

镁及镁合金

主编：黎文献 主审：田荣璋



中南大学出版社

镁及镁合金

黎文献 主编
田荣璋 主审

中南大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

镁及镁合金/黎文献主编. —长沙:中南大学出版社,2005. 6
ISBN 7-81105-124-9

I. 镁... II. 黎... III. ①镁②镁合金
IV. 0614. 22②TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 059352 号

镁及镁合金

主 编 黎文献 主 审 田荣璋

责任编辑 程 滨

责任印制 汤庶平

出版发行 中南大学出版社

社址:长沙市麓山南路

邮编:410083

发行科电话:0731-8876770

传真:0731-8710482

印 装 中南大学印刷厂

开 本 889×1194 1/32 印张 18.5 字数 457 千字

版 次 2005 年 11 月第 1 版 2005 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-81105-124-9/TO·004

定 价 45.00 元

图书出现印装问题,请与经销商调换

前 言

镁的资源丰富，约占地壳质量的 2%，海水质量的 0.14%。每 1 m^3 海水可提取 1 kg 以上的镁，盐湖中的镁含量也非常高，加之镁材可以回收利用，因此镁可谓是“用之不竭”的金属。

镁在工程金属中最显著的特点是质量轻。镁的密度为 1.738 g/cm^3 ，约为钢的 $2/9$ ，钛的 $2/5$ ，铝的 $2/3$ ，Mg-Li 合金密度小于水的密度，是迄今最轻的金属材料。镁材还具有比强度、比刚度高，减振性能好，抗辐射能力强等一系列优点，必将发展为十分重要的金属结构材料和功能材料。

然而，目前镁的实际应用尚少。“在材料领域中还没有任何材料像镁那样，潜力与现实有如此大的颠倒”。究其原因主要是：第一，镁的晶体结构为密排六方，塑性加工困难，至今主要应用铸造产品，变形产品很少。对于金属材料，变形产品的综合性能优于铸造产品，其用途和产量远远超过铸造产品，而镁材尚未达到这一境地。第二，镁的氧化膜(MgO)不致密，耐蚀性能差，工件必须进行可靠的表面处理。第三，产品成本尚高。这些问题应通过科学技术的进步加以解决，但过去人们对镁材的基础理论研究和开发应用都不够。

世纪之交以来，由于世界各国对能源和环境保护的更加重视，镁的研究与开发出现了新的局面，镁材成为迅速崛起的新工程材料。我国可谓是镁业大国：镁的矿藏量世界第一，原镁产量世界第一，原镁出口量世界第一，镁材的开发应用也不断加强，可以预料，中国的镁业必将出现新的局面。在这种形势下，我们编写了《镁及镁合金》这本书，作为长期从事有色金属材料教

学与科研的我们，为发展我国镁业所作出的一点贡献。

本书有如下特点：

1. 对镁的合金化、熔炼、铸造、塑性加工、热处理、连接、腐蚀与保护以及再生处理等的基本知识进行了较系统的介绍，并着重于以物理冶金基本理论进行分析和阐述。

2. 结合了作者的研究工作，反映了作者部分研究成果；

3. 对国外成熟的技术资料，如镁合金相图，合金系列，成分等择重作了介绍。

本书第1、2章及附录由黎文献教授撰写；第3、4、5、6和10章由余琨副教授撰写；第7、8章由李松瑞教授撰写；第9章由马正青副教授撰写。全书由黎文献教授主编，田荣璋教授主审。

本书可供从事镁材科研、生产的科技人员以及企业管理人员参考，亦可作为高等院校相应材料专业的选用教材。

由于镁还是一种新型材料，尚缺乏成熟系统的理论，同时由于作者水平所限，书中错误或遗漏之处在所难免，诚恳希望读者赐教。

黎文献

2005年8月14日于长沙

目 录

第 1 章 镁的特性	(1)
1.1 物理性能	(1)
1.1.1 原子特性	(1)
1.1.2 晶体结构	(2)
1.1.3 质量特性	(2)
1.1.4 热学性能	(3)
1.1.5 电学性能	(9)
1.1.6 磁学性能	(10)
1.1.7 光学性能	(10)
1.2 力学性能	(11)
1.3 化学性能	(15)
1.3.1 一般化学特性	(15)
1.3.2 镁和氮的反应	(16)
1.3.3 镁和氢的反应	(16)
1.3.4 镁和氧的反应	(17)
1.3.5 镁和水的反应	(18)
参考文献	(20)
第 2 章 镁的合金化	(22)
2.1 镁合金相图	(22)
2.2 镁合金的固溶度	(72)
2.3 合金元素对镁合金性能影响的一般规律	(81)

2.4 Mg-RE 合金化	(85)
2.4.1 稀土元素的基本特性	(85)
2.4.2 稀土元素在镁中的固溶度	(87)
2.4.3 镁-稀土二元合金系热力学性质计算	(89)
2.4.4 稀土元素在镁合金中的主要作用	(91)
参考文献	(92)
第3章 镁及镁合金	(94)
3.1 铸造镁合金	(94)
3.1.1 概述	(94)
3.1.2 不含锆的铸造镁合金	(97)
3.1.3 含锆的铸造镁合金	(107)
3.2 变形镁合金	(119)
3.2.1 概述	(119)
3.2.2 变形镁及镁合金	(121)
3.2.3 变形镁合金显微组织的演变及控制	(160)
参考文献	(171)
第4章 快速凝固镁合金	(174)
4.1 快速凝固镁合金开发原理	(176)
4.1.1 扩展 $\alpha(\text{Mg})$ 基固溶体的固溶度	(176)
4.1.2 形成新型合金相及多相弥散体系	(178)
4.1.3 细化晶粒	(180)
4.1.4 合金钝化	(181)
4.2 镁合金快速凝固技术	(183)
4.2.1 镁合金雾化快速凝固技术	(184)
4.2.2 镁合金模冷淬火快速凝固技术	(186)
4.2.3 镁合金表面重熔快速凝固技术	(190)

4.3 快速凝固镁合金的性能	(190)
4.3.1 雾化技术制备的快速凝固镁合金的主要性能	(191)
4.3.2 模冷淬火技术制备的快速凝固镁合金的主要性能	(197)
4.3.3 非晶镁合金及其性能	(211)
参考文献	(215)
第5章 镁及镁合金熔炼与铸造	(217)
5.1 镁及镁合金熔炼过程中的物理-化学反应	(218)
5.1.1 镁及镁合金组元与氧反应的化学热力学计算	(219)
5.1.2 镁及镁合金与各组元的相互作用	(223)
5.2 镁及镁合金的熔体保护和处理	(230)
5.2.1 镁及镁合金的熔体保护	(230)
5.2.2 镁及镁合金熔体的精炼处理	(238)
5.2.3 镁及镁合金的晶粒细化处理	(240)
5.3 镁及镁合金的熔炼工艺	(249)
5.4 镁及镁合金的铸造	(250)
5.4.1 镁及镁合金常用铸造工艺	(251)
5.4.2 镁合金铸锭的均匀化	(267)
5.4.3 镁合金铸造缺陷	(267)
参考文献	(273)
第6章 镁及镁合金压力加工	(275)
6.1 纯镁塑性变形的结构特征	(275)
6.2 镁及镁合金的塑性流变行为	(279)
6.3 镁及镁合金的塑性变形机制	(288)
6.3.1 滑移变形机制	(289)
6.3.2 孪生变形机制	(295)
6.3.3 晶界滑动变形机制	(300)

6.4 镁及镁合金塑性变形的主要影响因素	(302)
6.4.1 晶体结构对镁及镁合金塑性变形的影响	(302)
6.4.2 晶粒细化对镁及镁合金塑性变形的影响	(303)
6.4.3 变形温度对镁及镁合金塑性变形的影响	(305)
6.4.4 变形速率对镁及镁合金塑性变形的影响	(306)
6.4.5 应力状态对镁及镁合金塑性变形的影响	(308)
6.5 镁及镁合金塑性成形技术及其性能	(308)
6.5.1 镁合金的挤压成形技术及其性能	(309)
6.5.2 镁合金的锻造成形技术及其性能	(314)
6.5.3 镁合金的轧制成形技术及其性能	(319)
6.5.4 镁合金的冲压成形技术及其性能	(323)
6.5.5 镁合金的弯曲成形技术及其性能	(325)
6.5.6 镁合金的等径角挤压技术及其性能	(329)
6.5.7 镁合金的超塑性成形技术及其性能	(331)
参考文献	(336)
第7章 镁合金热处理	(338)
7.1 镁合金过饱和固溶体的分解(脱溶过程)	(338)
7.1.1 Mg-Al-(Zn)系合金	(338)
7.1.2 Mg-Zn系合金	(349)
7.1.3 Mg-RE系合金	(352)
7.1.4 WE系列合金	(358)
7.2 镁合金的热处理类型及工艺	(364)
7.2.1 镁合金热处理基本状态表示法	(364)
7.2.2 镁合金热处理类型及工艺参数	(365)
7.2.3 镁合金热处理的其他工艺问题	(376)
7.3 镁合金热处理时可能遇到的问题及防止方法	(378)
7.4 镁燃烧的预防和控制	(379)

参考文献	(380)
第 8 章 镁合金的连接	(383)
8.1 镁合金的焊接	(383)
8.1.1 镁合金的电弧焊	(383)
8.1.2 镁合金的高能束焊接	(398)
8.1.3 镁合金的摩擦焊	(405)
8.1.4 镁合金的电阻焊	(409)
8.1.5 镁合金的硬钎焊	(417)
8.2 镁合金的粘接	(420)
8.3 镁合金的机械连接	(423)
8.3.1 铆接	(423)
8.3.2 螺纹连接	(426)
参考文献	(426)
第 9 章 镁合金的腐蚀与防护	(428)
9.1 镁的电化学特性	(428)
9.2 镁及镁合金腐蚀的基本类型	(431)
9.2.1 化学腐蚀	(432)
9.2.2 电偶腐蚀	(434)
9.2.3 孔隙腐蚀	(436)
9.2.4 镁合金的应力腐蚀(SCC)破裂	(436)
9.2.5 腐蚀疲劳	(437)
9.3 镁合金耐蚀性评价方法	(439)
9.3.1 质(重)量损失法	(439)
9.3.2 腐蚀坑深度测量法	(440)
9.3.3 电化学极化法或电化学阻抗法	(440)
9.4 影响镁及镁合金腐蚀的因素	(443)

9.4.1	冶金因素对镁合金耐蚀性的影响	(443)
9.4.2	热处理制度对镁合金耐蚀性的影响	(447)
9.4.3	环境因素对镁合金耐蚀性的影响	(449)
9.4.4	镁及镁合金应力腐蚀的影响因素与控制	(456)
9.5	镁合金腐蚀的防护方法	(468)
9.5.1	提高镁合金的纯度	(468)
9.5.2	添加特殊合金化元素	(469)
9.5.3	快速凝固处理(RSP)	(470)
9.5.4	镁合金的表面处理	(471)
9.5.5	医用镁合金表面改性技术	(501)
9.5.6	镁合金装配件的装配与防护	(503)
9.6	镁合金牺牲阳极	(511)
	参考文献	(515)
第 10 章	镁及镁合金的废料再生	(521)
10.1	镁及镁合金废料的组成	(522)
10.2	镁及镁合金废料再生的途径	(524)
10.3	镁及镁合金废料再生过程中的特性	(526)
10.4	再生镁及镁合金的性能	(527)
	参考文献	(529)
附 录	(530)
附录 1	铸造镁合金锭(摘录)(GB/T 19078 - 2003) ...	(530)
附录 2	变形镁及镁合金牌号和化学成分(摘录) (GB/T 5153 - 2003)	(539)
附录 3	国外部分机构公布的镁合金化学成分	(545)
附录 4	主要镁合金标准相似牌号对照表	(574)

第1章 镁的特性

镁在门捷列耶夫元素周期表中属ⅡA族碱土金属。块状金属镁在室温下呈银白色。纯镁的主要物理、化学、力学性能如下。

1.1 物理性能

1.1.1 原子特性

原子序数：12，相对原子量：24.3050。

原子半径：0.160 nm，原子体积：14.0 cm³/mol。

原子内自由电子状态：1s² 2s² 2p⁶ 3s²。

在自然界中镁的同位素及其比例：²⁴₁₂Mg 为 79%，²⁵₁₂Mg 为 10%，²⁶₁₂Mg 为 11%。

镁原子核的热中子吸收率小，仅次于铍。常态镁的热中子吸收率为 0.063 ± 0.004，²⁴₁₂Mg 为 0.03，²⁵₁₂Mg 为 0.27，²⁶₁₂Mg 为 0.03。

X 射线吸收系数：32.9 m²/kg。

镁的放射性同位素性能列于表 1-1。

表 1-1 镁的放射性同位素性能

放射性同位素	半衰期	蜕变能 /MeV	放射线	放射能 ^① /MeV
Mg ²¹	0.12 s	—	β (荷正电的) 质子	(3.44, 4.03, 4.81, 6.45)
Mg ²²	3.9 s	5.04	γ	0.074, 0.59
Mg ²³	12 s	4.06	β (荷正电的) γ	3.0 0.44
Mg ²⁷	9.5 min	2.61	β (荷负电的) γ	1.75, 1.59 0.84, 1.01
Mg ²⁸	21.3 h	1.84	β (荷负电的) γ	0.45, 2.87 0.032, 1.35

注：① 括号中的数据表示放射线短寿命裂变产物的放射能。

1.1.2 晶体结构

镁的晶体结构为密排六方，结构符号 A3，空间群 $D_{6h}^2 - P6_3/mmc$ 。

在 25℃ 时，晶格常数 $a = 0.32092 \text{ nm}$ ， $c = 0.52105 \text{ nm}$ ， $a/c = 1.633$ ，晶格常数随温度的变化示于图 1-1。

1.1.3 质量特性

纯镁的密度在 20℃ 时为 1.738 g/cm^3 ，在熔点附近，固体状态密度约为 1.65 g/cm^3 ，液体状态密度约为 1.58 g/cm^3 。镁的密度随温度的变化示于图 1-2。

纯镁在凝固过程中的液固体积收缩率为 4.2%，线收缩率为 1.5%。

从 650℃ 冷却至 20℃，体积收缩率为 5%，线收缩率为 1.7%。

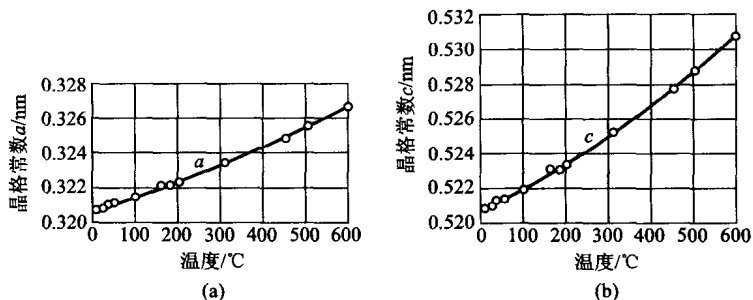


图 1-1 纯镁的晶格常数随温度的变化

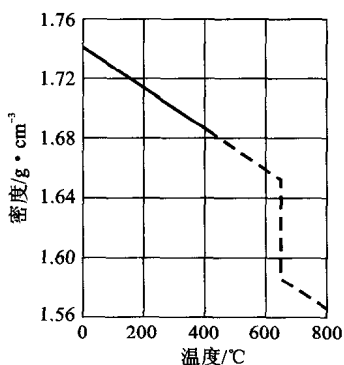


图 1-2 纯镁的密度与温度的关系

1.1.4 热学性能

熔点：在大气压下，纯镁的熔点为 $(650 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ ，熔点随环境压力的增加而升高，见图 1-3。

沸点：在大气压下，纯镁的沸点为 1090°C 。

燃烧点：在空气炉中加热时为 615°C 。

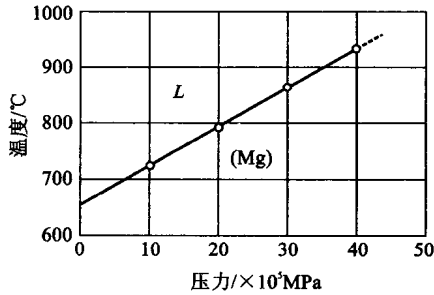


图 1-3 镁的温度与压力相图

燃烧热: 24900 ~ 25200 kJ/kg。

熔化潜热: 360 ~ 377 kJ/kg。

升华潜热: 25℃时为 6113 ~ 6238 kJ/kg。

蒸发潜热: 5150 ~ 5400 kJ/kg。

比热容(c_p): 20℃时为 1.025 kJ/(kg·K), 比热容随温度变化见图 1-4。

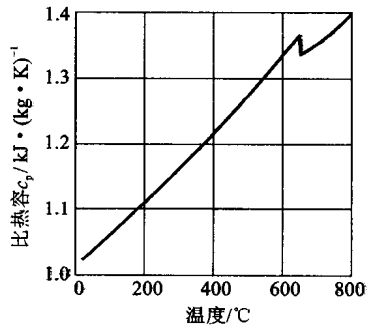


图 1-4 镁的比热容与温度的关系

德拜特征温度: 53℃。

动力学黏度: 700℃时约为 1.13 mPa·s。

表面张力: 660 ~ 852℃时为 0.545 ~ 0.563 N·/m。

894 ~ 1120℃时为 0.502 ~ 0.504 N/m。

蒸气压: 镁的给定温度下的蒸气压和给定蒸气压下的温度见表 1-2 和表 1-3。

表 1-2 镁的给定
温度下的蒸气压

温度/K	蒸气压/atm ^①
298.15	1.5×10^{-20}
400	5.2×10^{-14}
500	3.9×10^{-10}
600	1.38×10^{-7}
700	8.92×10^{-6}
800	1.99×10^{-4}
900	2.21×10^{-3}
923(固态)	3.55×10^{-3}
923(液态)	3.55×10^{-3}
1000	1.36×10^{-2}
1100	5.76×10^{-2}
1200	1.90×10^{-1}

表 1-3 镁的给定
蒸气压下的温度

蒸气压/atm ^①	温度/K
10^{-10}	482
10^{-9}	514
10^{-8}	551
10^{-7}	594
10^{-6}	644
10^{-5}	703
10^{-4}	776
10^{-3}	865
10^{-2}	982
10^{-1}	1143
10	1376

注: ① 1 atm = 101325 Pa

热扩散系数:

镁的单晶体和多晶体的自扩散系数分别见表 1-4 和表 1-5。

表 1-4 单晶体镁的自扩散系数

温度 /°C	自扩散系数/ $\times 10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	
	垂直于 c 轴轴	平行于 c 轴
468	6.17	4.98
504	2.24	1.92
535.5	0.995	0.836
575.5	0.391	0.345

表 1-5 多晶体镁的
自扩散系数

温度 /°C	自扩散系数 / $\times 10^{-9} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
468	0.44
551	3.6
627	21

线胀系数:

单晶体镁: 平行于 a 轴, 27°C 时为 $24.7 \times 10^{-6}/\text{K}$, 527°C 时为 $29.8 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

平行于 c 轴, 27°C 时为 $25.7 \times 10^{-6}/\text{K}$, 527°C 时为 $30.5 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

多晶体镁: 27°C 时为 $25.0 \times 10^{-6}/\text{K}$, 527°C 时为 $30.0 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。

亦可用下列公式计算: $\alpha_t = (25.0 + 0.018t) \mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ 。

t 为加热温度°C。

多晶体镁低温下的线胀系数和室温以上的平均线胀系数列入表 1-6。

表 1-6 镁的线胀系数

温度/°C	线胀系数/ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	温度间隔	平均线胀系数/ $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
-250	0.63	20 ~ 100	26.1
-225	5.4	20 ~ 200	27.1
-200	11.0	20 ~ 300	28.0
-150	17.9	20 ~ 400	29.0
-100	21.8	20 ~ 500	29.9
-50	23.8		