

## 熔炼工艺对 AZ61 稀土镁合金组织的影响

闫 洪,邱鸿旭,杜 磊

(南昌大学机电工程学院,南昌市轻合金材料制备与加工重点实验室,南昌 330031)

**摘 要:** 通过光学显微镜、扫描电镜等研究了浇铸温度、保温时间、稀土镧含量等工艺参数对 AZ61 镁合金显微组织的影响。结果表明:随着浇铸温度的升高,合金的组织变得均匀、晶粒变得圆整,但也开始长大、粗化,浇铸温度为 720 ℃ 时,合金的组织最均匀,晶粒也最圆整;保温时间的改变对合金组织影响不大;随稀土含量的增加,树枝状初生相  $\alpha$ -Mg 得以细化,同时稀土相也开始长大,当稀土质量分数为 1.0% 时,合金中  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相均匀分布在晶界上,并且组织中所含的稀土相分布比较均匀,没有出现团聚。

**关键词:** AZ61 镁合金;稀土镧;显微组织;熔炼工艺

**中图分类号:** TG146.22

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3738(2013)012-0060-04

### Effect of Melting Process on Microstructure of AZ61 Rare Earth Magnesium Alloy

YAN Hong, QIU Hong-xu, DU Lei

(Key Laboratory of Light Alloy Preparation & Processing in Nanchang City, School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The effects of pouring temperature, holding time and rare earth La content on the microstructure of AZ61 magnesium alloy were investigated by OM, SEM. The results indicate that with increasing pouring temperature, the microstructure of the alloy was more uniform, grains grew up and became more rounding and coarser in the mean time. The most uniform microstructure with the most rounding grains was obtained when pouring temperature was 720 ℃. There were no obvious influences of holding time on the microstructure of the alloy. With the increase of rare earth content, dendritic primary phase of  $\alpha$ -Mg was refined and the rare earth phase began to grow. When the rare earth content was 1.0wt. %,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> phases uniformly distributed around grain boundaries, the uniform distribution of rare earth phase was observed and no agglomeration of rare earth phase was found.

**Key words:** AZ61 magnesium alloy; rare earth La; microstructure; melting process

## 0 引 言

镁合金的密度小、比强度高,广泛用于汽车、航空航天等行业中,以达到轻量化的目的<sup>[1-2]</sup>。文献[3-7]研究表明,向镁合金中添加少量稀土元素可细化合金的显微组织、提高合金的力学性能,还可

改善合金的耐腐蚀和抗蠕变性能。文献[8]表明,当稀土镧含量超过 1%(质量分数,下同)时,AZ61 镁合金中晶界上稀土相粗化、长大,合金的力学性能下降。然而在稀土镁合金的浇铸过程中,合金的浇铸温度、保温时间等因素都会对合金组织产生一定的影响<sup>[9-10]</sup>。浇铸温度高,镁合金熔体容易烧损,浇铸温度低,镁合金熔体充型能力差,不利于浇铸成型;保温时间长可以使稀土元素有足够的时间进行扩散,使其均匀地分布在熔体中;稀土含量的多少也是一个重要的影响因素。但有关 AZ61 稀土镁合金冶炼工艺参数对其组织的影响缺少详细的报道,为此,作者采用正交试验方案冶炼制备出 AZ61 稀土

收稿日期:2012-10-19;修订日期:2013-09-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51364035,51165032);江西省高等学校科技创新团队资助项目(00008713);江西省教育厅资助项目(GJJ13203);党外专家博士产学研合作计划项目(2012-CYH-DW-XCL-002)

作者简介:闫洪(1962—),男,河南许昌人,教授,博士。

镁合金,主要研究了浇铸温度、保温时间、稀土元素含量对合金组织的影响,为冶炼 AZ61 稀土镁合金提供参考。

1 试样制备与试验方法

试验所用材料为 AZ61 镁合金(化学成分见表 1),颗粒状 Mg-15La 中间合金(镧质量分数 15%)。为了研究浇铸温度、保温时间、稀土含量等因素对合金组织的影响,制定了三水平三因素试验方案,如表 2 所示。

将原料 AZ61 合金表面进行机械打磨以去除表面氧化皮及污垢,放入烘干炉中烘干水分待用。试验前将 Mg-15La 中间合金切成小块使其在熔炼过

程中容易熔化,然后按预定的镧质量分数进行配料,充分考虑镁合金的烧损率予以适当调整后,分别在物理天平上称出原料所需量。

第 1 组试验步骤:将 AZ61 合金切成小块并预热到 300 ℃,炉子加热至 600 ℃后放入 AZ61 合金,当合金开始部分熔化时,加入自制的覆盖剂,升温至 720 ℃使其完全融化,再加入预先称好的小颗粒状的 Mg-15La 中间合金(加入时中间合金用铝箔纸包裹),机械搅拌,使其均匀分布在熔体中;静置保温 90 min 后,降温至 700 ℃浇铸至金属型模具中。在浇铸前预热浇铸模至 200 ℃左右,避免金属熔体激冷,提高合金的流动性。得到 AZ61-0.5%La 合金。其余 10 组试验按类似方法进行。

表 1 试验用 AZ61 镁合金的化学成分(质量分数)

Tab. 1 Chemical composition of test AZ61 magnesium alloy (mass)								%
Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	杂质	Mg
5.8~7.2	0.4~1.5	>0.15	0.1	0.05	0.05	0.005	0.3	余

表 2 AZ61 稀土镁合金熔炼方案

Tab. 2 Experimental scheme of AZ61 RE-magnesium alloy			
编号	浇铸温度/℃	镧质量分数/%	保温时间/min
1	700	0.5	90
2	700	1.0	30
3	700	1.5	60
4	720	0.5	60
5	720	1.0	90
6	720	1.5	30
7	740	0.5	30
8	740	1.0	60
9	740	1.5	90
10	720	0.5	30
11	720	0.5	90

为了观察试样的显微组织,先把合金镶嵌成试样,镶嵌机型号为 XQ-1,然后依次使用不同型号的水磨金相砂纸打磨镶嵌好的试样,对试样进行抛光,再用体积分数为 4%硝酸酒精溶液进行腐蚀,最后在为 XJL-02 型的光学显微镜与 Quanta 200 型扫描电子显微镜(SEM)下观察显微组织。

2 试验结果与讨论

2.1 保温时间对合金显微组织的影响

从图 1 中可以看出,合金在熔化后,经过不同保温时间处理后,浇铸成型的合金组织没有太大的区别,其显微组织基本类似。试验合金中添加了稀土元素镧,稀土元素镧的熔点高,扩散慢,可以通过延长保温时间来增加稀土镧元素融入合金中的量,从而达到理想的合金化效果。

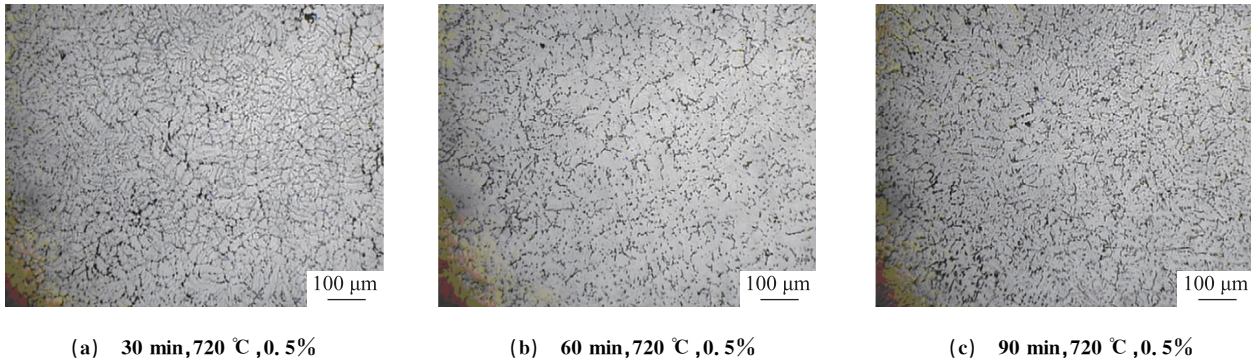


图 1 熔炼后保温不同时间 AZ61 稀土镁合金的显微组织

Fig. 1 Microstructure of AZ61 rare earth magnesium alloy for different holding time

## 2.2 浇铸温度对合金显微组织的影响

从图 2 中可以看出,基体合金主要由  $\alpha$ -Mg 相和粗大的  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相组成;当浇铸温度为 700 ℃ 时,合金组织比较均匀,当浇铸温度升高到 720 ℃ 时,合金的组织十分均匀,晶粒也比较圆整,随着温度的继续升高,合金的组织开始长大、粗化。

因为试验采用金属液直接浇铸到金属模具然后成形的方式,而模具温度比金属液温度低很多,金属液浇入模具型腔后快速冷却,因此合金的凝固过程是非平衡凝固。浇铸温度不同,金属熔体所含的热量也不同,所产生的过热度也不同,使得合金组织的长大形式及机制发生变化。另外,金属液温度的不同使得合金熔体的黏度不同,这对合金熔体在模具型腔内的流动性产生较大影响。金属液流动性差将导致初生相在长大过程中出现成分偏差,影响合金成分的均匀性,最终改变合金初生相长大机制。

根据合金熔体热量散失时间  $T$  公式<sup>[9]</sup>:

$$T \propto \ln \frac{t_{\text{浇}} - t_{\text{型}}}{t_L - t_{\text{型}}} \quad (1)$$

式中: $t_{\text{浇}}$  为浇铸温度; $t_{\text{型}}$  为模型温度; $t_L$  为合金液相线温度。

在冷却条件相同的情况下,浇铸温度高,合金所需要的散热时间也就长,相应的凝固时间也长。当浇铸温度为 700 ℃ 时,合金的浇铸温度相对来说比较低,熔体冷却速率快,凝固时间短,温度场比较均匀,有利于形成颗粒均匀的初生  $\alpha$ -Mg 相。当浇铸温度升高到 720 ℃ 时,熔体中所含的热量增加,合金形核和长大的时间延长,但是由于增加的热量刚好达到合金凝固形核和长大的最佳点,故得到的合金组织也非常均匀,晶粒也十分圆整;随着浇铸温度的进一步升高,合金中所携带的热量也继续增加,导致合金凝固时间延长, $\alpha$ -Mg 相开始长大,甚至发展成

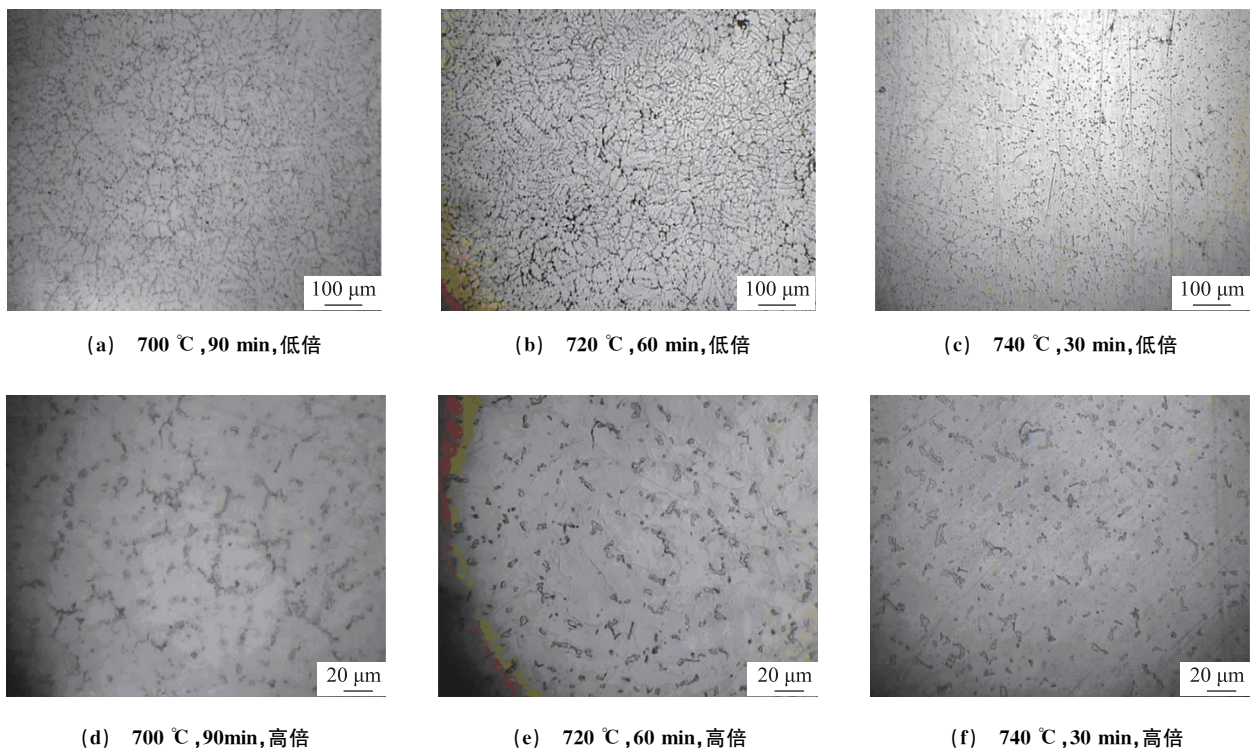


图 2 不同浇铸温度下 AZ61-0.5%La 稀土镁合金的显微组织

Fig. 2 Microstructures of AZ61-0.5%La rare earth magnesium alloy at different casting temperature

为树枝晶。另外,当浇铸温度升高时,镁合金熔体的氧化倾向增多,熔体吸气增多,合金凝固时易出现疏松、缩孔等铸造缺陷。因此,浇铸温度选择在 720 ℃ 时效果最好。

## 2.3 镧含量对合金显微组织的影响

由图 3,4 可以看出,当合金中稀土镧质量分数为 0.5% 时,初生相  $\alpha$ -Mg 呈树枝状,晶粒比较粗大,

$\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相在晶界上呈不均匀网状分布,并出现偏聚现象,由 SEM 形貌可知,此时稀土相的含量相对较少,零星地分布在组织中,其形貌主要是呈短棒状;当合金中稀土元素镧质量分数为 1.0% 时,晶粒细化较为明显,树枝状初生相  $\alpha$ -Mg 得到明显改善,网状  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相消失,均匀分布在晶界上,由其 SEM 形貌可知,合金中长条形、白色发亮的组织开



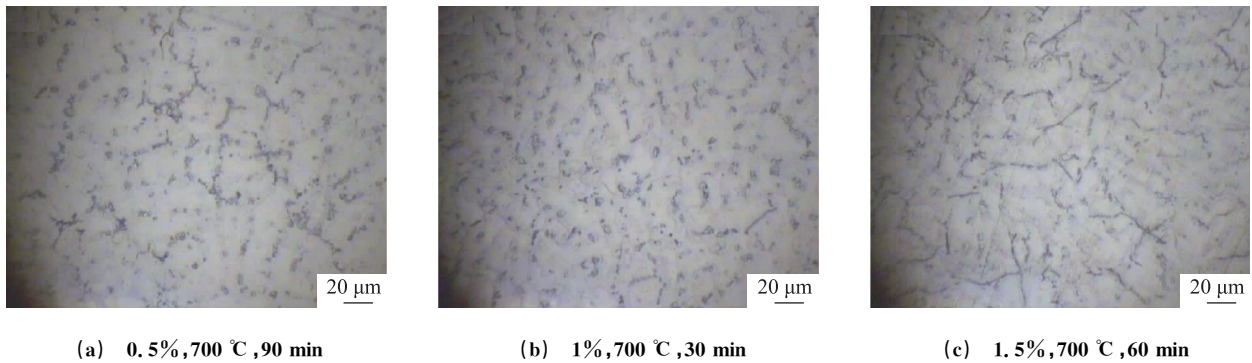


图 3 不同镧含量 AZ61 稀土镁合金的显微组织

Fig. 3 Microstructure of AZ61 rare earth magnesium alloy with different La contents

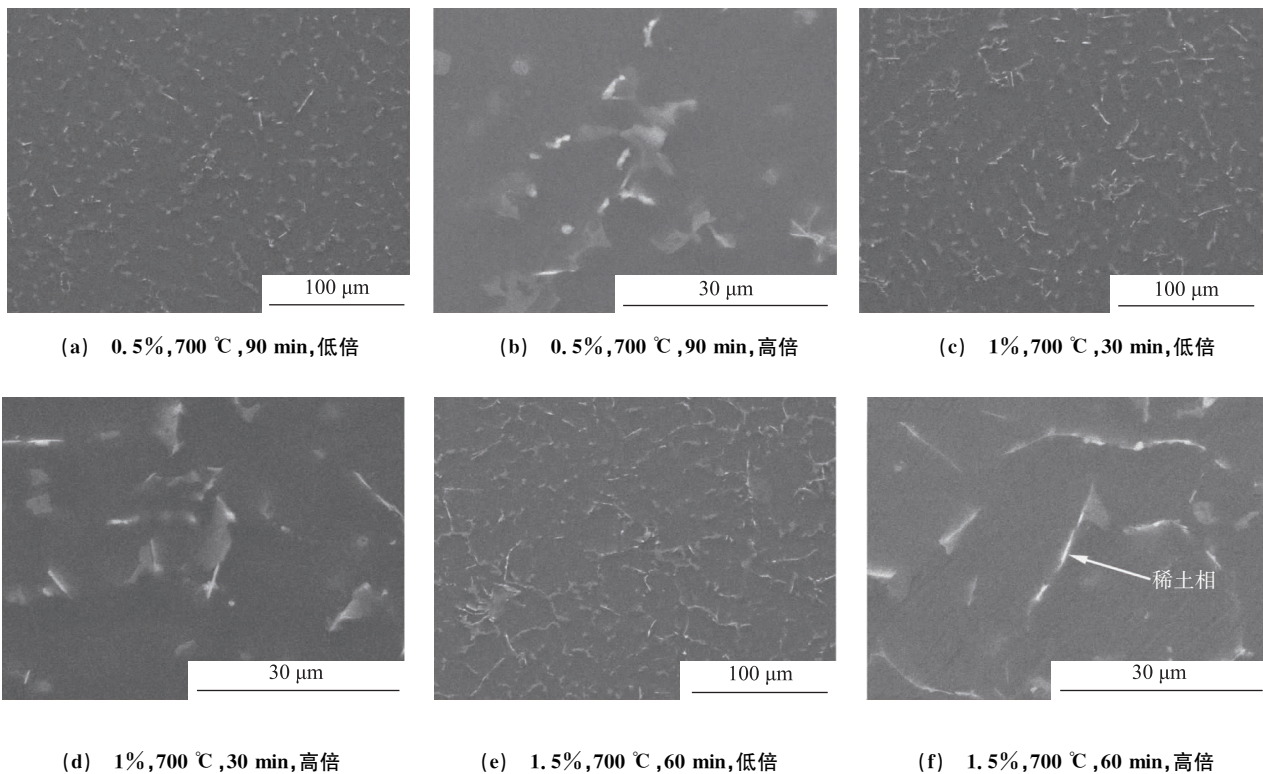


图 4 不同镧含量 AZ61 稀土镁合金的 SEM 形貌

Fig. 4 SEM morphology of AZ61 rare earth magnesium alloy with different La contents

始增多,在组织中大部分地方都有分布,原来呈现短棒状的稀土相开始变长,稀土相既有短棒状,也有长棒状;当稀土镧质量分数为 1.5%时,树枝状  $\alpha$ -Mg 重新出现,并且晶粒粗大, $\beta$ 相在晶界上偏聚现象严重,由 SEM 形貌可知,合金中存在较多的稀土相,稀土相继续变长,大部分稀土相都是呈长条状分布于合金中,甚至少数地方出现了稀土相团聚的现象。

晶粒尺寸、 $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>相及生成稀土相的形貌及分布直接影响合金的性能<sup>[11]</sup>。在常温下,细化晶粒是一种有效提高合金强度和塑性的手段, $\beta$ 相的网状化对合金的力学性能具有不利的影响,第二相

稀土相本身为硬脆相,它的形成可以防止晶体塑性变形时晶界的滑移,从而提高合金的强度,同时稀土相的均匀分布对合金的强韧性也有一定的提高。由图 3 可知,当稀土镧含量为 1.0%时,晶粒显细化,网状  $\beta$ 相被打散,同时短杆状的稀土相在合金中均匀分布,这都有利提高合金的强韧性;当稀土含量继续升高至 1.5%时,网状  $\beta$ 相重新聚集,同时细长稀土相的析出对合金具有割裂能力,严重影响合金的力学性能。因此,当合金中稀土镧含量为 1.0%时,所得合金的组织最佳。

(下转第 91 页)

(2) 应用多目标遗传算法 NSGA-II 进行切削参数优化,得到相应的 Pareto 最优解集,提供了多组可行的选择方案。

(3) 该方法适用范围广,可以获得最优的切削工艺参数组合,用于指导实际的加工生产;该方法也可进一步推广到更多的目标,如刀具磨损、机床功率等。

#### 参考文献:

- [1] TAYLOR F W. On the art of cutting metals[J]. Transactions of ASME, 1907, 28: 31-35.
- [2] BASKAR N, ASOKAN P, SARAVANAN R, *et al.* Selection of optimal machining parameters for multi-tool milling operations using a memetic algorithm[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 174(13): 239-249.
- [3] 王军, 张建明, 魏小鹏. 一次走刀立铣加工优化与 CAM 软件开发[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 141-146.
- [4] BENARDOS P G, VOSNIAKOS G C. Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and tagu-

chi's design of experiments[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2002, 18(5/6): 343-354.

- [5] WANG M Y, LAN T S. Parametric optimization on multi-objective precision turning using grey relational analysis[J]. Information Technology Journal, 2008, 7(7): 1072-1076.
- [6] 张臣, 周来水, 余湛悦, 等. 基于仿真数据的数控铣削加工多目标变参数优化[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(5): 1039-1045.
- [7] AGAPIOU J S. The optimization of machining operations based on a combined criterion, part 1: the use of combined objectives in single-pass operations[J]. Transactions of ASME, 1992, 114(4): 500-507.
- [8] SRINIVAS N, DEB K. Multi-objective optimization using non-dominated sorting in genetic algorithms[J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(1): 221-248.
- [9] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, *et al.* A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [10] 王占礼, 黄福志, 李静. 数控车削加工仿真中的切削力预测[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(1): 17-20.

(上接第 63 页)

### 3 结 论

(1) 试验条件下,随浇铸温度升高,组织变得均匀、晶粒变得圆整,但也开始长大、粗化;当浇铸温度为 720 ℃时,合金的组织最均匀,晶粒也最圆整。

(2) 随稀土镧含量增加,合金中树枝状初生相  $\alpha$ -Mg 得到改善,同时稀土相也开始长大,当其质量分数为 1.0%时,  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 相均匀分布在晶界上,并且组织中所含的稀土相分布比较均匀,没有出现团聚。

(3) 合金熔体经过不同保温时间浇铸的合金组织没有太大的区别,基本类似。

#### 参考文献:

- [1] 张景怀, 唐定骧, 张洪杰, 等. 稀土元素在镁合金中的作用及其应用[J]. 稀有金属, 2008, 32(5): 659-666.
- [2] 师昌绪, 李恒德, 王淀佐, 等. 加速我国金属镁工业发展的建议[J]. 材料导报, 2001, 15(4): 5-6.
- [3] 王勇, 廖治东, 张恒飞, 等. 稀土在镁合金中作用的研究现状[J]. 材料导报, 2011, 25(增 1): 487-491.
- [4] ZHOU H, WANG M X, LI W, *et al.* Effect of Ce addition on ignition point of AM50 alloy powders[J]. Materials Letters, 2006, 60(27): 3238-3240.
- [5] LI Q A, LI X F, ZHANG Q, *et al.* Effect of rare-earth element Sm on the corrosion behavior of Mg-6Al-1.2Y-0.9Nd alloy[J]. Rare Metals, 2010, 29(6): 557-560.
- [6] 段汉桥, 王立世, 蔡启舟, 等. 稀土对 AZ91 镁合金耐腐蚀性能

的影响[J]. 中国机械工程, 2003, 14(20): 1789-1793.

- [7] 张德平, 田政, 唐定骧, 等. 铈镧混合稀土对 AZ91D 压铸镁合金显微组织和蠕变性能的影响[J]. 稀有金属, 2010, 34(2): 202-209.
- [8] 杜磊, 闫洪. La 对 AZ61 镁合金组织及性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(增 1): 42-46.
- [9] 李克杰, 李全安, 井晓天, 等. 浇注温度对 Mg-5Al-0.5Y-0.5Nd 合金组织及性能的影响[J]. 铸造技术, 2008, 29(5): 642-645.
- [10] 刘胜新, 隋方飞, 苗晋琦, 等. 熔炼工艺对 Mg-Al-Ce-Sb 合金铸态显微组织和显微硬度的影响[J]. 轻合金加工技术, 2009, 37(7): 6-9.
- [11] 周海涛, 曾小勤, 刘文法, 等. 稀土铈对 AZ61 变形镁合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004(1): 99-104.

### 2014 年电子期刊征订

为了倡导环保理念,保护森林,节约纸张,希望广大读者踊跃订阅电子期刊,支持环保事业,共同携手创造绿色发展的明天!

本刊采用 PDF 格式用 E-Mail 形式发送,读者保存方便不占空间,可方便打印某篇文章或某一页;订阅费用低,全年订阅比邮购费用低一半,且比邮局发行快 10 天左右。如需订阅,请您登录 [www.mat-test.com](http://www.mat-test.com) 网站填写订阅信息,并把订阅款项打入指定银行或邮局,收到款后我们会及时将电子期刊发送给您。

《机械工程材料》电子期刊全年定价 90 元,半年 50 元。

联系电话:021-65527634; E-mail: [wm@mat-test.com](mailto:wm@mat-test.com)

联系人:王敏先生