



“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

熔焊方法与设备

Fusion Welding Method and Equipment

主 编 郑光海
副主编 鲍爱莲
丁元柱
岳竞峰

专家著书 体现先进性 前瞻性 反映材料领域的研究成果
学科融合贯通 注重交叉性 学术性 立足材料科学的人才培养
内容丰富翔实 追求研究性 实用性 促进材料工程的创新发展

哈尔滨工业大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
材料科学研究与工程技术系列(应用型院校用书)

熔焊方法与设备

主 编 郑光海
副主编 鲍爱莲 丁元柱 岳竞峰

哈尔滨工业大学出版社

内容提要

全书由两部分组成:电弧焊基础理论和常用熔化焊方法。共分9章:第1章和第2章为电弧焊的基础理论,重点介绍电弧基本原理、特性,电弧产生的熔化现象与焊缝成形规律。第3~9章,每章介绍一种熔化焊方法,分别是焊条电弧焊、埋弧自动焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊、电渣焊、高能束焊接。

本书可作为应用型本科院校焊接专业(材料成型及控制工程专业)教材,也可供材料加工工程、机械以及造船等专业的师生和工程技术人员参考。

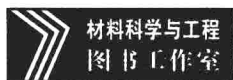
图书在版编目(CIP)数据

熔焊方法与设备/郑光海主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2012.8

ISBN 978-7-5603-3719-7

I. ①熔… II. ①郑… III. ①熔焊—焊接工艺②熔焊—焊接设备 IV. ①TG442

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 179619 号



责任编辑 许雅莹

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 9.25 字数 214 千字

版 次 2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-3719-7

定 价 20.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

进入 21 世纪,随着我国加入世界贸易组织和产业结构的调整。我国航空航天、国防、船舶、汽车、建筑、桥梁、石油化工、动力装备等诸多领域中,焊接技术的应用范围越来越广泛,焊接新技术不断涌现,焊接行业得到了蓬勃的发展。

企业对各层次焊接专业人才的需求也日趋旺盛。生产企业和研究机构对焊接人才有着不同层次的需求,特别是生产企业需要的是基础理论扎实、实践能力强的焊接人才。为适应这种需要,全国多所高等院校开设焊接专业或相关专业方向,培养应用型焊接人才。而在关于焊接方法与设备方面,用于应用型人才培养的焊接教材几乎是个空白,即使已经为多所高校采用的经典教材《电弧焊基础》(哈尔滨工业大学杨春利、林三宝编著),也因其理论性强且内容上仅限电弧焊方法而限制其在应用型人才培养中的应用。为了适应这一需要,我们组织编写了本教材。在编写时,参考了诸多国内经典理论教材和技术手册,力求理论与实践紧密结合,既突出理论的深度和广度,又体现实用性,以培养学生理论联系实际和分析解决问题的能力。

本教材基本内容由两部分组成:电弧焊基础理论和常用熔化焊方法。因为在熔化焊方法中,电弧焊方法占有主要地位,也是工艺生产中应用最为广泛的一种,所以本书的第 1 章和第 2 章主要介绍电弧焊的基础理论,重点介绍电弧基本原理、特性,电弧产生的熔化现象与焊缝成形规律。在第 3~9 章中,每章介绍一种熔化焊方法,分别是焊条电弧焊、埋弧自动焊、熔化极气体保护焊、钨极惰性气体保护焊、等离子弧焊、电渣焊、高能束焊接。在内容的深度和广度上,力求精练而全面,涵盖基本原理和前沿的熔焊技术,突出理论与实践的紧密结合。

本书可作为应用型本科院校焊接专业(材料成型及控制工程专业)教材,也可供材料加工工程、机械以及造船等专业的师生和工程技术人员参考。

本书由黑龙江科技学院郑光海任主编,黑龙江科技学院鲍爱莲、丁元柱和黑龙江省地球物理勘察院岳竞峰任副主编,其中,郑光海编写绪论、第 1 章、第 2 章、第 5 章、第 7 章;鲍爱莲编写第 4 章、第 9 章;丁元柱编写第 3 章、第 6 章;岳竞峰编写第 8 章。在本书的编写过程中得到一些兄弟院校老师的大力支持,在此向他们表示感谢!

由于编者的专业知识有限,书中难免出现疏漏和不足,敬请广大读者批评指正。

作 者
2012.6

目 录

绪论	1
0.1 焊接技术的发展历程	1
0.2 熔焊方法的分类、特点与工业应用	1
0.3 熔焊方法的发展趋势	2
第1章 焊接电弧基础	4
1.1 电弧的特征与本质	4
1.2 电弧的产生	5
1.3 电弧的构造与特性	7
习题1	22
第2章 电弧焊的熔化现象	23
2.1 母材的熔化与焊缝成形	23
2.2 焊丝的熔化与熔滴过渡	28
习题2	31
第3章 焊条电弧焊	32
3.1 焊条电弧焊的原理及特点	32
3.2 焊条电弧焊设备	37
3.3 焊条电弧焊工艺	39
3.4 焊条	49
3.5 常见焊接缺陷和检验方法	50
习题3	52
第4章 埋弧焊	53
4.1 埋弧焊原理、方法及特点	53
4.2 埋弧焊设备	55
4.3 埋弧焊工艺要点	57
习题4	71
第5章 熔化极气体保护焊	72
5.1 熔化极气体保护焊原理与特点	72
5.2 熔化极气体保护焊设备及保护气体	73
5.3 熔化极气体保护焊工艺	78
习题5	94

第 6 章 钨极惰性气体保护焊	95
6.1 钨极惰性气体保护焊原理、方法及特点	95
6.2 钨极惰性气体保护焊设备	96
6.3 钨极惰性气体保护焊工艺	98
习题 6	101
第 7 章 等离子弧焊	102
7.1 等离子弧焊原理、方法及特点	102
7.2 等离子弧焊设备的组成及分类	104
7.3 强流(大电流)等离子弧焊	108
7.4 微束等离子弧焊	110
7.5 脉冲等离子弧焊	113
7.6 等离子堆焊	114
7.7 等离子弧焊工艺要点	118
习题 7	121
第 8 章 电渣焊	122
8.1 电渣焊原理、类型及特点	122
8.2 电渣焊设备	124
8.3 电渣焊工艺	126
习题 8	129
第 9 章 高能束焊接	130
9.1 激光焊	130
9.2 电子束焊	135
参考文献	141

绪 论

0.1 焊接技术的发展历程

现代工业领域广泛应用的焊接技术,从其诞生起已有 120 多年的历史。最早应用于工业领域的焊接技术是俄罗斯人别那尔道斯(Бенардов)于 1885 年发明的碳弧焊。1907 年,瑞典人发明了焊条,确立了焊条电弧焊的技术基础。

为了克服焊条电弧焊所用焊条长度有限的不足,1930 年人们开发了埋弧焊,可以用更长的连续送进的焊丝进行长焊缝的一次焊接完成,提高了工效和焊接质量,改善了工作环境。从保护熔池和焊缝的目的考虑,人们开始研究钨电极与惰性气体(最早是 He 气)结合保护电弧(Gas Tungsten Arc, GTA)焊接方法的研究,1945 年,用于焊接铝合金的交流 GTA 焊法诞生。

在电弧焊发展的同时,其他一些熔焊方法也相继诞生并得到了完善和发展:1898 年出现了热剂焊,1901 年出现了气焊,20 世纪中叶,相继出现了电子束焊(1957 年)和激光焊(1960 年)。

熔焊方法在得到广泛应用的同时,其技术局限性也暴露出来,因此,一些非熔焊方法也相继出现,比如冷压焊(1948 年)、高频焊(1951 年)、超声波焊(1956 年)、摩擦焊(1957 年)、爆炸焊(1963 年)等。

0.2 熔焊方法的分类、特点与工业应用

熔焊方法尽管在原理上各不相同,但其共同之处是将被焊的材料(母材)熔化。现代工业领域中得到应用的熔焊方法已经有十几种,行业里一般倾向于按照热源的不同进行分类,如图 0.1 所示。

1. 电弧焊

利用电弧将母材(焊材)熔化,凝固冷却后形成焊缝。电弧在电极之间产生,电弧、熔池及熔滴在特定气氛或熔渣保护下免受空气的氧化。电极可以是相同的材料,也可以是不同的材料。前者称为熔化极气体保护焊,包括焊条电弧焊、埋弧焊、熔化极气体保护焊等;后者称为非熔化极气体保护焊,包括钨极氩弧焊、等离子弧焊等。

电弧焊热源温度高,能量集中,加热速度快,几乎能焊各种金属(等离子弧焊)。可以填充材料焊接中、厚板,也可以不填充材料焊接薄板,可以进行连接焊,也可以进行表面堆焊(带极埋弧焊),可以进行全位置焊接、全自动焊接。

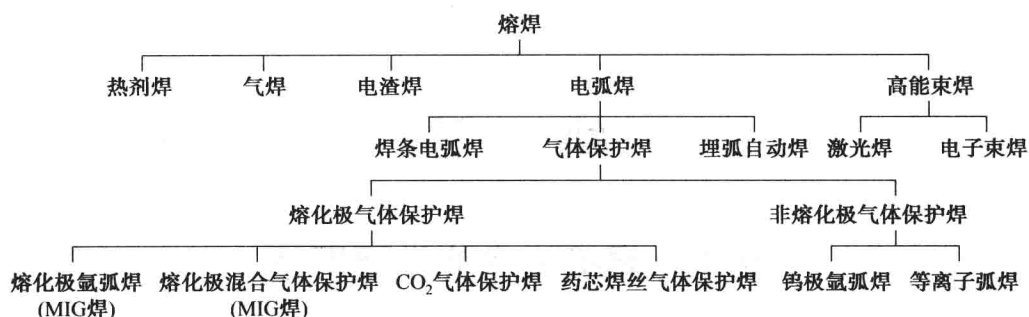


图 0.1 熔焊方法的分类

2. 电渣焊

电渣焊是电弧焊与电阻焊的结合。在焊丝(焊带)与工件间引燃电弧,电弧热将二者熔化后覆盖焊剂,将电弧熄灭而电阻热再将焊剂熔化,形成熔渣池,覆盖在熔池上保护熔池。在电阻热作用下,母材、焊材和焊剂持续熔化,液面上升,熔池逐渐凝固形成焊缝。

电渣焊只能进行立置焊接,非常适合大厚板的焊接。主要用于大型构件的焊接,如电站设备、核装备、冶金设备等。电渣焊是自动焊,焊丝的送进、熔池及渣池的上升均通过焊接专机实现。因其焊接速度慢,接头热影响区宽且组织粗化严重,所以电渣焊后的工件要进行退火处理,以细化晶粒。

3. 气焊

气焊是利用可燃气体的火焰热加热母材(焊材)进行的焊接方法。可燃气体通常有乙炔、天然气(CH_4)、液化石油气(C_3H_8)等,在氧气的助燃下燃烧,火焰热将母材加热熔化,可以填充材料也可以不填充材料。

气焊不需要电源,设备组成简单,操作技术易于掌握,灵活性强;但其不足是火焰有明显的氧化性,加热速度慢,热影响区宽,变形大。因此其应用受到限制,适合不重要构件、单件小批量生产和修复再制造等。

4. 高能束焊

高能束焊是指利用高能量密度的热源加热熔化焊件的焊接方法。高能束包括激光、电子束和等离子弧。高能束焊接的特点是加热速度快,热影响区窄,少或无变形及接头脆化。采用电子束焊接时,工件在真空环境下施焊,接头无氧化。高能束焊的不足之处是设备造价高,投入大,适合大批量生产及精密接头、难熔材料的焊接。

0.3 熔焊方法的发展趋势

熔焊方法在工程制造和安装领域的广泛应用,使这类焊接方法成为金属连接的主要方法。但是熔焊方法也存在其固有的不足,如金属组织性能变化、能耗、污染环境等。未来的发展趋势表现在如下几个方面。

1. 高效焊接

熔焊方法的能耗大,导致生产成本低和环境压力大,为此高效焊接势在必行。在不锈

钢、铝合金焊接中用到的活性剂 TIG 焊 (A - TIG 焊) 就是非常具有发展前景的焊接方法。

2. 焊接自动化和智能化

大批量 and 高质量、高精度焊缝,对熔焊提出了自动化、智能化要求。焊接机器人、智能化焊接电源层出不穷。

3. 结晶化焊接

焊条焊、埋弧焊等方法都存在较严重的环境污染问题,开发低烟、无烟的焊条、焊剂是环境保护的要求。

第 1 章 焊接电弧基础

如绪论中所述,电弧焊是种类最多、用途最广的一类熔焊方法。电弧焊熔化金属和填充材料的热源是焊接电弧。本章介绍焊接电弧的特征、产生过程及其内在特性。

1.1 电弧的特征与本质

1.1.1 电弧的本质与特征

简言之,电弧的本质是气体放电,气体放电是指气体电离。电离后的气体称为等离子体(Plasma),是由带电粒子、中性粒子组成的气体,是物质的第四种存在形态,具有高导电性。

气体放电是在某种能量(电场、热场、光、粒子碰撞)作用下的气体电离现象。这种能激发气体产生放电的能量称为激励源。根据气体放电对激励源的依赖程度不同,放电形式有自持放电和非自持放电两种形式,如图 1.1 所示。

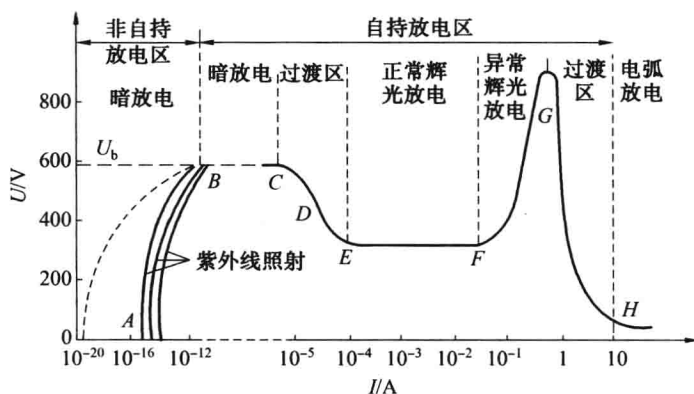


图 1.1 气体放电的伏 - 安特性曲线

非自持放电是在激励源消除后,放电也停止。自持放电则是在激励源消除后,依靠特定能量仍然能够维持的一种放电现象。焊接电弧放电就是一种极端的自持放电现象,是人们根据气体可以产生放电、产生能量转换的内在本质激发出的一种可以利用的放电形式。焊接用的电弧放电在图 1.1 曲线的最右端,表现出电压最低、电流最大的特征。实际的焊接电弧还伴有其他放电形式没有的弧光 and 高温。

实际情况中,用于产生焊接电弧的气体(空气、惰性气体、活性气体)是电的绝缘体,

但这些中性气体中仍然存在微量的带电粒子($< 10^{-8}$ 电子个数/ m^3)。当在中性气体间施加一定的电场时,这些带电粒子会被加速向电场两极飞行,途中将与中性的气体原子、分子发生碰撞,使中性粒子电离,产生更多的带电粒子,新生成的带电粒子在电场作用下飞向两极,电弧便形成了。

1.1.2 电弧中的带电粒子

电弧等离子体中的带电粒子是电子、阳离子和阴离子。它们来源于:电源通过阴极向气隙空间发射电子,气隙中的中性气体原子或分子被电离产生阳离子和电子,中性气体原子或分子捕获电子生成阴离子。电弧燃烧时,电弧空间同时存在电子、阳离子、阴离子、中性原子或分子,呈动态平衡状态即等离子体。电弧中的粒子运动和相互作用过程极其复杂,表现出来的特征极为活跃。

1. 电子

电弧空间的电子是由阴极发射出来的。阴极材料是导电性良好的金属、合金等材料,比如钢、铝、石墨等,在电场、热能的作用下向外发射电子。电子在电场的驱动下向阳极飞行,途中会碰撞中性原子、分子,使之产生电离,形成阳离子和电子。

电弧中的电子在运动中,不是全部到达阳极,有一少部分扩散到电弧的外围,与中性粒子复合成阴离子,或与阳离子复合成中性粒子,还有少部分散失到电弧空间以外。

对阴极材料施以电压或高温,均会使阴极产生电子发射。电弧中电子电流的密度与电场强度、阴极材料的温度有直接关系。如图 1.2 所示,在电场强度低于 $(1 \sim 2) \times 10^9 \text{ V/m}$ 时,电子电流密度受温度的影响明显,当电场强度高于某值时,电场主导电子的发射,电子电流密度对温度的依赖明显下降。

2. 阳离子

阳离子是气体中性原子电离而来的。电子的高速撞击、电弧自身的高温辐射都会使原子产生电离。阳离子在电场的驱动下向阴极飞行,撞击阴极表面反弹回来,释放的动能会进一步导致阴极发射电子。阳离子在运动中特别是电弧外围的阳离子会与电子复合形成中性原子。阳离子同电子一样,是电弧导电、产热的主要因素。

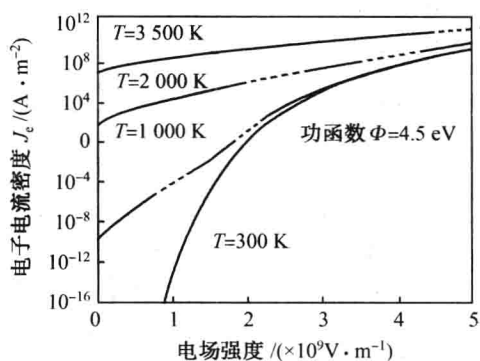


图 1.2 电子电流密度与电场强度的关系

1.2 电弧的产生

1.2.1 接触引弧与非接触引弧

实际中,电弧的引燃有接触引弧和非接触引弧两种方法。接触引弧的过程是:焊丝与

工件短路,短路电流使焊丝迅速发热爆断,空载电压 U_0 使电极产生热电子发射击穿气体,场电子发射维持电弧燃烧。这种引弧方法适用于熔化极电弧焊,包括焊条焊(Shielded Metal Arc Welding,SMAW)、熔化极气体保护焊(Gas Metal Arc Welding,GMAW) 和埋弧焊(Submerge Arc Welding,SAW)。

当电极与工件不能接触或电极不允许与工件接触时,需要用非接触引弧的方法引燃电弧。非接触引弧的过程是:在电极间施加引弧高电压(几千伏特),场发射电子击穿气体,热发射电子维持电弧燃烧。非接触引弧适用于非熔化极电弧焊,包括钨极惰性气体保护焊(Gas Tungsten Arc,GTA 或 Tungsten Inertia Gas,TIG)、等离子弧焊(Plasma Arc Welding,PAW)。

1.2.2 电弧产生的微观过程

1. 阴极电子发射

阴极电子发射是电弧产热及中性粒子电离的初始根源,电弧中的一切物理现象都与阴极电子发射有密切的关系。电子发射也是电源持续向电弧提供能量的唯一途径。

阴极电子发射是阴极材料中的电子脱离材料的束缚,逸出电极表面进入电弧空间的过程。使阴极产生电子发射的基本能量条件是,外加能量大于阴极材料的电子逸出功 W_w ,换算成等效电压为 U_w 。外加能量可以是电能、热能,也可以是光能、动能。不同物质的逸出功存在差异,见表 1.1。从表中可以看出,金属氧化物的逸出功均小于金属本身的逸出功,说明在同样能量作用下,金属氧化物更容易产生电子发射。

表 1.1 物质的逸出功 W_w eV

	W	Fe	Cu	Al	K	Ca	Mg
金属	4.54	4.48	4.36	4.25	2.02	2.12	3.78
金属氧化物	—	3.92	3.85	3.90	0.46	1.80	3.31

当金属温度达到 3 000 K 时,金属内部运动能量达到逸出功 W_w 的电子束迅速增多,会逸出电极到达自由空间,这种电子发射称为热电子发射。当在阴极表面施加一定强度的电场,阻挡电子逸出的电势壁垒将变薄,一部分居于高能态的自由电子就会逸出,形成电场发射。

热电子发射和场电子发射是电弧产生的两种初始条件。金属电子发射还有碰撞发射和光发射两种形式。这两种电子发射不是产生电弧的初始条件,但是,电弧产生以后,阴极材料在电弧光辐射的作用下会产生光电子发射,电弧中被加速的阳离子撞击阴极也会产生碰撞电子发射。碰撞发射和光发射与场发射、热发射共同为电弧区提供电子,所以,热发射、场发射产生电弧,随之四种电子发射形式同时存在,维持电弧的燃烧。

2. 中性粒子的电离

单独的电子发射无法产生电弧,需要另一个必要条件,就是气体的电离。电极间的气隙是产生电离的物质条件。

中性的气体原子、分子产生电离的能量条件是,原子、分子获得了超过其电离能 W_i 的外加能量,换算成等效电压 U_i 。使原子失去一个电子的能量称为第一电离能,使原子失

去两个电子的能量称为第二电离能,依此类推。外加能量可以是电能、动能、光能、热能。不同气体的电离能存在明显的差异。不同原子的电离电压见表 1.2。从表中可以看出,金属原子的电离电压均低于非金属原子的电离电压,说明金属蒸气的存在使电弧的电离度提高,这在熔化极电弧焊中很重要。

表 1.2 原子的电离电压

原子	电离电压 U_i/V	原子	电离电压 U_i/V	原子	电离电压 U_i/V
H	13.60	Al	5.99	Cr	6.77
He	24.59	Si	8.15	Mn	7.44
Li	5.39	P	10.49	Fe	7.87
C	11.26	S	10.36	Co	7.86
N	14.53	Cl	12.97	Ni	7.64
O	13.62	Ar	15.76	Cu	7.73
F	17.42	K	4.34	Zn	9.39
Ne	21.56	Ca	6.11	Ge	7.90
Na	5.14	Ti	6.82	Se	9.75
Mg	7.65	V	6.74	Kr	14.00

根据电离度的大小,等离子体分为弱电离等离子体和强电离等离子体。弱电离等离子体的电离度低,主要是电子和中性粒子控制等离子体。强电离等离子体是由电子、正离子支配等离子体。因为对象的不同,强、弱等离子体的界限没有统一的标准。一般而言,焊接电弧等离子体的电离度为 1% ~ 3%。

3. 带电粒子的扩散与复合

电弧空间的带电粒子在电场作用下总体做定向运动,即电子向阳极运动,正离子向阴极运动。同时,电弧中心轴线上的带电粒子密度高,周边区域的带电粒子密度低,因此,带电粒子会产生从电弧中心向外部周边的扩散,使电弧在形态上呈扩展的形状。

如前所述,电弧中的粒子运动和相互作用过程极其复杂,电弧中的带电粒子有产生同时也有消失。在电弧外围区域,带电粒子的运动速度较低,正离子与电子间容易发生非弹性碰撞产生复合。复合后的中性粒子可能再次被电离,也可能随着气体介质的运动散失到电弧空间以外。

1.3 电弧的构造与特性

1.3.1 焊接电弧的构造

1. 理想电弧模型

理想电弧是电极材料相同、截面相同,电极间通以直流电时产生的电弧,其电弧模型如图 1.3(a) 所示。水平放置的电极间产生的电弧,中心部分向外扩展,呈现弧状。电弧形状为双轴对称的特征,沿着电弧轴线,从阴极到阳极,分为阴极区、弧柱区和阳极区。据测量,阴极区的长度为 1 ~ 10 nm,阳极区的长度为 0.1 ~ 1 μm ,电弧的总长度为 2 ~

10 mm。而阴极区和阳极区的长度基本不变,所以电弧的长度基本等于弧柱区的长度。

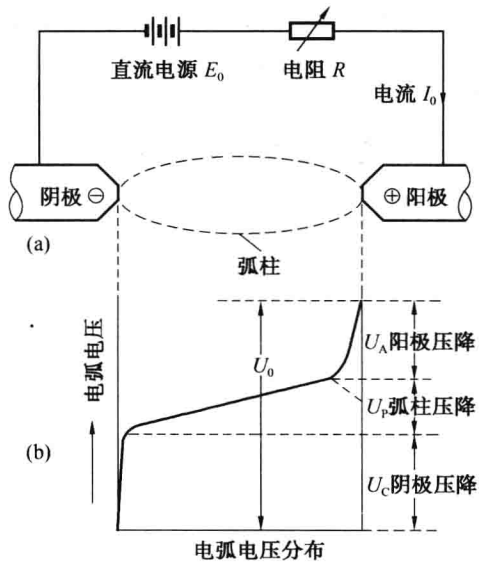


图 1.3 理想电弧模型

图 1.3(b) 显示了电弧长度上的电压降分布情况。在阳极区,聚集了大量来自弧柱区的电子,构成阳极压降 U_A ,如图 1.4 所示;在阴极区,聚集了大量来自弧柱区的阳离子,构成了阴极压降 U_c ,如图 1.5 所示;在弧柱区,气体电离形成等离子体,其产热与散热维持平衡,不会像两极区一样有过多的阳离子或电子聚集,因此其弧柱区压降 U_p 较两极区压降要小。

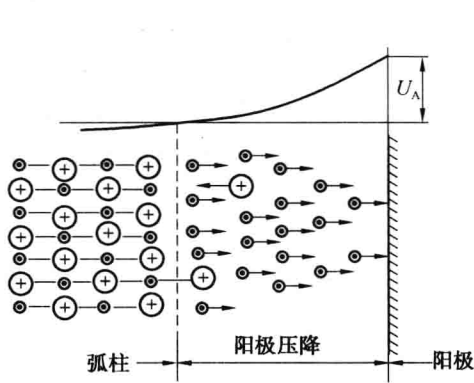


图 1.4 电弧阳极压降的形成

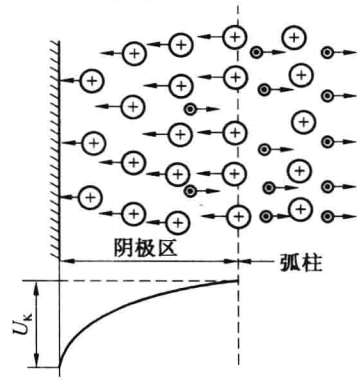


图 1.5 电弧阴极压降的形成

电弧电压为三个区域压降的总和,即

$$U_a = U_A + U_p + U_c \tag{1.1}$$

2. 实际电弧模型

实际的焊接电弧是在截面相差极大的两极间产生的,其中钨极或焊丝直径很小(小于 5 mm),限制了电弧的扩展,而工件面积很大,电弧在工件一侧可以扩展。所以实际的焊接电弧呈锥形,如图 1.6 所示。

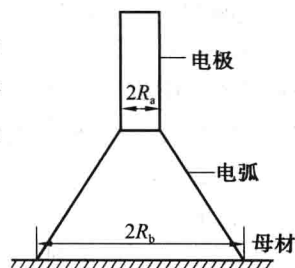


图 1.6 实际电弧模型

1.3.2 电弧的电特性

1. 电弧的导电机构

电极间的带电粒子(电子和离子)在电弧压降的加速下向两极运动,形成电流。电弧电流等于电子电流 I_e 与离子电流 I_i 之和,即

$$I = I_e + I_i \quad (1.2)$$

在电弧的各个区域,电流的组成有所不同,如图 1.7 所示。在弧柱区,电弧产生的热量发生作用,电流以电子流为主,约占 99%;在阴极区,来自弧柱区的阳离子撞击阴极,使之表面温度提高,产生热电子发射,同时,阳离子的聚集形成了阴极压降,产生场电子发射,所以阴极区的电流组成以电子流和离子流共存;在阳极区,来自弧柱区的电子聚集,并不断被阳极捕获,而阳离子被阳极压降“推开”,所以阳极区的电流几乎为 100% 的电子流。

2. 电弧的静特性

电弧的静特性是电弧稳定燃烧时电弧电压 - 电流特性,用电弧的静特性曲线来表述。电弧的静特性曲线就是在一定的电弧长度(弧长)和稳定的电弧燃烧条件(保护气流量、电极条件等)下,改变电弧电流数值。电弧稳定燃烧时对应的电弧电压曲线,如图 1.8 所示。

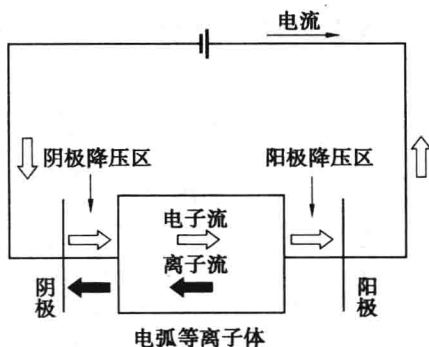


图 1.7 电弧各区域电流组成

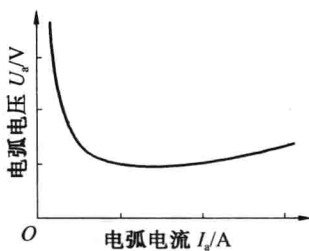


图 1.8 电弧静特性曲线

一般条件下,电弧静特性曲线分为三个区段,分别为下降特性区、平特性区和上升特性区。三个区段与电弧自身的特点有关,包括电弧的性质、产热与散热平衡等因素。

在下降特性区,电弧电压随着电流增加而下降,呈现“负特性”。产生负特性的原因

为:电流较小时,气体电离度低,电弧产热及两极温度较低,热电子发射不足,需要较高的电场维持电子发射。如果在这个区段提高电流值,气体的电离度提高,电弧温度及两极区温度提高,阴极电子发射能力增强,阴极压降 U_c 降低,阳极材料蒸发量增加,阳极压降 U_a 也降低;对于弧柱区,假定电弧的电流密度 j (电流/电弧面积) 恒定,如果电流增加 4 倍,则电弧直径要增加 2 倍,若弧柱区压降 U_p 不变,电弧产热就会增加 4 倍,而电弧的散热只增加 2 倍,这就打破了产热与散热的平衡,而电弧的特点之一是自动维持产热与散热的平衡,所以当电流增加时,电压要下降。上述多个因素导致了小电流区电弧的“负特性”特点。

在平特性区,电流处于中等大小区间,此时气体电离度显著增加,随着电流的增加,产热增加,散热也增加,电弧的产热与散热维持平衡,电压基本不变。

在上升特性区,电弧的电离度更大,电弧自身磁场的作用使电弧的截面积不能扩大太多,为保证更多电荷顺利通过电弧区到达两极,需要提高电压,而且在这个区间随着电流的增大电压要提高。

根据焊接电弧产生机理的不同,分为焊条电弧、钨极惰性气体电弧、保护气氛电弧、埋弧等不同种类。对于不同种类的电弧,其静特性不一定都具有三个区段。GTA 焊的电弧静特性具有三个区段,如图 1.9 所示。该图表明在各种电流大小的情况下这种电弧都能稳定燃烧。GMA 焊常用到中等以上电流,电弧电磁作用强烈,平特性区段不明显,静特性呈现上升趋势,如图 1.10 所示。SAW 焊接电弧掩盖在焊剂下,电弧的热损失小,而且电弧中基本没有 GTA、GMA 电弧的等离子体存在,一般采用粗焊丝(直径 2.0 mm 以上)、大电流(500 A 以上)焊接,所以电弧静特性基本只有下降阶段,如图 1.11 所示。

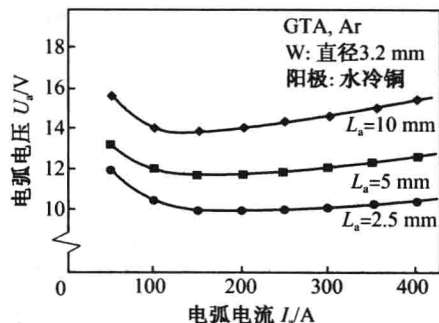


图 1.9 GTA 焊接电弧的静特性曲线

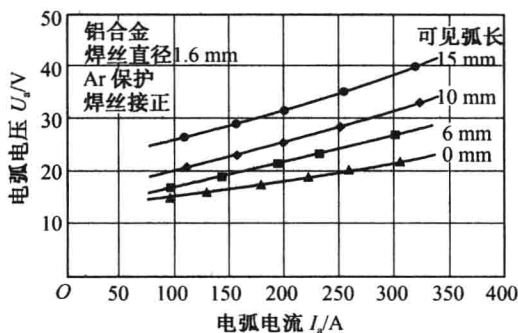


图 1.10 GMA 焊接电弧的静特性曲线

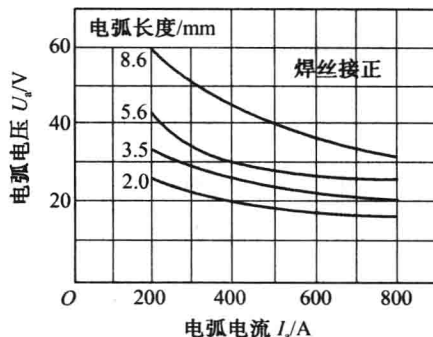


图 1.11 SAW 焊接电弧的静特性曲线

3. 电弧静特性的影响因素

(1) 电弧长度

电弧电压 U_a 与弧长 L 的关系可用下式表示

$$U_a = U_{a0} + EL \quad (1.3)$$

式中, U_{a0} 为 U_c 与 U_A 之和, 它不随电弧长度的变化而变化; E 为弧柱区单位长度上的电压降, 称为弧柱电位梯度。在整个弧柱区, E 是各处相等的; L 为弧长 (约等于弧柱区长度)。

因为阴极区和阳极区的长度与弧柱长度相比可以忽略不计, 电弧长度约等于弧柱区长度, 所以弧柱电位梯度也就是电弧电位梯度。因此, 从式 (1.3) 可以看出, 当弧长 L 增大时, 电弧电压 U_a 提高, 反之, 电弧电压 U_a 降低。从图 1.9 ~ 1.11 可以看出, 不管是哪种类型的电弧, 当弧长发生变化时, 电弧静特性曲线也会改变其在坐标系中的位置, 即当弧长增大时, 静特性曲线上移, 反之, 静特性曲线下移, 这与式 (1.3) 反映的现象是一致的。从图中还可以看出, 当静特性曲线位置发生改变时, 其斜率也发生变化, 这是由于电弧的散热是呈现非线性变化的结果。

(2) 保护气成分及流量

图 1.12 所示为保护气成分对电弧电压的影响。从图中可以看出, 在不同的保护气氛下, 即使弧长相同, 也会出现不同的电弧电压。其原因在于不同成分的保护气对弧柱电位梯度 E 的影响不同。

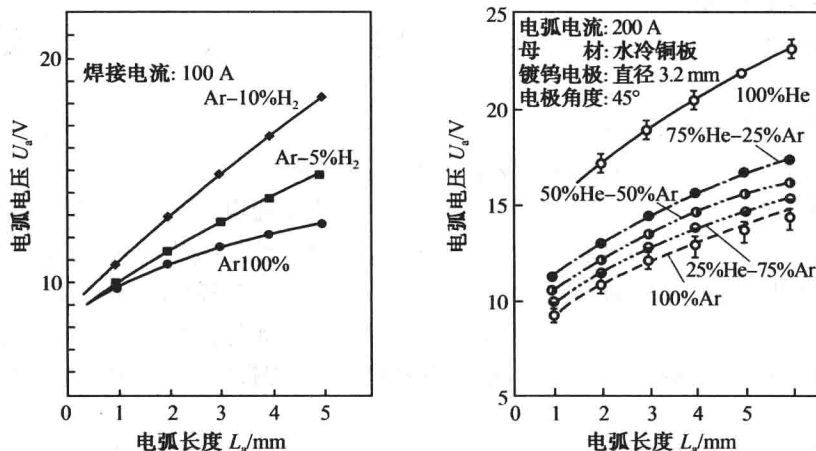


图 1.12 保护气成分对电弧电压的影响

表 1.3 为各种保护气氛下电弧电位梯度。不同保护气氛下电弧电位梯度不同可以作如下解释: 一是如图 1.12 所示, 氢、氦等原子质量小、质量轻的原子从电弧中心向周边区域扩散的速度明显大于原子质量大、质量重的氩原子, 带走的热量多, 电弧需要通过提高电压来维持热量平衡, 为此, 氢、氦等保护气氛下电弧电位梯度高。二是多原子气体如氧气、二氧化碳等, 在电离之前要分解, 分解反应是吸热的, 电弧同样要通过提高电压维持热