

[文章编号] 1004- 0609(2002)04- 0769- 05

熔体温度处理对不同成分铝合金凝固组织和性能的影响^①

何树先^{1, 2}, 王 俊¹, 孙宝德¹, 周尧和¹

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030;

2. 中国科学院 上海硅酸盐研究所 高性能陶瓷和超微结构国家重点实验室, 上海 200050)

[摘 要] 运用熔体温度处理工艺, 研究了 A356 铝合金中 Cu、Fe、Mg 成分的变化对凝固组织及性能的影响。组织观察和性能测试结果表明, 熔体温度处理工艺能够明显抑制富 Cu、富 Mg、富 Fe 等金属间化合物相的析出, 改善和减小了富 Cu、富 Mg、富 Fe 相析出形貌和尺寸, 显著地提高合金力学性能。用团簇理论分析和解释了有关的实验现象和结果。

[关键词] A356 铝合金; 熔体温度处理; 合金成分; 凝固组织; 原子团簇

[中图分类号] TG 113.1

[文献标识码] A

随着凝固技术和团簇学的发展, 人们越来越关注熔体的结构对最终凝固组织的影响^[1]。对凝固过程的研究逐步延伸到凝固开始前的液态金属结构对凝固组织的影响^[2~6]。

混合法熔体温度处理细化金属组织的方法是由前苏联科学家在 20 世纪 60 年代提出的, 但由于人们没有给予足够的重视, 致使该研究没有得到进一步的发展。随着人们对生态环境保护的日益重视, 生产中一直沿用添加细化剂细化金属组织的化学方法的弊端受到关注^[7], 为此人们开始致力于寻求一种工艺更简单、成本更低廉、对环境的影响更小的生产工艺进行铝合金组织细化来提高铝合金铸件力学性能。20 世纪 90 年代初, 日本学者 Ohmi 等^[8~11]和西北工业大学^[12]相继开展了混合熔体法细化过共晶 Al-Si 合金初生 Si 的研究, 细化效果比较显著。但对于生产中广泛应用的亚共晶 Al-Si 合金尚无研究报道。基于此, 作者根据混合熔体法温度处理的原理对亚共晶铝合金进行了系统的研究, 曾运用熔体温度处理工艺研究了冷却速度对亚共晶 A319 铝合金凝固组织及性能的影响^[13]。本文中作者重点报道 A356 铝合金成分变化对混合法熔体温度处理细化凝固组织及性能的影响。

1 实验方法

1.1 合金配制

选择工业材料亚共晶 A356 铝合金作为实验原

材料, 改变合金成分 Cu、Fe 和 Mg 的含量, 具体方法如下: 首先向 A356 铝合金中添加适量纯铝, 以减少合金中 Cu、Fe、Mg 的含量, 配成母合金; 然后向母合金中分别添加适量 Cu、Fe 和 Mg 配成 A 合金、B 合金和 C 合金, 如表 1 所示。合金成分通过等离子光谱分析得到。

表 1 实验合金成分

Table 1 Composition of experimental alloys

Experimental alloy	Alloy composition <i>w</i> / %		
	Cu	Fe	Mg
A356 alloy	0.052	0.096	0.403
A	3.200	0.089	0.340
B	0.005	0.750	0.360
C	0.005	0.091	1.000

1.2 实验过程

运用熔体温度处理工艺, 首先将某合金高、低温熔体分别升温至 750 ℃, 利用 C₂Cl₆ 进行精炼。接着将高温熔体在 Ar 气的保护下快速升温至 840 ℃, 将低温熔体随炉降温至 600 ℃, 高、低温熔体分别保温 20 min 后, 将高温熔体浇入低温熔体中进行混合处理, 高、低温熔体质量比为 1: 1, 混合温度为 720 ℃。然后, 混合熔体浇入预热温度为 220 ℃的金属型模具中成抗拉试样。通过 WE-60 型液压式万能材料试验机测试试样的抗拉强度和延伸率, 通过 LECO-IA32 图像分析仪和 HITACHI S520 扫描电镜观察和分析试样的凝固组织。

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划(973)资助项目(G1999064900- 4)

[收稿日期] 2001- 09- 10; [修订日期] 2001- 11- 15

[作者简介] 何树先(1972-), 男, 博士研究生。

2 实验结果

2.1 凝固组织

图 1(a) 所示为富铜 A 合金没有经过熔体温度处理的凝固组织金相照片, 图 1(b) 所示为经过熔体温度处理的凝固组织金相照片。比较图 1(a) 和 (b) 可以看出, 当 A356 合金中 Cu 的含量较多时, 没有经过熔体温度处理时, 通过能谱成分分析可知, 合金凝固组织中的富铜相 A'_1 ($Al_{75.27}Si_{3.68}Fe_{0.53}Cu_{20.51}$) 和 B'_1 ($Al_{92.26}Si_{1.78}Cu_{5.96}$) 呈现长杆状和大的、形状不规则的岛状; 而经过熔体温度处理后, 凝固组织中的富铜相明显得到分散和细化, 形貌发生变化, 尺寸明显变小。

图 2 所示为富铁 B 合金凝固组织照片。图 2(a)

所示为没有经过熔体温度处理, 图 2(b) 所示为经过熔体温度处理。经过能谱分析可知, 没有经过熔体温度处理的试样中主要富 Fe 相呈现长的针杆状, 标示为 A'_2 ($Al_{77.59}Si_{14.41}Fe_8$) (见图 2(a)); 而经过熔体温度处理后, 凝固组织中的主要富 Fe 相转变为尺寸较小的、分散的块状, 标示为 B'_2 ($Al_{69.70}Si_{20.63}Fe_{9.67}$) (见图 2(b))。这表明熔体温度处理工艺对于金属间化合物相的形成与长大有一定的作用。

图 3 所示为富镁 C 合金凝固组织扫描电镜照片。图 3(a) 所示为没有经过熔体温度处理, 图 3(b) 所示为经过熔体温度处理。可见 C 合金凝固组织中存在 2 种富 Mg 相, 一种呈现黑色短针状 (标示为 A'_3); 另一种呈现网状 (标示为 B'_3), 经过能谱分析表明, 分别为 A'_3 ($Al_{88.17}Si_{9.03}Mg_{2.79}$) 和 B'_3 ($Al_{79.54}Si_{10.99}Fe_{2.66}Mg_{6.81}$)。明显可以看出, 没有经过熔体

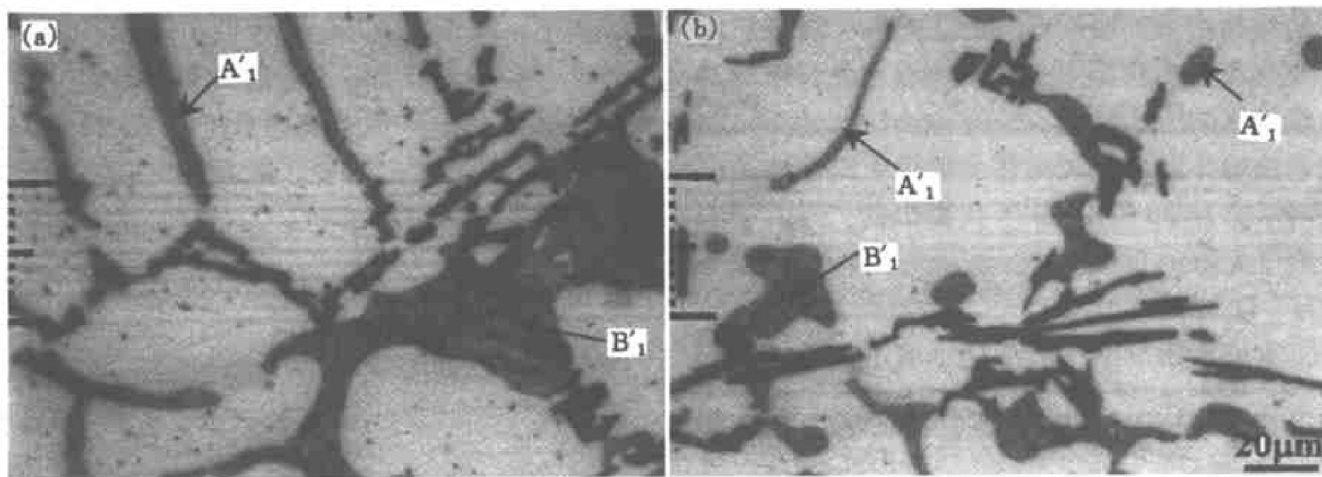


图 1 熔体温度处理对富 Cu 相金属间化合物的影响

Fig.1 Effects of treatment on Cu-rich phase

(a)—Without MTT; (b)—With MTT

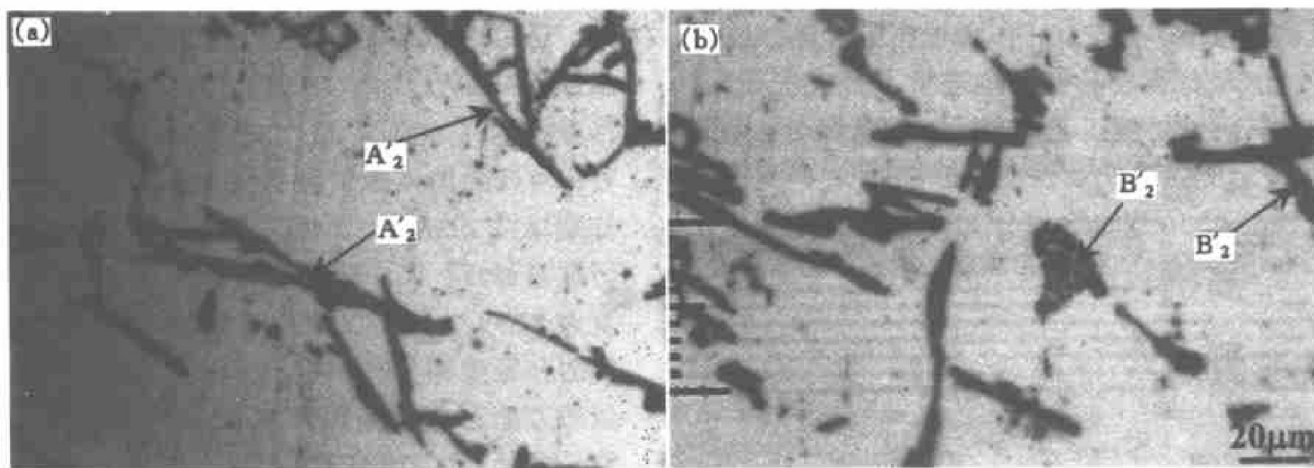


图 2 熔体温度处理对富 Fe 相金属间化合物的影响

Fig.2 Effects of treatment on Fe-rich phase

(a) —Without MTT; (b) —With MTT

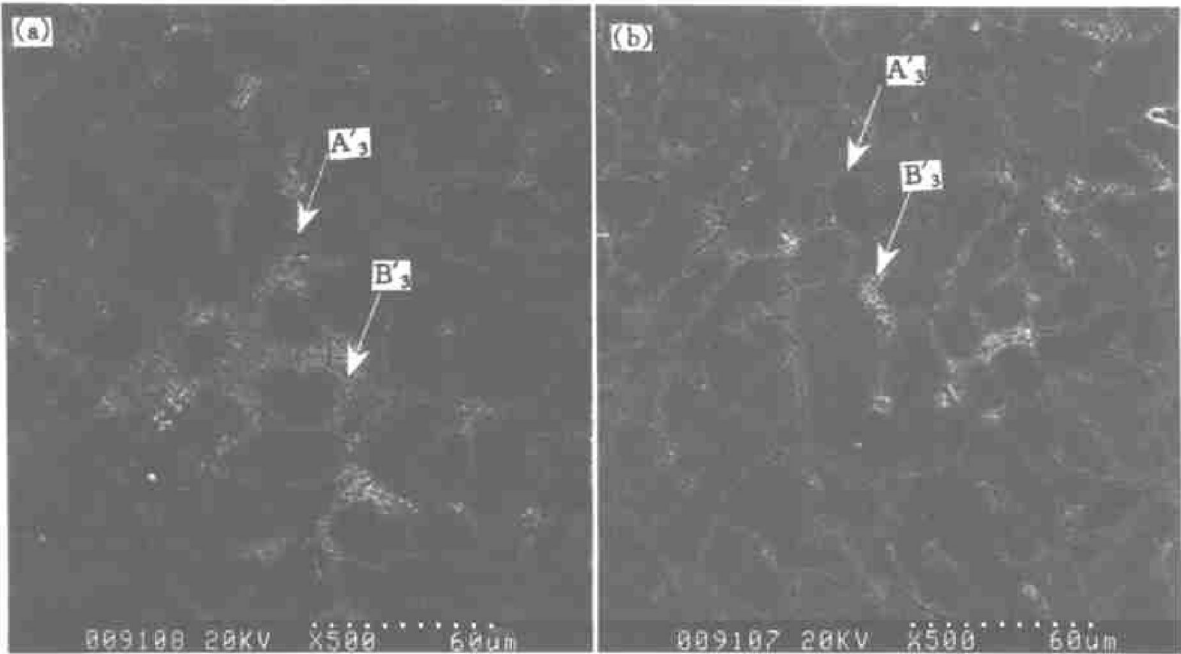


图 3 熔体温度处理对富 Mg 相金属间化合物的影响

Fig. 3 Effects of treatment on Mg-rich phase

(a) —Without MTT; (b) —With MTT

温度处理的试样凝固组织中, 富 Mg 针状相 A'_3 析出数量较多, 尺寸较大; 网状相 B'_3 则比较发达, 分布呈局部凝聚状; 而经过熔体温度处理的试样中, 富 Mg 针状相则明显变得细小, 网状相分布则变得均匀。

2.2 力学性能

合金的力学性能测试结果如图 4 和图 5 所示。测试结果表明, 运用熔体温度处理工艺后, A356 合金成分的变化对其力学性能, 特别是对塑性影响非常显著。对比常规凝固条件, 经过熔体温度处理

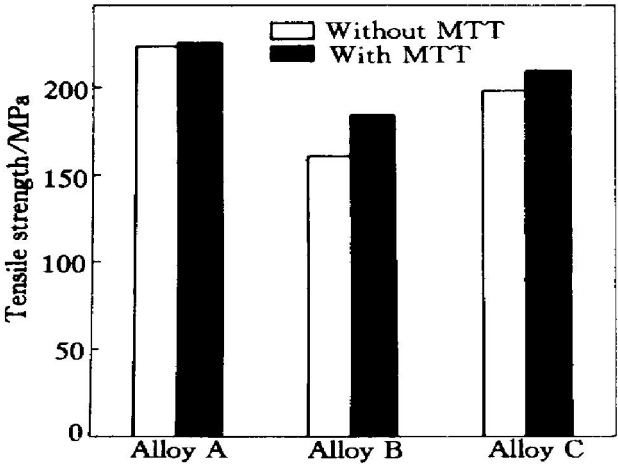


图 4 经过和未经过熔体温度处理合金的抗拉强度对比

Fig. 4 Comparison of tensile strength of alloys with and without MTT

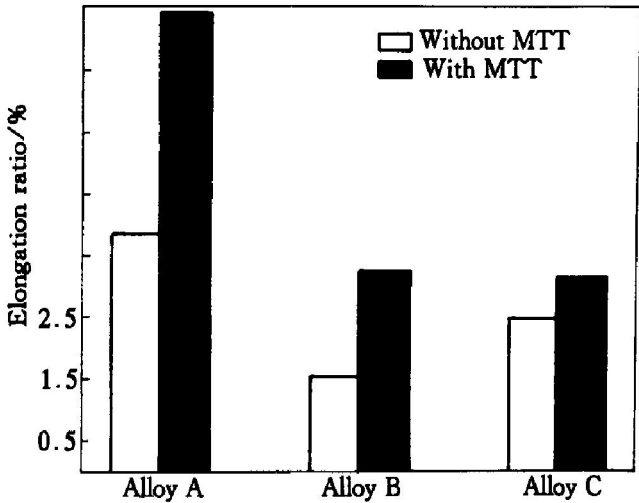


图 5 经过和未经过熔体温度处理合金的延伸率对比

Fig. 5 Comparison of elongation of alloys with and without MTT

111.7% 和 27.4%, 其中富铁 B 合金性能改变最显著。这表明熔体温度处理工艺不仅后, A, B, C 合金的抗拉强度分别提高了 0.5%, 14.6% 和 5.3%, 塑性则分别提高了 92.7%, 能够抑制析出化合物相对性能的负面影响, 而且能够改变不利化合物相的形态, 从而进一步提高合金的力学性能。

3 分析与讨论

以上实验结果表明, 在常规凝固条件下, A356 铝合金中合金元素含量的增加将导致金属间化合物

析出数量的增加,从而最终影响合金力学性能。而经过熔体温度处理以后,合金中金属间化合物析出的数量和形貌发生明显变化,数量和尺寸减小,其中富 Fe 相由原来的针杆状转变为尺寸较小的块状,试样抗拉强度和延伸率显著提高。

关于熔体温度处理能抑制金属间化合物析出的原因可作以下分析。从凝固学的角度分析可知^[1],金属凝固过程中凝固前沿热量、质量、动量传输是一种非线性或非平衡行为,相变、晶体的生长以及晶体形貌都取决于这种非平衡行为的特征。从熔体结构和原子团簇的角度考虑,研究者^[14, 15]发现,金属熔体的组织结构随熔体温度及成分的变化而变化,熔体温度较低时,熔体中含有许多短程有序的类型固相原子集团,也可称为原子团簇。随着熔体温度升高,这种类型固相原子团簇不断熔化,熔体结构逐步变成无序状态。熔体温度处理工艺实质就是把无序状态的高温熔体与有序状态的低温熔体相混合,使混合熔体在微观结构上呈现一种具有较大的温度起伏、能量起伏和成分起伏的非平衡状态。图 6 所示为熔体温度处理工艺混合模型,在这个模型中,混合熔体在微观上可分为 3 个不同的区域:即高温熔体区、温度过冷区和低温类固相团簇区。在本实验中,当高温熔体混入低温熔体时,低温熔体中主要存在的富 Cu、富 Fe、富 Mg 等类固相团簇在高温熔体的作用下迅速升温、熔化以至分解,很显然,低温熔体的升温过程和高温熔体的降温过程是一个非线性或非平衡过程,这种非线性特征必然影响到最终晶体的生长形态。当处于非平衡过程的混合熔体开始凝固时,由于尺寸较大的富 Cu、富 Fe、富 Mg 类固相团簇没有来得及完全熔化或分解,如果液固界面的推进速度大于这些团簇的

扩散迁移的速率时,这些富 Cu、富 Fe、富 Mg 等类固相团簇就有可能被整个包覆在初生固相中,从而导致最终在晶界上析出的金属间化合物数量减少。

另外,从凝固热力学角度分析,凝固偏析过程受冷却速度和液固界面的温度梯度影响较大,如下式^[1]:

$$-\frac{G_t^2}{\epsilon} > \frac{2\beta m \bar{w}}{D_L(1+k)(2+k)} \quad (1)$$

式中 G_t 为温度梯度, ϵ 为冷却速率, β 为凝固收缩率, m 为液相线斜率, $\bar{w}$ 为合金中溶质的平均质量分数, D_L 为液相扩散系数, k 为溶质分配系数。

由式(1)可知,小的温度梯度 G_t 和大的冷却速率 ϵ 有利于偏析的形成。经过温度处理以后,未熔类固相团簇很容易成为结晶形核的核心(如图 6 所示)。这样固液界面前沿必然存在一个相当大的温度梯度,因此,在冷却速率一定的情况下,经过温度处理的凝固过程将有利于抑制偏析的形成。

4 结论

1) 熔体温度处理能够有效抑制富 Cu、富 Fe、富 Mg 相的形成,改变化合物析出形貌,减小化合物相尺寸,从而有利于凝固组织的改善。

2) 熔体温度处理能够减弱 A356 合金由于 Cu、Fe 和 Mg 成分的增加对性能所带来的不良影响,不同程度地提高了试样抗拉强度和延伸率,其中对合金塑性影响最显著。

3) 熔体温度处理工艺抑制微观成分偏析的主要原因是由于混合熔体中存在未熔化的富 Cu、富 Fe、富 Mg 等类固相原子团簇与熔体中存在的微观温度起伏共同作用的结果。

[REFERENCES]

- [1] 周尧和, 胡壮麒, 介万奇. 凝固技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 9.
ZHOU Yao-he, HU Zhuang-qi, JIE Wan-qi. Solidification Technology [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 9.
- [2] 张 林, 边秀房, 马家骥. 铝硅合金的液相结构转变 [J]. 铸造, 1995(10): 7- 12.
ZHANG Lin, BIAN Xiur-fang, MA Jia-ji. Microstructural transformation of Al-Si alloy in the liquid state [J]. Foundry, 1995(10): 7- 12.
- [3] 李培杰, 桂满昌, 贾 均. Al-16% Si 合金熔体的电阻率及其结构遗传 [J]. 铸造, 1995(9): 15- 20.
LI Pei-jie, GUI Man-chang, JIA Jun. The resistivity and structure heredity of the melt for Al-16% Si alloy

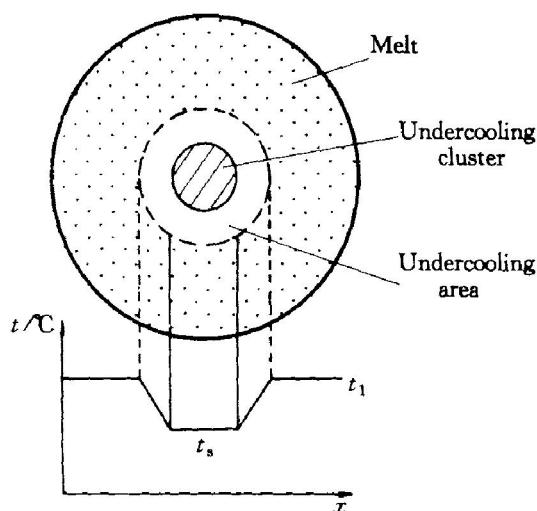


图 6 混合熔体模型示意图

Fig. 6 Schematic of model of mixing melt

- [J]. Foundry, 1995(9): 15– 20.
- [4] 李涛, 黄卫东, 林鑫. 半固态处理中球晶形成与演化的直接观察 [J]. 中国有色金属学报, 2000, 10(5): 635– 639.
- LI Tao, HUANG Weidong, LIN Xin. Formation of globular structure during semisolid material processing [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2000, 10(5): 635– 639.
- [5] 李培杰. 铝硅合金熔体的物性及结构遗传 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
- LI Peijie. The Heredity of Physical Properties and Structure of the AlSi Alloy Melt [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995.
- [6] ZHANG Kui, ZHANG Yongzhong, LIU Guojun, et al. Structure evolution of non-dendritic AlSi₇Mg alloy during reheating [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1999, 9(3): 553– 556.
- [7] 边秀房, 刘广荣, 刘相法. 金属晶粒自身细化 [J]. 金属学报, 1997, 33(6): 602– 607.
- BIAN Xiufang, LIU Guangrong, LIU Xiangfa. Self-grain refinement of metal [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(6): 602– 607.
- [8] Ohmi T, Kudoh M. Effect of casting condition on refinement of primary crystals in hypereutectic AlSi alloy ingots produced by duplex casting process [J]. J Japan Inst Metals, 1992, 56(9): 1064– 1071.
- [9] Ohmi T, Kudoh M. Formation of fine primary silicon crystals by mixing of semisolid slurry of hypoeutectic AlSi alloy and phosphorus-added hypereutectic AlSi alloy melt [J]. J Japan Inst Metals, 1994, 58(3): 324– 329.
- [10] Ohmi T, Kudoh M. Formation of fine primary silicon crystals by mixing of semisolid slurry of hypoeutectic AlSi alloy and phosphorus-added hypereutectic AlSi alloy melt [J]. J Japan Inst Metals, 1994, 58(11): 1311– 1317.
- [11] Ohmi T, Kudoh M, Matsuura K, et al. Undercooling and primary solidification behavior in mixture of hypereutectic and another AlSi alloy melts [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1998, 48(1): 42– 47.
- [12] 坚增运. 净化和熔体温度处理对铝合金凝固过程、组织和性能的影响 [D]. 西安: 西北工业大学, 1995.
- JIAN Zengyun. Effect of Denucleation and Melt Temperature Treatment on Solidification Process, Structure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 1995.
- [13] 何树先, 孙宝德, 王俊, 等. 熔体温度处理工艺对A319合金凝固组织影响的研究 [J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(5): 1– 4.
- HE Shuxian, SUN Baode, WANG Jun, et al. Effect of melt temperature treatment on solidification structure of A319 alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(5): 1– 4.
- [14] 关绍康. 熔体热历史对快凝铝铁基合金显微结构影响的研究 [D]. 北京: 北京科技大学, 1995.
- GUAN Shaokang. Effect of Melt Thermal History on the Microstructure of AlFe Alloy [D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 1995.
- [15] 王广厚. 团簇物理的新进展 [J]. 物理学进展, 1994, 14(2): 121– 168.
- WANG Guanghou. New progress of cluster physics [J]. Progress in Physics, 1994, 14(2): 121– 168.

Effect of composition on A356 alloy processed by melt temperature treatment

HE Shuxian^{1, 2}, WANG Jun¹, SUN Baode¹, ZHOU Yaohe¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Ceramics and Superfine Microstructure, Shanghai Institute of Ceramics, The Chinese Academy of Science, Shanghai 200050, China)

[Abstract] The effect of composition of Cu, Fe, Mg on the solidification structure and mechanical properties of the hypoeutectic A356 alloy treated by melt temperature treatment (MTT) process was studied. The results of solidification structure observation and mechanical properties evaluation show that the MTT process can obviously restrain the precipitation, change the morphology of intermetallic compound by the size decreasing, such as Cu-rich, Fe-rich and Mg-rich phase. So the mechanical properties are improved. Finally, the experimental results were analyzed according to the theory of atom clusters.

[Key words] A356 alloy; melt temperature treatment; alloy composition; solidification structure; atom clusters

(编辑 陈爱华)