



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水工钢结构

主 编 王建伟 彭明 满广生

副主编 曲恒绪



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水 工 钢 结 构

主 编 王建伟 彭明 满广生
副主编 曲恒绪



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

图书在版编目(CIP)数据

水工钢结构 / 王建伟, 彭明, 满广生主编. -- 北京
: 中国水利水电出版社, 2009.9

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-5084-6849-5

I. ①水… II. ①王… ②彭… ③满… III. ①水工结构: 钢结构—高等学校—教材 IV. ①TV34

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第174577号

书 名	普通高等教育“十一五”国家级规划教材 水工钢结构
作 者	主 编 王建伟 彭明 满广生 副主编 曲恒绪
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 219千字
版 次	2009年9月第1版 2009年9月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	20.00元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书根据高等职业技术教育水利水电类《水工钢结构教学大纲》组织编写，编写的主要依据是《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)。本书共分5章，主要内容包括钢结构的材料与设计方法、钢结构的连接、钢梁、其他受力构件、平面钢闸门等。为便于教学和强化基本技能的训练，书中增加了有关案例、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。

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建筑工程专业及其专业群“水工钢结构”课程的通用教材。

本书主要依据国家标准《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)和《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—95)编写。本书共分五章，主要内容包括钢结构的材料与设计方法、钢结构的连接、钢梁、其他受力构件、平面钢闸门。

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适用性，既加强学生实践能力的培养，更关注学生发展能力的培养。理论与实际相结合，减少理论推导，注重基本构件和连接的设计计算以及有关构造规定，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，书中增加了有关案例、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、白宏洁（绪论、第二章），黄河水利职业技术学院郭遂安（第一章），黄河水利职业技术学院彭明（第三章），安徽水利水电职业技术学院满广生、曲恒绪（第四章），河南开封黄河河务局曹宝田（第五章）。全书由王建伟、彭明、满广生任主编，曲恒绪任副主编，郑州大学李平先教授主审。

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

2009年6月

目 录

前言

绪论	1
第一章 钢结构的材料与设计方法	5
第一节 钢结构的材料	5
第二节 钢结构的设计方法	13
思考题	16
第二章 钢结构的连接	17
第一节 连接方法及特点	17
第二节 焊接方法及焊缝强度	18
第三节 对接焊缝连接	20
第四节 角焊缝连接	24
第五节 焊接应力和焊接变形	33
第六节 螺栓连接	35
思考题	47
计算题	48
第三章 钢梁	49
第一节 钢梁的种类和截面形式	49
第二节 钢梁的强度和刚度	51
第三节 钢梁的整体稳定	57
第四节 型钢梁设计	59
第五节 焊接组合梁	61
第六节 钢梁的局部稳定	65
第七节 钢梁的拼接、连接和支座	68
思考题	71
计算题	71
第四章 其他受力构件	73
第一节 轴心受力构件	73
第二节 拉弯和压弯构件	83
思考题	89

计算题	89
第五章 平面钢闸门	92
第一节 概述	92
第二节 平面钢闸门的结构布置	95
第三节 平面钢闸门的构造	99
思考题	108
附录	109
附录一 钢材和连接的强度设计值和容许应力	109
附录二 疲劳计算的构件和连接分类	113
附录三 梁的整体稳定系数	115
附录四 轴心受压构件的整体稳定系数	119
附录五 型钢表	122
附录六 型钢的螺栓（铆钉）准线表	138
附录七 螺栓和锚栓的规格	139
附录八 材料的摩擦系数	140
附录九 钢闸门自重估计公式	140
附录十 轴套的容许应力和混凝土的容许应力	141
参考文献	142

绪 论

一、概述

在工程建筑物中，由建筑材料制作的若干构件连接而组成的承重骨架称为建筑结构。按所用材料的不同，建筑结构可分为钢筋混凝土结构、钢结构、砌体结构等类型。

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。

在水利水电工程中，钢结构主要用于压力钢管（图 0-1）、闸门（图 0-2）、启闭机（图 0-3）等。主要构件形式为梁、柱等。这部分内容的学习任务是：构件尺寸拟定、荷载计算、内力（弯矩 M 、剪力 V 、压力 N 等）计算、强度计算、稳定计算等。

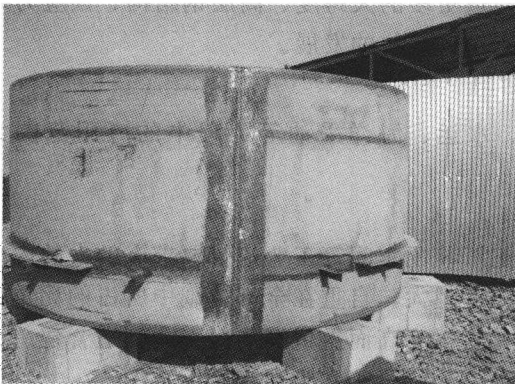


图 0-1 压力钢管



图 0-2 钢闸门

1. 钢结构的优点

- (1) 强度高，重量轻。
- (2) 内部组织较均匀，塑性、韧性好。
- (3) 可焊性好。
- (4) 制造简便，施工方便，装配性好。
- (5) 密封性好。

2. 钢结构的缺点

- (1) 耐热但不耐高温。
- (2) 耐腐蚀性差。
- (3) 在低温和其他条件下容易发生脆性断裂。

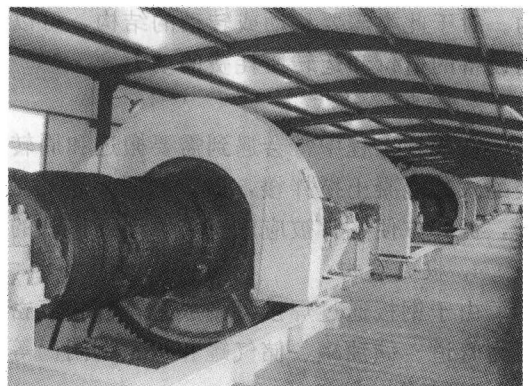


图 0-3 启闭机

二、钢结构的发展概况

中华人民共和国成立后，钢结构设计理论、结构制造安装等方面都有较快发展。在钢结构桥梁、大跨度工业厂房、大型公共建筑和高耸结构、水利工程等方面都有较多的应用。

在钢结构桥梁方面，1957年建成武汉大桥；1992年建成九江长江大桥；1993年建成上海黄浦大桥。

在公共建筑方面，采用大跨度的平板网架，悬索结构等，如1990年建成的亚运村综合馆，2008年建成的拥有91000个座位的国家体育场——鸟巢，“鸟巢”钢结构总重4.2万t，最大跨度332.3m。2008年6月建成的苏通大桥，主桥为七跨双塔双索面钢箱梁斜拉桥，主跨1088m，全长2088m。

用钢结构建成的塔架、桅杆结构也较多，如黑龙江广播电视塔被称为龙塔，坐落在哈尔滨市，高度336m，为亚洲第一钢塔。正在建设的河南广播电视塔，塔身为全钢结构，高度388m。

著名的三峡工程船闸闸门是“人字门”，共有12对闸门，其中最大的单扇尺寸为20.2m×38.5m×3m，是目前世界上罕见的巨型钢闸门。

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。

三、钢结构的应用

钢结构在工业与民用建筑、水利、水电、水运、海洋采油等工程中的应用范围大致如下。

1. 大跨度结构

体育馆、影剧院、大会堂等公共建筑以及工厂装配车间等工业建筑要求有较大的内部自由空间，故屋盖结构的跨度通常很大。结构跨度越大，自重在全荷载中所占的比重也就越大，减轻自重可以获得明显的经济效果。钢材强度高而重量轻的优点尤其适合建造大跨度结构。水利枢纽升船机的承船厢、铁路、公路的桥梁等常为大跨度钢结构。

2. 活动式结构

水工结构中大量采用的钢闸门、阀门、拦污栅、船闸闸门、升船机等均为活动式结构。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。

3. 装拆式结构

在水利工程中常会遇到需要搬迁和周转使用的结构。例如施工用的钢栈桥、钢模板，装配式的混凝土搅拌楼，砂、石骨料的输送架等。由于钢结构重量轻，且可利用螺栓连接，拆卸方便，常被应用于需拆迁、移动的结构。

4. 板壳结构

由于钢板通过焊接可制成水密性、气密性较好的密闭结构，因此钢结构广泛用于大型压力管道、储油罐、储气罐和水工钢闸门等。

5. 高耸结构

主要指承受风荷载的塔架、桅杆等结构，由于钢结构强度高、自重轻及运输安装方

便, 并且所需构件截面尺寸小, 能减少风荷载作用, 被广泛用于高耸结构中。如输电线铁塔、微波塔、电视转播塔、石油钻井架等多为钢结构。

6. 海洋工程钢结构

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, 中间由轻便的栈桥相连接。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海上安装等特点。

7. 受动力荷载作用的结构

重型工业厂房中的吊车起重量较大, 有时作业较繁重, 受动力荷载影响明显。由于钢材抵抗动力荷载的性能好, 这类厂房的承重骨架和吊车梁多采用钢结构。如冶金工厂的炼钢、轧钢车间, 造船厂的船体车间以及飞机制造厂的装配车间等。另外有较大锻锤或其他动力设备或振动设备的厂房, 对抗震要求较高的结构也宜采用钢结构。

8. 轻型钢结构

跨度小、屋面轻的工业、民用或商用房屋、广告牌架, 常采用轻型钢结构。这种钢结构是用小角钢、圆钢或冷弯薄壁型钢作为构件, 其屋面和墙体采用轻型材料如压型钢板等。这类结构的优点是重量轻、用钢量省、建设速度快且外形美观, 用钢量比普通钢结构节约 25%~50%。

四、水工钢结构的发展方向

水工钢结构的发展主要表现在以下几个方面。

1. 优质高强钢材的研制和应用

钢结构传统上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(合金元素总含量一般为 1%~2%, 不超过 5%), 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、耐磨性及耐低温等特殊性能。屈服强度 $f_y=345\text{N/mm}^2$ 的 16 锰(16Mn) 钢在我国最为常用, 其次为 15 锰钒(15MnV) 钢, 屈服强度 $f_y=390\text{N/mm}^2$ 。此外, 屈服强度 $f_y=390\text{N/mm}^2$ 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。

采用高强度低合金钢可大大节约钢材, 提高结构使用寿命, 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 锰桥钢所建造。1992 年建成的九江长江大桥采用的是 15 锰钒氮钢。

为了合理地利用材料, 对于由稳定控制的构件宜采用价格较低的 Q235 钢(普通碳素钢); 对于由强度控制的构件, 宜采用强度较高的 Q345、Q390 或 Q420 钢(高强度低合金钢)。

2. 不断创新合理的结构型式

钢与混凝土组合构件充分利用了钢材抗拉和混凝土抗压的特性, 且使一个构件具有多种用途, 因此是一种非常合理和经济的结构。

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梁结构, 钢梁与钢筋混凝土板间用抗剪件相连而使整个结构整体工作。

钢管混凝土结构也是一种组合结构，当用于受压构件时，不仅混凝土受到钢管的约束而提高了抗压强度，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为提高，且具有良好的塑性和韧性，经济效益显著。钢管也具有双重功能，既承受荷载，又代替了模板，因此施工很方便。

组合构件是一种很有发展前途的结构形式，有待进一步研究开发。

3. 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等。

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。

4. 钢结构的标准化和系列化

钢结构制造工业的机械化水平需要进一步提高。改进工艺和革新设备，使有些构件可以系列化、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，提高劳动生产效率的有效措施。

五、本课程的性质和学习任务

水工钢结构是水利水电建筑工程专业及其专业群中的一门专业技能课程。本课程的任务是阐述常用结构钢的工作性能、钢结构的连接设计、钢结构构件基础设计原理以及平面钢闸门的结构构造。通过本课程的学习，学生应掌握钢结构基本构件的设计理论、设计方法及其构造知识，熟悉和运用相应的结构设计规范，为学习专业课程和从事水工钢结构的施工与设计打下良好的基础。

学习本课程应注意以下几个方面：

(1) 水工钢结构是结构工程中按材料划分出来的一门学科。由于建筑材料的力学性能和强度理论异常复杂，有些难以用理论推导计算公式，有些计算公式是在大量的试验和适当假定基础上建立起来的。学习时要重视这种通过试验和假定建立理论的方法。

(2) 注重构造规定。构造规定是长期科学实验和工程经验的总结，要充分重视对构造知识的学习，不要死记硬背构造规定的具体条文，应注意弄清其中的道理。

(3) 理论联系实际。本课程的实践性较强，许多内容与我国现行的钢结构设计规范和工程实践联系密切。学习时应重视实践，通过作业、现场教学、课程实训、生产实习、顶岗实习等实践教学环节，进一步熟悉和运用规范，逐步培养学生综合分析问题和解决问题的能力。

第一章 钢结构的材料与设计方法

【学习提要】 本章学习钢材的工作性能以及影响钢材性能的主要因素，钢材的种类与规格，钢结构的极限状态设计法和容许应力设计法。

本章重点掌握钢材的机械性能，影响钢材性能的主要因素，钢材的种类与规格，钢结构的设计计算方法。

第一节 钢结构的材料

钢材的种类很多，其性能、用途和价格各不相同，适用于钢结构的建筑钢材只是其中的一小部分。钢结构常常需要在各种不同的环境和条件下承受各种荷载作用，所以用于钢结构的钢材应具有较高的强度、较好的塑性、韧性以及耐疲劳性能，同时也应具有良好的加工性能，包括冷、热加工和焊接性能。此外，根据结构所处的特殊工作环境，有时还要求钢材具有良好的低温、高温及耐腐蚀性能，以保证结构的安全可靠和经济适用。

根据上述要求，我国现行《钢结构设计规范》（GB 50017—2003）推荐使用的钢材，有碳素结构钢中的 Q235 钢以及低合金高强度结构钢中的 Q345、Q390 及 Q420 钢。

一、建筑钢材的两种破坏形式

钢材的强度断裂破坏可分为塑性破坏和脆性破坏两种形式。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，但在一些不利的工作条件下，仍有脆性破坏的可能性。

(1) 塑性破坏。钢材在常温和静力荷载作用下，当其应力超过屈服点 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，且变形持续的时间长，有明显的破坏预兆，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，一般不会引起严重后果。因此钢结构极少发生塑性破坏。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。

(2) 脆性破坏。当钢材承受动力荷载（包括冲击荷载和振动荷载）或处于复杂应力、低温等情况时，常会发生低应力脆性破坏。这种脆性断裂的应力常低于钢材的屈服点 f_y ，破坏前变形甚微，没有明显塑性变形，同时裂缝开展速度极快，可达 1800m/s。实践证明，脆性破坏发生突然，且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。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，采取一切合理措施，尽可能避免脆性破坏的

发生。

二、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。钢材的主要强度指标和塑性指标，是常温、静载下对钢材标准试件进行单向拉伸试验测定的。通过试验，可得到建筑钢材的三个重要机械性能指标：屈服强度 f_y 、抗拉强度 f_u 和伸长率 δ 。

屈服强度 f_y 和抗拉强度 f_u 是钢材的强度指标，其值越大钢材的承载力越高。

伸长率 δ 是衡量钢材塑性的主要指标，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。伸长率 δ 越大表明钢材的塑性越好。钢材的塑性是指钢材在外力作用下产生较大塑性变形后尚不致破坏的能力。良好的塑性有助于缓和钢构件的局部应力集中，避免钢结构在使用中发生突然的脆性破坏。

虽然钢材在应力达到极限抗拉强度 f_u 时才发生断裂，但是钢结构在设计时以钢材的屈服强度 f_y 作为静力强度的承载极限。即取钢材的标准强度 $f_k = f_y$ 。选择屈服强度 f_y 作为建筑钢材承载力极限的依据是：

(1) 钢材屈服后，塑性变形很大，塑性变形过大会使结构失去正常使用功能而达到正常使用极限状态，无法利用强化阶段。

(2) 钢材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，以免突然发生破坏。

(3) 抗拉强度和屈服点的比值较大 (Q235 钢: $f_u/f_y \approx 1.6 \sim 1.9$)，成为结构极大的后备强度。

碳素结构钢和低合金钢有明显的屈服点。而热处理钢材有较好的塑性性质，但没有明显的屈服点。对于没有明显屈服阶段的钢材，以试件卸载后塑性应变 0.2% 时所对应的应力作为屈服强度，称为名义屈服强度，也用 f_y 表示。

钢材在一次压缩或剪切时表现出来的应力与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及抗剪强度均较受拉时为低；剪变模量 G 也低于弹性模量 E 。

(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，冷弯性能由冷弯试验来检验。以试件冷弯 180° 表面不出现裂纹或分层为合格。冷弯试验不但能直接检验钢材冷加工弯曲时产生塑性变形的能力，而且还能暴露出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。

(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。钢材的冲击韧性用冲击试验测定，钢材的冲击韧性值用 A_{kv} 表示 (单位为 J)，其值为冲断试件所需的功。冲击韧性值越大，表明材料的韧性越好，抵抗脆性破坏的能力越强。

由于低温对钢材的脆性破坏有显著影响，当温度低于某值时，冲击韧性将急剧降低。对于低温下工作的重要构件，尤其是受动力荷载作用的结构，不但要保证常温 (20℃) 冲

击韧性指标, 还要保证负温 (0°C 、 -20°C 或 -40°C) 冲击韧性指标, 以保证结构具有足够的抗脆性破坏能力。

三、钢材的疲劳

(一) 疲劳破坏的特征

建筑结构中的有些构件, 如吊车梁和支承振动设备的平台梁等, 所受的不是静力荷载, 而是大小和方向随时间变化的荷载, 称为循环荷载 (亦称重复荷载)。

图 1-1 为几种连续循环荷载在钢材内引起的应力随时间变化的曲线。图中从最大应力到最小应力重复一周为一次应力循环。应力循环特性常用应力比值 $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ 表示 (拉应力取正值, 压应力取负值)。应力变化的幅度称为应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$, 即应力循环中的最大应力 σ_{\max} 和最小应力 σ_{\min} 之差。应力幅总是正值。

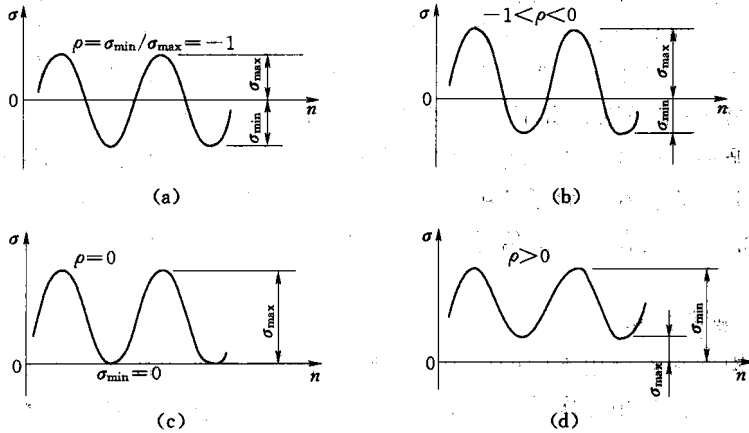


图 1-1 循环荷载的应力循环形式

当所有应力循环中的应力幅保持常量时称为常幅应力循环, 如应力幅值不是常量而是随机变量, 则称为变幅应力循环。前者比后者容易发生疲劳破坏。

钢材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, 钢材会发生突然断裂破坏, 这种现象称为钢材的疲劳或疲劳破坏。疲劳破坏属于脆性破坏, 破坏时塑性变形极小, 破坏突然发生, 危险性较大, 往往导致整个结构的毁灭性破坏。

从宏观表面上看, 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, 疲劳破坏是钢材内部的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。

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。在反复荷载的持续作用下, 裂缝不断开展, 有效截面不断减小, 应力集中现象越来越严重, 更促使裂缝的继续开展, 形成恶性循环。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，在循环荷载作用下将加剧疲劳破坏的倾向。构件截面几何形状的改变也会引起应力集中，对疲劳工作不利。

钢材在连续循环荷载作用下，经过许多次循环后出现疲劳破坏，相应的最大应力 σ_{\max} 称为疲劳强度。试验证明，循环荷载的作用次数越多，疲劳强度越低。国际标准化组织建议取循环次数 $n=5 \times 10^6$ 次时对应的 σ_{\max} 称为极限疲劳强度。研究表明，结构非焊接部位的疲劳强度与应力幅、应力比值有关；结构焊接部位的疲劳强度主要与应力幅有关。钢材的疲劳强度还与应力集中程度和应力循环次数有关，应力集中越严重，荷载循环次数越大，钢材越容易发生疲劳破坏。钢材的疲劳强度和钢材的静力强度无明显关系，即采用高强度钢材增加构件的疲劳强度是不经济的。

不同类型构件和连接的疲劳强度各不相同，规范将不同类型构件和连接形式按应力集中的影响程度由低到高分 8 类（表 1-1），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 类为无应力集中影响的主体金属，第 8 类则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。

长期承受循环荷载作用的钢结构构件及其连接，当应力变化的循环次数 $n \geq 5 \times 10^4$ 时，应进行疲劳计算。在应力循环中不出现拉应力的部位不必进行疲劳计算。疲劳计算采用容许应力幅法，采用荷载标准值进行计算，应力按弹性状态计算（即按工程力学方法计算）。

（二）常幅疲劳计算

对不同的构件和连接用不同的应力幅在疲劳试验机上进行常幅循环应力试验可得常幅疲劳破坏时的应力幅与循环次数的关系。应力幅与循环次数的对数关系接近于直线，如图 1-2 所示。该直线方程为：

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

或写成：
$$\lg \Delta\sigma = \frac{1}{\beta} (\lg C - \lg n) = \lg \left(\frac{C}{n} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

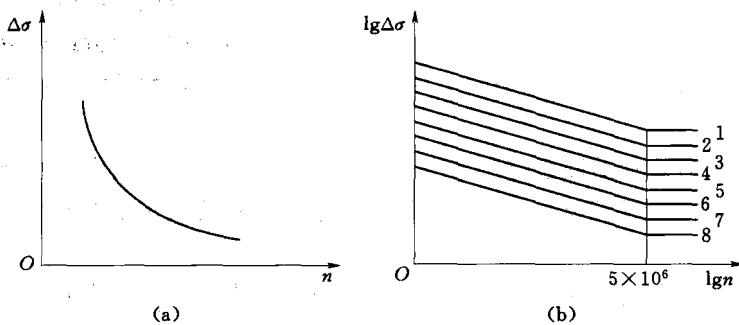


图 1-2 $\Delta\sigma-n$ 曲线

考虑安全系数后，得到对应于循环次数 n 的容许应力幅为：

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

式中 $[\Delta\sigma]$ ——常幅疲劳的容许应力幅；
 C 、 β ——计算系数，按构件和连接类别查表 1-1；
 n ——使用期间预期应力循环次数。

表 1-1 系数 β 和 C 值

构件和连接类别	1	2	3	4	5	6	7	8
C	1940×10^{12}	861×10^{12}	3.26×10^{12}	2.18×10^{12}	1.47×10^{12}	0.96×10^{12}	0.65×10^{12}	0.41×10^{12}
β	4	4	3	3	3	3	3	3

为保证构件和连接不发生疲劳破坏，当应力循环次数 $n \geq 5 \times 10^4$ 次时，应按式 (1-2) 进行疲劳计算：

$$\Delta\sigma \leq [\Delta\sigma] \quad (1-2)$$

式中 $\Delta\sigma$ ——计算部位的设计应力幅，对焊接部位， $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$ ；对非焊接部位，因无残余应力，试验证明取折算应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.7\sigma_{\min}$ 。计算 σ_{\max} 和 σ_{\min} 时，按荷载标准值计算，不考虑动力系数。

(三) 变幅疲劳计算

实际工程结构中，很多构件承受的是变幅循环应力的作用，如吊车梁、吊车桁架等。由于吊车并非每次都满载运行，吊车小车也不是都在极限位置，而且吊车运行速度在不断变化，所以每次循环应力幅不是都达到最大值，若仍按常幅疲劳计算显然比较保守。规范采用的验算方法，是将变幅应力谱按各应力幅出现的概率，根据线性累计损伤原理，找出应力幅为常数的等效力幅，按常幅进行疲劳验算：

$$\Delta\sigma_e = \left[\frac{\sum n_i (\Delta\sigma_i)^\beta}{\sum n_i} \right]^{\frac{1}{\beta}} \leq [\Delta\sigma] \quad (1-3)$$

式中 $\Delta\sigma_e$ ——变幅疲劳的等效力幅；
 $\Delta\sigma_i$ ——随机荷载下的应力幅；
 $\sum n_i$ ——以应力循环次数表示的结构预期使用寿命；
 n_i ——相应于 $\Delta\sigma_i$ 的应力循环次数；

$[\Delta\sigma]$ ——按式 (1-1) 计算。

工业建筑中的吊车梁和吊车桁架经常处于欠载工作状态，规范对其进行变幅疲劳计算时，将它的最大（即满负荷）的应力幅乘以欠载效应系数 α_f ，等效转换为循环次数 $n = 2 \times 10^6$ 的常幅疲劳计算，计算公式为：

$$\alpha_f \Delta\sigma \leq [\Delta\sigma]_{2 \times 10^6} \quad (1-4)$$

式中 α_f ——欠载效应的等效系数，对重级工作制硬钩吊车（如工厂车间的夹钳吊车）， $\alpha_f = 1.0$ ，重级工作制软钩吊车 $\alpha_f = 0.8$ ，中级工作制吊车 $\alpha_f = 0.5$ ；

$[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ ——循环次数 2×10^6 时的容许应力幅，按式 (1-1) 计算。

四、影响钢材力学性能的主要因素

(一) 化学成分

钢的基本元素是铁 (Fe)，普通碳素结构钢中含铁约 99%。其他元素有碳 (C)、硅

(Si)、锰(Mn)、硫(S)、磷(P)、氧(O)、氮(N)等,他们的总和占1%左右。在低合金钢中,除上述元素外,还有少量合金元素,如铜(Cu)、钒(V)、钛(Ti)、铌(Nb)、铬(Cr)等,总含量低于5%。尽管钢材中除铁以外的其他元素含量不大,但对钢材的力学性能却影响极大。

碳(C)是形成钢材强度的主要成分。含碳量高,则钢材强度高,但同时钢材的塑性、冲击韧性、冷弯性能、疲劳强度、可焊性及抗锈蚀能力都显著下降。故结构用钢的含碳量一般不应超过0.22%,焊接结构中则应限制在0.2%以下。

硅(Si)是强脱氧剂,是制作镇静钢的必要元素。硅适量时可提高钢材的强度而不显著影响其塑性、韧性、冷弯性能及可焊性。过量时会恶化钢材的塑性、冲击韧性、可焊性及抗锈蚀性。硅的含量在碳素结构钢中一般不应大于0.30%,低合金钢中不应大于0.55%。

锰(Mn)是有益元素,它能显著提高钢材的强度而不过多降低塑性和冲击韧性。过量时会使钢材变脆,并降低钢材的可焊性和抗锈蚀性。锰的含量在碳素结构钢中一般为0.30%~0.80%;在低合金高强度结构钢中为1.00%~1.70%。

硫(S)是有害元素。硫在钢材温度达到800~1000℃时生成硫化铁而熔化,使钢材变脆,易出现裂缝,称为热脆。硫还会降低钢材的冲击韧性、可焊性、疲劳强度及抗蚀能力。因此,对硫的含量必须严加控制,一般不应超过0.035%~0.045%。

磷(P)可以提高钢材的强度和抗锈蚀能力,但却严重降低钢材的塑性、韧性和可焊性,特别是在温度较低时使钢材变脆(冷脆),因而应严格控制其含量。一般不应超过0.045%。

氧(O)和氮(N)也是有害元素,氧能使钢材热脆,其作用比硫剧烈;氮能使钢材冷脆,与磷类似,故其含量应严格控制。一般氧的含量应低于0.05%;氮的含量应低于0.008%。

钒(V)和钛(Ti)是钢中的合金元素,能提高钢材的强度和抗锈蚀性,又不显著降低塑性。

铜(Cu)在碳素钢中属杂质成分,它可以提高钢材的强度和抗锈蚀性能,但对可焊性不利。

(二) 冶金缺陷

常见的冶金缺陷有偏析(钢材中化学成分分布不均匀)、非金属夹杂(钢中含有硫化物和氧化物等杂质)、气孔、裂纹及分层(钢材在厚度方向不密合,分成多层)等。这些缺陷会降低钢材的力学性能。选用钢材时,应充分重视冶金缺陷的影响。

(三) 构造缺陷

钢材的主要机械性能指标是以标准试件受均匀拉力试验为基础的。实际上在钢结构的构件中总是存在着刻槽、孔洞、凹角、截面突变等构造缺陷。此时,构件中的应力分布将不再保持均匀,而是在某些区域产生局部高峰应力,在另外一些区域内则应力降低,形成应力集中现象,在负温下或受动力荷载作用的结构,应力集中的不利影响将十分突出,往往是引起脆性破坏的根源,故在设计中应采取避免或减小应力集中,并选用质量优良的钢材。