

Al-Si-Mg-Y 合金消失模铸造振动压力凝固的组织与性能

赵 忠, 樊自田, 成 平, 蒋文明, 董选普

(华中科技大学 材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 应用消失模铸造振动压力凝固成形技术制备了 Al-7Si-0.8Mg-0.3Y(ASMY)合金。通过 SEM、XRD、DSC 和 TEM 等测试方法对其铸态和 T6 组织进行分析, 研究其对力学性能的影响。结果表明: 在 ASMY 合金铸态组织的晶界处生成有少量 Al_3Y 短棒状颗粒相; 在 T6 热处理过程中, 稀土 Y 或 Al_3Y 阻碍 Mg_2Si 相的析出和扩散聚集, 使析出相 Mg_2Si 呈弥散分布; Mg_2Si 相与晶界稳定相 Al_3Y 对合金同时起到钉扎强化作用; 采用消失模铸造振动压力凝固技术后, 铝合金的孔隙率显著降低, 从 1.1%降低 0.18%; ASMY 合金消失模铸造振动压力凝固试样 T6 态的抗拉强度达到 308 MPa, 比 A356 普通消失模试样 T6 态的抗拉强度提高 29%。

关键词: Al-Si-Mg-Y 合金; 消失模铸造; 振动压力; 组织; 性能

中图分类号: TG292

文献标志码: A

Microstructures and properties of Al-Si-Mg-Y alloy with vibration-pressure solidification in lost form casting

ZHAO Zhong, FAN Zi-tian, CHENG Ping, JIANG Wen-ming, TONG Xuan-pu

(State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Al-7Si-0.8Mg-0.3Y (ASMY) alloy was produced with vibration-pressure solidification in lost foam casting (LFC). The microstructure and mechanical properties of the as-cast and T6 heat treatment ASMY alloys were investigated by SEM, XRD, DSC and TEM. The results indicate that a small amount of short rod-like Al_3Y particle generates at the grain boundary of the as-cast ASMY alloy. In the T6 heat treatment process, the rare-earth Y or Al_3Y has a certain inhibition for the precipitation and aggregation of Mg_2Si phase, which leads to the dispersive distribution of precipitated Mg_2Si phase. Both Mg_2Si phase and Al_3Y stable phase in the grain boundary play an important role in pinning dislocations. The porosities of aluminium alloy by vibration-pressure solidification in LFC are reduced obviously from 1.1% to 0.18%. After T6 heat treatment, the ultimate tensile strength of ASMY alloy by vibration-pressure solidification in LFC reaches 308 MPa, and it is increased by 29% compared with that of A356 alloy by conventional LFC.

Key words: Al-Si-Mg-Y alloy; lost foam casting (LFC); vibration-pressure; microstructure; mechanical property

A356 铝合金具有良好的铸造流动性、抗热裂性、较小的收缩性以及良好的抗腐蚀性等优点, 成为应用最多的消失模铸造铝合金^[1-2]。然而, 限制 A356 铝合金消失模铸造技术广泛应用的最主要的问题是其力学性能较低、针孔较多等。

为了提高 A356 铝合金消失模铸件的力学性能, 现在主要采用的方法有变质共晶硅、细化 α 晶粒、增加强化相和热处理等^[3-4]。较成熟的工艺有加 Na、Sr 等变质细化共晶硅, 加 Ti、B 等细化 $\alpha(Al)$ 晶粒。另外, 采用振动等物理改性方法也能减少 $\alpha(Al)$ 枝晶数量, 细

化晶粒^[5]。研究表明^[6], 将振动技术应用到消失模铸造中对枝晶有明显的细化效果。为了降低 A356 铝合金消失模铸造中的针孔、缩孔, 提高铸件致密性, 采用的方法主要有精炼除气、冒口补缩和采用压力凝固^[2, 7]等。目前, 在消失模铸造工艺中, 叠加振动场和压力场, 能够在细化晶粒的同时显著降低针孔, 该技术在一定程度上提高了铝合金消失模铸件的性能。

对 A356 铝合金进行 T6 热处理时, 其强化机理主要是时效析出强化相 Mg_2Si 。另外, 通过加入稀土元素对 A356 铝合金进行变质强化, 也是提高性能的有效手段^[8]。研究认为^[9-12], 铝合金中加入少量稀土元素 Y, 可生成 Al-Y 稀土化合物, 起强化作用。因此, 本文作者在 A356 合金的基础上, 适当增加 Mg 元素含量, 同时添加少量稀土元素 Y, 并改进消失模铸造工艺, 在合金凝固过程中叠加振动场和压力场, 旨在提高铝合金消失模铸件的力学性能。

1 实验

实验采用消失模铸造振动压力凝固技术, 装置示意图如图 1 所示。可发性聚苯乙烯(EPS)模件的密度为 20 mg/cm^3 上涂料烘干后放入砂箱中, 填入干燥石英砂紧实、覆盖塑料薄膜、开真空阀抽真空(真空压力为 -30 kPa)、合砂箱盖后进行振动(振动频率 50 Hz , 振幅 0.23 mm)。铝合金按规范方法熔化并采用 Sr 变质, 氩气精炼除气, $750\text{ }^\circ\text{C}$ 时从导入杯浇注, 浇注结束后, 迅速关闭密封阀及真空阀, 以 5 kPa/s 的加压速率从加压口加入空气, 待箱内压力达 0.8 MPa 后开始保压, 10 min 后开真空阀泄压并停止振动, 之后取出铸件。

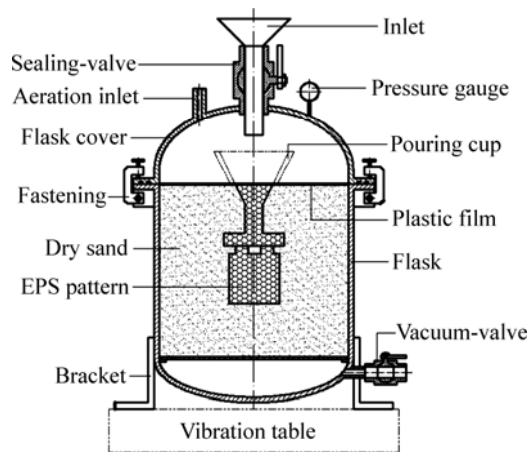


图 1 消失模铸造振动压力凝固试验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of vibration-pressure solidification in LFC

实验用 A356 合金与制备的 Al-7Si-0.8Mg-0.3Y(ASMY)合金的化学成分如表 1 所列。

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of alloys in experiment (mass fraction, %)

Alloy	Si	Mg	Ti	Sr	Y	Fe	Al
A356	7.10	0.31	0.23	0.046	0.00	0.17	Bal.
ASMY	7.09	0.82	0.21	0.047	0.278	0.19	Bal.

将成形的直径为 10 mm 的标准铸造试棒, 在 Instron-810 万能试验机上测试室温力学性能, 拉伸速率为 3 mm/min , 每组测试 3 根试棒, 取平均值。金相试样用 $0.5\%\text{ HF}$ 水溶液腐蚀, 显微组织观察采用 MDS 型光学显微镜和 FEI-Quanta 200 环境扫描电子显微镜(SEM)。合金组成相分析采用 X'Pert Pro X 射线衍射仪(XRD)和微区成分分析(EDS)相结合的方法。相变温度采用 PERKIN ELMER DSC7 型差示扫描量热仪(DSC)分析。将薄膜样品电解双喷减薄, 在 Tecnai-G2-20 透射电镜(TEM)上进行时效析出相微观组织的分析。

2 结果与分析

2.1 铸态的显微组织

图 2 所示为 A356 和 ASMY 合金消失模振动压力

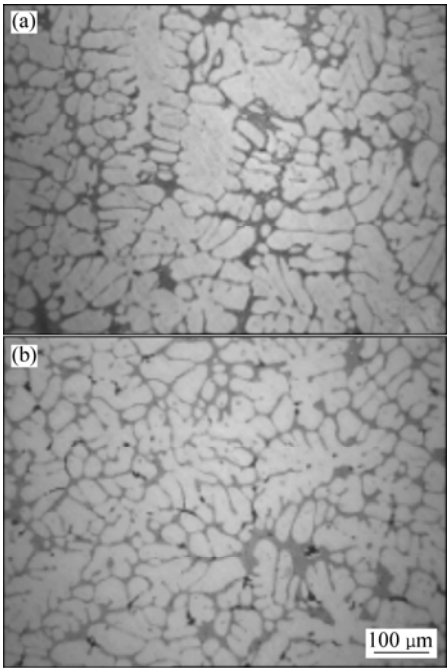


图 2 A356 和 ASMY 合金消失模铸造振动压力凝固的显微组织

Fig.2 Microstructures of A356 (a) and ASMY (b) alloys with vibration-pressure solidification in LFC

凝固的金相组织。由图2可知,两种合金的组织特征相似,基体主要由等轴晶或枝晶 $\alpha(\text{Al})$ 组成,且ASMY的 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒比A356的细小。

A356和ASMY铸态组织的XRD谱如图3所示。从图3(a)可以看出,A356合金主要由Al、Si以及 Mg_2Si 相组成;从图3(b)可以看出,ASMY合金中除含Al、Si以及 Mg_2Si 相以外,还出现了少量新相 Al_3Y 。另外,ASMY合金中 Mg_2Si 相的衍射峰强度明显比A356合金中 Mg_2Si 相的强,表明合金中 Mg_2Si 相的量较多。从图2中也可观察到ASMY合金中晶间的黑色针状 Mg_2Si 相明显比A356合金中的多。

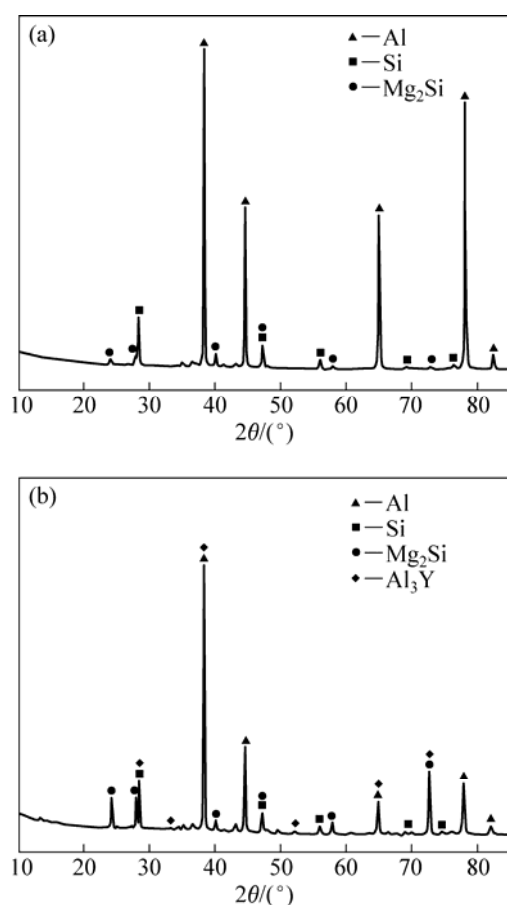


图3 铸态A356与ASMY合金的XRD谱

Fig.3 XRD patterns of as-cast A356 and ASMY alloys: (a) A356 alloy; (b) ASMY alloy

ASMY合金铸态组织的SEM像如图4所示。图4中A区是 $\alpha(\text{Al})$ 基体。对图4中B、C和D相进行标点测试,对物相的成分进行EDS能谱分析,结果如图5、6和7所示。

通过对能谱峰值和各元素含量分析可知,图5中B相是 Mg_2Si ,在铸态组织中,呈骨骼汉字形状,割

裂基体,降低合金性能。图6中的C相是Al-Si共晶相,由于Sr变质,该相呈片层状或颗粒状。图7中的D相是 Al_3Y 相,呈圆柱状或短棒状颗粒,分布在晶界处。从Y和Al相图分析^[13],在富Y区域,Y很容易和Al形成金属间化合物 Al_3Y ,这种化合物常常存在于晶界,起钉扎作用,阻碍位错通过^[9,11],合金的抗变形能力增强。

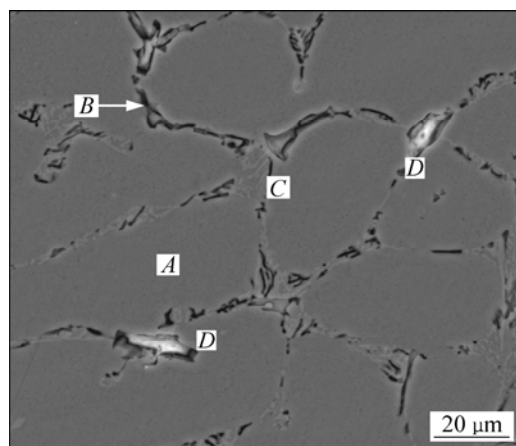


图4 ASMY合金铸态组织的SEM像

Fig.4 SEM image of as-cast ASMY alloy

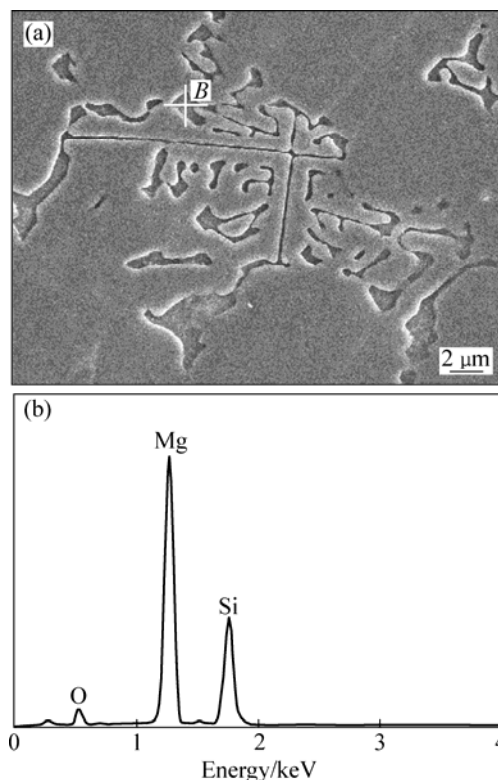


图5 ASMY合金中B点的SEM像及EDS谱

Fig.5 SEM image (a) and EDS spectrum (b) of point B in ASMY alloy

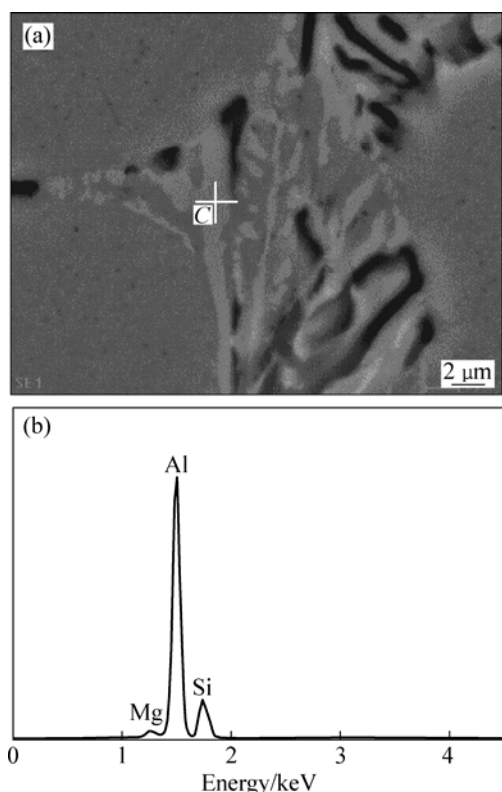


图 6 ASMY 合金中 C 点的 SEM 像及 EDS 谱

Fig.6 SEM image (a) and EDS spectrum (b) of point C in ASMY alloy

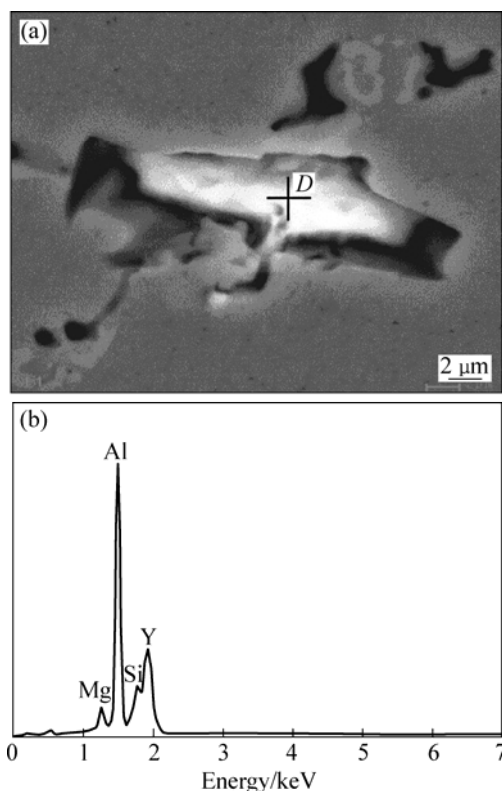


图 7 ASMY 合金中 D 点的 SEM 像及 EDS 谱

Fig.7 SEM image (a) and EDS spectrum (b) of point D in ASMY alloy

2.2 合金的力学性能

在不同铸造工艺下 A356 和 ASMY 两种合金的力学性能如表 2 所列。其中 T6 热处理工艺采用 538 °C 保温 12 h, 80 °C 温水淬火的固溶处理后, 再进行 200 °C 保温 6 h 的时效处理。

由表 2 可知, 在相同的工艺下, ASMY 合金铸态下的抗拉强度比 A356 合金的略有提高, 而伸长率的变化不大。经过 T6 热处理后, ASMY 合金的抗拉强度比 A356 合金的显著提高。对比表 2 中 3 种不同铸造工艺, 发现消失模铸造振动压力凝固工艺成形合金的力学性能明显优于普通消失模铸造的, 其性能接近金属型铸造性能。其中, 消失模铸造振动压力凝固工艺下的 ASMY 合金试样, T6 热处理后的抗拉强度达到 308MPa, 比普通消失模铸造下 A356 合金的强度 (239 MPa) 提高了 29%。ASMY 和 A356 合金的硬度变化趋势与抗拉强度的基本一致。A356 和 ASMY 合金抗拉强度的变化趋势如图 8 所示。

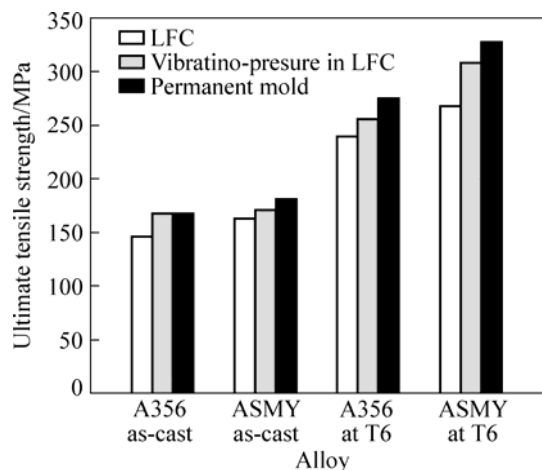


图 8 不同铸造方法下 A356 和 ASMY 合金的抗拉强度

Fig.8 Ultimate tensile strength of A356 and ASMY alloys in different casting processes

3 讨论

3.1 工艺分析

消失模铸造振动压力凝固技术是利用振动细化晶粒, 利用压力降低针孔, 增加补缩的原理, 将振动场和压力场叠加至普通消失模铸造工艺中的一种成形方法。从图 9 中显示的不同铸造工艺条件下 ASMY 合金和 A356 合金的断面孔隙率分析, 消失模铸造振动压力凝固成形试样的孔隙率明显低于普通消失模铸造试样的, 平均孔隙率从普通消失模铸造试样的 1.1%, 下

表 2 不同铸造工艺下 A356 和 ASMY 合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of A356 and ASMY alloys in different cast processes

Alloy	Cast process	As-cast			T6 heat treatment		
		σ_b /MPa	δ_5 /%	HB	σ_b /MPa	δ_5 /%	HB
A356	LFC	146	4.1	50	239	1.8	93
	Vibration-pressure in LFC	167	5.4	55	256	2.0	97
	Permanent mold	168	6.2	56	275	2.1	101
ASMY	LFC	163	3.2	54	268	1.7	101
	Vibration-pressure in LFC	171	4.5	56	308	2.0	105
	Permanent mold	181	6.0	60	327	2.0	107

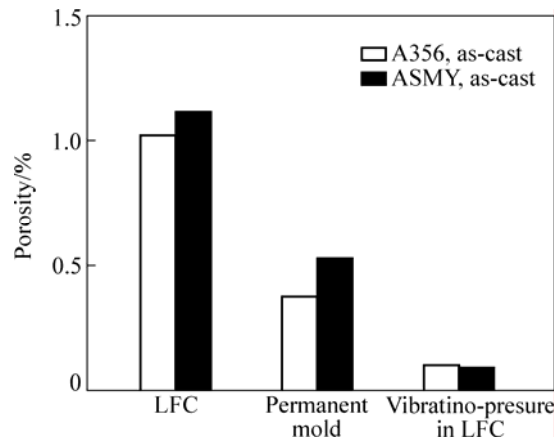


图 9 不同铸造方法处理的铸造态合金的孔隙率

Fig.9 Porosities of A356 and ASMY alloys cast by different processes

降到 0.18%，显著提高铸件致密性，减小因为孔洞造成的应力集中，有效提高合金的抗拉强度。

3.2 铸态组织分析

从图 2 中两种合金的铸态显微组织观察到，ASMY 合金组织中的 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒比 A356 合金中的细小。由于 Y 的原子半径(0.177 nm)比 Al 的原子半径(0.143 nm)大，且 Y 在 $\alpha(\text{Al})$ 中固溶度小于 0.03%，Y 主要富集在晶界，凝固过程中阻碍 $\alpha(\text{Al})$ 晶体的长大。此外，稀土 Y 是表面活性元素物质，降低固液界面张力，使晶粒的形核能下降，从而有效增加了形核^[9]。Hall-Petch 关系表明，减少晶粒尺寸可使合金强度提高。另外，ASMY 合金晶界少量棒状颗粒的 Al_3Y 起到钉扎晶界的作用，阻碍了合金的变形，提高了 ASMY 合金的强度。

3.3 合金的时效分析

通过 T6 热处理后，Al-Si-Mg 系合金时效析出 Mg_2Si 强化相。图 10 所示为 A356 合金和 ASMY 合金

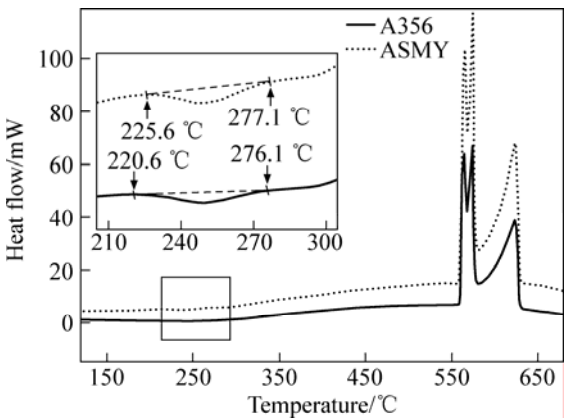
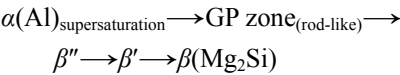


图 10 A356 和 ASMY 合金的 DSC 曲线

Fig.10 DSC curves of A356 and ASMY alloys

的 DSC 差示扫描量热分析曲线，加热速率为 10 K/min。由图 10 可知，在 220~270 °C 间有一个放热峰，为时效析出相变峰，ASMY 合金的析出相变开始温度比 A356 合金的略高，说明 ASMY 合金中的 Y 对 β 相的析出有一定阻碍作用。Al-Si-Mg 系合金的时效转变过程为^[14]：



Al-Si-Mg 系合金经固溶处理后，Mg 和 Si 溶于 $\alpha(\text{Al})$ 中形成过饱和固溶体，在 200 °C 时效过程中，Mg 和 Si 聚集开始形成 GP 区，并迅速沿基体 [100] 方向伸长，演变成针状 β'' 相^[4]。随着时效时间的延长， β'' 相逐步转变为 β' 相和 β 相，所以在 A356 和 ASMY 合金的 TEM 像中(见图 11 和 12)，观察不到 GP 区和 β'' 相。 β' 相为立方晶系， $a=0.642 \text{ nm}$ ，与基体的位相关系如下^[4]：

$$(001)_{\beta'} // (100)_{\alpha}, [100]_{\beta'} // [011]_{\alpha}$$

而文献[15]认为， β 相与基体的位相关系如下：

$$(100)_{\beta} // (100)_{\alpha}, [110]_{\beta} // [001]_{\alpha}$$

因此，从衍射花样 [001] 晶带(见图 11(b))分析可

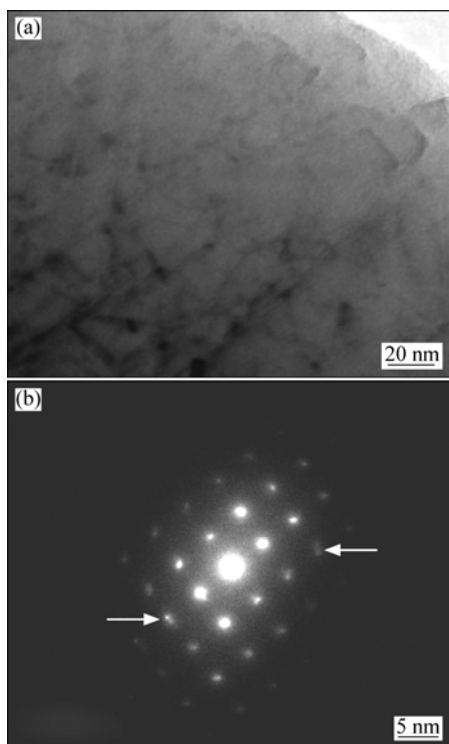


图 11 T6 态 A356 合金的 TEM 像和[001]晶带的选区衍射花样

Fig.11 TEM image of A356 alloy and diffraction pattern of [001] at T6 heat treatment

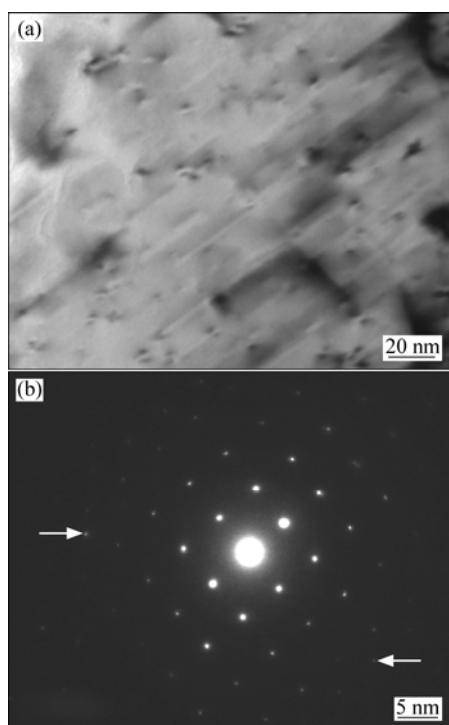


图 12 T6 态 ASMY 合金的 TEM 像和[001]晶带的选区衍射花样

Fig.12 TEM image of ASMY alloy and diffraction pattern of [001] at T6 heat treatment

知,合金中存在与基体半共格关系的 β' 相和稳定相 β 。

Al_3Y 金属间化合物具有六方结构,晶格常数为 $a=0.629\text{ nm}$, $b=0.458\text{ nm}$,熔点为 $980\text{ }^\circ\text{C}$ ^[13],形状为细小的柱状或短棒状,主要分布在 ASMY 合金晶界,在热处理过程中几乎不能固溶,所以稀土 Y 含量超过一定阈值时,对合金力学性能反而不利。从 TEM 图中显示,ASMY 合金中析出相(β)的体积分数明显大于 A356 合金中析出相的,这是由于 ASMY 合金中 Mg 元素含量较多。而 ASMY 合金中析出相(β)多为弥散颗粒状,这是由于稀土 Y 或 Al_3Y 对 Mg_2Si 的析出与聚集长大有一定的抑制作用,从而使析出 β 相的分布弥散均匀,减弱其对基体的割裂作用。弥散 β 相与晶界的细小棒状 Al_3Y 相阻碍了变形过程中位错的运动,从而提高了合金的强度。

4 结论

1) ASMY 合金的铸态组织主要由 $\alpha(\text{Al})$ 基体、共晶 Si、 Mg_2Si 相和分布在晶界稀土金属间化合物 Al_3Y 组成。稀土元素 Y 富集在晶界上,凝固过程中阻碍 $\alpha(\text{Al})$ 晶体的长大,有细化晶粒的作用。

2) ASMY 合金经过 T6 热处理后,弥散析出的强化相 Mg_2Si 的量明显大于 A356 合金中的; Mg_2Si 与晶界少量 Al_3Y 颗粒相对基体起钉扎作用,阻碍变形时位错的通过,起强化作用。稀土 Y 使 ASMY 合金的析出相变温度提高,并对 Mg_2Si 的析出具有一定的阻碍作用,从而使 Mg_2Si 相析出更细小、分布更均匀。

3) 采用消失模铸造振动压力凝固技术制备的 ASMY 铸件的孔隙率明显低于普通消失模铸造的 A356 铝合金的,试样的孔隙率从 1.1%下降到 0.18%。消失模铸造振动压力凝固工艺下试样的性能接近金属型铸造试样的性能,而明显高于普通消失模铸造试样的性能。

REFERENCES

- [1] BROWN J R. The lost foam casting process[J]. Metals Mater, 1992(8): 550-555.
- [2] WANG Q G, JONES P, OSBORNE M. The effects of applied pressure during solidification on the microstructure and mechanical properties of lost foam A356 castings[J]. Advances in Aluminum Casting Technology II, 2002(10): 75-84.
- [3] MONDOLFO L F. Structures and properties of aluminum alloys[M]. London: Butterworths, 1979.
- [4] 耿浩然, 滕新营, 王 艳, 王桂青. 铸造铝合金和镁合金[M].

- 北京: 化学工业出版社, 2007.
- GENG Hao-ran, TENG Xin-ying, WANG Yan, WANG Gui-qing. Cast aluminum alloy and magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [5] CAMPBELL J. Effects of vibration during solidification[J]. *Int Met Rev*, 1981(2): 71–108.
- [6] 李继强, 樊自田, 王元庆, 董选普. 振动和合金化对消失模铸造 AZ91D 组织与性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(7): 1047–1053.
- LI Ji-qiang, FAN Zi-tian, WANG Yuan-qing, DONG Xuan-pu. Effects of vibration and alloying on microstructure and properties of AZ91D magnesium alloy via lost foam casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(7): 1047–1053.
- [7] 夏振佳, 李 峰. 加压对铝合金消失模铸造的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2000(4): 43–46.
- XIA Zhen-jia, LI Feng. Influence of applied pressure on lost foam casting for aluminum alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2000(4): 43–46.
- [8] 孙成伟, 张淑荣, 侯爱芹. 稀土在铝合金中的行为[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- SUN Cheng-wei, ZHANG Shu-rong, HOU Ai-qin. Behavior of rare earth in aluminum alloy[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1992.
- [9] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平. 钇对 2519 铝合金铸态组织的影响[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2005, 36(4): 544–548.
- LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping. Effect of yttrium on as-cast microstructure of 2519 aluminum alloy[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2005, 36(4): 544–548.
- [10] 金松哲, 冉 旭, 陈 华. 稀土钇对含 Zn 和 Mg 铸态铝合金相组成的影响[J]. *吉林工学院学报*, 1999, 20(2): 1–4.
- JIN Song-zhe, RAN Xu, CHEN Hua. Effect of yttrium on the phase constituents in Zn and Mg containing aluminium alloys[J]. *Journal of Jilin Institute of Technology*, 1999, 20(2): 1–4.
- [11] 王建华, 易丹青, 卢 斌, 刘 沙, 曹 昱. 钇对 2618 合金组织及性能的影响[J]. *中国稀土学报*, 2002, 20(2): 150–153.
- WANG Jian-hua, YI Dan-qing, LU Bin, LIU Sha, CAO Yu. Effect of Y on microstructure and properties of 2618 aluminum alloy[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2002, 20(2): 150–153.
- [12] 周守则, 潘复生, 丁培道. 钇对 2024 铝合金铸态组织的影响[J]. *中国稀土学报*, 1993, 11(3): 277–279.
- ZHOU Shou-ze, PAN Fu-sheng, DING Pei-dao. Effect of Y on as-cast microstructure of 2024 aluminum alloy[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 1993, 11(3): 277–279.
- [13] RAN Q S, LUKAS H L, EFFENBERG G, PETZOW J. A thermodynamic optimization of the Al-Y system [J]. *J Less-Common Met*, 1989, 146: 213–222.
- [14] 祝汉良, 郭景杰, 贾 均, 赵九洲, 李沛勇. 铸造 Al-Si-Mg 合金的时效特性及形变机制[J]. *中国有色金属学报*, 1997, 7(1): 143–146.
- ZHU Han-liang, GUO Jing-jie, JIA Jun, ZHAO Jiu-zhou, LI Pei-yong. Aging characteristics and deformation mechanisms of a cast Al-Si-Mg alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1997, 7(1): 143–146.
- [15] 李普超, 汪明朴, 孙孝华, 徐国富. Al-Mg-Si 合金的时效研究[J]. *中南工业大学学报: 自然科学版*, 1998, 29(3): 262–265.
- LI Pu-chao, WANG Ming-pu, SUN Xiao-hua, XU Guo-fu. Study of ageing of Al-Mg-Si alloys[J]. *Journal of Central South University of Technology: Science and Technology*, 1998, 29(3): 262–265.

(编辑 龙怀中)