

镁合金热力学 及相图

MEIHEJIN RELIXUE JI XIANGTU

毛萍莉 王峰 刘正 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

镁合金热力学及相图

毛萍莉 王峰 刘正 编著



机械工业出版社

相图被称为材料工作者的地图,它是新材料研究与开发最源头及最重要的依据。镁合金开发所能够借鉴到的相图,远比钢铁和铝合金要少得多。本书主要介绍了镁合金热力学基础,以及建立在热力学模型上的镁合金相图计算技术,同时还介绍了镁合金二元、三元及部分四元相图,以期读者能对镁合金的基本性质、合金化、热力学原理,以及镁合金相图建立过程所采用的热力学模型有一个较为系统和全面的认识。

全书共分为五章,可对从事镁合金研究、开发与应用的同行们提供理论参考。

图书在版编目(CIP)数据

镁合金热力学及相图/毛萍莉,王峰,刘正编著.
—北京:机械工业出版社,2014.11

ISBN 978-7-111-47658-0

I.①镁… II.①毛…②王…③刘… III.①镁
合金-热力学-相图 IV.①TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第186641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:张秀恩 责任编辑:张秀恩 崔滋恩

版式设计:霍永明 责任校对:刘雅娜

封面设计:马精明 责任印制:刘 岚

北京京丰印刷厂印刷

2015年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·409千字

0 001—2 500册

标准书号:ISBN 978-7-111-47658-0

定价:55.00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

策划编辑电话:(010) 88379770

社服务中心:(010) 88361066

网络服务

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

读者购书热线:(010) 88379203

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

封面无防伪标均为盗版



前 言

镁是 10 种常用有色金属之一，蕴藏量极其丰富。据估计，镁在地壳中的含量约为 2.35%，金属元素中排在第 4 位，总储量为 100 亿 t 以上；镁在海水中的含量约为 1.28g/kg，仅次于氯和钠，总蕴藏量为 2×10^{15} t。可见，丰富的镁资源为其广泛应用提供了坚实的基础。另一方面，根据世界银行的估计，中国单位 GDP 消耗钢铁、铜、铝、铅和锌的数量分别为世界平均水平的 5.6 倍、4.8 倍、4.9 倍、4.9 倍和 4.4 倍。目前，随着中国工业化进程的加快，中国铝土矿、铜精矿、铁矿石和铅锌原料的对外依存度已分别达到或超过 60%、80%、65%、30%。可见，过高的资源对外依存度已经成为我国经济发展的短板。因此，推广我国富有资源金属——镁的用途和用量具有十分重要的战略意义。

镁的密度只有 1.74g/cm^3 ，比钢轻 75%，比铝轻 33%，是目前应用中最轻的金属结构材料，在交通工具、电子通信、航空航天和国防军工等领域具有广泛的应用前景。已有试验表明：汽车质量每下降 10%，油耗可降低 6%~8%，燃油效率可提高 5.5%；航天飞行器质量每降低 1g，则发射燃料可节约 4kg；导弹弹体减重 1kg，可少用 10kg 燃料；导弹弹头减重 1kg，则可增加 12~15km 的射程。随着近年对节能环保的日益重视，镁合金已经成为新的研究热点。然而，相对于其他规模应用的结构金属材料而言，目前镁合金的用途和用量还十分有限。从材料角度究其原因，主要是现存镁合金的牌号有限，性能的选择区间过窄，使其应用受到了极大地限制。

众所周知，如同其他合金材料一样，相图是镁合金开发的基础和工具。可是，镁合金开发所能够借鉴得到的相图，远比钢铁和铝合金要少得多。据东北大学郝士明教授的统计，现有的 87 个 Mg-X 二元系中，就有 25 个与高熔点元素等组成的系统尚未构建起相图；51 个 Mg-Al-X 三元系中，相平衡信息较多可用来帮助合金设计的只有 15 个，另有 15 个三元系只有很少的相平衡信息，尚不能支持合金设计，更多的三元系（19 个）则完全没有相图。正是因为与其他合金材料相比，镁合金的相图非常有限，因此现有的镁合金相图（包括实测相图和理论计算得到的相图）就显得极为弥足珍贵。基于这样的考虑，作者萌生了编辑镁合金相图的想法。目前，经过作者的努力本书终于完稿，诚愿本书的出版能够对今后镁合金新材料的开发有所裨益。

本书共分为五章。第一章介绍镁的基本性质，主要由沈阳工业大学刘正教授编写；第二章介绍镁的合金化及典型合金系，主要由沈阳工业大学王峰副教授编写；第三章介绍镁合金热力学，主要由沈阳工业大学刘正教授编写；第四章介绍镁合金相图计算与镁合金中相的热力学模型主要由沈阳工业大学毛萍莉教授编写；第五章介绍镁合金相图。其中，第五章镁合金相图是全书的重点，主要包括作者所能收集到的镁合金二元及三元合金相图，其中既有实测相图，也有计算相图。第一~第四章是镁合金相图的理论基础，可使读者对镁合金的基本性质、合金化、热力学原理，以及镁合金相图建立过程所

采用的热力学模型有一个较为系统和全面的认识。镁合金相图的收集和整理是一项非常艰辛的工作，沈阳工业大学镁合金课题组的研究生于波、林琳、杨金龙、彭思雯、秦佳明、孙庆海、鞠阳、刘超、邸金南、孙士杰在相图的收集和整理过程中做了大量而细致的工作，尤其是于波，在此对各位同学的辛勤工作表示衷心的感谢。特别需要指出的是，作者在编著本书的过程中参考并引用了大量的文献资料，在此向这些文献资料的作者表示最诚挚的谢意。

由于编者水平有限，难免出现一些疏漏和不当之处，敬请读者提出宝贵意见。

目 录

前言

第一章 金属镁的性质 1

- 1.1 纯镁的物理性质 1
- 1.2 纯镁的力学性能 5
- 1.3 镁合金的物理性质 7

第二章 镁的合金化及典型合金系 9

- 2.1 镁的合金化设计基础 9
 - 2.1.1 镁的合金化原则 9
 - 2.1.2 常见合金化元素 10
 - 2.1.3 合金元素的强化机制 13
- 2.2 镁合金典型合金系 15
 - 2.2.1 镁合金标记与牌号 15
 - 2.2.2 Mg-Al 系 16
 - 2.2.3 Mg-Zn 系 23
 - 2.2.4 Mg-RE 系 25
 - 2.2.5 Mg-Mn 系 27
 - 2.2.6 Mg-Li 系 28

第三章 镁合金热力学 30

- 3.1 相图热力学 30
 - 3.1.1 概述 30
 - 3.1.2 溶液、偏摩尔量与化学势 31
- 3.2 相图热力学计算 37
 - 3.2.1 相图热力学计算的一般原理 37
 - 3.2.2 热力学模型的发展历史 37
 - 3.2.3 理想溶液模型 38
 - 3.2.4 规则溶液模型 40
 - 3.2.5 亚规则溶液模型 42
 - 3.2.6 亚点阵溶液模型 44
 - 3.2.7 缔合溶液模型 47
 - 3.2.8 准化学模型 48
 - 3.2.9 修正的准化学模型 49
 - 3.2.10 物理转变对溶液摩尔吉布斯自由能的贡献 51
 - 3.2.11 多元系热力学性质的外推

方法 53

第四章 镁合金相图计算与镁合金中相的热力学模型 57

- 4.1 概述 57
- 4.2 常用相图计算软件介绍 59
 - 4.2.1 Thermo-Calcul 59
 - 4.2.2 Pandat 60
 - 4.2.3 FactSage 61
 - 4.2.4 JMatPro 62
- 4.3 镁合金中相的热力学模型 63
 - 4.3.1 镁合金二元体系中相的热力学模型 63
 - 4.3.2 镁合金三元体系中相的热力学模型 71
 - 4.3.3 镁合金四元体系中相的热力学模型 87
- 4.4 目前已经评估的镁合金相图 88
 - 4.4.1 目前已经评估的镁合金二元相图 88
 - 4.4.2 目前已经评估的镁合金三元相图 88

第五章 镁合金相图 90

- 5.1 相图基础 90
 - 5.1.1 相图基本术语 90
 - 5.1.2 二元相图 91
 - 5.1.3 三元相图 97
- 5.2 镁合金相图 99
 - 5.2.1 镁合金二元相图 99
 - Mg-Ag 99
 - Mg-Al 99
 - Mg-As 100
 - Mg-Au 100
 - Mg-B 100
 - Mg-Ba 100

Mg - Be	100	Mg - O	107
Mg - Bi	100	Mg - Pb	107
Mg - Bi (修正)	101	Mg - Pd	107
Mg - Ca	101	Mg - Pr	107
Mg - Cd	101	Mg - Pu	107
Mg - Ce	101	Mg - Rb	108
Mg - Co	101	Mg - Sb	108
Mg - Cs	101	Mg - Sc	108
Mg - Cu	102	Mg - Si	108
Mg - Cu (修正)	102	Mg - Sm	108
Mg - Dy	102	Mg - Sn	108
Mg - Dy (修正)	102	Mg - Sr	109
Mg - Er	102	Mg - Tb	109
Mg - Er (修正)	102	Mg - Tb (修正)	109
Mg - Eu	103	Mg - Th	109
Mg - Fe	103	Mg - Ti	109
Mg - Ga	103	Mg - Tl	109
Mg - Gd	103	Mg - Tm	110
Mg - Gd (修正)	103	Mg - U	110
Mg - Ge	103	Mg - V	110
Mg - H	104	Mg - Y	110
Mg - Hf	104	Mg - Y (修正)	110
Mg - Hg	104	Mg - Yb	110
Mg - Ho	104	Mg - Zn	111
Mg - Ho (修正)	104	Mg - Zn (修正)	111
Mg - In	104	Mg - Zr	111
Mg - Ir	105	5.2.2 镁合金三元相图	111
Mg - K	105	Mg - Ag - Al	111
Mg - La	105	Mg - Ag - Cd	114
Mg - Li	105	Mg - Ag - Ce	116
Mg - Lu	105	Mg - Ag - Cu	116
Mg - Mn	105	Mg - Ag - Ga	117
Mg - Mo	106	Mg - Ag - In	117
Mg - N	106	Mg - Ag - La	118
Mg - Na	106	Mg - Ag - Li	119
Mg - Nb	106	Mg - Ag - Nd	119
Mg - Nd	106	Mg - Ag - Ni	119
Mg - Nd (修正)	106	Mg - Ag - Pd	121
Mg - Ni	107	Mg - Ag - Pr	121

Mg - Ag - Sb	121	Mg - Be - Cu	161
Mg - Ag - Sm	122	Mg - Bi - Ca	162
Mg - Ag - Sn	122	Mg - Bi - Cu	163
Mg - Ag - Tl	123	Mg - Bi - Ga	164
Mg - Ag - Zn	123	Mg - Bi - Pb	164
Mg - Al - B	124	Mg - Bi - Sb	165
Mg - Al - Be	125	Mg - Bi - Sn	165
Mg - Al - Bi	126	Mg - Bi - Zn	166
Mg - Al - Ca	127	Mg - C - Ni	167
Mg - Al - Cd	128	Mg - Ca - Cu	167
Mg - Al - Ce	130	Mg - Ca - Li	167
Mg - Al - Co	131	Mg - Ca - Pb	167
Mg - Al - Cr	131	Mg - Ca - Si	168
Mg - Al - Cu	132	Mg - Ca - Zn	168
Mg - Al - Fe	135	Mg - Cd - Cu	168
Mg - Al - Ga	136	Mg - Cd - Li	168
Mg - Al - Ge	139	Mg - Cd - Pb	169
Mg - Al - Hf	139	Mg - Cd - Tl	170
Mg - Al - In	139	Mg - Cd - Y	170
Mg - Al - La	140	Mg - Cd - Zn	171
Mg - Al - Li	140	Mg - Ce - Ga	172
Mg - Al - Mn	143	Mg - Ce - La	172
Mg - Al - Nd	143	Mg - Ce - Li	174
Mg - Al - Pb	144	Mg - Ce - Si	174
Mg - Al - Sb	145	Mg - Ce - Y	175
Mg - Al - Sc	145	Mg - Ce - Zn	176
Mg - Al - Si	146	Mg - Cu - Ga	177
Mg - Al - Sm	149	Mg - Cu - In	177
Mg - Al - Sn	150	Mg - Cu - Li	177
Mg - Al - Sr	151	Mg - Cu - Ni	178
Mg - Al - Ti	152	Mg - Cu - Pb	180
Mg - Al - Tl	152	Mg - Cu - Sb	181
Mg - Al - Y	154	Mg - Cu - Si	182
Mg - Al - Zn	155	Mg - Cu - Sn	183
Mg - Al - Zr	159	Mg - Cu - Ti	184
Mg - Au - Cd	160	Mg - Cu - Zn	184
Mg - Au - Hg	161	Mg - Fe - Si	186
Mg - Au - Si	161	Mg - Ga - Ge	186
Mg - B - Ni	161	Mg - Ga - In	186

Mg - Ga - La	187	Mg - Pb - Sn	211
Mg - Ga - Li	187	Mg - Pb - Te	212
Mg - Ga - Sb	187	Mg - Pr - Zn	212
Mg - Ga - Tl	187	Mg - S - Zn	212
Mg - Gd - Y	188	Mg - Sb - Si	212
Mg - Ge - Li	188	Mg - Sb - Sn	213
Mg - Ge - Pb	189	Mg - Sc - Y	214
Mg - Ge - Si	189	Mg - Si - Sn	215
Mg - Ge - Sn	189	Mg - Si - Zn	215
Mg - Hg - Mn	190	Mg - Sm - Y	216
Mg - Hg - Te	191	Mg - Sm - Zn	217
Mg - In - Li	191	Mg - Sn - Tl	219
Mg - In - Sb	191	Mg - Sn - Zn	219
Mg - In - Sn	191	Mg - S - Zn	219
Mg - In - Te	192	Mg - Te - Zn	220
Mg - In - Tl	192	Mg - Th - Zr	220
Mg - La - Li	192	Mg - Tl - Zn	220
Mg - La - Ni	192	Mg - Y - Zn	221
Mg - La - Y	193	Mg - Y - Zr	221
Mg - La - Zn	195	5.2.3 计算镁合金三元相图	222
Mg - Li - Mn	195	Mg - Al - Dy	222
Mg - Li - Pb	195	Mg - Al - Er	222
Mg - Li - Sn	196	Mg - Al - H	224
Mg - Li - Tl	197	Mg - Al - Na	226
Mg - Li - Y	197	Mg - Ca - Ce	227
Mg - Li - Zn	198	Mg - Ca - Sn	227
Mg - Li - Zr	199	Mg - Ca - Li	231
Mg - Mn - Sn	199	Mg - Ca - Ni	232
Mg - Mn - Th	200	Mg - Ca - Sr	233
Mg - Mn - Y	201	Mg - Ce - La	234
Mg - Mn - Zr	202	Mg - Ce - Nd	234
Mg - Na - Pb	202	Mg - Cu - Ni	235
Mg - Nd - Ni	203	Mg - Cu - Y	237
Mg - Nd - Y	204	Mg - Cu - Zr	238
Mg - Nd - Zn	205	Mg - Ga - O	238
Mg - Ni - Pd	206	Mg - Ni - O	238
Mg - Ni - Zn	207	Mg - Gd - Sm	239
Mg - Pb - Sb	208	Mg - Gd - Zn	241
Mg - Pb - Si	210	Mg - La - Nd	242

Mg - La - Si	242	5.2.4 计算镁合金四元相图	250
Mg - Li - Si	243	Mg - Ca - Si - Sn	250
Mg - Ni - H	245	Mg - Ce - Gd - Y	251
Mg - Ni - Y	246	Mg - Ce - Mn - Y	251
Mg - Pr - Y	247	Mg - Fe - Si - O	252
Mg - Sr - Zn	248	Mg - Ga - Ni - O	253
Mg - Zn - Y	249	参考文献	255

第一章 金属镁的性质

镁呈银白色，熔点为 649°C ，质轻，密度为 $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ，约为铜的 $1/4$ 、铝的 $2/3$ ；其化学活性强，与氧的亲合力大，常用做还原剂去置换钛、锆、铀、铍等金属。粉状或细条状的镁，在空气中很易燃烧，燃烧时发出炫目的白光。镁与氟化物、氢氟酸和铬酸不发生作用，也不受苛性碱侵蚀，但极易溶解于有机和无机酸中。镁能直接与氮、硫和卤素等化合。金属镁无磁性，且有良好的导热性。镁是地壳中含量高、分布广的元素之一。镁存在于菱镁矿 (MgCO_3)、白云石 [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]、光卤石 ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) 中。工业上利用电解熔融氧化镁或在电炉中用硅铁等使其还原而制得金属镁，前者叫做熔盐电解法，后者叫做硅热还原法。氯化镁可以从海水中提取，主要用于制造轻金属合金、球墨铸铁、脱硫剂、格氏试剂，也能用于制烟火、闪光粉、镁盐等。

1.1 纯镁的物理性质

纯镁质软，熔点较低，呈银白色，是一种柔软有光泽的金属，其物理性质见表 1-1。

表 1-1 纯镁的物理性质

英文名	Magnesium	核外电子排布	2、8、2	第二电离能 /(kJ/mol)	1451	单质熔点/ $^{\circ}\text{C}$	650.0
中文名	镁	常见化合价	+2	第三电离能 /(kJ/mol)	7733	单质沸点/ $^{\circ}\text{C}$	1090.0
元素符号	Mg	同位素及 放射线	Mg-24、Mg-25、Mg-26、 Mg-27[9.45m]、Mg-28[21h]	电子亲和能 /(kJ/mol)	-21	原子半径/nm	0.172
相对原子 质量	24.305	常见化合物	MgO、MgCl ₂ 、Mg ₃ N ₂ 、 Mg(OH) ₂	电负性	1.31	离子半径/nm	0.066(+2)
外围电子 排布	s ²	第一电离能 /(kJ/mol)	738	单质密度 /(g/cm ³)	1.738	共价半径/nm	0.136

纯镁晶体为密排六方结构，如图 1-1 所示。其晶格常数 a 及 c 以及晶格常数随温度变化情况如表 1-2 及图 1-2 和图 1-3 所示。

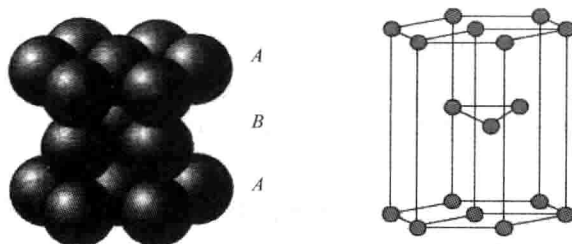


图 1-1 镁晶体结构示意图

表 1-2 纯镁晶体的晶格常数及温度对纯镁晶格常数的影响

温度/℃	晶格常数/nm	
	<i>a</i>	<i>c</i>
10	0.32081	0.52091
25	0.32088	0.52099
25 ^①	0.32095	0.52105
25 ^①	0.32093	0.52103
25 ^①	0.32090	0.52105
25 ^①	0.32094	0.52111
25 ^①	0.32088	0.52099
25	0.32095	0.52107
30	0.32100	0.52120
46	0.32106	0.52128
98	0.32152	0.52191
160	0.32211	0.52308
180	0.32214	0.52310
200	0.32217	0.52327
310.5	0.32313	0.52529
455	0.32485	0.52769
506.8	0.32551	0.52879
597	0.32665	0.53067

① 为不同研究者所测量的数据。

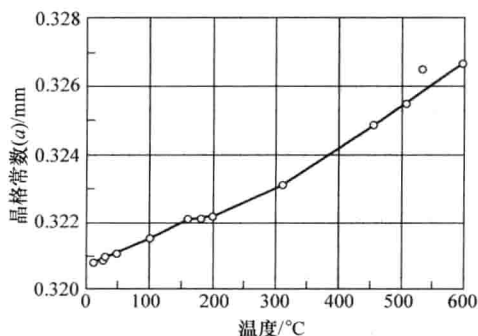


图 1-2 纯镁晶体的晶格常数 *a* 随温度变化情况

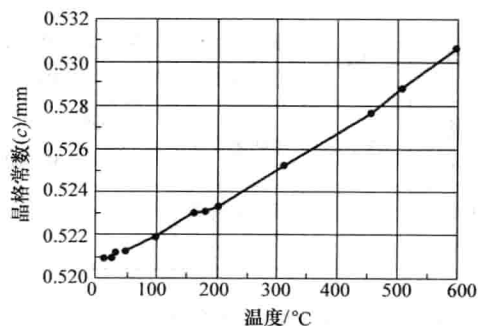


图 1-3 纯镁晶体的晶格常数 *c* 随温度变化情况

纯镁在 20℃ 时的密度为 1.738g/cm³，在熔点温度固态时的密度为 1.65g/cm³，液态时的密度约为 1.58g/cm³。纯镁的密度随温度变化情况如图 1-4 所示。纯镁在凝固时体积收缩大约 4.2%（线收缩率 1.5%），而当固态纯镁从 650℃ 冷却到 20℃ 时体积收缩 5%（线收缩率 1.7%）。

纯镁在大气压下的熔点为 650 ± 1℃。纯镁的熔点随着压力的增加而增加，如图 1-5 所示。纯镁的低温及高温线胀系数见表 1-3。

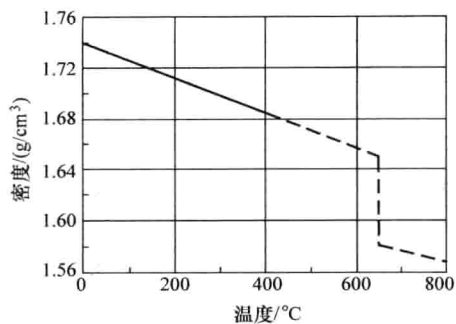


图 1-4 纯镁的密度随温度变化情况

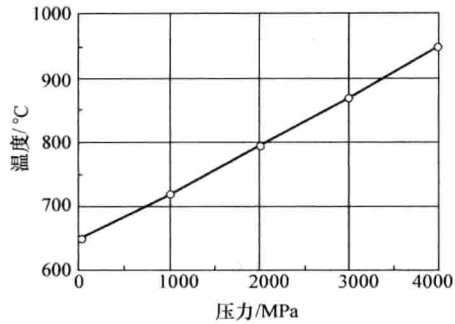


图 1-5 纯镁熔点随压力的变化

纯镁的低温及高温热导率见表 1-4 和表 1-5。纯镁高温热导率的计算公式为

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

式中 λ ——热导率；
 ρ ——电阻率；
 T ——温度。

表 1-3 温度对镁的线胀系数的影响

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

表 1-4 镁的低温热导率

温度			热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$	温度			热导率 $\lambda/[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$
/°C	/K	/°F		/°C	/K	/°F	
1	-272	-458	986	50	-223	-370	465
2	-271	-456	1960	60	-213	-352	327
3	-270	-455	2900	70	-203	-334	249
4	-269	-453	3760	80	-193	-316	202
5	-268	-451	4500	90	-183	-298	178
6	-267	-449	5080	100	-172	-280	169
7	-266	-447	5470	150	-123	-190	161
8	-265	-446	5670	200	-73	-100	159
9	-264	-444	5700	250	-23	-10	157
10	-263	-442	5580	300	27	80	156
15	-258	-433	4110	350	77	170	155
20	-253	-424	2720	400	127	260	153
30	-243	-406	1290	500	227	440	151
40	-233	-388	719	600	327	620	149

表 1-5 镁的高温热导率

温度		热导率 $\lambda/[W/(m \cdot K)]$	温度		热导率 $\lambda/[W/(m \cdot K)]$
/°C	/°F		/°C	/°F	
-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	700	153.7
98	200	153.7	427	800	154.1
149	300	153.2	482	900	154.9

纯镁的一些热物理性能见表 1-6。纯镁等压比热容如图 1-6 所示。镁的蒸气压见表 1-7。纯镁单晶的自扩散系数见表 1-8。纯镁的电阻率见表 1-9。

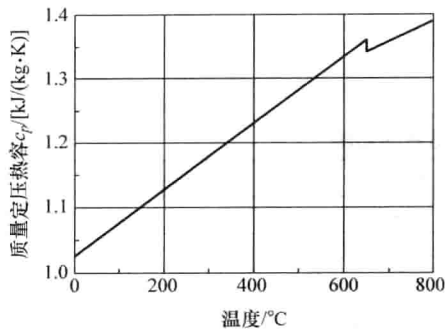


图 1-6 纯镁等压比热容与温度的关系

表 1-6 纯镁的热物理性质

性能指标	量值
比热容/ $[kJ/(kg \cdot K)]$	1.025
Debye 温度/°C	53 (326K)
熔化潜热/ (kJ/kg)	360 ~ 377
升华潜热 (25°C) / (kJ/kg)	6113 ~ 6238
蒸发潜热/ (kJ/kg)	5150 ~ 5400
燃烧热/ (kJ/kg)	24900 ~ 25200

表 1-7 镁的蒸气压

温度/K	给定温度下的蒸气压/atm	温度/K	给定温度下的蒸气压/atm
298.15	1.5×10^{-20}	482	10^{-10}
400	5.2×10^{-14}	514	10^{-9}
500	3.9×10^{-10}	551	10^{-8}
600	1.38×10^{-7}	594	10^{-7}
700	8.92×10^{-6}	644	10^{-6}
800	1.99×10^{-4}	703	10^{-5}
900	2.21×10^{-3}	776	10^{-4}
932 (固态)	3.55×10^{-3}	865	10^{-3}
932 (液态)	3.55×10^{-3}	982	10^{-2}
1000	1.36×10^{-2}	1143	10^{-1}
1100	5.76×10^{-2}	1376	10
1200	1.90×10^{-1}		
1300	5.14×10^{-1}		
1376	1.00		
1400	1.19		

注: 1atm = 101325Pa。

表 1-8 纯镁单晶的自扩散系数

温度		自扩散系数 $D/(cm/s)$	
/℃	/°F	垂直于 c 轴	平行于 c 轴
468	874	6.17	4.98×10^9
504	939	2.24	1.92×10^9
535.5	996	0.995	0.836×10^9
575.5	1068	0.391	0.345×10^9

表 1-9 纯镁的电阻率

固态			液态		
温度		电阻率 / $n\Omega \cdot m$	温度		电阻率 / $n\Omega \cdot m$
/℃	/°F		/℃	/°F	
0	32	41.0	650	1202	274.0
20	68	44.5	704	1300	277.4
38	100	47.2	760	1400	280.1
93	200	56.3	816	1500	282.9
149	300	65.4	871	1600	285.6
204	400	74.5	927	1700	288.5
260	500	83.6			
316	600	92.8			
371	700	101.9			
427	800	111.1			
482	900	120.3			
538	1000	129.8			
593	1100	139.5			
650	1202	153.5			

1.2 纯镁的力学性能

纯金属镁的弹性模量为 45GPa，剪切模量为 17GPa，体积模量为 45GPa，泊松比为 0.290，莫氏硬度为 2.5，布氏硬度为 260HBW。

1. 纯镁的拉伸性能

纯镁在室温时的拉伸性能见表 1-10。温度以及应变速率对纯镁拉伸性能的影响如图 1-7 及图 1-8 所示。

表 1-10 在 20℃时纯镁的典型力学性能

试样	抗拉强度 /MPa	拉伸规定塑性 延伸强度/MPa	压缩规定塑性 延伸强度/MPa	50mm 的 伸长率 (%)	硬度	
					HRE	HBW ^①
砂型铸造 ($\phi = 13mm$)	90	21	21	2 ~ 6	16	30
挤压 ($\phi = 13mm$)	165 ~ 205	69 ~ 105	34 ~ 55	5 ~ 8	26	35
硬辊轧板	180 ~ 220	115 ~ 140	105 ~ 115	2 ~ 10	48 ~ 54	45 ~ 47
退火薄板	160 ~ 195	90 ~ 105	69 ~ 83	3 ~ 15	37 ~ 39	40 ~ 41

① 载荷 500kg，直径 10mm 的硬质合金球。

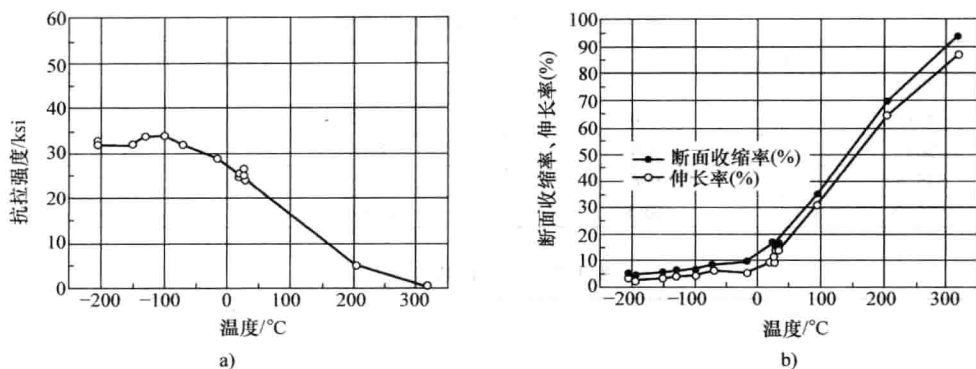


图 1-7 纯镁的拉伸性能与温度的关系 (测试条件: 挤压棒, $\phi = 15.8\text{mm}$, 应变速率为 1.27mm/min)

a) 抗拉强度 b) 断面收缩率及伸长率

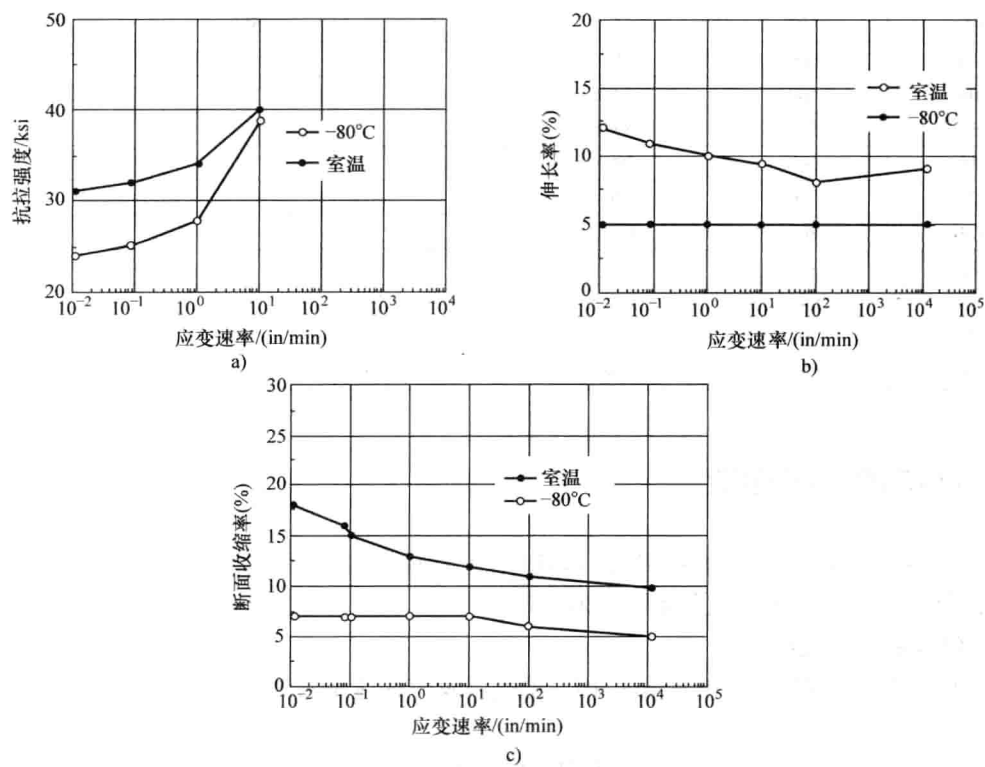


图 1-8 纯镁的拉伸性能与应变速率的关系 (测试温度: 室温及 -80°C)

a) 抗拉强度 b) 伸长率 c) 断面收缩率

注: $1\text{in} = 25.4\text{mm}$ 。

2. 纯镁的弹性性能

纯镁在 20°C 的弹性模量如下:

- 1) 对于纯度为 99.98% 的镁, 动态弹性模量为 44GPa , 静态弹性模量为 40GPa 。
- 2) 对于纯度为 99.8% 的镁, 动态弹性模量为 45GPa , 静态弹性模量为 43GPa 。

纯镁弹性模量与温度的关系如图 1-9 所示。

3. 纯镁的蠕变性能

纯镁的蠕变性能如图 1-10 及图 1-11 所示。

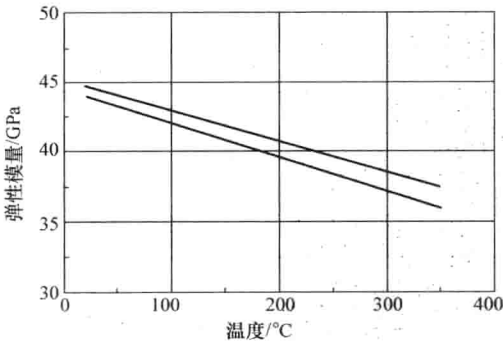


图 1-9 纯镁弹性模量与温度的关系

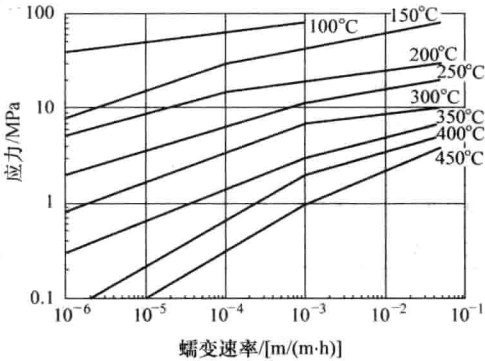


图 1-10 纯镁的最小蠕变率与应力及温度的关系

4. 纯镁的阻尼性能

纯镁的阻尼性能如图 1-12 所示。

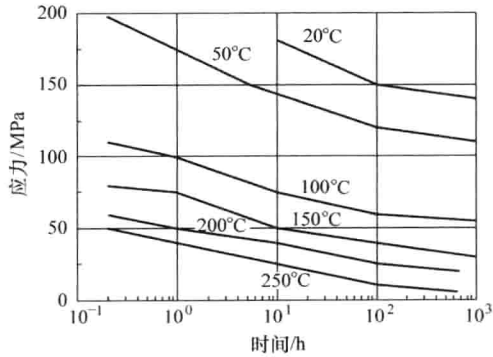


图 1-11 纯镁的断裂寿命与温度及应力的关系

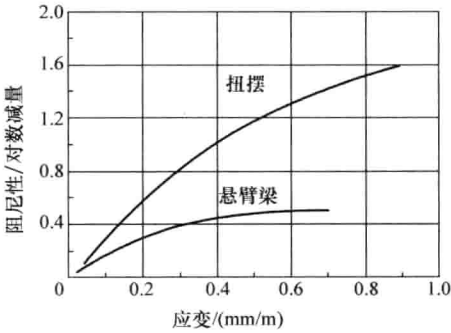


图 1-12 纯镁的阻尼性能

1.3 镁合金的物理性质

镁合金除了密度低外，还有很多其他的良好的物理特性。镁合金在汽车结构材料应用中，有时比铝和塑料更有应用价值。镁合金的主要优点有：比铝高 30 倍的减振性能；比塑料高 200 倍的导热性能；其热膨胀性能只有塑料的 1/2。镁合金的物理性能见表 1-11 ~ 表 1-13。

表 1-11 镁合金物理性能与其他合金的比较

物理性能	AZ91	AM60	A380DC	A356T6	尼龙	ABS	钢
密度/ (g/cm ³)	1.81	1.79	2.74	2.69	1.4	1.05	7.8
热导率/ [W/ (m·K)]	51	61	96	159	0.33	0.28	14
线胀系数/10 ⁻⁶ K	26	25.6	22	21.5	34.5	76.5	12
凝固范围/°C	470 ~ 595	540 ~ 615	540 ~ 595	555 ~ 615	—	—	—