

文章编号: 1004-0609(2004)04-0660-05

SIMA 法处理 AZ91D 镁合金压缩形变及 半固态等温组织的特征^①

姚亮宇¹, 袁 森¹, 王武孝^{1, 2}, 蒋百灵¹, 唐文亭¹

(1. 西安理工大学 材料科学与工程学院, 西安 710048; 2. 西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 研究了 AZ91D 镁合金在应变诱发熔化激活法处理过程中形变率和形变温度对组织的影响。结果表明: 形变温度为 280 ℃时, 随着形变率增加, 部分枝晶臂逐渐伸长, 枝晶破断现象加剧; 形变率为 20% 时, 随着形变温度的提高, 组织的形变方式逐渐由以枝晶断裂为主转变为带有方向性的弯曲。AZ91D 合金在 580 ℃等温 10 min 所获得的半固态组织, 随着形变率增加, 球状晶粒尺寸减小, 圆整度提高; 随形变温度的提高, 固相颗粒的偏聚现象减轻。

关键词: 应变诱发熔化激活法; 镁合金; 压缩形变; 半固态组织

中图分类号: TG 249

文献标识码: A

Characterization of deformation and semi-solid isothermal microstructures of AZ91D alloy for upsetting in SIMA process

YAO Liang-yu¹, YUAN Sen¹, WANG Wu-xiao^{1, 2}, JIANG Bai-ling¹, TANG Wen-ting¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an 710048, China;

2. Department of Materials Science and Engineering,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The influences of strain and temperature on microstructure of AZ91D alloy for upsetting in the strain-induced melt activation process were investigated. The results indicate that with increasing the strain at 280 ℃, the dendrite arms of AZ91D alloy get broken or stretched out. With increasing the predeformation temperature under 20% strain, the deformation style of the dendritic structure of AZ91D alloy changes gradually from fragmentation to directional bending. After held at 580 ℃ for 10 min, the greater the strain, the finer and rounder the size of the globular grains of AZ91D alloy. And in the mean time, the higher the isothermal temperature, the less the agglomeration of solid particles.

Key words: strain-induced melt activation; magnesium alloy; upsetting; semi-solid microstructure

金属的半固态成形是一种可以生产出近终形零件的先进成形技术。与液态压铸相比, 它具有成形温度低, 能源消耗少, 凝固收缩小, 模具使用寿命长等特点^[1], 这使得半固态成形技术越来越受到人们的重视。半固态成形法的金属浆料不同于常规凝固过程中的半固态金属, 它是由液态金属和包覆于

其中的球状晶粒所组成^[2], 这种浆料的触变性好、粘度大, 生产出的零件组织细小、力学性能好。获得半固态组织的方法主要有电磁搅拌法、机械搅拌法、等温热处理法和应变诱发熔化激活法(SIMA)等^[3~10]。与其它方法相比, SIMA 法由于省去了熔体处理过程, 特别适合于制备半固态镁合金。

① 基金项目: 陕西省教育厅产业化培育项目(02JC33)

收稿日期: 2003-07-09; 修订日期: 2003-10-27

作者简介: 姚亮宇(1968-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 袁 森, 教授; 电话: 029-82312109; E-mail: yuansen0814@163.com

镁合金作为结构材料, 其优势在于: 密度低 (约 1.8 kg/cm^3), 比强度和比弹性模量高, 刚性、减震性和切削加工性良好^[11~13]。镁合金在熔融状态下容易发生氧化燃烧, 需要采取严格的气体保护措施。本文作者以压铸镁合金 AZ91D 为研究对象, 探讨在压缩形变条件下, 形变率和温度对形变组织及半固态等温组织的影响规律, 目的在于确定适合于 AZ91D 的形变工艺参数, 为 SIMA 法生产镁合金半固态浆料的工业化提供依据。

1 实验

实验采用的 AZ91D 镁合金铸锭的化学成分(质量分数, %) 为: Al 8.6, Zn 0.86, Mn 0.78, S < 0.0021, Cu < 0.001, Ni < 0.0008, 其余为 Mg, 加工成适合于压缩形变的圆柱形试棒。

实验中制定了 2 组实验方案: 1) 考察同一温度不同形变率下 AZ91D 镁合金的形变组织及半固态等温组织。实验用压缩模具的内径固定, 压缩后不同形变率试样的高度均为 10 mm。为了使实验具有可比性, 方案中不同形变率试样的质量相等。根据压缩形变率确定圆柱形试棒的尺寸^[1, 14], 形变率为 10% 时试棒尺寸为 $18.97 \text{ mm} \times 11.11 \text{ mm}$, 形变率为 20% 时试棒尺寸为 $17.89 \text{ mm} \times 12.50 \text{ mm}$, 形变率为 30% 时试棒尺寸为 $16.73 \text{ mm} \times 14.29 \text{ mm}$ 。将试棒放入 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 的箱式电阻炉内保温 30 min。2) 考察同一形变率不同形变温度下 AZ91D 镁合金的形变组织及半固态等温组织。选取形变率为 20%, 形变温度分别为 180 、 230 、 280 、 $330 \text{ }^\circ\text{C}$ 的试样, 保温 30 min。

形变实验过程为: 试样出炉后马上放入如图 1 所示的模具中(模具随试样一起加热), 在液压机上压缩。压缩后迅速将试样取出, 放入水中冷却。

半固态等温实验过程为: 从形变试样中心部位取尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的小试样, 用 0.2 mm 厚的铜皮密封后放入电阻炉内在 $580 \text{ }^\circ\text{C}$ 下保温, 到设定时间后迅速水淬。

2 结果与讨论

2.1 形变工艺参数对 AZ91D 合金形变组织的影响

2.1.1 形变率的影响

图2所示为 $280 \text{ }^\circ\text{C}$ 下采用不同形变率所获得的

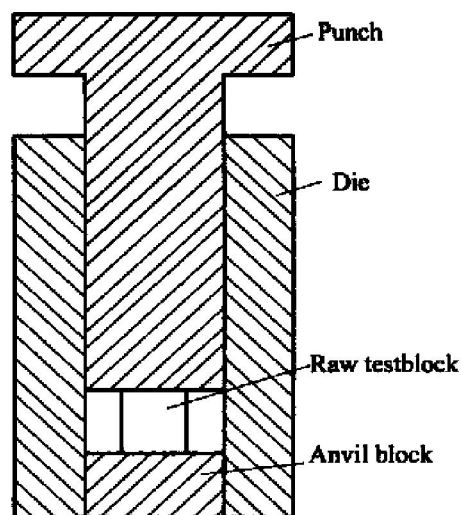


图 1 压缩形变装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental apparatus of upsetting

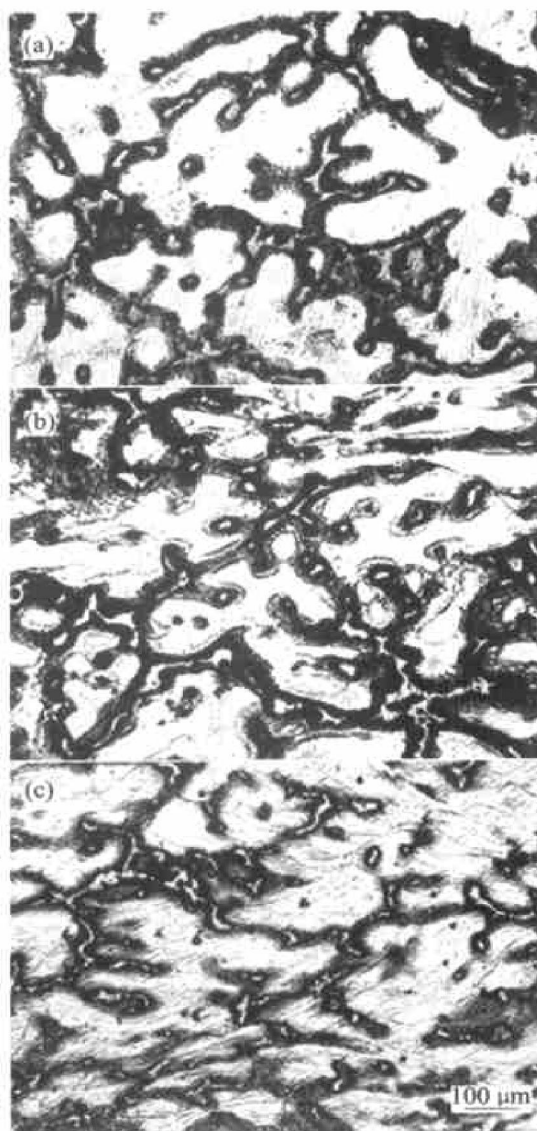


图 2 经不同形变率后 AZ91D 合金的微观组织

Fig. 2 Microstructures of AZ91D alloy deformed after different strains
(a) -10%; (b) -20%; (c) -30%

AZ91D 合金的组织。在图 2(a) 中, 由于形变率较低, 显微组织中大部分树枝晶的形变特征不明显, 基本上保持了铸态条件下的枝晶形态。当形变率为 20% 时(图 2(b)), 可以观察到枝晶臂受拉伸而断裂, 部分枝晶臂沿着与压应力垂直的方向伸长, 形变特征比较明显; 当形变率为 30% 时(图 2(c)), 由于枝晶形变增大, 枝晶的断裂、伸长加剧, 在垂直于压应力方向上趋于平行, 间距明显减小, 形态与铸态树枝晶有了明显的区别; 组织中还可以观察到枝晶破断后产生的碎片。可见: 随着形变率的增加, AZ91D 合金组织的树枝晶特征逐渐发生变化, 显微结构中缺陷增加, 储存的能量升高。

2.1.2 形变温度的影响

图 3 和图 2(b) 为形变率为 20% 时不同形变温度下 AZ91D 的微观组织。可以看出: 形变温度为 180 °C 时(图 3(a)), 树枝晶在压应力作用下发生破碎, 一个枝晶臂断裂为数块, 裂纹方向大致与压应力方向一致, 断裂面粗糙, 尖角明显, 破碎的枝晶仍然保持原来的骨架形状, 没有明显的塑性变形。当形变温度为 230 °C 时(图 3(b)), 树枝晶在形变后同样发生了断裂, 但由于形变温度较高, 合金的变形性能改善, 断口处的尖角钝化。随着形变温度的升高, 合金的塑性变形性能进一步改善。当形变温度为 330 °C 时(图 3(c)), 枝晶在应力作用发生破断的同时, 也发生了明显的伸长和弯曲, 形变枝晶取向在压力作用下呈现出一定的方向性。

形变温度的提高会降低合金的弹性模量和屈服强度, 从而改善其变形性能。合金中 αMg 的晶体结构为密排六方晶格, 变形性能较差。在低温下, αMg 的变形主要通过基面上 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向的滑移和在角锥面 $\{10\bar{1}2\}$ 上的孪晶, 而且孪晶只有在受到压应力时才会发生。在温度高于 250 °C 时, 附加的滑移面角锥面 $\{10\bar{1}1\}$ 开始起作用, 变形性能得到很大改善, 这一点从图 3(c) 中 AZ91D 合金在 330 °C 时枝晶臂的弯曲可以得到验证。

AZ91D 合金在低温下塑性很差, 在小的形变下就会发生脆断, 因此本文作者采取了预热形变的方法, 观察不同形变温度的试样。从图 3 可以看出, 组织中仍存在大量的原始枝晶, 说明绝大部分枝晶并未发生再结晶。

2.2 形变工艺参数对 AZ91D 合金半固态等温组织的影响

2.2.1 形变率的影响

图 4 所示为形变率分别为 0、10%、20%、30%

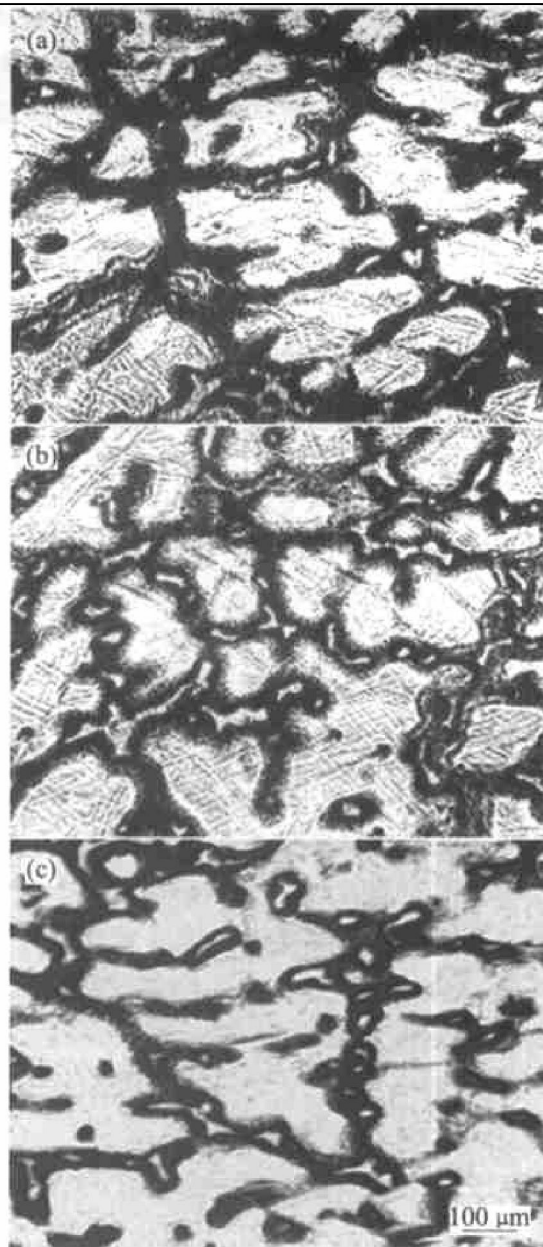


图 3 不同形变温度时 AZ91D 合金的微观组织

Fig. 3 Microstructures of AZ91D alloy at different temperatures
(a) -180 °C; (b) -230 °C; (c) -330 °C

的合金在 580 °C 保温 10 min 后所获得的液淬组织。从图 4(a) 中可以看出, 原始铸态树枝晶在半固态等温过程中也会逐渐向球状晶演化, 但与有形变的合金相比, 这一过程比较缓慢。图 4(b)、(c)、(d) 中, 3 个形变率的试样在保温 10 min 后都获得了半固态球状晶粒, 形变率为 20% 和 30% 的晶粒分布比形变率为 10% 的更均匀。随着形变率的增加, 晶粒的圆整度有所提高, 晶粒尺寸有所减小。

在 AZ91D 合金半固态晶粒球状化过程中起主要作用的是晶粒内部的残余应力。对照图 4(b) 与图 2(a) 发现: 形变率为 10% 时, 由于形变不足, 合金组织中树枝晶没有发生明显的形变, 晶粒内储存的

畸变能不足, 对应的半固态显微组织中球状晶发生偏聚现象, 而且与其他形变率相比, 晶粒的球状化不够充分。

2.2.2 形变温度的影响

图 5 及图 4(c) 为形变率为 20% 时不同形变温

度条件下 AZ91D 合金在 580 °C 保温 10 min 所获得的液淬组织。可以看出, 随着形变温度的升高, 合金半固态组织中的球状晶粒尺寸变化不大, 但固相晶粒在液相中的分布趋于均匀。当形变温度为 180 °C 时(图 5(a)), 球状晶存在着比较明显的偏聚现

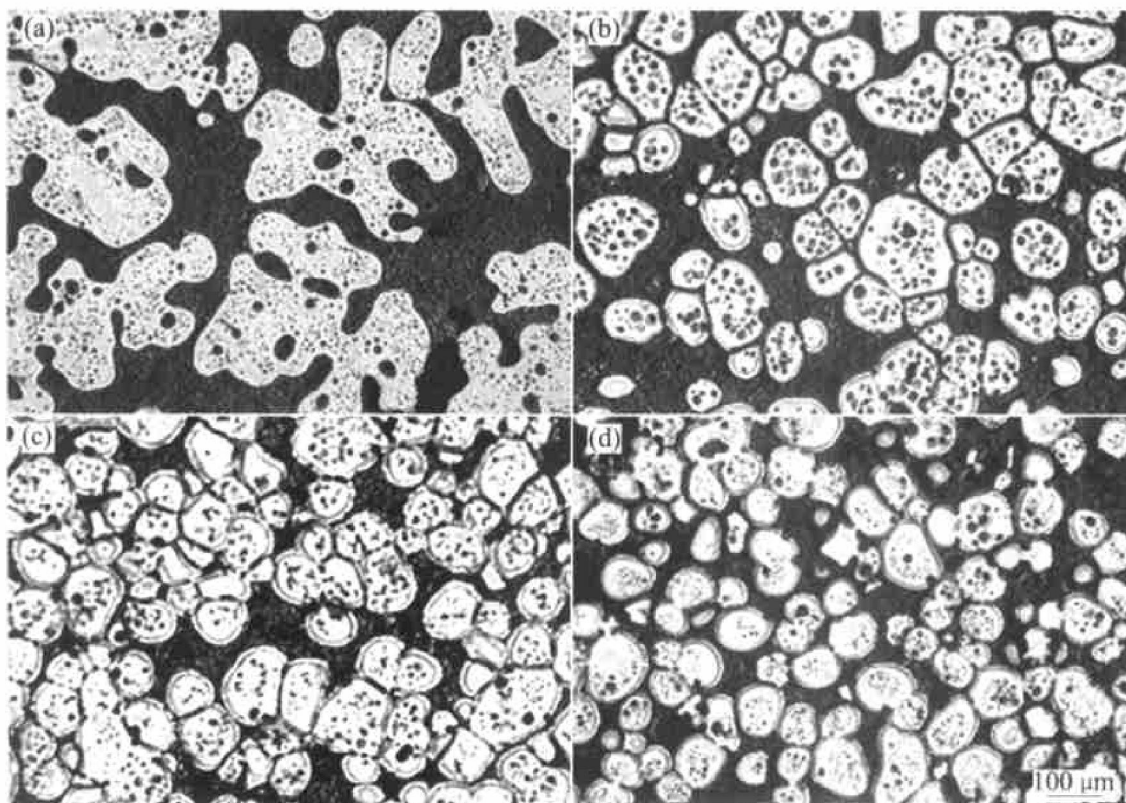


图 4 经过不同形变率后 AZ91D 合金在 580 °C 保温 10 min 的微观组织

Fig. 4 Microstructures of AZ91D alloy deformed after different strains and held at 580 °C for 10 min

(a) 0%; (b) -10%; (c) -20%; (d) -30%

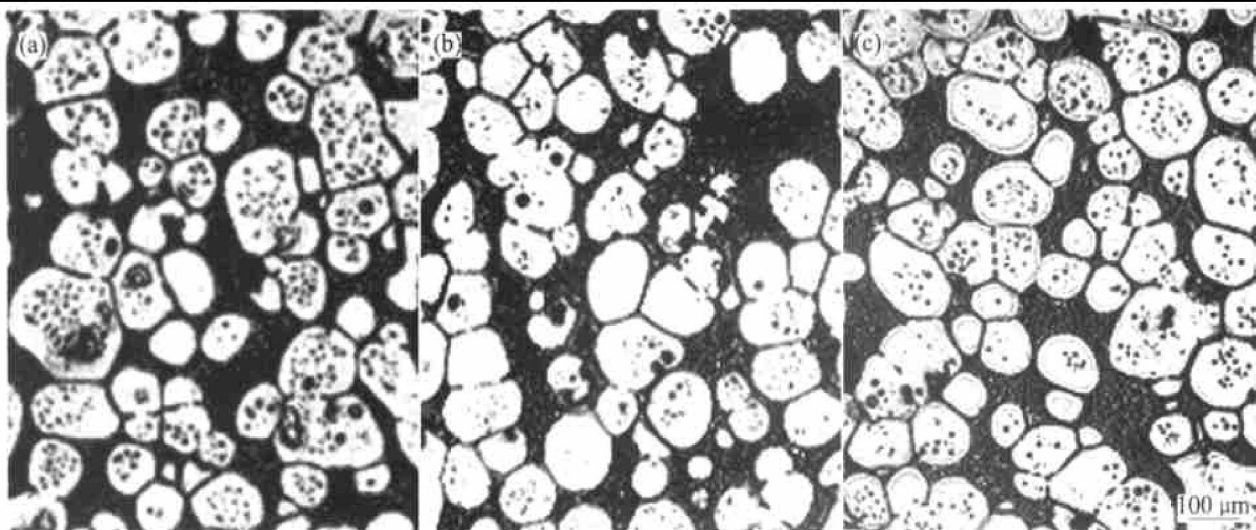


图 5 不同形变温度进行 20% 形变后 AZ91D 合金在 580 °C 保温 10 min 的微观组织

Fig. 5 Microstructures of AZ91D alloy after deformed 20% at different temperatures, then held at 580 °C for 10 min

(a) -180 °C; (b) -230 °C; (c) -330 °C

象。随着形变温度的升高,晶粒分布的不均匀状态逐渐减轻,如图 5(b)、(c)所示。

比较图 5 中不同形变温度下的半固态组织与其半固态保温前的金相组织(图 3)可以发现,合金半固态组织中球状晶的偏聚现象与枝晶的变形程度有关。当形变温度为 180 °C 时,形变主要通过枝晶臂断裂的方式进行,碎化的晶粒内部储存的畸变能有限,这使枝晶在半固态等温过程中分解速度较慢,微观组织中球状晶分布均匀性差。随着形变温度的提高,合金的塑性变形能力改善。形变温度为 330 °C 的树枝晶在受到压应力作用时,会通过弯曲来发生形变,这使晶粒内部的微观缺陷增多,储存的畸变能增加,且分布均匀,加快了半固态保温过程中枝晶的分解速度,固相颗粒的偏聚现象随之减轻。

REFERENCES

- [1] Choi J C, Park H J. Microstructural characteristics of aluminum 2024 by cold working in the SIMA process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1998, 82: 107 - 116.
- [2] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state[J]. *Metall Mater Trans A*, 1991, 22A: 957 - 980.
- [3] Charles V. Elaboration of semisolid alloys by means of new electromagnetic rheocasting process[J]. *Metall Mater Trans B*, 1992, 23B: 189 - 205.
- [4] 陈体军, 郝 远. 金属的半固态成形技术与应用[J]. *铸造*, 2001, 50(11): 645 - 649.
CHEN Tǐjun, HAO Yuan. Semisolid forming technology of metals and its application[J]. *Foundry*, 2001, 50(11): 645 - 649.
- [5] 左宏志, 刘昌明, 邹冒华, 等. ZL112Y 压铸铝合金摩托车零件的半固态高压铸造成形[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 949 - 955.
ZUO Hong-zhi, LIU Chang-ming, ZOU Mao-hu, et al. Semisolid die casting process of motorcycle parts of ZL112Y die cast alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 949 - 955.
- [6] 杨红亮, 张质良, Ohnaka I, 等. ZL101 合金半固态二次加热[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(3): 626 - 630.
YANG Hong-liang, ZHANG Zhǐ-liang, Ohnaka I, et al. Reheating of semisolid ZL101 alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(3): 626 - 630.
- [7] 杨红亮, 张质良. 半固态金属制备技术[J]. *中国有色金属学报*, 2002(S2): 126 - 131.
YANG Hong-liang, ZHANG Zhǐ-liang. Production technique of semisolid slurries[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002(S2): 126 - 131.
- [8] 田文彤, 罗守靖, 张广安. 半固态 LC4 的屈服应力[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(1): 82 - 86.
TIAN Wen-tong, LUO Shou-jing, ZHANG Guang-an. Yield stress of LC4 alloy in semisolid state[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 82 - 86.
- [9] 王 开, 刘昌明, 邹冒华, 等. ZL112Y 铝合金半固态压铸过程微观组织的演变[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(4): 956 - 962.
WANG Kai, LIU Chang-ming, ZOU Mao-hua, et al. Structural evolution of ZL112Y alloy in procedure of semisolid die casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(4): 956 - 962.
- [10] 朱鸣芳, 苏华钦. 预形变量和半固态等温温度对触变组织的影响[J]. *铸造*, 1996(1): 8 - 10.
ZHU Ming-fang, SU Hua-qin. The effect of the previous deformation and the isothermal temperature in semisolid state on the thixotropic microstructure[J]. *Foundry*, 1996(1): 8 - 10.
- [11] Kojima Y, Aizawa T, Kamado S. Magnesium Alloys 2000[M]. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd, 2000.
- [12] Decker R F. The renaissance in magnesium[J]. *Advanced Mater & Proc*, 1998, 154(9): 31 - 35.
- [13] 余 琨, 黎文献, 王日初, 等. 形变镁合金的研究、开发及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2003, 13(2): 277 - 288.
YU Kun, LI Wen-xian, WANG Rǐ-chu, et al. Research, development and application of wrought magnesium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2003, 13(2): 277 - 288.
- [14] 陈体军, 郝 远, 陆 松, 等. ZA27 合金在 SIMA 处理过程中形变量和等温温度对组织的影响[J]. *金属热处理学报*, 2000, 21(1): 26 - 31.
CHEN Tǐjun, HAO Yuan, LU Song, et al. Influences of strains and isothermal temperatures on microstructure of ZA27 alloy during strain-induced melt activation[J]. *Transactions of Metal Heat Treatment*, 2000, 21(1): 26 - 31.

(编辑 李向群)