

Y 含量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及性能的影响

毛红奎¹ 白霄宇¹ 田一清¹ 尹智¹ 王宇¹ 徐宏¹ 孙鹏程² 戈迎春²
(1.中北大学材料科学与工程学院; 2.西安应用光学研究所)

摘要 研究了 Y 元素对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及力学性能的影响。结果发现,Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金主要由 α -Mg 基体、Mg₂₄Y₅相、(Mg,Zn)₃(Y,Sm)相、LPSO 结构的 Mg₁₂YZn 相组成。随着 Y 含量增加,晶粒逐渐细化,晶界共晶相数量增多,在晶界位置存在共晶次生 LPSO 相 Mg₁₂YZn。LPSO 相与 α -Mg 基体共格,提高了镁合金的强度和硬度。随着 Y 含量增加,Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的力学性能不断提高,Y 含量达到 6.89%时,铸态 Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的硬度(HV)、屈服强度、抗拉强度以及伸长率分别为 95.6、118 MPa、193 MPa、10.5%。Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的断口和裂纹深度随着 Y 含量的增加逐渐变浅,台阶数目减少,由准解理脆性断裂转变为解理脆性断裂。

关键词 Y 元素;稀土镁合金;力学性能;显微组织;LPSO 相

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Y Content on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr Alloy

Mao Hongkui¹, Bai Xiaoyu¹, Tian Yiqing¹, Yin Zhi¹, Wang Yu¹, Xu Hong¹, Sun Pengcheng², Ge Yingchun²
(1.School of Materials Science and Engineering, North University of China; 2.Xi'an Institute of Applied Optics)

Abstract: The influences of Y element on the microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy were investigated. The Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr alloy is mainly composed of α -Mg matrix, Mg₂₄Y₅ phase, (Mg,Zn)₃(Y,Sm) phase, and Mg₁₂YZn phase with LPSO structure. With the increase of Y content, the grains are gradually refined and the amount of eutectic phases at the grain boundary is increased. There exists a eutectic secondary LPSO phase Mg₁₂YZn at the grain boundary. The LPSO phase Mg₁₂YZn is coherent with the α -Mg matrix, which improves the strength and hardness of the magnesium alloy. With the increase of Y content, the mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy is improved continuously. With the Y content of 6.89%, the hardness, yield strength, tensile strength and elongation of the as-cast Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr alloy reach up to 95.6 HV, 118 MPa, 193 MPa, 10.5%, respectively. The structure of LPSO has an effect on the fracture behavior of magnesium alloy. The fracture mechanism of Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr alloy is characterized by cleavage brittle fracture, and the fracture and crack depth gradually become shallower.

Key Words: Y Element, Rare Earth Magnesium Alloy, Mechanical Properties, Microstructure, LPSO Phase

收稿日期:2021-08-06;修改稿收到日期:2021-10-22

基金项目:山西省重点研发计划国际科技合作资助项目(201903D421080);山西省高等学校科技创新项目(2020L0319)

第一作者简介:毛红奎,男,1977 年出生,副教授,太原(030051),E-mail:maohk@126.com

引用格式:毛红奎,白霄宇,田一清,等. Y 含量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):194-199.

MAO H K, BAI X Y, TIAN Y Q, et al. Effects of Y content on microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):194-199.

[2] 韦天升,林高用,蔡阳中,等. 特种铸造方式下 QAl10-4-4 铝青铜组织演变规律[J]. 有色金属加工, 2013, 42(1): 13-18.

[3] 徐国富,尹志民,罗丰华,等. 铈及钛对 QAl10-4-4 铝青铜缓冷脆性的影响[J]. 材料科学与工艺, 2001, 9(4): 363-366.

[4] 张荣华. 深冷处理对 ZQAl10-4-4 铝青铜压缩性能的影响[J]. 金属热处理, 2014(4): 104-105.

[5] 巢曷轩,蒋克全,洪锋,等. 铝青铜 QAl10-4-4 热处理工艺性能研究[J]. 热处理技术与装备, 2016, 37(6): 35-38.

[6] 薛臣. 铝青铜(QAl10-4-4)连杆衬套的热处理工艺及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.

[7] WANG C X, JIANG C H, CHEN M, et al. Residual stress and microstructure evolution of shot peened Ni-Al bronze at elevated temperatures[J]. Materials Science and Engineering, 2017, A707: 629-635.

[8] XU G, CHEN B, ZHANG D, et al. Effect of heating treatment on microstructure and properties of QAl10-4-4 aluminum bronze alloy [A]//2020 3rd International Conference on Electron Device and Mechanical Engineering[C]. Suzhou, China, 2020.

[9] 王雪,赵俊生,孟宏伟,等.柴油机连杆衬套磨损的正交试验研究[J]. 润滑与密封, 2017, 42(9): 76-80,97.

[10] 李和言,马成男,吴健鹏,等. 铜基粉末冶金干式摩擦副磨合过程摩擦性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(2): 153-160.

[11] 马红帅,梁国星,吕明,等. AISI4340 钢干滑动摩擦磨损特性研究[J]. 摩擦学学报, 2018, 38(1): 59-66.

[12] ARCHARD J F. Contact and rubbing of flat surfaces[J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8): 981-988.

(编辑:刘晨辉)

镁及其合金具有高的比强度和比刚度、低噪音、优良的阻尼减震性能、高的尺寸稳定性和热导率,以及优良的电磁屏蔽性能、机械加工性能和密度小等特点^[1~3],得到研究者的广泛关注^[4,5]。在航空航天^[6]、兵工武器、电子通讯、交通运输等领域具有巨大的应用前景^[7~9]。

稀土元素在冶金、材料领域中具有净化合金液、改善合金组织、提高合金室温及高温力学性能,增强合金耐蚀性能等作用,被广泛应用于钢铁及有色金属生产中^[10~13]。研究表明,镁合金中添加适量的稀土元素后,可以增加合金的流动性、降低微孔率、提高气密性等,显著改善镁合金的热裂和缩松缺陷^[14,15]。同时,稀土加入镁合金中,还可以细化合金组织、促进合金表面氧化膜致密度、降低合金在液态和固态下的氧化倾向,从而提升传统镁合金强度、塑性、耐蚀性、耐磨性等^[16,17]。

Mg-Gd 基稀土镁合金具有较高的力学性能,屈服强度一般在 400 MPa 以上^[18~21]。其稀土含量较高,一般在 8.0% 以上,导致 Mg-Gd 基稀土镁合金的成本较高,大大限制了其工业应用。Sm 作为一种重要的轻稀土元素,在 Mg 中的最大固溶度为 5.8%,而且 Sm 在 Mg 中的固溶度随着温度的降低而迅速减小,符合析出强化原则,是提高镁合金强度的一种重要的合金化手段^[22]。Sm 的价格比 Gd 等重稀土元素低很多,密度也较小,因此对 Mg-Sm 系合金的研究成为近年来的热点之一。其中,Mg-Sm-Y-Zn-Zr 合金是最具代表性的稀土镁合金之一,这是由于 Zn 元素可以有效促进时效析出,还可以形成 LPSO 强化相,有利于提高合金的力学性能。YUAN M 等^[23]研究了 Mg-3Sm-0.5Gd- x Zn-0.5Zr 合金($x=0,0.3,0.6$),发现适量($<0.5\%$)的 Zn 增强了 β 相的形成,提高了 Mg-RE 合金的蠕变抗力,而较多 Zn 会引入 γ 相,降低伸长率,提高合金的硬度。Y 在 Mg 中与 Sm 的性质相近,在镁合金中除了可以与 Mg 形成 $Mg_{24}Y_5$ 强化相外,更重要的是与 Zn 相互作用形成热稳定性较高的 LPSO 相,提高合金的力学性能,因此,合理利用 Sm 和 Y 在镁合金中优异的强化作用是获得新型高强镁合金的重要手段。

为了探索 Y 含量对 Mg-Sm-Y-Zn 系合金的影响,本课题采用铸造法制备了不同 Y 含量的 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 系稀土镁合金,研究了 Y 添加量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 铸造稀土镁合金的微观组织和力学性能的影响,为开发新型高强镁合金提供参考。

1 试验材料及方法

制备了 Y 名义含量分别为 4.0%、5.0%、6.0%、7.0% 的 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 稀土镁合金铸锭,记

为 1~4 号合金。合金熔炼完毕后,采用 ICP 方法分析了实际成分,结果见表 1。

表 1 镁合金的实际成分
Tab.1 Chemical composition of the experimental magnisum alloy

合金 编号	w_B					%
	Sm	Y	Zn	Zr	Mg	
1	3.78	3.87	0.51	0.42	余量	
2	3.69	4.92	0.55	0.48	余量	
3	4.02	5.78	0.61	0.52	余量	
4	3.89	6.89	0.58	0.47	余量	

在制备的合金铸锭上采用线切割方法制备试样,然后制备金相试样。首先将试样在水磨砂纸上细磨,然后在抛光机进行抛光,最后用苦味酸酒精溶液(配比为 29.4 g 苦味酸+25 mL 冰乙酸+41 mL 水+350 mL 酒精)进行腐蚀。试样制备完毕后,采用粒径分布统计软件(Nano Measure)对晶粒尺寸进行统计并求取平均值。使用金相显微镜软件(ZEISS-Image)分析 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 铸态组织的晶粒度、形貌、晶界。采用 Rigaku Smartlab X 射线衍射(XRD)方法对合金的相组成进行分析,然后利用 SU-5000 扫描电镜分析合金组织中第二相形态与尺寸、再结晶相等。采用 EDAX 能谱分析(EDS)定性分析组织中各相的成分。同时,采用 SU-5000 扫描电镜对各种状态下的拉伸试样进行断口形貌进行分析。采用 HVS-1000 显微维氏硬度计、CMT5105 微机控制电子万能拉伸机分别对合金的硬度、力学性能进行测试。

2 试验结果与讨论

2.1 铸态 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的显微组织

图 1 为不同 Y 含量 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金的显微组织。可以看出,随着 Y 含量增加,合金的晶粒尺寸逐渐减小,4 种合金的平均晶粒尺寸分别为 45、37、26 和 21 μm ,统计结果见图 2。可见,增加 Y 含量对 Mg-4Sm-0.6Zn-0.5Zr 合金有明显的晶粒细化作用。在合金组织中的部分 α -Mg 晶粒内观察到一些近似平行的细条纹状组织,见图 3。根据 ZHU Y M 等的研究^[25],这些条纹状的组织应该是长周期有序结构 LPSO(Long Period Stacking Ordered)。

不同 Y 含量的 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的 X 射线衍射(XRD)测试结果见图 4。可以看出,Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金组织由 α -Mg 基体、 $(Mg,Zn)_3(Y,Sm)$ 相、 $Mg_{24}Y_5$ 相以及 $Mg_{12}YZn$ 相组成。目前,对于 $Mg_{12}YZn$ 相的晶体结构目前还没有统一的结论。LUO Z P 等^[24]在研究 $Mg_{97.28}Zn_{0.48}Y_{2.1}Zr_{0.14}$ (摩尔分数,%)合金时,在铸态合金组织中观察到了 $Mg_{12}YZn$

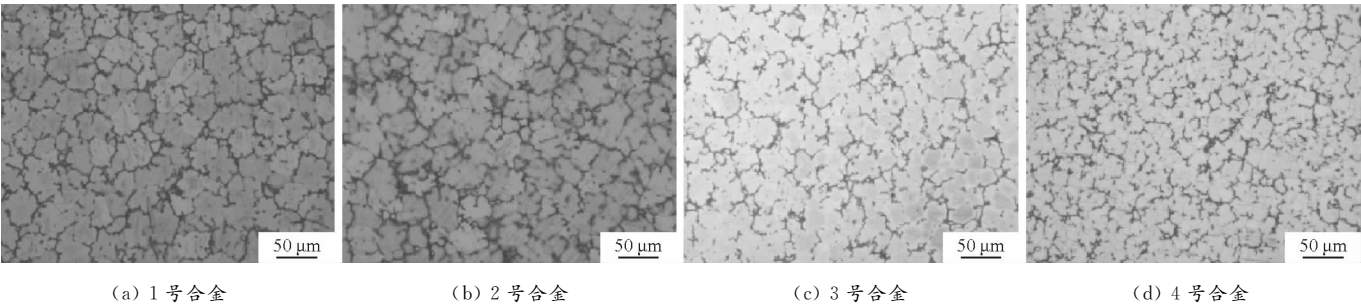


图 1 不同 Y 含量下 Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的显微组织

Fig.1 Microstructure of Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr alloy with different Y contents

相,认为该相具有 18R-LPSO 的结构特征。然而,ZHU Y M等^[25]在对 Mg-Y-Zn 合金中 LPSO 结构的研究中指出,18R 晶体结构的化学式应为 $Mg_{10}YZn$ 而不是 $Mg_{12}YZn$,而 $Mg_{12}YZn$ 相应为 14H-LPSO 结构。

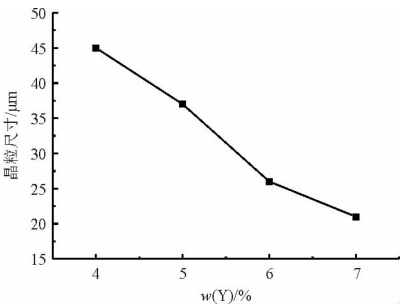


图 2 Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的平均晶粒尺寸

Fig.2 Average grain size of Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr alloy

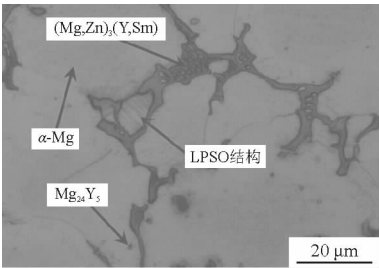


图 3 α -Mg 中观察到的近似平行的 LPSO 结构

Fig.3 Approximately parallel LPSO structure observed in α -Mg

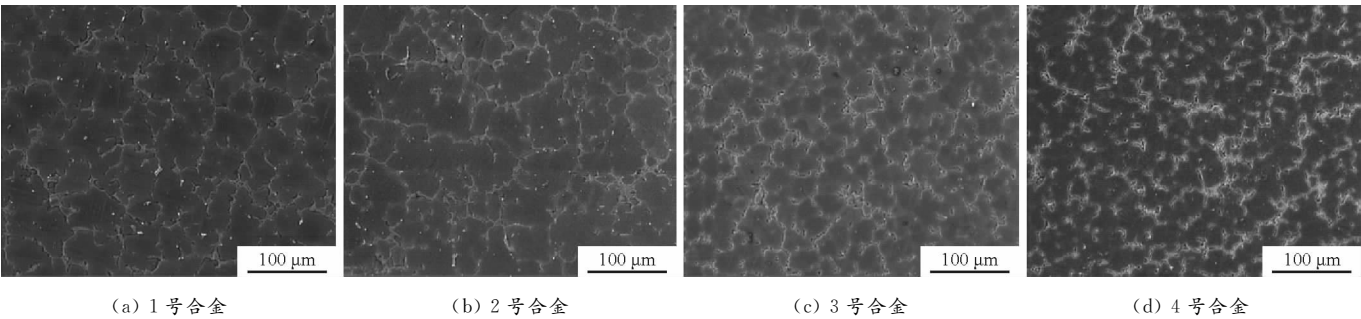


图 5 不同 Y 含量的 Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的 SEM 图

Fig.5 SEM images of Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr alloy with different Y contents

是 LPSO 相($Mg_{12}YZn$),属于 14H 型堆垛结构^[27],且随 Y 含量的增加,合金晶界处亮白色的鱼骨状共晶组织增多。

为了进一步从微观成分角度分析该合金组织中的

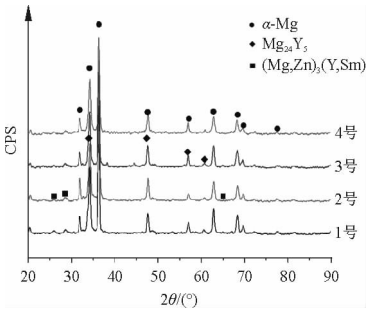


图 4 不同 Y 含量下铸态合金的 X 射线衍射谱

Fig.4 X-ray diffraction spectra of as-cast alloys with different Y contents

图 5 为不同 Y 含量下铸态 Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金组织的 SEM 图。可以看出,铸态合金的组织由 α -Mg 基体和沿晶界分布的共晶相组成。可以看出,随着合金中 Y 含量增加,Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金晶界处析出相数量明显增加,当 Y 含量达到 6.89% 时,晶界析出相的数量很多,使得共晶相连接在一起,呈网状连续分布。从形貌上来看(见图 3),有暗灰色的 α -Mg 相、亮白色长条鱼骨状的析出相以及少量的粒状析出相,结合 XRD 结果可知对应为不同的析出相。鱼骨状共晶相为 $(Mg,Zn)_3(Y,Sm)$ 相^[26],粒状相为体心立方结构的 $Mg_{24}Y_5$ 相^[27]。在晶粒内部近似平行分布的

相组成,对 Mg-4Sm-*x*Y-0.6Zn-0.5Zr 合金进行了能谱分析,结果见图 6。在 4 种合金显微组织的晶界位置分别进行 EDS 成分点分析。可以看出,4 种合金晶界处的析出相均含有 Mg、Y、Sm 和 Zn,随着合金中 Y 含量

增加,析出相中 Mg 含量提高,Sm 和 Zn 相对含量下降,但共晶组织的析出量随着 Y 含量的增加而增多。结合 XRD 结果可知,4 种合金中除了 α -Mg 基体外,还含有 Mg_{12}YZn 相、 Mg_{24}Y_5 相和 $(\text{Mg},\text{Zn})_3(\text{Y},\text{Sm})$ 相,然而图 6 中 4 种合金晶界的析出相中 Sm 含量相对较高。因此,可以推断 4 种合金晶界处均析出了 $(\text{Mg},\text{Zn})_3(\text{Y},\text{Sm})$ 相,但是其析出数量较少。XRD 结果显示 4 种合金中 $(\text{Mg},\text{Zn})_3(\text{Y},\text{Sm})$ 相和 Mg_{24}Y_5 相的衍射峰均较强,其含量较高,但其尺寸应该较小。随 Y 含量增加,合金晶界处的析出相数量增加,且形貌逐渐变为鱼骨状。

综上,Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 铸态合金的组织主要由 α -Mg 基体、 Mg_{24}Y_5 相、 $(\text{Mg},\text{Zn})_3(\text{Y},\text{Sm})$ 相和 LPSO 结构的 Mg_{12}YZn 相组成。在凝固过程中,在最后凝固的晶界处产生应力集中,形成大量位错,提高了 Y 和 Zn 的扩散速率,促使合金中 LPSO 相形成。Mg-Y-Zn 合金的 LPSO 相中的 Zn 和 Y 首先在形核的晶粒

边界富集,然后沿基面向晶粒内部生长。生长过程中,过饱和固溶体中偏析的 Y 和 Zn 原子首先在基面沉淀,通过形成晶界的“无定形区”而完成 LPSO 结构的形核。由于 Mg 原子半径(0.16 nm)小于 Y 的原子半径(0.18 nm)而大于 Zn 的原子半径(0.13 nm), α -Mg 中固溶的 Y 和 Zn 原子的偏析或分离会使 α -Mg 相产生明显的畸变,这种畸变能被认为是 LPSO 结构形成的根源^[28]。即这个过程促进了 LPSO 结构的堆垛有序和成分有序化过程,有助于 LPSO 结构的形核和长大^[29],同时完成 LPSO 结构从晶粒一侧到另一侧的生长。所以,LPSO 结构的形成过程被认为是与扩散机制和畸变相关的过程。通过扩散转变机制形成的 LPSO 结构,由于首先在靠近晶界附近的区域形核,并向晶内生长,同时先形成的 LPSO 结构可被看作 Y 和 Zn 等原子扩散的特殊路径,原子易沿 LPSO 结构扩散并实现成分和堆垛有序化,这就是同一晶粒内部的 LPSO 结构具有相同的生长方向的原因所在^[8]。

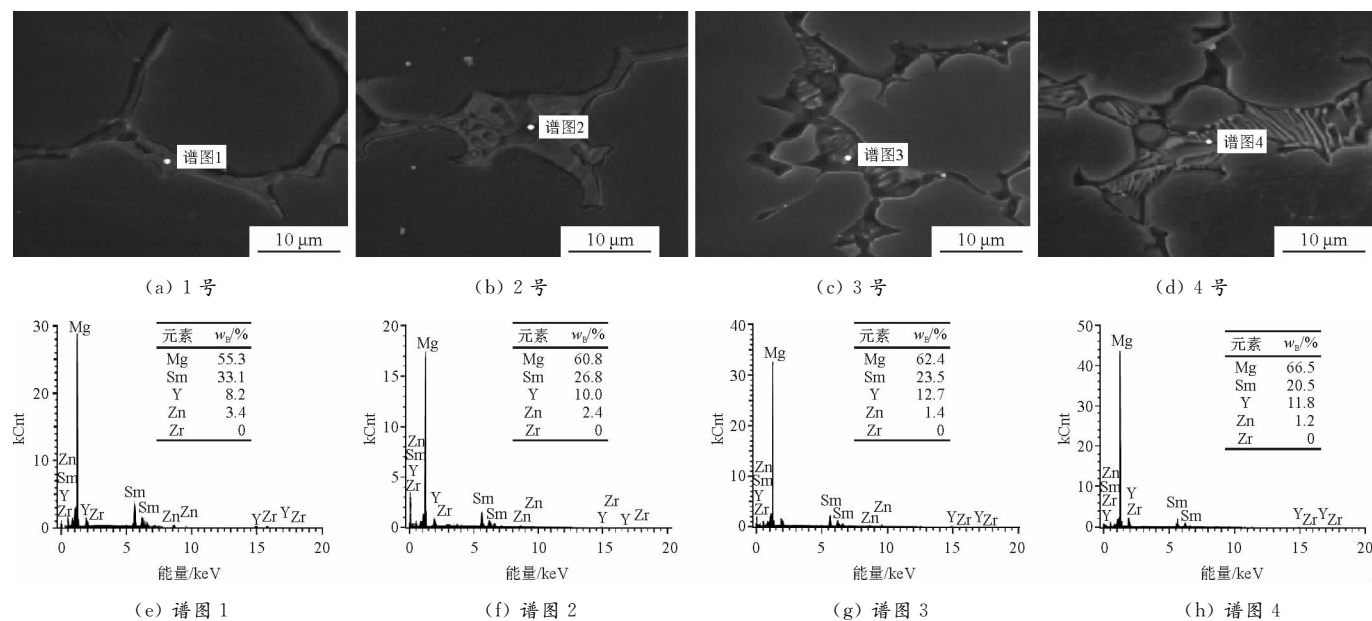


图 6 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的 SEM 和 EDS 图

Fig.6 SEM and EDS images of Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr alloy

2.2 铸态 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的力学性能

图 7 为 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的力学性能。根据 XRD 和 EDS 分析可知,合金晶界处存在 LPSO 结构的析出相 Mg_{12}YZn ,而 LPSO 结构相自身硬度远高于 α -Mg 基体,而且与 α -Mg 基体之间保持共格界面,共格界面产生的应变能可以进一步提高 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 镁合金的强度和硬度^[30]。同时,LPSO 相的结构具有独特的电子间成键和电子态储存的高内能也为 LPSO 结构的高硬度提供了相容性。CHINO Y 等^[31]采用显微硬度计和划痕法测试了 LPSO 结构基体区域的硬度,发现含 LPSO 结构的基体区域的硬度比

纯镁高出 4 倍多。因此,LPSO 结构有高的弹性内能,进而使其具有高的抑制位错运动的势能。而且随着 Y

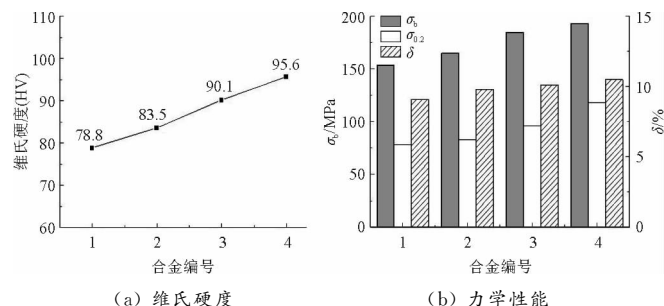


图 7 Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的力学性能

Fig.7 Mechanical properties of Mg-4Sm- x Y-0.6Zn-0.5Zr alloy

含量增加,合金晶界的析出相的数量也逐渐增加,使得合金的硬度越来越高,这是 Y 提高 Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr 镁合金硬度的主要原因。

另外,随着合金中 Y 含量增加,合金的硬度、屈服强度、抗拉强度和伸长率都呈现增长趋势,见图 7。1 号合金的屈服强度和抗拉强度分别为 78 MPa 和 154 MPa,伸长率为 9.1%。当 Y 含量增加至 6.89% 时(4 号合金),屈服强度、抗拉强度和伸长率分别提高到 118 MPa、193 MPa 和 10.5%。随合金中 Y 含量提高,凝固过程中产生的成分过冷增加,提高了形核率,使得合金的晶粒细化,晶界处析出相的数量增多。而晶粒细化以及晶界析出相的数量增加都可以提高合金的强度,尤其是对合金抗拉强度的提高作用明显。而且,晶粒细化提高合金强度的同时还能提高合金的塑性。最重要的是,合金在塑性变形时,合金晶粒内部存在由晶界向晶粒内生长的层片状 6H-LPSO 结构,以及晶界处存在 $Mg_{12}ZnY$ 相,使 Mg/LPSO 界面处易于产生应力集中,而高应力可以促进 LPSO 附近的 α -Mg 晶粒细化。同时,由于 LPSO 的显微硬度和弹性模量均显著高于 α -Mg 基体,且 LPSO 与周围的 α -Mg 可以形成特定的共

格界面,因此 α -Mg/LPSO 界面通常不会成为合金失效裂纹的起源和传播通道。此外,由于 LPSO 与 α -Mg 特定的位向关系,经过塑性变形后,LPSO 平行于拉伸方向排列,其强化机理类似于复合材料中的短纤维增强机制^[32],层片状 LPSO 还可以有效地阻碍位错在基体内部的滑移,提高合金的强度。

图 8 为铸态 Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr 合金室温下的拉伸断口形貌。从图 8a 和图 8b 中可以看到断面存在较深的断口,推断其可能为裂纹源,并且随着裂纹扩展,在断口上可以看到许多撕裂棱和许多互相平行但高度不同的台阶汇合成河流花样,加之合金为密排六方结构,所以应为典型的准解理脆性断裂。从图 8g 和 8h 可以看出,断面中较深的断口和台阶基本消失,出现部分平整光滑的解理面,并且观察到许多细小的解理台阶,撕裂棱也较少,有韧性断裂的特征,但此时合金的断裂依然为脆性断裂。因此,Mg-4Sm-7Y-0.6Zn-0.5Zr 合金的断裂机理为解理脆性断裂,断口和裂纹深度逐渐变浅,台阶数目减少。在拉伸变形过程中,微裂纹首先出现在晶界附近,并且在应力作用下裂纹逐渐扩大,最终导致合金断裂。

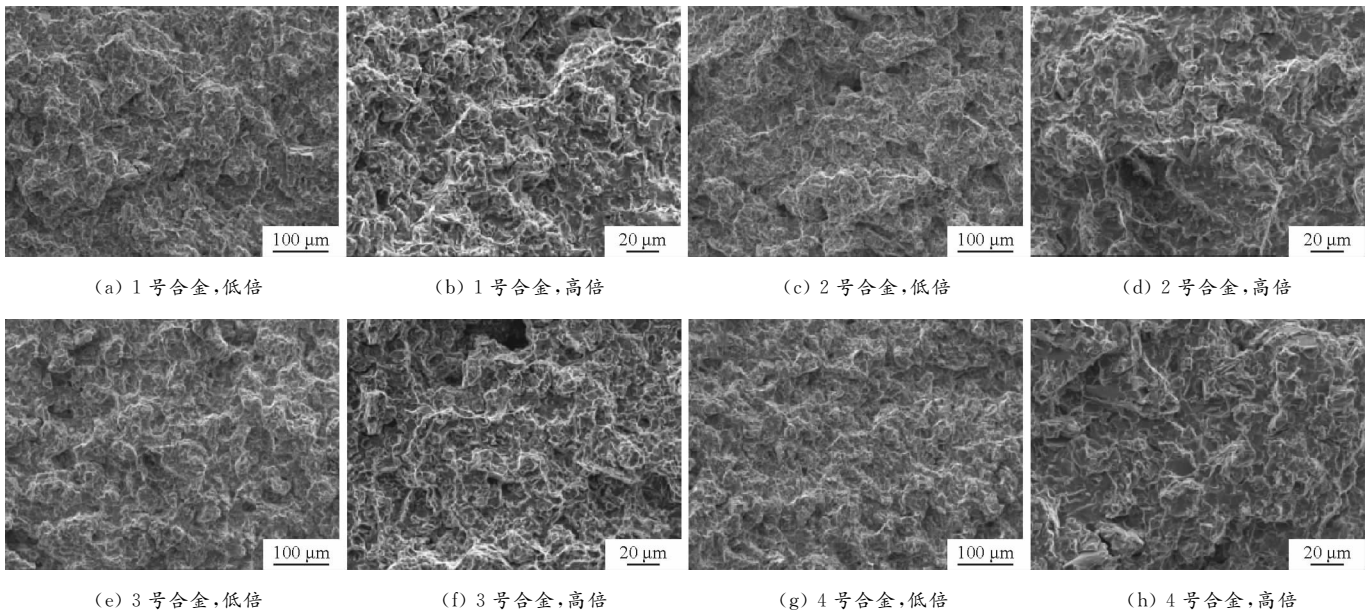


图 8 铸态 Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr 合金室温拉伸断口形貌

Fig.8 Tensile fracture morphology of as-cast Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr alloy at room temperature

3 结 论

(1) Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr 合金主要由 α -Mg 基体、 $(Mg, Zn)_3(Y, Sm)$ 相、 $Mg_{24}Y_5$ 相和晶粒内层片状的 LPSO($Mg_{12}YZn$) 结构组成。且随着 Y 含量增加,合金晶粒逐渐细化,晶界 LPSO 析出相 $Mg_{12}YZn$ 的数量增多。

(2) 随着 Y 含量增加, Mg-4Sm-xY-0.6Zn-0.5Zr 合

金的强度和塑性均逐渐提高,当 Y 含量达到 6.89% 时,合金铸态硬度、强度以及伸长率达到最高值。硬度(HV)为 95.6,屈服强度为 118 MPa,抗拉强度为 193 MPa,伸长率为 10.5%。合金断口裂纹扩展距离和解理台阶逐渐减少,断口由准解理脆性断裂转变为解理脆性断裂。

参 考 文 献

[1] BAHMANI A, ARTHANARI S, SHINK S. Improvement of cor-

- rosion resistance and mechanical properties of a magnesium alloy using screw rolling[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 813(1): 152-155.
- [2] MARYAMJAMALI A N, FIELD D. Gradient microstructure and enhanced mechanical performance of magnesium alloy by severe impact loading[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2020, 36(1): 45-49.
- [3] ZHAO X, GU D, MA C, et al. Microstructure characteristics and its formation mechanism of selective laser melting SiC reinforced Al-based composites[J]. *Vacuum*, 2019, 160(2): 189-196.
- [4] WANG B, SONG Q, WEI Y, et al. Improved mechanical properties of AlSi7Mg/nano-SiC composites fabricated by selective laser melting[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810(11): 151-162.
- [5] TANG W Q, ZHOU G W, SHAO Y C, et al. On the role of yttrium in microstructure evolution and texture modification during magnesium alloy extrusion[J]. *Materials Characterization*, 2020, 162(4): 110-189.
- [6] BAHMANI A, ARTHANARI S, SHIN K S. Formulation of corrosion rate of magnesium alloys using microstructural parameters[J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2020, 8(1): 134-149.
- [7] TUN K S, NAHATA A, VINCENT S, et al. Processing, microstructure and mechanical characterization of a new magnesium based multicomponent alloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 28(1): 1 044-1 047.
- [8] 丁文江, 付彭怀, 彭立明, 等. 先进镁合金材料及其在航空航天领域中的应用[J]. *航天器环境工程*, 2011, 28(2): 103-109.
- [9] CHE Q Y, WANG K S, WANG W, et al. Microstructure and mechanical properties of magnesium-lithium alloy prepared by friction stir processing[J]. *Rare Metals*, 2019, 4(3): 1-2.
- [10] LIU W S, WU L L, ZHENG M Y, et al. Controls on rare-earth element transport in a river impacted by ion-adsorption rare-earth mining[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660(4): 697-704.
- [11] NICKELS L. Reclaiming rare earth metals[J]. *Metal Powder Report*, 2020, 75(4): 189-192.
- [12] ROSSOUW D, LANGELIER B, SCULLION A, et al. Multivariate-aided mapping of rare-earth partitioning in a wrought magnesium alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2016, 124(11): 174-178.
- [13] GITHENS A, GANESAN S, CHEN Z, et al. Characterizing microscale deformation mechanisms and macroscopic tensile properties of a high strength magnesium rare-earth alloy: A combined experimental and crystal plasticity approach[J]. *Acta Materialia*, 2020, 186(3): 77-94.
- [14] PAN H, QIN G, HUANG Y, et al. Development of low-alloyed and rare-earth-free magnesium alloys having ultra-high strength[J]. *Acta Materialia*, 2018, 149(5): 350-363.
- [15] JAMILI A M, ZAREI-HANZAKI A, ABEDI H R, et al. Development of fresh and fully recrystallized microstructures through friction stir processing of a rare earth bearing magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering*, 2020, 775(2): 1-11.
- [16] JAGADEESHG V, SETTI S G. An experimental study on the surface finish of ball burnished magnesium(rare earth base) alloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 18(7): 4 711-4 716.
- [17] CHOUDHURI D, SRIVILLIPUTHUR G S. Density functional theory-based investigations of solute kinetics and precipitate formation in binary magnesium-rare earth alloys: A review[J]. *Computational Materials Science*, 2019, 159(3): 235-256.
- [18] XU C, NAKATA T, QIAO X G, et al. Ageing behavior of extruded Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr(%) alloy containing LPSO phase and γ' [J]. *Scientific Reports*, 2017, 4 3391(7): 950-953.
- [19] ZI J, HUANG Y, QIU X, et al. Fabrication of a high strength Mg-11Gd-4.5Y-1Nd-1.5Zn-0.5Zr alloy by thermomechanical treatments[J]. *Materials Science and Engineering*, 2015, A622(1): 121-130.
- [20] LI B, GUAN K, YANG Q, et al. Effects of 0.5% Ce addition on microstructures and mechanical properties of a wrought Mg-8Gd-1.2Zn-0.5Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 763(5): 120-133.
- [21] LI B, GUAN K, YANG Q, et al. Microstructures and mechanical properties of a hot-extruded Mg-8Gd-3Yb-1.2Zn-0.5Zr alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 776(10): 666-678.
- [22] ZHANG D, YANG Q, GUAN K, et al. A high-strength low-rare-earth-alloyed magnesium alloy via traditional hot-extrusion[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 810(8): 967-985.
- [23] YUAN M, ZHENG Z Q. Effects of Zn on the microstructures and mechanical properties of Mg-3Sm-0.5Gd- x Zn-0.5Zr ($x = 0, 0.3$ and 0.6) alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 590: 355-361.
- [24] LUO Z P, ZHANG S Q. High-resolution electron microscopy on the X-Mg₁₂ZnY phase in a high strength Mg-Zn-Zr-Y magnesium alloy[J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(9): 813-815.
- [25] ZHU Y M, MORTONA J, NIE J F. The 18R and 14H long-period stacking ordered structures in Mg-Y-Zn alloys[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(8): 2 936-2 947.
- [26] LYU S Y. A new cast Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy with high hardness[J]. *Materials Letters*, 2018, 217: 79-82.
- [27] LYU S Y. Fabrication of high-strength Mg-Y-Sm-Zn-Zr alloy by conventional hot extrusion and aging[J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, A732: 178-185.
- [28] WANG J F, SONG P F, HUANG G S, et al. High-strength and good-ductility Mg-RE-Zn-Mn magnesium alloy with long period stacking ordered phase[J]. *Materials Letters*, 2013, 93(2): 415-418.
- [29] INOUE A, MATSUSHITA M, KAWAMURA Y, et al. Novel hexagonal structure of ultra-high strength magnesium-based alloys[J]. *Materials Transactions*, 2002, 43(3): 580-584.
- [30] SHAO X H, YANG Z Q, MA X L. Strengthening and toughening mechanisms in Mg-Zn-Y alloy with a long period stacking ordered structure[J]. *Acta Materialia*, 2010, 58(14): 4 760-4 771.
- [31] CHINO Y, MABUCHI M, HAGIWARA S, et al. Novel equilibrium two phase Mg alloy with the long-period ordered structure[J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51(7): 711-714.
- [32] SHAO X H, PENG Z Z, JIN Q Q, et al. Atomic-scale segregations at the deformation-induced symmetrical boundary in an Mg-Zn-Y alloy[J]. *Acta Materialia*, 2016, 118(7): 177-186.