

工人技术培训教材

焊接工工艺学

(中 级)

忻鼎乾 芮树祥 孙关根 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

焊 接 工 工 艺 学

(中 级)

忻鼎乾 芮树祥 孙关根 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

内 容 简 介

本书全面地介绍了四级至六级焊工所必须掌握的基本技术理论和专业工艺知识。全书共分八章，内容包括：焊接基础理论；熔焊设备和工艺（如手工电弧焊、埋弧焊、CO₂焊、氩弧焊、等离子焊等）；各种金属材料的焊接；船体及舾装件焊接工艺；焊接应力与变形；焊接结构的生产；焊接缺陷及检验方法等。书中内容简明扼要，并尽量选用了造船生产中应用的焊接新工艺和新技术。

本书是船厂焊工中级技术培训教材，亦可供有关技术人员及技工学校师生使用。

焊 接 工 工 艺 学

(中 级)

忻鼎乾 芮树祥 孙关根 编

哈尔滨船舶工程学院出版社出版
北京市新华书店发行
黑龙江省地质矿产局测绘大队印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张20.25 字数505千字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数，1—6 000册

统一书号，15413·026 定价，4.20元

ISBN 7-81007-002-9/U·2

前 言

为了落实中共中央、国务院《关于加强职工教育工作的决定》，搞好船舶工人技术理论教育工作，加强智力开发，提高职工素质，以适应社会主义现代化建设和振兴船舶工业的需要。中国船舶工业总公司人事部组织了上海船舶工业公司有关船厂，在调查研究和总结经验的基础上，根据总公司《船舶工业造船工人技术等级标准》的要求，编写了船厂二十一个工种的初、中级《造船工人技术理论教育教学计划与教学大纲》。

根据这些教学计划与教学大纲的要求，我们组织一些船厂有实践经验的工程技术人员及有丰富教学经验的教师，编写了五十种船舶工人技术培训教材，并聘请技术水平较高、经验丰富的同志担任主审。在编写过程中，广泛地听取了各船厂的意见，增强了教材的适应性。

编写的教材有：放样号料工、冷加工、火工、装配工、焊接工、批铆和密性试漏工、气焊气割工、船舶钳工、船舶管铜工、螺旋桨工、船舶板金工、船舶电工、船舶木塑工、除锈涂装工、船舶泥工、起重吊运工的工艺学，及船体结构、船舶概论、船体制图、船体结构与识图、船体加工设备与工夹模具、企业管理常识、电工常识、机械制图、船舶常识、船舶电工学、电工基础、船舶电气工程概论、电工仪表与测量、船舶电站与电力拖动、船舶导航概论、木工制图、电动起重机原理及操作、金属材料及热处理、画法几何、船舶柴油机结构和修理等。

这些教材力图体现工人培训的特点，既考虑到当前造船工人的文化水平，做到通俗易懂，又要有一定的理论深度，适当考虑到长远的发展；既做到理论联系实际，又注意到知识的科学性、系统性和完整性；既体现船舶特色，又兼顾不同类型船厂的需要；既便于集体组织教学，也便于个人自学。

这套教材主要用于船舶工人相应工种的初、中级技术理论教育，也适用于对口专业职业高中和技工学校的教学，有的也可作为其它类型工厂的工人培训教材。相应专业的科技人员、专业教师及管理人员也可选作参考书。

这套教材的出版，得到了哈尔滨船舶工程学院、有关地区公司、船厂的大力支持，在此特致以衷心的感谢。

编写船舶工人培训的统一教材还是第一次。由于时间仓促，加上编写经验不足，教材难免存在不少缺点和错误。我们恳切希望广大读者在使用中提出批评和指正，以便进一步修改、完善，不断提高教材质量。

中国船舶工业总公司教材编审室

一九八五年七月

编者的话

本书是根据中国船舶工业总公司审定的“焊工工艺学”(中级)编写细纲,在上海船舶工业公司领导下组织编写的,作为船舶工业系统中级焊工(4~6级)培训教材。

全书共分八章。第一章介绍焊接基础理论;第二章、第三章介绍熔化焊设备及工艺;第四章介绍各种金属材料的焊接;第五章重点介绍船体及舾装件的焊接工艺;第六章介绍焊接应力与变形;第七章、第八章分别介绍焊接结构的生产、焊接缺陷及检验方法。

本书在编写过程中,根据教育计划和教学大纲的要求,注重了教材质量,并按工人培训的特点,使教材尽量体现船舶特点和较广泛的适应性;做到了通俗、易懂、理论联系实际;在理论上又有一定的广度和深度,以适合中级焊工的培训需要。

本书的绪论、第二章、第六章由沪东造船厂忻鼎乾同志编写;第三章、第五章、第七章由沪东造船厂芮树祥同志编写;第一章、第四章、第八章由江南造船厂孙关根同志编写。本书由大连造船厂邵公勋同志审定。

谨对在本书编写过程中,给予大力支持和指导的单位和同志表示衷心的感谢。限于水平,书中难免有错误和不当之处,我们恳切地希望同志们给予批评和指正。

编者

目 录

绪 论	(1)
第一章 焊接基础理论	(3)
第一节 焊接电弧	(3)
第二节 焊接冶金基础	(7)
第三节 气孔和裂纹	(21)
第二章 焊接设备	(30)
第一节 手弧焊电源	(30)
第二节 弧焊变压器	(34)
第三节 弧焊发电机	(42)
第四节 弧焊整流器	(51)
第五节 埋弧自动与半自动焊设备	(59)
第六节 气体保护电弧焊设备	(84)
第七节 电渣焊设备	(101)
第八节 等离子弧焊接设备	(111)
第三章 熔化焊工艺	(120)
第一节 手工电弧焊工艺	(120)
第二节 埋弧自动焊和半自动焊工艺	(135)
第三节 气体保护电弧焊工艺	(152)
第四节 电渣焊工艺	(173)
第五节 气焊工艺	(187)
第六节 等离子弧焊工艺	(214)
第四章 常用金属材料的焊接	(220)
第一节 碳素钢的焊接	(220)
第二节 低合金钢的焊接	(222)
第三节 不锈钢的焊接	(228)
第四节 铸铁焊补	(236)
第五节 有色金属的焊接	(242)
第五章 船体及其它焊件的焊接工艺	(252)
第一节 半立体分段焊接	(253)
第二节 艏柱和艉柱的焊接	(254)
第三节 艏、艉总段的焊接	(259)
第四节 船台焊接	(263)
第五节 其它部件的焊接	(267)

第六章 焊接应力与变形	(275)
第一节 概述.....	(275)
第二节 焊接应力的分类.....	(275)
第三节 焊接变形的种类.....	(277)
第四节 焊接应力与变形产生的原因.....	(279)
第五节 防止和减少焊接应力与变形的措施.....	(283)
第六节 焊接变形的矫正.....	(286)
第七章 焊接结构的生产	(289)
第一节 焊接结构生产的工艺流程.....	(289)
第二节 焊接胎夹具.....	(292)
第三节 焊接生产工艺规程的编制.....	(297)
第四节 工时定额和材料定额的制定.....	(298)
第八章 焊接缺陷及检验方法	(304)
第一节 焊接接头的主要缺陷.....	(304)
第二节 焊接检验方法.....	(306)

绪 论

一、造船焊接技术的发展和应用

焊接是造船的关键工艺之一。由于焊接工艺具有许多优越性，它在造船工业中的应用已成为必不可少，且直接影响船舶的质量和建造周期。因此，发展和应用各种高效焊接新技术，是大力发展造船工业的主要措施之一。

我国造船焊接技术的发展，大致分以下四个阶段。

早在五十年代中期，为了发展海运事业和保卫海防，造船焊接技术获得了较为迅速的发展，即以焊接逐步取代铆接造船法，这是我国造船焊接技术第一阶段的重大发展。这一发展促使船体放样、船体加工及装配等工艺都进行了相应的改革。在这期间，国内生产的低氢型焊条和埋弧自动及半自动焊工艺，在中、小型船舶建造中得到了实际应用；焊接结构的渔轮、快艇已成批地实现“分段建造法”。特别是埋弧焊工艺的使用，使焊接过程的机械化程度和质量有了很大的提高。

从六十年代开始直到七十年代初期是我国造船焊接技术发展的第二阶段。主要是从普低钢转入低合金高强度钢的焊接，且建造的船舶趋向大型化。同时，由于电子计算技术和数控技术的发展，以及在船厂中逐步得到应用，促进了焊接技术的发展。在这期间，我国先后建造了7500吨客货轮、16000吨、25000吨货轮以及50000吨油轮等船舶。但采用的焊接方法除了埋弧焊和电渣焊外，主要以手工焊为主，焊接高效专用化率很低。虽然重力焊和二氧化碳焊工艺也有所使用，但没能坚持用下去，与国外船厂相比差距很大。

七十年代末期，在我国对外开放政策的指引下，造船工业不但能满足国内市场的基本需要，而且顺利地完成了12500吨、27000吨、36000吨货轮、三用工作船以及海洋钻探平台等出口船舶的建造任务。且焊接质量均符合船级社的要求，并得到国内外造船界和航运界的赞赏。通过出口船舶的建造，把我国造船焊接技术推向一个新的水平，也即进入了第三阶段。

八十年代初期，随着国内外船舶需要量的不断增加，特别是国内海运和远洋事业的发展，要求船厂能提供更多的大型船舶。为此，必须加快船舶建造周期。由于焊接工时占整个船体建造工时的30~40%，多年来，国内外造船厂一直把研究改进焊接技术作为提高造船生产率的重大的措施之一。1983年开始，国内各船厂也重点抓了高效焊接技术的研究和推广应用，如重力焊、低角度弹力焊、二氧化碳气保护焊、下行焊条与高效铁粉焊条以及单面焊双面成型等方法的应用。部分船厂还建立了平面分段流水线，实现了平面分段装配以及焊接的机械化和自动化。

为进一步提高造船焊接高效专用化率，国外自八十年代初以来，二氧化碳半自动焊工艺以异常的速度迅速普及起来。

国内二氧化碳半自动焊工艺从1982年开始，也有较大的发展。二氧化碳焊工艺在造船

中的应用是方向，只要广大焊接工作者共同努力，一定会迎来可喜的普及局面，使焊接高效专用化率指标，有一个较大幅度的增长，这也是造船焊接发展的第四阶段。

二、造船焊接技术的展望

八十年代初期以来，造船焊接技术虽有一定的发展，但至今采用的焊接方法仍以手工焊为主（占70%以上）。随着造船工业的发展，要求造船焊接质量和劳动生产率都必须相应地提高。目前采用的焊接方法仅几种，焊接高效专用化率很低，致使焊接生产率不能适应生产发展的需要。为此，必须依靠技术进步来提高焊接生产率，也即要创造一定条件，进行新的工艺方法的开发和现行工艺方法的改进完善，特别要先抓好几种成熟的高效率焊接方法的推广应用。结合国内实际情况，应优先发展重力焊、低角度弹力焊的应用，积极推广下行焊条和高效铁粉焊条，特别要进一步推广二氧化碳焊工艺。

应该指出，为确保焊接高效专用化率的增长，要求从船舶设计到施工等各环节，都应以保证焊接质量和提高焊接效率为原则。另外，在高效焊接方法推广的中间阶段，会出现焊接高效专用化率与焊接效率较大幅度的增长；但到一定阶段后，焊接高效专用化率会达到半饱和状态，进一步提高将会遇到困难，这时就必须调整各种焊接方法的比例，以更高效率的焊接方法取代之。如较大范围地采用二氧化碳半自动焊工艺，以替代部分下行焊或其它焊接方法。

我国造船焊接的远期规划，主要是充分运用技术手段，在提高焊接高效专用化率的同时，还需提高各种方法的效益，并要加强焊接技术管理和改进生产组织，以保证焊接生产率的持续增长。

第一章 焊接基础理论

第一节 焊接电弧

一、焊接电弧的产生

在一定的条件下，电流不仅能通过固体的金属导体，而且也能够通过液体和气体。电流通过气体的现象称为气体放电，电弧放电是气体放电的一种形式。在焊条与焊件间的气体介质中产生持久的、有力的放电现象，称为焊接电弧。

在一般情况下，由于气体的分子和原子都是呈中性的，气体中没有带电质点，所以气体不导电，此时电弧也就不能自发地产生。为了引燃电弧，必须使两电极间的气体间隙内具有带电质点，这也是电弧产生和维持的重要条件。在电弧中遇到的带电质点可能是电子、阳离子或阴离子。在二个电极的间隙中，形成带电质点的过程称为电离。电离的结果使非导体的气体具有一定的导电性能。为了使气体电离，必须消耗一定的能量，使气体电离所需的能量称为电离电位(或电离功)。不同的气体或元素，由于原子构造不同，其电离电位也不同。表1-1为常用元素的电离电位。

表1-1 常用元素的电离电位

元 素	钾	钠	钡	钙	钛	铝	锰	铁	氢	氧	氮	氩	氟	氖	氦
电离电位 (伏)	4.33	5.11	5.19	6.10	6.80	7.35	7.40	7.83	13.5	13.6	14.5	15.7	16.9	21.5	24.5

电离现象不但发生于气体元素中，而且更容易发生在金属元素中，电离电位的大小由金属的性质决定。一般来说，碱金属和碱土金属如钾、钠、钡、钙等具有较小的电离电位。

在焊接时，使气体介质电离的方式主要有碰撞电离和热电离等。

碰撞电离：带电质点由于电场的作用而加速运动，使它具有很大的动能，在运行的过程中与中性原子相碰撞时，由于能量的转化，能促使中性原子产生电离。当电弧长度不变，两极间的电压越高，带电质点的运动速度就越快，产生碰撞电离的作用越强烈。

热电离：焊接电弧具有很高的温度(弧柱中心温度达 5000~8000 K)，在高温作用下，气体的分子或原子的运动速度很快，它们中间的电子也以高速度运动；当电子的高速运动所产生的离心力大于原子核对它的吸引力时，电子就脱离原子，而使原子变成阳离子和电子。温度越高，热电离作用就越大。

焊接时，如果仅有气体电离，而阴极不能发射电子，也即在两极间没有电流流通，电弧还是不能形成。因此，阴极电子发射和气体电离都是电弧产生和维持的必要条件。

阴极的金属表面连续地向外发射出电子的现象，称为阴极电子发射。正常情况下，

电子是不能自由离开金属表面向外发射的，要使电子冲出电极金属表面产生电子发射，就必须给电子加一定的能量。焊接时，根据阳极所吸收能量的性质不同，电子发射的方式可分为热电子发射、场致电子发射、撞击电子发射等。

热电子发射：焊接时，阴极表面温度很高，阴极中的电子运动速度很快，当电子的功能大于电极内部正电荷的吸引力时，电子就会冲出阴极表面，而产生热电子发射作用；电极表面温度越高，则热电子发射作用越强烈。

场致电子发射（也称自发射）：在强电场的作用下，由于电场对阴极表面电子的吸引力，电子可以获得足够的动能而从阴极表面发射出来，这种发射甚至可以在室温时发生。场致电子发射除取决于电极材料外，还取决于电场强度，两极间的电压越高，则场致电发射作用就越大。如阴极表面有高低不平的凸起部分存在时，这部分的端部形成局部的高强度电场和大电流密度，在这些点上电子就开始冲出，场致电子发射就会增大。

撞击电子发射：运动速度较高，能量较大的阳离子对阴极表面的冲击，也会引起阴极表面金属的电子发射。如电场强度越大，由于阴极的吸引，阳离子的运动速度也越快，则产生的撞击电子发射作用也越强烈。

实际上在焊接时，以上的几种电子发射作用常常是同时存在，互相促进的，但在不同条件下，它们所起的作用可能稍有差异。例如，在引弧过程中，热电子发射和场致电子发射起着主要作用。电弧正常燃烧时，如果用熔点较高的材料（钨或碳等）作阴极，则热电子发射作用较显著；若用铜或铝等作阴极时，撞击电子发射和场致电子发射就起主要影响；而钢作阴极时，则和热电子发射、撞击电子发射、场致电子发射都有关系。

二、焊接电弧的组成

焊接电弧由阴极区、阳极区和弧柱三个部分所组成(见图1-1)。

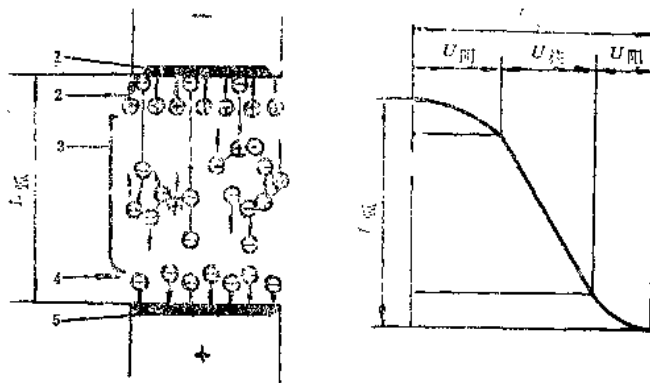


图1-1 焊接电弧的构造和各区的电压降

1—阴极斑点；2—阴极区；3—弧柱；4—阳极区；5—阳极斑点； L —电弧长度

阴极区：是电弧中最重要的区域。在阴极区的阴极表面有一个明亮部分称为阴极斑点，电子在一定的电场和热能的作用下，就能从阴极斑点发射出来，这个区域的尺寸很小，它的厚度只有万分之一毫米左右。从阴极斑点发射出来的电子，受阳极吸引很快就离开阴极向阳极移动；电弧中被电离的阳离子也受阴极的吸引向阴极移动。

阳离子飞向阴极时，对阴极的撞击和阳离子与阴极发射出来的电子结合成中性质

点，都要放出能量，这些能量都传给阴极，使阴极温度升高；但由于阴极发射电子要消耗一些能量，以及阴极金属材料的熔化、蒸发要吸收很多热量，所以阴极的温度一般都低于阴极金属材料的沸点(见表1-2)。

表1-2 阴极区及阳极区的温度和电压降

电极材料	材料沸点 (K)	阴 极 区		阳 极 区	
		温 度(K)	电压降(伏)	温度(K)	电压降(伏)
铁	3271	2400	8~12	2600	2~4
铜	2580	2200	12~13	2450	10~11
镍	3173	2370		2450	
钨	6200	3000		4250	

注：电弧中的气体为空气

阳极区：在阳极区的阳极表面也有一个明亮部分称为阳极辉点。电弧放电过程中，电子流以极高的速度冲击阳极表面，并与阳极区的阳离子中和而放出大量热能和光能。阳极辉点就是由于电子对阳极表面撞击而形成的。但是电子的质量很小，运动速度很大，所以在阳极表面聚集的密度相对就很小，而阳极区的厚度与阴极区的厚度相近，因而阳极电压降通常低于阴极电压降。

在一般情况下，和阴极比较，由于阳极能量只消耗于材料的熔化和蒸发，而不需消耗发射电子的能量，因此在和阴极材料相同时，阳极辉点的温度略高于阴极辉点。

在生产实践中，还发现用不同的工艺方法焊接时，阴极与阳极的温度高低有变化(见表1-3)。这是由于电弧各区域的电过程不同，因而电弧的阴极和阳极所得到的能量也不同的缘故。

表1-3 各种焊接工艺方法的阴极与阳极温度比较

工艺方法	一般的手 工电弧焊	钨极氩 弧焊	熔化极氩 弧焊	CO ₂ 气体保护焊	埋弧自动焊
温度比较	阳极温度 > 阴极温度		阴极温度 > 阳极温度		

一般在手工电弧焊时，阳极温度比阴极温度高一些；钨极氩弧焊时，阳极温度也比阴极温度高，这是因为钨极发射电子的能力较强，在较低的温度下就能满足发射电子的要求。

气电焊时，气体对阴极有较强的冷却作用，这就要求阴极具有更高的温度及更大的发射电子的能力。由于采用的电流密度较大，因此阴极温度较阳极温度高。例如CO₂气电焊或Ar + CO₂气电焊时，采用直流电源，熔化电极接负极，焊接生产率就较高。

埋弧自动焊时，因为焊剂熔化后产生的氟等蒸汽易形成阴离子，所以要求阴极要具备更强的发射电子的能力，这些阴离子在阳极区与阳离子中和时，会放出大量的能量，同时使用的电流密度也较大，因而阴极温度较阳极高。

弧柱：弧柱是处于阴极区和阳极区之间的电弧气柱。由于阴极区与阳极区的距离极短，因此弧柱长度就可以认为是电弧长度。弧柱通常呈圆锥体和球体形状。在弧柱中所进行的过程比较复杂。它是自由电子、阴离子向阳极转移与阳离子向阴极转移过程的通

路，同时又发生电离作用，以及电子、离子在转移的过程中发生相互复合的现象。

弧柱的温度不受电极材料沸点限制，因此弧柱温度通常高于阴极辉点和阳极辉点，可达5000~8000K。弧柱的温度取决于弧柱中的气体介质和焊接电流。一般情况下，焊接电流越大，弧柱中电离程度也越大，弧柱温度也越高。

以上是直流电弧的温度分布等情况，而交流电弧由于极性是正、负交替改变的，因此两个电极区的温度分布基本相同(近似于它们的平均值)。

通常我们测量出的电弧电压就是阴极电压降、阳极电压降以及弧柱电压降的总和(见图1-1)，可用下式表示：

$$U_{\text{弧}} = U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}} + U_{\text{柱}} = U_{\text{阴}} + U_{\text{阳}} + bL_{\text{弧}}$$

式中 $U_{\text{弧}}$ ——电弧电压(伏)；
 $U_{\text{阴}}$ ——阴极电压降(伏)；
 $U_{\text{阳}}$ ——阳极电压降(伏)；
 $U_{\text{柱}}$ ——弧柱电压降(伏)；
 b ——常数，一般为20~40伏/厘米；
 $L_{\text{弧}}$ ——电弧长度(厘米)。

三、焊接电弧的静特性

焊接电弧是焊接回路中的负载，它起着把电能转变为热能的作用。当电弧燃烧时，电弧两端的电压降与通过电弧的电流值是不成正比的，其比值随电流值的不同而变化。在电弧长度一定时，稳定状态下燃烧的电弧电压与焊接电流之间的关系称为焊接电弧的静特性，亦称静态伏安特性。表示它们关系的曲线称为焊接电弧的静特性曲线(见图1-2)。

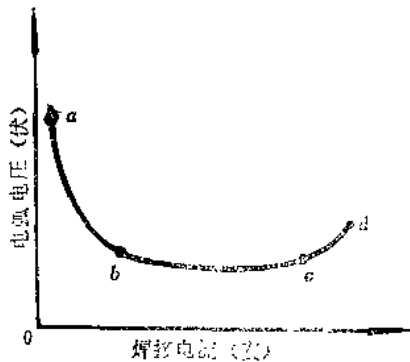


图1-2 焊接电弧的静特性曲线

从图1-2可以看出，电弧静特性曲线呈U形。开始左面a-b段，是在电流很小的情况下的变化。在小电流范围内，随着电流的增大，电弧电压是下降的，电流增大使电弧的温度升高，气体电离和阴极电子发射就增强，所以这时维持电弧所需的电弧电压就随电流的增大而降低。

在正常规范时，电流通常从几十安至二、三百安，这时的电弧静特性如图1-2的b-c段所示，加大电流只是增加对电极材料的加热和熔化程度，此时电弧电压不再随着电流强度的改变而变化。由于在中等电流范围内，电弧电压不随电流强度而变化，因此曲线是平的。这个现象具有重要的实际意义，在手工电弧焊时，可以采用允许范围内任意的电流强度，而不必改变电弧电压的数值。此时的电弧电压只随电弧长度成正比的变化(见图1-3)。

当焊接电流从曲线c点继续增加时，如果电极直径仍然不变(电流密度很大时)，由于电极区的(阴极或阳极区)电流密度过大，电极辉点受电极端面积的限制，而相对地

比正常状态有所压缩,使电极区的电压降增大,于是两极间维持电弧所需的电弧电压反而升高(见图1-2)。这种情况只有采用小直径电极,大电流焊接时才有可能产生,例如CO₂气体保护焊等。

四、焊接电弧的极性

在焊接过程中,电弧焊机的两个极分别接到焊条和焊件上,形成一个完整的焊接回路。用弧焊发电机焊接时,极性接法有两种:焊件接正极,焊条接负极,称为正接极(简称正接);焊件接负极,焊条接正极,称为负接极(简称反接)。弧焊变压器的极性是交变的,因此不存在正接和反接。

手工电弧焊时,极性的选择主要根据焊条药皮类型和对焊件的加热要求而定。当使用结427、结507等碱性焊条时,应采用直流反接。在使用酸性焊条时,一般采用交流电源,当采用直流电源,焊接厚板时,通常采用正接,因为阳极部分的温度高于阴极部分,焊件可以得到较大的熔深,而在焊接薄板时,则应采用反接。

鉴别弧焊发电机极性的方法主要有以下几种:

1. 用直流电压表来鉴别 将直流电压表的正负极分别接在焊机的两个接头上,这时如果发现电压表上的指针向反方向偏转时,则接在电压表正极的一端实际上是负极,而另一端就是正极。
2. 用碳棒鉴别 当碳棒引弧后,若能把电弧拉长到30~40毫米不断弧,而熄弧后碳棒沿直径方向更为细削,端面相对变尖,则说明是正接;反之,电弧一拉长就熄灭,碳棒极易发红,端面变钝,则说明是反接。
3. 用碱性焊条鉴别 根据焊工的实践经验,观察电弧的燃烧特性来判断极性。若电弧燃烧稳定,飞溅很小,且声音较平静均匀,则使用的极性是反接。如果电弧燃烧不稳定,飞溅大,声音又很暴躁,则说明使用的极性是正接。

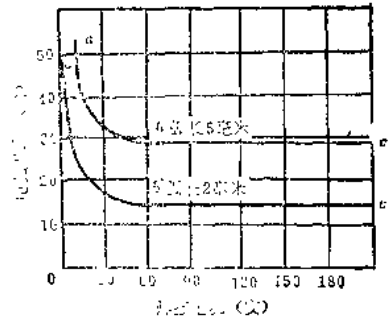


图1-3 不同电弧长度时的电弧静特性

第二节 焊接冶金基础

一、焊接接头的组织

(一) 焊接冶金的特点

1. 焊接熔池的构成 当两个被焊金属的边缘及填充金属被电弧加热到熔化状态时,熔化金属相互混合,形成一个液态金属池坑,这就是焊接熔池。当热源移开后,熔池温度迅速降低,液态金属在凝固后即形成焊缝金属。焊接熔池是焊接过程冶金反应集中进行的场所。在一定热功率条件下,焊接速度与焊接熔池存在时间的关系见表1-4。从表中可以看出,减低焊接速度可以增加焊接熔池的存在时间。熔池存在时间与焊接线能量呈正比关系,可用下式表示:

$$t = K \frac{UI}{v}$$

式中 K ——常数；
 U ——电弧电压（伏）；
 I ——焊接电流（安）；
 v ——焊接速度（米/时）。

表1-4 焊接速度与焊接熔池存在时间的关系

焊接方法	手工电弧焊					埋弧自动焊				
	3	5	7	9	11	30	40	50	60	70
焊接速度(米/时)										
焊接熔池存在时间(秒)	30	18	13	10	8.2	12	9	7	6	5.2

焊缝金属是熔化了的基本金属和填充金属经过相应的冶金反应后形成的合金。它的性能随着基本金属和填充金属在焊缝中的比例不同而改变，而它所占的比例与焊接方法、焊接规范、钢板厚度、坡口型式等因素有关。现将手工电弧焊和埋弧自动焊焊缝的基本金属和填充金属所占的比例列于表1-5中。

表1-5 焊缝中基本金属和填充金属所占的比例

焊接方法	基本金属在焊缝金属内所占的比例	填充金属在焊缝金属内所占的比例
手工电弧焊	20~70%	80~30%
埋弧自动焊	60~70%	40~30%

2. 焊接冶金过程的特点 焊接时的冶金反应过程，对焊缝金属的化学成分和物理性能产生重要影响，并将直接影响着焊缝的完美性。焊接冶金过程与熔池的下列特点有关：

(1) 液态金属的温度高且梯度大：作为热源的电弧温度达5000~8000 K，极易将金属加热到高温，焊接熔池的平均温度在2000℃以上，这就增强了各种元素的化学活性，有利于冶金反应的进行。

(2) 熔池体积小而存在时间短：熔池的体积很小，手工电弧焊时为2~10厘米³，埋弧自动焊时为9~30厘米³，同时由于熔池的存在时间短，这对冶金反应达到平衡状态是不利的，容易造成化学成分的偏析。

(3) 化学反应激烈：填充金属熔化后以熔滴的形式进入熔池，熔滴在电弧的高温下与气体、熔渣接触面积大，所以化学反应很激烈。

(4) 熔池中的液态金属被激烈搅动：由于电弧吹力的存在，使熔池中的液态金属经常处于搅动状态，这有利于液体熔渣相互作用，并且也有利于气体的吸收及逸出，容易使反应达到平衡。

(二) 焊缝金属的结晶过程

焊接熔池从高温冷却到常温状态，中间经过两次组织变化过程：第一次是从液体变成固体时的结晶过程，称为焊缝金属的一次结晶；第二次是当凝固的焊缝金属温度低于相变温度时，又发生了组织转变，称为焊缝金属的二次结晶。

1. 焊缝金属的一次结晶 焊接时，焊接熔池在热源离开一定距离后，由于热的传导，液态金属在周围金属的冷却作用下开始凝固并结晶。焊接熔池的结晶过程具有下列特点：

- (1) 熔池中的液态金属同时受到电弧的加热作用和周围固体金属的冷却作用；
- (2) 焊缝金属的平均结晶速度基本上相等于热源的移动速度；
- (3) 焊缝金属在运动状态下结晶，熔池体积小，冷却快，液态金属处于过热状态。

焊接熔池的结晶是从熔合线上开始发生，当熔池中液态金属的温度降低到熔点时，液态金属就从熔池温度最低的熔合线部位开始形成晶核，然后晶核吸附周围液体的原子进行长大。晶体是沿着与散热方向相反的方向长大，同时它也向着两侧方向生长，但因受到相邻的正在生长的晶体所阻挡，因此晶体的生长方向是指向熔池中心的，因而形成柱状晶体。柱状晶体不断长大至互相接触，最后凝固在焊缝中心和靠近表面的地方。熔池的液态金属全部结晶成固体时，焊缝的一次结晶过程结束，图 1-4 即为不同熔深的焊缝金属结晶示意图。

随着焊接热源的移动，熔池的结晶过程一直在连续地进行着。焊接速度越快，熔池结晶也越快，结晶后的晶粒也较细；反之，焊接速度越慢，熔池体积越大，凝固时间越长，其晶粒也越粗大，焊缝金属的塑性和韧性也越差。

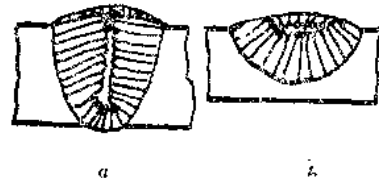


图1-4 焊缝金属结晶示意图
a—窄而深的焊缝，b—宽而浅的焊缝

2. 焊缝中的偏析现象 焊接熔池结晶时，各种合金的组成元素分布不均匀的现象称为偏析。在焊缝中常遇到的是显微偏析（枝晶偏析）和区域偏析（带状偏析）。偏析都是在焊缝一次结晶时产生的，它对焊缝质量有很大的影响，不仅能造成焊缝化学成分不均匀和降低性能，而且也是产生裂纹和气孔的主要根源。

(1) 显微偏析：显微偏析又称枝晶偏析，是指在金属中晶粒内部的化学成分不均匀。首先结晶的柱状晶粒比原来的液态合金和后来成长的结晶部分所含的合金元素和杂质少，在晶粒中心部分和开始结晶的部分是最纯的金属；而在外围部分和以后凝固的柱状晶粒之间的空间内，将含有较多的合金元素和杂质，从而形成了显微偏析。

(2) 区域偏析：在整个焊缝金属范围内，合金元素分布不均匀的现象称为区域偏析。由于焊缝结晶不是同时进行的，所以容易使低熔点的合金和杂质积聚在最后凝固的焊缝中部，而造成区域偏析。焊缝金属区域偏析的大小，与合金成分和冷却速度有关。合金中其它元素或杂质多时，易造成区域偏析；焊缝冷却速度快时，不易造成区域偏析。此外，偏析物的分布情况与焊缝形状有关。当焊缝窄而深时，形状系数小，杂质聚集在焊缝中部，形成了焊缝中心的脆弱面（见图 1-5a），这不仅是产生焊缝裂纹的主要根源，而且也使机械性能严重下降；而宽而浅的焊缝，形状系数大，杂质主要集中在焊缝上部（见图 1-5b），对焊缝性能的影响较小，不易造成热裂纹，所以在厚板焊接时，宜采用多层多道焊代替一次深熔焊。

在上述两种偏析中，显微偏析杂质分散，对焊缝性能影响较小，而区域偏析杂质集中，对焊缝性能影响较大。



图1-5 焊缝形状对区域偏析的影响
a—窄而深的焊缝，b—宽而浅的焊缝

3. 焊缝金属的二次结晶 焊缝金属的二次结晶组织，是在一次结晶之后，金属继续冷却到相变温度以下，经过二次结晶而产生的实际组织。如低碳钢焊接时，一次结晶的晶粒都是奥氏体，当冷却到低于相变温度时，奥氏体分解为铁素体和珠光体。但由于焊缝的冷却速度较快，所得珠光体的含量一般比平衡组织中含量高，冷却速度越快，珠光体含量越高，而铁素体含量就较少，所以焊缝金属的硬度和强度也都有所提高，而塑性和韧性则有所降低。

(三) 焊接接头热影响区的组织

焊接接头由焊缝金属和热影响区两个部分组成。在焊接热源作用下，焊缝两侧的金属发生组织性能变化之区域称为热影响区。

焊接接头的机械性能不仅取决于焊缝的化学成分和有无缺陷，而且焊缝的结晶与热影响区金属的组织特点等因素，都对焊接接头的机械性能有着极其重要的影响。

现以低碳钢为例，来讨论热影响区的组织变化。

焊接接头热影响区金属实际上经受了一次热处理过程，其组织取决于材料本身的成分、加热温度和冷却速度。对低碳钢来说，其淬火倾向很小，可以不考虑冷却速度的影响。判断低碳钢焊接接头的热影响区组织，主要根据加热温度。热影响区金属的加热温度是不均匀的，越是靠近焊缝，温度越高；离焊缝越远，温度越低。低碳钢焊接接头的温度分布与组织变化见图1-6。它表示焊接时焊缝及热影响区各点的金属所达到的最高温度，并对照碳化了

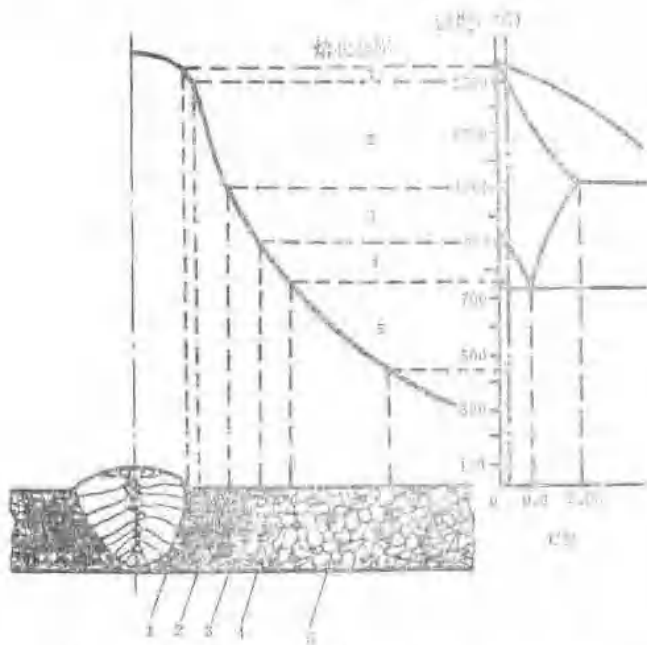


图1-6 低碳钢焊接接头的温度分布与组织变化图
1—不完全熔化区；2—过热区；3—正火区；4—不完全再结晶区；5—再结晶区

了的铁碳合金状态图，就可估计焊缝和热影响区上每一位置的金属，在焊接加热时发生的组织变化和冷却到常温时所得到的相应组织。

由于受热的温度不同，热