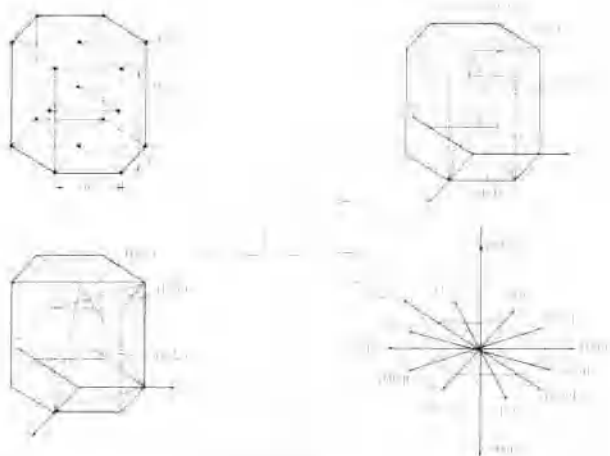


轻合金丛书

镁合金及应用

张津 章宗和 等编著



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

轻合金丛书

镁合金及应用

张津 章宗和 等编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

镁合金及应用/张津, 章宗和等编著. --北京: 化学工业出版社, 2004.7
(轻合金丛书)
ISBN 7-5025-5705-9

I. 镁… II. ①张…②章… III. 镁合金-研究
IV. TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 073788 号

轻合金丛书

镁合金及应用

张津 章宗和 等编著

责任编辑: 窦 臻

文字编辑: 韩庆利

责任校对: 洪雅姝

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印刷

三河市前程装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 21½ 字数 317 千字

2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5705-9/TG·8

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《轻合金丛书》编委会

主 任：曾苏民

常务副主任：潘复生

副 主 任：丁文江 史文芳 韩恩厚 赵永庆

熊柏青 谢建新

秘 书 长：张 津

委 员：丁培道 刘 庆 刘 兵 刘 正

罗承萍 龙思远 李焕喜 黄少东

孙东立 王渠东 易丹青 章宗和

序

铝、镁、钛等金属的密度小，分别为 2.78g/cm^3 、 1.74g/cm^3 和 4.52g/cm^3 ，通常被称为轻金属，其相应的铝合金、镁合金、钛合金则称为轻合金。铝合金导热性好、易于成形、价格较低，已经在航空航天、交通运输、轻工建材、通讯、电子等部门获得了广泛的应用，2003 年世界及我国铝产量已分别达到 3235 万吨和 540 万吨。镁合金具有比强度、比刚度高，阻尼性、切削加工性、导热性好，电磁屏蔽能力强等优点，在交通、通讯、电子和航空航天等领域的应用前景十分广泛，2003 年世界和我国原镁产量已分别达到 51 万吨和 34 万吨，且以每年 20% 的速度迅速增长。钛合金耐腐蚀性好、耐热性高，比刚度、比强度高，是航天航空、石油化工、生物医学等领域的重要材料，在尖端科学和高技术方面发挥着重要作用。2003 年世界和我国的海绵钛产量分别达到 6 万多吨和 6000 多吨。

轻合金所具有的特殊优异性能和发展潜力促使世界各国越来越重视对轻合金材料的研究开发与推广应用。除了继续系统深入开展铝合金、钛合金材料的研究与产业化发展外，近年来世界各国还投入了大量人力物力加快镁及镁合金材料的研究开发和产业化推进，突破了一批关键技术，扩大了镁合金材料的应用范围，发展势头十分强劲。我国近年来轻合金材料的发展令人瞩目，除了原材料生产持续高速增长以外，轻合金材料的基础研究、加工制造和应用水平也逐年提高，特别是在镁产业发展方面，我国已成为世界上最大的原镁生产和出口国，镁合金材料的产业化发展与推广应用也取得显著成效，国家科技部倡导和力推的我国镁资源优势向经济优势的转化正顺利进行。

由于轻合金材料近年来发展非常迅速，在冶炼、加工、回收、应用和制造装备等多方面有重要研究进展，取得了大量的产业化成果；在轻金属的资源开发利用、轻合金产品的产量与工业规模、发展重点等方面也都有了很大的变化。而且，从事轻金属及合金材料的研究开发和产业化的从业

人员数量也增长迅速。因此，特别需要出版一套图书介绍和反映轻合金材料的新进展和新应用。《轻合金丛书》的作者都是国内轻合金行业内很有成就的专家和学者。他们根据轻合金材料产业发展的需要，编写了这套系统、完整、规范的介绍现代轻合金材料的工程技术丛书。该丛书包括《镁合金及应用》、《钛合金及应用》、《铝合金及应用》、《铝箔材料》、《镁合金表面处理技术》、《高强度变形镁合金》（预计于2006年出版）、《轻合金材料新进展》（预计于2006年出版），全面总结介绍了轻合金资源状况、冶炼工艺、材料设计、加工制造和应用技术等基础知识，收集汇编了近年来轻合金材料的新工艺、新产品和发展动态等技术资料，并结合作者自己的科研成果和体会，探讨了轻合金材料产业的技术与行业发展趋势。其中，《镁合金及应用》、《钛合金及应用》和《铝合金及应用》三本书以介绍镁合金、钛合金和铝合金的基本理论、基本原理、基本工艺和重要应用为主；《铝箔材料》、《镁合金表面处理技术》、《高强度变形镁合金》和《轻合金材料新进展》四本书重点介绍最近几年的研究成果和研究进展。本书对从事轻合金材料研究开发及产业化的科研院所、高等院校、厂矿企业的科研与工程技术人员、在校材料及相关专业的学生有重要参考价值，对机械、能源、交通、通讯、电子、建筑等行业的相关从业人员也有一定的帮助。相信该丛书的出版发行对我国轻合金材料的研究开发和产业化发展将起到积极的促进和推动作用。

曾民

2004.5.13

前 言

镁及镁合金具有密度小、比强度高、加工焊接和阻尼性能良好及尺寸稳定、价格低廉、可以回收利用等优点，越来越受到人们的重视，镁合金已成功应用于航空、汽车制造和电子等领域。中国是镁资源大国，储量居世界第一，目前原镁的生产量占全世界的 2/3，是原镁最大的生产国和出口国，但并非为镁合金产品加工和应用的强国。国家科技部、发展改革委员会等部门和相关地方政府投入大量资金用于镁合金基础研究、应用开发及产业化发展。编著者参与了国家高新技术 863 “高强度变形镁合金研制及其应用研究”，“先进轻武器材料技术”，国家“十五”攻关“交通工具用镁合金零部件生产及应用共性关键技术研究开发及产业化”等项目，在进行项目研究过程中发现关于镁合金的专著较少，而且各自的侧重面有所差异。随着镁合金研究开发的不断深入，越来越多的人加入镁合金基础研究和产业化队伍中，为了方便相关读者了解镁合金的基础知识和研究现状，我们将收集的资料进行了归纳整理，同时将我们的研究成果和国内外最新的技术成果进行了介绍。书末附录了关于镁及镁合金的国内标准以及部分国外标准。本书的编著也是国家“863”项目（2001AA331050）研究内容的一部分。

在轻合金丛书编辑委员会的领导下，《镁合金及应用》一书由重庆工学院张津教授负责策划和进行总体构思，重庆镁业科技股份有限公司章宗和教授级高工对该书进行技术审核；重庆镁业科技股份有限公司章宗和、邹钢、向冬霞、王军以及力劲机械（深圳）有限公司黎前虎、陈继彬与宁夏华源公司藏镜淳等负责第 1 章、第 8 章、第 9 章撰写，重庆工学院张津、杨明波、曾荣昌负责第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 7 章撰写，兵器工业第五九研究所黄少东、唐全波负责第 5 章、第 6 章撰写，实际上有些章节都是上述作者共同劳动的结果。本书的校对由重庆工学院胡亚民教授完成。

本书在编写过程中得到了曾苏民院士、潘复生教授、吴秀铭教授、史

文方教授等同行专家关心、支持和帮助，在此表示衷心的感谢。另外还有许多同行和同事（如曹建勇、孙智富等）给予本书的撰写和出版提供了许多有益的建议，作者对他们的帮助表示真诚的谢意。还要指出的是：本书的出版得益于化学工业出版社的大力支持，我们在此也表示衷心的感谢。

本书从原镁生产、镁合金的制备、表面处理、回收利用以及安全生产到镁合金的应用进行了较为全面系统的分析和总结，概括了当前镁合金的发展情况。该书可供从事镁及镁合金科研开发和生产的工程技术人员参考，也可作为高等院校材料科学与工程专业本科生或研究生教材。

由于编著者知识有限，本书可能存在不少疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

张津

2004年5月

内容提要

本书系统介绍了镁及其合金的冶炼，镁合金的组织结构和性能控制，镁合金铸造、焊接和塑性成形加工，镁合金的回收利用和表面防护处理，及其这些方面的实际应用。该书是由从事镁合金研究及生产的高校、研究所以及企业的研究人员和技术人员共同创作的集体智慧结晶，作者在参考大量镁合金开发应用文献的基础上，根据自身的科研和生产实际，较为全面系统地分析和总结了镁合金从原镁提炼到实际应用过程中各个环节的发展及应用情况，其中许多图片为作者的最新科研成果和最新产品。本书是国家高新技术“863”项目(2001AA331050)的重要组成部分。

本书可作为广大科技工作者和工程技术人员从事镁合金研发、生产及应用的指导用书，同时也可作为材料类及相关专业高年级大学生及研究生的教学参考书。

重庆镁业科技股份有限公司

重庆镁业科技股份有限公司是由隆鑫集团、西南铝业（集团）等五家公司共同发起组建的具有完整产、学、研、销产业链的高新技术企业。

公司拥有实力雄厚的镁及镁合金研究开发应用中心，致力于镁及镁合金在航空航天、交通运输、手持工具、运动器材等中的应用技术研究和生产。目前的产品有镁合金汽车方向盘骨架、气缸盖罩、镁合金射钉枪壳体、园林工具上的齿轮室盖、箱体等零部件，镁合金摩托车零部件及各类镁合金型材等。

重庆镁业先后承担国家“十五”、国家“863 计划”镁合金项目和重庆市科技攻关重点项目。公司将秉承“科技报国、求实创新、精诚友善、高效尽责”的企业精神，凭借雄厚的科技实力和人才优势，朝着资本多元化、经营国际化、管理科学化的目标前进。

地址：重庆市九龙坡区华岩镇半山村（半山工业园区）

电话：023 89062355

传真：023 68653555

邮编：400052

网址：www.cqmst.com

E-mail：webmaster@cqmst.com



公司厂区

力劲集团

力劲集团创立于1979年,经过三十余年的发展,现已成为全球规模最大的压铸机制造商,成为拥有香港力劲、深圳力劲、中山力劲、上海力劲、上海一达、宁波力劲、深圳领威、上海一阳八家公司的大型企业集团。

力劲集团以生产冷热室压铸机,注塑机,镁合金压铸机及汽车零部件等为主,产品全球销售,广泛应用于汽车、摩托车、电子、通讯、军事、航空航天、运动器材等行业。

为配合国家实现“镁大国、镁强国”的战略目标,力劲集团自行研制生产了中国第一台镁合金压铸机,填补了国内空白。力劲集团开发的高性能镁合金压铸机被国家经贸委列为《2001年度国家级重点新产品》;主持研究的“镁合金应用及产业化”项目被列入国家“十五”计划科技攻关重大专项;镁合金高性能压铸机研究项目已入选国家火炬计划。

力劲集团秉承积极进取、不断创新的精神,面对新的机遇及新的挑战,在镁、铝等轻合金新材料应用领域稳步拓展。未来,力劲承诺以更高质量的产品及更优秀的服务迎来与客户共同的成功。



力劲机械有限公司

地址:香港新界葵涌华星街1-7号美华工业大厦地下A座及8字楼A室

电话:(852) 24101782 传真:(852) 24101789 <http://www.lkilw.com>

深圳领威科技有限公司

地址:深圳市龙华镇清湖村

力劲工业园

电话:(0755) 28123321

传真:(0755) 28123320

力劲机械(深圳)有限公司

地址:深圳布吉镇吉华工业区

第4号厂房

电话:(0757) 28542582

传真:(0757) 28545850

宁波力劲机械有限公司

地址:宁波北仑区大港工业

城松花江路402号

电话:(0574) 86875581

传真:(0574) 86829951

上海一达机械有限公司

地址:上海市松江出口加

工区民益路6号

电话:(021) 57686188

传真:(021) 37643555

中山力劲机械有限公司

地址:中山市东升镇广福大道

电话:(0760) 2825231 2828756

传真:(0760) 2228078

上海力劲机械有限公司

地址:上海市松江区民益路6号

电话:(021) 57644048

传真:(021) 57645364



厂房

宁夏华源集团

宁夏华源镁业集团成立于1994年，是一家集研发、生产、出口金属镁及镁合金于一体的科、工、贸民营企业。集团公司现在注册资本金已达10472.64万元，并拥有五个控（参）股生产企业和一个国际贸易公司，公司员工达2000余人。目前，宁夏华源镁业集团已形成年产镁锭26000吨和镁合金6000吨的生产能力，其中集团下属企业——鑫达镁业有限公司是宁夏金属镁行业最大的企业，其生产能力达12000吨/年，是国内目前单体规模最大的镁生产企业。而集团另一下属企业——宁夏华源冶金实业有限公司自1997年以来累计出口镁及镁合金产品50000多吨，创汇突破1亿美元，其中仅2004年1~5月份就已出口创汇1069万美元，出口创汇额列全自治区第八名，在国内镁行业名列前茅。

宁夏华源集团生产的金属镁及镁合金产品的质量在国内乃至世界镁行业都享有很高的声誉，众多国外客户都给予了很高的评价。同时，宁夏华源也为宁夏的镁行业培养了一大批专业技术人才，为宁夏镁行业的发展做出了应有的贡献。

地址：宁夏银川市高新技术开发区科技创新园83号

电话：(86) 951 5063888

传真：(86) 951 5063818

网址：www.westmg.com

E-mail：huayuan@public.yc.nx.cn



镁合金锭连铸生产线



镁合金锭

中国兵器工业第五九研究所

中国兵器工业第五九研究所是目前兵器行业最大的制造技术、技术基础、材料研发单位之一，在册职工 1031 人，其中各类专业技术人员 667 人，拥有固定资产（原值）9453 万元，仪器设备 1962 台（套）。现有技术专业 10 个，其中，自然环境试验技术、特种成形工艺技术、包装工程技术独具特色和技术优势，“国防科技工业自然环境试验研究中心”已具备自然环境试验和人工加速模拟试验双重功能，涂料涂装、表面工程等专业也具有较雄厚的设计/开发、生产实力。所生产的各类涂料、精密冷温锻件、特种铸件、表面处理化学制剂、碳基材料摩擦片、包装材料及制品等产品广泛应用于汽车、摩托车、机电、通讯等领域，是兵装集团科研生产、两车零部件开发的重要研究试验基地，是服务于重庆地区经济的大型研究开发机构。

在国家科技部、总装、重庆市科委的支持下，五九所结合军民品需求，开展了镁合金材料、工艺技术及应用研究，包括高性能镁合金材料成分设计与优化，镁合金熔炼技术，镁合金净化技术；镁合金成形过程中组织/织构演变及控制的研究，镁合金零件表面防护技术，镁合金等温成形、镁合金半固态成形、铸造等，研制了镁合金机匣、枪托体、排水管、滤座等零部件，开展了性能测试。

五九所将深化镁合金材料及应用研究，为武器装备、汽车摩托车轻型化及镁产业的发展作出更大贡献。

地址：重庆市石桥铺渝州路 33 号

电话：023 68792108

传真：023 68792100

邮编：400039

E-mail: zb59@163.net bq59kyc@tom.com

重庆工学院

重庆工学院原为重庆工业管理学院，隶属中国兵器工业部，1999年开始归属重庆市教委，该学院1940年建校，目前是重庆市重点支持的工科院校。近几年学校从全国各地引进了大量具有教授职称或博士学位的人才，组成了一支团结合作精干的科技队伍。

重庆工学院在原材料成型与控制工程专业的基础上，通过资源整合和引进人才，于2001年成立了材料科学与工程系，现有教职工55人，其中教授15人，副教授10人，具有博士学位的教师有9名。为了加速材料系（2003年更名为材料科学与工程学院）的发展和对引进人才的支持，新购进了离子束、射频和直流磁控溅射集于一体的超高真空镀膜机、高频等离子氮化设备、用子镀层处理的多种型号的整流设备、膜厚测试仪、摩擦磨损实验机、真空感应炉、真空碳管炉等，通过日本协力银行对中国中西部地区教育低息贷款项目，学院已购进辉光放电光谱仪、扫描隧道显微镜、带EBSD附件和能谱分析附件的低真空扫描电镜、纳米划痕（纳米压痕）仪等分析测试设备，学院的材料性能测试中心和模具加工中心具备了常规机械加工，材料制备、性能测试和微观结构分析测试能力。

重庆工学院自2002年开始从事镁合金的研究开发，目前主要在镁合金表面强化及防腐蚀处理、镁合金的摩擦、磨损及润滑等方面开展工作，负责并参与了国家863高新技术、国家自然科学基金、国家科技部攻关项目以及重庆市科委、国家重点实验室开放课题等项目。在镁合金的研究开发方面目前拥有以两名重庆市首批学科带头人后备人选为主、6名具有博士学位和副高职称以上、平均年龄在40岁以下的骨干研究队伍。

地址：重庆市杨家坪兴胜路4号

电话：023 68667401

传真：023 68668958

邮编：400050

E-mail: cl@cqit. edu. cn

目 录

第 1 章 镁资源及原镁生产	1
1.1 概述	1
1.2 镁资源	1
1.2.1 世界菱镁矿储量和分布	2
1.2.2 中国的镁资源	3
1.3 镁的性质	5
1.3.1 元素特征	5
1.3.2 晶体结构	5
1.3.3 品质特性	7
1.3.4 热性能	8
1.3.5 热力学性能	12
1.3.6 力学性能	13
1.4 原镁生产方法	15
1.4.1 电解法	18
1.4.2 皮江法	21
参考文献	36
<hr/>	
第 2 章 镁合金的成分、组织和性能	39
2.1 概述	39
2.2 镁合金成分对性能的影响	39
2.2.1 镁合金的合金化特点	39
2.2.2 镁合金成分与牌号	41
2.2.3 镁合金的分类及热处理	42
2.2.4 合金元素对组织和性能的影响	44
2.3 铸造镁合金组织和性能	47

2.3.1	Mg-Al 系合金组织	48
2.3.2	Mg-Zn 系合金	52
2.3.3	铸造镁合金的性能	53
2.4	变形镁合金组织及性能	54
2.4.1	变形镁合金组织	55
2.4.2	变形镁合金性能	57
2.5	镁合金热处理时效组织和性能	58
2.5.1	Mg-Al 系合金	59
2.5.2	Mg-Zn 系合金	61
2.5.3	Mg-Mn 系合金	61
2.5.4	Mg-RE 系合金	61
2.5.5	其他合金	62
2.6	冶金缺陷对镁合金性能的影响	66
	参考文献	68

第 3 章	镁合金强化处理	71
3.1	概述	71
3.2	合金化强化	71
3.3	热处理强化	74
3.4	复合强化	77
3.5	细晶强化	78
3.5.1	变质或过热处理细化晶粒	79
3.5.2	半固态成形细化晶粒	80
3.5.3	铸锭变形细化晶粒	81
3.5.4	快速凝固细化晶粒	81
	参考文献	82

第 4 章	镁合金铸造	85
4.1	概述	85
4.2	镁合金熔炼	85
4.2.1	镁合金熔炼过程中的阻燃保护	86

4.2.2	镁合金成形过程中的阻燃保护	92
4.2.3	镁合金的精炼和变质处理	94
4.2.4	镁合金的熔炼工艺	96
4.3	镁合金铸造成形	98
4.3.1	常规压铸	99
4.3.2	真空压铸	105
4.3.3	充氧压铸	106
4.3.4	挤压铸造	107
4.3.5	半固态铸造	108
4.4	镁合金铸造设备	109
4.4.1	镁合金熔炼设备	109
4.4.2	镁合金压铸机	111
4.4.3	镁合金压铸辅助设备	115
	参考文献	123

第5章	镁合金的塑性成形	127
5.1	概述	127
5.2	镁合金轧制技术	128
5.2.1	厚板轧制	129
5.2.2	薄板轧制	130
5.3	镁合金挤压成形	133
5.4	镁合金锻造成形	136
5.4.1	可锻性	136
5.4.2	工艺特性	137
5.4.3	坯料	139
5.4.4	坯料加热	139
5.4.5	成形设备	142
5.4.6	锻造模具及润滑	142
5.4.7	锻件的切边和整形	143
5.4.8	锻件后续处理	143
5.4.9	锻件品质控制	144