

材料科学与工程系列教材

电弧焊基础

杨春利 林三宝 主编
张九海 方洪渊 主审

444-43
41

哈尔滨工业大学出版社



材料科学与工程系列教材

电弧焊基础

杨春利 林三宝 主编
张九海 方洪渊 主审

哈尔滨工业大学出版社
哈尔滨

图书在版编目(CIP)数据

电弧焊基础/杨春利等主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2003. 2

ISBN 7-5603-1818-5

I. 电… II. 杨… III. 电弧焊-高等学校-教材
IV. TG444

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 007014 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006
传 真 0451-6414749
印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂
开 本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 326 千字
版 次 2003 年 2 月第 1 版 2003 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 7-5603-1818-5/TG·59
印 数 1~3 000
定 价 19.00 元

前 言

随着工业技术的发展,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。而原有的焊接专业教材在内容上难以体现这些新技术的发展。另外,由于全国的专业调整,国内高校的焊接专业都改名为材料成型与控制工程专业(哈尔滨工业大学惟一保留焊接专业名称),原有教材也停止出版。为了保证教学的需要,以及适应焊接行业新技术、新工艺的发展,根据作者多年从事焊接专业教学和科研工作的经验,编写了本教材。在编写上,参考了国外著作和教材,以及国内 1981 年出版的《焊接方法及设备》和 1991 年出版的《电弧焊及电渣焊》等教材,并参阅了许多焊接技术文献。

本教材是焊接专业的主要教材之一,主要讨论了焊接电弧物理、焊接熔化现象、非熔化极和熔化极气体保护电弧焊、等离子弧焊、埋弧焊等机械化自动化电弧焊方法、设备和实际焊接工艺。在各章中增加了国外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(STT)、空心阴极真空电弧焊(HCVAW)、数字化焊接电源、双丝焊等。为了便于深入地讲授电弧焊及其发展中一些共同性的基本理论和实践问题,本书首先讨论了焊接电弧的热源和力源特征、焊丝的熔化和熔滴过渡、钨极氩弧焊、等离子弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂ 电弧焊、埋弧焊的基本原理、特点和应用方面的知识,并给出这些方法和设备的整体概念。这样的编排有利于根据各校学时的实际情况合理安排授课内容。

本书为高等工业学校焊接专业(材料成型与控制工程专业)教材,也可供材料加工工程、热加工、机械以及造船等专业的师生和工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学杨春利教授、林三宝副教授主编,哈尔滨工业大学吴林教授、王其隆教授、冯吉才教授、刚铁教授、魏艳红教授和何景山副教授在教材的内容组织、教学方法、整体结构等许多方面给予精心的指导,并提出了许多宝贵的意见和建议。哈尔滨工业大学张九海教授和方洪渊教授审阅了全书。在此谨向他们表示深切的谢意。

在本书的编写过程中得到一些兄弟院校老师的大力支持,珠海科盈焊接器材有限公司、珠海雅各臣科技发展有限公司为本书提供了珍贵的资料,在此向他们一并致谢。

由于编者的专业知识有限,难免出现差错和不足,敬请广大读者批评指正。

编 者

2003 年元月

目 录

绪言	1
第 1 章 焊接电弧基础	9
1.1 焊接电弧机理	9
1.1.1 气体放电与焊接电弧	9
1.1.2 电弧中的带电粒子	10
1.1.3 电弧导电机构	16
1.1.4 电弧产热及温度分布	18
1.1.5 电弧压力与等离子气流	26
1.1.6 直流电弧与交流电弧	32
1.2 焊接电弧特性	34
1.2.1 焊接电弧静特性	35
1.2.2 焊接电弧动特性	38
1.2.3 阴极斑点和阳极斑点	40
1.2.4 电弧的阴极清理作用	41
1.2.5 最小电压原理	42
1.2.6 电弧的挺直性与磁偏吹	42
1.3 电弧焊中的保护气	45
1.3.1 保护气种类与纯度	45
1.3.2 保护气的分解及在金属中的溶解	47
1.3.3 混合气体的选择及作用	49
1.3.4 保护气气流与保护效果	53
1.4 电弧的引燃与稳弧措施	55
1.4.1 接触引弧	55
1.4.2 非接触引弧	56
1.4.3 交流电弧稳弧措施	57
第 2 章 电弧焊熔化现象	59
2.1 母材熔化与焊缝成形	59
2.1.1 母材熔化特征和焊缝形状尺寸	59
2.1.2 熔池金属的对流和对流驱动力	63
2.1.3 焊接参数与工艺的影响	71
2.1.4 焊缝成形缺陷及形成原因	73
2.2 焊丝熔化与熔滴过渡	75

2.2.1	焊丝的熔化与熔化速度	75
2.2.2	熔滴上的作用力与熔滴过渡分类	80
第3章	钨极氩弧焊	85
3.1	钨极氩弧焊特点与应用	85
3.1.1	钨极氩弧焊原理与特点	85
3.1.2	钨极氩弧焊应用对象	86
3.1.3	钨极氩弧焊设备	86
3.2	TIG 焊中的钨电极	88
3.2.1	钨电极材料	88
3.2.2	各种钨电极的基本特性	89
3.2.3	钨极直径和前端形状	91
3.3	焊接方法	93
3.3.1	直流焊接与交流焊接	93
3.3.2	低频脉冲焊	94
3.3.3	高频脉冲焊	95
3.4	焊接条件的选择	97
3.4.1	焊接规范条件	97
3.4.2	焊接工艺条件	98
3.5	焊接技术	100
3.5.1	提高焊接速度	100
3.5.2	增加焊接熔深	101
3.5.3	摆动电弧焊接	102
3.5.4	A-TIG 焊接技术	104
3.5.5	热丝法焊接	108
3.5.6	单电源型双面双弧焊	109
3.5.7	空心阴极真空电弧焊接技术	109
3.5.8	自动焊弧长调节	112
第4章	等离子弧焊接	114
4.1	等离子弧的产生及其特性	114
4.1.1	等离子弧的产生	114
4.1.2	等离子弧特性及用途	115
4.2	等离子弧焊接设备	117
4.2.1	焊接电源	117
4.2.2	等离子弧焊枪	117
4.3	等离子弧焊接	121
4.3.1	小孔型等离子弧焊接	121
4.3.2	其它形式等离子弧焊接	122
4.3.3	等离子弧焊接中的其它问题	125

第 5 章 CO ₂ 气体保护电弧焊	128
5.1 CO ₂ 电弧焊原理与特点	128
5.1.1 CO ₂ 电弧焊原理	128
5.1.2 CO ₂ 电弧焊特点	128
5.2 CO ₂ 电弧焊的金属化学基础	129
5.2.1 CO ₂ 气体的氧化性及合金元素的氧化	129
5.2.2 CO ₂ 焊的脱氧措施与焊缝金属合金化	131
5.2.3 CO ₂ 焊气孔问题	132
5.3 熔滴过渡与焊接条件的选择	134
5.3.1 CO ₂ 电弧焊熔滴过渡形式	134
5.3.2 短路过渡	134
5.3.3 颗粒过渡	137
5.3.4 焊接条件的选择	139
5.4 焊接飞溅	143
5.4.1 减少飞溅的措施	144
5.4.2 新型控制方法	146
5.4.3 表面张力过渡控制	147
5.5 CO ₂ 电弧焊设备	149
5.5.1 焊接电源	149
5.5.2 焊丝送给装置	151
5.5.3 其它设备	151
5.6 等速送丝调节系统	152
5.6.1 等速送丝调节系统静特性	153
5.6.2 等速送丝焊接系统弧长自身调节	154
5.6.3 等速送丝焊接系统的电流与电压调整方法	156
5.7 CO ₂ 电弧焊实际	158
5.7.1 焊接操作	158
5.7.2 坡口准备与接头形状	159
5.7.3 焊接缺陷及其对策	160
5.8 特种 CO ₂ 电弧焊	161
5.8.1 CO ₂ 电弧点焊	161
5.8.2 熔渣 - 气体保护电弧焊	162
5.8.3 窄间隙焊接	162
5.8.4 药芯焊丝 CO ₂ 电弧焊	163
第 6 章 熔化极氩弧焊	165
6.1 熔化极氩弧焊方法	165
6.1.1 熔化极氩弧焊原理与特点	165
6.1.2 熔化极氩弧焊设备	166

6.2 熔化极氩弧焊熔滴过渡	166
6.2.1 短路过渡	166
6.2.2 喷射过渡	166
6.2.3 亚射流过渡	170
6.2.4 电弧固有的自身调节作用	170
6.3 熔化极脉冲氩弧焊	172
6.3.1 脉冲 MIG 焊的熔滴过渡	173
6.3.2 脉冲 MIG 焊参数选择	174
6.3.3 熔化极脉冲氩弧焊的特点	176
6.3.4 脉冲 GMA 焊接熔滴过渡控制	176
6.4 各种金属的焊接	178
6.4.1 铝合金焊接	178
6.4.2 不锈钢焊接	181
6.4.3 低碳钢及低合金钢焊接	183
6.4.4 铜合金焊接	185
6.4.5 其它金属焊接	186
6.5 其它焊接技术	187
6.5.1 T.I.M.E.焊接方法	187
6.5.2 双丝 MIG/MAG 焊	188
6.5.3 数字化焊接	192
第 7 章 埋弧焊	195
7.1 埋弧焊原理及应用	195
7.1.1 埋弧焊原理与特点	195
7.1.2 埋弧焊的应用	196
7.2 埋弧焊设备	197
7.2.1 埋弧焊设备构成	197
7.2.2 埋弧焊自动调节系统	198
7.3 埋弧焊焊接现象	201
7.3.1 焊接现象	201
7.3.2 电弧特性	202
7.3.3 熔滴过渡	202
7.3.4 电极焊丝的熔化特性	204
7.3.5 母材的熔化	205
7.3.6 熔化金属与熔渣的反应	207
7.4 焊接材料	208
7.4.1 焊丝	208
7.4.2 焊剂	208
7.4.3 焊丝与焊剂的组配	210

7.5 埋弧焊焊接实际	210
7.5.1 焊接装置的构成	210
7.5.2 接头的坡口形式	211
7.5.3 焊接条件的选定	214
7.5.4 焊接缺陷及其对策	218
7.5.5 单面焊	219
7.6 高效埋弧焊方法	221
7.6.1 多电极埋弧焊	221
7.6.2 带状电极堆焊	222
7.6.3 板电极埋弧焊	224
7.6.4 填充金属焊接	224

绪 言

1. 焊接·接合技术的发展历程

1801年迪威发现了电弧放电现象,这是近代焊接·接合技术的起点。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。最初可以称作电弧焊接的是1885年俄国人发明的碳弧焊,该方法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。

采用碳电极的电弧焊接与以往的铆接相比具有划时代的意义。但由于采用碳材料做电极,遇到了碳混入焊缝金属中使接头变硬变脆这样的难点。俄国人在1891年提出以金属电极取代碳电极的金属极焊接法,最初是在空气中产生金属极(铁)电弧进行焊接,焊接区的品质用现在的知识判断是不合格的。瑞典人在1907年发明了焊条,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多年的岁月,焊接技术的基础才得以确立。与当时使用的螺钉等机械连接法相比,电弧焊接能够减少使用材料、确保连接强度、缩短作业时间,因此很快被产业界所采用,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法的发展。由于焊条焊接采用了有限长度的焊条,所进行的焊接是断续的,不适于连续焊接的要求。为克服这项难点,1930年开发了埋弧焊。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,这种电流供给方式成为现在自动焊的原形。

为了对电弧及焊接金属进行保护,使其同空气隔绝开来,从很早开始人们就考虑了利用保护气体。1930年以后以美国为中心,把钨电极与氩气相组合,进行了气体保护钨电极电弧(Gas Tungsten Arc - GTA)焊接法的研究。该焊接法的最初适用对象是镁及不锈钢薄板(1940年)。

对于铝合金,由于表面氧化膜的存在,焊接困难。1945年前后知道了电弧放电的阴极(严格讲是阴极点)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。

以上叙述了电弧焊方法的发展历程。在电弧焊接法出现的同时,也相继出现了其它形式的焊接·接合方法,比如电阻焊(1886年)、热剂焊(1898年)、气焊(1901年)。距今较近时期开发的还有电子束焊接(1957年)、激光焊接(1960年)等。

如上所述,焊接·接合技术是人们经过多年反复探索、不断改进而建立起来的。到现在,作为一项可靠性很高的接合技术而为社会所接受,比如从高楼、桥梁、船舶、飞机、汽车

等大型构造,到电子机械、电子封装等小型结构,焊接·接合技术是不可缺少的。

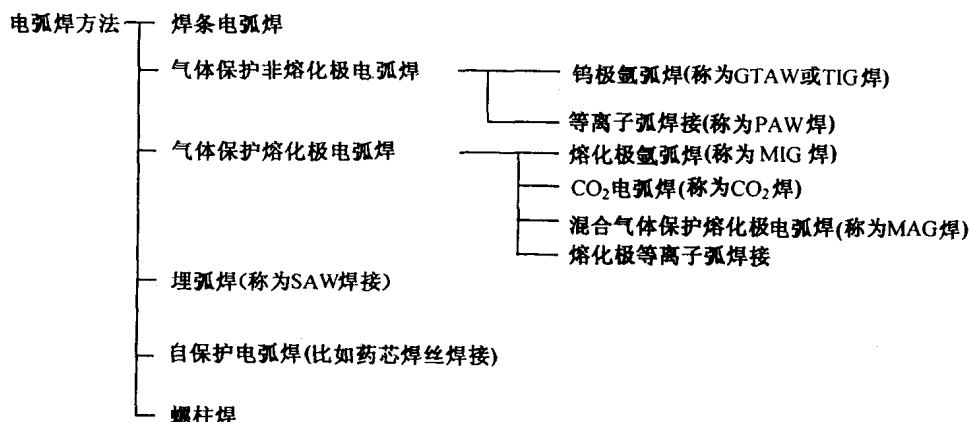
2. 电弧焊方法的分类与特点

焊接是一门材料连接技术,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,焊接被扩展到更具广泛意义的接合技术范畴。

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。

电弧焊是焊接·接合法的一种基本形式,到目前为止,在焊接·接合法的应用量中仍居主要地位。该方法就是对能够产生接合的两个部件的一部分进行熔化、混合,凝固后就形成了两部件的接合。依据电弧焊实现方式上的差异,对目前已有的主要的电弧焊方法可以归纳出表1所示的分类:

表1 电弧焊基本方法分类



(1) 焊条焊接法(Shielded Metal Arc Welding - SMAW)

这是具有最久历史的电弧焊方法,现在仍然在结构钢、不锈钢的焊接中广泛应用着。如图1所示,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。

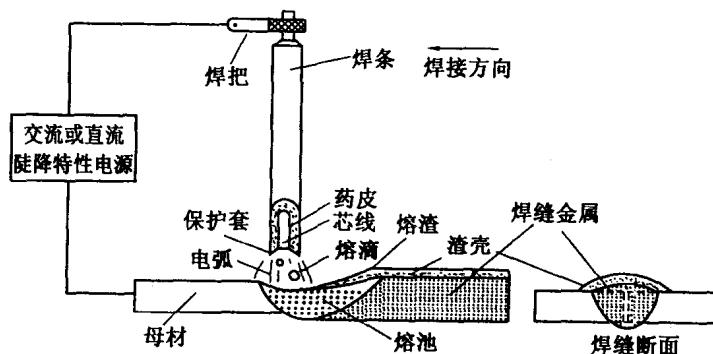


图1 焊条电弧焊原理

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。焊条芯受到电弧的加热而熔化,形成熔滴过渡到熔池,与母材的熔化金属共同形成焊缝金属。

焊条药皮的主要作用有如下几项:

- ① 有利于电弧放电的产生,并且能够提高电弧的稳定性;
- ② 产生气体和形成熔渣,隔离空气,保护电弧、熔滴及焊缝金属;
- ③ 提高熔渣-金属反应使金属还原(脱氧),精炼焊缝金属;
- ④ 根据需要对焊缝金属添加合金元素;
- ⑤ 熔渣覆在焊接金属表面,焊缝表面形状规整。

药皮是由石灰石(CaCO_3)、萤石(CaF_2)、 TiO_2 、 SiO_2 、Mn、铁粉等按一定比例混合制成的。药皮的组成不同,电弧稳定性、焊接操作性、焊缝裂纹倾向性等焊接特性是有差别的。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) 钨极氩弧焊(Gas Tungsten Arc Welding -GTAW)

非熔化极焊接多使用钨电极作为电弧的一极,并且更多的情况是使用氩气进行保护,因此被称作钨极氩弧焊。钨极惰性气体保护电弧焊原理如图2所示,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。

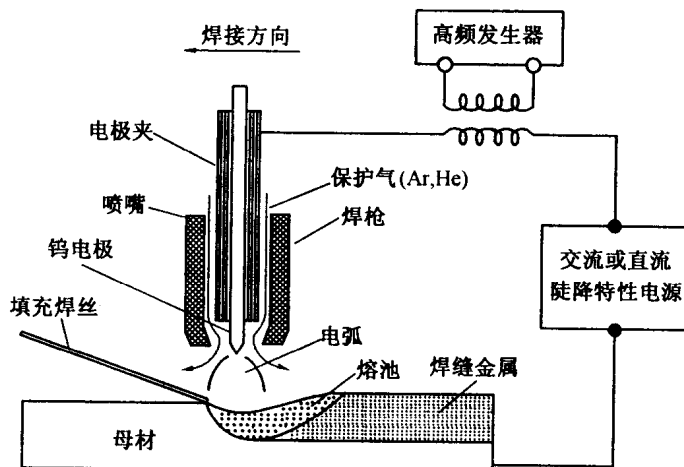


图2 钨极氩弧焊原理

由于利用惰性气体(Inert Gas)保护焊接区,所以该方法也叫做 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,这是该方法的特征。

同样的原因也使得该方法能够实现高质量的焊接。然而该方法的生产效率(焊接速度或焊接深度)低,这是 TIG 焊的不足。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。

(3) 等离子弧焊接(Plasma Arc Welding - PAW)

等离子弧焊接法是以 TIG 焊方法为基础,如图 3 所示,其特征是利用喷嘴对气体保护的钨极电弧进行拘束,形成更高密度的能量源。

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。对于金属的焊接,通常采用图 3 所示的等离子电弧方式。

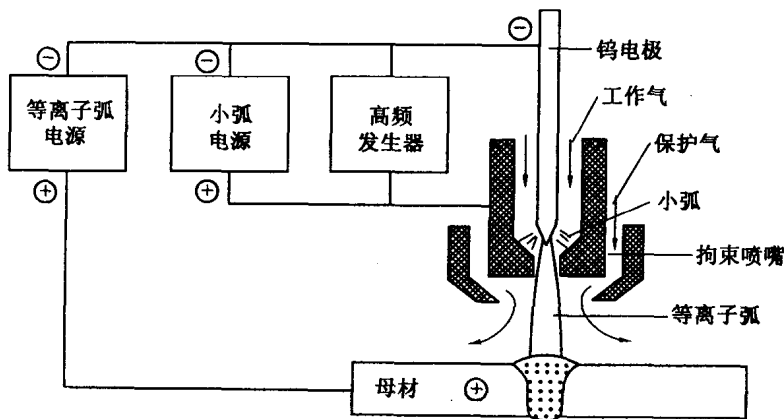


图 3 等离子弧焊接原理

等离子弧焊接通常采用下面两种方法进行焊接,并各有特点:

① 小电流等离子弧焊接法

主电弧引燃后,导引弧(也称作小弧)继续保持,这样即使在小电流下,等离子弧仍然能够稳定且具有良好指向性。利用这一特性,能够实现电流 1A 以下的等离子弧焊接,这在电子产品及极薄板的焊接中得以应用。而对于普通的 TIG 电弧,要维持电流值处于 1A 以下是很困难的。

② 小孔焊接法

等离子弧焊接时,电弧受到喷嘴的拘束,与 TIG 焊相比,其能量密度高,并且从喷嘴出来的等离子气流也非常集中,由此原因,在适当的条件下,能够实现小孔焊接。

此方法由于小孔的形成能够确保母材背面的熔化,即是容易形成背面焊道。对于厚度 6mm 的材料,能够实现单面单层焊接,这是该方法的特征。

(4) 气体保护金属极焊接法(GMA 焊接法)

气体保护金属极电弧(Gas Metal Arc: GMA)焊接法如图 4 所示,采用金属焊丝作为电极(熔化极),多数情况下焊丝是以恒定速度送进,在焊丝与母材之间形成电弧进行焊接。为了把焊接区与空气隔离开来,一般采用氩气和二氧化碳气体作为保护气。

在使用氩气等惰性气体作为保护气时,称作 MIG(Metal Inert Gas)焊接。在使用二氧化碳气体作为保护气时,称作 CO_2 电弧焊。当使用氩气与二氧化碳气等的混合气体作为保护气时称作混合气体保护电弧焊。由于近年来混合气体使用频度的增加,有时也把 CO_2 电弧焊和混合气体保护电弧焊统称作 MAG(Metal Active Gas)焊接。所以 GMA 焊接是

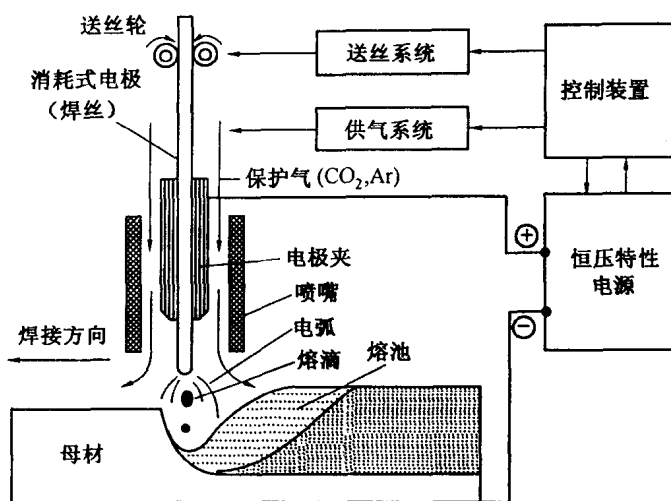


图4 气体保护熔化极电弧焊原理

MIG 焊、CO₂ 焊、MAG 焊的统称,在我国通常称作气体保护熔化极电弧焊。

该方法一般利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。由于 MIG 焊可以利用阴极清理作用,所以对铝材料可以实现高质量、高生产率焊接。

MAG 焊被用于结构钢、低合金钢的焊接中。在细径焊丝中通以大电流,并采用高速焊接,是高生产率焊接法。由此原因,该方法在桥梁、建筑、汽车的焊接中得到很好的应用,并且最适合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。

(5) 埋弧焊方法(SAW 焊接法)

埋弧焊(Submerged Arc Welding)方法如图5所示,焊接开始前在焊接线上堆积颗粒状焊剂,以自动方式向焊剂中送进裸焊丝,在焊剂覆盖状态下引燃电弧进行熔化焊接。焊剂受到电弧的加热而熔化、分解,对焊接区起到保护作用。

埋弧焊采用的焊剂因制造方法的不同而分为熔炼焊剂和粘结焊剂,焊剂的功能和成分类似于焊条电弧焊中的药皮。由于焊剂是分散的,从利用上考虑,只适用于平焊及横焊位置焊接,这是埋弧焊的一个不足点。然而,由于电弧被焊剂覆盖着,电弧光受到焊剂的遮挡,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。这是埋弧

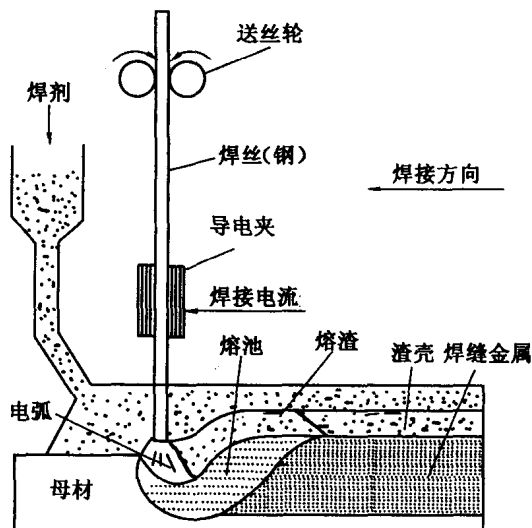


图5 埋弧焊原理

焊所具有的优点。

比如,如果使用粗径焊丝,焊接电流可以使用到 2 000A,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。

(6) 自保护电弧焊方法(Self Shielded Arc Welding)

自保护电弧焊接法与焊条电弧焊、埋弧焊一样,是采用焊剂进行保护的电弧焊接法。采用焊剂-焊丝一体的药芯焊丝(flux-cored wire),在焊丝与母材间引燃电弧进行焊接。

图 6 示出药芯焊丝的断面图例。该方法除了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。自保护电弧焊方法的特征是熔敷速度快,但熔深较浅。由此原因,该方法更多是用于角缝焊接,只是焊接时产生的烟尘较多,是其缺点。

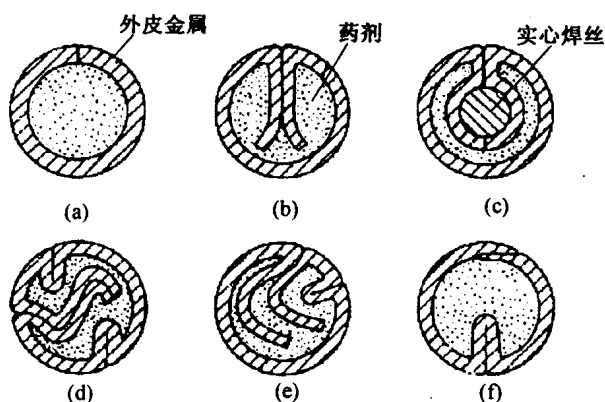


图 6 自保护电弧焊使用的药芯焊丝

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,适合于室外作业,比如在建设现场进行的焊接。

(7) 螺柱焊方法(Arc Stud Welding)

螺柱焊是把螺栓或棒材熔化接合到母材上的方法,一般采用下述的 2 种方式进行:图 7 示出的是采用陶瓷套环的方式。首先,把螺柱与母材接触,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,焊接就结束了。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。

上述两种方法在实际焊接装置中都设置了螺柱动作、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,与其它方法比较,生产率较高。通常采用下降特性的直流或交流电源,用于几毫米到 25mm 螺柱直径的低碳钢、不锈钢、黄铜、铝合金等材料的焊接。根据情况的不同,也可以把钢条或黄铜条当做螺柱焊接到被焊件母体上。

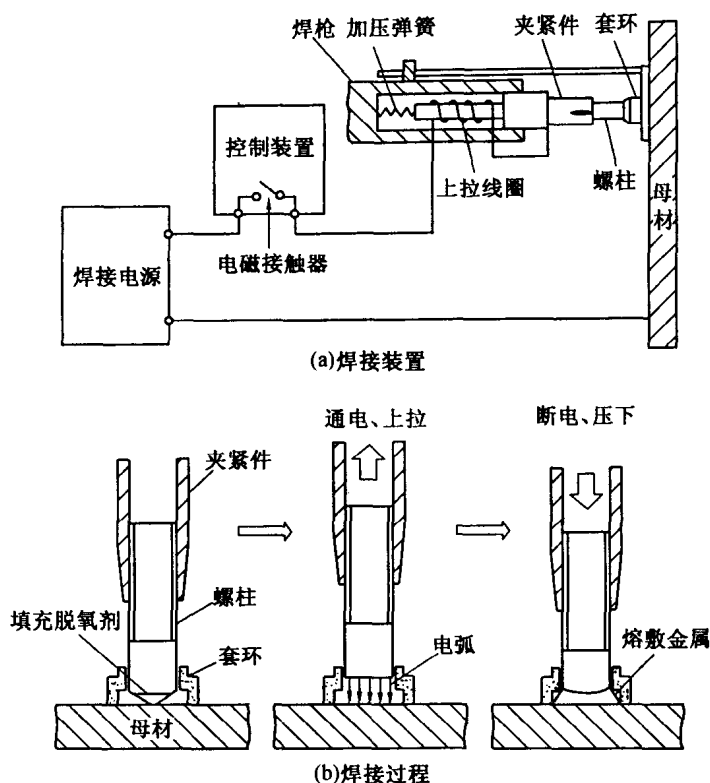


图 7 螺柱焊原理

3. 焊接电弧研究在电弧焊技术发展中的作用

对电弧机理的研究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,比如在埋弧焊方法最初出现时,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,随后对其导电特性的研究表明该方法确实是形成了电弧的熔化焊。受此影响,巴顿研究所 1950 年开发了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。1950 年以后,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,一些微量稀土元素被加入到电极中,代替了原来的纯钨极,电弧的引燃性能、电弧特性都有明显改善。在对电弧导电粒子的研究中,人们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,开发出活性化 TIG 焊方法,焊接生产率得以大幅度提高。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给予指导,这些都促进了 CO_2 电弧焊的应用。

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。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。