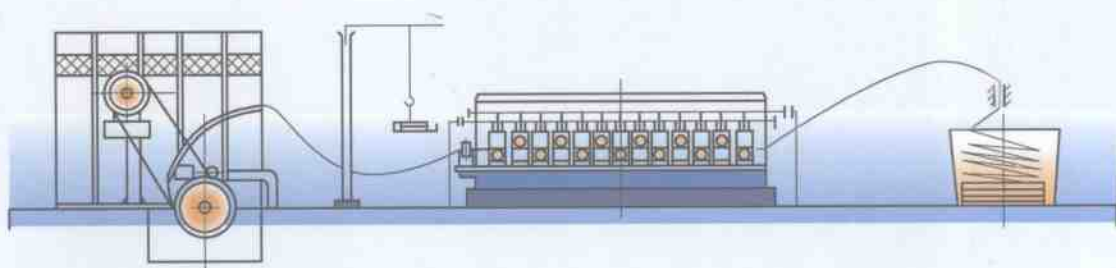


高等学校规划教材  
GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

# 有色金属及合金的 熔炼与铸锭

王文礼 王快社 等编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

高等学校规划教材

# 有色金属及合金的 熔炼与铸锭

王文礼 王快社 等编著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2009

## 内 容 简 介

本书主要介绍了有色金属及合金熔铸的理论基础和具体熔铸生产技术与设备等。全书共分两篇,上篇为有色金属及合金熔铸的基础知识,主要内容包括有色金属及合金材料的分类,熔铸的任务、要求及工艺规程,有色金属及合金熔炼与凝固基础,其中论述了金属熔炼特性,熔体净化技术和成分控制,凝固过程的动量、热量及质量传输,凝固过程组织的控制等;下篇为有色金属及合金熔铸技术与设备,主要介绍了一些常规或新开发的熔炼和铸造技术及设备,常见有色金属如铝、镁、铜及合金的熔铸工艺和特点等。

本书可作为金属材料工程、材料成形与控制工程专业本科生,材料加工专业研究生教材,也可供从事有色金属材料科研、生产的技术人员及管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

有色金属及合金的熔炼与铸锭/王文礼等编著. —北京:冶金工业出版社, 2009. 8

高等学校规划教材

ISBN 978-7-5024-4997-1

I. 有… II. 王… III. ①有色金属冶金—熔炼—高等学校—教材  
②有色金属冶金—铸锭—高等学校—教材 ③有色金属合金—熔炼—  
高等学校—教材 ④有色金属合金—铸锭—高等学校—教材 IV. TF80

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148492 号

出版人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 李 梅 美术编辑 李 新 版式设计 张 青

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4997-1

北京兴华印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2009 年 8 月第 1 版; 2009 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 16.75 印张; 446 千字; 255 页; 1-2000 册

39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

# 前 言

有色金属是国民经济发展的基础材料，航空、航天、汽车、机械制造、电力、通讯、建筑、家电等绝大部分行业都以有色金属材料为生产基础。随着现代化工、农业和科学技术发展的突飞猛进，有色金属在人类发展中的地位愈来愈重要。它不仅是世界上重要的战略物资，而且也是人类生活中不可缺少的生产资料和消费资料。中国在 21 世纪前 20 年，仍将处于工业化过程，而作为工业基础有色金属工业的发展对中国经济能否继续保持相对较高的增长率显得尤为重要，中国对有色金属的需求仍将保持稳定增长趋势。

有色金属及其合金主要是以铸锭冶金产品（包括管、棒、线、型材、板带材、箔材等）形式应用于实际生产生活的。这些产品的加工成材率和使用性能与铸锭质量密切相关，而铸锭质量又与熔炼工艺、熔体净化及铸锭生产工艺等密切相关。因此，本书除了系统地论述有色金属熔铸的基本知识、熔炼与凝固理论基础以及熔铸的成熟技术外，还介绍了作者课题组前期参与的国家“973”研究项目中关于铝、镁合金铸锭组织控制的科研成果。

全书分为两篇，上篇为有色金属及合金熔铸的基础知识，主要内容包括有色金属的分类，熔铸的任务、要求及工艺规程，有色金属及合金熔炼与凝固基础以及凝固过程组织的控制等；下篇为有色金属及合金熔铸技术和设备，主要介绍了一些常规或新开发的熔炼和铸造技术及设备，常见有色金属的熔铸工艺和特点等。本书是作者在历年使用的讲义基础上，综合近年的科研成果，国内一些企业的生产成就和新技术、新工艺、新设备，以及中外文资料等内容精心编著而成。为了适合教材使用，在各章都设有“本章要点”，对学习重点内容进行了提示，方便学生学习。

本书第 3、4、5 章由王庆娟编写，第 10、11 章由刘明华编写，其余章

节由王文礼编写。全书由王文礼统稿，由王快社负责审核。

本书的编写得到西安建筑科技大学冶金工程学院老师和同志们们的热情支持，李志坚、周俊松同学对书稿图表的收集和整理做了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢。同时对本书所引用的文献资料的作者致以诚挚的谢意。

鉴于有色金属合金品种繁多，其熔铸特性各不相同，影响熔铸工艺及质量因素较多，以及受作者水平所限，书中不妥之处，读者与同行如能不吝赐教，当不胜感激。

编著者

2009年5月于西安

# 目 录

## 上篇 有色金属及合金熔铸的基础知识

|                                 |           |
|---------------------------------|-----------|
| <b>1 有色金属及合金材料</b> .....        | <b>1</b>  |
| 1.1 概述 .....                    | 1         |
| 1.2 铝及铝合金 .....                 | 1         |
| 1.2.1 纯铝 .....                  | 1         |
| 1.2.2 铝合金 .....                 | 2         |
| 1.3 镁及镁合金 .....                 | 5         |
| 1.3.1 纯镁 .....                  | 6         |
| 1.3.2 镁合金 .....                 | 6         |
| 1.4 铜及铜合金 .....                 | 10        |
| 1.4.1 工业纯铜 .....                | 10        |
| 1.4.2 铜合金 .....                 | 10        |
| 1.5 钛及钛合金 .....                 | 13        |
| 1.5.1 工业纯钛 .....                | 13        |
| 1.5.2 钛合金 .....                 | 13        |
| <b>2 熔铸的基本任务、要求及工艺规程</b> .....  | <b>15</b> |
| 2.1 熔铸的基本任务 .....               | 15        |
| 2.2 熔铸的基本要求 .....               | 15        |
| 2.3 熔铸工艺规程制定 .....              | 17        |
| <b>3 有色金属及合金熔炼的基本原理</b> .....   | <b>22</b> |
| 3.1 金属熔炼过程的热量和物质交换 .....        | 22        |
| 3.1.1 金属熔炼过程中的传热 .....          | 22        |
| 3.1.2 金属熔炼过程中的传质 .....          | 24        |
| 3.2 金属的蒸发 .....                 | 25        |
| 3.3 金属的氧化及防护 .....              | 27        |
| 3.3.1 金属氧化的热力学条件 .....          | 27        |
| 3.3.2 金属氧化的动力学条件 .....          | 30        |
| 3.3.3 影响氧化过程的因素及降低氧化烧损的方法 ..... | 34        |
| 3.4 金属熔体的气体夹杂及控制 .....          | 36        |

|          |                           |           |
|----------|---------------------------|-----------|
| 3.4.1    | 气体在金属中存在的形式与种类 .....      | 36        |
| 3.4.2    | 气体的来源 .....               | 36        |
| 3.4.3    | 气体的溶解度及影响因素 .....         | 37        |
| 3.4.4    | 熔体的吸气过程 .....             | 40        |
| 3.4.5    | 气体从熔体中的析出 .....           | 41        |
| 3.5      | 杂质的吸收与积累 .....            | 43        |
| 3.5.1    | 杂质形成途径 .....              | 43        |
| 3.5.2    | 减少杂质污染金属的途径 .....         | 45        |
| <b>4</b> | <b>有色金属及合金熔体的净化 .....</b> | <b>46</b> |
| 4.1      | 熔体净化原理 .....              | 46        |
| 4.1.1    | 脱气原理 .....                | 46        |
| 4.1.2    | 除渣精炼原理 .....              | 47        |
| 4.2      | 铝及铝合金的熔体净化处理 .....        | 49        |
| 4.2.1    | 炉内处理 .....                | 50        |
| 4.2.2    | 炉外在线处理 .....              | 57        |
| 4.3      | 镁及镁合金的熔体净化 .....          | 64        |
| 4.3.1    | 熔体的特性 .....               | 64        |
| 4.3.2    | 除气处理 .....                | 68        |
| 4.3.3    | 除渣精炼 .....                | 69        |
| 4.4      | 铜及铜合金的熔体净化处理 .....        | 70        |
| 4.4.1    | 除气精炼 .....                | 70        |
| 4.4.2    | 氧化去除杂质元素 .....            | 72        |
| 4.4.3    | 脱氧 .....                  | 73        |
| 4.5      | 熔炼过程的熔体保护 .....           | 76        |
| 4.5.1    | 铝熔体的保护 .....              | 76        |
| 4.5.2    | 镁合金熔体的保护 .....            | 78        |
| 4.5.3    | 纯铜熔体的保护 .....             | 78        |
| <b>5</b> | <b>熔体成分控制 .....</b>       | <b>80</b> |
| 5.1      | 合金炉料的组成 .....             | 80        |
| 5.1.1    | 新金属 .....                 | 80        |
| 5.1.2    | 废料 .....                  | 82        |
| 5.1.3    | 中间合金 .....                | 82        |
| 5.1.4    | 金属添加剂和化工原料 .....          | 85        |
| 5.2      | 合金成分控制与配料计算 .....         | 85        |
| 5.2.1    | 炉料选择 .....                | 85        |
| 5.2.2    | 配料 .....                  | 86        |
| 5.2.3    | 配料计算 .....                | 87        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 5.2.4 成分调整 .....              | 89         |
| 5.3 熔体质量检验 .....              | 92         |
| 5.3.1 金属熔体中气体的检测方法 .....      | 92         |
| 5.3.2 熔体中非金属夹杂物的检测方法 .....    | 97         |
| <b>6 铸锭凝固过程的动量和热量传输 .....</b> | <b>99</b>  |
| 6.1 凝固过程的动量传输 .....           | 99         |
| 6.1.1 液体金属的对流 .....           | 99         |
| 6.1.2 枝晶间液体金属的流动 .....        | 100        |
| 6.1.3 对流对凝固过程的影响 .....        | 101        |
| 6.2 凝固过程的传热 .....             | 103        |
| 6.2.1 凝固传热的基本微分方程 .....       | 103        |
| 6.2.2 绝热模中铸锭的凝固 .....         | 104        |
| 6.2.3 水冷模中铸锭的凝固 .....         | 106        |
| 6.2.4 无水冷铁模中铸锭的凝固 .....       | 111        |
| 6.2.5 影响凝固传热的因素 .....         | 112        |
| 6.3 凝固区及凝固方式 .....            | 115        |
| 6.3.1 凝固区 .....               | 115        |
| 6.3.2 凝固方式 .....              | 116        |
| 6.3.3 影响凝固方式的因素 .....         | 118        |
| 6.3.4 凝固方式对铸锭质量的影响 .....      | 118        |
| 6.4 铸锭凝固过程的控制 .....           | 119        |
| 6.4.1 凝固方式的控制 .....           | 119        |
| 6.4.2 凝固的强制控制 .....           | 120        |
| <b>7 铸锭凝固过程的晶体形核和长大 .....</b> | <b>122</b> |
| 7.1 晶体形核 .....                | 122        |
| 7.2 形核控制 .....                | 124        |
| 7.2.1 促进形核 .....              | 125        |
| 7.2.2 抑制形核 .....              | 125        |
| 7.2.3 选择形核 .....              | 125        |
| 7.3 晶体长大 .....                | 125        |
| 7.3.1 连续生长机制 .....            | 126        |
| 7.3.2 台阶生长机制 .....            | 126        |
| <b>8 铸锭凝固过程的质量传输 .....</b>    | <b>129</b> |
| 8.1 凝固过程的溶质平衡 .....           | 129        |
| 8.2 传质过程的控制方程 .....           | 130        |
| 8.3 溶质再分配 .....               | 130        |



|       |                       |     |
|-------|-----------------------|-----|
| 8.3.1 | 平衡分配系数 .....          | 130 |
| 8.3.2 | 非平衡凝固的溶质再分配 .....     | 131 |
| 8.4   | 固-液界面前沿熔体过冷 .....     | 135 |
| 8.4.1 | 界面前沿熔体温度分布 .....      | 135 |
| 8.4.2 | 界面前沿熔体过冷的形成 .....     | 136 |
| 8.4.3 | 成分过冷对晶体生长的影响 .....    | 137 |
| 9     | 铸锭凝固组织控制 .....        | 142 |
| 9.1   | 铸锭凝固组织的形成 .....       | 142 |
| 9.1.1 | 铸锭的典型凝固组织与形成过程 .....  | 142 |
| 9.1.2 | 等轴晶的形核 .....          | 144 |
| 9.1.3 | 铸锭典型凝固组织形态的控制 .....   | 145 |
| 9.1.4 | 铸锭异常凝固组织 .....        | 145 |
| 9.2   | 等轴晶的晶粒细化 .....        | 147 |
| 9.2.1 | 添加晶粒细化剂法 .....        | 148 |
| 9.2.2 | 动力学细化法 .....          | 150 |
| 9.2.3 | 熔炼及浇注过程的温度控制 .....    | 150 |
| 9.3   | 凝固组织中的偏析及其控制 .....    | 151 |
| 9.3.1 | 枝晶凝固组织的微观偏析 .....     | 151 |
| 9.3.2 | 铸锭中的宏观偏析 .....        | 153 |
| 9.4   | 凝固收缩及凝固组织致密度的控制 ..... | 155 |
| 9.4.1 | 凝固收缩率 .....           | 155 |
| 9.4.2 | 缩松的形成与控制 .....        | 157 |
| 9.5   | 裂纹的形成与控制 .....        | 157 |
| 9.5.1 | 铸造应力的形成 .....         | 158 |
| 9.5.2 | 裂纹的形成机理及影响因素 .....    | 159 |
| 9.5.3 | 防止裂纹产生的方法 .....       | 162 |
| 9.6   | 气孔及非金属夹杂的形成与控制 .....  | 163 |
| 9.6.1 | 气体对铸锭质量的影响 .....      | 163 |
| 9.6.2 | 铸锭中的气孔 .....          | 163 |
| 9.6.3 | 铸锭中的非金属夹杂物 .....      | 166 |
| 9.6.4 | 气体与非金属夹杂的排除 .....     | 170 |

## 下篇 有色金属及合金的熔铸技术及设备

|        |                     |     |
|--------|---------------------|-----|
| 10     | 有色金属及合金的熔炼技术 .....  | 171 |
| 10.1   | 熔炼炉选用的基本要求和种类 ..... | 171 |
| 10.1.1 | 熔炼炉的基本要求 .....      | 171 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 10.1.2 熔炼炉的种类和应用 .....       | 171        |
| 10.2 坩埚炉和反射炉熔炼技术 .....       | 172        |
| 10.2.1 坩埚炉熔炼 .....           | 172        |
| 10.2.2 反射炉熔炼 .....           | 172        |
| 10.3 感应炉熔炼技术 .....           | 174        |
| 10.3.1 感应加热的原理 .....         | 174        |
| 10.3.2 感应炉的分类和特点 .....       | 174        |
| 10.3.3 无芯感应炉熔炼 .....         | 175        |
| 10.3.4 有芯感应炉熔炼 .....         | 177        |
| 10.4 真空熔炼 .....              | 179        |
| 10.4.1 真空熔炼的理论基础 .....       | 180        |
| 10.4.2 真空感应炉熔炼技术 .....       | 183        |
| 10.4.3 真空电弧炉熔炼技术 .....       | 184        |
| 10.5 快速熔炉熔炼技术 .....          | 185        |
| 10.5.1 竖炉熔炼技术 .....          | 185        |
| 10.5.2 喷射式熔炉熔炼技术 .....       | 185        |
| 10.6 电子束炉熔炼技术 .....          | 186        |
| 10.6.1 电子束炉工作原理 .....        | 187        |
| 10.6.2 电子束炉的炉体结构 .....       | 188        |
| 10.7 等离子炉熔炼技术 .....          | 189        |
| 10.7.1 基本原理 .....            | 189        |
| 10.7.2 炉型与炉体构造 .....         | 190        |
| 10.8 电渣炉熔炼技术 .....           | 191        |
| 10.8.1 电渣熔炼工作原理 .....        | 191        |
| 10.8.2 电渣炉的构造和技术性能 .....     | 192        |
| <b>11 有色金属及合金的铸造技术 .....</b> | <b>193</b> |
| 11.1 普通铸造技术 .....            | 193        |
| 11.1.1 水平模铸造 .....           | 193        |
| 11.1.2 立模铸造 .....            | 194        |
| 11.1.3 斜模铸造 .....            | 195        |
| 11.1.4 无流铸造 .....            | 195        |
| 11.1.5 真空吸铸技术 .....          | 196        |
| 11.2 立式半连续铸造技术 .....         | 197        |
| 11.2.1 立式半连续铸造的特点 .....      | 197        |
| 11.2.2 半连续铸造设备 .....         | 198        |
| 11.2.3 立式半连续铸造技术的发展 .....    | 203        |
| 11.3 连续铸轧技术 .....            | 209        |
| 11.3.1 连续铸轧机组的组成 .....       | 209        |

|        |                                |     |
|--------|--------------------------------|-----|
| 11.3.2 | 铸轧辊及工艺润滑 .....                 | 210 |
| 11.3.3 | 浇注系统和供料嘴 .....                 | 210 |
| 11.3.4 | 连续铸轧的优缺点 .....                 | 212 |
| 11.3.5 | 连续铸轧的技术发展 .....                | 212 |
| 11.4   | 连铸连轧技术 .....                   | 213 |
| 11.4.1 | Properzi 连铸连轧 .....            | 213 |
| 11.4.2 | SCR 技术 .....                   | 215 |
| 11.4.3 | Up-Casting 法 (上引法) 技术 .....    | 215 |
| 11.4.4 | Dip-Forming 法 (浸渍成形法) 技术 ..... | 215 |
| 11.4.5 | Contirod 技术 .....              | 216 |
| 11.5   | 水平连续铸造 .....                   | 216 |
| 11.5.1 | 工作原理 .....                     | 216 |
| 11.5.2 | 设备组成 .....                     | 217 |
| 11.6   | 其他铸造技术 .....                   | 220 |
| 11.6.1 | 悬浮铸造技术 .....                   | 220 |
| 11.6.2 | 喷射铸轧技术 .....                   | 221 |
| 11.6.3 | 挤压铸造技术 .....                   | 222 |
| 11.6.4 | VADER 法 .....                  | 223 |
| 11.6.5 | 内部凝固法 .....                    | 223 |
| 12     | 常见有色金属及合金的熔铸 .....             | 224 |
| 12.1   | 铝及铝合金的熔铸 .....                 | 224 |
| 12.1.1 | 铝及铝合金的熔炼特性 .....               | 224 |
| 12.1.2 | 典型铝合金的熔炼工艺 .....               | 225 |
| 12.1.3 | 铝及铝合金的铸锭生产 .....               | 226 |
| 12.2   | 镁及镁合金的熔铸 .....                 | 234 |
| 12.2.1 | 熔炼过程控制 .....                   | 234 |
| 12.2.2 | 熔炼设备 .....                     | 235 |
| 12.2.3 | 典型熔炼工艺 .....                   | 237 |
| 12.2.4 | 典型的铸造工艺 .....                  | 238 |
| 12.3   | 铜及铜合金的熔铸 .....                 | 244 |
| 12.3.1 | 铜及铜合金的熔铸特点 .....               | 244 |
| 12.3.2 | 铜及铜合金的熔炼生产 .....               | 245 |
| 12.3.3 | 铜及铜合金的铸锭生产 .....               | 250 |
|        | 参考文献 .....                     | 255 |

# 上 篇

## 有色金属及合金熔铸的基础知识

纯铝。

纯铝的牌号由  $1 \times \times \times$  表示，其中最后两位数字表示纯铝的纯度为  $99. \times \times \%$ ，如 1A97 表示铝含量为 99.97%。工业纯铝的牌号主要有 1070A(原 L1)、1060(原 L2)、1050(原 L3)、1035(原 L4)。高纯铝的牌号主要有 1A85(原 LG5)、1A90(LG2)、1A93(原 LG3)、1A97(原 LG4)、1A99(原 LG5)。

工业纯铝主要用来制作铝箔、电缆、日用器皿等。高纯铝及工业高纯铝主要用于科学研究，制作电容器、铝箔、包铝等。

## 1.2.2 铝合金

纯铝强度较低，使用受到一定的限制。在铝中适量加入合金元素，可以配制出各种成分的铝合金。铝合金经变形强化或热处理强化，可显著提高强度，可用来制造承受较大载荷的重要结构部件。

### 1.2.2.1 铝合金的分类

根据铝合金的成分及生产工艺特点，可将铝合金分为两类，即变形铝合金和铸造铝合金，如图 1-1 所示。

由图 1-1 可以看出，成分位于 B 点左侧的合金，加热时能形成单相固溶体，其塑性好，适于加工成形，故称为变形铝合金。成分位于 B 点右侧的合金，具有共晶组织，且共晶点温度低，这种组织塑性差，不适于塑性加工，但其流动性好，适合于铸造，故称为铸造铝合金。

变形铝合金又分为热处理不能强化和热处理可强化两类。成分在 D 点左侧的合金，温度变化时无溶解度变化，属于不能热处理强化的铝合金；而成分点在 B 和 D 之间的合金，由于溶解度随温度变化，可以用热处理来强化，称其为热处理强化铝合金。

### 1.2.2.2 变形铝合金

变形铝合金具有优良的塑性，可以在热态及冷态进行深加工变形。依据其热处理及性能特点，可分为不能热处理强化的防锈铝合金以及可以热处理强化的硬铝、超硬铝及锻造铝合金。各种变形铝合金的牌号、性能及用途见表 1-1。

以下将针对各种变形铝合金的牌号及主要性能作简单介绍。

(1) 防锈铝合金。防锈铝合金的代号为 LF，常用牌号有 LF2、LF5、LF12 等，主要为铝-锰系和铝-镁系合金。这类合金因时效强化效果不明显，属于不能用热处理强化的变形铝合金，合金主要通过冷加工塑性变形来提高强度和硬度。这类合金具有优良的抗蚀性，故称为防锈铝合金。合金还具有良好的塑性和焊接性能，适宜制作需要深冲、焊接以及一定腐蚀环境下服役的零部件。

(2) 硬铝合金。硬铝合金代号为 LY，是热处理强化铝合金。合金为铝-铜-镁系列合金，另外含有少量锰。合金中除固溶强化外，主要形成强化相  $\theta$  相 ( $\text{CuAl}_2$ ) 和 S 相 ( $\text{CuMgAl}_2$ )。合金经固溶处理后时效析出强化相，显著提高合金的强度和硬度。合金中镁含量低时，强化效果小；铜、镁含量高时，强化效果显著。由于该合金强度、硬度高，故称为硬铝，又称为杜拉铝。

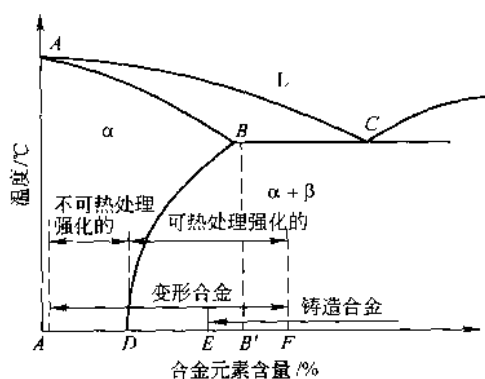


图 1-1 铝合金分类示意图

表 1-1 常用变形铝合金牌号、性能及用途

| 类别        | 牌号             | 化学成分(质量分数)/% |         |         |         |                                      | 热处理<br>状态    | 力学性能            |             |        | 用途                         |
|-----------|----------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------------------------|--------------|-----------------|-------------|--------|----------------------------|
|           |                | Cu           | Mg      | Mn      | Zn      | 其他                                   |              | $\sigma_b$ /MPa | $\delta$ /% | 硬度 HBS |                            |
| 防锈<br>铝合金 | 5A02<br>(LF2)  | 0.1          | 2.0~2.8 | 0.1~0.4 |         | Si 0.4<br>Fe 0.4                     | 退 火          | 190             | 23          | 45     | 焊接油箱、油<br>管及低压容器           |
|           | 5A05<br>(LF5)  | 0.1          | 4.8~5.5 | 0.3~0.6 |         | Si 0.5<br>Fe 0.6                     | 退 火          | 260             | 22          | 65     | 焊接油管铆钉<br>及中载零件            |
|           | 3A21<br>(LF21) | 0.2          | 0.5     | 1.0~1.6 |         | Si 0.6<br>Fe 0.7                     | 退 火          | 130             | 23          | 30     | 焊接油管铆钉<br>及轻载零件            |
| 硬铝<br>合金  | 2A01<br>(LY01) | 2.2~3.0      | 0.2~0.5 | 0.2     | 0.1     | Si 0.5<br>Fe 0.5<br>Ti 0.2           | 淬火 +<br>自然时效 | 300             | 24          | 70     | 中等强度、温<br>度低于 100℃ 的<br>铆钉 |
|           | 2A11<br>(LY11) | 3.8~4.8      | 0.4~0.8 | 0.4~0.8 | 0.3     | Si 0.7<br>Fe 0.7<br>Ni 0.1<br>Ti 0.2 | 淬火 +<br>自然时效 | 420             | 15          | 100    | 中等强度结<br>构件                |
|           | 2A12<br>(LY12) | 3.8~4.9      | 1.2~1.8 | 0.3~0.9 | 0.3     | Si 0.5<br>Fe 0.5<br>Ni 0.1<br>Ti 0.2 | 淬火 +<br>自然时效 | 500             | 10          | 131    | 高强度结构件<br>及 150℃ 下工作<br>零件 |
| 超硬<br>铝合金 | 7A04<br>(LC4)  | 1.4~2.0      | 1.8~2.8 | 0.2~0.6 | 5.0~7.0 | Si 0.5<br>Fe 0.5<br>Cr 0.2<br>Ti 0.1 | 淬火 +<br>人工时效 | 600             | 12          | 150    | 主要受力构<br>件, 如飞机起<br>落架     |
|           | 7A09<br>(LC9)  | 1.2~2.0      | 2.0~3.0 | 0.2     | 5.1~6.1 | Si 0.5<br>Fe 0.5<br>Cr 0.3<br>Ti 0.1 | 淬火 +<br>人工时效 | 570             | 11          | 150    | 主要受力构<br>件, 如飞机大梁          |
| 锻铝<br>合金  | 2A50<br>(LD5)  | 1.8~2.6      | 0.4~0.8 | 0.4~0.8 | 0.3     | Si 0.8<br>Fe 0.7<br>Ni 0.1<br>Ti 0.1 | 淬火 +<br>人工时效 | 420             | 13          | 105    | 形状复杂和<br>中等强度的锻<br>件及模锻件   |
|           | 2A70<br>(LD7)  | 1.9~2.5      | 1.4~1.8 | 0.2     | 0.3     | Si 0.3<br>Fe 1.5<br>Ni 1.2<br>Ti 0.1 | 淬火 +<br>人工时效 | 440             | 12          | 120    | 高温下工作<br>的复杂锻件及<br>结构件     |
|           | 2A14<br>(LD10) | 3.9~4.8      | 0.4~0.8 | 0.4~1.0 | 0.3     | Si 1.0<br>Fe 0.7<br>Ni 0.1<br>Ti 0.2 | 淬火 +<br>人工时效 | 490             | 12          | 135    | 承受重载荷<br>的锻件及模<br>锻件       |

硬铝合金常用牌号有 LY1、LY11、LY12 等。其中 LY1 含铜、镁量低, 强化效果小, 属于低合金硬铝, 硬铝合金强度低、塑性好, 常用作铆钉等。LY11 含铜、镁量适中, 强度较高, 塑性很好, 主要用于中等强度的结构部件, 如螺旋桨等。LY12 含铜、镁量较高, 属于高合金硬铝, 时效处理后强度高, 塑性低, 主要用作高强度结构部件, 如航空模锻件和重要的梁、轴等。硬铝合金耐蚀性差, 常在其表面复合一层纯铝, 称为包铝处理, 以此来提高耐蚀性能。硬

铝合金一般采用自然时效处理。

(3) 超硬铝合金。合金代号用 LC 表示, 属于铝-锌-镁-铜系列, 是在硬铝合金基础上添加锌元素而形成的合金。合金中的强化相除  $\theta$  相和 S 相外, 还能形成含锌的强化相, 如  $\eta$  相 ( $MgZn_2$ ) 和 T 相 ( $Al_2Mg_3Zn_3$ ) 等。由于其强度超过硬铝, 故称为超硬铝合金。超硬铝合金经固溶处理及人工时效后, 强度、硬度很高, 但耐蚀性能差, 故需包铝保护。由于超硬铝电位比铝低, 因此包铝材料采用电位更低的含锌 10% 的铝锌合金。

超硬铝合金主要牌号为 LC4, 它是综合性能优良、使用最广的一种超硬铝材料。主要用于受力大的重要结构部件, 如飞机大梁、起落架等。

(4) 锻造铝合金。锻造铝合金的代号为 LD, 属于铝-铜-镁-硅系列合金。由于合金中每种元素含量少, 因而合金热塑性好, 可用于加工形状复杂的锻件, 故称为锻造铝合金。合金中可能存在的强化相有  $Mg_2Si$ 、W 相 ( $Cu_4Mg_5Si_4Al$ )、 $\theta$  相 ( $CuAl_2$ ) 以及 S 相 ( $Al_2CuMg$ )。

锻造铝合金主要牌号为 LD5、LD7 和 LD10 等, 主要用于制作形状复杂、受力较大的锻件, 如航空发动机活塞、直升机桨叶等。

### 1.2.2.3 铸造铝合金

铸造铝合金代号为 ZL, 这类合金有较好的铸造性能和抗蚀性能, 但塑性差, 常用变质方法热处理提高性能。铸造铝合金为铝-硅系、铝-铜系、铝-镁系及铝-锌系合金。其牌号、成分、性能见表 1-2。

表 1-2 常用铸造铝合金的牌号、成分及性能

| 类别   | 牌号                    | 化学成分(质量分数)/% |           |             |           | 铸造方法            | 热处理状态                   | 力学性能            |             |            | 用途                     |
|------|-----------------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------|------------|------------------------|
|      |                       | Si           | Cu        | Mg          | Mn        |                 |                         | $\sigma_b$ /MPa | $\delta$ /% | 硬度 HBS     |                        |
| 铝硅合金 | ZAlSi7Mg<br>(ZL101)   | 6.5 ~ 7.5    |           | 0.25 ~ 0.45 |           | 金属型<br>砂型<br>变质 | 淬火 + 人工时效               | 185<br>225      | 4<br>1      | 50<br>70   | 形状复杂的零件                |
|      | ZAlSi2<br>(ZL102)     | 10 ~ 13      |           |             |           | 砂型<br>变质        | 退火                      | 135<br>145      | 4<br>3      | 50<br>50   | 形状复杂的铸件                |
|      | ZAlSi9Mg<br>(ZL104)   | 8.0 ~ 10.5   |           | 0.17 ~ 0.35 | 0.2 ~ 0.5 | 金属型             | 人工时效 + 淬火 + 人工时效        | 195<br>235      | 1.5<br>2    | 65<br>70   | 形状复杂、工作温度在 200°C 以下的零件 |
|      | ZAlSi5CuMg<br>(ZL105) | 4.5 ~ 5.5    | 1 ~ 1.5   | 0.4 ~ 0.6   |           | 金属型<br>金属型      | 淬火 + 不完全时效<br>淬火 + 稳定回火 | 235<br>175      | 0.5<br>1    | 70<br>65   |                        |
|      | ZAlSi7Cu4<br>(ZL107)  | 6.5 ~ 7.5    | 3.5 ~ 4.5 |             |           | 砂型<br>变质<br>金属型 | 淬火 + 人工时效               | 245<br>275      | 2<br>2.5    | 90<br>100  | 强度和硬度较高的零件             |
| 铝铜合金 | ZAlCu5Mn<br>(ZL201)   |              | 4.5 ~ 5.3 |             | 0.6 ~ 1.0 | 砂型<br>砂型        | 淬火 + 自然时效<br>淬火 + 不完全时效 | 295<br>335      | 8<br>4      | 70<br>90   | 工作温度为 175~300°C 的零件    |
|      | ZAlCu10<br>(ZL202)    |              | 9.0 ~ 11  |             |           | 砂型<br>金属型       | 淬火 + 人工时效<br>淬火 + 人工时效  | 163<br>163      |             | 100<br>100 | 高温下不受冲击的零件             |

续表 1-2

| 类别   | 牌号                    | 化学成分(质量分数)/% |    |               |              | 铸造方法      | 热处理状态        | 力学性能            |             |        | 用途               |
|------|-----------------------|--------------|----|---------------|--------------|-----------|--------------|-----------------|-------------|--------|------------------|
|      |                       | Si           | Cu | Mg            | Mn           |           |              | $\sigma_b$ /MPa | $\delta$ /% | 硬度 HBS |                  |
| 铝镁合金 | ZAlMg10<br>(ZL301)    |              |    | 9.5 ~<br>11.0 |              | 砂型        | 淬火 +<br>自然时效 | 280             | 10          | 60     | 承受冲击载荷,外形不太复杂的零件 |
|      | ZAlMg5Si<br>(ZL303)   | 0.8 ~<br>1.3 |    | 4.5 ~<br>5.5  | 0.1 ~<br>0.4 | 砂型<br>金属型 | 退火           | 145             | 1           | 55     |                  |
| 铝锌合金 | ZAlZn11Si7<br>(ZL401) | 6.0 ~<br>8.0 |    | 0.1 ~<br>0.3  |              | 金属型       | 人工时效         | 245             | 1.5         | 90     | 结构复杂的汽车、飞机、仪器零件  |
|      | ZAlZn6Mg<br>(ZL402)   |              |    | 0.5 ~<br>0.65 |              | 金属型       | 人工时效         | 235             | 4           | 70     |                  |

(1) 铝-硅系铸造铝合金。铝-硅系合金是工业上使用最广泛的铸造合金。该合金流动性好,热裂倾向小,补缩能力强。铝-硅系铸造铝合金又称硅铝明。仅由铝、硅两个组元构成的二元合金,称为简单硅铝明;含有铝、硅及其他多种合金元素的合金,称为特殊硅铝明。

简单硅铝明铸造后组织中含有粗大针状的初晶硅、共晶体 $\alpha$ 相与硅晶体,这种组织严重降低了合金的力学性能。生产上经常采用变质处理,即浇注前向液相中加入约2%的变质剂,经变质处理后组织明显细化,性能显著改善。常用来制造形状复杂但强度不高的铸件,如内燃机缸体、缸盖等。

简单硅铝明不能采用热处理强化,但加入Cu、Mg、Mn等元素后制成特殊硅铝明。此时组织中可能出现强化相 $\text{CuAl}_2$ 、 $\text{Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Al}_2\text{CuMg}$ 等,经变质和时效处理后强度能得到很大的提高,可用来制作汽缸体、风扇叶片等铸件。

(2) 铝-铜系铸造铝合金。这类合金中铜的质量分数约为4%~14%,具有较高强度和耐热性,但铸造性能、抗蚀性能差。当含铜量高时,耐热性明显降低。常用牌号如ZL201、ZL202等。其中ZL201为铝-铜-锰系合金,室温强度和塑性较高,适于作内燃机气缸盖、活塞等。ZL202的合金强度及塑性低,主要用作高温下不受冲击的部件。

(3) 铝-镁系铸造铝合金。铝镁系铸造合金密度小,耐蚀性好,强度高,抗冲击性能好,易切性能好,但铸造性能和耐热性较差。常用牌号有ZL301和ZL302等。该合金主要用于承受冲击、耐海水腐蚀的部件,如舰船配件等。

(4) 铝-锌系铸造铝合金。铝锌合金价格便宜,铸造性能优良,抗蚀性差,热裂倾向大。常用牌号有ZL401和ZL402等。常用于制造工作温度在200℃以下、形状复杂受力不大的部件,如汽车发动机零件。

### 1.3 镁及镁合金

镁(Mg)是地壳中分布最广的元素之一,约占地壳质量的2.77%,其探明储量仅次于金属铝和铁。镁的化学活性极强,在自然界中只能以化合物的形态存在。在已知的1500多种矿物中,含镁的矿物有200多种,主要为碳酸盐、硅酸盐、硫酸盐、氧化物。

镁除了具有密度小、质量轻的特点之外,另一个显著特性是比强度高,甚至可与合金结构钢媲美。但纯镁的塑性和力学性能较差,变形伸长率只能达到10%左右,因此不能单独作结构材料使用。工业应用的镁系材料多是以镁作为金属基体添加某些合金元素,如铝、锌、锰、锆等形成镁合金。在本章中,主要对纯镁的性能、镁合金的分类、性能及应用作一概要的



叙述。

### 1.3.1 纯镁

室温下纯镁的密度为  $1.738\text{g}/\text{cm}^3$ ，在接近熔点( $650^\circ\text{C}$ )时，固态镁的密度约为  $1.65\text{g}/\text{cm}^3$ ，液态镁的密度约为  $1.58\text{g}/\text{cm}^3$ 。凝固结晶时，纯镁体积收缩率为 4.2%。固态镁从  $650^\circ\text{C}$  降温至  $20^\circ\text{C}$  时体积收缩率为 5% 左右。镁在铸造和凝固冷却时收缩量大，导致铸件容易形成微孔，使铸件具有低韧性和高缺口敏感性。

#### 1.3.1.1 纯镁的力学性能

室温下纯镁的拉伸和压缩性能指标如表 1-3 所示。室温下纯镁的纯度为 99.98% 时，动态弹性模量为 44GPa，静态弹性模量为 40GPa；纯度为 99.8% 时，动态弹性模量为 45GPa，静态弹性模量为 43GPa。随着温度的增加，纯镁的弹性模量下降。

表 1-3 室温下纯镁的典型力学性能

| 试样规格 | $\sigma_b/\text{MPa}$ | $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$ | $\sigma_{0.2}(\text{压缩})/\text{MPa}$ | $\delta/\%$ | 硬度    |       |
|------|-----------------------|---------------------------|--------------------------------------|-------------|-------|-------|
|      |                       |                           |                                      |             | HRE   | HB    |
| 砂型铸件 | 90                    | 21                        | 21                                   | 2~6         | 16    | 30    |
| 挤压件  | 165~205               | 69~105                    | 34~55                                | 5~8         | 26    | 35    |
| 冷轧薄板 | 180~220               | 115~140                   | 105~115                              | 2~10        | 48~54 | 45~47 |
| 退火薄板 | 160~195               | 90~105                    | 69~83                                | 3~15        | 37~39 | 40~41 |

#### 1.3.1.2 纯镁的工艺性能

镁为密排六方晶格，室温变形时只有单一的滑移系  $\{0001\} \langle 1120 \rangle$ ，因此镁的塑性比铝要低，各向异性也比铝显著。随着温度的升高，镁的滑移系会增多，在  $225^\circ\text{C}$  以上发生 (1011) 面上  $[1120]$  方向滑移，从而塑性显著提高，因此镁合金可以在  $300 \sim 600^\circ\text{C}$  温度范围内通过挤压、轧制和锻造成形。此外，镁合金还可通过铸造成形，且镁合金的压铸工艺性能比大多数铝合金好。

镁容易被空气氧化生成热脆性较大的氧化膜，该氧化膜在焊接时极易形成夹杂，严重阻碍焊缝的成形，因此镁合金的焊接工艺比铝合金复杂。

### 1.3.2 镁合金

#### 1.3.2.1 镁合金的牌号

镁合金包括铸造镁合金和变形镁合金。铸造镁合金适合于铸造工艺，用于生产各种铸件，如砂型铸件、金属型铸件、蜡模铸件、压铸件等。变形镁合金适合于各种变形加工工艺，用于生产各种加工材，如板、棒、线、型、管等。由于镁合金类型及用途不同，其牌号也不同。

镁合金牌号的标示方法有多种，国际上目前尚没有统一的规定，但倾向于采用美国材料试验学会使用的系统，即美国 ASTM 标准。按 ASTM 标准的标记规则，镁合金名称由字母-数字-字母三部分组成，第一部分由两个代表主要合金元素的字母组成，字母的顺序按在实际合金中含量的多少排列，含量高的化学元素在前，如果两种元素的含量相同，则按英文字母的先后顺序排列。第二部分由代表两种主要合金元素在合金中含量的数字组成，表示该元素在合金中的名义成分，用质量分数表示，四舍五入到最接近的整数。第三部分由指定的字母如 A、B、C、D 等组成，表示合金发展的不同阶段，大多数情况下，该字母表征合金的纯度，区分具有相同