

## 【综述与评论】

## 高性能稀土镁合金的研发现状及应用\*

沈远香,张秀蓉,罗明文

(中国兵器工业第五九研究所,重庆 400039)

摘要:介绍高性能稀土镁合金中的铸造稀土镁合金、快速凝固稀土镁合金、变形稀土镁合金、稀土耐热镁合金、稀土阻燃镁合金,并对高性能稀土镁合金在国内外的研发现状及在军民品上的应用状况作了较详细的叙述。

关键词:稀土;镁合金;研发现状

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2008)05-0114-03

我国是镁、稀土资源大国,但它们长期处于低级应用阶段,如何深层次应用镁、稀土资源,成为一项紧迫的课题。如何利用镁资源的优势正受到越来越多国内有识之士的关注。镁合金材料以其独特的优势被誉为“21世纪绿色工程金属结构材料”,并将成为21世纪重要的商用轻质结构材料<sup>[1]</sup>。随着镁合金及其相关技术的发展,镁合金在国内各个领域的应用也得到了进一步的推广,并将成为21世纪重要的轻质结构材料。据统计,在全球范围内,已连续10年保持增长率15%~25%,这在现代工程结构材料中前所未有<sup>[2]</sup>。

## 1 稀土镁合金的研发动向

### 1.1 铸造稀土镁合金

传统的镁合金耐热、抗高温蠕变等性能较差,通常只能用于120℃以下的场合,达不到交通工具发动机和传动部件需要耐温150~200℃、250℃甚至更高的要求,从而限制了它的应用。围绕着如何提高铸造镁合金的力学、耐腐蚀、耐高温、抗蠕变等性能,研究人员对稀土作为镁合金添加剂或合金元素的作用进行了大量研究,取得了瞩目的成绩<sup>[2]</sup>。

### 1.2 快速凝固稀土镁合金

快速凝固工艺的原理适于改进镁合金的力学性能。由于冷却速率相当快,可获得在传统铸造工艺条件下得不到的铸件成分、相结构,如晶粒细小、无偏析、过饱和固溶、亚稳相、化合物细小弥散等。快速凝固是最新发展的一类制备高性能材料的先进技术,使镁合金的开发进入一个崭新的领域。

快速凝固技术的三大类(雾化、流铸和原处熔化)都可以用于镁合金的生产。目前最具代表性的工作主要是由

DowChemical Co和Allied Signal公司开发的RSP-Mg-Al-Zn基合金。研究表明,对AZ91合金,快速凝固合金抗拉强度提高40%~60%,屈服强度提高50%~100%,压缩屈服强度提高45%~230%,压缩屈服强度与拉伸屈服强度之比CYS/TYS $\geq$ 1.1,伸长率可高达22%,大气腐蚀行为与铝合金20142T6相当。在该类合金基础上加入3%~5%稀土元素,可产生附加弥散硬化效应,降低腐蚀趋势,并进一步提高合金蠕变抗力。此外,以稀土元素为主的雾化喷射沉积Mg-Nd-Pr-Mn合金在室温及高温下均具有优良的抗拉强度和耐腐蚀性。因此,采用快速凝固技术对开发优质含稀土的镁合金有巨大的潜力。

通过快速冷却制备的凝固镁合金,由于大量超过平衡溶度的稀土元素固溶到镁中可以大幅度地降低轴比( $c/\alpha$ ),扩展 $\alpha$ -Mg的固溶区间,激发新的滑移系,从而提高镁合金的塑性变形能力;也可提高镁合金微观组织的均匀性,避免局部微电池作用,降低了镁合金的腐蚀趋势<sup>[3]</sup>。

### 1.3 变形稀土镁合金

变形稀土镁合金比铸造镁合金具有更高的强度、更好的塑性。研究表明镁合金在热变形后,组织得到了显著细化,铸造组织缺陷被消除,使得产品的综合力学性能大大提高<sup>[2]</sup>。发展变形镁合金制品可使镁合金更大量地应用于结构件上,如轧制的薄板或厚板、挤压材和锻件。但由于变形镁合金的开发与研究不够充分,有关稀土对其组织性能影响的研究远不如稀土在铸造镁合金中的研究那么深入和充分,相关的公开专题研究报告相对较少<sup>[3]</sup>。

### 1.4 稀土耐热镁合金

耐热性差是阻碍镁合金广泛应用的主要原因之一。当温度升高时,它的强度和抗蠕变性能大幅度下降,使它难以作为关键零件(如发动机零件)材料在汽车等工业中得到更广泛的应用。目前世界各国含稀土铸造镁合金已占牌

\* 收稿日期:2008-06-16

作者简介:沈远香(1964—),女,重庆江津人,高级工程师,主要从事科技采编研究。

号总数的50%以上,稀土镁合金中稀土金属的质量分数一般在2.5%~3%。其主要机制是稀土元素使晶界和相界扩散渗透性减少,使相界的凝聚作用减慢,且第二相在整个持续时间内始终是位错运动的有效障碍,稀土元素可减少金属表面氧化物缺陷;加入稀土元素后(如Ce),能在晶界生成高熔点化合物(如 $MS_{12}Ce$ )对晶粒起钉扎作用,从而提高合金的高温强度和蠕变强度,且稀土含量增加,合金蠕变速率降低;在镁基体中稀土元素具有较大的固溶度,且随温度的下降,固溶度也降低,满足与Mg形成时效型合金的必要条件。大多数镁稀土合金形成共晶反应,并且由于晶间热稳定性高的化合物存在,使Mg-RE合金具有良好的抗蠕变性能,在200~250℃时仍具有良好的抗蠕变性能。到目前为止,稀土元素如Y,Sc,Gd在耐热镁合金中的作用研究已取得突破性进展<sup>[4]</sup>。

### 1.5 稀土阻燃镁合金

镁合金常用的阻燃方法为熔剂保护和SF<sub>6</sub>混合气体保护;但相对而言,合金化阻燃是一种更理想的阻燃方法。其机理是在合金中添加特定的合金元素来影响合金氧化的热力学反应与动力学过程,形成具有保护作用的致密的氧化膜,达到阻止合金剧烈氧化的目的。与熔剂保护和SF<sub>6</sub>气体保护相比,合金化阻燃可以消除熔剂夹杂,提高合金的力学性能与抗腐蚀性,消除有害气体对大气的污染。通过合金化的方法来达到阻燃的目的将是镁合金熔炼阻燃的发展方向<sup>[1]</sup>。

## 2 高性能稀土镁合金的研发现状

### 2.1 高性能稀土镁合金的国内研发现状

我国的稀土镁合金也有了很大发展,在铸造镁合金中开发了ZM2,ZM3,ZM4,ZM6和ZM8等系列产品,在变形镁合金中开发了MB8,MB22,MB25,以及在MB25基础上用富Y混合稀土代替高品位Y的MB26。东北轻合金加工厂研制开发成功的含Nd、含Gd代号为122和127合金的2种耐热高强稀土变形镁合金,其室温强度比MA13和HM21要高得多,且300℃下的高温强度与MA13,HM21相当,已在国防军工上获得广泛应用。

目前,上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心开发出阻燃效果和力学性能良好的轿车用阻燃镁合金。湖南大学、中南大学等采用快速凝固粉末冶金、高挤压比及等通道角挤(ECAE)等方法使镁合金晶粒高度细化,从而开发出具有高强度、高塑性甚至超塑性的高强、高韧镁合金如Mg-(5~8)Al-(1~2)Zn-(0.5~2)M(M=Pr,Nd,Ce,Y)。快速凝固镁合金因其微观组织结构的均匀化和弥散沉淀相的形成,提高了合金的抗腐蚀能力,如快速凝固Mg-5Al-2Zn-2Y合金是已知镁合金中抗腐蚀性能最高的合金。同时高性能的含Sc镁合金也正在积极开发之中<sup>[5]</sup>。

### 2.2 高性能稀土镁合金的国外研发现状

近年来,镁合金的研究越来越引起人们的关注,这主要是由于镁合金具有许多优良的性能。镁合金是最轻的工

程结构材料,具有密度小、比强度和刚度、导热导电性能好、易于成形加工、废料容易回收等特点,在汽车、电子、家电、通讯、仪表和航空航天等领域的应用日益增多<sup>[6]</sup>。目前国外对稀土镁合金研究较多的是美国、欧洲、日本及俄罗斯。

美国科学家对镁合金这一工程材料投入大量的研究,在汽车工业、航空航天工业进行了广泛的新材料研制与推广应用工作。开发出AE系列镁稀土压铸合金,并将WE系列合金大规模投入应用。在耐热镁稀土合金研究与应用方面,美国始终处于领先地位。

欧洲的稀土镁合金研究最为活跃,许多应用型稀土镁合金问世于欧洲。含银富钕稀土QE22A合金长期以来广泛用于飞机、导弹的优质铸件,如美洲虎攻击机的座舱盖骨架,超黄蜂直升机的前起落架外筒和轮毂等。在Mg-Zn合金研究中,发现加入稀土元素改善Mg<sub>2</sub>Zn合金的铸造性能和蠕变抗力,但降低抗拉性能,采取折中方案,曾开发了ZE41及EZ33合金。ZE41有较高强度,可以用到200℃,而EZ33合金有更高蠕变抗力,用到250℃。WE系列合金的强度性能超过其他稀土镁合金,高温强度甚至比高温铝合金RR350的稳定性还好,已经用于赛车及航空。欧洲的稀土镁合金基础研究及其在汽车、航空航天工业中的应用同美国一样处于世界领先地位,当前欧洲正在进行Mg-Gd合金、Mg-Tb合金、Mg-Sc-Mn等新型稀土镁合金研究。

日本紧随欧美步伐,相继仿制出与欧美最新研究成果大致相同的MC8(EZ33A),MC9(QE22A),MC10(ZE41A)等稀土镁合金,并积极研制汽车工业用稀土压铸镁合金。

俄罗斯主要沿袭前苏联的镁合金发展体系,曾经研制出早期飞机舱盖用Mn<sub>7</sub>以及大量应用于米格23飞机的Mn10稀土镁合金等,最近几年未见突破性研究报道。目前在俄罗斯的航空航天及军事工业已经广泛使用含钕的变形镁合金BMn10和含钕、钹的铸造镁合金BMn14。对比铝合金结构,这些镁合金的应用可保证降低结构重量的25%~50%<sup>[3]</sup>。

## 3 高性能稀土镁合金的发展趋势

如何推动镁合金产业化、加强稀土应用研究已成为一项紧迫的任务,把握国际最新镁合金研究进展,必将能实现我国稀土镁合金研究与应用的跨越式发展。

高性能稀土镁合金有望的发展方向:

1) 进一步研究稀土元素对镁合金的强韧化、耐腐蚀和抗蠕变的作用机理。

2) 优化稀土镁合金系,研究多元稀土对镁合金的协同作用,促进合金由二元合金系向多元高性能合金系发展。

3) 与先进的合金制备工艺相结合。通过压铸、快速凝固、半固态技术和挤压铸造等手段,进一步提高稀土镁合金性能。

4) 降低成本。大多数高强稀土镁合金中稀土的含量偏高,由于稀土元素价格偏高,所以开发低成本稀土镁合金也是当前研究的重点<sup>[7]</sup>。

## 4 高性能稀土镁合金的应用

稀土镁合金的应用性能优势,主要体现在耐高温和高强度方面,通过加入稀土元素合金化,能显著提高镁合金的强度和耐热温度,国外已将耐热稀土镁合金应用到飞机蒙皮、导弹舱体、卫星空间结构件、飞船框架、发动机引擎盖、发动机汽缸体和变速箱壳体等零部件上.随着社会经济发 展,在军工领域和民用领域均会有更大拓展.

### 4.1 高性能稀土镁合金在军工方面的应用

镁合金是减轻武器装备质量,实现武器装备轻量化,提高武器装备各项性能的理想结构材料.武器装备的需要,推动了高性能镁合金材料及应用技术开发的发展.在军工方面,以稀土金属钕为主要添加元素的 ZM6 铸造镁合金已用于直升机减速机匣、歼击机翼肋及 30 kW 发电机的转子引线压板等重要零件<sup>[5]</sup>.随着冶炼和加工技术的进步、价格的降低、武器装备轻量化要求的日益提高,镁合金在武器装备上的应用需求越来越大.

在我国,高性能的稀土镁合金以前主要应用于航空航天、导弹等军工领域,近年来,镁合金及镁基复合材料已逐步在武器和弹药上得到成功应用,发展十分迅速.

国外镁合金在武器上应用的典型实例:

1) 美军正在研制的 21 世纪士兵武器——理想的单兵综合作战系统,计划用镁合金做壳体等构件,使质量从 8.17 kg 降到 6.37 kg;

2) 美军正在研制的先进水平水陆两栖突击车采用镁合金做壳体,并采用了先进的镁合金表面防护技术,经试验证明,表面性能良好;

3) 国外已将镁合金用于次口径脱壳弹壳,穿甲弹弹托;

4) 法国 MK50 式反坦克枪榴弹部分零件应用了镁合金材料,其全弹质量仅为 800 g;

5) 美国制造的 Racegan(强装药,先进战斗用手枪)扳机等零件采用镁合金,重量减轻 45%,击发时间减少 66%<sup>[8]</sup>.

### 4.2 高性能稀土镁合金在民品上的应用

民品应用开发方面,在交通工具上广泛使用镁合金,一直是材料科学家们努力的方向.而稀土镁合金的应用使产品的开发范围大大拓宽.Drits 等开发的一系列耐热高强 WE 型镁合金,因具有良好的力学性能已广泛应用于赛车及航空飞行器的变速箱壳体<sup>[5]</sup>.

汽车工业需要努力改善有效载荷和提高燃油效益,它的一些结构件都要求有较高的耐热性能,可在汽车发动机箱体、变速箱壳、舵杆件、气缸盖、支撑柱等部件中得到使

用.开发耐高温镁合金越来越受到人们的重视<sup>[8]</sup>.

在石油化工中,由于镁对燃料、矿物油和碱等具有很高的化学稳定性,故所开发的阻燃耐蚀稀土镁合金可用于制造、贮存和运送这类液体的导管、箱体和贮罐.

稀土镁合金 Mg-Be-RE(含 Be 0.1%~0.8%,RE 4%~1.5%),其着火点可提高 250℃,且力学性能与 AZ91D 相当,是一种很实用的阻燃镁合金,在煤炭矿井、天然气及容易燃烧物质接触的部件中可获得广泛应用<sup>[5]</sup>.

## 5 结束语

镁的化学性能活泼等特性,使镁合金在制备和使用过程中遇到许多新问题.然而,稀土元素的加入对提高合金的抗氧化和抗蠕变性能等起到了主要作用,为进一步开发高质量镁合金注入了新的活力.近年来,各经济大国对其研究投入越来越多,这一领域已成为世界研究热点.

稀土镁合金的高强、耐热、耐蚀性能不但能进一步增加镁合金材料在现有的汽车工业、通讯电子业等行业领域中的应用,还可促进镁合金材料在新领域中的进一步开发和利用,也为稀土材料的应用开辟出一个十分广阔的领域.不断改进完善现有的稀土镁合金,开发成本低、性能好的新型稀土镁合金,对镁合金材料和稀土材料两大领域的发展都将具有极大的推动作用<sup>[9]</sup>.

## 参考文献:

- [1] 马刚,郭胜利.稀土在镁合金中的应用[J].宁夏工程技术,2005(3):268.
- [2] 彭光怀,张小联,邱承洲,等.稀土镁合金的研究进展[J].江西有色金属,2006,20(3):27.
- [3] 周开文,孙仙奇,庄应焱.稀土镁合金的研究状况[J].广西大学学报:自然科学版,2006,31:186.
- [4] 黎业生,董定乾,吴子平.稀土镁合金的研究现状及应用前景[J].轻合金加工技术,2006(4):1.
- [5] 余国强,翁国庆.稀土镁合金的发展、应用及开发[J].稀有金属与硬质合金,2006(3):36.
- [6] 杨国超,艾云龙,张剑平.稀土镁合金的研究现状[J].中国材料科技与设备,2007(2):17.
- [7] 李德辉,董杰,曾小勤,等.高性能镁合金的研究进展[J].材料导报,2005,19(8):51.
- [8] 张津,章宗和.镁合金及应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [9] 余琨,黎文献,李松瑞,等.含稀土镁合金的研究与开发[J].特种铸造及有色合金,2001(1):41.