

电弧焊方法及设备

◎ 主编 杨文杰

哈尔滨工业大学出版社

电弧焊方法及设备

主 编 杨文杰
副主编 李慕勤 廖 平
主 审 陈彦宾

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述了有关电弧焊的基础理论,包括焊接电弧的特性、焊丝加热熔化、焊缝成形以及电弧焊自动控制技术;对以焊接电弧为热源的各种电弧焊方法,包括埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂气体保护电弧焊、等离子弧焊及切割、螺柱焊及钢轨焊等,分别讲述了其工作原理和特点、焊接设备、焊接材料、焊接工艺以及所派生出的新法。本教材注意理论联系实际,突出重点,并注意反映国内外新的研究成果和发展趋势,可作为高等院校材料成形及控制工程专业(或焊接方向)的主干课教材,亦可供从事焊接等技术领域工作的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电弧焊方法及设备/杨文杰主编.—哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2007.8

ISBN 978-7-5603-2575-0

I.电… II.杨… III.电弧焊-基本知识 IV.TG444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 120179 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 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 17.25 字数 400 千字

版 次 2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-2575-0

印 数 1~3 000 册

定 价 29.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

随着科学技术和工业技术的发展,我国焊接行业也得到了蓬勃的发展,出现了许多革新性技术。随着经济建设的发展,新的焊接技术在企业生产中得到广泛的推广和应用,也促进了焊接行业的进一步发展。

据统计我国的钢铁产量从1989年的6 000万t提高到2004年的2.74亿t,产量提高了3.57倍,已经成为钢铁生产和消费大国。焊接设备从6.97万台增加到2003年的42万台;焊接材料从44.7万t增长到227.5万t。随着焊接设备的产量大幅度提高,焊接设备也从简单的晶闸管整流式TIG焊和CO₂焊设备发展到今天的IGBT逆变焊设备。气体保护电弧焊从TIG焊设置到交流方波焊机和变极性TIG焊设备,GMAW电弧焊从CO₂电弧焊到熔化极脉冲电弧焊设备,CO₂电弧焊从抽头整流焊机和SCR整流焊机,到今天的逆变式气体保护电弧焊机和数字化CO₂电弧焊机。PMIG也出现了许多种焊机,如双脉冲、双丝Tandem、CMT、ACMIG、新型的CO₂焊机等。总之,电弧焊设备从整流式到全数字化,这一变化是巨大的。从焊材来看,原来仅有一种H08Mn2SiA焊丝(ER49-1),现在又增加了ER50系列多种焊丝,同时药芯焊丝也具有多种。我国气保护焊消耗材料仅占总消耗材料的20%,而先进工业国家为60%以上,日本达到80%。

为适应焊接技术及国民经济建设发展的需要,满足高校焊接专业教材在内容上对一些新技术的发展要求,保证教学的需要,以及适应焊接行业新技术、新工艺发展的推广和普及,根据作者多年从事焊接专业教学和科研工作的经验,编写了本书。

本书主要介绍了焊接电弧物理、焊丝加热熔化及熔滴过渡现象、非熔化极和熔化极气体保护电弧焊、等离子弧焊、埋弧焊、螺柱焊及钢筋埋弧压力焊等机械化自动化电弧焊方法、设备和焊接工艺。并介绍了近年来发展起来的新技术和新工艺,如活性化TIG焊(A-TIG)、热丝TIG焊、表面张力过渡(SIT)、数字化焊接、双丝焊、激光电弧复合焊等。

本书由杨文杰任主编,李慕勤、廖平任副主编。哈尔滨工业大学陈彦宾教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的意见和建议,在此谨向其表示深切的谢意。

由于编者的水平所限,难免出现疏漏和不足,敬请读者及专家批评指正。

编 者

2007年6月

目 录

第0章 绪论	1
0.1 焊接技术的发展历程	1
0.2 电弧焊方法的分类与特点	2
0.3 焊接电弧研究在电弧焊技术发展中的作用	5
第1章 焊接电弧	6
1.1 焊接电弧的物理本质	6
1.2 焊接电弧各区域的导电机构	13
1.3 焊接电弧的电特性	20
1.4 焊接电弧的产热及温度分布	24
1.5 焊接电弧力及影响因素	28
1.6 焊接电弧的稳定性及其影响因素	32
第2章 焊丝的加热、熔化与熔滴过渡	36
2.1 焊丝的加热与熔化	36
2.2 熔滴上的作用力	40
2.3 熔滴过渡主要形式及其特点	42
2.4 熔滴过渡飞溅的产生及损失	51
2.5 熔滴过渡的控制	55
第3章 母材熔化与焊缝成形	60
3.1 母材熔化与焊缝形成过程	60
3.2 焊缝形状尺寸及其与焊缝质量的关系	61
3.3 电弧热与熔池形状的关系	62
3.4 熔池受到的力和力对熔池形状的影响	65
3.5 焊接参数和工艺因素对焊缝形状的影响	67
3.6 焊缝成形缺陷及缺陷形成的原因	71
3.7 焊缝成形的控制	73
第4章 电弧焊的自动控制技术	76
4.1 熔化极电弧焊的自动调节系统	76
4.2 电弧焊接过程参数的恒值控制	89
4.3 电弧焊的程序自动控制	93

第5章 埋弧焊	96
5.1 埋弧焊的原理和特点	96
5.2 埋弧焊用焊接材料	99
5.3 埋弧焊的冶金特点	102
5.4 埋弧焊的自动焊设备	106
5.5 埋弧焊工艺	114
5.6 埋弧焊焊接技术	117
5.7 高效埋弧焊	126
第6章 钨极氩弧焊	131
6.1 钨极氩弧焊原理、特点与应用	131
6.2 钨极氩弧焊电极材料与保护气体	133
6.3 钨极氩弧焊设备组成及引弧、稳弧方式	138
6.4 钨极氩弧焊电流的种类和极性	144
6.5 钨极氩弧焊工艺	151
6.6 脉冲钨极氩弧焊	156
6.7 高效钨极氩弧焊技术	159
第7章 熔化极氩弧焊	164
7.1 熔化极氩弧焊原理、特点及应用	164
7.2 熔化极氩弧焊熔滴过渡	165
7.3 熔化极氩弧焊的自动调节系统	166
7.4 熔化极氩弧焊设备	170
7.5 熔化极脉冲氩弧焊	173
7.6 混合气体的选择和使用	177
7.7 熔化极氩弧焊工艺	180
7.8 高效熔化极气体保护焊	186
第8章 CO₂ 气体保护电弧焊	196
8.1 CO ₂ 气体保护电弧焊的原理、特点与应用	196
8.2 CO ₂ 气体保护电弧焊的冶金特性	197
8.3 CO ₂ 气体保护电弧焊焊接材料	201
8.4 CO ₂ 气体保护电弧焊工艺	203
8.5 减少飞溅的方法及措施	207
8.6 CO ₂ 气体保护电弧焊设备	210
8.7 CO ₂ 气体保护电弧焊的焊接技术	217
8.8 CO ₂ 气体保护电弧焊的其他方法	223

第 9 章 等离子弧焊接与切割	230
9.1 等离子弧的产生及其特性	230
9.2 等离子弧焊接设备	233
9.3 等离子弧焊接	239
9.4 等离子弧切割原理及特点	245
第 10 章 螺柱焊及钢筋埋弧电渣压力焊	250
10.1 螺柱焊的特点、分类和应用	250
10.2 电容储能螺柱焊	252
10.3 短周期螺柱焊	256
10.4 电弧螺柱焊	256
10.5 螺柱焊的方法	260
10.6 螺柱焊焊接材料	260
10.7 拉弧式螺柱焊工艺的磁偏吹现象	262
10.8 钢筋埋弧电渣压力焊	262
参考文献	267

第0章 绪 论

0.1 焊接技术的发展历程

焊接作为一种实现材料永久性连接的方法,被广泛地应用于机械制造、石油化工、桥梁、建筑、动力工程、交通车辆、船舶、航天、航空等各个工业部门,已成为现代机械制造业中不可缺少的加工工艺方法,且随着国民经济的发展,其应用领域还将不断地拓宽。

从1801年迪威发现电弧放电现象开始,到1885年俄国人发明的碳弧焊的出现,这是电弧作为焊接热源应用的开始,是近代焊接技术的起点。19世纪中叶人们提出了利用电弧熔化金属并进行材料连接的思想,许多年后真正出现了达到实用程度的电弧焊接方法。最初可以称做电弧焊接的是以碳电极作为阳极产生电弧,被用在铁管及容器的制造及蒸汽机车的修理中。1892年发现了金属极电弧,随之出现了金属极电弧焊。1907年瑞典人发明了焊条,将其用做金属极电弧焊中的电极,于是出现了薄皮焊条电弧焊和厚皮焊条电弧焊;并于1912年开发出保护性能良好的厚涂层焊条,确立了焊条电弧焊技术的基础。从“利用电弧进行金属的熔化焊接”这一新思想产生开始,经历了50多年,焊接技术的基础才得以确立。电弧焊接能够减少使用材料、确保连接强度、缩短作业时间,因此很快被产业界采用,1920年英国全焊接船已下水使用。

焊条焊接法成功进一步促进了电弧焊接技术的发展。由于焊条焊接采用了有限长度的焊条,所进行的焊接是不连续的,不适于连续焊接的要求。为克服此项难点,1935年人们发明了埋弧焊。埋弧焊方法是向颗粒状焊剂中连续送进钢制焊丝,电弧放电所需电流从导电嘴供给,这种电流供给方式是现在自动焊的原形。

为了对电弧及焊接金属进行保护,使其与空气隔绝,人们很早就开始考虑利用保护气体。从20世纪40年代初开始,惰性气体保护电弧焊开始在生产中大量应用。1930年后以美国为中心,进行了钨电极与氦气保护的钨电极电弧焊接方法的研究。1940年该方法首先用于镁及不锈钢薄板的焊接。由于铝合金表面氧化膜的存在,焊接困难。1945年前后,由于电弧放电的阴极斑点具有去除氧化膜的作用,随后出现了以铝合金为对象的交流GTA焊接法、在氩气保护气氛中采用铝焊丝的直流金属极(gas metal arc)焊接法,即GMA焊接法。与此同时,电阻焊开始大量被使用,这使得焊接技术的应用范围迅速扩大,在许多方面开始取代铆接,成为机械制造业中一种基础加工工艺。

进入20世纪50年代以后,现代工业和科学技术迅猛发展,焊接方法得到更快的发展。1951年出现了用熔渣电阻热作为焊接热源的电渣焊;1953年出现了CO₂气体保护电弧焊;1956年出现了以超声波和电子束作为焊接热源的超声波焊和电子束焊;1957年出现了以等离子弧作为热源的等离子弧焊接和切割以及以摩擦热作为热源的摩擦焊;1965

年和 1970 年又相继出现了以激光束作为热源的脉冲激光焊和连续激光焊。

20 世纪 80 年代以后,人们开始对更新的焊接热源进行探索,如太阳能、微波等。历史上每一种新热源的出现,都伴随着新的焊接方法的问世,焊接技术发展到今天,几乎运用了一切可以利用的热源,包括火焰、电弧、电阻热、超声波、摩擦热、电子束、激光、微波等。而人们对焊接热源的研究与开发仍未停止过,一方面,对现有的热源进行改进,使之更为有效、方便、经济、适用,电子束,特别是激光束焊接的发展比较显著;另一方面,人们积极开发更好、更有效的热源,例如近些年来电弧加激光的复合热源等,在增强能量密度和提高焊接生产率方面取得了成功。可以预料,随着现代工业的发展和科学技术的进步,焊接方法将有更新的发展。

随着各种焊接方法的不断出现,各种焊接方法的机械化、自动化水平也在不断提高。电子技术、计算机技术、传感技术、自适应控制技术以及信息和软件技术在焊接领域的应用,使焊接生产自动化程度日新月异,目前正在向焊接过程智能化控制的方向发展。特别是工业焊接机器人的引入,是焊接自动化的革命性的进步,它突破了传统的焊接刚性自动化方式,开拓了一种柔性自动化的新方式。

0.2 电弧焊方法的分类与特点

焊接作为材料连接技术,是通过某种物理化学过程使分离的材料产生原子或分子间的作用力而连接在一起。近年来,随着焊接技术应用领域的迅猛发展,特别是新技术、新方法、新材料的不断涌现,焊接被赋予更具广泛意义的技术范畴。通常要使两个物体(相同物体或不同物体)产生原子间结合有一定的难度,为了达到这个目的,实际中可以采用在两物体的界面上加压和加热熔化的办法。

1. 焊接方法

按照焊接过程中母材是否熔化以及对母材是否施加压力进行分类,可以把焊接方法分为熔焊、压焊和钎焊 3 大类,在每一大类方法中又分成若干小类。

(1) 熔焊

熔焊是在不施加压力的情况下,将待焊处的母材加热熔化形成焊缝的焊接方法。焊接时母材熔化而不施加压力是其基本特征,根据焊接热源的不同,熔焊方法又可分为:以电弧作为主要热源的电弧焊;以化学热作为热源的气焊;以熔渣电阻热作为热源的电渣焊;以高能束作为热源的电子束焊和激光焊等。

(2) 压焊

压焊是焊接过程中必须对焊件施加压力(加热或不加热)才能完成焊接的方法。焊接时施加压力是其基本特征,共有两种形式,一种是将被焊材料与电极接触的部分加热至塑性状态或局部熔化状态,然后施加一定的压力,使其形成牢固的焊接接头,如电阻焊、摩擦焊、气压焊、扩散焊、锻焊等;第二种是不加热,仅在被焊材料的接触面上施加足够大的压力,使接触面产生塑性变形而形成牢固的焊接接头,如冷压焊、爆炸焊、超声波焊等。

(3) 钎焊

钎焊是焊接时采用比母材熔点低的钎料,将焊件和钎料加热到高于钎料熔点,低于母

材熔点的温度,利用液态钎料润湿母材,填充接头间隙,并与母材相互扩散而实现连接的方法。其特征是焊接时母材不发生熔化,仅钎料发生熔化。钎焊方法分为硬钎焊和软钎焊,使用的钎料熔点高于 450 ℃为硬钎焊,使用的钎料熔点低于 450 ℃为软钎焊。另外,根据钎焊的热源和保护条件的不同也可分为火焰钎焊、感应钎焊、炉中钎焊、盐浴钎焊等。

2. 电弧焊

电弧焊是焊接方法的一种基本形式,在各类焊接方法的应用量中居主要地位。该方法是对能够产生连接的两个部件的一部分进行电弧熔化,熔化金属混合、凝固后形成两部件的冶金结合。依据电弧焊实现方式上的差异,目前已有的电弧焊方法如图 0.1 所示。

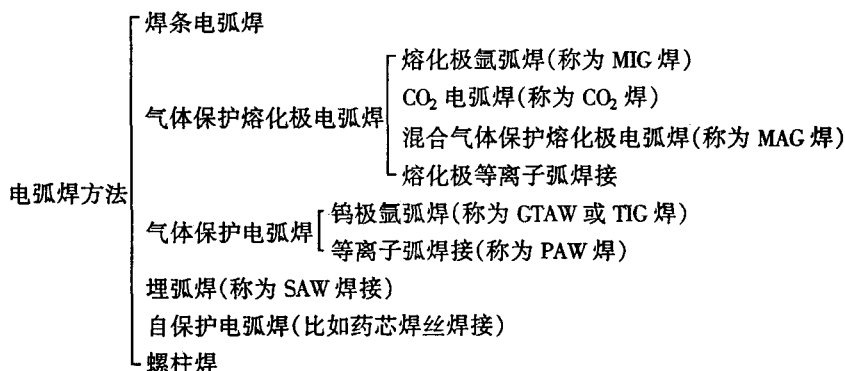


图 0.1 电弧焊基本方法分类

(1) 焊条电弧焊方法(shielded metal arc welding, SMAW)

焊条电弧焊方法历史最久,在实际生产中使用广泛,如结构钢、不锈钢的焊接等。焊条电弧焊原理是在焊条与母材(被焊材料)之间引燃电弧,利用电弧热进行熔化焊接。电弧及焊接区受到焊条药皮(药剂)分解产生的气体及熔渣的保护,使其与大气相隔离。焊芯受到电弧的加热而熔化,形成熔滴过渡到熔池,与母材熔化的金属共同形成焊缝。

焊条药皮的主要作用有如下几点。

- ① 有利于电弧放电的产生、提高电弧的导电性及电弧的稳定性。
- ② 造渣形成熔渣,隔离空气,保护电弧、熔滴及焊缝金属,防止焊缝极速冷却。
- ③ 通过有机物、碳酸盐造气。
- ④ 脱氧及合金化、精炼焊缝金属。

药皮的组成不同,电弧稳定性、焊接工艺性、焊缝裂纹倾向性等焊接特性也不同。焊接时应根据母材的材质、构造物、焊接姿势等进行焊条的选择和使用。

焊条电弧焊利用了具有下降特性的交流或者是直流电源。通常随着焊条的熔化,操作者要借助于手把运作焊条完成焊接。

(2) 气体保护熔化极电弧焊方法(gas metal arc, GMA 焊接法)

气体保护金属极电弧焊接法采用焊丝作为电极(熔化极),在焊丝与母材之间形成电弧进行焊接。为使焊接区与空气隔离,一般采用氩气和二氧化碳气体作为保护气。使用氩气等惰性气体作为保护气时,称做 MIG(metal inert gas)焊接;使用 CO₂ 气体作为保护气时,称做 CO₂ 电弧焊;使用氩气与二氧化碳气体的混合气体作为保护气时称做混合气体保护电弧焊。近年来由于混合气体保护电弧焊被广泛使用,也把 CO₂ 电弧焊和混合气体保

护电弧焊统称做 MAG(metal active gas)焊接。

MIG 焊、CO₂ 焊、MAG 焊统称为气体保护熔化极电弧焊。

气体保护熔化极电弧焊一般采用直流恒压特性电源,铝合金焊接也可以采用直流恒流特性电源,通常是把电极接为正极。铝及合金 MIG 焊时利用阴极清理作用,可以实现铝及合金高质量、高效率焊接。

MAG 焊时在细径焊丝中通以大电流,并采用高速焊接,可获得高的生产率。因此,MAG 焊在桥梁、建筑、汽车等的结构钢、低合金钢的焊接中得到很好的应用,并且最适用于机器人化焊接生产。此外,由于二氧化碳气体高温下分解成一氧化碳和氧,形成氧化性气氛,所以在进行钢材料的 MAG 焊接中使用添加了 Si、Mn 等脱氧元素的焊丝。

(3) 渣保护埋弧焊方法(submerged arc welding, SAW 焊接法)

埋弧焊方法是焊接开始前在被焊工件上堆积颗粒状焊剂,焊丝自动向焊剂中送进,在焊剂覆盖状态下引燃电弧进行焊接。焊剂受到电弧的加热而熔化、分解,对焊接区起到保护作用。焊剂的功能和成分类似于焊条电弧焊中的药皮。由于焊剂堆积的分散性,只适用于平焊及横焊位置焊接,这是埋弧焊的一个不足。然而,由于电弧被焊剂覆盖,无弧光辐射,烟尘及飞溅也较少。此外,由于焊接以自动焊方式进行,能够利用大电流进行焊接。如果使用粗径焊丝,焊接电流可达 2 000 A,具有极高的生产率。因此,埋弧焊作为高生产率的自动焊接方法,广泛应用于造船、桥梁、大型建筑、压力容器等的焊接中。

(4) 自保护药芯焊丝电弧焊方法(self shielded arc welding)

自保护药芯焊丝电弧焊方法与焊条电弧焊、埋弧焊一样,是采用焊剂进行保护的电弧焊接法。

采用药芯焊丝电弧焊除不需供给保护气之外,焊接装置的构成与气体保护熔化极电弧焊是相同的。自保护药芯焊丝电弧焊方法的特征是熔敷速度快,但熔深较浅,焊接时产生较多的烟尘。因此,该方法更多用于角焊缝焊接。

该方法与焊条电弧焊相比,能够获得高的熔敷速度,生产率高;与 MAG 焊相比,不需要保护气而更为简便,并且侧向风的影响也小,适合于在建设现场进行的焊接作业。

(5) 螺柱焊方法(arc stud welding)

螺柱焊是把螺栓或棒材焊接到母材上的方法,一般采用以下两种方式进行,一是采用陶瓷套环的方式。首先,螺柱与母材接触,随后拉起引燃电弧,当螺柱及母材达到适当的熔化状态时,把螺柱压到母材中,结束焊接。陶瓷套环起到隔离空气、保护电弧及焊接区的作用。另一种方法是采用导电药室的方法,通电后赤热的药室起到引燃电弧的作用。

在实际焊接设备中都设置有螺柱提升、下压、电弧定时等功能,实现了自动化焊接。从螺柱的定位到焊接结束只需要几秒时间,与其他方法相比,生产率较高。具有下降特性的直流或交流电源都可以作为螺柱焊焊接电源,可以焊接几毫米到 25 mm 直径的低碳钢、不锈钢、黄铜、铝合金等材料的螺柱,也可以把钢条或黄铜条作为柱焊接到被焊件上。

(6) 钨极氩弧焊方法(gas tungsten arc welding, GTAW)

非熔化极焊接多使用钨电极作为电弧的一极,并且更多是使用氩气进行保护,因此称做钨极氩弧焊,这是在氩气或氦气这类惰性气体保护下,在钨极与母材间引燃电弧进行焊接的方法。

由于利用惰性气体(inert gas)保护焊接区,所以该方法也称做 TIG(tungsten inert gas)焊。气体化学性质上的惰性,使其能够用于铝、镁等非铁合金及各种金属的焊接,也使其能够实现高质量的焊接,但 TIG 焊的生产效率低。在需要熔敷金属的场合,可使用焊丝(但不作为电极)向熔池中填加熔敷金属。TIG 焊通过调整填加焊丝的送进速度,能够单独控制熔敷金属量。

(7)等离子弧焊方法(plasma arc welding, PAW)

等离子弧焊方法是在 TIG 焊方法的基础上,使自由电弧强制通过一个孔径很小的水冷喷嘴,利用喷嘴对气体保护的钨极电弧进行拘束,形成具有更高温度和能量密度的热源。依据电弧放电的形态,可以把等离子弧分为两种,一种是把母材作为阳极的等离子电弧方式(转移弧方式);另一种是把喷嘴作为阳极的等离子焰流方式(非转移弧方式),等离子焰流方式对母材的热输入密度低。

0.3 焊接电弧研究在电弧焊技术发展中的作用

科学技术向前发展是永恒的,同样焊接技术也要向前发展,对电弧机理的研究同样能够促进电弧焊技术的发展。电弧产生机理、电弧特性是各种电弧焊方法应用与发展的基础,如 1950 年巴顿研究所开发利用流经熔化焊剂中的电流所产生的电阻热进行焊接的电渣焊方法,就是在埋弧焊方法基础上对其进一步研究获得的结果。最初出现时,人们认为这种焊接是流经熔化焊剂中的电流产生的电阻热作用的结果,在对其导电特性的研究表明是形成了电弧的熔化焊。随着对电弧机理的深入研究,人们逐步认识了电弧中产生的一些重要现象,例如对电子发射机理的研究促进了钨极材料的改良;把电弧中负离子的产生与阳极斑点、熔池表面张力行为结合在一起,开发的 A-TIG 焊方法,焊接生产率得以大幅度提高。为进一步提高焊接效率,人们开辟新的途径,如在综合利用能源方面已做了许多新的尝试,如热丝 TIG 焊是电阻热与电弧热的结合;CMT 是机械能与电弧能的结合;L-MIG 和 L-TIG 焊是激光和电弧的结合;磁控 TIME 焊是磁能与电弧能的结合等。阴极清理作用的发现,明确了电弧阴极斑点具有自动破碎氧化膜的作用,使铝合金焊接技术产生飞跃。电弧静特性的研究对于稳定电弧长度、实现焊接自动调节起到重要作用。探索电弧中的物理化学反应、多粒子的分解与平衡,在焊丝脱氧及防止焊接气孔方面都促进了 CO₂ 电弧焊的应用。

用最小的能量输入实现最快的焊接速度、最大的熔深和对生产准备条件的适应性。为提高电弧的能量密度采用 He 代替 Ar,采用高频 TIG 和复合能源等。这些措施都能提高能源的电流密度,提高熔深和提高焊速,复合焊还可以放宽对坡口间隙的要求,等等。

随着焊接自动化要求和对焊接质量要求的提高,人们在焊缝成形控制、熔滴过渡控制、降低焊接飞溅等方面不断做出努力,促进电弧热输入方式的改进和热输入量的控制研究,把电弧力控制与电弧稳定性控制、焊接电源的研制、薄件焊接等联系起来,推动了焊接技术与装备的发展。近代由于计算机科学技术的发展,可通过建模、仿真,并在虚拟环境中再现焊接过程中所要了解和解决的各种电弧物理现象。总之,焊接电弧研究在电弧焊技术发展中起着重要作用,作为电弧焊领域的一门科学知识,应受到焊接工作者的重视。

第 1 章 焊接电弧

电弧是所有电弧焊方法的能源,在各类焊接方法中电弧焊方法占据主要地位,一个重要的原因就是电弧能有效而简便地把弧焊电源输送的电能转换成焊接过程所需要的热能和机械能。因此,为了认识和发展电弧焊方法,首先就必须弄清楚电弧是怎样实现这种能量转换和焊接中是如何利用这种能源的,这就需要深入了解焊接电弧的物理本质和各种特性,分析电弧的产热和产力机构、交流电弧的特点及磁场对电弧的作用等,认清电弧实现这种能量转换和焊接中利用这种能量的过程。

1.1 焊接电弧的物理本质

把碳或钨棒制成的电极如图 1.1 所示的那样水平相对放置,串联一电阻并接一直流电源,使两电极接触一下再拉开,则两电极之间便产生了电弧。因此,电弧并不是一般的燃烧现象。电弧实质是在一定条件下电荷通过两电极间气体空间的一种导电过程,或者说是一种气体放电现象,借助这种特殊的气体放电过程,电能转换为热能、机械能和光能。焊接主要是利用其热能和机械能来达到连接金属的目的。

1.1.1 气体放电的基本概念

自然界中任何物质都是由原子组成的,原子是由带负电的电子和原子核组成,原子核又由带正电的质子和中性的中子组成。电子按一定规律分布在原子核外各电子层上并围绕原子核高速旋转。金属和非金属原子结构的不同之处主要是金属原子核最外层上的电子数很少(一般只有 1~2 个,少数有 3~4 个)。因此这些电子与原子核的吸引力(结合力)就较弱,容易脱离自己的轨道,成为自由电子,大量的自由电子组成电子云(或电子气),所以在金属两端加上微小电压,自由电子便会定向运动,形成电流。金属导电时导电部分的电流与电压之间的关系,遵循欧姆定律 $I = U/R$ 。

液体导电的机理是由于液体中含有能电离出阳离子和阴离子的电解质。

如果在气体空间,两个电极之间的空隙中出现导电(或放电)现象,也必须使两个电极之间出现并形成大量可自由移动的带电粒子。一般正常状态下气体不含带电粒子,只含中性分子或原子,它们虽可以自由移动,但不会受电场作用产生定向运动,所以不会导电。

气体导电时,其导电部分即电弧的电流与电压之间的关系并不遵循欧姆定律,而是一

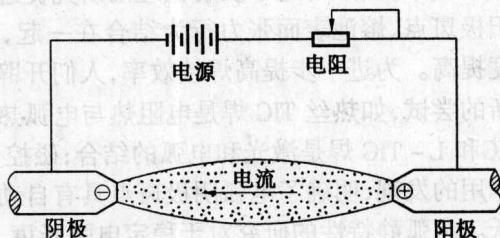


图 1.1 电弧的示意图

个很复杂的关系,如图 1.2 所示。随着导电区间和导电条件的不同,其导电机构呈现两种不同的放电形式。

(1) 非自持放电

在较小的电流区间,气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生,而需要外加措施来制造带电粒子,而且一旦外加措施撤除,放电即停止,这种气体导电现象称非自持放电。

(2) 自持放电

当电流大于一定数值时,气体导电过程本身就可以产生维持导电所需要的带电粒子,这种气体放电只在开始时需要外加措施制造带电粒子,进行诱发引燃,一旦放电开始,取消外加诱发措施,放电过程仍可以继续,放电过程自身能够产生维持放电所需要的带电粒子,这种放电过程称为自持放电。

因放电机构、电流数值的不同,自持放电区间的放电特性也有显著的差异,又可分为暗放电、辉光放电和电弧放电 3 种基本形式。

在 3 种放电形式中电弧放电具有电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的特点。因此,电弧在工业中作为热源和光源被广泛应用,在焊接技术领域电弧也成为不可缺少的能源而被利用。

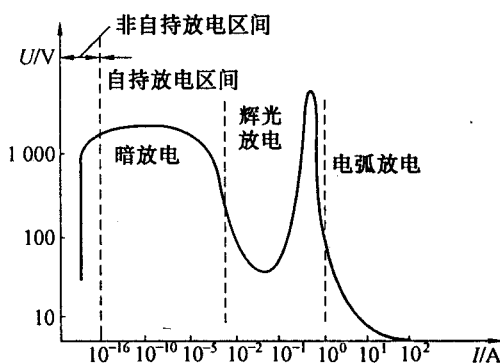


图 1.2 气体的伏安特性

1.1.2 电弧中带电粒子的产生过程

电弧中的带电粒子主要是指电子、正离子和负离子,这些带电粒子主要依靠电弧气体空间的电离和电极的电子发射两个物理过程所产生,同时伴随着解离、激励、扩散、复合、负离子的产生等一些其他过程。

1. 解离

两电极之间的气体与其他一切物质一样,都是由原子或分子组成,而分子是由原子组成。当气体受到外加能量(如外加电场、光辐射、加热等)作用时,气体分子热运动加剧。当能量足够大时,由多原子构成的气体分子就会分解为原子,这个过程称为解离。解离所需的最低外加能量称为解离能。

2. 电离

原子是由带正电核的原子核和带有负电荷的电子组成的,电子按照一定的轨道环绕原子核运动。在常态下,原子核所带的正电荷与核外电子所带的负电荷相等,因此,原子呈中性。但是,如果进一步增大外加能量,就会使中性原子发生电离或激励。在一定外加能量条件下中性气体分子或原子分离为正离子和电子的现象称为电离。

中性气体粒子失去第一个电子所需要的最低外加能量称为第一电离能,通常以电子伏(eV)为单位,若以伏表示则为电离电压。中性气体粒子失去第二个电子则需要更大的电离电压,称为第二电离电压。

在普通焊接电弧中,当焊接电流较小时只存在一次电离,而在大电流或压缩的焊接电

弧中,电弧温度很高,可能出现二次或三次电离,即使如此,一次电离仍居主要地位。

不仅原子状态的气体粒子可以被电离,分子状态的气体也可以直接被电离。当电子脱离气体分子时,一般需要克服两层约束(原子对电子的约束和分子对电子的约束),所以需要的电离电压比原子状态时的电离电压要高一些,如 H(原子)的电离电压为 13.5 V,而 H₂(分子)的电离电压为 15.4 V。然而,也有些气体原子结合为分子时反而使电子与原子的联系减弱,故分子的电离电压反而比原子的电离电压低,如 NO 分子的电离电压为 9.5 V,而 N 原子和 O 原子的电离电压分别为 14.5 V 和 13.5 V。

气体电离电压的大小说明电子脱离原子或分子所需要外加能量的大小,即某种气氛中产生带电粒子的难易。在相同能量条件下,低电离电压的气体提供带电粒子较容易,有利于电弧的稳定。但电离电压高低不是唯一影响因素,因为气体的解离能、热物理性能等反过来会影响整个电弧空间的能量状态、带电粒子的产生和移动过程等。

当电弧空间同时存在电离电压不同的几种气体时,在外加能量的作用下,电离电压低的气体粒子先被电离,若这种低电离电压气体供应充分,则电弧空间的带电粒子将主要依靠这种气体的电离过程来提供,所需要的外加能量也主要取决于这种气体的电离电压。由表 1.1 可知,Fe 的电离电压为 7.9 V,比 CO₂ 或 Ar 的电离电压(13.7 V,15.7 V)低,因此钢的气体保护电弧焊时,当焊接电流较大时,电弧空间将充满铁的蒸气,并主要由铁蒸气的电离提供带电粒子,电弧气氛的电离电压也由铁蒸气的电离电压决定,所需要的外加能量较低。

表 1.1 常见气体粒子的电离电压

元素	电离电压/V	元素	电离电压/V
H	13.5	W	8.0
He	24.5(54.2)	H ₂	15.4
Li	5.4(75.3,122)	C ₂	12
C	11.3(24.4,48,65.4)	N ₂	15.5
N	14.5(29.5,47,73,97)	O ₂	12.2
O	13.5(35,55,77)	Cl	13
F	17.4(35,63,87,114)	CO	14.1
Na	5.1(47,50,72)	NO	9.5
Cl	13(22.5,40,47,68)	OH	13.8
Ar	15.7(28,41)	H ₂ O	12.6
K	4.3(32,47)	CO ₂	13.7
Ca	6.1(12,51,67)	NO ₂	11
Ni	7.6(18)	Al	5.90
Cr	7.7(20,30)	Mg	7.61
Mo	7.4	Ti	6.81
Cs	3.9(33,35,51,58)	Cu	7.68
Fe	7.9(16,30)		

3. 激励

常态下的中性气体粒子内部的原子核与电子构成一个稳定系统,当受外来能量作用失去电子而产生电离是这个稳定系统被破坏的一种可能结果。也存在另一种可能的结果,即当中性粒子受外来能量作用其能量还不足以使电子完全脱离气体原子或分子,但可能使电子从较低的能级转移到较高的能级时,中性粒子内部的稳定状态也被破坏,这种状态称为激励。

使中性气体粒子激励所需要的最低外加能量称为最低激励能,若以伏为单位来表示则称最低激励电压。激励电压数值低于该元素电离电压数值,某些气体的最低激励电压见表 1.2。受激励的中性气体粒子具有不同的能级状态,其存在形式有以下两种。

(1) 较高能级的激励粒子继续接受外来能量可以使其电离,或者将自己的能量以辐射能的形式释放出来,表现为电弧的辐射光,而粒子恢复到原来的稳定状态。

(2) 能级低的激励粒子,可能与其他粒子碰撞将能量传递给其他粒子而恢复其稳定状态,接受其能量的其他粒子则可能解离、激励或电离。

因此粒子的激励过程虽然不是直接产生带电粒子的过程,但也是与电离过程和电弧特性有密切关系的物理现象。

表 1.2 常见气体粒子的最低激励电压

元素	激励电压/V	元素	激励电压/V	元素	激励电压/V
H	10.2	K	1.6	CO	6.2
He	19.8	Fe	4.43	CO ₂	3.0
Ne	16.6	Cu	1.4	H ₂ O ⁺	7.6
Ar	11.6	N ₂	7.0	Cs	1.4
N	2.4	H ₂	6.3	Ca	1.9
O	2.0	O ₂	7.9		

任何中性粒子在接受外界一定数值能量的条件下,会产生电离与激励,外加能量可以通过不同方式将能量传递给自由运动的气体粒子,从本质讲只有两种传递能量途径,一种是碰撞,另一种是光辐射。

(1) 碰撞传递

各个粒子以某一速度运动时,具有一定的动能,而且可能互相频繁地碰撞,粒子在相互碰撞时将进行能量的转移,粒子以这种形式传递能量称为碰撞传递。气体粒子的相互碰撞可能有两种情况。

① 非破坏性的弹性碰撞。是在气体粒子拥有较低动能时产生的,弹性碰撞时气体粒子间只产生动能的传递和再分配,碰撞后两个粒子的动能之和基本不变,粒子的内部结构不发生任何变化,只能使粒子的运动速度变化和引起粒子温度的变化,不能产生电离与激励过程。

② 破坏性的非弹性碰撞。是在气体粒子拥有较大动能时产生的,被碰撞的气体粒子的内部结构发生变化,在碰撞时部分或全部动能转换为内能,如果此内能大于激励电压则粒子被激励,如果此能量大于电离电压,则粒子将被电离。被激励的粒子如果继续受到非

弹性碰撞,内能积累达到电离电压时也将产生电离。

电子与中性粒子进行非弹性碰撞时,它的动能几乎可以全部传给中性粒子,转换为中性粒子的内能,使其激励与电离。

当中性粒子之间进行碰撞时,由于它们的质量相近,则只能将部分能量传递给被碰撞的粒子,最多不超过原动能的一半,因此在电弧中通过碰撞传递使气体粒子电离的过程中,电子的作用是所有粒子中最主要的。

(2) 光辐射传递

中性气体粒子接受外界以光量子形式所施加的能量,提高其内能并改变其内部结构,使气体粒子被激励或电离,这种向气体粒子传递能量的方式称为光辐射传递。

气体粒子接受光量子作用产生激励的条件为

$$h\gamma \geq W_e = eU_e \quad (1.1)$$

式中 W_e ——激励能;

e ——电子电荷量;

U_e ——气体粒子的激励电压。

气体粒子接受光量子产生电离的条件为

$$h\gamma \geq W_i = eU_i \quad (1.2)$$

式中 W_i ——电离能;

U_i ——电离电压。

以光量子形式传递给气体粒子的能量可以全部转换为粒子的内能。当光量子能量超过气体粒子的电离能时,则其多余部分将转换为电离生成的电子的动能,即

$$h\gamma = eU_i + \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.3)$$

式中 m ——电子的质量;

v ——被电离出来的电子运动速度。

电弧本身发出多种频率的光辐射,因此电弧本身就具有向气体粒子提供辐射能量的条件,中性粒子接受弧光辐射就可能产生激励与电离,制造带电粒子维持电弧的导电。但在一般焊接电弧中,通过光辐射传递方式来制造带电粒子与碰撞传递相比,则是次要的。

4. 电离种类

电弧中气体粒子的电离因外加能量种类的不同而分为3类。

(1) 热电离

高温条件下气体粒子受热的作用产生的电离,称为热电离。

气体的温度越高,气体粒子的运动速度越高,动能越大。由于气体粒子的热运动是无规则的,粒子之间将发生频繁碰撞,如果粒子的动能足够大,就会引起气体粒子的激励或电离。因此热电离实际上是粒子之间的碰撞而产生的电离过程。

(2) 电场作用电离

在电场力作用下,带电粒子受电场影响做定向运动,正、负带电粒子在电场中定向运动的方向相反,且电场对带电粒子的运动起加速作用,电能转换为带电粒子的动能。这些粒子与中性粒子碰撞而使之电离,这种电离称为电场作用下的电离。