

船舶制造工艺系列教材

船舶焊接技术

Welding Technic in Ship Fabrication



赵东升 主编



大连理工大学出版社

船舶制造工艺系列教材

船舶焊接技术

赵东升 主编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

船舶焊接技术 / 赵东升主编. — 大连 : 大连理工大学出版社, 2013. 6
船舶制造工艺系列教材
ISBN 978-7-5611-7297-1

I. ①船… II. ①赵… III. ①造船—焊接工艺—高等学校—教材 IV. ①U671.83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 215721 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail: dulp@dulp. cn URL: <http://www.dulp. cn>

丹东新东方彩色包装印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:185mm×260mm
2013 年 6 月第 1 版

印张:15 字数:356 千字
2013 年 6 月第 1 次印刷

责任编辑:邵 婉

责任校对:杨柏林

封面设计:波 朗

ISBN 978-7-5611-7297-1

定 价:26.00 元

前 言

船舶及海洋结构物是大型的焊接结构,焊接是船舶及海洋结构物制造工艺的主要研究方向之一。随着我国造船数量的增加和质量的不断提高,由造船大国向造船强国的不断发展,以及未来对海洋资源开发利用的重要性越来越突出,对于船舶焊接技术的要求也在不断提高。精度造船、绿色造船概念的提出和发展,使得船舶专业学生对船舶焊接技术的学习成为必要。但是,关于船舶焊接技术的专业书籍较少,针对性不强,或介绍较为分散,因此有必要结合船舶建造及船舶服役特点编写适用于船舶工程专业学生学习的教材。

据目前来看,船舶焊接技术仍然以电弧焊为主,尤其是气体保护焊在船舶建造中的应用占了80%~90%,因此,本教材第1章至第5章主要介绍了焊接电弧、电弧焊熔化现象以及钨极氩弧焊、CO₂气体保护电弧焊和埋弧焊三种船舶建造中最常用的焊接方法。第6章、第7章介绍了船体结构材料及其焊接。第8章介绍了船舶结构的疲劳强度。第9章介绍了目前在船舶焊接中存在的主要问题:焊接应力和变形。第10章介绍了焊接检验的主要方法。

在教材的编写过程中,作者参考并引用了其他院校的焊接教材等书籍及船级社规范,在此向其作者一并表示感谢。

感谢大连理工大学船舶制造国家工程中心主任刘玉君教授对本教材结构和内容的总体规划和建议以及在出版过程中的大力支持。同时感谢哈尔滨工业大学材料学院闫久春教授在百忙之中抽出时间审核教材并提出了许多宝贵意见。在本教材的编写过程中研究生高飞、孙敏科和王显栋参与了资料的整理和文字输入工作,在此也表示感谢。

受编者能力所限,教材中难免存在错误和纰漏,敬请谅解,并请广大读者多提宝贵意见。

编 者

2013年4月

目 录

第 1 章 焊接电弧	1
1.1 焊接电弧机理	1
1.1.1 气体放电与焊接电弧	1
1.1.2 电弧中的带电粒子	2
1.1.3 电弧导电机构	5
1.1.4 电弧产热及温度分布	6
1.1.5 电弧压力与等离子气流	9
1.1.6 直流电弧与交流电弧	13
1.2 焊接电弧特性	15
1.2.1 焊接电弧静特性	15
1.2.2 焊接电弧动特性	17
1.2.3 阴极斑点和阳极斑点	19
1.2.4 电弧的阴极清理作用	20
1.2.5 电弧的挺直性与磁偏吹	21
1.3 电弧焊中的保护气	23
1.3.1 保护气种类与纯度	24
1.3.2 保护气的分解	25
1.3.3 混合气体的选择及作用	25
1.3.4 保护气气流与保护效果	30
1.4 电弧的引燃与稳弧措施	32
1.4.1 接触引弧	32
1.4.2 非接触引弧	32
1.4.3 交流电弧稳弧措施	34
第 2 章 电弧焊熔化现象	36
2.1 母材熔化与焊缝成形	36
2.1.1 母材熔化特征和焊缝形状尺寸	36
2.1.2 焊接参数与工艺的影响	40
2.1.3 焊缝成形缺陷及形成原因	42
2.2 焊丝熔化与熔滴过渡	45
2.2.1 焊丝的熔化与熔化速度	45

2.2.2 熔滴上的作用力与熔滴过渡分类·····	50
第3章 钨极氩弧焊 ·····	55
3.1 钨极氩弧焊特点与应用·····	55
3.1.1 钨极氩弧焊原理与特点·····	55
3.1.2 钨极氩弧焊应用对象·····	56
3.1.3 钨极氩弧焊设备·····	56
3.2 TIG 焊中的钨电极·····	58
3.2.1 不同材料的电极·····	58
3.2.2 钨电极直径和前端形状·····	59
3.3 焊接方法·····	61
3.3.1 直流焊接与交流焊接·····	61
3.3.2 低频脉冲焊·····	62
3.3.3 高频脉冲焊·····	63
3.4 焊接条件的选择·····	65
3.4.1 焊接规范条件·····	65
3.4.2 焊接工艺条件·····	66
第4章 CO₂ 气体保护电弧焊 ·····	69
4.1 CO ₂ 气体保护电弧焊特点·····	69
4.2 CO ₂ 气体保护电弧焊的金属化学基础·····	70
4.2.1 CO ₂ 气体的氧化性及合金元素的氧化·····	70
4.2.2 CO ₂ 气体保护电弧焊的脱氧措施与焊缝金属合金化·····	72
4.2.3 CO ₂ 气体保护电弧焊气孔问题·····	74
4.3 焊接飞溅·····	75
4.3.1 减少飞溅的措施·····	76
4.3.2 新型控制方法·····	77
4.3.3 表面张力过渡控制·····	79
4.4 CO ₂ 气体保护电弧焊设备·····	82
4.4.1 焊接电源·····	82
4.4.2 焊丝送给装置·····	83
4.4.3 其他设备·····	84
第5章 埋弧焊 ·····	85
5.1 埋弧焊原理及应用·····	85
5.1.1 埋弧焊原理与特点·····	85
5.1.2 埋弧焊的应用·····	87
5.2 埋弧焊设备·····	87
5.2.1 埋弧焊设备构成·····	87
5.2.2 埋弧焊自动调节系统·····	88



5.3 埋弧焊焊接	88
5.3.1 焊接现象	88
5.3.2 电弧特性	89
5.3.3 熔滴过渡	90
5.3.4 电极焊丝的熔化特性	91
5.3.5 母材的熔化	92
5.3.6 熔化金属与熔渣的反应	93
5.4 焊接材料	94
5.4.1 焊 丝	95
5.4.2 焊 剂	95
5.4.3 焊丝与焊剂的组配	97
5.5 高效埋弧焊方法	97
5.5.1 多电极埋弧焊	97
5.5.2 带状电极堆焊	99
5.5.3 板电极埋弧焊	100
5.5.4 填充金属焊接	100
第6章 船体结构材料	102
6.1 钢	102
6.1.1 钢的分类	102
6.1.2 船体结构钢的性能要求	106
6.1.3 船体结构钢的化学成分和力学性能	108
6.1.4 船用特殊性能钢	112
6.1.5 船体结构钢的选用	114
6.2 船用铝合金	115
6.2.1 纯 铝	115
6.2.2 铝合金的分类及对船用铝合金性能的基本要求	116
6.2.3 铝合金的腐蚀与防腐	119
6.3 船用铜合金	120
6.3.1 纯 铜	120
6.3.2 铜合金	120
6.4 船用钛合金	123
6.4.1 钛及钛合金的种类和性能	123
6.4.2 钛及钛合金的耐腐蚀性能	126
6.4.3 钛及钛合金在造船工业中的应用	126
6.5 船用工程塑料	127
6.5.1 造船中常用的塑料	127
6.5.2 工程塑料在船舶中的应用	129

第7章 船体与海上设施结构的焊接	132
7.1 船体结构的焊接	132
7.1.1 一般规定	132
7.1.2 船体构件的焊接	133
7.1.3 焊缝检验与修补	135
7.1.4 不锈钢及其复合钢板的焊接	136
7.1.5 铝合金的焊接	138
7.2 海上设施结构的焊接	139
7.2.1 一般规定	139
7.2.2 结构焊接	140
7.2.3 焊接检验	142
第8章 船体结构的疲劳强度	147
8.1 疲劳分析	147
8.1.1 疲劳分析方法	147
8.1.2 船体结构节点	148
8.1.3 疲劳校核部位	148
8.1.4 S-N 曲线的选取	148
8.1.5 船体结构应力范围的 Weibull 分布	154
8.1.6 许用应力范围	154
8.1.7 累积损伤度计算	154
8.2 疲劳载荷	155
8.2.1 波浪弯矩和扭矩	155
8.2.2 海水动压力	157
8.2.3 船舶运动加速度	159
8.2.4 舱内货物压力	161
8.3 名义应力范围计算	162
8.3.1 应力范围简化计算	163
8.3.2 应力范围的合成	166
8.3.3 名义应力范围计算	167
8.3.4 局部名义应力范围直接计算	168
8.4 热点应力计算	169
8.4.1 热点应力评估方法	169
8.4.2 典型节点的应力集中系数	169
8.4.3 应力集中系数的计算方法	171
8.4.4 热点应力直接计算	171
第9章 焊接应力与变形	175
9.1 内应力的产生	175
9.1.1 内应力及其产生原因	175



9.1.2 热应变与相变应变	176
9.2 焊接应力与变形的形成过程	177
9.2.1 简单杆件的应力与变形	177
9.2.2 焊接引起的应力与变形	178
9.3 焊接残余应力	181
9.3.1 焊接残余应力的分布	181
9.3.2 焊接残余应力的影响	186
9.4 焊接残余变形	191
9.5 焊接残余应力与变形的测量和调控	194
9.5.1 残余应力与变形的测量方法	194
9.5.2 焊接残余应力与变形的调整与控制	200
第 10 章 焊接检验	215
10.1 船体结构无损检验	215
10.1.1 无损检测范围及数量	216
10.1.2 检测位置	217
10.2 检测前准备和外观检查	217
10.2.1 检查前清洁	217
10.2.2 外观检查	218
10.2.3 结果评定	218
10.3 射线检测	218
10.3.1 射线检测的器材	219
10.3.2 检测准备	219
10.3.3 射线检测工艺	220
10.3.4 评 片	221
10.3.5 检测报告	221
10.4 超声波检测	222
10.4.1 超声波检测设备	222
10.4.2 超声波检测准备	222
10.4.3 超声波检测工艺	223
10.4.4 结果评定	223
10.4.5 检测报告	224
10.5 磁粉检测	224
10.5.1 检测设备	224
10.5.2 检测准备	225
10.5.3 磁粉检测工艺	225
10.5.4 结果评定	226



10.5.5 检测报告	226
10.6 渗透检测	227
10.6.1 检测器材	227
10.6.2 检测准备	227
10.6.3 渗透检测工艺	227
10.6.4 结果评定	228
10.6.5 检测报告	228
参考文献	229

焊接电弧

任何一种焊接都表现为能量的作用。电弧焊的能量源是焊接电弧,在焊接中对被焊件起到热和力的作用,是被焊件熔化并形成焊缝的前提。本章讲述电弧的产生、电弧结构、电弧等离子体及其特性,电弧热、电、力平衡,电弧与磁场的相互作用等基础知识。

1.1 焊接电弧机理

1.1.1 气体放电与焊接电弧

气体放电是指气体电离。气体在电场和热场作用下产生电离,电离后所处的空间由阳离子及电子这样的带电粒子、原子及分子这样的中性粒子所构成。电离气体具有与通常状态下的气体所不同的性质,被称作等离子体(Plasma)。物理学中的等离子体是指含有带电粒子的电中性的粒子集团,是继固体、液体、气体之后的物质的第 4 种存在状态,以高导电性为其特征。

电弧的本质是气体放电,是气体放电的一种表现形态。气体放电的涵盖范围很广,比如宇宙中各种形式的放电现象。任何一种形式的放电都是某种形式的能量作用的结果。宇宙中的放电应属于一种自然现象,而电弧放电是人们依据气体可以产生放电、产生能量转换这种内在本质所激发出的一种可利用的放电形式。电弧的某些特点和表现是纯自然的气体放电所难以达到的,这里就涉及放电形式的变迁、外部能量的提供等问题。

气体放电的表现是电流在气体中流动,而电流是因电子、离子的流动而形成的。通常情况下,气体被认为是电的绝缘体,但即使在室温状态下,气体中尽管数量很少但仍然有处于游离状态的带电粒子存在($<10^{-8}$ 电子个数/ m^3)。图 1-1 是由阴极、放电气隙(以下简称“气隙”)、阳极、直流电源组成的回路(直流放电回路)。室温状态下,回路开关合上的瞬间,依赖于电源电压,回路及气隙中会有微弱的电流流动。然而,为了获得稳定、持续的电流流动,必须提高气隙气体的导电性能及生成相当数量的带电粒子,比如对两电极间的气隙气体加以高电场(大气压下氙的情况在 $5 \times 10^5 \text{ V/m}$ 程度)。被电场加速的电子与其他中性粒子碰撞使其产生电离,带电粒子数量增加,气隙的导电性能瞬间得以提高(绝缘破坏),从而开始有电流连续流动的气体放电。

图 1-2 所示的是在气体压力 100 Pa、气隙长度为数厘米时的直流放电形式及放电能

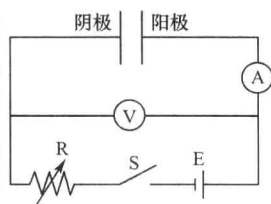


图 1-1 直流放电回路

流—电压特性。加在气隙两端的电压超过气隙绝缘破坏电压(与气体种类、压力、气隙长度有关)后,气隙放电开始。根据放电电流值的不同,放电形态也不同。在电流超过 $10^{-10} \sim 10^{-8}$ A后,形成自持放电。所谓自持放电是当放电电流达到一定程度(亦与放电条件有关)以后,取消最初的诱发措施,气体导电过程本身亦可以再次产生维持导电所需的带电粒子,与回路电流平衡,使放电持续下去。此后随着电流值的增加,从暗放电形态经辉光放电向电弧放电转移,其间的各种放电形式都有各自的特征表现。

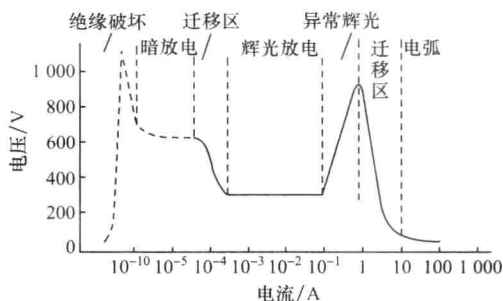


图 1-2 直流放电形式及放电电流—电压特性

从高压到真空,电弧放电可以在各种气氛中进行,当然需要有相关的措施。因为放电电流范围很宽,从0.1 A到 10^4 A以上,弧柱及极区具有相当高的电流密度。电弧放电的一个重要特征是放电电压(电极电压或气隙电压)处于几种放电形式中的最低值。就阴极电压降而言,暗放电时有数百伏,电弧放电时只有10 V,而电弧整体温度值最高。此外在发光现象上亦有差别,据此可以对暗放电、辉光放电、电弧放电加以区分。

电弧放电是气体放电的最终形式,通常伴随熔化和蒸发现象。在较低的电压下,把高密度的热能注入被加工材料中,作为材料加工能源,效率高,操作性、安全性都很适合。正是由于电弧具备所有放电形式中电压最低、电流最大、温度最高的特征,才得以广泛应用于工业生产中。

1.1.2 电弧中的带电粒子

图 1-2 所示的放电电流—电压特性反映的是气隙导电性能的迁移,而导电性能取决于气体状态和产生的带电粒子。气隙放电中的带电粒子有两个来源:一是电源通过电极(阴极)向气隙空间发射电子;二是气隙中的中性粒子被电离产生电子和离子。电弧放电状态下,电弧空间是多种粒子的组合,其间的过程极其复杂,表现也最为活跃。在此对电弧空间带电粒子的产生机理做出阐述。

1. 阴极电子发射

阴极电子发射是电源持续向电弧供给能量的唯一途径。电源通过阴极向电弧空间提供电子,经过电弧空间的复杂行为,再从阳极接收电子,从而形成电流回路。阴极所发射电子中的相当一部分消耗在电弧中,比如复合成中性粒子,或是再次被电离,或散失到电弧以外空间。而阳极所接收电子中的相当一部分是由电弧中中性粒子电离所产生的。阴极电子发射是电弧产热及中性粒子电离的初始根源,电弧中的一切现象都与阴极电子发射有密切的联系。

阴极电子发射使阴极中的电子脱离阴极材料的束缚,逸出电极表面进入电弧空间。使阴极产生电子发射的首要条件是需要对阴极施加某种形式的外加能量,比如电能、热能、动能和光能等。在此概要介绍金属电子发射的T-F理论。

金属中的电子是以自由电子的形态存在的,各个电子自身具有各种各样的能量,其能量分布遵从费米分布。温度为0 K时的最大运动能量被称作费米能量 E_F ,而电子密度分布因金属的温度而改变,提高温度后,运动能量超过费米能量的电子数增加。

金属内的电子与周围自由空间相比,在能量上处于更稳定状态,同时在阴极金属表面存在图1-3所示的电势壁垒,阻碍电子进入自由空间。要想把金属内部的电子吸引到自由空间需要较大的功(能量),把这个能量称为功函数 Φ (eV),换算成电压形式称为逸出电压 U_w (V)。当金属达到 3×10^3 K高温时,金属内运动能量大于 $e(E_F + U_w)$ 数值的电子数目增多,就可以离开金属表面进入到自由空间,把这称作热电子发射。

如果对阴极表面施加电场,封闭自由电子的电势壁垒就会变薄(就如同即使是金属,如果把其制成薄膜的话,光也能透射一样),一部分自由电子穿过电势壁垒渗透出来(隧道现象),把这称作电场发射。

金属中的电子具有各种各样的速度并且在运动着。当其碰撞到表面的电势壁垒时,有的被弹了回来,有的侵入到壁垒内部。侵入到壁垒内部、所具有的能量(W)处于能量范围 dW 中的电子个数按单位时间、单位面积衡量可以表示为下式:

$$N(T, E_F, W) dW = \frac{4\pi mkT}{h^3} \ln \left\{ 1 + \exp \left(-\frac{E_F}{kT} \right) \right\} dW \quad (1-1)$$

把侵入到电势壁垒中的电子从金属表面逸出的概率设定为 $D(E, W)$ 。当金属内电子的运动能量大于表面电势壁垒时($W > W_1$), $D(E, W) = 1$ 。(1-1)式乘以电势壁垒的透过概率,即进入到自由空间的电子个数。在电子全部能量范围内对超出电子个数进行积分,再乘以电荷 e ,就是从阴极表面单位面积上发射出的全电子电流密度,如下式表示:

$$J(E, T, E_F) = e \int_{-W_2}^{\infty} D(E, W) N(T, E_F, W) dW \quad (1-2)$$

(1-1)和(1-2)式中: k 为玻尔兹曼常数(J/K); h 为普朗克常数(J·s); E_F 为费米能量(J); m 为电子质量(kg); T 为绝对温度(K)。

图1-4是对功函数为4.5 eV(相当于钨电极)的阴极材料计算得到的电场强度与电子电流密度的关系。把阴极温度作为参数,在 T 分别为300 K、 1×10^3 K、 2×10^3 K、 3×10^3 K下算得数据如图1-4中曲线所示。各个温度下,当提高电场强度时,电子电流密度都会增大。当电场强度达到 $(1 \sim 2) \times 10^9$ V/m时,电子电流密度增加的倾向性有所改变。就是说,在电场强度低于 $(1 \sim 2) \times 10^9$ V/m时,电子电流密度对温度的依赖性较为明显,可以理解为电极达到高温时,热电子发射变得活跃起来。另一方面,当电场处于高强

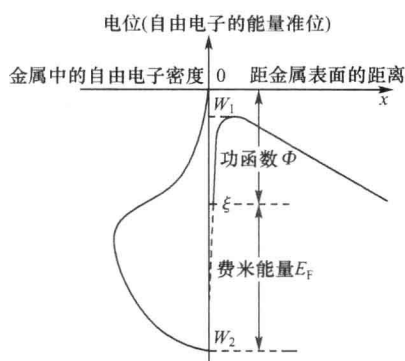


图1-3 金属内部自由电子的电位分布

度领域时,电场发射居于主导地位,与温度无关,即使在室温下,仍然能够得到高电流密度。在温度及电场强度完全一致时,阴极材料的功函数越小,所得到的电流密度越大。

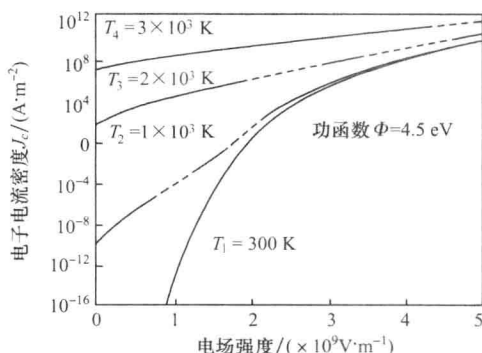


图 1-4 电场强度与电子电流密度

以上讲述了金属表面热电子发射和电场发射。对于热电子发射,其从阴极发射出的电子电流密度是阴极材料温度的函数;对于电场发射,其从阴极发射出的电子电流密度是阴极前部电场强度的函数。电弧放电的阴极,因条件的改变,当温度及电场强度任何一方发生变化时,必须同时考虑两方面效应所构造的电子发射机构。

金属电子发射除上述热电子发射和电场发射两种机制外,还有光发射和碰撞发射。光发射是指金属表面受到光照射后,其中阴极电子接受某一特定波长光子的能量后提高了自身的能量所产生的电子逸出;碰撞发射是指高速运动的外部粒子碰撞金属表面后,将其自身动能传递给金属中的电子促使其逸出金属表面。在电弧条件下表现为正离子对阴极的碰撞。

2. 中性粒子电离

中性粒子存在于电弧空间(气隙中),当处于高能量状态时,其电子轨道上的电子脱离约束,分离成电子和离子,称之为电离。使中性粒子处于高能量状态需要外部给予一些能量,使中性粒子产生电离所需要的能量亦即使电子脱离原子核束缚所需的能量,称作电离能(eV),换算成电压用电离电压 $U_i(\text{V})$ 表示。图 1-5 及表 1-1 所示的是各种原子的电离电压。惰性气体的电离电压高,碱性金属的电离电压低。

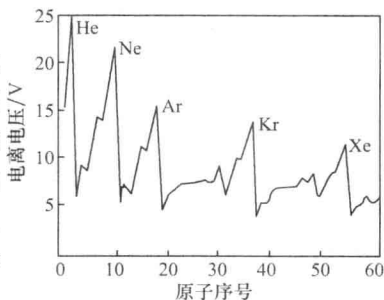


图 1-5 原子的电离电压

表 1-1

原子的电离电压

原子	电离电压 U_i / V	原子	电离电压 U_i / V	原子	电离电压 U_i / V
H	13.60	Al	5.99	Cr	6.77
He	24.59	Si	8.15	Mn	7.44
Li	5.39	P	10.49	Fe	7.87
C	11.26	S	10.36	Co	7.86
N	14.53	Cl	12.97	Ni	7.64
O	13.62	Ar	15.76	Cu	7.73



(续表)

原子	电离电压 U_i/V	原子	电离电压 U_i/V	原子	电离电压 U_i/V
F	17.42	K	4.34	Zn	9.39
Ne	21.56	Ca	6.11	Ge	7.90
Na	5.14	Ti	6.82	Se	9.75
Mg	7.65	V	6.74	Kr	14.00

3. 带电粒子的扩散与复合

电弧空间的带电粒子在电场作用下总体进行着定向运动,同时由于密度分布的差异也在进行着扩散运动,其方向是从密度高的区域向密度低的区域运动。电弧中以轴线上的带电粒子分布密度最高,周边区域的带电粒子分布密度最低。因此,带电粒子在定向运动过程中出现从电弧内部向外部周边区域的移动,称作带电粒子的扩散,在电弧形态上表现出扩展形态。电弧中带电粒子的扩散是在带电粒子的不断产生与运动中进行着的。由于电弧内部中心区域的温度很高,该区域将不断产生大量的带电粒子,因此,带电粒子的扩散并不会造成电弧整体电荷密度的均一分布,在电弧环境条件与自身条件不变的情况下,扩散使得电弧中带电粒子的分布处于相对稳定的动平衡状态。

电弧空间带电粒子既有产生的过程也有消失的过程。比如电弧中的正离子只能来自于中性粒子的电离,并且电离是在不间断进行着的,但其整体数量却处于相对稳定状态。带电粒子的复合即指电子与正离子相遇后重新结合成中性粒子。带电粒子的复合主要出现在电弧温度较低的区域,在电弧外围区域表现更为频繁。由于该区域温度低,粒子运动速度慢,产生非弹性碰撞的几率大,更多的是正负粒子相互吸引而结合成中性粒子。在电弧的阴极区,由于电子密度集中,也会与弧柱区过来的正离子产生复合。

带电粒子的复合是一项重要的电弧行为,复合后的粒子或是在电弧空间重新被电离,参与导电过程,或是随气体介质的运动而散失到电弧以外的空间,对电弧热量平衡和导电性构成影响。实际上,电弧从其自身机制上具备自身维护热量平衡和导电性的能力,带电粒子的复合只在小电流电弧或者交流电弧的稳定性方面会产生一定程度的不利影响。在热量平衡方面,由于焊接电弧的电离度处于很低的数值,带电粒子复合后散失到周围空间的热量并不居于主导地位(带电粒子产生复合时也会释放出相当于电离能的能量),而中性粒子从电弧空间带走并散失的热量是大量的。

1.1.3 电弧导电机构

1. 维持电弧放电的条件

存在于放电气隙中的电子,受电极电场的作用向阳极运动,到达阳极后进入阳极并通过导线形成电子流。另一方面,阳离子向阴极移动,在阴极表面与从阴极发射出来的电子复合,这样就在回路中形成了电流流动。为稳定维持这一状态所需的条件如下:(1)放电气隙内有带电粒子生成;(2)保持阴极、阳极与电弧间电的连续性。

2. 电弧的构造和电弧电压

如图 1-6 所示,水平放置的电极间产生的电弧,其中心部位呈现一定的扩展,即呈现弧状,所以称之为电弧。

图 1-6(a)所示的是电弧构造的基本模式。这里显示的是同一形状的电极通过电阻接到直流电源上,在两电极间产生电弧(实际焊接中的一个电极是钨极或者是消耗式电极即焊丝,另一个电极是被焊母材)。

图 1-6(b)所示的是电弧放电的电压分布。阴极前面存在由阳离子构成的正空间电荷区域,称作阴极压降区,产生的压降称作阴极压降;阳极前面存在由电子构成的负空间电荷区域,称作阳极压降区,产生的压降称作阳极压降。上述两极区的区域尺寸相当小(不到0.5 mm),在电弧长度变化时几乎不产生变化,但压降值很高,在电弧总体电压降中占有相当比例。两极区以外的部分称作弧柱区,以很平缓的形式呈现线性电压降,称作弧柱压降。电弧弧柱电压产生维持高温等离子体状态所需的加热能量,粗略考虑,此电压由弧柱区产热与向周围气氛的热传导及辐射损失三者之间达到能量平衡而确定,随电弧长度、电流的变化而变化。电弧电压 U_a 是上述各电压降之和,由下式表示:

$$U_a = U_A + U_P + U_C \quad (1-3)$$

式中: U_C 为阴极压降; U_P 为弧柱压降; U_A 为阳极压降。

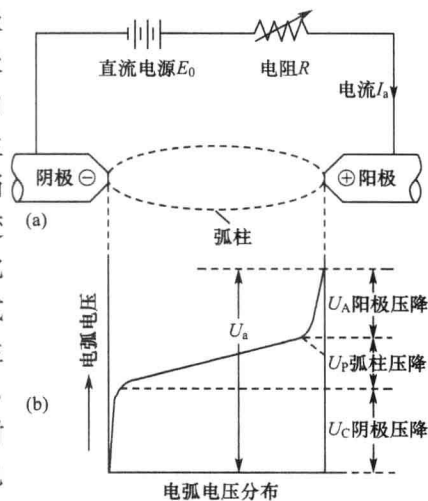


图 1-6 电弧构造与电弧放电的电压分布

1.1.4 电弧产热及温度分布

1. 焊接电弧的产热

焊接电弧的热量来自电源提供的电能,电源向电弧的弧柱区、阳极区和阴极区即电弧整体提供的电能用下式表示:

$$P_a = IU_a = I(U_A + U_C + U_P) \quad (1-4)$$

该能量在电弧中转变为热能、光能、磁能、机械能,占总能量绝大部分的热能,以传导、对流、辐射等形式给予了周围的气体、阳极和阴极材料。光能亦以辐射的形式给予了周围的气体、阳极和阴极材料,但在电弧条件下所占比例较小。磁能对周围环境状态的作用很小。机械能主要指粒子的运动及等离子气流的表现,对阴极和阳极的作用较大,也可以看作是热能的一种表现。如果以热能作为电弧能量的主要转换形式,则电弧产热与散热、热传导在总体上处于平衡状态。

其中,弧柱区的产热量由弧柱压降 U_P 决定,其等效电能 P_P 为:

$$P_P = I \times U_P \quad (1-5)$$

弧柱区产生的热量,一部分通过粒子的运动传递到阳极区和阴极区,一部分以对流、辐射的形式传递给周围空间(包括光能量的传递),一部分通过辐射传递给阳极和阴极。等离子气流对热量的传递、对电极(焊丝)和母材的加热及熔化起到重要作用。

2. 焊接电弧的热效率

相对于电弧功率(电弧电压×电弧电流),向母材(比如 GTA 焊接时,母材作为阳极)

传送的热量(热输入量)所占的比例称作焊接电弧热效率 η 。在熔化焊接中,有效功率亦包含加热、熔化焊丝的能量,这部分能量最终也被带入母材。

常用电弧焊方法的热效率目前已有实测数据,但因测量方法的不同,所得结果有很大差异。比较有代表性的方法如下:(1)TIG 焊用水冷铜板作阳极,根据冷却水的温度上升及冷却水流量测定热量,这时测得的热效率高达 85%~95%;(2)把实际焊得的母材试验片投入到水热计中求得热量,这时所测得的热效率一般有较低的数值。所测得的数值显示,在焊接电流相同的情况下,当母材厚度减薄以及焊接时间延长后,所测得的热效率数值有较大幅度的降低,就是说,焊接过程中,当材料表面的散热量增加时,所测得的焊接热效率数值降低。把实验数据按其变化趋势外延到焊接时间为 0 时的数值可认为是接近真实数值。采用这种方法推断的氩气电弧热效率为 80%~85%,接近水冷铜板作为阳极时所测得的结果。

对于焊接热效率的测量尚没有十分准确的方法和统一的标准,并且母材热辐射、热传导损失无法统一定性,目前人们基本认同的各种电弧焊方法的热效率见表 1-2。

表 1-2 电弧焊方法及对应的热效率

焊接方法	热效率/%
埋弧焊	90~99
MIG/MAG/焊条电弧焊	66~85
TIG 焊	60~70
等离子弧焊(熔入型)	60~75
等离子弧焊(小孔型)	45~65

3. 焊接电弧的温度分布

图 1-7 所示的是测得的氩气电弧的温度分布(焊接电流 200 A)。

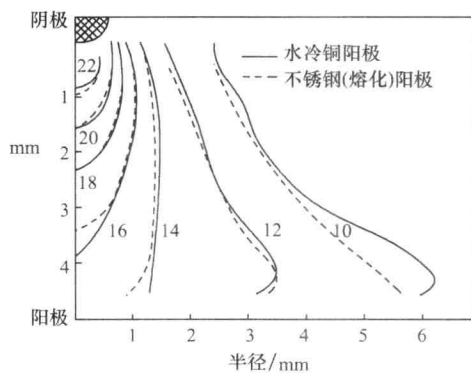


图 1-7 氩气电弧温度分布测量结果

目前人们所做的电弧温度测量主要是针对电弧弧柱进行的,电弧极区的温度由于区域尺寸小,尚无法明确得出,通常认为电弧温度具备连续性。在电弧两极受材料熔点即承受温度能力的影响,电弧温度呈现下降特点,对于钨电极、碳电极这样的高熔点电极,电极表面可以达到略低于材料熔点的温度,对于铁(钢)、铝(铝合金)、铜这样的低熔点材料,无论是作为电极焊丝还是作为母材,其表面可以达到略高于材料熔点的温度(水冷铜板的情况除外)。