

中等专业学校试用教材

焊接方法与设备

华中理工大学 周兴中 主编

ZHONGDENG
ZHUANYE
XUEXIAO
JIAOCAI



机械工业出版社

前 言

本书是根据1986年国家机械工业委员会中等专业学校焊接专业协作组所制订的《焊接方法与设备》教学大纲编写的。

焊接方法及设备是焊接专业的必修课程，其任务是讲述各种焊接方法的过程本质、质量控制以及相应焊接设备的结构和工作原理，为正确掌握和使用焊接技术打下坚实的基础。

全书共分九章。重点讲述电弧焊、电渣焊和电阻焊三种方法，其中又以电弧焊为主。第一章介绍电弧及焊丝熔化和熔滴过渡的基础知识；第二至六章分别介绍生产中广泛使用的埋弧自动焊、CO₂气体保护焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊和等离子焊接与切割等几种电弧焊方法；第七章为电渣焊；第八章为电阻焊；第九章中对其他的焊接方法作了简要地介绍。

本书力求贯彻中等专业学校培养应用型人才的目标，取材上注意到理论联系实际，叙述上深入浅出，并在每章末附有复习思考题。

本书是为中等专业学校编写的教材，但因学时较多，内容上也比较全面深入，所以亦可供大专学生作为教材选用。

本书第一、三章和第九章第一至第三节由华中理工大学熊腊森编写；第四、五章和第九章第四至六节由华中理工大学姜幼卿编写；第六、七章由四川省机械工业学校王咸佳编写；其余部分由华中理工大学周兴中编写，并任全书主编。本书由武汉水运工程学院蒋友寰任主审。

由于编者水平所限，疏漏之处敬请读者批评指正。

编者 1989年6月

目 录

绪论	1	第二节 熔化极氩弧焊的熔滴过渡形式和 特点	197
第一节 焊接方法的本质及分类	1	第三节 熔化极氩弧焊所用气体	202
第二节 焊接方法在工业中的地位及 发展情况	4	第四节 熔化极氩弧焊工艺	206
第三节 本课程的内容和学习方法	5	第五节 熔化极氩弧焊设备	212
复习思考题	6	第六节 熔化极脉冲氩弧焊和窄间隙焊	220
第一章 电弧焊基础知识	7	复习思考题	223
第一节 焊接电弧	7	第六章 等离子弧焊接和切割	229
第二节 焊丝的熔化及熔滴过渡	22	第一节 等离子弧特性及等离子弧发生器	229
复习思考题	33	第二节 等离子弧焊接、堆焊及喷涂	239
第二章 埋弧自动焊	35	第三节 等离子弧切割	249
第一节 埋弧自动焊的过程、特点及应用	35	复习思考题	259
第二节 埋弧自动焊的冶金过程及 焊接材料的选用	38	第七章 电渣焊	260
第三节 埋弧自动焊焊缝成形及工艺参数的 选择	47	第一节 电渣焊的特点及应用	260
第四节 埋弧自动焊的焊接技术	59	第二节 冶金过程特点及焊接材料	265
第五节 埋弧自动焊机	77	第三节 丝极电渣焊	268
复习思考题	111	第四节 丝极电渣焊设备	279
第三章 CO ₂ 气体保护电弧焊	113	第五节 其他电渣焊方法及特点简介	283
第一节 CO ₂ 电弧焊的特点及其应用	113	复习思考题	290
第二节 CO ₂ 电弧焊的冶金特点及 焊接材料	121	第八章 电阻焊	291
第三节 CO ₂ 电弧焊工艺及工艺参数的 选择	129	第一节 电阻焊的实质、分类、特点及 应用	291
第四节 CO ₂ 电弧焊设备	139	第二节 电阻焊的热源及热过程	295
第五节 特种 CO ₂ 电弧焊	156	第三节 点焊	303
复习思考题	159	第四节 缝焊	319
第四章 钨极氩弧焊	161	第五节 点焊机和缝焊机	323
第一节 氩弧焊的特点及应用范围	161	第六节 对焊	348
第二节 钨极氩弧焊的电极和焊枪	163	复习思考题	362
第三节 钨极氩弧焊的电流种类和极性	168	第九章 其他焊接方法	364
第四节 钨极氩弧焊工艺	172	第一节 电子束焊接	364
第五节 钨极氩弧焊设备	182	第二节 激光焊接	372
第六节 脉冲钨极氩弧焊	191	第三节 超声波焊接	376
复习思考题	195	第四节 钎焊	378
第五章 熔化极氩弧焊	197	第五节 摩擦焊	385
第一节 熔化极氩弧焊的特点	197	第六节 扩散焊接	390
		复习思考题	393
		参考文献	395

绪 论

第一节 焊接方法的本质及分类

焊接是材料加工的主要方法之一。焊接是指通过加热或加压，或两者并用，并且用或不用填充材料，使焊件达到原子结合，而形成永久性连接的一种加工工艺方法。

焊接过程的物理本质是使被焊物体之间产生原子（分子）间的结合力。对于晶体来说，要使其产生这种结合力，就必须使原子或分子之间互相接近，并达到与晶格之间距离相当的尺寸范围（约 $0.3\sim 0.5\text{nm}$ 即 $3\sim 5\text{\AA}$ ），其结合力才可稳定。众所周知，原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子构成的，两个原子相接近时，它们之间有两种作用力，如图1所示。一种是一个原子外层的电子与另一个原子的原子核之间产生的吸引力；另一种是一个原子的外层电子对另一个原子的外层电子，以及两个原子核之间所产生的排斥力。当两个原子间的距离远远超过点阵间的距离时，吸引力和排斥力都很小，不会发生连接过程。而当原子间的距离足够接近时，则吸引力大于排斥力，便可产生稳定的结合了。若距离进一步接近，则排斥力又会超过吸引力。由此可知，产生焊接过程的原子间距离应该是吸引力大于排斥力，即合力为吸引力的区域。在这个区域内要使原子进一步接近或者分离都需要施加能量。

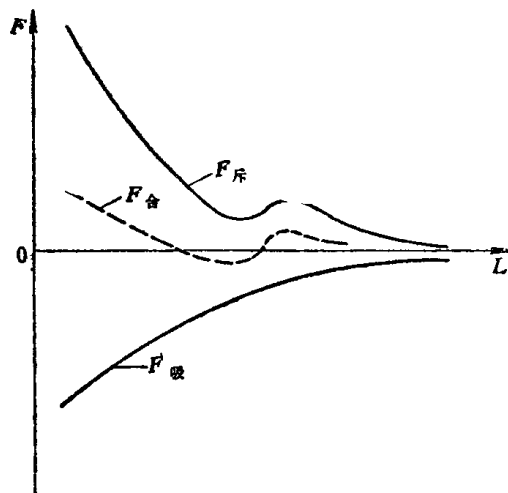


图1 原子间接近时相互作用力的变化

当两个物体自然靠近时，其表面原子间的距离远大于实现物体焊接所要求的距离。这一方面是因为在一般情况下材料表面总是不平整的，即使经过精密加工其表面平面度仍比点阵间距离大得多（约几十微米）。另一方面，也是由于固体表面总难免存在着氧化膜、污物或吸附着一些气体分子，它们也阻碍着两分离物体原子间的接近。因此就不得不采用某些物理化学方法来克服这些阻碍材料焊接的因素，从而实现焊接过程。这些物理化学方法归结起来不外是加压和用各种能量加热两类。通常用的能量有电弧热、电阻热、化学反应热等。

焊接的材料可以是各种同类或不同类的金属、非金属（包括石墨、陶瓷、玻璃、塑料等），也可以是一种金属与一种非金属。但是目前工业生产中最普遍应用的还是金属之间的焊接。因此，本书中所说的焊接通常情况下是指金属的焊接。

将材料连接为一体的方法，除焊接外还有铆接、粘接（与焊接一样同属不可拆连接）、螺钉和销钉等机械连接（属可拆连接）。与这些方法相比，焊接工艺有着多方面的优点，因而在工业中占有最重要的地位，在需要连接的地方应优先考虑焊接方法。

随着工业的发展和技术的进步，已出现了多种焊接方法。目前一般按其形成接头的本质

分为熔化焊接、固相焊接和钎焊三大类。每一类又可按所作用热源的不同分为若干种。并且每一种还可因工艺或设备的特点分为若干具体方法。另一方面也可按主要作用是加热或者加压，分为熔焊（以加热为主）、压焊（以加压为主）、和钎焊三大类。各种焊接方法按本质分类示于图 2。

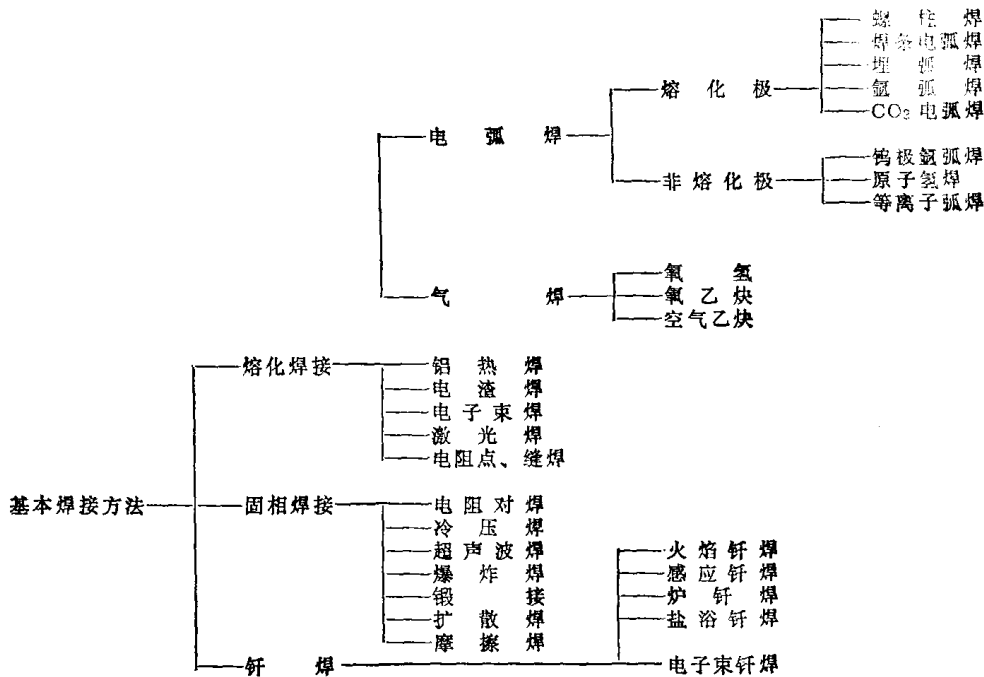


图 2 基本焊接方法及分类

一、熔化焊接

将被焊工件局部加热并熔化为液体，以克服固体间阻碍结合的障碍，然后冷却结晶成为一体的方法称为熔化焊接。实现熔化焊接的关键在于有一个能量集中、温度足够高的局部热源。若温度不够高则无法使材料熔化，而能量集中程度不够则会加大热作用区的范围，徒然增加能量损耗。按所使用热源的不同，熔化焊有以下一些基本方法。电弧焊（以气体导电时产生的电弧为热源）、气焊（以乙炔或其他可燃气体在氧中燃烧的火焰为热源）、铝热焊（以铝热剂的放热反应为热源）、电渣焊（以熔渣导电时产生的电阻热为热源）、电阻点、缝焊（以焊件本身通电时产生的电阻热为热源）、电子束焊（以高速运动的电子流撞击工件表面所产生的热为热源）、激光焊（以激光束照射到工件表面而产生的热为热源）等若干种。

其中电子束、激光和压缩电弧而产生的等离子体三种束流的能量密度特别高，所以通称为高能量密度的焊接方法。电阻点、缝焊是电阻焊中的一种，而电阻焊是压焊中最主要的焊接方法，通常在压焊中讨论。

在熔焊时，为了避免熔化金属在高温时与空气相作用而使性能恶化，在焊接区要实施保护。保护的方法通常有抽真空、通以保护气体和造渣三种。如电子束焊一般要求抽真空，氩弧焊时要通氩气保护电弧区域，埋弧自动焊则是将焊剂熔化形成熔渣来保护电弧区。此外，电弧焊方法还可按电极是否熔化为特征分为熔化电极电弧焊和非熔化电极电弧焊两大类。

二、固相焊接

固相焊接是被焊材料在固态下通过加压、摩擦或扩散等工艺措施，克服工件表面不平或存

表1 各种焊接方法的主要应用范围①

材 料	厚 度 mm	焊 接 方 法																	软 钎 焊				
		手 弧 焊	埋 弧 焊	气 保 护 焊		管 状 焊 丝 电 弧 焊	气 保 护 焊 极 电 弧 焊	等 离 子 弧 焊	电 渣 焊	电 阻 焊	电 光 焊	气 扩 散 焊	摩 擦 焊	电 子 束 焊	激 光 焊	硬 钎 焊							
				射 流 过 渡	脉 冲 弧											火 焰 钎 焊	炉 中 钎 焊	感 应 加 热 钎 焊		电 阻 加 热 钎 焊	浸 渍 钎 焊	红 外 线 钎 焊	扩 散 钎 焊
碳 钢	~3	△	△		△	△		△			△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3~6	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	6~19	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	△
	19以上	△	△	△	△	△	△		△	△		△	△	△		△	△	△	△			△	△
低合金钢	~3	△	△		△	△		△			△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3~6	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
	6~19	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
	19以上	△	△	△	△	△	△		△		△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
不 锈 钢	~3	△	△		△	△		△	△		△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3~6	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
	6~19	△	△	△	△	△	△	△			△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
	19以上	△	△	△	△	△	△		△		△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
铸 铁	3~6	△														△	△	△				△	△
	6~19	△	△	△			△										△	△	△			△	△
	19以上	△	△	△			△										△	△	△			△	△
镍和合金	~3	△			△	△		△	△		△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3~6	△	△	△	△	△		△	△		△	△		△	△	△	△	△	△			△	△
	6~19	△	△	△	△			△			△	△		△	△	△	△	△	△			△	△
	19以上	△		△	△				△		△	△		△	△	△	△	△	△			△	△
铝和合金	~3			△	△			△	△		△	△	△		△	△	△	△	△	△	△	△	△
	3~6			△	△			△			△	△	△		△	△	△	△	△			△	△
	6~19			△				△			△		△		△	△	△	△	△			△	△
	19以上			△						△	△		△		△	△	△	△	△			△	△
钛和合金	~3				△			△	△		△	△		△	△	△		△	△			△	△
	3~6			△	△			△	△			△		△	△	△		△	△			△	△
	6~19			△	△			△	△			△		△	△	△		△	△			△	△
	19以上			△	△						△	△		△	△	△		△	△			△	△
铜和合金	~3				△			△	△					△	△		△	△	△			△	△
	3~6			△	△				△					△	△		△	△	△			△	△
	6~19			△										△	△		△	△	△			△	△
	19以上			△										△	△		△	△	△			△	△
镁和合金	~3				△			△						△	△		△	△				△	
	3~6			△	△			△						△	△		△	△				△	
	6~19			△	△									△	△		△	△				△	
	19以上			△	△									△								△	
难熔合金	~3				△			△	△					△			△	△	△	△		△	△
	3~6			△	△				△					△			△	△	△			△	△
	6~19																△	△	△			△	△
	19以上																△	△	△			△	△

① 有△表示被推荐。

在于表面的氧化物等杂质的影响,使其分子或原子间接近到晶格以内的距离,从而形成不可拆连接的一类焊接方法。其中加压是最重要也是最必须的工艺手段,所以固相焊接几乎可以全部归类于压焊之中。但是为了降低加压时材料的变形抗力,增加材料的塑性,通常也需同时加热材料,但加热温度应低于熔点。

按所施加焊接能量的不同,固相焊接的基本方法有:电阻对焊(包括闪光对焊),摩擦焊,超声波焊,扩散焊、冷压焊,爆炸焊和锻焊等。固相焊接一般不需采用保护措施。

三、钎焊

利用某些熔点低于被连接物体材料熔点的金属(即钎料)作连接的媒介,利用钎料与母材间的扩散,将两被焊金属连接在一起的焊接方法称为钎焊。钎焊时,通常要清除焊件表面污物,增加钎料的铺展性,这就需采用一些钎剂。钎焊时也必须加热以熔化钎料(但焊件不熔化)。按热源的不同可分为火焰钎焊(以乙炔在氧中燃烧的火焰为热源)、感应钎焊(以高频感应电流流过工件产生的电阻热为热源),电阻热钎焊、焊件电阻热,盐浴钎焊(以高温盐溶液为热源)和炉中钎焊等。钎焊时通常要进行保护,如抽真空,通保护气体和使用钎剂等。

各种焊接方法的主要应用范围如表1所示。

第二节 焊接方法在工业中的地位及发展情况

焊接作为一种材料加工方法,主要是起连接作用,将一定形状和尺寸的分离部件焊接为一个整体。它既可能是大型的焊接结构,也可能是一个金属的零部件。

在工业生产中采用的连结方法主要有可拆连结和不可拆连结两大类。螺钉、键、销钉等连结方式属于可拆联结,它们通常不用于制造金属结构,而使用于零件的装配和定位工作中,不可拆连结有铆接,焊接和粘接等几种方式,它们通常用于金属结构或零件的制造中。其中铆接应用较早,但是它工序复杂、结构笨重、材料消耗也比较大,所以现代工业中已逐步被焊接所取代。粘接虽然工艺简单,而且在粘接过程中对被粘材料的组织和性能不产生任何不良影响,但是其接头一般强度较低,相反焊接方法不但易于保证焊接结构等强度的要求,而且相对来说工艺比较简单,加工成本也比较低廉,所以焊接方法在现代工业中占有很重要的地位。

焊接是一种古老而又年青的加工方法,远在我国古代就有使用锻焊和钎焊的实例,如在著称世界的秦始皇墓中的铜车马上就发现了钎焊的焊缝。明代的科学著作《天工开物》上就有关于锻焊的记载:“凡铁性逐节粘合,涂以黄泥于接口之上,入火挥捶,泥淬(Zi)成枵(Xiao)而去,取其神气为媒合,胶合之后,非灼红斧斩永不可断也。”

但是目前工业生产中广泛应用的焊接方法却是上世纪末和本世纪初现代科学技术发展的产物。特别是冶金学、金属学以及电工学的发展奠定了焊接工艺及设备的理论基础,而冶金工业、电力工业和电子工业的进步则为焊接技术的长足发展提供了有利的物质与技术条件。1885年发现了气体放电的电弧;1930年发明了涂药焊条的手工电弧焊方法,并在此基础上发明了埋弧自动焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊以及二氧化碳气体保护焊等自动或半自动焊方法。电阻焊是1886年发明的,并逐步完善为电阻点焊、缝焊和对焊方法,它几乎与电弧焊同时推向工业应用,逐步取代铆接,成为工业中广泛应用的两种主要焊接方法。到目前为止,

又相继发明了电子束焊、激光焊等20余种基本方法和成百种派生方法，并且仍处于继续发展之中。

随着工业生产的发展，对焊接技术提出了多种多样的要求。如对焊接产品的使用方面提出了动载、强韧、高压、高温、低温和耐蚀等项要求；从结构形式上提出了焊接厚壁零件到精细零件的要求；从焊接材料的选择上提出了焊接各种黑色金属和有色金属的要求。具体地说，在造船和海洋开发中要求解决大面积拼板以及大型立体框架结构的自动焊及各种低合金高强度钢的焊接问题；在石油化学工业的发展中，要求解决耐高温、低温以及耐各种腐蚀性介质的压力容器制造问题；在航空工业及空间开发中要求解决大量铝、钛等轻合金结构的制造问题，在重型机械工业中要求解决大截面构件的焊接问题，在电子及精密仪表工业中则要求解决微型精密零件的焊接问题。总之，一方面工业生产的发展对焊接技术提出了多种要求，另一方面科学技术的发展又为焊接技术的进步开拓了新的道路。为适应我国四化建设的需要，相信焊接技术必将会得到更迅速的发展，并在工业生产中更发挥应有的作用。

第三节 本课程的内容和学习方法

本书是介绍各种焊接方法及其所使用设备的一门专业课程。

它的主要内容是

- 1) 各类基本焊接方法的过程本质、特点、接头形成条件以及合理的使用范围。
- 2) 各类基本焊接方法中影响焊接质量的工艺参数的合理选择及控制方法。
- 3) 各种焊接设备的结构、工作原理及操作使用方法。

概括地说，就是通过本课的学习应该掌握各种焊接方法的原理、焊接质量的控制以及设备的使用维护这三个方面的有关知识，达到正确选用这些基本方法的目的。

在前面介绍的各种焊接方法中，电弧焊约占焊接生产总劳动量的60%以上，是目前应用最广泛的焊接方法，也是理论上和工艺上最为成熟的焊接方法。电弧焊接保护方式、电弧压缩程度、电源种类、所采用的工艺措施以及电极导电型式等方面的不同，还可以派生出多种具体的焊接方法。如以渣保护为主的手工电弧焊和埋弧焊方法；以气体保护为主的钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊和二氧化碳气体保护焊方法；采用压缩电弧的等离子焊的方法；采用特种电源的高频或低频脉冲电弧焊方法；对电弧施加磁场的磁控电弧焊方法；采用留间隙焊厚大焊件的窄间隙焊方法等等。因此在本课中将以电弧焊方法为重点，比较深入而全面地介绍它及其各种派生方法。

在熔焊方法中除电弧焊外，电渣焊也是机械工业中应用较为广泛的一种方法，特别是在厚大焊件焊接时电渣焊更有着其他方法不可取代的优点，而且与电弧焊相比它又有着本质上的不同，所以在本课中也占用一定篇幅进行介绍。

在压焊中电阻焊是应用最广泛的焊接方法，目前约占焊接生产总劳动量的30%左右，所以据有关学者预测，由于电阻焊焊接过程简单，生产率高，易于实现过程自动化的缘故。它在焊接工作量中所占的比重还有继续增大的趋势。因此在本课中也将安排一定篇幅予以介绍。

至于其他焊接方法，则由于目前应用较少，且因本课学时有限，所以只在本书末尾予以简单介绍，课堂上不予讲授。因此，要求同学们在学习本课时应注意锻练自己分析问题和解

决问题的能力，即不但应该注意学好课程本身所介绍的内容，还要注意掌握分析各种焊接方法的思路，才会有更好的学习效果。

在学习本课之前，应先修物理学、电工电子学、机械零件和金属学等基础课或技术基础课程、弧焊电源和焊接原理等专业课程，并且应进行过焊接操作和生产实习。在本课学习中应将上述知识学以致用，融会贯通，以便更扎实地学好焊接方法课程。由于中等专业学校的主要任务是培养应用型人才，中专毕业生绝大多数将在生产第一线上工作。因此理论联系实际对于每个同学来说便有着特别重要的意义。焊接方法是一门实践性很强的课程，所以在学习本课中应特别注意理论联系生产实际，分析工艺现象，研究工艺问题，学会设备的使用维护知识。并且特别重视实验和操作环节，才能具体地掌握各种焊接方法，在生产建设中发挥作用。

复习思考题

1. 焊接过程的物理本质是什么？
2. 如何按焊接接头形成的本质将焊接方法进行分类？
3. 焊接在工业生产中的作用是什么？

第一章 电弧焊基础知识

本章介绍与电弧焊有关的基础知识，其主要内容有：焊接电弧的物理基础、焊接电弧的产热和产力机理、电源的种类和极性选择、磁场对电弧的作用以及焊丝的加热、熔化和熔滴过渡等。关于母材的熔化和焊缝成形、电弧过程参数的自动调节等内容以及电渣焊、电阻焊的基础知识将结合本书有关章节进行介绍。

第一节 焊 接 电 弧

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，因而电弧焊在焊接方法中占有重要的地位。为了认识和发展电弧焊接，就必须首先弄清电弧的物理本质、电弧能量产生和转换的基本规律以及焊接过程中，我们是如何利用这种能源的。

一、焊接电弧的物理基础

电弧是一种气体放电现象。所谓气体放电，是指两电极间存在电位差时，电荷通过两电极之间的气体空间的一种导电现象(图1-1)。

在正常状态下，气体不含带电粒子而由中性分子或原子组成，它们虽然可以自由移动，但在外电场作用下，不能够产生定向运动。因此，在一般情况下，气体是不导电的。为了使正常状态下的气体导电，必须先有一个产生带电粒子的过程，然后才能出现导电现象。在外电场的作用下，气体中所有的带电粒子都要产生定向运动，所以气体的导电过程和规律与金属有显著不同。另外气体导电时，其导电部分的电压和电流关系并不遵循欧姆定律，而是一个很复杂的关系。它在不同的条件和不同的导电区间，具有不同的导电特性。图1-2是气体放电与金属导电的伏安特性曲线比较图。图1-2 a 中电弧放电区是所有气体放电中电压最低，电流最大、温度最高、发光最强的一种放电区域，因此电弧在工业生产中广泛用来作为光源和热源。

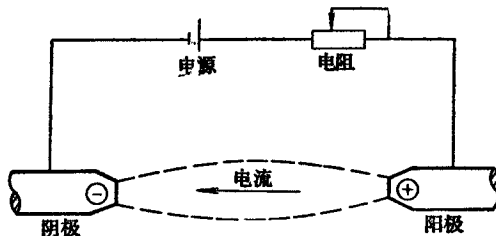


图1-1 电弧的示意图

图1-2 a 中电弧放电区是所有气体放电中电压最低，电流最大、温度最高、发光最强的一种放电区域，因此电弧在工业生产中广泛用来作为光源和热源。

电弧是由两个电极和它们之间的气体空间放电而形成的，电弧的带电粒子主要依靠气体的电离和电极发射电子这两个物理过程产生。除这二个主要物理过程之外，还有一些其它过程，如气体的解离、激励、扩散、复合、形成负离子等，也会影响电弧的导电性能。

1. 气体的电离

在一定条件下，中性气体分子或原子分离成为电子和正离子的现象称为电离。为了将气体电离，就必须施加足够的能量，使气体分子或原子中的电子脱离原子核的束缚而成为自由电子，同时使原子成为正离子。使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，生成的正离子称为一价正离子，这种电离称为一次电离。使中性气体粒子失去

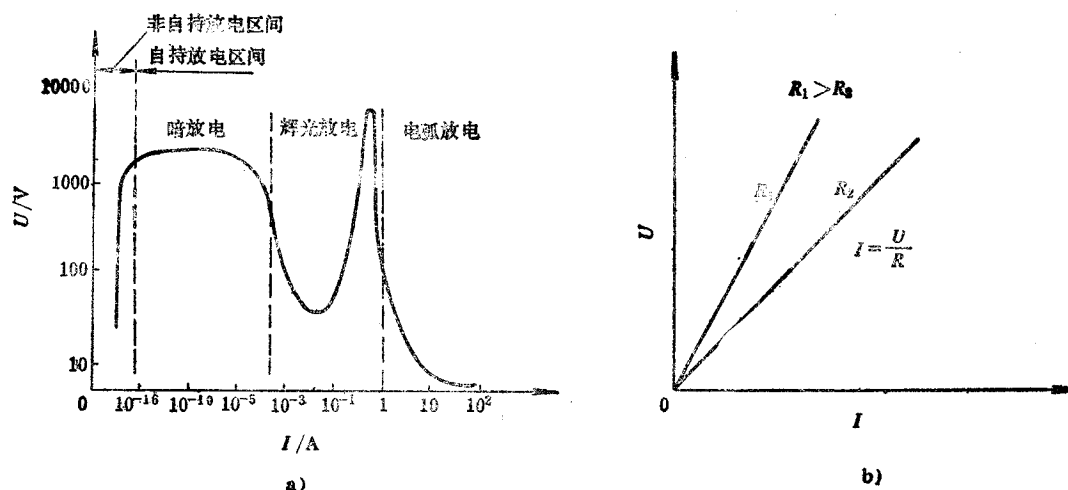


图1-2 气体放电与金属导电的伏安特性

a) 气体放电 b) 金属导电

第二个电子需要更大的电离能，称为第二电离能，生成的离子称为二价正离子，这种电离称为二次电离，依此类推。普通焊接电弧中当焊接电流较小时，只存在一次电离，而在大电流焊接电弧中，电弧温度很高，可能出现二次或三次电离，但仍以一次电离为主。电离能的单位通常为电子伏 (eV)。1 电子伏就是 1 个电子通过一伏特电位差的空间所需要的能量，其数量等于 $1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 。在电学中，为计算方便起见，常把以电子伏为单位的能量转换为数值上相等的电压来处理，即直接用该电压值 U_i (称为电离电压) 来表示气体电离的难易程度。自由状态气体原子的第一电离电压在 3.9 V (Cs) 到 24.5 V (He) 之间，而第二电离电压在十几伏到几百伏之间。电弧气氛中可能遇到的气体电离电压如表 1-1 所示。

表1-1 常见气体粒子的电离电压

元 素	电 离 电 压 U_i / V	元 素	电 离 电 压 U_i / V
H	13.5	W	8.0
He	24.5(54.2)①	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 ₂	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	5.96
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	7.8(16; 30)		

① 括号内的数字依次为二次、三次，……电离电压。

除原子状态的气体可电离外,分子状态的气体也可以直接被电离。在通常情况下,分子状态时的电离电压值比原子状态时的电离电压值要高一些,如H原子为13.5 V,而H₂分子为15.4 V。当然也有个别气体分子的电离电压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原子的电离电压则分别为14.5 V和13.5 V。

气体电离电压的高低说明电子脱离原子或分子所需要的外加能量的高低,也就是说明在某种气氛中产生带电粒子的难易。在相同的外加能量条件下,电离电压低的气体产生带电粒子较容易,从这个角度看,是有利于维持电弧稳定的。但是影响电弧稳定性的因素很多,气体的其它性能(如解离性能、热物理性能等),会影响整个电弧空间的能量状态、带电粒子的产生和移动等过程,同样会影响电弧的稳定性。因此,在分析焊接电弧现象时,不能只看气体的电离电压,而应综合考虑气体的各种性质。

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,电离电压较低的气体粒子将首先被电离,如果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,所需的外加能量也主要由这种气体的电离电压来决定。由表1-1可知,铁的电离电压为7.9 V,比CO₂或Ar的电离电压(13.7 V, 15.7 V)都低很多,因此,在钢材的气体保护电弧焊时,如果焊接电流足够大,电弧空间将充满铁的蒸气,电弧空间的带电粒子将主要由铁蒸气的电离过程来提供,电弧气氛的电离电压也将主要由铁蒸气的电离电压来决定。通常把这种决定电弧气氛的电离电压称为实效电离电压。

当气体中性粒子受外来能量作用其数量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,则中性粒子内部的稳定状态有影响,但对外仍呈电中性,这种状态称为激励。使中性粒子激励所需要的最低外加能量称为最低激励能。激励能小于电离能,也可用电压值来表示,称为最低激励电压。

粒子的激励状态是一种非稳定状态,它处于这个状态的时间是很短暂的,根据激励能级的不同,存在的时间可为 $10^{-1} \sim 10^{-8}$ s。能级高的存在寿命较短,能级低的存在寿命较长。较高能级的激励粒子若继续接受外来能量,达到或超过电离能时则会使其电离;否则将自己的能量以辐射的形式释放出来,表现为电弧的辐射光而恢复到原来的稳定状态。低能级的激励粒子则通过碰撞将能量传递给其它粒子而恢复到其稳定状态。接受其能量的其它粒子则可能解离、激励或电离。因此粒子的激励过程也是与电离过程和电弧特性密切相关的物理现象。

外加能量可以通过不同方式施于中性气体粒子,但是能量的传递途径从本质上讲只有二种,即碰撞传递和光辐射传递。碰撞传递是借助于气体粒子相互碰撞时进行能量转移的一种能量转换和传递方式。弹性碰撞只能引起粒子温度的变化,不能产生电离过程;非弹性碰撞能使被碰撞的气体粒子的内部结构发生变化,最终使中性气体粒子电离为电弧提供带电粒子。电弧空间气体中除了中性粒子外,还同时含有电子和正离子,其间的碰撞和能量传递与它们的质量比有密切关系。被撞粒子和撞击粒子的质量比愈大,被撞粒子获得的能量则愈大。电子的质量大大小于气体原子、分子或离子的质量,因而当具有足够动能的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递给中性粒子,转换为中性粒子的内能,使其电离。中性气体粒子也可以直接接受外界以光量子形式所施加的能量,使其内能提高,造成内部结构改变而电离。

在实际电弧过程中,通过气体粒子间的碰撞将能量传递给中性粒子并使之电离,是电弧本身产生带电粒子以维持其导电的最主要的途径,而通过光辐射传递方法来产生带电粒子则

是次要的。

电弧中气体粒子的电离因外加能量的种类不同而分为热电离、电场作用下的场电离和光电离三类。气体粒子受热的作用而产生的电离称为热电离,它实质上是由于气体粒子的热运动而产生碰撞的一种电离过程。气体热电离的电离度 α [$\alpha = (\text{电离后的电子或离子密度})/(\text{电离前中性粒子的密度})$] 随着温度的升高, 气体压力减小, 电离电压的减小而增加, 其中以温度的影响最为显著。热电离的电离度与温

度的关系如图 1-3 所示。当带电粒子的动能 在 电 场 的 影 响 下 增 加 到 足 够 高 的 数 值 时, 则 可 能 与 中 性 粒 子 产 生 非 弹 性 碰 撞 而 使 之 电 离, 这 种 电 离 称 为 电 场 作 用 下 的 电 离。电 场 作 用 下 的 电 离 现 象 主 要 是 电 子 与 中 性 粒 子 的 非 弹 性 碰 撞 所 引 起 的。中 性 粒 子 接 受 光 辐 射 的 作 用 而 产 生 的 电 离 现 象 称 为 光 电 离。电 弧 的 光 辐 射 能 直 接 引 起 电 离 电 压 较 低 的 K、Na、

Ca、Al 等金属蒸气的光电离, 但不能使其它气体直接引起光电离。

电弧弧柱的温度一般在 5000~30000 K 之间, 而电场强度仅为 10 V/cm 左右, 所以在弧柱区热电离是产生带电粒子的主要途径, 电场作用下的电离则是极为次要的。在电弧的阴极压降区和阳极压降区, 电场强度可达 $10^5 \sim 10^7$ V/cm, 因而有可能产生电场作用下的电离现象。至于光电离则是电弧中产生带电粒子的一个次要途径。

2. 电子发射

电极表面受到外加能量的作用, 使其内部的电子冲破电极表面的束缚而飞到电弧空间的现象称为电子发射。从阴极发射出来的电子在电场的作用下参加电弧导电过程, 向弧柱提供所需要的电子流。

使一个电子从金属表面飞出所需要的最低外加能量称为逸出功 (W_w), 单位是电子伏 (eV)。因电子电量为 e , 通常以 $W_w/e = U_w$ (称逸出电位, 单位为 V) 来表示逸出功的大小。逸出功的大小与电极材料的种类、表面状态有关。表 1-2 为几种金属材料的逸出功。由表可见, 当金属表面附有氧化物时其逸出功都会减小。

表 1-2 几种金属的逸出功

金属种类		W	Fe	Al	Cu	K	Ca	Mg
逸出功 eV	纯金属	4.54	4.48	4.25	4.36	2.02	2.12	3.78
	表面有氧化物		3.92	3.9	3.85	0.46	1.8	3.31

由于外加能量形式不同, 电子发射机构可分为热发射、电场发射、光发射和粒子碰撞发射等四种类型。热发射是由于金属表面受热作用, 使其内部的自由电子热运动增加, 当自由电子的动能大于逸出功时, 则会飞出金属表面, 参加电弧的导电过程。电子从金属表面逸出时要带走热量, 对金属表面产生冷却作用; 当其被金属表面接收时会释放能量, 使金属表面加热。带走和释放的能量在数值上均为 IU_w , 其中 I 为发射的总电子流, U_w 为逸出电压。

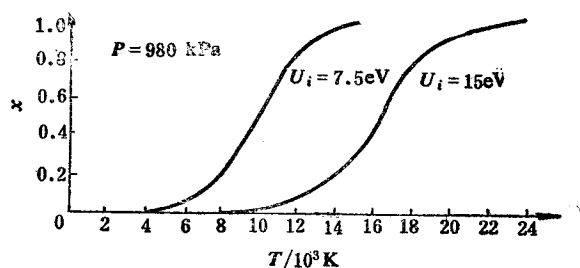


图 1-3 热电离度 α 与温度 T 之间的关系

当金属表面存在一定强度的正电场时,金属内部的电子会受到电场力的作用。当此力足够大时,电子即可飞出金属表面,这种现象称为电场发射。当电场强度足够高时,即使电极温度很低,也可以发射足够的电子供给电弧导电的需要。由于电场提供了电场能,相当于降低了电极的逸出功,因此电场发射时,电子从电极表面带走的热量比热发射带走的要少。金属表面受光能照射,使内部自由电子冲破表面约束而产生的电子发射称为光发射。产生光发射时,由于电子吸收光辐射能,不从金属表面带走能量,所以对电极没有冷却作用。焊接电弧中正离子撞击阴极表面,将其动能传给阴极内部的电子,使其逸出金属表面的发射过程,称为碰撞发射。这种发射伴随着从阴极逸出的电子首先与正离子中和成为中性粒子,并释放出电离能的过程。因此,当该电离能与正离子的撞击能之和为电子逸出功的两倍时,阴极才能发射出一个有效电子。

在实际焊接电弧中,当使用沸点高的材料钨或碳作电极时,其阴极区的带电粒子主要靠热发射来提供,通常称为热阴极电弧。但使用钢、铜、铝、镁等材料作电极时,由于它们沸点很低,电极加热温度受沸点限制不可能很高,热发射不能提供足够的带电粒子。此时,电场发射起着重要的作用,这种电弧称为冷阴极电弧。焊接电弧由于光量较弱,因而光发射在阴极电子发射中居次要地位。焊接电弧中阴极区前面有大量的正离子聚积,而形成一定强度的正电场,能使正离子加速撞击阴极,因此在一定的条件下碰撞发射是供给电弧所需要电子的主要途径。

焊接电弧中的带电粒子中除了电子和正离子之外,还可能有另一种带电粒子——负离子。负离子是在一定的条件下,某些中性原子或分子吸附一个电子而形成的。中性粒子吸附电子形成负离子时,其内部能量不是增加而是减少。减少的这部分能量称为中性粒子的电子亲和能,通常以热能或光辐射能的形式释出。电子亲和能越大的元素形成负离子的倾向越大,卤族元素(F、Cl、Br、I等)的电子亲和能较大,比较容易形成负离子。此外,电弧中的O、O₂、OH、NO₂、H₂O、Li等气体具有一定的电子亲和能,所以也都可能形成负离子。由于形成负离子要伴随着放热过程且电子在高温时运动速度高,所以在电弧高温区负离子不易形成和存在,而只能在电弧的周边形成和存在。负离子所带的电荷量虽然与电子相同,但因其质量比电子大很多,不能有效地参加电弧导电过程,所以电弧中如果产生大量的负离子,则必然会引起电弧导电困难而使其稳定性降低。

电弧中通过上述带电粒子的产生和消亡等一系列物理过程,不断地把电能转换为热、光和机械能,以满足焊接和其它工业应用的需要。

二、焊接电弧的构成及其导电特性

焊接电弧由三个不同电场强度的区域,即阳极区、阴极区和弧柱区构成(图1-4)。其中弧柱区电压降 U_c 较小而长度较大,说明其阻抗较小,两个极区沿长度方向尺寸较小但电压降较大(U_A 为阳极压降, U_K 为阴极压降),可见其阻抗较大。电弧的这种特性是由于各区导的电机构不同所决定的。

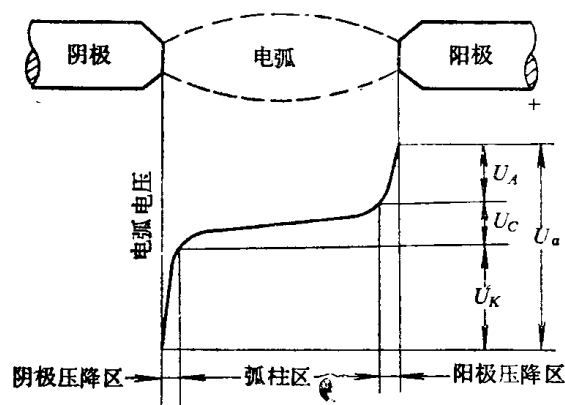


图1-4 电弧各区的电压分布示意图

1. 弧柱区的导电特性

弧柱是阴极区和阳极区中间的区域，其长度比两极区大得多，占了电弧长度的绝大部分，因而可以认为弧柱的长度基本上等于电弧的长度。弧柱温度因气体种类和电流大小不同，一般在5000~50000 K范围内，因此弧柱气体将产生以热电离为主的导电现象。由热电离产生的带电粒子在外加电场的作用下，正离子向阴极方向运动，电子向阳极方向运动而形成电流。这种受电场作用而形成的电子流和离子流，将由阴极区和阳极区产生相应的电子流和正离子流予以补充，以保证弧柱带电粒子的动平衡。从整体来看，弧柱呈电中性，因此电子流和离子流通过弧柱时不受空间电荷电场的排斥作用，从而决定电弧放电具有大电流、低电压的特点（电压降几伏，电流却可达上千安培）。

弧柱的导电性能的优劣，直接表现在弧柱导电时所需要的电场强度大小。电场强度 E 的大小与电弧气氛种类和电流大小有密切关系，图 1-5 为几种气体的弧柱电场强度与电流的关系。由图可知，在较小电流区间，电场强度随电流的增加而减少；在较大的电流区间，电场强度则随电流的增加而增加。

2. 阴极区的导电特性

阴极区的作用是向弧柱区提供所需要的电子流，接受由弧柱送来的正离子流。由于阴极材料种类、电流大小以及气体介质不同，阴极区的导电机构可分为三种类型。

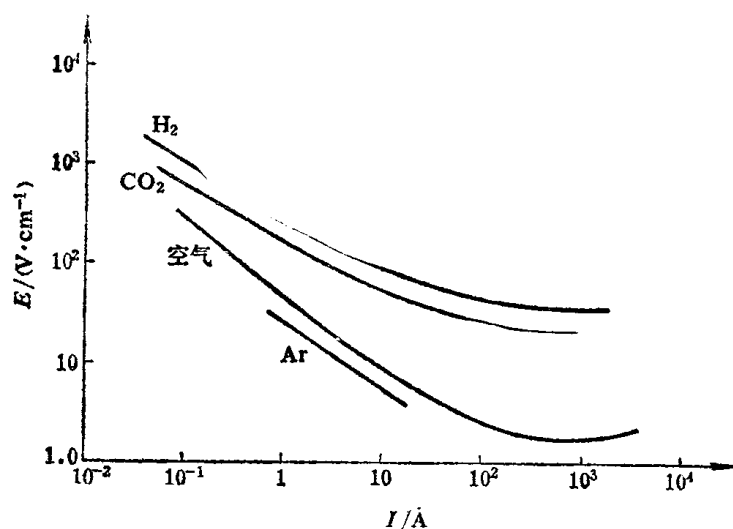


图1-5 弧柱电场强度与气体种类和电流的关系

(1) 热发射型阴极区导电机构 当阴极采用W、C等高熔点材料，电流较大时，由于阴极可达到很高的温度，弧柱所需要的电子流主要靠阴极的热发射来提供，这样的阴极区称为热发射型阴极区。如果阴极通过发射能够提供所需要的全部电子，则阴极区不复存在，阴极压降也不存在，即阴极前面的电场强度完全和弧柱区一致。在大电流钨极氩弧焊时，这种阴极导电机构占主要地位。

(2) 电场发射型阴极导电机构 当阴极材料为W、C但电流较小或者阴极材料采用熔点较低的Fe、Al、Cu时，阴极表面的温度受电流或材料沸点的限制，不能产生较强的热发射，以供给所需的电子流。由于电子供应不足，使得在邻近阴极的弧柱处正负电荷的平衡首先受到破坏，造成过剩的正离子堆积，形成正电场。热发射愈弱，则正电场愈强。在这一正电场的作用下，使阴极造成电场发射，同时加速电子运动，在阴极区产生碰撞电离，共同向弧柱提供所需的电子流。这种型式的导电机构也称为冷阴极导电机构，是熔化极电弧焊常见的导电机构。在通常情况下热发射和电场发射两种阴极导电机构并存，并且根据电极材料、电流大小和气体介质不同而自动调节。当电极材料熔点较高或者电流较小时，热发射比例较大，电场发射比例较小，阴极压降较低；反之，电场发射比例增大，阴极压降也随之提高。

在冷阴极小电流或低气压钨极氩弧焊时，由于阴极热发射不足以提供所要求的电子，在

阴极前造成正电荷堆积,产生阴极压降 U_k ,当 $U_k < U_i$ 不足以使中性粒子产生碰撞电离,也不能引起强烈的电子发射时,正离子到达阴极时与阴极发射的电子中和成为中性粒子,并携带中和时放出的部分能量回弹到阴极区聚集成为一个高温区。该高温区使中性粒子再次被加热电离,生成的电子供弧柱所需要的电子流,生成的正离子流向阴极形成正离子流。这种导电机构的特点是靠近阴极处有高亮度的辉点,阴极压降在 0 与 U_i 之间。随着电流增加,这种阴极导电机构可向热发射转变,辉点逐渐消失,阴极压降也随之降低。

3. 阳极区的导电特性

阳极区的作用是接受由弧柱流过来的电子流和向弧柱提供所需要的正离子流。阳极区接受电子的过程较为简单,每一个电子到达阳极时便向阳极释放相当于逸出功 W_w 的能量。但由于阳极不能直接发射正离子,所以正离子只能由阳极区供给。根据电弧电流密度大小,阳极区可以由二种方式提供正离子。

当电流密度较大时,阳极温度很高,阳极材料发生蒸发,靠近阳极前面的空间也加热到很高的温度。当电流密度增加到一定程度时,聚积在这里的金属蒸气将产生热电离。热电离生成的正离子供给弧柱的需要,电子则流向阳极。如果电流足够大,则弧柱所需要的正离子可全部由热电离提供,此时阳极压降下降到零。当电弧电流较小时,阳极区热电离不足,阳极前面电子数将大于正离子数,形成负的空间电场、产生阳极压降 U_A ,在 U_A 达到一定程度时,会使弧柱来的电子加速运动,撞击中性粒子而产生碰撞电离,向弧柱提供所需要的正离子。当这种电离可以满足弧柱所需的正离子数目时, U_A 不再继续升高而保持稳定。在这种情况下,阳极区压降一般大于气体介质的电离电压。

试验表明,大电流钨极氩弧焊及大电流熔化极焊接时, U_A 都很少甚至接近零。 U_A 除了与焊接电流有关外,还与材料的导热性能有关。在相同条件下,阳极材料的导热性能越强, U_A 越大。

三、焊接电弧中的能量平衡及电弧力

1. 焊接电弧中的能量平衡

电弧可以看作为一个由电能转换为热能的元件,当其各部分(弧柱、阴极区、阳极区)的能量交换达到平衡时,电弧便处于稳定燃烧状态。由于电弧三个区域导电性能不同,因而各区的能量产生和转换的特性也不一样,各区的温度也不相同。

(1) 弧柱区的能量平衡 单位时间内弧柱区所产生的能量,主要有通过弧柱电场而被加速的对正离子和自由电子所获得的动能,并借助于其间的碰撞以及中和作用转变成的热能。单位时间内弧柱产热量可用单位弧长的外加能量 IE (I 为电流, E 为弧柱电场强度)来表示。弧柱区的产热和热损失相平衡。热损失有对流、传导和辐射等,其中对流约占 80% 以上,传导与辐射各约 10% 左右。

弧柱区的产热量在电流一定时,将随热损失量的大小通过自动改变其 E 值而自行调节。例如,气体质量不同,导热性能不同,周围散热条件不同等都会引起电弧燃烧时的热损失不同,通过自动调节弧柱的电场强度 E ,可使得弧柱的产热量也相应变化。当 E 升高时,意味着热损失和产热量增加,也意味着电弧温度升高,当弧柱外围有强迫冷却或气压升高时,都会造成弧柱电场强度和温度升高的倾向。

一般电弧焊接过程中,弧柱的热量不能直接作用于加热焊条(丝)或母材,只有很少一部分通过辐射传给焊条和工件。当电流较大产生等离子流时,才会将弧柱的部分热量带到工

件上, 增加工件的热量。在等离子弧焊接、切割或钨极氩弧焊时, 则主要利用弧柱的热量来加热工件和填充焊丝。

(2) 阴极区的能量平衡 由阴极区的导电机理可知, 该区是由电子与正离子两种带电粒子构成的, 这两种带电粒子不断地产生、消失和运动, 便构成了能量的转变与传递过程。在能量交换过程中, 阴极区获得的能量, 有被阴极压降 U_K 加速的正离子动能; 正离子达到阴极表面取出等量的电子并与之中和而放出的电离能, 以及由阴极发射的电子经阴极压降加速后在阴极区和弧柱区交界面上释放的动能等几项。单位时间内阴极区实际获得的能量, 在数值上等于阴极电流 (电子流和离子流之和) 和阴极压降的乘积 IU_K 。单位时间内阴极区消耗的能量有阴极发射电子所需要的能量、该区产生热电离所需要的能量以及阴极发射的电子和电离产生的电子进入弧柱区所带走的热量等几项, 在数值上等于 $I(U_w + U_T)$, 其中 IU_w 表示发射电子所需的逸出功, IU_T 表示从阴极区带进弧柱区的能量 (U_T 为弧柱温度的等效电压)。因此单位时间内阴极区产热量也可用电功率 P_K 表示, P_K 等于单位时间内获得的能量与耗散的能量之差, 即:

$$P_K = I(U_K - U_w - U_T) \quad (1-1)$$

阴极的产热, 在焊接过程中可直接用来加热焊丝或工件。

(3) 阳极区的能量平衡 阳极区的能量转换过程比较简单, 一般只考虑接受电子流所产生的能量转换。单位时间内阳极接受电子时将获得三部分能量, 即经阳极压降 U_A 加速获得的动能 IU_A , 电子从阳极带出的逸出功 IU_w 以及从弧柱带来的与弧柱温度相对应的热能 IU_T , 因此单位时间内阳极上的总能量也可用电功率 P_A 表示

$$P_A = I(U_A + U_w + U_T) \quad (1-2)$$

在焊接过程中, 阳极产热量也是用来直接加热焊丝或工件的能量。

2. 电弧的能量密度和温度分布

单位面积上的热功率称为能量密度。能量密度大时, 则能有效地利用热源, 提高焊接速度, 减少焊接热影响区, 达到改善焊缝质量的目的。气焊火焰的能量密度为 $1 \sim 10 \text{ W/cm}^2$, 而电弧焊的能量密度则可达 $10^2 \sim 10^4 \text{ W/cm}^2$ 。

由电弧各部分导电特点可知, 其各部分的轴向能量密度的分布与电流密度的分布是相对应的, 即阴极区和阳极区的能量密度高于弧柱区的能量密度。但温度的轴向分布却不与能量密度分布相对应, 而是弧柱温度较高, 两电极温度较低, 如图 1-6 所示。这是因为电极温度受到电极材料导热性能以及熔点和沸点的限制, 而弧柱的温度则不受材料限制的缘故。而阴极和阳极的温度哪个更高些, 则不仅与该极区的产热量有关, 而且还受材料热物理性能 (熔点、沸点和导热性能等)、电极的几何尺寸大小以及周围的散热条件等因素的影响。在相同产热量的情况下, 如果材料沸点低, 导热性好, 电极的几何尺寸大, 则该极区温度低; 反之, 则该极区温度高。

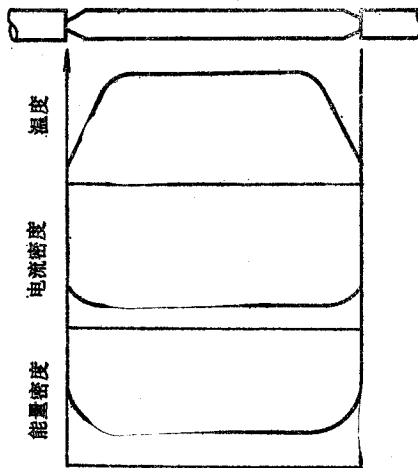


图1-6 电弧各区的温度、电流密度、能量密度的轴向分布