



金属

JINSHU
HANJIE
JISHU JICHU

焊接技术基础

刘斌 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

金属焊接技术基础

刘 斌 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要包括：金属焊接冶金及其焊接性基础、焊接方法、焊接结构及工艺装备等三大部分。金属焊接冶金基础和材料焊接性主要介绍金属焊接冶金的基础理论和金属材料（钢及有色金属）的焊接性；金属材料焊接方法基础主要介绍常见熔化焊方法、压力焊方法以及钎焊与微连接方法等；金属焊接结构及工装主要介绍焊接的应力与变形基础知识、焊接结构装配及焊接工艺装备等内容。

本书可作为材料成型及控制工程专业本专科教材，同时兼顾其他同层次的专业技术教育培训等需求，还可作为教学和相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

金属焊接技术基础/刘斌编著. —北京：国防工业出版社，2012.7

ISBN 978-7-118-08158-9

I. ①金… II. ①刘… III. ①金属材料—焊接工艺 IV. ①TG457.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 134591 号

※

国防工业出版社出版发行

（北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048）

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 389 千字

2012 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 39.00 元

（本书如有印装错误，我社负责调换）

国防书店：（010）88540777

发行邮购：（010）88540776

发行传真：（010）88540755

发行业务：（010）88540717

前 言

金属材料焊接技术是材料加工和制备的一种重要手段,近年来得到了快速发展,在各行业的应用越来越广泛,许多新工艺新方法应运而生。材料成型及控制工程是一个宽口径、多方向的本科专业,针对宽专业口径的学生培养要求,大多院校均设有“焊接技术基础”或“材料焊接概论”类的专业课或选修课程,使这一传统“热加工成型”专业的学生掌握焊接方向的基础知识,扩充专业知识面。为了满足本专业本专科学生教学和工程技术人员的需要,同时兼顾其他层次的专业技术教育培训等需要,国防工业出版社组织编著了此书。

本书主要内容包括金属材料焊接冶金基础及其焊接性、焊接方法、焊接结构及工艺装备等三篇。第一篇金属焊接冶金基础和材料焊接性主要介绍金属焊接冶金的基础理论和金属材料(钢及有色金属)的焊接性;第二篇金属材料焊接方法基础主要介绍常见熔化焊方法、压力焊方法以及钎焊与微连接方法等;第三篇金属焊接结构及工艺装备主要介绍焊接的应力与变形基础知识、焊接结构装配及焊接工艺装备等内容。

本书由刘斌副教授、李志勇教授、丁京滨高级工程师、张英乔副教授、杨亚琴博士合作编著,刘斌负责本书的统稿和第一章、第四章部分内容的编写,李志勇负责第四章第七节、第五章的编写,张英乔负责第六章的编写,杨亚琴负责第二章、第三章、第四章前四节内容的编写,丁京滨负责第四章部分内容和第三篇的编写。

本书在编写过程中得到国防工业出版社的大力支持,同时向本书援引参考文献的作者表示诚恳的谢意和致敬。

本书可作为工程技术人员的参考书,也可作为高等院校本专科学生相关课程的教材。由于作者水平有限,疏漏难免,恳请各位读者批评指正。

编著者

2012年4月

目 录

第一篇 金属焊接冶金及焊接性基础

第一章 焊接冶金基础	1
第一节 焊接化学冶金过程	1
一、焊缝金属的组成	1
二、焊接化学冶金特点	5
三、焊接熔渣	7
第二节 气体对焊缝金属的影响	9
一、焊接区的气体来源	9
二、氧对焊缝金属的影响	9
三、氢对焊缝金属的影响	10
四、氮对焊缝金属的影响	11
第三节 焊缝金属的合金化	11
一、焊缝金属合金化的目的	11
二、合金化的方式	11
三、合金元素过渡系数及影响因素	12
第四节 焊接接头的组织与性能	13
一、熔池的凝固与焊缝金属的固态相变	13
二、熔合区的组织和性能	15
三、焊接热影响区的组织和性能	16
四、焊接接头组织和性能的调整与改善	19
复习思考题	21
第二章 钢的焊接性	22
第一节 金属的焊接性概述	22
一、金属的焊接性及其类别	22
二、碳当量及其计算方法	22
三、常用焊接用钢的碳当量	24
第二节 碳素钢的焊接	24
一、低碳钢的焊接	24
二、中碳钢的焊接	26
第三节 合金结构钢的焊接	27
一、合金结构钢概述	27

二、合金结构钢的焊接	28
第四节 不锈钢、耐热钢的焊接	37
一、不锈钢、耐热钢的类型及性能特点	37
二、不锈钢的焊接	38
第五节 异种钢的焊接	43
一、珠光体钢与奥氏体钢的焊接	43
二、不锈钢复合钢板的焊接	45
复习思考题	47
第三章 有色金属的焊接	48
第一节 铝及铝合金的焊接	48
一、铝及铝合金的特点及焊接	48
二、铝及铝合金的焊接工艺	49
第二节 铜及铜合金的焊接	50
一、铜及铜合金的焊接特点	50
二、纯铜的焊接	51
三、黄铜的焊接	52
第三节 钛及钛合金的焊接	54
一、钛及钛合金的焊接特点	54
二、钛及钛合金的焊接工艺	54
复习思考题	56

第二篇 金属焊接方法基础

第四章 常用弧焊方法	57
第一节 焊接电弧	57
一、电弧的形成和组成区域	57
二、焊接电弧的静特性	58
三、焊接电弧力	59
第二节 弧焊电源	62
一、弧焊电源的分类	62
二、对弧焊电源的基本要求	62
第三节 手工焊条电弧焊	69
一、手工焊条电弧焊的焊条	69
二、手工焊条电弧焊工艺要领	71
第四节 气体保护电弧焊	73
一、气体保护电弧焊原理及分类	73
二、CO ₂ 气体保护电弧焊	74
三、氩弧焊	80

四、富氩混合气体保护电弧焊与药芯焊丝气体保护电弧焊	84
第五节 埋弧焊	85
一、概述	85
二、埋弧焊用焊接材料	86
三、埋弧焊设备	87
四、埋弧焊焊接工艺	87
第六节 等离子弧焊接与切割	89
一、概述	89
二、等离子弧焊接	90
三、等离子弧切割	92
第七节 高能束流焊接	92
一、激光焊	92
二、电子束焊	96
复习思考题	100
第五章 压力焊	102
第一节 电阻焊	102
一、电阻点焊	102
二、凸焊	107
三、缝焊	109
四、电阻对焊	111
五、闪光对焊	113
六、对接缝焊	116
第二节 摩擦焊	118
一、摩擦焊原理及分类	118
二、摩擦焊接过程分析	119
三、摩擦焊规范参数	121
四、搅拌摩擦焊	121
第三节 扩散焊	123
一、扩散焊原理及分类	123
二、扩散焊接过程分析	124
三、扩散焊规范参数	126
第四节 其他压力焊方法	129
一、爆炸焊	129
二、超声波焊	130
第六章 钎焊及微连接	134
第一节 钎焊的工作原理	134
一、液态钎料对固态母材的润湿与铺展	134
二、液态钎料与固态母材的相互作用	137
第二节 钎焊材料	138

一、钎焊用钎料	138
二、钎剂和保护	144
第三节 钎焊方法及工艺	147
一、常用钎焊方法及设备	147
二、特种钎焊方法及设备	152
三、钎焊工艺	154
四、常用材料的钎焊	158
第四节 电子微连接方法及工艺	165
一、微电子连接技术	166
二、微电子封装与组装中的焊接材料	173
复习思考题	176

第三篇 焊接结构生产及工艺装备基础

第七章 焊接结构	178
第一节 焊接结构基本知识	178
一、焊接结构的应用及特点	178
二、焊接结构的基本类型	179
三、焊接接头基本知识	180
第二节 焊接应力与变形	183
一、焊接应力与变形的产生	183
二、焊接残余应力	187
三、焊接变形	197
第三节 焊接结构的疲劳破坏和脆性断裂	211
一、疲劳破坏	211
二、焊接结构的脆性断裂	212
复习思考题	214
第八章 焊接结构生产工艺	215
第一节 焊接结构生产工艺过程	215
一、生产准备	215
二、材料加工工艺	215
三、装配与焊接	216
四、质量检验与安全评定	216
第二节 典型焊接结构的生产工艺	216
一、圆筒形压力容器的基本结构	216
二、中、低压压力容器的制造工艺	218
三、高压容器的制造工艺特点	222
复习思考题	223

第九章 焊接结构装配及焊接工艺装备	224
第一节 焊接结构的装配	224
一、基本条件及装配基准	224
二、装配用工具、量具、夹具与设备	225
三、装配中的测量	227
四、结构的装配工艺	229
五、装配基本方式与方法	231
第二节 焊接工艺装备的作用及分类	235
一、焊接工装的地位和作用	235
二、焊接工装的分类	235
三、焊接工装的特点	236
第三节 工件的焊接夹具	237
一、工件的定位及定位器	237
二、工件在夹紧机构中夹紧	242
三、工装夹具设计的基本知识	247
第四节 焊接变位机械	253
一、焊件变位机	253
二、焊机变位机	258
三、焊工变位机	261
四、变位机械装备的组合应用	261
复习思考题	262
参考文献	263

第一篇 金属焊接冶金及焊接性基础

第一章 焊接冶金基础

焊接化学冶金过程，主要是指熔焊时焊接区内各种物质之间在高温条件下的相互作用。其中不仅包括化学变化，而且包括物质在各个参加反应物（如气体、熔渣、液体金属）间的迁移和扩散。

第一节 焊接化学冶金过程

焊接化学冶金过程对焊缝金属的成分、组织、力学性能、某些焊接缺陷（如气孔、结晶裂纹）以及焊接工艺性能都有很大影响。因此，了解焊接冶金过程及其特点，对控制焊缝质量具有极其重要的意义。

一、焊缝金属的组成

焊件经焊接后所形成的结合部分就是焊缝。熔焊时，焊缝金属是由熔化的母材与填充金属组合而成，其组成的比例取决于具体的焊接工艺条件。所以，有必要了解焊条金属与母材在焊接中加热和熔化的特点以及影响其组成比例的因素。

1. 焊条的熔化与过渡

1) 焊条的加热与熔化

焊条电弧焊时焊条是电弧放电的电极之一，加热熔化进入熔池，与熔化的母材混合而构成焊缝。焊条的加热与熔化，对焊接工艺过程的稳定性、化学冶金反应、焊缝质量以及焊接生产率都有直接影响。

(1) 加热和熔化焊条的热量。焊条电弧焊时，加热与熔化焊条的热量来自于三方面：焊接电弧传给焊条的热能；焊接电流通过焊芯时产生的电阻热；化学冶金反应产生的反应热。一般情况下化学反应热仅占 1%~3%，可忽略不计。

①焊接电弧传给焊条的热量。这部分热量占焊接电弧总功率的 20%~27%，它是加热熔化焊条的主要能量。电弧对焊条加热的特点是热量集中，沿焊条轴向和径向的温度场非常窄。电弧热主要集中在焊条端部 10mm 以内。

②焊接电流通过焊芯所产生的电阻热。电阻热与焊接电流密度、焊芯的电阻及焊接时间有关。当电流密度不大、加热时间不长时，电阻热对焊条加热的影响可不考虑。当

焊接电流密度很大、焊条伸出长度太长时需考虑电阻热的影响。

电阻热为

$$Q_R = I^2 R t \quad (1-1)$$

式中： I 为焊接电流（A）； R 为焊芯的电阻（ Ω ）； t 为电弧燃烧时间（s）。

电阻热过大，会使焊芯和药皮升温过高引起以下不良后果：产生飞溅；药皮开裂与过早脱落，电弧燃烧不稳；焊缝成形变坏，甚至引起气孔等缺陷；药皮过早进行冶金反应，丧失冶金反应和保护能力；焊条发红变软，操作困难。为保证焊接正常进行，焊条电弧焊时，对焊接电流与焊条长度需加以限制。

由实验可得出如下结论：

①在其他条件相同时，电流密度越大，焊芯的温升越高，因此，调节焊接电流密度是控制焊条加热温度的有效措施。

②在电流密度相同的条件下，焊芯电阻越大，其温升越高，故电阻较大的不锈钢芯焊条应比碳钢焊条短，相同直径的焊条选用的电流也要低些。

③在相同的条件下，焊条的熔化速度越高，由于被加热的时间缩短，则其温升越低。

④随药皮厚度的增加，药皮表面与焊芯的温差增大，加大了药皮开裂的倾向。

⑤调整药皮成分，使焊条金属由短路过渡变为喷射过渡，可以提高焊条的熔化速度并降低焊接终了时的药皮温度。

（2）焊条的熔化速度。焊条的熔化速度是不均匀的。电阻热对焊芯的强烈预热作用，使焊条后半段的熔化速度高于焊条的前半段。焊条金属的熔化过程是周期性的，因而其熔化速度也作周期性变化。焊条的熔化速度一般用焊条金属的平均熔化速度来衡量。在正常工艺条件下，焊条的平均熔化速度与焊接电流呈正比，即

$$v_m = \frac{m}{t} = \alpha_p I \quad (1-2)$$

式中： v_m 为焊条的平均熔化速度（g/h）； m 为熔化的焊芯金属质量（g）； t 为电弧燃烧时间（h）； α_p 为焊条的熔化系数（g/（A·h）），

$$\alpha_p = m / It \quad (1-3)$$

熔化系数 α_p 反映了熔焊过程中，单位电流、单位时间内，焊芯（或焊丝）的熔化量。但是，焊接时由于金属蒸发、氧化和飞溅，熔化的焊芯（或焊丝）金属并不是全部进入熔池形成焊缝，而是有一部分消耗掉了。单位电流、单位时间内，焊芯（或焊丝）熔液在焊件上的金属量，称为溶敷系数（ α_H ）。可表示为

$$\alpha_H = \frac{m_H}{It} \quad (1-4)$$

式中： m_H 为熔敷到焊缝中的金属质量（g）； α_H 为溶敷系数。

可见，熔化系数并不能确切地反映对焊条金属的利用率和生产率的高低，而真正反映对焊条金属利用率和生产率的指标是溶敷系数。

2) 熔滴过渡的作用力

熔滴是指电弧焊时，在焊条（或焊丝）端部形成的向熔池过渡的液态金属滴。在熔滴的形成和长大过程中，作用在其上的作用力主要有以下几种。

(1) 重力：熔滴因自身重力而具有下垂的倾向。平焊时，重力促进熔滴过渡；立焊和仰焊时，重力阻碍熔滴过渡。

(2) 表面张力：焊条金属熔化后，在表面张力的作用下形成球滴状。平焊时，表面张力阻碍熔滴过渡；在立焊、仰焊时，表面张力促进熔滴过渡。表面张力的大小与熔滴的成分、温度、环境气氛和焊条直径等有关。

(3) 电磁压缩力：焊接时，把熔滴看成由许多平行载流导体组成，这样在熔滴上就受到由四周向中心的电磁力，称为电磁压缩力。电磁压缩力在任何焊接位置都促使熔滴向熔池过渡。

(4) 斑点压力：电弧中的带电质点（电子和正离子）在电场作用下向两极运动，撞击在两极的斑点上而产生的机械压力，称为斑点压力。斑点压力的作用方向是阻碍熔滴过渡，并且正接时的斑点压力较反接时大。

(5) 等离子流力：电磁压缩力使电弧气流的上、下形成压力差，使上部的等离子体迅速向下流动产生压力，称为等离子流力。等离子流力有利于熔滴过渡。

(6) 电弧气体吹力：焊条末端形成的套筒内含有大量气体，并顺着套管方向以挺直而稳定气流把熔滴送到熔池中。无论焊接位置如何，电弧气体吹力都有利于熔滴过渡。焊接时焊条末端形成的套管如图 1-1 所示。

3) 熔滴过渡的形式

熔滴通过电弧空间向熔池的转移过程称为熔滴过渡。熔滴过渡分为粗滴过渡、短路过渡和喷射过渡 3 种形式，如图 1-2 所示。

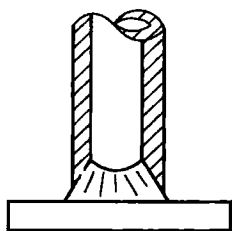


图 1-1 焊接时焊条末端形成的套管

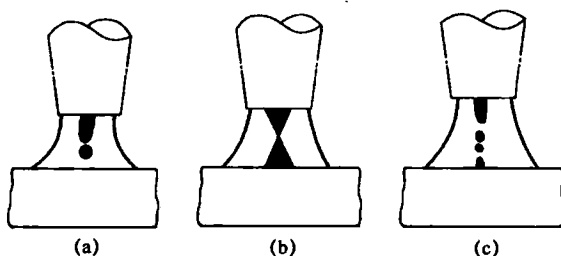


图 1-2 熔滴过渡形式

(1) 粗滴过渡（颗粒过渡）：熔滴呈粗大颗粒状向熔池自由过渡的形式，如图 1-2 (a) 所示。

粗滴过渡会影响电弧的稳定性，焊缝成形不好，通常不采用。

(2) 短路过渡：焊条（焊丝）端部的熔滴与熔池短路接触，由于强烈过热和磁收缩作用使其爆断，直接向熔池过渡的形式，如图 1-2 (b) 所示。短路过渡时，电弧稳定，飞溅小，成形良好，广泛用于薄板和全位置焊接。

(3) 喷射过渡：熔滴呈细小颗粒，并以喷射状态快速通过电弧空间向熔池过渡的形式，如图 1-2 (c) 所示。产生喷射过渡除要有一定的电流密度外，还要有一定的电弧长度。其特点是熔滴细、过渡频率高、电弧稳定、焊缝成形美观及生产效率高等。

4) 熔滴过渡时的飞溅

熔焊过程中，熔化金属颗粒和熔渣向周围飞散的现象称为飞溅。引起飞溅的原因主

要有以下两方面。

(1) 气体爆炸引起的飞溅。由于冶金反应时在液体内部产生大量 CO 气体，气体的析出十分猛烈，造成熔滴和熔池液体金属发生粉碎性的细滴飞溅。

(2) 斑点压力引起的飞溅。短路过渡的最后阶段在熔滴和熔池之间发生烧断开路，这时的电磁力使熔滴往上飞去，引起强烈飞溅。

2. 母材的熔化及熔池

熔焊时，当焊接热源作用于母材表面，母材金属瞬时被加热熔化，母材的熔化程度主要由焊接电流决定。

熔焊时在焊接热源作用下，焊件上所形成的具有一定几何形状的液态金属部分称为熔池。不加填充材料时，熔池由熔化的母材组成；加填充材料时，熔池由熔化的母材和填充材料组成。

(1) 熔池的形状与尺寸。熔池的形状如图 1-3 所示，其形状接近于不太规则的半个椭球，轮廓为熔点温度的等温面。熔池的主要尺寸是熔池长度 L ，最大宽度 $B_{\max}$ ，最大熔深 $H_{\max}$ 。熔池存在的时间与熔池长度成正比，与焊接速度成反比。

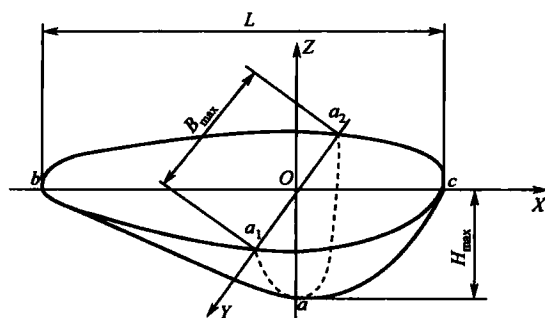


图 1-3 熔池示意

(2) 熔池的温度。熔池的温度分布是不均匀的，边界温度低，中心温度高。熔池的温度分布如图 1-4 所示。

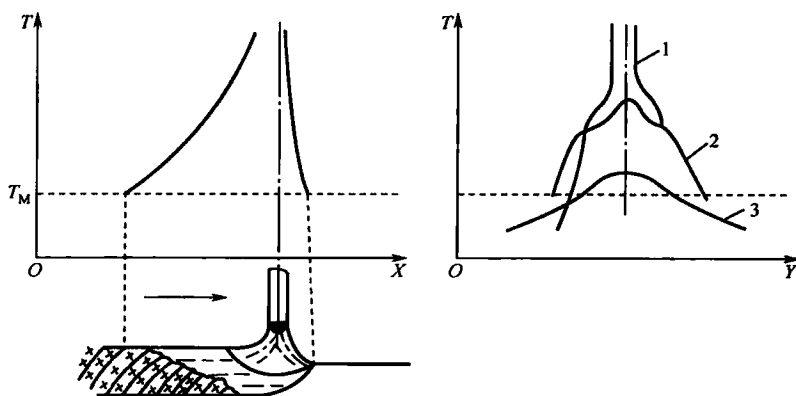


图 1-4 熔池的温度分布

1—熔池中部；2—头部；3—尾部。

(3) 熔池金属的流动。由于熔池金属处于不断的运动状态，其内部金属必然要流动。熔池金属运动如图 1-5 所示。引起熔池金属运动的力分为两大类：一是焊接热源产生的电磁力、电弧气体吹力、熔滴撞击力等；二是由不均匀温度分布引起的表面张力差和金属密度差产生的浮力。

3. 母材金属的稀释

除自熔焊接和不加填充材料的焊接外，焊缝均由熔化的母材和填充金属组成。填充

金属受母材或先前焊道的熔入而引起化学成分含量的降低称为稀释。通常用母材金属或先前焊道的焊缝金属在焊道中所占的质量比来确定，并称为稀释率。

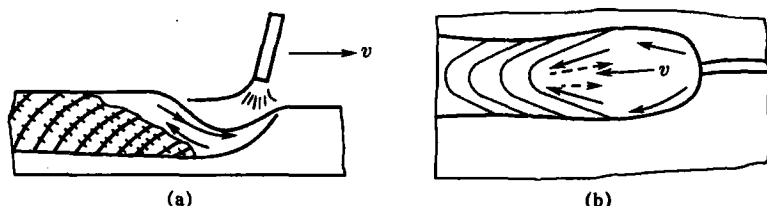


图 1-5 熔池中液态金属的运动

(a) 纵剖面；(b) 横剖面。

稀释率与焊接方法、焊接工艺参数、接头形状和尺寸、坡口尺寸、焊道数目、母材金属的热物理性质等有关。

因母材金属的稀释，即使用同一种焊接材料，焊缝的化学成分也不相同。在不考虑冶金反应造成的成分变化时，焊缝的成分只取决于稀释率。

二、焊接化学冶金特点

焊接化学冶金过程，实质上是金属在焊接条件下再熔炼的过程。与炼钢相比，无论在原材料方面还是在冶炼条件方面都有很大不同。

1. 焊接时焊缝金属的保护

熔焊时，由于熔化金属和周围介质的相互作用，使焊缝金属的成分和性能与母材和焊接材料有较大的不同。因此，为保证焊缝质量，焊接过程中需对熔化金属进行保护，而且还需进行必要的冶金处理。不同焊接方法有不同的保护方式，熔焊时各种保护方式与焊接方法如表 1-1 所列。

表 1-1 熔焊时各种保护方法与焊接方法

保护方法	焊接方法	保护方法	焊接方法
熔渣保护	埋弧焊、电渣焊、不含造气物质的物质	气—渣联合保护	具有造气物质的焊条或药芯焊丝焊接
		真空	真空电子束焊接
气体保护	在惰性气体或其他气体保护中焊接	自保护	用含有脱氧剂、脱硫剂的“自保护”

2. 焊接冶金的特点

(1) 焊接冶金反应分区域连续进行。焊条电弧焊时，焊接冶金反应区分为：药皮反应区、熔滴反应区和熔池反应区，如图 1-6 所示。埋弧焊和熔化极气体保护焊分为熔滴反应区和熔池反应区，钨极氩弧焊只有熔池反应区。

(2) 焊接冶金反应具有超高温特征。普通冶金反应温度在 $1500^{\circ}\text{C} \sim 1700^{\circ}\text{C}$ ，而焊接弧柱区的温度可达 $5000^{\circ}\text{C} \sim 8000^{\circ}\text{C}$ 。焊条熔滴的平均温度达 $2100^{\circ}\text{C} \sim 2200^{\circ}\text{C}$ ，熔池温度高达 $1600^{\circ}\text{C} \sim 2000^{\circ}\text{C}$ ，与熔融金属接触的熔渣温度也高达 1600°C 。所以，焊接冶金反应在超高温下进行，反应过程必然快速和剧烈。

(3) 焊接冶金反应界面大。焊接冶金反应是多相反应，熔滴和熔池金属的比表面积大，能与熔渣、气相充分接触，促使冶金反应快速完成。

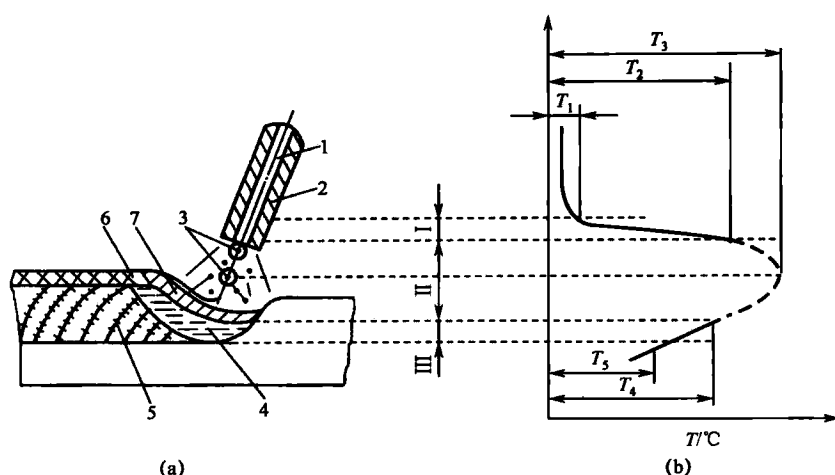


图 1-6 焊接冶金反应区 (以药皮焊条为例)

(a) 焊接区纵剖面; (b) 焊接反应区温度变化特性示意。

I—药皮反应区; II—熔滴反应区; III—熔池反应区。

1—焊芯; 2—药皮; 3—包有渣壳的熔滴; 4—熔池; 5—已凝固的焊缝;

6—焊壳; 7—熔渣; T_1 —药皮反应开始温度; T_2 —焊条熔滴表面温度;

T_3 —弧柱间熔滴表面温度; T_4 —熔池表面温度; T_5 —熔池底部温度。

(4) 焊接冶金过程时间短。熔焊时, 焊接熔池的体积极小, 焊条电弧焊熔池的质量通常只有 $0.6\text{g}\sim 16\text{g}$, 同时, 加热和冷却的速度很快。因此, 熔滴和熔池的存在时间很短。熔滴在焊条端部停留时间只有 $0.01\text{s}\sim 0.1\text{s}$; 熔池存在时间最多也不超过几十秒, 因此, 不利于冶金反应的充分进行。

(5) 熔融金属处于不断运动状态。熔滴和熔池金属均处于不断运动状态, 有利于提高冶金反应的速度, 促使气体和杂质的排除, 使焊缝成分均匀化。

3. 焊接冶金各反应区的特点

现以焊条电弧焊为例, 说明各反应区的特点。

1) 药皮反应区

药皮反应区主要在焊条端部的套筒附近 (图 1-6 中的 I 区), 最高加热温度不超过药皮的熔点, 反应的物质是药皮的组成物, 反应的结果是产生气体和熔渣。反应的主要种类如下。

(1) 脱水反应。当药皮温度超过 100°C , 药皮中的水分开始蒸发, 药皮温度超过 $350^\circ\text{C}\sim 400^\circ\text{C}$, 药皮中的结晶水和化合水开始逐步分解。蒸发和分解的水分一部分进入电弧区。

(2) 有机物的分解反应。药皮温度超过 $200^\circ\text{C}\sim 280^\circ\text{C}$ 时, 有机物就开始分解, 产生气体。有机物一般是碳氢化合物, 分解成 CO 和 H_2 。

(3) 矿物质的分解反应。药皮温度超过 400°C , 药皮中的矿物质 (碳酸盐、高价氧化物等) 发生分解。反应式为



(4) 铁合金的氧化。药皮分解产生的自由氧、二氧化碳和水蒸气等, 将使药皮中的

铁合金发生一定的氧化，例如：



(5) 气体间的反应。药皮反应阶段产生的气体之间也会产生反应，例如：



药皮反应区是整个冶金过程的准备阶段，其产物就是熔滴和熔池反应区的反应物，对冶金过程有一定的影响。

2) 熔滴反应区

熔滴反应区（图 1-6 中的Ⅱ区）是冶金反应最剧烈的区域，对焊缝的成分影响最大。这个区域的主要反应有以下几种。

(1) 气体的高度分解。进入和生成的气体在电弧区被加热分解。这些气体有空气、水蒸气、二氧化碳、氢气、氮气、一氧化碳等，最后两种气体发生部分分解。

(2) 氢气和氮气的溶解。分解的氢气和氮气将溶解到熔融金属中。

(3) 熔融金属的氧化反应。电弧气氛中的氧化性气体和熔融金属产生氧化反应，熔渣中的 MnO 、 SiO_2 与熔滴产生置换氧化，熔渣中的 FeO 向熔滴扩散氧化。

(4) 金属的蒸发。由于熔滴的温度接近钢的沸点，一些低沸点的元素，如锰、锌等将发生蒸发，产生金属蒸气。

(5) 熔滴合金化。药皮、药芯中的合金剂使熔滴强烈的合金化。

3) 熔池反应区

熔池反应区（图 1-6 中的Ⅲ区）是对焊缝成分起决定性作用的反应区。虽然其温度、比表面积比熔滴反应区低，但冶金反应还是相当剧烈的。熔池中的温度分布不均匀。熔池前部处于升温阶段，有利于吸热反应；熔池尾部处于降温阶段，有利于放热反应。熔池的前部主要发生金属的熔化、气体的吸收及硅锰的还原反应；熔池的尾部主要发生气体的析出、脱氧、脱硫及脱磷反应。

三、焊接熔渣

焊接过程中，焊（钎）剂和非金属夹杂经化学变化形成覆盖于焊（钎）缝表面的非金属物质称为熔渣。

1. 熔渣的作用

(1) 机械保护作用。焊接时，液态熔渣覆盖在熔滴和熔池表面，使之与空气隔开，阻止了空气中有害气体的侵入。熔渣凝固后形成的渣壳覆盖在焊缝上，可防止焊缝高温金属被空气氧化。同时也减缓了焊缝金属的冷却速度。

(2) 改善焊接工艺性能。熔渣中的易电离物质，可使电弧易引燃和稳定燃烧。熔渣适宜的物理、化学性质可保证不同位置进行操作和良好的焊缝成形，并可减少飞溅，降低焊缝气孔的产生。

(3) 冶金处理。焊接熔渣与液态金属之间可进行一系列的冶金反应，从而影响焊缝金属的成分和性能。通过冶金反应，熔渣可清除焊缝中的有害杂质，如氢、氧、硫、磷等，通过熔渣可向焊缝过渡合金元素，调整焊缝的成分。

2. 熔渣的种类

熔渣是一个多元化学复合体系,按成分不同可分为三大类:

(1) 盐型熔渣。主要由金属的氟盐、氟盐组成,如 $\text{CaF}_2\text{—NaF}$ 、 $\text{CaF}_2\text{—BaCl}_2\text{—NaF}$ 等。盐型熔渣的氧化性很弱,主要用于焊接铝、钛和其他活性金属及其合金。

(2) 盐—氧化物型熔渣。主要由氟化物和碱金属或碱土金属的氧化物组成,如 $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaF}_2\text{—CaO—SiO}_2$ 等。这类熔渣氧化性较弱,主要用于焊接各种合金钢。

(3) 氧化物型熔渣。主要由各种氧化物组成,如 MnO—SiO_2 、 FeO—MnO—SiO_2 、 $\text{CaO—TiO}_2\text{—SiO}_2$ 等。这类熔渣氧化性较强,主要用于焊接低碳钢和低合金钢。

3. 熔渣的物理性质与碱度

熔渣的物理性质主要是指熔渣的粘度、熔点、相对密度、脱渣性和透气性等。这些性质对焊缝金属的成形、电弧的稳定性、焊接位置的适应性、焊接缺陷的产生等都有较大的影响。

熔渣的碱度是判断熔渣碱性强弱的指标。熔渣的碱度对焊接化学冶金反应,如元素的氧化与还原、脱硫、脱磷及液态金属气体的吸收等都有重要的影响。熔渣的碱度主要有两种表达方式。

1) 分子理论表达式

将熔渣中的氧化物分成三大类。

(1) 酸性氧化物: SiO_2 、 TiO_2 、 P_2O_5 等。

(2) 碱性氧化物: K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 BaO 、 FeO 等。

(3) 两性氧化物: Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Cr_2O_3 等。

熔渣的碱度 B 定义为

$$B = \frac{\sum \text{碱性氧化物}\%}{\sum \text{酸性氧化物}\%} \quad (1-11)$$

碱度的倒数为酸度。理论上将 $B > 1$ 时为碱性渣,但由于未考虑各种氧化物酸碱性的强弱及酸碱性氧化物间的复合情况,因而与实际有较大偏差,通过试验修正为

$$B_1 = [0.018\text{CaO} + 0.015\text{MgO} + 0.006\text{CaF}_2 + 0.014(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) + 0.007(\text{MnO} + \text{FeO})] / [0.017\text{SiO}_2 + 0.005(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{ZrO})] \quad (1-12)$$

式中各种成分以质量分数计算, $B_1 > 1$ 时为碱性渣; $B_1 = 1$ 时为中性渣; $B_1 < 1$ 时为酸性渣。

但是,有些焊条如钛铁矿型和氧化铁型焊条的熔渣的碱度大于 1,而实际上呈酸性熔渣。产生这种现象的原因时上述公式中没有考虑不同氧化物碱性或酸性的强弱不同,也没有考虑在某些复合盐中,少量的酸性较强的氧化物比有较多的碱性氧化物对复合物的碱性影响更大,如 $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$,以致与实际情况有出入。所以根据经验确定 $B_1 > 1.3$ 时为碱性熔渣。

国际焊接学会(IIW)推荐采用下式计算熔渣的碱度,即

$$B_3 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + 0.4(\text{MnO} + \text{FeO} + \text{CaF}_2)}{\text{SiO}_2 + 0.3(\text{TiO}_2 + \text{ZrO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)} \quad (1-13)$$

式中各种氧化物均以质量分数计算, $B_3 > 1.5$ 为碱性熔渣; $B_3 < 1$ 为酸性熔渣; $B_3 = 1 \sim 1.5$ 为中性熔渣。