

[文章编号] 1004 - 0609(2002) 06 - 1246 - 06

加热工艺对半固态 AlSi7Mg 合金的重熔组织的影响^①

丁志勇, 潘洪平, 谢水生
(北京有色金属研究总院, 北京 100088)

[摘 要] 研究了半固态 AlSi7Mg 合金在不同加热温度制度、不同保温温度、不同保温时间下的显微组织。经电磁搅拌的 AlSi7Mg 合金在固相线—液相线温度区间保温加热时, 共晶相首先熔化, 团块状 α 相逐渐演变成球状。随着保温温度的提高, 晶粒形状更圆滑; 随保温时间增加, 晶粒形状也更圆滑。保温温度太高或保温时间太长时, 试样表面有液相析出, 靠近表面部位产生大量孔洞, 试样在自重作用下变形。随炉加热方式所获得的固相颗粒尺寸比热炉加热方式所获得的固相颗粒尺寸大。

[关键词] 半固态; 铝合金; 半固态重熔; 组织

[中图分类号] TG 146.3

[文献标识码] A

自 1970 年以来, 金属半固态成形技术得到了很快发展, 并已经成功地应用于汽车、通讯产品的零部件生产。目前商业化生产主要有流变成形 (Rheoforming) 和触变成形 (Thixoforming) 2 种工艺, 汽车用铝合金零件的生产主要采用后一种工艺^[1~4]。在触变成形生产工艺中, 首先用电磁搅拌的方法制备出铝合金非枝晶组织坯料, 再对坯料重新进行加热重熔 (Remelting), 通过控制加热工艺使坯料达到合适的固相分数和组织状态, 最后将坯料压铸或锻压成形。加热工艺对铝合金半固态组织及后续成型制品质量有重要影响, 因此对它的研究非常重要。国内外很多作者都对此进行了研究^[5~12]。本文作者研究了半固态 AlSi7Mg 合金在不同加热温度制度、不同保温温度、不同保温时间下的显微组织, 探讨了不同工艺参数对组织的影响规律。

1 实验

1.1 实验材料

试验合金为 AlSi7Mg, 其成分见表 1。该合金是目前国外商业应用最为广泛的一种合金, 其固相线和液相线温度分别为 555 ℃和 615 ℃。合金棒料 (直径 $d76$ mm) 是电磁搅拌半连续铸造的。制备工艺为: 电磁搅拌频率为 30~ 50 Hz, 电流强度为 50~ 70 A, 拉坯速度为 90~ 110 mm/min, 冷却水量为 35 L/min, 熔体浇注温度为 745~ 755 ℃。其铸造原始组织包括: 近球形和团块状的初生 α 相, 分

布在晶界的片层状 (α + Si) 共晶相, 见图 1。

表 1 AlSi7Mg 合金的化学成分
Table 1 Composition of AlSi7Mg alloy
(mass fraction, %)

Si	Mg	Fe _{max}	Cu _{max}	Mn _{max}	Zn _{max}	Al
Balance	6.5~ 7.5	0.45~ 0.7	0.20	0.20	0.10	0.10

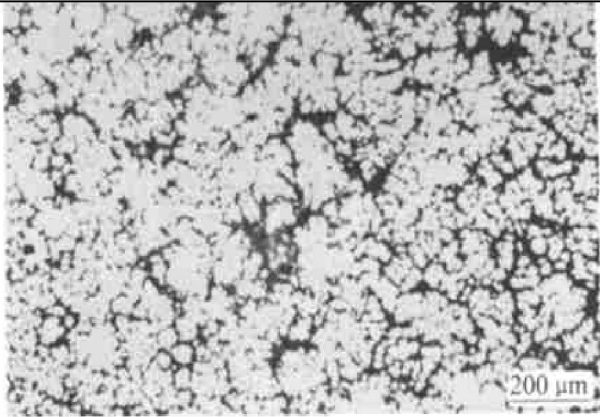


图 1 AlSi7Mg 合金半固态重熔前的原始组织

Fig. 1 Initial microstructure of AlSi7Mg alloy before semi-solid remelting

1.2 半固态重熔工艺

重熔加热的小试样尺寸为 $d10$ mm $\times$ 15 mm, 采用电阻炉加热, 控温精度为 ± 1 ℃。试样置于炉膛中央, 热电偶放置于试样边缘。试验了 2 种加热方式: 第一种方式是将试样置于已经加热到 550 ℃的炉子中, 然后炉子继续升温至预定温度后开始计量保温时间, 本文中称之为热炉加热方式; 第二种方式是将试样放

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (59975011) [收稿日期] 2002- 03- 18; [修订日期] 2002- 05- 24
[作者简介] 丁志勇 (1971-), 男, 博士研究生。

入室温的电阻炉中, 然后炉子升温到预定温度后开始计量保温时间, 本文中称之为随炉加热方式。2 种方式下都进行了不同保温温度、不同保温时间的加热。2 种加热方式下炉子的加热温度- 时间曲线见图 2。试样保温到预定时间后立即取出进行水淬。

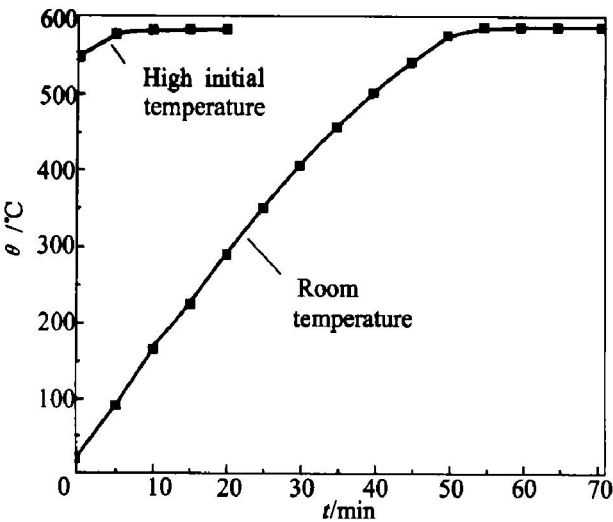


图 2 两种加热方式炉温随时间的变化曲线

Fig. 2 Temperature-time curves of furnace in two kinds of heating methods

1.3 半固态组织观察

水淬后的小试样经粗磨、细磨、抛光后用混合

酸浸蚀, 用光学显微镜观察试样的金相组织。

2 结果及分析

2.1 热炉加热方式下的组织

2.1.1 在不同保温温度、相同保温时间下的组织比较

图 3 所示为热炉加热方式下小试样加热到不同温度保温相同时间(均为 15 min)的组织照片。保温温度分别为(575 ±1) °C, (581 ±1) °C, (587 ±1) °C, (593 ±1) °C, 对应的理论固相分数依次大约为 50%, 46%, 42%, 37%。对比图 1 和图 3(a) 可以看出, 热炉加热方式下在 575 °C 保温 15 min 的组织与原始组织相比, 只有极少部分晶界重熔, α 相基本无变化。图 3(b) 是 581 °C 下保温 15 min 的组织, 可以看到 α 相边缘部分熔化, 晶界变得模糊不清。随着保温温度提高到 587 °C, α 相已经团球化, 有少量液相包裹在 α 相中间, 其余液相均匀分布在 α 相之间。当保温温度提高到 593 °C 时, α 相边缘更加圆整。

图 4 所示是热炉加热方式下 AlSi7Mg 合金小试样在不同保温温度、相同保温时间重熔后的外观照片。试样在 575 °C 保温时表面只有轻微氧化, 在

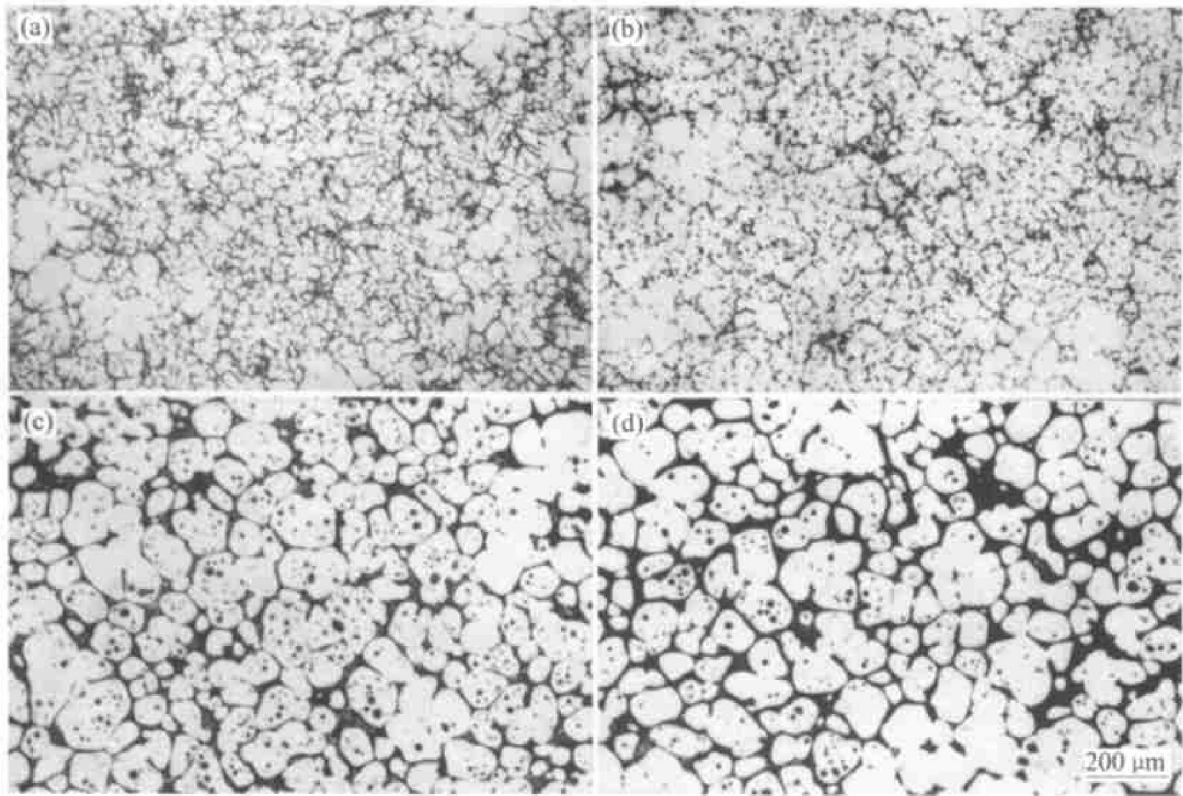


图 3 热炉加热方式 AlSi7Mg 合金在不同保温温度重熔后的组织(保温时间 $t = 15$ min)

Fig. 3 Microstructures of AlSi7Mg alloy remelted at different holding temperatures and for same holding time ($t = 15$ min) from higher initial temperature (a) — $\theta = 575$ °C; (b) — $\theta = 581$ °C; (c) — $\theta = 587$ °C; (d) — $\theta = 593$ °C

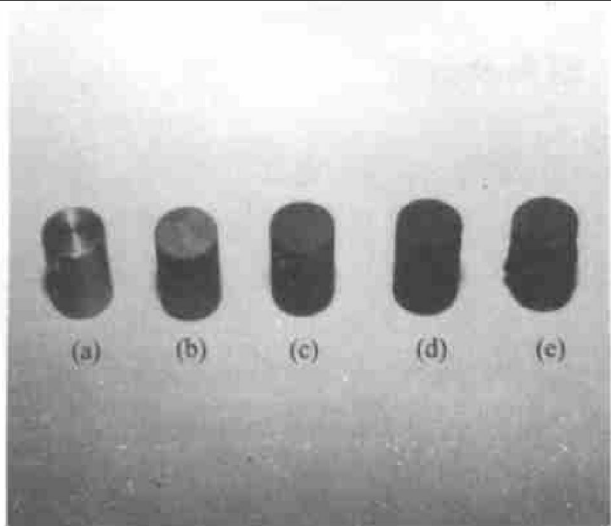


图 4 热炉加热方式 AlSi7Mg 合金
在不同保温温度重熔后的外观
照片(保温时间 $t = 15 \text{ min}$)

Fig. 4 Appearances of AlSi7Mg alloy remelted
at different holding temperatures and
for same holding time ($t = 15 \text{ min}$) from
higher initial temperature

(a) —Initial sample; (b) $-\theta = 575 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
(c) $-\theta = 581 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-\theta = 587 \text{ }^{\circ}\text{C}$; (e) $-\theta = 593 \text{ }^{\circ}\text{C}$

581 $^{\circ}\text{C}$ 以上氧化随温度升高加重。在 593 $^{\circ}\text{C}$ 保温时
表面有大量液相渗出(图 5), 试样变形严重。

2.1.2 在相同保温温度、不同保温时间下的组织 比较

图 6 所示为热炉加热方式下小试样加热到 587
 $^{\circ}\text{C}$ 、保温不同时间的组织照片, 保温时间分别为
10, 20, 25, 30 min, 从中可以看到随着保温时间延
长, 组织的演化过程。保温 10 min 时, α 相已经团
球化, 有少量液相包裹在 α 相中间, 其余液相均匀
分布在 α 相之间, 但液相中尚残留有共晶硅颗粒。
保温时间增加到 20 min, α 相更加圆整, 液相体积
增加, 液相中的共晶硅减少。保温时间增加到 25 和
30 min, 试样表面有大量液相渗出, 试样严重变形,
 α 相尺寸增大。

2.2 随炉加热方式下的组织

2.2.1 在不同保温温度、相同保温时间下的组织 比较

图 7 所示为随炉加热方式下小试样加热到不同温
度保温相同时间(均为 15 min)的组织照片。保温温
度分别为 $(575 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$, $(581 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$, $(587 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$, $(593 \pm 1) \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与热炉加热方式不同, 在 575 $^{\circ}\text{C}$ 保温 15

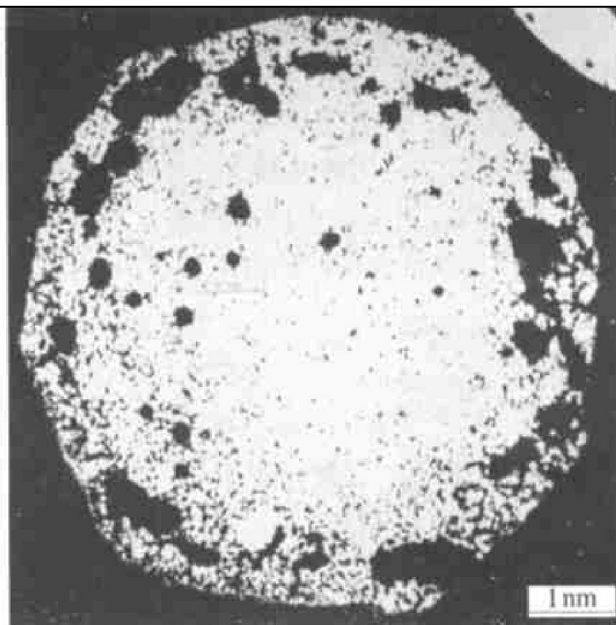


图 5 有液相渗出后的试样横断面

Fig. 5 Appearance of transection sample under
liquid metal exuding

min 后 α 相已经团球化。随着保温温度升高, 液相
体积增加, α 相内部包裹的液相减少, α 相颗粒边
缘更加圆整。但温度升高到 593 $^{\circ}\text{C}$ 保温 15 min 后,
试样同样严重变形。比起热炉加热方式来, 随炉加
热方式下获得的 α 相颗粒尺寸更大些。

2.2.2 在相同保温温度、不同保温时间下的组织 比较

图 8 所示为随炉加热方式下小试样加热到 587
 $^{\circ}\text{C}$ 、保温不同时间的组织照片, 保温时间分别为 5,
10, 15, 20 min。与热炉加热方式相比, α 相更容易
团聚在一起, 所获得的颗粒尺寸也更大。试样保温
20 min 后表面已经有大量液相渗出, 在重力作用下
变形。

3 结论

1) 电磁搅拌的非枝晶 AlSi7Mg 合金在固相线-
液相线温度区间保温加热时, 共晶相首先熔化, 团
块状 α 相逐渐演变成球状。随着保温温度的提高,
晶粒形状更圆滑; 保温时间增加, 晶粒形状也更圆
滑。

2) 非枝晶 AlSi7Mg 合金在固相线-液相线温度
区间保温加热时, 保温温度太高或保温时间太长,
试样表面有液相析出, 靠近表面部位产生大量孔
洞, 试样在自重作用下变形。

3) 半固态重熔加热时, 随炉加热方式所获得的
固相颗粒尺寸比热炉加热方式所获得的

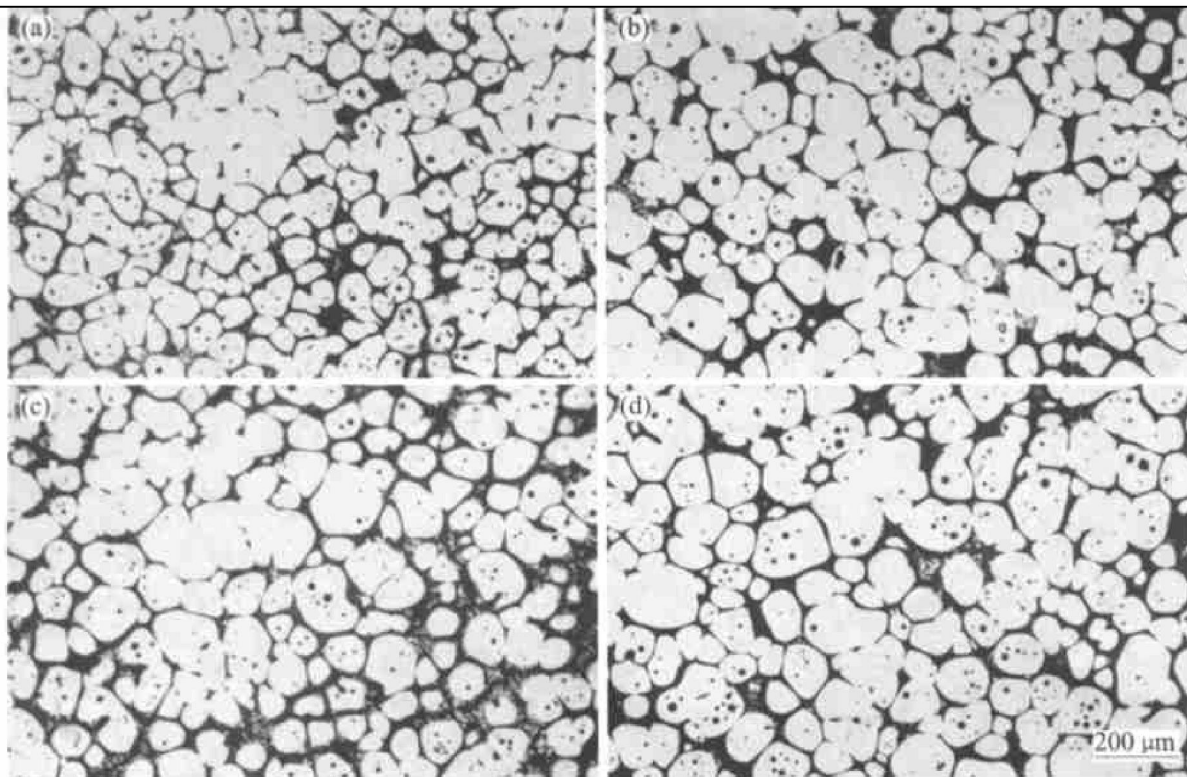


图 6 热炉加热方式 AlSi7Mg 合金在不同保温时间重熔后的组织

Fig. 6 Microstructures of AlSi7Mg alloy heated for different holding times and of same holding temperature($\theta = 587\text{ }^{\circ}\text{C}$) from higher initial temperature
(a) $-t = 10\text{ min}$; (b) $-t = 20\text{ min}$; (c) $-t = 25\text{ min}$; (d) $-t = 30\text{ min}$

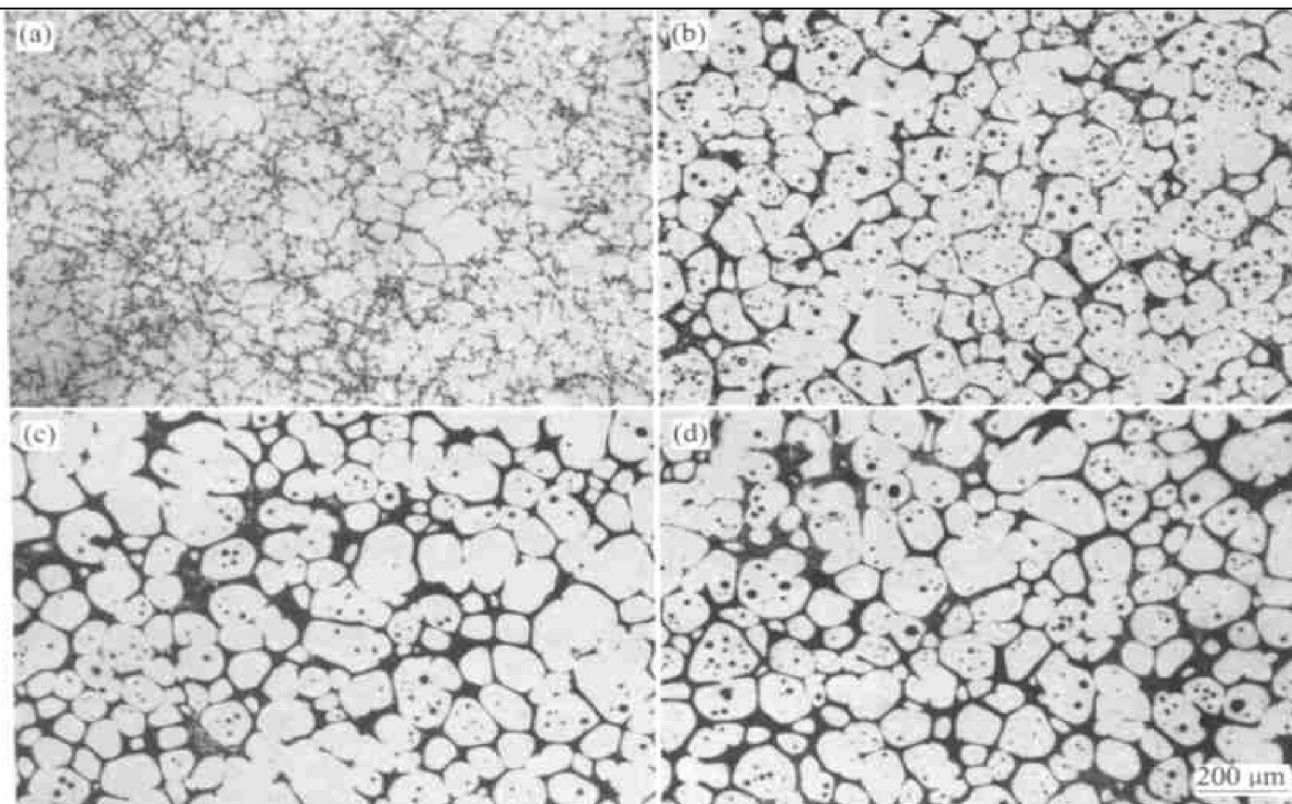


图 7 随炉加热方式 AlSi7Mg 合金在不同保温温度重熔后的组织(保温时间 $t = 15\text{ min}$)

Fig. 7 Microstructures of AlSi7Mg alloy heated at different holding temperatures and for same holding time($t = 15\text{ min}$) from room temperature
(a) $-\theta = 575\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $-\theta = 581\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $-\theta = 587\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $-\theta = 593\text{ }^{\circ}\text{C}$

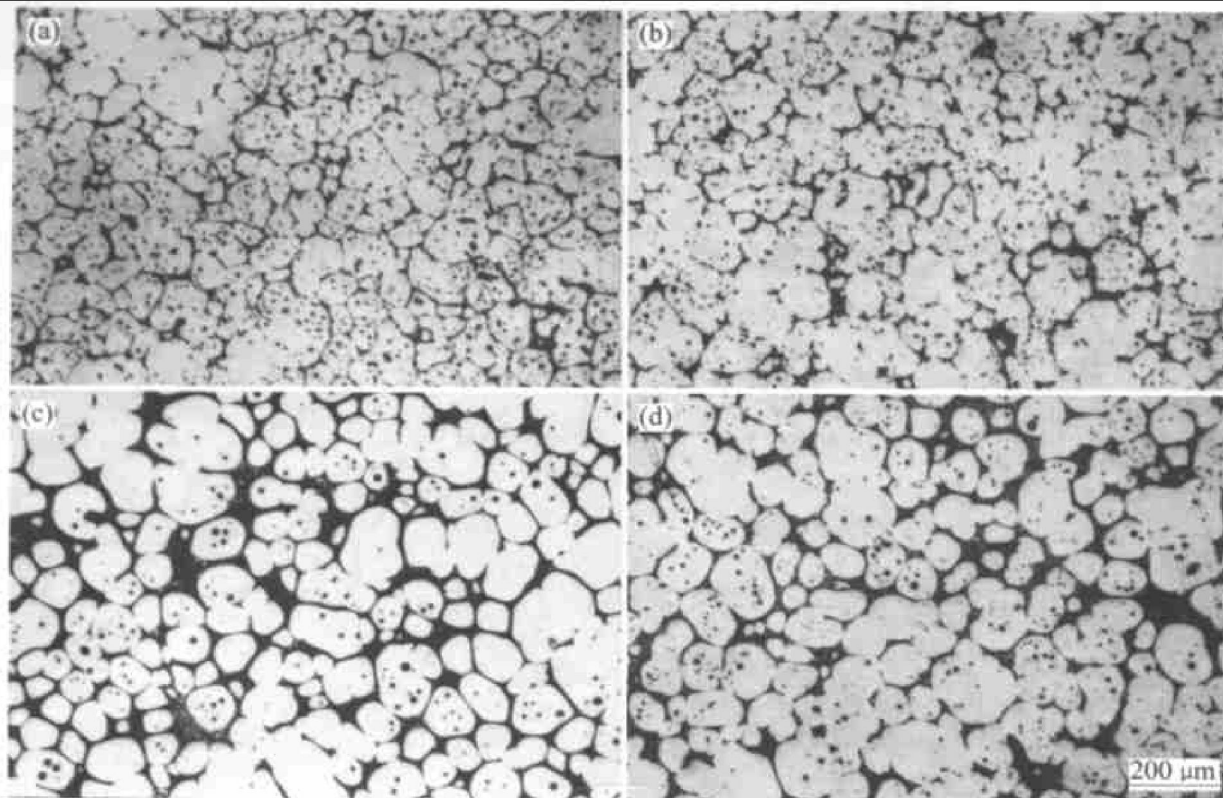


图 8 随炉加热方式 AlSi7Mg 合金在不同保温时间重熔后的组织(保温温度 $\theta = 587\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 Microstructures of AlSi7Mg alloy heated for different holding times and at same holding temperature($\theta = 587\text{ }^{\circ}\text{C}$) from room temperature
(a) $-t = 5\text{ min}$; (b) $-t = 10\text{ min}$; (c) $-t = 15\text{ min}$; (d) $-t = 20\text{ min}$

固相颗粒尺寸大。

4) 非枝晶 AlSi7Mg 合金半固态重熔加热时, 适宜的保温温度区间为 $584\sim 590\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温时间为 $10\sim 20\text{ min}$, 保温温度高相应的保温时间应该更短。

[REFERENCES]

- [1] Flemings M C. Behavior of alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transactions, 1990, 22B: 269 - 293.
- [2] Chiarmetta G. Thixoforming of automobile components [A]. Proceedings the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Sheffield England, 1996: 204 - 207.
- [3] Eisen P. Introduction of SSM cast safety critical components for automotive applications (Keynote Speaker) [A], Proceedings the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Golden Colorado America, 1998. IX - X VI.
- [4] Witulski T, Winkelmann A, Hirt G. Thixoforming of aluminum components for lightweight structures [A]. Proceedings the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Sheffield UK, 1996. 242 - 247.
- [5] Loue W R, Suery M. Microstructural evolution during partial remelting of AlSi7Mg alloys [J]. Material Science and Engineering, 1995, A203: 1 - 13.
- [6] Thanh L N, Suery M. Microstructure and compression behavior in the semisolid state of short-fibre-reinforced A356 aluminium alloys [J]. Material Science and Engineering, 1995, A196: 33 - 44.
- [7] Kapranos P, Gibson R C, Kirkwood D H, et al. Induction heating and partial melting of high melting point thixoformable alloys [A]. Proceedings the 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Sheffield UK, 1996. 29 - 35.
- [8] Midson S, Rudnev V, Gallik R. The induction heating of semi - solid aluminum alloys [A]. Proceedings the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Golden Colorado America, 1998. 497 - 504.
- [9] Garat M, Blais S, Pluchon C, et al. Aluminium semi-solid processing: from the billet to the finished part [A]. Proceedings the 5th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites [C]. Golden Colorado America, 1998. X VII - X XI.
- [10] 毛卫民, 钟雪友, 李立强. 非枝晶 AlSi7Mg 合金在半固态重熔下的显微组织演变 [J]. 铸造, 1998, 8: 10 - 12.

- MAO Weimin, ZHONG Xueyou, LI Liqiang. Microstructural Evolution of AlSi7Mg Non-dendritic Alloys During Semisolid Remelting [J]. Foundry, 1998, 8: 10-12.
- [11] Jae Chan Choi, Hyung Jin Park, Byung Min Kim, The influence of induction heating on the microstructure of A356 for semisolid forging[J]. Journal of Material Processing Technology, 1999, 87: 46-52.
- [12] Matsuura F, Kitamura S. Induction aluminum billet heater for semisolid processing[A]. Proceedings the 5th International Conference on Semisolid Processing of Alloys and Composites[C]. Golden Colorado: America, 1998. 489-496.

Influence of heating processing on microstructure of semi-solid remelted AlSi7Mg alloy

DING Zhiyong, PAN Hongping, XIE Shusheng

(Beijing General Research Institute for Non-ferrous Metals, Beijing 100088, China)

[Abstract] The Microstructure of AlSi7Mg semisolid alloy remelted at different temperature and different holding time is studied. The results show that heated at the temperature between liquidus and solidus, the eutectic in AlSi7Mg alloy stirred by an electromagnetic field is first remelted, and α phase gradually evolves into spheroidal-like shape. The higher the holding temperature or the longer the holding time is, the smoother the side of α phase turns. But if the holding temperature is too high or the holding time is too long, some liquid metal is exuded from the surface of samples, and the samples are deformed by their own gravity. The dimension of the solid phase heated from room temperature is bigger than that heated from a higher initial temperature.

[Key words] semisolid; aluminum alloy; semisolid remelting; microstructure

(编辑 朱忠国)