

支道光 主编



JINSHU
RONGHAN
YUANLI
QIANSHUO

金属熔焊 原理浅说

—— 焊工理论知识学习读本

HANGONG LILUN ZHISHI XUEXI DUBEN



化学工业出版社

支道光 主编



JINSHU
RONGHAN
YUANLI
QIANSHUO

金属熔焊 原理浅说

——焊工理论知识学习读本



化学工业出版社
· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

金属熔焊原理浅说——焊工理论知识学习读本 / 支道光
主编. —北京: 化学工业出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-122-04885-1

I. 金… II. 支… III. 熔焊—基本知识 IV. TG412

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 025443 号

责任编辑: 周一红

文字编辑: 张燕文

责任校对: 周梦华

装帧设计: 周 遥

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 刷: 北京市振南印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

850mm×1168mm 1/32 印张 7 1/2 字数 160 千字

2009 年 5 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: 20.00 元

版权所有 违者必究

前 言

焊接作为制造业的加工手段，在当前国民经济迅猛发展时期，日益显现出它的重要性。可以认为，大多数现代工程结构都是需要通过焊接来完成的，因此对焊接技能人才的需求量也日渐加大。为了适应这一新形势的需要，如何尽快培训出既有一定的基础理论知识，又有较高操作技能水平的技术工人，已是当前亟待解决的重要课题。

笔者多年从事焊工培训教学工作，对当前焊接技术工人现状较为了解。许多多年从事焊接操作的老工人，由于缺乏必需的基础理论知识，对生产中出现的技术问题往往难以解决，技术水平的提高也受到一定的限制。

社会上适合技术工人阅读的技术理论书籍极少，大多数是工艺操作技术方面的。本书就是为适应这一形势的需要而编写的。本书在编写时，力求文字通俗，内容深入浅出，着重从基本概念入手，基本不涉及抽象的理论及计算公式。

本书的内容包括金属材料基础知识、热处理基本知识、焊接热过程、焊接化学冶金、焊接结晶过程、焊接热影响区、焊接接头裂纹等。附录中列有有关的物理、化学知识简介，常用钢材焊接接头显微组织金相照片，金属焊接性及其试验方法简介，国内常用焊接标准目录等内容。编者深信，这些内容对于从事熔焊的焊工学习与提高，将会有所裨益。

本书由支道光主编。参加本书编写的人员有：支玲玲、梁

轩、王淑琴、梁永光、方波、梁伟钢、郝飞舟、王军。

由于编者水平所限，书中不妥之处在所难免，衷心希望广大读者批评指正。

支道光

目 录

第 1 章 金属材料基础知识	1
1.1 金属材料是晶体材料	1
1.1.1 什么是晶体材料	1
1.1.2 金属的晶体结构	2
1.1.3 合金的晶体结构	4
1.1.4 实际金属的晶体结构	5
1.2 金属材料的结晶	7
1.2.1 纯金属的结晶	7
1.2.2 合金的结晶	8
1.3 铁碳合金	9
1.3.1 铁碳合金的基本相	9
1.3.2 铁碳合金相图	10
1.3.3 含碳量对铁碳合金组织性能的影响	17
1.3.4 铁碳合金相图的应用	18
1.4 冷热压力加工对金属材料组织性能的影响	19
1.4.1 冷压力加工对金属材料组织性能的影响	19
1.4.2 热压力加工对金属材料组织性能的影响	21
第 2 章 热处理基本知识	24
2.1 热处理的目的	24
2.2 热处理的分类	25
2.3 整体热处理与焊接	25
2.3.1 退火	25

2.3.2	正火	27
2.3.3	淬火	30
2.3.4	回火	33
第3章	焊接热过程	36
3.1	焊接热过程的特点	36
3.2	焊接热过程对焊接的影响	37
3.3	焊接热源	38
3.3.1	焊接热源种类	38
3.3.2	焊接热效率	41
3.3.3	焊件上加热区的热量分布	44
3.4	焊接温度场	45
3.4.1	焊接温度场的分布特征	45
3.4.2	影响焊接温度场的因素	50
3.5	焊接热循环	54
3.5.1	焊接热循环的主要参数	55
3.5.2	多层焊的焊接热循环	56
3.5.3	脉冲焊的焊接热循环	58
3.5.4	影响焊接热循环的因素	61
3.6	金属的加热与熔化	62
3.6.1	焊条的加热与熔化	62
3.6.2	母材的熔化与熔池	68
第4章	焊接化学冶金	71
4.1	焊接化学冶金的特点	71
4.1.1	焊接时焊缝金属的保护	71
4.1.2	焊接时化学冶金反应区及其反应条件	73
4.1.3	焊接规范对焊接化学冶金过程的影响	77
4.1.4	焊接化学冶金反应的不平衡性	78

4.2 焊接区内的气体	78
4.2.1 焊接区内气体的来源	78
4.2.2 焊接区内气相的成分	79
4.2.3 氮 (N_2) 的影响	79
4.2.4 氢 (H_2) 的影响	81
4.2.5 氧 (O_2) 的影响	87
4.3 焊接时的熔渣	90
4.3.1 熔渣的作用	90
4.3.2 熔渣的成分和类型	91
4.3.3 熔渣的性能	91
4.3.4 熔渣对焊缝金属的氧化	94
4.3.5 焊缝的脱氧	95
4.4 焊缝金属的合金化	97
4.4.1 焊缝金属合金化的方式	97
4.4.2 合金元素的过渡系数及其影响因素	98
4.5 焊缝金属的脱硫、脱磷	101
4.5.1 脱硫 (S)	101
4.5.2 脱磷 (P)	102
第5章 焊接结晶过程	105
5.1 熔池结晶的特点	105
5.2 熔池金属的结晶过程	106
5.2.1 晶核的形成	107
5.2.2 晶核的成长	107
5.3 焊缝金属的化学不均匀性	108
5.3.1 显微偏析	108
5.3.2 区域偏析	109
5.3.3 层状偏析	110

5.4	焊接接头的熔合区	111
5.4.1	熔合区的形成	111
5.4.2	熔合区的不均匀性	112
5.5	焊缝中的夹杂物	113
5.5.1	焊缝中夹杂物的种类及其危害性	114
5.5.2	防止焊缝中产生夹杂物的措施	115
5.6	焊缝中的气孔	116
5.6.1	气孔的类型及其分布特征	116
5.6.2	形成气孔的气体及其产生气孔的原因	117
5.6.3	影响气孔形成的因素及防止措施	119
5.7	改善焊缝结晶组织的措施	123
5.7.1	改善焊缝一次结晶组织	124
5.7.2	改善焊缝二次结晶组织	125
第6章	焊接热影响区	128
6.1	焊接热影响区的形成与影响因素	128
6.2	焊接时加热过程热影响区的组织转变	129
6.2.1	焊接加热时热影响区组织转变特点	129
6.2.2	焊接加热时热影响区的晶粒长大	132
6.3	焊接时冷却过程热影响区的组织转变	134
6.3.1	连续冷却组织转变曲线图	134
6.3.2	焊接冷却时热影响区组织转变特点	137
6.3.3	焊接冷却时热影响区组织转变	140
6.4	焊接热影响区的组织和性能	142
6.4.1	焊接热影响区的组织	142
6.4.2	焊接热影响区的性能	149
第7章	焊接接头裂纹	154
7.1	焊接热裂纹	154

7.1.1	结晶裂纹	155
7.1.2	液化裂纹	160
7.1.3	高温失塑裂纹	162
7.1.4	多边化裂纹	162
7.2	焊接冷裂纹	163
7.2.1	冷裂纹的特征	163
7.2.2	冷裂纹的形成	165
7.2.3	影响冷裂纹形成的因素	167
7.2.4	防止冷裂纹的措施	168
7.3	消除应力裂纹	170
7.3.1	裂纹的主要特征	170
7.3.2	影响因素及防止措施	171
7.4	层状撕裂	172
7.4.1	层状撕裂的产生及其特征	173
7.4.2	影响层状撕裂的因素	173
7.4.3	防止层状撕裂的措施	175
7.5	应力腐蚀裂纹	176
7.5.1	应力腐蚀裂纹的特征	177
7.5.2	应力腐蚀裂纹的形成	177
7.5.3	影响应力腐蚀裂纹的因素	177
7.5.4	应力腐蚀裂纹的控制	178
附录 1	有关的物理、化学知识简介	181
1.1	有关的物理知识	181
1.2	有关的化学知识	184
附录 2	常用钢材焊接接头显微组织金相照片	188
2.1	低碳钢焊条电弧焊	188
2.2	T 形接头焊条电弧焊	192

2.3	普通低碳低合金钢焊条电弧焊.....	195
附录 3	金属焊接性及其试验方法简介	200
3.1	金属焊接性的定义.....	200
3.2	影响焊接性的因素.....	201
3.3	评定焊接性的准则.....	201
3.4	评定焊接性的方法.....	202
3.5	工艺焊接性试验方法示例.....	203
3.6	使用焊接性试验方法示例.....	212
附录 4	国内常用焊接标准目录	224
参考文献		228

第1章 金属材料基础知识

在现代工程结构中，金属焊接结构在重型机器结构、锅炉压力容器与管道、建筑结构、船舶与海洋工程结构、起重设备、汽轮机和水轮机等动力机械、铁路机车车辆、桥梁结构、工程机械等许多工业领域获得广泛的应用，所涉及的金属材料品种繁多。为了帮助从事焊接的技术工人掌握必要的金属材料基础知识，以利于提高技能水平，本章就金属材料的基础理论作些简要的介绍。

1.1 金属材料是晶体材料

平常所说的金属材料，实际上包括纯金属及合金材料。这两种材料在固体状态下，都是晶体材料。在自然界，一切呈固体状态的物质可分为晶体及非晶体两大类。像金属材料、盐、金刚石、石墨等属于晶体材料；而橡胶、普通玻璃、松香、石蜡等则是非晶体材料。晶体材料占大多数。

1.1.1 什么是晶体材料

自然界一切物质都是由原子（或分子）组成的，它们是物

质的最小、最基本的组成单元，晶体材料的内部原子（或分子）的排列是按一定的规律规则排列的；而非晶体材料则相反，它的原子（或分子）排列是杂乱无章的，没有一定的规律。这就是它们之间的根本区别。

晶体与非晶体在性能上也有一定区别。例如，晶体有固定的熔点（铁为 1538°C 、铜为 1083°C 、铝为 660°C 、铅为 327°C 等），而且在不同的方向上，具有不同的性能等，而非晶体则不是这样。

随着科学技术的发展，晶体和非晶体在一定的条件下是可以相互转化的。例如，在一定条件下可以得到非晶态金属，因为这种金属具有高的强度和韧性等许多优异性能，已日益受到人们的重视。

1.1.2 金属的晶体结构

通常把晶体用假想的，以一定规律排列的空间格架即晶格表示，晶格中的小球代表原子占据的位置，而原子之间的连线表示相互间的作用力。与人体的细胞一样，晶格中的最小几何单元称为晶胞。弄清楚这点，就可以谈论金属的晶体结构了。

金属中常见的晶格类型有以下三种。

(1) 体心立方晶格 属于这种晶格类型的金属有 $\alpha\text{-Fe}$ (α -铁)、Cr(铬)、W(钨)、Mo(钼)、V(钒) 等，如图 1-1 所示。

(2) 面心立方晶格 属于这种晶格类型的金属有 $\gamma\text{-Fe}$ (γ -铁)、Al(铝)、Cu(铜)、Au(金)、Ag(银)、Pb(铅)、Ni(镍) 等，如图 1-2 所示。

(3) 密排六方晶格 属于这种晶格类型的金属有 Mg(镁)、Zn(锌)、Bi(铋)、Cd(镉) 等，如图 1-3 所示。

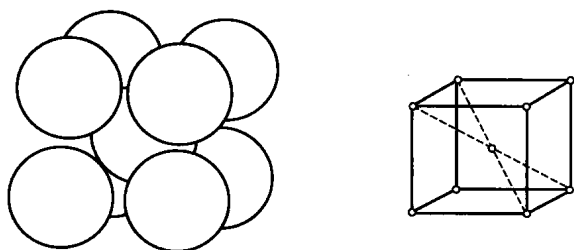


图 1-1 体心立方晶格

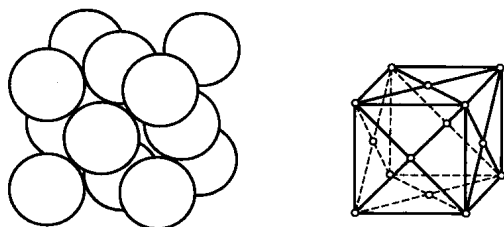


图 1-2 面心立方晶格

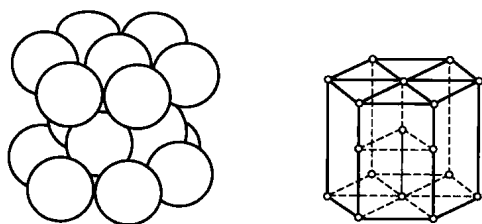


图 1-3 密排六方晶格

在固体状态下，有些金属随着温度的变化，常以不同的晶格类型存在。例如，纯铁就有两种晶格类型：体心立方晶格及面心立方晶格。在 $1394\sim 1538^{\circ}\text{C}$ 及 912°C 以下的纯铁具有体心立方晶格，而在 $912\sim 1394^{\circ}\text{C}$ 温度范围内的纯铁则具有面心立

方晶格，它们之间的转变称为同素异构转变。金属的同素异构转变是金属热处理的基础。这是因为这种转变会带来性能上的改变，从而达到热处理的目的。

1.1.3 合金的晶体结构

合金是由两种或两种以上的金属元素或金属元素与非金属元素通过冶炼等方法结合而成的具有金属特性的物质。例如，钢、铸铁、黄铜、青铜、硬铝、防锈铝等都是合金材料。由于合金具有比纯金属更高的力学性能及某些特殊的物理、化学性能（如耐高温、耐腐蚀等），因而，合金材料比纯金属应用更为广泛。

在合金中，通常把具有同一化学成分而且结构相同的均匀组成部分称为相，而且相和相之间有明显的界面。合金具有更多的优异性能与合金的相结构密切相关。固态合金的相结构可分为固溶体与金属化合物两大类。

固溶体是合金在固态下，组成合金的溶质原子（如碳钢中的碳）溶解在溶剂原子（如碳钢中的铁）所组成的晶格中，保持溶剂原子所组成的晶格（如铁的体心立方晶格或面心立方晶格）不发生变化，而形成的一种均匀固相。例如，碳钢中的铁素体、奥氏体就是固溶体。固溶体通常具有较高的塑性、韧性和较低的强度、硬度。焊接结构中常采用的低碳钢，由于含有大量的铁素体，含碳量低，塑性、韧性好，因此具有良好的焊接性。

固溶体由于溶质原子的溶入，使晶格发生畸形改变，塑性变形阻力增大，因而比纯金属具有更高的强度、硬度，这就是固溶强化作用。

固溶强化是提高金属材料力学性能的重要途径之一，特别对于结构用钢，常采用固溶强化来提高它的强度。例如，工业上焊接结构广泛应用的普通低合金强度钢 16Mn (Q345)，就是将锰 (Mn) 加入钢中 (作为溶质原子)，使铁 (溶剂原子) 的晶格发生畸形改变，从而起到固溶强化作用，使它的强度比 Q235 (普通低碳结构钢) 提高 25%~40%。

至于金属化合物，则是合金中组成元素间发生相互作用而形成的一种具有金属特性的物质。金属化合物具有独特的晶格类型，一般可用化学分子式表示。

金属化合物的熔点较高，且硬而脆。它在合金中的数量、大小、形态及分布，对合金的性能影响很大。当它以细小颗粒均匀分布在固溶体的基体上时，将使合金的强度、硬度、耐磨性明显提高，这种现象称为弥散强化。由此可见，金属化合物是合金中的重要强化相。金属化合物的种类很多，是合金钢、有色金属合金及硬质合金中的重要组成相。例如，碳钢中的渗碳体 (Fe_3C)、合金钢中的碳化物、氮化物以及硬质合金中的碳化物都是金属化合物。

1.1.4 实际金属的晶体结构

实际金属材料的晶体结构，并不像前面说的那样由原子规则排列的，而是由许多颗粒状的小晶体组合形成的。每个小晶体内部的晶格排列趋向大体一致，而各个小晶体彼此之间的晶格排列趋向却不相同，如图 1-4 所示。这种外形不规则的小晶体通常称为晶粒，晶粒与晶粒之间的交界面称为晶界。因此可以说，实际金属材料的晶体结构是由许许多多晶粒组成的多晶体结构。

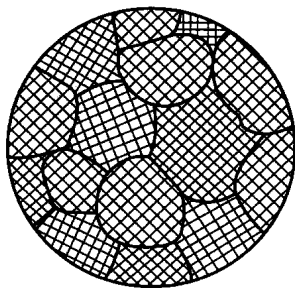


图 1-4 多晶体结构示意图

晶粒尺寸是很小的。例如，钢铁材料的晶粒一般为 $0.1 \sim 0.001\text{mm}$ ，必须在金相显微镜下才能观察到。

晶界实际上是一种晶体缺陷，常称它为面缺陷。因为这一地带原子排列很紊乱，具有较高的能量。而且，常温强度、硬度较高，熔点较低，很易被腐蚀，往往相的转变就从晶界处开始。即使晶粒内部，也不像理想晶体那样完整、规则。

此外，实际金属除存在面缺陷以外，还有点缺陷（空位及间隙原子）、线缺陷（位错）等。

空位是晶格的某些结点没有被原子所占据而空着的位置；间隙原子则是在个别晶格空隙的地方出现了多余的原子；而位错是在晶体中的某些地方出现一系列或若干列原子发生有规律性的错排现象。无论是哪种缺陷的存在，都破坏了原子间的平衡状态，使晶格产生畸形变化，造成晶体的性能发生改变，如使金属的强度、硬度增加等。而空位和间隙原子的运动，是金属中原子扩散（物质的迁移过程）的主要方式之一，对热处理、化学热处理、焊接过程的进行非常重要。晶体中位错密度的变化及位错运动也都对金属的性能、压力加工及组织转变产生极