

# 金属熔焊原理分析 与焊接技术研究

© 王 磊 著

非外借

 吉林大学出版社

# 金属熔焊原理分析 与焊接技术研究

© 王 磊 著

## 图书在版编目 (CIP) 数据

金属熔焊原理分析与焊接技术研究 / 王磊著. — 长春: 吉林大学出版社, 2019. 1

ISBN 978-7-5692-4386-4

I. ①金… II. ①王… III. ①熔焊—研究 IV. ①TG442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 041389 号

书 名 金属熔焊原理分析与焊接技术研究

作 者 王磊 著

策划编辑 魏丹丹

责任编辑 魏丹丹

责任校对 王瑞金

装帧设计 凯祥文化

出版发行 吉林大学出版社

社 址 长春市人民大街 4059 号

邮政编码 130021

发行电话 0431-89580028/29/21

网 址 <http://www.jlup.com.cn>

电子邮箱 [jdcbs@jlu.edu.cn](mailto:jdcbs@jlu.edu.cn)

印 刷 河北纪元数字印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 11.25

字 数 166 千字

版 次 2019 年 1 月 第 1 版

印 次 2019 年 1 月 第 1 次

书 号 ISBN 978-7-5692-4386-4

定 价 45.00 元

---

版权所有 翻印必究

# 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的时期，日益显现出其重要性。大多数现代工程结构都需要通过焊接才能完成，因此，社会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，如何尽快培养出既有扎实的基础理论知识，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问题。

金属焊接技术的用途很广，但是很多经验丰富的焊接工人却不具备扎实的理论基础，在生产工作中出现的技术问题往往难以解决，技术水平也得不到质的提升。关于金属熔焊工作，需要更多的焊接工作者在理论与实践相结合的前提下，不断地探索与研究。本书从金属熔焊的原理入手，通过对原理的论述，系统地讲解焊接的相关技术。

本书共分八章，具体内容如下：第一章介绍了金属材料的基础知识，为整个焊接原理的论述打下了基础；第二章、第三章对金属焊接的热过程以及化学冶金过程进行了探索；第四章则详细地论述了焊缝的组织 and 性能；第五章至第八章对碳素钢、低合金钢、不锈钢、耐热钢和铸铁等各种金属材料的焊接技术进行了科学的探讨。本书知识覆盖面广、逻辑清晰、层次分明、图文并茂、言简意赅，希望对从事金属熔焊工作的读者有所裨益。

## 《《金属熔焊原理分析与焊接技术研究》

笔者在撰写本书时，参考了有关金属熔焊原理与焊接技术的专家和学者们的相关理论，在此表示诚挚的谢意。由于本人学术水平有限，书中难免会存在不妥之处，恳请广大读者批评、指正。

王 磊  
2018年10月

# 目 录

<b>第一章 金属材料基础知识</b> .....	1
第一节 金属材料的本质 .....	1
第二节 金属材料的结晶 .....	5
第三节 铁碳合金概述 .....	6
第四节 温度对金属材料的影响 .....	15
<b>第二章 焊接热过程</b> .....	19
第一节 焊接热过程的特点 .....	19
第二节 焊接热过程对焊接的影响 .....	20
第三节 焊接热源 .....	21
第四节 焊接温度场 .....	26
第五节 焊接热循环 .....	33
第六节 金属的加热与熔化 .....	40
<b>第三章 焊接化学冶金</b> .....	49
第一节 焊接化学冶金过程的特点 .....	49
第二节 气相对金属的作用 .....	56
第三节 焊接熔渣 .....	82
第四节 焊接熔渣对金属的作用 .....	86
第五节 焊缝金属的合金化 .....	89

<b>第四章 焊缝的组织 and 性能</b> .....	93
第一节 焊缝金属的一次结晶 .....	93
第二节 焊缝金属的固态相变 (二次结晶) .....	101
第三节 焊缝组织与性能的改善 .....	109
<b>第五章 碳素钢材料焊接技术分析研究</b> .....	115
第一节 低碳钢焊接技术分析研究 .....	116
第二节 中碳钢焊接技术分析研究 .....	122
第三节 高碳钢焊接技术分析研究 .....	125
<b>第六章 低合金钢焊接技术分析研究</b> .....	128
第一节 热轧及正火钢焊接技术分析研究 .....	129
第二节 低碳低合金调质钢焊接技术分析研究 .....	136
第三节 中碳调质钢焊接技术分析研究 .....	139
<b>第七章 不锈钢和耐热钢焊接技术分析研究</b> .....	143
第一节 不锈钢的焊接技术分析研究 .....	143
第二节 耐热钢的焊接技术分析研究 .....	150
<b>第八章 铸铁焊接技术分析研究</b> .....	157
第一节 灰铸铁焊接技术分析研究 .....	157
第二节 球墨铸铁焊接技术分析研究 .....	165
<b>参考文献</b> .....	169
<b>后记</b> .....	172

# 第一章 金属材料基础知识

在现代工程结构中，金属材料在重型机器结构、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、汽轮机和水轮机之类的动力机械、铁道机车车辆、桥梁结构、工程机械等许多工业领域中获得了广泛的应用，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，提高工人的技能水平，本章就金属材料的基础知识作简要的介绍。

## 第一节 金属材料的本质

平常所说的金属材料，实际上包括纯金属材料及合金材料。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、食盐、金刚石、石墨等属于晶体材料；而像橡胶、普通玻璃、松香、石蜡等则是非晶体材料。在自然界中晶体材料占大多数。

### 一、什么是晶体材料

自然界一切物质都是由原子、分子或离子组成的，它们是物质最小、最基本的组成单元，晶体材料内部质点的排列是按一定的规律排列的；而非晶体材料则相反，它的内部质点排列是杂乱无章的，没有

一定的规律。这就是晶体材料与非晶体材料之间的根本区别。

晶体材料与非晶体材料在性能上也有一定区别。例如，晶体材料有固定的熔点（如标准大气压下，铁为  $1\ 538\ ^\circ\text{C}$ 、铜为  $1\ 083\ ^\circ\text{C}$ 、铝为  $660\ ^\circ\text{C}$ 、铅为  $327\ ^\circ\text{C}$  等），而且在不同的方向上，具有不同的性能，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强度、高韧性等许多优异的性能，已日益受到人们的重视。

## 二、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，即晶格来表示。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。

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  $\alpha\text{-Fe}$  ( $\alpha$ -铁)、Cr (铬)、W (钨)、Mo (钼)、V (钒) 等，如图 1-1 所示。

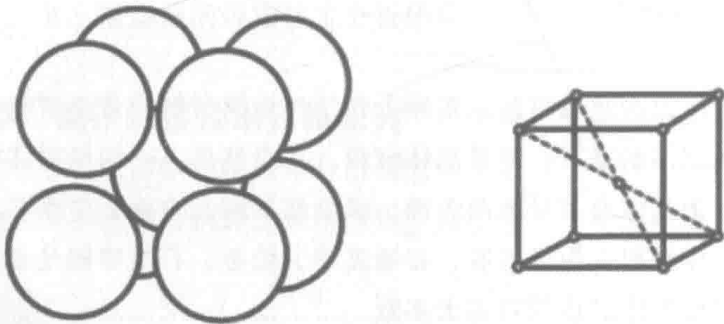


图 1-1 体心立方晶格

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

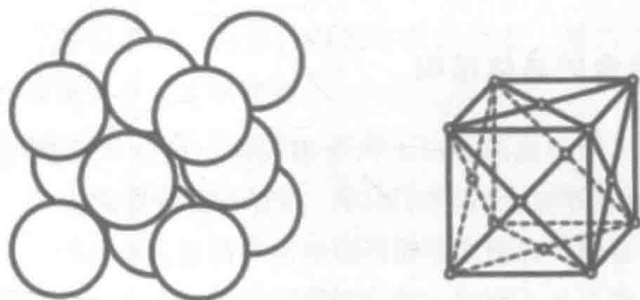


图 1-2 面心立方晶格

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

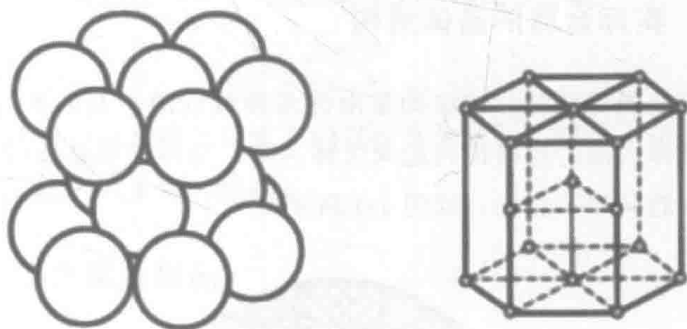


图 1-3 密排六方晶格

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：体心立方晶格和面心立方晶格。在  $1\ 394\sim 1\ 538\text{ }^{\circ}\text{C}$  及  $912\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下的纯铁为体心立方晶格，而在  $912\sim 1\ 394\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内的纯铁则为面心立方晶格，它们之间的转变称为同素异构转变<sup>①</sup>。这种转变会带来性能上的改变，从而达到热

<sup>①</sup> 一些金属在固态下，随温度或压力的改变，会发生晶体结构变化，即由一种晶格转变为另一种晶格的变化，称为同素异构转变。

处理的目的是。金属的同素异构转变是金属热处理的基础。

### 三、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，钢铁、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，合金材料比纯金属材料应用更为广泛。在合金材料中，通常把具有同一化学成分、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。

### 四、实际金属的晶体结构

实际金属材料的晶体结构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。

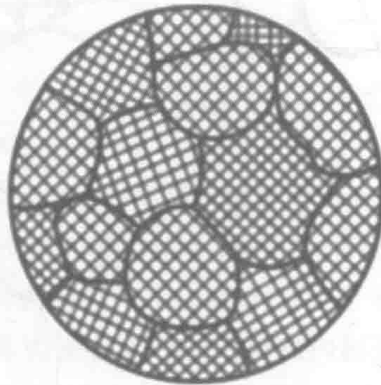


图 1-4 多晶体结构示意图

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。

晶粒尺寸是很小的。例如，钢铁材料的晶粒一般为 0.001 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，常温下，晶粒的强度、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。即使在晶粒的内部，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。

## 第二节 金属材料的结晶

金属材料由液态转化成固态的过程称为凝固，但是，由于固态金属是晶体材料，故常称为结晶。

### 一、纯金属的结晶

纯金属结晶有一定的规律，具体如下。

(1) 结晶是在一个恒定的温度下进行的。也就是说有一个固定的结晶温度——凝固点。

(2) 结晶是在一定的过冷条件下进行的。实际结晶温度要低于理论结晶温度，它们之间的差值，称为过冷度。过冷是结晶的必要条件，也是结晶时的推动力。结晶时的冷却速度越大，过冷度也就越大，金属的实际结晶温度就越低。过冷现象也并非只在金属中存在，如水结冰，并非在 0℃，而是在 -4℃ 左右。

(3) 结晶的过程是晶核不断形成和长大的过程。实际结晶时，晶核大多是依附在某些杂质的表面形成的（即异质形核），且多以树枝

状方式长大，也就是先形成金属熔焊的主干，然后长出枝干，最后，获得类似树枝状的晶体。如果金属的纯度很高，能看到颗粒状的多边形晶粒。如果金属的纯度不高，先结晶的主干必然是纯度较高的部分，而杂质由于熔点较低，往往最后凝固在树枝间隙，出现枝晶偏析现象。通过适当的腐蚀，能够显现树枝状晶体形态。在实际生产中，如果最后凝固部分得不到液态金属的补充，就会在结晶树枝间留下空隙，形成缩松，使铸件不致密。<sup>①</sup>

## 二、合金的结晶

合金的结晶过程较为复杂，通常运用合金相图来分析合金的结晶过程。相图又称为平衡图、状态图，是表示在平衡状态下（加热或冷却都非常缓慢），合金的组织状态（相）、温度和成分之间关系的简明图解。应用相图，可以了解合金系中，不同成分合金在不同温度时的组织状态（相），以及各相的成分和它们的相对数量，还可以了解合金在缓慢加热和冷却过程中，其组织变化（相变）的规律。在生产实践中，相图可作为制定冶炼、铸造、压力加工、焊接、热处理工艺的重要依据。

最简单的相图是二元合金相图。该相图中，纵坐标表示温度，横坐标表示合金成分。常见的典型二元合金相图有：匀晶相图、共晶相图、包晶相图以及在固态下转变的共析相图等。这些相图在铁碳合金相图中都有所反映。

## 第三节 铁碳合金概述

铁碳合金由于应用极为广泛，所以其在工业上占有重要地位。铁

<sup>①</sup> 韩喆，陈淑花，叶东南，金属材料与热处理 [M]，北京：冶金工业出版社，2013.

和碳可以形成一系列合金，但实际具有应用价值的铁碳合金其含碳量（用碳的质量分数  $T$  表示）不超过 5%。最常见的是碳钢和铸铁。合金钢是在碳钢的基础上有意加入一些合金元素形成的。

### 一、铁碳合金的基本相

铁碳合金的基本相是铁素体、奥氏体和渗碳体。

(1) 铁素体是碳溶于  $\alpha$ -Fe 中形成的固溶体，用符号 F 表示。铁素体溶碳量极少，在室温下不超过 0.008%，具有体心立方晶格，因而强度、硬度很低，但塑性、韧性良好，它的力学性能和纯铁很接近。铁素体在 770 °C 温度下，具有铁磁性。在低碳钢中，铁素体是主要组成相。

(2) 奥氏体是碳溶于  $\gamma$ -Fe 中形成的固溶体，用符号 A 表示。奥氏体具有面心立方晶格，在 1 148 °C 时，可达到 2.11% 的最大溶碳量，但随着温度的下降，其溶碳量将逐渐减少。奥氏体具有较低的硬度、较高的塑性，故易于锻轧成形。碳钢的热压力加工就是要加热到奥氏体区方能进行。奥氏体没有铁磁性。

(3) 渗碳体化学分子式为  $\text{Fe}_3\text{C}$ ，用符号 Cem 来表示。它的含碳量为 6.69%，它具有特殊、复杂的晶格，性质硬而脆，在 230 °C 以下具有弱的铁磁性，渗碳体是铁碳合金中的强化相。高碳钢由于渗碳体数量多，因而硬度高、耐磨性好；白口铸铁由于渗碳体成为基体组织，使得其又硬又脆。在合金钢中，由于合金元素的加入，形成合金渗碳体，因而赋予合金钢更高的强度。渗碳体在合金中的数量、形态与分布对合金的性能影响很大。<sup>①</sup>

### 二、铁碳合金相图

具有实际应用价值的铁碳合金相图就是 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图，如图 1-5

<sup>①</sup> 王彩霞. 铁碳合金相图的教学分析 [J]. 中国校外教育, 2012, 19 (3): 113.

所示。

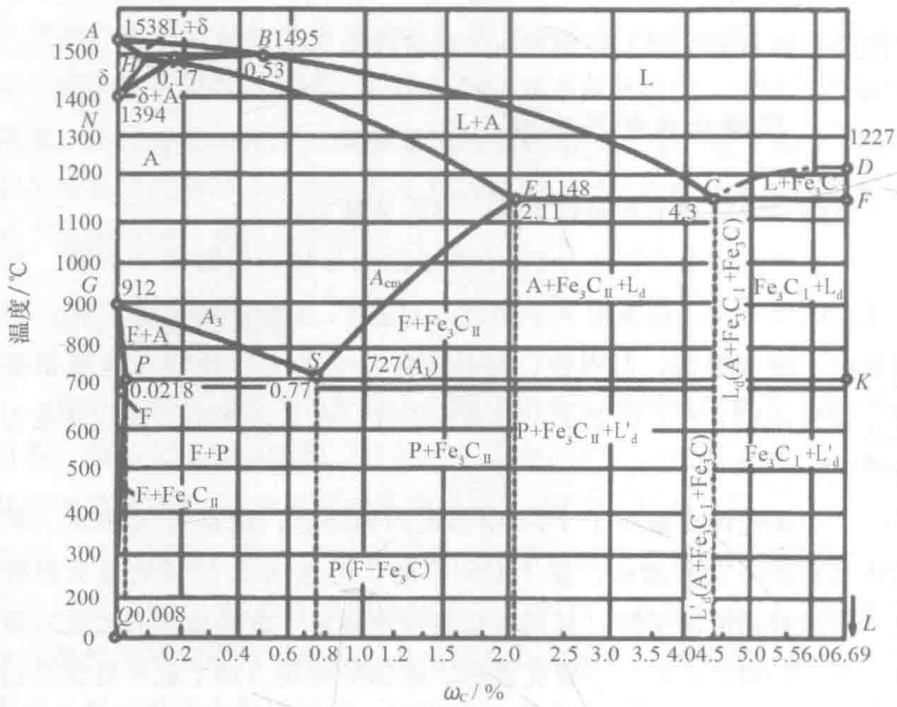


图 1-5 Fe-Fe<sub>3</sub>C 相图

### (一) 相图中几个重要的点

#### 1. C 点

C 点即共晶点 (温度为 1 148 °C)。C 点成分 (ω<sub>c</sub> 为 4.3%) 的液态合金冷却时, 在 1 148 °C 恒温下, 同时结晶出奥氏体和渗碳体的机械混合物, 这种混合物称为共晶体 (即共晶组织)。共晶体又称莱氏体, 用符号 L<sub>d</sub> 表示, 共晶体硬而脆, 是白口生铁 (铸铁) 中的主要组织。

#### 2. S 点

S 点即共析点 (温度为 727 °C)。S 点成分 (ω<sub>c</sub> 为 0.77%) 的

奥氏体在 727 °C 恒温下冷却时，将同时析出铁素体和渗碳体的机械混合物，这种混合物称为共析体（即共析组织）。共析体又称珠光体，用符号 P 表示。共析体强度较高，是钢中重要组织。

### 3. E 点

E 点为碳在  $\gamma$ -Fe 中的最大溶解度。E 点碳的质量分数为 2.11%，温度为 1 148 °C。钢和白口生铁就是以 E 点的成分来分界的。

## (二) 相图中几条重要的线

### 1. ECF 线

ECF 线温度为 1 148 °C，是共晶转变温度线。在此线上的成分的液态合金冷却时，都将不同程度地进行共晶转变。越靠近共晶点 C 成分的合金，转变后共晶组织将越多。在 C 点成分以左的合金称为亚共晶合金；在 C 点成分以右的合金称为过共晶合金。亚共晶合金通过冷却时的组织转变，在室温下的组织为珠光体+二次渗碳体+低温莱氏体。在实际生产中应用的铸铁成分都是接近共晶成分的亚共晶合金。

### 2. PSK 线

此线温度为 727 °C，是共析转变温度线。在此线上的成分的固态合金冷却时都将不同程度地进行共析转变，越靠近共析点 S 成分的合金，转变后共析组织（珠光体）将越多。在 S 点成分以左的合金称为亚共析合金；在 S 点成分以右的合金称为过共析合金。PSK 线又称为下临界温度，用符号  $A_1$  表示。

### 3. GS 线

这是冷却时由奥氏体开始析出铁素体或加热时铁素体最终转变成奥氏体的温度线。GS 线又称为上临界温度，用  $A_3$  表示。钢件进行热处理主要是把钢件加热到  $A_3$  线以上，获得完全奥氏体，根据所需性

能的不同，制定不同的冷却方式进行冷却，以满足所需性能指标。

### (三) 相图中铁碳合金的分类

按照相图中  $P$  点及  $E$  点的成分，可将铁碳合金分成工业纯铁、钢及白口铸铁三大类。

#### 1. 工业纯铁

工业纯铁是成分处在  $P$  点成分左边的铁碳合金，其含碳量小于  $0.0218\%$ （碳的质量分数）。

#### 2. 钢

钢的成分范围处在  $P$  点成分和  $E$  点成分之间。具体又可分为如下三种。

(1) 亚共析钢。成分处在  $P$  点成分和  $S$  点成分之间，含碳量（碳的质量分数）在  $0.0218\% \sim 0.77\%$  之间的铁碳合金，它在室温下的平衡组织是铁素体（ $F$ ）+珠光体（ $P$ ）。<sup>①</sup> 含碳量越低，铁素体越多，珠光体越少；反之，则铁素体越少珠光体越多。焊接结构常用的低碳钢，就属于亚共析钢，由于含碳量较低，因而室温组织铁素体较多，珠光体较少。图 1-6 所示为 20 钢退火状态（接近平衡状态）的金相照片。图中白色粒状晶粒为铁素体，黑色部分为珠光体，由于平均含碳量较低（ $w_c = 0.20\%$ ），故组织中大部分为铁素体，而珠光体则是少量的。

(2) 共析钢。它的成分为  $S$  点成分，含碳量（碳的质量分数）为  $0.77\%$ 。在室温下的平衡组织是珠光体（ $P$ ）。图 1-7 所示为 T8 碳素工具钢完全退火典型组织的金相照片，由于 T8 钢的平均含碳量很接近共析成分，故组织  $100\%$  为片状珠光体。

<sup>①</sup> 范莹隆，刘良江．亚共析钢中先共析铁素体形态的研究 [J]．湘潭大学自然科学学报，1991（3）：86—93.