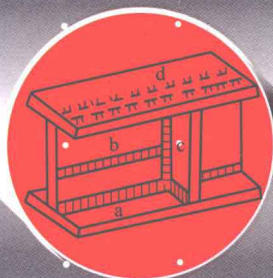
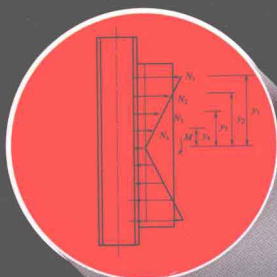
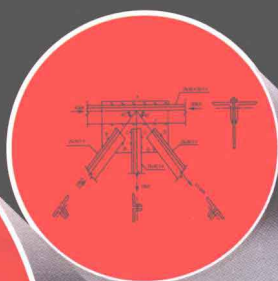


QIZHONG JIXIE GANGJIEGOU SHEJI

起重机械 钢结构设计

王积永 张青 沈孝芹 等编著

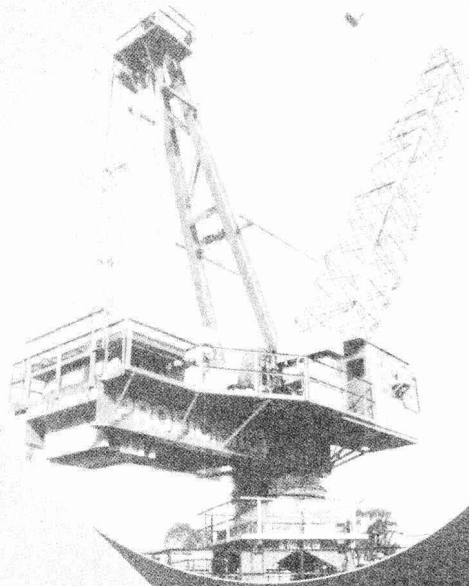


化学工业出版社

QIZHONG JIXIE GANGJIEGOU SHEJI

起重机械 钢结构设计

王积永 张青 沈孝芹 等编著



化学工业出版社

本书依据最新的《起重机设计规范》(GB/T 3811—2008)给出了工程机械金属结构的设计计算理论、计算方法,并结合作者多年来工程起重机设计、生产和教学的实践和教学的经验以工程起重机械为例给出了涵盖几乎所有金属结构构件的设计过程、设计方法的实例。

本书可供起重机设计人员、工程机械设计人员查阅和参考,也可作为高等院校工程机械专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

起重机械钢结构设计/王积永,张青,沈孝芹等编著. —北京:
化学工业出版社, 2011. 7

ISBN 978-7-122-11157-9

I. 起… II. ①王…②张…③沈… III. 起重机械-钢结构-结构设计 IV. TH210.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第076247号

责任编辑:张兴辉

文字编辑:张燕文

责任校对:蒋宇

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张16½ 字数420千字 2011年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究



FOREWORD

起重机械钢结构为起重机械产品的支承体系,钢结构的重量通常占整台机械重量的60%~70%,有的机械如塔式起重机的金属结构占整机重量的90%,钢结构设计不仅肩负着安全的重任,而且其结构的优化,与产品的造型、性能及产品成本密切相关。随着计算理论、计算手段和设计方法的发展,设计规范版本不断更新,机械工程及自动化专业学生的教材需要更新,广大起重机械专业技术人员需要一本应用新的设计规范、新的设计理论和方法的专业化书籍。

本书根据高等工科院校教学基本要求,结合作者多年起重机设计、生产及租赁的实际经验和教学经验进行编写。依据最新的《起重机设计规范》给出了工程机械金属结构的设计计算理论、计算手段,并结合作者多年来工程起重机设计、生产和教学的实践和教学的经验以工程起重机械为例给出了涵盖几乎所有金属结构构件的设计过程、设计方法的实例。具有以下两大特点:

1. 理论最新,依据最新的《起重机设计规范》(GB/T 3811—2008);
2. 实例丰富,涵盖了塔式起重机的所有金属结构部件和流动式起重机和其他工程机械工作装置的金属结构部件。

本书第2~6章为金属结构的材料和设计计算,构件强度、刚度和整体稳定计算、板件和壳体的抗屈曲计算、金属结构的连接及结构抗疲劳强度计算,主要介绍起重机金属结构的知识和设计理论;第7~10章为轴心受力构件设计、实腹受弯构件设计、偏心受力构件设计、桁架结构设计,结合工程实例,主要介绍起重机金属结构设计理论的应用,各类结构件的设计方法、流程及各环节注意的要点。

本书第1、4、7、8、9、10章由王积永撰写,第3、5章由张青撰写,第2、6章由沈孝芹撰写,全书由王积永统稿和定稿,参加编写的还有山东富友公司的毛瑞年、何继红,研究生李磊等。山东建筑大学机电学院工程机械教研室的多位老师对本书的编写给予了很多帮助和支持,在此表示衷心的感谢!

鉴于编者水平所限,不妥之处在所难免,恳请广大读者朋友批评指正。

编者



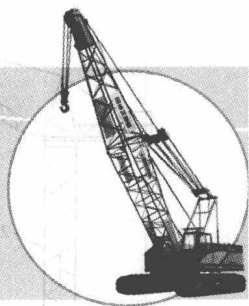
CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 起重机械钢结构的应用	1
1.2 起重机械钢结构的分类	1
1.3 起重机械钢结构的特点	4
1.4 起重机械钢结构设计的基本要求和研究方向	5
第 2 章 起重机械钢结构材料	7
2.1 钢材的主要力学性能	7
2.2 钢材的脆性破坏	9
2.3 钢材的标号、规格及其选择	11
第 3 章 计算载荷与设计方法	21
3.1 计算载荷与载荷系数	21
3.2 载荷情况与载荷组合	34
3.3 钢结构计算方法	35
3.4 起重机械钢结构计算	40
第 4 章 结构构件的强度、刚度及稳定性	46
4.1 轴心受力构件的强度、刚度及整体稳定	46
4.2 梁的强度、刚度及整体稳定	55
4.3 偏心受力构件强度、刚度和整体稳定	62
4.4 薄板结构局部稳定性	73
第 5 章 结构件的连接及计算原理	84
5.1 连接类型	84
5.2 焊缝连接	85
5.3 普通螺栓连接	101
5.4 高强螺栓计算	111
第 6 章 结构件及连接的疲劳强度	122
6.1 循环作用的载荷和应力	122

6.2	结构及其连接的工作级别	124
6.3	疲劳极限	125
6.4	疲劳强度校核	131
6.5	疲劳验算算例	132
第7章	轴心受力构件的结构及设计	135
7.1	构件的类型和截面形式	135
7.2	实腹式轴心受压构件设计	136
7.3	格构式轴心受压构件设计	141
7.4	构件的计算长度	147
第8章	实腹受弯构件结构及设计	155
8.1	实腹受弯构件的类型和截面形式	155
8.2	组合梁截面设计	155
8.3	梁的构造设计	164
第9章	偏心受力构件结构及设计	175
9.1	偏心受力构件的种类和截面形式	175
9.2	偏心受压构件板的宽厚比	175
9.3	缀材及单肢的设计	178
9.4	偏心受力构件截面设计	180
9.5	偏心受压构件构造设计	186
第10章	桁架	190
10.1	桁架的结构和应用	190
10.2	桁架的外形和桁架的腹杆系统	191
10.3	桁架的主要参数	192
10.4	桁架杆件内力分析	193
10.5	桁架杆件的计算长度	194
10.6	桁架节点设计和弦杆拼接	196
10.7	桁架的挠度和拱度	202
附录一	影响脆性破坏因素评价和钢材质量组别的选择	204
附录二	常用钢板及型钢截面特性表	207
附录三	组合截面和回转半径与截面尺寸近似比值 α	227
附录四	轴心受压构件的稳定系数	228
附录五	起重机金属结构的载荷与载荷组合表	232
附录六	桁架节点板在斜腹杆压力作用下的稳定计算	234
附录七	GB/T 3811 附录	235

第1章

绪论



1.1 起重机械钢结构的应用

以钢材为原料轧制的型材（角钢、工字钢、槽钢、钢管等）和板材作为基本元件，通过焊接、螺栓或铆钉连接等方式，按一定的规律连接起来制成能够承受起重机械外载荷的结构称为起重机械钢结构。

由于钢结构具有强度高、重量轻、质量稳定等独特优点，已在工业部门获得非常广泛的应用。在传统的工业部门，如工业与民用建筑业中的建筑结构，交通运输业中的船舶、车辆、飞机、桥梁，电力部门中的高架塔桅，水工建筑中的闸门、大型管道以及机械工业中的起重机械、重型机械等方面，在新兴的宇航工业、海洋工程中都大规模应用了钢结构。

1.2 起重机械钢结构的分类

钢结构的类型很多，可以根据钢结构基本元件几何特征、结构外形、连接方式以及外载荷与结构构件在空间的相互位置这四种情况来区分。

1.2.1 根据结构构件几何特征分类

钢结构基本元件根据其几何特征，可分为杆系结构和板结构。

(1) 杆系结构

若干杆件按照一定的规律组成几何不变结构，称为杆系结构。其特征是每根杆件的长度远大于宽度和厚度，即截面尺寸较小。常见的塔式起重机的臂架和塔身（图 1-1），轮胎式起重机的臂架（图 1-2），都是杆系结构。

(2) 板结构

板结构由薄板焊接而成，薄板的厚度远小于其他两个尺寸，故又称薄壁结构。汽车起重机箱形伸缩臂架、转台、车架、支腿（图 1-3）及挖掘机的动臂、斗杆、铲斗（图 1-4）等属于板结构。

1.2.2 根据结构构件外形分类

根据结构构件外形的不同，可分为臂架结构（图 1-1、图 1-2）、车架结构（图 1-2、图 1-3）、塔架结构（图 1-1）、人字架转台（图 1-2）、门架结构等。图 1-5 所示为推土机刀架计算简图，属于门架结构。常见的还有龙门起重机的龙门架（图 1-6）、叉车的门架等。

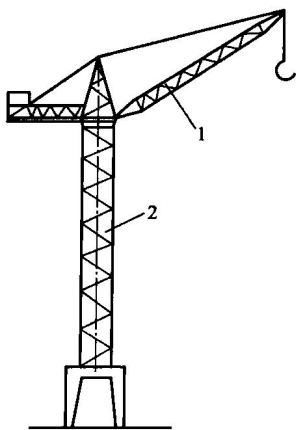


图 1-1 塔式起重机
1—臂架；2—塔身

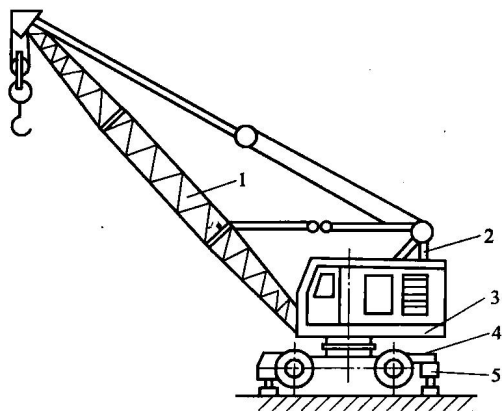


图 1-2 轮胎式起重机
1—臂架；2—人字架；3—转台；4—车架；5—支腿

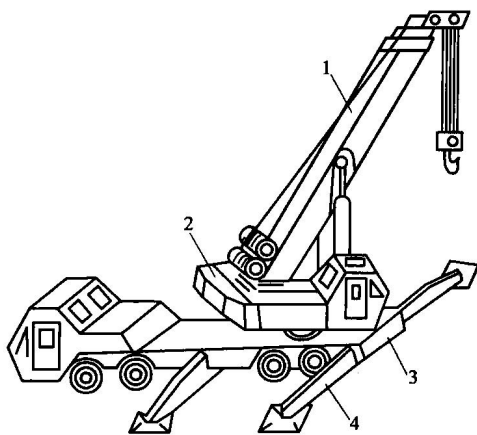


图 1-3 汽车起重机
1—臂架；2—转台；3—车架；4—支腿

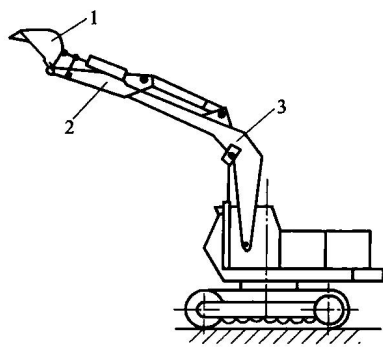


图 1-4 液压挖掘机
1—铲斗；2—斗杆；3—动臂

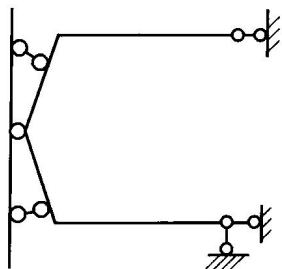


图 1-5 推土机刀架简图

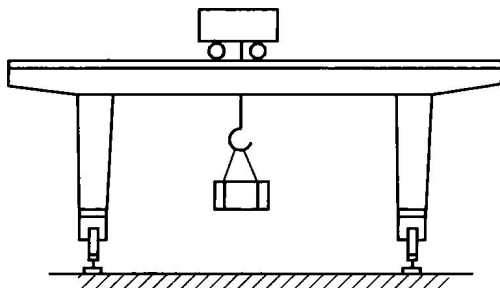


图 1-6 龙门起重机

1.2.3 根据结构构件连接方式分类

根据结构构件连接方式的不同，可分为铰接结构、刚接结构和混合结构。

(1) 铰接结构

铰接结构中所有节点都是理想铰，即不承受和传递弯矩。钢结构中极少有铰接结构，只是如果杆系结构中杆件受弯矩甚小，主要承受轴向力，或者当节点处的连接状态与铰接连接很相近时，如塔式起重机的臂架、塔身，在设计计算时，可近似简化为铰接结构处理。

(2) 刚接结构

刚接结构也称刚架结构。这种结构的特点是杆件连接处比较刚强。在外载荷作用下，节点处各构件之间的原有相互夹角不会变化，或变化甚小可忽略不计，节点能承受较大弯矩。龙门起重机的门架就是刚接结构。

(3) 混合结构

混合结构的特点是既有铰接连接的节点，又有刚接连接的节点。

1.2.4 根据外载荷与结构杆件在空间的相互位置分类

根据外载荷与结构杆件在空间的相互位置不同，结构可分为平面结构和空间结构。

(1) 平面结构

外载荷的作用线和全部杆件的中心轴线都处在同一平面内，则结构称为平面结构。

在实际结构中，直接应用平面结构的情况较少，但许多实际结构通常由平面结构组合而成，故可简化为平面结构来计算。图 1-7 所示的塔式起重机水平臂架上，小车轮压、结构自重与架式臂架平面共面，因此该臂架也可简化为平面结构计算。

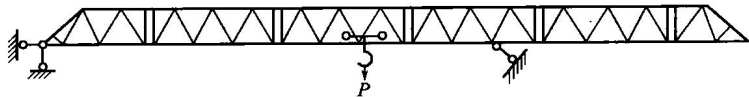


图 1-7 塔式起重机水平臂架简图

(2) 空间结构

当结构杆件的中心轴线不在同一平面，或者结构杆件的中心轴线虽位于同一平面，但外载荷作用线却不在其平面内，这种结构称为空间结构。图 1-8 所示的轮胎式起重机车架，即为空间结构。

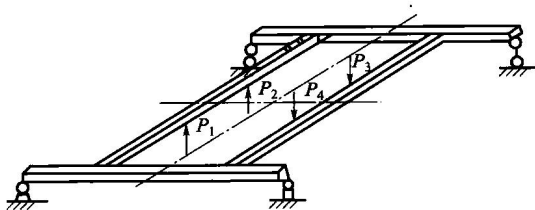


图 1-8 轮胎式起重机车架简图

1.2.5 根据构件受力特点

上述四种不同的分类方式，表明钢结构形式很多。但它们都是由一些基本受力构件组成，这些基本构件主要有如下几种。

(1) 受弯构件

如龙门起重机的水平横梁，轮式起重机车架的纵梁和横架等。这些构件的受力特点是仅

受弯矩作用。

(2) 轴心受力构件

如汽车起重机电人字架的拉、压杆及车架的支腿，压杆式塔式起重机的臂架等。其受力特点是构件轴心受拉或受压。

(3) 偏心受力构件

如小车式塔式起重机的水平臂架、汽车起重机臂架等。这种构件的受力特性是除了受轴心压力外，同时还承受横向弯曲，或者轴力不通过构件截面形心而具有一定偏心距，以致产生偏心弯矩。

1.3 起重机械钢结构的特点

钢结构与其他材料制成的结构相比，具有下列一些特点。

(1) 强度高、重量轻

钢结构大都采用钢材。钢材比木材、砖石、混凝土等建筑材料的强度要高出很多倍，因此当承受的载荷和条件相同时，用钢材制成的结构自重较轻，所需截面较小，运输和架设也较方便。

(2) 塑性和韧性好

钢材具有良好的塑性，在一般情况下，不会因偶然超载或局部超载造成突然断裂破坏，而是事先出现较大的变形预兆，以便人们采取补救措施。钢材还具有良好的韧性，使得结构对常作用在起重机械上的动力载荷的适应性强，为钢结构的安全使用提供了可靠保证。

(3) 材质均匀

钢材的内部组织均匀，各个方向的物理力学性能基本相同，很接近各向同性体，在一定的应力范围内，钢材处于理想弹性状态，与工程力学所采用的基本假定较符合，故计算结果准确可靠。

(4) 制造方便、具有良好的装配性

钢结构由各种通过机械加工制成的型钢和钢板组成，采用焊接、螺栓连接或铆接等手段制造成基本构件，运至现场装配拼接。故制造简便、施工周期短、效率高，且修配、更换也方便。

(5) 密封性好

钢结构如采用焊接连接方式易做到紧密不渗漏，密封性好，适用于制作容器、油罐、油箱等。

(6) 耐腐蚀性差

起重机械经常处在潮湿环境中作业，用钢材制作的钢结构在湿度大或有侵蚀性介质情况下容易锈蚀，因而需经常维修和保护，如除锈、油漆等，维护费用较高。

(7) 耐高温性差

钢材不耐高温，随着温度的升高，钢材强度会降低，因此对重要的结构必须注意采取防火措施。

(8) 耐低温性差

低碳钢冷脆性一般以 -20°C 为界，对于我国的环境一般不用考虑其低温性能，对于出口俄罗斯、乌克兰等国家的钢结构就必须考虑钢材的低温性能。

1.4 起重机械钢结构设计的基本要求和研究方向

起重机械是一种工作条件十分繁忙的重型机械设备,经常承受变化的动力载荷,工作环境差,而作为起重机械骨架的钢结构,其设计制造质量的好坏将直接影响整机的技术经济指标和寿命。因此,为了保证机械正常作业,设计钢结构时应满足一些基本要求。

首先,必须符合整机设计要求,包括作业空间要求和机构动力学要求,保证机械能够有良好的运动性能。

其次,钢结构必须具备足够的承载能力,应有足够的静强度及规定寿命下的疲劳强度和构件的整体稳定、局部稳定;钢结构还应具有足够的静态刚性和动态刚性,以保证机械能够有良好的工作性能。

钢结构的重量通常占整台机械重量的60%~70%,有的机械如塔式起重机的钢结构部件占整机重量的90%,因此要求结构自重尽量轻,既节约材料,又可提高机械的工作性能。

钢结构的造型与受力情况、制造工艺性有关。应尽量使构造合理,适应结构受力特点,并有良好的制造工艺性,以方便安装、维修和运输。

起重机械的造型取决于结构的造型。设计钢结构时,应尽量使造型美观、大方。

根据上述的对钢结构的基本要求,钢结构设计制造的理论水平以及研究方向和趋势归纳如下。

(1) 研究和改进设计理论及计算方法

起重机械钢结构的设计和计算,至今我国无专门的设计规范,大多参考各种专业设计规范中的规定进行设计,如《起重机设计规范》(GB/T 3811—2008)、《塔式起重机设计规范》(GB/T 13752—92)和《钢结构设计规范》(GB 50017—88)。在这些设计规范中多采用以结构的极限状态为依据,进行多系数分析,用单一安全系数的许用应力算法。这种方法使用简便,但由于采用单一的安全系数,无法区别反映出各构件不同的超载情况,设计出的结构,或材料富余,或安全程度过低。随着试验技术的不断发展,近年来出现了一些新的计算方法,如建筑设计领域采用的以概率理论为基础的极限状态算法,如《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)。

当前,钢结构设计领域正在研究并不断得到应用的新的理论和计算方法有随机疲劳理论、动态设计理论、可靠性理论、断裂力学理论、稳定理论、有限元分析法、最优化设计法等。这些新理论和新方法极大地促进和提高了钢结构的设计水平。

(2) 改进现有的结构形式和开发新颖的结构形式

在保证机械工作性能的条件下,改进现有的结构形式和开发新颖的结构形式,能有效地减轻钢结构的自重,节省材料,从而降低造价。如采用合理的结构截面形式,改善截面几何特性,将厚壁结构改为薄壁结构,使用管形结构代替矩形结构等。结合具体机械,创造新颖的结构形式,可取得明显的经济效益。

(3) 研究采用新材料

材料对起重机械的性能,特别是对机械的可靠性、寿命和自重的影响较大。例如,每减轻100kg起重机自重,可提高30kg的起重量。研究采用轻金属或高强度结构钢制作钢结构,是减轻结构自重、节省材料的有效途径,我国已经在长江九江大桥和北京鸟巢体育馆成功地使用了Q420(15MnVN)低合金高强度结构钢材料。国外也有用铝合金制成的起重机臂架,自重可减轻30%~60%。也有的用硬质工程塑料制造起重机结构和零件,既明显减

轻自重，又节省材料、简化制造工艺。此外，国内外都在研究使用低合金高强度结构钢，使用这种强度高、材质好的钢材，可使钢结构体轻耐用。

(4) 改进制造工艺

除传统的焊接、铆接和螺栓连接外，目前还在研究和试用其他新型的连接方式，如高强度螺栓连接、胶合连接以及装配式结构和标准化冲压构件等。选择先进的制造工艺，可以提高生产率，降低制造成本。

(5) 钢结构的标准化和系列化

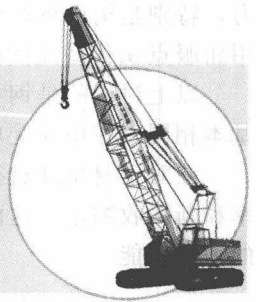
从设计着手，结合制造工艺，将一些易于标准化的构件，如桁架动臂式起重机的臂架标准段、起重机车架等，设计成有一定规格的标准部件，经过组装，即可制造成系列化产品。部件的标准化和产品的系列化可大大加快设计和制造过程，且便于计算机辅助设计和制造，为大规模的工业生产创造必要的条件。

思考题

- 1-1 起重机械钢结构的类型如何划分？各种类型包括哪些结构？
- 1-2 起重机械钢结构的特点是什么？
- 1-3 起重机械对钢结构有哪些要求？
- 1-4 起重机械钢结构的发展趋势是什么？

第2章

起重机械钢结构材料



2.1 钢材的主要力学性能

2.1.1 钢材单向受力状态下的性能

钢材受到的单向力有拉力、压力和剪力，一般通过钢材在单向拉力作用下的应力-应变曲线来研究钢材的受力性能。对钢材标准试件进行单向静拉伸试验时，其应力 σ 与应变 ϵ 之间的关系如图2-1所示，图中应力-应变曲线可分为五个阶段。

(1) 弹性阶段 (O-A)

在O-A阶段，当应力处在比例极限 σ_p 之内，应变随着应力的增加而增加，即应变与应力成正比关系，服从胡克定律。此时钢材的变形为弹性变形。此阶段内，当载荷卸除后，试件能恢复原长不出现残余变形。应力与应变的比值为常数，称弹性模量 E 。

(2) 弹塑性阶段 (A-B)

当应力超过比例极限 σ_p ，应力与应变成非线性关系，钢材存在少量塑性变形，处于弹塑性状态，直到图中B点为止。对应于B点的应力 σ_s 称屈服点或屈服极限。

(3) 塑性阶段 (B-C)

当应力到达屈服极限点后，应力-应变曲线是不稳定的。在经过一定范围内的波动后，逐渐趋于平稳。此时，应力没有明显的增加，应变却急剧增长。钢材在屈服阶段产生塑性变形，即卸去载荷，试件的变形也不能完全恢复，从B点到C点阶段应变的大小称为流幅。流幅越大，表明钢材的塑性越好。

(4) 强化阶段 (C-D)

应力过了屈服阶段，钢材又恢复了抵抗载荷能力，进入强化阶段。应力-应变为曲线关系，直到最高点D点。对应于D点的应力 σ_b 称为极限强度，或称抗拉强度。

(5) 颈缩阶段 (D-E)

应力超过 σ_b 后，在试件薄弱处的截面将开始显著缩小，产生明显的颈缩现象，塑性变形迅速增大，应力随之下降，直至最终断裂。

从图2-1中应力-应变曲线可以看出：钢材的比例极限 σ_p 与屈服点 σ_s 很接近。屈服点 σ_s 以前的应变很小 ($\epsilon \approx 0.15\%$)，屈服点之后，由于出现流幅，钢材将失去抵抗外载荷的能

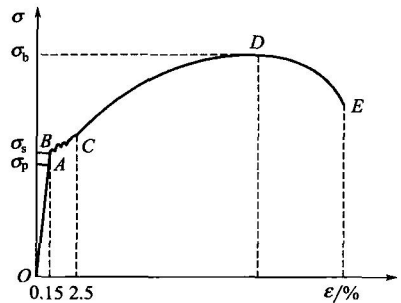


图 2-1 Q235 钢的应力-应变曲线

力,特别是构件将产生很大的塑性变形 ($\epsilon \approx 0.15\% \sim 2.5\%$)。因此,在结构设计时,往往用屈服点 σ_s 代替比例极限 σ_p ,作为强度计算的最大控制应力。

以上讨论的是钢材在单向受拉状态下的力学性能。钢材在单向受压状态下,其力学性能基本相同。在单向受剪状态下,情况也相似,但屈服点和抗拉强度稍低。

在对钢材试件进行拉伸试验的同时,除测得强度特性之外,还可得到塑性特性——伸长率和断面收缩率。这两项指标反映了钢材塑性变形的性能。与强度指标一样,也是钢材重要的力学性能。

2.1.2 钢材在复杂受力状态下的性能

在实际结构中,钢材常常受到二向或三向平面应力的作用。在这种复杂应力作用下,用试验的方法很难确定材料处于弹性或塑性状态,一般采用强度理论来确定。经试验证明,材料力学中的第四强度理论最符合这类钢材的实际情况。按此理论可获得钢材在复杂应力状态下由弹性状态转变为塑性状态的判别式:

$$\left. \begin{array}{l} \text{塑料状态} \quad \sigma_{zs} \geq \sigma_s \\ \text{弹性状态} \quad \sigma_{zs} < \sigma_s \end{array} \right\} \quad (2-1)$$

式中 σ_s ——钢材的屈服点;

σ_{zs} ——折算应力。

如以应力分量表示,根据第四强度理论,折算应力公式为

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

对平面应力状态, $\sigma_z = 0$, $\tau_{zy} = \tau_{xz} = 0$, 则

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

在一般结构中, $\sigma_y = 0$, $\sigma_x = 0$, $\tau_{xy} = \tau$, 则上式可写为

$$\sigma_{zs} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (2-4)$$

钢材在复杂应力作用下,除了强度发生变化外,塑性和韧性也会产生变化。在同号平面应力作用状态下,钢材的弹性工作范围和抗拉强度均有提高,塑性变形降低;在异号平面应力作用状态下,情况则相反。钢材在受同号立体应力和异号立体应力作用下的情况与平面应力相类似。例如,当受同号且相等立体拉应力作用时,塑性变形几乎不出现,即钢材存在脆性断裂的危险。当为立体压应力作用且数值相等时,钢材既不会出现塑性变形,也无断裂危险,也就是说,几乎不可能破坏。因此,结构设计中,应尽量避免同号平面或立体拉应力作用状态的出现。

2.1.3 钢材在连续反复载荷作用下的性能——疲劳

钢材在连续反复载荷作用下,即使其最大应力低于抗拉强度 σ_b ,甚至低于屈服点 σ_s ,也可能发生脆性破坏,此现象称为疲劳。疲劳破坏与塑性破坏完全不同,往往是突然发生的脆性断裂,在破坏前不出现显著的变形和局部收缩。破坏一般发生在应力比较集中的区域,如截面突变处、焊缝连接处、钢材表面缺口处等。由于疲劳强度直接影响了结构的安全性,故是起重机械钢结构设计的主要指标之一。

起重机械钢结构长期承受连续反复载荷作用,应特别注意疲劳现象。对于某些工作级别的起重机,就需验算疲劳强度。例如,起重机结构件的工作级别为 E4~E8 级的结构件,需验算疲劳强度。

影响钢材疲劳强度的因素较多,包括钢材种类、连接接头形式、结构特征、应力循环形式、应力变化幅度 ρ 以及载荷重复次数 N 等。钢材发生疲劳破坏时的绝对值最大应力 σ_{\max} ,称为疲劳应力,它与应力循环的形式有直接关系,并随着载荷重复次数 N 的增加而降低。图2-2所示的 $\sigma-N$ 曲线,或称 $S-N$ 曲线,是以脉冲循环应力(疲劳应力循环特性值 $r=\sigma_{\min}/\sigma_{\max}=0$)的最大拉应力 σ_{\max} 为纵坐标、破坏时循环数 N 为横坐标,对一批标准试件施加不同量值的等幅循环载荷,得到各试件破坏时的对应循环数 N ,绘制而成的表示了材料的疲劳强度与寿命关系的曲线。

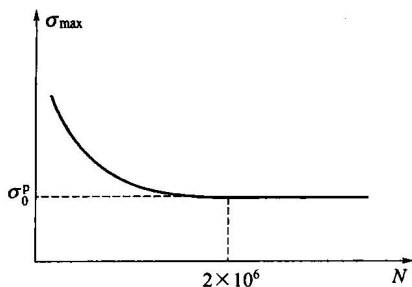


图 2-2 Q235 钢的应力应变曲线

由图2-2可见,随着最大拉应力 σ_{\max} 减小,应力循环次数 N 增加。当减小到某一值时, N 可以无限增加,此值以符号 σ_0^b 表示。对于结构钢试件取 $N=2\times 10^6$ 次时的应力作为材料疲劳极限。

2.2 钢材的脆性破坏

钢材的破坏性质按照断裂前塑性变形的大小,分为塑性破坏和脆性破坏两类。产生了很大塑性变形后材料才出现断裂称为塑性破坏;在材料几乎不出现显著的变形情况下就突然断裂称为脆性破坏。前者一般在简单受压、受剪、受弯或受扭时出现。由于变形大、有预兆,易被人们发现,可采取修复措施。而后者,由于断裂前基本上不发生塑性变形,是突然性发生的,不能事先发觉,因此脆性破坏易造成事故,危害性大,必须尽量避免发生。

起重机械钢结构发生脆性破坏往往是多种因素影响的结果。主要因素有某些有害的化学成分、应力集中、加工硬化和低温等。

2.2.1 化学成分

钢的基本元素是铁(Fe),在普通碳素结构钢中纯铁的含量约占99%,另外含有碳(C)、锰(Mn)、硅(Si)、硫(S)、磷(P)等元素和氧(O)、氮(N)等有害气体,仅占1%左右。钢的化学成分对材料力学性能和可焊性影响很大,因此在选用钢材时要注意。

碳是决定钢材性能的最主要元素,含碳量增加,钢材的屈服点和抗拉强度就会提高,硬度也上升,但伸长率、冲击韧性会降低。同时,钢材的疲劳强度、冷弯性能和耐腐蚀性能也将明显降低。因此,规范对各类钢材含碳量有限制,一般不超过0.22%。

锰是有益元素,能显著地提高钢材强度,并保持一定的塑性和冲击韧性。但含量过多,也会降低钢的可焊性。一般在普通碳素钢中,锰含量为0.25%~0.65%。

硅能提高钢的强度和硬度,但含硅量过多会降低钢材的塑性和冲击韧性以及可焊性。钢材中的含硅量控制在0.1%~0.3%。

硫是钢材中的有害元素。含硫量增大会降低钢材的塑性、冲击韧性、疲劳强度和耐腐蚀性。由于硫化物在高温时很脆,使钢材在热加工时易发生脆断(热脆),焊接时易开裂,故含硫量必须严格控制,一般不超过0.055%。

磷和硫一样,也是有害元素。随着含磷量的增加,钢材的塑性和冲击韧性降低,低温时尤为明显,使钢材发生脆断(冷脆)。因此,磷的含量也应严格限制,一般不超过0.045%。

氧和氮是钢中的有害气体。在金属熔化状态下,从空气中进入,都使钢变脆,造成材质不匀。因此在冶炼和焊接时,要避免钢材受大气作用,使氧和氮的含量尽量减少。

为了改善钢的力学性能,可增加锰和硅的含量,也可掺入一定数量的钒、钛、铌等合金元素,形成合金钢。机械结构中常采用含合金元素较少的低合金钢。

2.2.2 应力集中

一般情况下,构件中的应力分布是不均匀的。尤其是当截面形状有急剧变化的部位,如

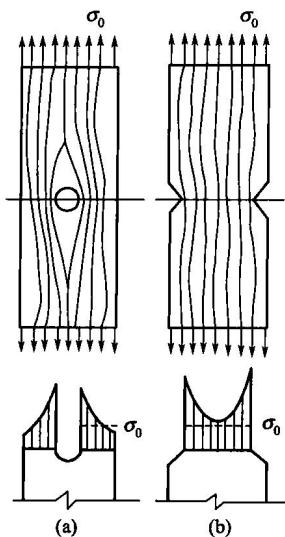


图 2-3 应力集中现象

孔洞、凹角、裂缝槽口和厚度改变等处,主应力线发生转折,在截面突变处形成应力作用线密集和曲折,出现局部高峰应力,这种现象称为应力集中(图 2-3)。孔洞或缺口边缘处的主应力线出现转折,形成双向应力,即处在同号平面应力状态。当板厚较大,就形成同号立体应力。此时,材料不易屈服,容易脆性破坏。而且,截面形状变化越急剧,应力集中越严重,材料变脆的程度也越严重。

应当指出,应力集中现象在实际结构中是无法避免的。当结构承受静力载荷作用且处于常温下工作时,由于材料的流幅可使高峰应力的增长逐步减弱,应力集中所引起的危害性不十分严重,设计时可不考虑,只在构造上尽量做到截面形状变化平缓。而起重机械通常受到动力载荷和反复振动载荷作用,应力集中现象会引起严重后果,因此必须十分重视。除了在构件上尽量做到截面形状变化平缓外,有时对重要结构,还需对钢材在冲击机上进行冲击试验,以了解材料由于应力集中影响而

变脆的情况。

2.2.3 加工硬化

钢材在常温下经过冲孔、剪切、冷拉、校直等冷加工后,会产生局部或整体硬化,使钢材的强度和硬度提高,塑性和韧性下降,这种现象称为冷作硬化或加工硬化。经过硬化的钢材,在常温下,经过一段时间后,钢材的强度会进一步提高,塑性和韧性会进一步下降,称时效硬化,由于在硬化区域中,钢材易出现裂缝、损伤和应力集中现象,导致钢材变脆,因此加工硬化现象对承受动载荷和反复振动载荷的结构是十分不利的,需进行退火处理。对重要结构还需把钢板因剪切而硬化的边缘部分刨去,以消除硬化现象。

2.2.4 温度

温度变化对钢材的力学性能有直接影响,当钢材处在温度 200°C 之内,强度、塑性、韧性变化很小。当温度处在 $200\sim 300^{\circ}\text{C}$ 时,强度和硬度提高,伸长率下降,钢材变脆,称为蓝脆现象。温度超过 300°C ,强度明显下降。当超过 600°C ,强度几乎等于零。

温度下降时,钢材的强度显著提高,塑性、韧性下降,在一定的负温度下,钢材完全处于脆性状态,此时,如果存在应力集中,将加速脆性发展,导致钢材脆断。起重机械常在野外作业,应特别注意低温脆断问题。

引起钢材的脆性破坏除了上述因素之外,焊接、时效等影响也是主要因素。通常,脆性破坏是在多种因素综合影响下发生的,为防止脆性破坏,必须在起重机械钢结构设计和制造

中采用必要措施，以消除或减少各种不利因素的影响，并且根据结构受力情况和使用条件正确地选择钢材。

2.3 钢材的标号、规格及其选择

2.3.1 钢材的类别和标号

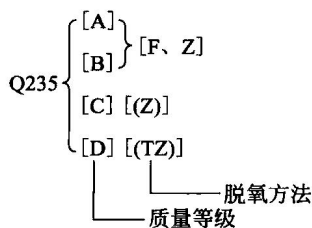
起重机械钢结构主要有两个种类：一是碳素结构钢（或称普通碳素钢）；二是低合金结构钢，低合金钢因含有锰、钒等合金元素而具有较高的强度。

(1) 碳素结构钢

根据国家标准《碳素结构钢》(GB/T 700—2006)的规定，将碳素结构钢分为 Q195、Q215、Q235 和 Q275 四个牌号，其中 Q 是屈服强度中屈字汉语拼音的字首，后接的阿拉伯数字表示屈服强度的大小，单位为 MPa。阿拉伯数字越大，含碳量越多，则强度和硬度越高，塑性、韧性越低。由于碳素结构钢冶炼容易，成本低廉，并有良好的各种加工性能，所以使用较为广泛。其中 Q195 钢和 Q215 钢强度不高，仅用作次要结构件。Q275 钢虽然强度较高，但可焊性较差，易脆裂，不宜用于受动载荷的焊接结构构件。目前，机械结构中应用最广的是 Q235 钢。

碳素结构钢由平炉或氧气顶吹转炉冶炼。交货时供方应提供力学性能质保书，其内容为屈服强度 (σ_s)、抗拉强度 (σ_b) 和伸长率 (δ_5)。同时还要提供化学成分质保书，其内容为碳 (C)、锰 (Mn)、硅 (Si)、硫 (S) 和磷 (P) 等含量。

Q235 按质量等级、脱氧方法等表示如下：



质量等级分为 A、B、C、D 四级，由 A 到 D 表示质量由低到高。不同质量等级对冲击韧性的要求有区别。A 级无冲击功规定，对冷弯试验只在需方有要求时才进行；B 级要求提供 20℃ 时冲击功 $A_k \geq 27\text{J}$ (纵向)；C 级要求提供 0℃ 时冲击功 $A_k \geq 27\text{J}$ (纵向)；D 级要求提供 -20℃ 时冲击功 $A_k \geq 27\text{J}$ (纵向)。B、C、D 级也都要求提供冷弯试验合格证书。不同质量等级对化学成分的要求也有区别。

根据脱氧方法不同，钢材分为沸腾钢、镇静钢和特殊镇静钢，并用汉字拼音字首分别表示为 F、Z 和 TZ。用 Z 和 TZ 表示牌号时也可以省略。现将 Q235 钢表示法举例如下：

Q235A——屈服强度为 235MPa，A 级镇静钢；

Q235AF——屈服强度为 235MPa，A 级沸腾钢；

Q235Bb——屈服强度为 235MPa，B 级半镇静钢；

Q235D——屈服强度为 235MPa，D 级特殊镇静钢；

Q235C——屈服强度为 235MPa，C 级镇静钢。

碳素结构钢按现行标准规定的化学成分和力学性能见表 2-1 和表 2-2。