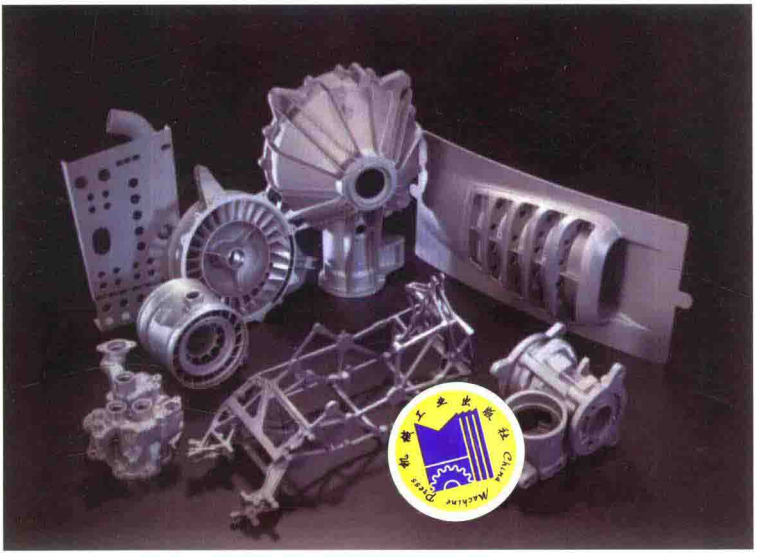
智能制造与装备制造业转型升级丛书
MADE IN CHINA

MAGNESIUM ALLOYS AND THEIR FORMING TECHNOLOGIES

镁合金及其成形技术

王渠东 / 编著



制造业是国民经济的主体
经济的主体是立国之本、兴国之器、强国之基
致力于助力中国智能制造的快速进步和装备制造业的转型升级

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

智能制造与装备制造业转型升级丛书

镁合金及其成形技术

王渠东　编著

机械工业出版社

本书系统地介绍了各种镁合金的组织与性能、成形技术及其应用，重点对镁合金的液态成形技术和固态成形技术进行了详细介绍。其主要内容包括：概述、镁合金的组织与性能、镁合金的熔炼、镁合金的液态成形、镁合金的固态成形、镁合金的表面处理、镁合金的应用。本书密切结合生产实际，内容全面、新颖，图文并茂，数据翔实，实用性强，是一本关于镁合金极具参考价值的技术资料。

本书可供从事镁合金生产和研究的技术人员阅读，也可作为相关专业在校师生的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

镁合金及其成形技术/王渠东编著．—北京：机械工业出版社，2017.7
（智能制造与装备制造业转型升级丛书）
ISBN 978-7-111-57217-6

Ⅰ．①镁…　Ⅱ．①王…　Ⅲ．①镁合金-成型　Ⅳ．①TG146.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 146783 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号　邮政编码 100037）
策划编辑：陈保华　责任编辑：陈保华　安桂芳
责任校对：肖　琳　责任印制：常天培
北京圣夫亚美印刷有限公司印刷
2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 23.5 印张 · 457 千字
0001—2200 册
标准书号：ISBN 978-7-111-57217-6
定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
服务咨询热线：010-88361066	机 工 官 网：www.cmpbook.com
读者购书热线：010-68326294	机 工 官 博：weibo.com/cmp1952
010-88379203	金　书　网：www.golden-book.com
策 划 编 辑：010-88379734	教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

前言

镁合金是实际应用中最轻的金属结构材料，它具有密度低，比强度和比刚度高，阻尼性、导热性、切削加工性、铸造性能好，电磁屏蔽能力强，尺寸稳定，资源丰富，容易回收等一系列优点。因此，在汽车工业、通信电子工业和航空航天工业等领域正得到日益广泛的应用。

与铝合金相比，镁合金的研究和发展还很不充分，其实际应用也还很有限。目前，镁合金的产量只有铝合金的1%。镁合金作为结构应用的最大用途是铸件，其中90%以上是压铸件。限制镁合金广泛应用的主要问题是：镁合金在熔炼和加工过程中极容易氧化燃烧，因此镁合金的生产难度很大；镁合金的生产技术还不成熟和完善，特别是镁合金成形技术就更有待进一步发展；镁合金的耐蚀性较差；现有工业镁合金的高温强度、抗蠕变性能较低，限制了镁合金在高温（150～350℃）场合的应用；镁合金的常温力学性能，特别是强度和塑韧性有待进一步提高；镁合金的合金系列相对较少，变形镁合金的研究开发严重滞后，不能适应不同应用场合的要求。但镁合金的发展潜力和应用优势引起了许多国家的政府、企业和研究机构对镁合金及其成形技术的高度重视，他们投入了大量人力、财力进行开发研究，并取得了显著效果。

近年来，镁合金的熔炼技术、高性能镁合金材料及其先进成形技术的开发、镁合金表面处理技术等方面都取得了很大进展，在此背景下作者编著了这本《镁合金及其成形技术》，以介绍近年来全球镁合金领域的研究发展动态、镁合金材料开发、镁合金熔炼技术、镁合金成形技术，以及镁合金的应用现状和最新发展，希望能为从事镁合金及其成形技术相关的研究开发和技术人员，相关行业的设计、应用和营销人员提供参考资料，助力我国镁工业的发展。

全书共分7章。第1章介绍了镁的基本性质及资源、镁及镁合金的发展历史、生产和应用；第2章详细介绍了镁合金的分类和牌号，镁合金的强化途径，铸造镁合金、变形镁合金、快速凝固镁合金及镁基复合材料的组织和性能；第3章介绍了镁合金的熔炼，主要从镁合金熔体与周围介质的反应、熔炼保护方法、熔体处理及废料回收四个方面展开论述；第4章介绍了镁合金的液态成形技术，涉及镁合金的重力铸造、压力铸造、挤压铸造、半固态成形、连续铸造、快速凝固和喷射沉积等成形技术；第5章介绍了镁合金的固态成形技术，包括镁合金的塑性变形理论、挤压成形、轧制成形、锻造成形、板材成形、旋压成形等成形技术，以及镁

合金的焊接技术；第6章介绍了镁合金的表面处理技术，包括镁合金表面处理的前处理、表面镀、化学转化膜处理、阳极氧化及密封和着色、气相沉积、表面涂覆、表面合金化等技术；第7章介绍了镁合金的应用，主要列举了镁合金在机械工业、电子器材、航空航天领域的应用实例。

需要指出的是，作者在编著本书的过程中参考并引用了大量国内外资料，在此向这些作者表示由衷的谢意。此外，作者指导的上海交通大学材料科学与工程学院的博士生周浩、汪欢、隋育栋、张利等人参与了书稿的整理工作，在此表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免会出现一些疏漏，诚挚地希望读者能够提出宝贵意见。

作　者

目 录

第1章

概　述

1.1　镁与镁合金简介

1.1.1　概述

镁是10种常见的有色金属之一，为元素周期表中ⅡA族碱土金属元素，原子序数为12，相对原子质量为24.305。镁的晶体结构为密排六方结构，由于镁原子的电子层结构特点（$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$），其化合价通常表现为+2价（Mg^{2+}），离子半径为0.74Å[⊖]。在所有的结构金属中，镁的密度最低，纯镁的密度仅为1.738g/cm^3。

镁资源分布很广，地壳中镁的平均质量分数为2.77%，在各种金属元素当中仅次于铝、铁、钙、钠和钾。自然界中已知有200多种镁的化合物，存在于地壳、海水、盐湖中。海水中含氯化镁1.3kg/m^3。镁工业中采用的主要原料有菱镁矿（$MgCO_3$）、白云石（$MgCO_3 \cdot CaCO_3$）、光卤石（$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$）、水氯镁石（$MgCl_2 \cdot 6H_2O$）、水镁石［$Mg(OH)_2$］及蛇纹石（$3MaO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）等；海水与盐湖水中含有$MgCl_2 \cdot 6H_2O$，为炼镁工业提供了丰富的原料。丰富的天然资源和广泛的地理分布使得任何国家只要有适当的技术和比较便宜的能源，就能够独立地发展自己的镁工业，在这方面比铝具有优越性。

1774年人们首次发现镁，并以希腊古城Magnesia命名。金属镁早期的用途主要是与铝形成铝-镁合金、使铁液脱硫、制造球墨铸铁及作为一种结构材料，其中制造铝-镁合金几乎占了一半的原镁消费量。但是，较高的生产成本、熔融状态下较强的化学活性、较低的疲劳性能和蠕变性能等因素限制了镁的应用。随着社会的发展，科学技术的进步对新型材料的需求越来越高，这促进了镁在航空航天领域、汽车行业、导弹制造、核能工业、电气和运动商品等行业中的应用。近年来，

⊖ 1Å = 10^{-10}m。

镁用途和应用领域仍在不断扩大。2015 年全球镁产能为 165.45 万 t，产量约为 100.2 万 t，我国同期的镁工业产量为 62.22 万 t。

在镁中添加合金元素，可以形成具有各种性能的合金，满足不同的需要。镁和镁合金既可以通过铸造直接制备出结构件，也可以通过各种塑性加工和热处理制备出各种规格的管、棒、板、线、带材和异型材。对于同种材质，采用不同的方法来制备时，材料的性能也有很大的区别。为了提高镁材的耐蚀性，还可以对其进行表面处理。与其他结构材料相比，镁及镁合金具有一系列的优点，如密度低，比强度和比刚度高，减振性好，电磁屏蔽性能优异，抗辐射，摩擦时不起火花，热中子捕获截面小，切削加工性和热成形性好，对碱、煤油、汽油和矿物油具有化学稳定性，易回收等。由于有突出的特点，镁材已成为继钢铁和铝之后的第三类金属结构材料，在世界范围内得到迅猛发展。

进入 21 世纪，自然资源和环境已成为人类可持续发展的首要问题。镁作为一种轻质工程材料，其潜力尚未充分挖掘出来，开发利用远不如钢铁、铜、铝等成熟。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已成为社会可持续发展的重要措施之一。

1.1.2 镁矿资源

镁是地壳中排位第八的富有元素，其蕴藏量为 2.77%。镁同时也是海水中的第三富有元素，约占海水质量的 0.13%。镁有 60 多种矿产品，其中白云石（$MgCO_3 \cdot CaCO_3$）、菱镁矿（$MgCO_3$）、氢氧镁石[$Mg(OH)_2$或$MgO \cdot H_2O$]、光卤石（$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$）、橄榄石（$MgFeSiO_4$）和蛇纹石（$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$）最具商业开采价值。含镁的主要矿物见表 1-1。据有关资料介绍，截至 1993 年年底，全世界已探明的菱镁矿储量为 126 亿 t，主要储存于以下十几个国家和地区。国内外菱镁矿的储量和分布见表 1-2。

表 1-1 含镁的主要矿物

矿物名称			组成	Mg 质量分数（%）
碳酸盐类	magnesite	菱镁矿	$MgCO_3$	28.8
	dolomite	白云石	$MgCO_3 \cdot CaCO_3$	13.2
	hydromagnesite	水碳镁石	$MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$	26
硅酸盐类	talc	滑石	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	19.2
	olivine	橄榄石	$MgFeSiO_4$	28
	serpentin	蛇纹石	$3MgO \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	26.3
硫酸盐类	kiesrite	硫酸镁石	$MgSiO_4 \cdot H_2O$	17.6
	kainite	钾镁矾石	$MgSiO_4 \cdot KCl \cdot 3H_2O$	9.8
	langbeinite	无水钾镁矾	$2MgSiO_4\ K_2SiO_4$	11.7
氯化物盐类	carnallite	光卤石	$MgCl_2 \cdot KCl \cdot 6H_2O$	8.8
	brine	卤水	$NaCl \cdot KCl_2 \cdot MgCl_2$	可变

（续）

矿物名称			组 成	Mg质量分数（%）
其他	periclase	方镁石	MgO	60
	brucite	水镁石	$Mg(OH)_2$	41.6
	spinel	尖晶石	$MgO \cdot Al_2O_3$	17
	sea water	海水		0.13

表 1-2 国内外菱镁矿的储量和分布

国 家	储量/亿 t	国 家	储量/亿 t
中国	30.09	美国	0.66
朝鲜	30	加拿大	0.6～1
新西兰	6.0	巴西	0.4
捷克	5.0	希腊	0.3
印度	1.0	前南斯拉夫	0.14
奥地利	0.75	澳大利亚	>0.1

中国是世界上镁资源最丰富的国家，储量居世界首位，已探明的菱镁矿保有储量为30.09亿t，约占世界探明储量的四分之一。符合炼镁要求的一、二级矿占78%，主要分布在辽宁、山东、山西、宁夏、内蒙古、河南等地，其中辽宁省储量为25.7亿t，占全国总储量的85%以上，占世界储量的20%，矿石品位高达40%。辽宁菱镁矿资源具有以下特点：

1）资源集中，矿床巨大，呈显晶型。

2）品位高、杂质少，MgO质量分数大于46%的一、二级矿石约占总储量的1/2。

3）矿石赋存条件优越，易剥离，好开采。

我国菱镁矿储量及分布见表1-3。

表 1-3 我国菱镁矿储量及分布

地区	矿区数	已利用矿区	储量/万 t			MgO的质量分数（%）
			总 计	A+B+C	D	
辽宁	12	6	257676	113737	143939	>46
河北	2	1	1438	1000	438	>33
安徽	1	—	333	—	333	—
山东	4	2	28715	16932	11783	>43
四川	3	1	783	174	609	38～43
西藏	1	—	5710	—	5710	44.02
甘肃	2	1	3087	—	3087	44.05
青海	1	—	82	50	32	38.45
新疆	1	—	3110	—	3110	45.37
全国	27	11	300934	131893	169041	—

菱镁矿石经过煅烧，碳酸镁分解为氧化镁和二氧化碳。氧化镁具有较强的耐火性能和绝热性能，广泛应用于冶金、建材、轻工、化工、医药、航空、航天、军工、电子、农牧等行业。

白云石资源遍及全国各地，已探明储量在 40 亿 t 以上。白云石的组成见表 1-4。宁夏矿藏丰富，现已探明白云石矿储量超过亿吨，其中同心县白云石是国内综合指标最好的矿石之一。镁的主要加工原料白云岩在贺兰山下储量丰富，品位很高。宁夏与山西、河南两省并列为我国镁业三强。

表 1-4　白云石的组成

产　地	质量分数（%）				
	MgO	CaO	R_2O_3	SiO_2	烧失量
海南枫树乡	21.52	30.44	0.64	1.53	45.4
广西贵港	20.45	30.78	0.27	0.32	47.3
贵州乌当下坝	21.85	30.87	0.072	0.54	47.03
江苏南京	21.18	30.93	0.15	0.09	47.5
湖南新化县坪溪乡	21.26	33.27	0.27	0.32	47.3
湖南湘乡棋梓桥	20.05	32.29	0.08	0.50	47.6
湖南临湘城关	20.76	30.0	0.50	1.8	46.2
湖南宜章县	21.76	30.64	0.035	0.37	46.72
湖北石门坎	20.65	30.36	0.63	2.56	45.1

中国青海盐湖含有丰富的镁资源。柴达木盆地拥有丰富的钾、镁盐矿，其中察尔汗盐湖总面积达 5856km^2，具有储量大、品位高、类型全、资源组合好等特点。据初步探测，柴达木盆地盐湖保有储量为 48.15 亿 t（其中氯化镁 31.43 亿 t，硫酸镁 16.72 亿 t），工业储量为 12.72 亿 t（其中氯化镁 12.55 亿 t，硫酸镁 0.17 亿 t）。镁盐储量占我国总储量的 89.3%，其中卤水平均含氯化镁 17.74%，高出海水氯化镁含量 30 倍。

1.1.3　镁的性质

人们对于镁这种金属的普遍认识是密度小、易于燃烧，镁的这些特性是由其物理、化学性质所决定的。下面就镁元素的特征、晶体结构、物理性能、热性能和力学性能等方面进行介绍。

1. 元素特征

镁元素的元素符号为 Mg，原子序数为 12，自由原子中各轨道电子状态为 $1s^22s^22p^63s^2$，同位素原子有 Mg^{24}、Mg^{25} 和 Mg^{26}（其质量分数分别为 78.99%、10.00% 和 11.01%），相对原子质量为 24.305，摩尔体积为 14.0cm^3/mol。

2. 晶体结构

在标准大气压下纯镁是密排六方晶体结构，其晶格常数见表 1-5，晶胞结构如

图 1-1 所示。表 1-5 的测量结果与理论预测值 $a=0.32092\text{nm}$ 和 $c=0.52105\text{nm}$ 相吻合，误差仅为 0.01%。如果交错密排原子层系由理想的硬球原子组成，则理想密排六方结构的 c/a 为 1.633。这与室温下所测得的 c/a 为 1.6236 相比，说明金属镁具有接近完美的密排结构。

表 1-5 纯镁的晶格常数

晶格常数/nm		说 明	晶格常数/nm		说 明
a	c		a	c	
0.32095	0.52105	在 25℃下	0.32094	0.52111	25℃
0.32093	0.52103	在 25℃下	0.32088	0.52099	25℃
0.32090	0.52105	在 25℃下	0.32095	0.52107	25℃

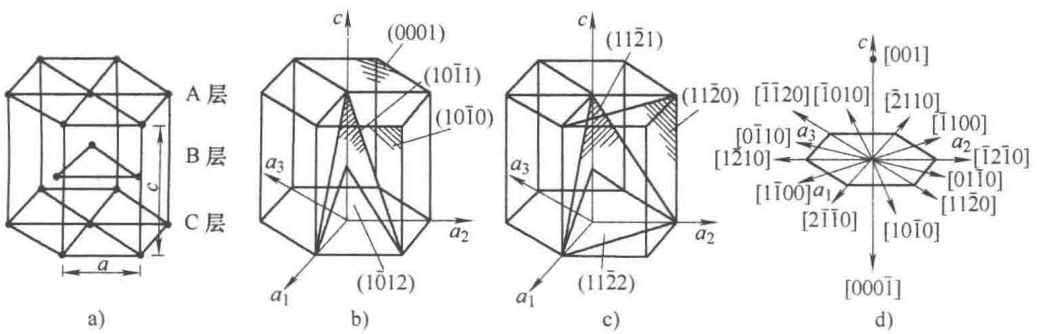


图 1-1 金属镁晶胞结构

纯镁的晶格常数 a、c 的大小与温度有关，在 0～50℃的温度区间内，a（单位为 nm）、c（单位为 nm）的大小可用公式表示为

$$a=0.32075+(7.045T+0.0047T^2)\times10^{-6} \tag{1-1}$$

$$c=0.52076+(11.758T+0.0080T^2)\times10^{-6} \tag{1-2}$$

式中，T 为摄氏温度（℃）。

3. 物理性能

（1）密度 20℃时金属镁的密度为 1.738g/cm^3，在熔化温度下（650℃）固态金属镁的密度约为 1.65g/cm^3。

（2）凝固体积变化 金属镁凝固体积收缩率为 4.2%，对应的凝固线收缩率为 1.5%。

（3）冷却体积变化 当金属镁从 650℃冷却到 20℃的过程中产生约 5% 的体积收缩，对应的线收缩率为 1.7%。

4. 热性能

（1）熔点 标准大气压下，金属镁的熔点为 650℃。

（2）沸点 标准大气压下，金属镁的沸点是 1090℃。

（3）热膨胀　纯镁在较低温度下的热膨胀系数见表 1-6。

表 1-6　低温状态下纯镁的热膨胀系数

温度/℃	热膨胀系数/℃$^{-1}$	温度/℃	热膨胀系数/℃$^{-1}$
-250	0.62×10^{-6}	-150	17.9×10^{-6}
-225	5.4×10^{-6}	-100	21.8×10^{-6}
-200	11.0×10^{-6}	-50	23.8×10^{-6}

基于已发表的试验结果和美国陶氏（Dow）化学公司的研究数据，Baker 提出在 0～550℃温区内多晶金属镁的热膨胀系数 α_t（单位为℃$^{-1}$）可以表达为

$$\alpha_t=(25.0+0.0188T)\times10^{-6} \tag{1-3}$$

式中，T 为摄氏温度（℃）。

根据该公式推出的多晶纯镁在该温度范围内的平均热膨胀系数见表 1-7。

表 1-7　低温状态下纯镁的热膨胀系数

温度/℃	热膨胀系数/℃$^{-1}$
20～100	26.1×10^{-6}
20～200	27.1×10^{-6}
20～300	28.0×10^{-6}
20～400	29.0×10^{-6}
20～500	29.9×10^{-6}

（4）热传导能力　试验测定的金属镁在低、中温区的热导率见表 1-8。热导率在 149～5700W/(m·K) 之间变化，在温度 9K 时到达峰值。

表 1-8　低、中温状态下纯镁的热导率

温度			热导率 λ /[W/(m·K)]
/K	/℃	/°F	
1	-272	-458	986
2	-271	-456	1960
3	-270	-455	2900
4	-269	-453	3760
5	-268	-451	4500
6	-267	-449	5080
7	-266	-447	5470
8	-265	-446	5670
9	-264	-444	5700
10	-263	-442	5580
15	-258	-433	4110
20	-253	-424	2720

（续）

温度			热导率 λ /[W/(m·K)]
/K	/℃	/℉	
30	-243	-406	1290
40	-233	-388	719
50	-223	-370	465
60	-213	-352	327
70	-203	-334	249
80	-193	-316	202
90	-183	-298	178
100	-172	-280	169
150	-123	-190	161
200	-73	-100	159
250	-23	-10	157
300	27	80	156
350	77	170	155
400	127	260	153
500	227	440	151
600	327	620	149

金属镁的热导率 λ［单位为 W/(m·K)］还可以根据镁的 Bungardt 和 Kallenbach 公式计算，即

$$\lambda = 22.6T/\rho + 0.0167T \tag{1-4}$$

式中，ρ 为电阻率；T 为绝对温度（K）。

表 1-9 给出了式（1-4）预测的热导率。

表 1-9 理论计算的镁的热导率

温度		热导率	温度		热导率
/℃	/℉	λ/[W/(m·K)]	/℃	/℉	λ/[W/(m·K)]
-18	0	155.7	204	400	152.8
0	32	155.3	260	500	152.8
20	68	154.5	316	600	153.2
38	100	154.1	371	7000	153.7
93	200	153.7	427	800	154.1
149	300	153.2	482	900	154.9

（5）比热容（c_p） 金属镁在 20℃的比热容是 1.025kJ/(kg·K)，不同温度时镁的比热容见表 1-10。