



先进镁合金制备与加工技术

巫瑞智 张景怀 尹冬松 编 著
张密林 主 审



科学出版社

先进镁合金制备与加工技术

巫瑞智 张景怀 尹冬松 编著
张密林 主审

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书总结了作者近几年在耐热镁合金、超轻镁锂合金、镁合金的先进加工技术和复合技术、镁合金腐蚀及其防护技术等方面的研究工作,同时对国内外近年来在这些方面的研究现状进行了综述。本书内容共七章,分别对高强耐热镁合金、超轻镁锂合金、超塑性镁合金、镁合金复合技术、镁合金先进加工技术、镁合金腐蚀与防护等先进材料与先进技术进行了系统的论述。

本书可作为高等院校、科研院所材料科学与工程、冶金工程、腐蚀与防护等相关领域的教师、研究工作者、研究生和工程技术人员的教学参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

先进镁合金制备与加工技术/巫瑞智,张景怀,尹冬松编著. —北京:科学出版社,2012.6

ISBN 978-7-03-034859-3

I. ①先… II. ①巫…②张…③尹… III. ①镁合金-加工-研究
IV. ①TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 131806 号

责任编辑:牛宇锋 / 责任校对:林青梅
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 6 月第一次印刷 印张:24 1/2

字数:484 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着全球工业化进程的推进和资源的大规模开发利用，各种金属资源（锌、铜、铝、铁等）正日益贫化，需要寻求新的金属替代材料。镁是地球上储量最丰富的元素之一，与其他金属不同，镁合金作为一种轻质工程材料，其潜力尚未充分挖掘出来，其开发应用还远不如钢铁、铝、铜等成熟。在很多传统金属矿产趋于枯竭的今天，加速开发镁金属材料是社会可持续发展的重要措施之一。

镁合金是目前最轻的工程金属材料。镁的密度为 1.738g/cm^3 ，约为铝的 $2/3$ 、钛的 $2/5$ 、钢的 $1/4$ 。同时镁合金还具有比强度、比刚度高，阻尼减振性好，电磁屏蔽和导热性能强，易切削加工和易于回收等一系列独特的优点，因此，镁合金被誉为“21 世纪绿色工程材料”。进入 21 世纪，国际大环境对于结构件（如航空航天、汽车、3C 产品等结构件）轻量化和节能、减排的要求日益强烈。在国防军事领域，飞行器自身的特点和工作环境的特殊要求凸显出轻质镁合金不可替代的优点，降低重量能够提高飞行器的机动性能，还可以降低航天器（火箭、飞船等）的发射成本。另外，降低重量意味着可以提高武器的射程和命中精度。在民用方面，随着人类社会的进步，对生存环境保护的要求进一步提高。例如，对现代汽车减重、节能、降耗的要求不断提高，轻量化成为汽车选材的重要目标，镁合金成为汽车工业材料设计中的理想新材料。此外，镁合金也可替代工程塑料，满足 3C（计算机、通信、消费类电子）产品的轻、薄、小型化，高集成度以及环保方面的要求。因此，在资源、高科技、环境成为人类可持续发展的首要前提下，镁及镁合金作为一种对保持社会可持续发展具有重要战略意义的新材料，在全球掀起了新的开发应用热潮。

20 世纪 90 年代以来，各工业发达国家高度重视镁合金的研究与开发，美国、日本、德国、澳大利亚等相继出台了各自的镁研究计划，把镁原料作为 21 世纪的重要战略物资，加强了镁合金在汽车、计算机、通信及航空航天等领域的应用开发研究。在我国，镁是少有的几种优势金属资源之一。在过去的十几年里，我国的镁工业从弱小到壮大，直到目前已成为世界上原镁生产的大国。但由于镁的深加工技术相对落后，我国镁的生产和出口还多以初级产品为主，远不能称为镁生产的“强国”。从 2000 年开始，在师昌绪院士等专家的直接推动下，我国镁合金的研究和应用逐渐取得举世瞩目的成绩，逐步从镁生产大国向镁研发和应用强国迈进。我国在“十五”和“十一五”期间，均曾将有关镁和镁合金的开发、应用与产业化列入国家科技攻关计划和国家高技术研究计划（863 计划），

并在“十一五”期间，把“高性能镁合金加工与制备中的关键基础问题”列为国家重点基础研究发展计划（973计划）。在过去的十几年里，我国在高性能镁材料的研究、镁加工装备的开发以及镁合金深加工产品的开发应用方面都取得了较大的进展。从镁产业的角度来讲，我国已经初步形成从原材料到深加工再到应用的完整产业链；从镁研究开发的角度来讲，我国已经初步形成从基础研究到应用研究再到产品开发的完整科研开发体系。这表明，我国镁的开发和应用已经进入了一个新的发展时期，正朝着健康、强大和可持续发展的目标迈进。

目前，国内外已有一些知名学者编著了镁合金相关方面的著作，但大多是系统地介绍镁合金知识或涉及的仅为镁合金某一方面的研究。本书作者近年来工作在镁合金研究第一线，在高性能镁合金制备与加工技术方面开展了一些研究，并取得一些研究成果，内容涉及高强耐热镁合金、超轻镁锂合金、镁基复合材料、生物医用镁合金及镁合金的先进成形技术等诸多目前镁合金研究的热点。本书即是在这些工作基础上对现有研究成果进行的总结，同时参考国内外近年来的相关文献进行综述，内容主要涉及当前镁合金的研究前沿领域，着重介绍镁合金的先进成形技术、高强耐热镁合金、超轻镁锂合金、超塑性镁合金、镁基复合材料、镁合金的腐蚀防护及生物医用腐蚀研究。

本书在编写时融合了目前国内外镁合金领域同行的最新研究成果，在书中难免有注解遗漏之处，望同行见谅，谨向书中引用文献的作者表示由衷的谢意。作者近几年的研究工作得到了国内镁合金领域许多教授和专家的帮助，同时，国家自然科学基金和黑龙江省青年学术骨干支持计划等项目对作者的研究工作给予了支持，在此表示衷心的感谢。

本书共七章，张景怀参与编写了第1章、第2章和第4章；巫瑞智参与编写了第3章和第5章；尹冬松参与编写了第6章和第7章；巫瑞智负责全书的统稿。全书内容由张密林教授负责主审。

作者衷心希望本书能对从事镁合金工作的学者、科研开发人员、生产技术人员有所帮助，对我国镁业及镁合金材料的发展起到一定的推动作用。

由于作者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请广大读者批评指正，作者将不胜感激。

作者

2012年5月1日

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 镁的特性	1
1.1.1 镁的物理化学性质	1
1.1.2 镁的力学性能	2
1.1.3 镁的化学性质	3
1.2 镁——21 世纪绿色工程材料	4
1.2.1 丰富的镁资源	4
1.2.2 性能和价格优势	4
1.2.3 减重节能效应	6
1.2.4 生物效应	7
1.3 镁合金的发展概况	8
1.3.1 镁和镁合金的发展简史	8
1.3.2 镁合金存在的问题	9
1.3.3 镁合金的发展方向	11
1.3.4 镁合金的发展前景	14
参考文献	15
第 2 章 高强耐热镁合金	17
2.1 合金元素对高强耐热镁合金的影响	18
2.1.1 稀土元素	18
2.1.2 碱土元素	23
2.1.3 第 IV、V 族元素	25
2.2 高强耐热镁合金的分类及性能	26
2.2.1 含稀土的高强耐热镁合金	26
2.2.2 不含稀土的高强耐热镁合金	39
2.3 新型高强耐热镁合金的设计思路	53
2.4 新型高强耐热镁合金的研究开发	54
2.4.1 Mg-Al-RE 系压铸合金的研究开发	54
2.4.2 Mg-RE-Zn 系合金的研究开发	73
2.4.3 Mg-RE 基合金的研究开发	77
参考文献	101

第 3 章 超轻镁锂合金	109
3.1 镁锂合金的性质	109
3.2 镁锂合金的发展历程	111
3.3 镁锂合金的发展现状	113
3.4 镁锂合金的合金化研究	113
3.4.1 Al、Zn 对镁锂合金组织与性能的影响	114
3.4.2 稀土元素对镁锂合金组织与性能的影响	115
3.4.3 Ca 对镁锂合金组织与性能的影响	121
3.4.4 Ag 对镁锂合金组织与性能的影响	123
3.5 镁锂合金的时效特性研究	123
3.6 典型镁锂合金的组织 and 性能	124
3.6.1 Mg-5Li-3Al-2Zn-xRE (LAZ532) 合金	124
3.6.2 Mg-8Li-1Al-xY (LA81-xY) 和 Mg-8Li-3Al-xY (LA83-xY) 合金	131
3.6.3 Mg-8.5Li-xCe 合金	136
3.6.4 Mg-5.6Li-3.37Al-1.14Ce 合金	139
3.6.5 Mg-5.5Li-3.0Al-1.2Zn-1.0Ce 合金	142
3.6.6 Mg-16Li-5Al-xCe 合金	146
3.6.7 Mg-5Li-3Al-2Zn-xSn 合金	151
3.6.8 LA141-xNd 合金	154
3.6.9 Mg-6Li-3Al-xCa 合金	158
3.6.10 Mg-5Li-3Al-2Zn-xAg 合金	163
3.6.11 Mg-5Li-3Al-2Zn-xCu 合金	167
3.6.12 挤压态 Mg-8Li 合金的超塑性	173
3.7 镁锂合金的应用	178
3.7.1 镁锂合金在航空航天领域的应用	178
3.7.2 镁锂合金在军事领域的应用	180
3.7.3 镁锂合金在民用领域的应用	181
参考文献	181
第 4 章 超塑性镁合金	187
4.1 超塑性的发展概况	187
4.2 超塑性变形的特点与机理	188
4.2.1 超塑性现象的分类及特点	188
4.2.2 镁合金超塑性变形的机理及特点	190
4.3 超塑性镁合金的制备工艺	192
4.3.1 大挤压比热挤压和反复轧制	192
4.3.2 等径角挤压	193

4.3.3	快速凝固/粉末冶金技术	194
4.4	镁合金的超塑性加工方式	195
4.4.1	镁合金的超塑性气胀成形	195
4.4.2	一阶段超塑性拉伸及两阶段超塑性拉伸	196
4.4.3	超塑性压缩	196
4.4.4	超塑性扩散连接	197
4.5	超塑性镁合金的发展趋势	198
4.5.1	高应变速率超塑性镁合金	198
4.5.2	低温超塑性镁合金	218
4.5.3	大晶粒超塑性镁合金	229
4.5.4	低成本化、安全化和环保化	243
	参考文献	244
第5章	镁基复合材料与复合技术	248
5.1	镁基复合材料的制备方法及其工艺	248
5.1.1	传统制备方法	248
5.1.2	其他制备方法	254
5.2	镁基复合材料的增强相	263
5.2.1	SiC 增强体	264
5.2.2	B ₄ C 增强体	267
5.2.3	TiC 增强体	268
5.2.4	TiB ₂ 增强体	270
5.2.5	氧化物颗粒增强体	272
5.2.6	Mg ₂ Si 颗粒增强体	273
5.2.7	晶须、纤维增强体	277
5.3	镁锂基复合材料	282
5.3.1	镁锂基复合材料的制备工艺	283
5.3.2	镁锂合金增强相的种类和特性	288
5.3.3	提高 Mg-Li 基复合材料性能的途径	299
5.3.4	Mg-Li 基复合材料制备方法的拓展	300
5.4	镁基复合材料存在的问题与展望	305
5.5	镁基复合材料的应用	307
	参考文献	307
第6章	镁合金的先进加工技术	312
6.1	压铸	312
6.2	挤压铸造	315
6.3	镁合金的半固态加工	320

6.4	镁合金的超塑性加工	322
6.5	镁合金的挤压变形	323
6.6	镁合金的轧制技术	327
6.7	镁合金的焊接	330
6.7.1	镁及镁合金的焊接基础	330
6.7.2	镁合金的焊接方法	330
6.7.3	镁锂合金的焊接	335
	参考文献	342
第7章	镁合金的腐蚀与防护	345
7.1	镁合金腐蚀的分类	345
7.1.1	自然氧化	345
7.1.2	电化学腐蚀	346
7.1.3	高温腐蚀	347
7.2	镁合金的表面腐蚀膜	347
7.2.1	纯镁的腐蚀表面膜	347
7.2.2	Al元素对镁合金的腐蚀表面膜的影响	348
7.2.3	Zn元素合金化对腐蚀表面膜的影响	348
7.2.4	Ca元素合金化对腐蚀表面膜的影响	349
7.2.5	稀土元素对镁合金表面腐蚀膜的影响	349
7.3	镁合金的应力腐蚀	350
7.4	腐蚀环境对镁合金腐蚀的影响	352
7.4.1	大气腐蚀	352
7.4.2	酸雨腐蚀	355
7.4.3	土壤腐蚀	356
7.4.4	含Cl ⁻ 水溶液腐蚀	358
7.5	镁合金腐蚀的防护	360
7.5.1	高纯化	361
7.5.2	合金化	361
7.5.3	表面处理	367
7.6	镁合金的生物腐蚀研究	375
7.6.1	镁合金的腐蚀机理	376
7.6.2	腐蚀速率及pH变化	377
7.6.3	植入材料的体内腐蚀行为	379
7.6.4	镁合金体内腐蚀与体外腐蚀的差异	379
	参考文献	380

第 1 章 绪 论

1.1 镁的特性

1.1.1 镁的物理化学性质^[1]

金属镁外观呈银白色，在元素周期表中属于ⅡA族元素，有²⁴Mg (78.98%*)、²⁵Mg (10.05%)、²⁶Mg (10.97%) 三种同位素。镁的基本性质^[2]见表 1-1。

表 1-1 镁的基本性质

性 质	数 值	性 质	数 值	
原子序数	12	熔点/K	923±1	
化合价	2	沸点/K	1380±3	
相对原子质量	24.3050	再结晶温度/K	423	
原子体积/(cm ³ /mol)	14.0	熔化潜热/(kJ/kg)	360~377	
原子半径/nm	0.162	气化潜热/(kJ/kg)	5150~5400	
离子半径/nm	0.065	升华热/(kJ/kg)	6113~6238	
泊松比	0.33	燃烧热/(kJ/kg)	24900~25200	
室温密度/(g/cm ³)	1.738	比热容 (293~373K)/[kJ/(kg·K)]	1.03	
电阻温度系数 (273~373K)/10 ⁻³	3.9	热膨胀系数 (298K)/(10 ⁻⁶ /K)	26	
电阻率 ρ/(nΩ·m)	47	MgO 生成热 Q _p /(kJ/mol)	0.6105	
273K 时的电导率/[10 ⁶ /(Ω·m)]	23	结晶时的体积收缩率/%	3.97~4.2	
热导率 λ/[W/(m·K)]	153.6556	磁化率 φ/10 ⁻³ (MKS 单位制)	6.27~6.32	
表面张力 (945K)/(N/m)	0.563	声音在固态镁中的传播速度/(m/s)	4800	
收缩率/%	固-液转变	标准电极电位/V	氢电极	-1.55
	熔点至室温		甘汞电极	-1.83

镁的晶体结构为密排六方 (hcp)，单胞内沿主要晶面和晶向的原子排布如图 1-1 所示。低于 225℃ 时，镁的主要滑移系为 {0001}⟨11 $\bar{2}$ 0⟩，次滑移系为 {10 $\bar{1}$ 0}⟨11 $\bar{2}$ 0⟩；高于 225℃ 时，滑移还可以在 {10 $\bar{1}$ 1}⟨11 $\bar{2}$ 0⟩ 上进行。孪晶主要出现在 {10 $\bar{1}$ 2} 晶面族上，二次孪晶出现在 {30 $\bar{3}$ 4} 晶面族上。在高温下，{10 $\bar{1}$ 3} 晶面族上也可能出现孪晶。

* 本书所指含量在未做说明时，均指质量分数。

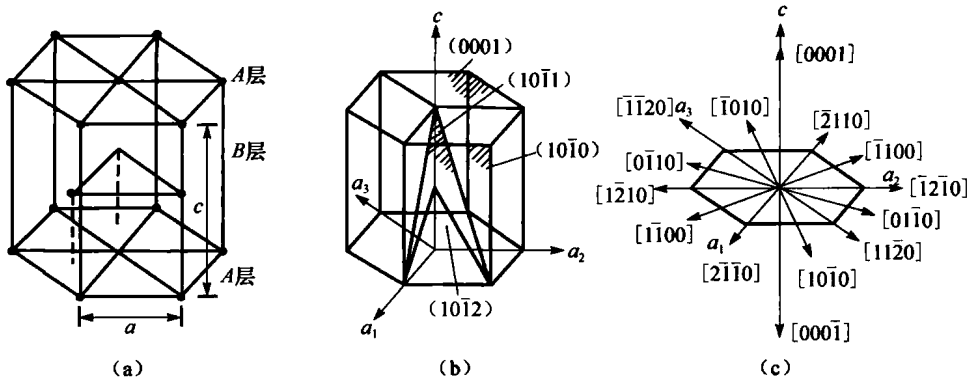


图 1-1 镁单胞的原子结构、主要晶面和晶向
(a) 原子位置；(b) 主要晶面；(c) 主要晶向

在室温下，镁的晶格常数为 $a=0.32092\text{nm}$ ， $c=0.52105\text{nm}$ ， $c/a=1.6236$ 。由于原子层按 $ABAB$ 顺序堆积，理想钢球模型的 c/a 值为 1.633。因此，可以认为镁晶格的原子堆积接近理想紧密堆积。在镁中加入 Li 、 In 、 Ag 等金属元素能使 $c/a < 1.618$ ，提高晶格的对称性，可激活镁晶格的 $\{10\bar{1}0\}\langle 11\bar{2}0\rangle$ 等棱柱面滑移系。

1.1.2 镁的力学性能

铸造状态的镁的力学性能^[3]较低，常温下其抗拉强度为 $80\sim 110\text{MPa}$ ，伸长率为 $6\%\sim 8\%$ ，硬度为 30HB ，弹性模量为 45GPa ，泊松系数为 0.33 。表 1-2~表 1-4 为镁在不同状态下的力学性能。

表 1-2 20℃ 时镁的力学性能

材料状态	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\Psi/\%$	HB
铸态	115	25	8.0	9.0	30
变形态	200	90	11.5	12.5	36

表 1-3 高温下铸态镁的力学性能

温度/℃	σ_b/MPa	$\delta/\%$	温度/℃	σ_b/MPa	$\delta/\%$
100	93	18	350	14.0	72
200	56	28	400	8.5	80
250	41	40	450	5.0	78
300	25	58	500	3.5	81

表 1-4 高温下变形镁的力学性能

温度/℃	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%	Ψ /%	α_H /(kJ/cm ²)
200	60	25	42.5	36.5	2.3
250	30	20	41.5	92.5	5.0
300	20	16	58.5	95.5	12.5
350	18	12	95.0	98.0	17.0
400	10	5	60.0	93.5	10.3
450	6	4	65.5	93.5	13.5

1.1.3 镁的化学性质

众所周知，镁是化学性质非常活泼的金属，它和氧及卤素的结合能较大，可用做还原剂，置换钛、锆、铀、铍等金属。在原镁生产、合金熔炼、合金化处理、金属传输及铸造过程中，镁极易与氧、氮、水发生化学作用。一般来说，镁是耐碱的，室温下，镁与氢氧化钠等碱性溶液几乎不发生反应，但加热时会发生反应。镁不耐酸，除氢氟酸、铬酸、脂肪酸外，其他无机或有机酸均能够迅速与镁发生反应将镁溶解。镁与大多数有机化合物是不发生反应的。镁能与二氧化碳发生燃烧反应，因此，镁燃烧时不能用二氧化碳灭火器灭火。表 1-5 列举了镁及其化合物的热力学参数。

表 1-5 镁及其化合物的热力学参数

参 数	Mg	MgO	MgCl ₂	MgF ₂
熔点/℃	651	2800	712	1396
沸点/℃	1107	3600	1412	2239
熔化潜热/(kJ/kmol)	2.16	18.5	8.1	5.9
气化潜热/(kJ/kmol)	32.552		32.69	69.8
25℃时的热容/[kJ/(kg·℃)]	23.90	37.80	71.33	
标准热容/[kJ/(kg·℃)]		611.56	320.43	552.12
25℃时的标准熵/[kJ/(kg·℃)]	32.52	27.42	89.58	58.60

在空气中，镁的表面容易生成氧化镁薄膜使表面颜色迅速变暗。氧化镁具有体心立方结构，其晶格参数 $a = 0.4192\text{nm}$ 。25℃时，氧化镁的结合能为 610.30kJ/(kg·K)。温度低于 450℃时，氧化镁薄膜对镁表面具有保护作用。温度高于 450℃时，氧化膜将变得不稳定且易被破坏，从而导致镁的进一步氧化，此氧化反应是放热反应，若氧化放出的热量不能被及时转移，镁将会燃烧。在空气中，镁的燃点是 623℃，随着大气压的变化，镁在氧气中的燃点也会发生变化。氧化镁薄膜并不致密，其致密系数为 0.79，这是镁和镁合金耐蚀性不及铝和铝合金的主要原因，所以一般来说，镁合金必须经过特殊的表面防护技术才能

保证其永久储存。

1.2 镁——21 世纪绿色工程材料

镁是地球上储量最丰富的元素之一，在地壳表层金属矿的资源含量中居常用金属的第三位。此外，在盐湖及海洋中，镁的含量也十分可观，可以说“取之不尽、用之不竭”。镁是工程应用中密度最小的金属结构材料，其密度仅相当于铝的 2/3，钢的 1/4。同时镁合金还具有高比强/刚度、高比模量、高阻尼、电磁屏蔽，优异的铸造、切削加工性能和易回收等一系列独特的优点。因此，镁被誉为“21 世纪的绿色工程材料”^[4~7]。

1.2.1 丰富的镁资源

世界上的镁资源是“取之不尽，用之不竭”的^[8]，从白云石、菱镁矿里可以取得镁，从大洋里可以得到镁，从盐湖里也可以得到镁。

1. 镁在地壳中的分布广且极其丰富

镁是自然界中分布最广的元素之一，约占地壳质量的 2.35%，仅次于氧、硅、铝、铁、钙、钠和钾，居第八位，在结构金属中仅次于铝和铁，居第三位。地球上几乎到处都可以找到镁的矿物。在已知的 1500 种矿物中，含镁矿物大约有 200 种。镁的化学性质活泼，在自然界中仅以化合物的形式存在，含镁矿物大致可分为硅酸盐、碳酸盐、氯化物和硫酸盐四类，多属于地壳造岩矿物。我国是世界上镁矿资源最丰富的国家之一，镁资源占全球总储量的 22.5%，矿石品位超过 40% 的菱镁矿储量占世界的 60% 以上。

2. 海水和盐湖中的镁取之不尽、用之不竭

镁是海水中的第三富有元素，约占海水质量的 0.13%。在 1m³ 海水中大约含有 1kg 镁，在大洋的海水及一些海湾的海水中，镁盐的浓度可达 0.25%~0.55%。海水中镁总量约为 2.3×10^{15} t，如果每年用海水生产 100 万 t 镁，可以生产 23 万年。因此，海水可谓是制备金属镁取之不尽、用之不竭的来源。

1.2.2 性能和价格优势^[9~12]

1. 优异的性能

(1) 比强度、比刚度高。镁合金的比强度高于铝合金和钢铁，略低于比强度最高的纤维增强塑料。其比刚度与铝合金和钢铁相当，但却远远高于纤维增强塑

料。因此在相同强度和刚度情况下，用镁合金做结构件可以减轻零件重量，这对国防、航空、汽车及便携式电子器材等行业均有很重要的意义。

(2) 减振性能好。镁合金与铝合金、钢、铁等相比具有较低的弹性模量，在同样受力条件下，可消耗更大的变形功，具有降噪、减振功能，可承受较大的冲击振动负荷。镁合金具有极好的滞弹吸振能力，其减振性是铝合金的5~30倍，塑料的20倍，钢铁的50~1000倍。在汽车中使用镁合金可提供舒适安静的搭乘条件，提高安全保障；也被用于航空航天、国防等尖端领域，如鱼雷、战斗机和导弹等的减振部位。例如，镁合金AZ91在35MPa应力下的振动衰减系数为25%，铝合金A380只有1%；AZ91在100MPa应力下的衰减系数上升为53%，A390只有4%。

(3) 良好的铸造性能。镁与铁几乎不发生反应，熔炼时可用铁坩埚。熔融镁对坩埚的侵蚀少，压铸时对压铸模的侵蚀少。与铝合金压铸相比，压铸模使用寿命可提高2~3倍，通常可维持20万次以上。镁合金的比热容和结晶潜热小，流动性好，镁合金的充型流动速度约为铝合金的1.25倍，用于压铸生产时生产效率比铝合金提高40%~50%，且镁制品壁厚可小于0.6mm，而铝合金为1.2~1.5mm，塑胶制品在相同强度下是无法达到的。

(4) 尺寸稳定性高。不需要退火和消除应力就具有尺寸稳定性是镁合金的一个很突出的特性，体积收缩率仅为4%~6%，是铸造金属中收缩量最低的一种合金。

(5) 优良的切削加工性能。镁合金的切削速度大大高于其他金属，减少切削加工时间，切削时对刀具的消耗很低。镁合金、铝合金、铸铁、低合金钢切削同样零件消耗的功率比值为1:1.8:3.5:6.3。镁合金机加工多在干态下进行，不用切削液便可改善零件表面加工质量、减少摩擦力和提高刀具寿命，不需磨削和抛光便能获得平滑光洁的表面。

(6) 良好的磁屏蔽性。镁合金具有优于铝合金的磁屏蔽性能，能更好地阻隔电磁波，适合制作发出电磁干扰的电子产品的壳、罩，尤其是紧靠人体的手机。而采用塑料制造电子器件时，为了提高其电磁屏蔽能力，一般在表面喷涂导电漆、表面镀层、金属喷涂，在塑料内部添加导电材料、辅助金属箔或金属板等，但这会增加生产工艺的复杂性，提高产品的生产成本和价格，且电磁屏蔽效果仍然很有限。

(7) 高散热性。镁合金的导热能力是工程塑料ABS的350~400倍，适用于元件密集的电子产品。镁合金的散热性能不但比塑料好得多，与铝合金比也略胜一筹。例如，在20℃时镁合金AZ91的密度、比热容和导热率分别为1.81g/cm³、1050J/(kg·K)、72W/(m·K)；铝合金A380的密度、比热容和导热率分别为2.74g/cm³、963J/(kg·K)、96W/(m·K)。因此，计算的镁合金、铝合金的热

扩散系数 α 分别为 $3.79 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $3.64 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ，体积比热容分别为 $1.90 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$ 、 $2.64 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{K})$ ，而工程塑料 ABS 和聚碳酸酯的热扩散系数几乎为零。可见，在相同体积下，镁合金件的蓄热能力远比铝合金件低，但二者的散热能力相差无几。由于镁合金压铸成型性比铝合金的成型性好，镁合金压铸件可以比铝合金压铸件的壁厚做得更薄、形状更复杂，考虑到这些尺寸因素对散热性的影响，镁合金压铸件加热与散热往往比铝合金压铸件快，工程塑料 ABS 更是无法与之相比。

(8) 再生性。废旧镁合金铸件可再熔化，并作为 AZ91、AM50 或 AM60 的二次材料可再铸造。镁合金的熔化潜热比铝合金低，熔炼消耗的能量低。更为重要的是，镁合金中的杂质可以通过相对简单的冶金法清除，这种方法符合环保要求，使镁合金比许多塑胶材料更具有吸引力。

2. 廉价的原镁

20 世纪 90 年代以前，由于镁的价格波动太大，镁产品的最终使用商不敢涉及与镁相关的产品。20 世纪 90 年代以后，随着科学技术的不断进步，原料和能源成本迅速降低，原镁的成本也快速下降，价格也不断降低，全球镁的用量急剧攀升。近几年镁的价格已经比铝低，甚至比工程塑料 ABS 低，且原镁的成本仍然有下降的空间，这为镁的应用提供了很大的潜在替代市场。表 1-6 为 2006 年中国市场原镁、原铝和工程塑料 ABS 的价格对比。

表 1-6 2006 年中国市场原镁、原铝和工程塑料 ABS 的价格对比

材 料	原 镁	原 铝	工程塑料 ABS
价格 (2006 年中国市场)/(万元/t)	1.4~1.5	2.0~2.4	1.5~1.6

1.2.3 减重节能效应

镁合金以其质轻及其他一系列优点在同其他结构材料（铝合金、工程塑料等）的竞争中逐渐占据明显优势，已成为近年来新材料研究、开发与应用的热点。这主要表现在下列两个方面：一方面，在国防军事领域，使用镁合金不仅可以提高飞行器的机动性能，还可以降低航天器（火箭、飞船等）的发射成本，因此，镁合金非常适用于制造飞机、导弹、飞船、卫星、轻武器等重要武器装备的零件。西方国家（尤其是美国）以超常规的速度和投入力度加快镁合金在航空和航天领域中的应用步伐，并使其在飞机、导弹和卫星等领域得到广泛应用，而我国在这方面起步较晚，应用也较欠缺；另一方面，进入 21 世纪以来，降低能耗、

减少污染和改善人类赖以生存的环境已成为全人类面临的共同主题。各国对汽车等交通工具能耗、尾气排放的限制不断升级,对降耗减排提出苛刻要求,汽车结构件轻量化已势在必行。使用镁合金制造汽车传动系统零部件,不仅能够减轻汽车自身质量、降低油耗,而且有助于质量的优化分布,从而改善汽车的驾乘舒适性和安全性。目前我国大飞机、绕月工程、高速轨道交通等大型工程项目正在启动,这为镁合金的研究应用开拓了广阔的应用空间 and 市场需求,也提出了更高的要求。

1.2.4 生物效应^[13,14]

镁是人体不可或缺的元素。镁在人的肌体内起催化剂和激活剂的作用。美国 RDN 新标准要求成年男子每天镁的摄入量为 350mg,女性一般为 180mg。一般成年人的体内含镁量大致保持 20~25g,其中 70%以磷酸盐和碳酸盐的形式参与骨骼和牙齿的组成;25%的镁存在于软组织中,主要与蛋白质结合成络合物。

镁合金作为医用植入材料,与现有进入临床使用的医用金属材料相比,具有以下优势:

(1) 镁与人体有良好的生物相容性。镁是人体内仅次于钾、钠、钙的细胞内正离子。它参与蛋白质的合成,能激活体内多种酶,调节神经肌肉和中枢神经系统的活动,保障心肌正常收缩。镁几乎参与人体内所有的新陈代谢过程,因此,镁在适当的代谢条件下不会对人体产生不良影响。

(2) 镁可以在人体内降解。镁经过人体体液分解后可发生多种代谢反应,而且可以促进体内能量转运、储存和利用。此外,镁具有很低的标准电极电位,在人体体液中生成的镁离子可被周围肌体组织吸收,通过体液排出体外^[9]。因此,镁可以被人体完全降解,是一种难得的金属生物材料。

(3) 镁是骨生长的必需元素。镁离子可促进钙的沉积,促进骨细胞的形成,加速骨的愈合。初步的细胞毒性研究表明,镁对骨髓细胞的生长没有抑制作用,即没有细胞溶解现象。

(4) 镁合金具有合适的物理力学性能。镁合金的密度与人骨吻合,符合理想接骨板的要求。镁合金在所有金属材料中具有最高的比强度,比钛合金高。镁合金的弹性模量的绝对值较低(~40GPa),与人骨的弹性模量值(~20GPa)接近。镁合金在骨折愈合初期可以提供稳定的力学环境,逐渐而不是突然降低其应力遮挡作用,使骨折部位承受逐步增大至生理水平的应力刺激,从而加速愈合、防止局部骨质疏松和再骨折,避免由于植入材料与人骨弹性模量不匹配造成的骨骼强度降低和愈合迟缓问题。

(5) 镁合金成形性好,资源丰富,价格低。镁合金可以通过精密铸造、挤

压、冲压、机械加工等多种方式获得需要的各种形状的产品。因此，镁合金可以作为有效的医用植入材料使用。

1.3 镁合金的发展概况

1.3.1 镁和镁合金的发展简史^[15~17]

虽然镁资源丰富，但人类对镁的认识却较晚，从首次利用自然资源获得金属镁到目前镁合金商业应用仅有 200 多年的历史。1808 年 5 月，英国化学家戴维（Humphry Davy, 1778~1829，镁的发现者）电解汞和氧化镁的混合物，得到镁汞齐，再将镁汞齐中的汞蒸馏，在人类历史上第一次制取了金属镁。1828 年，法国科学家 Antoine-Alexander Bussy 将氯化镁和金属钾一起溶化从而分离出金属镁。1833 年，英国物理学家和化学家 Michel Faraday 首次采用电解还原氯化镁的方法成功生产出镁。镁的商业化生产始于 19 世纪中叶的巴黎，在此后的几年中，全世界生产的镁几乎全部被用于制成供照相业使用的镁丝和镁粉。1852 年，德国人 Robert Bunsen 建成了一个小型的实验室用电解槽，用于电解熔融状态的氯化镁。1886 年，德国使用经过改进的 Bunsen 电解槽开始镁的商业化生产，并于 1896 年创建了世界上唯一的镁金属生产厂。此后，镁产量迅速增长，1910 年世界镁产量约 10t，1930 年世界镁产量增长到 1200t 以上。

第二次世界大战期间，镁工业获得了飞速发展。1935 年，德、法、苏、奥、意等分别建立镁厂，美国的镁产量扩大了 10 倍，1943 年世界镁产量约为 23.5 万 t。期间，镁主要用于制造燃烧弹、照明弹、曳光弹、信号弹以及飞机等军用设备的零部件。二战结束后，1946 年世界镁产量降低到 2.5 万 t，世界各国开始考虑镁合金在民用工业的开发和应用。在以后的 20 年中，美国 Dow 化学公司在开发镁合金及其生产技术方面取得突出成就，为镁及其合金在冶金、航空、电子、兵器、汽车、化学及防腐、印刷、纺织等民用工业部门的应用开辟了道路。到 20 世纪 90 年代，随着镁的研究和应用水平的提高，1998 年镁消耗量提高到 36 万 t，此后每年以 7%~9% 的速度递增。我国自 90 年代初开始出口金属原镁。1999 年我国原镁产量达到 12 万 t，首次超过美国成为世界上第一大镁生产国，之后连续 10 年位居产量第一位，近几年的年总产量占全世界年总产量的 70% 以上，几乎左右着世界原镁的价格（表 1-7^[18]）。2008 年我国镁产量达到 63.07 万 t，出口 39.64 万 t，国内消费 15.8 万 t，均居世界首位。近年来我国的镁产业规模连续跨越，经济效益不断提高，国际影响力显著增强。