

细晶镁合金制备方法 及组织与性能

郭学锋 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

细晶镁合金制备方法 及组织与性能

郭学锋 著

北 京
冶金工业出版社
2010

内 容 提 要

本书以 Mg-Zn-Y-Ce 和 Mg-Al-Si 两个合金系为例,论述了采用快速凝固和大变形制备细晶镁合金的工艺、组织和性能特点。

本书共分 9 章:第 1 章为绪论;第 2 章详细描述了制备细晶镁合金的三种装置;第 3~7 章分别论述了两个合金系的铸态和快速凝固态的组织和性能,以及往复挤压大变形过程中其组织演化、强化相的细化和球化、往复挤压态镁合金的室温和高温力学性能等;第 8 章探讨了往复挤压快速凝固镁合金的疲劳性能特点;第 9 章利用热力耦合计算,模拟了镁合金往复挤压过程中的不同场,为今后镁合金大变形加工从可视的角度提供了理论参考。

本书可供从事镁合金研究和生产的科技工作者阅读,也可供大学冶金专业和材料专业的本科生和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

细晶镁合金制备方法及其组织与性能/郭学锋著. —北京:
冶金工业出版社,2010. 4

ISBN 978-7-5024-5174-5

I. ① 细… II. ① 郭… III. ① 细晶强化—镁合金—制备
IV. ① TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 028684 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张爱平 李培禄 美术编辑 李 新 版式设计 孙跃红

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-5174-5

北京百善印刷厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销

2010 年 4 月第 1 版,2010 年 4 月第 1 次印刷

148 mm×210 mm;10 印张;296 千字;307 页

49.00 元

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100711) 电话:(010)65289081

(本书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前

言

进入新世纪以来,节能与减排日益受到重视。镁及其合金作为最轻的常用金属结构材料,已受到人们越来越多的关注,世界各国都将镁合金列入了 21 世纪最为重要的结构材料之一。美国 2005 年制定了未来 15 年镁合金战略规划,德国将镁合金看成是未来汽车制造业的主要材料。作为起步过程中的中国汽车业和航空航天业对镁合金的需求将会越来越多。镁合金之所以受到如此重视,是因为它具备了结构材料要求的主要性能。其质轻、环境“友好”和资源丰富三个突出特点顺应了持续发展的要求,因此,镁合金又被称之为未来“绿色材料”。

但是,由于镁合金强度低、抗蠕变性能差、塑性差和耐蚀性差,到目前,其应用范围并非预期想象的那么广泛,被工业界接受也尚有一个过程。为此,作为材料科学工作者,需要在镁合金研究和应用方面做更多的工作。

为了提高镁合金的强度和塑性,通过细化镁合金的组织(基体晶粒和强化相颗粒)是重要的方法之一。本书以 $\text{Mg}-\text{Zn}-\text{Y}-\text{Ce}$ 和 $\text{Mg}-\text{Al}-\text{Si}$ 两个合金系为例,论述了采用快速凝固和大变形制备细晶镁合金的工艺、组织和性能特点。第 1 章绪论部分,主要论述了两个合金系中合金元素的主要作用、准晶相和其强化镁合金的特点,并综述了快速凝固镁合金制备技术以及低维合金大变形固结技术。第 2 章详细描述了制备细晶镁合金的三种装置。第 3~7 章是本书的主要部分,论述了两个合金系的铸态和快速凝固态的组织 and 性能,以及往复挤压大变形过程中其组织演化、强化相的细化和

球化、往复挤压态镁合金的室温和高温力学性能等。第8章探讨了往复挤压快速凝固镁合金的疲劳性能特点,分析了其组织与疲劳性能的关系。第9章利用热力耦合计算,模拟了镁合金往复挤压过程中的不同场,为今后镁合金大变形加工从可视的角度提供了理论参考。

本书论述的材料制备方法未必非常合理,学术观点未必完全正确,希望同行批评指正。

著 者

2009年11月于河南理工大学



1 绪论	1
1.1 纯镁	1
1.2 镁合金	2
1.3 Mg-Zn-Y(-Zr)合金	5
1.3.1 合金元素的作用	5
1.3.2 Mg-Zn-Y合金中的准晶相	6
1.4 Mg-Al-Si(AS)镁合金	9
1.5 镁合金的强化	9
1.5.1 固溶强化	10
1.5.2 时效强化	10
1.5.3 弥散强化	11
1.5.4 细晶强化	11
1.6 快速凝固镁合金	11
1.6.1 快速凝固的特点	11
1.6.2 单辊快速凝固	13
1.6.3 快速凝固薄带的固结	18
1.6.4 金属材料大塑性变形技术	18
1.7 本章小结	22
参考文献	22
2 细晶镁合金制备装置	31
2.1 KND-II型单辊快速凝固设备	31
2.1.1 熔化部分	32
2.1.2 加热电路	33

2.1.3	测温系统	33
2.1.4	真空系统	35
2.1.5	单辊及驱动	35
2.1.6	喷射气路	38
2.1.7	控制部分	39
2.1.8	设备功能	40
2.2	正挤压	40
2.3	往复挤压	41
2.4	本章小结	42
	参考文献	43
3	铸态 $Mg_2Si/Mg-Al$ 复合材料的组织与性能	44
3.1	$Mg-Si$ 和 $Al-Si$ 中间合金	44
3.1.1	$Mg-Si$ 中间合金	44
3.1.2	$Al-Si$ 中间合金	46
3.2	铸态 $Mg_2Si/Mg-Al$ 复合材料的组织与性能	47
3.2.1	铸态 AS42、AS44 和 AS66 组织	47
3.2.2	铸态 AS42、AS44 和 AS66 合金性能	49
3.2.3	AS93、AS96 和 AS99 铸态组织	51
3.3	铸态 $Mg_2Si/Mg-Al$ 复合材料的热处理	53
3.3.1	AS42、AS44 和 AS66 热处理态组织	53
3.3.2	AS42、AS44 和 AS66 热处理态性能	55
3.3.3	AS93、AS96 和 AS99 热处理态组织	56
3.3.4	AS93、AS96 和 AS99 热处理态性能	60
3.4	Mg_2Si 相的球化及其对力学性能的影响	62
3.4.1	Mg_2Si 相对力学性能的影响	62
3.4.2	Mg_2Si 相的球化	63
3.5	合金元素对 $Mg_2Si/Mg-Al$ 复合材料的组织与性能的影响	65
3.5.1	Sb 变质对铸态 AS42、AS44 和 AS66 组织的影响	65
3.5.2	Sb 变质对铸态 AS42、AS44 和 AS66 性能的影响	71

3.5.3 Ce、Sb、Y 对 AS96 复合材料组织的影响	71
3.5.4 Ce、Sb、Y 对 AS96 复合材料性能的影响	73
3.6 本章小结	73
参考文献	75
4 Mg-Zn-Y-Ce 合金的凝固组织与性能	76
4.1 铸态 Mg-Zn-Y-Ce 合金的组织	76
4.1.1 铸态 Mg-5.4% Zn 合金的组织	76
4.1.2 铸态 ZK60 的组织	78
4.1.3 铸态 Mg-Zn-Y 合金的组织	80
4.1.4 铸态 Mg-6.3% Zn-1.5% Y-1.0% Ce 合金的组织	86
4.1.5 Mg-Zn-Y-Ce-Zr 铸态组织	90
4.2 快速凝固 (RS) Mg-Zn-Y 合金的组织	90
4.2.1 RS 薄带的宏观特征	90
4.2.2 RS-Mg-5.4% Zn 合金的组织	91
4.2.3 RS-ZK60 薄带的组织	92
4.2.4 RS66 薄带的组织	97
4.2.5 热处理对 RS66 薄带组织的影响	101
4.3 热处理对快速凝固薄带组织与性能的影响	102
4.4 本章小结	106
参考文献	107
5 往复挤压 Mg_2Si_p/Mg-Al 复合材料的组织与性能	110
5.1 往复挤压 AS 42、AS 44 和 AS 66 的组织	110
5.1.1 Mg_2Si 和 $Mg_{17}Al_{12}$ 相的细化	110
5.1.2 基体的细化	115
5.2 往复挤压 AS 42、AS 44 和 AS 66 的性能	117
5.3 往复挤压 AS 96 的组织	120
5.3.1 往复挤压未经均匀化处理 AS 96 的组织	120
5.3.2 往复挤压经均匀化处理后 AS 96 的组织	122

5.4 往复挤压 AS 96 的性能	123
5.4.1 室温拉伸性能	123
5.4.2 室温压缩性能	124
5.5 往复挤压过程中基体组织的演化	125
5.5.1 基体组织动态再结晶与细化	125
5.5.2 影响晶粒细化的因素	127
5.5.3 晶粒粗化	130
5.6 Mg_2Si 的细化	130
5.6.1 Mg_2Si 颗粒细化特征	131
5.6.2 应变对 Mg_2Si 颗粒尺寸的影响	132
5.6.3 Mg_2Si 颗粒细化机制	133
5.7 往复挤压材料的高温力学性能	138
5.7.1 镁合金高温性能的基本概念	138
5.7.2 RE - n - EX - AS 42(44,66) 系列镁合金 高温性能	139
5.7.3 RE - n - EX - AS 96 镁合金高温性能	143
5.8 本章小结	147
参考文献	148
6 挤压态 Mg - Zn - Y 镁合金的组织与性能	150
6.1 EX - RS 66 合金的组织	150
6.2 EX - RS 66 合金的室温性能	153
6.2.1 EX - RS 66 合金的硬度	153
6.2.2 EX - RS 66 合金的拉伸性能	155
6.2.3 EX - RS 66 合金的压缩性能	158
6.2.4 EX - RS 66 合金的压缩与拉伸性能对比	160
6.3 EX - RS 66 合金的高温压缩性能	160
6.3.1 高温压缩应力应变曲线	160
6.3.2 高温压缩试样宏观形貌	162
6.3.3 高温压缩真应力应变	162
6.3.4 热压缩过程中的动态再结晶	165

6.4 变形工艺参数对流变应力的影响	168
6.4.1 应变速率对流变应力的影响	168
6.4.2 温度对流变应力的影响	170
6.5 EX - RS 66 合金高温压缩的本构方程	170
6.6 本章小结	174
参考文献	175
7 往复挤压 Mg - Zn - Y 镁合金的组织与性能	177
7.1 往复挤压合金的宏观形貌	177
7.2 往复挤压铸态 Mg - Zn - Y 合金组织特点	178
7.2.1 RE - n - CT 合金组织特点	178
7.2.2 RE - CT - Mg - Zn - Y 合金晶粒细化	181
7.2.3 热处理对 RE - CT - Mg - Zn - Y 合金组织的影响	183
7.3 RE - CT - Mg - Zn - Y 合金的性能	184
7.3.1 RE - n - EX - CTB1 合金的性能	184
7.3.2 RE - n - EX - CT66 合金的性能	187
7.4 往复挤压快速凝固 Mg - Zn - Y 合金的组织特点	188
7.4.1 RE - n - EX - RS - ZK60 合金的组织特点	188
7.4.2 RE - n - EX - RS 66 合金的组织特点	191
7.4.3 RE - n - EX - RS B1 合金的组织特点	193
7.5 往复挤压快速凝固 Mg - Zn - Y 合金薄带的焊合	197
7.5.1 线接触阶段	197
7.5.2 焊合阶段	198
7.5.3 最终阶段	200
7.6 RE - n - EX - RS 合金的性能	200
7.6.1 RE - n - EX - RS - ZK60 合金的性能	200
7.6.2 RE - n - EX - RS 66 合金的性能	201
7.6.3 RE - n - EX - RS B1 合金的性能	205
7.6.4 往复挤压对合金组织与力学性能的影响	205
7.6.5 往复挤压快速凝固 Mg 合金强化机制	213
7.7 本章小结	220

参考文献	221
8 往复挤压快速凝固 Mg-Zn-Y 合金的疲劳性能	223
8.1 金属材料的疲劳性能	224
8.1.1 疲劳的有关定义及分类	224
8.1.2 疲劳裂纹的萌生与扩展	225
8.1.3 材料的 $S-N$ 曲线	226
8.1.4 疲劳的研究进展	227
8.1.5 镁合金疲劳性能的研究现状	230
8.1.6 影响镁合金疲劳的因素与改进方法	231
8.2 RE-2-EX-RS 66 合金疲劳研究路线	232
8.2.1 疲劳试样与夹具	232
8.2.2 常规性能测试	235
8.2.3 疲劳性能测试	236
8.2.4 疲劳断口分析	237
8.3 RE-2-EX-RS 66 合金的疲劳性能	238
8.3.1 疲劳试验结果	238
8.3.2 RE-2-EX-RS 66 合金的疲劳性能	241
8.3.3 分布函数验证	243
8.3.4 RE-2-EX-RS 66 合金疲劳数据的正态 分布验证	246
8.4 $S-N$ 曲线与 $P-S-N$ 曲线	246
8.4.1 实验数据	246
8.4.2 RE-2-EX-RS 66 合金的 $S-N$ 曲线	247
8.4.3 RE-2-EX-RS 66 合金的 $P-S-N$ 曲线	249
8.5 疲劳极限与抗拉强度的关系	251
8.6 疲劳断口与疲劳机理分析	252
8.6.1 宏观断口分析	252
8.6.2 微观断口分析	254
8.6.3 疲劳损伤机理	261
8.6.4 往复挤压与快速凝固对提高合金疲劳性能的影响	263

8.7 本章小结	263
参考文献	264
9 镁合金往复挤压成形热力耦合模拟	267
9.1 往复挤压成形过程数值模拟	267
9.1.1 有限元模型与模拟条件	267
9.1.2 往复挤压变形过程	269
9.1.3 不同工艺参数对往复挤压过程的影响	282
9.2 数值模拟实验验证	302
9.2.1 物理模拟准则、模拟材料的选择及实验过程	302
9.2.2 结果与分析	303
9.3 本章小结	305
参考文献	306
后记	307

1 绪 论

1.1 纯镁

镁是银白色的金属,原子序数 12,相对原子质量 24.32,电子结构 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$,位于周期表中第 3 周期第 2 族。其化学性质比较活泼,平衡电位较低(-2.34 V)。因此,镁易氧化,在空气中暴露很短时间,其表面很快就会发暗,接着便形成一层白色氧化层。镁表面的氧化膜一般都疏松多孔,故镁耐蚀性较差,具有极高的化学和电化学活性。其电化学腐蚀过程主要以析氢为主,以点蚀或全面腐蚀形式迅速溶解直至粉化。镁合金在酸性、中性和弱碱性溶液中都不耐蚀,溶于各种有机酸和无机酸中(氢氟酸和铬酸除外)。在 pH 值大于 11 的碱性溶液中,由于生成稳定的钝化膜,镁合金是相对耐蚀的。如果碱性溶液中存在 Cl^- ,使镁表面钝态破坏,镁合金也会腐蚀。

镁为密排六方结构,基面 $\{0001\}$ 为原子最密排面。在 25°C 时,晶格常数为: $a=0.3202\text{ nm}$, $c=0.5199\text{ nm}$, $c/a=1.6237$ 。配位数等于 12 时的原子半径为 0.1602 nm 。

纯镁在 20°C 时的密度为 1.738 g/cm^3 ^[1],比铝轻 35.6%,比钛轻 61.5%,是常用结构材料中最轻的金属。镁的比热容比其他金属都低,且合金元素对其比热容的影响不大。因此,镁及其合金加热升温与散热降温比其他金属快。纯镁的熔点是 650°C ,再结晶温度约为 150°C 。

由于镁是六方晶系金属,它在常温时的强度低,塑性差,见表 1-1,所以,纯镁很少用作结构材料。镁的最主要用途是制造镁合金及配制其他有色合金材料。但是,随着镁合金腐蚀防护技术研究的不断深入和新型耐蚀镁合金材料的开发,镁合金的应用领域必将进一步扩大。目前,镁主要应用在如下几个方面:

- (1) 作为难熔金属(如 Ti、Zr、Hf)的还原剂;
- (2) 作为生产球墨铸铁的球化剂;
- (3) 作为生产优质钢的脱硫剂;
- (4) 用于铅和锡冶金脱铋(生成 Bi_2Mg_3);
- (5) 作为铝的合金化元素;
- (6) 制备镁合金;
- (7) 制备高储能材料(如 MgH_2)。

表 1-1 纯镁的力学性能^[2]

加工状态	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	刚度 /GPa	伸长率 /%	断面收缩率 /%	硬度 HBS
铸 态	11.5	2.5	45	8	9	30
变形态	20.0	9.0	45	11.5	12.5	36

1.2 镁合金

镁合金的密度比纯镁稍高,在 $1.75 \sim 1.90 \text{ g/cm}^3$ 之间。镁合金具有良好的生物兼容性,最高的比强度和比刚度,优异的工艺性能,较好的耐腐蚀性能,良好的导热、减振及电磁屏蔽性以及原材料丰富,切削加工简单和回收容易等优点。被认为是制备电器产品壳体、运输工具和航天飞行器零部件最具前途的材料,被誉为“21 世纪的绿色工程结构材料”。

据报道,飞行器重量每降低 1 g,发射燃料可以节约 4 kg;航空发动机自重降低 40%,比功率可以提高约 30%^[3]。采用快速凝固技术获得的超高强度镁合金,已经被美国和以色列应用于制作飞行器中推进器冷室的多种关键零部件^[4]。

镁合金作为一种正式的材料首次应用于工业是在 20 世纪 30 年代,应用于一辆赛车的活塞。不过,那时候镁被认为是潜力有限的一种特殊材料。第二次世界大战的爆发,推动了镁在宇航领域的发展。德、美、英三国开始对镁合金进行了大量的研究和试验。

20 世纪 80 年代以来,随着镁及其合金的价格下降和加工技术不

断革新,人们为解决环境和能源问题,为降低能耗的需要,愈来愈追求轻量化。汽车、航空航天器和 3C 产品等对镁合金需求开始日益增加,镁合金的应用愈来愈受到青睐。镁合金将成为 21 世纪最重要的轻质高强度材料之一^[5]。

1990~1996 年世界镁合金压铸件产量以 18% 的速度递增,1997 年创纪录,比 1996 年增长 32%,达到 7 万吨^[6]。1999 年全世界总共生产约 36 万吨镁,主要用于压铸镁合金。

目前,镁合金在轿车上的主要应用形式是铸件和压铸件。随着人们节约能源及环保意识的增强,现代汽车工业正朝着燃料效率型的轻型汽车方向发展,从而迫使汽车制造商竞相开发镁合金汽车零件以减轻车重。镁合金在降低轿车重量上,无论从短期,还是长期来看,都具备开发的潜力及竞争力。预计,全世界对汽车用镁合金的需求量每年将递增 20% 以上^[6]。在汽车工业中,镁合金用于制造离合器外壳、变速器外壳、变速器上盖、发动机罩盖、转向盘、座椅支架、仪表盘框架、车门内板、转向支架、制动支架、气门支架、缸盖和缸体等 60 多种零部件。在航空工业中,镁合金用于制造飞机、发动机零件等十几种部件。镁合金还用来制造笔记本电脑外壳、手机外壳和光学仪器等。

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。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,20 世纪 90 年代后期,变形镁合金产品开始用于车辆、3C 产品以及其他民用产品领域。

根据生产工艺的不同,镁合金可分为铸造镁合金及变形镁合金。我国的镁合金牌号中,ZM 表示铸造镁合金,MB 表示变形镁合金,后面标以序号。目前,几乎所有商业运作和研究报道都采用 International Magnesium Association (IMA) 镁合金牌号标记。因此,本书中在未特殊标记时,也采用 IMA 牌号。

铸造镁合金包括压铸镁合金和砂型铸造镁合金。根据化学成分的不同,镁合金可分为 Mg-Al-Zn (AZ)、Mg-Al-Mn (AM)、Mg-Mn-Ce、Mg-RE-Zr (EK)、Mg-Zn-Zr (ZK) 和多元系镁合金等^[7~9]。目前,工业中应用最广泛的是 AZ 系镁合金,如:AZ 91 D 压铸镁合金。

对于 AZ 系合金, 437℃ 时铝在镁中的溶解度为 12.7% (质量分数), 而在 93℃ 时仅为 3.0% (质量分数)。但是, AZ 系合金中只有铝含量高于 4% (质量分数) 才有足够体积分数的 β -Mg₁₇Al₁₂ 强化相。故一般铝含量高于 7% (质量分数), 才能保证有高的强度。AZ 系合金中加入少量锌可提高合金元素的固溶度, 加强热处理强化效果, 可以有效地提高合金的屈服强度。含高锌的镁铝锌合金有更好的压铸性能。在镁铝合金中, 锌含量在一定范围内易引起热裂, 尤其在压铸时更易发生^[8~10]。这是由于 AZ 系合金在凝固过程中, 由于 Al、Zn 元素晶间偏析而在晶界富集, Zn 元素增加了晶界低熔点相的量, 增加了合金的热裂纹倾向。因此, Al/Zn 比是值得重视的一个参数。当 Al 含量较低 (<8% (质量分数)) 时, 随着 Zn 含量的增加, 抗拉强度提高, 伸长率下降; 当 Al 含量高 (>8% (质量分数)) 时, 随着 Zn 含量的增加, 抗拉强度降低, 伸长率提高。研究表明^[9,11], AZ 91 和 ZA 84 合金具有好的综合力学性能。另外, 这类合金中加入少量的锰可以提高镁合金的耐蚀性, 并可以消除杂质铁对耐蚀性的不良影响。

变形镁合金和铸造镁合金在成分、组织和性能上存在很大的差异。固溶体合金的塑性变形优良, 但强度比较低。对于包含金属间化合物的两相合金, 其强度高, 但塑性变形能力低。特别是当第二相合金很脆时, 变形往往不均匀, 容易造成开裂。因此, 早期的变形镁合金, 由于要求其兼有良好的塑性变形能力和尽可能高的强度, 在组织的设计上, 一般情况下要求不含金属间化合物。而强度的提高主要依赖合金元素对镁合金的固溶强化和塑性变形引起的加工硬化。变形镁合金主要包括 Mg-Al-Zn (AZ)、Mg-Al-Mn (AM)、Mg-Zn-Zr (ZK) 等。

除了上述铸造镁合金和变形镁合金外, 还有新发展的快速凝固粉末冶金镁合金^[12,13]和大变形镁合金。本书主要讨论以下两类材料的组织和性能特点:

(1) 铸造和铸造结合大变形条件下的 Mg-Al-Si (AS) 和 Mg-Zn-Y;

(2) 快速凝固结合大变形条件下的 Mg-Zn-Y。

1.3 Mg-Zn-Y(-Zr)合金

1.3.1 合金元素的作用

一般认为,稀土元素在镁合金中的作用有^[14]:

(1) 提高镁合金的高温强度、抗蠕变性能。比如加入 Y、Nd 合金化后的 WE 系列镁合金,使用温度可以达到 300℃;

(2) 改善镁合金的铸造性能,降低显微疏松和热裂纹的倾向;

(3) 改善镁合金焊接性能,提高焊缝强度;

(4) 稀土镁合金耐蚀性不亚于其他镁合金,一般无应力腐蚀倾向;

(5) 稀土元素 Y、Nd 在镁中具有高的固溶度,合金经过固溶处理可以使 Mg-RE 化合物全部溶入基体,进一步改善镁合金室温和高温力学性能;

(6) 稀土元素可降低镁在液态和固态下的氧化倾向;

(7) 含稀土的 Mg 合金在医学上可作为人工骨骼。

合金元素 Y 具有密排六方晶体结构,在镁中的固溶度为 12.0% (质量分数)。Mg-Y 合金热处理时能够形成 GP 区强化^[15],提高 Y 含量可以形成强化相。Y. Kawamura^[16]等研究快速凝固喷射沉积 $Mg_{97}Y_2Zn_1$ 合金时获得了室温 610 MPa 的高屈服强度。发现微量锌(0.02% (摩尔分数))对 Mg-Y 基合金强度影响显著^[17,18]。由此可见,用锌部分替代价格昂贵的 Y,同样可以得到良好的强化效果^[19]。

Mg-Zn 合金中添加了 Y,可提高合金的共晶温度,延迟过度时效。Y 含量和 Zn 含量对合金显微组织、力学性能影响较大^[20]。在 Mg-Y 合金中添加 Zn 能有效提高温度为 550~650 K 区间的抗蠕变性能^[16]。

B. L. Mordike^[21]研究 Mg-Y-Zn-Nd-Zr、Mg-Zn-Y、Mg-Y-Zr 等合金在 200℃加载 100 h,产生 0.2% 塑性变形的强度时发现,Y 具有很好的高温强化效果,如图 1-1 所示。

研究表明,在 ZK60 合金中,Zr 主要分布在晶粒中心,由中心向晶粒边缘逐渐降低。浸蚀后偏析区呈年轮状或花朵状^[22]。镁合金中加入 0.5%~0.8% Zr (质量分数),其细化晶粒效果最好。另外,Zr 还可以减少热裂倾向、提高力学性能和耐蚀性、降低应力腐蚀敏感性^[23]。