

# Mg 对压铸 Al-8Ce 合金组织和性能的影响

权北北, 李德江, 曾小勤, 徐隼鹏

(上海交通大学材料科学与工程学院, 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200240)

**摘要:** 采用扫描电子显微镜、X射线衍射、透射电子显微镜和激光热导仪等分析测试手段, 研究了Mg对压铸Al-8Ce合金微观组织、力学性能和导热性能的影响。结果表明, 合金主要由 $\alpha$ -Al初生相和Al-Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>共晶相组成, Mg在合金中以固溶态存在, 没有含Mg的第二相生成, 且Mg元素的添加对合金微观组织无明显影响。压铸Al-8Ce-xMg合金的屈服强度和抗拉强度随着合金中Mg含量的增加而增加, 而合金的伸长率和热导率则随着合金中Mg含量的增加而降低。试验结果表明, 压铸Al-8Ce-0.50Mg合金展现出更加优异的综合性能, 其屈服强度为112.8 MPa, 抗拉强度为225.0 MPa, 伸长率为10.3%, 热导率为153.7 W/(m·K)。

**关键词:** 压力铸造; Al-Ce合金; 微观组织; 力学性能; 导热性能

近年来, 随着燃油汽车所带来的环境污染和能源紧缺等问题越来越严重, 电动汽车因其环保、节能等优势而迅猛发展。但是, 随着电动汽车续航里程的增加, 电动汽车的动力系统产生的热量越来越多<sup>[1]</sup>。如果无法及时将热量排出, 则会影响零部件的服役性能和使用寿命<sup>[2]</sup>。压铸铝合金因其密度小、比强度高、导热性能好, 而被广泛应用于生产电动汽车的电机、变速箱和电池等在汽车行驶过程中热量密度较高的零部件壳体<sup>[3]</sup>。然而, 常用的压铸铝合金, 如ADC12、A380等, 其热导率为90~110 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, 约为纯铝(213 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)的二分之一, 难以满足电动汽车零部件的散热要求<sup>[4]</sup>。

Al-Ce-Mg合金因其高强高韧性能而被认为是理想的汽车用压铸铝合金材料, 但是Al-Ce-M合金的力学性能并没有被系统地研究, 而且其导热性能没有相关的报道。此外, 国内外对铝合金导热性能的研究主要集中在多元的商用铝合金<sup>[5-9]</sup>。商用铝合金的基体中含有多种不同的固溶原子和第二相, 这导致很难单独分析每种固溶原子或第二相对合金导热性能的影响规律。在Al-Ce-Mg合金中, Ce主要以Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>金属间化合物的形式存在, 且常温下Ce在Al基体中的固溶度可以忽略不计<sup>[10-11]</sup>。而常温下, Mg在铝基体中的固溶度却能达到0.89wt.% (1.00at.%)<sup>[12]</sup>, 而且Ce元素不会影响Mg在铝基体中的固溶度<sup>[13]</sup>。因此, 本研究以Al-8Ce合金为基体, 通过高压铸造方法制备不同Mg含量的Al-8Ce-xMg (x=0, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75wt.%)合金, 研究了Mg元素对合金微观组织、力学性能和导热性能的影响。

## 1 试验方法

本研究通过压力铸造, 制备了不同Mg含量的Al-8Ce-xMg (x=0, 0.10, 0.25, 0.5, 0.75wt.%)合金, 表1为采用直读型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测试得到的合金实际成分。合金原材料为工业纯铝(Al≥99.9wt.%)、工业纯镁(Mg≥99.9wt.%)、Al-20wt.%Ce中间合金(Al+Ce≥99.9wt.%)。通过TOYO-BD350V5冷室压铸机制备了不同成分合金的压铸件, 压铸件的示意图及尺寸如图1所示, 压铸温度为720℃, 模具的预热温度为200℃, 压铸机在不同充型阶段的充型速度及变换位置如图2所示。用于合金力学性能测试的棒状试样可以直接从压铸件中获得, 拉伸棒在铸件中的位置如图1的A处所示。合金的室温拉伸试验在Zwick/

作者简介:

权北北(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为高性能压铸铝合金。E-mail: quanbb@sjtu.edu.cn  
通讯作者:  
李德江, 男, 副教授。E-mail: lidejiang@sjtu.edu.cn

中图分类号: TG27  
文献标识码: A  
文章编号: 1001-4977(2020)07-0727-05

基金项目:  
国家重点研发计划项目(2016YFB0101704)。  
收稿日期:  
2020-01-11 收到初稿,  
2020-03-09 收到修订稿。

Roell Z100w万能试样机上进行, 试样标距为50 mm, 拉伸速度为1 mm/min, 每种成分的合金至少进行6次拉伸试验。用于显微组织观察和导热性能测试的样品通过线切割从铸件中获得, 样品的切割位置如图1中的B处的圆圈所示。采用装配有EDS的扫描电子显微镜 (SEM, Phenom XL) 对合金的微观组织及成分进行表征。采用装配有铜靶的X射线衍射仪 (XRD, Ultima IV) 分析合金中的相组成, 加速电压为20 kV, 扫描角度的范围为 $10^{\circ} \sim 100^{\circ}$ , 扫描速度为 $1^{\circ}/\text{min}$ 。采用透射电子显微镜 (TEM, 2100F) 对合金的微观组织进行表征。

用于导热系数测试的样品为圆盘状试样, 试样的直径为12.7 mm, 厚度为2.5 mm。通过激光脉冲法, 采用Netzsch LFA 447导热仪测试了合金在 $25^{\circ}\text{C}$ 下的导热扩散系数, 每种成分的合金至少测试四个样品, 每个样品至少测量三个不同位置的热扩散系数。为了提高样品对激光脉冲的吸收能力, 样品在测试前被涂上一层石墨。合金的密度通过装配有密度计 (YDK03P) 的分析天平 (Sartorius Quintix124-1CN), 基于阿基米德法测量得到。合金的比热容根据Neumann-Kopp定律<sup>[14-15]</sup>计算得到, 其中合金比热容的计算见式 (1)。

$$C_p(T) = \sum C_{p,i}(T) x_i \quad (1)$$

式中,  $C_p$ 为合金的热导率,  $C_{p,i}(T)$ 为合金中各元素的定压比热容,  $x_i$ 为该元素在合金中的质量分数。本研究中所用到的各元素的比热容与温度的计算见式 (2) - (4)<sup>[16]</sup>。

$$C_p(\text{Al}) = 0.67 + 5.90 \times 10^{-4}T \quad (2)$$

$$C_p(\text{Ce}) = 0.16 + 0.98 \times 10^{-4}T \quad (3)$$

$$C_p(\text{Mg}) = 0.89 + 4.58 \times 10^{-4}T \quad (4)$$

将以上公式带入到公式 (1) 中即可计算得到合金的比热容。合金热导率按式 (5) 计算。

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (5)$$

式中:  $\lambda$  为合金的热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $\alpha$  为合金的热扩散系数,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $C_p$ 为合金的比热容,  $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ;  $\rho$  为合金的密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 显微组织

图3是不同Mg含量压铸Al-8Ce-xMg合金的SEM图像。从中可以看出, 随着Mg含量的增加, 合金的显微组织没有明显变化, 合金主要由 $\alpha$ -Al初生相和Al-Ce共晶组织组成。初生 $\alpha$ -Al基体为枝晶状形态, 而层片状的共晶相则呈网状分布在枝晶间的区域。由于Al-8Ce合金为亚共晶合金, 在凝固过程中首先析出初生 $\alpha$ -Al相, 而且Ce在Al中的固溶度可以忽略不计, 在 $\alpha$ -Al的形核及长大过程中, 合金熔液中的Ce原子被不断地

排出, 熔液中Ce原子的浓度增加, 在界面前沿形成成分梯度, 造成界面偏析, 导致初生的 $\alpha$ -Al以枝晶的形态进行生长。随着 $\alpha$ -Al初晶的长大, 合金成分达到共晶点, 开始发生共晶反应, 此时Al与Al-Ce金属间化合物从熔液中析出并长大, 形成层片状的共晶相。结合合金的XRD图谱 (图4) 可以确定, 合金中的共晶相为Al-Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>, 在合金的SEM图像中, 白色的组织为Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>金属间化合物, 灰色的组织为Al基体。

图4是不同Mg含量压铸Al-8Ce-xMg合金的XRD图谱, 从中可以看出, 随着Mg含量的增加, 合金的相

表1 试验合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of experimental alloys /%

合金	Ce		Mg		Al
	质量分数	原子分数	质量分数	原子分数	
Al-8Ce	8.24	1.70	0	0	余量
Al-8Ce-0.10Mg	8.04	1.66	0.12	0.14	余量
Al-8Ce-0.25Mg	8.59	1.78	0.27	0.33	余量
Al-8Ce-0.50Mg	8.37	1.73	0.52	0.63	余量
Al-8Ce-0.75Mg	8.30	1.71	0.69	0.83	余量

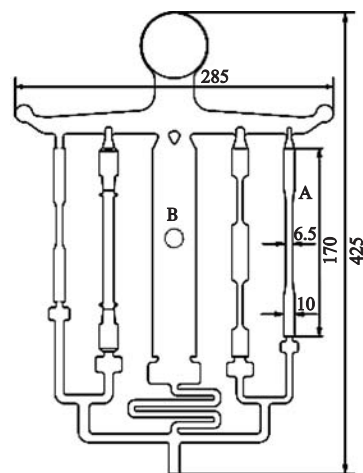


图1 压铸件的示意图

Fig. 1 Diagram of the casting

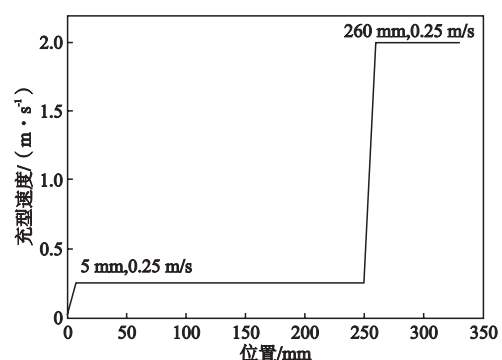


图2 压铸过程中的充型速度及变换位置

Fig. 2 Filling speed and transformation location during die casting

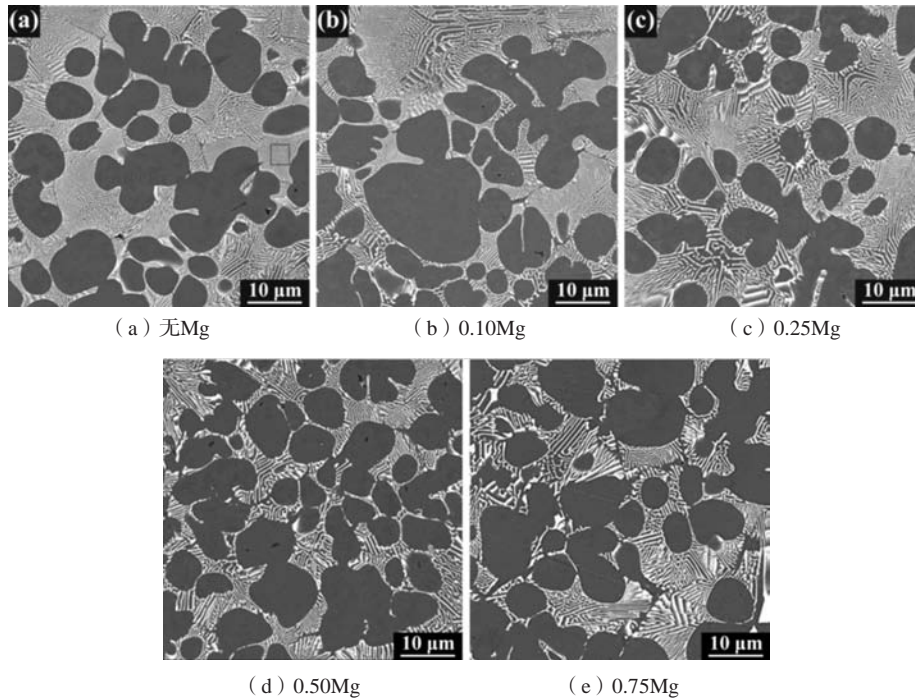


图3 压铸Al-8Ce-xMg合金的SEM图像

Fig. 3 SEM images of die cast Al-8Ce-xMg alloys with varying Mg content

组成保持不变, 主要由 $\alpha$ -Al和 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 金属间化合物组成, 虽然在XRD试验过程中的扫描速度低至 $1^\circ/\text{min}$ , 但仍然没有检测到含Mg的第二相生成。随着Mg含量的增加,  $\alpha$ -Al和 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 衍射峰的强度和宽度都没有发生明显的变化, 这就表明, Mg元素的添加不会改变合金中 $\alpha$ -Al和 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 的体积分数及合金的晶粒大小。从以上结果可以得出, Mg原子的添加不会改变压铸Al-8Ce合金的微观组织形貌及相组成。

图5所示为Al-8Ce-0.75Mg合金的TEM明场像照片。右上角为 $\alpha$ -Al基体[110]晶带轴的选区电子衍射花样, 从中可以发现, 基体中观察不到任何弥散相或析出相的存在。表2是通过EDS对合金中 $\alpha$ -Al基体中多个位置的点分析结果, 从中可以看出, 基体中的Mg含量与表1所示的合金实际成分非常接近。结合压铸Al-8Ce-xMg合金的SEM图像、EDS成分检测结果、XRD衍射图谱和TEM明场像照片可以确定在压铸Al-8Ce-xMg合金中Mg原子以固溶态的形式存在于Al基体中, 且合金中没有含Mg的第二相生成。

## 2.2 力学性能

图6所示为压铸Al-8Ce-xMg合金的室温拉伸试验结果, 从中可以看出合金的屈服强度和抗拉强度随着Mg含量的增加而增加, 而伸长率则随着Mg含量的增加而降低。具体来说, 当合金中的Mg含量从0增加至0.75wt.%时, 合金的屈服强度从92 MPa增加至115 MPa, 抗拉强度从177 MPa增加至231 MPa, 而伸长率从28.3%降低至7.9%。

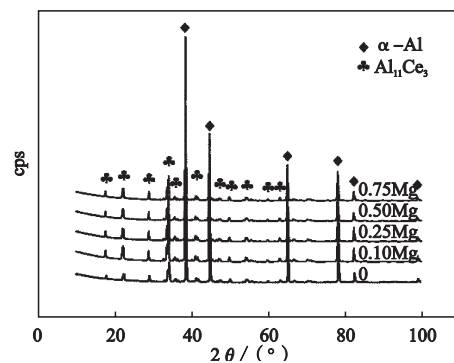
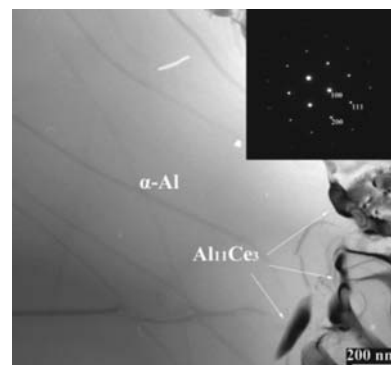


图4 压铸Al-8Ce-xMg合金的XRD图谱

Fig. 4 XRD patterns of die cast Al-8Ce-xMg alloys with varying Mg content

图5 压铸Al-8Ce-0.75Mg合金的TEM明场像及 $\alpha$ -Al基体[110]晶带轴的选区电子衍射花样Fig. 5 TEM bright-field image and selected-area electron diffraction pattern of  $\alpha$ -Al matrix [110] zone axis in HPDC Al-8Ce-0.75Mg alloy

结合合金的微观组织可以发现, Mg原子在Al基体中的固溶所产生的固溶强化效果是合金强度提高的主要原因, 同时Mg原子的固溶也会增加晶粒内部的位错塞积程度, 在合金变形过程中产生强烈的加工硬化效应导致合金的断裂, 从而降低合金的塑性<sup>[17]</sup>, 这也是合金伸长率下降的主要原因。总的来说, 当合金中的Mg含量为0.50wt.%时, 合金表现出较优的强韧性, 此时合金的屈服强度和抗拉强度分别为112.8 MPa和225.0 MPa, 伸长率为10.3%。

### 2.3 导热性能

图7为压铸Al-8Ce-xMg合金在25℃下的热导率测试结果, 从中可以看出, 合金的热导率随着合金基体中Mg含量的增加而降低。Al-8Ce合金的热导率只有170 W/(m·K), 远低于纯Al的213 W/(m·K)<sup>[18]</sup>。对于Al-8Ce-xMg合金来说, 随着基体中的Mg含量从0增加到0.75wt.%, 合金的热导率线性地从170 W/(m·K)减小到了148 W/(m·K), 下降了12.9%。合金的热导率随着基体中固溶原子含量的增加而线性下降, 这一结果与Chen等人的研究结果相吻合, 铝合金的热导率随着基体中固溶Si含量的增加而线性减小<sup>[17-18]</sup>。

铝合金的热导率主要由合金中电子的热传导和晶格的热传导共同决定。但在常温下, 电子的热传导起主导作用, 晶格的热传导起次要作用<sup>[19]</sup>。在本研究中, 由于Mg原子固溶到Al基体中形成置换固溶体<sup>[20-22]</sup>, 而且Mg的原子半径要大于Al的原子半径。所以, Mg原子的固溶会导致Al基体的晶格中产生点阵畸变, 破坏了原子排列的周期性, 这对于合金中电子的自由运动起着阻碍作用, 因此电子的热传导能力降低, 合金的热导率下降。通过线性拟合可以获得压铸Al-8Ce-xMg合金的热导率与Mg含量的定量函数关系。可以发现, 拟合得到的直线与试验的测量结果非常接近, 拟合的标方差小于1。拟合得到的直线斜率为-26.5, 这也就意味着合金中固溶Mg原子的含量每增加1at.%, 合金的热导率将会下降26.5 W/(m·K)。对于本研究所制备的Al-8Ce-xMg合金, 合金的热导率可以通过方程定量计算得到, 计算的方程式见式(6)。

$$\lambda = \lambda_B - 26.5C_C \quad (6)$$

式中,  $\lambda_B$ 为基础合金Al-8Ce的热导率, 其值为169.9 W/(m·K),  $C_C$ 为合金基体中固溶Mg的含量, at.%。

#### 参考文献:

- [1] MALLICK P K. Joining for lightweight vehicles [C]// Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicles. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd, 2010: 275-308.
- [2] TAKAHASHI K, KUWAHARA H, KAWASAKI N, et al. Enhancement of thermal contact conductance between metal surfaces in an induction motor [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2001, 8: 201-213.

表2 压铸Al-8Ce-xMg合金  $\alpha$ -Al基体的Mg含量  
Table 2 Mg content in primary  $\alpha$ -Al matrix of die cast Al-8Ce-xMg alloys with varying Mg content  $w_B/\%$

无Mg	0.10Mg	0.25Mg	0.50Mg	0.75Mg
0	0.097	0.217	0.503	0.719

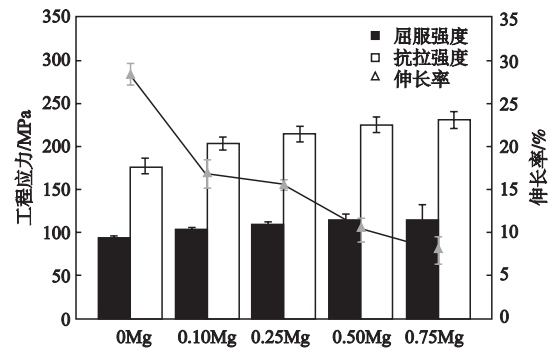


图6 压铸Al-8Ce-xMg合金的力学性能  
Fig. 6 Mechanical properties of HPDC Al-8Ce-xMg alloys with varying Mg content

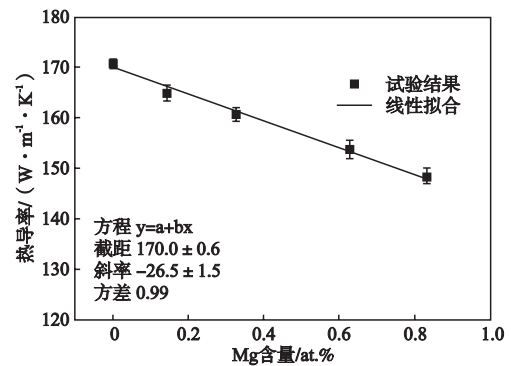


图7 压铸Al-8Ce-xMg合金的热导率  
Fig. 7 Thermal conductivity of HPDC Al-8Ce-xMg alloys with varying Mg content

## 3 结论

(1) 压铸Al-8Ce-xMg合金主要由 $\alpha$ -Al初生相和Al-Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>共晶相组成,  $\alpha$ -Al初生相以枝晶状存在, Al-Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>共晶相以层片状分布在枝晶间的区域。

(2) Mg在压铸Al-8Ce-xMg合金中以固溶态存在, 合金中没有含Mg的第二相生成, 且Mg元素的添加不会影响合金微观组织的形貌及相组成。

(3) 当合金中的Mg含量为0.5wt%时合金具有较优异的综合性能, 其屈服强度为112.8 MPa, 抗拉强度为225.0 MPa, 伸长率为10.3%, 热导率为153.7 W/(m·K)。

- [3] LUO A A, SACHDEV A K, POWELL B R. Advanced casting technologies for lightweight automotive applications [J]. China Foundry, 2010, 7: 463-469.
- [4] 毛文龙, 周海涛, 王顺成, 等. Sr变质对Al-Si-Mg合金的流动性、力学性能和导热系数的影响 [J]. 铸造, 2017, 66 (2): 122-126.
- [5] 李林君. 高性能热传导6063铝合金材料的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2105.
- [6] 张建新, 高爱华. 热处理工艺对Al-Mg-Si系合金导热性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (10): 911-913.
- [7] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 366-370.
- [8] CINGI C, RAUTA V, SUIKKANEN E, et al. Effect of heat treatment on thermal conductivity of aluminum die casting alloys [J]. Advanced Materials Research, 2012, 538-541: 2047-2052.
- [9] OLAFSSON P, SANDSTROM R, KARLSSON A. Comparison of experimental, calculated and observed values for electrical and thermal conductivity of aluminum alloys [J]. Journal Of Materials Science & Technology, 1997, 32: 4383-4390.
- [10] SIMS Z C, WEISS D, MCCALL S K, et al. Intermetallic-strengthened aluminum casting alloy: high-volume co-product development [J]. JOM, 2016, 68: 1940-1947.
- [11] MAO Z, SEIDMAN D N, WOLVERTON C. First-principles phase stability, magnetic properties and solubility in aluminum-rare-earth (Al-RE) alloys and compounds [J]. Acta Materialia, 2001, 59: 3659-3666.
- [12] MASSALSKI T B. Binary Alloy Phase Diagrams [M]. Ohio: ASM International, 1992.
- [13] ROKHLIN L L, BOCHVAR N R, DOBATKINA T V, et al. Effect of cerium and yttrium on aging processes in alloys of the Al-Mg system [J]. Metally, 2003, 1: 102-108.
- [14] RUDAJEVOVA A, BUCH M, MORDIKE B L. Thermal diffusivity and thermal conductivity of MgSc alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 1999, 292: 27-30.
- [15] RUDAJEVOVA A, LUKAC P. Comparison of the thermal properties of AM20 and AS21 magnesium alloys [J]. Material Science and Engineering A, 2005, 397: 16-21.
- [16] TOULOUKIAN Y S, BUYCO E H. Thermophysical properties of matter: specific heat of metallic elements and alloys [M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [17] EMBURY J D, POOLE W J, LLOYD D J. The work hardening of single phase and multi-phase aluminum alloys [J]. Materials Science Forum, 2006, 519: 71-78.
- [18] CHEN J K, HUNG H Y, WANG F, et al. Thermal and electrical conductivity in Al-Si/Cu/Fe/Mg binary and ternary Al alloys [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2015, 50: 5630-5639.
- [19] POLLOCK D D. Physics of engineering materials [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990.
- [20] HENSHALL G A, MILLER A K. The influence of solutes on flow stress plateaus, with emphasis on back stresses and the development of unified constitutive equations [J]. Acta Metallurgica, 1989, 37: 2693-2704.
- [21] SAFARI J, CHERMAHINI M D, AKBARI G H. The effect of Mg content on microstructure and mechanical properties of Al-xMg/5Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite prepared by mechanical alloying [J]. Powder Technology, 2013, 234: 7-12.
- [22] SHANG H L, MA B Y, SHI K C, et al. The strengthening effect of boron interstitial supersaturated solid solution on aluminum films [J]. Material Letter, 2017, 192: 104-106.

## Effects of Mg on Microstructure and Properties of Al-8Ce Die Casting Alloy

QUAN Bei-bei, LI De-jiang, ZENG Xiao-qin, XU Jiang-kun

(National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

### Abstract:

The effects of Mg on the microstructure, mechanical properties and thermal conductivity of Al-8Ce die casting alloy were studied by scanning electron microscopy, X-ray diffraction, transmission electron microscope and flash thermal conductivity meter. The results indicate that the alloy consists of primary  $\alpha$ -Al and Al-Al<sub>1</sub>Ce<sub>3</sub> eutectic phase, and Mg atoms exist in the solid-solution phase without any Mg-contained second phase detected and the addition of Mg barely has influence on the microstructure and phase constituents of the alloy. The yield strength and ultimate tensile strength of the alloy increase with the Mg content, whereas the elongation and thermal conductivity of the alloy decrease with the Mg content. The experiment results also reveal that the HPDC Al-8Ce-0.50Mg has more excellent comprehensive properties, with the yield strength, ultimate tensile strength, elongation and thermal conductivity being 112.8 MPa, 225.0 MPa, 10.3% and 153.7 W/(m·K), respectively.

### Key words:

die casting; Al-Ce alloy; microstructure; mechanical properties; thermal conductivity