具有明显的经济效果。由于钢材轻质高强,适合于建造大跨度结构。例如三峡水利枢纽升船机的承船厢,有效长度 120m,宽 18m,水深 3.5m,总重量 11.8 万 t,可承载 3 000t 船舶过坝,为当今世界最大的承船厢;上海卢浦大桥为全钢结构大桥,主跨 550m。

(二)活动式结构

水工结构中大量采用的钢闸门、拦污栅、船闸闸门、升船机和钢引桥等均为活动式结构。对于此类需要移动或转动的结构,可以充分发挥钢结构自重较轻的特点,从而降低启闭设备的造价和运转所耗费的动力。有“天下第一门”称号的三峡工程永久船闸南线第一闸首人字门,高 38.5m,宽 20.2m,厚 3m,每扇门重量达 804t,无论是尺寸还是重量都在世界船闸闸门中名列首位。

(三)装拆式结构

在水利工程中经常会遇到需要拆迁和周转使用的结构。例如施工用的钢栈桥,钢模板,装配式的混凝土拌和楼及砂、石骨料的输送架等。这类结构充分发挥了钢结构自重较轻,便于运输和安装的特点。

(四)板壳结构

用钢板制造的压力管道、储液罐、储气罐等结构密封性好。例如三峡水利枢纽工程中的电厂进水压力钢管内径达 12.4m。

(五)高耸结构

主要是指承受风荷载的高耸塔桅结构,如输电线路塔、微波塔、电视转播塔等。例如世界第一高塔加拿大多伦多电视塔高达 553m,世界第二高塔俄罗斯电视塔高 540m,世界第三高塔上海东方明珠电视塔高 468m。广州新电视塔将于 2009 年建成,总高度 610m,其中塔体 450m,天线桅杆 160m,建成后有望成为世界上最高的电视塔。

(六)海工钢结构

海洋工程中的钻井、采油平台结构,由采油平台、生活平台和烽火台组成,中间由轻便的栈桥连接。这类结构要承受平台上各种装置及机械设备的荷载以及风、浪和冰等动力荷载作用,这就利用了钢材强度高、抗震性能好以及便于安装等优点。

(七)受动力荷载作用的结构

由于钢材抵抗动力荷载的性能好,因而重量较大的桥式吊车的吊车梁应采用钢结构,有较大锻锤或动力设备的厂房通常采用钢结构。

三、钢结构的发展概况

中国是最早用钢铁建造承重结构的国家。公元 60 年左右开始在高山峡谷地区建造铁链桥,其中明朝时湖南的沅江桥、清朝时四川的泸定桥最为著名。泸定桥建于 1706 年,净跨 100m,宽 2.7m,共有 13 根铁链,每根质量 1.6t,铁链系于直径 200mm、长 4m 的铸铁锚桩上。

中国古代除铁链桥外,尚有众多的观赏铁塔,至今尚存的有宋代(1061 年)湖北荆州玉泉寺铁塔,塔身高 17.9m,共 13 层,由生铁铸造而成;还有山东济宁铁塔和江苏镇江甘露寺铁塔等。

1782 年,英国用生铁建造了科尔布鲁克代尔肋拱桥,跨长 30.5m。随着冶金技术的发展,出现了熟铁铆钉连接结构,1889 年法国建成的埃菲尔铁塔,高 321m。19 世纪 60 年代,平炉和转炉炼钢出现后,才开始用钢建造桥梁和高层建筑。1974 年在芝加哥建造了西尔斯大厦,高 443m;1998 年建成的日本明石海峡吊桥,跨度为 1 990m。

新中国成立后,随着国家经济的飞速发展,在钢结构设计理论、结构制造安装等方面都有了较快的发展。在钢结构桥梁、大跨度工业厂房、大型公共建筑和高耸结构、高层建筑等方面都有较多的应用。

在钢结构桥梁方面,自 1957 年建成武汉长江大桥以后,又建成了多座大桥,如 1968 年建成的南京长江大桥,正桥长 1 577m,采用 16 锰桥(16Mnq)钢,160m×3 的三跨连续桁架。1992 年建成的九江长江大桥,正桥长 1 806.6m,为 15 锰钒氮桥(15MnVNq)钢、柔性拱加肋的桁架桥,最大跨度 216m。1993 年 10 月建成的上海黄浦大桥,总长 8 346m,主桥为双塔双索面斜拉桥,主桥长 846m,主跨为 423m。

在工业建筑方面,鞍钢、武钢、宝钢等冶金企业的许多车间都采用钢结构厂房。如 1977 年建成的上海锅炉厂的重型容器车间,主跨长 36m,高 40m。1996 年建成的首都大型客机检修库屋盖采用双跨 150m 的钢网架结构。

在公共建筑方面,采用大跨度的平板网架、悬索结构等。如 1961 年建成的北京工人体育馆、1975 年建成的上海体育馆、1990 年建成的亚运村综合馆等。

用钢结构建成的塔桅结构也较多,如 1977 年建成的北京环境气象塔,是由 5 层纤绳组成的桅杆结构,杆身截面为三角形,边宽 2.7m,总高 325m。在石油开发和城市建设中,建造了不少大型油气储罐及筒仓等。1987 年在秦皇岛建成两座 10 万 m³ 储油罐。在北京建造的钢板筒式粮仓,高 20m,直径 10m。

随着国民经济的发展与科技进步,我国将建造更多的大跨度、高层钢结构、预应力结构。薄壁型钢尤其是压型钢板组合结构,近年来得到较快的发展。

四、水工钢结构的发展方向

随着经济建设和国际贸易的迅速发展,钢结构的应用会更加广泛。水工钢结构的发展主要有以下几个方面。

(一) 优质高强钢材的研制和应用

长期以来,钢结构传统地采用普通碳素结构钢,随着冶金工业的发展,冶炼时在碳素

钢里加入少量的合金元素,可得到强度高、综合机械性能好的普通低合金钢。这类钢还具有抗蚀性、耐磨性及耐低温等性能。屈服点 $f_y = 345\text{N/mm}^2$ 的 16 锰(16Mn)钢在我国最为常用,其次为 15 锰钒(15MnV)钢,屈服点 $f_y = 390\text{N/mm}^2$ 。此外,屈服点 $f_y = 390\text{N/mm}^2$ 的 15 锰钛(15MnTi)钢、 $f_y = 400\text{N/mm}^2$ 的 30 硅钛(30SiTi)钢以及 $f_y = 450\text{N/mm}^2$ 的 15 锰钒氮(15MnVN)钢等也曾用于一些重要工程,但这与国外高强度钢材的发展还有一定的差距。例如,美国早在 1969 年已将屈服点 $f_y = 700\text{N/mm}^2$ 的钢材列入规范。

采用高强度低合金钢可大大节约钢材,提高结构的经济使用寿命,同时由于构件截面尺寸减薄,还可以简化制造工艺,节约工时,利于运输和安装,对于大跨度结构更有利。如南京长江大桥、葛洲坝水利枢纽中的各类钢闸门均采用 16 锰钢或 16 锰桥钢建造。1992 年建成的九江长江大桥采用的是 15 锰钒氮桥钢。

为了合理利用材料,对于由稳定条件控制的构件,宜采用价格较低的 Q235 钢;对于由强度条件控制的构件,宜采用强度较高的 Q345、Q390 和 Q420 钢。

(二)结构和新技术的研究和应用

钢与混凝土组合构件充分利用了钢材宜抗拉和混凝土宜抗压的特性,且使一个构件有多种用途,是一种经济合理的结构。例如,目前在桥梁和房屋楼盖中应用的钢梁与钢筋混凝土板组合结构,钢梁与钢筋混凝土板间用抗剪连接件相连而使整个结构整体工作。此外,钢管混凝土结构也是一种组合结构,当用作受压构件时,不仅混凝土受到钢管的约束而提高了其抗压强度,同时由于管内混凝土的填充也提高了钢管抗压的稳定性,因而构件的承载能力大大提高,且具有良好的塑性和韧性,经济效益显著。钢管既承受荷载,又代替了模板,施工很方便。

组合结构是一种很有发展前途的结构形式,有待于进一步研究开发。

我国从 20 世纪 50 年代开始就对预应力钢结构进行理论和实验研究,并在一些工程中应用。预应力钢结构,可以较大幅度地节约钢材,并能增加结构的刚度。例如在三峡工程中船闸人字钢闸门上采用了预应力的门背斜拉杆,可以有效地防止当门扇在水中旋转时产生过大的挠曲和扭转变形。

(三)设计理论和计算方法

水工钢结构一直用容许应力的设计方法。其优点是计算简便,可满足正常的使用要求;缺点是所给定的容许应力不能保证各种结构具有比较一致的可靠度。因此,水工钢结构应研究以概率论为基础的极限状态设计法。现行《钢结构设计规范》(GB50017—2003)(以下简称《规范》)采用的就是此方法。

水工钢闸门的结构计算,通常是将空间结构简化成若干个平面结构来计算。这种计算方法没有考虑结构的整体性,其结果不能准确反映结构实际的工作性能。因此,不能充分合理使用材料。我国从 20 世纪 50 年代以来,对钢闸门已经有按空间结构的计算方法。此法较真实地反映了闸门的工作情况,还可节约钢材。对于跨度较小的闸门,节约效果不显著,且计算过程比较烦琐。所以,按空间结构计算并不普遍。但计算机的发展已为钢闸门按空间计算提供了条件,同时还可以对结构进行优化设计。

(四)新型连接方法

在钢构件的连接上使用最多的是焊接。不仅工厂内的构件组装和装配加固构件,而且现场的构件连接也大量采用焊接。因此,要改进焊接工艺,提高焊接质量,采用二氧化碳气体保护焊、电渣焊等,研究与高强度结构钢相匹配的高质量焊接材料。

现场连接中比焊接用得更多的是高强度螺栓连接。摩擦型高强螺栓连接具有较好的塑性和韧性,避免了焊接中存在的焊接应力和焊接变形等缺点。它不仅安装迅速,而且承受动力荷载的性能也较好。

(五)钢结构的标准化和系列化

钢结构制造工业和机械化水平需要进一步提高。改进工艺和革新设备,使有些构件系列化、产品化。推行水工钢结构的标准化和系列化是缩短工期、降低成本、提高劳动生产率的有效措施。

五、课程的性质和任务

钢结构在各项工程建设中的应用极为广泛,如钢桥、钢厂房、钢闸门、管道、容器、高层建筑和塔桅结构等。钢结构是结构工程中按材料划分出来的一门学科。这门学科主要是建立在建筑材料、工程力学及工程实践知识的基础上,按照结构物的使用目的,在预计的各种荷载作用下,在预定的使用期限内,使结构不致失效。因此,在进行结构设计时必须考虑具体的材料性能,综合运用上述力学知识,研究结构在使用环境和荷载作用下的工作状况,设计出既安全适用,又经济合理的结构。

由于本课程有时需要直接引用上述课程中的有关计算方法和计算公式,有时还要通过适当的假定,把某些复杂的公式转化成实用方便的简化公式,所以,对于设计工作者,必须熟悉上述有关力学课程的内容。然而,钢结构这门学科的特点,不仅是力学的分析和运算,还必须熟悉结构的使用要求,了解结构的工作状况,需要掌握钢材在各种因素作用下的工作性能以及各种构造要求。然而工程中的许多问题不是全部能借助公式解决的,往往需要有丰富的工程实践经验,然后才能设计构件,进行构造处理,确定必要的制造工艺和安装方法。

本课程的任务是阐述常用结构的工作性能、钢结构的连接设计、钢结构各类基本构件的设计原理以及结合水利工程专业的要求讲述平面钢闸门的设计原理和方法。通过本课程的学习,学生应掌握钢结构的基本知识、设计原理和方法,能够对钢梁、钢柱等基本构件进行设计,了解平面钢闸门的组成及各部件的作用,为设计其他类型的钢结构打下基础。

思考题

- 1-1 根据你所知道的钢结构工程,试述其特点。
- 1-2 钢结构有哪些特点?
- 1-3 该课程有哪些主要内容和特点?

第二章 钢结构的材料和设计方法

第一节 建筑钢材的两种破坏形式

钢材有塑性破坏和脆性破坏两种破坏形式。钢结构所用的材料虽然有较高的塑性和韧性,一般为塑性破坏,但在一定条件下,仍有发生脆性破坏的可能性。

当构件中的应力超过屈服点 f_y , 即有明显的塑性变形产生, 当应力超过钢材的抗拉强度 f_u 后, 构件将在很大的变形情况下断裂, 这种破坏称为塑性破坏。塑性破坏前, 结构有明显的塑性变形, 且变形持续时间长, 使人们易于发现结构处于危险状态并有机会采取补救措施。因此, 在钢结构中未经发现和补救而真正发生塑性破坏的情况很少。另外, 塑性变形后结构出现内力重分布, 使结构中原先受力不均匀的部分应力趋于均匀, 因而提高了结构的承载能力。

另一种破坏形式是脆性破坏。脆性破坏前塑性变形很小, 甚至没有塑性变形, 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。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。破坏前没有明显的变形和预兆, 断裂往往发生在瞬间。由于脆性破坏前没有明显的预兆, 无法及时察觉和采取补救措施, 而且个别构件的断裂常引起整个结构塌毁, 后果严重, 损失较大。

同一种钢材, 由于具体情况和工作条件不同, 可能发生塑性破坏, 也可能发生脆性破坏。使钢材产生脆性破坏的原因包括钢材材质的优劣、设计与构造是否正确、施工制作是否合理及结构使用是否恰当等。应充分认识到钢材脆性破坏的严重后果, 在设计、施工和使用钢结构时, 采取合理措施, 避免脆性破坏的发生。

第二节 钢材的主要工作性能

一、钢材单向拉伸试验表现的机械性能

钢材的机械性能也称力学性能, 主要通过试验获得。在静载、常温条件下由标准试件的一次单向均匀拉伸试验得出的静力性能最具有代表性, 拉伸试验也比较容易进行, 便于规定标准的试验方法和多项性能指标。所以, 钢材的主要强度指标和变形性能是根据标准试件在规定试验条件下的拉伸试验确定的。

碳素结构钢和低合金钢一次拉伸时的应力—应变曲线如图 2-1 所示。建筑钢材一次拉伸时的工作特征可分为四个阶段。

(一) 弹性阶段

应力由零到比例极限 f_p (因弹性极限和比例极限很接近, 所以通常略去弹性极限, 把

f_p 看做弹性极限)。在此阶段,钢材表现为弹性,应力应变成线性关系,弹性模量很大,且为常数, $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$,卸荷后变形完全恢复,符合胡克定律。

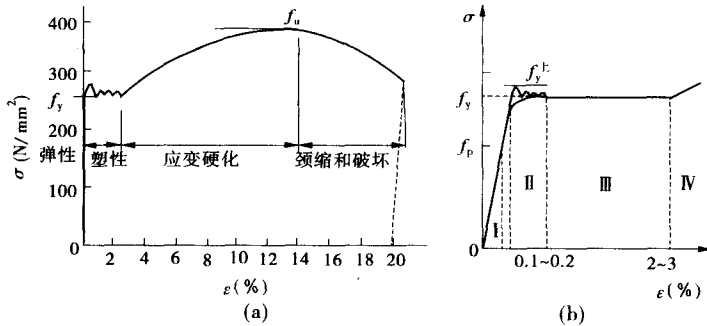


图 2-1 建筑钢材应力应变曲线

(二)弹塑性阶段

由比例极限 f_p 到屈服极限 f_y 。应力应变表现为曲线关系,应变值 ϵ 增加比应力值 σ 增加快,弹性模量由 $E = 206 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ 逐渐减为零。在此阶段内,任何一点的变形中都将包括弹性变形和塑性变形两部分,其中塑性变形在卸荷后不再恢复。

(三)塑性阶段

应力维持屈服点 f_y 不变,而应变不断增加,应变 ϵ 由开始屈服时的 0.1%~2% 达到屈服结束时的 2%~3%,表现为钢材暂时失去承载力,应力应变关系形成水平段,弹性模量 E 为零。

(四)强化阶段

钢材发生很大的塑性变形后,内部结晶组织自行调整,抵抗外荷载的能力又有所提高,应力应变关系曲线又上升。最后当应力达到极限抗拉强度 f_u 时,在试件的某一薄弱截面发生颈缩现象而断裂破坏,这种破坏是塑性破坏。

通过标准试件的拉伸试验,可得到建筑钢材的三个重要机械性能指标:屈服点 f_y 、极限抗拉强度 f_u 及伸长率 δ_{10} 或 δ_5 。

钢材的极限抗拉强度 f_u 是衡量钢材在经过巨大变形后抵抗拉断的能力,它直接反映钢材内部组织的优劣,并与疲劳有密切关系。

伸长率是反映钢材在荷载作用下塑性变形能力的指标,它等于试件拉断后原标距间的长度伸长值与原标距长度的百分比。

虽然钢材在应力达到极限抗拉强度 f_u 时才发生断裂,但是结构强度设计时以钢材的屈服点 f_y 作为静力强度的承载极限。试验表明,当应力开始进入塑性阶段时,曲线的波动较大,而后才逐渐趋于平稳,即出现上屈服点和下屈服点。前者和试验时的加载速度及试件形状等试验条件有关,而后者则对此不太敏感,因而设计中以下屈服点作为材料抗力的标准。另外,钢材之所以有弹塑性阶段,是由于存在残余应力,如果消除了试件中残余应力,比例极限 f_p 将和屈服点 f_y 重合。由于一般建筑钢材中的残余应力并不大, f_p 为 $(0.7 \sim 0.8)f_y$ 。为了简化计算,可以把钢材的应力应变关系看作是两根直线组成的理想

弹性塑性体,如图 2-2 所示。当应力达到屈服点后,将使结构产生很大的残余变形,表明钢材的承载能力达到了最大限度。因此,在设计中取屈服点 f_y 为钢材可以达到的最大应力。

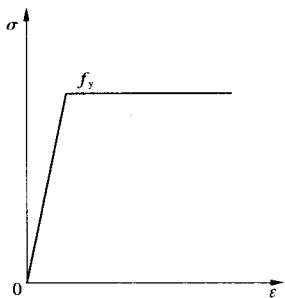


图 2-2 理想弹性塑性体

选择屈服点作为建筑钢材承载力极限的依据:①钢材屈服后,塑性变形很大,从屈服到断裂的塑性变形约为弹性变形的 200 倍,如此大的塑性变形已使结构失去正常使用功能而达到极限状态,无法利用强化阶段;②屈服后塑性变形很大,险情极易被察觉,可以及时采用适当补救措施,避免发生突然破坏;③抗拉强度和屈服点的比值较大(Q235 钢 $f_u/f_y = 1.6 \sim 1.9$),成为结构极大的后备强度。

钢材屈服点的高低还与钢材晶粒的粗细有关,材质好,轧制次数多,晶粒细,屈服点就高。因此,不同厚度的钢材,屈服点是不同的。钢材按厚度分为 6 个范围并分别

规定了其屈服点 f_y 和伸长率 δ_{10} 。

钢材在一次压缩或剪切时表现出来的应力应变关系变化规律基本上与拉伸试验相似,只是剪切时的屈服点 τ_y 和抗剪强度 τ_u 均较受拉时为低;剪变模量也低于弹性模量。

碳素结构钢和低合金钢有明显的屈服点和屈服平台(见图 2-1(a))。而热处理钢材有较好的塑性性质,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的曲线。对于没有明显屈服点的钢材,规定永久变形为 0.2% 时的应力作为名义屈服点,用 $\sigma_{0.2}$ 表示,如图 2-3 所示。为简明起见,也可用 $\epsilon = 0.5\%$ 对应的应力作为屈服强度,因为它与 $\sigma_{0.2}$ 相差不多,统一用屈服强度 f_y 表示。

二、冷弯性能

钢材的冷弯性能是判别钢材塑性变形能力及冶金质量的综合指标,是比单向拉伸试验所表现性能更严格的一项指标。冷弯性能由试验来确定,如图 2-4 所示。根据试件原有厚度,按照规定的弯心直径在试验机上将试件弯曲 180° ,其表面及内侧面不出现裂纹或分层即为冷弯试验合格。冷弯试验不但能直接检验钢材的弯曲变形能力和塑性性能,还能暴露钢材内部的冶金缺陷,如硫、磷偏析及非金属夹杂等情况。重要的结构中需要有良好的冷加工性能时,应有冷弯试验合格保证。

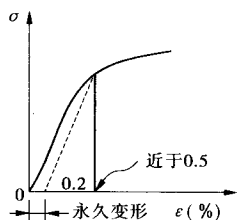


图 2-3 名义屈服点

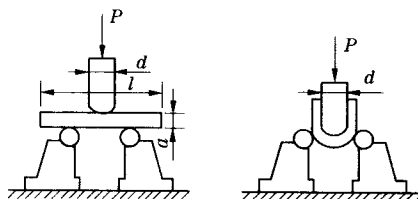


图 2-4 冷弯试验

三、冲击韧性

冲击韧性是钢材的一种动力性能,是钢材抵抗冲击荷载的能力,它可用钢材在塑性变形及断裂过程中吸收能量的能力来衡量。钢材在一次拉伸静力作用下断裂时所吸收的能量,用单位体积吸收的能量来表示,其值等于图 2-1(a)中 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线与横坐标所包围的总面积。塑性好的钢材,其应力应变关系曲线下的面积大,韧性也好。但是在实际结构中,脆性断裂并不是发生在单向受拉的地方,而总是发生在有缺陷高峰应力的地方,在缺陷处的高峰应力往往呈现三向受拉的应力状态。因此,最具代表性的是钢材的缺口冲击韧性,简称冲击韧性。

材料的冲击韧性数值随试件缺口形式和使用试验机不同而异。国家标准《碳素结构钢》(GB700—88)规定采用国际上通用的夏比 V 形缺口试件在夏比试验机上进行,如图 2-5 所示。夏比缺口韧性用 C_v 表示,其值为试件折断所需要的功,单位为 J。

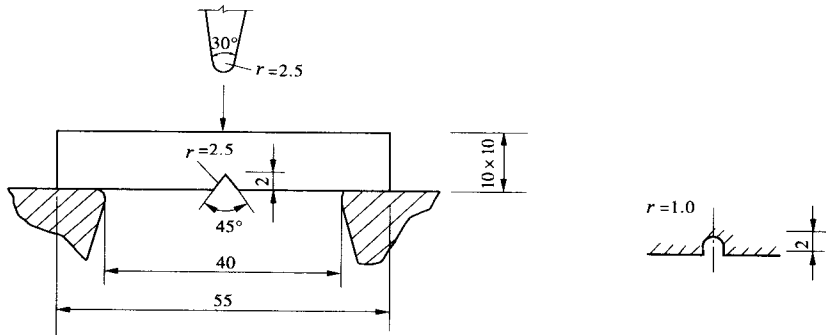


图 2-5 冲击韧性试验 (单位:mm)

由于低温对钢材的脆性破坏影响显著,当温度低于某值时冲击韧性将急剧降低。在寒冷地区建造的结构不但具有常温(20℃)冲击韧性指标,还要求具有负温(0℃, -20℃或 -40℃)冲击韧性指标,以保证结构具有足够的抗脆性破坏能力。

第三节 钢材的疲劳

一、钢材疲劳破坏的特征

建筑结构中大小和方向随时间变化的荷载,称为循环荷载,如图 2-6 所示。每次循环中的最大应力 σ_{\max} 和最小应力 σ_{\min} (拉应力取正值,压应力取负值)之差称为应力幅,即 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 。

当所有应力循环中的应力幅保持常量时称为常幅循环荷载;反之,在每次应力循环中,其应力幅值不是常数而是一种随机变量,这种循环荷载称为变幅循环荷载。

循环形式用应力比值 $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 表示,一般有拉压相等的对称循环($\rho = -1$)、异号不对称循环($-1 < \rho < 0$)、 σ_{\min} 为零的脉冲循环($\rho = 0$),以及同号不对称循环($\rho > 0$)等四

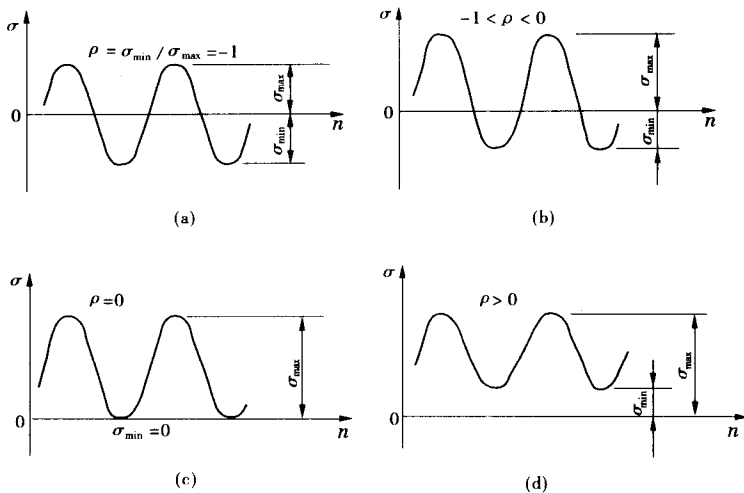


图 2-6 循环荷载

种情况。其中以拉压相等的对称循环最危险。

在连续循环荷载作用下,当应力低于抗拉强度,甚至低于屈服强度,当循环次数达到某数值时,钢材会发生脆性断裂破坏,这种现象称为钢材的疲劳或疲劳破坏。疲劳破坏往往发生得很突然,事先没有明显征兆,塑性变形极小,危险性较大,破坏性质属于脆性破坏。钢材在规定的应力循环次数和应力变化幅度下所能承受的最大动态应力称为疲劳强度。《规范》规定取应力循环次数 $n = 5 \times 10^6$ 时相应的疲劳强度作为钢材的耐久疲劳强度,或称钢材的疲劳强度极限,即应力循环无穷多次试件不致发生疲劳破坏的循环应力 σ_{\max} 的极限值。

从宏观上看,疲劳断裂是突然发生的,但实际上是在钢材内部经历长期的发展过程才出现的,疲劳破坏是微观裂纹在连续重复荷载作用下不断扩展直至断裂的过程。影响钢材疲劳破坏的主要因素是应力集中、作用的应力幅和应力循环次数,而与钢材的静力强度无关。现分述如下:

(1)应力集中的影响。在钢材中不可避免地存在一些局部缺陷,如不均匀夹杂,化学成分偏析,轧制时形成的微裂纹,或加工制造形成的刻槽、孔洞和裂纹等。当循环荷载作用时,在这些缺陷处截面上应力分布不均匀,产生应力集中,且应力集中处的高峰应力往往形成双向或三向同号应力场。在反复应力作用下,首先在应力高峰处出现微观裂缝,然后逐渐开展形成宏观裂缝。随着裂缝不断开展,有效截面不断减小,应力集中越来越严重,更促使裂缝的继续开展,形成恶性循环。同时,由于应力集中处是双向或三向同号拉应力场,材料的塑性变形受到限制。因此,当反复循环荷载作用达到一定的循环次数时,裂缝的开展使不断削弱的截面难以承受外力作用,危险截面突然断裂,出现钢材的疲劳破坏。如果钢材中存在残余应力,将加剧疲劳破坏的产生。构件截面几何形状的突然改变也会引起应力集中。《规范》将构件和连接形式按应力集中的影响程度由低到高分为 8 类,并分别规定了它们的容许应力幅 $[\Delta\sigma]$ 作为疲劳强度验算的标准。其中第 1 类为基本

无应力集中影响的主体金属,第8类为应力集中最严重的角焊缝,第2~7类则是有不同程度应力集中的主体金属。

(2)国内外大量疲劳试验证实,无论何种形式的应力循环,都可用 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ 表示其应力幅,只要他们的应力幅相等,不论其循环特征有无差异,其疲劳强度均相同。

(3)在不同的应力幅作用下,各类构件和连接产生疲劳破坏的应力循环次数不同,应力幅愈大,循环次数愈少,反之则愈多。当应力幅小于一定数值时,即使应力无限多次循环,亦不致产生疲劳破坏,即达到通称的疲劳极限。《规范》将 $n = 5 \times 10^6$ 视为各类构件和连接疲劳极限对应的应力循环次数。

二、常幅疲劳计算

《规范》确定最低疲劳寿命为 $n = 5 \times 10^5$ 。对直接动力荷载重复作用的钢构件及其连接,当应力变化循环次数 $n \geq 5 \times 10^4$ 时,应进行疲劳计算,在应力循环中不出现拉应力的部位可不计算疲劳。疲劳计算仍采用容许应力幅法,疲劳计算采用荷载的标准值按结构在弹性阶段工作进行应力分析,这是由于现阶段对疲劳裂缝的形成、扩展以至断裂这一过程的极限状态定义及有关影响因素的研究还不足的缘故。

根据试验数据可以画出构件或连接的应力幅与相应的致损循环次数 n 的关系曲线,如图 2-7(a) 所示,目前常用双对数坐标轴的方法,使曲线改为直线,以便分析,如图 2-7(b) 所示。

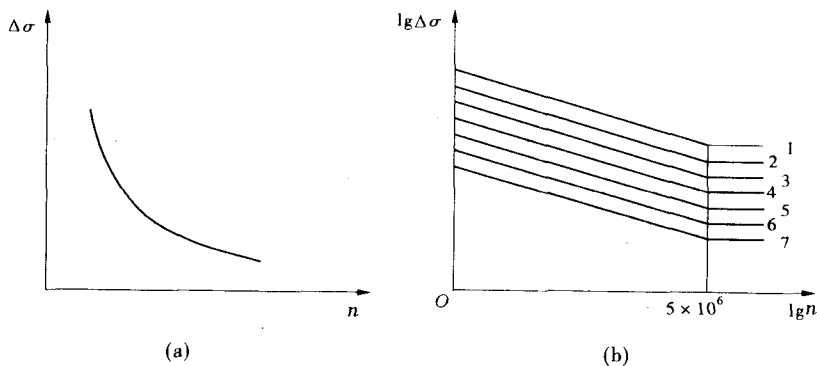


图 2-7 $\Delta\sigma \sim n$ 曲线

在双对数坐标图中, $\Delta\sigma \sim n$ 的直线方程可按数理统计理论回归为:

$$\beta \lg \Delta\sigma + \lg n - \lg C = 0$$

或写成:

$$\lg \Delta\sigma = \frac{1}{\beta} (\lg C - \lg n) = \lg (C/n)^{\frac{1}{\beta}}$$

考虑安全系数后,得到对应于 n 次循环寿命的容许应力幅 $[\Delta\sigma]$ 为:

$$[\Delta\sigma] = (C/n)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2-1)$$

对于不同的焊接构件和连接形式,按试验数据回归的直线方程的斜率也不尽相同。为了设计方便,按连接方式、受力特点和疲劳强度,归纳划分为 8 类,它们的 β 和 C 值