



技能型人才培养教材
职业技能鉴定培训教材



焊工

HANGONG

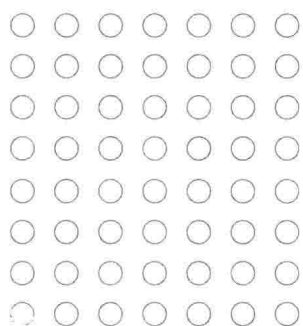
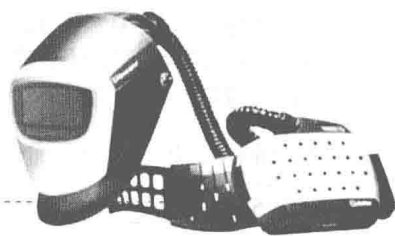
◎ 杨佩时 主编



化学工业出版社



技能型人才培养教材
职业技能鉴定培训教材

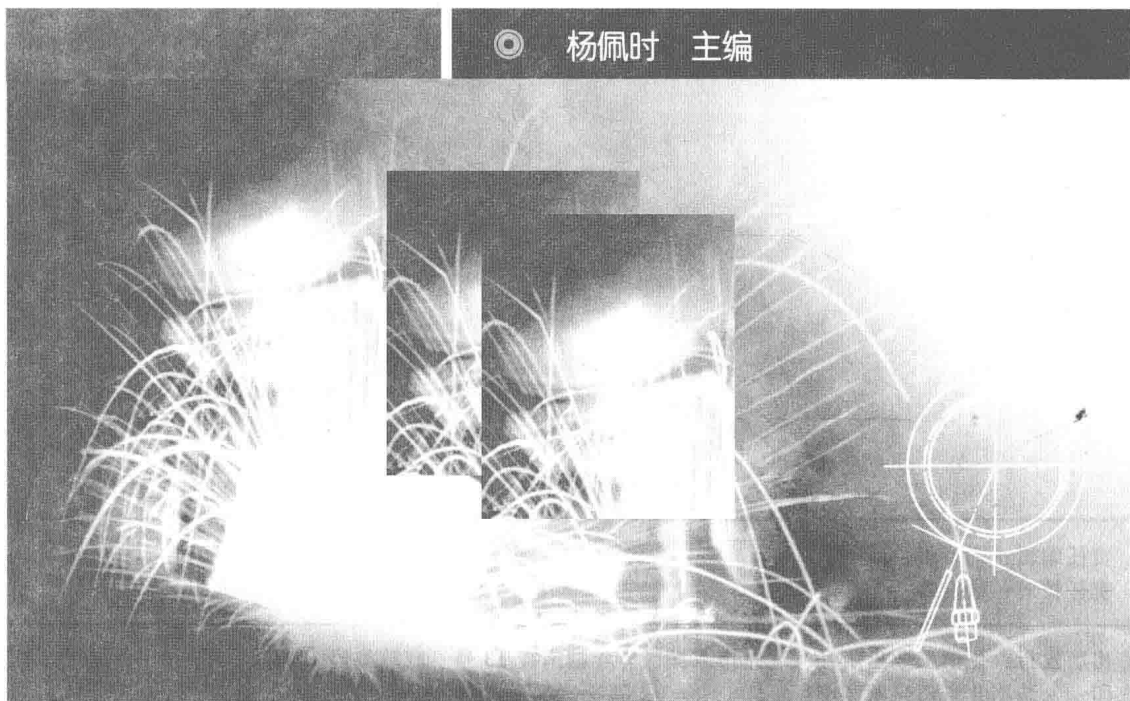


焊工

HANGONG



◎ 杨佩时 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

焊工/杨佩时主编. —北京: 化学工业出版社, 2010. 4
技能型人才培养教材. 职业技能鉴定培训教材
ISBN 978-7-122-07819-3

I. 焊… II. 杨… III. 焊接-技术培训-教材 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 032042 号

责任编辑: 刘 哲
责任校对: 徐贞珍

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)
印 装: 北京市兴顺印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 398 千字 2011 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 35.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为了适应经济发展对技能型人才的需要，国家正在大力推行职业资格证书制度，鼓励广大技术工人通过各种形式的学习和培训来提高自身的知识水平和操作能力，不断提高自身的创新意识、创业能力和就业能力，从而增强综合竞争力。

根据当前生产技术发展的需要和广大操作人员的要求，我们组织了一批具有丰富实践经验、长期从事生产技术、生产管理的工程技术人员和具有丰富教学经验、长期从事职业技术教育的专业课教师，编写了这套“技能型人才培养教材”：《机械基础》、《化学基础》、《化工基础》、《电工电子技术基础》、《机械制图》、《电工识图》、《钳工》、《焊工》、《冷作钣金工》、《维修电工》、《仪表维修工》等。

该系列培训教材根据《国家职业标准》并参考中、高职学校相关专业教材，突出了实际操作和技能训练内容的编写。该系列培训教材具有很强的实用性，而且适用面很宽；具有逻辑性强、语言简练、文字严谨、层次清晰的特点。每本教材遵循由浅到深、由易到难的原则，按照一般的认识规律和教学规律而编写。该系列培训教材在编写过程中坚持了先进性原则，注意了新标准、新知识、新技术、新工艺的采集和介绍。该系列培训教材在每章开头明确提出本章的学习要求，每章结束附有习题，题型符合职业技能鉴定要求。可以作为职业技能鉴定考试考核的辅导用书。

本书为《焊工》分册。全书重点介绍了焊接（电焊）的理论基础知识，比较全面地阐述了各种形式、各种材料焊接的操作技能、相关质量标准和安全操作要求。

本书由杨佩时主编，参加编写的还有杨名坤、吴杰然、范会民等。全书由欧述生、刘勃安进行了审核与修改。

由于时间仓促，加之编者水平有限，书中定有不足之处，欢迎使用单位和读者提出宝贵意见和建议，在此深表谢意。

编 者
2010 年 7 月

目 录

第 1 章 焊接冶金基础知识	1
1.1 焊条、焊丝及母材的熔化	1
1.1.1 焊接热源	1
1.1.2 焊条、焊丝的加热及熔化	1
1.1.3 焊条、焊丝金属向母材的过渡	2
1.1.4 母材的熔化	4
1.2 焊接化学冶金过程	4
1.2.1 对焊接区金属的保护	5
1.2.2 焊接化学冶金过程的特点	5
1.2.3 有害元素对焊缝金属的作用	5
1.2.4 焊缝金属合金化	8
1.3 焊缝结晶过程	8
1.3.1 焊缝金属的一次结晶	9
1.3.2 焊缝结晶过程中的偏析	9
1.3.3 焊缝金属的二次结晶	10
1.3.4 焊缝中的夹杂物	10
1.4 焊接热影响区的组织和性能	11
1.4.1 熔合区的组织和性能	11
1.4.2 焊接热循环	11
1.4.3 焊接热影响区的组织和性能	12
1.5 控制和改善焊接接头性能的方法	13
1.5.1 材料的匹配	13
1.5.2 控制熔合比	13
1.5.3 焊接工艺方法的选择	13
1.5.4 焊接热输入及焊接工艺参数的选择	14
1.5.5 焊接工艺	14
习题 1	15
第 2 章 焊前准备	18
2.1 焊接安全技术和劳动保护	18
2.1.1 焊接安全技术	18
2.1.2 焊接劳动保护	20
2.2 焊接材料	21
2.2.1 焊条	21
2.2.2 焊剂	29
2.2.3 保护气体	29

2.2.4	焊丝	31
2.2.5	钨极	33
2.3	工件准备	34
2.3.1	焊接接头及焊接坡口	34
2.3.2	焊缝符号和焊接方法代号	36
2.3.3	不同位置焊件组对及定位焊	41
2.3.4	焊前预热	42
2.4	设备准备	43
2.4.1	焊条电弧焊电源	43
2.4.2	埋弧焊机	50
2.4.3	CO ₂ 气体保护焊设备	55
2.4.4	钨极氩弧焊设备	59
习题 2		61

第 3 章	焊接操作技术	64
3.1	概述	64
3.1.1	焊接的定义及分类	64
3.1.2	焊接技术的特点	65
3.2	气焊与气割	66
3.2.1	气焊、气割的原理、设备工具及材料	66
3.2.2	低碳钢和低合金钢的气焊与气割	76
3.3	手工电弧焊	87
3.3.1	焊接电弧	87
3.3.2	引弧和运条	91
3.3.3	手工电弧焊接工艺参数选取	95
3.3.4	手工电弧焊的实际操作	98
3.4	埋弧焊	120
3.4.1	埋弧焊原理	120
3.4.2	埋弧焊工艺	122
3.4.3	埋弧焊的实际操作	126
3.5	氩弧焊 (TIG)	131
3.5.1	氩弧焊的原理、特点和分类	131
3.5.2	钨极氩弧焊	132
3.5.3	钨极氩弧焊安全规程	134
3.5.4	钨极氩弧焊的实际操作	135
3.6	二氧化碳气体保护焊 (CO ₂)	137
3.6.1	CO ₂ 气体保护焊的原理及特点	137
3.6.2	CO ₂ 气体保护焊的冶金特点	138
3.6.3	CO ₂ 气体保护焊的熔滴过渡	139
3.6.4	CO ₂ 气体保护焊的飞溅问题	140
3.6.5	CO ₂ 气体保护焊的焊接材料	141
3.6.6	CO ₂ 气体保护焊的焊接工艺参数	141

3.6.7 CO ₂ 气体保护焊的实际操作	143
3.7 电阻焊	147
3.7.1 电阻焊的原理	147
3.7.2 电阻焊的特点	148
3.7.3 电阻焊的分类及应用	148
3.7.4 电阻焊设备	150
3.7.5 电阻焊工艺	152
3.7.6 电阻焊操作	155
3.8 等离子弧切割与焊接	156
3.8.1 等离子弧的形成及特性	156
3.8.2 等离子弧切割	158
3.8.3 等离子弧焊接	161
3.8.4 等离子弧焊接切割的双弧问题	163
3.8.5 等离子弧实际操作	163
3.9 碳弧气刨	165
3.9.1 碳弧气刨原理、设备工具及材料	165
3.9.2 碳弧气刨工艺参数	168
3.9.3 碳弧气刨操作	170
习题3	171

第4章 常用金属材料的焊接

4.1 低合金结构钢的焊接	176
4.1.1 焊接性概念	176
4.1.2 低合金结构钢的焊接性	176
4.1.3 低合金结构钢焊接工艺	178
4.2 珠光体耐热钢和低温钢的焊接	182
4.2.1 珠光体耐热钢的焊接	182
4.2.2 低温钢焊接	185
4.3 奥氏体不锈钢的焊接	187
4.3.1 不锈钢的分类及性能	187
4.3.2 奥氏体不锈钢的焊接性	189
4.3.3 奥氏体不锈钢焊接工艺	190
4.3.4 奥氏体不锈钢焊接方法的选用	191
习题4	194

第5章 焊接应力与变形

5.1 焊接应力和变形的形成	196
5.1.1 焊接应力与焊接变形	196
5.1.2 焊接应力与变形产生的原因	196
5.2 焊接残余变形	198
5.2.1 焊接残余变形的分类	198
5.2.2 影响焊接残余变形的因素	200

5.2.3	控制焊接残余变形的措施	202
5.2.4	残余变形的矫正	205
5.3	焊接残余应力	207
5.3.1	焊接残余应力的分类	207
5.3.2	控制残余应力的措施	208
5.3.3	消除残余应力的方法	210
习题 5		210
第 6 章	焊接缺陷及检验	213
6.1	焊接缺陷分析	213
6.1.1	焊接缺陷的分类	213
6.1.2	焊接缺陷的危害	213
6.1.3	焊接缺陷产生的原因及防治措施	214
6.2	焊接质量检验	219
6.2.1	焊接质量检验的过程和分类	219
6.2.2	无损检验	219
6.2.3	破坏性检验	225
6.3	焊接缺陷返修	228
6.3.1	返修前的准备	228
6.3.2	返修工艺	228
习题 6		229
习题答案		232
参考文献		238

第1章 焊接冶金基础知识



【学习目标】

1. 能够理解焊条、焊丝及母材在焊接过程中是如何熔化和过渡。
2. 能正确理解在焊接过程中各种气体对焊接的影响。
3. 了解在焊接过程中金属是如何结晶的。
4. 明确在焊接过程中焊接热影响区对焊缝组织的影响。
5. 能选用合理的方法改善焊缝性能。
6. 能正确选择各种焊接设备并能够维护及排除故障。

1.1 焊条、焊丝及母材的熔化

1.1.1 焊接热源

要实现金属的焊接，必须提供其能量。对于熔焊，关键是要有一个能量集中、温度足够高的局部加热热源。常用的熔焊热源有电弧热（电弧焊）、气体火焰（气焊）、电阻热（电渣焊）、等离子弧（等离子弧焊）等。

焊接热源所产生的热量并不能全部用来加热和熔化焊条、焊丝及母材，有一部分热量损失于周围介质和飞溅等。

1.1.2 焊条、焊丝的加热及熔化

熔化极电弧焊时，加热并熔化焊条、焊丝的主要热量有电弧热和电阻热，非熔化极电弧焊仅有电弧热而无焊丝的电阻热。

（1）电阻加热 当电流通过焊条或焊丝时，将产生电阻热。电阻热的大小决定于焊条或焊丝的伸出长度、电流强度、焊条或焊丝金属的电阻率和直径。

焊条或焊丝伸出长度越大，则通电的时间增加，电阻热加大；焊接电流越大，电阻热也越大；焊条或焊丝金属本身的电阻率越大，电阻热也越大。如不锈钢焊条的电阻率比低碳钢焊条大，因此，在相同焊接电流的情况下所产生的电阻热更大。同种材料的焊条或焊丝其直径越大，则电阻越小，相对产生的电阻热也就减小。

电阻热过大会给焊接过程带来不利的影响。如焊条电弧焊时，过高的电阻将使焊条药皮在熔化前就发红变质，失去保护和冶金作用。自动焊时，过高的电阻热将使焊丝发生崩断而影响焊接。为了减小过大的电阻热所带来的不利影响，在焊接过程中采取以下措施。

① 限制焊条或焊丝的长度 焊条电弧焊时焊条不能过长，特别是在采用细直径焊条时，更要限制其长度。例如直径 5mm 的焊条，其最大长度为 450mm；而直径为 2.5mm 的焊条，

其最大长度为 300mm。同样直径的不锈钢焊条,其长度还要短一些,如直径 5mm 的不锈钢焊条长度为 400mm。埋弧自动焊机气体保护焊时,在焊接工艺参数的选择中对焊丝伸出长度都有一定限制。

② 限制焊接电流 对于一定直径的焊条或焊丝,在生产中应根据工艺的要求选用合适的电流值,决不能单纯为了提高效率而选用过高的电流值。埋弧自动焊及 CO_2 气体保护焊时,由于焊丝伸出长度比焊条长度短得多,且没有焊条药皮,所以同样直径的焊丝可以选用比焊条电弧焊大得多的电流值,这样就大大地提高了生产率。不锈钢焊条由于本身材料的电阻率大,所以选用电流应比同样直径的碳钢焊条小一些。

(2) 电弧加热 真正使焊条、焊丝熔化的是电弧热。尽管电弧热只有一小部分用来熔化焊条或焊丝(大部分热量熔化母材),但它却是熔化焊条、焊丝的主要热量。而焊条、焊丝本身的电阻热仅起辅助作用。

1.1.3 焊条、焊丝金属向母材的过渡

熔滴是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。熔滴通过电弧空间向熔池转移的过程称为熔滴过渡。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的影响。

(1) 熔滴过渡的形式 金属熔滴向熔池过渡根据其形式不同,大致可分为滴状过渡、短路过渡和喷射过渡,如图 1-1 所示。

① 滴状过渡 滴状过渡有粗滴过渡和细滴过渡两种。

熔滴呈粗大颗粒状向熔池自由过渡的形式成为粗滴过渡,也称颗粒过渡,如图 1-1 (a) 所示。当电流较小时,熔滴依靠表面张力的作用可以保持在焊条或焊丝端部自由长大,直至熔滴下落的力(如重力、电磁力等)大于表面张力时才脱离焊条或焊丝端部落入熔池,此时熔滴较大,电弧不稳,呈粗滴过渡,通常不采用。随着电流增大,熔滴变细,过程频率提高,电弧较稳定,飞溅减小,呈细滴过渡。细滴过渡是焊条电弧焊和埋弧焊所采用的熔滴过渡形式。

② 短路过渡 焊条(或焊丝)端部的熔滴与熔池短路接触,由于强烈过热和磁收缩的作用使其爆断,直接向熔池过渡的形式称为短路过渡。熔滴的过渡情况如图 1-1 (b) 所示。

短路过渡能在小电流、低电弧电压下,实现稳定的熔滴过渡和稳定的焊接过程短路过渡,适合于薄板或低热输入的焊接。 CO_2 气体保护电弧焊采用最经典的过渡形式就是短路过渡。

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称为喷射过渡。焊接时,熔滴的尺寸随着焊接电流的增大而减小,当焊接电流增大到一定数值后,即产生喷射过渡状态。需要强调的是,产生喷射过渡除了要有一定的电流密度外,还必须要有电弧长度(电弧电压)。如果弧长太短(电弧电压太低),无论电流数值有多大,也不可能产生喷射过渡。

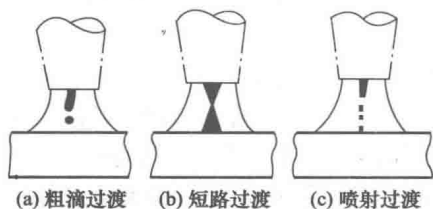


图 1-1 熔滴过渡形式

喷射过渡的特点是熔滴细,过渡频率高,熔滴沿焊丝的轴向高速向熔池运动,并具有电弧稳定、飞溅小、熔深大、焊缝成形美观、生产效率高等优点。喷射过渡是熔化极氩弧焊、富氩混合气体保护焊所采用的熔滴过渡形式,如图 1-1 (c) 所示。

(2) 熔滴过渡的作用力 在熔滴形成和长大过程中,有多种力作用其上。根据其来源不同,可分为重

力、表面张力、电磁压缩力、斑点压力和气体的吹力。

① 重力 金属熔滴因为本身的重力而具有下垂的倾向。平焊时，金属熔滴的重力起促进熔滴过渡的作用。但是在立焊或仰焊时，熔滴的重力阻碍了熔滴向熔池过渡，成为阻碍力。熔滴的重力如图 1-2 所示。

② 表面张力 表面张力是焊条或焊丝端头上保持熔滴的作用力。熔滴的表面张力如图 1-2 所示。

焊条或焊丝金属熔化后，其液体金属并不会马上掉下来，而是在表面张力的作用下形成球状悬挂在焊条或焊丝末端。随着其不断熔化，熔滴体积不断增大，直到作用在熔滴上的作用力超过熔滴与焊芯或焊丝界面间的张力时，熔滴才脱离焊芯或焊丝过渡到熔池中去。因此平焊时表面张力对熔滴过渡起阻碍作用。

但表面张力在仰焊等其他位置的焊接时，却有利于熔滴过渡。其一，熔池金属在表面张力作用下，倒悬在焊缝上面不易滴落；其二，当焊芯或焊丝末端熔滴与熔池金属接触时，会由于熔池表面张力的作用，而将熔滴拉入熔池。表面张力越大，焊芯或焊丝末端的熔滴越大。

表面张力的大小与多种因素有关，如焊条直径越大，焊条末端熔滴的表面张力也越大；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（如氩气中加入氧气），可以显著降低液体金属的表面张力，有利于形成细颗粒熔滴向熔池过渡。

③ 电磁压缩力 由电工学可知，两根平行的载流导体，若它们通过的电流方向相同，则这两个导体彼此相吸，使这两个导体相吸的力叫做电磁力，方向是从外向内，如图 1-3 所示。电磁力的大小与两个导体上的电流成正比，即通过导体的电流越大，电磁力越大。

焊接时，把焊条或焊丝末端的液体熔滴看成是由许多载流导体组成，如图 1-4 中箭头所示，这样熔滴就会受到由四周向中心的径向收缩力，称之为电磁压缩力。电磁压缩力垂直作用在金属熔滴表面上，电流密度最大的地方是在熔滴的细颈部分，这部分也是电磁压缩力作用最大的地方，电磁压缩力也随之增强，则促使熔滴很快地脱离焊条或焊丝端部向熔池过渡，这样就保证了熔滴在任何空间位置都能顺利地过渡到熔池。所以电磁压缩力在任何焊接位置都是促使熔滴过渡的力。

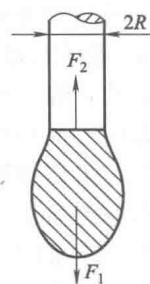


图 1-2 熔滴的重力和熔滴的表面张力示意图
 F_1 —熔滴的重力；
 F_2 —熔滴的表面张力

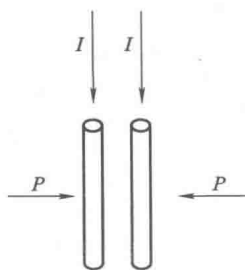


图 1-3 通有相同方向电流的两根导线的相互作用力

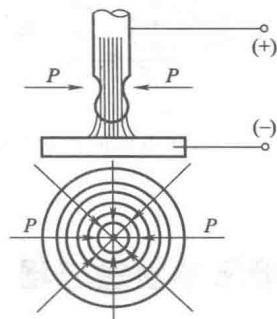


图 1-4 电磁力在熔滴上的压缩作用
 P —电磁压缩力

焊接时，一般焊条或焊丝上的电流密度都比较大，因此电磁压缩力是焊接过程中促使熔滴过渡的一个主要作用力。在气体保护焊时，通过调节焊接电流的密度来控制熔滴尺寸，是

工艺上的一个主要方法。

④ 斑点压力 焊接电弧中的带电微粒（电子和正离子），在电场的作用下分别向阳极和阴极运动，撞击在两极的斑点上而产生的机械压力，称为斑点压力，如图 1-5 所示。由于斑点压力的方向与熔滴过渡的方向相反，所以在任何焊接位置都是阻碍熔滴过渡的力。在直流正接时，阻碍熔滴过渡的是电子的压力；直流反接时，阻碍熔滴过渡的是正离子的压力。由于正离子的质量比电子大，所以直流正接时的压力比直流反接时大。

⑤ 气体的吹力 焊条电弧焊时，焊条药皮的熔化稍微落后于焊芯的熔化，在药皮的末端会形成一小段尚未熔化的“喇叭”形套筒，如图 1-6 所示。药皮造气剂分解产生的气体及焊芯中碳元素氧化产生的 CO_2 气体从套管中喷出。这些气体在高温状态下，体积急剧膨胀，沿焊条的轴线方向，形成挺直而稳定的气流，把熔滴吹到熔池中。因此在任何焊缝位置，这种气流都将有利于熔滴金属的过渡。

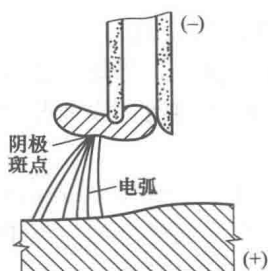


图 1-5 斑点压力阻碍熔滴过渡示意图

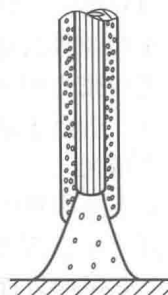


图 1-6 焊条药皮形成的套筒示意图

1.1.4 母材的熔化

熔焊时在焊接热源作用下，焊条、焊丝金属熔化的同时，被焊金属（母材）也发生局部的熔化。母材上由熔化的焊条、焊丝金属与母材金属所组成的具有一定几何形状的液体金属称为焊接熔池。焊接时，熔池随热源的向前移动而做同步运动。

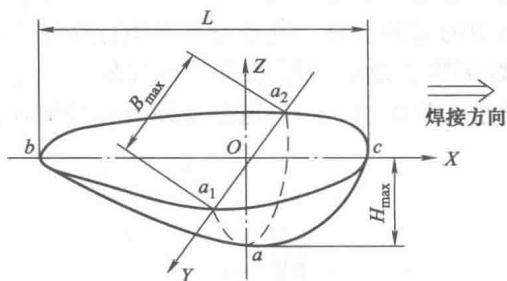


图 1-7 焊接熔池形状示意图

熔池的形状如图 1-7 所示，很像一个不标准的半椭圆形球。熔池的大小、存在时间对焊缝性能有很大影响。

一般情况下，随着电流的增加，熔池的最大深度 $H_{\max}$ 增大，熔池的最大宽度 $B_{\max}$ 相对减小；而随着电压的升高， $H_{\max}$ 减小， $B_{\max}$ 增大。

1.2 焊接化学冶金过程

焊接化学冶金过程是指焊接区中各种物质（熔化金属、熔渣、气体）之间在高温下相互作用的过程。焊接化学冶金的首要任务就是对焊接区的金属进行保护，防止空气的有害作用。其次是通过熔化金属、气体、熔渣之间的冶金反应来消除焊缝金属中的有害杂质，增加焊缝金属中某些有益的合金元素，从而保证焊缝金属的各种性能。

1.2.1 对焊接区金属的保护

焊接过程中,对焊接区进行保护的目的是防止空气的有害作用,保证焊缝质量。不同的焊接方法,其保护方式也不同。熔焊时各种保护方式见表 1-1。

表 1-1 熔焊方法的保护方式

保 护 方 式	焊 接 方 法
熔渣保护	埋弧焊、电渣焊、不含造气物质的焊条或药芯焊丝焊接
气体保护	在惰性气体或其他气体(如 CO_2 、混合气体等)保护中焊接
气-渣联合保护	具有造气物质的焊条或药芯焊丝焊接
真空保护	真空电子束焊接
自保护	用含有脱氧、脱硫剂的“自保护”焊丝进行焊接

1.2.2 焊接化学冶金过程的特点

(1) 温度高,温度梯度大 焊接电弧的温度很高,一般可达到 $6000\sim 8000^\circ\text{C}$,使金属剧烈蒸发,电弧周围的气体 CO_2 、 N_2 、 H_2 等大量分解,分解后的气体原子或离子很容易溶解在液态金属中形成气孔。

熔池温差大,熔池的平均温度在 2000°C 以上,并被周围的冷却金属包围,温度梯度大,因此,焊件易产生应力并引起变形,甚至产生裂纹。

(2) 熔池体积小、存在时间短 焊接熔池的体积小,焊条电弧焊熔池的质量通常在 $0.6\sim 16\text{g}$ 之间,埋弧焊熔池的质量一般不超过 100g 。同时加热及冷却速度很快,由局部金属开始熔化形成熔池,到结晶完成的全部过程一般只有几秒的时间,因此,整个冶金反应不能充分进行,易形成偏析。

(3) 熔池金属不断更新 焊接时随着焊接热源的移动,熔池中参加反应的物质经常改变,不断有新的铁液及熔渣加入到熔池中参加反应,增加了焊接冶金的复杂性。

(4) 反应接触面大,搅拌激烈 焊接时,熔化金属是以滴状从焊条或焊丝端部过渡到熔池的,熔滴与气体及熔渣的接触面大,有利于冶金反应快速进行。同时气体侵入液体金属中的机会也增多了,使焊缝金属易产生氧化、氮化及气孔。此外,熔池搅拌激烈,有助于加快反应速度,也有助于熔池中气体的逸出。

由于焊接化学冶金过程具有上述特点,冶金反应往往不能充分进行。因此,焊接化学冶金过程要比一般的炼钢冶金过程复杂和强烈得多。

1.2.3 有害元素对焊缝金属的作用

焊缝金属中的有害元素主要是氧、氢、氮、硫、磷。焊接中的 O_2 、 H_2 、 N_2 主要来自焊条、焊丝、焊剂等焊接材料,以及电弧周围的空气及未清理干净的母材表面,焊缝中的硫、磷主要来自母材、焊条、焊丝、焊剂等,它们将严重影响焊缝质量,因此焊接中必须对氧、氢、氮及硫、磷进行控制。

1.2.3.1 氧对焊缝金属的作用

(1) 氧的来源 焊接区的氧气主要来自电弧中的氧化性气体(如 CO_2 、 O_2 、 H_2O 等),

空气中氧的侵入,焊剂、药皮中的高价强化物和焊件表面的铁锈、水分等的分解产物。

(2) 氧对焊接质量的影响

① 焊缝金属中的氧,不仅使焊缝中有益元素大量烧损,而且使焊缝的强度、塑性、硬度和冲击韧性降低,尤其冲击韧性降低明显。

② 降低焊缝金属的物理性能和化学性能,如降低导电性、导磁性和抗腐蚀性能等。

③ 氧与碳、氢反应,生成不溶于金属的 CO 和 H_2O ,若结晶时来不及顺利逸出,则在焊缝内形成气孔。

④ 产生飞溅,影响焊接过程稳定。

(3) 控制氧的措施

① 加强保护,如采用短弧焊、选用合适的气体流量等,防止空气侵入。采用惰性气体保护或真空保护下焊接。

② 清理焊件及焊丝表面的水分、油污、锈迹,按规定温度烘干焊剂、焊条等焊接材料。

③ 对焊缝脱氧也是行之有效的措施。

(4) 焊缝金属的脱氧 焊接时,除采取措施防止熔化金属氧化外,设法在焊丝、药皮、焊剂中加入一些合金元素,去除或减少已进入熔池中的氧,是保证焊缝质量的关键。这个过程称为焊缝金属的脱氧。

① 脱氧剂选择的原则 用来脱氧的元素或合金叫做脱氧剂。作为脱氧剂必须具备下列条件:

a. 脱氧剂在焊接温度下对氧的亲合力应比被焊金属的亲合力大。元素对氧的亲合力大小按递减顺序排列为: Al 、 Ti 、 Si 、 Mn 、 Fe 。

在实际生产中,常用它们的铁合金或金属粉,如锰铁、硅铁、钛铁、铝粉等作为脱氧剂。元素对氧的亲合力越大,脱氧能力越强。

b. 脱氧后的产物应该不溶于金属而容易被排除入渣且熔点应较低,密度应比金属小,易从熔池中上浮入渣。

② 焊缝金属的脱氧途径 焊缝金属的脱氧有先期脱氧、沉淀脱氧和扩散脱氧三种途径。

a. 先期脱氧。焊接时,在焊条药皮加热过程中,药皮中的碳酸盐 (CaCO_3 、 MgCO_3) 或高价氧化物 (Fe_2O_3) 受热分解放出 CO_2 和 O_2 ,这时药皮内的脱氧剂,如锰铁、硅铁、钛铁等便与其发生氧化反应生成氧化物,从而使气相氧化性降低。这种在药皮加热阶段发生的脱氧方式称为先期脱氧。

先期脱氧的目的是尽可能在早期把氧去除,减少熔化金属的氧化。先期脱氧是不完全的,脱氧过程和脱氧产物一般不和熔滴金属发生直接关系。

b. 沉淀脱氧。沉淀脱氧是利用溶解在熔滴和熔池中的脱氧剂直接与 FeO 反应进行脱氧,并使脱氧后的产物排入熔渣而清除。沉淀脱氧的对象主要是液态金属中的 FeO 。沉淀脱氧常用的脱氧剂有锰铁、硅铁、钛铁等。酸性焊条 (E4303) 一般用锰铁脱氧;碱性焊条 (E5015) 一般用硅铁、钛铁脱氧。

Al 的脱氧能力虽然很强,但生成的 Al_2O_3 熔点高,不易上浮,易形成夹渣,同时还会产生飞溅、气孔等缺陷,故一般不宜单独做脱氧剂。

c. 扩散脱氧。利用 FeO 既能溶于熔池金属,又能溶解于熔渣的特性,使 FeO 从熔池扩散到熔渣,从而减低焊缝含氧量,这种脱氧方式称为扩散脱氧。

酸性焊条焊接时,由于熔渣中存在大量的 SiO_2 、 TiO_2 等酸性氧化物,作为碱性氧化物的 FeO 就比较容易从熔池扩散到熔渣中去,所以,酸性焊条焊接以扩散脱氧作为主要脱氧方式。

碱性焊条焊接时,由于在碱性熔渣中存在大量的强碱性的 CaO 等氧化物,而熔池中的 FeO 也是碱性氧化物,扩散脱氧难以进行,所以扩散脱氧在碱性焊条中基本不存在。

由此可见,酸性焊条主要以扩散脱氧为主,碱性焊条主要以沉淀脱氧为主。

1.2.3.2 氢对焊缝金属的作用

(1) 氢的来源 焊接区的氢主要来自受潮的药皮或焊剂中的水分、焊条药皮或焊剂中的有机物、空气中的水分、焊件表面的铁锈、油脂及油漆等。

(2) 氢对焊接质量的影响

① 形成气孔 熔池结晶时氢的溶解度突然降低,容易造成过饱和的氢残留在焊缝金属中,当焊缝金属的结晶速度大于它的逸出速度时,就形成气孔。

② 产生白点和氢脆 当焊缝含氢量高时,常常在焊缝拉断面上出现如鱼目状的、直径为 $0.5\sim 5\text{mm}$ 的白的圆形斑点,称为白点。氢在室温时使钢的塑性严重下降的现象称为氢脆。白点和氢脆使焊缝金属塑性严重下降。

③ 产生冷裂纹 氢是产生冷裂纹的因素之一,焊缝含氢量高时易产生冷裂纹。

(3) 控制氢的措施

① 焊前清理干净焊件及焊丝表面的铁锈、油垢、水分等污物。

② 焊前按规定温度烘干焊剂、焊条,气体保护焊保护气体进行去水、干燥处理。

③ 尽量选用低氢型焊条,焊接时采用直流反接,短弧操作。

④ 焊后消氢处理,即焊后立即将焊件加热到 $250\sim 350^\circ\text{C}$,保温 $2\sim 6\text{h}$,使焊缝金属中的扩散氢加速逸出,降低焊缝和热影响中的氢含量。

1.2.3.3 氮对焊缝金属的作用

(1) 氮的来源 焊接区中的氮主要来自周围空气。氮既不溶解于铜等金属,又不与其形成化合物,故焊接这类金属时,可用氮作为保护气体。

(2) 氮对焊接质量的影响

① 形成气孔 氮与氢气一样,在熔池结晶时溶解度突然降低,此时有大量的氮要析出,当来不及析出时,就会形成气孔。

② 影响焊缝的力学性能 氮与铁等形成化合物,并以针状夹杂物形式存在于焊缝金属中,使硬度和强度提高,塑性、韧性降低,影响焊缝的力学性能。

(3) 控制氮的措施

① 加强对焊接区液态金属的保护,防止空气中氮的侵入,是控制焊缝中氮的含量的主要措施。

② 采取正确的焊接工艺措施,尽量采用短弧焊接,因为电弧越长,氮侵入熔池越多,焊缝中氮的含量越高。此外采用直流反接比直流正接可减少焊缝中氮的含量。

1.2.3.4 焊缝金属中硫、磷的控制

(1) 硫、磷的来源 焊缝中的硫、磷主要来自母材、焊丝、药皮、焊剂等材料。焊缝中以 FeS 形式最为有害。磷在焊缝中主要以铁的磷化物 Fe_2P 、 Fe_3P 的形式存在。

(2) 硫、磷的危害 FeS 可无限地溶解于液态铁中,而在固态铁中的溶解度只有 $0.015\%\sim 0.020\%$,因此熔池凝固时 FeS 析出,并与 $\alpha\text{-Fe}$ 、 FeO 等形成低熔点共晶,尤其焊接高 Ni 合金钢时, S 和 Ni 形成的 NiS 与 Ni 共晶的熔点更低。这些低熔点共晶呈液态薄膜聚集于晶界,导致晶界处开裂,产生热裂纹。此外,硫还能引起偏析,降低焊缝金属的冲击韧性和耐腐蚀性能。

磷与硫一样可与铁形成低熔点共晶 $\text{Fe}_3\text{P}+\text{P}$,聚集于晶界,易产生热裂纹。此外,这些

磷化物还削弱了晶粒间的结合力,且它本身既硬又脆,因而增加了焊缝金属的冷脆性,使冲击韧性降低,造成冷裂。

(3) 脱硫和脱磷的措施

① 脱硫的措施 焊接过程中脱硫的主要措施有元素脱硫和熔渣脱硫两种。

a. 元素脱硫。元素脱硫就是在液态金属中加入一些对硫的亲合力比对铁大的元素,把铁从 FeS 中还原出来,形成的硫化物不溶于金属而进入熔渣,从而达到脱硫的目的。在焊接中最常用的是 Mn 元素脱硫。

b. 熔渣脱硫。熔渣脱硫是利用熔渣中的碱性氧化物如 CaO 、 MnO 及 CaF_2 等进行脱硫。脱硫产物 CaS 、 MnS 进入熔渣被排除,从而达到脱硫目的。

Ca 比 Mn 对硫的亲合力强,并且 CaS 完全不溶于金属,所以 CaO 脱硫效果较 MnO 好。

CaF_2 脱硫主要是利用氟与硫化物生成挥发性氟硫化物及 CaF_2 与 SiO_2 作用可产生 CaO 进行的。

② 脱磷的措施 焊接过程中脱磷的措施分为两步。

a. 将 P 氧化成 P_2O_5 。

b. 利用碱性氧化物与 P_2O_5 形成稳定的磷酸盐进入熔渣。

碱性氧化物中 CaO 效果最好,因此常用 CaO 脱磷。

从上述讨论中可知,熔渣中如同时有足够的自由 FeO 和自由 CaO (在熔渣中未形成稳定化合物的 FeO 或 CaO),则脱磷效果好。但实际上在碱性焊条或酸性焊条中,要同时具有上述两个条件是困难的。

(4) 酸性焊条和碱性焊条的脱硫和脱磷

① 酸性焊条 酸性焊条熔渣中碱性氧化物 CaO 及 MnO 较少,熔渣脱硫能力弱,仅靠 Mn 元素脱硫。同时碱性氧化物 CaO 较少,脱磷能力差,所以酸性焊条脱硫、脱磷效果较差。

② 碱性焊条 碱性焊条药皮中含有大量的大理石、萤石和钛合金,熔渣中有大量的碱性氧化物 CaO 、 MnO 等,既能进行熔渣脱硫又能脱磷,同时又可元素脱硫,所以碱性焊条的脱硫、脱磷能力比酸性焊条强。这是碱性焊条的力学性能、抗裂性能比酸性焊条强的重要原因。

1.2.4 焊缝金属合金化

焊缝金属的合金化就是将所需的合金元素由焊接材料通过焊接冶金过程过渡到焊缝金属中去的反应,也称焊缝金属的渗合金。

焊条电弧焊时,焊缝金属合金化方式有两种:一种是通过焊芯(即利用合金钢焊芯)过渡;另一种是通过焊条药皮(即将合金成分加在药皮里)过渡。也有这两种方式同时是兼有的。

通过合金钢焊芯合金化,外面再涂以碱性熔渣的保护药皮,焊缝金属合金化的效果与可靠性最好。通过药皮实现合金化,是在焊条药皮中加入各种钛合金粉末和合金元素,然后在焊接时,把这些元素过渡到焊缝金属中去。这种方法在生产上应用较广,通常是采用在低碳钢(H08 、 H08A)焊条药皮中加入合金剂,从而达到合金化的目的。焊条药皮常用的合金剂有锰铁、硅铁、镍铁、钼铁、钨铁、硼铁等。

1.3 焊缝结晶过程

焊缝金属从熔池中高温的液体状态冷却至常温的固体状态,经历了两次结晶过程,即从

液相转变为固相的一次结晶和在固相焊缝金属中出现同素异构转变的二次结晶（或称重结晶）。焊缝结晶过程对焊缝金属的组织 and 性能有重大影响，焊接过程中的许多缺陷如气孔、裂纹、夹杂、偏析等，大多是在熔池结晶时产生的。

1.3.1 焊缝金属的一次结晶

焊缝金属由液态转变为固态的凝固过程称为焊缝金属的一次结晶。一次结晶包括生核和长大两个基本过程。

焊接时，随着电弧的移去，熔池液体金属温度逐渐降低，由于熔合线处的散热条件好，是熔池中温度最低的地方，所以当液体金属达到凝固温度时（实际温度要比理论温度稍低些），熔合线上的半熔化晶粒就成为附近液体金属结晶的晶核，如图 1-8 所示。随着熔池温度的不断降低，晶核开始朝着与散热方向相反的方向长大，即垂直熔合线指向熔池中心方向，同时也向两侧较缓慢地长大，形成柱状结晶。当柱状晶体不断长大至相互接触时，焊缝的一次结晶过程结束。焊接熔池结晶过程如图 1-9 所示。

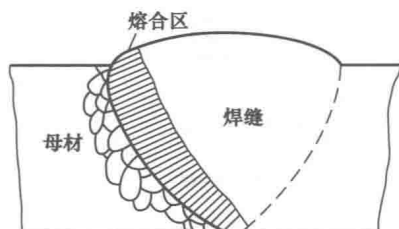


图 1-8 熔合线上的晶核

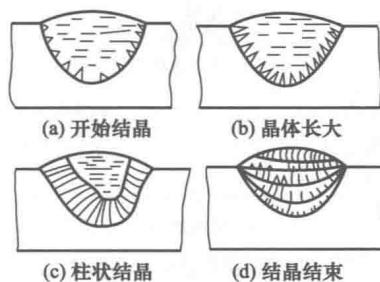


图 1-9 焊接熔池结晶过程

1.3.2 焊缝结晶过程中的偏析

焊缝金属中化学成分分布不均匀的现象称为偏析。偏析主要是在一次结晶时产生的，偏析的化学成分不均匀，不仅导致性能改变，同时偏析也是产生裂纹、气孔、夹杂物等焊接缺陷的主要原因之一。

焊缝中的偏析主要有显微偏析、区域偏析和层状偏析。

(1) 显微偏析 在一个柱状晶粒内部和晶粒之间的化学成分分布不均匀现象，称为显微偏析。

柱状晶粒生长的过程，一方面是在结晶的轴向延长，另一方面是径向扩展，如图 1-10 所示。焊缝结晶时，最先结晶的结晶中心（即结晶轴）的金属最纯，而后结晶的部分含合金元素和杂质略高，最后结晶的部分，即晶粒的外缘和前端含合金元素和杂质最高。这样一个柱状晶粒内部化学成分分布不均匀的现象叫晶内偏析。焊缝结晶过程是无数个柱状晶粒同时生长的过程，每个晶粒都有自己的结晶轴，很多相邻的晶粒都以自己的晶轴为中心向四周和前方发展，所以相邻晶粒之间的液体结晶最迟，含有较多的合金元素和杂质，这种晶粒之间化学成分分布不均匀的现象称为晶间偏析。

(2) 区域偏析 熔池结晶时，由于柱状晶体的不断长大和推移，把杂质推向熔池中心，这样熔池中心的杂质含量要比其他部位高，这种现象称为区域偏析。

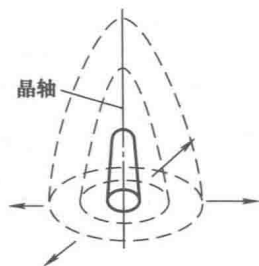


图 1-10 柱状晶粒生长过程