



现代冶金及材料科技新进展

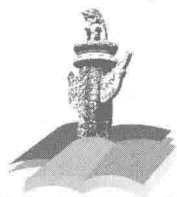
高性能镁合金 晶粒细化新技术

New Technologies of Grain Refinement for
High Performance Magnesium Alloys

张丁非 胡红军 戴庆伟 杨明波 代俊林 著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代冶金及材料科技新进展

高性能镁合金晶粒细化新技术

张丁非 胡红军 戴庆伟 杨明波 代俊林 著

北 京

冶 金 工 业 出 版 社

2016

内 容 提 要

本书概述了 21 世纪初国家镁合金科技计划项目开展以来,相关单位在镁合金晶粒细化方面开展的主要研究和取得的主要成果,总结了国内外镁合金制备与成型领域的最新进展、所取得的成绩和经验。针对高性能镁合金晶粒细化技术如合金化、液态成型技术、传统塑性变形技术、挤压剪切塑性变形技术、计算机应用等技术的原理、理论、应用进行了详细阐述。

本书可供高等院校和科研院所冶金、材料专业的教师、研究生阅读,也可供从事镁合金研究和生产的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高性能镁合金晶粒细化新技术/张丁非等著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 1

现代冶金及材料科技新进展

ISBN 978-7-5024-7187-3

I. ①高… II. ①张… III. ①镁合金—晶粒细化
IV. ①TG146. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 040921 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 张熙莹 唐晶晶 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 王永欣 孙跃红 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7187-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版, 2016 年 1 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 24 印张; 468 千字; 373 页

68.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高、阻尼减振降噪性好、导热和导电性好、抗动态冲击载荷能力强、资源丰富、可循环应用等优点，是目前工程应用中最轻的金属结构材料，被誉为“用之不竭的轻质材料”和“绿色的工程材料”，与钢、铝、铜、工程塑料等互补，为交通工具、电子通信、航空航天和国防军工等领域的材料应用提供了重要选择。镁合金被誉为 21 世纪资源与环境可持续发展的绿色材料，已成为世界各国普遍关注的焦点。我国镁资源极其丰富，可利用的镁储量占世界总储量的 70%，且我国已是镁合金生产及出口的大国，因此，大力发展镁合金材料，推广镁合金应用具有突出的资源优势。从某种意义上说，资源可以制约一个国家的经济，影响国家的发展战略，危及国家的安全。当前，资源及能源已成为制约我国国民经济可持续发展的突出问题。发展高性能镁合金材料，提高镁合金的制备加工水平，是实现我国从镁资源优势向经济优势转化的关键之举。

作者近年来在镁合金制备与成型方面，包括高性能镁合金的合金化、熔炼、热处理、液态成型技术、塑性变形技术、表面防护技术、焊接技术、计算机数值模拟等方面，开展了广泛的研究，并取得了一些成果。本书概述了 21 世纪初国家镁合金科技计划项目开展以来，相关单位在镁合金晶粒细化方面开展的主要研究和取得的主要成果，总结了国内外镁合金制备与成型领域的最新进展与所取得的成绩和收获的经验。本书针对高性能镁合金晶粒细化技术如合金化、液态成型技术、传统塑性变形技术、挤压剪切塑性变形技术、计算机应用等技术

的原理、理论、应用进行了详细阐述。本书信息量大，内容丰富、新颖、系统性强，含有不少前沿资料，论述的学术思想和技术均具有国内先进水平，有较高的参考价值。

本书可作为高等院校和科研院所材料专业及冶金专业的教师和研究生的教学和科研用书，也可供从事镁合金研究和生产的科技工作者阅读。

全书由张丁非、胡红军统稿，刘杰慧、张钧萍、耿青梅、代俊林、戴庆伟、杨明波等参与了编写，为本书的完成作出了贡献，在此表示感谢。

感谢国家出版基金对本书出版的资助，同时感谢国家自然科学基金（项目号：51101176、51571040、51501025）、中国博士后基金（面上一等资助、特别资助）、重庆市前沿与基础研究项目（项目号：cstc2014jcyjA50004、cstc2015jcyjBX0054）、重庆市教委科研项目（项目号：KJ1500939）等对研发的资助。

由于作者水平所限，书中不足之处恳请读者批评指正。

作者
2015. 8. 20

目 录

1 绪论	1
1.1 镁合金的特性	1
1.2 镁合金的分类	2
1.3 镁合金的应用	3
1.4 镁合金强韧化方法	5
1.4.1 固溶强化	5
1.4.2 第二相强化	6
1.4.3 时效沉淀强化	6
1.4.4 晶粒细化	6
1.4.5 热处理强化	7
1.4.6 复合强化——镁基复合材料	8
1.4.7 合金化	8
1.4.8 控制温度和应变速率	8
1.4.9 控制组织	8
1.5 镁合金应用中存在的瓶颈问题	8
1.6 细化晶粒对提高镁合金性能的意义	11
参考文献	15
2 镁合金普通挤压过程晶粒细化及调控	17
2.1 凹模型线对镁合金棒材裂纹形成的有限元和实验研究	17
2.1.1 模拟和实验	17
2.1.2 实验结果与分析	20
2.2 新型 Mg-Zn-Mn 变形镁合金的挤压特性与组织性能研究	25
2.2.1 材料制备与实验方法	25
2.2.2 实验结果与分析	26
参考文献	30

3 镁合金挤压剪切过程物理模拟研究	32
3.1 镁合金的普通挤压研究	32
3.1.1 普通挤压工艺	32
3.1.2 普通挤压工艺对组织和性能的影响	32
3.2 镁合金的等径角挤压研究	33
3.2.1 等径角挤压工艺	33
3.2.2 等径角挤压工艺对组织和性能的影响	34
3.3 EX-ECAE 复合工艺	36
3.4 金属热挤压变形的物理模拟	36
3.5 有限元法	37
3.6 模拟与实验方法	40
3.6.1 挤压剪切的模拟研究	40
3.6.2 实验方法	46
3.7 挤压剪切工艺物理模拟结果与分析	49
3.7.1 挤压剪切的物理模拟	50
3.7.2 组织不均匀的原因	51
参考文献	52
 4 AZ31 镁合金挤压剪切过程晶粒细化机制研究	 56
4.1 影响 ES 变形挤压压力的因素	57
4.1.1 温度	57
4.1.2 速度	57
4.1.3 摩擦	59
4.2 ES 挤压后的模具状况	60
4.3 ES 变形 AZ31 镁合金的组织分析	60
4.3.1 挤压后纵截面的组织演变	61
4.3.2 挤压后横截面组织演变	65
4.3.3 X 射线衍射实验结果分析	67
4.3.4 EBSD 实验结果分析	69
4.4 ES 变形 AZ31 镁合金的力学性能	70
4.4.1 显微硬度测试	70
4.4.2 压缩性能分析	71

4.4.3 拉伸性能分析	72
4.4.4 拉压不对称性	73
4.4.5 断口失效分析	74
4.5 影响组织和性能的主要因素	77
4.6 AZ31 镁合金 ES 工艺的形核机制和细化机理	78
4.6.1 ES 变形对组织的影响及形核机制	78
4.6.2 ES 变形过程中的动态再结晶机制	79
4.7 ES 挤压过程的有限元分析	79
4.7.1 网格的变形行为	80
4.7.2 应力分析	81
4.7.3 应变分析	82
4.7.4 应变速率分析	83
参考文献	84
5 挤压剪切细晶强化后镁合金 AZ61 组织和性能的研究	85
5.1 实验过程及内容	88
5.1.1 ES 挤压模拟	89
5.1.2 ES 挤压实验	90
5.2 420℃ 挤压变形微观组织与性能研究	92
5.2.1 ES 变形微观组织	94
5.2.2 ES 变形与普通挤压所制备镁合金微观组织比较	95
5.2.3 初始状态不同时的性能研究	98
5.3 ES 变形微观组织与性能分析	102
5.3.1 不同的变形温度	103
5.3.2 不同部位	108
5.3.3 不同初始状态	113
5.3.4 模拟挤压的有限元分析	116
参考文献	122
6 挤压剪切过程多物理场对镁合金微观组织的影响	125
6.1 挤压剪切过程多物理场演化仿真	128
6.1.1 挤压剪切过程的物理场演化仿真参数的选择	133

6.1.2 挤压剪切过程挤压力演变仿真	133
6.1.3 挤压剪切过程等效应变演化	137
6.1.4 挤压剪切过程挤压速度场演变	140
6.1.5 挤压剪切过程温度场的变化	144
6.2 挤压剪切的微观组织与力学性能	147
6.2.1 挤压剪切实验结果	147
6.2.2 晶粒取向变化	151
6.2.3 显微硬度	153
6.2.4 挤压比为 12, 转角为 120° 的 ES 挤压与普通挤压	153
6.2.5 挤压比为 12, 转角为 135° 的 ES 挤压	172
6.2.6 挤压比为 18 的 ES 挤压	178
6.2.7 挤压比为 22 的 ES 工艺	179
6.2.8 影响 ES 工艺的因素	187
参考文献	188
 7 镁合金轧制过程晶粒细化及调控	 193
7.1 镁合金板材轧制成型的研究进展	193
7.1.1 镁合金轧制成型的特点	193
7.1.2 提高镁合金轧制成型性的途径	194
7.1.3 基于有限元技术的板带轧制研究的进展	200
7.2 初始宽度对 AZ31 轧制板材组织性能的影响	204
7.2.1 材料准备和实验方法	204
7.2.2 实验结果和分析	205
7.3 递温镁合金板的轧制实验和数值仿真	209
7.3.1 数学模型	209
7.3.2 实验方法和有限元模拟	211
7.3.3 结果与讨论	212
参考文献	233
 8 Mg-Zn-Ca 镁合金的晶粒细化机制及调控	 239
8.1 实验材料及实验方法	245
8.1.1 实验合金的成分设计	246

8.1.2 实验合金的熔炼制备	246
8.1.3 实验合金的热处理	247
8.1.4 组织与性能测试方法	248
8.2 实验结果与分析	249
8.2.1 Mg-3.8Zn-2.2Ca-xCe 镁合金的组织 and 性能	249
8.2.2 Mg-3.8Zn-2.2Ca-xSn 镁合金的组织 and 性能	263
8.2.3 Mg-3.8Zn-2.2Ca-xZr 镁合金的组织 and 性能	277
8.2.4 分析与讨论	288
参考文献	293
9 稀土元素对耐热镁合金的晶粒细化作用机制	298
9.1 耐热镁合金	299
9.2 合金元素对镁合金组织和性能的影响	300
9.2.1 Sr 对镁合金组织和性能的影响	300
9.2.2 Gd 对镁合金组织和性能的影响	301
9.2.3 Y 对镁合金组织和性能的影响	301
9.3 实验材料和实验方法	304
9.3.1 Mg-3.8Zn-2.2Ca-Sr/Gd/Y 镁合金的成分设计	304
9.3.2 Mg-3.8Zn-2.2Ca-Sr/Gd/Y 镁合金的熔炼制备	305
9.3.3 Mg-3.8Zn-2.2Ca-Sr/Gd/Y 镁合金的热处理	306
9.3.4 组织与性能检测方法	307
9.4 实验结果	309
9.4.1 Sr 添加对 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金组织和性能的影响	309
9.4.2 Gd 添加对 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金组织和性能的影响	326
9.4.3 Y 添加对 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金组织和性能的影响	342
9.5 分析与讨论	359
9.5.1 Sr 对 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金晶粒细化的影响分析	359
9.5.2 Gd 和 Y 对 Mg-3.8Zn-2.2Ca 镁合金晶粒细化的影响分析	363
参考文献	365
索引	370

1 绪 论

随着现代科技的不断发展,金属材料的消耗与日俱增,主流金属矿产资源逐渐趋于枯竭。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为2.3%,位居常用金属的第四位,此外,镁在盐湖及海洋中的含量也十分可观,如海水中镁含量达 $2.1 \times 10^{15} \text{t}$ 。在很多金属趋于枯竭的今天,加速开发镁金属材料是实现可持续发展的重要措施之一。由国际著名镁合金专家联合撰写的“镁基合金”(详见R. W. 卡恩、P. 哈森、E. J. 克雷默主编的《材料科学与技术丛书》的第8卷)中指出:“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。”

镁合金是所有金属结构材料中最轻的,其密度只有 1.74g/cm^3 ,是铝的67%,钢的23%,且具有很高的比强度、比刚度,优良的抗振性、抗冲击性和切削加工性能。同时镁合金还具有导热导电性好、阻尼减振、电磁屏蔽、易于机械加工和容易回收等优点,因此有人将镁誉为“21世纪绿色工程金属”。镁合金已成为交通、电子通信、国防军工等工业领域的重要材料,有可能在若干年后超过铝和铜而成为应用量最大的第二种金属材料,现已成为世界各国关注的焦点^[1]。我国汽车、高速轨道交通、电子通信等产业的快速发展,对镁合金的制备及加工提出了更高的要求。

镁资源是我国的优势金属材料资源,镁合金是一种重要的绿色结构材料,镁产业在我国国民经济发展中有着举足轻重的地位。立足我国已有的镁产业基础,重点突破镁合金加工成型过程的关键科学问题,建立和发展镁合金加工成型的理论基础和关键应用技术原型,为镁材料产业的进一步发展做好技术储备,具有重要的战略意义^[2]。我国的镁合金研究发展水平与世界发达国家的差距较小,如果集中优势力量针对关键科学问题展开研究,在镁合金材料的加工成型与制备理论上取得突破,就有可能达到甚至赶超世界先进水平,造就一批从事该领域前沿科学研究的具有创新思想的高科技人才,实现我国镁产业由“资源大国”向“研发强国”和“应用强国”的跨越。

1.1 镁合金的特性

与其他结构材料相比,镁合金具有以下几个特点^[3,4]:

(1) 镁合金的密度是钢的23%,铝的67%,塑料的170%,是金属结构材

料中最轻的金属, 镁合金的屈服强度与铝合金大体相当, 只稍低于碳钢, 是塑料的 4~5 倍, 其弹性模量更远远高于塑料, 是它的 20 多倍, 因此在相同的强度和刚度情况下, 用镁合金做结构件可以大大减轻零件质量, 这对航空工业、汽车工业、手提电子器材业均有很重要的意义。

(2) 镁合金与铝合金、钢、铁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, 可承受较大的冲击震动负荷。

(3) 镁合金具有较好的铸造性和加工性能。镁与铁的反应低, 熔炼时可用铁坩埚, 熔融镁对坩埚的侵蚀小, 熔化成本只有铝的 $2/3$ 。压铸时对压铸模的侵蚀小, 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。铸造镁合金的铸造性能良好, 镁合金可压铸制造复杂的零部件和超薄外壳件, 最薄可达 0.45mm (ABS 塑料为 1.2~2mm, 铝合金为 1.5~2mm), 镁铸件的表面质量和外观明显比铝好; 镁压铸件与模具的亲合力远低于铝, 模具寿命是铝的 2 倍以上; 压铸生产效率比铝高 25%, 消失模铸造比铝高 200%; 镁的结晶潜热比铝小, 在模具内凝固快, 生产率比压铸铝件高出 40%~50%, 最高可达两倍。镁合金有相当好的切削加工性能, 切削阻力仅为铝合金的 56%、黄铜的 43%。加工时可采用较高的切削速度和廉价的切削刀具, 工具消耗低, 而且不需要磨削和抛光, 用切削液就可以得到十分光洁的表面。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。

(4) 镁合金电磁屏蔽性能和导热性均较好, 适合做成发出电磁干扰的电子产品的壳、罩, 尤其是紧靠人体的手机。镁合金与铝、铜等有色金属一样具有非火花性, 适合做矿山设备和粉粒操作设备。

(5) 镁合金具有较好的非黏附性和耐磨性。镁合金表面具有非黏附性, 适合于做成在冰、雪、沙尘中运动的产品。镁合金有较好的耐磨性, 适宜做缠绕滑动设备。

(6) 镁合金有较高的尺寸稳定性, 稳定的收缩率, 铸件和加工件尺寸精度高, 除镁-铝-锌合金外, 大多数镁合金在热处理过程及长期使用中由于相变而引起的尺寸变化接近于零, 适于做样板、夹具和电子产品外罩。

(7) 镁合金对缺口的敏感性比较大, 易造成应力集中。在 125℃ 以上的高温条件下, 多数合金的抗蠕变性能较差, 这在选用和设计零件时应考虑。

(8) 与塑料类材料相比, 镁合金具有可回收性。这对降低制品成本、节约资源、改善环境都是有益的。

1.2 镁合金的分类

按成型工艺, 镁合金可分为铸造镁合金 (ZM) 和变形镁合金 (MB) 两大类。变形镁合金一般是指可用挤压、轧制、锻造等塑性成型方法加工成型的镁合

金^[6]。从 20 世纪 40 年代开始,变形镁合金开始在社会生产制造中得到应用,主要集中在航空航天和国防军工等方面。进入 20 世纪 90 年代后,随着人们对变形镁合金研究得更加深入,变形镁合金材料开始应用在汽车、交通、电子以及其他民用产品等领域。铸造镁合金主要用于汽车零件、机件壳罩和电气构件等。用镁合金铸件代替铝合金铸件,在强度相等的条件下,可使工件的质量减轻 25%~30%。

镁合金的晶体结构为密排六方,塑性不及面心立方结构的铝,使得塑性成型能力差。因此镁合金在压铸成型领域优先得到了重视并有所发展。但因为变形镁合金比铸造镁合金具有更优良的综合使用性能,所以对变形镁合金的挤压工艺展开深入的研究成为了进一步扩大和提高镁合金应用的核心。变形镁合金制品一般采用挤压、轧制和锻压成型的方法生产^[5]。由于变形加工消除了铸锭组织中的一些缺陷,使显微组织发生了显著的细化,变形镁合金获得了比铸造镁合金更高的强度、伸长率等力学性能^[3]。

变形镁合金类型主要有 Mg-Mn 系、Mg-Al 系、Mg-Zn 系和 Mg-Li 系四大类合金。

1.3 镁合金的应用

采用镁合金制作汽车零部件可以降低汽车启动和行驶重量,提高加速和减速性能,减少行驶中的振动,使汽车驾驶更加舒适灵活。采用镁合金制造手机、笔记本电脑和一些家用电器的外壳时,能显著增强产品的散热能力和抗震能力,并能有效地减轻对人体和周围环境的电磁辐射。采用变形镁合金制造战术导弹舱段、副翼蒙皮、壁板、加强框、舵面、隔框等零件,诱饵鱼雷壳体,以及雷达、卫星上用的镁合金井字梁,相机架和外壳等,质量可与原来的塑料壳体相当,而刚度更高。

镁合金的特点可满足航空航天等高科技领域对轻质材料吸噪、减震、防辐射的要求,可大大改善飞行器的气体动力学性能并明显减轻结构质量。在航空航天方面用作飞机的起落架、舱门、连杆机构、壁板等,尤其是密度最小的 Mg-Li 合金,兼有强度、韧性和可塑性,备受航空航天业的青睐。20 世纪 40 年代开始,镁合金首先在航空航天部门得到了应用。B-36 重型轰炸机每架用 4086kg 镁合金薄板;洛克希德 F-80 喷气式歼击机镁板机翼,使结构零件从 47758 个减少到 16050 个;“大力神”火箭使用了 600kg 的变形镁合金;“季斯卡维列尔”卫星中使用了 675kg 的变形镁合金;直径约 1m 的“维热尔”火箭壳体是用镁合金挤压管材制造的。我国歼击机、轰炸机、直升机、运输机、民用机、机载雷达、地空导弹、运载火箭、人造卫星、飞船上均选用了镁合金构件:一个型号的飞机最多选用 300~400 项镁合金构件,一个零件最重近 300kg,一个构件的最大尺寸达

2m 以上。

世界各国都非常重视兵器装备的轻量化,采用轻金属是其主要手段之一^[7,8]。武器轻量化是现代兵器的发展趋势,利用镁合金取代现有武器上的一些零部件正成为各国研究的热点。有关单位已分别通过锻造或铸造成型方式开发出了变形镁合金冲锋枪机匣、枪尾、提把、前扶手、枪托体、大托弹板、瞄具座、小弹匣座以及军用铸造合金发动机进水管和发动机滤座等军品武器用零部件,其中部分对耐蚀耐磨有较高要求的军用镁合金零部件还被通过协和涂层的方法进行了相应的表面处理。目前,这些研制生产出的军用镁合金零部件已进入实际演示验证和考核阶段,预计不久将得到初步应用。

镁合金作为密度最低的金属结构材料,在以汽车为主的交通工具中具有重要的发展应用前景。镁的比强度高于铝合金和钢,比刚度接近铝合金和钢,能承受一定负荷;具有良好的铸造性和尺寸稳定性,容易加工,废品率低;具有较高的阻尼系数,减振量大于铝合金和铸铁,用于壳体可降低噪声,用于座椅、轮圈可以减少振动,提高汽车的安全性和舒适性。另外,我国汽车数量的快速增长加剧了我国石油资源的短缺,在大气污染中汽车尾气排放占 30%~60%,已成为全球的重要污染源。为此,以降低油耗和尾气排放为目标的汽车减重已成为我国节能环保的重要任务。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%。但目前镁合金在汽车、摩托车及轨道交通等方面的应用还主要在非承力的壳(箱)体件上,而一些新研发的合金由于加入较贵的合金元素以及加工成本高等问题还无法满足交通工业上的规模化应用。所以,研究低成本、高性能镁合金材料及产品,促进镁合金在交通工具上的应用,对于降低石油(能源)消耗和尾气排放都具有十分重要的意义。欧、美的汽车工业是现时镁合金铸件消费最多的行业,此行业应用镁合金的主要原因是减轻汽车的质量和降低整体的生产成本。随着人们的环境保护意识不断加强,汽车轻量化成为一个重要的课题,镁合金是其中一个能实现轻量化的材料。此外,镁合金也可满足一些整体设计上和功能上的特殊要求。

欧洲的镁合金铸造工业发展较亚洲早,技术较成熟。第二次世界大战前镁合金主要应用于军事用途,德国在这方面有很悠久的历史。第二次世界大战结束后,德国被禁止发展镁合金技术,后来逐渐解禁,镁合金也转移至民用上。

未来战争环境和作战模式都要求武器装备必须满足远程投放、快速部署、机动作战和远程精确打击的需要。这就要求未来武器装备的结构要轻,可靠性要高。对远程作战而言,减轻武器装备的质量对于扩大作战半径、减少能源消耗、增加有效负载及降低运输费用都具有重要意义。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;航天飞行器质量每降低 1g,发射燃料可节约 4kg。

为了提高武器远程精确打击和机动战术性能,国内外长期以来一直期待着将镁合金作为主干材料,更多地应用于制造飞机、导弹、飞船、卫星、轻武器等重要装备。目前受限于镁合金牌号少和使役性能不高等问题,镁合金材料在军事装备中的应用优势未得到充分发挥,所以新型高性能镁合金材料在国防军工领域具有十分广阔的应用前景。

镁合金在电子工业中的应用也具有很大的潜力。众所周知,电子工业是当今发展最为迅速的产业,数字化技术的发展导致各类数字化电子产品的不断涌现。电子元器件越来越趋于高度集成化和小型化,便携式电脑、数码摄像机、数码相机、手机等日新月异,更新速度之快令人瞠目结舌。镁合金由于具有比强度高、导热导电性好、电磁屏蔽性能好以及环境兼容性能,可代替塑料壳体满足3C(计算机、通信、消费类电子)产品轻、薄、小型化、高集成的要求以及严格的环保要求,在信息产业中得到了广泛的应用。镁合金压铸件的壁厚越薄,工艺要求越高,相对来说加工的稳定性会越低,令次品率提高,生产成本因而增加。日本在追求产品微型化中,采用镁合金制造电子用具、电脑、相机、通信器材等产品的外壳和零件,可以令产品更薄、外形更轻巧、结构更紧凑。例如手提电脑外壳,利用镁合金制造可薄至0.8mm,并具有防电磁波的功效。日本的镁合金压铸技术的研究主题,是要把压铸件做到越来越薄,以配合市场的需求。镁合金所具有的特殊外观和质感,使它成为制造时尚产品的必然选择,也可以令产品的价值大增。因此,现时流行的手机、笔记本电脑、相机等产品越来越多地应用镁合金制造外壳,尤其在日本更是应用甚广。

我国是世界上笔记本电脑和手机等3C产品的最大制造国,每年生产笔记本电脑8千多万台,手机1亿多部,但因成本问题,目前只有少量高端产品采用镁合金材料。所以,开发满足3C电子产品需求的低成本镁合金材料,特别是可用于直接冷成型的镁合金薄板及其加工技术,具有重要的经济效益,同时可显著提升3C产品的生产技术和使用水平,并降低电磁污染对健康的危害。

1.4 镁合金强韧化方法

镁合金的强化方式主要包括固溶强化、第二相强化(析出强化、弥散强化)、时效沉淀强化等。

1.4.1 固溶强化

根据原子尺寸、晶格类型、电化学性质和电子浓度等因素,镁和元素周期表中可形成合金的元素能形成有限固溶体,合金元素溶入基体中,通过原子错排、溶质与溶剂原子弹性模量的差异而强化基体,若溶质原子提高了合金熔点、增大弹性模量、减小原子自扩散,还可提高抗蠕变性能。

1.4.2 第二相强化

超过溶解度的合金元素将与镁形成中间相,有下列三种类型^[5-7]:

- (1) AB 型——简单立方 CsCl 结构,如 MgTi 、 MgAg 、 MgCe 和 MgSn 。
- (2) AB_2 型——Laves 相,如 MgCu_2 、 MgZn_2 和 MgNi_2 。
- (3) CaF_2 型——面心立方金属间化合物,如 Mg_2Si 和 Mg_2Sn 。

当合金元素在基体中的溶解度随温度降低而下降时,将从基体中析出第二相阻碍位错运动和滑移,使屈服强度提高,产生析出强化(时效强化)。强化效果取决于尺寸、形状、物理性能和析出相与基体间的界面性质。

弥散强化的颗粒是合金在凝固过程中产生的,其熔点较高、不溶于镁基体、具有良好的热力学稳定性。弥散强化相比于析出强化可以保持到更高的温度。

1.4.3 时效沉淀强化

镁合金时效硬化效应没有铝合金明显,与其结构变化特点有关。 Mg-Al 和 Mg-Al-Zn 系合金缓冷试样(空冷或油淬)在 $150 \sim 222^\circ\text{C}$ 时效,先从晶界或缺陷部位发生不连续沉淀,不经 GP 区阶段即直接析出片状平衡相 Mg_4Al_3 ,沿一定取向向晶粒内生长。此时,沉淀区的基体浓度和晶格常数已达平衡状态,未发生沉淀反应的晶粒内部,晶格常数和浓度保持不变。这种片层状不连续反应结构又称珠光体型沉淀。这种组织中的 Mg_4Al_3 相弥散度低,片间距大(200nm),基体浓度低,无共格或中共格应力场,故强化效果低^[8,9]。

当不连续沉淀向晶内发展到一定程度后,晶粒内部才能发生连续分解。此时,细小的片状 Mg_4Al_3 相一边析出和长大,固溶体浓度和晶格常数也发生连续变化,最终达到与时效温度相适应的平衡状态。这种沉淀的特点是基体浓度和晶格常数是连续变化的,即连续沉淀。这两种合金的显微组织,一般是由连续和不连续反应组织组成,但两类组织所占比例的大小则由合金的浓度和热处理制度来决定。合金的过饱和度低,固溶体浓度不均匀(偏析),时效不足或温度低时,不连续沉淀将占优势;反之,铝浓度高,进行了充分均匀化处理,淬火速度快,时效温度高,连续沉淀则占主要地位。因为不连续沉淀是由于沉淀相结构与基体相差较大,沉淀应变能过高,只能从晶界开始逐渐向晶内发展,如果时效温度过高(250°C 以上),原子扩散能力强,不连续沉淀也可能不发生,只出现连续沉淀。

1.4.4 晶粒细化

细化晶粒不仅能提高材料的强度,还能增强材料的塑性(小晶粒间的晶界更易滑动同时协助大晶粒而变形)。研究表明:当晶粒小于一定尺寸时,材料会呈

现明显的延性转变,如镁合金晶粒尺寸细化到 $8\mu\text{m}$ 以下时,延性转变温度可至室温。

通过下列手段控制镁合金晶粒尺寸,以提高镁合金强度和塑性^[10~12]:向镁合金熔液中添加晶粒细化剂,如含 Zr 细化剂、含 C 细化剂。凝固时 Zr 以六方晶型 $\alpha\text{-Zr}$ 质点形式析出,弥散分布于镁合金熔体中作为镁的结晶核心,使镁合金组织明显细化;加入的 C 与铝形成 Al_4C_3 ,其晶格类型属于六方晶系,晶格常数均与镁相近,同样作为镁的结晶核心。将镁合金过热到 850°C 左右保温 30min,然后快冷到铸造温度浇注的过程即为过热处理。这种处理最适于含 Al、Mn 和杂质 Fe 的镁合金。细化原因可能是过热处理时产生了六方晶格 MnAl_4 等高熔点化合物在结晶过程中起晶核作用,从而细化晶粒。

1.4.5 热处理强化

铸态镁合金的力学性能可通过热处理的方法改善。锻造态镁合金可用冷加工、退火、固溶和时效等方式来提高镁合金的力学性能。图 1-1 为典型的二元镁合金相图,溶解度 c 点附近的合金,时效强化效果最高。成分向左或向右偏离 c 点,强化效果都将降低。合金成分向左偏离时,由于 α 固溶体的过饱和度降低,故淬火时效效果减小。合金成分位于 b 点以左时,合金不再可能通过热处理进行强化。合金成分向右偏离 c 点,淬火时效强化效果也将降低。因为时效过程是在 α 固溶体中进行的,根据杠杆定律,合金成分向右偏离 c 点越远,其所含 α 固溶体的量越少,故强化效果越低。但如果第二相不太脆,合金的强度也可能有所增加,因为第二相的硬度往往高于 α 固溶体,其含量增多势必增大合金的强度^[13]。

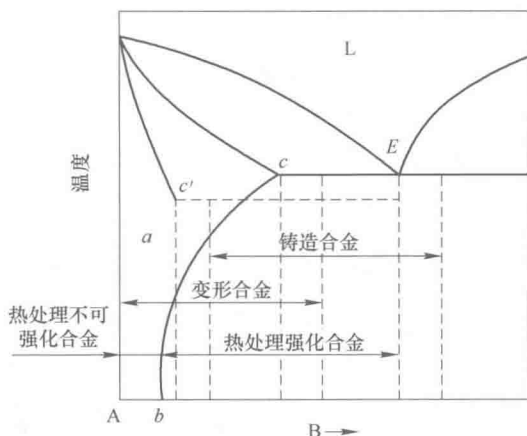


图 1-1 二元镁合金相图