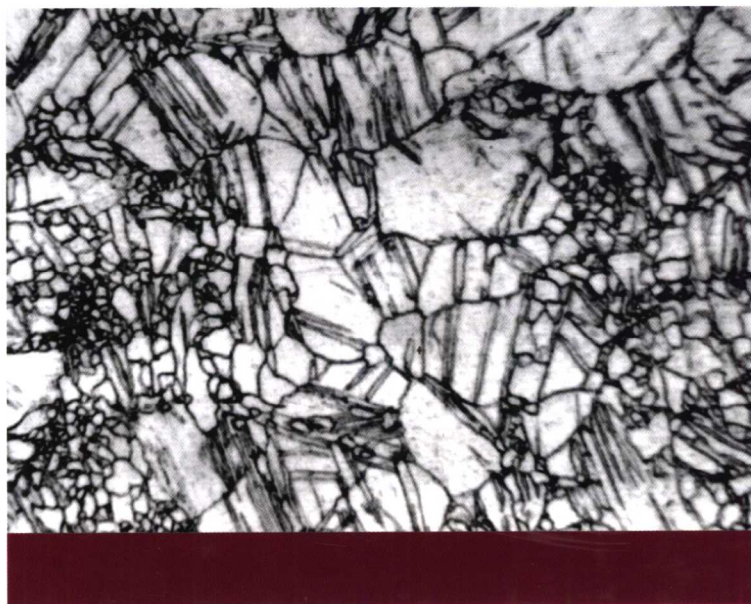


陈振华 主编

变形镁合金



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

变形镁合金/陈振华主编. —北京: 化学工业出版社,
2005. 5

ISBN 7-5025-6987-1

I. 变… II. 陈… III. 镁合金-研究 IV. TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 037438 号

变形镁合金

陈振华 主编

责任编辑: 丁尚林

责任校对: 凌亚男

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

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 25 $\frac{1}{4}$ 字数 515 千字

2005 年 6 月第 1 版 2005 年 6 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-6987-1

定 价: 50.00 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

本书编写人员

主 编 陈振华

参编人员 陈振华 夏伟军 严红革 李落星

程永奇 郭 强 陈 鼎

前 言

变形镁合金是指可用挤压、轧制、锻造和冲压等塑性成形方法加工的镁合金。由于镁合金多为密排六方结构，传统上被视为一种难以塑性变形、压力加工性能差的金属材料，而大多数镁合金又具有较好的铸造性能，因此目前的镁合金产品以铸件，特别是压铸件居多。与铸造镁合金相比，变形镁合金具有更高的强度、更好的塑性和更多样化的规格，在汽车、电子、电器、航空、航天等领域有着十分广阔的应用前景。近年来，工业发达国家对变形镁合金的研究与开发十分重视，合金牌号和产品规格已开始向系列化和标准化方向发展。我国在变形镁合金的研制和开发领域仍处于起步阶段，商业化的变形镁合金产品则更少。但近年来国家和各级地方政府对变形镁合金的研究、开发和产业化等相当重视，并将“镁合金应用与开发”列为国家计委和科技部联合下发的“十五”国家科技发展规划材料领域的重点任务，最终目标是充分发挥我国的镁资源优势，通过建立镁合金技术创新体系，建立具有国际竞争力的镁合金高新技术产业群，将镁的资源优势转化为经济优势。目前国内一大批高等院校和科研单位投入到相关领域的研究，并取得了一系列可喜的成果。

作者近年来在变形镁合金塑性成形理论与技术、合金设计与开发、表面防腐处理以及微晶镁合金的制备等领域开展了广泛研究，采用自主发明的快速凝固、喷射沉积和定向凝固、等径角轧制、异步轧制等新技术成功研制出力学性能优异、牌号和规格多样的薄壁空心型材、板材、锻件以及冲压件。在研究过程中，作者深切感受到变形镁合金的研究涉及很多重要的理论和技术问题，急需一本能够系统阐述变形镁合金相关基础理论和加工新技术方面的著作。考虑到目前国内外尚未出版过此类著作，现有资料仅限于一些零星的文献报道，作者决定编著《变形镁合金》一书。作者曾主编过《镁合金》，主要介绍了镁合金的发展历史、合金体系、铸造加工、表面处理和焊接成形等技术，其特点是内容新颖、丰富和全面。本书的侧重点则有所不同，主要介绍变形镁合金的塑性成形基础理论以及国内外相关领域的新技术、新成果，是《镁合金》一书中有关变形镁合金内容的深化和延伸。两者涵盖了镁合金研究的主要领域，且由“全”到“专”，形成了一个完整的体系。

全书共分九章，第1章是变形镁合金概论，主要介绍变形镁合金的发展概况、应用领域和最新研究进展。第2章介绍变形镁合金的分类、牌号和性能。第3章系统讲述镁合金塑性成形理论，重点包括位错滑移、交滑移和孪生理论。第4章全面介绍了变形镁合金晶粒细化技术及理论。第5章详细讲述镁合金锻造、挤压、轧制、拉拔和冲压等塑性成形技术。第6章为镁合金超塑性成形技术与理论。第7章阐述塑性变形过程中镁合金织物的形成机理和演变规律及其对材料力学性能的影响。最后两章简要介绍变形镁合金热处理与回收技术。本书内容新颖，理论性强，且理论与技术结合紧密，具有很强的实用性。

作者在编著本书时参考并引用了大量的中外文献资料，在此谨向这些作者表示由衷的谢意。同时，在书稿整理过程中得到了湖南大学材料科学与工程学院高文理博士、杨石强博士、程英亮博士、肖平安博士以及博士研究生陈吉华、王慧敏、詹美燕、张昊等人的大力协助，本书的出版得到了化学工业出版社的大力支持，在此一并表示谢意！

本书的出版填补了国内外变形镁合金著作的空白，作者衷心希望本书能够对从事镁合金研究、开发和生产的教师、研究生和技术人员提供有力的帮助，促进我国变形镁合金技术的发展。由于编著者学术水平有限，书中难免出现一些疏漏和错误，殷切期望广大读者批评指正！

陈振华

2005年3月于湖南长沙

目 录

第 1 章 变形镁合金概论	1
1.1 变形镁合金的发展现状	1
1.1.1 概述	1
1.1.2 变形镁合金的应用	3
1.2 变形镁合金的设计与开发	6
1.2.1 新型变形镁合金材料的设计与开发	6
1.2.2 快速凝固变形镁合金的开发	9
1.3 变形镁合金塑性变形理论和加工技术	10
1.3.1 变形镁合金的塑性变形理论	10
1.3.2 镁合金的塑性加工技术	10
1.4 变形镁合金的研究进展	14
参考文献	15
第 2 章 变形镁合金的分类、牌号和性能	21
2.1 变形镁合金的分类和牌号	21
2.1.1 变形镁合金的分类	21
2.1.2 变形镁合金的牌号	22
2.2 变形镁合金的性能	24
2.2.1 概述	24
2.2.2 物理性能	25
2.2.3 化学性能	27
2.2.4 力学性能	27
2.2.5 加工性能	31
2.2.6 热处理制度	33
2.2.7 表面处理工艺	34
2.3 航空航天变形镁合金	34
2.3.1 概述	34
2.3.2 镁-锂系合金	35

2.3.3 镁-稀土系合金	37
2.3.4 镁-钍系合金	41
2.3.5 特殊性能	43
参考文献	47

第3章 镁合金塑性成形理论

3.1 滑移、交滑移和孪生	48
3.1.1 滑移、滑移面和滑移方向	48
3.1.2 滑移系	49
3.1.3 临界剪切应力	49
3.1.4 晶体滑移的位错机制	52
3.1.5 交滑移	53
3.1.6 孪生	54
3.1.7 多晶体塑性变形的特点	57
3.2 镁合金的滑移	58
3.2.1 镁合金的晶体结构与位错特征	58
3.2.2 镁合金中的独立滑移系	62
3.2.3 影响镁合金滑移的主要因素	64
3.3 镁合金中的交滑移	70
3.3.1 Friedel 机制	71
3.3.2 割阶-配对机制	72
3.3.3 锁定-解锁机制	74
3.3.4 三种交滑移机制的比较与转换	78
3.4 镁合金中的孪生	81
3.4.1 镁合金中的孪生模式和孪生要素	81
3.4.2 镁合金孪生晶体学	83
3.4.3 镁合金孪生的位错机制	84
3.4.4 镁合金孪晶之间的交互作用	86
3.4.5 孪生在镁合金塑性变形中的作用	88
3.4.6 影响镁合金孪生的因素	91
3.5 镁合金的晶间塑性变形机制及 GBS	97
参考文献	99

第4章 镁合金的晶粒细化

4.1 概述	101
4.2 变形镁合金铸造过程中的晶粒细化	101
4.2.1 晶粒细化工艺	102

4.2.2	晶粒细化机理	108
4.3	快速凝固/粉末冶金技术	110
4.3.1	镁合金的快速凝固方法	110
4.3.2	快速凝固镁合金的后续成形	113
4.3.3	快速凝固对镁合金组织、结构及性能的影响	114
4.3.4	快速凝固镁合金的强化机制	120
4.3.5	快速凝固技术在镁合金制备中的应用	121
4.3.6	存在的问题及展望	129
4.4	镁合金等径角挤压	130
4.4.1	ECAE 工艺	131
4.4.2	ECAE 镁合金晶粒细化及变形机理	135
4.4.3	ECAE 镁合金组织与性能的变化	137
4.4.4	等径角轧制工艺	146
4.4.5	小结	149
4.5	镁合金中的动态再结晶	149
4.5.1	动态再结晶的概念与特点	149
4.5.2	镁合金动态再结晶的原因及特点	150
4.5.3	镁合金动态再结晶形核机制	153
4.5.4	影响镁合金动态再结晶的基本因素	160
4.5.5	镁合金动态再结晶的应用	166
	参考文献	171
第 5 章 镁合金塑性加工技术		180
5.1	镁合金塑性加工概论	180
5.2	镁合金锻造	182
5.2.1	镁合金的可锻性	182
5.2.2	镁合金的锻造特点	184
5.2.3	锻造用镁合金	187
5.2.4	镁合金锻造工艺	193
5.2.5	镁合金锻件缺陷及其防止措施	208
5.2.6	镁合金锻造研究实例	209
5.3	镁合金挤压	216
5.3.1	挤压设备和模具	217
5.3.2	挤压工艺	219
5.3.3	镁合金挤压制品的组织与性能	225
5.3.4	镁合金挤压实例	235
5.4	镁合金板材轧制	239

5.4.1	镁合金轧制工艺流程	239
5.4.2	镁合金轧制制度的确定	245
5.4.3	轧制工艺对镁合金板材组织性能的影响	249
5.5	镁合金拉拔	257
5.5.1	拉拔工艺	257
5.5.2	镁合金拉拔变形	258
5.6	镁合金板材冲压	267
5.6.1	镁合金板材冲压性能	267
5.6.2	镁合金冲压成形工艺	275
5.6.3	镁合金冲压的应用范围及常见实例	295
	参考文献	296

第6章	镁合金超塑性	299
6.1	超塑性发展概论	299
6.1.1	微晶组织超塑性 (恒温超塑性)	300
6.1.2	相变超塑性 (变温超塑性)	300
6.1.3	其他超塑性	300
6.2	镁合金超塑性变形机制及特点	300
6.2.1	扩散蠕变调节的晶界滑移机制	301
6.2.2	位错运动调节晶界滑移机制	302
6.2.3	液相辅助晶界滑移协调机制	302
6.2.4	空洞协调晶界滑移机制	303
6.2.5	动态再结晶协调晶界迁移机制	304
6.2.6	本构方程	305
6.2.7	镁合金超塑性变形的特点	305
6.3	超塑性镁合金的制备工艺	306
6.3.1	等径角挤压	306
6.3.2	热机处理	308
6.3.3	快速凝固 (RS)/粉末冶金 (PM) 工艺	309
6.4	超塑性镁合金的发展方向	309
6.4.1	高应变速率超塑性镁合金	311
6.4.2	低温超塑性镁合金	312
6.4.3	大晶粒超塑性镁合金	313
6.4.4	镁基复合材料的超塑行为	314
6.4.5	低成本化、安全化和环保化	316
6.5	结束语	316
	参考文献	317

第7章 镁合金织构	321
7.1 引言	321
7.2 织构的极图表达	321
7.2.1 晶体投影法	321
7.2.2 多晶体极图	324
7.2.3 极图的分析	325
7.2.4 反极图	325
7.3 取向分布函数	325
7.3.1 晶体取向及表达	325
7.3.2 取向分布函数	327
7.4 镁合金织构组分及演变规律	329
7.4.1 镁合金纤维织构	330
7.4.2 镁合金板织构	331
7.4.3 镁合金ECAE织构	334
7.4.4 镁合金再结晶织构	335
7.5 镁合金织构的形成机理	341
7.6 晶体学织构对镁合金力学性能的影响	344
7.6.1 镁合金单晶体的各向异性特征	344
7.6.2 织构对镁合金力学性能的影响	345
7.7 影响镁合金织构的基本因素	347
7.7.1 合金元素的影响	347
7.7.2 变形温度的影响	348
7.7.3 变形速度的影响	349
7.7.4 变形程度的影响	349
7.7.5 外加应力的影响	349
7.7.6 晶粒度的影响	350
参考文献	350
第8章 镁合金的热处理	353
8.1 概论	353
8.2 热处理类型	353
8.2.1 退火	354
8.2.2 固溶和时效	355
8.3 不同镁合金系的热处理工艺	358
8.3.1 常规变形镁合金	358
8.3.2 耐热变形镁合金	361

8.4 不同类型工件的热处理	366
8.4.1 锻件热处理和性能	366
8.4.2 挤压件的热处理和性能	367
8.4.3 板材热处理和性能	370
参考文献	371
第9章 镁合金的回收及安全生产	372
9.1 概论	372
9.2 镁合金废料的分类	373
9.3 镁合金的液态回收方式	375
9.3.1 炉前回收	375
9.3.2 厂内回收	375
9.3.3 厂外回收	376
9.4 镁合金的液态回收技术	376
9.4.1 坩埚炉法	376
9.4.2 隔室溶剂槽法	377
9.4.3 双室坩埚熔炼法	377
9.4.4 隔室气体吹泡法	378
9.4.5 气体底吹过滤法	378
9.4.6 减压过滤法	378
9.4.7 向熔融的炉渣中吹氩气法	379
9.5 镁废料回收的品质	380
9.5.1 化学成分	380
9.5.2 纯净度	380
9.5.3 抗腐蚀性	381
9.6 镁合金固态回收技术	381
9.7 镁合金回收应用实例	385
9.7.1 报废轿车上镁合金的回收	385
9.7.2 笔记本镁合金外壳的回收	386
9.8 镁合金安全生产	393
9.8.1 镁合金熔炼安全技术	393
9.8.2 镁合金压铸安全技术	394
9.8.3 镁合金热处理安全技术	395
9.8.4 镁合金加工安全技术	396
9.8.5 镁合金回收安全技术	396
参考文献	397

第 1 章 变形镁合金概论

1.1 变形镁合金的发展现状

1.1.1 概述

镁及其合金是目前最轻的金属结构材料，具有密度低、比强度和比刚度高、阻尼减震性好、导热性好、电磁屏蔽效果佳、机加工性能优良、零件尺寸稳定、易回收等优点，在航空、航天、汽车、计算机、电子、通讯和家电等行业已有多年的应用历史^[1]。尽管如此，由于受材料制备、加工技术、抗腐蚀性能以及价格等因素的制约，镁合金尤其是变形镁合金的应用量仍远远落后于钢铁和铝合金。在材料领域里还没有任何材料像镁那样，其发展潜力和实际应用现状之间存在如此大的差异，其主要原因之一是过去镁没有找到巨大的应用市场。近年来，对汽车轻量化和环保要求的不断提高以及能源日趋紧张激发了人们对镁的极大兴趣^[2]。对镁的需求的迅速增加极大地刺激了镁工业的迅速发展，人们也逐步认识到应该强化镁在汽车、交通等民用领域中的应用研究，必须改变过去那种强调以航空、航天工业作为镁工业持续发展动力源泉的思想。

大多数镁合金具有密排六方结构，因此人们一直认为镁合金是一种难以塑性变形、压力加工成形性能差的金属材料。同时，大多数镁合金又具有较好的铸造性能，使得目前镁合金产品以铸件，特别是压铸件居多，塑性加工产品极少。然而，铸件的力学性能不够理想，产品形状尺寸存在一定的局限性且容易产生组织缺陷，导致镁合金的使用性能和应用范围受到很大限制。因此，变形镁合金的研究已成为世界镁工业发展中的重要方向，并已经取得了很多重要的成果。图 1-1 为镁合金成形技术发展状况示意图，与目前较成熟的镁合金铸造技术（包括提高镁合金抗蠕变性能技术、先进薄壁铸造和触变铸造技术等）相比，镁合金的锻造、挤压、轧制、拉拔、冲压等塑性加工技术与超塑成形技术的发展则相对缓慢，造成这种局面的主要原因有以下几点：

① 镁合金的塑性变形能力较差，采用传统的塑性加工技术难以解决这一问题；

② 对镁合金的塑性变形理论研究不够深入，变形镁合金的研制缺乏理论

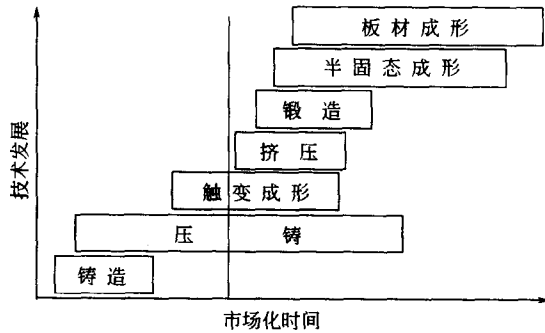


图 1-1 镁合金成形技术发展示意图

指导；

- ③ 未能发展出行之有效的变形镁合金加工成形新技术；
- ④ 相对于铸造产品而言，变形镁合金的成本更高。

图 1-2^[3]对比了变形镁合金和铸造镁合金的强度指标。由图可见变形镁合金的力学性能明显优于铸造镁合金。研究表明，镁合金在热变形（如挤压、轧制、锻造等）后组织得到显著细化，铸造组织缺陷被消除，从而产品的综合力学性能大大提高。通过塑性加工可以生产出尺寸、规格多样的棒、管、型材、线材、板材及锻件产品，并且可以通过调整塑性变形和热处理工艺来控制材料的组织和性能，获得比镁合金铸件更高的力学性能，同时可以满足不同场合对镁合金结构件使用性能的要求，扩大镁合金的应用范围。国际镁协会（International Magnesium Association, IMA）在 2000 年提出了一项发展镁合金材料的长远计划，即研究和开发新型变形镁合金，开发变形镁合金加工新技术、新工艺，生产高质量的变形镁合金产品，这也代表了当今国际镁工业的发展趋势。

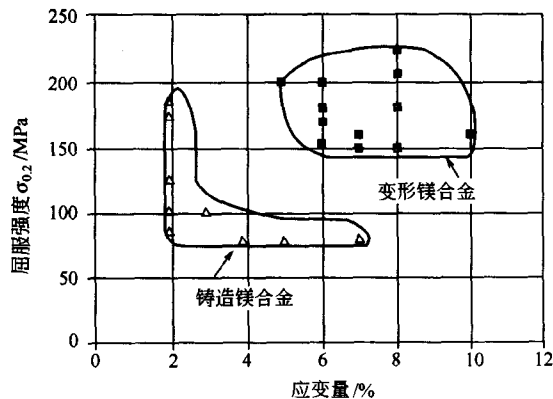


图 1-2 变形镁合金和铸造镁合金屈服强度的对比^[3]

美国、日本等工业发达国家对变形镁合金的研究与开发十分重视，合金牌号

和产品规格已开始向系列化和标准化方向发展。其中美国的变形镁合金材料体系最为完备，合金系列有 Mg-Al、Mg-Zn、Mg-RE、Mg-Li 和 Mg-Th 等，产品类型有板材、棒材、型材、线材及锻件^[4,5]，并且开发出了快速凝固高性能变形镁合金、非晶态镁合金以及镁基复合材料。1997 年，美国 SAE (Society of Automotive Engineers, Inc.) 还专门为变形镁合金产品制定了标准。2003 年美国汽车材料联合体 (The US Automotive Materials Partnership, USAMP) 为了开发汽车发动机和变速箱、油盘等发动机周边部件的拉深件，组织了 42 家公司和 2 个团体 (国际镁协会和北美压铸协会) 进行共同研究。德国在 1995 年开始了 SFB390 计划，在“关于镁特定领域研究”课题支持下，由两所大学牵头，56 所大学共同参加，对变形镁合金进行了重点研究。此后不久该国又在新合金系开发、原材料制备、压铸技术、塑性加工工艺、焊接、表面处理等实用化研究方面，进行了官、产、学相结合的研究。德国联邦教育研究部、德国学术协会以及欧洲共同体均对此项研究给予了支持，共立项 44 个，其中压铸镁合金和变形镁合金在汽车领域的应用研究成果最为突出。日本于 1991 年就在世界上率先成立了镁协会，为了解决地球资源枯竭和环境污染问题，日本在 1999 年由文部省组织实施了“先进镁合金科学与技术平台” (Platform Science and Technology for Advanced Magnesium Alloy) 计划^[6]，着重研究新合金系、新工艺，开发超高强变形镁合金材料。此外，英国开发出的 MgAlB 合金挤压材被用于 Magnox 核反应堆燃料罐。以色列最近也研制出了用于航天飞行器，力学性能和耐蚀性能均十分优异的变形镁合金材料。最近，荷兰 Delft 科技大学对 AZ31、AZ61、AZ80 以及含 Ca 和 Sr 元素的高温镁合金 MRI153 等的均匀化处理、等温挤压工艺及表面处理技术进行了全面系统的研究，并开发出了一系列适合航空用的镁合金型材。法国和俄罗斯开发了鱼雷动力源用变形镁合金阳极薄板材料。

我国在变形镁合金的研制 and 开发领域仍处于起步阶段，商业化的变形镁合金产品很少。近年来，国家和各级地方政府对镁合金，特别是变形镁合金的研究、开发和产业化等相当重视。我国已将“镁合金应用与开发”列为国家计委和科技部联合下发的“十五”国家科技发展规划材料领域的重点任务，最终目标是充分发挥我国的镁资源优势，通过建立镁合金技术创新体系，建立具有国际竞争力的镁合金高新技术产业群，将镁的资源优势转化为经济优势。目前国内一大批高等院校和科研单位投入到相关领域的研究，并取得了可喜的成果。编著者对镁合金变形机理进行了深入研究，并成功地研制出不同牌号合金的薄壁空心 and 分流模型材、厚度为 0.3mm 的板材以及不同形状、规格的冲压件。

1.1.2 变形镁合金的应用

变形镁合金一般是指可用挤压、轧制、锻造等塑性成形方法加工成形的镁合金。从 20 世纪 40 年代开始，变形镁合金已经开始应用于汽车、航空、航天、国防军工等领域，进入 20 世纪 90 年代后期，变形镁合金产品开始用于汽车、交通车、电子以及其他民用产品领域。

1.1.2.1 变形镁合金在航空航天领域中的应用

镁合金由于密度低，能够有效减轻零部件的质量，很早就应用于航空、航天工业^[1,7,8]。特别是 Mg-Li 系合金具有很高的比强度、比刚度和塑性，是航空航天领域最具有前途的金属结构材料之一。座舱架、吸气管、导弹舱段、壁板、蒙皮、直升机上机闸等大都采用 Mg-Li 合金制件。

采用镁合金部件替代铝合金，可以解决铝合金机翼的疲劳问题。早在 20 世纪 20 年代，镁合金锻件已开始用于制造飞机螺旋桨，当时每架 B-36 重型轰炸机使用了 4086kg 的镁合金薄板；喷气式歼击机“洛克希德 F-80”的机翼也是使用镁合金制作的，由于采用了镁合金，使其结构零件的数量从 47758 个减少到 16050 个；“德热米奈”飞船的起动火箭“大力神”中曾使用了 600kg 的变形镁合金；“季斯卡位列尔”卫星中也曾使用了 675kg 的变形镁合金；直径约 1m 的“维热尔”火箭壳体是用镁合金挤压管材制造的。我国研制的航空机轮及刹车装置上也使用了镁合金。

随着镁合金制备技术的发展，材料的性能如比强度、比刚度、耐热强度和抗蠕变性能等不断提高，其应用范围也不断扩大。目前其应用领域包括各种民用、军用飞机的发动机零部件、螺旋桨、齿轮箱、支架结构以及火箭、导弹和卫星的一些零部件等。

1.1.2.2 变形镁合金在汽车工业中的应用

采用镁合金制造汽车零部件具有一系列优点，如：可以显著减轻车身质量、降低油耗、减少尾气排放量、提高零部件的集成度、降低零部件加工和装配成本、提高汽车设计的灵活性等。据估计，机动车辆每减重 10% 可以节省燃料 5.5%^[9]，相应地也可以减少废气排放量。在汽车上使用镁合金零件可以提高汽车抗震及耐碰撞性能，改善汽车的刚度，提高废旧零部件的回收率，提高汽车的安全性和可操作性。在汽车工业中变形镁合金板材可用于制备车身零部件，锻件可用于制备汽车底盘承载件^[7]。德国大众（奥迪）汽车公司开发了镁合金汽车覆盖件的热冲压成形技术，成功地加工出了汽车内门板。与钢门相比，采用内镁外铝的混合车门可减重 50%，与铝门相比可减重 20%。此外，从冲压性能角度考虑，镁合金板材冲压杯形件时在 448K 时的极限拉深比可达 2.0，在 498K 时可达 3.0，超过了钢板和铝板在室温下的极限拉深比（两者分别为 2.2 和 2.6）。Volkswagen 1 升新款样车的设计中使用了更多的镁合金，该车选用了镁合金管材作空心支架，碳纤维增强复合材料作覆盖件，与铝合金空心支架相比减重了 13kg。目前影响变形镁合金在汽车工业广泛应用的关键因素是缺少工业化的生产技术，未能很好地解决塑性变形能力差和腐蚀问题，另外产品的价格偏高，质量稳定性也有待进一步提高。

1.1.2.3 变形镁合金在 3C 领域中的应用

随着现代电子技术的发展，对电子器件用结构材料及部件的性能提出了越来越高的要求。传统的塑料和铝材已逐渐难以满足电子器件轻、薄、小型化以及安

全、环保的发展要求，从而变形镁合金成为制造电子器件壳体的理想材料。近十年来，世界上电子工业发达的国家，特别是日本和欧美一些国家在镁合金产品的开发方面开展了大量工作，并取得了重要进展。一大批重要电子产品在使用镁合金后，取得了理想的效果。1998年以后日本所有的笔记本电脑厂商均推出镁合金外壳的机型，目前38cm以下的机种已全面使用镁合金作为外壳。我国的联想、华硕等笔记本电脑1999年也部分采用了镁合金外壳。采用镁合金制造相机的顶盖、前盖、反光镜箱和机身，提高了相机刚度、精度和耐久度，并使得相机质量变轻、结构变小，且易于携带，目前主要用于数码相机的机壳制造^[10]。但是，这些产品大都采用压铸法制造，存在产品规格尺寸受限、力学性能差等局限。采用塑性加工技术生产该产品，不仅可提高产品性能和质量，还可提高生产效率。因此，变形镁合金在3C领域中具有广阔的应用前景。鉴于变形镁合金塑性成形技术的限制，目前采用塑性成形的方法制造该产品还只是处于实验室研究阶段，工业化生产尚未见报道。

1.1.2.4 变形镁合金在国防军工领域中的应用

国防军工领域很早就已开始应用变形镁合金产品。20世纪40年代开始采用变形镁合金制造装填器杆（挤压件）、航空火箭发射器（挤压件）、地面导弹发射器（挤压件）、T-31型20mm加农炮（挤压及铸造件）、SIG33 15cm枪托架（铸造和锻造件）等。随后，变形镁合金又被用于制造控制系统雷达（多种方法制造）、M113运输机地板（有花纹的金属板）、M113壳体结构件（Mg-Li合金板材）和底板炮手站台（挤压件）、M116运输机仓顶拱部件和底板（挤压件和板材）、迫击炮基板（锻件）、XM102 105mm榴弹炮炮架架尾（板材）、民兵导弹牵引车（板材和挤压件）、野外保养隐蔽所和直升机部件（挤压件）等。20世纪80年代以后，为了实现武器轻量化，镁合金在军事领域中的应用进一步扩大。

1.1.2.5 变形镁合金在其他领域中的应用

在办公、家用和体育用品方面，由于经过塑性变形后的镁合金产品具有高的强度和刚度，以及轻巧、美观、可回收等优点，可替代许多塑料制品，成为近年来变形镁合金材料不可忽视的一个应用领域。在办公设备方面，变形镁合金用于制备铅笔刀（挤压件）、打印机卷轴（挤压件）、磁带卷轴（板材及挤压件）、记录磁盘（板材）等。此外，变形镁合金还被应用于电力工业、家庭消费品、家具、车床设备、办公室设备、光学设备、运动器械和医疗器械等众多领域，应用非常广泛^[11]。

在工具方面，镁合金锻件可以作为钳子和扳手的把手，也可以作为固定扳手、棘轮扳手、轻便的工具等。

在家庭消费品方面，镁合金被用于制造手提箱（板材和挤压件）、公文袋（挤压件）、梯子（挤压件）、折叠椅（挤压件）、化妆品罐、打火机外壳、安全帽等。

在运动器械方面，采用镁材的零部件有淡水用独木舟和船体（板材和挤压

件)、背包架(挤压件)。与一般铝合金相比,采用高强度镁合金材料制成的网球拍、弓箭手柄具有更好的抗拉、抗扭强度及耐疲劳极限。

在自行车领域^[12],由于镁合金密度小,比强度高,耐冲击,阻尼性好,制造的自行车轻便、舒适。镁合金自行车车架仅重 1.4kg,整车重 4kg。目前已开发出符合 ASTM B107 规范要求的镁合金管材和棒材,成品车有镁合金登山车、折叠车、轮椅车,零件有曲柄、竖管、夹器、车圈和车架附件。

1.2 变形镁合金的设计与开发

1.2.1 新型变形镁合金材料的设计与开发

目前,人们已经开发出了许多变形镁合金并形成了一定的系列,变形镁合金的应用范围越来越广泛,急需开发出各种规格、型号的新型变形镁合金,以满足不同环境对变形镁合金使用性能的要求。因此,新型变形镁合金的设计和开发已经成为当前乃至未来的一个重要发展方向。目前,变形镁合金的设计主要以多元微合金化为出发点,以热力学计算为理论基础,并通过结合分子轨道理论计算出的特定参数来预测合金的室温强度和高温强度^[13]。通过研究制备工艺对合金元素在镁合金中固溶度的影响规律、阐明合金化元素在镁合金中的作用机理、揭示合金元素对材料强韧性、耐热性能等的影响规律及机理,采用固溶强化、沉淀强化、细晶强化以及复合强化等手段提高材料的综合性能以及开发新型超轻、高强、耐蚀和耐热变形镁合金是目前镁合金设计的研究重点。

1.2.1.1 超轻变形镁合金的开发^[14,15]

超轻镁合金主要指 Mg-Li 系合金,其研究和开发具有特殊意义。在镁中加入锂元素后其结构和性能发生特殊变化。首先,添加 Li 可进一步降低镁合金的密度。Mg-Li 系合金是迄今为止最轻的金属结构材料,日本已成功地制备出密度小于水的 Mg-Li 合金,并应用在航天器上。其次,锂的加入可大大提高合金的塑性,使合金具有优良的冷、热变形能力。虽然 Mg-Li 合金固溶强化值和加工硬化效应较低,但是其比强度比常用镁合金的高。如果再加入适当元素,还可进一步提高 Mg-Li 合金的强度。

二元 Mg-Li 合金的抗蚀性和耐热性能均较差。通过多元微合金化,在 Mg-Li 合金中加入 Mn、Al、Sn、Cd 等元素可以有效地改善合金的抗蚀性和耐热性。当 Mn 含量低于 4% (质量) 时添加锰能提高 Mg-Li 合金抗蚀性,且效果最为显著。Cd、Al、Sn 等元素对 Mg-Li 合金抗蚀性的影响与含量有关。当 Cd 含量小于 4% (质量) 时,添加 Cd 可提高合金的耐蚀性,但超过 4% (质量) 时则会降低其抗蚀性;而对于 Al 和 Sn,当其含量在 (0.6~1.0)% (质量) 范围内时,合金的抗蚀性随着元素含量的增加而下降;当超过 1.0% (质量) 后,其抗蚀性随含量的增加而稍有提高。在 Mg-Li 合金中添加少量的 Al 和 Ca 不但有助于合