

# Gd 含量对铸造 WE43 镁合金显微组织和力学性能的影响

刘 涛, 王小刚, 李伟莉, 张红芳, 冯露露

(山西银光华盛镁业股份有限公司, 山西闻喜 043800)

**摘要:** 以铸造WE43合金为基础, 通过添加不同含量的Gd元素, 研究了Gd含量对WE43合金组织与力学性能的影响。结果表明, 经过热处理后, 添加Gd元素可以有效提高WE43合金力学性能。添加0.5% Gd, 合金表现出最优力学性能, 伸长率可以达到5%以上。

**关键词:** 镁合金; WE43; 显微组织; 力学性能

WE43稀土镁合金具有优良的铸造性及高温力学性能, 在航空航天及国防工业领域应用广泛, 可直接用作航空发动机、大型复杂薄壁壳体构件、导弹舱体等, 是发展较成熟的耐热镁合金之一<sup>[1-3]</sup>。然而, 军工产品对材料强度及塑性要求较高, 且产品结构精密复杂不易成形, 因此现常采用传统砂型铸造一次成形。但是砂型铸造条件下合金的凝固冷却速率较低, 铸件的组织较为粗大, 铸造缺陷较多, 从而造成强度和塑性不能满足需求, 这已成为铸件制备的瓶颈因素, 极大地限制了该稀土镁合金的广泛应用。另外, 新产品的开发和原有产品的升级对材料的强度和塑性提出了更高的要求, 传统WE43合金已经不能完全满足不同工程领域的应用需求。因此, 需要寻找到有效的强韧化方法来改善铸造WE43合金的力学性能, 破除其应用瓶颈。

合金化是改善镁合金综合性能的有效方法, 稀土元素的化学性质很活泼, 在合金的熔炼过程中可以除氢、除氧、除氮、除夹杂物, 从而起到净化熔体的作用。由于稀土与镁形成的共晶相结晶温度间隔较小, 因此低熔点共晶相的流动性良好, 从而改善了合金熔体的流动性, 减小了合金缩孔及热裂的倾向。同时稀土元素的添加还可以降低合金在液态及固态下的氧化倾向, 提高耐蚀性。通常稀土元素在镁中固溶度大, 可显著增强镁合金的时效硬化和固溶强化。Mg-Zn-Gd-Zr中主要有I相和W (Mg-Zn-Gd) 三元相<sup>[4]</sup>, 随着Gd含量的增加, 合金中的第二相显著增加, 尤其是鱼骨状的W-相和棒状的I-相, 且大部分第二相均沿晶界分布, 由于第二相的强化作用, 合金强度显著提高。另外当合金中添加Zn元素时, Gd与Zn元素形成LPSO相, 当Gd: Zn质量比在3~6: 1之间时, 可以很好地提高稀土合金的强度。因此高温固溶处理后, 冷却时会形成不稳定的过饱和固溶体, 在低温长时间时效处理时, 大量的稀土溶质原子从基体中以大量细小分散的析出相形式析出, 析出相与滑移位错作用, 使合金具有很强的时效强化效果及较高的屈服强度<sup>[5]</sup>。

通过热处理实现沉淀析出是强化镁合金的重要方式。均匀化处理可以有效消除铸态合金中晶界处存在的粗大共晶化合物, 改善元素分布使得组织更加均匀。时效过程中形成的层错及LPSO相可强化合金, 使得合金屈服强度增加。许多变形镁合金和铸造镁合金需要通过高温下的固溶处理, 使合金进入单相区将第二相溶解进镁基体, 固溶处理后合金的抗拉强度和塑性同时提高。随后在相对低的温度下时效处理, 过饱和固溶体脱溶析出细小的强化相。时效过程中一般涉及一系列析出相, 这些析出相对位错的滑移和孪晶的移动有较强的阻碍作用, 能起到很好的强化作用。此外, 由于稀土元素在镁中的扩散速率较低, 析出相的热稳定性很高, 所以镁稀土

## 作者简介:

刘 涛 (1983-), 男, 工程师, 主要研究方向为镁合金铸造成形工艺。电话: 15035091675, E-mail: t\_liu389@163.com

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)10-1030-04

收稿日期:

2020-07-30。

合金在高温下也有很高的强度<sup>[6]</sup>。因此,本文在传统WE43铸造合金的基础上,添加不同含量的Gd元素,研究Gd含量对WE43合金微观组织与力学性能的影响,旨在拓宽稀土镁合金在国防科技领域的进一步应用。

## 1 试验材料与方法

本试验所用材料为纯Mg锭(>99.7 wt.%)、纯Zn锭、Mg-30Y、Mg-30Gd、Mg-30Nd、Mg-30Zr中间合金。镁锭、锌锭全部熔化后,依次加入各中间合金,气体搅拌精炼9~10 min,然后加热到760 °C后静置30 min。最后将合金液体浇注在提前准备好的砂型型腔中,待冷却后取出铸锭。浇注过程中以SF<sub>6</sub>+CO<sub>2</sub>为保护气体,铸造完成后取小样进行ICP(电感耦合等离子体原子发射光谱仪)化学成分分析,具体成分如表1所示。金相试样依次从600#砂纸、2 000#砂纸进行预磨,然后进行抛光机器粗、精细抛光,金相腐蚀液采用配制的硝酸酒精溶液。拉伸试样尺寸符合GB/T 228.1—2010,使用DSC-800B差示扫描量热仪测试铸态合金中共晶相的熔点,试样重量不超过10 mg,升温速率10 °C/min,加热

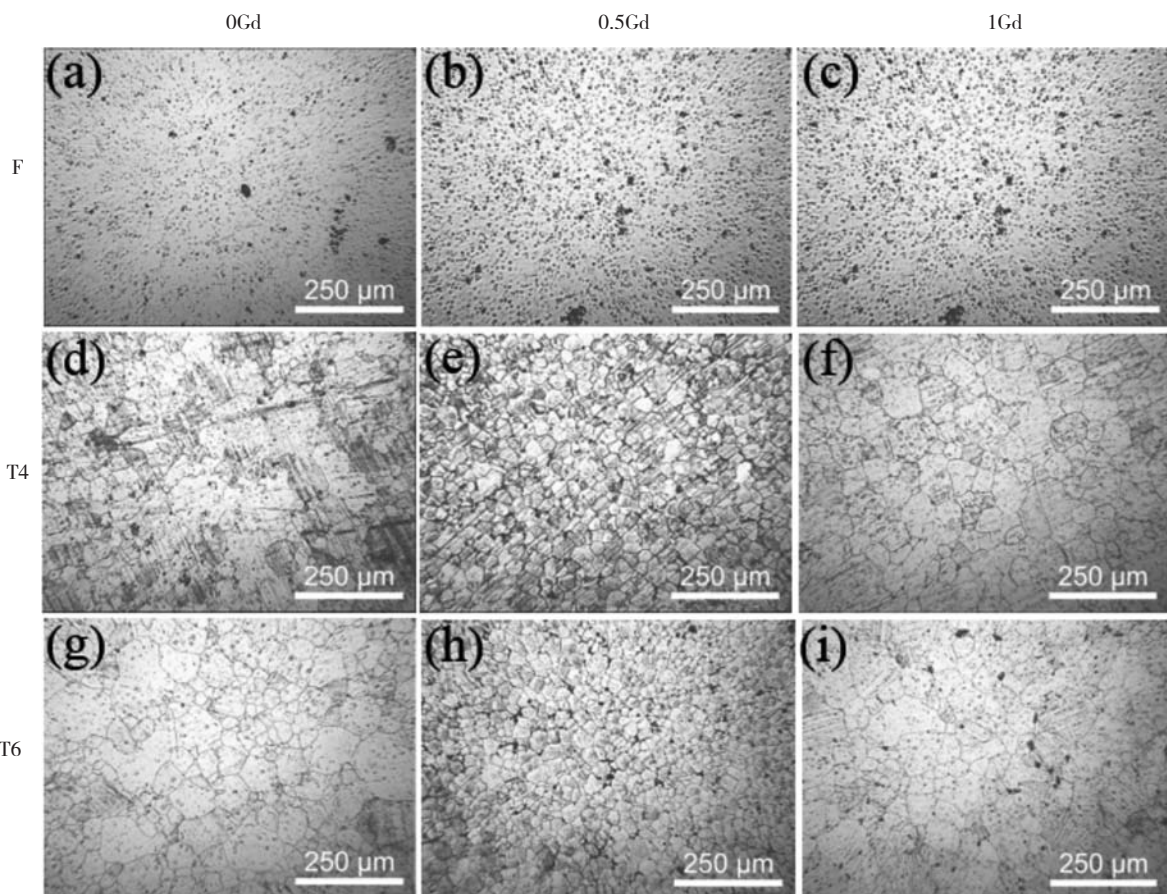
温度25~700 °C,所得曲线的吸热峰对应合金第二相的熔点。

## 2 结果与讨论

图1为不同合金在不同状态下的OM组织,其中图1a-c为铸态组织,图1b-f为固溶后组织,图1g-i为时效处理后组织。可以看出,铸态组织呈现出典型的树枝状结构,这主要是形成的稀土相,除了这种均匀分布于基体的第二相外,合金中均分布大块的颗粒状第二相,这可能是Mg-Zn相或LPSO相。徐超等人<sup>[7]</sup>研究Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金,证实了LPSO相的结构及对合金性能的影响,且随着Gd含量的增多,第二相数量增多。

表1 合金的化学成分分析结果  
Table 1 Chemical composition analysis results of alloys with varying Gd content

合金	Y	Nd	Zr	Gd	Zn	w <sub>B</sub> /%
WE43-0 Gd	3.81	2.43	0.46		0.24	余量
WE43-0.5 Gd	3.78	2.54	0.56	0.56	0.19	余量
WE43-1 Gd	3.88	2.72	0.52	1.08	0.19	余量



(a-c) 铸态; (d-f) 固溶态; (g-i) 时效态

图1 不同合金在不同状态下的OM组织

Fig. 1 Microstructure of alloys with different amounts of Gd under various states

为了探究第二相的熔点,以便后续合适的热处理工艺制定,进行了DSC差热分析。如图2所示,DSC曲线光滑平整,表面测试过程中加热温度均匀;在536℃出现一个吸热峰,这表明共晶相的溶解;在650℃左右镁基体开始溶解,呈现出大的吸热峰值。一般在共晶相熔点以10~20℃进行固溶处理,因此本试验将该WE43合金的固溶温度设为525℃,具体工艺为:380℃保温2h,525℃保温16h,在60℃水中进行淬火处理。图1d-f为不同Gd含量合金经过固溶处理后的OM组织。从图中可以看出,经过固溶处理后大部分共晶第二相熔入基体;当加入Gd元素以后,晶粒尺寸明显细化,这主要是由于第二相数量的增多提供了更多的形核位点,晶粒变多从而使得晶粒尺寸减小;但是当Gd含量达到1%时,晶粒又发生一定的长大,一些未熔第二相沿晶界分布。由于合金成分不同,晶粒取向和第二相体积分数不同,经过腐蚀后侵蚀程度不一样,因此OM组织呈现不同的衬底。从动力学角度看,固溶过程中共晶化合物的溶解和晶界的迁移是热激活过程,受热扩散控制。温度越高,时间越长,原子扩散和晶界迁移越容易被激活,共晶第二相的溶解更加完全,但同时晶粒长大的趋势也更明显。从热力学角度看,温度越高,溶质原子在 $\alpha$ -Mg内的固溶度越高,越容易固溶充分<sup>[8]</sup>。有意思的是,在1Gd合金中观察到少量的孪晶的存在,这可能是由于在淬火快速冷却过程中,受热应力的影响发生了微小的变形,而此变形是由于孪生引起的。

稀土合金具有很强的时效强化效果,时效过程主要为第二相的动态析出过程,属于固态相变。为了探究Gd元素含量对WE43合金时效强化的影响,将该合金在225℃进行24h时效处理,OM组织如图1g-i所示。从图中可以看出,经过时效处理后保留了固溶态组织特征,晶粒尺寸没有发生明显的变化,这主要是由于时效过程温度过低达不到晶粒长大的条件。但是在基体上分布细小的麻点,0.5Gd合金最为明显,这主要受合

金元素的扩散过程控制,第二相细小弥散析出。

图3为不同状态不同成分合金室温拉伸数据。从图3a可以看出,铸态合金中Gd元素的加入对性能的影响效果不明显,但是0.5Gd合金表现出最优的综合力学性能,这可能是由于铸态组织中存在铸造缺陷较多,而且合金元素越多,溶质元素分散不均匀,越容易产生缩孔缩松等缺陷。经过固溶后,组织分布更加均匀,伸长率较铸态显著提高,且随着Gd含量的增多效果更为明显。整体来看,0.5Gd合金同样表现出最优力学性能。经过时效处理后,合金力学性能显著提升,如图3c所示,其中0.5Gd合金极限抗拉强度可达到310MPa,伸长率5%以上,达到应用要求。

图4显示了0.5Gd合金在不同状态下断口形貌。从图中可以看出,铸态合金及时效处理后,断口中存在少量的韧窝,大部分为撕裂棱及形成的解离台阶,为典型的沿晶脆性断裂方式;而经过固溶处理后,断口中存在大量的韧窝,断裂方式为韧性断裂方式,这也与固溶后合金高伸长率所对应。固溶处理后合金内的第二相含量大大减少,组织和成分比较均匀,裂纹不易扩展,导致高的伸长率。

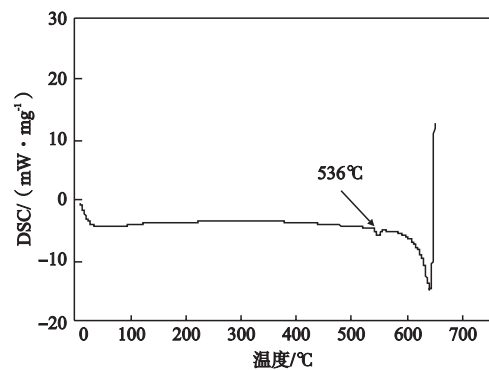


图2 铸态合金的DSC曲线

Fig. 2 DSC curve of as-cast alloy sample

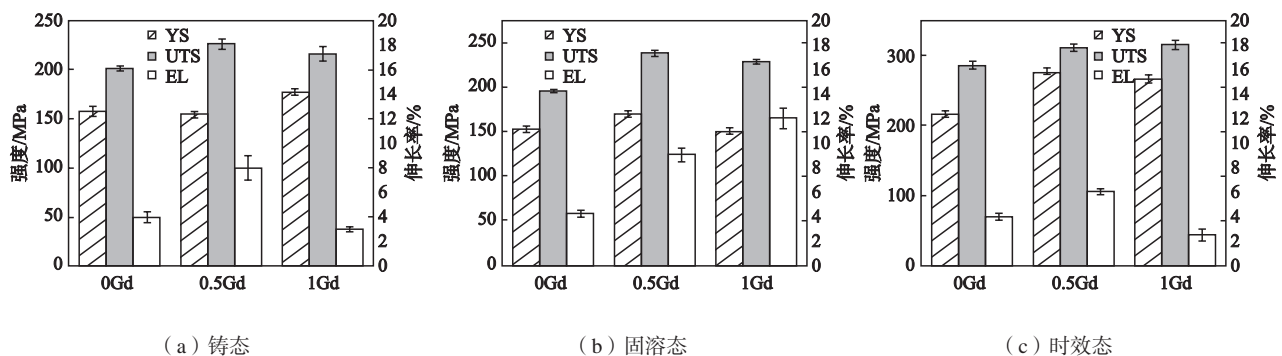
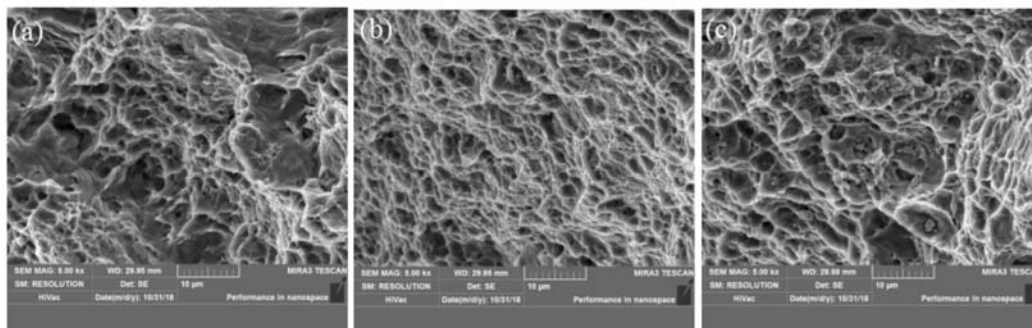


图3 不同合金在不同状态下的室温拉伸性能

Fig. 3 Tensile properties of WE43 alloys under different states at room temperature



(a) 铸态

(b) 固溶态

(c) 时效态

图4 0.5Gd合金在不同状态下的断口组织

Fig. 4 Fracture morphology of WE43 alloy with 0.5 Gd under different states

### 3 结语

铸态合金中,随着Gd含量的增加,合金力学性能提升不明显,但是经过固溶、时效热处理后,合金强度明显增加,这主要是由于固溶强化及析出强化所导致。0.5Gd合金表现出最优力学性能,其伸长率可达5%以上,达到军工产品性能要求,拓展了镁合金在航空航天上的广泛应用。

#### 参考文献:

- [1] 沙学超. 稀土镁合金析出强化机制研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2019.
- [2] 刘涛, 王小刚, 李伟莉, 等. 锻造温度对航空壳体用镁合金组织及力学性能的影响 [J]. 冶金与材料, 2019, 39 (6): 5-7.
- [3] 丁文江. 镁合金科学与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [4] ZHANG S, YUAN G Y, LU C, et al. The relationship between (Mg, Zn) 3RE phase and 14H-LPSO phase in Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloys solidified at different cooling rates [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509 (8): 3515-3521.
- [5] FU Penghuai, PENG Liming, JIANG Haiyan, et al. Chemical composition optimization of gravity cast Mg-yNd-xZn-Zr alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 496 (1-2): 177-188.
- [6] 吴玉娟, 丁文江, 彭立明, 等. 高性能稀土镁合金的研究进展 [J]. 中国材料进展, 2011, 30: 1-9.
- [7] XU Chao, NAKATA Taiki, QIAO Xiaoguang, et al. Effect of LPSO and SFs on microstructure evolution and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zn-Zr alloy [J]. Scientific Reports, 2017, 7: 40846-40855.
- [8] KANG Y H, WU D, CHEN R S, et al. Effects of quenching rate on the microstructures and mechanical properties of the heat treatable Mg-4.2Y-2.3Nd-1.0Gd-0.6Zr magnesium alloy [J]. Materials Science Forum, 2015, 816: 356-361.

## Effect of Gd Content on Microstructure and Mechanical Properties of WE43 Magnesium Cast Alloy

LIU Tao, WANG Xiao-gang, LI Wei-li, ZHANG Hong-fang, FENG Lu-lu  
(Shanxi Yinguang Huasheng Magnesium Co., Ltd., Wenxi 043800, Shanxi, China)

#### Abstract:

Based on WE43 magnesium cast alloy, the effect of Gd content on the microstructure and mechanical properties of WE43 alloy was studied by adding different amounts of Gd. The results show that the mechanical properties of WE43 alloy after heat treatment can be improved by adding Gd element, and WE43 alloy with 0.5% Gd shows the best mechanical properties, among which the elongation can reach more than 5%.

#### Key words:

magnesium alloy; WE43; microstructure; mechanical properties