

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0626 - 05

ZL101 合金半固态二次加热^①

杨红亮¹, 张质良¹, I. Ohnaka², H. Yasuda², A. Sugiyama², T. Ohmichi²

(1. 上海交通大学 模具 CAD 国家工程研究中心, 上海 200030; 2. Osaka University, Yamada oka 2 - 1, Suita, Osaka, Japan)

摘 要: 采用半固态合金二次加热, 对半固态坯料施加合理的二次加热路径, 重新获得适于后续加工的具有近球状固相颗粒均匀分布的半固态组织。采用功率为 20 kW, 频率为 30 kHz 的高频感应加热装置, 研究了采用再熔融加热法制备的 ZL101 半固态合金坯料的二次加热过程。结果表明: 为了获得适于最终成形的半固态组织, 有必要把半固态坯料二次加热过程分为几个加热速率不同的加热阶段, 然后在半固态温度区间某一需要加工温度下进行适度保温。通过实验给出了 ZL101 合金半固态坯料二次加热条件, 并讨论了二次加热条件对半固态组织演化的影响。

关键词: 再熔融加热法; 半固态合金; 二次加热; 组织演化

中图分类号: TG 146; TG 249

文献标识码: A

半固态加工一般包括坯料制备、二次加热及触变成形 3 个工序^[1-2]。半固态二次加热是把已制备的半固态坯料加热到需要的半固态温度区间内某一温度, 以进行触变成形的加热工序^[3-4]。其目标是重新获得近球状固相颗粒均匀分布的具有触变性的半固态浆料。由于温度是固相分数的变量, 温度的变化直接影响固相分数的高低及固相颗粒的分布情况, 所以获得均匀分布的温度场, 从而获得固相颗粒均匀分布的半固态组织, 成为半固态二次加热的主要任务。由于工业上的半固态二次加热一般采用感应加热方法, 所以半固态二次加热涉及到加热线圈设计、二次加热条件控制等方面的课题^[5-12]。Dantzig 等^[9]建立了描述温度场分布的数学模型, 模型嵌入了包括熔化潜热在内的材料热性能参数、坯料及线圈尺寸、感应电流及频率等, 并采用该模型对铜基合金的温度场进行了模拟, 从而辅助加热线圈设计。Choi 等^[10]通过对比计算机模拟结果和试验结果, 研究了 A356 合金感应二次加热过程的加热条件和温度分布情况。此外, Jung 等^[11-12]也就加热线圈设计及获得的半固态组织进行了研究。

本文作者采用功率为 20 kW, 频率为 30 kHz 的高频电磁感应加热装置, 研究了采用再熔融加热法制备的坯料的二次加热条件对 ZL101 合金半固态组织的影响。通过控制二次加热条件如不同加热阶段加热速率、保温时间等获得固相颗粒形状和尺

寸满足半固态加工需要的半固态组织。

1 实验

实验用半固态毛坯采用再熔融加热法制备。毛坯尺寸为 $d\ 25.4\ \text{mm} \times 70\ \text{mm}$, 毛坯材料为 ZL101 合金, 其化学组成如表 1 所列。ZL101 合金的熔化温度区间通过差热分析确定。根据 ZL101 合金的 DTA 曲线, 熔化起始温度为 568.1 °C, 熔化结束温度为 613.2 °C。

二次加热设备采用高频电磁感应加热装置, 功率为 20 kW, 加热频率为 30 kHz。加热实验装置简图如图 1 所示。

表 1 ZL101 合金化学成分

Table 1 Chemical compositions of ZL101 alloy
(mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Ni	Al
6.99	0.13	-	-	0.35	-	-	0.14	0.01	Bal.

二次加热分别采用两种加热路径, 即三步加热和四步加热法(如图 2 所示)。三步加热中, 分别以 2 °C/s, 0.5 °C/s 及 0.07 °C/s 的加热速率加热到 540、570 及 576 °C。四步加热中分别以 2、1、0.5 及 0.05 °C/s 的加热速率加热到 540、560、570 及 576 °C。每种加热路径分别在 576 °C 保温 60、90、120、

① 收稿日期: 2002 - 10 - 28; 修订日期: 2003 - 01 - 21

作者简介: 杨红亮(1974 -), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 杨红亮, 博士研究生; 电话: 021 - 62934419, 021 - 62813475; E-mail: lionyang@homecity365.com

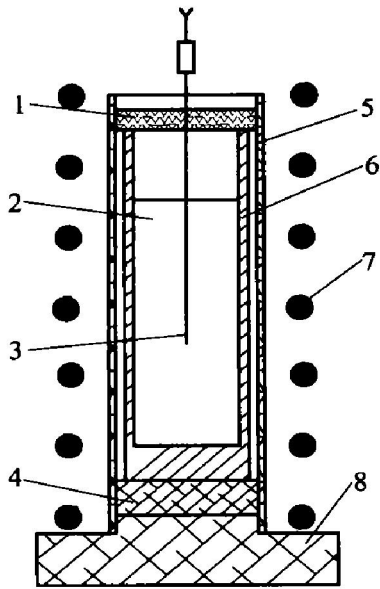


图 1 加热装置简图

Fig. 1 Schematic of heating set

- 1—Asbestos; 2—Billet; 3—Thermocouple;
4—Ceramic plate; 5—Quartz sleeve;
6—Graphite crucible; 7—Coil; 8—Bottom plate

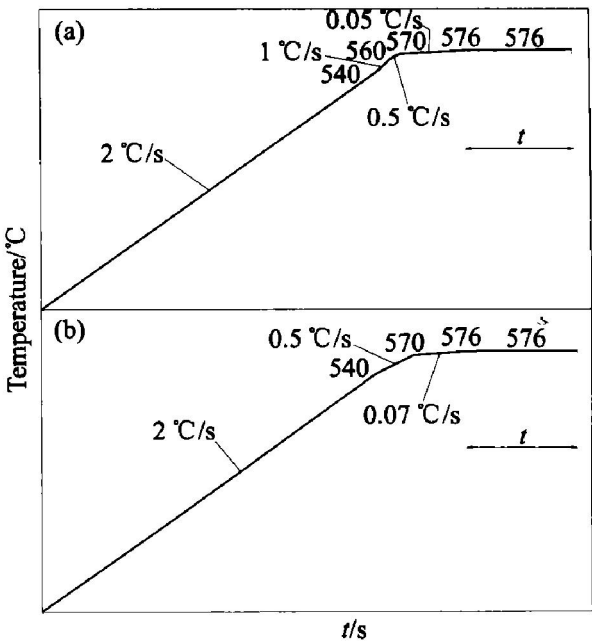


图 2 二次加热路径

Fig. 2 Reheating routes

(a)—Three steps heating; (b)—Four steps heating

150、300 及 420 s。经过二次加热保温后的坯料快速水冷, 经过研磨、抛光和腐蚀处理后观察微观组织。采用 Media Cybernetics Inc 开发的 Image-Proplus 软件评估半固态组织初晶相的尺寸及形状因子。这里采用真圆度衡量初晶相的球化程度。真圆度越接近数值 1, 固相颗粒越接近球状。

$$S=\frac{P_{\alpha}^2}{4\pi A}$$

式中 S 、 P_{α} 及 A 分别定义为半固态初晶相颗粒的平均真圆度、周长及面积。

2 结果与分析

半固态感应二次加热采用多步加热比单步加热能获得更好的半固态组织^[4]。这是因为对于 ZL101 半固态合金, 在二次加热到 555 °C 时三元合金 Al-Si-Mg 开始熔化, 当加热到 574 °C 时二元 Al-Si 共晶组织开始熔化, 由于熔化需要吸收热量, 所以会延迟加热过程, 也给该温度范围的加热控制带来困难。为保证三元合金和二元共晶组织的充分熔化扩散, 在到达这两个温度范围时应降低加热速率, 这样既利于二次加热的控制也利于半固态近球状固相组织的演化。为缩短二次加热时间, 采用的多步加热过程不施加保温, 只在达到半固态区间加工温度时进行保温, 并且每个加热工步的加热速率不同。

三步加热(加热条件如图 2(b) 所示)是: 540 °C 以前以 2 °C/s 加热速率加热; 540~ 570 °C 的加热速率为 0.5 °C/s, 该温度范围对应三元 Al-Si-Mg 合金的熔化; 570~ 576 °C 的加热速率为 0.07 °C/s, 该温度范围对应 Al-Si 二元共晶组织的熔化; 然后在 576 °C 分别保温 60、90、120、150、300 及 420 s。

图 3 所示为获得的半固态组织。表 2 为采用 Image-Proplus 软件计算的固相初晶相大小及真圆度。由图 3 和表 2 可知, 保温 60 s 时初晶相较小, 为 100 μm 左右, 真圆度为 1.28。随着保温时间延长, 初晶相增大。这是随着保温时间增加半固态固相颗粒迅速长大的结果。从表 2 可知, 真圆度并不是与保温时间成比例关系, 即增加保温时间并不意味着能得到较小的真圆度。

四步加热(加热条件如图 2(a) 所示)是: 540 °C

表 2 半固态组织初晶相尺寸及形状的计算结果

Table 2 Calculated dimensions and shape of primary phase in semi-solid state				
Holding time/ s	3 steps heating		4 steps heating	
	Roundness	Diameter/ μm	Roundness	Diameter/ μm
60	1.37 ±0.33	147.37 ±62.09	1.32 ±0.17	148.60 ±58.18
90	1.28 ±0.24	118.32 ±50.04	1.31 ±0.27	134.86 ±54.10
120	1.44 ±0.27	133.14 ±47.53	1.16 ±0.08	150.33 ±41.59
150	1.42 ±0.48	130.29 ±57.92	1.26 ±0.18	136.68 ±31.76
300	1.48 ±0.39	179.74 ±86.01	1.33 ±0.23	143.18 ±36.67
420	1.24 ±0.21	188.72 ±60.50	1.36 ±0.31	173.92 ±53.78

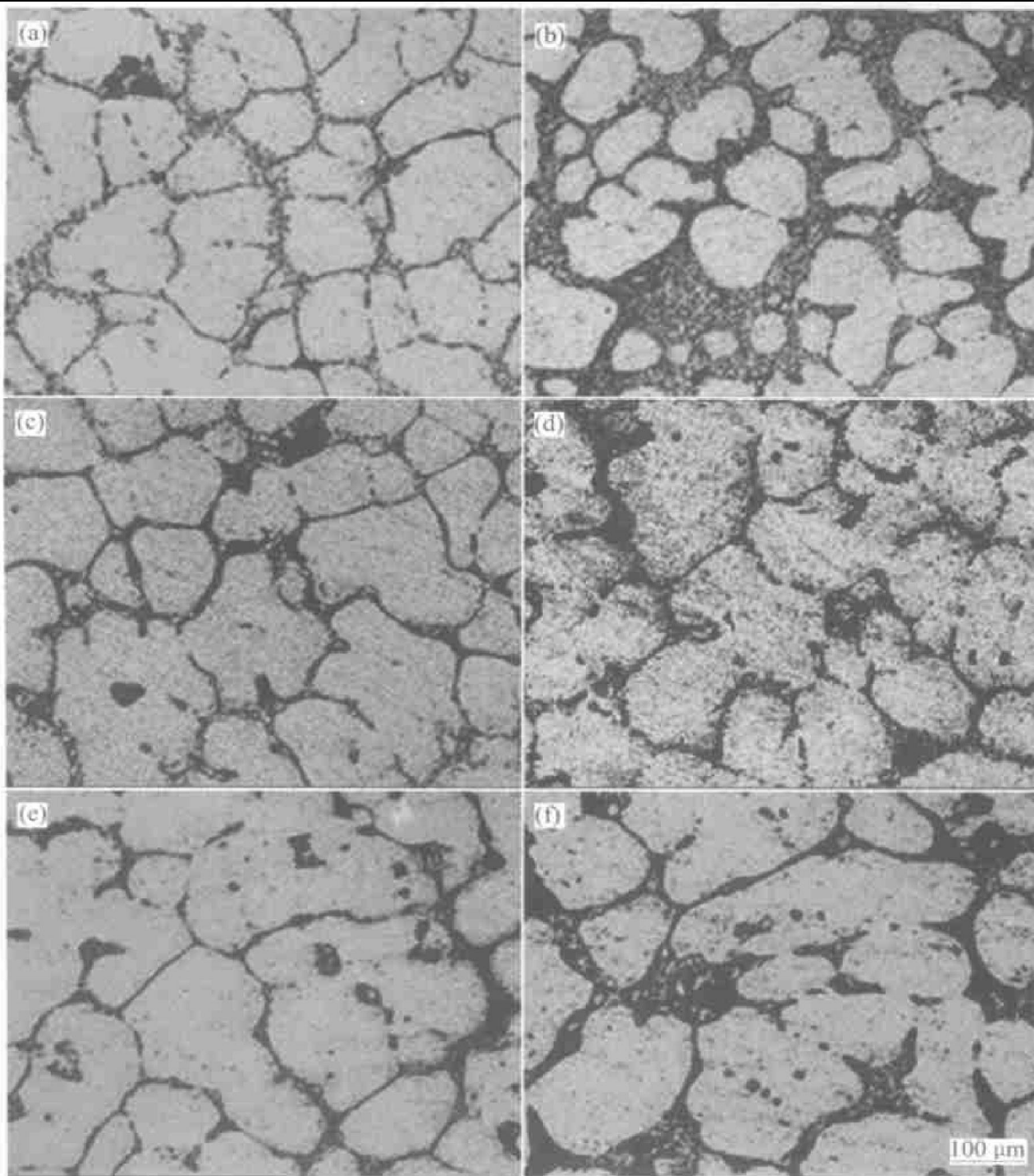


图 3 三步二次加热获得的半固态组织

Fig. 3 Semi-solid microstructures after three steps reheating for different durations
(a) —60 s; (b) —90 s; (c) —120 s; (d) —150 s; (e) —300 s; (f) —420 s

以前以 $2\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 的加热速率加热; $540\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热速率为 $1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; $560\sim 570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热速率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; $570\sim 576\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的加热速率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C/s}$; 然后在 $576\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 60、90、120、150、300 及 420 s。图 4 所示为获得的半固态组织。由图 4 和表 2 可知, 保温 90 s 时固相颗粒最小, 为 $134\text{ }\mu\text{m}$ 左右; 保温 120 s 时真圆度最小, 为 1.16。随着保温时间增加, 固相颗粒有增大趋势。同样, 初晶相真圆度并不随着保温时间的增加而减小。

对比三步加热和四步加热结果, 四步加热虽然能在保温 120 s 时获得比三步加热更小的真圆度值,

但固相颗粒普遍较大, 所以三步加热效果比四步加热更好。事实上, 四步加热和三步加热相比, 只是在 $540\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时加热速率更快, 导致三元 Al-Si-Mg 组织不能充分扩散、熔化。一般认为: 共晶组织的熔化对于半固态初晶相向球状组织演化起关键作用, 而初始半固态组织的形貌特征及晶粒度对半固态初晶相颗粒大小起主要作用。本实验表明, 在二次加热过程中, Al-Si-Mg 三元组织的熔化过程同样对半固态初晶相的尺寸起主要作用。所以在二次加热过程中, 为保证 Al-Si-Mg 三元组织和 Al-Si 共晶相组织的充分熔化扩散, 必须在该温度区间

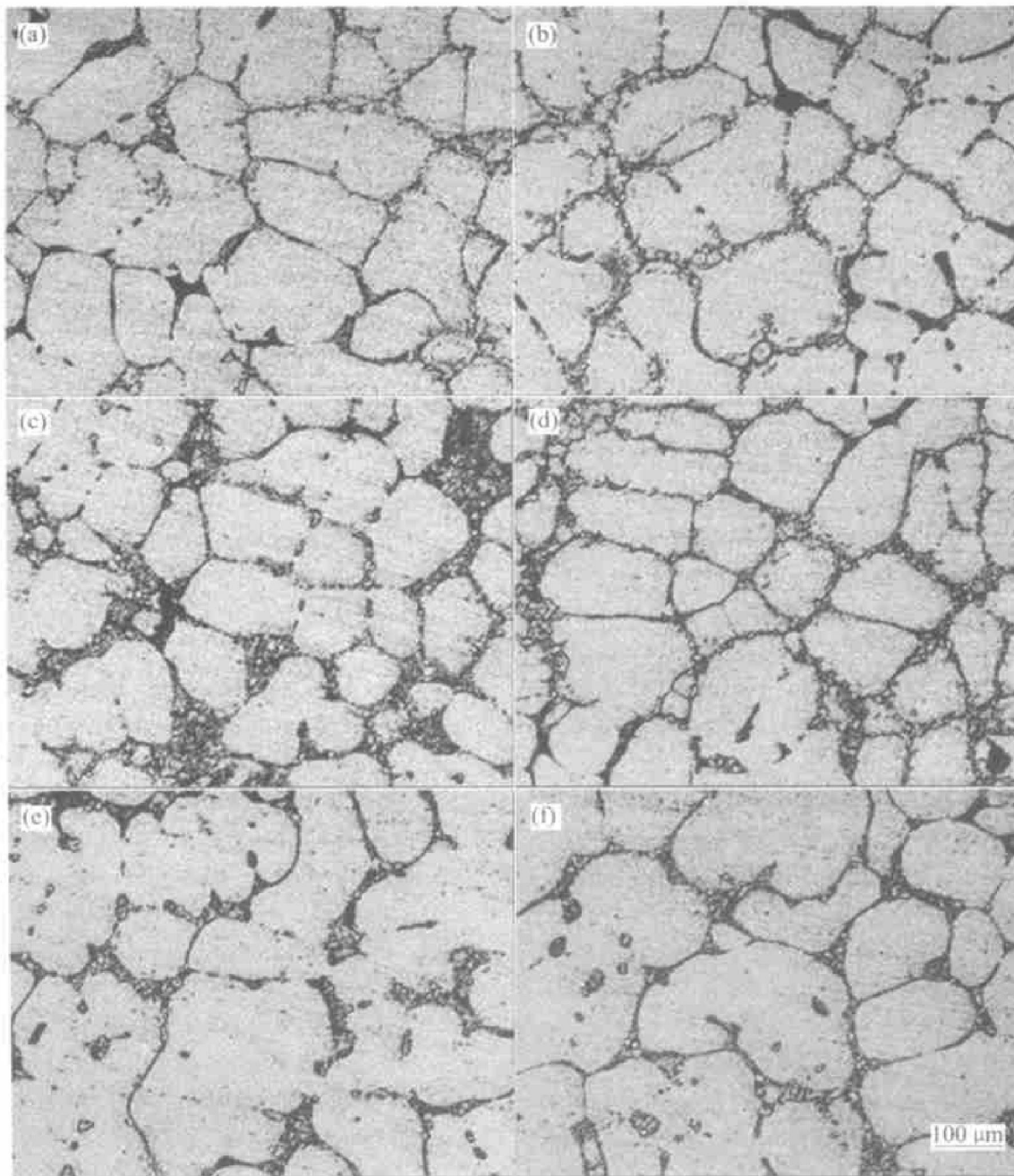


图 4 四步二次加热获得的半固态组织

Fig. 4 Semi-solid microstructures after four steps reheating for different durations
(a) —60 s; (b) —90 s; (c) —120 s; (d) —150 s; (e) —300 s; (f) —420 s

以较小的加热速率进行, 以获得较小尺寸和接近球状的初晶相。另外, 由于半固态二次加热对温度控制要求较严格, 在达到需要的半固态加热温度前, 也应该降低加热速率, 以防止毛坯温度分布不均匀使局部区域的温度急剧升高, 造成后加工过程产生液相外溢等缺陷。

3 结语

1) 半固态坯料二次加热采用三步加热比采用四步加热能获得较好的半固态组织。通过把二次加

热过程分成多步加热, 可以控制某些重要温度点附近的加热速率, 从而控制二次加热过程半固态组织的演变过程。

2) 在 ZL101 半固态合金二次加热过程中, 三元 Al-Si-Mg 合金的熔化条件、初始合金组织的形貌和晶粒度的大小共同决定了最终形成半固态固相颗粒的尺寸。

REFERENCES

[1] 谢水生, 黄声宏. 半固态金属加工技术及其应用 [M].

- 北京: 冶金工业出版社. 1999. 1-12.
- XIE Shu-sheng, HUANG Sheng-hong. *Semi-Solid Forming and its Applications* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999. 1-12.
- [2] Kapranos P, Ward P J, Atkinson H V, et al. Near net shaping by semi-solid metal processing [J]. *Materials and Design*, 2000, 21: 387-394. 1-12.
- [3] 罗守靖, 田文彤, 谢水生, 等. 半固态加工技术及应用 [J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(6): 765-773.
- LUO Shou-jing, TIAN Wen-tong, XIE Shu-sheng, et al. Technology and applications of semi-solid forming [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(6): 765-773.
- [4] 吴炳尧, 戴挺. 半固态触变成形坯料二次加热技术分析 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2000(6): 58-61.
- WU Bing-yao, DAI Ting. Technological analysis on billet reheating of thixoforming in semi-solid state [J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2000(6): 58-61.
- [5] 张奎, 张永忠, 刘国均, 等. 半固态 AlSi7Mg 合金二次加热工艺与组织转变机制 [J]. *金属学报*, 1999, 35(2): 127-130.
- ZHANG Kui, ZHANG Yong-zhong, LIU Guo-jun, et al. Reheating process and structural evolution of semi-solid AlSi7Mg alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1999, 35(2): 127-130.
- [6] 路贵民, 董杰, 崔建忠, 等. 液相线半连续铸造 7075Al 合金二次加热与触变成形 [J]. *金属学报*, 2001, 37(11): 1184-1188.
- LU Gui-min, DONG Jie, CUI Jian-zhong, et al. Study on the reheating and thixoforming of 7075 aluminum alloy cast by liquidus semi-continuous casting [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, 37(11): 1184-1188.
- [7] 陈刚, 蒋益民. 过共晶 AlSi 合金二次加热稳定性的研究 [J]. *铸造*, 2002, 51(6): 346-348.
- CHEN Gang, JIANG Yi-min. Study on the microstructures of hypereutectic AlSi alloys after reheating [J]. *Foundry*, 2002, 51(6): 346-348.
- [8] 叶春生, 叶康生, 张新平, 等. 二次加热和冷却方式对过共晶铝硅合金半固态组织的影响 [J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(S1): 236-240.
- YE Chun-sheng, YE Kang-sheng, ZHANG Xin-ping, et al. Influence of partial reheating and cooling method on semi-solid microstructure of hypereutectic AlSi alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(S1): 236-240.
- [9] Dantzig J A, Midson S P. Billet heating for semi-solid forming [A]. Brown S B, Flemings M C. *Proc 2nd Int Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites* [C]. Warrendale, PA: TMS, 1993: 105-118.
- [10] Choi J C, Park H J. The influence of induction heating on the microstructure of A356 for semi-solid forging [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 87: 46-52.
- [11] Jung H K, Kang C G. An induction heating process with coil design and solutions avoiding coarsening phenomena of Al-6% Si-3% Cu-0.3% Mg (mass fraction) alloy for thixoforming [J]. *Metall Mater Trans A*, 1999, 30A: 2967-2977.
- [12] Jung H K, Kang C G. Reheating process of cast and wrought aluminum alloys for thixoforming and their globularization mechanism [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 104: 244-253.

Reheating of semi-solid ZL101 alloy

YANG Hong-liang¹, ZHANG Zhi-liang¹, I. Ohnaka², H. Yasuda²,
A. Sugiyama², T. Ohmichi²

- (1. National Die and Mold CAD Engineering Research Center,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;
2. Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka, Japan)

Abstract: By reheating the semi-solid microstructure with spheroidal solid particles distributed uniformly in the liquid phase can be obtained. The reheating conditions of the semi-solid billet of ZL101 alloy produced by remelting heat treatment method were studied. The rational reheating route including optimal holding time was obtained through reheating experiments using a high frequency heater with power of 20 kW and frequency of 30 kHz. The results show that it is necessary to divide the whole reheating process into several heating stages with different heating rates in order to obtain satisfactory semi-solid structure before final forming. Finally, the structure evolution during reheating process was discussed.

Key words: remelting heat treatment method; semi-solid alloys; reheating; structure evolution

(编辑 黄劲松)