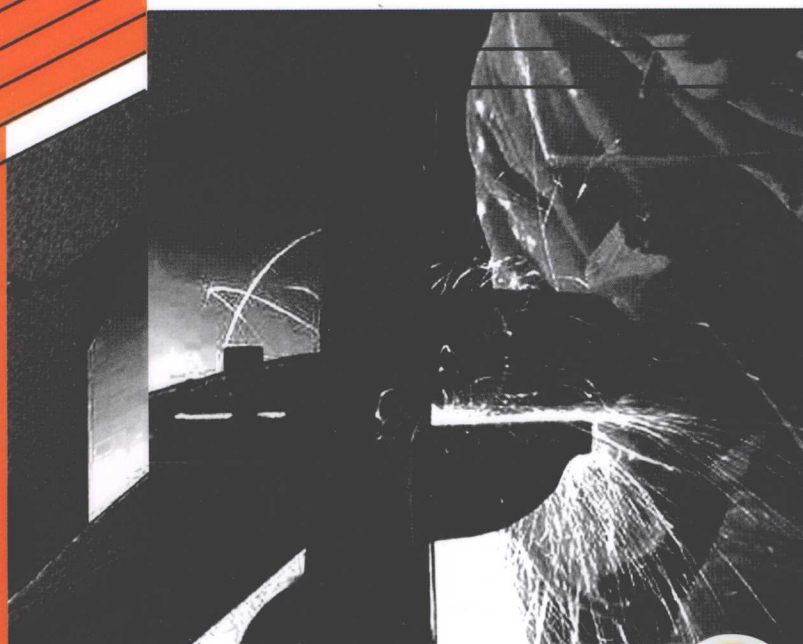


电焊工 工艺与操作技术

周岐 王亚君 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电焊工工艺与操作技术

周 岐 王亚君 编著



机械工业出版社

本书在理论联系实际的基础上,系统地讲解了常用焊接方法的工艺和操作技术,便于读者理解和掌握焊接操作技能。全书共分十二章,内容包括焊接及焊接生产基础知识、焊条电弧焊、氩弧焊、CO₂气体保护焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊、碳弧气刨、堆焊与补焊技术、焊接应力与变形、焊接缺陷及检验、焊接安全技术等。

本书从实际出发,适合从事焊接工作的初、中级焊工以及相关技术人员使用,也可作为职业院校相关专业培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

电焊工工艺与操作技术/周岐,王亚君编著. —北京:机械工业出版社, 2009.7

ISBN 978-7-111-27609-8

I. 电… II. ①周…②王… III. 电焊-焊接工艺 IV. TG443

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第117767号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:林春泉 责任编辑:赵玲丽 责任校对:樊钟英

封面设计:鞠杨 责任印制:洪汉军

北京市朝阳展望印刷厂印刷

2009年10月第1版第1次印刷

184mm×260mm·20.25印张·498千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27609-8

定价:45.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821

封面无防伪标均为盗版

前 言

焊接在机械、船舶制造、石油化工、航天、电力及家用电器等工业领域都具有广泛的应用。焊接技术工人的操作技能是企业职工队伍素质、企业整体素质的重要因素，焊工培训是提高工程焊接质量的关键，培训优秀焊工是提高焊接技术水平的一项根本任务。优秀的焊工不仅要掌握熟练的操作技能，还要掌握一定深度的理论知识。为适应我国工业的迅速发展，加强焊工的培训，从焊工实际出发，编写了本书。

本书突出了焊接专业各项知识的内部联系和理论联系实际。本书共分十二章，分别为焊接及焊接生产基础知识、焊条电弧焊、氩弧焊、CO₂气体保护焊、埋弧焊、电渣焊、等离子弧焊、碳弧气刨、堆焊与补焊技术、焊接应力与变形、焊接缺陷及检验、焊接安全技术。本书面向初、中级焊工和有关技术人员，目的是培养焊接施工人员能够熟练地综合运用各种操作技能与技术，并具有一定的工艺分析能力和解决生产实际问题能力。

本书由周岐、王亚君编写。中油吉林化建工程股份有限公司的杨惠、段斌，锦州化工设备厂的杨建新、赵建平，中冶天工建设有限公司的王德云为本书的编写提供了大量的帮助，特向他们致以衷心的感谢。

由于编者水平和经验有限，书中恐有错误或不妥之处，敬请读者批评指正。

编者
于辽宁工业大学

目 录

前言

第一章 焊接及焊接生产基础知识 1

第一节 焊接概述 1

一、焊接的概念和分类 1

二、焊接结构的优缺点 1

第二节 金属学基础知识 2

一、金属材料的力学性能 2

二、金属与合金的结构 4

三、铁碳合金相图 6

四、钢的热处理 7

第三节 焊接冶金过程 9

一、焊接电弧 9

二、熔滴过渡 13

三、气体对焊接金属的影响 14

四、熔渣的组成与作用 15

五、焊接接头与焊缝结晶 17

六、焊接热过程 19

第四节 常用材料的焊接性 20

一、金属的焊接性 20

二、常用金属的分类及焊接特点 22

三、异种金属的焊接 28

第五节 焊接机械识图 32

一、焊接接头形式 32

二、焊缝形式 34

三、焊缝符号及标注 35

四、焊接识图 40

第六节 焊接结构生产工艺及质量控制 43

一、焊接结构生产工艺 43

二、焊接生产质量控制 51

第二章 焊条电弧焊 53

第一节 焊条电弧焊设备及工具 53

一、焊条电弧焊对焊机的要求 53

二、焊条电弧焊机的分类及应用 54

三、焊接设备的选用及维护 58

四、焊条电弧焊的使用工具 61

第二节 焊条 63

一、焊条的组成及性能 63

二、焊条分类及选用 65

第三节 焊条电弧焊工艺及操作技术 72

一、引弧方法 72

二、运条方法 73

三、焊缝的起头、接头及收尾 76

四、焊接参数的选择 78

五、各种位置的焊接操作技术 81

第四节 焊条电弧焊技术应用 91

一、常用金属材料的焊条电弧焊 91

二、管道焊接工艺及操作技术 109

三、金属结构焊接技术 116

四、单面焊双面成形技术 118

五、薄板的焊接 119

六、管板焊接技术 120

第三章 氩弧焊 123

第一节 氩弧焊概述 123

一、氩弧焊原理及特点 123

二、氩弧焊的分类 124

第二节 氩弧焊设备 125

一、设备组成 125

二、弧焊电源 126

三、焊枪 127

四、供气系统 128

五、水路系统 128

六、控制系统 129

七、氩弧焊设备的维护 129

第三节 氩弧焊焊接材料 129

一、保护气体 129

二、电极材料 130

三、焊丝 131

第四节 氩弧焊工艺及操作技术 132

一、钨极氩弧焊焊接参数 132

二、钨极氩弧焊操作技术 134

三、熔化极氩弧焊工艺技术 137

第五节 氩弧焊技术应用 138

一、常用金属材料的氩弧焊 138

二、薄板水平对接的钨极氩弧焊 149

三、插入式管板的钨极氩弧焊	151	二、对接直焊缝的焊接技术	191
四、小直径管子的钨极氩弧焊	152	三、对接环焊缝的焊接技术	194
五、管道氩弧打底焊	153	四、角焊缝的焊接技术	195
六、背面自保护 TIG 焊丝的应用	154	第五节 埋弧焊技术应用	196
第四章 CO₂ 气体保护焊	155	一、常用金属材料的埋弧焊	196
第一节 CO ₂ 气体保护焊概述	155	二、容器纵缝埋弧焊	200
一、CO ₂ 气体保护焊原理及特点	155	三、深坡口焊接技术	202
二、CO ₂ 气体保护焊的冶金特点	155	第六章 电渣焊	205
第二节 CO ₂ 气体保护焊设备	157	第一节 电渣焊概述	205
一、弧焊电源	157	一、电渣焊原理及特点	205
二、控制系统	159	二、电渣焊的类型及应用	206
三、焊枪	159	第二节 电渣焊设备	208
四、送丝系统	160	一、焊接电源	208
五、供气系统	161	二、焊机结构	208
六、CO ₂ 气体保护焊设备的维护	161	三、电渣焊设备维护和保养	210
第三节 CO ₂ 气体保护焊焊接材料	162	第三节 电渣焊焊接材料	210
一、CO ₂ 气体	162	一、电极	210
二、焊丝	163	二、焊剂	211
第四节 CO ₂ 气体保护焊工艺及操作	164	第四节 电渣焊工艺及操作技术	211
技术	164	一、焊接规范对焊缝的影响	211
一、CO ₂ 气体保护焊焊接规范	164	二、丝极电渣焊规范的选择	212
二、CO ₂ 气体保护焊操作技术	166	三、丝极电渣焊操作技术	213
第五节 CO ₂ 气体保护焊技术应用	170	第五节 电渣焊技术应用	216
一、常用金属材料的 CO ₂ 焊	170	一、常用金属材料的电渣焊	216
二、中厚板的水平对接 CO ₂ 焊	171	二、容器纵缝熔嘴电渣焊技术	217
三、管板的 CO ₂ 气体保护焊	171	第七章 等离子弧焊	220
四、管子对接的 CO ₂ 焊	172	第一节 等离子弧概述	220
五、自动 CO ₂ 焊技术	173	一、等离子弧的产生原理	220
第五章 埋弧焊	176	二、等离子弧的特点	221
第一节 埋弧焊概述	176	三、等离子弧的类型	221
一、埋弧焊原理	176	四、等离子弧焊接	222
二、埋弧焊特点	177	第二节 穿透型等离子弧焊接	223
第二节 埋弧焊设备	177	一、穿透型等离子弧的焊接设备	223
一、埋弧焊机的工作原理	177	二、自动等离子弧焊的焊接工艺	226
二、MZ—1000 型埋弧焊机的构造及	179	三、穿透型等离子弧焊的技术应用	229
使用	179	第三节 微束等离子弧焊接	232
三、埋弧焊辅助设备	182	一、微束等离子弧焊接特点	232
第三节 埋弧焊焊接材料	183	二、微束等离子弧焊接设备	232
一、焊丝	183	三、微束等离子弧焊接工艺	233
二、焊剂	184	第四节 脉冲等离子弧焊接	236
三、焊丝和焊剂的选用	187	一、脉冲等离子弧焊的特点	236
第四节 埋弧焊工艺及操作技术	188	二、脉冲等离子弧焊接的焊接参数	237
一、埋弧焊焊接参数的选择	188	三、脉冲等离子弧焊接的应用	237

第八章 碳弧气刨	241	三、合理的装配和焊接顺序	283
第一节 碳弧气刨概述	241	四、刚性固定法	285
一、碳弧气刨的原理	241	五、散热法	286
二、碳弧气刨的特点	241	六、锤击焊缝法	287
第二节 碳弧气刨设备及材料	241	第四节 焊接变形的矫正	287
一、电源设备	242	一、机械矫正法	287
二、碳弧气刨枪	242	二、气体火焰矫正法	287
三、碳弧气刨软管	243	第五节 减少焊接应力的方法	289
四、碳棒	243	一、选择合理的焊接参数和焊接方法	289
第三节 碳弧气刨工艺及操作技术	244	二、降低焊接接头刚度	289
一、碳弧气刨工艺选择	244	三、选择合理的焊接顺序	289
二、碳弧气刨的操作技术	246	四、整体预热法	292
第四节 碳弧气刨的应用	247	五、加热“减应区”法	292
一、常用金属的碳弧气刨	247	第六节 焊接残余应力的消除方法	292
二、水碳弧气刨	247	一、机械法	292
第九章 堆焊与补焊技术	249	二、热处理方法	293
第一节 堆焊	249	第十一章 焊接缺陷及检验	295
一、概述	249	第一节 常见焊接缺陷及防止措施	295
二、堆焊工艺	251	一、焊缝外形尺寸不符合要求	295
三、焊条堆焊	253	二、咬边	295
四、埋弧堆焊	254	三、烧穿	296
五、等离子弧堆焊	256	四、弧坑	296
六、电渣堆焊	260	五、焊瘤	297
第二节 补焊	260	六、夹渣	297
一、概述	260	七、未焊透	298
二、总体补焊方法的确定	260	八、气孔	299
三、补焊工艺	261	九、裂纹	300
四、顶水顶气顶压补焊技术	263	第二节 焊接检验	302
五、铸铁的补焊	265	一、破坏性检验	302
六、铸钢的补焊	273	二、非破坏性试验	304
七、压力容器的补焊	273	第十二章 焊接安全技术	309
第十章 焊接应力与变形	275	第一节 预防触电的安全知识	309
第一节 焊接应力和变形产生的原因	275	一、安全电压	309
一、焊件的热应力	275	二、预防触电的安全措施	309
二、熔池的凝缩应力	275	第二节 焊接过程中的有害因素	309
三、焊接接头的组织应力	275	一、电弧辐射	310
第二节 焊接变形的影响因素及种类	276	二、金属粉尘	310
一、影响焊接变形的因素	276	三、有毒气体	310
二、焊接变形的种类	277	四、其他有害因素	310
第三节 减少和防止焊接变形的办法	281	第三节 劳动保护	311
一、控制焊接变形的原则	282	一、预防职业病危害的措施	311
二、反变形法	282	二、预防工伤事故的安全措施	313
		参考文献	315

第一章 焊接及焊接生产基础知识

第一节 焊接概述

一、焊接的概念和分类

焊接就是被焊工件的材质（同种或异种），通过加热或加压或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件的材质达到原子间的结合而形成永久性连接的工艺过程。按焊接的工艺特点和母材金属所处的状态，焊接方法可分为熔化焊、压力焊、钎焊和特种焊四类，见表 1-1。

表 1-1 焊接方法的分类

焊接方法	一级分类	二级分类	焊接方法	一级分类	二级分类
熔化焊	气焊		钎焊	烙铁钎焊	
	电弧焊	焊条电弧焊、埋弧焊		火焰钎焊	
	电渣焊			电阻钎焊	
	气体保护焊	自保护电弧焊、惰性气体保护电弧焊、活性气体保护电弧焊		电弧钎焊	
				感应钎焊	
				盐浴钎焊	
	等离子弧焊			金属浴钎焊	
压力焊	锻焊			炉中钎焊	
	摩擦焊			真空钎焊	
	气压焊			超声波钎焊	
	电阻焊	点焊、缝焊、凸焊、对焊	扩散钎焊		
	冷压焊		特种焊	电子束焊	
	超声波焊				
	爆炸焊				
	扩散焊			激光焊	
	高频焊				

二、焊接结构的优缺点

（一）优点

焊接结构与铆接结构、铸件及锻件相比，具有下列特点：

- 1) 焊接结构重量轻, 节省金属。实践证明, 它比铆接结构可节省金属 15% ~ 20%; 比铸铁件节省金属 30% ~ 40%; 比铸钢件节省金属 30% 左右; 比锻件也有不同程度的节省。
- 2) 焊接结构比铆接、铸件的结构强度高, 而且接头密封性好。
- 3) 焊接结构劳动量小, 生产率高, 加工和装配容易, 可以多人同时焊接。
- 4) 焊接时的噪声低、劳动条件较好。
- 5) 容易实现机械化和自动化。

(二) 缺点

焊接的不足之处: 首先是焊接由于局部和加热不均匀容易引起变形和产生内应力, 焊后有时要作矫正处理, 对重要构件还要进行焊后热处理, 以消除内应力; 其次, 焊接前, 通过热处理或加工硬化形成的金属内部有利组织性能在焊接后受到破坏, 焊接热影响区塑性下降, 硬度增高, 从而容易导致裂纹产生; 另外, 某些焊接方法会产生强光或有害气体和烟尘, 必须采取相应的劳保措施, 以保护工人的身体健康。

第二节 金属学基础知识

一、金属材料的力学性能

金属在一定的外力作用下所表现出的抵抗变形和断裂的能力, 称为金属的力学性能。

常用的力学性能指标有抗拉强度、屈服强度、伸长率、断面收缩率、弯曲角、冲击韧度等。其中, 抗拉强度和屈服强度反映了材料的强度; 伸长率、断面收缩率和弯曲角反映了材料的塑性; 冲击韧度能够反映材料的韧性。

(一) 强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗变形和破坏的能力, 它是用应力来度量的。常用来衡量金属强度的指标有屈服强度和抗拉强度。

金属强度通过拉伸试验机拉伸试样获得。将材料按规定加工成一定形状和尺寸的试样, 将试样置于拉伸试验机中按标准规定加轴向载荷, 直至试样被拉断为止, 如图 1-1 所示。

屈服强度是表示材料抵抗塑性变形的能力, 抗拉强度是试样抵抗被拉断的能力, 是试样在拉断前所能承受的最大标称拉应力。抗拉强度以通过拉断前试样所能承受的最大载荷除以试样的原始横截面积得到。

屈服强度和抗拉强度是金属材料力学性能的重要指标。金属结构所能承受的应力一般都应小于它的屈服强度, 否则就会产生明显的塑性变形, 以致影响其使用性能, 甚至遭受破坏。

(二) 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下, 产生塑性变形而不被破坏的能力。衡量塑性的指标有

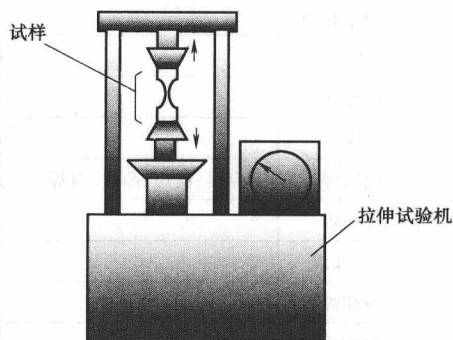


图 1-1 拉伸试验示意图

伸长率(δ)、断面收缩率(ψ)和弯曲角(α)。

1. 伸长率 伸长率是指断裂后试样的残余总变形量与原始长度的比值,用百分率来表示。

2. 断面收缩率 断面收缩率是指试样拉断后断口面积的缩减量与原截面面积之比值,同样用百分率来表示。

3. 弯曲角 弯曲角是指一定形状和尺寸的试样,在被弯曲到出现第一条裂缝时所测得的角度,用 α 表示,如图1-2a所示。金属焊缝的塑性往往是通过在室温下的冷弯试验来测定的,如图1-2b所示。

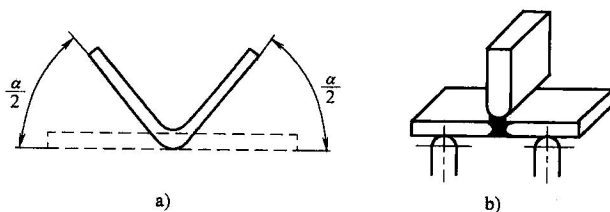


图 1-2 弯曲角和焊缝的冷弯试验

a) 弯曲角 b) 焊缝的冷弯试验

由于弯曲时试样与压头接触的一面受压缩,另一面受拉伸,弯曲角度越大时,试样在出现裂纹前的变形也越大,即塑性越好。当弯曲角等于 180° 时,塑性最好。

塑性也是金属材料力学性能的一个重要指标,它将影响着材料的加工方法,如塑性良好的低碳钢就易于进行压力加工。另外,为了避免金属结构在工作时突然断裂或产生焊接裂缝,一般都要求其材料具有一定的塑性。一般材料的伸长率 δ 达到5%或断面收缩率 ψ 达到10%即可满足要求。过高的塑性会导致强度的下降。

(三) 硬度

硬度是金属材料表面抵抗其他更硬物体压入的能力,它也是金属材料力学性能的重要指标之一。常用的硬度指标有布氏硬度(HB)、洛氏硬度(HR)和维氏硬度(HV)等。

1. 布氏硬度 是采用一个淬火的钢球在布氏硬度计上测得的,如图1-3所示。

布氏硬度常用来测量硬度不高的材料,而且通常根据测得的布氏硬度近似计算出其抗拉强度。对于低碳钢, $\sigma_b \approx 0.36HB$;对于高碳钢, $\sigma_b \approx 0.34HB$;对于调质合金钢, $\sigma_b \approx 0.325HB$ 。

2. 洛氏硬度 是在洛氏硬度计上测得的。压头通常采用圆锥角为 120° 金刚石压头,如图1-4所示。压痕越深,硬度越低;反之,硬度越高。在实际测定时,硬度值可直接从洛氏硬度计的刻度盘或显示器上读出,例如,施工现场焊缝或热影响区的硬度一般采用便携式硬度计测量,如图1-5所示。

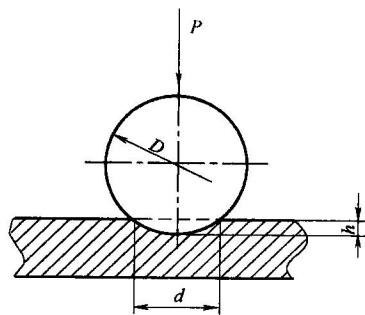


图 1-3 布氏硬度测量示意图

根据所加载荷与压头形状的不同,洛氏硬度可分为A、B、C三级,分别表示为HRA、HRB、HRC,生产中常用的是C级。

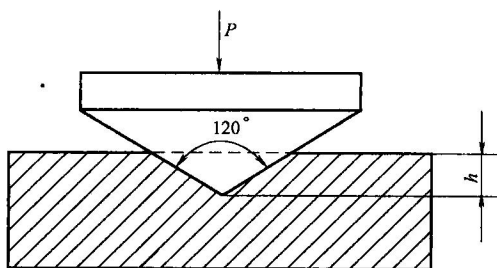


图 1-4 洛氏硬度测量示意图

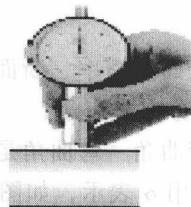


图 1-5 便携式硬度计测量硬度

洛氏硬度常用于测量硬度较高的材料，如淬硬钢等。洛氏硬度的数值没有单位，当 $HB > 220$ 时，洛氏硬度和布氏硬度值的关系大致为 1:10。

3. 维氏硬度 维氏硬度的试验原理与布氏硬度相同，但其压头不是球体而是对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体。维氏硬度计所加载荷小，压入金属表面的深度浅，主要用于测定材料表面薄硬层的硬度。此外，材料或焊缝区显微组织的硬度也常用 HV 测定。但此法测量硬度时不如洛氏法迅速。

（四）韧性

凡是承受冲击载荷的零件，要求材料应具有抵抗冲击载荷而不被破坏的能力，这就是冲击韧度。它表示金属经受突然施加的较大冲击力的能力，即在冲击载荷作用下，衡量金属在断裂前吸收变形能量能力的指标。

冲击韧度通过冲击试验来测定，冲击试验是将被测试的金属材料加工成一定形状和尺寸的试样，放在专门的冲击试验机上，并加上一定的冲击载荷将试样打断，如图 1-6 所示。冲击试样一般采用夏比 V 形缺口形式，试验机一般采用悬臂梁式。

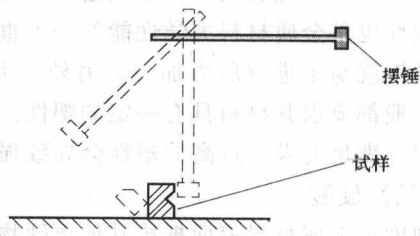


图 1-6 悬臂梁式冲击试验示意图

焊接接头的冲击试验可用来测定焊接接头的冲击韧度和缺口敏感性，作为评定材料断裂韧度和时效敏感性的一个指标。

（五）疲劳强度

疲劳强度是金属材料经受重复的交变载荷作用下的能力，一般重复施加应力或重复施加多种应力。一般钢材的弯曲疲劳强度大约只有抗拉强度的一半左右，疲劳断裂是金属结构失效的一种主要形式。对于经受周期性应力和振动载荷的产品（如桥梁和飞机等），疲劳强度是很重要的。

材料的疲劳强度在疲劳试验机上测定，如图 1-7 所示。

二、金属与合金的结构

不同的金属与合金，由于其内部组织结构的不同，性能也不一样，这主要与其各自的内部构造有关。

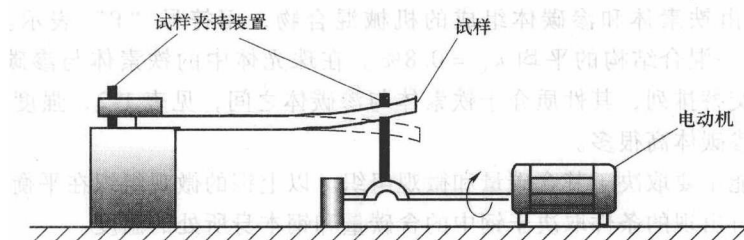


图 1-7 疲劳试验示意图

(一) 金属的结构与组织

金属和其他物质一样是由原子构成的，人们把原子在三维空间作有规则的周期性重复排列的物质称为晶体。由于金属内原子的排列是有规则的、有次序的，因此金属的构造属于晶体。金属的原子有一定的排列规则，形成了所谓“空间晶格”。

金属晶格常见的有体心立方晶格、面心立方晶格与密排六方晶格，如图 1-8 所示。

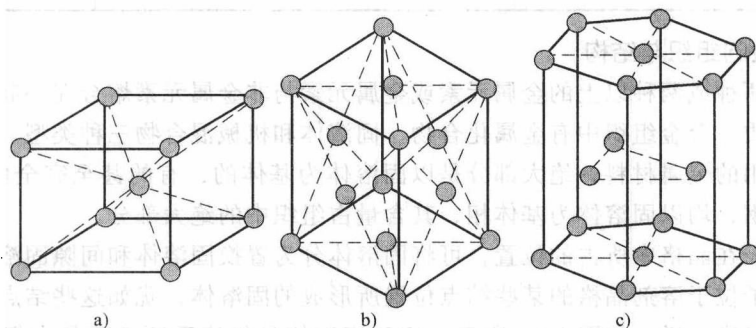


图 1-8 典型金属晶体结构

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

所谓金属组织是指人们用肉眼或显微镜所能观察到的金属的内部结构。通常把用肉眼或低于 30 倍的放大镜能看到的组织称为宏观组织；把用放大数十倍乃至上千倍显微镜观察到的组织称为显微组织或微观组织。

钢中常见的显微组织有以下几种：

1. 铁素体 碳溶于 α -Fe 晶格的间隙中而形成间隙固溶体，用符号“F”或“ α ”表示，在低于 910℃ 时出现。其性能与纯铁相似，强度低，但塑性较好，见表 1-2。碳溶于体心立方晶格 δ -Fe 中的间隙固溶体，称为 δ 铁素体，用“ δ ”表示。

2. 渗碳体 由铁与碳以一定比例形成的金属化合物称为渗碳体。其中铁原子和碳原子的比例为 3:1，其化学分子式为 Fe_3C 。它的性质见表 1-2。与铁素体相反，硬度极高，强度很低，脆性也很大，伸长率和断面收缩率几乎为零。随着钢中含碳量的增加，钢中渗碳体的量也增多，钢的硬度、强度增加，塑性和韧性则下降。

3. 奥氏体 碳溶于 γ -Fe 晶格的间隙中而形成的间隙固溶体，用符号“A”或“ γ ”表示。其强度和硬度比铁素体高，塑性和韧性良好，无磁性。奥氏体具有面心立方晶格。碳钢中的奥氏体只出现在高温区域内，当温度低于 723℃ 时，奥氏体就随钢中含碳量的不同，分别转变为铁素体、珠光体和渗碳体。

4. 珠光体 由铁素体和渗碳体组成的机械混合物，用符号“P”表示。它仅在低于723℃时存在。这一混合结构的平均 $w_c = 0.8\%$ 。在珠光体中的铁素体与渗碳体都是片状，并且是一层一层交替排列，其性质介于铁素体与渗碳体之间，见表1-2，强度、硬度比铁素体高，塑性则比渗碳体高很多。

钢的力学性能主要取决于其含碳量和微观组织。以上钢的微观组织在平衡状态时，不全部同时存在，各自出现的条件取决于钢中的含碳量和钢本身所处的温度。

表 1-2 铁素体、珠光体和渗碳体的力学性能

性 能	铁 素 体	珠 光 体	渗 碳 体
硬度(HB)	80	220	800
抗拉强度 σ_b /MPa	300	800	—
断面收缩率 ψ (%)	75	20	—
伸长率 δ (%)	50	14	0
冲击韧度 α_K /J $\cdot$ cm ⁻²	20	1.5	—

(二) 合金的组织与结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素熔合在一起所得到的具有金属特性的物质。合金组织中有金属化合物、固溶体和机械混合物三种类型。

工业上使用的金属材料，绝大部分是以固溶体为基体的，有的甚至完全由固溶体组成，如碳钢和合金钢，均以固溶体为基体相，其含量占组织中的绝大部分。

按溶质原子在晶格中所占的位置，可将固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体。置换固溶体是指溶质原子位于溶剂晶格的某些结点位置所形成的固溶体，犹如这些结点上的溶剂原子被溶质原子所置换一样，如图 1-9a 所示。间隙固溶体是指溶质原子不是占据溶剂晶格的正常结点位置，而是填入溶剂原子间的一些间隙中，如图 1-9b 所示。

三、铁碳合金相图

钢和铸铁是现代工业的重要金属材料，由于它们基本上是由铁和碳两种元素组成，因此又称为铁碳合金。铁碳合金相图是研究铁碳合金的成分、组织与温度之间关系的图形。根据铁碳合金相图，可以了解铁碳合金的内部组织随含碳量和温度而变化的规律，是学习热加工和热处理的重要理论基础。铁

碳合金相图如图 1-10 所示。图上的纵坐标表示温度，横坐标表示成分，即铁碳合金中碳的百分含量。

图中有五条线，各线具有不同的意义。ABCD 线表示液体合金在冷却时开始凝固结晶的温度。该线最左端说明，纯铁在 1535℃ 开始凝固；而当钢中含碳量增高时，合金的凝固点则降低。AHJECF 线为固相线，表示液态合金在冷却时全部凝固结晶为固溶体的温度。HJB 水平线是包晶反应线，表示在此温度（1495℃）发生包晶转变，即 $L + \delta \rightarrow \gamma$ ，转变产物是奥

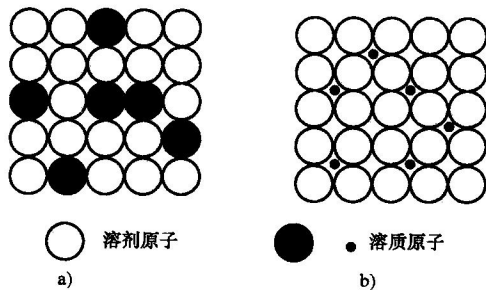


图 1-9 固溶体的两种类型

a) 置换固溶体 b) 间隙固溶体

氏体。GS 线表示 $w_C < 0.77\%$ 的钢在缓慢冷却条件下由奥氏体中开始析出铁素体的温度；同理，GS 线即是铁素体转变为奥氏体的终了温度，用 A_3 表示。ES 线表示 w_C 在 $0.77\% \sim 2.11\%$ 的钢在缓慢冷却条件下由奥氏体开始沉淀渗碳体的温度，用 A_{cm} 表示。PSK 水平线相当于 727°C ，它表示所有含碳量的钢在缓慢冷却时，奥氏体全部转变为珠光体的温度；相反，在缓慢加热时，该线表示由珠光体转变为奥氏体的温度。为了简化起见，PSK 线常用符号 A_1 表示，ES 用 A_{cm} 表示，GS 用 A_3 表示。

图中 E 点为区分钢和生铁的分界点。S 点称为共析点。正对 S 点成分的钢称为共析钢，S 点左边的钢成为亚共析钢，其组织结构为铁

素体加珠光体；S 点右边的钢称为过共析钢，其结构为珠光体加渗碳体。

钢的状态图对焊接过程中焊缝和热影响区组织和性能的变化，钢的热处理（包括焊接接头的焊缝热影响区组织和焊后热处理）等有着极其重要的意义。

四、钢的热处理

钢的热处理就是将金属加热到一定温度，并在这个温度下保持一定时间，然后以一定的冷却速度冷却到室温，从而通过改变钢的内部组织来达到改善钢的性能的一种工艺方法。它不仅是广泛用来强化钢材的重要手段，而且是改善钢材加工性能、提高产品质量、延长使用寿命的关键因素之一。

焊接时，焊缝及其热影响区受到焊接加热及冷却条件的影响，实际上经受了热处理。焊后热处理就是把焊接接头按不同钢种所严格规定的温度和保温时间均匀加热，然后按规定条件冷却。焊后热处理的不同类型及效果，见表 1-3。

表 1-3 焊后热处理的类型及效果

热处理类型		控制温度范围	热处理目的及效果
淬火		亚共析钢加热到 A_3 线以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ ；共析钢或过共析钢加热到 A_1 线以上 $30 \sim 50^\circ\text{C}$	淬火后的钢得到高硬度马氏体。主要用于提高钢的硬度，但要防止焊接接头淬火
回火	低温回火	回火温度为 $150 \sim 200^\circ\text{C}$	得到回火马氏体。主要用于要求高硬度和高耐磨性的刀具及量具等

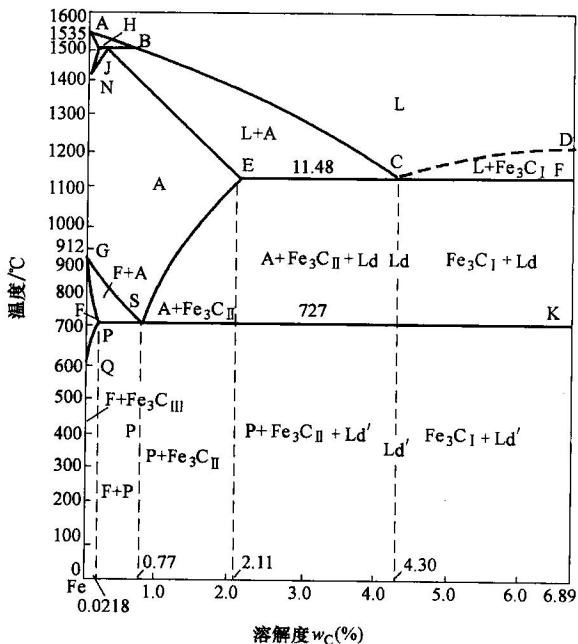


图 1-10 铁碳合金相图

(续)

热处理类型		控制温度范围	热处理目的及效果
回火	中温回火	回火温度为 300 ~ 450℃	得到回火屈氏体(铁素体与渗碳体极细的机械混合物), 主要用于弹簧和锻模的回火
	高温回火	回火温度为 500 ~ 650℃	得到回火索氏体(铁素体和细粒渗碳体的混合组织), 主要用于综合力学性能好的重要零件和焊件以及消除焊接残余应力
调质		淬火后又进行高温回火	
退火		亚共析钢加热到 A_3 线以上 20 ~ 30℃; 共析钢或过共析钢加热到 A_1 线以上 20 ~ 30℃	降低钢的硬度、细化晶粒并消除内应力
正火		亚共析钢加热到 A_3 线以上 30 ~ 50℃; 共析钢或过共析钢加热到 A_{cm} 线以上 30 ~ 50℃	主要用于破坏网状渗碳体, 以改善切削加工性能。对亚共析钢常用正火代替退火, 但对过共析钢应用较少

焊后热处理主要由加热、保温和冷却三个阶段所组成, 如图 1-11 所示。其中热处理规范主要包括: 升温速度、热处理温度、保温时间及冷却速度等。

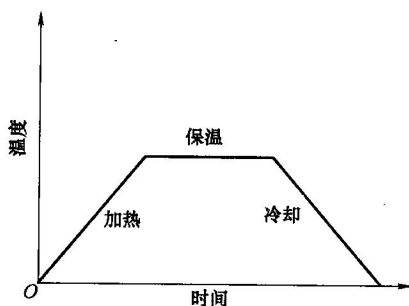


图 1-11 热处理工艺曲线

常用钢号焊后热处理规范见表 1-4。

表 1-4 常用钢号焊后热处理规范

钢 号	焊后热处理温度/℃		最短保温时间/h
	电弧焊	电渣焊	
10、20G、20、20R、20g、Q235-A、Q235-B、Q235-C	600 ~ 640	—	(1) 当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} \leq 50\text{mm}$ 时, 保温时间为 $\frac{\delta_{PWHT}}{25}\text{h}$, 且不少于 $\frac{1}{4}\text{h}$;
09MnD	580 ~ 620	—	(2) 当 $\delta_{PWHT} > 50\text{mm}$ 时,
16MnR	600 ~ 640	900 ~ 930 正火后, 600 ~ 640 回火	保温时间为 $\left(2 + \frac{1}{4} \times \frac{\delta_{PWHT} - 50}{25}\right)\text{h}$
16Mn、16MnD、16MnDR	—	—	(3) 当焊后热处理厚度 $\delta_{PWHT} \leq 125\text{mm}$ 时, 保温时
15MnVR、15MnNbR	540 ~ 580	—	间为 $\frac{\delta_{PWHT}}{25}\text{h}$, 且不少于
20MnMo、20MnMoD	580 ~ 620	—	$\frac{1}{4}\text{h}$;
18MnMoNbR、13MnNiMoNbR、20MnMoNb	600 ~ 640	950 ~ 980 正火后, 600 ~ 640 回火	(4) 当 $\delta_{PWHT} > 125\text{mm}$ 时,
07MnCrMoVR、07MnNiCrMoVDR、08MnNiCrMoVD	550 ~ 590	—	保温时间为 $\left(5 + \frac{1}{4} \times \frac{\delta_{PWHT} - 125}{25}\right)\text{h}$
09MnNiD、09MnNiDR、15MnNiDR、12CrMo、12CrMoG	540 ~ 580	—	
15CrMo、15CrMoG	≥ 600	—	
15CrMoR	≥ 600	800 ~ 950 正火后, ≥ 600 回火	
12Cr1MoV、12Cr1MoVG、14Cr1MoR、14Cr1Mo	≥ 640	—	
12Cr2Mo、12Cr2Mo1、12Cr2MoG、12Cr2Mo1R	≥ 660	—	
1Cr5Mo	≥ 660	—	

在对冷裂纹敏感性较大的低合金钢和拘束度较大的焊件焊接时,焊接结束或焊完一条焊缝后,立即将焊件或焊接区加热,这种热处理通常称为后热处理。对于强度级别较高的低合金钢和大厚度的焊接结构,后热温度一般为 $200 \sim 350^{\circ}\text{C}$ 之间,保温时间与焊件厚度有关,一般为 $2 \sim 6\text{h}$,且不少于 0.5h 。后热处理也叫“消氢处理”。后热处理的主要目的是防止焊缝金属或热影响区内形成冷裂纹。如焊接技术要求中已明确要焊后热处理,且焊后立即进行热处理,则可不作后热处理。

第三节 焊接冶金过程

焊接冶金反应的过程是指在很小的熔池中、很短的时间内、很高的温度下进行的焊接过程。它具有电弧区和熔池的温度很高、熔池存在时间短而体积小、熔池金属不断更新、金属液体以细滴状进入熔池的特点。

一、焊接电弧

(一) 焊接电弧的产生和构造

1. 焊接电弧的产生 焊接时,当焊条与焊件接触后,很快将焊条提起一些,焊条端部和焊件之间就会立即产生明亮的电弧。

引燃电弧时,由于焊条与焊件瞬时接触而造成短路,于是产生很大的短路电流,使某些接触点上电流密度很大,这样在短时间就产生了大量的热,使接触处的焊条末端与焊件温度很快升高。然后稍提起焊条,这时,焊条与焊件之间就存有高温空气和金属及药皮的蒸气,这些高温气体很容易被电离成为带电的正负离子,在电场力的作用下,这些带电质点便按照一定的方向移动,即自由电子和负离子奔向阳极,正离子奔向阴极。在它们运动途中和到达两极(焊条和焊件)极面时,不断发生碰撞与复合而产生大量的热能和弧光。电弧的引燃和燃烧就是在这种情况下进行的。电弧焊就是利用电弧放出的热量,来熔化焊件和焊条的。

2. 焊接电弧的构造 焊接电弧由阴极区、阳极区、弧柱三个部分组成,如图 1-12 所示。

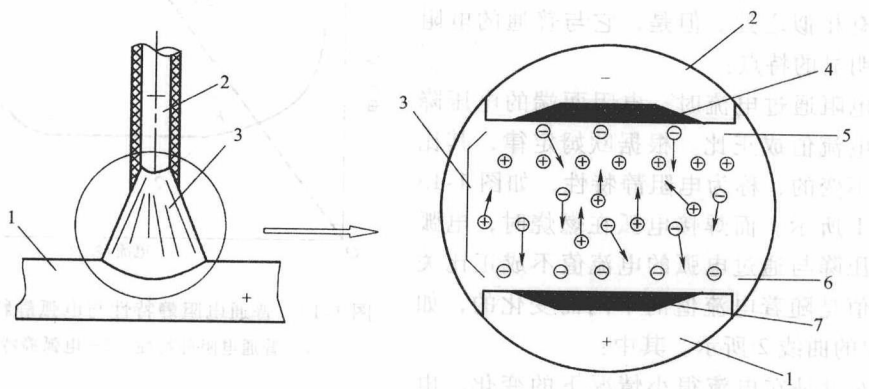


图 1-12 焊接电弧的构造

1—焊件 2—焊条 3—弧柱 4—阴极斑点 5—阴极区 6—阳极区 7—阳极斑点

(1) 阴极区 是指阴极表面到附近空间的正离子层区域。在阴极区的阴极表面有一个明亮的斑点,称为阴极斑点或阴极辉点。阴极斑点是一次电子发射的发源地,是阴极区温度最高的部分,也是正离子与电子复合的地方。

(2) 阳极区 是指阳极表面到附近空间聚集电子的区域。在阳极区的阳极表面上有一个明亮的斑点,称为阳极斑点或阳极辉点。它是由于电子对阳极表面撞击而形成的。

在一般情况下,阳极温度比阴极温度高,因为阳极能量只消耗于材料的熔化和蒸发,而不消耗发射电子的能量,所以当阳极材料和阴极材料相同时,阳极区的温度略高于阴极区,见表 1-5。

表 1-5 阴极区和阳极区的温度

电极材料	材料沸点/K	阳极区温度/K	阴极区温度/K
碳	4640	4100	3500
铁	3271	2600	2400
钨	6200	4250	3000
镍	3173	2450	2370
铜	2580	2450	2200

(3) 弧柱 是处于阴极区和阳极区之间的区域。由于阳极区和阴极区的长度极短,故弧柱长度可以认为是电弧长度。弧柱是自由电子、负离子奔向阳极与正离子奔向阴极的通道,同时又是发生电离作用以及电子、离子运动过程中发生相互复合的地方。

弧柱中心的温度可达 6000 ~ 8000K, 大大高于阴极区和阳极区的温度。

(二) 焊接电弧的静特性

焊接电流流过两电极间的电离空间所产生的电压降称为电弧电压,其大小决定于电极材料、电弧长度和焊接电流大小。在电极材料一定、电弧长度固定不变、电弧稳定燃烧的情况下,电弧电压和焊接电流之间的关系叫电弧的静特性。表示它们关系的曲线叫做电弧的静特性曲线,如图 1-13 所示。

焊接电弧是焊接回路中的负载,它起着把电能转变为热能的作用,在这一点上,它与普通的电阻有相似之处。但是,它与普通的电阻相比又有明显的特点:

普通电阻通过电流时,电阻两端的电压降与通过的电流值成正比。根据欧姆定律,其比值基本是不变的,称为电阻静特性,如图 1-13 中的虚线 1 所示。而焊接电弧在燃烧时,电弧两端的电压降与通过电弧的电流值不成正比关系,其比值是随着电流值的不同而变化的,如图 1-13 中的曲线 2 所示。其中:

1) *ab* 段是在电流很小情况下的变化。电

流小,电弧电压增高;电流增大时使电弧的温度升高,气体电离和阴极电子发射增强,所以维持电弧所需的电弧电压就降低。

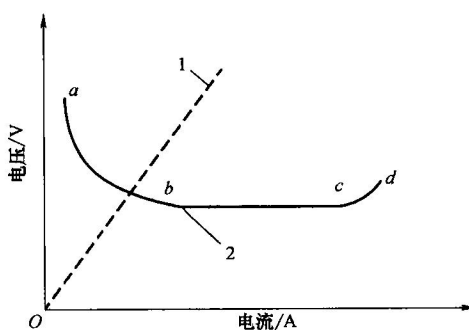


图 1-13 普通电阻静特性与电弧静特性曲线
1—普通电阻静特性 2—电弧静特性