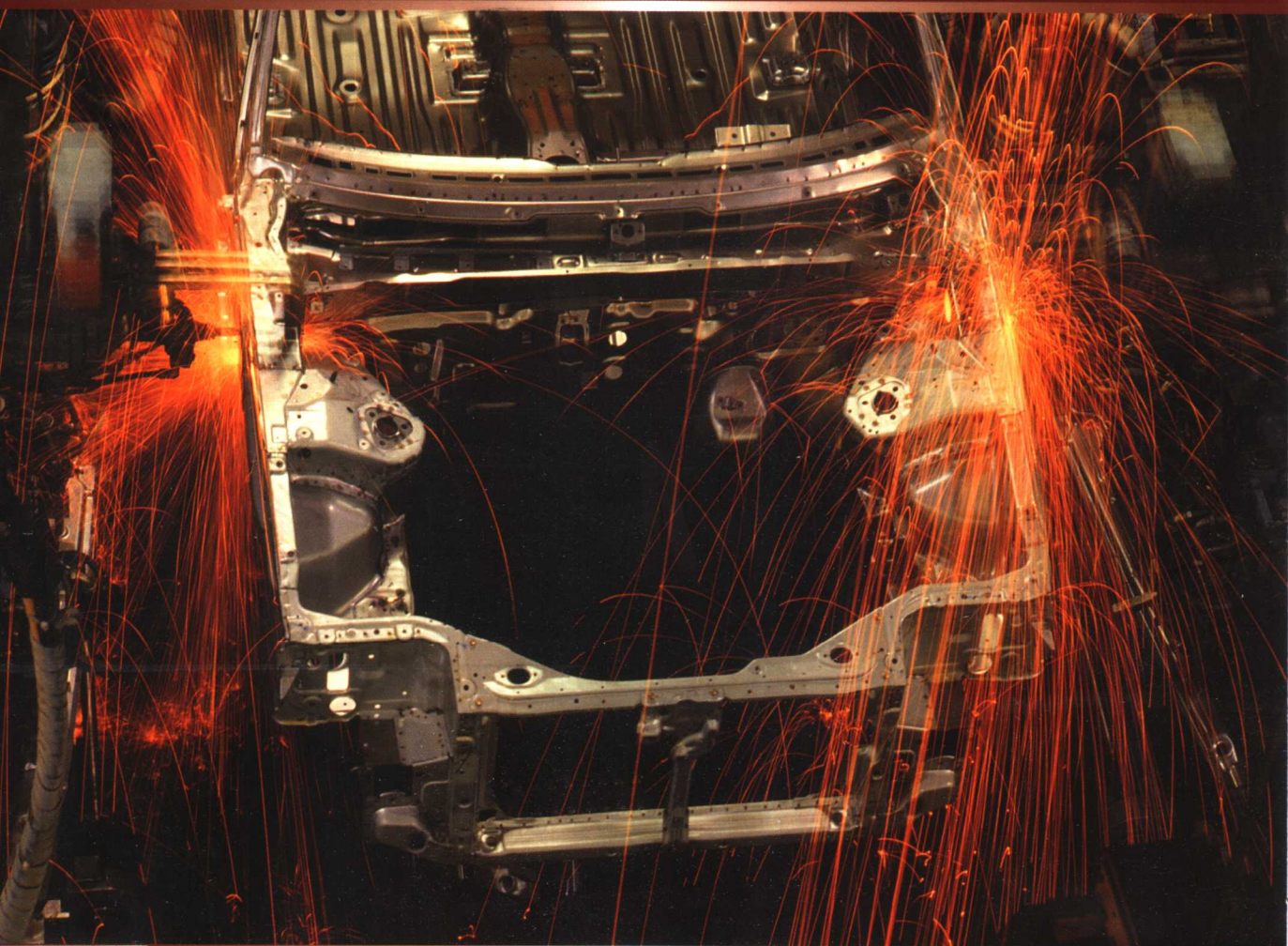


高等学校教材

金属材料焊接工艺

雷玉成 陈希章 朱强 主编



1-43



化学工业出版社

高等学校教材

金属材料焊接工艺

雷玉成 陈希章 朱 强 主编



化学工业出版社

·北京·

《金属材料焊接工艺》是高等学校“材料成形及控制工程”专业的技术基础课教材之一。本书系统阐述了各种电弧焊、电阻焊、高能密度焊及其他常用焊接方法的基本原理、焊接工艺及其规范参数的选择和优化,并介绍了钢和各种有色金属及复合材料的焊接特性、焊接方法、焊接材料的选择。全书理论联系实际,注重思路和能力的培养,并适当反映了国内外的新成就和发展趋势,综合性及工程应用性强,适应工业化社会发展需要。

本书为高等工业学校材料成形与控制工程专业、材料加工工程专业的通用教材,亦可供从事焊接工程领域工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料焊接工艺/雷玉成,陈希章,朱强主编.

北京:化学工业出版社,2007.8

高等学校教材

ISBN 978-7-122-00960-9

I. 金… II. ①雷…②陈…③朱… III. 金属材料-焊接工艺-高等学校-教材 IV. TG457.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第121166号

责任编辑:杨菁 彭喜英

文字编辑:林丹

责任校对:吴静

装帧设计:潘峰

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)

印刷:北京云浩印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张14 字数361千字 2007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:24.00元

版权所有 违者必究

前 言

科学技术是第一生产力，现代机械制造技术的发展离不开焊接，焊接不仅可以解决各种钢材的连接，而且还可以解决铝、铜等有色金属及复合材料的连接，是材料加工技术中极其重要的关键技术之一，广泛应用于机械制造、船舶行业、海洋开发、汽车工业、机车车辆、石油化工、航空航天、原子能、电力、电子技术、建筑及家用电器等部门。据工业发达国家统计，全世界每年仅需要进行焊接加工之后使用的钢材就占钢材总产量的50%。随着现代工业生产的需要和科学技术的蓬勃发展，焊接技术不断进步，几乎可以满足当前许多重要工业产品的制造要求，如航空航天及核能工业中的重要产品。新兴工业的发展仍然迫使焊接技术不断发展，以满足其需要，因此新的焊接方法不断出现。仅以新型焊接方法而言，到目前为止，已达数十种之多，而且焊接技术仍在不断发展之中。

本书在编写过程中，力求做到理论联系实际。书中主要归纳和突出了各种焊接方法的特点及其在实际生产中的应用，适当反映了国内外的新成就和新的发展趋势。在内容上，从传统的材料焊接方法到各种先进焊接技术均做了详细介绍，阐述了各种焊接方法的基本原理，焊接工艺规范及焊接材料的选择原则，焊接缺陷的产生和预防措施。希望能使学生从中熟悉和掌握常用材料焊接方法的特点和本质，同时也希望对从事焊接生产的工程技术人员在发展或采用新的焊接技术时有所帮助。

全书共分六章。第一章主要讨论焊接成形技术的特点、焊接方法的分类及其在现代工业中的应用；第二章介绍电弧焊的基本原理及各种常用的电弧焊焊接方法，内容包括焊接电弧和弧焊电源的基础知识，焊条电弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、埋弧焊、CO₂气体保护焊等各种常用的电弧焊焊接方法的特点及适用范围；第三章介绍电阻焊的基本原理及常用电阻焊方法，内容包括电阻焊的热源及其特点，点焊过程分析及点焊工艺，电阻对焊和闪光对焊的焊接特点及实际应用，常用金属的高频纵缝焊接工艺；第四章介绍三种先进的高能密度焊接方法，内容包括激光焊原理、特点、应用范围及常用金属材料的激光焊工艺，电子束焊接原理、焊接工艺及电子束焊接的应用和安全防护，等离子弧的形成原理及其焊接工艺和应用特点；第五章介绍扩散焊、摩擦焊、钎焊及超声波焊，内容包括四种焊接方法的基本原理、特点、焊接工艺规范及适用范围；第六章介绍各种金属材料的焊接性，内容包括合金结构钢、不锈钢、耐热钢、铝、铜、钛等有色金属、复合材料的焊接性及焊接方法以及对应的焊接材料和工艺的选择。

本书由江苏大学材料学院雷玉成教授统稿，并由雷玉成、陈希章、朱强、李贤等教师编写。

由于作者水平有限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正，以便修订时完善。

编者
2007年3月

目 录

第一章 绪论	1
一、焊接成形技术的特点	1
二、焊接方法及其在现代工业中的应用	2
第二章 电弧焊	5
第一节 焊接电弧	5
一、电弧的形成和组成区域	5
二、电弧气氛对电弧的影响	7
三、焊接电弧的静特性	7
四、焊接电弧力	8
第二节 电弧焊电源	11
一、电源的分类	11
二、各种弧焊电源的特点和应用	11
三、对弧焊电源的基本要求	12
第三节 焊条电弧焊	18
一、概述	18
二、焊条电弧焊电弧的特性	19
三、焊条电弧焊基础	20
四、焊接工艺参数	24
五、焊条电弧焊常见的缺陷及防止措施	27
第四节 钨极氩弧焊	30
一、概述	30
二、电极材料的选择	31
三、电流种类和极性的选择	32
四、钨极氩弧焊工艺	33
五、脉冲钨极氩弧焊	34
第五节 熔化极氩弧焊	35
一、概述	35
二、熔化极氩弧焊的熔滴过渡	36
三、混合气体的选择及应用	38
四、熔化极氩弧焊工艺参数	40
五、脉冲熔化极氩弧焊	41
第六节 埋弧焊	43
一、概述	43
二、埋弧焊的冶金特点	44
三、埋弧自动焊工艺	45
四、焊接工艺参数及焊接技术	48

五、主要缺陷及其防止	50
第七节 CO ₂ 气体保护电弧焊	52
一、概述	52
二、CO ₂ 气体保护焊的冶金特点	53
三、CO ₂ 气体保护焊的熔滴过渡形式及规范参数的选择	56
四、减少 CO ₂ 气体保护焊飞溅的措施	59
第三章 电阻焊	61
第一节 电阻焊的加热	61
一、电阻焊的热源及其特点	61
二、点焊时的电阻及加热	63
三、对焊时的电阻及加热	69
第二节 点焊	71
一、概述	71
二、点焊过程分析	73
三、点焊规范参数及其相互关系	75
四、点焊时的分流	79
五、特殊情况的点焊工艺	81
第三节 电阻对焊和闪光对焊	83
一、电阻对焊	83
二、闪光对焊	86
三、典型零件的对焊	90
第四节 高频对接缝焊	91
一、概述	91
二、高频对接缝焊焊接参数及选择	92
三、常用金属的高频纵缝焊接	93
四、高频螺旋缝焊管	94
第四章 高能密度焊	95
第一节 激光焊	95
一、激光焊原理、特点、应用范围及分类	95
二、激光焊设备	99
三、激光焊工艺参数	100
四、常用金属材料的激光焊	108
第二节 电子束焊	113
一、概述	113
二、电子束焊接原理	114
三、电子束焊接设备	115
四、电子束焊接工艺	116
五、电子束焊接的应用	117
六、安全防护	119
第三节 等离子弧焊接	119
一、等离子弧的形成及应用特性	119

二、等离子弧焊接特点	122
三、等离子弧焊工艺	124
四、焊接缺陷	126
五、铝合金穿孔型等离子弧立焊	126
第五章 其他焊接方法	128
第一节 扩散焊	128
一、概述	128
二、扩散焊原理	129
三、扩散焊工艺	134
第二节 摩擦焊	140
一、摩擦焊原理及特点	140
二、摩擦焊接过程分析	142
三、摩擦焊焊接规范	143
四、影响材料摩擦焊接性的因素	145
五、摩擦焊接头的缺陷及检测	146
第三节 钎焊	147
一、钎焊原理	148
二、钎焊材料	151
三、钎焊工艺	152
第四节 超声波焊接	157
一、概述	157
二、焊接设备	161
三、接头性能及接头设计	163
四、焊接工艺	165
第六章 常用金属材料焊接性	168
第一节 金属材料的焊接性	168
一、金属焊接性概念	168
二、焊接性的试验	169
第二节 合金结构钢的焊接性	173
一、热轧及正火钢的焊接性	173
二、调质钢的焊接性	179
第三节 不锈钢及耐热钢的焊接性	183
一、焊接接头晶间腐蚀	184
二、焊接接头的热裂纹及应力腐蚀开裂	185
三、奥氏体钢焊缝的脆化	186
四、奥氏体钢的焊接工艺	187
五、耐热钢的焊接性	189
第四节 有色金属的焊接性	191
一、铝及其合金的焊接性	191
二、钛及钛合金的焊接性	194
三、铜及铜合金的焊接性	198

第五节 复合材料的焊接	201
一、复合钢的焊接	201
二、铝基复合材料的焊接	207
参考文献	215

第一章 绪 论

焊接技术是现代工业高质量、高效率制造技术中一种不可缺少的加工技术。焊接制造工艺具有多学科综合技术的特点,使得焊接技术能够更多更快地融入最新科学技术的成就而具有时代发展的特征。据统计,大多数发达国家利用焊接加工的钢材量已超过钢材产量的一半,大量的铝、铜、钛等有色金属及其合金的结构件也是用焊接方法制造的,因此,材料学科的发展大大推动了焊接技术的发展。近半个多世纪以来,焊接技术发生了很大的变化,通过提高生产率、缩短生产周期和降低成本等,焊接技术正向着智能化的机器人焊接方向发展,同时,为满足高新技术中新材料日益发展的需求,还要求焊接技术能够连接各种特殊的新型材料。正是受到材料学科和信息学科新技术的影响,焊接技术已具有数十种焊接新工艺,而且也使得焊接工艺操作正经历着从手工焊到自动焊,自动化、柔性化到智能化的过渡。目前,焊接技术已广泛应用于锅炉与压力容器、船舶、工程机械、航空航天、电力、石油化工、建筑、电子、海洋开发等各个工业部门。

一、焊接成形技术的特点

焊接(welding),是通过加热或加压,或两者并用,并且添加或不加填充材料,使工件达到永久性连接的一种方法。其实质就是通过适当的物理-化学过程,使两个分离固体表面的金属原子接近到晶格距离(0.3~0.5nm)形成金属键,从而使两分离的固体实现永久性的连接。与其他材料加工工艺,如铸造、锻压、铆接相比,焊接成形技术具有如下特点。

① 焊接可以将不同类型、不同形状尺寸的材料连接起来,可使金属结构中材料的分布更合理。此外,焊接结构中各零部件间通常可直接用焊接方法连接,不需要附加的连接件,焊接接头的强度一般也能达到与母材相同。因此,焊接结构产品的质量轻,生产成本低。

② 焊接接头是通过原子间的结合力实现连接的,刚度大,整体性好,在外力作用下不像机械连接(如铆接、销子连接等)那样产生较大的变形;而且,焊接结构具有良好的气密性、水密性,这是其他连接方法无法比拟的。

③ 焊接加工一般不需要大型、贵重的设备。因此,是一种投资少、见效快的方法。同时,焊接是一种“柔性”加工工艺,既适用于大批量生产,又适用于小批量生产。而产品结构变化时,设备可基本不变。

④ 焊接连接工艺特别适用于几何尺寸大而材料较分散的制品,例如船壳、桁架等。焊接还可以将大型、复杂的结构件分解为许多小型零部件分别加工,然后通过焊接连成整体结构,从而扩大了工作面,简化了金属结构的加工工艺,缩短了加工周期。

随着焊接工艺方法的发展及焊接结构形式的改进,现在不仅已经制成了各种机械化、自动化及专门用途的自动焊机,而且还创造了大量的焊接辅助装置、单机自动化的焊接机械装置,焊接生产流水线和生产自动线早已成为现实。在整个机械制造行业中,焊接机器人比其他类型机器人应用更广泛,焊接生产的机械化、自动化,不仅可以提高焊接结构的生产率,降低生产成本,提高产品质量,同时也使生产工人的健康进一步得到保障,环境污染也有所下降。然而,由于焊接结构产品的多样化及生产过程的复杂性,目前国内焊接生产过程的机械化、自动化的程度还不是很,手工操作在某些产品中仍占

有相当大的比例。

二、焊接方法及其在现代工业中的应用

根据母材在焊接过程中是否熔化，将焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊三大类，然后再根据加热方式、工艺特点或其他特征进行下一层次的分类，见表 1-1。

表 1-1 焊接方法分类

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次	第三层次	第四层次	代号	是否易于实现自动化
<p>熔焊:利用一定的热源,使构件的被连接位局部熔化成液体,然后再冷却结晶成一体方法</p>	电弧焊	熔化极电弧焊	焊条电弧焊	111	△
			埋弧焊	121	○
			熔化极气体保护焊(GMAW)	131	○
			CO ₂ 焊	135	○
			螺柱焊		△
			埋弧焊	121	○
		非熔化极电弧焊	钨极氩弧焊(GTAW)	141	○
			等离子弧焊	15	○
			氢原子焊		△
	气焊	氧-氢火焰		311	△
		氧-乙炔火焰			△
		空气-乙炔火焰			△
		氧-丙烷火焰			△
		空气-丙烷火焰			△
	铝热焊				△
	电渣焊			72	○
	电子束焊	高真空电子束焊		76	○
		低真空电子束焊			○
		非真空电子束焊			○
	激光焊		CO ₂ 激光焊	751	○
			YAG 激光焊		○
	电阻点焊			21	○
电阻缝焊			22	○	
<p>压焊:利用摩擦、扩散和加压等物理作用,克服两个连接表面的不平度,除去氧化膜及其他污染物,使两个连接表面上的原子相互接近到晶格距离,从而在固态条件下实现连接的方法</p>	闪光对焊		24	○	
	电阻对焊		25	○	
	冷压焊			△	
	超声波焊		41	○	
	爆炸焊		441	△	
	锻焊			△	
	扩散焊		45	△	
	摩擦焊		42	○	

续表

第一层次 (根据母材是否熔化)	第二层次	第三层次	第四层次	代号	是否易于实现自动化	
钎焊:采用熔点比母材低的材料作钎料,将焊件和钎料加热至高于钎料熔点但低于母材熔点的温度,利用毛细作用使液态钎料充满接头间隙,熔化钎料润湿母材表面,冷却后结晶形成冶金结合的方法	火焰钎焊			912	△	
	感应钎焊				△	
	炉中钎焊	空气炉钎焊				△
		气体保护炉钎焊				△
		真空炉钎焊				△
	盐浴钎焊					△
	超声波钎焊					△
	电阻钎焊					△
	摩擦钎焊					△
	金属溶钎焊					△
	放热反应钎焊					△
	红外线钎焊					△
	电子束钎焊					△

注: △—不易实现自动化; ○—易于实现自动化。

焊接用的热源主要有电弧、火焰、电阻热、电子束、激光束、超声波、化学能等。电弧是应用最广泛的一种焊接热源,主要用于电弧焊、堆焊。电渣焊或电阻焊利用电阻热进行焊接。锻焊、摩擦焊、冷压焊及扩散焊等利用机械能进行焊接。气焊依靠可燃性气体(如乙炔、氢气、天然气、丙烷、丁烷等)与氧混合燃烧产生的热量进行焊接。热剂焊利用金属与其他金属氧化物间的化学反应所产生的热量作热源,利用反应生成的金属作为填充材料进行焊接,应用较多的是铝热剂焊。爆炸焊利用炸药爆炸释放的化学能及机械冲击能进行焊接。

随着科学技术的发展,新的焊接方法仍在不断出现。如英国焊接研究所发明的搅拌摩擦焊方法,不仅可以焊接铝、镁、锌、铜等有色金属及其合金,而且已成功焊接了25mm的钢板,是一种很有发展前景的新方法。又如俄罗斯汽车工业科学研究所发明的氙灯焊接新工艺,为金属、非金属材料的焊接提供了广泛的可能性,其生产成本远低于激光焊。

众所周知,机械制造业是国民经济的基础工业,它决定着国家的生产能力和水平,而焊接技术则是机械制造业的关键技术之一。工业发达国家的焊接结构用钢均在其钢产量的一半以上,我国每年亦有6000万吨以上的钢材用于制造各种用途不同的焊接结构,并对焊接质量和自动化水平有着越来越高的要求。

在能源工业,如石油、天然气、煤炭等都需要制造大量的化工容器、分流装置和各种管线,焊接加工占有重要地位。各类采油平台和炼油设备不仅焊接工作量大,而且技术要求也高。在水电站、火电站、核电站等发电装置的制造方面,焊接技术也是最重要、最关键的技术,在这里,现代焊接方法——MAG/MIG、TIG、CO₂焊、电子束焊、激光焊等都获得了广泛的应用。

在汽车工业中,先进的焊接技术已被大量采用,如焊接机器人、激光切割及焊接。同时,CAD/CAM和CIMS等技术也得到了很大的发展。在船舶工业,机械化、自动化、高效化的焊接技术已成为重要的发展方向。目前我国造船焊接高效化已达80%,其中CO₂焊

上升到 40%，自动化及半自动化程度已提高到 45%。在航空航天及国防工业中，由于运载工具要求尽可能高的推力重量比，必须采用各种轻型材料和结构，因而要采用一些特殊的现代焊接方法，如等离子弧焊、电子束焊、激光焊、钎焊、超塑性成形-扩散连接等。这些新技术及时地应用到国防尖端产品，为我国两弹一星、核潜艇、宇宙飞船等制造的成功起到了非常重要的作用。此外，在电子工业中广泛采用的表面组装技术，其核心内容之一就是微电子软钎焊连接。

第二章 电弧焊

电弧焊是利用电弧作为热源的熔焊方法，简称弧焊。这一类方法主要由焊条电弧焊、埋弧焊、气体保护电弧焊等方法组成。电弧焊是现代焊接方法中应用最为广泛，也是最为重要的一类焊接方法。根据一些工业发达国家最近的统计，电弧焊在各国焊接生产劳动总量中所占比例一般都在60%以上，其重要的原因就是，电弧能有效而简便地把电能转换成焊接过程所需要的热能和机械能。

第一节 焊接电弧

一、电弧的形成和组成区域

电弧是一种气体导电现象（图2-1）。通常状态下气体由中性分子或原子组成，不能导电。为了使气体导电，必须使两电极间的中性气体中产生带电粒子，同时还要有促使带电粒子做定向运动的电压。电弧稳定燃烧时，参与导电的带电粒子主要是电子和正离子。这些带电粒子是通过电弧中气体介质的电离和电极的电子发射这两个物理过程而产生的。在电弧现象中，气体的电离主要有热电离、电场电离和光电离三种方式，而且在电弧温度下是以一次电离为主。电极的电子发射主要有热发射、电场发射、光发射和碰撞发射四种方式。由于电子和正离子所带的电量相同，所受到的电场力相同，但是电子的质量远远小于正离子的质量，其运动速度要远远大于正离子的运动速度，所以电弧电流中约99.9%是电子流，正离子流只约占0.1%。值得注意的是，在每一瞬间，电弧中的正、负电荷数是相等的，电弧对外界呈现的是电中性。

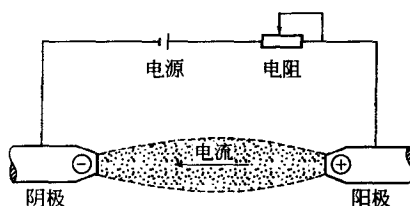


图2-1 电弧导电示意图

1. 电弧的构造

电弧是由阴极区、弧柱区和阳极区三个部分构成的。

(1) 阴极区和阴极斑点 阴极区是指阴极外紧靠阴极表面的导电区，其长度约为 $10^{-6} \sim 10^{-2}$ cm。阴极区的任务是向弧柱区提供所需要的电子流，以满足电弧导电要求。阴极区提供的电子流与阴极材料种类、电流大小、气体介质等因素有关。当以钨、碳等高熔点材料作阴极且电流较大时，弧柱所需要的电子流主要依靠阴极热发射来供应。此时，阴极除了直接发射总电流的99.9%的电子流外还接受0.1%的正离子流。这样的阴极区称为热发射型阴极区，其阴极压降很小。若阴极材料为钨、碳但电流较小时，或阴极材料采用熔点较低的Al、Cu、Fe时，由于仅靠热发射远不能满足弧柱所需要的电子流，从而导致正离子在阴极的前面堆积。这样一来就在阴极前面形成局部较高的电场强度，即形成了所谓阴极压降区（电场强度可达 $10^6 \sim 10^7$ V/cm），这样高的电场强度的存在，可以使阴极增大电子发射量，从而向弧柱提供所需要的电子流。也就是说这种情况下热发射和电场发射同时存在，阴极区的正离子流要大于总电流的0.1%，此外，除了存在明显的阴极压降外，在阴极表面存在导电区域很小、电流密度很高的阴极斑点；另外，在低电压小电流条件下，还会形成正离子比例更

大的所谓等离子型阴极导电机构。

阴极斑点是指阴极表面局部出现的发光强、电流密度很高（可达 $5 \times 10^5 \sim 10^7 \text{ A/cm}^2$ ）的区域。它产生于用熔点、沸点都较低的 Al、Cu、Fe 等冷阴极材料作阴极时，用高熔点材料（钨、碳等）作阴极时如果采用小电流也可产生这种阴极斑点。阴极斑点的形成要求有一定条件，首先该点应具有可能发射电子的条件（主要是电场发射和热发射），其次是电弧通过该点时能量消耗较小。所以阴极斑点有自动跳向温度高、热发射能力强的物质上的性能。如果金属表面有低逸出功的氧化膜存在时，阴极斑点有自动寻找氧化膜的倾向，铝合金焊接时去除氧化膜的作用，就是利用了阴极斑点的这种特性。

(2) 弧柱区 弧柱长度可看作为电弧的实际长度。这个区域内发生着气体粒子的各种电离、扩散、复合和亲和过程。由于弧柱温度较高，约为 $5000 \sim 30000 \text{ K}$ （等离子弧时可达 50000 K ），故弧柱的电离以热电离为主，弧柱中因扩散和复合而消失的带电粒子将由弧柱自身的热电离来补偿。通过弧柱的总电流由电子流和正离子流组成，电子流占 99.9%，正离子流占 0.1%。但从整体上看弧柱空间保持电中性，即每瞬间每个单位体积中正、负带电粒子数量相等，保证了电子流和正离子流通过弧柱时不受空间电荷电场的排斥作用，阻力小，从而使电弧放电具有小电压、大电流的特点。

(3) 阳极区和阳极斑点 紧靠阳极长度约为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{ cm}$ 的气体导电区域称为阳极区。阳极区的任务是接受由弧柱上过来的 $0.999I$ 电子流（ I 为电弧总电流）和向弧柱提供 $0.001I$ 的正离子流。阳极接受电子的过程是通过向阳极释放出相当于逸出功的能量实现的。由于阳极不能直接发射正离子，所以正离子只能由阳极区提供。一般认为弧柱中 $0.1\%I$ 正离子流是在阳极区与弧柱界面上生成的。其形成途径有两种：① 阳极区电场作用下的电离。由于阳极不发射正离子，故电弧导电时，必将造成阳极前面电子的堆积，使阳极与弧柱之间形成一个负电性区，即所谓的阳极区。从弧柱来的电子通过阳极区时将被加速并在阳极区内与中性气体粒子产生碰撞电离。当电弧电流较小时，阳极区的导电常属于这种机理。② 当电弧电流大时，阳极的温度很高，导致阳极材料蒸发，从而使得聚积在阳极前面的金属蒸气产生热电离，通过这种热电离生成正离子供弧柱需要。这种情况下阳极压降（ U_A ）很小，甚至可以降到零。

阳极斑点是指阳极表面局部出现的发光强、电流密度大（ $10^2 \sim 10^3 \text{ A/cm}^2$ ）的区域。它产生于熔化极电弧焊或小电流的非熔化极电弧焊。阳极斑点的形成条件是：首先该点有金属蒸发，其次是电弧通过该点时弧柱消耗能量较低。由于与纯金属相比，大多数金属氧化物的熔点和沸点以及电离电压均较高，因此，阳极斑点有自动寻找纯金属表面而避开氧化膜的倾向。

2. 电弧电压分布

在两电极间产生电弧放电时，在电弧长度方向电场强度的分布是不均匀的。沿弧长方向

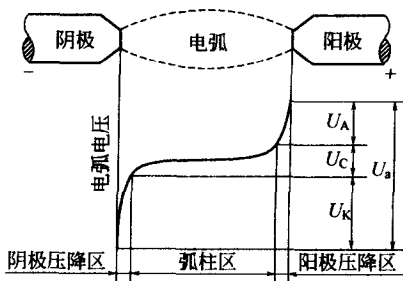


图 2-2 电弧各区域的电压分布

测定的电压，其分布如图 2-2 所示。由图可以看出，在阴极和阳极附近很小的区域里电压变化比较大，中间部分电压变化较小，而且比较均匀。由此可以把整个电弧分成三个区域：靠近阴极附近电压变化较大的区域为阴极压降区，其电压降用 U_K 表示；靠近阳极附近电压变化较大的区域为阳极压降区，其电压降用 U_A 表示；中间的区域为弧柱区，其电压降用 U_C 表示。总的电弧电压 U_a 是这三部分电压降之和，即：

$$U_a = U_A + U_C + U_K$$

阴极压降区和阳极压降区在长度方向的尺寸均很小，而弧柱区的长度占电弧长度的绝大部分，可以认为电弧的长度等于弧柱区的长度。电弧温度的高低主要受电弧电流的大小、电弧周围气体介质的种类以及电弧的状态等因素的影响。

二、电弧气氛对电弧的影响

电弧稳定燃烧时把电能转化成为热能，其产热量的多少可以用它消耗电能的多少来表示。即电弧的产热可以表示为 IU_a ， I 为电弧电流， U_a 为电弧电压。若考虑单位弧长的产热量，则可以表示为 IE_c ， E_c 为弧柱的电场强度。电弧的热量散失主要是电弧与周围气体介质的热交换所散失的热量。热量散失的多少与两个因素有关：一个是电弧周围气体介质的热交换所散失的热量，一个是电弧与气体介质的接触面积。当电弧的气氛一定时，散热多少主要取决于电弧的导热截面。电弧作为一种柔性导体，其导电截面的大小可用最小电压原理来说明。最小电压原理的基本内容是：对一个与轴线对称的电弧，在电流一定、周围条件一定的时候，处于稳定燃烧状态，其弧柱直径或温度应使弧柱的电场强度具有最小值。这一原理说明，电弧稳定燃烧时，是依据保持能量消耗最小这一特性来确定电弧的导电截面的。

弧柱电场强度 E_c 的大小反映出电弧导电的难易。当电流和电弧气氛一定时，弧柱的导电截面只能在保证 E_c 为最小的前提下确定，否则，都会引起 E_c 值的增加。如果电弧的直径变大，电弧与周围气体介质接触面积增加，会使散热条件增加，为了达到能量平衡，则要求电弧的产热 (IE_c) 也增加，在电流 I 一定的条件下，只有使 E_c 增加；相反，如电弧的直径变小，则电弧的电流密度增加，使电弧的电阻率增加，为了保持电流不变，必须增加 E_c 值。所以电弧只能确定一个能够保证 E_c 为最小值的断面。

最小电压原理是一个很重要的理论。它反映了电弧周围气氛对电弧的影响，成功地解释了为什么当电流不变，而改变电弧气氛时电弧具有不同的形态。例如，当电弧周围气体介质导热性比较差时，电弧的散热减少，热损失降低，则电弧的弧柱发散，导电半径增加，电流密度小，弧柱的电场强度 E_c 值也较低。当电流保持不变的时候，改变电弧气氛使电弧周围气体导热性增加，或者对电弧进行强迫冷却使电弧的热损失增加时，根据最小电压原理，电弧一方面要收缩，以减小导电截面来减少散热；另一方面导电截面的减小使得电流密度增加，弧柱的电场强度 E_c 值增加以增加产热，并在新的条件下达到新的平衡。

三、焊接电弧的静特性

电弧的静特性是指在电极材料、气体介质和弧长一定的情况下，电弧稳定燃烧时，两极间稳态的电压与电流之间的变化关系，也称为电弧的伏安特性。

1. 电弧静特性曲线的形状

电弧静特性曲线的形状如图 2-3 所示，有三个不同的区域。在电流较小时，电弧的温度较低，电离度较小，电弧电压较高；随着电流的增加，电弧的温度升高，电离度迅速增加，电弧的等效电阻迅速降低，电导率增大，电弧电压反而降低。这就是电弧的负阻特性区，即图 2-3 中的 A 区。当电弧电流提高到中等电流范围内时，随着电流增加或温度升高，电导率的增长速度变缓，弧柱的导电截面随电流的增加而增大，在一定范围内保持电流密度不变或增加不多，电弧电压不随电流的增加而增加，表现为平特性区，即图 2-3 中的 B 区。在大电流范围内，电导率随温度增长而增长的速率大大减小，电弧的电离度基本上不再增加，电弧的导电截面也不能再进一步扩大，这样，随着电流的增加，电弧电压也要升高，表现为上升特性区，即图 2-3 中的 C 区。

2. 影响电弧静特性的因素

(1) 电弧长度的影响 电弧电压 U_a 由阴极区压降 U_K 、阳极区压降 U_A 和弧柱压降 U_C 所组成。弧长的变化主要影响到弧柱的压降 $U_C = L_C E_C$ (L_C 为弧长), 从而影响到电弧电压 U_a 。一般弧长增加, 电弧电压增加, 电弧的静特性曲线要平行上移, 如图 2-4 所示。

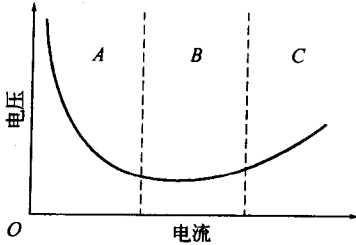


图 2-3 电弧的静特性曲线

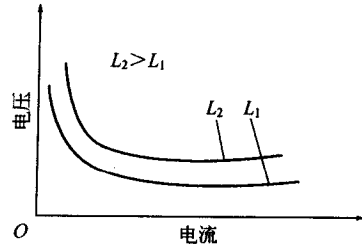


图 2-4 电弧长度对电弧静特性的影响
 L_1, L_2 —电弧长度

(2) 电弧周围气体介质的影响 电弧周围的气体介质对电弧静特性的影响, 主要是由气体的热物理性能所决定的。例如, 气体的热导率大、多原子气体在高温下分解时吸收大量的解离能等都对电弧产生较强的冷却作用, 使热损失增加, 必然使电弧的产热增加, 以保持能量平衡。当焊接电流 I 一定时, E_C 必然增加, 从而引起电弧电压升高。图 2-5 为不同保护气体时电弧电压的差别。由图可知, $Ar + 50\% H_2$ 的混合气体比纯 Ar 的电弧电压高得多, 这主要是因为 H_2 的热导率要比 Ar 大得多 (图 2-6) 且对电弧的冷却作用强。

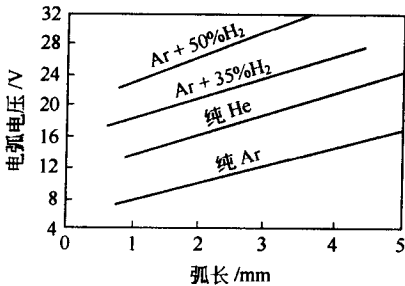


图 2-5 不锈钢 TIG 焊时弧压与弧长的关系 ($I=100A$)

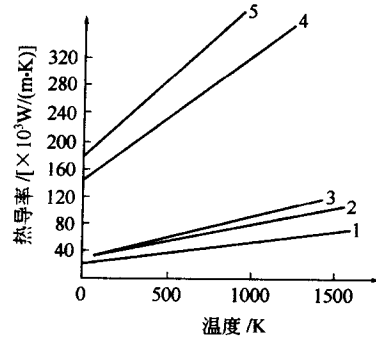


图 2-6 不同气体的热导率与温度的关系
1— Ar ; 2— N_2 ; 3— CO_2 ; 4— He ; 5— H_2

四、焊接电弧力

电弧在燃烧过程中不仅要产生大量的热能, 而且还会产生一些机械力, 这些机械力称为电弧力。它对熔滴过渡、焊缝成形以及焊接过程均产生很大的影响。

1. 电弧力的种类

(1) 电磁收缩力 由电工学可知, 在两个相距不远的平行导体中通过同方向电流时, 将产生相互吸引力, 这个力称为电磁力。同理, 在一个导体中通过电流时, 可以把这个电流看成由无数条方向相同的电流线组成, 在这些电流线之间也会产生相互吸引的电磁力。对于固态导体, 这个力仅与弹性应变力相平衡, 不会产生太大影响; 如果是在流体导体中 (如气体、液体), 则电磁力将会使导体变形产生收缩, 如图 2-7 所示, 此时的电磁力 F_1, F_2 称为电磁收缩力。如果这个导体是圆柱体, 并且电流线分布均匀, 则这个导体每个截面上的收缩

力都是相等的，实际上，在焊接中由于两电极尺寸相差悬殊，通常焊条（焊丝）的直径很小而工件的尺寸很大，电弧在焊条（焊丝）上将受到电极尺寸的限制，而在工件上可以自由扩展，所以焊接电弧不是一个圆柱体，而是一个可以抽象为截面不断变化的圆锥体（图 2-8）。在这个圆锥体中，任意一点 A 的坐标 (L, φ) 。当电流均匀分布时 A 点受到的电磁收缩力为：

$$F_A = \frac{2I^2}{\pi L^2 (1 - \cos\theta)^2} \ln \frac{\cos(\varphi/2)}{\cos(\theta/2)} \quad (2-1)$$

式中 I ——焊接电流；
 θ ——1/2 锥顶角；
 φ ——A 点与电极轴线的夹角；
 L ——A 点距锥顶的距离。

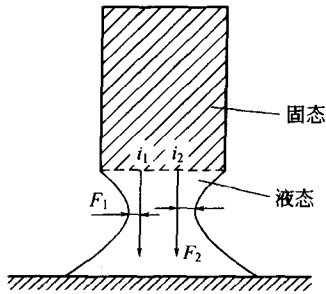


图 2-7 液态导体中电磁力引起的收缩效应

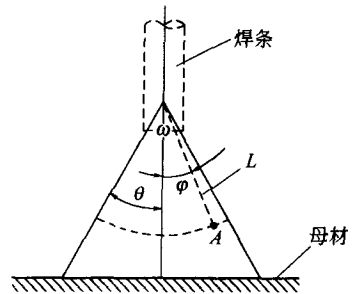


图 2-8 圆锥形电弧模型示意图

从式(2-1)可知，A 点的电磁收缩力与电流的平方成正比，与距离的平方成反比，且与 θ 和 φ 角有关。因此，可根据该公式绘出在一定条件下电弧中电磁收缩力的等压力曲线（图 2-9）。由图 2-9 可以看出，在圆锥形电弧中每个截面上的电磁收缩力是不一样的，截面小的电磁收缩力大，而截面大的电磁收缩力小。由于这种压力差的存在，就会产生一个由小截面（焊条或焊丝）指向大截面（工件）的推力，这个推力称为电弧静压力。由于这个静压力在电弧中心最大，而在电弧的边缘较小，因此使熔池的液态金属表面凹陷形成如图 2-12(a) 所示的熔深。

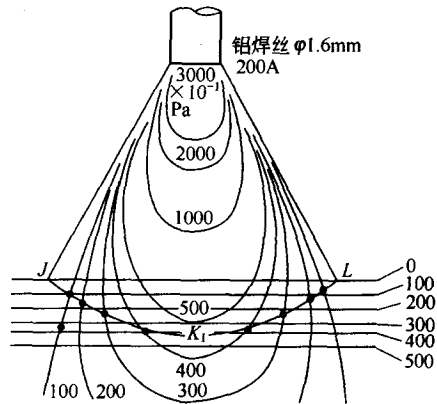


图 2-9 弧柱中和母材表面上的电磁收缩力等压力曲线

(2) 等离子流力 等离子体是一种高度电离的电中性气体。在电弧导电中，由于电弧中心部分温度高，电流密度大，这里的气体处于高电离状态，形成了电弧等离子体。如前所述，由于电弧导电截面的变化，形成了由焊条指向工件的推力。当电弧电流比较大时，这个推力将推动电弧等离子体由焊条向工件运动。这样在电弧中将形成一股高速流动

的气体，称为等离子流，如图 2-10 所示。为了保持流动的连续，外部的冷气流将从电极端部 C 区进行补充。这些冷气流进入电极后迅速被加热，电离后受推动力的作用从 A 区冲向 B 区。这部分等离子流的运动速度很高，可以达到每秒数百米（图 2-11）。这部分高速运动的物质将对熔池产生较大的压力，称为等离子流力，又称为电弧动压力。等离子流力的分布与等离子流速度分布相对应，在电弧中心线上压力最大，而且分布区间较小。这种较强的等离子流力是形成如图 2-12(b) 所示的指状熔深的一个重要原因。