

21世纪机械类课程系列教材

工程材料与 成形技术基础

鞠鲁粤 主编

高等教育出版社

内容简介

本书是根据教育部最新颁布的《工程材料及机械制造基础课程教学基本要求》和《工程材料及机械制造基础系列课程改革指南》的精神编写的,在内容和体系上作了较大的更新。

本书共分 7 章,分别介绍了工程材料、铸造成形、锻压成形、焊接成形、非金属材料及成形、快速成形和零件的毛坯选择。为配合学习,每章都附有习题和思考题,便于读者进行复习和总结,巩固已学知识。本书阐述了各种材料技术和成形过程的工艺原理、工艺方法、自身规律、相互联系、技术经济性及发展趋势,归纳了选材和选择成形工艺的方法,为理论与实践相联系作了一些尝试。本书的主要特点是,较详细地阐述了材料技术和各种成形技术的基本理论,在此基础上较全面地介绍了现代成形方法和新成果、新发展,便于读者了解先进材料技术、成形工艺和方法的发展趋势。

本书作为机械类专业基础课程工程材料与成形技术基础的教学参考书,主要面向机械类本科学生,工科相关专业也可采用本教材进行教学。本书也可作为相关工程技术人员和工厂管理人员的参考读物。

图书在版编目 (CIP)数据

工程材料与成形技术基础 /鞠鲁粤主编. —北京:高等教育出版社,2004.12
ISBN 7 - 04 - 015872 - 8

.工鞠工程材料 - 成形 - 高等学校—教材 .TB3

中国版本图书馆 CIP数据核字 (2004)第 116299 号

策划编辑 庚欣 责任编辑 胡纯 封面设计 王凌波
版式设计 王艳红 责任校对 杨雪莲 责任印制

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000

购书热线 010 - 64054588
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 19
字 数 450 000

版 次 年 月第 1 版
印 次 年 月第 次印刷
定 价 24.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。
版权所有 侵权必究
物料号 :15872 - 00

前 言

工程材料与成形技术基础是高等工科院校机械类专业和相关专业的一门重要的技术基础课程,目的在于使读者了解工程材料和成形技术的基本原理和工艺知识,开拓工程眼界,了解工程材料与成形技术的发展趋势。

21世纪前后,随着现代自然科学的不断发展,新工艺不断涌现,传统工艺不断变革,作为现代社会的重要支柱之一的材料科学及成形工程正取得迅猛的发展。为适应这样的发展,使读者在材料成形领域掌握现代加工的基本原理,为解决现代工程材料的成形和新型材料的开发打下基础,特编写了本书。本书既可作为机械工程(院)系本科生的必修技术基础课教材,又可作为相关工科学生选修课教材,也可作为从事此领域的工程技术人员参考书。

本书根据现代科学技术的发展,按机械工程和相关专业方向的教学要求,对原教学内容进行了较大的更新和充实。本书较系统地介绍了材料科学与工程、材料成形科学与工程的基础理论,紧密结合材料加工和材料成形学科的现状和发展动向,补充了较多的应用实例,介绍了行业前沿的科研成果,以便为读者进一步学习打下必要的基础。编者力求适应机械工程学科的教学改革要求,按照宽口径、厚基础的原则,加强对学科基础理论的阐述,增加学科知识信息量,增加对各种材料处理方法和成形方法的比较与分析,力求使读者提高分析问题和解决问题的能力。

编者长期从事本课程的教学工作,本书是编者们长期教学工作经验的总结,对机械类和其他专业的学生掌握机械制造科学会有一定的帮助。

本书由上海大学鞠鲁粤教授主编,上海交通大学陈关龙教授主审。参加本书编写的人员有(按章节顺序):上海大学鞠鲁粤(前言、绪论、第2章),苏州大学潘钰娴、谢志余(第1章),上海理工大学朱莉(第3章),浙江工业大学陈琍(第4章),北京工业大学许东来(第5章),上海大学朱冒冒、冯祖军(第6章),上海大学鞠鲁粤、张萍(第7章)。

编写过程中参阅并引用了有关教材、手册及相关文献,在此对有关作者表示感谢,并把引用的资料一并列举在参考文献中。

编写过程中得到了各院校有关领导和同志们的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本书涉及的专业面较广,由于编者的水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2004年 6月

目 录

绪论	1	1.10 钢中的合金元素	61
第 1 章 工程材料	7	1.10.1 合金元素在钢中的分布	61
1.1 概述	7	1.10.2 合金元素在钢中的作用	62
1.1.1 金属材料的发展	7	1.11 合金钢	65
1.1.2 非金属材料及复合材料的发展	7	1.11.1 合金结构钢	65
1.1.3 新材料的发展趋势	8	1.11.2 合金工具钢	68
1.2 固体材料的性能	8	1.11.3 特殊性能钢	70
1.3 金属的结构	13	1.12 非铁金属材料	71
1.3.1 金属的晶体结构	13	1.12.1 铝及铝合金	72
1.3.2 实际金属的晶体结构	17	1.12.2 铜及铜合金	73
1.4 金属的结晶	18	1.12.3 镁合金	74
1.4.1 纯金属的冷却曲线和过冷现象	18	1.12.4 钛合金	75
1.4.2 金属的同素异构性	20	1.12.5 轴承合金	75
1.4.3 金属铸锭的组织	21	思考题与习题	76
1.5 二元合金	21	第 2 章 铸造成形	79
1.5.1 二元合金的相结构	21	2.1 概述	79
1.5.2 二元合金相图	23	2.2 铸件形成理论基础	80
1.5.3 相图与性能的关系	29	2.2.1 金属的充型	80
1.6 铁碳合金	30	2.2.2 铸件的温度场	81
1.6.1 铁碳合金的基本相和基本组织	30	2.2.3 金属的凝固	82
1.6.2 铁碳合金相图	30	2.2.4 合金的收缩、应力及变形	83
1.7 碳钢	36	2.3 砂型铸造工艺分析	87
1.7.1 碳钢的分类	36	2.3.1 浇注位置和分型面的确定	87
1.7.2 碳钢的牌号	37	2.3.2 主要工艺参数的确定	89
1.8 铸铁	37	2.3.3 铸造工艺图的制定	90
1.8.1 铸铁的分类及特性	37	2.4 铸件的结构设计	92
1.8.2 铸铁的石墨化过程	37	2.5 砂型铸造方法	94
1.8.3 铸铁的牌号与性能	39	2.5.1 气动微震压实造型	94
1.9 钢的热处理	40	2.5.2 高压造型	95
1.9.1 钢在加热时的组织转变	40	2.5.3 真空密封造型	96
1.9.2 钢在非平衡冷却时的转变	44	2.5.4 气流冲击造型	97
1.9.3 钢的常用热处理工艺	50	2.5.5 消失模造型	98
1.9.4 钢的形变热处理	57	2.5.6 冷冻造型	100
1.9.5 钢的表面淬火	58	2.6 特种铸造	100
1.9.6 钢的化学热处理	60		

2.6.1 金属型铸造	100	3.4.10 粉末冶金温压成形技术	159
2.6.2 离心铸造	101	3.4.11 数字化塑性成形技术	160
2.6.3 压力铸造	103	思考题与习题	162
2.6.4 低压铸造	106		
2.6.5 熔模铸造	108	第 4 章 焊接成形	164
2.6.6 壳型铸造	109	4.1 概述	164
2.6.7 陶瓷型铸造	111	4.1.1 焊接基础知识	164
2.6.8 磁性铸造	111	4.1.2 熔化焊化学冶金	167
2.6.9 石墨型铸造	111	4.1.3 熔池结晶和接头组织	168
2.6.10 真空吸铸	112	4.1.4 焊接结构力学	169
2.6.11 差压铸造	112	4.2 常用焊接工艺方法	175
2.6.12 半固态金属铸造	113	4.2.1 手工电弧焊	175
2.6.13 现代整体精铸及快速凝固成形 技术	114	4.2.2 气体保护焊	177
2.6.14 铸造成形过程数值模拟	115	4.2.3 埋弧自动焊	179
2.6.15 铸造工程中的并行工程	116	4.2.4 电渣焊	180
2.6.16 常用铸造方法的比较	116	4.2.5 电阻焊	180
2.7 铸造技术的发展趋势	117	4.2.6 超声波焊	183
思考题与习题	118	4.2.7 摩擦焊	183
		4.2.8 钎焊	183
第 3 章 锻压成形	121	4.3 其他材料的焊接	184
3.1 概述	121	4.3.1 陶瓷的焊接	184
3.1.1 金属的塑性变形	121	4.3.2 塑料的焊接	184
3.1.2 金属及合金的锻造性	124	4.4 切割	185
3.2 锻造	126	4.4.1 气体火焰切割	185
3.2.1 自由锻	126	4.4.2 等离子弧切割	186
3.2.2 模锻	131	4.4.3 碳弧气刨	186
3.2.3 胎模锻	139	4.4.4 激光切割	187
3.3 板料冲压	140	4.5 焊接材料和金属材料的焊接	187
3.3.1 板料冲压的基本工序、特点及应用 范围	140	4.5.1 焊接材料	187
3.3.2 冲模种类	146	4.5.2 金属焊接性及其试验方法	189
3.4 锻压新技术	149	4.5.3 典型金属材料的焊接	190
3.4.1 精密模锻	150	4.6 焊接工艺设计	191
3.4.2 精密冲裁	150	4.7 焊接检验	192
3.4.3 回转成形	151	4.8 胶接	194
3.4.4 多向模锻	153	4.8.1 胶接工艺	195
3.4.5 超塑性成形	153	4.8.2 胶接应用举例	197
3.4.6 高能率高成形	155	4.9 焊接新技术及其发展	198
3.4.7 粉末冶金及粉末锻造	156	思考题与习题	200
3.4.8 液态模锻	158		
3.4.9 半固态金属塑性成形	158	第 5 章 非金属材料及成形	202
		5.1 概述	202
		5.1.1 非金属材料的发展	202

5.1.2 非金属材料分类	203	6.3.4 熔化沉积成形 FDM	248
5.1.3 非金属材料的选择及应用	203	6.3.5 三维打印 3D - P	248
5.2 工程塑料及其成形	204	6.3.6 形状沉积制造 SDM	248
5.2.1 工程塑料的组成及性能	204	6.4 快速成形技术的应用	249
5.2.2 工程塑料的分类和应用	206	6.4.1 原型制造	249
5.2.3 工程塑料的成形	208	6.4.2 快速制模 RT	250
5.3 工业橡胶及其成形	213	6.5 快速成形材料	253
5.3.1 工业橡胶的组成及性能	213	6.6 快速成形与相关学科之间的关系	253
5.3.2 工业橡胶的分类及应用	215	6.7 采用逆向工程构造三维模型	253
5.3.3 工业橡胶件的成形	216	6.7.1 逆向工程系统	254
5.4 工业陶瓷及其成形	219	6.7.2 逆向工程应用与意义	255
5.4.1 陶瓷的组织结构及性能	220	6.7.3 逆向工程测量系统	255
5.4.2 陶瓷的分类及应用	221	6.7.4 逆向工程后处理	259
5.4.3 陶瓷的成形	223	6.7.5 快速原型数据后处理实例	261
5.5 复合材料及其成形	226	思考题与习题	264
5.5.1 复合材料的定义、分类和性能	226		
5.5.2 复合材料的应用	228	第 7 章 零件的毛坯选择	265
5.5.3 复合材料的成形	233	7.1 毛坯选择的原则	265
5.5.4 复合材料的二次加工	235	7.2 常用毛坯成形方法的比较	267
5.6 纳米材料	236	7.3 常用零件的成形方法	269
5.6.1 纳米材料的定义和特性	236	7.3.1 轴杆类零件	269
5.6.2 纳米陶瓷	238	7.3.2 盘套类零件	270
5.6.3 纳米复合材料	239	7.3.3 机架、箱体类零件	271
思考题与习题	240	7.4 毛坯成形方法选择实例	271
第 6 章 快速成形	242	7.4.1 V 带轮零件的成形方法选择	271
6.1 概述	242	7.4.2 单级齿轮减速器组件的成形方法 选择	273
6.2 快速成形技术原理及工艺	243	7.5 毛坯成形方法选择的经济性分析	275
6.2.1 快速成形技术原理	243	7.5.1 毛坯材料的经济性选材原则	275
6.2.2 快速成形方式分类	243	7.5.2 铸件的生产成本分析	277
6.2.3 快速成形的工艺流程	243	7.5.3 锻件的生产成本分析	281
6.2.4 快速成形的优点	245	7.5.4 焊接件的生产成本分析	282
6.3 快速成形的主要工艺方法	246	7.5.5 各种成形方案经济性综合比较	287
6.3.1 立体光固化 SLA	246	思考题与习题	290
6.3.2 分层实体制造 LOM	246	参考文献	294
6.3.3 选择性激光烧结 SLS	247		

第 4 章

焊 接 成 形

焊接是连接金属的一种工艺方法,无论是在车辆、船体、飞机以及重型机械设备等各类机电设备制造工厂,还是在电机、电子器件及系统、家电制造工厂;无论是在钢铁、能源、石化生产,还是在桥梁、管道、高层建筑等各类工程建设项目中,焊接都是一种基本的或主要的生产技术。

除焊接外,还可以用螺栓连接、键连接、铆接、胶接等实现连接。从本质上看,焊接实现的连接是不可拆卸的永久性连接,它是通过加热或加压(或两者并用),并且用或不用填充材料,使焊件形成原子间结合的一种连接方法。它可以节省材料,简化制造工艺,缩短生产周期,且连接处具有良好的使用性能,具有较大的经济价值。

4.1 概述

4.1.1 焊接基础知识

1. 实现焊接的原理

为了达到焊接的目的,大多数焊接方法都需要借助加热或加压。或同时实施加热和加压,以实现原子结合。

从冶金的角度来看,可将焊接区分为三大类:液相焊接、固相焊接、固-液相焊接。

利用热源加热待焊部位,使之发生熔化,利用液相的相溶而实现原子间结合,即属液相焊接。熔化焊属于最典型的液相焊接。除了被连接的母材(同质或异质),还可添加同质或非同质的填充材料,共同构成统一的液相物质。常用的填充材料是焊条或焊丝。

固相焊接属于典型的压力焊方法。因为固相焊接时,必须利用压力使待焊部位的表面在固态下直接紧密接触,并使待焊表面的温度升高(但一般低于母材金属熔点),通过调节温度、压力和时间以充分进行扩散而实现原子间结合。在预定的温度(利用电阻加热、摩擦加热、超声振荡等)紧密接触时,金属内的原子获得能量、增大活动能力,可跨越待焊界面进行扩散,从而形成固相接合。

固-液相焊接,就是待焊表面并不直接接触,而是通过两者毛细间隙中的中间液相相联系。于是,在待焊的同质或异质固态母材与中间液相之间存在两个固-液界面,通过固液相间充分进行扩散,可实现很好的原子结合。钎焊即属此类方法,形成中间液相的填充材料称为钎料。

2. 焊接热源的种类及特征

实现焊接必须由外界提供相应的能量 ,也就是说 ,能源是实现焊接的基本条件。作为焊接热源应当是 热量高度集中可快速实现焊接过程 ,并保证得到致密而强韧的焊缝和最小的焊接热影响区。能够满足焊接条件的热源有以下几种。

1) 电弧热
利用气体介质中放电过程所产生的热能作为焊接热源 ,是目前焊接热源中应用最为广泛的一种 如手工电弧焊、埋弧自动焊等。

2) 化学热
利用可燃气体 (氧、乙炔等)或铝、镁热剂燃烧时所产生的热量作为焊接热源 ,如气焊。这种热源在一些电力供应困难和边远地区仍起重要的作用。

3) 电阻热
利用电流通过导体时产生的电阻热作为焊接热源 ,如电阻焊和电渣焊。采用这种热源所实现的焊接方法 ,都具有高度的机械化和自动化 ,有很高的生产率 ,但耗电量。

4) 高频热源
对于有磁性的被焊金属 ,利用高频感应所产生的二次电流作为热源 ,在局部集中加热 ,实质上属电阻热。由于这种加热方式热量高度集中 故可以实现很高的焊接速度 ,如高频焊管等。

5) 摩擦热
由机械摩擦而产生的热能作为焊接热源 如摩擦焊。

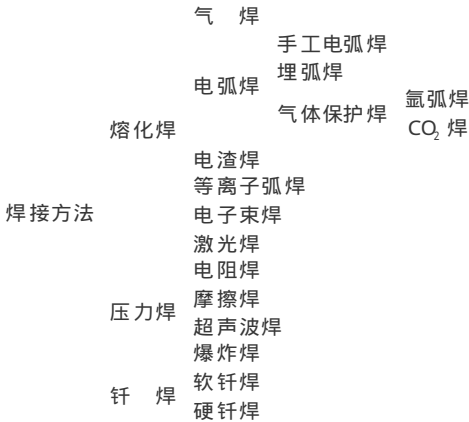
6) 电子束
在真空中 利用高压高速运动的电子猛烈轰击金属局部表面 ,使这种动能转化为热能作为焊接热源 ,如电子束焊。

7) 激光束
通过受激辐射而使放射增强的单色光子流 ,即激光 ,它经过聚焦产生能量高度集中的激光束作为焊接热源。

每种热源都有其本身的特点 ,目前在生产上均有不同程度的应用。与此同时 ,还在大力开发新的焊接热源。

3. 焊接方法的分类

综上所述 按焊接过程的物理和工艺特点的不同 ,焊接方法可作如下分类：



其中 熔化焊是将焊件连接部位局部加热至熔化状态 ,随后冷却凝固成一体 ,使被焊材料达到原子间距离 ,不加压力而获得原子间结合 ,完成焊接的方法。

压力焊是焊接过程中必须对焊件施加压力 ,同时加热或不加热 ,即通过加热、加压、扩散等方法 ,使被焊材料原子达到原子间距离 ,获得原子间结合力 ,以完成焊接的方法。

钎焊是采用低熔点的填充金属 (钎料)熔化后 ,与固态焊件金属相互扩散形成原子间的结合而实现连接的方法。

4. 焊接温度场

焊接时的加热和冷却过程称为焊接热过程 ,它包括焊件的加热、热能在焊件中的传播及冷却三个阶段。其特征是 :焊接热源不断移动 ,有极高的加热和冷却速度 ,对局部进行加热。

焊接过程中 ,热传导、对流传热、辐射传热等三种传热方式都起着重要的作用 ,影响最大的是热能在焊件内部的传导过程。传热对于焊接应力、变形、焊接化学冶金过程 ,焊缝及热影响区组织变化以及焊接缺陷的产生均有重要的影响。

图 4 - 1所示为典型的焊接温度场。根据其传热方向 ,可分为三维传热、二维传热、一维传热三种类型。影响温度场的主要因素有 材料的热物理参数、焊接规范参数、焊件的厚度、接头形式等。

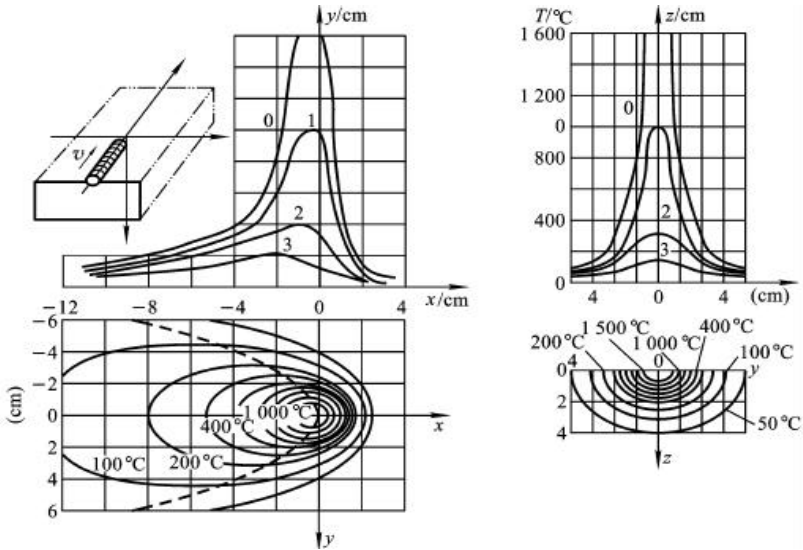


图 4 - 1 焊接温度场

5. 焊接热循环

在连续移动热源焊接温度场中 ,当热源移近时 ,焊缝附近母材上各点 ,将急剧加热 ,而当热源离去后 ,将迅速冷却降温 ,焊缝及近缝区母材上某一点所经受的这种升温 and 降温过程叫做焊接热循环。焊接热循环具有加热速度快 ,温度高 ,高温停留时间短和冷却速度快等特点。

距焊缝距离不同 ,材料所经受的焊接热循环过程也不同 ,因此 ,会引起金属内部组织的不同变化 ,从而影响接头性能和产生复杂的焊接应力与变形。

焊接热循环的主要参数有 :加热速度、最高温度、高温停留时间、瞬时冷却速度等。

4.1.2 熔化焊化学冶金

焊接过程中,焊接区内各种物质之间在高温下相互作用的过程,称为焊接化学冶金过程。

无保护的情况下在空气中焊接时,焊缝金属中的含氧、氮量显著增加,同时锰、碳等有益合金元素大量减少。这时,焊缝金属的塑性和韧性急剧下降。所以,为了得到优质的焊缝金属,必须研究焊接化学冶金的特点,找出其本身固有的规律。

1. 熔化焊化学冶金的特点

焊接化学冶金反应过程从焊接材料被加热、熔化开始,经熔滴过渡,最后到达熔池中,该过程是分区域(药皮反应区、熔滴反应区、熔池反应区)连续进行的(图 4-2),不同的焊接方法有不同的反应区。

在药皮反应区中,主要发生水分的蒸发、某些物质的分解、铁合金的氧化等。反应析出的大量气体,一方面隔绝了空气,另一方面,也对被焊金属和药皮中的铁合金产生了很大的氧化作用,结果,将显著改变焊接区气相的氧化性。

熔滴反应区包括熔滴形成、长大到过渡至熔池前的整个阶段。在这里,会发生气体的分解和溶解、金属的蒸发、金属及其合金成分的氧化和还原、焊缝金属的合金化等。反应时间虽短(0.01~0.1 s),但平均温度高(2 000~2 800 K)、液态金属与气体及熔渣的接触面积大,所以是冶金反应最激烈的部位,对焊缝成分的影响也最大。

熔滴金属和熔渣以很高的速度落入熔池后,即同熔化了了的母材混合或接触,各反应继续进行。该区温度较熔滴反应区低,约为 1 800~2 200 K,反应时间较长,为数秒钟,并有两个显著特点:一是温度分布极不均匀,熔池头部和尾部存在温度差,因而冶金反应可以同时向相反的方向进行。二是反应过程不仅在液态金属与气、渣界面上进行,而且也在液态金属与固态金属和液态熔渣的界面上进行。

2. 焊接区内的气体和杂质

焊接区内的气体来源主要有:焊接材料、热源周围的气体介质、焊丝和母材表面的杂质、材料的蒸发。产生的气体中,对焊接质量影响最大的是 N_2 、 H_2 、 O_2 、 CO_2 、 H_2O 。

空气是氮的主要来源,由于氮的作用,会在焊缝中产生气孔,在液态金属中会形成脆性氮化物,其中一部分以片状夹杂物的形式残留于焊缝中;另一部分则使钢的固溶体中含氮量大大增加,从而使焊缝严重脆化。

氢主要来自焊接材料中的水分和其他含氢物质、电弧周围气体中的水蒸气、焊丝和母材坡口表面上的铁锈和油污等杂质。氢与熔池作用对焊缝质量也有重要影响,氢易于在焊缝中造成气孔,即使溶入量不足以形成气孔,固态焊缝中多余的氢也会在焊缝中的微缺陷处集中形成氢分子,这种氢的聚集往往在微小空间内形成局部的极大压力,使焊缝变脆。

氧来源于周围的空气以及焊接材料和焊件中的高价氧化物、水分、铁锈等的分解产物。在电弧高温作用下,氧分解为氧原子,氧原子要和多种金属发生氧化反应,如:

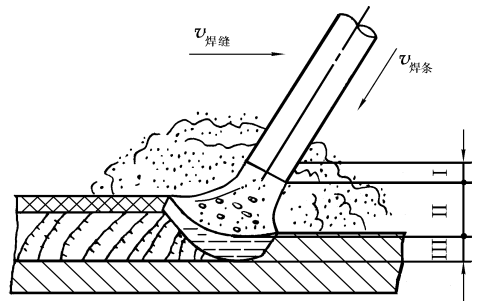
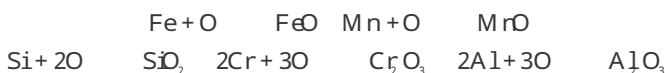


图 4-2 焊接冶金反应区

—药皮反应区； —熔滴反应区； —熔池反应区



有的氧化物能溶解在液态金属中,冷凝时因溶解度下降而析出,成为焊缝中的杂质,影响焊缝质量,是一种有害的冶金反应物。大部分金属氧化物则不溶于液态金属,生成后会浮在熔池表面进入渣中。

硫和磷是钢中有害的杂质,焊缝中的硫和磷主要来源于母材、焊芯和药皮。硫在钢中以 FeS 形式存在,与 FeO 等形成低熔共晶聚集在晶界上,增加焊缝产生裂纹的倾向,同时降低焊缝的冲击韧度和抗腐蚀性。磷与铁、镍等也可形成低熔点共晶,促进热裂纹的产生。磷化铁硬而脆,使焊缝的冷脆性加大。

因此,为了保证焊缝质量,要从以下方面采取措施:

1) 减少有害元素进入熔池

其主要措施是机械保护,使电弧空间的熔滴和熔池与空气隔绝,防止空气进入;还应清理坡口及两侧的锈、水、油污,烘干焊条,去除水分等。

2) 清除已进入熔池中的有害元素,增添合金元素

主要通过焊接材料中的合金元素进行脱氧、脱硫、脱磷、去氢和渗合金等,从而保证和调整焊缝的化学成分。

4.1.3 熔池结晶和接头组织

焊接接头包括焊缝、熔合区和热影响区,其划分见图 4-3。

1. 熔池结晶的特点和结晶形态

焊接熔池的结晶过程与一般冶金和铸造时液态金属的结晶过程并无本质上的区别,也服从液相金属凝固理论的一般规律。与炼钢和铸造冶金过程相比,它有以下特点:

(1) 熔池金属体积很小,周围是冷金属、气体等,故金属处于液态的时间很短,手工电弧焊从加热到熔池凝固往往只有十几秒,各种冶金反应进行得不充分。

(2) 熔池中反应温度高,往往高于炼钢炉温 200℃,使金属元素强烈地烧损和蒸发。

(3) 熔池的结晶是一个连续熔化、连续结晶的动态过程。

在焊接熔池金属结晶时,由于熔池各部位的晶粒生长速度和熔池中的温度梯度并不一致,因此,在焊缝边缘,晶粒开始生长的熔合线附近,平面晶得到生长。随着远离熔化边界,结晶形态向胞状晶、胞状树枝晶、树枝晶和等轴树枝晶发展。在实际的焊缝中,不一定具有上述全部结晶形态。

2. 焊接接头的组织和性能

1) 焊缝

焊缝属于铸造组织,晶粒呈垂直于熔池底壁的柱状晶,硫、磷等形成的低熔点杂质容易在焊缝中心形成偏析,使焊缝塑性降低,易产生热裂纹。由于按等强度原则选用焊条,通过渗合金实现合金强化,因此,焊缝的强度一般不低于母材。

2) 熔合区

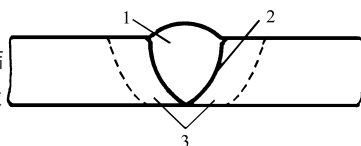


图 4-3 焊接接头
1—焊缝; 2—熔合区; 3—热影响区

焊接接头中,焊缝向热影响区过渡的区域,称为熔合区(亦称半熔化区)。此区成分及组织极不均匀,晶粒长大严重,冷却后为粗晶粒,强度下降,塑性和冲击韧度很差,往往成为裂纹的发源地。虽然熔合区只有 0.1~1 mm,但它对焊接接头的性能有很大影响。

3) 热影响区

焊接过程中,材料因受热的影响(但未熔化)而发生金相组织和力学性能变化的区域,称为热影响区(图 4-4)。它包括过热区、相变重结晶区、不完全重结晶区。

(1) 过热区

焊接热影响区中,具有过热组织或晶粒显著粗大的区域称为过热区。此区的温度范围为固相线至 1100℃,宽度约 1~3 mm。由于温度高,晶粒粗大,使塑性和韧性降低。焊接刚度大的结构时,常在过热区产生裂纹。

(2) 相变重结晶区

此区的温度范围为 1100℃ 至 A_{c3} 之间,宽度约为 1.2~4.0 mm。由于金属发生了重结晶,随后在空气中冷却,因此可以得到均匀细小的正火组织。相变重结晶区的金属力学性能良好。

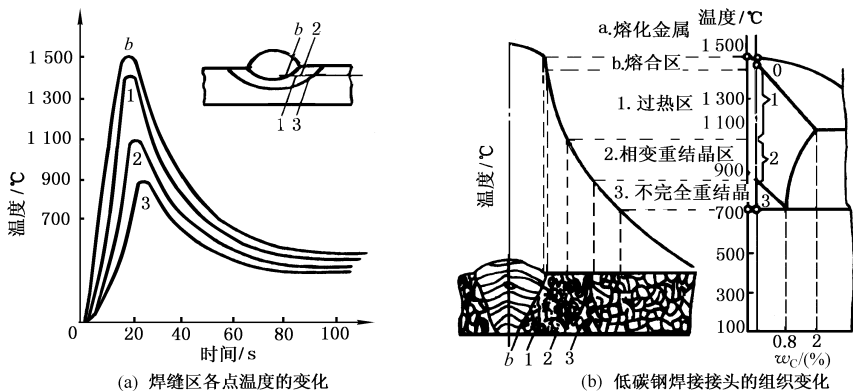


图 4-4 焊接接头及热影响区

(3) 不完全重结晶区

此区的温度范围在 A_{c1} ~ A_{c3} 之间,只有部分组织发生相变。由于部分金属发生了重结晶,冷却后可获得细化的铁素体和珠光体,而未重结晶的部分金属则得到粗大的铁素体。由于晶粒大小不一,故力学性能不均匀。

焊缝及热影响区的大小和组织性能变化的程度取决于焊接方法、焊接规范、接头形式等因素。在热源集中、焊接速度快时,热影响区就小。实际上,接头的破坏常常是从热影响区开始的。为消除热影响区的不良影响,焊前可预热工件,以减缓焊件上的温差及冷却速度或采用其他措施。

4.1.4 焊接结构力学

按结构承载、工作条件和结构特征来分,焊接结构可分为:

1) 梁、柱和桁架结构

工作在横向弯曲载荷下的结构称作梁,而在纵向弯曲或压力下工作的结构称作柱。拉杆是承

受拉力的构件,各种杆件经节点相连可承担梁或柱的载荷,而把主要工作在拉伸或压缩载荷下各种杆件的组合结构称为桁架、塔桅结构。它们是组成各类建筑钢结构的基础,如电视塔、屋架、栈桥等都属这一类。

2) 板壳结构

板壳结构大多用钢板成型加工后拼焊而成,主要制造能承受内压或外压、要求密闭的各种焊接容器,包括各种压力容器、锅炉、储罐、塔、运输槽车及管道等。

3) 机器结构

机器结构是机器的一个组成部分,要满足机器耐冲击、承受交变载荷、耐磨、耐蚀、耐高温等工作要求,常构成铸-压-焊、铸-焊及锻-焊等复合结构,机体、机座、床身和滚筒、轴、齿轮就是这类典型结构。汽轮机、发电机、柴油机、水轮机等动力机械,以及减速箱、机床、压力机中都包含有这类焊接结构。

1. 焊接结构特点

焊接结构有自己的特点,只有正确认识和切实掌握它的特点,才能设计制造出性能良好、结构合理的焊接结构,才能保证结构运行的安全可靠。焊接结构的特点是:

1) 整体性强

焊接结构具有很好的气和水的密封性,但刚度大,对应力集中因素和缺陷较为敏感,选材时应注意。

2) 材料性能变化

焊接过程会局部改变材料的性能,使结构中的性能不均匀,甚至部分材料性能会有所下降,对整体结构的强度和断裂行为产生一定影响。

3) 存在焊接残余应力和变形

其结果易产生裂纹,不仅影响结构的外形和尺寸,还会影响结构的承载能力,对焊后加工也影响其尺寸的稳定性和加工精度。

4) 焊后加工工艺的影响

不同的制造工艺,如冷加工、切削、焊后热处理等都会对结构性能产生不同影响。

5) 重要结构件必须经过严格的无损检测

无损检测技术能保证产品质量和提高安全使用的可靠性。

2. 焊接接头力学特点

1) 力学性能不均匀

由于焊接接头各区在焊接过程中发生不同的焊接冶金过程,并经受不同的热循环和应变循环的作用,各区的组织和性能存在较大的差异,焊接接头组织的不均匀,造成了整个接头力学性能的不均匀。

2) 工作应力分布不均匀

由于焊接接头存在几何不连续性,致使其工作应力是不均匀的,存在应力集中。当焊缝中存在工艺缺陷,焊缝外形不合理或接头形式不合理时,将加剧应力集中程度,影响接头强度,特别是疲劳强度。

3) 刚度较大

由于焊缝与构件组成整体,所以与铆接或胀接相比,焊接接头具有较大的刚度。

3. 焊接残余应力和变形

1) 焊接残余应力与变形产生的原因

焊接残余应力是焊接过程中焊件内产生的应力,它将使焊件的许用应力降低,严重时将导致焊件的开裂。焊接变形是焊接过程中焊件产生的变形,它可引起结构形状和尺寸的改变。

由于焊件各处经受了不均匀的加热和冷却过程,使焊缝及近缝区存在拉应力,而远缝区存在压应力,焊接残余应力的松弛则是焊接残余变形产生的根本原因。

2) 焊接应力和变形的的基本形式

(1) 焊接应力

焊接应力形式如图 4 - 5 所示。

焊接加热是局部进行的。焊接时焊缝被加热,焊缝区域膨胀。但是由于焊缝区域周围的金属未被加热和膨胀,所以该部分的金属制约了焊缝区域受热金属的自由膨胀,焊缝被压缩产生塑性变形。焊缝冷却后,焊缝区域比周围区域短,但是焊缝周围区域没有缩短,从而阻碍焊缝区域的自由收缩,因此焊接以后工件内部产生了残余应力,焊缝区域受拉,周围区域受压。

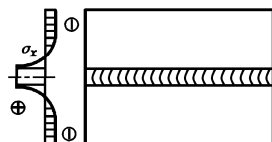


图 4 - 5 焊接残余应力的分布

(2) 焊接变形

焊接变形的的基本形式如图 4 - 6 所示,主要有以下几种:

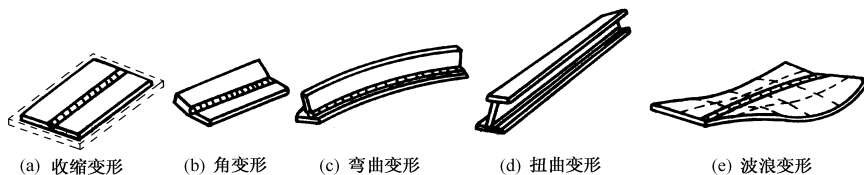


图 4 - 6 焊接变形的的基本形式

收缩变形

焊接后金属构件纵向和横向尺寸的缩短,这是由于焊缝纵向和横向收缩引起的。

角变形

由于焊缝截面上下不对称,焊缝横向收缩沿板厚方向分布不均匀,使板绕焊缝轴转一角度。此变形易发生于中、厚板焊件中。

弯曲变形

因焊缝布置不对称,引起焊缝的纵向收缩沿焊件高度方向分布不均匀而产生。

扭曲变形

当焊前装配质量不好,焊后放置不当或焊接顺序和施焊方向不合理,都可能产生扭曲变形。

波浪变形

薄板焊接时,因焊缝区的收缩产生的压应力,使板件失稳而形成。

3) 焊接应力和变形对焊接结构的影响

焊接不均匀加热引起的焊接残余应力及变形,可能与工作应力叠加,导致结构破坏。焊接变形还可能引起结构的几何不完善,产生附加应力,直接影响结构强度。

4) 焊接变形的控制

(1) 合理的结构及接头设计

设计结构时,尽可能减少焊缝数量,焊缝的布置和坡口形式尽可能对称,焊缝的截面和长度尽可能小。

(2) 合理的焊接工艺设计

焊前组装时,采用反变形法(图 4-7)。一般按测定和经验估计的焊接变形方向和数量,组装时使工件反向变形,以抵消焊接变形。同样,也可采用预留收缩余量来抵消尺寸收缩。

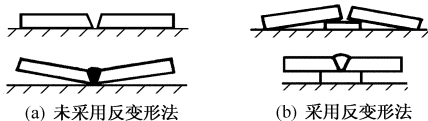


图 4-7 焊前组装时采用反变形法

刚性固定法能限制产生焊接变形,但应注意刚性固定会产生较大的焊接应力(图 4-8)。

工艺上采用合理的焊接顺序,即尽可能对称地选择焊接次序(图 4-9)。例如,如果焊缝较长,从一端到另一端需较长时间,温度分布不均匀,焊后变形较大,可将焊缝全长分成若干段,各段依次焊接,且各段施焊方向与焊缝的总焊接方向相反,这样每段的终点与前一段的起点重合,温度分布较均匀,从而减少了焊接应力和变形。

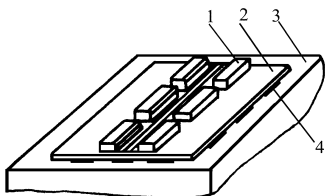


图 4-8 刚性固定法

1—压铁;2—焊件;3—平台;4—临时定位焊缝

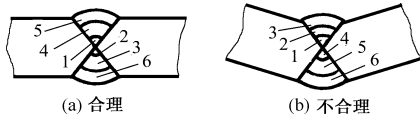


图 4-9 采用合理的焊接次序

5) 焊接变形的矫正方法

矫正变形的基本原理是产生新变形抵消原来的焊接变形。机械矫正法是用机械加压或锤击的冷变形方法,产生塑性变形来矫正焊接变形,如图 4-10所示。火焰加热矫正的原理与机械矫正法相反,它是利用火焰局部加热后的冷却收缩,来抵消该部分已产生的伸长变形,如图 4-11所示。

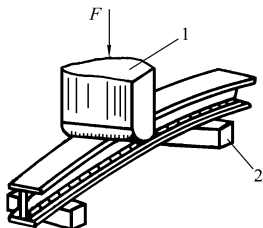


图 4-10 机械矫正法

1—压头;2—支承

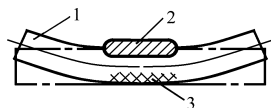


图 4-11 火焰加热矫正法

1—中性层;2—堆焊焊缝;3—加热区

6) 减少和消除焊接残余应力的措施

(1) 结构设计要避免焊缝密集交叉,焊缝截面和长度也要尽可能小,从而减少焊接残余应力。如图 4-12a b焊缝交叉密集,图 c d焊缝布置合理。

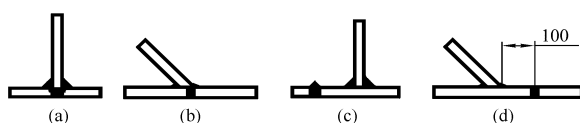


图 4 - 12 避免焊缝密集交叉

(2) 将焊件预热到 350 ~ 400 后再进行焊接 ,是一种减少焊接应力的有效方法。

(3) 锤击焊缝。

(4) 去应力退火。加热温度为 550 ~ 650 ,该方法可消除残余应力 80%左右 ,是最常用、最有效的方法。

4. 焊接裂纹

焊接应力超过材料的强度极限时 ,将使焊件产生裂纹。它不仅会造成应力集中 ,降低焊接接头的静载强度 ,更严重的是它是导致疲劳和脆性破坏的重要诱因。所以 ,焊接裂纹给生产带来许多困难 ,而且可能带来灾难性的事故。据统计 ,世界上焊接结构所出现的各种事故中 ,除少数是由于设计不当、选材不合理和运行操作上的问题之外 ,绝大多数是由裂纹而引起的脆性破坏。

在焊接生产中由于钢种和结构类型的不同 ,可能出现的各种裂纹形态和分布特征都是很复杂的。按产生裂纹的本质来分 ,大体上可分为以下五大类。

1) 热裂纹

热裂纹是在焊接时高温下产生的 ,它的特征是沿原奥氏体晶界开裂。根据所焊金属的材料不同 ,产生热裂纹的形态、温度区间和主要原因也各有不同 ,但其产生常跟 S、P 等杂质太多有关。例如 ,在含杂质较多的碳钢、低合金钢、单相奥氏体钢、镍基合金焊缝中易产生结晶裂纹 ,而纯金属的焊缝或近缝区常发生多边化裂纹。

2) 再热裂纹

厚板焊接结构 ,并采用含有某些沉淀强化合金元素的钢材 ,在进行消除应力热处理时或在一定温度下服役的过程中 ,在焊接热影响区粗晶部位发生的裂纹称为再热裂纹。它也具有沿晶开裂的特征 ,多发生在低合金高强度钢、珠光体耐热钢、奥氏体不锈钢等中。

3) 冷裂纹

冷裂纹是焊接生产中较为普遍的一种裂纹 ,它是在焊后冷至较低温度下产生的 ,主要发生在低合金钢、中合金钢、中碳和高碳钢的焊接热影响区。其断裂行径 ,有时沿晶扩展 ,有时穿晶前进。由于有些冷裂纹不是在焊后立即可以发现 ,须延迟一段时间 ,甚至在使用过程中才出现 ,所以危害较大。主要因素是氢致脆性。

4) 层状撕裂

在焊接大型厚壁结构的过程中 ,常在钢板的厚度方向承受较大的拉伸应力 ,于是沿钢板轧制方向出现一种台阶状的裂纹 ,即层状撕裂。它属于内部的低温开裂 ,一般在表面难以发现。产生的主要原因是轧制钢材的内部存在不同程度的分层夹杂物 ,常出现在厚壁结构的 T 形接头、十字接头和角接头中。

5) 应力腐蚀裂纹

焊接构件 ,如容器、管道等在腐蚀介质和拉伸应力的共同作用下 ,产生一种延时破坏的现象 ,称为应力腐蚀裂纹。该裂纹多属于晶间断裂性质 ,其形态如同枯干的树枝 ,从表面向深处发展 ,

且呈现为典型的脆性断口。

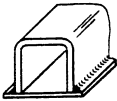
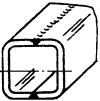
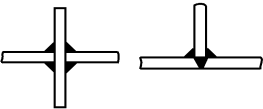
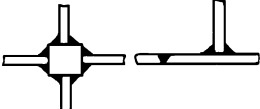
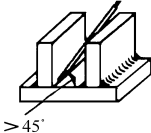
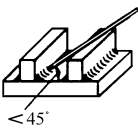
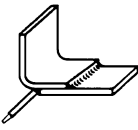
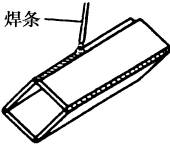
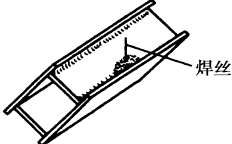
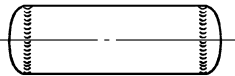
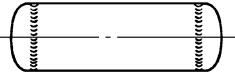
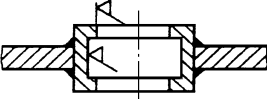
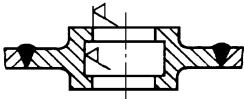
5. 焊接结构的设计

焊接结构设计时 ,一般应考虑下面一些因素 :

- (1) 焊接接头应保证具有足够的强度和刚度 ,保证一定的使用寿命。
- (2) 要考虑焊接接头工作介质的情况和使用条件 ,如温度、压力、腐蚀性、振动及疲劳等。
- (3) 尽量使焊接件不再进行或仅需少量进行机械加工。
- (4) 在设计有脆断倾向的焊接结构时 ,应尽量减少结构或焊接接头部位的应力集中 ;尽量减少结构的刚度 ;不采用过厚的截面 ;对于不受力焊缝的设计 ,应该和主要受力焊缝一样重视 ;尽量减少和消除残余拉伸应力的影响。

常见焊接件结构的设计见表 4 - 1。

表 4 - 1 常见焊接件结构的设计

不合理结构	合理结构	设计理由
		焊缝应均匀对称布置 ,可防止焊接应力分布不对称而产生的变形
		焊缝不能交叉密集
		焊条运条需有一定的角度
		焊条需有一定的操作空间
		埋弧焊接时应能堆放焊剂
		环形圆筒焊接不能在圆弧和直线相交处采用焊缝 ,焊缝应离圆弧有 30 ~ 50mm 的直线过渡 ,以减少应力集中
		避免焊缝靠近加工面