

中国镁工业进展

ZHONGGUO MEIGONGYE JINZHAN

■ 孟树昆 主编



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

中国镁工业进展

孟树昆 主编

北 京

冶金工业出版社

2012

内 容 提 要

本书由中国有色金属工业协会镁业分会组织编写。全书共十五章,以镁的新技术、新装备、新成果和新应用的发展为主线,详细介绍了镁的资源、冶炼、加工、装备、连接(焊接)、表面处理、回收、安全与防护、标准、专利等有关技术及应用的最新进展。重点介绍了高品质镁合金(包括:高强、高韧、耐热、耐蚀稀土镁合金)的研发与应用,以及“十五”、“十一五”、“863”计划、“973”计划项目应用成果和一些新的镁合金功能材料最新制备及加工新技术、新应用的最新进展等。同时介绍了相关产业政策、经济运行、产学研用联盟等概况。

本书可供从事镁合金生产、研究、开发和应用的工程技术人员、科研人员、管理人员及相关从业人员阅读,也可供大专院校有关专业本科生、研究生及教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国镁工业进展/孟树昆主编. —北京:冶金工业出版社,
2012.9

ISBN 978-7-5024-6017-4

I. ①中… II. ①孟… III. ①镁—冶金工业—工业发展—
研究—中国 IV. ①F426.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第188415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 yjcbs@cnmip.com.cn

责任编辑 张登科 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-6017-4

三河市双峰印刷装订有限公司印刷;冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销
2012年9月第1版,2012年9月第1次印刷

169mm×239mm;28印张;2彩页;544千字;425页

80.00元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿信箱:tougao@cnmip.com.cn

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(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

祝賀中國有色金屬協會

鎂業分會成立

鎂是包括海洋在內地球表層最
為豐富的金屬元素，在諸多金
屬趨於枯竭的今天，大力開發
金屬鎂材料是實現可持續
發展的重要保證。

師昌緒
二〇〇二年
七月

師昌緒先生：中國科學院、中國工程院院士，現任國家自然科學基金委員會特邀顧問，中國有色金屬工業協會鎂業分會特邀高級顧問，國家科技圖書文獻中心理事會理事長，《自然科學進展》、《材料導報》等雜誌主編。

紀念建國六十周年

建國六十年來，我國各行各業都在突飛猛進，我國鎂產業從無到有，而今中國鎂業在世界上已成為最有競爭力的領域之一。祝愿再接再勵，使我國材料領域步入強國之林做出更大贡献！

九老人 師昌緒 二〇〇九年八月

加快產業結構調整
走新型鎂工業道路

祝賀鎂業分會成立十周年
陳全訓

陳全訓：國務院參事

中國有色金屬工業協會會長

编委会

顾问 师昌绪 左铁镛 陈全训 文献军

主任 徐晋湘

副主任 吴秀铭 韩 薇 孙 前

主审 徐晋湘 吴秀铭

编委 (按姓氏笔画排序)

丁文江 王 伴 孔海群 任龙太 朱 军

朱建华 孙 前 刘雪生 李振江 吴秀铭

杨留保 孟树昆 姜永正 赵建平 徐晋湘

韩 薇 雷金狮 潘复生

主 编 孟树昆

参编人员 (按姓氏笔画排序)

丁卫南 卫中领 马存真 王洪福 王守泰

龙思远 史晓梅 刘 正 刘黎明 刘 庆

刘冬博 关绍康 朱世杰 许月旺 陈荣石

李华伦 李子健 李远发 李迎春 张洪国

张治民 孟 健 单大勇 单巍巍 韩恩厚

姜永正 席 欢 唐定镶 徐年生 高 峰

聂祚仁 曹建勇 崔建忠 黄元伟 曾小勤

鲁化一 彭立明 潘复生

分会参编人员 韩 薇 吴秀铭 徐晋湘 孙 前 章红宇

范玉仙 王华丽 曹佳音 李 煜 弓维英

责任编辑 张登科

序

孟树昆教授主编了《中国镁工业进展》一书，他把全书初稿交给了我，要我写个序。我翻阅了一遍，感到内容新颖、丰富、全面。特别对镁的资源情况、生产工艺和镁的应用，直到废料的回收，结合中国的具体情况，都做了详细的描述和分析。最后还将专利、标准、产业政策及相关法规都收集在一起，尤其是对相关单位承担的国家“863”计划、“973”计划项目、“高性能镁合金加工与制备中的关键基础理论问题”作了介绍。这些都是从事镁的研发和兴办企业必须要了解的内容。该书力求理论与实际紧密结合，具有知识性和实用性。因此，本书的出版，必将对我国镁工业的发展起到推动作用。

本书也涉及我国镁工业的发展历程，谈到中国镁工业发展经历了54个年头，前30年（1957~1987年）为缓慢期，后24年（1988~2011年），特别是近10多年是中国镁工业发展最快的阶段，从无到有，从进口转入大量出口。在此，我不得不插入15年前的一段历史，因为这是我亲身经历过的一段历史。20世纪90年代中，在兰州召开了一次中日“环境材料论坛”，并邀请我作一报告，我根据已有资料进行了分析，结果发现：全球地表金属资源在不太长的时间内都将会枯竭，如铜、铅、锌只有几十年，铁的资源最多也只有几百年；只有镁取之不尽、用之不竭，因为除了含镁矿物和盐湖以外，还有海洋中的镁，其含量高达 10^{14} 吨量级，且可经济开采（每立方米中镁的含量为1.5kg）。在此思想指导下，2000年有色金属工业协会技术交流中心史文芳主任拟了一封信，由李依依、王淀佐、左铁镛、李恒德和我5个人上书科技部，将镁的开发列入了国家“重大科技攻关”项目，有了国家的导向和支持，我国镁工业发展迅猛。1997年成立了全国镁业联合体，2002年改为中国有色金属工业协会

镁业分会，从此我国镁的产业进入了高速发展阶段。

此后，在镁合金的研究方面，国家也加大了支持力度，如国家“973”计划和“863”计划都有关于镁合金研究的重点课题。并且在政府各部委的支持下，成立了有关镁合金的国家工程中心和国家重点实验室，使我国镁合金的研究、开发与应用走在国际前列，如镁合金已用于航天，正在开发试用于医用材料，因为镁合金在人体内可以降解。

除了我国镁的产量遥遥领先于世界以外，镁的研发也对世界产生了影响，我们多次组织召开镁合金国际会议和国际合作，如2004年我国首次召开了“世界镁合金大会”，我担任大会主席并作了主旨报告，会议期间，还展示了国内生产的镁合金产品，令世人感叹，中国人在镁的应用方面取得了重大进展！

我国镁产业尽管得到很快发展，从进口到出口，再到目前中国镁产量占世界80%以上。但是近年来中国镁产量进入了徘徊阶段，原因之一是镁的用途没有被充分开发，因此，要想镁产业得到大发展，必须高度重视镁应用领域的快速开发，利用镁的密度小，可以代替目前广泛流行的铝和塑料，用于建筑、交通、运输和新能源的开发等。但是镁有几个致命的弱点必须得到重视：一是易燃；二是不耐氧化和腐蚀；三是强度低。这些要通过基础研究或应用基础研究及新技术开发来解决。此外，镁的突出特点，如屏蔽效应和消振能力等也要得到充分利用。

总之，镁是有待开发的一种金属，政府部门和科学技术人员都要予以更多的关注，使正在兴起的镁产业更加兴旺发达！

中国科学院院士、中国工程院院士
中国有色金属工业协会镁业分会特邀高级顾问

师昌绪

2012年1月12日

前 言

1808 年，英国化学家戴维从氧化镁中分离出镁，1825 年，戴维又制得了铝。虽然镁和铝是同时代被发现的，但近 200 年后，铝的发展突飞猛进，2011 年中国铝产量为 1806 万吨，铝材为 2346 万吨，其应用已深入到人们生活的各个领域；而 2011 年中国镁产量为 66 万吨，消费量为 27.68 万吨，与铝相差甚远。镁与铝相比，镁的资源取之不尽、用之不竭，而铝的资源却是有限的。镁合金作为结构材料，不仅比铝轻 $1/3$ ，还具有高比强、高比模、高阻尼、减振性好、电磁屏蔽好以及优异的铸造、切削加工性能和易于回收等优点，在汽车、电子、航空航天、国防军工等领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景，被誉为“21 世纪绿色工程材料”。

20 世纪 80 年代以来，工业发达国家出于对环境和能源问题的考虑，相继制订了各自的镁研发计划，并投入了巨额资金用于镁的研究与开发。

1949 年新中国成立后，我国金属镁从无到有，从进口到出口，特别是改革开放以来，依靠科技进步，我国镁工业取得了举世瞩目的成就，镁的资源、产量、出口量、国内消费量均居世界首位。2000 年 7 月 6 日，师昌绪、李依依、王淀佐、左铁镛、李恒德五位院士站在国家战略的高度，向科技部提出了“关于加速发展我国金属镁工业的战略意义和建议”，之后科技部自 2001 年开始制订了“‘十五’镁合金开发应用及产业化”重大项目，2006 年制订了“‘十一五’镁及镁合金关键技术开发与应用”科技支撑计划项目；国家自然科学基金委“973”计划、“863”计划也都有关于镁的研

发项目。

近十多年来，中国镁工业步入快速发展阶段，这些与师昌绪院士等老一辈科学家大力倡导、政府部门重视和从业人员的共同努力分不开。十多年来，经过广大科技工作者和镁冶炼加工企业的共同努力，镁合金开发应用已取得丰硕成果，相关的电子信息、装备制造也表现出应用镁合金的积极性。正是由于五位院士的建议，适时地点燃了中国镁工业科技进步的引擎，为科技工作者指引了方向，为未来中国镁工业科技发展跻身世界前列奠定了基础。

中国有色金属工业协会镁业分会成立至今，10多年间，一直坚持做好“三个服务”，发挥协会的引导与协调作用；以推动镁工业技术进步，推广镁的应用，促进中国镁业的可持续发展为己任，维护中国镁业合法权益，推动中国镁业国际化。

目前，镁合金的应用潜力尚未充分挖掘出来，开发利用的程度远远不如钢铁、铜和铝等，这给镁业的科技工作者提出了艰巨的任务，同时也为他们施展才华提供了广阔空间和机遇。为了使广大镁及镁合金冶炼、加工、应用企业的相关从业人员，以及包括研究院所、大专院校、检测部门、咨询服务机构和市场贸易机构等行业在内的相关人员能够方便地查阅镁合金的熔炼、铸造、塑性加工、连接（焊接）、表面处理、回收、标准、专利等有关技术和信息及最新发展动态；为了充分发挥镁的资源优势，促进镁合金的开发与应用，中国有色金属工业协会镁业分会于2011年7月开始组织编写《中国镁工业进展》一书。

本书作者参阅了近年来最新出版的图书，收集了大量近期研究论文、文献资料，并根据部分研究院所、大学、企业相关人员提供的资料，进行了系统的组织、筛选和编撰。在注重知识性的同时，重点介绍了加入稀土的高强、高韧、耐热、耐蚀镁合金的研发与应

用,以及“十五”、“十一五”期间国家重大科技计划成果,结合最新的应用成果,力求理论与实际紧密结合,能够为从事镁及镁合金研究、开发和应用的技术人员,以及其他行业需要了解镁及镁合金有关情况的人员提供一些指导或帮助。

在本书出版之际,对为本书作序并一直倡导、支持中国镁工业发展的老一辈科学家师昌绪院士等表示诚挚的敬意和感谢。对诚邀参加本书编写并提供资料的专家、教授和镁业分会各副会长及相关企业,特别是陕西神木县兴杨金属镁有限责任公司董事长杨留保先生的大力支持,以及关心、鼓励和支持本书出版的同仁和工作人员表示衷心的感谢。

由于镁合金材料以及中国镁工业仍处在发展中,一些基础理论和技术远不如铝合金成熟,所以本书局限性和疏漏之处在所难免,真诚希望同行专家和读者给予批评指正,并提出宝贵意见。

孟树昆

2012年8月于北京

目 录

1 镁的发展史	1
1.1 镁冶炼发展的三阶段	1
1.1.1 化学法阶段	1
1.1.2 熔盐电解法阶段	1
1.1.3 热还原法阶段	1
1.2 第一、二次世界大战期间镁生产技术发展概况	2
1.3 世界镁工业发展概况	2
1.4 中国镁工业发展概况	3
2 镁及镁合金的性能	7
2.1 镁的晶体结构	7
2.2 镁的性能	8
2.2.1 镁的力学性能	8
2.2.2 镁的工艺性能	9
2.3 镁的合金化	9
2.3.1 合金元素的作用	9
2.3.2 镁的合金化	11
2.4 镁合金的强化	11
2.4.1 固溶强化	11
2.4.2 沉淀（析出）强化	12
2.4.3 弥散强化	12
2.4.4 细晶强化	12
2.4.5 形变强化	12
2.4.6 复合强化	12
2.5 镁合金的分类	13
2.6 镁合金的特性	14
3 镁的资源与分布	16
3.1 地壳中镁的分布及含镁主要矿物	16
3.2 炼镁用的镁矿及其特性	17
3.3 目前具有工业应用价值的几种镁矿资源	18

3.4 中国镁矿的分布与勘查	19
3.4.1 中国白云石矿资源分布	19
3.4.2 中国菱镁矿资源分布	20
3.4.3 中国其他镁矿资源的分布	21
3.5 中国的镁资源优势	24
3.6 采选技术与装备	25
4 镁冶炼工艺技术与装备	26
4.1 镁冶炼工艺技术	26
4.1.1 电解法	26
4.1.2 热还原法	30
4.2 皮江法炼镁主要装备	33
4.2.1 煅烧设备	33
4.2.2 炉料细磨设备	33
4.2.3 球团压形设备	34
4.2.4 还原罐	34
4.2.5 还原炉	34
4.2.6 真空系统	34
4.2.7 精炼设备	35
4.2.8 连续铸造机	35
4.3 皮江法镁冶炼技术经济指标及计算方法	35
4.3.1 对皮江法炼镁的原料要求	35
4.3.2 皮江法镁冶炼生产工艺过程	35
4.3.3 皮江法镁冶炼技术经济指标及计算方法	36
4.4 镁合金生产工艺与装备	40
4.4.1 镁合金生产工艺流程	41
4.4.2 镁合金生产中需要强调的几个问题	43
4.4.3 镁合金生产用设备	44
4.5 中国皮江法炼镁技术与装备的创新发展	45
4.5.1 调整能源结构, 采用清洁能源	46
4.5.2 提升皮江法镁冶炼技术与装备水平、节能减排	46
4.5.3 粗废镁无熔剂连续复合精炼技术	55
4.5.4 新型节能竖罐还原的研发与试用取得新成果	57
4.5.5 皮江法炼镁各项技术经济指标明显进步	59
4.6 镁冶炼倡导低碳循环经济发展模式	60
4.6.1 惠冶镁业的低碳循环经济发展模式	61

4.6.2	惠冶镁业循环经济产业链的特点	61
4.6.3	惠冶镁业循环经济产业链的具体做法	61
4.6.4	惠冶镁业节能降耗工作落到实处	63
4.6.5	镁还原渣的综合利用	63
4.7	电解法炼镁技术水平有新进展	64
4.7.1	以海绵钛副产氯化镁进行电解, 通过引进技术消化创新, 改善电解指标	64
4.7.2	利用青海盐湖资源, 引进国外脱水电解技术, 建 10 万吨 电解镁厂	64
4.7.3	氯化物体系熔盐电解法制备稀土镁中间合金	65
4.8	镁合金新材料的研发与应用新进展	68
4.8.1	高性能稀土镁合金新材料研发与应用	68
4.8.2	低成本非稀土镁合金新材料	92
4.8.3	镁锂合金的研发进展	95
4.8.4	镁功能材料研发新进展	98
4.9	镁及其材料的生命周期评价	134
4.9.1	生命周期评价及其应用	134
4.9.2	生命周期评价在金属镁及其材料中的应用	136
5	镁加工技术与装备	139
5.1	铸造镁合金成形技术与装备	139
5.1.1	重力和低压铸造	139
5.1.2	压铸	139
5.1.3	镁合金的半固态成型	142
5.1.4	挤压铸造	143
5.2	镁合金塑性加工技术与装备	143
5.2.1	镁合金挤压	144
5.2.2	镁合金轧制	145
5.2.3	镁合金锻造	147
5.2.4	镁合金拉拔	149
5.2.5	镁合金超塑成型	150
5.3	镁合金加工成型技术与装备研发新进展	150
5.3.1	铸造	150
5.3.2	铸轧	161
5.3.3	挤压	164
5.3.4	锻造	168

5.3.5 轧制	177
5.3.6 镁合金加工成型装备向大型化发展	182
5.4 国家“973”项目“高性能镁合金加工与制备中的关键基础 问题”研究的重要进展	183
5.4.1 项目研究单位组成	183
5.4.2 项目围绕四大关键科学问题开展研究取得了显著成效	184
5.4.3 项目研究的重要进展	184
6 镁合金连接（焊接）技术及新进展	195
6.1 镁及镁合金材料的焊接技术	195
6.1.1 焊接特性	195
6.1.2 焊接设备及材料的选择	196
6.2 镁及镁合金材料的粘接技术	196
6.3 镁合金材料的机械连接	196
6.3.1 铆接	196
6.3.2 螺纹连接	197
6.4 镁合金连接（焊接）技术新进展	197
6.4.1 镁合金 MIG 焊	199
6.4.2 高沸点低污染镁合金焊丝	199
6.4.3 优质高效镁合金焊接装备开发及应用	201
6.4.4 镁合金焊接技术应用	203
7 镁及镁合金的腐蚀与防护（表面处理）技术及新进展	206
7.1 影响镁及镁合金耐蚀性的因素	206
7.1.1 合金元素与杂质的影响	206
7.1.2 加工、热处理工艺及组织结构形态的影响	207
7.2 提高镁及镁合金耐腐蚀性的途径	207
7.2.1 研究开发高纯镁合金，减少合金中的有害杂质元素	207
7.2.2 应用快速凝固处理工艺，细化晶粒和提高某些元素的 固溶度	208
7.2.3 进行有效的表面处理，大大提高镁合金材料的耐蚀性	208
7.3 镁及镁合金材料的表面处理	208
7.3.1 表面清理和预处理	209
7.3.2 化学氧化（转化膜）处理	209
7.3.3 阳极氧化（电化学）处理技术	210
7.3.4 微弧氧化处理	210
7.3.5 电镀技术	212

7.3.6 表面热喷铝扩散处理工艺	212
7.3.7 有机涂层工艺与颜料着色	212
7.4 镁及镁合金表面处理技术的新进展	212
7.4.1 高耐蚀镁合金的发展	213
7.4.2 镁合金表面防护技术的新发展及其应用	217
8 镁及镁合金废料回收与再生利用	239
8.1 镁合金废料的产生	239
8.2 镁合金废料的分类	239
8.3 镁合金废料的回收工艺	240
8.4 镁合金废料的回收方式	241
8.4.1 厂内回收	241
8.4.2 厂外回收	241
8.4.3 废旧汽车上镁合金零部件的回收	241
8.5 镁合金废料的前期处理	241
8.6 镁合金废料的熔炼方法	242
8.6.1 镁切屑的重熔工艺	242
8.6.2 镁切屑真空蒸馏法	242
8.6.3 熔剂法	243
8.7 镁合金废料在熔炼中的质量控制	244
8.7.1 降低镁合金中铁的含量	244
8.7.2 降低镁合金中非金属杂质的含量	245
8.7.3 预防外来杂质	245
8.8 镁合金压铸废料绿色回收过程质量控制及应用	246
8.8.1 镁合金废料无熔剂回收技术	247
8.8.2 绿色回收技术经济指标	247
8.8.3 回收镁合金质量控制	247
8.8.4 绿色回收系统精炼效果	248
8.8.5 回收镁合金在压铸生产中的推广应用	250
8.9 镁合金压铸工艺废镁的现场重熔精炼再生技术与装备	251
8.10 高危劣质废镁的蒸馏再生系统	252
9 镁及镁合金的应用	254
9.1 镁的应用	254
9.1.1 镁在冶金领域的应用	254
9.1.2 镁在化学工业的应用	255
9.1.3 镁在电化学、牺牲阳极上的应用	255