

# 金属的焊接与切割

程绪贤 主编

石油大学出版社

石油高校统编教材

# 金属的焊接与切割

程绪贤 主编

石油大学出版社

## 内 容 简 介

《金属的焊接与切割》全面阐述了焊接的基础理论知识。主要介绍了焊接电弧与弧焊电源、焊接冶金与各类焊接材料特点、焊缝结晶与热影响区性能的控制以及各类裂纹、气孔等冶金缺陷的形成机理与控制措施。较详细地介绍了炼油厂常用的埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO<sub>2</sub>焊的基本原理、设备及工艺特点;对等离子弧焊、电渣焊、电阻焊、钎焊等其它焊接方法及一些特种焊接作了一般性叙述。本书重点讨论炼油厂常用金属材料的焊接性,并结合炼油厂典型设备,介绍如何正确制订合理的焊接工艺。此外,还阐明了焊接应力与变形的原因及防止和消除措施。并以压力容器为主,介绍了焊接接头的质量检验和缺陷评定标准。

本书可作为石油高校化工过程机械等专业的焊接课教材,也可供有关工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属的焊接与切割/程绪贤主编.-东营:石油大学出版社,1995.(2003.7重印)  
高校教材  
ISBN 7-5636-0590-8

I.金… II.程… III.①焊接②金属-切割  
IV.TG4

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第056515号

书 名:金属的焊接与切割

作 者:程绪贤 主编

---

出版者:石油大学出版社(山东 东营,邮编 257061)

网 址:<http://sunctr.hdpu.edu.cn>

电子信息:[bianwn@mail.hdpu.edu.cn](mailto:bianwn@mail.hdpu.edu.cn)

排版者:石油大学出版社

印刷者:石油大学印刷厂

发行者:石油大学出版社(电话 0546-8391797)

开 本:185×260 印张:16.875 字数:364千字

版 次:1995年2月第1版第1次印刷 2003年7月第1版第2次印刷

印 数:2501—2800册

定 价:18.00元

## 前 言

《金属的焊接与切割》是根据“八五”计划期间石油高校统编教材会议的要求，为化工过程机械专业编写的焊接课教材。它是一门实践性较强的课程。

本书是在编者编写的《金属的焊接与切割》教材应用多年的基础上作了一定的修改，同时也总结了编者在石油大学从事本课程的教学经验。编写中除了贯彻“少而精”和“理论联系实际”的原则外，力求尽量反映国内外焊接发展的最新成就和生产经验，并引用了国家最近颁布的标准。本书经修改后系统性更强、内容更精炼。

全书除绪论外共七章，由程绪贤副教授主编并编写绪论及第二、四、七章，侯振波和雷毅编写第一章，孙永兴和牛俊邦编写第三章，王勇编写第五、六章。

本书经赵正修教授主审，并对原稿提出许多宝贵意见，特此表示感谢。

限于编者水平，书中的内容和体系难免有不足和欠妥之处，希望读者批评指正。

编 者

1994年5月

# 目 录

绪论	(1)
一、焊接过程的物理实质及焊接方法分类	(1)
二、焊接的优越性及焊接技术的新发展	(1)
三、焊接在石油领域的地位	(3)
四、焊接质量问题	(3)
第一章 焊接电弧与弧焊电源	(5)
第一节 焊接电弧	(5)
一、焊接电弧的产生和分类	(5)
二、焊接电弧的结构	(6)
三、电弧的静特性	(8)
四、交流电弧	(9)
五、电弧的偏吹	(10)
第二节 对弧焊电源的基本要求	(11)
一、对弧焊电源外特性的要求	(11)
二、对弧焊电源调节特性的要求	(13)
三、对弧焊电源动特性的要求	(13)
第三节 弧焊变压器	(13)
一、串联感抗式弧焊变压器	(13)
二、增大漏磁式弧焊变压器	(14)
第四节 直流弧焊发电机	(16)
一、差复激式弧焊发电机	(16)
二、裂极式弧焊发电机	(17)
第五节 硅弧焊整流器	(18)
一、磁放大器式弧焊整流器	(18)
二、动圈式硅弧焊整流器	(19)
第六节 其它类型弧焊电源简介	(20)
一、晶闸管式弧焊整流器	(20)
二、晶体管式弧焊整流器	(20)
三、弧焊逆变器	(21)
第七节 常用弧焊电源的主要技术数据	(22)
一、常用弧焊变压器的主要技术数据	(23)
二、直流弧焊发电机主要技术数据	(24)
三、常用硅弧焊整流器主要技术数据	(26)

四、晶闸管弧焊整流器的主要技术数据 .....	(27)
第八节 弧焊电源的使用及维修 .....	(27)
一、弧焊电源的安装 .....	(27)
二、弧焊电源的使用 .....	(28)
三、弧焊电源的常见故障及处理 .....	(29)
第二章 焊接冶金与焊接材料 .....	(31)
第一节 焊接化学冶金的任务与特点 .....	(31)
一、对焊接化学冶金过程的要求 .....	(31)
二、焊接化学冶金的特殊性 .....	(32)
第二节 焊接熔渣 .....	(33)
一、熔渣的化学性质 .....	(33)
二、熔渣的物理性质 .....	(34)
第三节 焊缝金属中的气体杂质 .....	(35)
一、氢对金属的作用及控制 .....	(35)
二、氮对金属的作用及控制 .....	(38)
三、氧对金属的作用及控制 .....	(39)
第四节 焊缝金属化学成分的控制 .....	(42)
一、焊接化学冶金过程中的氧化与还原 .....	(42)
二、硫、磷对焊缝金属的作用及控制 .....	(44)
三、焊缝金属的合金化(渗合金) .....	(46)
第五节 焊接接头的组织与性能 .....	(48)
一、焊缝金属的凝固组织 .....	(48)
二、焊接热循环 .....	(51)
三、焊缝金属的固态相变 .....	(53)
四、焊接热影响区金属的组织与性能 .....	(55)
第六节 焊缝中的气孔与夹杂 .....	(59)
一、气孔的类型与危害 .....	(59)
二、气孔的形成机理 .....	(60)
三、影响气孔产生的因素及防止措施 .....	(62)
四、焊缝中的夹杂 .....	(63)
第七节 焊接材料 .....	(64)
一、焊条的类型、组成、基本特性和选用 .....	(64)
二、焊剂的类型、组成和选用 .....	(75)
三、焊丝的类型与应用 .....	(78)
四、保护气体的类型与基本特性 .....	(79)
第三章 焊接方法与设备 .....	(81)
第一节 埋弧自动焊 .....	(81)
一、埋弧焊的工作原理、特点及应用范围 .....	(81)
二、焊接电弧自动调节原理 .....	(83)
三、埋弧自动焊机 .....	(84)

四、埋弧自动焊工艺 .....	(89)
第二节 氩弧焊 .....	(98)
一、气体保护焊概述 .....	(98)
二、钨极氩弧焊 .....	(99)
三、熔化极氩弧焊 .....	(106)
四、混合气体保护焊 .....	(109)
五、熔化极脉冲氩弧焊 .....	(111)
六、窄间隙活性气体保护焊 .....	(112)
第三节 二氧化碳气体保护焊 .....	(112)
一、二氧化碳焊的特点、分类与应用 .....	(112)
二、二氧化碳焊的冶金特性 .....	(113)
三、二氧化碳焊的熔滴过渡 .....	(114)
四、二氧化碳焊的飞溅问题 .....	(116)
五、二氧化碳焊用的焊接材料 .....	(116)
六、二氧化碳焊焊接设备简介 .....	(117)
七、二氧化碳焊的焊接规范 .....	(119)
八、药芯焊丝 CO <sub>2</sub> 焊 .....	(120)
第四节 其它焊接方法 .....	(121)
一、等离子弧焊接与切割 .....	(121)
二、碳弧气刨 .....	(126)
三、电渣焊 .....	(127)
四、电阻焊 .....	(131)
五、摩擦焊 .....	(134)
六、高频焊 .....	(136)
七、钎焊 .....	(138)
八、特种焊接方法简介 .....	(139)
第四章 焊接应力与变形 .....	(145)
第一节 焊接应力和变形产生的原因 .....	(145)
一、平板中心加热时的纵向应力与变形 .....	(145)
二、平板对接焊时的纵向应力与变形 .....	(147)
三、平板对接焊时的横向应力与变形 .....	(149)
第二节 焊接残余变形 .....	(151)
一、焊接残余变形的类型及产生原因 .....	(151)
二、减小和防止焊接变形的措施 .....	(153)
三、矫正焊接变形的的方法 .....	(158)
第三节 焊接残余应力 .....	(159)
一、焊接残余应力的种类 .....	(159)
二、焊接残余应力对结构的危害性 .....	(161)
三、减小焊接残余应力的措施 .....	(162)
四、消除焊接残余应力的方法 .....	(165)

第五章 焊接裂纹	(167)
第一节 焊接热裂纹	(168)
一、焊接热裂纹类型	(168)
二、结晶裂纹的特征及产生机理	(169)
三、结晶裂纹的防止措施	(171)
第二节 焊接冷裂纹	(173)
一、焊接冷裂纹类型	(173)
二、焊接冷裂纹的特征及产生机理	(174)
三、冷裂纹的防止措施	(177)
第三节 再热裂纹、层状撕裂和应力腐蚀裂纹	(179)
一、再热裂纹的特征、产生机理与控制	(179)
二、层状撕裂的特征、产生机理与控制	(181)
三、应力腐蚀裂纹的特征、形成与控制	(182)
第六章 炼油厂典型金属材料的焊接	(186)
第一节 金属材料的焊接性及其试验方法	(186)
一、焊接性概念	(186)
二、金属的焊接性试验	(187)
三、常用焊接性试验方法	(188)
第二节 碳钢的焊接	(193)
一、碳钢的分类	(193)
二、低碳钢的焊接	(193)
三、中、高碳钢的焊接	(195)
四、碳钢典型设备的焊接	(197)
第三节 合金结构钢的焊接	(201)
一、合金结构钢的类型及性能	(201)
二、热轧及正火钢的焊接	(202)
三、调质钢的焊接	(213)
四、专用钢(珠光体耐热钢、低温用钢和低合金耐蚀钢)的焊接	(216)
第四节 不锈钢和耐热钢的焊接	(221)
一、不锈钢和耐热钢的类型及性能	(221)
二、奥氏体钢的焊接	(223)
三、马氏体钢的焊接特点	(229)
四、铁素体钢的焊接特点	(230)
五、异种钢的焊接	(230)
第五节 铸铁焊接	(233)
一、铸铁的种类和性能	(233)
二、铸铁焊接性分析	(234)
三、灰口铸铁的焊接工艺要点	(236)
四、球墨铸铁和白口铸铁的焊接工艺简介	(239)
第六节 铝及其合金的焊接	(240)



一、铝及其合金的类型及特性 .....	(240)
二、铝及其合金的焊接性 .....	(240)
三、铝及其合金的焊接工艺特点 .....	(241)
<b>第七章 焊接质量检验</b> .....	<b>(244)</b>
<b>第一节 焊接接头质量检验的内容与方法</b> .....	<b>(244)</b>
一、焊接接头的非破坏性检验 .....	(244)
二、焊接接头的破坏性检验 .....	(246)
<b>第二节 无损探伤</b> .....	<b>(249)</b>
一、射线探伤 .....	(250)
二、超声波探伤 .....	(253)
三、磁粉探伤 .....	(257)
四、渗透探伤 .....	(257)
<b>参考文献</b> .....	<b>(259)</b>

# 绪 论

焊接是金属连接的主要方法。它已成为现代工业生产中的一种重要的金属加工工艺。据工业发达国家统计,每年需焊接加工后使用的钢材就占钢总产量的45%左右。焊接还可用于有色金属和特种金属的连接。因而在各个工业部门焊接都获得广泛应用。

## 一、焊接过程的物理实质及焊接方法分类

焊接是指通过适当的手段,使两个分离物体(同种或异种金属间或非金属间,也可以是金属与非金属间)产生原子(分子)间结合而形成一体的连接方法。但通常是指金属的焊接。

为完成焊接,可使两个被焊件表面接近到金属晶格距离(0.3~0.5nm),就会在接触表面进行扩散、再结晶等物理化学过程而形成金属键。但由于金属表面(即使经精密加工)凹凸不平,以及表面常带有氧化膜、水分、油污等吸附层,都将妨碍二块金属表面的紧密接触。焊接的物理实质就是利用局部加热、加压或二者并用的手段,克服上述两个障碍,使母材和焊缝金属形成共同的晶粒,达到永久性的牢固连接。

因此,焊接方法基本上可分为熔化焊、固相焊和钎焊三大类。

熔化焊是通过局部加热使连接处达熔化态,然后冷却结晶形成共同晶粒。它最有利于实现原子结合,是金属焊接的最主要方法。关键是应具备能量集中且温度足够高的热源;同时必须采取有效隔离空气的保护措施,以防止熔化金属与空气接触而恶化焊缝的成分与性能。

固相焊接是利用加压、摩擦、扩散等物理作用克服连接表面的不平度,挤除氧化膜等污物,使在固态条件下实现连接。固相焊接时通常都必须加压,故也称压力焊。为了更容易实现固相焊接,一般在加压的同时还伴随加热。但加热温度远低于母材的熔点,因此除加热温度较高的扩散焊外,都无需保护措施。

钎焊与熔焊不同,它采用熔点低于母材的金属材料作钎料,加热的温度仅使钎料熔化而母材并不熔化。液态钎料靠毛细作用填入接头间隙并润湿母材金属表面,与母材相互扩散而形成钎焊接头。可见这是一种固液相兼有的焊接方法。为防止熔化的钎料与空气接触,必须采取保护措施。

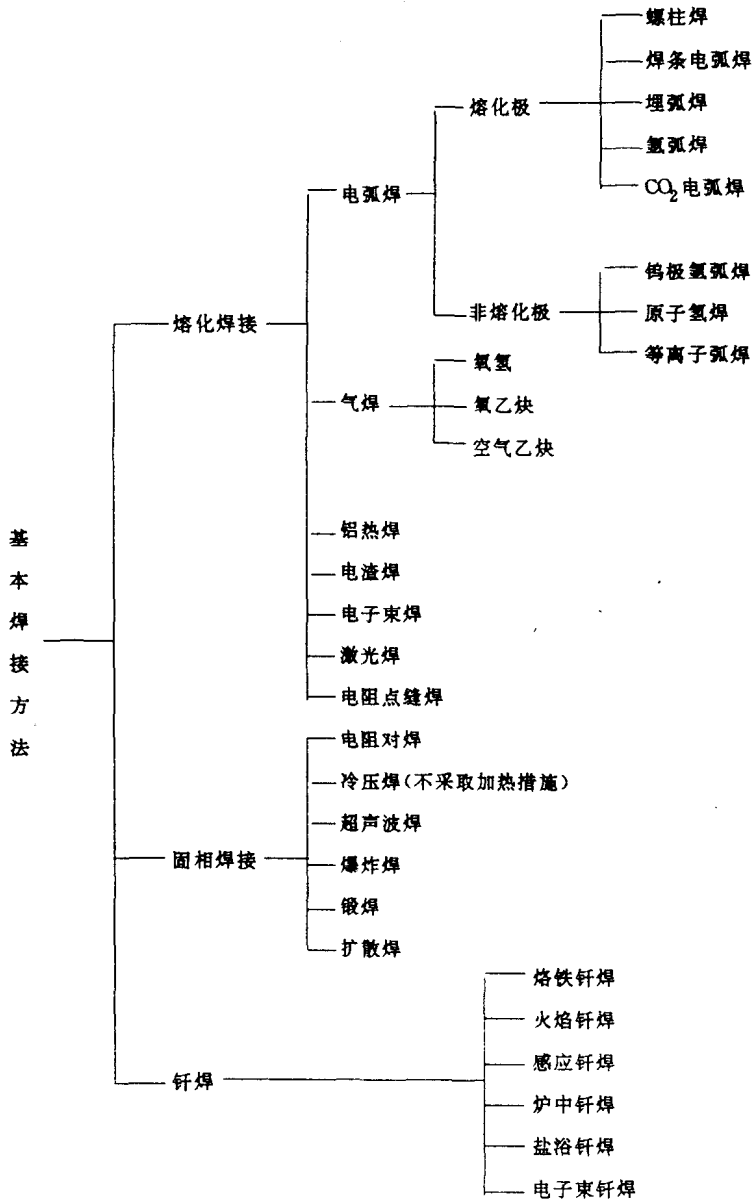
熔化焊和压力焊都是晶内结合;而钎焊通常在连接处却不形成共同晶粒,仅在钎料和母材之间形成粘合,因此它们在微观上是不同的。

随着科学技术的发展,焊接方法已有数十种。基本焊接方法分类见表0-1。应当说明,通常所指的电阻焊又称压力焊,属于固相焊接,但是电阻点焊、缝焊的接头在形成过程中伴随有熔化结晶过程,故属于熔化焊接。此外,金属热切割、表面堆焊、热喷涂等金属加工方法,也都属于焊接专业的技术范围。

## 二、焊接的优越性及焊接技术的新发展

焊接与另一种永久性连接方法——铆接相比,具有生产效率和质量高,接头密封性好、能

表0-1 金属焊接方法分类



承受高压,节省金属材料和减轻结构重量,简化加工与装配工序,改善劳动条件、降低劳动强度,易实现机械化自动化生产,能制造新型复杂的金属结构(如电渣焊与锻压、铸造结合,制成庞杂的锻-焊或铸-焊结构)等一系列优点。因此半个多世纪来,焊接已逐渐取代了铆接。随着焊接新能源的开发和焊接新工艺的应用,已制成许多现代化的大型优质结构与设备,如各种大型复杂的桁架结构、48万吨的巨型油轮、10万立方米的大型储罐、120万千瓦的核电站、耐3000大气压的高压容器以及火箭、宇宙飞船等。

近年来,焊接技术的新发展体现在以下几方面:

1. 提高生产率 这是推动焊接技术发展的动力。首先应提高焊接熔敷率,如手工焊通过

铁粉焊条、重力焊条、躺焊条；埋弧焊通过多丝或热丝，均可取得显著效果。其次应减少坡口断面及熔敷金属量，如采用单丝、双丝或三丝的窄间隙焊接可使熔敷金属量降低数倍至数十倍。从而大大提高生产率。

## 2. 提高准备工序的机械化自动化水平

这是工业发达国家特别重视的发展方向，因为其优点不仅在于提高生产率，更重要的是提高产品质量，准备工序主要包括：材料运输；材料表面去油、喷砂、涂保护漆；划线、切割、开坡口；部件组装及点固等。

3. 焊接过程的自动化和智能化 这是提高焊接质量稳定性和改善劳动条件的方向。目前全世界 50% 以上的机器人用于焊接。智能化的发展重点是视觉系统，即利用计算机等高精度技术控制焊道轨迹跟踪，以及根据坡口尺寸适时地自动调节工艺参数。

4. 热源的研究与开发 这是推动焊接工艺发展的基础。焊接工艺几乎应用了一切可利用的热源，每种热源的出现都伴随着焊接新工艺的发明，目前除了继续开发更好更有效的热源外，还研究了采用两种热源叠加，如在等离子弧或电弧中加激光，以获得更强的能量密度。

此外，由于焊接能源消耗大，新技术的发展还应考虑节能要求。例如，利用电子技术将交流电阻点焊改为次级整流点焊，可使焊机容量由 1000kVA 降至 200kVA。近 10 年来逆变焊机的出现，不仅可节约电能、提高功率因数，还可大大减小焊机体积和重量。

## 三、焊接在石油领域的地位

焊接，由于上述优越性，且通常设备较简单，灵活性较大，室内外、高空及水下均可采用，因此在石油化学工业中占有极重要的地位。

在石油化工机械方面，各种管线、压力容器、球罐、反应塔、加热炉、换热器等的制造与安装维修都需要大量的焊接工作。

在储运设备方面，各种储罐、输油输气管道、油槽车、油轮等都是用焊接制造的，如一艘 30 万吨油轮要焊接 1000 公里的焊缝。

在钻采机械方面，焊接可用于各种金属结构如架体、泵体、钻杆、抽油杆、钻头等的制造及安装修理。

近年来海洋工程的发展使焊接技术更显重要，海洋钻探及采油平台、海洋钻井船的制造都离不开焊接。水下焊接技术在该领域获得广泛应用。

石油化学工业的迅速发展要求焊接各种耐高、低温及耐各种腐蚀介质的压力容器，因而不断提出新钢种和特殊性能材料如高强度、超高强度、不锈钢、耐热钢、铝合金、钛合金、耐热合金及异种金属的焊接问题。

## 四、焊接质量问题

焊接质量取决于正确选择焊接方法、焊接材料以及正确的焊接工艺。优质焊接接头应包括两个方面，一是接合性能<sup>①</sup>好；二是接头的使用性能应不低于母材。因此，对焊接质量的要求是：焊缝的成分以及焊缝与近缝区母材的金相组织应符合要求；整个结构没有较大的残余变形，也不存在过大的残余应力。

焊缝的成分既区别于母材又不同于填充金属。焊缝的组织及物理化学性能取决于成分，要

<sup>①</sup> 某金属在一定焊接工艺条件下对形成焊接缺陷的敏感性。

求其耐腐蚀性、耐热性、耐磨性或力学性能等使用性能均不低于母材。但在同一成分条件下,焊接工艺条件的变化会显著影响焊缝的组织,从而影响焊缝的性能。近缝区母材受高温作用而发生的组织变化,也直接影响焊接接头的性能。因此,实际生产中必须根据各种金属的焊接性正确制定相应的焊接工艺,以便尽可能地获得优质接头性能。

焊接时接口处通常被加热至熔化状态,而周围则是冷金属,所以焊缝及其附近存在很大的温度梯度,导致焊件焊后产生残余变形和残余应力。过大的变形将降低结构的装配质量和承载能力,并增加制造成本;过大的应力则可能引起裂纹,故要求尽量减小焊接应力和变形。

焊接是一门涉及多学科的工艺课,在教学过程中应十分注重理论与实际的联系。本课程的基本内容就是围绕焊接质量来介绍焊接方法(原理、设备及特点)、焊接冶金与焊接材料、以及各种金属材料的焊接工艺(焊前准备、焊接规范参数、预热、后热和焊后热处理等措施)。

学习焊接课程的目的就是为了今后应能根据焊件的使用要求,正确解决上述的焊接质量问题,以获得优质的焊接接头,制备出优质焊接产品。

# 第一章 焊接电弧与弧焊电源

电弧焊是熔化焊中最重要、应用最广的一种焊接方法,它是将电能转变为热能来熔化金属、实现焊接的。

弧焊电源供给电弧电能。不同性能的弧焊电源对电弧的燃烧有不同的影响,因而对整个焊接过程的进行和焊接质量的影响也不同。为了满足焊接工艺的需要和保证焊接质量,必须正确选用弧焊电源。因为弧焊电源的影响是通过电弧表现出来的,所以首先应清楚了解电弧的有关特性。

## 第一节 焊接电弧

### 一、焊接电弧的产生和分类

电弧是气体放电的一种形式,即一种气体导电现象。中性气体本来是不导电的,要使之导电,则必须在其中产生带电粒子。且为了使电弧维持燃烧,还要不断地向电弧空间输送能量。因此,电弧的产生与维持需要具备两个条件,即气体电离和阴极电子发射。

气体电离就是使电子完全脱离原子核的束缚,形成离子和自由电子的过程。如果气体的原子得到了外加能量,电子就会跃向更高的能级,若外加能量足够大,则电子会跃出原子核的束缚圈而成为自由电子。因此,气体的电离需要外加能量。按外加能量的来源不同,气体电离的方式可分为热电离、撞击电离和光电离等。

电子发射,是指固体阴极表面向空间释放出自由电子的现象。它也是由外加能量所致,并按外加能量的不同分为热发射、场致发射、光发射等方式。

焊接电弧的产生有两种方式,即接触引弧和非接触引弧。

最常用的是接触引弧,是在弧焊电源接通的情况下,将两电极(焊条或焊丝与焊件)接触短路。由于电极表面不平,只是一些凸点接触(见图 1-1),这些接触点中通过的短路电流比正常的焊接电流大,且接触面积小,故电流密度极大,产生大量的电阻热使接触点发热、熔化甚至部分蒸发,引起强烈的热发射和热电离。随后在迅速拉开电极的瞬间,由于电弧间隙极小,在电源空载电压的作用下建立了强电场,因而又产生强烈的场致发射,并使已产生的带电粒子加速,在高温下进一步发生撞击电离、热电离和光电离。电离的结果使弧柱成为高度电离的气体,由正离子、电子和少数高温气体分子组成。在电离的同时也有部分正离子与电子重新复合为中性分子和原子,电离与复合形成一动平衡。弧焊电源也不断地向电弧输送能量,弥补了消耗的能量和带电质点,从而维持了电弧的稳定燃烧。

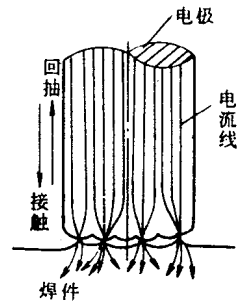


图 1-1 接触引弧示意图

引弧时电子发射的主要方式取决于电极材料,例如高熔点的钨或碳极以热发射为主,称为

热电极；低熔点的铜或铝板以场致发射为主，称为冷电极。熔点介于二者之间的钢焊芯或焊丝作电极时，热发射和场致发射同时起作用。

非接触引弧是使两电极间存在一定间隙，施以高电压击穿气体间隙而引燃电弧。可见，这是一种依靠高电压使电极表面产生场致发射，进而造成气体电离、把电弧引燃的方法。它一般用于钨极氩弧焊和等离子弧焊，因为若钨极与焊件直接接触会污染焊件的引弧点，且损坏电极端面的几何形状。

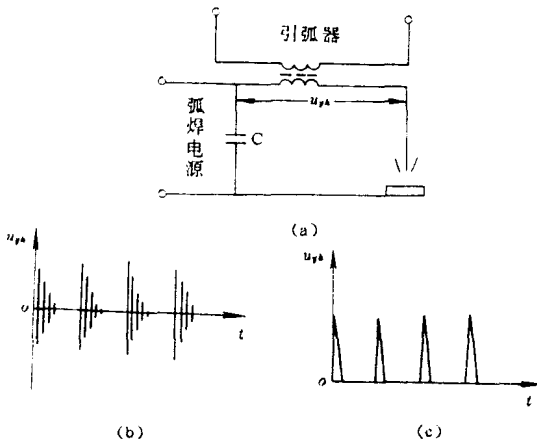


图 1-2 非接触引弧示意图

- a) 引弧器接入方式； b) 高频高压引弧电压波形；  
c) 高压脉冲引弧电压波形  $u_{yh}$ —引弧电压  $t$ —时间

按电弧对焊件的作用分为发生于电极与焊件间的直接弧和发生于两极间的间接弧(图 1-3)。

按电弧的外周是否受拘束可分为自由电弧、拘束电弧(又称压缩电弧)。

按电弧燃烧的环境可分为常压电弧、低压电弧、高压电弧、水下电弧等。

电弧的分类方法较多，且随着科技的发展，焊接电弧的应用领域日益扩大，其种类也越来越多。

## 二、焊接电弧的结构

以直流电弧为例，电弧可近似看成为一个圆柱形的气体导体，沿其长度方向分为三个区域，见图 1-4。电弧与电源正极所接的那端称阳极区；与负极相接的那端称阴极区；阳极区和阴极区之间的部分称弧柱区。阴极区的长度极短，约为  $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm}$ ，阳极区的长度也很短，约为  $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm}$ ，因此可认为电弧的长度近似等于弧柱长度。

电极端面上高温发强光的区域称活性斑点。负极上的称阴极斑点；正极上的称阳极斑点。

如图 1-4 所示，沿电弧长度方向的电压分布是不均匀的。电弧电压  $U_f$  由阴极压降  $U_c$ 、阳极

非接触引弧需采用引弧器来实现，可分为高频高压引弧和高压脉冲引弧，如图 1-2 所示。高压脉冲引弧的频率一般为 50 或 100Hz，电压峰值 3000~5000V；高频高压引弧则需用高频振荡器，一般采用每秒振荡 50 次，每次振荡的频率为 150~260kHz 左右，电压峰值为 2000~3000V。

焊接电弧可按不同的方法进行分类。

按电源的性质可分为直流电弧、交流电弧和脉冲电弧。

按电极材料可分为非熔化极电弧和熔化极电弧。

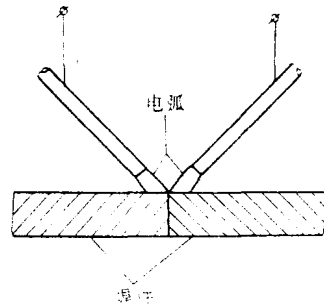


图 1-3 间接作用弧

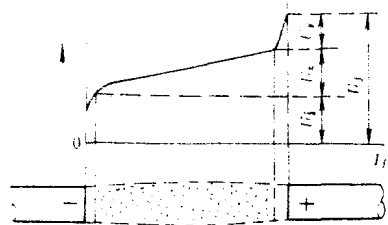


图 1-4 电弧结构及压降分布

压降  $U_r$  和弧柱压降  $U_s$  三部分组成:

$$U_r = U_i + U_c + U_s \quad (1-1)$$

通常,阳极压降基本不变;阴极压降在一定条件(指的是电弧电流,电极材料和气体介质等)下,也基本上是定值;弧柱压降则在一定气体介质下与弧长成正比。

### (一) 弧柱区

弧柱区由电子、离子及少数气体分子和原子组成,具有良好的导电性,呈现大电流、小电压的特点。

在弧柱区中进行着电离和复合过程。弧柱气体是否易于电离,是影响电弧稳定性的主要因素之一。一般用电离电压来表示气体电离的难易。表 1-1 中列出了几种常见元素的一次电离电压。可见,金属蒸气比气体的电离电压低,电弧中存在金属蒸气可提高电弧的稳定性。焊条药皮中的稳弧剂(钾盐或钠盐等)就是利用了这一特点。

表 1-1 几种常见元素的一次电离电压

元 素	K	Na	Cu	Fe	H	O	N	Ar	F	He
电离电压(V)	4.3	5.1	6.1	7.8	13.5	13.6	14.5	15.7	16.9	24.5

弧柱的温度由电极材料、弧柱气氛、电弧电流、弧柱压缩程度等多因素决定,一般自由焊接电弧的弧柱温度达 5000~8000K,而等离子弧的温度则高达 24000K 以上,有的甚至达 50000K。

弧柱区的外加电能大部分转变为热能。这部分热能,一般在熔化极焊接中不能直接用于熔化金属;而只是在填丝电弧焊和等离子切割时,才用来熔化金属。

### (二) 阴极区

阴极表面在热能和电场的作用下产生强烈的电子发射。阴极斑点是阴极表面电子发射处,即电流集中流过的地方。

阴极压降  $U_c$  产生电场,用来发射电子和加速带电粒子,一般与这两点有关的因素均能影响  $U_c$ 。例如,电极温度低,热发射差;弧柱温度高,粒子动能大;形成负离子减少电子数目,需发射更多的电子等均使  $U_c$  增大。若阴极表面有碱土,稀土元素或它们的化合物时,则  $U_c$  会因逸出功的降低而减小。

阴极区的能量来自弧柱中经阴极区加速的正离子的动能及其与电子复合所释放的电离能,其中小部分能量消耗于电子发射;大部分能量使阴极被加热熔化及蒸发。而用于电子发射和加速电子的绝大部分能量传向弧柱区。阴极压降  $U_c$  与电极材料、弧柱气氛有关, $U_c$  值的增大可提高阴极的热量与温度。

阴极斑点的最高温度不会超过材料的沸点,一般阴极材料的熔点越高,阴极斑点的温度也越高。如沸点为 5950K 及 4300K 的钨及碳极的温度可达 3500K 以上。

### (三) 阳极区

阳极压降  $U_a$ ,主要用来加速带电粒子。阳极外加电能中,用来加速正离子的能量的绝大部分传向弧柱。加热阳极的能量由来自弧柱区、经  $U_a$  加速的电子的动能及进入阳极释放的逸出功所提供。阳极区产热机构一般较为稳定。一般阳极斑点的温度高于阴极斑点的温度,但同样也不可能超过材料的沸点。

电弧各区的轴向温度分布如图 1-5 所示。

由于电弧电流主要是由电子流构成,所以一般阳极产生的热量多于阴极。但在实际生产



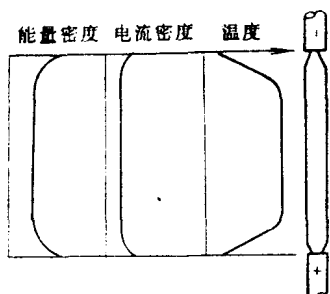


图 1-5 电弧各区轴向温度分布

中,  $U_i$  会受某些因素的影响而提高, 使阴极温度有时会高于阳极。例如, 采用碱性焊条或含  $\text{CaF}_2$  的焊剂焊接时, 由于含有负电元素氟而使  $U_i$  增大, 故阴极温度高于阳极温度; 气电焊时, 保护气对电极有较强的冷却作用, 且焊丝细、电流密度大, 要求发射更多的电子而使  $U_i$  升高, 因此阴极温度高于阳极温度。

直流电弧两极的温度和产热机构不同, 因而可采用不同的接法来控制加热过程, 当焊件接正极时为正接或正极性(图 1-6a); 焊件接负极时为反接或负极性(图 1-6b)。

根据各种工艺条件下正负极的热量情况和焊件所需热量选用不同的接法。例如, 用来焊接重要结构的结 507、结 557 等碱性低氢焊条必须用直流反接。又如  $\text{CO}_2$  焊时, 为获得较大熔深也应采用反接法。

交流电弧的电流幅值和方向都随时间而变化, 故两极的热量和温度介于直流正接和直流反接电弧之间。

### 三、电弧的静特性

一定长度的电弧在稳定燃烧的状态下, 电弧电压  $U_f$  和电弧电流  $I_f$  之间的关系称为电弧的静特性, 也称为电弧的静态伏安特性。可用下式函数式表示:

$$U_f = f(I_f) \quad (1-2)$$

焊接电弧电阻呈非线性, 即电弧两端的电压与通过电弧的电流之间不是成正比例关系。当电弧电流从小到大在很大范围内变化时, 焊接电弧的静特性近似为 U 形曲线, 故也称 U 形特性, 见图 1-7。

U 形静特性曲线可看成由三段组成。ab 称下降段; bc 称水平段; cd 称上升段。

现在讨论电弧静特性曲线各段形状的形成机理。

在阳极区,  $U_i$  基本是常数。

在阴极区, 对于 ab、bc 段,  $I_f$  较小, 阴极斑点面积  $S_i$  小于电极端部面积, 且  $S_i$  随着  $I_f$  的增加而增大, 阴极斑点的电流密度基本不变, 因此  $U_i$  也不变; 而在 cd 段,  $S_i$  已等于电极端面积,  $I_f$  继续增大, 电流密度也增大,  $U_i$  势必增大以加强阴极电子发射, 因此  $U_i$  随  $I_f$  的增大而升高。

对于弧柱区, 可以看作一个近似均匀的导体。其电压可用下式表示:

$$U_z = I_f R_z = I_f \frac{l_z}{\gamma_z S_z} \quad (1-3)$$

式中,  $R_z$  为弧柱电阻;  $l_z$  为弧柱长度;  $\gamma_z$  为弧柱电导率;  $S_z$  为弧柱截面积。

在 ab 段:  $I_f$  较小,  $S_z$  随  $I_f$  的增加而有较快地扩大; 同时,  $I_f$  的增加使弧柱温度和电离度增高, 导致  $\gamma_z$  增大, 故  $U_z$  随  $I_f$  的增加而下降。

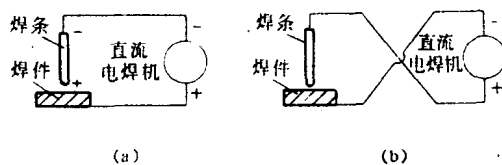


图 1-6 直流弧焊时的极性接法

a) 正接; b) 反接

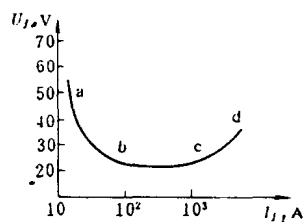


图 1-7 电弧静特性曲线