

焊条电弧焊焊接技术

李正端 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



焊条电弧焊焊接技术

李正端 编著



机械工业出版社

前 言

焊条电弧焊是一种简单、灵活的焊接技术，具有广泛的适应性和通用性。焊接操作具有多种多样的焊接运条方法，运条路线及其运条动作，具有相当的复杂性、随意性及其个性化特征。一名合格的焊工，不仅要求有熟练、稳健的焊接操作技能，同时还应对焊接电弧现象、焊缝成形、焊接化学冶金、焊接条件下的金属组织和性能、材料的焊接性、焊接缺陷的产生及其防止等有基本的了解。

本人作为焊工技师从事焊接工作 50 多年，一直致力于压力容器的焊接，担任二、三类压力容器，重要结构件以及高温高压锅炉中各类大、中、小管道的焊接，并获得过“江西省焊接技术能手”的称号。在长期的焊接工作实践中，本人对于焊缝成形及其质量中的一些问题，进行了认真的分析研究。本书图、文并茂，具体、清晰和准确地进行了解说，对于学习和提高焊接操作技术是很有帮助的。

本书作为焊条电弧焊工的培训教材，适于高级焊工、焊工技师的自学和培训，亦可作为职业院校焊接专业的教材，还可作为从事焊接专业人员的高等院校焊接专业师生的参考用书。

在本书编著伊始，曾得到国家电力建设科学研究所研究员、高级焊接工程师俞乐尘的关切指导。本书编著过程中，得到焊接高级工程师杨炳秀、何晓夫、焊接高级技师符方枚、廖益生等的支持和帮助，谨向他们致以深切的谢意。

限于本人的水平，本书可能会有不少问题甚至错误，恳请各读者提出批评指正。

编著者

目 录

前言

绪论 1

第1章 焊接电弧现象 3

1.1 焊接电弧的本质及其特点 4

1.1.1 焊接电弧的本质 4

1.1.2 焊接电弧的构成及其导电性 5

1.1.3 焊条电弧焊焊接时的电弧 功率 9

1.1.4 焊接电弧的热流分布和电 弧各区的温度、电流密度 及能量密度的分布 11

1.1.5 磁场对电弧产生的作用 和影响 12

1.1.6 焊接电弧的特性曲线 14

1.2 焊条电弧焊焊接时的电弧行 为表现 16

1.2.1 熔滴的过渡形态 16

1.2.2 焊接电弧行为表现的类型 17

1.2.3 熔滴过渡形态对电弧行为 表现的影响 19

1.2.4 焊条药皮类型、焊接电流种类 和电流极性对电弧行为表现的 影响及对电弧稳定性的评估 20

第2章 焊接化学冶金 23

2.1 焊条的种类及型号 23

2.1.1 焊条的种类 23

2.1.2 焊条的型号 24

2.1.3 焊条的工艺性能 24

2.1.4 焊条的冶金性能 27

2.2 焊接化学冶金的特殊性 28

2.2.1 焊接区金属的保护 28

2.2.2 焊接化学冶金的反应区 29

2.2.3 焊接化学冶金的不平衡性 30

2.3 焊接区内的气体与金属的作用 30

2.3.1 焊接区内的气体 30

2.3.2 气体与金属的作用 32

2.4 焊接熔渣与金属的作用 36

2.4.1 焊接熔渣的作用及其性质 36

2.4.2 焊接熔渣对金属的氧化 37

2.4.3 焊缝金属的脱氧 37

2.5 焊缝成分对焊接质量的影响及 焊缝金属的合金化 38

2.5.1 氮对焊接质量的影响及控制 38

2.5.2 氢对焊接质量的影响及控制 39

2.5.3 氧对焊接质量的影响及控制 41

2.5.4 硫的危害及控制 42

2.5.5 磷的危害及控制 43

2.5.6 焊缝的合金化 43

第3章 焊接条件下的焊缝组织 及其性能 44

3.1 金属的基本知识 44

3.1.1 金属的晶体构造 44

3.1.2 金属结晶的过程 45

3.1.3 金属的实际构造和晶体缺陷 48

3.1.4 晶体缺陷与焊接冷裂纹 50

3.1.5 合金的构造 50

3.2 铁碳合金 53

3.2.1 纯铁的组织及性能 53

3.2.2 钢铁的基本组织形态 55

3.2.3 铁碳合金相图的分析 55

3.2.4 典型铁碳合金冷却过程的 组织转变与合金组织的性能 65

3.3 合金钢 67

3.3.1 合金元素对钢中基本相的 影响 67

3.3.2 合金元素对 $\text{Fe-Fe}_3\text{C}$ 相 图的影响 68

3.3.3 在加热和冷却时合金元素 对钢的转变的影响 70

3.4 焊缝金属结晶过程 72

3.4.1 焊接熔池结晶的特殊性 73

3.4.2 焊接熔池的结晶速度 73

3.4.3 焊接熔池的结晶形态 75

3.4.4 焊缝的成分不均匀性及其影响 80

3.5 焊接接头的组织和性能	83	4.3.3 焊接热输入和焊接速度对焊 接温度场的影响	144
3.5.1 焊接接头的组成及其特点	83	4.3.4 焊接热输入和焊接速度对焊 接区冷却速度的影响	146
3.5.2 焊缝的相变组织	85	4.3.5 焊接热输入和焊接速度对焊 接热影响区宽度的影响	147
3.5.3 焊缝组织和性能的控制	92	4.3.6 焊接热输入和焊接速度对焊 缝凝固速度的影响	147
3.6 焊接接头的熔合区	94	4.3.7 焊接热输入和焊接速度对熔 池结晶速度及其形态的影响	148
3.6.1 熔合区的构成及特征	94	4.4 焊条倾角和焊条摆动角在焊接中 的作用和影响	150
3.6.2 凝固过渡层的特征	97	4.4.1 焊条倾角的确立	150
3.6.3 碳迁移过渡层的特征	98	4.4.2 焊条摆动角的确立和焊条摆 动角在焊接时的变化	152
3.7 焊接热影响区	99	4.4.3 焊条倾角和焊条摆动角对熔 缝成形和焊接质量的作用和 影响	152
3.7.1 焊接热影响区的组织转变特点	99	第5章 焊接应力与变形	154
3.7.2 焊接热影响区的组织特征	102	5.1 焊接过程中金属随焊接温度发 生的变化	154
3.7.3 焊接热影响区的性能	107	5.1.1 金属力学性能的变化	155
第4章 焊接参数的作用及其选择	114	5.1.2 金属物理性能的变化	155
4.1 焊接电流对电弧产热的作用及其 选择	114	5.1.3 金属相变时的比体积变化	156
4.1.1 焊接电弧的产热	114	5.2 焊接时金属应力、应变的分类	157
4.1.2 焊条的熔化和熔滴的温度	114	5.3 焊接应力和变形的形成	158
4.1.3 焊条熔滴的过渡	119	5.3.1 简单杆件的应力和变形	158
4.1.4 母材的熔化和熔池的温度	119	5.3.2 金属框架构件在不同加热 温度时的应力及应变	159
4.1.5 焊缝金属的熔合比	120	5.3.3 焊接时的热应力以及由此 引起的残余应力	160
4.1.6 焊接电流在焊接中的作用和 影响	122	5.3.4 焊件中的残余应力及其反 作用力	160
4.1.7 焊接电流、电流种类及极性 的选择	123	5.3.5 焊件中残余应力的分布	161
4.2 电弧电压在焊接中的作用及其 选择	132	5.4 残余应力的影响	165
4.2.1 焊条电弧焊焊接时的电弧 电压	132	5.4.1 拉应力下的断裂	165
4.2.2 焊条极性、药皮厚度与电弧 电压的关系	134	5.4.2 消除应力处理对焊件脆 性断裂的影响	166
4.2.3 电弧电压与电弧长度的关系	135	5.4.3 对静载强度的影响	167
4.2.4 电弧长度对焊条和母材熔化 的影响	136	5.4.4 对结构刚度的影响	167
4.2.5 电弧长度对熔池几何尺寸的 影响	138	5.4.5 对受压杆件稳定性的影响	167
4.2.6 电弧长度与焊缝成形的关系	139	5.4.6 对疲劳强度的影响	168
4.2.7 电弧长度与焊缝中气体含量 的关系	140	5.4.7 对焊件加工精度和尺寸	
4.3 焊接热输入和焊接速度的作用和 选择	143		
4.3.1 焊接热输入的主要作用	143		
4.3.2 焊接热输入与焊缝成形的 关系	144		

稳定性的影响	168	过大造成余高、凹陷超标缺陷的产生及防止	237
5.4.8 对应力腐蚀开裂的影响	169	6.5.2 焊缝表面气孔、夹杂的产生及防止	238
5.5 调节残余应力的措施	169	6.5.3 焊缝弧坑、焊缝表面及附近被电弧烧伤等缺陷的产生及防止	239
5.5.1 设计措施	169	6.6 工艺性焊接缺陷的产生和防止	239
5.5.2 工艺措施	170	6.6.1 近缝区粗晶脆化——焊条电弧焊工艺性缺陷之一	240
5.6 焊接残余变形	171	6.6.2 热应变脆化——焊条电弧焊工艺性缺陷之二	242
5.6.1 焊接残余变形的类型	171	6.6.3 不锈钢焊接区脆化和晶间腐蚀——焊条电弧焊工艺性缺陷之三	244
5.6.2 焊接残余变形的影响因素	171	6.6.4 不锈钢焊接时的晶间腐蚀——焊条电弧焊工艺性缺陷之四	244
5.7 控制焊接残余变形的措施	173	第7章 焊条电弧焊焊接技术操作基础	251
5.7.1 设计措施	173	7.1 焊条电弧焊焊接运条三要素	251
5.7.2 工艺措施	174	7.1.1 焊接电弧对于焊接部位的相对运动	252
5.7.3 矫正焊接残余变形的办法	175	7.1.2 焊接电弧沿焊条轴线作用于熔池基本（或焊件焊接面）的长度和角度	252
第6章 焊接缺陷的产生及防止	179	7.1.3 焊接电弧作用于熔焊部位的时间	254
6.1 焊接裂纹	179	7.2 焊接操作技术运条基础	254
6.1.1 焊接裂纹的种类	179	7.2.1 焊条沿焊接方向的移动	254
6.1.2 焊接热裂纹的特征及其形成	181	7.2.2 焊条沿焊接方向的横向摆动	255
6.1.3 结晶裂纹的形成及其防止	184	7.2.3 焊条沿其轴向的送进	256
6.1.4 多边化裂纹的形成及其防止	192	7.2.4 焊接电弧作用于焊接部位的时间	256
6.1.5 高温液化裂纹的形成及其防止	193	7.2.5 焊接电弧施焊时的运动具有“四维空间”的形式	256
6.1.6 再热裂纹的形成及其防止	195	7.2.6 引燃电弧的方法	257
6.1.7 焊接冷裂纹的特征及其形成	200	7.2.7 灭弧方法和收弧方法	259
6.1.8 焊接冷裂纹的形成条件	209	7.2.8 焊缝接头方法	260
6.1.9 焊接冷裂纹的防止	210	7.2.9 暂停焊接收弧及续焊接头方法	261
6.1.10 层状撕裂的形成及防止	215	7.2.10 焊接时起始熔池座的建立	266
6.1.11 应力腐蚀裂纹的形成及防止	218	7.2.11 焊接运条线路	271
6.2 焊缝夹杂	227		
6.2.1 焊缝夹杂物的形成	227		
6.2.2 非金属夹杂物的种类及其危害	229		
6.2.3 控制焊缝产生夹杂的措施	230		
6.3 焊缝气孔	230		
6.3.1 气孔的分类及形成机理	230		
6.3.2 焊缝气孔的危害	231		
6.3.3 影响气孔形成的因素	232		
6.3.4 气孔的防止措施	234		
6.4 焊缝未焊透和熔合不良	234		
6.4.1 焊缝未焊透	235		
6.4.2 防止产生未焊透的措施	235		
6.4.3 焊缝熔合不良的产生及防止	236		
6.5 焊缝表面缺陷的产生及防止	237		
6.5.1 焊缝根部未焊透、根部熔透			

7.3 熔焊运条方法	274	8.3.3 V形坡口对接平焊	297
7.3.1 连弧焊法	274	8.3.4 T形接缝平焊	299
7.3.2 灭弧焊法	276	8.3.5 船形焊平焊	302
7.3.3 挑弧焊法	278	8.3.6 搭接缝平焊	302
7.3.4 复合运条焊法	280	8.4 立焊	302
7.4 定位焊缝的焊接	280	8.4.1 堆焊立焊	303
7.4.1 定位焊缝的功能及要求	280	8.4.2 I形坡口对接立焊	303
7.4.2 定位焊缝施焊时的要点	281	8.4.3 V形、Y形、U形坡口对接 立焊	304
7.5 焊接操作中焊接电弧的特殊运用	283	8.4.4 角缝立焊	308
7.5.1 运用焊接电弧对焊接部位进行 焊前预热	284	8.4.5 搭接缝立焊	310
7.5.2 运用焊接电弧对焊接缺陷进行 切割清除及补焊	285	8.4.6 立向下焊	310
7.5.3 运用焊接电弧挖掘作用,对焊 接头部位进行切割处理	286	8.5 横焊	316
7.5.4 运用焊接电弧熔焊焊缝时产生 的应力、应变来矫正变形的焊 接部件	287	8.5.1 堆焊横焊	316
7.6 焊条电弧熔焊运条方法、运条线 路及其运条动作的辅助图形、代号等 内容的表示法	288	8.5.2 I形、V形、K形坡口对接 横焊	317
第8章 板类构件的焊接	290	8.6 仰焊	322
8.1 焊接条件对熔池几何尺寸及其流动 性的影响	290	8.6.1 堆焊仰焊	323
8.1.1 焊接参数对熔池几何尺寸及其 流动性的影响	290	8.6.2 I形坡口对接仰焊	324
8.1.2 焊接位置的影响	292	8.6.3 V形、U形坡口对接仰焊	325
8.1.3 药皮焊条类型、牌号的影响	293	8.6.4 仰角接缝的焊接	328
8.1.4 母材厚度、接头形式和坡口尺 寸的影响	294	8.7 典型钢种板状构件的焊接	329
8.1.5 焊接操作运条方法、运条线路 及其运条动作的影响	294	8.7.1 Q345R 钢容器(壁厚 $\delta \geq 20\text{mm}$, 直径 $\geq 2000\text{mm}$)立式构件的 安装横焊	329
8.2 焊缝形状的控制	294	8.7.2 18MnMoNb 钢的焊接	334
8.2.1 根据焊接条件选用合适的焊接 参数,使焊接熔池的几何尺寸 及其质量和熔池的流动性符合 焊缝成形的要求	294	第9章 管类构件的焊接	340
8.2.2 选择合适的焊接操作技术,运 用合适的焊接运条方法、运条 线路及其运条动作	294	9.1 固定位置管子对口焊缝的成形	340
8.3 平焊	295	9.1.1 固定位置管子对口焊接熔池的 力学状态	340
8.3.1 堆焊平焊	295	9.1.2 固定位置管子对口打底焊时 焊接熔池几何尺寸及其流动 性的控制	341
8.3.2 I形坡口对接平焊	296	9.2 固定位置管子对口的焊接	345
		9.2.1 固定位置管子对口打底焊单 面焊双面成形技术	345
		9.2.2 焊前准备	347
		9.2.3 焊接工艺	351
		9.2.4 固定位置管子对口施焊时, 焊接顺序、焊道数目和焊接 层次的选择	354
		9.2.5 焊接参数的选择	357
		9.3 水平固定管子对口的焊接	360

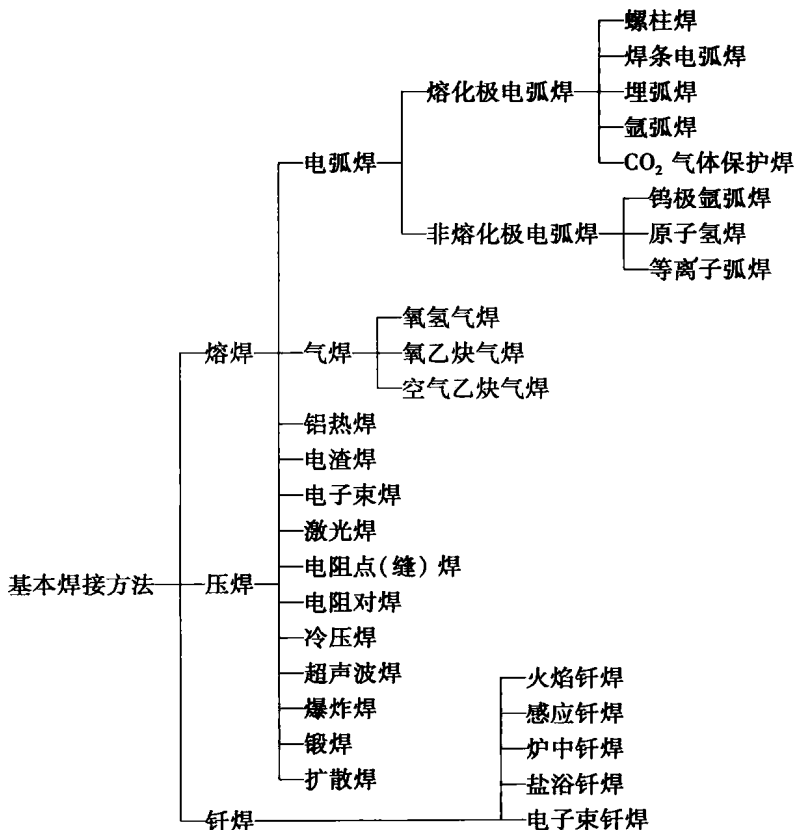
9.3.1 水平固定管子 $\phi 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ (小径) 对口的焊接	361	9.6.1 插入式管板垂直固定对口的 俯焊	383
9.3.2 水平固定管子 $\phi (76 \sim 168) \text{mm} \times$ 10mm (中径) 对口的焊接	367	9.6.2 骑座式管板垂直固定对口的 俯焊	385
9.3.3 水平固定管子 $\phi \geq 168\text{mm}$ (大径) 对口的焊接	369	9.6.3 插入式、骑座式管板垂直固 定对口仰焊	387
9.3.4 水平固定管子带垫圈对口的 焊接	369	9.6.4 插入式、骑座式管板水平固 定对口焊接	389
9.4 垂直固定管子对口的焊接	373	9.7 三通管对口的焊接	393
9.4.1 垂直固定 $\phi 50\text{mm} \times 5\text{mm}$ (小径) 管子对口的焊接	373	9.7.1 受压等径三通管的焊制	393
9.4.2 垂直固定 $\phi (76 \sim 168) \text{mm}$ (中径) 和 $\phi > 168\text{mm}$ (大径) 管子对口的焊接	377	9.7.2 等径三通管焊接操作技术	398
9.5 倾斜 45° 固定管子对口的焊接	377	9.7.3 异径三通管的制作、组装和 焊接	399
9.5.1 倾斜 45° 固定小径管子对口 的焊接	378	9.7.4 特种披肩高压三通管对口的 焊接	400
9.5.2 倾斜 45° 固定中径 ($\phi \geq 76 \sim 168\text{mm}$)、 大径 ($\phi > 168\text{mm}$) 管子 对口的焊接	381	9.8 水平固定大径管子对口立向下焊	403
9.6 固定位置管板对口的焊接	382	9.8.1 立向下焊专用焊条	403
		9.8.2 管子对口立向下焊焊接工艺	404
		9.8.3 水平固定管子对口立向下焊 操作技术	408
		9.9 典型管道用钢的焊接	409

绪 论

焊接是一种很普遍的金属加工方法，很早以前就有使用锻焊和钎焊的实例，例如，在闻名世界的秦始皇兵马俑墓葬中的铜马车上，就发现有许多钎焊焊缝。我国明代的科学著作《天工开物》中，也有关于锻焊的记载：“凡铁性逐节粘合涂以黄泥于接口之上，入火挥锤，泥滓（Zi）成朽（Xiao）而去，取其神气为媒合，胶合之后，非灼红斧斩永不可断也。”

目前工业上广泛应用的焊接方法是在 19 世纪末和 20 世纪发展起来的。1885 年发现了气体放电的电弧，1930 年发明了涂药皮焊条的焊条电弧焊，并在此基础上发明了埋弧焊、钨极氩弧焊、熔化极氩弧焊、CO₂ 气体保护焊。电阻焊是 1886 年发明的，并逐步完善为电阻点焊、缝焊和对焊，它几乎与电弧焊同时推向工业应用，逐步取代铆接，成为工业中广泛应用的主要焊接方法。

常见的焊接方法分类如下：



从金属物理学可知，固态金属之间是依靠金属键结合在一起的。因此，只要将两种金属达到原子或分子之间的结合或扩散就可形成金属键，从而紧密连接在一起。据此，可以给出焊接的定义：两种或两种以上金属材料通过原子或分子之间的结合或扩散形成永久性连接的工艺过程。

各种焊接方法中，焊条电弧焊是最早的一种电弧焊。同时，也是一种最简单、最灵活和最通用的焊接方法，与其他焊接方法相比，具有下列特点：

(1) 机动灵活 焊接电弧焊不论在生产车间、安装工地，还是野外都可采用，具有设备简单、电缆可长可短、焊把轻巧、移动方便等特点。焊条电弧焊适用于各种位置、各种接缝形式构件的焊接。可以说，凡是焊接电弧能达到及作用的位置，特别是对于结构复杂、焊接位置困难和作业空间狭小、单件和非定型构件，如火电、核电热交换锅炉；石化炼油装置，大型船舶的管线，大都采用辅助工装进行焊接，显示出焊条电弧焊的灵活机动性及广泛的适应性。

(2) 对焊接坡口装配的要求不高 根据不同的焊接位置、焊件厚度，焊缝成形及焊接质量、焊接坡口几何尺寸有不同的要求。由于焊条电弧焊的灵活机动性及其广泛的适应性，焊工施焊时可以根据焊接条件选择合适的焊接参数及焊接运条方法，在坡口制作、尺寸装配有相当误差的情况下，仍可以获得良好的焊缝成形质量。

(3) 可焊接的金属材料广泛 焊条电弧焊广泛应用于低碳钢、低合金钢、耐热钢、不锈钢、低温钢等多种钢构件的焊接，以及铸铁、铜合金、镍合金等的焊接，还常用于耐磨损、耐腐蚀、耐高温等特殊使用要求构件表层的堆焊。

(4) 生产率低和成本高 焊条电弧焊多采用直径为 2.5 ~ 6mm 的焊条，焊接电流为 50 ~ 300A，采用特种焊条时焊接电流可高达 600A。一般情况下，焊接时填充金属的熔敷速度为 1 ~ 8kg/h，焊工每个工作日熔焊的焊条重量在 3 ~ 10kg 之间。全位置焊接时，须采用较小焊条直径和焊接电流进行焊接，同时还需要大量的运条动作、清理熔渣和飞溅等辅助性工作；焊接熔敷的金属量约为所用焊条重量的 60% 左右。因此，焊接效率不高，所耗材料的费用较大。

(5) 焊接质量的依赖性大 一般钢结构焊接接头的力学性能可以通过选用与母材相匹配的焊条来满足。焊条电弧焊的焊接质量，尤其是重要构件的焊接质量，在很大程度上取决于焊工手工操作技术的水平、现场作业的适应性及心态的稳定性；特别是在困难位置以及作业空间狭小等情况时位置，如大型锅炉、石油、化工等装置中密集管束的安装，完全是依靠施焊操作者熟练、稳定的焊接操作技术及其一丝不苟的工作作风。

随着近代科技和生产的发展，高参数技术及其装置的采用，对焊接质量提出了更高的要求。因此，从事重要构件焊接的高级焊工、技师和工程师等，必须在原有的基础上不断提高焊接理论、焊接操作技能及焊接技术管理工作的水平，以适应时代发展的需要。

第1章 焊接电弧现象

焊接电弧可以看作是一个把电能转变成热能的气态导体。焊接电弧可以定义为由激发气态导电介质所形成和维持的一种特殊类型的放电现象。

气态介质的载流子是采用高温和场致发射电子的办法产生的，电流由等离子体输送。等离子体就是电离状态的气体，由数量几乎相等的电子和离子组成。焊接电弧等离子体不是纯净的等离子体，也混入一些其他状态的物质，有熔融金属、熔渣、蒸气、中性受激的气态原子及分子等。

根据等离子体所传导的电流的大小可以决定焊接电弧的温度值，一般为 5000 ~ 30000K。采用药皮焊条电弧焊时，焊接电弧轴向的温度约为 6000K，钨极氩弧焊焊接时，电弧的温度约为 15000K。

虽然弧柱温度在 5000K 以上，但在小电流时，阴极和阳极却一点都未熔化，故可推断弧柱高温气流并未直接接触到电极，而是位于弧柱与电极表面之间的阴极、阳极压降区。阴极和阳极压降区至今尚不很清楚。但这两个压降区的长度，一般认为只有几个气态粒子运动的平均自由程 λ (10^{-6} cm) 左右的大小。

据现有概念，焊接电弧中流向阳极的主要是电子流。阴极区的情况相当复杂，阴极表面的电子发射是由向阴极运动的高温正离子电荷形成高强度电场及光电效应等作用的结果。

在沸点显著低于热电子发射温度的金属“冷”阴极，具有极大的阴极电流密度 ($10^4 \sim 10^7$ A/cm²) 的电极斑点，是由电子密集形成的，并沿阴极表面不规则的运动。由于焊条药皮成分的不同和阴极表面上经常存在的杂质，会导致阴极压降 V_k 和阴极电流 I_k 的明显变化。离化剂的加入使阴极斑点稳定并向无斑点电弧过渡，导致电弧电压的降低和电弧稳定性的提高。

焊条电弧焊焊接时，电弧的产热及产力，主要与焊接电流的大小、电弧电压的高低、焊条药皮成分及其数量等的变化有关，同时也与焊接电流的种类及其极性、焊条药皮套筒所形成喷嘴的几何尺寸等有关。

电弧中，电现象与热现象之间存在着密切的关系。例如，在热自发射的电弧中，阴极变冷使发射电子困难，并引起阴极电压降增大和功率在电弧中的再分布。在电弧中加入促使电子发射的电离剂，会使电弧电压减小和电弧温度降低。当在电弧中加入消电离的物质时，会使电弧电压增大及电弧温度升高。焊接电弧把热量从电弧的一部分带到另一部分，这对电弧热功率在电极和焊件之间均分布有相当大的影响。

焊接电弧流具有磁流体动力学的本质。当扩大或者压缩电流传导区时，气流便在电磁力的作用下产生。径向压缩度与弧柱截面成反比，所产生的轴向压力指向等离子体扩张的方向，这个方向一般是从电极到焊件。

焊条电弧焊焊接时，焊接电弧流的热力和机械作用力对于焊条和母材的熔化、熔滴的过渡、熔池的几何尺寸和流动，以及焊缝的成形都有具大的影响；同时与熔化金属发生的冶金反应，直接关系到焊缝金属的成分及性能，焊接热影响区金属的组织及性能，以及焊接缺陷

的产生。因此,通过对焊接过程中电弧现象的观察、了解和认识,要尽可能的在焊接操作时对电弧现象所产生的作用和影响加以运用、调节及控制,用以改善和提高焊接质量及工作效率。

1.1 焊接电弧的本质及其特点

通过焊接电弧的热力、机械力及电弧稳定性的了解,下面对焊接电弧的物理本质、电弧能量产生和转换的基本规律及焊接电弧在焊接过程中的作用和影响作以简要的介绍。

1.1.1 焊接电弧的本质

电弧是在1802年发现的。1808年有人发明采用碳棒作为电极以碳极电弧作为焊接热源代替氧乙炔焰进行焊接。不久,又有人发明采用金属焊条进行焊接。如今采用电弧作为热源的焊接方法有很多种,例如,焊条电弧焊、埋弧焊、钨极氩弧焊、CO₂气体保护焊、熔化极氩弧焊和等离子弧焊等焊接方法。这些焊接方法都是运用电弧有效而简便地把电能转换成热能来实现焊接。由此可见,电弧焊在焊接中占有相当重要的地位。

电弧的本质是一种气体放电现象。所谓气体放电,就是当两电极之间存在电位差时,电荷通过两电极空间的一种导电现象。或者说,电弧是在两个电极之间的气体空间放电而形成的一种放电现象。电弧中的带电粒子主要依靠气体电离和电极发射电子两过程产生。除了这两个主要过程之外,还有其他一些过程,如气体的离解、激励、扩散、复合和形成负离子等,也影响到电弧导电的性能。

电弧中气体粒子的电离,根据外加能量种类的不同而分为热电离、电场作用下的场致电离和光电离3种。焊接电弧中产生的电离不同于一般电离,这是因为焊接电弧的电流很大,从数安培到几千安培,两电极之间的电压则较低,通常为20~70V左右,焊接电弧的电场强度仅为10V/cm左右。因此,电弧弧柱区热电离是产生带电粒子的主要途径,而电场作用下的场致电离则是次要的。当阴极压降区和阳极压降区的电场强度达到10⁵~10⁷V/cm时,有可能产生场致电离现象。至于光电离,则是电弧带电粒子形成的次要途径。

等离子体通常是指气体粒子中至少有部分离子化,从而由中性粒子、阳离子和电子等聚合在一起所组成的气体或蒸气。由此可知,等离子体是电离状态的流体,是由几乎相等数量的阳离子和电子组成,电流由等离子输送;传导大部分电流的电子从负(阴)极流出,并向正(阳)极运动。焊条电弧焊焊接时的等离子体相混合的是一些其他状态的物质,如熔融金属、熔渣、蒸气、中性受激气态粒子以及分子等。通过加热的办法,即通过撞击过程建立中性等离子体时,产生等离子体的材料温度需要达到由它的电离电位决定的平衡温度。等离子体的形成受广义的理想气体定理和质量作用定律制约。基本方程式是:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \frac{2 Z_i (2 \pi m_e K T)^{3/2} e^{-U_i}}{Z_0 h^3 K T}$$

式中 n_e 、 n_i 和 n_0 ——粒子密度(分别为每单位体积内电子、离子和中性原子的数量);

h ——普朗克常数;

e ——单位电子;

m_e ——电子质量;

K ——波茨曼常数；

U_i ——电离电位；

T ——热力学温度；

Z_i 、 Z_0 ——离子和中性粒子的划分函数。

假定平衡条件使电子和离子的密度相等

$$n_e = n_i$$

便可决定电子、离子和中性粒子的密度。

电弧内受热气体的热平衡方程式表明，在焊接电弧是接近于热平衡的，但是，由于辐射、热传导和对流等主要能量传递过程的影响，也只能将它看作是近似的热平衡。电弧中受热气体的最高温度主要取决于气体的种类和通过的电流密度，一般在 $5000 \sim 50000\text{K}$ 的范围，其电离度为 $1\% \sim 100\%$ ，所有粒子都处在相当于第一电离电位的温度，即完全电离状态。

1.1.2 焊接电弧的构成及其导电性

焊接电弧由三个不同的区域组成，即阴极区、阳极区和弧柱区，如图 1-1 所示。

1. 弧柱区及其导电特性

电弧阴极区和阳极区的长度很小，一般认为只有几个平均自由程（标准状态下空气粒子的平均自由程 $\lambda = 9.6 \cdot 10^{-6}\text{cm}$ ）。因此，弧柱区占电弧长度的绝大部分，且可以认为它是电弧的长度。

弧柱温度因其气体介质种类、电流大小及其被压缩的程度等因素的不同而不同。焊接电弧的温度大致在 $5000 \sim 30000\text{K}$ 范围，焊条电弧焊焊接时由于焊条药皮内含有大量像钾、钠这类容易电离的物质，其焊接电弧的温度约为 6000K 。由于弧柱高温而使其中的全部或大部分双原子气体分子分解为原子，其中较大部分的原子进一步分解为电子和阳离子。弧柱区中的电子和阳离子的空间密度相等，如图 1-2 所示。因此，弧柱空间呈电中性。

当电弧长度一定时，改变电流的大小，在小电流范围内电流和电压之间的关系如图 1-3a 所示；当电流大小一定时，改变电弧的长度，电弧电压的变化如图 1-3b 所示。

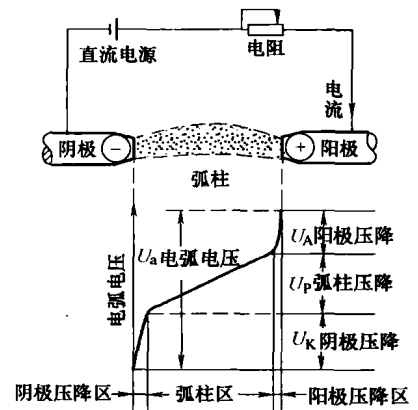


图 1-1 焊接电弧的构成及其电压分布

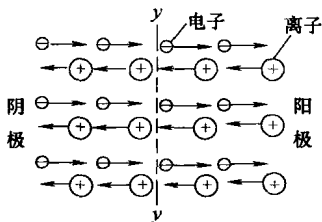


图 1-2 弧柱中的电子和阳离子

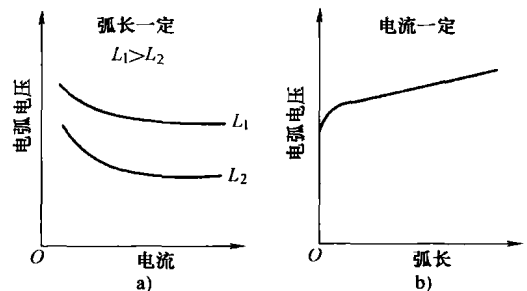


图 1-3 电弧中的电压特性

弧柱导电性能的优劣,直接与其电场强度 E 的大小、气体介质的种类及电流的大小相关,图 1-4 所示为弧柱电场强度与不同种类气体和电流大小的关系。

大气中的弧柱等离子体由密度很高的电子、阳离子、中性原子和分子等组成。其中电子把它从电场获得的热能通过静电碰撞有效地传给阳离子而使阳离子升温。由于阳离子能与其他粒子能极好的接触,而使其他粒子获得与阳离子相当的温度,使大气中的弧柱等离子体处于所谓的热电离状态。

弧柱中的电流元几乎是相互平行地流动,在这些电流元之间由于自身磁场的作用产生吸引而引起的压缩,导致弧柱中心部位的气体压力和温度都变得比其外围要高。

2. 阴极区及其导电特性

电子是从电弧阴极发射到弧柱区的,这种现象与水分子从水面蒸发变成蒸汽很相似。从水在蒸发时要吸收汽化热这一点上就可以知道,只有水中的高速分子才能蒸发为气体分子;而金属内部的电子要脱离金属飞向空间,它需要有相当高的位能产生超过某一极限速度才能飞向空间。

一般金属中,原子构成晶格且呈紧密排列,离原子核较远的最外层电子受到周围原子核强静电力作用。因此,金属中的电子完全不同于气体粒子那样专属于某一特定原子的状态,前者可以挣脱原子核的束缚在金属原子构成的离子晶格空间自由移动。金属之所以是电和热的良导体,正是由于这种自由电子的作用。自由电子也像气体中的原子一样在金属中做不规则运动,形成所谓电子气。

当温度升高时,金属内部的自由电子与气体粒子一样,其运动的速度加大,当其运动的作用力可以克服静电吸引力时,将逸出金属表面而发生所谓热电子发射。

当以碳或钨等高熔点金属作阴极产生的电弧时,其阴极温度可高达 3500K 或更高,因此说明这类电极电弧放电的大部分电流是同热电子发射产生的。而铁、铜一类电极电弧,即使阴极温度达到电极材料的沸点,充其量不过是 2500K 左右,其热电子电流密度将不会超过 $1\text{A}/\text{cm}^2$ 。然而,实际观测到铁、铜一类电极电弧阴极的电流密度却在 $10^2 \sim 10^6\text{A}/\text{cm}^2$ 左右。由此可见,铁铜类电极不是热电子发射。

电子要逸出金属表面,就要克服其静电力的阻碍。现若在阴极表面加上一个电位梯度为 X 的外部电场,电子就受到一个大小为 $-eX$ 的作用力。此时,该电子所受静电荷的吸引力若与外加电场的作用力 X 相等,则其合力等于零。因此,电子一到达这一位置就自动飞出,随后将受到外加电场的作用而加速,通过弧柱向阳极运动。这种在阴极表面上的电子受外加电场的作用向阳极运动的现象,称为场致发射或自发射。

电弧阴极区的作用主要是向弧柱提供所需要的电流,同时接受由弧柱送来的正离子流。根据阴极材料种类、电流大小和不同气体介质,电弧阴极区的导电机构可分为三种类型:

(1) 热阴极型(无亮点阴极型) 在大电流及其电流密度为 $10^3\text{A}/\text{cm}^2$ 的 W 或 C 极等高熔点电极时,阴极表面的温度很高,电极内的自由电子受高温而具有很高的动能,当其动能

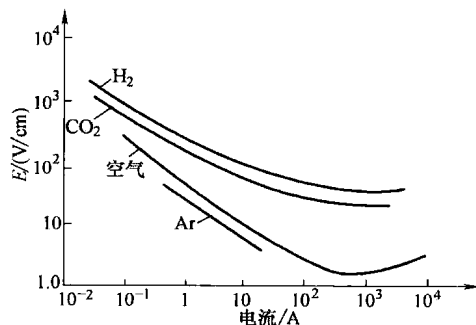


图 1-4 弧柱不同类型气体介质的电场强度与电流大小的关系

大于静电吸引力时,便从阴极表面逸出,通过弧柱向阳极运动。

(2) 等离子阴极型(亮点阴极型) 钨电极在小电流高压放电管中发生的放电现象就是这种形式,不能用热电子发射机理来解释。在这类阴极前存在着一个狭窄的高亮度空间,放电正是通过该部位的热电离机理发生的,电流密度一般为 10^4 A/cm^2 。

(3) 冷阴极型(移动亮点阴极型) 这是不能用热电子发射机理来解释铁、铜类的阴极放电现象,阴极斑点在这类阴极表面上作不规则移动,有时几个斑点同时存在,并随时不断消失和产生。电流密度比等离子型高出一个数量级。

当阴极采用 W、C 等高熔点材料及较小电流(或阴极采用铁、铜类较低熔点材料)时,阴极表面的温度受较小电流(或电极材料沸点温度较低)的限制,不能使阴极表面产生高温而形成较强的热电子发射,提供弧柱所需要的电子流,导致在阴极邻近弧柱界面处正负电荷的平衡受到破坏,造成正离子堆积在阴极表面而使空间电荷区形成正电场,如图 1-5 和图 1-6 所示。当阴极热电子的发射越弱时,使其形成的正电场越强。在这种正电场的作用下,促使阴极场致发射,同时使电子具有较大的能量及在阴极区产生碰撞电离,以便向弧柱提供所需要的电子,这种形式的冷阴极机构,正是熔化极电弧常见的导电机构:热电子发射和场致发射并存,且根据电极材料的物理性能、电流大小和气体介质的不同而对其热电子发射与场致发射比率自行调节。

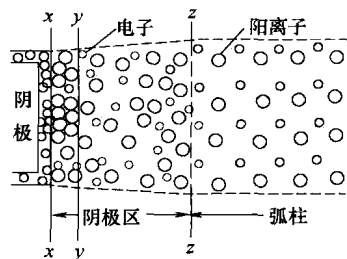


图 1-5 阴极区、弧柱区电子与阳离子的分布示意图

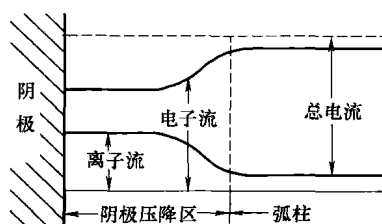


图 1-6 阴极压降区电子流和离子流的比率

当阴极热电子发射不足时,就会在阴极附近造成阳离子过剩而产生正的空间电荷,如图 1-5 和图 1-7 所示。正的空间电荷吸引金属电极内部的自由电子,而使阴极表面上的电子发射变得容易。阳离子在阴极前堆积得越多,使形成的电场强度越大,促使阴极电子的发射,这就是场致发射最基本的概念。

设阴极压降为 U_k , 电离电位为 U_i , 只要 $U_k > U_i$, 从阴极跑出来的电子在阴极压降区的终端将得到大小为 U_k 的动能,碰撞中性粒子就会发生电离。碰撞产生的电子同初始形成的电子一起向弧柱运动,而阳离子则向阴极运动。如果上述碰撞电离可以顺利进行,则从阴极表面发射的电子流仅为总电流的 50%, 这样在阴极压降区终端便要发生 1:1 的电离碰撞,以形成 100% 的电子流流向弧柱。在阴极压降区,则由 50% 的阳离子流(由电离碰撞产生的)和 50% 的电子流(由阴极发射的)构成总电流。

从以上分析可知,阴极压降区的电流构成与弧柱很不相同,图 1-6 表示了这种差异。

阴极斑点可以认为是阴极为消耗最小能量实施其电子发射,而驱使电子占据有利于发射位置集中所形成。阴极斑点的电流密度比弧柱要高得多,因此在阴极斑点放电空间,要发生

截面收缩现象。图 1-7 就是这一现象的示意图。在阴极表面 $x-x$ 上有阴极斑点 A-A，在 $x-x$ 相距很近的 $y-y$ 之间有电压降 V_k 。 $z-z$ 之右是正常弧柱区，其截面由于 $y-y$ 与 $z-z$ 之间有一个电磁“压缩区”之后的扩张而较大。如图 1-5 所示， $y-y$ 以左至阴极面空间阳离子的密度很高，形成具有相当大的正空间电荷区，对阴极表面电子有相当大的引力，促使阴极电子场致发射。

弧柱区送来的阳离子飞过阴极压降区进入阴极时，将其所有动能以及在阴极表面与电子中和所产生的相当于电离电位 U_i 的能量，以热的方式传递给阴极；另一方面，阴极发射电子时将带走相当于功函数 U_w 的能量而使阴极冷却。在热阴极型电弧的某些例子中，电子流有时占总电流的 97.5%。因此，可以认为， U_w 起的冷却作用大于阳离子的加热作用。但是，电子流飞过阴极压降区之后获得 U_k 的动能，该动能的一部分以热形式传导给紧贴的阴极而使其保持着高温。

3. 阳极区及其导电机构

电弧阳极压降区如图 1-1 和图 1-8 所示。弧柱中的电流由大约 99.9% 的电子流和 0.1% 的阳离子流构成。阳极一般不发射阳离子，因此阳极前面缺少阳离子。紧靠阳极表面的区域是 100% 的电子，如图 1-9 中所示。正是这些电子所形成的负空间电荷产生了与真空电子管一样的阳极压降。电子受阳极压降的加速其能量增加，因此撞击中性粒子时的能力加大，致使阳极区的中性粒子得到比弧柱区更充分的碰撞电离。该区便成为向弧柱输送阳离子（0.1% 带正电荷粒子）^{*} 的供给源。

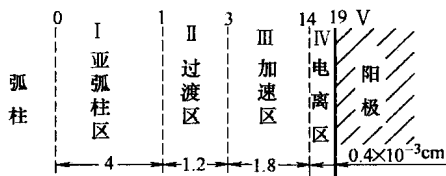


图 1-8 阳极压降区示意图

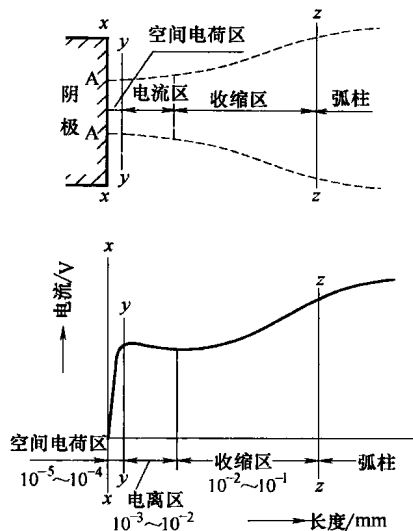


图 1-7 阴极区尺寸和阴极前收缩现象示意图

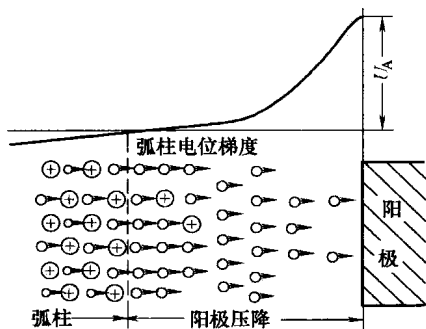


图 1-9 阳极压降区的电子流和离子流

采用碳极电弧、电流 $I = 50A$ 的阳极压降区如图 1-8 所示。测得电弧弧柱温度为 7000K，阳极表面温度为 4000K。二者温差的能量消耗在阳极压降区。阳极压降 $U_A = 19V$ ，该压降区的长度为 $0.4 \times 10^{-3}cm$ ，如图 1-8 中所示。

为便于讨论，将阳极压降区划分为图 1-8 中 I、II、III、IV 4 个区域，来自弧柱的电子经过加速区 III 在阳极压降的加速之后进入电离区 IV，碰撞中性粒子使之电离。由于 IV 区长度

小于平均自由程, 因此, 几乎所有电子都能进入阳极, 但只有 0.1% 的电子成功地发生碰撞电离。这样产生的阳离子在通过 I、II、III 区间, 获得电压降的加速的同时, 与其他粒子发生多次碰撞, 其运动的方向和弧柱中一样是不规则的, 阳离子将其动能转换成温度形式的能量进入弧柱区。

在熔化极电弧焊采用较小直径焊条、较大焊接电流进行熔焊时, 电流密度相当高, 阳极的温度也很高, 中性粒子的温度相应也较高。因此, 中性粒子电离所需的电子动能就减小; 电子也不需要因为要发生碰撞电离而拥有特别高的能量, 在极限情况下, 阳极压降 $U_A = 0$ 时, 电子碰撞中性粒子发生电离是有可能的。

从焊条熔化速度推算出阳极压降 $U_A \approx 0$; 从大电流金属极电弧焊的实际情况 $U_A \approx 0$, 这是由于阳极附近产生高温的结果, 这一现象形成的概念对于理解焊接电弧的产热是很重要的。

1.1.3 焊条电弧焊焊接时的电弧功率

1. 焊条电弧焊焊接时的阴极压降和阳极压降

由于电弧阴极、阳极压降区导电特性的不同、电极材料物理性能(熔点、沸点、电离电位及功函数)及其化学运动(分子、原子的化分和化合)等的不同, 在电弧高温下产生不同的作用和影响, 致使电弧阴极区、阳极区有不同的导电性能及其压降值。

图 1-10 所示为采用探极法测得焊接电弧的电压值。大气压下探极测定法的可靠性尚有些疑问, 但测定 U_K 还可以用其他方法。这些方法都是建立在以下假定之上的, 即在电极短路后提起电极引弧的瞬间或者在刚要从燃弧过渡到短路的瞬间, 此时的电弧电压只含有 U_K , 不包含 U_A , 见表 1-1。

表 1-1 焊条电弧焊电弧电压

电 极	U_K/V	电 极	U_K/V
软钢药皮焊条	10.4	堆焊裸焊条	11.9 ~ 14.0
堆焊药皮焊条	8.6 ~ 9.4	不锈钢药皮焊条	13.3

注: 采用探极法, 焊接电流 $I = 200A$ 。

从焊接实验结果可知, 焊条电弧焊焊接时的电弧电压不但与弧长成线性关系, 同时与焊条药皮成分(化合物及金属元素相对原子质量、电离电位、功函数)和药皮厚度及电流极性等相关。

一般认为, 金属氧化物可以降低阴极压降 U_K 。但是, 作为电弧电压, 还必须考虑弧柱压降 U_p 和阳极压降 U_A 的变化。由于金属蒸气的电离电位一般比较低, 当这种蒸气大量存在于弧柱空间时, U_p 应当下降。虽然弧柱空间中蒸气量的多少对降低 U_p 有多大的作用尚未清楚, 但可定性地说, Al_2O_3 可以提高电弧电压的原因, 大概是 Al_2O_3 的耐热性强, 很难以产生 Al 蒸气所致。

另外, 当电弧空间存在消电离的 F、Cl 类卤族

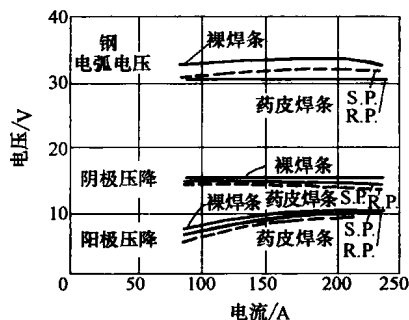


图 1-10 焊接电弧的阴极压降和阳极压降