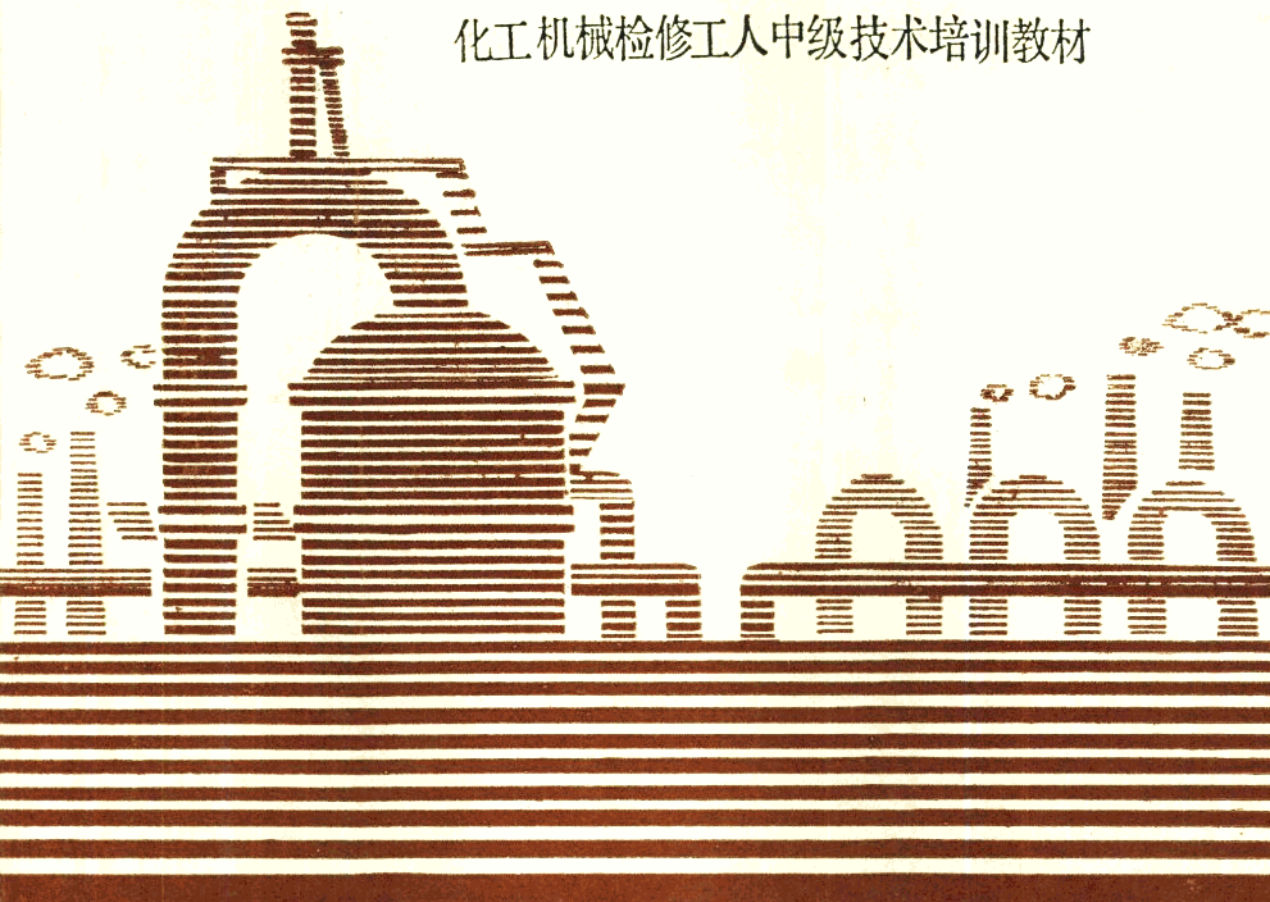


化工机械检修工人中级技术培训教材



化工焊工工艺学

吴允光编

成都科技大学出版社

化工检修工人中级技术培训教材

化工焊工工艺学

吴允光 编

成都科技大学出版社

1988·成都

内 容 提 要

本书是对从事化工机械检修的焊工进行中级技术理论培训的教材。全书共分十一章，内容包括：金属熔化焊和焊接电弧的基本理论，常用焊接和热切割方法的特点及应用，焊接设备、焊接应力与变形以及焊接检验的基本知识，化工常用金属的焊接，典型化工设备的焊接和检修等。各章都附有复习题。

本书可作化工企业对焊工进行技术理论培训的教材，也可供化工机械专业的工程技术人员参考。

化工焊工工艺学

吴允光 编

成都科技大学出版社出版、发行
四川省新华书店经销
航空航天工业部六一一研究所印刷厂印刷
开本 787×1092 1/16 印张：8.375
1988年9月第一版 1988年9月第一次印刷
印数：1—10100 字数：202千字
ISBN 7-5616-0131-X/TQ·18(课)

定价：2.95元

前 言

对广大工人进行比较系统的技术理论培训，是一项战略任务。开展这项工作，教材是个关键。为了统一培训目标及教学内容，逐步建立起比较正规的工人技术教育制度，我们在全中国化工技术培训教材编委会的领导下，根据化工部颁发的《化工检修工人中级技术等级标准》和《化工机械检修工人中级技术理论培训教学大纲》，组织编写了化工机械检修九个工种〔检修（综合）钳工、机泵检修钳工、橡胶设备检修钳工、管工、铆工、电焊工、气焊工、起重工、无损探伤工〕用的五门技术基础课教材：《工程制图》、《机械基础》、《金属工艺基础》、《化工生产过程及机器设备》、《橡胶制品机械》和七门专业课教材：《化工检修钳工工艺学》、《化工管工工艺学》、《化工铆工工艺学》、《化工焊工工艺学》、《化工起重工艺学》、《化工无损探伤工艺学》、《橡胶设备检修钳工工艺学》。

这套教材主要用于化工机械中级检修工人培训，也适用于技工学校、职业学校的相关专业，还可以作为中专、大专院校有关专业实践性教学的参考书。考虑到在职培训的特点，同时也为了便于教学，这套教材在内容上贯彻“少而精”的原则，力求做到结构合理、份量恰当、联系实际、学用结合、由浅入深、循序渐进，在将基本概念、基本理论、基本技能阐述清楚的前提下，注意到知识的科学性、系统性和适合读者自学的需要。各门教材之间既注意相关的联系衔接，又使有一定的独立性和灵活性，使用单位既可利用整套教材对工人进行系统培训，又可选用其中的一种或几种进行短期的、专门的单项技术训练。

在编写过程中，吸取了不少职工教育工作者的意见。很多省市化工厅（局）、企业、学校和研究单位提供了大力支持和许多方便。书稿完成后，又在全国范围内组织了在工厂、学校、研究设计单位的许多同志进行审阅。对于参与编写工作和审稿工作的同志，我们致以诚挚的谢意。

编写化工机械检修工人技术理论培训的统一教材，建国以来还是第一次，由于时间仓促和编写经验不足，书中难免存在缺点和错误，我们恳切地希望使用单位和广大读者批评指正，以便进一步修改完善。

化工部技术培训教材编委会
西南、西北地区组

1987年8月

编 者 的 话

本书是根据化工部教育司、劳资司以(87)化教培字第003号文颁发的《化工机械检修工人中级技术理论培训教学计划和大纲》的要求编写的,供化工企业已具有初级技术理论基础的初级焊工和未经系统技术培训的中级焊工进行技术理论培训时使用,也可作为从事焊接工作的工人和技术人员的自学读物。

本书根据化工企业焊接工作的特点,较系统地介绍了熔化焊的基本原理,焊接电弧的基础理论,常用焊接和热切割方法的材料、设备及工艺,简要地介绍了焊接应力与变形和焊接检验的有关知识,结合实际,突出地介绍了化工装置中常用金属材料的焊接工艺,以及典型化工设备的焊接制造和检修工艺等内容。

本书根据在职工培训的特点,注意与初级技术理论相衔接,力求做到既立足于当前,又考虑今后的发展,体现和保持知识的科学性、系统性和完整性。考虑到行业和企业之间使用机械的差异,教学中可按照学以致用、学用结合的原则,适当增减。

本书由四川化工机械厂季敬培主任工程师主审,泸州天然气化工厂机修分厂肖银生和易小平、化工部岳阳安装技校李实青、衢化公司机械厂余继聪、泸州化工学校雷克颐等也参加了审稿。在编写中,四川省化工厅教育处,四川化工总厂教育中心和修造分厂、成都科技大学出版社曾给予大力支持和指导,在此一并表示感谢。

鉴于水平有限,加之编写经验不足,书中难免有不妥或错漏之处,望广大读者提出批评指正。

编者

1987年12月

绪 论

焊接是通过加热或加压，或两者结合，使用或不用填充材料，使两个分离体达到原子间结合成一个整体的一种加工方法。当前，焊接已成为金属构件永久性联接的主要方式，并广泛应用于石油、化工、电力、冶金、建筑等现代工业部门。

从焊接过程的本质及实现途径来看，焊接分为钎焊、压力焊和熔化焊三大类。

钎焊采用比母材熔点低的金属作钎料，使加热温度高于钎料熔点并低于母材熔点，利用液态钎料润湿母材、填充接头间隙并与母材相互扩散，实现焊接。钎焊是一种最古老的焊接方法，由于它不必熔化母材即可焊接，所以仍占有很重要的地位。

压力焊借助压力使被联接的金属结合，有加热和不加热压焊两种。前者需将金属联结处加热，使其局部熔化或达到塑性状态，促进原子之间的扩散，在压力作用下形成整体的接头。不加热压焊要求金属联结表面十分清洁，靠压力破坏表面的氧化膜，使其发生局部塑性变形，实现原子间的互相扩散，形成整体接头。压力焊特别适宜大面积的或异种金属的焊接，在焊接技术中有其独特的地位。

熔化焊是将焊件接头加热熔化而不加压完成焊接的。在焊接过程中，不管是添加或不添加金属，联结处都应加热熔化，形成一个熔池，使被焊金属充分地混合，完成扩散、反应及共同结晶过程，熔池冷却凝固即形成整体接头。熔化焊是最基本的焊接方法，在焊接生产中占着主导地位。

焊接的历史几乎可以与金属的历史相提并论，也就是说，焊接技术在青铜时代就出现了。最早的是碳极电弧焊。19世纪初发现了电弧，该世纪末才应用到金属焊接上。带有保护药皮的金属极电焊条，是在20世纪20年代以后才发展起来的。20世纪初已开始应用火焰气焊。在30年代，接触焊及熔剂层下自动焊试验成功，使焊接向机械化、自动化方向发展迈出了一大步。到了40年代，铝、镁、钛及其合金的大量采用，给焊接技术带来了新的课题，于是产生并逐步完善了气体保护焊。50年代以后，新的金属材料日益增多，焊接新能源、新工艺层出不穷，其中，惰性气体保护焊与混合气体保护焊为新材料的焊接，开辟了新的途径；电渣焊解决了特厚件的焊接难关；爆炸焊为异种金属大面积焊接提供了高效率的手段；摩擦焊、等离子弧焊、电子束焊及激光焊在焊接领域中取得了惊人的成效。电子技术的发展，焊接机械人和机械手的问世，使焊接自动化发展到了一个新的阶段。射线探伤和超声波探伤已成为焊接检验的重要手段。总的来说，目前世界上焊接技术正向高效率、高质量、高度自动化的方向发展，不断地变革和更新。

在化工机械制造中，据统计，化工装置焊接的结构量，约占整个装置总重的75%左右，各种化工容器、塔罐、钢结构等大多采用焊接方法制造，其安装和检修也离不开焊接；由于化工装置的生产工艺复杂，工作压力高，温度范围广，腐蚀性强，所以对焊接质量要求特别严格。因此，提高焊接技术水平，确保焊接质量，对保证化工长周期、安全、高效率生产有着重要的作用。由于在化工机械的制造、安装和检修中，采用的焊接方法大都属于熔化焊的范畴，加以金属的热切割与焊接技术有许多共同之处，因此，将金属熔化焊的基本规律，常用的焊接和热切割方法，以及焊接应力、变形和焊接检验的有关知识作为重点，是恰当的。

目 录

| | | |
|---------------------------|-------|-----------|
| 绪 论 | | |
| 第一章 金属熔焊原理 | | 1 |
| 第一节 焊接热过程 | ..... | 1 |
| 第二节 焊接化学冶金过程 | ..... | 4 |
| 第三节 焊缝金属的结晶过程 | ..... | 7 |
| 第四节 焊接时的裂纹 | ..... | 12 |
| 第二章 焊接电弧 | | 18 |
| 第一节 焊接电弧的产生及种类 | ..... | 18 |
| 第二节 焊接电弧的构造及其静特性 | ..... | 19 |
| 第三节 焊接电弧的极性和稳定性 | ..... | 21 |
| 第三章 手工电弧焊 | | 24 |
| 第一节 电焊条 | ..... | 24 |
| 第二节 手工电弧焊技术 | ..... | 28 |
| 第三节 手工电弧焊机 | ..... | 30 |
| 第四章 埋弧自动焊 | | 37 |
| 第一节 电弧焊的自动调节原理 | ..... | 37 |
| 第二节 埋弧自动焊机 | ..... | 38 |
| 第三节 焊接材料 | ..... | 41 |
| 第四节 埋弧自动焊工艺 | ..... | 43 |
| 第五章 钨极氩弧焊 | | 52 |
| 第一节 手工钨极氩弧焊 | ..... | 52 |
| 第二节 熔化极氩弧焊 | ..... | 57 |
| 第六章 气焊与气割 | | 61 |
| 第一节 气焊 | ..... | 61 |
| 第二节 气割 | ..... | 70 |
| 第七章 其它焊接与切割方法 | | 77 |
| 第一节 等离子弧切割与焊接 | ..... | 77 |
| 第二节 CO ₂ 气体保护焊 | ..... | 78 |
| 第三节 碳弧气刨与切割 | ..... | 79 |
| 第八章 焊接应力与变形 | | 81 |
| 第一节 焊接应力及变形概述 | ..... | 81 |
| 第二节 焊接残余应力 | ..... | 82 |
| 第三节 焊接残余变形 | ..... | 85 |

| | | |
|-------------|------------------|-----|
| 第九章 | 焊接检验 | 89 |
| 第一节 | 焊接缺陷及焊接检验方法 | 89 |
| 第二节 | 破坏性检验 | 91 |
| 第三节 | 非破坏性检验 | 92 |
| 第十章 | 常用金属材料的焊接 | 95 |
| 第一节 | 普通低合金钢的焊接 | 95 |
| 第二节 | 珠光体铬钼耐热钢的焊接 | 97 |
| 第三节 | 不锈钢的焊接 | 100 |
| 第四节 | 异种金属的焊接 | 104 |
| 第五节 | 铝及铝合金的焊接 | 106 |
| 第六节 | 铜及铜合金的焊接 | 108 |
| 第七节 | 钛及钛合金的焊接 | 110 |
| 第八节 | 铸铁焊补 | 111 |
| 第十一章 | 典型化工设备的焊接 | 115 |
| 第一节 | 压力容器的焊接 | 115 |
| 第二节 | 列管式换热器的焊接 | 120 |
| 第三节 | 管道的焊接 | 121 |

第一章 金属熔焊原理

第一节 焊接热过程

熔化焊有一个加热、熔化和冷却的连续过程，即焊接热过程。

一、焊接热源

1. 热源的种类。熔化焊常用的热源有：

(1) 电弧——气体介质放电过程所产生的热能，常用于药皮焊条电弧焊、埋弧自动焊、气体保护焊等。

(2) 化学热——可燃气体或铝、镁热剂燃烧时产生的热能，常用于氧—乙炔焰气焊、铝热铸焊等。

(3) 电阻热——电流通过电阻较大的导体产生的热能，如利用金属表面接触电阻热的电阻焊、利用熔渣电阻热的电阻焊。

(4) 摩擦热——由机械摩擦而产生热能，如摩擦焊。

(5) 等离子弧——高度电离的等离子弧，功率大，温度高，可用于等离子弧焊接及切割。

(6) 电子束——在真空中，高压高速运动的电子流轰击金属局部表面，使动能转变为热能，可进行电子束焊接。

(7) 激光束——激光束热能集中，用于焊接难熔、易氧化的金属。

2. 焊接热源的效率。焊接过程中热源产生的热量并未全部被利用，有一部分损失于周围介质和因飞溅而带走。各种热源热量的利用状况可用热效率 η 值来表示，它是热源功率减去损失功率后与热源功率的比值， η 与工艺方法有关，通常，手工电弧焊 $\eta = 0.7 \sim 0.8$ ，埋弧焊 $\eta = 0.8 \sim 0.95$ ，钨极氩弧焊 $\eta = 0.5$ ，氧—乙炔气焊 $\eta = 0.4 \sim 0.6$ 。

3. 焊接线能量。熔焊时，由焊接热源输给单位长度焊缝的能量，称为焊接线能量 q 。对于电弧焊

$$q = \eta \frac{36U \cdot I}{v} \quad \text{焦耳/厘米}$$

式中： η ——热效率；

U ——电弧电压，伏；

I ——焊接电流，安；

v ——焊接速度，米/小时。

一般说来，式中可变因素是焊接电流和焊接速度。线能量影响焊接接头的性能，线能量过大时，过热区晶粒粗大，韧性严重降低；过小时，硬度值增高，淬硬倾向大，也是不利

的。所以，对一定的焊接方法和钢材，应进行焊接工艺试验，寻求最佳的焊接线能量。

二、焊接热循环

1. 概念。焊接中热源沿着焊缝移动，于是，在焊缝区的任意一点，其温度由低到高，又由高到低，即在热源作用下，该点的温度随时间而变化，这个过程称为焊接热循环。焊缝两侧离焊缝远近不同的点，所经历的热循环是不同的。离焊缝近的点，达到的最高温度高，而较远的点，则较低。因此，焊接是一个不均匀的加热和冷却过程，也是一种特殊的热处理过程。这种过程必然会使焊件在焊缝和热影响区产生不均匀的组织性能，同时产生复杂的应力。

2. 主要参数。焊接热循环主要有四个参数：加热速度、加热最高温度、在相变温度以上停留的时间及冷却速度。

加热速度是指对焊件焊接加热的快慢程度。它比一般热处理要快得多。随着加热速度的提高，相变温度也提高，奥氏体的均质化和碳化物的溶解也显得不充分。因此，必然影响热影响区的组织和性能。加热速度以钨极氩弧焊为最快，电渣焊最慢。

焊接时，焊件上不同的点，由于达到的最高温度不同，就会产生不同的组织和性能。例如在溶合线附近，温度较高(对低碳钢和低合金钢可达 $1300\sim 1350^{\circ}\text{C}$)，母材晶粒发生严重长大，塑性大为降低，成了焊接接头机械性能最差区域。

对碳素钢和低合金钢来说，在相变温度以上停留的时间越长，越有利于奥氏体的均质化，同时也促使奥氏体晶粒长大。温度很高时($>1000^{\circ}\text{C}$)，即使停留时间不长，也会产生严重的晶粒长大，使焊缝性能变坏。

焊后冷却速度也决定热影响区的组织与性能。例如低碳钢和低合金钢，熔合线附近冷却到 540°C 左右时的速度，或从 800°C 冷却到 500°C 时所用的时间，对接头性能影响极大。

3. 多层焊接热循环。通常中厚板采用多层多道焊接，特别是厚壁容器，有的要焊几十条焊道。单层焊时因受到焊缝截面积的限制，不能在更大的范围内调整功率和焊速，所以焊接热循环的调整也受到限制。从这个意义上讲，多层焊比单层焊更优越，它受到许多单层焊热循环叠加在一起的综合作用，而且相邻焊层具有热处理的性质，有利于提高焊接质量。

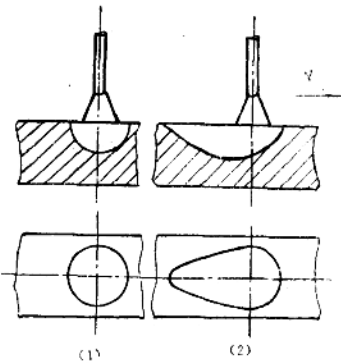


图1-1 点焊及连续焊接时的熔池
(1)一点焊 (2)一连续焊

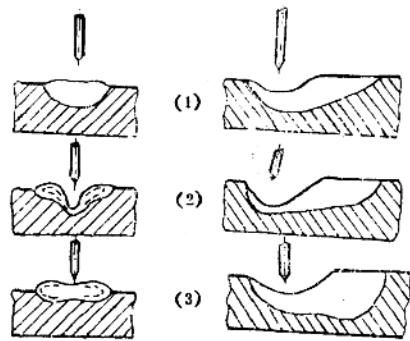


图1-2 不同焊接规范的溶池形状

三、熔池及焊缝成形

1. 熔池的形状。熔化焊在焊件上形成的具有一定几何形状的液态金属部分叫做焊接熔

池。电弧点焊时，熔池冷却结晶形成焊点。电弧连续移动时，卵形熔池也随着移动逐渐冷却结晶形成焊缝(图1—1)。

熔池的形状与热源的移动状态和焊接规范有关，当电流密度较小、弧长较短、焊速较慢而电极垂直的情况下，熔池如图1—2(1)所示；电流密度很大，电极前倾或焊速提高时，熔池的深度增加，并呈凹形，如图1—2(2)所示；如果焊速过高，熔池最深部份可能后移如图1—2(3)。

2. 熔池形状对焊缝质量的影响

(1)对焊缝成形的影响。焊缝的形状用熔深(H)、熔宽(B)和余高(e)来表示，焊缝成形的合理性，可用成形系数(B/H)和增高系数(B/e)来控制。

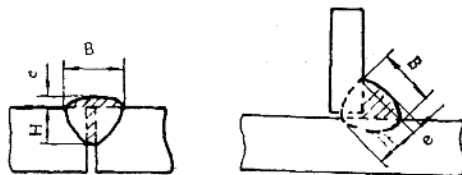


图1—3 焊缝的形状

焊缝成形系数小，焊缝则深而窄，这既保证充分焊透，又使焊缝宽度方向的无效加热区和热影响区缩小，有利于提高热效率和减少热影响区性能的恶化。但是成形系数过小，对裂纹和气孔敏感性增大。一般手工电弧焊的成形系数大于1，埋弧自动焊大于1.3。

焊缝过高是无益的，其增高系数一般为4—8，甚至可以令 $e=0$ ，特别重要的焊件，焊后尚需人工磨平。理想的角焊缝表面最好是凹形的，所以增高系数可以是负值。

(2)对焊缝金属化学成份的影响。在填充金属的熔焊中，熔池由熔化的母材和填充金属组成，因此焊缝的化学成份由两种材料的熔合比来决定。这对堆焊、复合钢板和异种金属的焊接有重要意义，往往可以通过减少熔深、加过渡层等方法来减少母材对焊缝成分的影响。

(3)对焊缝结晶过程的影响。电弧向前移动，熔池金属从后部边缘开始结晶，结晶方向与熔池散热方向相反，通常垂直于熔池池壁。因此，熔池的形状与焊缝的结晶状态有关。从焊缝的横截面来看(图1—4)，成形系数大的焊缝的结晶状况较好，在成形系数小的焊缝中心，杂质成份偏析，容易形成裂纹。从焊缝纵向看，熔池尾部长焊缝的结晶状况较差，它的结晶方向、杂质成份偏析易集中到焊缝中心，降低强度，易出现纵向裂纹。

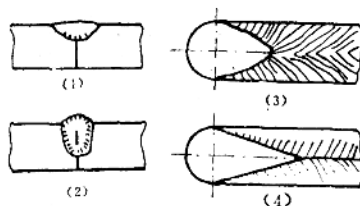


图1—4 熔池形状对结晶的影响

3. 焊缝成形的控制

(1) 选择合理的焊接规范。如前所述焊接规范对熔池形状有很大影响。如手工电弧焊时，在一般情况下，加大焊接电流能增加熔深、降低余高；加大电弧电压能增加熔宽和熔深，而加大焊速则能降低熔深和熔宽，当参数变化到一定程度时，往往会得到相反的结果。同时，焊条的类别与直径、电源种类与极性、操作的位置与结构等都有不同程度的影响。所以理想的焊缝形状必须是各个焊接参数的合理配合。

(2) 提高装配质量及焊接操作技术。焊件的装配质量低劣或焊接技术不高(尤其是手工电弧焊)，会产生未焊透、烧穿、焊瘤、咬边、未熔合和尺寸不符等焊缝缺陷。

(3) 焊缝的强制成形。当熔池过大，液体金属依靠自身的表面张力无力承托时，常常用强制成形方法来控制焊缝形状，常见的方法有：

①加焊剂垫法。主要用于埋弧自动焊。通过橡皮垫、槽钢、气囊或其它形式，使普通的埋弧焊剂或专用衬垫焊剂，紧压在焊缝背面，保证熔池不流失和背面焊缝的成形。

②加石墨垫法。常用在铝或铜等有色金属的对接接头平位置焊接上。将石墨先加工成弧形凹槽，垫在接头背面，当加热焊缝时，填充金属与母材一起熔化成石墨垫板弧形槽的形状成形。

③加金属垫法。永久性的金属垫其材质与母材相同，焊后与焊缝连成一体。临时性的金属垫与石墨垫同样，可取下再用，它一般用紫铜制成，导热性好、不与焊缝粘合；若焊接铝和铜，则用碳钢或不锈钢制作。

④采用冷却滑块或滚轮。主要用于全位置自动焊接工艺上。滑块和滚轮用紫铜制成，里面通以冷却水，焊接时强制冷却熔池成形。

第二节 焊接化学冶金过程

一、焊接化学冶金过程的特点

熔焊时，熔池上方是气体、熔池内部分散着熔融状态的熔剂，熔池表面复盖一层正在反应或已反应的熔渣。这些气体、熔剂和熔渣与液态金属在高温下相互作用的过程，称为焊接化学冶金过程。它实质上是金属在焊接中再熔炼的过程，具有以下特点：

1.焊接时金属的保护。用低碳钢焊丝在空气中焊接，由于熔化金属和空气相互作用，使焊缝中的氮、氧含量显著增加，据测定，其含氮量比焊丝高20~45倍，含氧量高7~35倍；同时锰、碳等元素大量被烧损和蒸发，使焊缝的机械性能急剧下降，因此焊接时对熔化金属进行保护，是焊接冶金的第一个任务。

目前，虽采取各种保护方法隔离空气，但有时仍得不到理想的焊缝成分。譬如，药皮、焊剂和氧化性保护气体对金属仍有不同程度的氧化性，使焊缝增氧。因此，焊接冶金的第二个任务就是通过调整焊接材料成分和性能控制冶金反应以获得要求的焊缝成分。

2.焊接化学冶金的区域。与一般炼钢不同，焊接冶金过程是分区域连续进行的。不同的焊接方法有不同的反应区。手弧焊有三个反应区：药皮反应区、熔滴反应区和熔池反应区。熔化极气体保护焊只有熔滴反应区和熔池反应区；而钨极氩弧焊则只有熔池反应区。

3.焊接工艺对焊接化学冶金的影响。一般熔焊的焊缝由填充金属(焊条、焊丝等)和熔化的母材组成。焊缝中熔化母材所占的比例称为熔合比。熔合比的大小取决于焊接方法、规范、接头型式、坡口宽度、药皮和焊剂的性质以及焊条倾角等因素。

因此，可改变焊接工艺条件来改变熔合比。例如堆焊时，调整焊接规范使熔合比尽量小；焊接异种钢时，因熔合比对焊缝成分和性能影响甚大，因此要根据熔合比选择焊接材料。焊接材料(焊丝、药皮、焊剂、保护气体等)决定焊缝的主要合金成分，因此调整焊接材料是控制焊缝成分的主要手段；焊接工艺规范一般只影响焊接冶金过程，而且它的调整还受到其它因素的限制，所以调节焊接规范只是控制焊缝成分的辅助手段。

二、气体与金属的作用

1.焊接区内的气体来源和成分。焊接区内的气体主要来源于：

(1) 焊接材料。一般焊条药皮中都含有造气剂，如淀粉、木粉、大理石和白云石等，它们在加热时分解或燃烧，析出大量气体。用潮湿的焊条或焊剂焊接时将析出水泡。气电焊时，焊接区内主要是保护气体。

(2) 空气。来自焊接材料的气体和保护气体不能完全排除电弧区内的空气。

(3) 焊丝和母材表面上的杂质。如油污、铁锈、油漆、吸附的水分等。这些物质受热后将析出气体进入电弧空间。

(4) 高温蒸发产生的气体。如金属和熔渣的蒸气。

焊接时，气体的成分、数量随焊接方法、规范、药皮或焊剂的种类等而变化。用酸性焊条时，气体主要是CO、氢及水，此外，还有少量的CO₂、氧、氮和金属蒸气。用碱性焊条时，气体主要是CO及CO₂，水及氢很少，故碱性焊条又称低氢型焊条。埋弧焊时，气体主要是CO和氢，而氧、氮及水很少。

2. 气体对焊缝金属的作用与影响

(1) 氮。氮可以以原子状态或以NO形式进入熔池。焊接时，氮使焊缝产生气孔，因此氮是有害的。控制含氮量的主要措施是加强对焊接区域的保护，防止空气与液态金属发生作用。

(2) 氢。低碳钢和焊丝中的原始含氢量都很低，一般为0.2~0.5厘米³/100克，表1—1表明，各种焊接方法均使焊缝增氢，只是程度不同。手弧焊用纤维素焊条时焊缝含氢量比母材高90倍，低氢焊条比较低，埋弧自动焊更低，而CO₂气体保护焊最低。氢是有害元素，会在焊缝中引起气孔、冷裂纹和白点等缺陷。应控制焊缝氢含量，措施有：

表1—1 焊接碳钢时焊缝中的含氢量

| 焊接方法 | 手 工 电 弧 焊 | | | | | 埋弧自 动 焊 | CO ₂ 保护 焊 | 氧—乙炔 气 焊 |
|--------------------------------|-----------|------|------|------|-----|------------|-------------------------|-------------|
| | 纤维素型 | 钛 型 | 钛铁矿型 | 氧化铁型 | 低氢型 | | | |
| 含氢量 (厘米 ³ /100克) | 42.1 | 46.2 | 36.8 | 38.8 | 6.8 | 5.90 | 1.54 | 6.50 |

① 焊条和焊剂应严格烘干，随用随取，以免吸潮。

② 清除焊件和焊丝表面上的杂质。如坡口和焊丝表面上的铁锈、油污、吸附水分以及其它含氢物质。

③ 冶金处理。药皮或焊剂中的CaF₂有较强的去氢效果，因为它与氢或水蒸气反应生成的HF气体可逸出，从而减少了焊缝的含氢量。当在药皮或焊剂中同时加入CaF₂和SiO₂时，去氢效果将更加显著，这是因为它们之间反应生成的SiF₄沸点很低(90℃)，常以气态存在并与气体中的原子氢和水蒸气发生反应，生成HF气体逸出。另外，适当增加焊接材料的氧化性也有利于去氢。碱性焊条药皮中含有较多的CaCO₃(或MgCO₃)，它们受热分解析出CO₂，与氢化合生成稳定的OH，可达到去氢的目的。

焊后立即加热焊件可使氢扩散外逸，这种减少接头含氢量的工艺叫消氢处理。实践证明，把焊件加热到350°以上，保温超过一小时，几乎可将扩散氢全部去除。

(3) 氧。焊接时，氧以原子状态和氧化亚铁(FeO)形式溶解在液态铁中。尽管母材和焊丝的含氧量都很低，但是由于金属与气体和熔渣的相互作用，焊缝金属的含氧量总是增加的，致

使焊缝金属的强度、塑性和冲击韧性明显下降，抗腐蚀性能也降低，冷脆倾向增加。氧与碳、氢反应，生成不溶于金属的CO和水蒸气，易产生气孔。加强保护，减少电弧中的氧化性气体，可减少焊缝金属中的氧，还可通过化学冶金进行脱氧。

三、熔渣与金属的作用

1. 焊接熔渣。焊条药皮或焊剂熔化后经化学变化形成的复盖于熔池表面的物质，称为焊接熔渣。

(1) 熔渣在焊接中的作用。熔渣是金属和非金属的复杂盐类，它在焊接过程中有三种作用：

机械保护作用。熔渣复盖在熔池表面上，把液态金属与空气隔离开，保护前者不致氧化和氮化。熔渣凝固后形成的渣壳复盖在焊缝上，也可保护高温下的焊缝不受空气的有害作用。

改善焊接工艺性能的作用。在熔渣中加入适当的物质可使电弧容易引燃，并连续稳定地燃烧，减少飞溅，保证焊缝良好的成型。

冶金处理作用。熔渣和液态金属能够发生一系列的物理化学反应，对焊缝的成分产生很大影响。例如，在一定条件下熔渣可以去除焊缝中的有害杂质，如脱氧、脱硫、脱磷、去氢等；还可使熔渣合金化。

(2) 熔渣的物理性质。主要指其熔点、粘度、比重、脱渣性和透气性等。

熔渣的熔点应稍低于母材的熔点。熔渣的粘度越小，流动性越好，化学反应也越强烈。但是，粘度过小，熔渣反而不能均匀地复盖在熔池表面发挥保护作用，而且焊缝成形不良。按照冷却时粘度增加的情况，熔渣可分为长渣和短渣两种。高温时，熔渣的粘度很小，温度降低，粘度便增加。有的熔渣随着温度降低而迅速凝固（凝固温度范围很窄），称为短渣；而凝固缓慢、凝固温度区间较宽的称为长渣。因焊条药皮中含有萤石、钛白粉或金红石的熔渣属于短渣，所以碱性焊条和以氧化钛为药皮主要成分的酸性焊条都属于短渣。其它酸性焊条的熔渣一般属于长渣。短渣可以用于立焊。长渣则不适于立焊和仰焊的操作。

熔渣的脱渣性是指冷却凝固后从焊缝表面脱落的难易程度。生产中总是希望脱渣性好。影响脱渣性的主要因素为熔渣与焊缝金属之间的化学结合力，在焊钢的条件下主要是熔渣的氧化性，即熔渣中氧化铁的含量。它既能溶于金属，又能溶于熔渣，使金属和熔渣结合起来从而恶化了脱渣性。此外，熔渣和金属的线膨胀系数相差愈大，熔渣本身的弹性愈小，则脱渣性愈好。熔渣中的氧化钛可以有效地改善脱渣性，而氟化钙将恶化脱渣性。

2. 熔渣的脱氧作用

(1) 脱氧目的及脱氧剂。脱氧就是金属的还原反应。通过焊丝或药皮加入某种元素，夺取液体金属中的氧，从而保护母材及合金元素不被氧化。用来脱氧的元素叫脱氧剂，常用的有锰、硅、钛、铝、碳等，除碳外，它们均以铁合金的形式加入焊条药皮或焊剂中。

(2) 脱氧的方式。脱氧反应是分阶段和区域进行的，按其进行的方式，可分先期脱氧、沉淀脱氧和扩散脱氧三种。

先期脱氧。含有脱氧剂的药皮被加热时其中高价氧化物或碳酸盐分解出的氧和二氧化碳，便和脱氧剂发生作用，生成氧化物，使熔池上部气体中的CO₂及氧原子减少，从而减少

熔渣和熔池的氧化性。

沉淀脱氧。在熔滴和熔池中，利用溶解在液态金属中的脱氧剂(主要是碳、锰、硅等)，直接和溶于液态中的氧化铁作用，把铁还原，脱氧产物浮到熔渣中去。

扩散脱氧。氧化铁既可溶解于液态铁以及熔渣中，也可从熔池扩散到熔渣中去。这种不断扩散使熔池的含氧量降低即是扩散脱氧。

3. 焊缝金属的脱硫

(1) 硫的危害。硫在低碳钢中主要以 FeS 和 MnS 形式存在， FeS 与液态铁可以无限互溶，而溶于固态铁却很少，因此，熔池在凝固结晶时， FeS 便析出在晶粒界面上，并与 FeO 等形成低熔点共晶。共晶物的熔点很低，在高温下处于半凝或液态，在不均匀冷却造成的内应力作用下，晶界处容易开裂产生裂纹，即热脆性。

(2) 脱硫方法。最常用的方法是利用锰夺取 FeS 中的硫生成 MnS ，浮到熔渣中去。也可用碱性金属的氧化物(如 MnO ， CaO 等)脱硫，生成的 CaS 类似于 MnS 。

无疑地，必须限制焊接材料中的含硫量。低碳钢及低合金钢焊丝的含硫量，一般应小于 $0.03\sim 0.04\%$ ，合金结构钢焊丝应小于 $0.025\sim 0.03\%$ ，不锈钢焊丝应小于 0.02% 。药皮和焊剂的原材料，如钛铁矿、锰矿、锰铁、赤铁矿等，常含有一定的硫，必要时应对原材料提纯。

4. 焊缝金属的脱磷

(1) 磷的危害。磷在钢中主要以 Fe_2P 和 Fe_3P 的形式存在。它们与铁镍形成低熔点共晶，分布于晶粒的边界。在奥氏体类钢和焊缝的碳量较高时，能促成结晶裂纹。磷的最大危害是增加焊缝的冷脆性。磷化物本身硬而脆，存在于晶粒边界上，减弱了晶粒之间的结合力，降低焊缝金属的冲击韧性，并使脆性转变温度升高。因此，低碳钢和低合金钢含磷量一般限制在 0.045% 以下，合金钢焊缝限制在 0.035% 以下。

(2) 脱磷方法。焊缝中脱磷反应分为两步：第一是将磷氧化；第二是使其与渣中的碱性氧化物发生反应，生成复合物进入熔渣，从而减少焊缝中的含磷量。实际上焊接时脱磷很困难。所以目前主要靠严格限制原材料的含磷量。

5. 焊缝金属的掺合金。利用焊接材料将所需合金元素掺到焊缝金属中的过程，称为掺合金。其目的有两个：一是补偿合金元素在焊接过程中的烧损及蒸发；二是形成具有特殊性能(如耐磨、耐热、耐腐蚀性等)的焊缝或堆焊层。

手弧焊掺合金的方法有三种：一是通过焊芯；二是通过焊条药皮(将合金成分加在药皮里)；三是两种方式兼用。焊接高合金钢通常用合金钢焊芯外面再涂碱性渣系的保护药皮，从而使焊缝金属合金化，这样取得的效果最好。一般的碳钢焊条，大多通过焊条药皮掺合金，焊芯常用低碳钢材料(焊08、焊08A)，药皮用氧化性极低的碱性渣系，利于合金元素过渡。此外也可采用氧化性弱的酸性钛钙型熔渣来掺合金。反之，如果使用氧化性极强的氧化铁型酸性渣系药皮，则大量的合金成分会被氧化烧损掉，这既不经济，也不合理。焊条药皮中常用的合金剂有锰铁、铬铁、镍铁、钼铁、钨铁、钛铁、硼铁等。

第三节 焊缝金属的结晶过程

当焊接热源离开后，熔池金属便开始结晶。焊接产生的气孔、夹杂、偏析和结晶裂纹等

缺陷，都是在这个过程中产生的，因此研究焊缝金属的结晶过程是有很大意义的。

一、焊缝金属的结晶

熔池从高温冷却到室温，要经过两次组织变化：第一次是从液体转变成固体，称为一次结晶；第二次是焊缝温度降低至相变温度时，将发生组织转变，叫做二次结晶。

1. 焊缝金属的一次结晶

(1) 熔池结晶的特点。因熔池体积小，周围全是冷金属，所以冷却速度很快；熔滴的平均温度约为 2300°C ，熔池平均温度约为 1700°C 左右，熔池金属的凝固温度比钢高得多；熔池中心温度很高，边缘凝固界面处散热快，因而，熔池结晶是在很大温差条件下进行的；熔池随热源的移动而移动，因此其形状和结晶组织也受到焊接速度的影响；此外焊条的摆动，电弧的吹力，都使熔池产生强烈的搅拌，因而熔池结晶是在运动状态下进行的。

(2) 焊缝结晶过程。熔焊热源的移去，使熔池温度降低，当降到凝固点时，液态金属中的一些原子开始有规则的排列形成晶核。然后，晶核吸附周围液态金属中的原子，逐渐长大。熔池结晶最容易从熔合线上开始，因为熔合线外温度最低，散热又好。随着热源的离去，熔合线上的半熔化晶粒就成为附近液态金属的晶核。由于晶粒长大的方向与散热方向相反，因此晶粒长大方向指向熔池中心，形成柱状晶体。柱状晶体不断长大至互相接触，结晶过程即告结束(图1—5)。



图1—5 熔池的结晶过程

随着热源的移动，熔池的结晶过程也是连续的，其结晶速度等于焊接速度。焊速越慢，熔池体积越大，焊缝冷却也越慢，其晶粒也越粗大，焊缝金属的塑性也越差。

2. 焊缝金属的二次结晶。焊缝金属的组织，是在一次结晶之后金属继续冷却到相变温度之下，经过二次结晶而得到的室温组织。以低碳钢为例，一次结晶的都是奥氏体晶粒，当继续冷却产生二次结晶时，奥氏体转变为铁素体和珠光体，因焊缝冷却速度较大，故珠光体的含量较高，焊缝强度和硬度提高，塑性和韧性则降低。

二、焊缝中的偏析和夹杂

1. 焊缝中的偏析。熔池结晶过程中因冷却速度快，金属的化学成分来不及扩散，使合金元素分布不均匀，这种现象称为偏析。焊缝中的偏析现象有三种：

(1) 显微偏析。熔池结晶时，最先结晶的金属最纯，后续结晶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更高。因此，晶粒内部和晶粒之间的化学成分是不均匀的，这种现象称为显微偏析。影响显微偏析的一个重要因素是金属的化学成分，因为它决定金属结晶温度区间的大小。一般结晶温度区间越大，越容易产生显微偏析。低碳钢的结晶温度区间不大，所以显微偏析不严重。高碳钢、合金钢焊接时，显微偏析很严重，常常引起热裂纹等缺陷。所以高碳钢、合金钢焊接后，常需进行扩散及细化晶粒的热处理，以消除显微偏析现象。熔池金属成分相同时，影响偏析的因素则是过冷度，它的影响往往呈现复杂的关系。

(2) 区域偏析。熔池结晶时，由于柱状晶体的不断长大和推移，会把杂质“赶”向熔池中心，使熔池中心的杂质比其它部位高，这种现象称为区域偏析。它与焊缝的断面形状有很大关系。窄而深的焊缝各柱状晶的交界在中心，因此较多的杂质聚集在焊缝中心，该处极易形成热裂纹。宽而浅的焊缝，杂质聚集在焊缝上部，这种焊缝具有较高的抗热裂纹能力(图1—6)。

(3) 层状偏析。熔池始终是处于气流和熔滴的脉动作用下，所以金属的流动或热量的供应和传递都具有脉动性质。熔池在结晶过程中要放出结晶潜热，当潜热达到一定数值时，熔池的结晶出现暂时的停顿，以后随着熔池的散热，结晶又继续。这些都使晶体的成长速度出现周期性地增加和减少。晶体长大速度的这种变动，伴随着结晶前沿液态金属中杂质浓度的变动，这样周期性地形成偏析，称为层状偏析。层状偏析常集中一些有害元素，因而缺陷也往往出现在偏析层中。图1—7显示由层状偏析造成的气孔。

焊接中由于熔池连续存在杂质聚集及断弧点的熔池中搅拌不够强烈等因素，使火口处杂质较多，出现较为严重的火口偏析现象，容易引起所谓的火口裂纹。

2. 焊缝中的夹杂。因熔池凝固较快，一些非金属夹杂物在结晶过程中来不及浮出而残存在焊缝内部形成夹杂。焊缝中的夹杂物有：

(1) 氧化物。主要成分是 SiO_2 ，其次是 MnO 、 TiO_2 和 Al_2O_3 等，多以硅酸盐的形式存在。它们容易在焊缝中引起热裂纹。焊接中熔池脱氧越完全，焊缝中氧化物夹杂就越少。

(2) 硫化物。主要是 MnS 和 FeS 。一般来讲， FeS 比 MnS 的影响要恶劣得多，它易促使热裂纹产生。粗大的夹杂，对焊缝性能影响很大，要采取措施防止或消除。首先是正确选择焊条、焊剂的渣系，使之更好地脱氧、脱硫。其次是注意操作：选用合适的焊接规范，使熔池存在的时间不要太短；多层焊时，要清除前层焊缝的熔渣；焊条要有适当的摆动，以利熔渣排出；保护熔池，防止空气的侵入。

三. 焊缝中的气孔

1. 气孔的危害性及形成原因。熔池结晶过程中，气体若来不及逸出就可能残存为气孔。它削弱了焊缝的有效断面，降低了焊缝的致密性，还会带来应力集中，降低焊缝强度和塑性。严重的气孔对交变载荷下的焊接结构更为不利，它降低焊缝的疲劳强度。形成气孔的原因是很多的，如焊条和焊剂质量不好，没有烘干，母材表面不干净，焊接规范不稳定，焊接操作不良，焊接区域保护不善等。形成气孔的气体有两类：一类是高温时气体溶解于熔池金属中，结晶或相变时气体的溶解度突然下降，从而残留在焊缝内部，如氢和氮；第二类是熔池中冶金反应产生不溶于金属的气体，如 CO 和水蒸气等。

2. 气孔的类型及分布特征。焊缝中气孔有多种，主要是氢气孔，氮气孔和 CO 气孔。

(1) 氢气孔。对于低碳钢，氢气孔大多出现在焊缝表面，气孔断面多为螺钉状，从表面

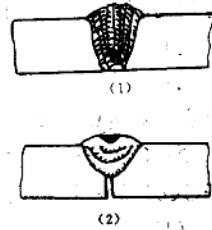


图1—6 焊缝形状与杂质分布的关系

- (1)窄而深的焊缝
- (2)宽而浅的焊缝

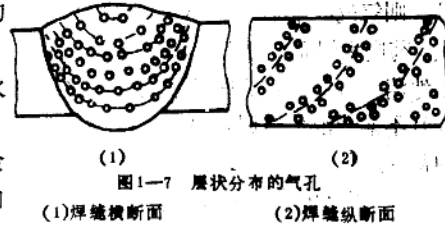


图1—7 层状分布的气孔

- (1)焊缝横断面
- (2)焊缝纵断面