

镁合金 制备与加工技术

Magnesium Alloy
Fabrication and Processing Technology

徐 河 刘静安 谢水生 编著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

内 容 简 介

本书是由中国有色金属工业协会镁业分会与中国有色金属工业协会有色金属技术交流中心组织国内镁行业专家、学者和工程技术人员撰写与审定的实用性技术著作。

本书全面总结了国内外近年来镁加工工业,特别是镁加工技术方面所取得的成就和经验,系统地阐述了镁加工工业的产品、工艺、技术和装备,重点对镁加工工业的新产品、新工艺、新技术和新设备进行了详细介绍,内容丰富,实用性强。

全书共分 11 章,包括:绪论,镁合金的分类、牌号、状态、化学成分与性能,镁合金的熔炼与铸造,镁合金塑性成形技术,镁合金材料的热处理与精整矫直,镁合金材料的深加工及产品开发,镁合金材料的腐蚀及表面处理,镁合金新材料及制备新技术的研究开发,镁及镁合金材料的市场分析与应用开发,镁及镁合金废料回收与再生利用,镁及镁合金材料的安全生产与防护。另外,附录中列出了国内外镁及镁合金现行标准目录。

本书是镁加工企业及科研设计院所的工程技术人员和研究人员必备的工具书;也可供从事金属材料生产、科研、设计、产品开发与深加工及应用的技术人员阅读;并可作为大专院校有关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

镁合金制备与加工技术/徐河等编著. —北京:冶金工业出版社,2007.5

ISBN 978-7-5024-4229-3

I. 镁… II. 徐… III. ① 镁合金—制备—技术
② 镁合金—金属加工—技术 IV. TG146.2-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 031607 号

出 版 人 曹胜利(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)

策 划 张登科(电话:010-64062877 E-mail:zhdengke@sina.com)

责任编辑 张登科 美术编辑 王耀忠 版面设计 张 青

责任校对 刘 倩 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4229-3

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2007 年 5 月第 1 版,2007 年 5 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 34.75 印张; 914 千字; 530 页; 1—3500 册

128.00 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

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

编辑委员会

主 任 康 义

副 主 任 赵家生 吴秀铭 史文芳 徐 河

委 员 (按姓氏笔画排序)

丁培道	史文芳	刘 正	刘静安	刘黎明	关绍康
朱祖芳	李向宇	李华伦	李培杰	吴秀铭	何振波
周 昆	孟树昆	赵家生	徐 河	徐日瑶	康 义
崔建忠	章宗和	曾小勤	谢水生	韩 薇	

责任编辑 张登科

Editorial Board

Chairman Kang Yi

Vice-chairman Zhao Jiasheng Wu Xiuming Shi Wenfang Xu He

Board Member (in the order of the number of strokes in the surnames)

Ding Peidao	Shi Wenfang	Liu Zheng
Liu Jingan	Liu Liming	Guan Shaokang
Zhu Zufang	Li Xiangyu	Li Hualun
Li Peijie	Wu Xiuming	He Zhenbo
Zhou Kun	Meng Shukun	Zhao Jiasheng
Xu He	Xu Riyao	Kang Yi
Cui Jianzhong	Zhang Zonghe	Zeng Xiaoqin
Xie Shuisheng	Han Wei	

Executive Editor Zhang Dengke

作者简介



徐河，维恩克科技集团董事长/CEO，博士。中国有色金属工业协会镁业分会副会长、专家组专家，河南省有色金属工业协会镁业分会会长，河南省镁合金及制品工程研究中心主任。

1982年赴美，获美国俄亥俄州立大学博士学位。曾在美国俄亥俄州立大学和德克萨斯大学任教并从事研究工作，期间任联合国开发计划署新能源顾问。曾在多家美国公司任研发部主任、副总裁、总裁等。

1996年回国从事镁合金研发、生产和市场推广工作。先后在中国山东临沂、河南鹤壁、北京、香港、澳门和美国休斯顿分别建立了镁合金产品生产基地、研发机构和销售中心。承担国家“十五”科技攻关镁专项“五千吨镁合金牺牲阳极产业化示范基地”项目，获部级二等奖；承担“十一五”国家科技支撑计划重点项目“镁及镁合金关键技术开发与应用”子课题“镁合金管型材低成本成形技术研究”；承担多项省、市科技攻关项目，并多次获奖。多次获中国有色金属工业协会镁业分会颁发的多项成果和成就奖。参与修订“镁合金牺牲阳极”（2003版）国家标准和“镁产品能耗”（2007版）国家标准。发表镁合金相关论文30余篇。



刘静安，西南铝业（集团）有限责任公司原副总工程师，教授。1964年毕业于中南矿业学院（现中南大学）有色金属压力加工与热处理专业，享受国务院政府特殊津贴，是我国著名的金属挤压和模具专家。

一直在特大型铝加工企业第一线从事科研、技术开发、新产品研制和生产技术工作，具有深厚的理论基础和丰富的生产实践经验。曾组织并参与完成了多项国家重点科技攻关、技术开发与新产品研制项目。曾获国家级科技进步奖5项，省部（市）级科技进步奖40余项。

出版《轻合金挤压工具与模具》、《铝型材模具设计、制造、使用与维修》、《铝加工技术实用手册》、《铝合金材料的应用与技术开发》等著作30余部，在国内外刊物上发表论文200余篇。



谢水生，北京有色金属研究总院教授、博士生导师。1986年获清华大学工学博士学位，澳大利亚 Monash 大学访问学者，享受国务院政府特殊津贴。现兼任中国有色金属学会合金加工学术委员会主任；北京市机械工程学会压力加工学会主任；《稀有金属》、《塑性工程学报》编辑委员会委员等。

承担并负责：国家“863”课题6项，国家自然科学基金课题7项，国家“攻关”课题6项，国际合作课题2项。获得国家专利15项，部级一等奖1项、二等奖3项等。

出版《铝加工技术实用手册》、《铝加工生产技术500问》、《金属塑性成形工艺的有限元数值模拟》、《半固态金属加工技术及其应用》等著作8部。在国内外刊物上发表论文140余篇。

A Brief Introduction of Authors

Dr. He Xu, Chairman of the Board and CEO of WINCA Tech Group. Currently, he is Vice Chairman of the China Magnesium Association, Chairman of the Magnesium Branch of the Henan Provincial Non-Ferrous Metal Industry Association and Director of the Henan Provincial Magnesium Alloy Research Center.

After earning his Ph.D. from the Ohio State University, he was a faculty member for teaching and research there and also at the University of Texas, at El Paso. During that period, he was appointed to be a project consultant for renewable energy for the UNDP. Before joining WINCA, he also held positions as Director of R&D, Vice President and President for several U.S. companies respectively.

In 1996, Dr. He Xu became the CEO of WINCA Tech Group. Continuing in that position, he has engaged in material research, product development, marketing and sales and production management for magnesium alloys and magnesium alloy products. He has published over 30 technical papers related to magnesium alloys fabrication and processing technology.

Professor Jingan Liu, former Deputy Chief Engineer of South-West Aluminum Industry (Group) Co., Ltd.. He graduated from Zhongnan Mineral College (now, Zhongnan University) with his major in metal forming and heat treatment of non-ferrous metals.

He is a specialist in the field of light metal extrusion and has been engaged in basic research, new product development, processes design and mold design, for over 30 years. He has participated in numerous national R & D projects and state "Key Project" for light metal forming and heat treatment, winning five prizes for "Achievement in Science and Technology" at the state level.

Professor Jingan Liu has authored over thirty technical books including "Application and Development of Aluminum Alloys" and he has published more than 200 technical papers.

Dr. Shuisheng Xie, Professor at the General Research Institute for Non-ferrous Metals of Beijing. He earned his Ph.D. from Tsinghua University in Mechanical Engineering, in 1986. At present, he is serving as Director of Alloy Processing Committee of the Non-Ferrous Metals Society of China and as Director of the Metal Forming Branch of the Beijing Machinery Engineering Society.

He has headed six state "863" projects, seven projects of National Natural Science Foundation of China and six state "Key Project". He has won one first prize and three second prizes for "Achievement in Science and Technology" at the state level.

Dr. Shuisheng Xie is the author of 8 technical books, including "Handbook on Aluminum Processing Technology". He has published over 140 papers in technical journals worldwide.

致 词

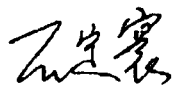
祝贺《镁合金制备与加工技术》出版!

镁、铝元素是同时代被科学家发现的。200 多年来铝的科技发展突飞猛进,铝材料的应用已深入到人们生活的各个领域,2006 年,我国原铝产量达 900 万 t,铝加工材产量达 814 万 t,但我国铝资源有限,开发利用将面临资源匮乏。而我国镁资源十分丰富,是保持稳定可持续发展极好的后续资源。镁作为结构材料,其潜力尚未充分挖掘出来,开发利用的程度远不如钢铁、铜、铝等,这给镁业科技工作者提出了艰巨的任务,同时也提供了施展才华的广阔空间和创新机遇。我们坚信,随着技术的突破,在全球范围内大规模开发应用镁合金材料的时机已经到来。

在“十五”国家科技攻关计划引导下,遵循“一条产业链,两个创新体系和三个结合”的发展思路,经过广大科技工作者的努力,镁合金的开发应用已取得丰硕成果,电子信息、装备制造等行业表现出应用镁合金的积极性,从而进一步激发了国内更大范围开发镁产业的热情,同时,我国已取得的进展也得到国际同行的高度关注与认可。我国镁业在大陆、台湾、香港两岸三地建立起了密切交流;与美国、加拿大开展的三国合作项目已进入实施阶段;与欧洲、亚洲等国家也正在进行交流,不少国际公司与我们洽谈合作事宜。这些极大地提高了广大科技工作者攻克镁材料关键与核心技术的信心,为大规模开展镁的开发应用奠定了基础。

“十五”期间,我本人有幸直接参与国家科技计划“镁合金开发应用及产业化”项目的酝酿、策划和实施,为推动镁合金的开发应用尽了微薄之力,也为取得的成就感到欣喜和鼓舞。我希望,我国广大镁业科技工作者,坚持科学发展观,大力提高自主创新能力,从全国镁产业科技发展的全局出发,抓住当前国际、国内有利条件,携手共创大业;集中人力、物力和财力开展节能降耗减排的原镁生产新工艺研究,镁合金材料基础理论研究,镁合金材料制备技术与装备的研究开发及镁合金材料扩大应用研究等;形成具有中国特色的以企业为主体,以市场为导向,产学研相结合的镁材料技术创新体系,促进镁产业又好又快发展,为实现镁产业从资源优势向技术优势和经济优势的转变,为把我国从镁资源大国发展成为镁产业强国

贡献力量。《镁合金制备与加工技术》一书的出版,正好适应这种形势的需要,将为镁业的进一步发展起到积极的促进作用。



Shi Dinghuan

国务院参事

Counselor of Counselor's Office of the State Council of China

科技部原秘书长

Former General Secretary of Ministry of Science and Technology of China

2007年3月

March, 2007

序

镁具有低密度、高比强度、高比刚度,良好的阻尼减振性、导热性、可切削加工性和可回收性等特点,被称为新世纪的“绿色”工程材料。因此,镁及镁合金在航空航天、交通运输和电子工业等领域有着重要的应用价值。

镁是地球上储量最丰富的元素之一,我国镁资源非常丰富,为我国镁工业的可持续发展提供了物质保证。近10年来,我国镁工业以年均20.4%的增长速度快速发展,2006年原镁产量已达52.56万t,成为世界镁生产大国、出口大国,连续8年镁产量居世界第一。特别是近几年来,皮江法炼镁技术装备水平不断提高,环保条件有所改善,节能降耗取得了显著进步,产业结构调整取得了新进展,镁合金应用及产业化也取得新成果,镁及镁合金深加工产品品种在增加,开始向高附加值产品转变。

但是,目前我国镁工业整体水平,特别是镁合金深加工技术及应用与发达国家差距较大,突出表现在基础理论研究不够,缺乏关键性核心技术。我国镁工业的发展,必须贯彻科学发展观,依靠科技创新转变增长方式,节能减排,实现产业升级,努力把我国的镁工业建设成为资源节约、环境友好和技术创新型产业。

为了提高镁产业的技术水平,更广泛而有效地推广镁的应用,最大限度地开发利用镁资源,中国有色金属工业协会镁业分会与中国有色金属工业协会有色金属技术交流中心及时组织行业内的专家学者编写、审定,完成了《镁合金制备与加工技术》一书,可喜可贺。

本书作者多年来从事镁冶炼、镁合金及材料加工技术的研究与开发,基础理论扎实,实践经验丰富,曾编写过不少相关著作,在有色金属材料界享有较高的声誉。

本书比较全面地阐述了镁及镁合金生产加工方法与工艺特点,系统地介绍了镁合金分类、牌号、状态、相图、产品性能与用途,并用大量翔实的数据反映了近年来镁及镁合金的最新科技成果,是一部不可多得的镁及镁合金材料制备与加工技术方面的参考书,对从事金属镁及镁合金生产、科研、教学和应用方面的科技人员、管理人员及高校师生将大有裨益。

康毅

Kang Yi

会 长

Chairman

中国有色金属工业协会

China Non-Ferrous Metal Industry Association

2007年3月

March, 2007

前 言

随着许多金属矿产资源的日益枯竭,镁以其资源丰富而日益受到重视,镁及镁合金与其他金属结构材料相比,所具有的一系列优点,在交通运输、电子电器、航空航天和国防军事工业等领域具有极其重要的应用价值和广阔的应用前景,特别是结构轻量化技术及环保问题的需求更加刺激了镁工业的发展。目前,镁及镁合金材料的研究、开发和应用,已成为世界性的课题与普遍关注的热点。特别是20世纪80年代以来,出于对环境和能源问题的考虑,工业发达国家相继制定了各自的镁研究计划,并投入了巨额资金开展研究。我国自2001年开始制订了镁合金开发、应用及产业化的“十五”科技攻关计划,并于2006年制订了镁及镁合金关键技术开发与应用的“十一五”科技支撑计划,取得了一系列科研和产业化成果。然而,由于镁属于密排六方结构金属,塑性变形能力差,加工成板、带、棒、型材困难,目前还未能很好地解决加工成形问题以及镁合金纯净化困难和耐腐蚀差等问题,从而导致镁合金开发与应用及产业化发展缓慢。随着近年来研究开发的不断深入,上述问题可望得到解决。

为了使广大镁及镁合金的冶炼企业、加工企业、应用企业的生产部门、技术部门、质量部门、市场营销部门及采购部门的相关人员以及与镁行业相关的各类使用单位,包括大学、科研院所、检测部门、咨询服务机构和市场贸易机构等行业的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)、表面处理等有关技术;为了充分发挥我国的镁资源优势;为了促进建设镁合金开发应用的技术创新体系,建立具有国际竞争力的镁合金高新技术产业化群体,将镁的资源优势转化为经济优势,中国有色金属工业协会镁业分会与中国有色金属工业协会有色金属技术交流中心于2005年初开始组织编写《镁合金制备与加工技术》一书。同时,本书的编写荣幸地得到了国家发改委“中国金属镁工业发展战略与对策研究”项目和国家科技部“十一五”科技支撑计划项目“镁及镁合金关键技术开发与应用”的资助。

本书的初稿由徐河博士、刘静安教授、谢水生教授编撰,其中:第1、2、3、9、10章及附录由徐河博士编撰;第4、5、7章由刘静安教授编撰;第6、8、11章由谢水生教授编撰。为了进一步完善本书的内容,中国有色金属工业协会镁业分会与中国有色金属工业协会有色金属技术交流中心组织了编委会,分别对各章节进行审阅和修改。编委会(按姓氏笔画排序)由丁培道、史文芳、刘正、刘静安、刘黎明、关绍

康、朱祖芳、李向宇、李华伦、李培杰、吴秀铭、何振波、周昆、孟树昆、赵家生、徐河、徐日瑶、康义、崔建忠、章宗和、曾小勤、谢水生、韩薇等 23 位专家组成。2006 年 12 月编委会又在北京召开会议,对本书进行了终审定稿。会议由中国有色金属工业协会镁业分会吴秀铭会长主持,冶金工业出版社张登科副编审参加了终审定稿会议。

本书全面详细地介绍了镁及镁合金材料的发展现状与展望;镁合金的分类、牌号、状态、化学成分与性能;镁合金的熔炼铸造技术;镁合金塑性成形技术;镁合金材料的热处理与精整矫直技术;镁合金材料的深加工技术及产品开发;镁合金材料的腐蚀及表面处理技术;镁合金新材料及制备新技术的研究开发;镁及镁合金材料的市场分析与应用开发;镁及镁合金废料回收与再生利用;镁及镁合金材料的安全生产与防护等。

本书在系统介绍镁合金熔炼铸造、制备技术、塑性加工、腐蚀与防腐蚀理论技术的基础上,还介绍了大量的镁合金制备和生产工艺,并指出了不同技术各自存在的关键问题及相应的解决方法;特别突出的是,介绍了目前变形镁合金材料的一些最新制备与加工新技术及镁合金研究领域的最新进展。编者参阅了近年来出版的国际会议文集,最新版本图书和各种材料科学杂志的专辑和大量的研究论文、国内外研究动态、文献资料,概括了镁合金当今的发展趋势。可以说,本书是从事镁及镁合金熔炼、加工技术人员的小百科全书。

本书的编撰密切结合生产实际,内容新颖丰富,全面系统,图文并茂,数据翔实,具有很强的实用性和可查阅性;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。

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一些帮助或指导作用。由于镁合金材料正处于发展中,诸如合金的各类标准,一些基础理论远不如铝合金成熟,所以本书局限性和疏漏之处在所难免,真诚希望同行专家、读者给予批评指正并提出宝贵意见。

在本书出版之际,对作者和参与本书修改、终审的全体专家编委一并表示感谢。

中国有色金属工业协会镁业分会
China Magnesium Association

2007 年 3 月

目 录

1 绪论	1	2.2.3 镁合金的热处理	34
1.1 概述	1	2.2.4 镁合金中各种合金元素及它们之间的相互作用和影响	34
1.2 镁的发展历史与原镁的生产方法	1	2.3 镁合金的分类与基本特性	37
1.2.1 镁的发展历史	1	2.3.1 镁合金的分类	37
1.2.2 原镁的生产方法	3	2.3.2 镁合金的基本特性	38
1.3 镁及镁合金的特性与用途	4	2.4 镁合金的牌号和状态表示方法及化学成分	40
1.3.1 镁的基本特性	4	2.4.1 ASTM命名法及镁合金的化学成分	40
1.3.2 镁合金的特点	11	2.4.2 国际标准中镁合金牌号、状态的表示方法	43
1.3.3 镁及镁合金的主要应用领域	12	2.4.3 中国镁及镁合金牌号、状态命名系统及化学成分	44
1.4 镁及镁合金材料的品种、规格、技术质量要求	13	2.4.4 世界各国主要镁合金牌号状态与化学成分对照	47
1.4.1 镁合金铸造材的品种、规格及技术质量要求	13	2.5 主要镁合金的相图、相结构与相组成	56
1.4.2 镁合金加工材的品种、规格及技术质量要求	14	2.5.1 Mg-Al系合金	56
1.5 镁及镁合金材料工业的发展现状与趋势	14	2.5.2 Mg-Zn系合金	58
1.5.1 全球镁工业的发展现状与趋势	14	2.5.3 Mg-Mn系合金	60
1.5.2 中国镁工业的发展现状与趋势	17	2.5.4 Mg-Zr系合金	61
参考文献	23	2.5.5 Mg-RE系合金	62
2 镁合金的分类、牌号、状态、化学成分与性能	25	2.5.6 Mg-Li系二元合金	64
2.1 工业纯镁	25	2.5.7 Mg-Th系二元合金	66
2.1.1 工业纯镁的牌号和化学成分	25	2.5.8 Mg-Ag系二元合金	68
2.1.2 杂质元素对纯镁组织和性能的影响	25	2.5.9 其他二元合金及三元合金的相图选编	69
2.1.3 工业纯镁的性能	26	2.6 镁合金的组织、性能、品种和用途	71
2.1.4 工业纯镁的用途	29	2.6.1 概述	71
2.2 镁合金的冶金特性与合金化原理	29	2.6.2 铸造镁合金	71
2.2.1 镁合金的物理冶金特性	29	2.6.3 变形镁合金	93
2.2.2 镁合金的晶粒细化机理	33	参考文献	116

3 镁合金的熔炼与铸造	120	4.4.1 概述	213
3.1 概述	120	4.4.2 镁及镁合金厚板生产	214
3.2 变形镁合金的熔炼技术	121	4.4.3 镁合金薄板生产	223
3.2.1 镁合金的熔炼方法	121	4.4.4 轧辊的预热、冷却、润滑及 轧辊辊型控制	227
3.2.2 镁合金熔体与气体的相互 作用	121	4.4.5 镁及镁合金板材的热处理、 精整、矫直与包装	229
3.2.3 镁合金熔铸用主要工艺 辅料和熔剂的选择	124	4.4.6 镁及镁合金板材的力学 性能	232
3.2.4 变形镁合金的熔炼工艺	128	4.4.7 镁及镁合金薄带铸轧工艺	235
3.2.5 镁合金的熔炼设备	132	4.5 镁及镁合金的锻造成形	236
3.3 变形镁合金的铸造技术	133	4.5.1 镁及镁合金锻造的特点	236
3.3.1 变形镁合金的铸造方法	133	4.5.2 锻造成形用镁合金及其 可锻性	237
3.3.2 镁合金的铸造工艺	134	4.5.3 镁及镁合金锻造工艺特性	238
3.3.3 镁合金的裂纹倾向性	139	4.5.4 锻造方法与设备	239
3.3.4 镁合金铸锭的偏析	142	4.5.5 工模具准备	239
3.3.5 镁合金铸锭的缺陷和废品	142	4.5.6 坯料准备	240
3.3.6 铸锭的机械加工	143	4.5.7 镁及镁合金的锻压工艺	240
3.3.7 镁合金熔铸时的安全问题	144	4.5.8 锻件的切边与精整	243
3.4 铸造镁合金的成形技术	144	4.5.9 锻件的热处理	243
3.4.1 铸造镁合金材料及部件的 制备方法	144	4.5.10 镁及镁合金锻件的质量 控制	244
3.4.2 镁合金的熔炼与浇注技术	144	4.5.11 镁及镁合金锻造新工艺	246
3.4.3 镁合金的铸造成形	159	4.6 镁合金等温成形技术	247
参考文献	180	4.6.1 镁合金等温成形的特点	247
4 镁合金塑性成形技术	183	4.6.2 镁合金等温成形用设备和 模具	247
4.1 概述	183	4.6.3 镁合金等温成形工艺及 应用举例	248
4.1.1 镁合金的塑性变形特性	183	4.7 镁合金的超塑性成形技术	249
4.1.2 镁合金塑性成形方法	184	4.7.1 概述	249
4.2 镁合金的成形性及基本变形 条件	185	4.7.2 超塑性变形机理及变形 模型	249
4.2.1 镁合金的整体可成形性	185	4.7.3 镁合金超塑性条件	250
4.2.2 镁合金二次成形时的 可成形性	185	4.7.4 细晶镁合金的制备和超塑性 成形工艺	251
4.2.3 镁合金的应力-应变特性	186	参考文献	251
4.3 镁合金的挤压成形技术	200	5 镁合金材料的热处理与精整矫直	252
4.3.1 挤压常用镁合金及挤压 产品断面形状	201	5.1 镁合金的热处理	252
4.3.2 镁合金挤压成形的基本 条件	201	5.1.1 镁合金的主要热处理类型	252
4.3.3 镁及镁合金的挤压工艺	204		
4.4 镁及镁合金轧制技术	213		

5.1.2 工艺操作和工艺参数对镁合金材料热处理性能的影响	259	6.4.10 平底铰钻	316
5.1.3 热处理设备	259	6.4.11 攻丝和板牙套丝	317
5.1.4 热处理质量的控制与检测	260	6.4.12 多工序机械加工	317
5.1.5 镁合金材料热处理缺陷分析	264	6.4.13 铣削	318
5.1.6 镁合金热处理安全技术	265	6.4.14 锯切	319
5.2 镁合金材料的精整、矫直和包装	266	6.4.15 磨削	320
5.2.1 镁及镁合金铸件的矫直与精整	266	参考文献	321
5.2.2 镁合金模锻件的矫直与精整	266	7 镁合金材料的腐蚀及表面处理	324
5.2.3 镁及镁合金板材精整、矫直与包装交货	268	7.1 概述	324
5.2.4 镁及镁合金挤压产品的矫直、精整与包装	271	7.2 镁及镁合金的腐蚀特征与耐蚀性	324
参考文献	274	7.2.1 镁合金的基本特性	324
6 镁合金材料的深加工及产品开发	275	7.2.2 镁及镁合金腐蚀的主要类型	327
6.1 概述	275	7.2.3 镁及镁合金材料典型腐蚀失效形式及主要检测试验方法	328
6.2 镁及镁合金板料的二次成形	275	7.2.4 影响镁及镁合金耐蚀性的因素及提高耐蚀性的途径	333
6.2.1 冷成形	275	7.3 镁及镁合金材料的防腐措施	338
6.2.2 热成形	276	7.3.1 电偶腐蚀的防护措施	338
6.3 镁及镁合金材料的连接技术	289	7.3.2 镁合金组合件的装配保护	339
6.3.1 概述	289	7.3.3 防止应力腐蚀开裂的措施	342
6.3.2 镁及镁合金材料的焊接技术	289	7.4 镁及镁合金材料的表面处理	342
6.3.3 镁及镁合金材料的粘接技术	304	7.4.1 概述	342
6.3.4 镁合金材料的机械连接	305	7.4.2 表面清理和预处理	344
6.4 镁合金制品的机械加工	309	7.4.3 镁及镁合金材料的化学氧化(转化膜)处理	350
6.4.1 概述	309	7.4.4 镁及镁合金材料的阳极氧化(电化学)处理技术	355
6.4.2 镁合金材料的机械加工特性	309	7.4.5 镁及镁合金材料的微弧氧化处理技术	363
6.4.3 机加工刀具	310	7.4.6 镁及镁合金材料的电镀技术	367
6.4.4 切削液	311	7.4.7 镁及镁合金材料含氟协合涂层	373
6.4.5 车削与镗削	312	7.4.8 镁及镁合金材料的化学沉积处理工艺	375
6.4.6 刨削	313	7.4.9 表面热喷铝扩散处理工艺	376
6.4.7 拉削	314	7.4.10 有机涂层工艺与颜料着色	377
6.4.8 钻孔	314	7.4.11 镁材表面耐蚀改性处理新技术	382
6.4.9 铰孔	316	7.4.12 变形镁合金加工材料的	

防腐与表面处理技术	389	8.3.9 镁基复合材料的制备技术	458
7.4.13 镁合金表面处理层性能		8.3.10 AZ31 变形镁合金零件的	
检测方法	393	等温锻压成形	464
7.4.14 镁及镁合金材料的涂油		8.3.11 镁合金粉末挤压技术	466
包装	394	8.3.12 镁合金连续铸轧技术	467
7.4.15 镁及镁合金材料表面处理		8.3.13 复合成形技术	468
过程中的卫生与安全	395	参考文献	468
参考文献	395	9 镁及镁合金材料的市场分析与	
8 镁合金新材料及制备新技术的		应用开发	473
研究开发	398	9.1 镁及镁合金材料的消费结构与	
8.1 概述	398	市场分析	473
8.1.1 镁合金材料基础研究现状	398	9.1.1 消费量与消费结构	473
8.1.2 镁合金材料生产装备的		9.1.2 镁及镁合金应用市场趋势	
开发	399	分析	475
8.2 新型镁合金材料的研发	399	9.1.3 镁合金材料的消费与应用	
8.2.1 高耐蚀性镁合金的研发	399	前景	478
8.2.2 耐热镁合金的研发	400	9.2 镁合金材料在交通运输业上的	
8.2.3 阻燃镁合金的研制	406	应用与开发	478
8.2.4 超轻 Mg-Li 合金新材料		9.2.1 镁材的轻量化效果	478
的研制	406	9.2.2 镁材的生产成本及在交通	
8.2.5 稀土在镁及镁合金中		运输业上竞争力的评估	480
的应用	409	9.2.3 镁合金材料在汽车工业上的	
8.2.6 快速凝固镁合金	410	应用与开发	482
8.2.7 镁基非晶合金	411	9.2.4 镁合金材料在摩托车工业上	
8.2.8 镁基复合材料	416	的应用	487
8.2.9 其他新型镁合金材料	420	9.2.5 镁合金材料在自行车上的	
8.3 镁及镁合金材料制备新技术	425	应用与开发	489
8.3.1 高纯镁精炼工艺的开发	425	9.3 镁合金材料在航空航天工业上的	
8.3.2 镁合金熔炼及保护新技术		应用与开发	491
的开发	427	9.3.1 概述	491
8.3.3 镁合金铸造与压铸技术的		9.3.2 航空航天工业常用镁合金	
发展方向	428	材料的性能与用途	491
8.3.4 镁合金加工技术的		9.3.3 主要航空航天器零部件的	
发展趋向	430	镁合金应用情况	493
8.3.5 镁及镁合金的半固态成形		9.4 镁合金材料在常规武器上	
技术	431	的应用与开发	496
8.3.6 细晶镁合金的制备与镁		9.4.1 概述	496
合金的超塑性成形	442	9.4.2 现代兵器零部件的镁合金化及	
8.3.7 快速凝固/粉末冶金法制备		发展趋势	497
变形镁合金技术	450	9.4.3 兵器工业用典型镁合金零部件	
8.3.8 喷射沉积法制备镁合金	454	举例	498

9.5 镁合金材料在电子工业(家用电器和 3C 产品)上的应用与开发	499
9.5.1 现代电子产品对材料提出的要求	499
9.5.2 镁合金材料在现代电子产品上的应用情况	501
9.6 镁合金材料在核工业上的应用与开发	504
9.7 镁牺牲阳极产品的应用与开发 ..	504
9.8 镁及镁合金在其他领域的应用与开发	505
9.8.1 在冶金工业上的应用	505
9.8.2 在化学工业上的应用	506
9.8.3 在烟火和照明中的应用	506
9.8.4 其他应用	506
9.9 使用镁合金材料制造零件时应注意的事项	507
9.9.1 镁材的设计形状	507
9.9.2 防火措施	509
参考文献	509
10 镁及镁合金废料回收与再生利用	512
10.1 概述	512
10.2 镁合金废料的产生	512
10.3 废镁合金的分类	512
10.4 镁合金废料的前期处理	513
10.5 废镁合金的熔铸方法和生产过程	513
10.5.1 熔剂熔炼法	513
10.5.2 无熔剂熔炼法	514
10.5.3 用废镁生产镁合金锭的工艺要点	514
10.6 镁合金废料在熔炼中的质量控制	515
10.6.1 降低合金中铁的含量	515
10.6.2 非金属夹杂的降低或消除 ..	516
10.6.3 在生产过程中防止外来杂质元素进入镁合金熔体中	517
10.6.4 高纯镁合金的成分控制	518
10.6.5 镁熔液中的除气处理	518
10.7 镁合金的检验方法	519
10.7.1 化学成分的检验	519
10.7.2 耐腐蚀程度的检验	519
参考文献	519
11 镁及镁合金材料的安全生产与防护	520
11.1 概述	520
11.2 镁合金发生燃烧的化学反应机理	520
11.3 镁合金的安全生产条件与要求	520
11.3.1 对管理工作的要求	520
11.3.2 对安全生产条件的要求	521
11.3.3 对操作人员的要求	521
11.3.4 人身与设备安全操作规范 ..	521
11.3.5 镁合金压铸生产过程的	
要求	522
11.3.6 镁合金压铸对设备的要求 ..	523
11.4 各生产工序的安全生产要求和防护措施	523
11.4.1 镁合金熔炼过程中的安全与防护	523
11.4.2 压铸工序的安全要求	524
11.4.3 镁合金热处理安全技术	524
11.4.4 镁合金材料机械加工时的危险及对策	525
11.4.5 镁合金材料在研磨时的危险及对策	526
11.4.6 打磨、抛光、烤漆工序的安全要求	526
11.4.7 物资的安全存储管理要求 ..	526
11.5 消防安全措施	526
参考文献	527
附录 国内外镁及镁合金现行标准目录	528
1 基础标准目录	528
2 产品标准目录	528
3 镁及镁合金分析检测方法标准目录	529
4 其他辅助材料标准目录	529
5 环保安全标准目录	530

Contents

1 Introduction	1
1.1 Summary	1
1.2 History and Production Methods of Primary Magnesium	1
1.3 Properties and Applications of Magnesium and Magnesium Alloys	4
1.4 Classification and Technical Specifications of Magnesium Alloys	13
1.5 Current Status and Development Trends of the Magnesium Industry	14
References	23
2 Magnesium Alloy Systems, Chemical Composition and Performance	25
2.1 Industrial Pure Magnesium	25
2.2 Metallurgy and Alloying Principles	29
2.3 Classification and General Properties	37
2.4 Magnesium Alloy Systems and Chemical Composition	40
2.5 Phase Diagram, Phase Structure and Phase Composition	56
2.6 Microstructure, Properties and Applications	71
References	116
3 Smelting and Casting of Magnesium Alloys	120
3.1 Summary	120
3.2 Smelting Technology for Wrought Magnesium Alloys	121
3.3 Casting Technology for Wrought Magnesium Alloys	133
3.4 Casting Technology for Cast Magnesium Alloys	144
References	180
4 Forming Technology of Magnesium Alloys	183
4.1 Summary	183
4.2 Formability and General Deformation Characteristics	185
4.3 Extrusion Technology	200
4.4 Rolling Technology	213
4.5 Forging Technology	236
4.6 Isothermal Forming Technology	247
4.7 Super-plastic Forming Technology	249
References	251
5 Heat Treatment, Finishing and Straightening of Magnesium Alloys	254
5.1 Heat Treatment of Magnesium Alloys	254
5.2 Finishing, Straightening and Packing of Magnesium Alloy Products	266
References	274
6 Deep Processing and Product Development of Magnesium Alloys	275
6.1 Summary	275
6.2 Secondary Forming of Magnesium Sheets	275
6.3 Technology for Joining Magnesium and Magnesium Alloys	289
6.4 Machining of Magnesium Alloy Products	309
References	321

7 Corrosion and Surface Treating of Magnesium Alloys	324	References	509
7.1 Summary	324	10 Waste Recovery and Recycling of Magnesium Alloys	512
7.2 Corrosion Characteristics and Corrosion Resistance	324	10.1 Summary	512
7.3 Corrosion Prevention	338	10.2 Causes of Magnesium Waste	512
7.4 Surface Treatment	342	10.3 Classification of Magnesium Alloy Waste	512
References	395	10.4 Early Stag Treatment of Waste Magnesium Alloys	513
8 Development of New Materials and New Processing Technology	398	10.5 Smelting and Casting of Waste Magnesium Alloys	513
8.1 Summary	398	10.6 Quality Control for Magnesium Alloy Recycling	515
8.2 Development of New Magnesium Alloy Materials	399	10.7 Testing Methods for Magnesium Alloy	519
8.3 Development of New Processing Technology	425	References	519
References	468	11 Safety and Protective Measures for Magnesium Alloy Production	520
9 Market Analysis and Application Development of Magnesium Alloys	473	11.1 Summary	520
9.1 Usage and Market Analysis of Magnesium and Magnesium Alloys	473	11.2 Chemical Reaction Mechanism of Magnesium Alloy Burning	520
9.2 Development and Application in Communication	478	11.3 Safety Conditions and Requirements for Magnesium Alloy Production	520
9.3 Development and Application in the Aviation and Aerospace Industry	491	11.4 Safety Requirements and Protective Measures for Each Production Procedure	523
9.4 Development and Application in Weapons	496	11.5 In Case of Fire	526
9.5 Development and Application in the Electronic Industry	499	References	527
9.6 Development and Application in the Nuclear Industry	504	Appendix Standards for Magnesium and Magnesium Alloys form Different Countries	528
9.7 Development and Application in Magnesium Alloy Sacrificial Anodes	504	1 Fundamental Standards	528
9.8 Development and Application in Other Fields	505	2 Product Standards	528
9.9 Notes for Producing Magnesium Alloy Products	507	3 Standard Methods for Magnesium and Magnesium Alloy Testing and Analysis	529
		4 Accessory Materials Standards	529
		5 Environmental Protection and Safety Standards	530