

文章编号: 1004-0609(2003)05-1151-05

再熔融加热对亚共晶铝硅合金半固态组织演变的影响^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. Graduate School of Engineering, Osaka University Yamada Oka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

摘 要: 提出一种新的亚共晶铝硅合金半固态坯料制备方法, 即再熔融加热制备法, 其特点是不对熔融金属施加任何机械的或电磁的搅拌力, 而是通过在金属凝固过程中进行再熔融加热, 获得具有近球状初晶相的亚共晶铝硅合金半固态组织。研究了 Al-7% Si-0.2% Ti 半固态合金再熔融加热制备过程中再熔融温度及保温时间等关键工艺参数对半固态组织的影响, 并讨论了再熔融加热对半固态组织演变的影响。

关键词: 再熔融加热法; 半固态合金; 组织演变

中图分类号: TG 249.9; TG 146

文献标识码: A

20 世纪 70 年代, Spencer 等^[1, 2] 研究发现, 经过强力搅拌的金属在凝固过程能形成一种具有特殊组织的固液混合浆料, 具有该组织特征金属在固相和液相温度区间具有较好的流动性, 采用普通方法加工时较为容易, 人们把该加工方法称之为半固态加工。半固态加工过程一般有 3 个工序: 半固态坯料制备、坯料二次加热和触变成形工艺。其中半固态材料制备是半固态后续加工的基础。迄今为止报道的半固态坯料制备方法有: 机械搅拌法^[3, 4]、电磁搅拌法^[5]、触变注射成形法^[6, 7]、超音波法^[8, 9]、半固态压铸法^[10]、SIMA 法^[11~13]、粉末法^[10, 14]、倾斜板法^[15] 等。综观以上半固态坯料制备方法, 一般是通过在金属凝固过程中施加物理搅拌力打断枝晶或提高形核率获得具有近球状固相颗粒分布的半固态组织。但是, 机械搅拌涉及到转子转速及转子材料污染的问题; 电磁搅拌也要很好的控制电磁场功率, 而超音波法更涉及到复杂而昂贵的设备问题。

本文作者提出一种新的亚共晶铝硅合金半固态坯料制备法, 其特点是不对熔融金属施加任何机械或电磁搅拌力, 而是通过在金属凝固过程中采用再熔融加热的方法, 获得具有近球状初晶相的亚共晶铝硅合金半固态组织。

1 实验

实验材料为 Al-7% Si-0.2% Ti 合金, 由 Al-

24.4% Si 合金和 AlTi5 合金混合冶炼而成, 其化学组成如表 1 所示。合金中加入钛是为了细化晶粒。Al-7% Si-0.2% Ti 合金的液相线温度为 618 ℃, 固相线温度为 577 ℃。加热设备采用功率为 20 kW, 频率为 30 kHz 的高频电磁感应加热装置。图 1 所示为加热装置简图。其中坩埚尺寸为 d 25 mm × 100 mm。

表 1 Al-7% Si-0.2% Ti 合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of Al-7% Si-0.2% Ti alloy (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Ti	Al
7.035	0.158	0.003	0.200	Bal.

采用再熔融加热法获得半固态组织的机理是: 在液态金属未完全凝固以前, 通过再熔融加热及保温处理, 改变液态金属凝固过程的热流动及传质扩散过程, 从而使已形成的枝晶组织熔断, 为后续的凝固提供更多的形核质点, 即提高形核率, 最后经过保温获得需要的具有近球状初晶相的半固态组织。实验过程为: 将经过浇铸制备的尺寸为 d 25 mm × 80 mm 的毛坯放入石墨坩埚中, 加热到液相线温度以上某一温度 θ_1 经过短暂保温, 冷却到较低温度 θ_2 保温, 再冷却到半固态区温度 θ_3 , 然后再熔融到温度 θ_4 , 保温后通过吹冷气快速冷却。再熔融加热温度曲线如图 2 所示。冷却温度 θ_3 、再熔融加热温度 θ_4 、保温温度 θ_5 及保温时间 t_9 等温度

① 收稿日期: 2002-11-11; 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, 上海市华山路 1954 号 上海交通大学 129 信箱, 200030; 电话: 021-62934419;
E-mail: lionyang@homecity365.com

及时间参数对最后能否形成半固态组织及形成的半固态初晶相的形状及尺寸都起决定性影响。通过表 2 设计的实验方案研究了这些参数对半固态组织的影响。

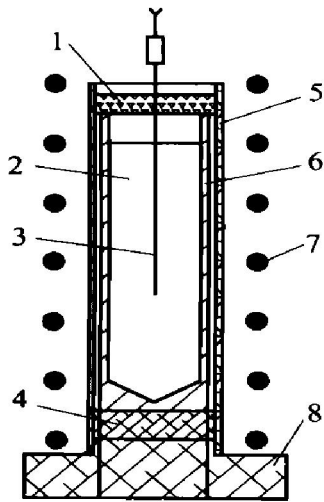


图 1 再熔融加热装置简图

Fig. 1 Sketch of re-melting heating set

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

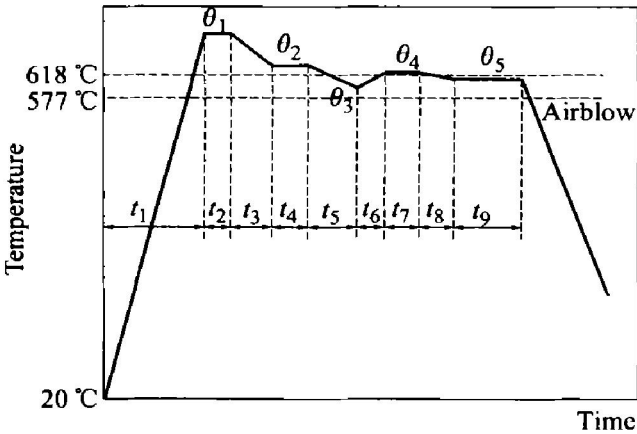


图 2 再熔融加热曲线

Fig. 2 Re-melting heating conditions

2 结果与分析

图 3(a)~ 3(e) 所示分别为 1 号~ 5 号试样的合金组织。由图 3 可知, 在保温时间为 4 min 和 6 min 时得到具有椭球状初晶相的半固态组织。当保温时间较短或较长时都得到粗大的枝晶组织或等轴晶。这是因为, 熔断枝晶需要提供一定的热量, 而且原子的充分扩散也需一定的时间。所以需要一定时间的保温才能得到椭球状半固态初晶相; 然而当保温时间过长时, 某些未熔断的小枝晶会长大粗化, 从而形成图 3(e) 所示的粗大枝状晶。实验结果表明, 在 612 °C 保温 4 min 左右较佳, 但是该实验条件并不是再熔融加热最佳条件, 因为获得的半固态组织实际上并不理想。

图 4(a)~ 4(c) 所示分别为 6 号~ 8 号试样的合金组织。由图可知, 当 θ_3 为 590 °C 时可获得较好的组织。这表明, 若初始冷却温度过低, 易形成粗大的枝晶组织, 即使经过再熔融加热处理也很难熔断枝晶。所以在 θ_3 温度时, 最好能形成细小的等轴晶或枝晶组织, 可以通过加细化剂、提高冷却速度实现。

图 4(d)~ 4(f) 所示分别为 9 号~ 11 号试样的半固态组织。由图 4 可知, 当再熔融加热温度在合金液相线温度 618 °C 附近, 并随后冷却到 612 °C 保温 3 min, 然后吹冷气冷却后, 能够获得近球状固相颗粒分布的半固态组织, 如图 4(d) 所示。而当再熔融温度较低(如 612 °C)或较高(如 623 °C)时, 都难以获得非方向性分布的具有近球状固相的半固态组织。而且, 若再熔融温度超过金属液相线温度太高, 会使金属完全熔融成液相, 最会得到的组织相当于液态金属直接冷却得到的组织, 再熔融加热便

表 2 实验条件

Table 2 Experimental conditions

Sample No.	$\theta_1/^\circ\text{C}$	$\theta_2/^\circ\text{C}$	$\theta_3/^\circ\text{C}$	$\theta_4/^\circ\text{C}$	$\theta_5/^\circ\text{C}$	t_1/s	t_2/s	t_3/s	t_4/s	t_5/s	t_6/s	t_7/s	t_8/s	t_9/s
1	700	640	590	612	590	360	60	120	120	280	44	0	44	0
2	700	640	590	612	590	360	60	120	120	280	44	120	44	0
3	700	640	590	612	590	360	60	120	120	280	44	240	44	0
4	700	640	590	612	590	360	60	120	120	280	44	360	44	0
5	700	640	590	612	590	360	60	120	120	280	44	600	44	0
6	700	640	570	612	612	360	60	120	120	600	120	0	0	180
7	700	640	580	612	612	360	60	120	120	360	120	0	0	180
8	700	640	590	612	612	360	60	120	120	280	120	0	0	180
9	700	640	590	618	612	360	60	120	120	280	120	0	120	180
10	700	640	590	620	612	360	60	120	120	300	120	0	120	180
11	700	640	590	623	612	360	60	120	120	300	120	0	120	180

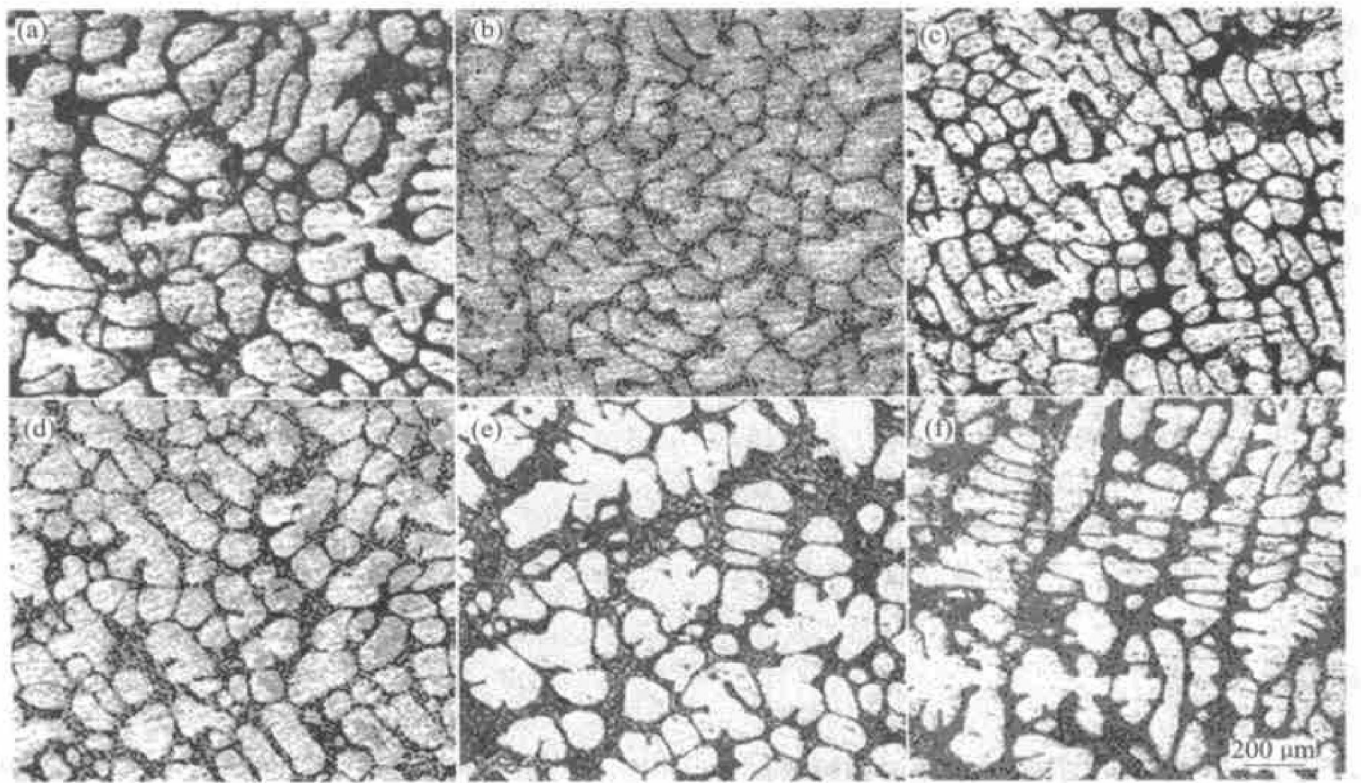
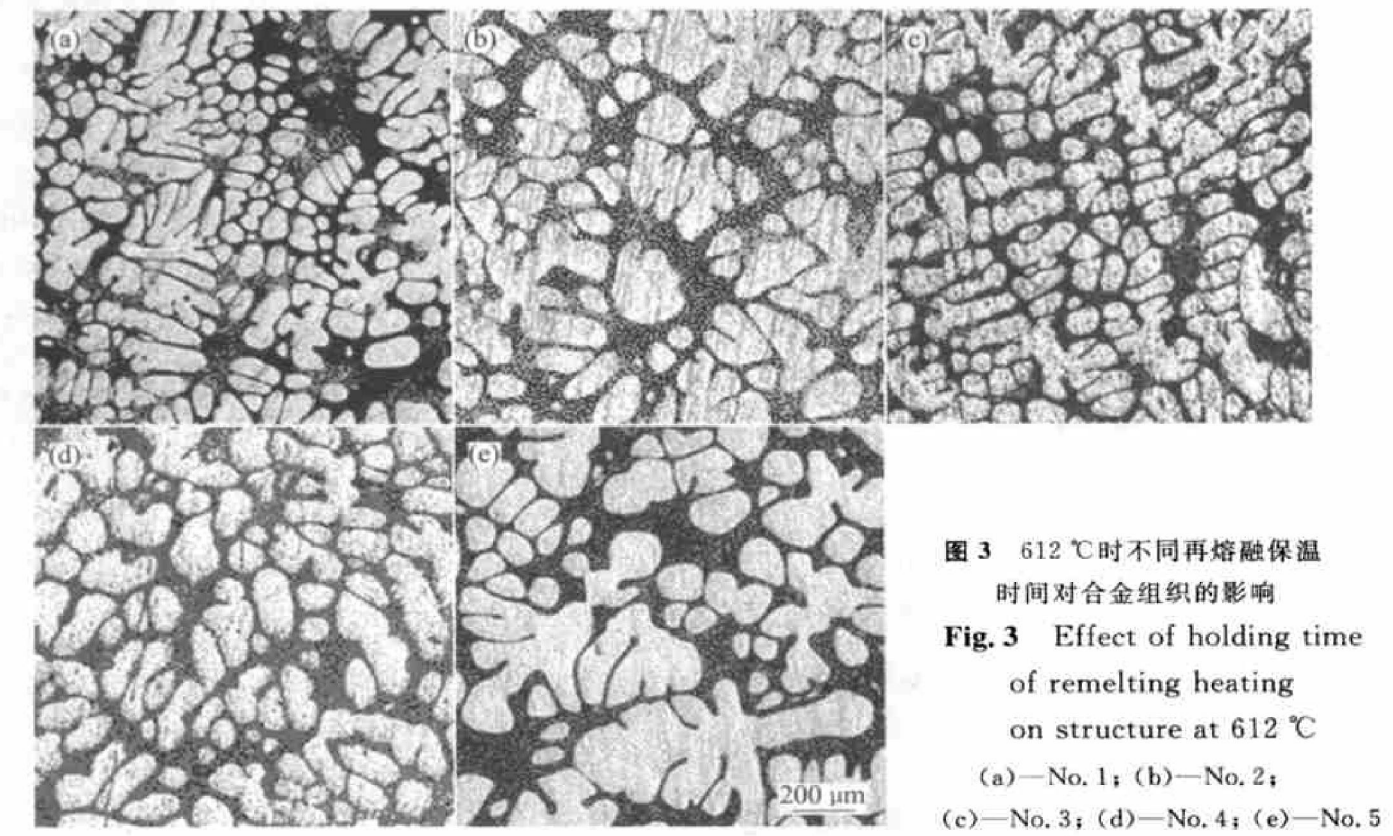


图 4 再熔融加热温度对半固态组织演变的影响

Fig. 4 Effect of re-melting heating temperature on evolution of semi-solid structure
(a) —No. 6; (b) —No. 7; (c) —No. 8; (d) —No. 9; (e) —No. 10; (f) —No. 11

没有实际意义。

为对比采用再熔融加热法和电磁搅拌法^[12] (见图 5) 获得的半固态组织的形貌及初晶相颗粒大小, 采用 Media Cybernetics Inc 的 Image-pro. plus 软件计算半固态组织初晶相颗粒的尺寸及形状因子 (以真圆度作为形状因子), 结果为: 采用电磁搅拌法获得的半固态初晶相颗粒大小为 112.59 μm, 真圆度 1.001; 采用再熔融加热法获得的半固态组织

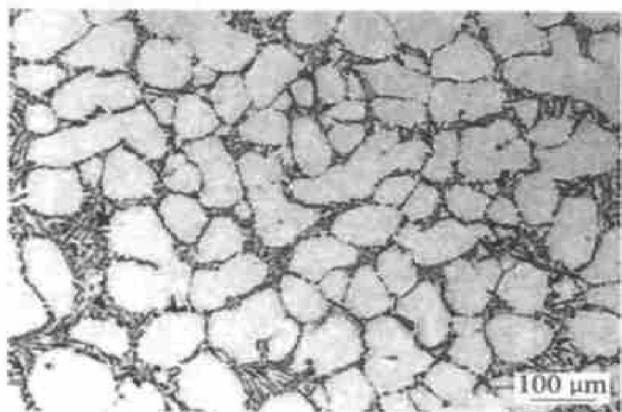


图5 采用电磁搅拌法制备的
A356 半固态合金组织

Fig. 5 Semisolid structure of
A356 alloy produced by EMS method^[12]

(图4(d))的初晶相颗粒大小为 $(107.88 \pm 45.37) \mu\text{m}$, 真圆度为 (1.28 ± 0.24) 。由计算结果及得到的半固态组织形貌可以看出, 二者相差不大, 也表明采用再熔融加热法制备半固态坯料在理论上的可行性。

通过实验得出采用再熔融加热法制备半固态坯料的过程为: 首先将液态金属冷却到半固态温度范围某一温度, 获得细化的枝晶或等轴晶组织(通过控制冷却速率或加入晶粒细化剂获得), 然后以一定加热速率再熔融加热到合金融点左右, 再以一定冷却速率冷却到某一半固态温度并保温一定时间, 最后以较快冷却速率冷却获得半固态组织。经过再熔融加热, 细化的枝晶组织在较高温度下经过传热、传质作用熔断成较小的椭球状或球状颗粒, 甚至熔断成可以作为以后形核质点的颗粒。再熔融后经过冷却和保温, 熔断后的椭球状或球状颗粒经过长大、熟化形成稳定的近球状颗粒组织, 重新形核的颗粒也经过长大、熟化形成近球状颗粒组织。

3 结论

1) 通过亚共晶 Al-Si 合金的半固态再熔融加热实验及获得的半固态组织与电磁搅拌法获得的组织比较, 验证了采用再熔融加热法制备半固态合金坯料的可行性。

2) 经过再熔融加热, 枝晶组织的枝晶被熔断, 熔断的小颗粒成为以后凝固过程中结晶形核的质点。经过再熔融加热以后的冷却和保温, 前期形成的细小的等轴晶和熔断的枝晶经过长大和熟化进而演化为近球状的初晶相的半固态组织。但是, 采用

该方法对于加热设备要求较高, 必须保证在整个再熔融过程对合金温度的精确控制。

REFERENCES

- [1] Spencer D B, Mehrabian R, Flemings M C. Rheological behavior of Sn-15% Pb in the crystallization range [J]. Metallurgical Transactions, 1972, 3(7): 1925 - 1932.
- [2] Joly P A, Mehrabian R. The rheology of a partially solid alloy [J]. J Mater Sci, 1976, 11(8): 1393 - 1418.
- [3] Flemings M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Trans A, 1991, 22(5): 957 - 981.
- [4] Brabazon D, Browne D J. Mechanical stir casting of aluminium alloys from the mushy state: process, microstructure and mechanical properties [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 326(2): 370 - 381.
- [5] Vivès C. Effects of electromagnetic vibrations on the microstructure of continuously cast aluminium alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 1993, 173: 169 - 172.
- [6] Walukas D M, Lebeau S, Deck R F. Advances in thixomolding [A]. Froes F H. Synthesis of Lightweight Metals III[C]. Warrendale, PA: The Minerals, Metals & Materials Society, 1999. 277 - 283.
- [7] Avedesian M M, Baker H. Magnesium and Magnesium Alloys[M]. Materials Park, OH: ASM Int, 1998. 226 - 234.
- [8] Gabathuler J P, Barras D. Evaluation of various processes for the production of billets with thixotropic properties [A]. Brown S B, Flemings M C. Proc 2nd Int Conf Proc Semisolid Alloys Composites[C]. Warrendale, PA: TMS, 1993. 33 - 46.
- [9] Eskin G I. New aspects of plastic deformation of light alloys in thixotropic state [J]. Metallurgy, 1998(4): 18 - 20.
- [10] Okano S. Methods to manufacture semisolid metals [J]. Journal of Japan Society for Technology of Plasticity, 2000, 41: 1162 - 1168.
- [11] 周尧和, 胡壮麟, 介万奇. 凝固技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. 136 - 146.
ZHOU Yao-he, HU Zhuang-lin, JIE Wan-qi. Solidification Technique [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1998. 136 - 146.
- [12] Zoqui E J, Robert M H. Contribution to the study of mechanisms involved in the formation of rheocast structure [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 109(1-2): 215 - 219.
- [13] Kamado S. Semisolid forming of strain-induced various

alloys[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1996, 46(2): 77-82.

[14] 孙家宽. SiC_p/2024 复合材料半固态变形力学行为及机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999.

SUN Jiakuan. Mechanical Behaviors and Mechanism of Deformation of SiC_p/2024 Al Composites at Semisolid State[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999.

[15] Kiuchi M, Sugiyama S. New process to manufacture semisolid metals[A]. Brown S B, Flemings M C. Proc 2nd Int Conference on Semisolid processing of alloys and Composites [C]. Warrendale, PA: TMS, 1993. 47-56.

Effect of re-melting heat treatment on semi-solid structure evolution of hypoeutectic Al-Si 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. Graduate School of Engineering, Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan)

Abstract: A new method——re-melting heat treatment method was presented to produce semisolid billets. Without introducing any physical stirring into the melt, the semisolid structure with ellipsoidal solid particles was obtained by re-melting heating control during solidification of Al-7%Si-0.2%Ti alloy. Some key parameters in the course of re-melting heating control, such as re-melting temperature and holding time, were studied. The effect of re-melting heat treatment on semisolid structure evolution was discussed.

Key words: re-melting heat treatment method; semisolid alloys; structure evolution

(编辑 陈爱华)