

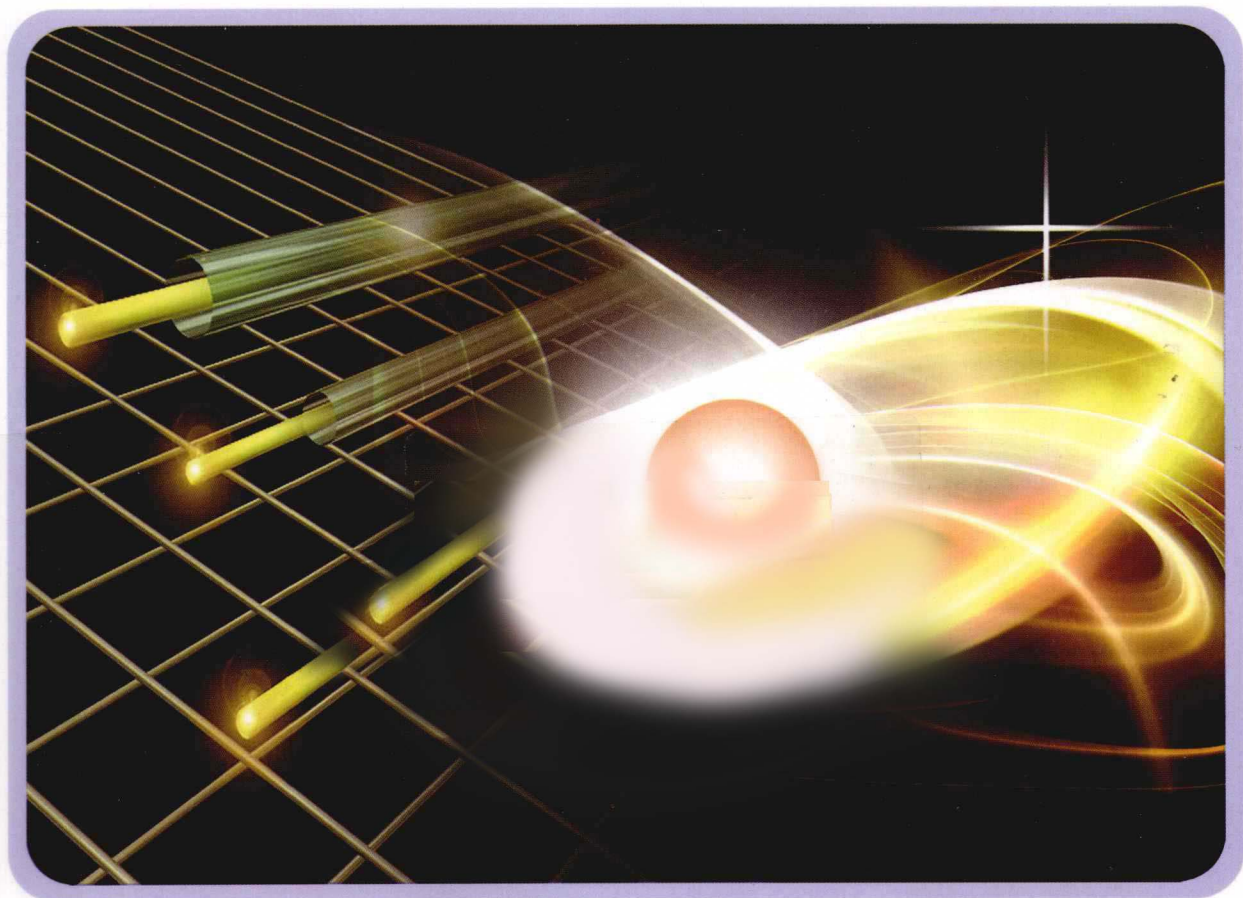


职业教育特色精品课程规划教材
职业教育课程改革项目研究成果

熔焊基础与金属材料焊接

ronghan jichu yu jinshu cailiao hanjie

◆ 主编 郝建军 马璐萍



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

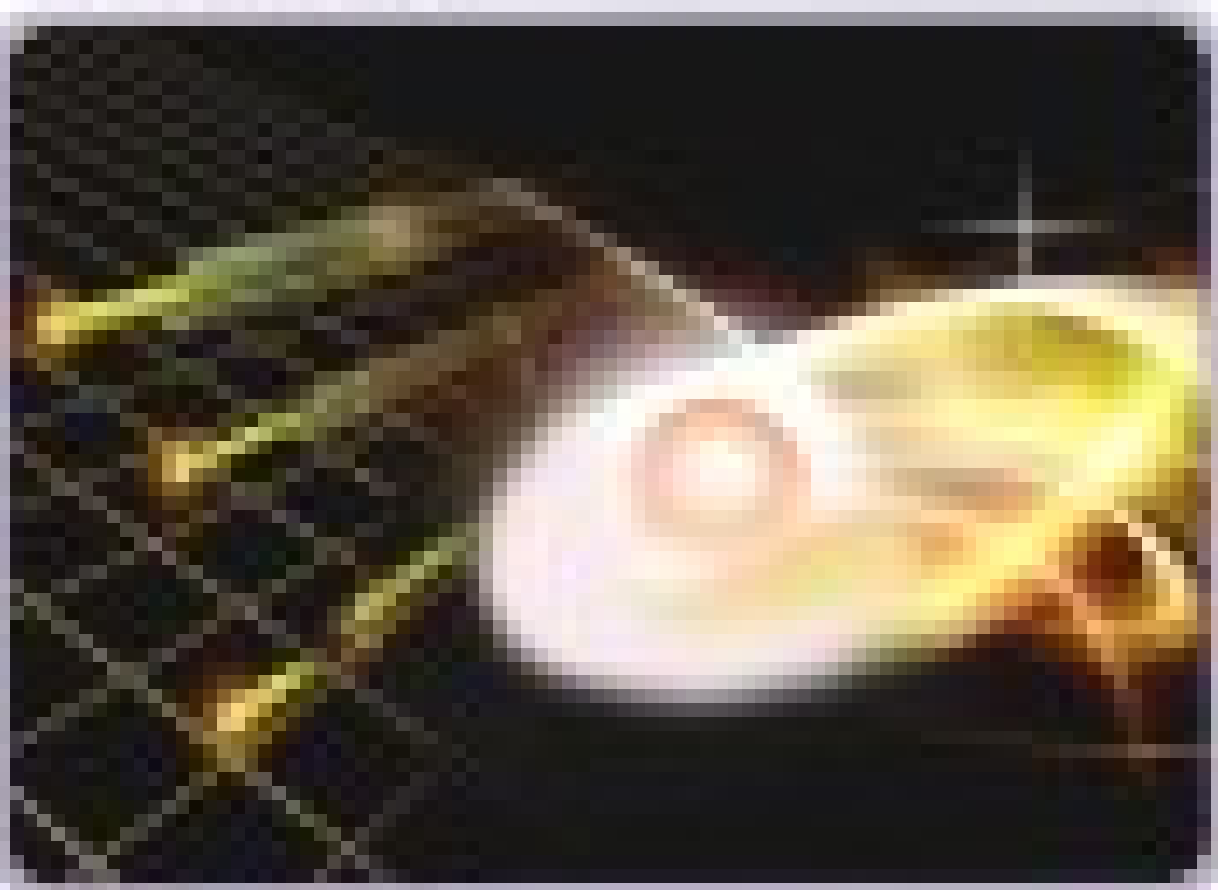


中国工程教育认证教材

焊接基础与金属材料焊接

Welding Basics and Metal Materials Welding

王 健 王 健 王 健



中国工程教育认证教材
Welding Basics and Metal Materials Welding

21 世纪职业教育特色精品课程规划教材
职业教育课程改革项目研究成果

熔焊基础与金属材料焊接

主 编 郝建军 马璐萍
主 审 马跃进 孙维连
副主编 郝建国 刘小平

内 容 提 要

本书根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲,并结合教学实践、职业技能鉴定的需求和焊接技术的发展状况编写而成,是职业教育焊接专业课程改革项目研究成果《21 世纪职业教育焊接专业精品课程规划教材》之一。本书的内容编排结合岗位技术特点,贴近生产实际。在尊重教学规律的前提下,注重对部分专业知识的重新整合和对学生创新精神和实践能力的培养。全书在保证理论体系清晰、完整的前提下,力争做到实用为先、够用为度、宽基础、厚专业。全书共十章,主要内容为:金属学及热处理基础、焊接冶金基础、焊接材料、金属焊接性及其试验方法、碳钢的焊接、低合金高强钢的焊接、低合金特殊用钢的焊接、不锈钢的焊接、铸铁的焊接、常用有色金属的焊接等。本书注重工程实际,通过学习,使学生能对金属熔焊原理及常用金属材料的焊接性有充分认识,并能根据材料焊接性,结合工程实际,制定材料的焊接工艺参数。本书可供职业技术学校、职业培训学校、高职高专院校及成人高校的焊接专业、热加工工种的师生使用,也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

版权专用 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

熔焊基础与金属材料焊接 / 郝建军, 马璐萍主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2010. 10
ISBN 978 - 7 - 5640 - 3873 - 1

I. ①熔… II. ①郝… ②马… III. ①熔焊 - 基本知识②金属材料 - 焊接 IV. ①TG442②TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 192367 号

出版发行 / 北京理工大学出版社

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通县华龙印刷厂

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 18.75

字 数 / 400 千字

版 次 / 2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷

责任校对 / 张沁萍

定 价 / 34.00 元

责任印制 / 母长新

图书出现印装质量问题,本社负责调换

21 世纪职业教育焊接专业精品课程规划教材
职业教育课程改革项目研究成果

编 委 会

主 任：郝建军

委 员：（按姓氏笔画排序）

弋景刚 马跃进 王泽河 孙维连

李建昌 赵建国 彭海滨 霍利民

本书主编：郝建军 马璐萍

本书副主编：郝建国 刘小平

本书参编：（按姓氏笔画排序）

白庆华 时君伟 李帅伦 李建昌

杨淑华 胡敏英 赵建国 董婷婷

本书主审：马跃进 孙维连

出版说明

CHU BAN SHUO MING

职业教育是以培养具有较强实践能力，面向生产、面向服务和管理第一线职业岗位的实用型、技能型专门人才为目的的职业技术教育。目前，职业教育教学改革已经从专业建设、课程建设延伸到了教材建设层面。根据教育部关于发展职业技术教育，培养职业技术人才的大纲要求，北京理工大学出版社根据职业教育课程改革项目研究成果，组织编写了《21 世纪职业教育特色精品课程规划教材》。该系列教材坚持以能力为本位，以就业为导向，以服务学生职业生涯发展为目标为指导思想。主要从以下 3 个角度切入。

1. 从专业建设角度

该系列教材摒弃了传统普通高等教育和传统职业教育“学科性专业”的束缚，致力于职业教育“技术性专业”。主体内容由与一线技术工作相关联的岗位有关知识所构成，充分体现职业技术岗位的有效性、综合性和发展性，使得该系列教材不但追求学科上的完整性、系统性和逻辑性，而且突出知识的实用性、综合性，把职业岗位所需要的知识和实践能力的培养熔于一炉。

2. 从课程建设角度

该系列教材规避了现有职业教育教材内容上的“重理论轻实践”“重原理轻案例”、教学方法上的“重传授轻参与”“重课堂轻现场”、考核评价上的“重知识的记忆轻能力的掌握”“重终结性的考试轻形成性考核”的倾向，力求在整体教材内容体系以及具体教学方法指导、练习与思考等栏目中融入足够的实训内容，加强实践性教学环节，注重案例教学和能力的培养，使职业能力的提升贯穿于教学的全过程。

3. 从人才培养模式角度

该系列教材为了切合职业教育人才培养的产学结合、工学交替培养模式，注重有学就有练、学完就能练、边学边练的同步教学，吸纳新技术引用、生产案例等情景来激活课堂。同时，为了结合学生将来因为岗位或职业的变动而需要不断学习的实际，注重对新知识、新工艺、新方法、新标准的引入，在培养学生创造能力和自我学习能力的培养基础上，力争实现学生毕业与就业上岗的零距离。

为了贯彻和落实上述指导思想，在本系列教材的内容编写上，我们坚持以下一些原则。

1. 适应性原则

在进行广泛的社会调查基础上，根据当今国家的政策法规、经济体制、产业结构、技术进步和管理水平对人才的结构需求来确定教材内容。依靠专业自身基础条件和发展的可行性，以相关行业和区域经济状况为依托，特别强调面向岗位群体的指向性，淡化行业界限、看重市场选择的用人趋势，保证学生的岗位适应能力得到训练，使其有较强的择业能力，从而使教材有活力、有质量。

2. 特色性原则

在调整原有专业内容和设置专业新兴内容时，注意保留和优化原有的、至今仍适应社会需求的内容，但随着社会发展和科技进步，及时充实和重点落实与专业相关的新内容。“特色”主要体现为“人无我有”“人有我精”或“众有我新”，科学预测人才需求远景和人才培养的周期性，以适当超前性专业技术来引领教材的时代性。结合一些一线工作的实际需要和一些地方用人单位的区域资源优势、支柱产业及其发展方向，参考发达地区的发展历程，力争做到专业课内容的成熟期与人才需求的高峰期相一致。

3. 宽口径性原则

拓宽教材基础是提高专业适应性的重要保证之一。市场体制下的人才结构变化加快，科技迅猛发展引起技术手段不断更新，用人机制的改革使人才转岗频繁，因此要求大部分专门人才应是“复合型”的。具体课程内容应是当宽则宽，当窄则窄。在紧扣本专业课程内容基础上延伸或派生出一

些适应需求的与其他专业课相关的综合技能。既满足了社会需求又充分锻炼学生的综合能力，挖掘了其潜力。

4. 稳定性和灵活性原则

职业教育的专业课程都有其内核的稳定性，这种内核主要是体现在其基础理论、基础知识等方面。通过稳定性形成专业课程教材的专业性特点，但同时以灵活的手段结合目标教学和任务教学的形式，设置与生产实践相切合的项目，推进教材教学与实际工作岗位对接。

为了更好地落实本教材的指导思想和编写原则，教材的编写者都是既有一线教学经验、懂得教学规律，又有较强实践技能的专家，他们分别是：相关学科领域的专家；各类职业教育科研带头人；教学一线的高级教师。同时邀请众多行业协会合作参与编写，将理论性与实践性高度统一，打造精品教材。另外，还聘请生产一线的技术专家来审读修订稿件，以确保教材的实用性、先进性、技术性。

总之，该系列教材是所有参与编写者辛勤劳作和不懈努力的成果，希望本系列教材能为职业教育的提高和发展做出贡献。

北京理工大学出版社

编写说明

BIAN XIE SHUO MING

本套教材根据劳动和社会保障部培训就业司最新颁发的教学大纲，以中（高）等职业教育焊接专业培养目标为基础，结合职业技能鉴定需求和焊接专业特点编写而成。全套教材包括《熔焊方法与工艺》《焊接电工电子技术》《焊接工程制图与 CAD》《焊接结构与制造》《焊接检测技术》《熔焊基础与金属材料焊接》《工程材料与热加工基础》《机械工程基础（焊接专业）》《焊接安全与卫生》《金工实习（焊接专业）》《材料连接与切割技术》《电弧焊工艺与实训》《钳工与冷作工艺与实训》《钣金连接技术》等。

在教材的编写过程中，我们始终坚持了以下几个原则。

（1）坚持中高级技能人才的培养方向，从职业（岗位）需求分析入手，强调实用性，使学生掌握一定理论知识，培养学生分析问题、解决问题的能力。并引导学生理论联系实际，提高学生操作技能水平。

（2）紧密结合职业教育的教学实际情况，化繁为简，化难为易，全书以国家职业资格标准为依据，力求使教材内容在覆盖职业技能鉴定的各项要求的基础上拓展外延，以满足不同层次的各级各类学校和工矿企业的需求。

（3）突出教材的时代感，力求较多地引进新知识、新技术、新工艺、新方法、新材料等方面的内容，较全面地反映焊接技术发展趋势。

（4）打破传统的教材编写模式，树立以学生为主体的教学理念，强调培养学生自主学习能力。

本套教材是基于编者多年的教学实践积淀而成。编写时，取材力求少而精，突出实用性，内容紧密结合焊接工程实践。本套教程可供职业技术学校、职业培训学校、成人高校的焊接专业、热加工工种师生使用，也可作为岗位培训教材和相关工程技术人员的参考资料。

本套教程在编写过程中得到了保定市焊接学会（培训中心）、河北农业

大学机电工程学院及河北省焊接学会、河北省职工焊割技术协会的大力支持，在此表示感谢。同时，对本书编写中所参阅的书籍和资料作者（编者）表示感谢。衷心希望本套教材能使业内读者受益，成为各级各类学校焊接专业师生和广大焊接工作者的良师益友。由于编写时间仓促，加之编者水平有限，书中难免有不足和错误，恳请广大读者不吝赐教，予以斧正。

本书共分10章，由河北农业大学郝建军、马璐萍担任主编，保定市焊接学会郝建国、保定技师学院刘小平担任副主编，由河北农业大学白庆华、时君伟、李建昌、胡敏英、赵建国、董婷婷，河北省科技工程学校李帅伦，中国地质大学长城学院杨淑华参编，全书由河北农业大学马跃进、孙维连审稿。

21 世纪职业教育焊接专业精品课程规划教材 编委会

目 录

Contents

绪 论	1
第 1 章 金属学及热处理基础	3
1.1 金属材料的性能	3
1.2 金属的晶体结构	12
1.3 金属与晶体的结晶	17
1.4 铁碳合金相图	23
1.5 钢的热处理	29
第 2 章 焊接冶金基础	46
2.1 焊接热过程	46
2.2 焊缝成型	55
2.3 焊接化学冶金	68
2.4 焊接缺陷	90
第 3 章 焊接材料	106
3.1 焊条	106
3.2 焊丝	121
3.3 焊剂	126
3.4 焊接用气体	137
3.5 其他焊接材料	143
第 4 章 金属的焊接性及其评定	149
4.1 金属焊接性基础知识	149
4.2 金属材料焊接性的分析与试验	151
第 5 章 非合金钢（碳钢）焊接	161
5.1 碳钢的焊接性	161



5.2	碳钢的焊接	164
第6章	低合金高强钢焊接	171
6.1	热轧及正火钢的焊接	171
6.2	低碳调质钢的焊接	177
6.3	中碳调质钢的焊接	181
第7章	低合金特殊用钢的焊接	186
7.1	低温用钢的焊接	186
7.2	珠光体耐热钢的焊接	193
7.3	低合金耐蚀钢的焊接	198
第8章	不锈钢的焊接	201
8.1	奥氏体不锈钢的焊接	201
8.2	铁素体不锈钢的焊接	213
8.3	马氏体不锈钢的焊接	216
8.4	双相不锈钢的焊接	218
第9章	铸铁的焊接	223
9.1	灰铸铁的焊接	223
9.2	球墨铸铁的焊接	234
第10章	常用有色金属焊接	239
10.1	铝及铝合金的焊接	239
10.2	铜及铜合金的焊接	253
10.3	钛及钛合金的焊接	276

绪 论

在各种金属加工工艺方法中,焊接属于连接加工,焊接工艺虽然发展历史不长,但近年来发展十分迅速,迄今为止,焊接已发展为一门独立的学科,在能源、交通、建筑,特别是在机器制造部门中,已成为不可缺少的工艺方法,并发挥着越来越大的作用。

焊接的目的是将两个或两个以上的物体(焊件)连接为永久结合的整体。在 GB/T 3375—1994《焊接术语》中,焊接的定义为:“焊接是通过加热或加压,或两者并用,并且用或不用填充材料,使工件达到结合的一种方法”。根据上述定义可知,焊接时必须加热或加压(或两者并用)。按照加热的程度以及是否加压,可将焊接划分为熔焊、压焊与钎焊三大类。焊接时,将待焊处的母材金属熔化以形成焊缝的焊接方法叫做熔焊;焊接过程中,必须对焊件施加压力(加热或不加热)以完成焊接的方法叫做压焊;采用熔点比母材熔点低的金属材料作钎料,将焊件与钎料加热到高于钎料熔点,低于母材熔化温度,利用液体钎料润湿母材,填充接头间隙,并与母材相互扩散实现连接的焊接方法叫做钎焊。

从焊接的定义可知,为使工件达到结合,焊接时需要外部能量,而且从焊接接头的外观上可明显看出,焊接的结合有别于螺栓联接、键联接、铆接等,是不可拆卸的,因此,可以认为需要外加能量与结合的不可拆卸(即永久性)是焊接在宏观上的特点。在微观上,焊接的特点则是在焊件之间达成原子间的结合。也就是说,原来分开的工件,经过焊接后在微观上形成了一个整体。对金属来说,就是在两焊件之间建立了金属键。

熔化焊是焊接方法中应用最广的方法之一。对大型、高参数(高温、高压下运行)设备,如在大吨位船舶、舰艇、发电设备、核能装置、化工机械的制造中,几乎全部采用熔焊。生产中常用焊条电弧焊、埋弧焊、气焊、CO₂气体保护焊、氩弧焊、电渣焊、等离子弧焊、激光焊等都属于熔焊。

金属的熔焊,一般都要经历加热—冶金反应—结晶—固态相变—形成接头等几个过程。上述过程可归纳为以下三个互相交错进行且彼此联系的局部过程。

①焊接热过程。熔焊时,被焊金属在热源作用下将发生加热和局部熔化过程。因

此，在被焊金属中必然存在着热量的传播和分布问题，通常称之为焊接热过程。

②焊接化学冶金过程。熔焊时，在熔化金属、熔渣、气相之间进行着一系列的化学冶金反应，如金属的氧化、还原、脱硫等，这些冶金反应将直接影响焊缝金属的化学成分、组织和性能，因此控制冶金过程是提高焊接质量的重要措施之一。

③焊接时金属的结晶和相变过程。由于焊接条件是快速连续冷却，使焊缝金属的结晶和相变具有各自的特点，并且有可能在这些过程中产生诸如偏析、夹杂、气孔等缺陷。因此控制和调整焊缝金属的结晶和相变过程是保证焊接质量的又一关键。

与螺栓联接、键联接、铆接、粘结等其他连接方法相比，熔焊具有以下优点。

①节约材料。焊接接头在连接部位没有重叠部分，也不需要附加的连接件（如铆钉），从而减少了材料的消耗，降低了结构自重及生产成本。

②工艺过程比较简单。焊件不需开孔加工，也不需制造连接附件，同时焊接本身生产率高，大大缩短了制造周期。

③质量高。熔焊的结合部位（焊接接头）不仅可以获得与母材相同的力学性能，而且其他使用性能（耐热性，耐蚀能力等）也都能够与母材相匹配。特别是不需采用特殊措施即可获得优良的密封性，使其成为在压力容器与船舶制造中唯一的连接方法。

④可充分发挥设备和材料的潜力。焊接可以将较大的产品分段翻造，不仅能制造由不同材料连接而成的双金属结构，还可将不同方法制造的毛坯连成铸—焊、铸—锻—焊复合结构。这样，既可充分利用不同材料的特性，又可用较小的设备制造出尺寸较大的产品。

⑤劳动条件好，劳动强度低，噪声小。

另外，需要指出的是，熔焊过程的高温加热，会使某些金属材料的性能降低，甚至影响产品的安全运行。因此，目前还不能说熔焊技术可适用于任何一种金属材料。但可确信，随着焊接技术的发展，熔焊的应用范围会进一步扩大。

第 1 章

金属学及热处理基础

1.1 金属材料的性能

金属材料的性能包括使用性能和工艺性能。使用性能是指金属材料在使用过程中应具备的性能，它包括力学性能（强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等）、物理性能（密度、熔点、热膨胀性、导热性、导电性等）和化学性能（耐蚀性、抗氧化性等）。工艺性能是金属材料从冶炼到成品的生产过程中，适应各种加工工艺（如冶炼、铸造、冷热压力加工、焊接、切削加工、热处理等）应具备的性能。

1.1.1 金属的力学性能

通常机器零件或工程结构在工作中都要受到外力的作用，金属在外力的作用下所表现的性能叫做力学性能。

按外力（载荷）作用性质的不同，可分为静载荷、冲击载荷和交变载荷。在不同性质的载荷作用下，金属所表现的特性与抵抗破坏的能力不同，因而需要用不同的力学性能指标。

常用的力学性能指标有强度、硬度、塑性和冲击韧性等。这些性能是机械设计、材料选择、工艺评定及材料检验的主要依据。

1. 强度与塑性

强度是指金属材料在载荷作用下，抵抗塑性变形和断裂的能力。由于作用力的性质不同，其判据可分为屈服强度、抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等，在生产中，最常用、最基本的是屈服强度和抗拉强度。金属材料的强度与塑性一般可以通过金属的拉伸试验来测定。

（1）拉伸试验

①拉伸试样。拉伸试样的形状通常有圆柱形和板状两类。为便于对不同材料的强度进行对比，拉伸试验所用试件的形状与尺寸应符合 GB/T 397—1986《金属拉伸试验

试样》的规定。图 1-1 (a) 所示为圆柱形拉伸试样。在圆柱形拉伸试样中 d_0 为试样直径, l_0 为试样的标距长度, 根据标距长度和直径之间的关系, 试样可分为长试样 ($l_0 = 10d_0$) 和短试样 ($l_0 = 5d_0$)。

②拉伸曲线。试验时, 将试样两端夹装在试验机的上下夹头上, 随后缓慢地增加载荷, 随着载荷的增加, 试样因逐步变形而伸长, 直到被拉断为止。在试验过程中, 试验机自动记录了每一瞬间负荷 F 和变形量 Δl , 并给出了它们之间的关系曲线, 称为拉伸曲线 (或拉伸图)。拉伸曲线反映了材料在拉伸过程中的弹性变形、塑性变形和直到拉断时的力学特性。

图 1-1 (b) 为低碳钢的拉伸曲线。由图可见, 低碳钢试样在拉伸过程中, 可分为弹性变形、塑性变形和断裂三个阶段。

当载荷不超过 F_p 时, 拉伸曲线 Op 为一直线, 即试样的伸长量与载荷成正比例增加, 如果卸除载荷, 试样立即恢复到原来的尺寸, 即试样处于弹性变形阶段。载荷在 $F_p - F_e$ 间, 试样的伸长量与载荷已不再成正比关系, 但若卸除载荷, 试样仍然恢复到原来的尺寸, 故仍处于弹性变形阶段。

当载荷超过 F_e 后, 试样将进一步伸长, 但此时若卸除载荷, 弹性变形消失, 而有一部分变形却不能消失, 即试样不能恢复到原来的长度, 称为塑性变形或永久变形。

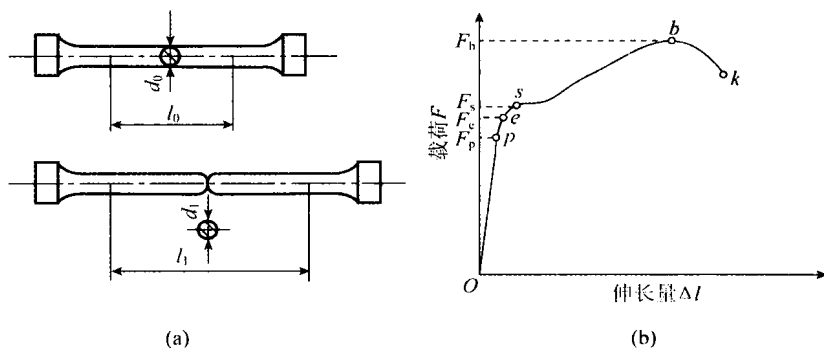


图 1-1 拉伸试样与拉伸曲线

(a) 拉伸试样; (b) 拉伸曲线

当载荷增加到 F_s 时, 试样开始明显的塑性变形, 在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段, 这种现象称为屈服。

当载荷继续增加到某一最大值 F_b 时, 试样的局部截面缩小, 产生了颈缩现象。由于试样局部截面的逐渐减少, 故载荷也逐渐降低, 当达到拉伸曲线上的 k 点时, 试样就被拉断。

(2) 强度

材料受外力作用时, 其内部产生了与外力大小相等方向相反的抵抗力, 即内力。单位面积上的内力称为应力, 用符号 σ 表示, 即

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

式中 F ——拉伸力 (N);

A_0 ——试样原始截面积 (m^2)。

根据拉伸曲线可以求出材料的强度指标, 其强度指标主要有以下三项。

①弹性极限。金属材料在载荷作用下产生弹性变形 (即不产生永久变形) 时所能承受的最大应力称为弹性极限, 用符号 σ_e 表示:

$$\sigma_e = \frac{F_e}{A_0}$$

式中 F_e ——试样产生弹性变形时所承受的最大载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

σ_e 值越大, 表示材料的弹性越大。

②屈服强度 (又称屈服点)。金属材料开始明显塑性变形 (即在外力不增加仍能继续伸长) 时的最低应力称为屈服强度, 用符号 σ_s 表示:

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

式中 F_s ——试样屈服时的载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

生产中使用的某些金属材料, 在拉伸试验中不出现明显的屈服现象, 无法确定其屈服强度 σ_s 。所以国标中规定, 以试样塑性变形量为试样标距长度的 0.2% 时, 材料承受的应力称为“条件屈服强度”, 并以符号 $\sigma_{0.2}$ 表示。 $\sigma_{0.2}$ 的确定方法如图 1-2 所示。在拉伸曲线横坐标上截取 c 点, 使 $Oc = 0.2\% l_0$, 过 c 点作 Op 斜线的平行线, 交曲线于 s 点, 则可找出相应的载荷 $F_{0.2}$, 从而计算出 $\sigma_{0.2}$ 。

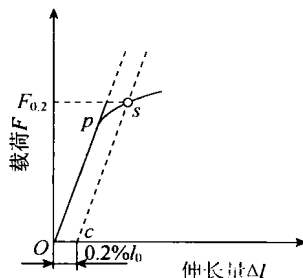


图 1-2 屈服强度测定

③抗拉强度 (又称强度极限)。金属材料在断裂前所能承受的最大应力称为抗拉强度, 用符号 σ_b 表示:

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

式中 F_b ——试样在断裂前的最大载荷;

A_0 ——试样原始横截面积。

σ_s 与 σ_b 都是金属材料的主要力学性能指标, 是设计及选材的重要依据。对于塑性材料, 考虑到主要因塑性变形过大而失效, 因此 σ_s (或 $\sigma_{0.2}$) 是产品设计的强度指标, 脆性材料没有屈服现象, 则用 σ_b 作为强度指标。

σ_s/σ_b 称为屈强比。屈强比小, 表明材料的塑性储备高, 万一超载也不会立即破坏, 可靠性大; 但屈强比过低, 使材料的利用率降低。因此, 对不同钢种的屈强比有不同的要求。如低碳钢为 0.5 ~ 0.6, 低合金结构钢为 0.65 ~ 0.75, 合金结