

船 舶 焊 接

孙维善 编

国防工业出版社

前 言

本书是根据1982年全国高等院校造船专业教材会议所订计划编写的。其初稿是天津大学船舶工程专业所用的《造船焊接学》讲义，后来又根据教材评审会议和各校意见进行了改写。本书可供高等院校船舶工程专业和海洋工程专业使用。

本书是以造船中常用的电弧焊方法为主，介绍了电弧焊的基本理论、工艺方法、所用焊接材料与设备、焊接接头质量及检验、金属材料焊接和焊接应力及变形等。由于近年来对焊接结构的脆性断裂问题的研究有了很大发展，因此本书也对此作了较详细介绍。

本书在编写中力求深入浅出、理论联系实际。对于工艺性较强的部分尽量从理论上进行分析，对于理论性较强的部分尽量结合生产实际加以阐述，目的在于培养学生分析问题和解决问题的能力。

书中所用单位制为公制，为便于推广使用国际单位制，因此在公制单位后括号内还注出相应的国际单位制。

《船舶焊接》作为一门专业基础课，应安排在学生学完基础课与船体结构、材料力学、金属学及热处理等课程和金工实习之后学习。本书的讲授大约需要40学时。对于书中实践性和直观性较强的内容，建议在现场教学中讲授。

本书在编写过程中参阅了武汉水运工程学院、大连工学院和华南工学院的造船焊接教材，还得到赵家瑞、贾安东、顾云霞等同志的支持和帮助，在此一并表示感谢。

本书承镇江船舶学院张伟之、武汉水运工程学院王承权两同志审阅，并提出许多宝贵意见；最后由上海交通大学李传曦副教授审阅定稿，他不仅是审定者，而且是给编者帮助最多的指导者。在此，对以上三位同志表示深切谢意。

由于水平有限，书中内容难免有谬误之处，敬请使用本书的教师和读者惠予批评指正。来信请寄天津大学。

编 者

内 容 简 介

本书共分九章，以造船生产中常用的电弧焊方法为主，介绍了电弧焊的基本理论、工艺方法、所用焊接材料及设备、焊接接头质量的检验、焊接应力与变形等，也介绍了金属材料的切割和焊接以及焊接结构的脆性断裂等。

本书可作为高等院校船舶工程专业和海洋工程专业教材，也可供从事船舶焊接工作的技术人员参考。

船 舶 焊 接

孙维善 编

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张11¹/₂ 264千字

1985年6月第一版 1985年6月第一次印刷 印数：0,001—4,040册

统一书号：15034·2904 定价：2.15元

目 录

绪论	1
第一章 电弧焊的基本理论	5
§ 1-1 焊接电弧	5
§ 1-2 焊缝的形成过程	11
§ 1-3 焊接接头的金相组织及其机械性能	17
第二章 手弧焊	22
§ 2-1 焊接接头和焊缝的形式	22
§ 2-2 手弧焊焊接技术	24
§ 2-3 电焊条	31
§ 2-4 手弧焊机	43
第三章 埋弧自动焊	50
§ 3-1 埋弧焊的实质及其优越性	50
§ 3-2 船厂常用的埋弧自动焊接设备	51
§ 3-3 埋弧焊用的焊接材料	53
§ 3-4 埋弧自动焊工艺	55
第四章 其它焊接方法	63
§ 4-1 CO ₂ 气体保护焊	63
§ 4-2 氩弧焊	70
§ 4-3 电渣焊	76
§ 4-4 水下焊接	81
第五章 金属的切割	87
§ 5-1 氧气切割	87
§ 5-2 等离子弧切割	93
§ 5-3 碳弧气刨	97
第六章 金属材料的焊接	100
§ 6-1 金属的可焊性	100
§ 6-2 普通低合金结构钢的焊接	104
§ 6-3 铝及铝合金的焊接	114
第七章 焊接接头质量及检验	117
§ 7-1 焊接接头的常见缺陷	117
§ 7-2 焊接质量检验	119
第八章 焊接应力与变形	125
§ 8-1 焊接热过程	125
§ 8-2 焊接应力与变形产生的原因	127
§ 8-3 焊接应力	135
§ 8-4 焊接变形	140
第九章 焊接结构的脆性断裂	156
§ 9-1 概述	156
§ 9-2 金属材料的断裂及其影响因素	158
§ 9-3 金属材料脆性断裂基本理论及抗裂性能试验方法	162
§ 9-4 预防船体结构脆性断裂的措施	171
主要参考文献	178

绪 论

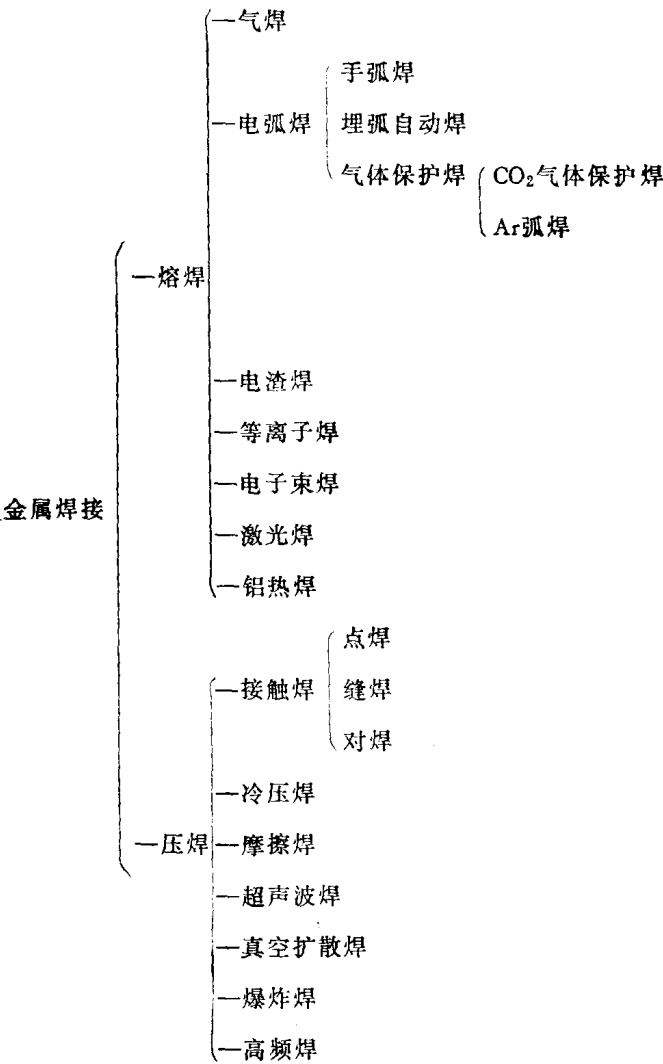
各种金属结构中，构件常用的连接方法有铆接和焊接两种，前者是可拆卸的连接，后者是不可拆卸的连接。

所谓焊接，就是通过加热或加压，或两者并用，并辅以填充材料或不用填充材料而使焊件达到原子结合的一种加工方法。

一、焊接方法的分类

随着生产和科学技术的不断发展，目前金属焊接方法的种类很多。如果按照焊接过程的特点来分，可以归纳为两大类。

1. 熔焊



这一类焊接方法的共同特点是，利用局部热源将焊件的接合处及填充金属材料（不用填充金属材料也可以）熔化，并互相熔合，冷却凝固后而形成牢固的接头。电弧焊、电渣焊和气体保护焊等均属于这一类。

2. 压焊

这一类焊接方法的共同特点是，焊件不论加热与否均施加一定压力，使两结合面紧密接触产生结合作用，从而使两焊件连接在一起。接触焊和摩擦焊等都属于这一类。

还有一种连接方法叫钎接，它与熔焊相似，却又有本质的区别。当连接件进行局部适当加热后（但不到熔化状态），随之将熔化状态的钎料金属（熔点低于钎件）填充到连接件表面的空隙里，液态钎料与固态连接件的表面由于分子或原子间的互相扩散与结合作用，从而形成接头。

上表是金属焊接主要方法的分类。

二、焊接的优越性及其在造船工业中的地位

由于焊接技术先进、经济效益高，所以发展很迅速，并且很快在造船工业中得到应用。在本世纪以前建造的船舶多用铆接，从三十年代起逐步采用了焊接，现在焊接已成为造船中最主要的连接金属构件的方法。焊接对造船事业的发展极为重要，堪与木壳船向铁壳船的过渡相比拟。船舶建造工艺从铆接变为焊接，可以说是造船工业的第二次技术革命。

在造船工业中，焊接之所以能迅速取代铆接，并成为最主要的连接船体构件的方法，根本原因在于它具有比铆接高得多的技术经济指标。

1. 焊接船体结构优越

（1）结构形式合理 焊接结构在接头处的整个截面是连续的，不象铆接结构那样因有铆钉孔而破坏了连续性；同时可使结构形式做得甚为合理。此外，焊着金属重量约占构件重量的1~1.5%，但在铆接结构中，铆钉重量占构件重量的3.5~4%，再加上接头处的重叠板条，因而一般铆接船比焊接船多消耗材料约10~20%。从图0-1中所示的几个基本情况可以看出焊接接头要比铆接接头省金属，而且接头既简单又美观。在同等排水量的情况下，焊接结构船舶比铆接结构船舶可增加载重量。

（2）结构强度高 焊缝的机械性能可与基本金属相等或稍高。

（3）焊接接头的不透水性好 由于焊缝致密，与结构形成整体，所以油密、水密性高。即使结构因碰撞或过载而发生残余变形时，焊接接头仍能保持不致渗漏，所以焊接船体设置的隔离舱比铆接的少。

2. 投资省、劳动条件好、生产率高

焊接船体构件的加工量较铆接的少，加工机床也较少，因而投资省。由于焊接船体可采用分段式建造，使60~70%的船体装配焊接工作量可以移到车间内进行，因而改善了劳动条件，扩大了施工作业面，同时分段在装配焊接胎架上施工，有利于实现流水线生产方式、预舾装等等。所有这些都有利于提高劳动生产率和生产过程的自动化，从而大大缩短船舶建造周期。

事物都是一分为二的。从焊接船的使用经验和焊接船的破损事故中，人们总结了焊接船体结构的一些特点。其中突出的是焊接结构的刚性较大，整体性较强。正因为这两

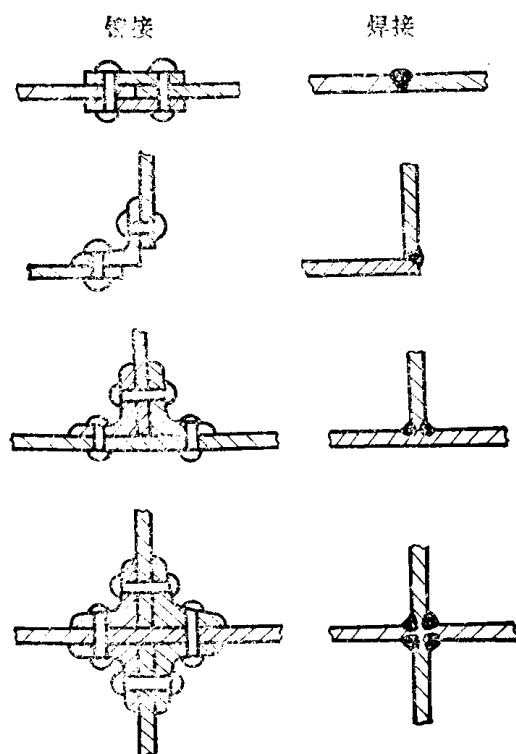


图0-1 铆接与焊接的比较

个特点，所以遇有结构应力集中的区域，往往容易发生裂纹，而且当一个构件产生裂纹后，就会迅速蔓延和扩展。

因此在设计船舶时，就要根据焊接船体结构的特点，合理地设计其结构，以保证构件的力线婉顺，消除有可能产生应力集中的节点；在建造中就要运用正确的焊接工艺参数、合理的焊接顺序，扬长避短，这样才能真正发挥焊接这一先进技术的作用，为发展祖国的造船事业做出贡献。

解放后，焊接技术与其它事业一样很快地发展起来，研究成功了许多新工艺、新设备和新材料。焊接技术由只能用于修理工作，而发展到在国民经济和国防建设各部门中的广泛应用。造船事业的不断前进与焊接技术的发展密切相关。1954年我国自己设计制造了铆焊结构的客货轮，使手弧焊在造船中获得了迅速发展；随之在埋弧自动焊的应用方面也取得了丰富经验；七十年代初，我国一些船厂向焊接自动化、高效率化方向迈开了大步，试验成功许多先进焊接技术，如铜衬垫压力架式单面焊双面成形自动焊，双丝铜滑块单面焊双面成形自动焊，垂直自动焊、重力焊等等。这些焊接工艺，与加工、装配等新工艺一起促进了造船工业的自动化、流水线生产，加速了船舶建造速度。七十年代我国成批地建造了万吨级远洋货轮、油轮、25000吨远洋散装货轮和50000吨级油轮。这些船舶不仅装备了我国海运队伍，而且打入了国际市场。

三、本课程的内容

焊接技术几乎在所有工业部门中都要采用，涉及的面甚广，内容也极为丰富，但本课程不可能包罗焊接技术的全部内容，而只是介绍一些与造船有关的焊接方法，焊接工艺以及焊接应力与变形等。具体内容如下：

(1) 电弧焊的基本理论 包括焊接电弧、焊缝的形成过程和焊接接头的金相组织及性能。

(2) 常用的焊接方法 包括手弧焊、埋弧自动焊和其它焊接方法,介绍它们的焊接工艺、焊接材料和焊接设备。在第二章中还介绍了焊接冶金中的一些基本理论知识,如焊缝渗合金、脱氧、脱硫、脱磷和气孔等。

由于金属的切割也是船舶建造过程中的重要加工手段,所以本书中还补述了一些金属的氧气切割、等离子切割和碳弧气刨的基本知识。

(3) 焊接应力与变形 这部分讲述焊接变形与应力产生的原因、影响焊接变形的因素、焊接应力对焊接结构的影响、减少焊接变形与应力的措施。

(4) 焊接结构的脆性断裂 这部分讲述金属材料断裂的类型及影响因素、金属材料脆性断裂的基本理论、抗裂性能试验方法和预防船体结构脆性断裂的措施。

(5) 金属材料的焊接 这部分内容是在介绍了金属材料可焊性概念及其试验方法之后,重点讲述低合金钢、铝及其合金的焊接,其中还讲述了金属材料焊接中常出现的裂纹问题。

(6) 焊接接头的质量检验 这部分综述了焊接接头中经常出现的缺陷,并对船厂中常用的两种无损探伤方法作了重点介绍。

第一章 电弧焊的基本理论

目前造船工业中采用的主要焊接方法有手弧焊、埋弧自动焊和气体保护焊。这些焊接方法有各自的工艺特点和适用范围,这将在以后的各章中分别予以介绍。由于它们统属于电弧焊,所以也有许多共同之点,本章内容就是介绍电弧焊的几个基本理论问题,包括:焊接电弧、焊丝熔化过渡、焊缝的形成过程、焊接接头的金相组织及其机械性能等。

§ 1-1 焊 接 电 弧

电弧是焊接的热源,它所产生的高温能将被焊金属和填充金属熔化,冷却凝固后形成焊缝。

一、焊接电弧的产生过程

图1-1为手弧焊接示意图。焊接时,将焊条与焊件各接到焊接电源的一个极上,当焊条接触焊件而又随即拉开的瞬间,在焊条端部和焊件之间就会产生明亮的电弧。

电弧是一种气体放电现象。在一般情况下,气体呈现中性,是不导电的。若使气体导电,则必须使气体的中性质点(分子或原子)离解成为带电荷的电子、正离子。

在一定情况下,气体分子或原子中的电子从外界获得足够的能量,能脱离原子核的束缚而成为自由电子,失去电子的原子成为正离子。

这种使中性气体分子或原子变成电子和离子的过程叫做“电离”,经电离的气体才有导电作用。

使气体电离所需的能量叫做电离电位(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。常见元素的电离电位如表1-1。电离电位越低的物质,越容易电离。

焊接电弧的产生,从现象上来看,虽然是在焊条与焊件接触又拉开的一瞬间形成的,但实际上可以分为“短路-空载-燃弧”三个极短的阶段,下面分别研究这三个阶段。

(一) 短路

焊条与焊件接触形同短路。由于焊条表面与焊件表面都不可能是绝对平整,而只是有几个突出的地方相接触,电流就从这些接触点流过(见图1-2)。

由于接触点的面积很小,所以流过这些点的电流密度极大,在接触点上产生大量电阻热。电阻热使接触点的温度骤然升高,部分金属熔化和蒸发,并使焊条药皮中某些易分解或低沸点的物质(钾、钠元素等)变成蒸气,也就是在两极间充满金属元素蒸气,为即将发生的电离创造了物质条件。同时由于电阻热的作用,使阴极表面的电子获得了

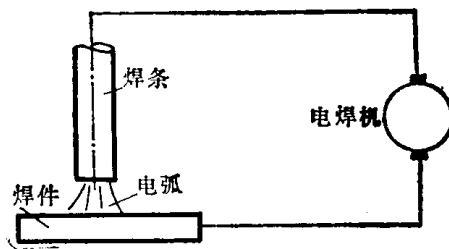


图1-1 焊接回路简图

表1-1 常见元素的电离电位

元 素		电离电位 (电子伏)	元 素		电离电位 (电子伏)
名 称	符 号		名 称	符 号	
钾	K	4.33	硫	S	10.30
钠	Na	5.11	碳	C	11.22
钡	Ba	5.19	氯	Cl	13.00
锂	Li	5.40	氢	H	13.50
铝	Al	5.96		H ₂	15.40
钙	Ca	6.10	氧	O	13.60
铬	Cr	6.74		O ₂	12.20
钒	V	6.76	二氧化碳	CO ₂	13.70
钛	Ti	6.80	氮	N	14.50
锰	Mn	7.40		N ₂	15.50
镁	Mg	7.61	氩	Ar	15.70
铜	Cu	7.70	氟	F	16.90
铁	Fe	7.83	氖	Ne	21.50
硅	Si	7.94	氦	He	24.50
钨	W	8.00			

能量，运动速度加快，并从阴极表面逸出。电子因受热而逸出电极表面的这一运动，称为“热发射”。电极获得的热量越多，温度越高，则热发射出来的电子数量越多。

电子只有得到足够的能量才能逸出阴极表面，这个能量叫“逸出功”，单位是电子伏特。各种物质的构造不同，它们的逸出功也各不相同，如表1-2所示。逸出功越低的物质，热发射能力越强。

表1-2 几种金属及其表面氧化物的逸出功

金 属 名 称		钾	钙	镁	铝	铜	铁	钨
纯 金 属	逸 出 功 (电子伏)	2.02	2.12	3.78	4.25	4.36	4.48	4.54
表面带有氧化物		0.46	1.8	3.31	3.9	3.85	3.92	—

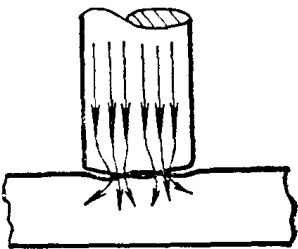


图1-2 焊条与焊件短路时的接触状态

当金属表面具有杂质（氧化物、硫化物及其它金属夹杂）时，元素的逸出功大大降低，热发射的能力显著增加。例如当钨中含有0.5%氧化钍时，它在高温时的热发射能力将比纯钨增加几十倍。

总之，在短路过程中，在比正常焊接电流大得多的短路电流作用下，产生大量电阻热，从而使阴极表面的电子迅速进行热发射，与此同时还生成大量金属元素的蒸气，这就是短路阶段的主要作用。

(二) 空载

焊条与焊件短路并随之将焊条拉开的瞬间，而且电弧尚未形成时，电源处于空载状态。

空载时的电压较高（如手弧焊机的空载电压 $U_0 \approx 50 \sim 70$ 伏），这个电压完全加在焊条端面与焊件之间的很短距离（ $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 厘米）内，在焊件与焊条之间形成很大的电场强

度。在这个强大电场作用下，电子脱离原子核的束缚而从阴极表面曳出，这叫做电子的自发射（或场致发射）。

空载时由于强电场的作用而引起的自发射是相当强烈的，但由于热发射和自发射都只是刚刚开始，还不能使两极间的气体充分电离，因此电弧尚未产生，但已为燃弧创造了条件。

（三）燃弧

由阴极发射出来的电子，在电场作用下产生加速运动，以很高的速度射向阳极；电子在通过两极空间时，又与极间的气体中性质点碰撞，而将其中的电子撞出轨道，形成所谓撞击电离。此时自由电子数和正离子数逐渐增多起来。极间气体的电离程度与阴极电子发射及电场强度有关。阴极电子发射越强烈，则碰撞电离的作用越剧烈。当电弧长度不变，两极间的电压越高，电场力的作用就越大，带电质点的运动速度也越大，则碰撞电离的作用也越强烈。

在电弧高温（弧柱中心温度达5000~8000K）作用下，原子核外电子获得热能以很高速度运动，并从距离原子核较近的轨道跃迁到较远的轨道，当电子获得的能量使其产生的离心力大于原子核对它的引力时，便脱离轨道形成为自由电子，原子因失去电子而成为正离子，这就是气体的热电离。温度越高，热电离的作用就越大。

此种链锁反应的电离过程使极间的中性质点变成带电的电子和正离子。电子与正离子分别跑向两极，进行中和放电，于是产生了电弧。

上述三个阶段是在极短的时间内连续进行的，通常称为引弧。

在电弧燃烧过程中仍继续进行着热发射和自发射。

在电弧中除电子和正离子之外，还可能产生负离子。这是在一定条件下，有些中性原子或分子吸附一个电子而形成的。各种元素吸附电子形成负离子的倾向决定于它们的电子亲和能。元素中电子亲和能越大，形成负离子的倾向越大。而元素的电子亲和能的大小决定于原子构造。卤族元素（氟、氯、溴、碘）的电子亲和能最大，氧、氢、氮、锂、钠等电子亲和能较小，而惰性气体（氦、氖）不能形成负离子。

电子是电弧导电过程中的主要角色。负离子虽然带有与电子相同的电荷，但因为它的质量比电子大得多，所以不能有效地传送电荷。负离子的生成使自由电子数量降低，从而削弱了电弧的导电性，使电弧燃烧的稳定性降低。

二、焊接电弧的构造及其静特性

（一）焊接电弧的构造及温度

焊接电弧由三部分组成，即阴极区、阳极区和弧柱（见图1-3）。

1. 阴极区

阴极区是在靠近阴极端部的地方。在这个区域中电压降较大，约为电弧气体介质的电离电位。该区沿弧长方向甚短，大约为 10^{-5} 厘米，所以该区的电场强度很大，可以达到 10^6 伏/厘米，这是场致发射产生的原因。

在阴极端面上，有一个很小的亮斑，称为阴极斑点。阴极斑点是电子集中发射的地方，电流密度很大。阴极区的电流由电子流与正离子流二部分组成，电子流流向阳极，正离子流流向阴极。

阴极斑点的温度很高，通常约2700~5000K，温度的变动与阴极材料有关。电极材料的熔点越高，阴极斑点的温度也越高，一般和电极材料的沸点相当。

2. 阳极区

阳极区是在靠近阳极的地方，阳极区稍长，约为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 厘米。在阳极端部表面也有一个光亮的斑点，称为阳极斑点。通过弧柱中的电子经阳极区的电场作用而加速运动，集中射到阳极斑点上。阳极斑点的电流密度很大，温度较阴极区高些。阳极区的电流基本上由电子流组成。

阳极区的电压降比阴极电压降小，且不受电极材料和电弧气体介质的影响。一般阳极电压降约为2.5伏左右。

由于阳极区的电压降较小，而其长度又比阴极区大，所以它的电场强度比阴极区小得多。

3. 弧柱

弧柱是在阴极区和阳极区中间的一段。它的长度比阴极区和阳极区大得多，占弧长的绝大部分，可以认为弧柱长度基本等于电弧的长度。

弧柱区充满气体分子和原子，以及由它们电离出来的电子、正离子和负离子。在弧柱区发生着激烈的反应，既有中性质点的碰撞电离和热电离，又有带正、负电荷质点的中和放电过程。由于其中进行着能量的充分转换，所以弧柱的温度最高，可达5000~8000K。

在弧柱的长度方向上，带电质点的分布是均匀的，所以弧柱压降与弧长成正比。在弧柱的径向上，带电质点的密度分布极不均匀，中心密度大而周围密度小，温度分布也以弧柱中心处高而周围低。

由上述可知，电弧电压由三部分组成，即阴极压降、弧柱压降和阳极压降。可表示为：

$$U_h = U_y + U_{ya} + U_z = a + bl_h$$

式中 U_h ——电弧电压(伏)；

U_y ——阴极电压降(伏)；

U_{ya} ——阳极电压降(伏)；

U_z ——弧柱电压降(伏)；

$$a = U_y + U_{ya}$$

b ——单位长度的弧柱压降，一般为20~40伏/厘米；

l_h ——电弧长度(厘米)。

(二) 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，在这一点上它与普通电阻有相似之处，但又有很大差异。普通电阻两端的电压降与负载电流的关系服从

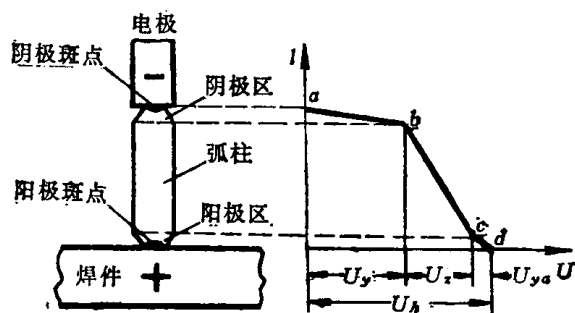


图1-3 电弧的构造和电压降的分布图

U_y —阴极电压降； U_z —弧柱电压降；

U_{ya} —阳极电压降； U_h —电弧电压。

欧姆定律, 即 $U=IR$, 在常温下或温升不高时, 电阻为常数, 电流与电压呈直线关系 (图1-4中的线1)。

电弧两端的电压降与通过电弧的电流值不成正比, 而是随电流值的不同而变化。在电弧长度一定时, 电弧两端的电压与焊接电流之间的关系称为电弧的静特性 (图1-4中曲线2)。

电弧静特性呈U形。在电流较小的情况下, 阴极和阳极的电压降与电流无关, 而弧柱的截面积及其导电性随电流的增大而增加, 因而弧柱中的电流密度和电势梯度有所减小。也就是说, 电弧电压随电流的增加而减小, 电弧的静特性呈下降趋势, 即图中曲线2的ab段。

当电流增长到正常焊接范围时 (大于100安), 阴极和阳极的电压降仍然保持不变, 弧柱的横截面积随电流增大而增加, 但弧柱的导电性无甚变化。因此弧柱电阻随电流成反比变化, 也就是说, 弧柱电压降及其电场强度不随电流增大而变化, 总的电弧电压也就保持不变, 即图中曲线2的bc段。

当焊接电流从曲线c点继续增加时, 如果电极直径不变, 显然, 流过电极的电流密度便增加了。由于电磁力、焊剂 (埋弧焊) 及保护气体 (气体保护焊) 的作用, 电弧截面积不是增大, 而是相应减小, 因而导电率有所减少。要保证一定的电流流过, 则必须有较大的电场强度, 所以随着电流的增加, 电弧压降升高 (曲线2的cd段)。

手弧焊时, 电弧静特性通常在水平段; 而细丝 CO_2 保护焊时, 电弧静特性才出现上升段。

在一般情况下, 电弧电压与弧长成正比地变化, 如图1-5所示, 即电弧越长电压越高。

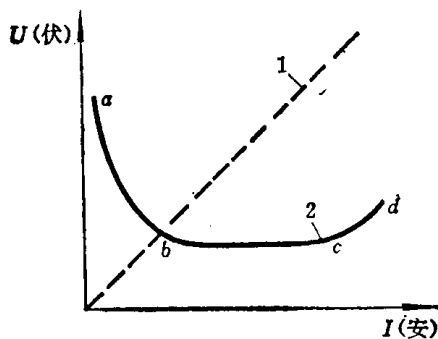


图1-4 普通电阻静特性与电弧静特性曲线

1—普通电阻静特性; 2—电弧静特性。

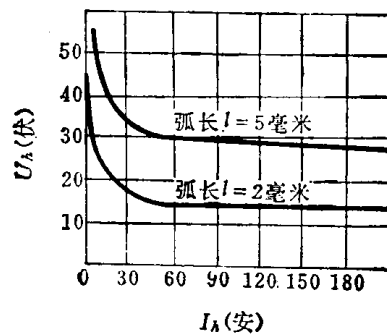


图1-5 不同电弧长度的

电弧静特性曲线

(三) 焊接电弧的稳定性

焊接电弧的稳定性是指电弧电压和焊接电流能否保持相对稳定, 同时也要保持一定的弧长、不偏吹、不摇摆、不熄灭。电弧燃烧稳定与否, 对焊接的质量影响很大, 从而也影响到产品质量。影响电弧稳定性的因素有以下几方面。

1. 焊接电源

焊接电源种类和极性都会影响电弧的稳定性。直流电焊接的电弧要比交流电的电弧稳定; 空载电压较高的焊接电源其电弧燃烧较空载电压低的稳定; 有良好动特性的焊机容易保证电弧稳定燃烧。

采用直流电焊接时, 由于焊机有正、负两极, 因而有两种不同的接法: 将焊件接到

电焊机的正极，焊条接至负极，这种方法叫正接极，又称正极性（图1-6(a)）。反之将焊件接至负极，焊条接至正极，称为反接极，或称反极性（图1-6(b)）。通常应根据焊条性质和焊件厚度来选用不同的接法。如用碱性焊条时，必须采用直流反接极，才能使电弧燃烧稳定。

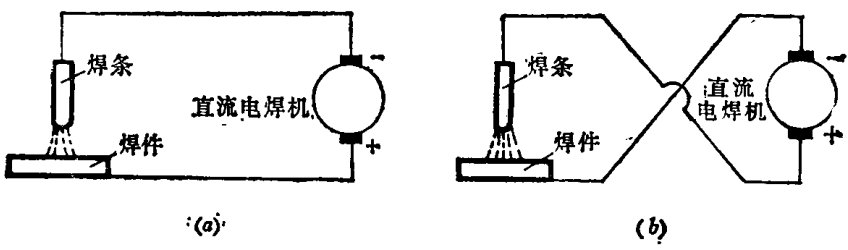


图1-6 用直流电焊接时极性的不同接法
(a) 正接极；(b) 反接极。

2. 焊条药皮

当焊条药皮中含有较多低电离电位元素（如钾、钠等）或它们的化合物时，容易保证电弧燃烧稳定。而药皮中含有较多氟化物时，由于在气体电离过程中，它容易获得电子而形成负离子，使自由电子大量减少，而且负离子还能与正离子结合成中性质点，使电弧的导电性变差，因而降低了电弧的稳定性。

焊条偏心（即焊条药皮厚薄不均匀），容易引起电弧偏吹；药皮局部剥落的焊条，电弧偏吹较之偏心焊条更为严重。

3. 气流

在露天（如室外船台）进行弧焊接时，风吹对电弧的稳定性影响很大，严重时甚至无法施焊。

4. 焊接处不清洁

焊接处若有铁锈、水分及油污等物质，它们在焊接时要吸热分解，因此减少了电弧的热能，影响电弧稳定燃烧。

5. 电弧的磁偏吹

正常状态下，电弧的轴线与焊条轴线是一致的（图1-7的(a)、(b)），但有时发现电弧会偏离焊条中心线而形成偏吹（图1-7(c)、(d)）。电弧偏离熔池以后，熔池金属容易受有害气体的侵入，结果使焊缝产生气孔、未焊透、焊偏等缺陷。

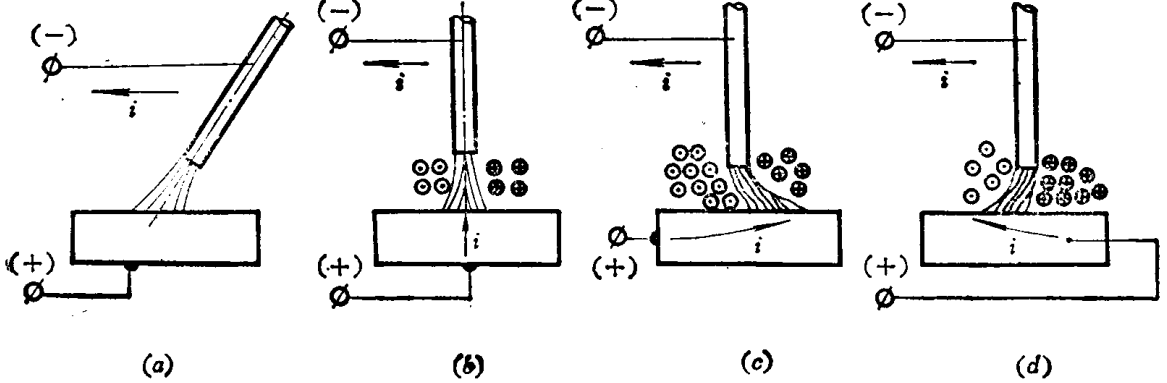


图1-7 正常的焊接电弧和电弧的磁偏吹

我们知道，在有电流流过的导体周围要产生磁场，而磁场又反过来对其载流导体产生作用力。当按照图1-7(c)、(d)那样接线用直流电焊接时，在焊条（或电弧）两侧的磁力线分布很不均匀，因此作用力不平衡，电弧偏向磁通密度较小的一侧，此即磁偏吹。电弧的磁偏吹程度随焊接电流增加而急剧增加。

还有一种情况也会导致磁偏吹，就是在电弧附近有铁磁性物质存在，部分磁力线通过铁磁物质，使近铁磁物质一侧的磁力线减少，也会出现不平衡的磁力，使电弧偏向铁磁物质一侧（图1-8）。

在焊接过程中，为了防止和减少电弧的磁偏吹现象，可适当改变接地线的位置，例如把图1-7(c)的接线改成(b)的方式，尽可能使弧柱周围的磁力线分布均匀；或适当调整焊条的倾斜角度，使焊条朝电弧偏吹方向倾斜（图1-9）；或采取短弧焊，皆可避免或减少磁偏吹。



图1-8 铁磁物质对电弧磁偏吹的影响

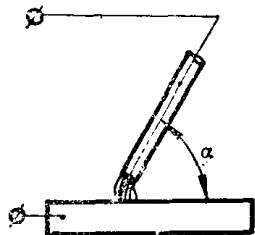


图1-9 倾斜焊条抵消磁偏吹

§ 1-2 焊缝的形成过程

在焊接电弧的高温作用下，焊条端部金属熔化形成熔滴，母材（或焊件）也局部熔化，形成熔池，熔池经熔滴填满，冷却后形成焊缝。

在熔池上部充满大量气体和熔渣，使熔池金属得到保护，也使焊缝金属的性能得到改善。

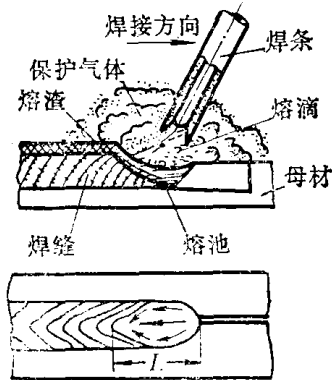


图1-10 电弧焊过程示意图

一、焊接电弧的有效热功率

单位时间内（秒）焊接电弧所产生的热量叫做焊接电弧的热功率，可用 q_0 表示。

$$q_0 = 0.24 U_h I_h \text{ (卡/秒)}$$

式中 U_h ——焊接电弧电压（伏）；

I_h ——焊接电流强度（安）。

但是电弧的热功率不是全部有效地用来加热焊件和焊条，而是有相当一部分损失掉了，例如向电弧周围介质散失等，真正用于焊接的热能仅为电弧热功率的一部分，这一部分称为焊接电弧的有效功率 q ，即

$$q = q_0 \cdot \eta_u = 0.24 U_h I_h \cdot \eta_u$$

式中 q ——表示单位时间内作用于焊件的有效热量（卡/秒）；
 η_u ——热效率。

不同的焊接方法，热量损失不尽相同，因此热效率依焊接方法不同而改变（见表1-3）。

表1-3 不同焊接方法的 η_u 值

焊 接 方 法	碳 弧 焊	金属极手弧焊	埋弧自动焊	氩弧自动焊
热效率 η_u (%)	50~70	70~85	80~95	70~80

二、焊条金属的熔化和过渡

焊接时，电流通过焊条芯产生电阻热，使焊条芯预热（通常可达600~700℃以上），同时焊条端部受到电弧的直接加热而迅速熔化。在这两部分热量中，弧热是使焊条熔化的主要热源。

焊条端部金属在弧热作用下发生熔化，而熔化的液体以颗粒状不断地向熔池过渡，这个过程称之为熔滴过渡。

熔滴过渡对焊接过程的稳定性、焊缝成形、飞溅及焊接接头的质量有很大影响，因此了解熔滴过渡的规律对于掌握熔化焊工艺是很重要的。

（一）熔滴过渡的作用力

焊条金属熔化后，受几种力的作用，这些力对熔滴过渡或起促进作用，或起阻碍作用，下面分别加以分析。

1. 表面张力

液体金属象其它液体一样，也具有表面张力，即液体在没有外力作用时，其表面积会尽量减小，聚集成球形。

焊条金属熔化后，在表面张力作用下，形成球滴状悬挂在焊条末端，只有当其它力超过表面张力时，才能使熔滴过渡到熔池中去。所以，平焊时表面张力对熔滴的过渡起阻碍作用。但在仰焊时，焊件处于焊条的上方，熔池的液体金属依靠表面张力得以保持在焊件上，不致滴落。

表面张力的大小与许多因素有关，如熔滴尺寸加大，熔滴表面张力也增加；液体金属温度越高，其表面张力越小；在保护气体中加入氧化性气体，可以显著降低液体金属的表面张力，使熔滴变细。

2. 熔滴的重力

熔滴在重力作用下有自然下垂倾向。平焊时，重力有利于熔滴的过渡，仰焊及立焊时，重力起阻碍熔滴过渡的作用。

3. 电磁力

电流流过导体时，在导体周围便产生磁场，此磁场又对导体产生压缩力 P （见图1-11），这种力称电磁力。

电磁力的方向垂直于导体表面（更确切地说是垂直于电流线），力图使导体截面积减小。电磁力对焊条未熔化部分无甚影响，而对熔化的金属则有显著的压缩作用。特别是在焊条末端与熔滴之间的细颈部分，电流密度最大，电磁力也最大。此种沿焊条轴线分布不均匀的电磁力，又构成一种轴向推力，促使熔滴脱离焊条，而向熔池过渡。

在空间任何位置进行焊接时，电磁力都有促进作用。在用大电流施焊时，电磁力是熔滴过渡中的主要力。

在气体保护焊中，调节焊接电流密度以控制熔滴的尺寸和过渡方式，这是电磁力的具体应用。

4. 气体的吹力

手弧焊时，焊条药皮的熔化稍微慢于焊条芯的熔化，因此在焊条末端形成一小段喇叭形套管（图1-12）。套管内因药皮造气剂而生成大量CO、CO₂和其它蒸气。这些气体因受热而急剧膨胀，顺着套管方向喷向焊件，将熔滴吹送到熔池，此即所谓气体吹送力。不论焊缝的空间位置怎样，这种气流都有利于熔滴金属的过渡。

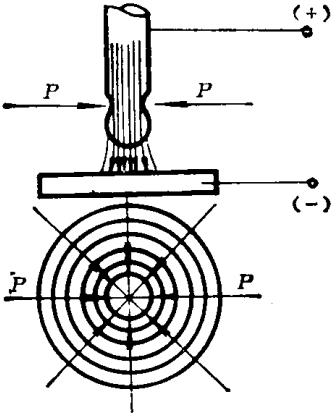


图1-11 作用在导体上的电磁力的收缩作用

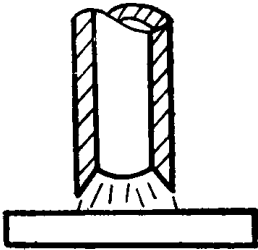


图1-12 沿套管形成的气体吹送力

5. 极点压力

焊接电弧中的带电质点主要是电子和正离子，在电场的作用下，电子向阳极运动，正离子向阴极运动，这些带电质点撞击在两极的斑点上，便产生了机械压力，称为极点压力，它阻碍熔滴的过渡。在直流正接时，阻碍熔滴过渡的是正离子引起的极点压力，在直流反接时，阻碍熔滴过渡的是电子引起的极点压力。由于正离子的质量大，动能高，所以极点压力大；电子的质量小、动能低，极点压力也较小。因此，反接时容易产生细颗粒过渡，而正接时则不容易产生。

综上所述，熔滴的过渡及其粒度大小，受上面五种力的制约，而这些力又与许多因素有关，例如：

（1）焊接电流 在几个主要作用力中，除了重力外，其余都受电流的影响。当焊接电流增加时，熔滴表面张力减小，而电磁力和气体吹送力增加，使熔滴变细，过渡频率和速度加快。

（2）焊丝直径 在其它条件保持不变的情况下，焊丝越粗，熔滴尺寸增大，表面张