

# 镁合金生产技术与应用

Production Technologies and  
Applications of Magnesium Alloy

常毅传 李骏骋 谢伟滨 编著

Mg



冶金工业出版社  
[www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn)

# 镁合金生产技术与应用

常毅传 李骏骋 谢伟滨 编著



北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2018

## 内 容 提 要

本书共分 14 章, 内容包括镁工业的发展历史、镁合金材料的市场与需求, 镁合金在航空航天、交通、兵器、电子产品、冶金及电化学保护等领域的应用, 镁的基本特性与镁合金分类, 铸造镁合金的熔炼与铸造, 变形镁合金的熔炼与铸造, 镁合金的轧制、挤压、锻造、冲压成型技术, 镁合金的半固态加工技术, 镁合金材料的连接技术, 镁合金的表面处理技术, 镁合金材料的安全与防护措施, 镁合金材料的回收利用和生命周期。

本书旨在向我国镁工业战线广大工程技术人员、企业管理者和行业领导们提供一本便于携带并方便翻阅的镁及其合金的技术工具书, 同时可以作为设计研究单位以及大专院校相关专业师生的参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

镁合金生产技术与应用/常毅传, 李骏骋, 谢伟滨编著.  
—北京: 冶金工业出版社, 2018. 6  
ISBN 978-7-5024-7811-7

I. ①镁… II. ①常… ②李… ③谢… III. ①镁合金—  
生产工艺 IV. ①TG146. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 136262 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 [www.cnmp.com.cn](http://www.cnmp.com.cn) 电子信箱 [yjcb@cnmp.com.cn](mailto:yjcb@cnmp.com.cn)

责任编辑 张熙莹 王 双 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7811-7

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2018 年 6 月第 1 版, 2018 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 20.5 印张; 493 千字; 310 页

89.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 [tougao@cnmp.com.cn](mailto:tougao@cnmp.com.cn)

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 [yjgycbs.tmall.com](http://yjgycbs.tmall.com)

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

## 本书编委会

顾 问 左铁镛 何季麟 丁文江 潘复生

徐晋湘 吴秀铭 孟树昆

主 任 林如海

副 主 任 孙 前

编 委 邓绛峰 石 磊 白林旺 朱 军

任龙太 孙 杰 李振江 陈 滨

陈根永 赵向东 赵校军 姜永正

穆锦琿

主 编 常毅传

副 主 编 李骏骋 谢伟滨

参编人员 林如海 徐晋湘 孙 前 徐明洪

谢水生

# 前 言

---

作者参与编写的《简明镁合金材料手册》自 2016 年出版以来受到了我国镁工业战线广大工程技术人员、企业管理者和行业领导们的欢迎。但由于手册的内容丰富，体量较大，不方便携带，我们在参阅该手册的基础上，查阅、翻译、整理了大量国内外最新的技术文献资料、科研成果和专利等，精心编写了本书，为广大镁工业战线上的从业者，特别是生产一线的技术员、车间干部、班组长提供一本可以随身携带并方便翻阅的技术工具书，同时供广大镁材料领域的生产企业、设计研究单位以及大专院校的相关人员查阅和参考。

镁在地球上储量极为丰富，镁金属质量轻，密度小，纯镁密度仅  $1.74\text{g/cm}^3$ ，相同体积的镁金属质量仅为铝的  $2/3$ 、钛的  $2/5$ 、钢的  $1/4$ 。镁金属具有很高的比强度和比刚度，阻尼减振降噪能力强，导热导电性能好，电磁屏蔽性能优异，抗辐射，液态成型性能优越，切削加工和热成型性好，无毒，易回收再利用，与环境兼容性好。

镁于 1808 年被从实验室中制取，自 19 世纪后期工业化规模生产以来的 100 多年间，全球镁金属生产与应用主要集中于发达国家。我国自 1954 年发展镁工业以来，已有 60 多年的历史。但是前 40 年发展缓慢，自 20 世纪 90 年代中期，受改革开放政策鼓励和国际镁市场需求旺盛、价格上涨等因素影响，我国镁金属产业得以迅速发展。1999 年，中国镁金属产量达到 12.07 万吨，上升到世界第一位。此后中国镁金属产量持续增长，遥遥领先于发达国家。

我国是原镁生产大国，又是镁出口大国，但我国并不是镁及其合金加工技术的强国。近年来，我国众多科研院所与企业共同研发，在镁合金精深加工技术领域取得了长足的进步，但与世界先进水平还有着相当大的差距。

镁合金精深加工主要有铸造加工与变形加工两大类。镁合金铸件的应用是目前镁合金应用的主流，但增长乏力。变形加工件目前占镁合金应用总量的很少一部分，但由于其优越的性能指标，未来增长潜力巨大。

镁合金产品在汽车、火车、飞机等交通工具上的应用，能够在增加安全性舒适性的同时有效减轻质量、节省能源、减少污染。由于明显的性能优势，镁合金作为一种新型轻金属材料，越来越受到社会的重视。

汽车整体质量减重除了节能减排，还可以提高加速度与制动性能；底盘以上部分减重，可以降低汽车重心，降低离心力，增强稳定性；汽车前端减重，可以使汽车重心后移，改善操纵性能，缩短刹车距离。使用镁合金结构件，还可以减振降噪。

武器装备质量的轻量化提高了武器射程和精度等各项战斗性能，目前发达国家制造的直升机、歼击机、坦克、装甲车、军用吉普车、枪械武器等大量应用了镁合金结构件。

航空材料减重带来的经济效益和性能改善非常明显，商用飞机与汽车减轻相同质量，节省燃油费是汽车的数十倍，军用战斗机的效果更为显著。更重要的是减轻质量能改善战斗机的机动性能，极大地提高战斗力和生存力。为此，航空工业正在加大力度采取各种措施增加镁合金的应用。

目前，中国经济结束了较长时间的高速发展期，接下来可能进入长期的平稳发展阶段。对于镁行业来说，主要问题是低附加值的冶炼产能过剩严重，投资需求不足，结构调整缓慢，上下游产业缺乏衔接，高附加值的镁合金材料制备与精深加工产业生产成本低、规模应用少、发展滞后，结构性矛盾显著。因此大力发展镁合金材料制备与精深加工产业，是实现经济结构转型的必经之路。

此外，在资源日益匮乏的今天，全球各类金属矿产资源形势日趋紧张，与其他金属资源短缺相比，镁金属资源极其丰富，而且性能优异，是钢、铝等金属结构材料极佳的替代材料。大力发展镁合金材料与应用不仅能够实现先进制造业轻量化，推动全社会节能减排，而且还能为国家经济发展所需金属材料提供保障和支撑。

当前从镁及其合金研发与推广应用的速度来看，还是普遍低于人们的市场预期。对于这种情况，业界专家学者普遍认为有三大难题制约着镁产业的快速发展。一是镁合金的绝对强度偏低；二是镁合金塑性加工难度大，成本高；三是镁合金的耐腐蚀性能差。这些问题是阻碍镁合金发展的瓶颈，也是摆在广大镁合金战线科研工作者和一线技术工人面前的正在被逐步攻克的目标。相信在政府部门、生产企业、科研院所等各方面的共同努力下，我国的镁冶炼、镁合

金属材料制备与深加工成型技术正在快速发展，大规模开发应用镁合金的时机已经向我们走来。

本书由常毅传主持，常毅传、李骏骋与谢伟滨共同编写。其中：第1章和第3~9章由常毅传编写；第2章由常毅传与李骏骋编写；第10章由谢水生编写；第11、14章，由李骏骋编写；第12、13章，由谢伟滨编写；其他编写人员提供了许多编写意见和资料。最后，全书由常毅传定稿。

本书在编写与出版过程中，得到了中国有色金属工业协会镁业分会的高度重视和支持，并得到了国内外不少专家、学者、企业技术人员和工人师傅的指导、关心和帮助，在此表示衷心的感谢。

我们衷心希望本书能够为从事镁合金研究工作的学者和从事镁合金开发、应用研究的广大技术人员提供有用的信息和帮助，同时也能对正在学习相关专业的学生们提供参考。但由于镁合金材料正处在快速发展中，本书目前尚存一些局限性，真诚希望同行专家、读者给予批评指正，提出宝贵意见。

我们相信，只要坚持不懈地努力，在不久的将来，人们一定会攻克镁合金发展应用中的诸多技术难题，一个镁合金获得广泛应用的时代必将到来。

作者

2017年11月

# 目 录

|                                   |    |
|-----------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                        | 1  |
| 1.1 镁及镁工业的发展历史 .....              | 2  |
| 1.1.1 世界镁及镁工业的发展历史 .....          | 2  |
| 1.1.2 我国镁及镁工业的发展历史 .....          | 3  |
| 1.2 镁及镁合金材料的市场与需求 .....           | 4  |
| 1.2.1 世界镁及镁合金的生产量及消费量 .....       | 4  |
| 1.2.2 我国镁及镁合金的生产量及消费量 .....       | 6  |
| 2 镁及镁合金的应用 .....                  | 10 |
| 2.1 镁及镁合金在航空航天工业中的应用 .....        | 10 |
| 2.1.1 航空航天工业对材料性能的要求及镁合金的使用 ..... | 10 |
| 2.1.2 镁合金材料在航空航天工业中的应用实例 .....    | 12 |
| 2.2 镁合金材料在交通领域的应用 .....           | 20 |
| 2.2.1 镁合金在交通运输节能减排上的应用与开发 .....   | 20 |
| 2.2.2 镁合金材料在汽车上的应用与开发 .....       | 21 |
| 2.2.3 镁合金材料在摩托车上的应用与开发 .....      | 34 |
| 2.2.4 镁合金材料在自行车上的应用与开发 .....      | 37 |
| 2.3 镁合金在现代兵器工业中的应用 .....          | 40 |
| 2.3.1 镁合金材料在兵器工业中的应用发展 .....      | 40 |
| 2.3.2 镁合金材料在兵器工业的应用前景 .....       | 41 |
| 2.4 镁及镁合金材料在现代电子产品中的应用 .....      | 42 |
| 2.4.1 现代电子产品对材料的要求 .....          | 42 |
| 2.4.2 镁合金材料在电子工业中的应用与开发 .....     | 46 |
| 2.5 镁在冶金工业上的应用 .....              | 47 |
| 2.5.1 在铝合金中的应用 .....              | 47 |
| 2.5.2 在钢铁行业的主要应用 .....            | 49 |
| 2.5.3 在钛冶炼中的应用 .....              | 51 |
| 2.6 镁在电化学保护方面的应用 .....            | 52 |
| 2.6.1 金属的电化学特性 .....              | 52 |
| 2.6.2 阳极的种类与性能 .....              | 53 |
| 2.6.3 镁牺牲阳极的应用 .....              | 54 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 2.7 镁合金在其他领域的应用 .....          | 54  |
| 2.7.1 镁在照明器及烟火领域的应用 .....      | 54  |
| 2.7.2 在护理器械领域中的应用 .....        | 54  |
| 2.7.3 金属镁在核工业上的应用 .....        | 55  |
| 2.7.4 金属镁在化工工业上的应用 .....       | 56  |
| 2.7.5 在民用领域中的应用 .....          | 56  |
| 3 镁的基本特性及镁合金的分类 .....          | 60  |
| 3.1 金属镁的基本特性与用途 .....          | 60  |
| 3.1.1 镁的物理性质 .....             | 60  |
| 3.1.2 力学性能 .....               | 65  |
| 3.1.3 镁及镁合金的塑性变形特性 .....       | 67  |
| 3.1.4 镁的化学与腐蚀性能 .....          | 73  |
| 3.2 镁及镁合金分类及表示方法 .....         | 73  |
| 3.2.1 镁合金的分类 .....             | 73  |
| 3.2.2 镁合金的牌号和状态表示方法及化学成分 ..... | 76  |
| 4 铸造镁合金的熔炼与铸造 .....            | 84  |
| 4.1 镁合金铸造成型方法分类 .....          | 84  |
| 4.2 铸造镁合金的熔炼及净化技术 .....        | 84  |
| 4.2.1 铸造镁合金的熔炼工艺 .....         | 84  |
| 4.2.2 铸造镁合金的熔体净化与晶粒细化 .....    | 88  |
| 4.2.3 铸造镁合金的熔炼工艺操作 .....       | 91  |
| 4.3 重力和低压铸造技术 .....            | 93  |
| 4.3.1 镁合金的砂型铸造 .....           | 93  |
| 4.3.2 镁合金的金属型（永久型）铸造 .....     | 96  |
| 4.3.3 镁合金的低压铸造 .....           | 99  |
| 4.3.4 镁合金的熔模铸造 .....           | 100 |
| 4.4 镁合金的压力铸造技术 .....           | 105 |
| 4.4.1 镁合金的压铸特性及常用压铸镁合金 .....   | 105 |
| 4.4.2 镁合金压铸生产流程及主要工艺参数 .....   | 107 |
| 4.4.3 镁合金压铸的发展方向 .....         | 109 |
| 5 变形镁合金的熔炼与铸造 .....            | 111 |
| 5.1 变形镁合金的熔炼与净化技术 .....        | 111 |
| 5.1.1 变形镁合金的净化与变质处理 .....      | 111 |
| 5.1.2 变形镁合金的熔炼工艺 .....         | 113 |
| 5.2 变形镁合金的半连续铸造 .....          | 117 |
| 5.2.1 半连续铸造方法的主要特点 .....       | 117 |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 5.2.2 变形镁合金的半连续铸造工艺 .....       | 118 |
| 5.3 变形镁合金板坯的铸轧技术 .....          | 125 |
| 5.3.1 双辊铸轧法制备镁合金板坯的基本工艺流程 ..... | 125 |
| 5.3.2 双辊铸轧法制备的镁合金板坯的特性 .....    | 125 |
| 5.3.3 双辊铸轧镁合金板坯生产线 .....        | 127 |
| 5.3.4 镁合金铸轧板坯的热轧工艺参数 .....      | 127 |
| 6 镁合金轧制成型技术 .....               | 129 |
| 6.1 轧制的基本特点及板带材生产的主要工艺流程 .....  | 129 |
| 6.1.1 轧制的基本特点 .....             | 129 |
| 6.1.2 镁合金板带材生产主要工艺流程 .....      | 130 |
| 6.1.3 镁及镁合金板带材的分类 .....         | 131 |
| 6.2 镁及镁合金厚板生产技术 .....           | 132 |
| 6.2.1 铸锭(扁锭)准备 .....            | 132 |
| 6.2.2 镁及镁合金厚板的热轧工艺 .....        | 135 |
| 6.3 镁及镁合金薄板生产技术 .....           | 141 |
| 6.3.1 镁及镁合金薄板的主要生产方法 .....      | 141 |
| 6.3.2 板坯的加热 .....               | 142 |
| 6.3.3 粗轧 .....                  | 143 |
| 6.3.4 中轧和精轧 .....               | 144 |
| 6.3.5 叠轧 .....                  | 146 |
| 6.3.6 典型轧制工艺举例 .....            | 146 |
| 6.3.7 镁合金薄板常见的缺陷及消除方法 .....     | 146 |
| 6.4 轧辊的预热、冷却、润滑及辊型控制 .....      | 147 |
| 6.4.1 轧制前轧辊的预热 .....            | 147 |
| 6.4.2 镁合金轧制时的冷却与润滑 .....        | 148 |
| 6.4.3 轧制时的轧辊辊型控制 .....          | 149 |
| 6.5 镁合金板带材的热处理、精整、矫直与包装 .....   | 150 |
| 6.5.1 热处理 .....                 | 150 |
| 6.5.2 镁合金板材的剪切 .....            | 151 |
| 6.5.3 矫直 .....                  | 151 |
| 6.6 镁合金板材的力学性能 .....            | 152 |
| 7 镁合金的挤压成型技术 .....              | 159 |
| 7.1 挤压成型的特点及常用挤压镁合金 .....       | 159 |
| 7.1.1 挤压成型的特点 .....             | 159 |
| 7.1.2 常用挤压镁合金 .....             | 160 |
| 7.2 镁合金的挤压工艺 .....              | 161 |
| 7.2.1 镁合金挤压的工艺流程 .....          | 161 |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 7.2.2 挤压前的准备 .....         | 161        |
| 7.2.3 主要挤压工艺参数的选择 .....    | 164        |
| 7.2.4 挤压法制备镁合金板坯技术 .....   | 169        |
| 7.3 镁合金挤压材的热处理与精整矫直 .....  | 170        |
| 7.4 镁合金挤压制品的力学性能 .....     | 171        |
| <b>8 镁合金的锻造成型技术 .....</b>  | <b>175</b> |
| 8.1 镁合金锻造成型特点 .....        | 175        |
| 8.1.1 镁合金和铝合金锻造成型的差异 ..... | 175        |
| 8.1.2 镁合金的锻造特性 .....       | 175        |
| 8.1.3 锻造成型用镁合金 .....       | 176        |
| 8.2 镁合金锻造前的准备 .....        | 176        |
| 8.2.1 工模具准备 .....          | 176        |
| 8.2.2 坯料准备 .....           | 177        |
| 8.3 镁合金的锻造工艺 .....         | 178        |
| 8.3.1 锻压力的估算 .....         | 178        |
| 8.3.2 锻造温度、速度和变形程度 .....   | 179        |
| 8.3.3 锻造方案的制定 .....        | 180        |
| 8.3.4 模具与润滑 .....          | 181        |
| 8.3.5 典型镁合金锻件 .....        | 181        |
| 8.4 锻件的切边与精整 .....         | 182        |
| 8.5 锻件的热处理 .....           | 182        |
| 8.6 锻件的质量控制 .....          | 183        |
| 8.6.1 晶粒度控制 .....          | 183        |
| 8.6.2 力学性能 .....           | 183        |
| 8.6.3 镁及镁合金锻件主要缺陷分析 .....  | 185        |
| <b>9 镁合金的冲压成型技术 .....</b>  | <b>186</b> |
| 9.1 冷成型 .....              | 186        |
| 9.2 热成型 .....              | 187        |
| 9.2.1 镁合金板材的热成型性 .....     | 187        |
| 9.2.2 弯曲成型 .....           | 190        |
| 9.2.3 拉深成型 .....           | 193        |
| 9.2.4 拉深技术及装置 .....        | 197        |
| <b>10 镁合金半固态加工技术 .....</b> | <b>201</b> |
| 10.1 半固态加工的特点及分类 .....     | 201        |
| 10.1.1 半固态加工的主要优点 .....    | 201        |
| 10.1.2 半固态成型工艺的分类 .....    | 201        |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 10.1.3 半固态成型镁合金的力学性能 .....  | 202 |
| 10.2 几种典型的半固态浆料制备方法 .....   | 204 |
| 10.2.1 机械搅拌法 .....          | 204 |
| 10.2.2 剪切—冷却—轧制法 .....      | 205 |
| 10.2.3 双螺旋搅拌法 .....         | 205 |
| 10.2.4 电磁搅拌法 .....          | 206 |
| 10.2.5 冷却斜槽法 .....          | 207 |
| 10.2.6 流变铸造法 .....          | 207 |
| 10.2.7 NRC 工艺 .....         | 208 |
| 10.2.8 不同液体混合法制备半固态浆料 ..... | 209 |
| 10.2.9 浇铸温度控制法 .....        | 209 |
| 10.2.10 应力诱发熔体激活法 .....     | 209 |
| 10.3 半固态成型工艺及装备 .....       | 210 |
| 10.3.1 流变成型 .....           | 210 |
| 10.3.2 触变成型 .....           | 211 |
| 10.3.3 注射成型 .....           | 211 |
| 11 镁合金材料的连接 .....           | 213 |
| 11.1 镁及镁合金的焊接 .....         | 213 |
| 11.1.1 镁及镁合金的焊接特性 .....     | 213 |
| 11.1.2 焊接前的准备 .....         | 215 |
| 11.1.3 镁及镁合金的焊接工艺 .....     | 218 |
| 11.1.4 镁及镁合金材料的补焊 .....     | 230 |
| 11.1.5 镁合金焊后热处理 .....       | 233 |
| 11.1.6 镁合金焊接缺陷 .....        | 234 |
| 11.1.7 镁合金焊接安全技术 .....      | 235 |
| 11.2 粘接 .....               | 235 |
| 11.3 机械连接 .....             | 237 |
| 11.3.1 铆接 .....             | 237 |
| 11.3.2 螺纹连接 .....           | 239 |
| 12 镁合金的表面处理 .....           | 242 |
| 12.1 镁合金表面处理的意義及主要方法 .....  | 242 |
| 12.1.1 镁合金表面处理的意義 .....     | 242 |
| 12.1.2 镁合金材料表面强化的主要方法 ..... | 242 |
| 12.2 镁合金的表面清理和预处理 .....     | 244 |
| 12.2.1 机械清理 .....           | 245 |
| 12.2.2 化学清洗 .....           | 248 |
| 12.2.3 机械抛光 .....           | 250 |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 12.3 镁合金材料的表面强化改性处理 .....        | 252 |
| 12.3.1 镁合金材料的化学氧化处理 .....        | 252 |
| 12.3.2 镁合金材料的电化学处理技术 .....       | 257 |
| 12.3.3 镁合金材料的微弧氧化技术 .....        | 267 |
| 12.3.4 镁合金材料的电镀技术 .....          | 271 |
| 12.3.5 镁合金材料含氟协合涂层 .....         | 278 |
| 12.4 镁合金表面处理层性能检测方法 .....        | 280 |
| 12.4.1 外观检测 .....                | 281 |
| 12.4.2 表面层厚度测定方法 .....           | 281 |
| 12.4.3 膜层硬度的测量 .....             | 281 |
| 12.4.4 涂层结合力或结合强度测试法 .....       | 281 |
| 12.4.5 腐蚀试验方法 .....              | 282 |
| 13 镁及镁合金材料的安全与防护措施 .....         | 283 |
| 13.1 镁及镁合金发生燃烧的化学反应机理 .....      | 283 |
| 13.1.1 镁合金发生燃烧的化学反应形式 .....      | 283 |
| 13.1.2 不同形态的镁合金产生燃烧的特点 .....     | 283 |
| 13.2 镁及镁合金安全生产的条件与要求 .....       | 284 |
| 13.2.1 对管理工作的要求 .....            | 284 |
| 13.2.2 镁合金安全生产对场地的要求 .....       | 284 |
| 13.2.3 对操作人员的要求 .....            | 284 |
| 13.2.4 对熔炼设备安全操作的要求 .....        | 285 |
| 13.2.5 镁合金压铸生产现场的要求 .....        | 285 |
| 13.2.6 镁合金压铸对设备的要求 .....         | 286 |
| 13.3 镁及镁合金生产的安全与防护措施 .....       | 287 |
| 13.3.1 镁及镁合金熔炼工序的安全与防护措施 .....   | 287 |
| 13.3.2 镁及镁合金压铸工序的安全与防护措施 .....   | 288 |
| 13.3.3 镁及镁合金热处理的安全与防护措施 .....    | 290 |
| 13.3.4 镁及镁合金机械加工的安全与防护措施 .....   | 291 |
| 13.3.5 镁及镁合金的存储管理安全与防护措施 .....   | 293 |
| 13.3.6 熔渣(淤渣、浮渣)管理的安全与防护措施 ..... | 294 |
| 13.4 消防安全防范管理措施 .....            | 294 |
| 13.4.1 镁合金安全生产的中心任务 .....        | 294 |
| 13.4.2 消防安全管理的主要内容 .....         | 295 |
| 13.4.3 安全管理的相关内容 .....           | 295 |
| 14 镁材与环境 .....                   | 296 |
| 14.1 镁的回收 .....                  | 296 |
| 14.1.1 镁压铸厂的废料回收历史 .....         | 296 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 14.1.2 废料源 .....                       | 296 |
| 14.1.3 再生法 .....                       | 296 |
| 14.1.4 夹杂物和品质评价 .....                  | 300 |
| 14.2 镁的生命周期评估 .....                    | 300 |
| 14.2.1 生命周期评估概论 .....                  | 300 |
| 14.2.2 不同制备方法镁材的生命周期评估 .....           | 301 |
| 14.2.3 回收镁的生命周期评估 .....                | 303 |
| 14.2.4 产品的成型加工工序的生命周期评估 .....          | 304 |
| 14.2.5 使用镁产品的生命周期评估 .....              | 305 |
| 14.3 镁产业的环境措施 .....                    | 305 |
| 14.3.1 SF <sub>6</sub> 覆盖气体的替代措施 ..... | 305 |
| 14.3.2 镁金属冶炼与环境 .....                  | 306 |
| 14.3.3 镁产业的前景 .....                    | 307 |
| 参考文献 .....                             | 308 |

# 1 绪 论

镁于1774年首次被人们发现，并以希腊古城 Magnesia 命名，元素符号为 Mg，属周期表中ⅡA族碱土金属元素，相对原子质量为 24.305。纯镁的密度为  $1.738\text{g/cm}^3$ ，是轻金属的一种。

镁是具有银白色金属光泽的金属，化学性活泼，在空气中由于氧化而迅速变暗。镁与铍、钛一样，呈密排六方晶体结构，晶格常数为  $a=0.3202\text{nm}$ ， $c=0.5199\text{nm}$ 。在室温下滑移系少，故加工性能比面心立方晶格的铝和体心立方晶格的铁要差得多。

镁的资源十分丰富，是自然界中分布最广的元素之一。在地壳中的含量高达 2.77%，仅次于 O、Si、Al、Fe、Ca，居第六位。在工业金属中仅次于 Al 和 Fe 而居第三位。同时，占地球表面积 70% 的海洋也是一个天然的镁资源宝库。据估算，每立方米海水中约含有 1.3kg 镁，而死海处每立方米海水的镁含量高达 4kg，仅此一处若能得到充分开发，就可供人类使用上万年，可以说海水是镁金属取之不尽的源泉。由于镁的化学活性很高，在自然界中只能以化合物形式存在，主要存在于白云石、菱镁矿、光卤石矿、橄榄石矿、蛇纹石、盐矿、地下卤水以及盐湖和海水中。我国是世界上镁矿资源最富有的国家之一。目前主要用电解法和热还原法来生产金属镁。

镁合金是目前世界上最轻的可用金属工程结构材料，各种镁合金在不同应用领域中的减重和性能改善中起到的重要作用正在受到人们越来越多的重视。

镁及镁合金既可以用铸造成型的方式制备出各种铸件或压铸件；也可通过各种塑性加工和热处理方式加工出不同品种、规格、性能和用途的管、棒、型、线材、板、带、条、锻件和模锻件等半成品，然后进行切削加工、冷冲成型和表面处理等深加工，制成各种零件或结构部件。与其他结构材料相比，镁及其合金具有一系列的优点，如密度低、比强度和比刚度高、阻尼减振降噪能力强、电磁屏蔽性能优异、抗辐射、摩擦时不起火花、热中子俘获截面小、液态成型性能优越、切削加工和热成型性好、可焊接和胶接、对碱、煤油、汽油和矿物油具有化学稳定性、易于回收利用等，符合“21 世纪绿色结构材料”的特征，越来越受到人们的青睐。近年来，镁材在汽车、摩托车等交通工具、计算机、通信、仪器仪表、家电等电子电器工业、轻工、化工、冶金、航空航天、国防军工等部门获得了广泛的应用。随着镁冶炼及加工技术的发展和成本的下降，镁材已成为钢铁和铝之后的第三类金属材料，在全球范围内将得到快速发展，将为国防军工的现代化、国民经济的高速持续发展、人民生活水平的提高以及人类社会的进步作出贡献。特别是在轻量化方面，将为现代化、高速化的交通运输工具、绿色建筑工程及其他零部件的应用提供节能、减排、安全、舒适的绿色轻金属材料，以促进人类与自然的和谐发展。

但是，由于镁元素具有某些特殊性能，以及基础研究和应用开发工作的滞后，镁及镁合金材料的应用潜力仍然没有得到充分发挥。加大力度、加快速度对镁及镁合金材料的研究开发，并努力拓展其应用领域是我国乃至全球主要工艺先进国家的重要任务之一。

## 1.1 镁及镁工业的发展历史

### 1.1.1 世界镁及镁工业的发展历史

自 1808 年英国化学家汉弗莱·戴维 (Humphry Davy) 确认氧化镁是一种新金属元素的氧化物,到现在经历了 210 年的历史 (即 1808~2018 年)。其中,值得关注的是:1852 年德国人罗伯特·威廉·本生 (Robert Wilhelm Bunsen) 建造了一个小型的实验室用电解槽,来电解熔融状态的氯化镁。1886 年德国格里诗姆·伊利可创公司 (Griesheim Elektron) 使用经过改进的本生电解槽建起了世界第一家商业化镁厂,开创了镁金属产业化的先河,至今已有 132 年的历史 (从 1886~2018 年)。直到 1916 年,美国陶氏 (DOW) 化学公司建立了自己的第一家电解氯化镁法生产镁的工厂。从此,镁工业走上了快速发展的道路。1910 年全球产镁量约 10t/a,1930 年才增长到 1200t/a。

在第二次世界大战的刺激下,镁工业获得了飞速发展。从 1935 年开始,德国、法国、奥地利、意大利、日本、苏联等国分别新建了镁厂。其中日本人于二战期间在我国辽宁营口建立了我国境内第一个镁冶炼厂。二战期间,美国的镁产能扩大了 10 倍。1939 年世界镁产量上升到 32000t/a,1943 年世界镁年产量达 23.5 万吨。在此期间,镁制品主要用来制造燃烧弹、照明弹、曳光弹以及陆用军车和飞机等军用装备的零部件。

二战结束后,世界镁年产量又大幅回落,1946 年世界镁年产量下降到 2.5 万吨,美国原镁产量降低到 4834t/a。为促进镁工业的发展,各国开始考虑镁在民用工业上的开发与应用。在此之后的 20 年中,美国陶氏化学公司在开发镁合金及其生产技术方面取得了突破性的进展,为镁及其合金在冶金、电子、航空航天、电器、轻工、汽车、交通运输、化学化工、印刷、文体等领域的应用开辟了有利的道路,使镁工业发展出现很好的势头。二战以后,世界镁产量年均增长率一直保持在 7% 左右,1998 年平均产销量达 36 万吨,此后以每年 9% 左右的速度递增。2000 年世界原镁产能已超过 64 万吨,实际产量已达 48.8 万吨以上。自 2007 年开始,世界受到金融危机和严重经济衰退的影响 (除中国以外),世界镁工业也处于衰退之中。

从镁及镁工业的生产方法与技术进步来看,镁工业化生产的 130 多年中,其发展历史可以分为三个阶段:

(1) 化学法制备阶段。1808 年英国科学家汉弗莱·戴维从氯化镁中分离出了镁。1829 年法国科学家布西用钾和钠的蒸气还原熔融的氯化镁。到了 19 世纪 60 年代,英国和美国才开始用化学法得到了多一点的金属镁。此阶段没有形成工业规模。

(2) 熔盐电解法制备阶段。1830 年英国科学家法拉第首先用电解熔融氯化镁方法制得了纯镁。1852 年本生在实验室范围内对此法进行了较详细的研究,直到 1886 年在德国开始镁的工业生产。1886 年以后,镁的需求量增加。20 世纪 70 年代以来,含水氯化镁在 HCl 气体中脱水—电解法成为当时具有先进水平的工艺方法。

(3) 热还原法制备阶段。由于镁的需求量越来越大,光靠电解法生产镁已经不能满足镁的需求,因此许多科学家在化学法的基础上,研究了热还原法炼镁。氯化镁真空热还原法炼镁是 1913 年开始的。第一次用硅作还原剂还原氯化镁是 1924 年由安吉平和阿拉贝舍夫实现的。1932 年安吉平、阿拉贝舍夫用铝硅合金作还原剂还原氯化镁。1941 年加拿大

Toronto 大学教授皮江在渥太华建立了一个以硅铁还原煅烧白云石炼镁的试验工厂,并获得成功。1942 年加拿大政府在哈雷白云石矿建立了一个年产 5000t 金属镁的硅热法炼镁厂。皮江法炼镁成为工业炼镁的第二大方法。

1947 年法国着手研究了半连续生产的硅热法炼镁工艺流程,1950 年建立了扩大试验炉,1959 年建成了第一家日产 2t 镁的半连续热硅法镁厂,1971 年扩产为年产镁 9600t。半连续炼镁(即熔渣导电半连续还原炉)成为当今镁工业生产中具有先进水平的工艺方法之一。

### 1.1.2 我国镁及镁工业的发展历史

#### 1.1.2.1 金属镁制备的发展历史

1949 年前,我国虽然有丰富的炼镁资源,但是在漫长的岁月里,我国的金属镁生产几乎是处于空白状态。1938 年 7 月日本在东北成立满洲镁工业株式会社,1943 年 10 月在营口建成采用电解法生产金属镁的镁工厂,设计能力为 800t/a,到 1945 年 8 月,仅生产出 691t 镁。由于一些生产技术问题没能得到很好的解决,一直没有达到生产能力。1943 年还采用碳化钙还原氧化镁的热还原法,在抚顺铝厂建成年产 300t 的试验厂,试产出少量镁。这些工厂在 1949 年之前都受到严重损坏,设备技术资料散失。

1954 年,国家批准引进苏联菱镁矿氯化电解法炼镁技术,在抚顺铝厂建设年产 3000t 电解镁项目,被列入国家“一五”期间 156 项工程之一。抚顺铝厂的镁生产工艺是以菱镁矿氯化制取无水氯化镁,经电解生产金属镁。1957 年底电解镁项目投产,炼出了中华人民共和国成立后第一块金属镁锭。抚顺铝厂成为中国第一家电解法镁生产厂。

20 世纪 60 年代,我国在镁工业发展方面做了大量工作,曾筹建了多个镁厂,但是,由于种种原因都停产了。直到 1966 年初,在兰州 205 厂建设 650t/a 的皮江法镁车间,这是我国第一个采用硅热法生产金属镁的车间,用内径 1.8m 的竖式炉煅烧白云石,有一台由 40 个还原罐组成的横罐式还原炉。还原、精炼均以煤气为燃料。

20 世纪 60 年代末到 70 年代末,我国曾在抚顺、郑州、兰州、民和等厂家进行过内热硅热法卧式还原炉的炼镁试验和生产工作,取得了一定的进展。

1970 年开始,遍布沿海十个省市迅速发展了 17 个以海水、卤水、白云石为原料的地方小镁厂(车间),其中采用电解法的有 12 家。这些小镁厂从小到大,从土到洋,边试验、边生产、边建设,逐渐配套完善。到 1976 年共生产出 1242t 金属镁,缓解了国内对镁的急需。当时,买不到进口镁,从 1975 年到 1978 年的 4 年间只进口了 662t 镁,这仅是 1974 年进口镁量的 15.5%,是 1973 年的 9.9%。后来,这些小镁厂因工艺方法没有过关,生产规模小,特别是吨镁电解电耗达到  $5.5 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ,生产处于多产多亏的局面,加之地方电力紧张,不能保证正常生产,相继停产。

进入 20 世纪 90 年代以来,随着改革开放深入发展和市场经济的不断深化,镁工业和其他各行各业一样,也有了突飞猛进的发展。1995~1996 年共建有 400 多家皮江法镁厂,几乎遍布全国各省市。到 2000 年底,据统计 120 多家生产企业生产能力超过 30 万吨,产量近 20 万吨,出口量 16.5 万吨,产量占世界总产量的 1/3 以上,出口量占世界消费量 1/3 以上,已成为世界最大的原镁生产国和最大的镁产品出口国,表 1-1 列出我国从 1995 年到 2000 年的镁产量。