

实践经验总结，操作技巧展示，从技术到质量，成就大国工匠

长输管道焊工 培训教程

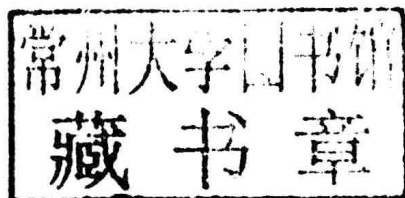
尹长华 主编



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

长输管道焊工培训教程

主 编 尹长华
副主编 吕向阳
参 编 李颂宏 闫 臣 靳海成
付桂英 郭瑞杰



机械工业出版社

本书主要结合长输管道工程实际,介绍了电弧焊基础知识、长输管道焊接设备、常用焊接方法、长输管道工程用材料、典型电弧焊操作技术、长输管道工程常见缺欠成因及预防、焊缝质量检验、焊接安全与防护等内容。附录中给出了钢材的牌号、性能及热处理基础知识、长输管道工程焊工考试管理规定和焊工考试样卷。

本书可作为从事长输管道工程施工的焊工培训教材,还可作为长输管道工程施工管理人员和焊接质量控制人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

长输管道焊工培训教程/尹长华主编. —北京:机械工业出版社, 2016. 12

ISBN 978-7-111-55385-4

I. ①长… II. ①尹… III. ①长输管道-管道焊接-技术培训-教材
IV. ①TG457.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 276411 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:吕德齐 责任编辑:吕德齐 责任校对:张玉琴

封面设计:陈沛 责任印制:李洋

河北鑫宏源印刷包装有限责任公司印刷

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 15.5 印张 · 307 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-55385-4

定价: 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线: 010-88361066

读者购书热线: 010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

前 言

和公路、铁路、水运以及航空相比，采用管道输送石油和天然气是最经济、最安全的运输方式。随着人类对能源需求的日益增长，世界各国的管道建设量正在迅速增加。我国无论是从宏观规划还是微观进度来看，油气管道建设都在逐渐步入高峰期。据统计，截至2013年10月，我国油气管道总里程达10.6万km，按照规划，到2025年前后，我国油气管道总长度将达到20万~25万km。随着长输管道向着高钢级、大口径、高压力方向发展，保障管道的安全逐渐引起了各方的重视，其中长输管道焊接质量的好坏尤其受到关注。

本书是为了适应长输管道焊接技术发展需要而编写的。在编写过程中，编者在总结多年来长输管道焊接技术实践经验基础上，从工程建设对高素质劳动者的实际需求出发，注重以“必需和够用”为原则进行了取材编改和撰写，主要介绍了电弧焊基础知识、长输管道焊接设备、常用焊接方法、长输管道工程用材料、典型电弧焊操作技术、长输管道工程常见缺欠成因及预防、焊缝质量检验、焊接安全与防护等内容。附录中给出了钢材的牌号、性能及热处理基础知识、长输管道工程焊工考试管理规定和焊工考试样卷等内容。

本书由中国石油天然气管道科学研究院尹长华高级工程师组织编写。第一、第二、第三章及附录由尹长华编写，第四章由吕向阳、付桂英共同编写，第五章由李颂宏、吕向阳共同编写，第六章由靳海成编写，第七章由闫臣编写，第八章由郭瑞杰编写。全书由尹长华进行统稿。

全书由中国石油天然管道科学研究院王鲁君教授级高级工程师、隋永莉教授级高级工程师审阅。

本书适用于从事长输管道工程施工的焊工，还可作为长输管道工程施工管理人员和焊接质量控制人员的参考用书。

由于编者的水平有限，加之时间较紧，书中定有不当之处，敬请广大读者及同行专家批评指正。

编 者

目 录

前言	
第一章 电弧焊基础知识	1
第一节 焊接电弧	1
一、电弧的特性	1
二、电弧的温度分布	3
三、焊接电弧的静态伏安特性	4
四、电弧和熔池的保护	6
五、电弧力及其影响因素	6
六、电弧燃烧的稳定性	11
第二节 弧焊电源相关特性	15
一、常用弧焊电源分类	15
二、电弧焊基本焊接电路	16
三、弧焊电源的特性要求	17
四、电源的负载持续率	20
五、电源的空载电压及电流调节范围	21
六、电弧焊电源的选择	21
第三节 焊丝加热、熔化及熔滴过渡	22
一、焊丝的加热与熔化特性	22
二、影响焊丝熔化速度的因素	23
三、熔滴过渡及飞溅	24
第四节 焊接接头形式与坡口形式	36
一、焊接接头形式	36
二、坡口形式及参数	36
三、坡口加工与清理	37
第五节 焊缝形状尺寸与焊接位置	40
一、焊缝和熔池的形状尺寸及焊缝成形	40
二、焊接位置及代号	42
第六节 焊接参数和工艺因素对焊缝成形的影响	46
一、电流、电压、焊速等的影响	46
二、电流的种类和极性以及电极尺寸等的影响	48
三、其他工艺因素对焊缝尺寸的影响	49
思考题	51
第二章 长输管道焊接设备	52
第一节 焊接设备的分类及型号	52

一、焊接设备的分类	52
二、我国电焊机产品型号的编制方法	52
第二节 焊接设备的特点及应用	54
一、手工电弧焊焊机	55
二、气体保护焊焊机	56
三、埋弧焊机	56
四、电阻焊焊机	56
五、焊接机器人	57
六、专用成套焊接设备	57
七、管道全位置自动焊机	57
第三节 典型焊接设备介绍	58
一、DC—400 焊接电源	58
二、LN—23P 送丝机	65
第四节 焊接设备的正确使用与维护	70
思考题	72
第三章 长输管道焊接方法	73
第一节 焊接方法分类	73
第二节 长输管道工程常用焊接方法简介	74
一、焊条电弧焊	75
二、钨极氩弧焊	77
三、自保护药芯焊丝半自动焊	78
四、STT 技术气体保护实心焊丝半自动焊	80
五、CMT 技术熔化极气体保护半自动焊	81
六、RMD 技术熔化极气体保护半自动焊	82
七、管道自动焊	83
思考题	90
第四章 长输管道工程用材料	91
第一节 管道用材	91
一、管道工程的发展趋势及其对管线钢的要求	91
二、管道工程常用材料	92
第二节 焊接材料	94
一、焊接材料分类	94
二、长输管道常用焊接材料	95
三、焊材牌号、型号	98
四、焊接材料质量管理	107
五、长输管道用焊接材料选用原则	111
思考题	115
第五章 典型电弧焊操作技术	116
第一节 传统焊条电弧焊操作技术	116

一、引弧、运条和收弧	116
二、单面焊双面成形技术	118
三、板的焊接	119
四、管的焊接	129
第二节 焊条向下焊操作技术	138
一、纤维素焊条向下焊操作技术	138
二、低氢焊条向下焊操作技术	142
第三节 自保护药芯焊丝半自动焊操作技术	144
第四节 表面张力过渡根焊技术	147
一、需调整设定的参数及其作用	147
二、表面张力过渡根焊操作技术	149
第五节 熔敷金属控制根焊技术	152
一、焊接设备及焊接参数	152
二、熔敷金属控制根焊操作技术	152
第六节 管道自动焊操作技术	154
一、管道内焊机操作技术	154
二、管道外自动根焊操作技术	155
三、管道外自动填充、盖面焊操作技术	158
思考题	160
第六章 长输管道工程常见焊接缺欠	162
第一节 焊接缺欠的危害	162
第二节 长输管道工程常见焊接缺欠成因及控制	162
一、裂纹	162
二、未焊透	164
三、边缘及层间未熔合	165
四、夹渣	165
五、气孔	166
六、咬边	168
七、凹陷	168
八、焊瘤	168
九、弧坑	169
十、电弧擦伤	169
十一、焊缝尺寸不符合要求	169
十二、夹钨	170
十三、烧穿	170
十四、飞溅	171
思考题	171
第七章 长输管道工程焊接质量检验	172
第一节 焊缝外观及尺寸检验	172

一、焊缝的目视检验	172
二、对接焊缝尺寸的检验	173
第二节 射线检测	174
一、射线检测的基本原理及特点	174
二、射线底片评定	176
三、典型缺欠的射线底片影像	176
四、质量分级	183
第三节 长输管道工程焊缝的强度和严密性试验	189
一、一般规定	189
二、清管、测径	190
三、水压试验	190
四、气压试验	191
第四节 焊接接头的破坏性试验	192
一、试样的取样位置及数量	192
二、试验方法及要求	193
思考题	198
第八章 焊接安全与防护	200
第一节 安全用电	200
一、电流对人体的危害	200
二、安全用电注意事项	201
第二节 防火、防爆基础知识	202
一、焊接现场发生爆炸的可能性	202
二、防火、防爆措施	202
第三节 焊接安全规定	203
一、电焊作业	203
二、气焊作业	204
三、管道维修的安全	204
第四节 焊接劳动卫生和防护	205
一、焊接有害因素	205
二、焊接防护措施	207
第五节 焊接安全管理	209
一、焊接作业点组织及消防措施	209
二、焊接急性中毒的预防	210
三、焊接灼伤和机械伤害的预防	211
四、制定焊接安全操作规程	212
思考题	212
附录	213
附录 A 钢材的牌号、性能和热处理基础知识	213
附录 B 长输管道工程焊工考试	217
附录 C 焊工基本知识考试样卷	232
参考文献	237

第一章

电弧焊基础知识

第一节 焊接电弧

一、电弧的特性

电弧焊时，熔化金属的热源是焊接电弧。电弧是电荷通过两电极间气体空间的一种导电过程，是一种气体放电现象。通常情况下气体是不导电的，为了使其导电，必须在气体中形成足够数量的自由电子和正离子。

焊接电弧是能量比较集中的热源，用于熔化母材和填充金属。焊接电弧电压在整个弧长上的分布是不均匀的，明显地分为三个区域。靠近阴极（负极）一段极小的长度（约 $10^{-6} \sim 10^{-5} \text{cm}$ ）为阴极压降区，靠近阳极（正极）一段极小的区域（约 $10^{-3} \sim 10^{-4} \text{cm}$ ）为阳极压降区，中间部分为弧柱区，弧柱区的长度可以近似代表整个弧长，如图 1-1 所示。

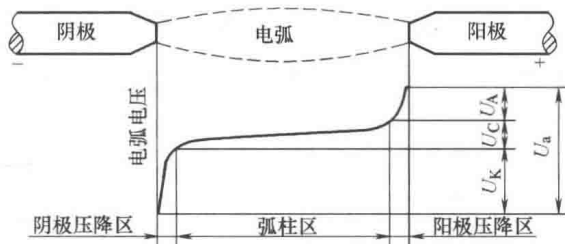


图 1-1 电弧各区域的电压分布示意图

U_A —阳极区电压降 U_K —阴极区电压降 U_C —弧柱区电压降 U_a —电弧电压

燃烧过程中，在电极和母材上形成的活性斑点是电极和焊件的最热点，电弧电流都由此通过。阴极上的活性斑点，称为阴极斑点，阳极上的活性斑点称为阳极斑点，如图 1-2 所示。电弧阴、阳两极的最高温度接近于材料的沸点。一般情况下，阳极斑点温度略高于阴极斑点温度，而在焊接电弧中，弧柱区是电子和离子移动最频繁的地方，因而温度最高。焊条电弧焊时，电弧的温度可达 $6000 \sim 7000^\circ\text{C}$ 。

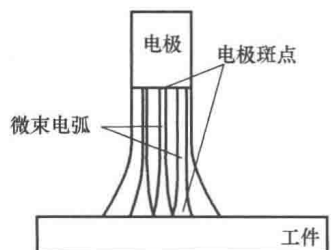


图 1-2 电极斑点示意图

随着焊接电流的增大，弧柱的温度也增高。焊接电弧各区产生的热量与电压分布有着直接的关系，在阴极和阳极区域，有较大的电压降（ $10^5 \sim 10^7 \text{V/cm}$ ），产生较多的热量。在弧长较短的情况下，弧柱只有几伏的压降（ 10V/cm ），其产生的热量，只占电弧产生热量的较小部分。由此可见，两个极区对焊条（丝）与母材的加热和熔化起主要作用。

对于电极斑点，具有以下特性：

- 1) 发射（阴极）和接收（阳极）导电粒子（电子）。
- 2) 有自动寻找氧化膜（阴极斑点）和避开氧化膜的特性（阳极斑点）。
- 3) 具有游动性，影响电弧稳定性。
- 4) 产生斑点压力（反作用力），阻止熔滴过渡，导致飞溅，也影响稳定性。

其中阴极斑点力大于阳极斑点力。

对于电弧各区产热，主要作用对象：

- 1) 两极区产热用于电极（工件）的加热、熔化和散热损失。
- 2) 弧柱区产热用于平衡弧柱区的散热损失。

一般来讲：对于熔化极焊接方法，阴极区产热大于阳极区产热；而对于非熔化极焊接方法，阴极区产热小于阳极区产热。

这里要重点提及的是，阴极斑点的形成要求一定的条件，首先该点应具有可能发射电子的条件，其次是电弧通过该点时弧柱能量消耗较小，即 IEL_c 较小（ I 为电弧电流， E 为弧柱电场强度， L_c 为弧柱长度）。凡具备上述条件的点便产生新的阴极斑点，失去上述条件的点则阴极斑点就自动消失，由此形成阴极斑点的高速跳动（其速度可达 $10^4 \sim 10^5 \text{cm/s}$ ）或可能同时存在数个阴极斑点。阴极斑点的形成条件决定了阴极斑点不能沿阴极表面自由移动，具有所谓“黏着”特性。图 1-3 表明了这种特性。

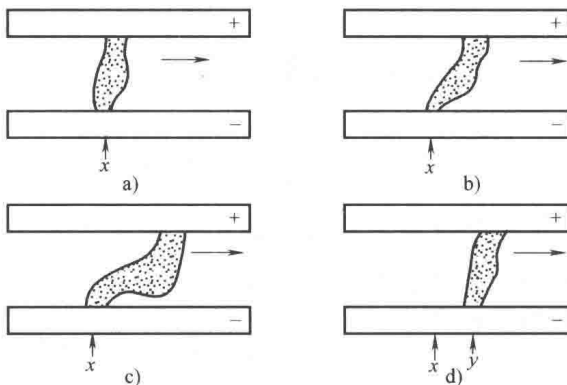


图 1-3 阴极斑点黏着作用

x—原斑点位置 y—新斑点位置

对于阳极斑点，一般在低熔点材料作为阳极时而发生，阳极斑点的条件是，首

先该点有金属的蒸发，其次是电弧通过该点时弧柱消耗能量较低，即 IEL_c 较小。若焊条（焊丝）为阴极，工件为阳极，当阴极（焊条）相对于阳极（工件）移动时，阳极斑点在工件上也不能连续移动，只能产生跳动。如图 1-4 所示。

二、电弧的温度分布

电弧温度的轴向分布是弧柱的温度较高，而两个电极上温度较低，如图 1-5 所示，这是因为电极温度的升高受到电极材料导热性能、熔点和沸点限制的结果。从图 1-5 还可以看出，阴极区和阳极区的电流密度和能量密度均高于弧柱区。一般电弧焊时，阴极和阳极产生的热量相近，但由于阴极发射电子消耗的能量较多，故其温度比阳极低一些。

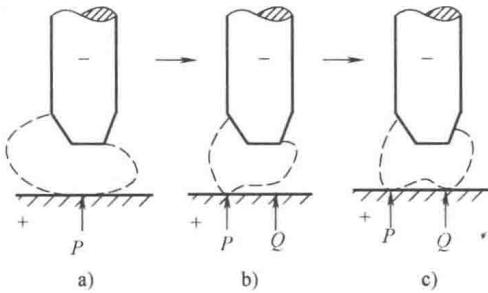


图 1-4 阳极斑点跳动示意图

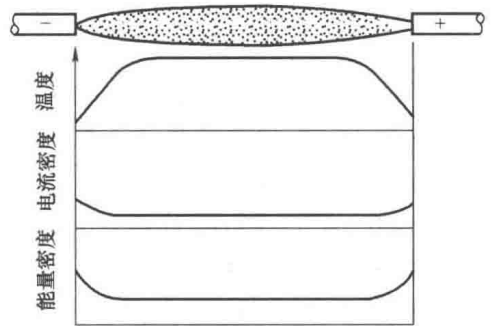


图 1-5 电弧的温度、能量密度、
电流密度的轴向分布

焊接电弧温度沿径向的分布是不均匀的，电弧中心轴温度最高，离开中心轴的温度逐渐降低，这主要是由于外围散热快造成的。

在相同的产热情况下，电极的温度受电极材料的种类、导热性、电极的几何尺寸影响较大。一般来说，材料的沸点越低、导热性越好、电极的尺寸越大，电极的温度越低；反之，则越高。弧柱区的温度受电流大小、电极材料、气体介质、弧柱的压缩程度等因素的影响较大。焊接电流增大，弧柱区的温度增加，在常压下，当电流由 1A 至 1000A 变化时，弧柱区的温度可在 5000 ~ 30000℃ 之间变化。金属蒸气的电离电压一般比较低，当电极材料不同时，其蒸气的电离电压不同，因而对弧柱区温度的影响不同，其电离电压越低，弧柱的温度也越低。当电弧周围有高速气流流动时（如等离子弧），由于气流的冷却作用，使弧柱区电场强度提高，温度上升。当气体介质中有较多易电离的物质（如碱金属、碱土金属的蒸气等）时，虽然能提高电弧的稳定性，但弧柱区的温度有所降低；反之，如果介质中含有电离能较高（不易电离）的物质，特别是存在负电性元素氟时，能显著地提高弧柱区的温度。例如，用含氟的焊剂进行埋弧焊时，弧柱区的温度可高达 7577℃。含氟越多，温度越高。其原因是，氟易与电子在电弧周边结合形成负离子 F^- ，使得电弧

周边难以导电，电弧电流主要从电弧中心流过，这相当于对电弧产生了压缩作用，因而使弧柱的温度提高。

三、焊接电弧的静态伏安特性

电弧燃烧时，两极间稳态的电压和电流关系曲线称为电弧静特性，表示变化状态电流与电压之间关系的曲线称为电弧的动特性。

1. 电弧静特性曲线的形状

电弧静特性曲线形状一般如图 1-6 所示，有三个不同的区域。当电流较小时（图中 A 区），电弧是下降特性，随着电流的增加电压减小；当电流增大时（图中 B 区），电压几乎不变，电弧呈平特性；当电流更大时（图中 C 区），电压随电流的增加而升高，电弧呈上升特性。各种工艺因素使电弧静特性曲线有不同的数值，但都有如图 1-6 那样的趋势。电弧电压 (U_a) 是由阴极压降 (U_K)、弧柱压降 (U_C) 和阳极压降 (U_A) 三部分组成，即 $U_a = U_K + U_C + U_A$ 。电弧静特性就是这三部分电压降的总和与电流的关系。在小电流区间，因为电弧电流较小，弧柱的电流密度基本不变，弧柱断面将随电流的增加而按比例增加。若电流增加四倍，弧柱断面也增加四倍，而弧柱周长却只增加两倍，使电弧向周围空间散失热量也只增加两倍。减少了散热，提高了电弧温度及电离程度，因电流密度不变，必然使电弧电场强度下降， U_a 有下降趋势，因此在小电流区间，电弧静特性呈负阻特性。

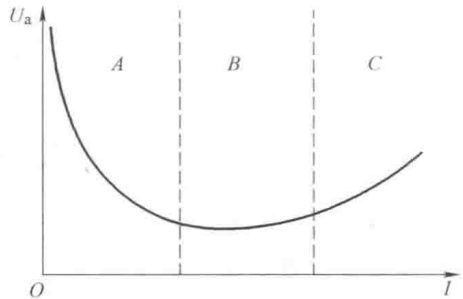


图 1-6 电弧的静特性

当电流稍大时，焊丝金属产生的金属蒸气将发射等离子流。金属蒸气以一定速度发射要消耗电弧的能量，等离子流也将对电弧产生附加的冷却作用，此时电弧的能量不仅有周边上的散热损失，而且还与金属蒸气与等离子流消耗的能量相平衡。这些能量消耗将随电流的增加而增加，因此在某一电流区间，可以保持 E 不变，即 U_a 不变来保证产热与散热的平衡，因此呈平特性。钨极氩弧焊时，在小电流区间电弧为下降特性，对埋弧焊、焊条电弧焊和大电流钨极氩弧焊时，因电流密度不太大，电弧呈平特性。

当电流进一步增大时，特别用细丝熔化极惰性气体保护焊（MIG 焊）焊时，金属蒸气的发射和等离子流冷却作用进一步加强，同时因电磁力的作用，电弧断面不能随电流的增加成比例地增加，电弧的电导率将减小，要保证一定的电流则要求较大的电场强度 E ，所以在大电流区间，随着电流的增加，电弧电压 U_a 升高，呈上升特性。

2. 影响电弧静特性的因素

(1) 电弧长度的影响 电弧长度改变时，主要是弧柱长度发生变化，整个弧

柱的压降 EL_0 (L_0 为弧柱长度) 增加时, 电弧电压增加, 电弧静特性曲线的位置将提高, 如图 1-7 所示。另外, 电流一定时, 电弧电压随弧长的增加而增加, 对熔化极和钨极都有类似的情况。

(2) 周围气体种类的影响 气体介质对电弧静特性有显著的影响, 这种影响也是通过对弧柱电场强度的影响表现出来的。主要有两方面原因, 一是气体电离能不同; 二是气体物理性能不同。第二个原因往往是主要的。气体的导热系数、解离程度及解离能等对电弧电压都有决定性的影响。双原子气体的分解吸热以及导热系数大的气体对电弧冷却作用的加强, 即热损失的增加, 使电弧单位长度上要求有较大的 IE 与之平衡。当 I 为定值时, E 必然要增加, 从而使电弧电压升高。图 1-8 给出了不同保护气体电弧电压的比较, 50% Ar + 50% H₂ 的混合气体电弧电压比纯 Ar 气的电弧电压高得多。这是因为 H₂ 的高温解离吸热及导热系数比 Ar 大得多 (图 1-9), 对电弧的冷却作用很强所致, 使电弧电压显著升高。

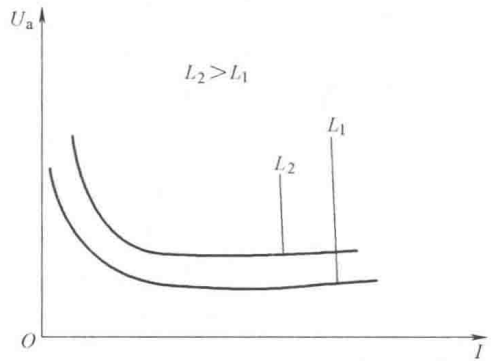


图 1-7 电弧长度对电弧静特性的影响
 L_1 、 L_2 —电弧长度

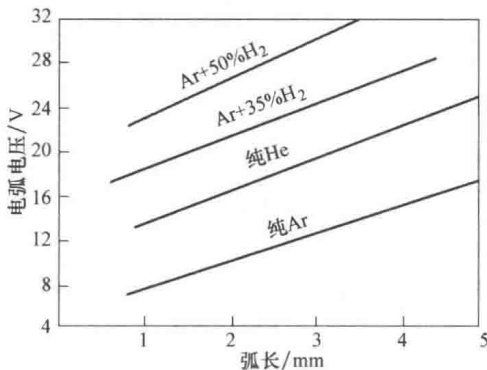


图 1-8 不锈钢钨极氩弧焊时弧压与弧长的关系 ($I = 100A$)

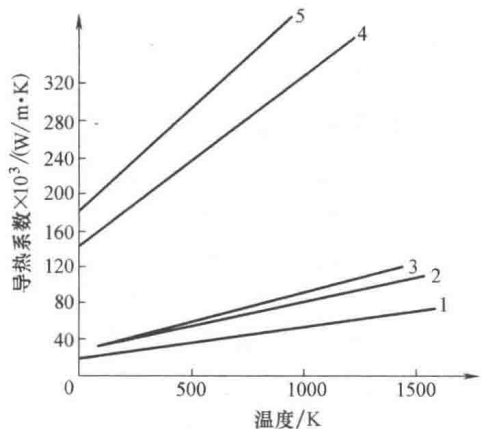


图 1-9 不同气体导热系数与温度的关系
1—Ar 2—N₂ 3—CO₂ 4—He 5—H₂

(3) 周围气体介质压力的影响 其他参数不变, 气体介质压力的变化将引起电弧电压的变化, 即引起电弧静特性的变化。气体压力增加, 意味着气体粒子密度的增加, 气体粒子通过散乱运动从电弧带走的总热量增加, 因此气体压力越大, 冷却作用就越强, 电弧电压就越升高。

四、电弧和熔池的保护

在电弧高温下，金属与空气中的主要成分氧和氮发生化学反应，熔池金属与空气接触，也生成氧化物和氮化物，熔池凝固后就可能导致接头性能变坏，因此必须用气体或熔渣来覆盖保护电弧和熔池，以阻碍或减少熔池金属与空气的接触。保护方法也会影响电弧的稳定性和其他特性。

图 1-10 示出焊条对焊接电弧和熔池的保护情况。涂覆于焊条外的药皮，在电弧热的作用下产生气体，阻止空气与熔池接触。药皮中还含有混合物的成分，在电弧高温作用下熔化，它可与金属表面的有害物质，如氧化物等发生作用，生成熔渣，浮于熔池表面，并在新凝固的金属表面结成渣壳，对其起保护作用，以防止凝固了的金属与空气接触。

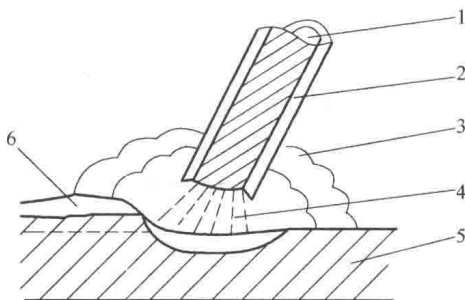


图 1-10 焊条电弧焊时电弧和熔池的保护

- 1—焊芯 2—药皮 3—气体
4—电弧 5—焊件 6—熔渣

五、电弧力及其影响因素

在焊接过程中，电弧不仅是个热源而且也是一个力源。电弧产生的机械作用力与焊缝的熔深、熔池搅拌、熔滴过渡、焊缝成形等都有直接关系。如果对电弧力控制不当它将破坏焊接过程，使焊丝金属不能过渡到熔池而形成飞溅，甚至形成焊瘤、咬肉、烧穿等缺陷。焊接电弧力主要包括电磁力、等离子流力、斑点压力、短路爆破力等。

1. 焊接电弧作用力

(1) 电磁收缩力 当电流在一个导体中流过时，整个电流可看成是由许多平行的电流线组成，这些电流线间产生相互吸引力，使导体断面有收缩的倾向。如果导体是固态不能自由变形，此收缩力不能改变导体外形，如果导体是可以自由变形的液态或气态，导体将产生收缩（如图 1-11 中的液态段），这种现象称为电磁收缩效应，由此而产生的力称为电磁收缩力或电磁力。在流体中各方向的压力相同，径向压力等于轴向压力，故而在焊接电弧中，轴向压力 F 同时作用于焊条和工件上。

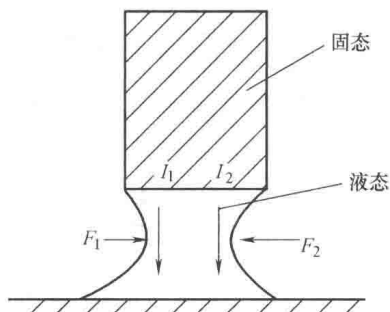


图 1-11 液态导体中电磁力引起的收缩效应

实际上焊接电弧不是圆柱体，而是断面直径变化的圆锥状。因为焊条直径限制了导电区的扩展，而在工件上电弧可以扩展得比较宽，所以接近焊条端电弧断面直

径小，而接近工件端电弧断面直径较大，这样因直径不同引起压力差，从而产生由焊条指向工件的推力。电弧中电流密度的分布是不均匀的，特别在大电流情况下，弧柱中心区域温度很高，电导率很大，故弧柱中心区域电流密度高于其外缘区。

(2) 等离子流力 焊接电弧呈锥形，使电磁收缩力在电弧各处分布是不均匀的，具有一定的压力梯度，靠近焊条（焊丝）处的压力大，靠近工件处的压力小，形成沿轴线的推力 $F_{推}$ 。电弧中的压力差将使靠近焊条处的高温气体向工件方向流动（图 1-12），高温气体流动时要求从焊条上方补充新的气体，形成有一定速度的连续气流进入电弧区。新加入的气体被加热和部分电离后，受 $F_{推}$ 作用继续冲向工件，对熔池形成附加的压力。在电弧中由于电弧推力引起高温气流的运动所形成的力称为等离子流力。熔池这部分附加压力是由物质的高速运动（等离子体流动）引起的，所以称为电弧的电磁动压力。电弧中等离子气流具有很大的速度和加速度，可以达到每秒数百米，其速度分布如图 1-13 所示。等离子流产生的动压力分布应与等离子流速度分布相对应，这种动压力在电弧中心线上最强。电流越大，中心线上的动压力幅值越大，而分布的区间越小。熔池轮廓主要由静压力决定时的焊缝形状，如图 1-14a 所示。当钨极氩弧焊的钨极锥角较小，电流较大，或熔化极氩弧焊采用射流过渡规范时，这种电弧的动压力皆较显著，容易形成如图 1-14b 所示的焊缝。

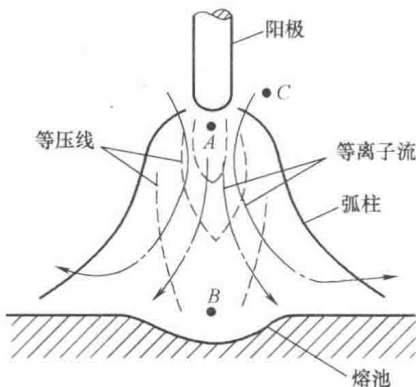


图 1-12 电弧中等离子流力示意图

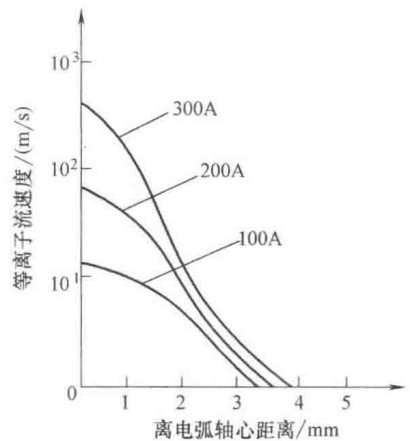


图 1-13 等离子流速度的径向分布

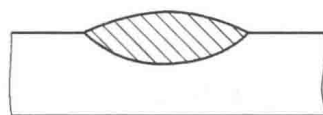
事实上不但产生从焊条指向工件的等离子流，也可能产生从工件指向焊条的等离子流。由于从焊条指向工件的等离子流比从工件指向焊条的等离子流强，其结果是向下的等离子流将向上的等离子流完全压制下去，如图 1-15、图 1-16 所示。

(3) 斑点力 当电极上形成斑点时，由于斑点上导电和导热的特点，在斑点上将产生斑点力。如图 1-17 所示，此斑点力在一定条件下将阻碍焊条熔化金属的过渡。斑点力也称斑点压力，它可由下面几种力组成：

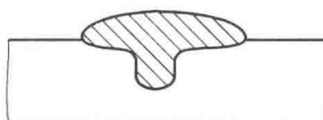
1) 正离子和电子对电极的撞击力。阳极接受电子的撞击，阴极接受正离子的

撞击。由于正离子的质量远远大于电子的质量，同时一般情况下阴极压降 U_k 大于阳极压降 U_A ，故通常这种斑点力在阴极上表现较大，在阳极上表现较小。

2) 电磁收缩力。当电极上形成熔滴并出现斑点时，焊丝、熔滴及电弧中电流线的分布如图 1-18 所示，熔滴和电弧空间的电流线都在斑点处集中。根据前述电磁收缩力产生的原理，电磁力的合力方向是由小断面指向大断面，所以斑点处将产生向上的电磁收缩力，阻碍熔滴下落。通常阴极斑点比阳极斑点的收缩程度大，所以阴极斑点力也大于阳极斑点力。



a) 一般电弧形成的焊缝



b) 较强等离子流形成的焊缝

图 1-14 焊缝熔深示意图

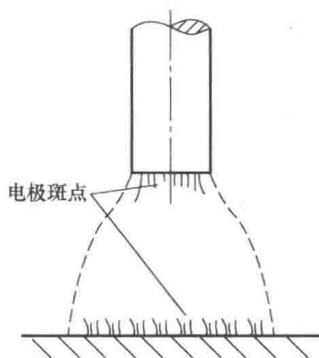


图 1-15 焊条与工件产生相对等离子流机构的示意图

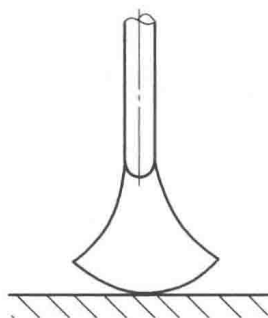


图 1-16 方向相反的两股等离子流的作用结果

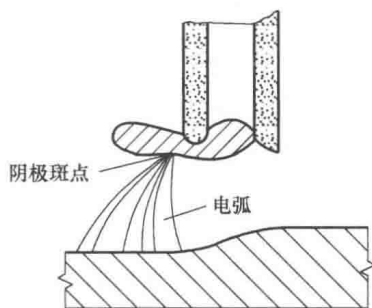


图 1-17 斑点压力示意图

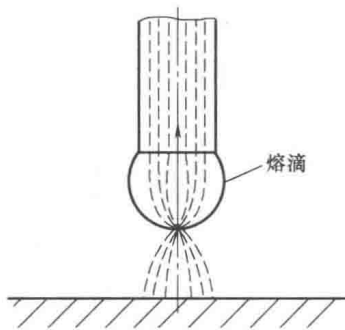


图 1-18 斑点的电磁收缩力

3) 电极材料蒸发的反作用力。由于斑点上的电流密度很高，局部温度很高而产生强烈的蒸发，使金属蒸气以一定速度从斑点发射出来，它将施加给斑点一定的反作用力。由于阴极斑点的电流密度比阳极斑点的高，发射要更强烈，因此阴极斑

点力也比阳极斑点力大。

(4) 爆破力 熔滴短路时电弧瞬时熄灭,如图 1-19 所示,因短路时电流很大,短路金属液柱中电流密度很高,在金属液柱内产生很大的电磁收缩力,使缩颈变细,电阻热使金属液柱小桥温度急剧升高,使液柱汽化爆断,此爆破力可能使液体金属形成飞溅。液柱爆断后电弧重新点燃,电弧空间的气体突然受高温加热而膨胀,局部压力骤然升高对熔池和焊丝端头的液态金属会形成较大的冲击力,严重时也会造成飞溅。

(5) 细熔滴的冲击力 富 Ar 气体保护焊的射流过渡焊接时,熔化金属形成连续细滴沿焊丝轴向射向熔池,每个熔滴的重量只有几十毫克,这些熔滴在等离子流力作用下,以很高的加速度(可达重力加速度的 50 倍以上)冲向熔池,到达熔池时其速度可达每秒几百米。这些细滴带有很大的动能,再加上电磁力及等离子流力的作用,使焊缝极易形成指状熔深,如图 1-20 所示。

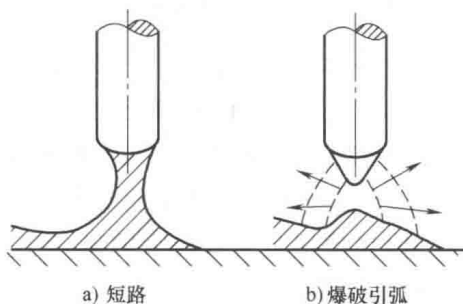


图 1-19 熔滴短路形成的爆破力

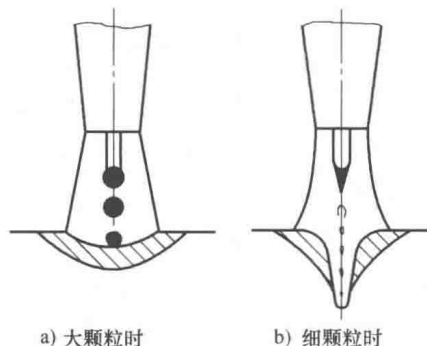


图 1-20 细熔滴的冲击力

2. 影响因素

产生及影响电弧力的因素较多,电弧形态及焊接参数与电弧力大小有直接关系。

(1) 气体介质 导热性强或多原子气体皆能引起弧柱收缩,导致电弧压力的增加(图 1-21)。气体流量或电弧空间气体压力增加,也会引起电弧收缩并使电弧压力增加,同时引起斑点收缩进一步加大了斑点压力。这将阻止熔滴过渡,使熔滴颗粒增大,过渡困难。 CO_2 气体保护焊时这种现象特别明显。

(2) 电流和电弧电压 电流增大时电磁收缩力和等离子流力皆增加,故电弧力也增大(图 1-22)。电弧电压升高,即电弧长度增加时,使电弧压力降低(图 1-23)。

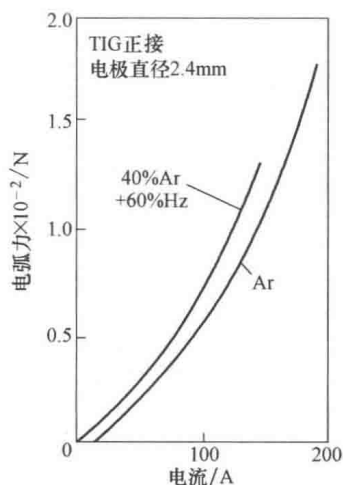


图 1-21 电弧力与气体介质的关系