

## La 对 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn 和 ZnAl12Cu1 (Mg) 铸造合金力学性能的影响

张福男<sup>1,2</sup>, 李现慕<sup>2</sup>, 王兆文<sup>1</sup>

(1. 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 金策工业综合大学, 朝鲜 平壤 999093)

**摘 要:** 利用 Al-La 中间合金制备了 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 和 ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa 铸造合金, 考察了不同的 La 含量对合金组织和抗拉强度、伸长率、冲击强度等性能的影响。研究表明: 微量稀土 La 可以细化合金的晶粒, 改变 Si 相晶粒大小和形状。与未添加 La 的合金相比, 含有微量稀土 La 的 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 合金和 ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa 合金具有更优良的力学性能。当 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn 铸造合金中 La 添加量为 0.15% (质量分数) 时, 铸造合金的伸长率增加 2.7 倍。含有 0.1% (质量分数) La 的 ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa 合金抗拉强度和伸长率相比于未添加稀土 La 的合金, 分别增强 1.3 倍和 3.2 倍。含有 0.3% (质量分数) La 时 ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa 的硬度增强 1.8 倍, 但冲击强度是含有 0.15% (质量分数) La 时最高。综合考虑 ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa 铸造合金的机械性能, 稀土 La 的最优添加量为 0.1% ~ 0.2% (质量分数)。

**关 键 词:** 稀土 La; Al-La 中间合金; 铸造铝合金; 铸造锌合金; 力学性能

中图分类号: TG 146.21

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1719-05

## Effects of Rare Earth La on Mechanical Properties of Casting AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn and ZnAl12Cu1 (Mg) Alloys

JANG Pok-nam<sup>1,2</sup>, LI Hyon-mo<sup>2</sup>, WANG Zhao-wen<sup>1</sup>

(1. School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Kim Chaek University of Technology, Pyongyang 999093, D. P. R of Korea. Corresponding author: JANG Pok-nam, E-mail: outlook\_jpn@163.com)

**Abstract:** AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa and ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa casting alloy were prepared by Al-La master alloy. The effect of La content on the microstructure, tensile strength, elongation and impact strength of these alloys were investigated. The results indicated that the crystalline grain of alloys could be refined by addition of La element and the size and shape of Si phase particle were also modified. Compared with the previous alloys, the mechanical properties of AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa alloy and ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa alloy containing traces of La were relatively improved. When 0.15wt% of La was added in AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn casting alloy, the elongation could increase to 2.7 times. The tensile strength and elongation of ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa containing 0.1wt% of La was increased to 1.3 and 3.2 times, respectively. The hardness of ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa containing 0.3wt% of La was increased to 1.8 times while ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa containing 0.15wt% of La exhibited the maximum impact strength. Comprehensively considering the mechanical properties of ZnAl12Cu1 (Mg)-xLa casting alloy, the optimal addition content of La was controlled in the range of 0.1wt% ~ 0.2wt%.

**Key words:** rare earth La; Al-La master alloy; cast Al alloy; cast Zn alloy; mechanical property

稀土元素是有色金属材料重要的合金元素, 由于稀土元素具有很多独特的性质, 添加少量稀土元素可以改善有色金属材料的组织和性能. 在铝合金中广泛应用稀土元素作为添加剂. 把稀土金属添加到铝、镁及锌合金<sup>[1-7]</sup>中, 由于变质作用和对杂质的净化作用, 微量稀土金属能有效改善合金的强度、硬度、导电性、腐蚀性等性能<sup>[8-9]</sup>. 铝稀土合金分为两类: 中间合金(稀土质量分数约为 5% ~ 12%) 和标准合金(稀土质量分数约为 0.1% ~ 0.5%, 个别超过 1%). 从铸造合金到变形合金, 从重达吨级的铝电缆、铝母线到轻至几克的铝箔, 可以说稀土已渗透到铝和铝合金各个领域<sup>[10-11]</sup>. 目前, 有关含有稀土 La 的  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  和  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  铸造合金力学性能的研究较少. 本文研究添加稀土 La 的  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn}$  和  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)}$  铸造合金的组织及力学性能, 研究不同 La 添加量对这些合金力学性能的影响.

## 1 实 验

### 1.1 实验方法

根据表 1, 将原料配比好, 采用中频感应炉, 制备了  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  合金 ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ ). 实验合金成分设计见表 1.

表 1  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  合金设计成分 (质量分数)

Table 1 Composition design of  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  alloy (mass fraction) %

Si	Cu	Mn	Mg	La	Al
10	0.2	0.3	0.2	$x$	余量

实验中合金熔炼所用原料为铝和镁、Al-10% (质量分数) La 中间合金、Al-20% (质量分数) Si 中间合金、Al-10% (质量分数) Cu 中间合金和 Al-10% (质量分数) Mn 中间合金. 在熔炼过程中, 先将预热到 100 °C 的铝锭加入炉内, 添加 RF-2 型熔剂 (光卤石型覆盖剂) 后升温, 在铝熔化后, 升温到 760 °C, 加入预热的 Al-20% (质量分数) Si 中间合金. Al-20% (质量分数) Si 中间合金熔化后加入 Al-10% (质量分数) Mn 中间合金. Al-10% (质量分数) Mn 中间合金熔化后充分搅拌熔体, 用  $\text{C}_2\text{Cl}_6$  精炼剂对熔体进行净化处理, 然后静置 5 ~ 10 min 并扒渣. 扒渣后压入镁块, 镁熔化后, 充分搅拌熔体, 加入已制备的 Al-

10% (质量分数) La 中间合金. Al-10% La 中间合金熔化后, 充分搅拌熔体降温静置 10 ~ 20 min, 进行浇铸, 浇铸温度为 730 °C. 对铸造品进行 T6 热处理.  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  合金的制备过程同上述的  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  合金制备方法.  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  合金的浇铸温度为 460 ~ 490 °C.  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  ( $x=0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3$ ) 合金成分设计见表 2.

表 2  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  合金设计成分 (质量分数)  
Table 2 Composition design of  $\text{ZnAl12Cu1(Mg)-xLa}$  alloy (mass fraction) %

Al	Cu	Mg	La	Zn
12	1.0	0.03	$x$	余量

通过改变 Al-La 中间合金的加入量, 研究稀土 La 添加量对合金组织和力学性能的影响.

### 1.2 合金的分析及测试

采用 NEOPHOT 21 型金相显微镜 (德国)、QUANTA-200 型扫描电镜 (FEI 公司, 荷兰) 进行铸造合金的微观形貌分析. 用 ZDM-5 型拉力试验器 (德国)、布氏硬度计和 JB-300 冲击试验器来测定添加稀土 La 的铸造铝硅系合金及铝锌系合金的力学性能.

## 2 结果与讨论

### 2.1 稀土 La 对 $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$ 铸造合金力学性能的影响

La 对合金力学性能的影响见图 1 和图 2.

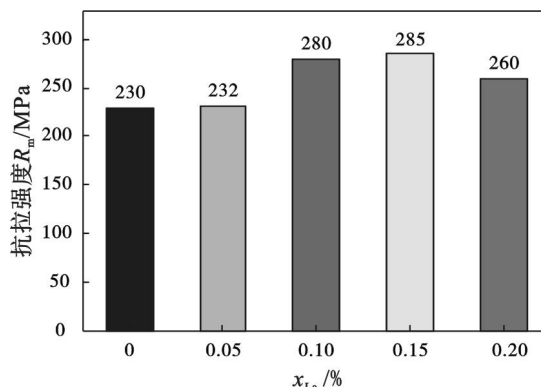


图 1 La 对  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$  合金的抗拉强度的影响

Fig. 1 The effect of La on the tensile strength of casting alloy  $\text{AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa}$

从图 1 和图 2 可以看出, 添加不同含量稀土后合金的抗拉强度及伸长率得到了改善. 随着稀土含量的增加, 试样抗拉强度也逐步增加, 稀土

La 添加到 0.15% (质量分数) 后出现峰值 (285 MPa), 随后强度逐步下降. 而随着稀土质量分数增加, 材料伸长率和硬度先增强、后逐步降低. 伸长率峰值为 5.3%, 比未加 La 的合金增加 2.7 倍. 从图 2 可知, 稀土 La 变质合金比未变质合金优越一些.

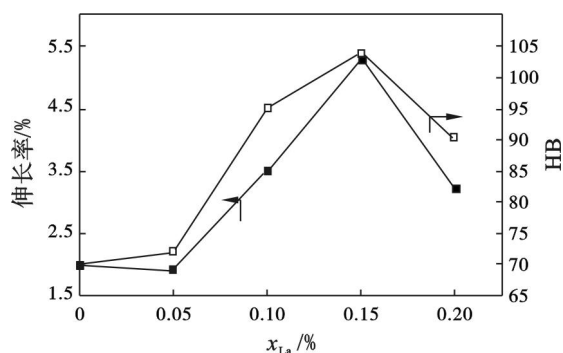


图 2 La 对 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 合金伸长率和硬度的影响  
Fig. 2 The effects of La addition on the elongation and hardness of casting alloy AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa

从 Al-La 相图<sup>[12]</sup>可以看出, 因为稀土 La 与 Al 结合而形成金属间化合物  $Al_{11}La_3$  (熔点 1240 °C), 该金属间化合物在合金中起变质作用.

合金的力学性能取决于晶粒细化和固溶强化的结果. 晶粒细化提高合金的强度和伸长率, 但当合金中 La 质量分数为 0.15% 以上时, 由于具有高熔点的  $Al_{11}La_3$  中间化合物在晶界前沿液相层更多富集, 稀土 La 消耗更多的 Al 元素, 更难以在固溶处理中分解, 导致 Al 对合金的固溶强化作用降低, AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 合金的固溶强化作用最弱. 含有 0.15% (质量分数) La 的 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 铸造合金的金相组织见图 3.

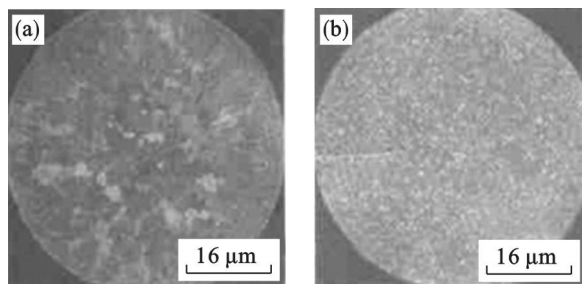


图 3 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 合金的金相显微镜照片  
Fig. 3 The optical microscope photos of casting alloy AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa  
(a)—未添加 La; (b)—0.15% (质量分数) La.

从图 3 可以看出, 含有 0.15% (质量分数) La 的合金晶粒最为细小. 对比稀土分布可以看出, 添加 0.15% (质量分数) La 的合金中 La 的分布最为均匀, 基本上无团聚现象. 另外观察了稀土 La 对 Si 相晶粒大小和状态的影响 (图 4). 从图 4 可知, 不加 La 时金属 Si 的分布与添加 0.15% (质量分数) La 时 Si 的分布不一样.

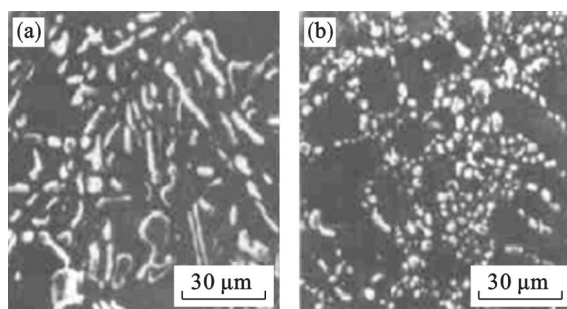


图 4 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa 合金中 Si 相组织 SEM 照片  
Fig. 4 SEM microstructure of Si phase in casting alloy AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn-xLa  
(a)—未添加 La; (b)—0.15% (质量分数) La.

不加 La 的 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn 合金中 Si 晶粒平均大小是 15 μm, 而添加 0.15% (质量分数) La 时树枝形态的 Si 相组织几乎未发现, 此时 Si 晶粒平均大小约为 5 μm. 这说明稀土 La 抑制 Si 相的生长. 原因主要是稀土元素作为“表面活性元素”, 在固-液界面上形成含有 La 的吸附膜, 导致晶粒生长速率的降低, 使得熔体有更充足的时间产生更多的晶核.

## 2.2 稀土 La 对铸造 Zn 合金力学性能的影响

合金的力学性能见图 5 和图 6.

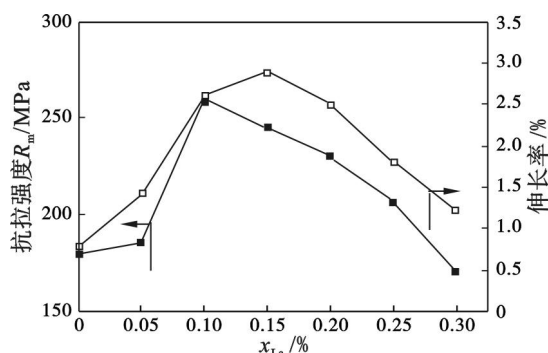


图 5 ZnAl12Cu1(Mg)-xLa 合金的抗拉强度和伸长率  
Fig. 5 Tensile strength and elongation of alloy ZnAl12Cu1(Mg)-xLa

从图 5 可以看出, 添加 0.1% (质量分数) La 时抗拉强度增大 1.3 倍, 伸长率增加 3.2 倍. 稀土 La 与合金元素结合而形成金属间化合物, 起组织微细化作用和强化作用. 从图 6 可以看出, 添加



0.3% (质量分数) La 时硬度增强 1.8 倍, 但冲击强度是添加 0.15% (质量分数) La 时最高, 此时增加 1.6 倍左右。虽然稀土 La 起晶粒细化作用, 但添加 0.2% (质量分数) 以上的 La 时, 稀土 La 成为一种杂质, La 在晶界层大量偏析, 所以合金的冲击强度降低, 对合金的力学性能有不良影响。

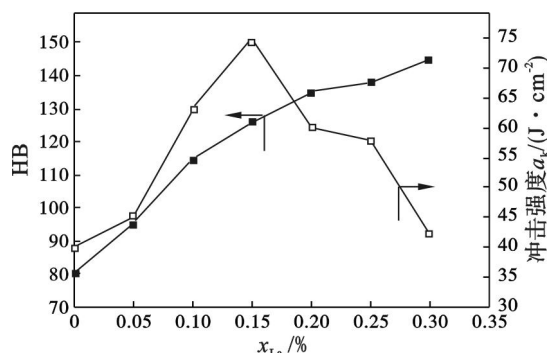


图 6 La 对 ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 合金的硬度和冲击强度的影响

Fig. 6 The hardness and impact strength of alloy ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa

图 7 是添加稀土 La 后 ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 组织 SEM 照片。从图 7 可以看出, 用 La 来变质合金的晶粒比不变质的合金细小, 而且晶粒分布比较均匀。稀土 La 变质处理的 ZnAl12Cu1 (Mg) 合金的应用如表 3 所示。

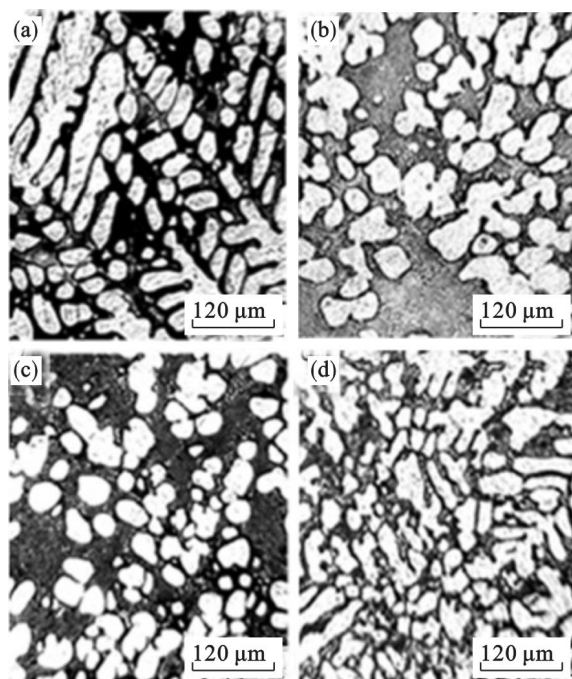


图 7 ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 合金 SEM 照片

Fig. 7 SEM microstructure of ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa alloy

(a) —未添加 La; (b) —0.1% (质量分数) La;  
(c) —0.15% (质量分数) La; (d) —0.2% (质量分数) La.

表 3 ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 合金的应用

设备	规格	零件	替代合金
万能车床	—	前床螺母	铜合金
滚齿机	01 - 800 × 6	本体轴衬	铜合金
滚齿机	01 - 800 × 6	轴衬	铜合金
薄板压延机	300 mm × 400 mm	辊轴轴衬	巴比特
交流电动机	14 kW/6 极	转子轴衬	巴比特
搪磨机	3A650	摩擦套管	巴比特

### 3 结 论

1) 由于稀土具有变质作用, 加入 La 可以改善 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn 和 ZnAl12Cu1 (Mg) 合金的力学性能。

2) AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn - xLa 合金中合理的 La 添加量是 0.1% ~ 0.2% (质量分数)。含有 0.15% (质量分数) La 的 AlSi10Cu0.2Mg0.2Mn - xLa 合金的伸长率增加 2.7 倍。

3) ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 合金中合理的 La 添加量是 0.1% ~ 0.2% (质量分数), 含有 0.1% (质量分数) La 的 ZnAl12Cu1 (Mg) - xLa 合金的抗拉强度和伸长率分别增加 1.3 倍和 3.2 倍。Al - La 中间合金变质处理的 ZnAl12Cu1 (Mg) 合金可以代替铜合金及巴比特合金。

### 参考文献:

- [1] Li Y G, Wu Y Y, Qian Z, et al. Effect of co-addition of RE, Fe and Mn on the microstructure and performance of A390 alloy[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 527 (1/2): 146 - 149.
- [2] Lai J, Jiang R, Liu H, et al. Influence of cerium on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Journal of Central South University*, 2012, 19(4): 869 - 874.
- [3] Zang Z, Chen K, Fang H, et al. Effect of Yb addition on strength and fracture toughness of Al-Zn-Mg-Cu-Zr aluminum alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(5): 1037 - 1042.
- [4] Zou L, Pan Q, He Y, et al. Effect of minor Sc and Zr addition on microstructures and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(2): 340 - 345.
- [5] Qiu H, Yan H, Hu Z. Effect of samarium (Sm) addition on the microstructures and mechanical properties of Al-7Si-0.7Mg alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 567: 77 - 81.
- [6] Wu D, Yan S, Wang Z, et al. Effect of samarium on microstructure and corrosion resistance of aged as-cast AZ92

- magnesium alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 2014, 32(7): 663–671.
- [7] Jun J H, Kim J M, Park B K, et al. Effects of rare earth elements on microstructure and high temperature mechanical properties of ZC63 alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40(9/10): 2659–2661.
- [8] Yuan W H, Liang Z Y, Zhang C Y, et al. Effects of La addition on the mechanical properties and thermal-resistant properties of Al-Mg-Si-Zr alloys based on AA 6201 [J]. *Materials & Design*, 2012, 34: 788–792.
- [9] Zhou W W, Cai B, Li W J, et al. Heat-resistant Al-0.2Sc-0.04Zr electrical conductor[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 552: 353–358.
- [10] Bacewicz R, Antonowicz J. XAFS study of amorphous Al-RE alloys[J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54(6): 1187–1191.
- [11] Banerjee M K, Datta S. Effect of cold work and trace rare-earth additions on the aging behavior of Al-Cr alloys containing zirconium [J]. *Materials Characterization*, 2000, 44(3): 277–284.
- [12] Zhou S H, Napolitano R E. Phase equilibria and thermodynamic limits for partitionless crystallization in the Al-La binary system [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(3): 831–840.

(上接第 1681 页)

- [7] Wang Y Y, David J, Guo G X. Robust decentralized control for multimachine power systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and System*, 1998, 45(3): 271 – 279.
- [8] Lo J C, Lin M L. Observer-based robust  $H_\infty$  control for fuzzy systems using two-step procedure[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2004, 12(3): 350 – 359.
- [9] Tseng C S. A novel approach to  $H_\infty$  decentralized fuzzy-observer-based fuzzy control design for nonlinear interconnected systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, 16(5): 1337 – 1350.
- systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(11): 2957 – 2962.
- [11] 孙妙平, 年晓红, 潘欢. 基于观测器的汽轮发电机气门开度的时滞无关控制[J]. *控制理论与应用*, 2012, 29(5): 593 – 598.
- (Sun Miao-ping, Nian Xiao-hong, Pan Huan. Observer-based delay-independent control for steam valves of steam turbo-generator[J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(5): 593 – 598.)