

[文章编号] 1004- 0609(2002)02- 0275- 04

高密度脉冲电流对过共晶 Al-Si 合金凝固组织的影响^①

何树先, 王 俊, 孙宝德, 周尧和
(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200030)

[摘 要] 研究了高密度脉冲电流对过共晶 Al-19Si 合金凝固组织的影响。结果表明: 未经任何处理的试样凝固组织中含有大量的长杆状初生 Si, 其长宽比较大, 且共晶 Si 尺寸较大; 而经过高密度脉冲电流处理后, 凝固组织中初生 Si 转变为块状, 长宽比显著减小, 共晶 Si 呈短杆状, 尺寸较小, 另外在试样的局部存在初生 Si 晶粒破碎现象, 这是高密度脉冲电流在熔体内部产生不平衡的电磁力而导致不平衡剪切的结果。

[关键词] Al-19Si 合金; 凝固组织; 高密度脉冲电流处理; 电磁力

[中图分类号] TG 113.1

[文献标识码] A

金属凝固组织细化或改良有利于提高铸件的力学性能。针对金属凝固组织的细化, 常用的方法是向金属熔体中添加晶粒细化剂或者采用各种物理搅拌方法等。随着凝固技术的不断发展, 许多新兴的凝固组织控制工艺应运而生, 其中脉冲电流对金属凝固组织的影响作用非常显著, 并成为当前研究的热点^[1~9], 但这些研究或者集中在操作简单的低熔点合金方面(如 Pb-Sn 合金等), 或者由于脉冲设备不能产生足够高的充电电压和放电电流密度, 致使实验结果不是十分明显。目前对于工业上常用的结构材料, 如 Al-Si 合金研究较少, 尚未见有关文献报道。为此, 作者着重研究高密度脉冲电流(HD-PEC)对过共晶 Al-Si 合金凝固组织的影响。

1 实验

采用 Al-19Si 过共晶铝合金作为实验材料。自行设计的 R-C-L 实验电路和实验装置如图 1 所示, 包括两部分: 一部分是由充电电源、电容器组(由 10 个 100 μF 电容器并联而成, 等效电容为 1 000 μF)、二极管组和触发电路等构成的充电电路; 另一部分是由电极、耐火保温材料装置及实验材料组成的放电电路。实验中, 脉冲电流由充放电电路提供, 其大小变化为:

$$I(t) = U/R \exp(-t/RC) \quad (1)$$

$$J(t) = I(t)/A \quad (2)$$

式中 U —电容器的充电电压, V; R —整个充放

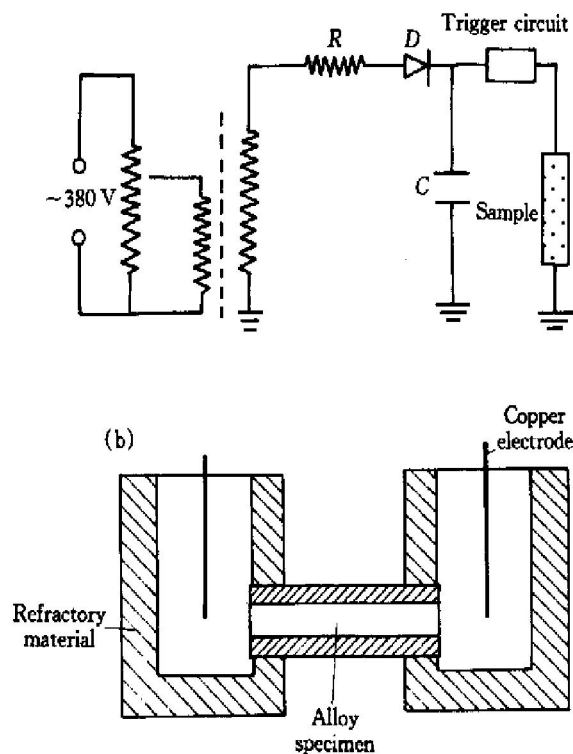


图 1 实验电路和实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric circuit (a) and experimental setup (b)

电电路电阻, Ω ; C —电容, F; A —试样截面积, m^2 。实验中, 电容量保持不变, 充电电压事先设定为 1 500 V, 放电频率为 1 Hz, 经计算, 试验过程中通过试样的电流密度 $J(t)$ 随放电时间的变化如图 2 所示, 从图中可知, 瞬时脉冲电流密度最高可达 $10^{11} A/m^2$ 。

在实验过程中, 先将母合金放入石墨坩埚中,

① [基金项目] 国家重点基础研究发展规划资助项目(G1999064900- 4); 美国 GM(中国) 公司基金资助项目

[收稿日期] 2001- 04- 27; [修订日期] 2001- 06- 14

[作者简介] 何树先(1972-), 男, 博士研究生。

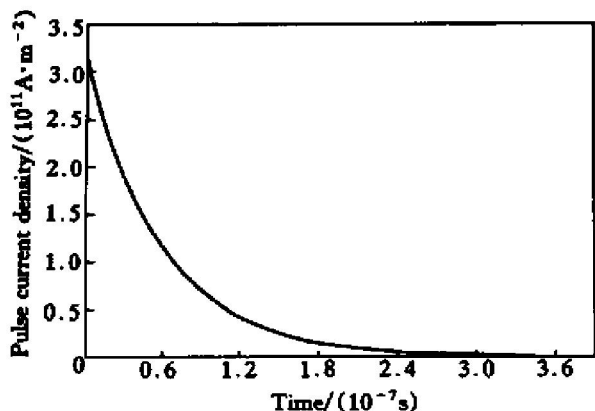


图 2 脉冲电流密度随放电时间的关系曲线

Fig. 2 Change curve of pulse current density with discharge time

通过电阻炉加热到 750 °C 进行熔化, 精炼除气除渣后, 迅速转移到实验装置中, 脉冲电极预热到 700 °C, 充电放电开始, 直到凝固结束, 其间放电次数共计 40 次。作为对比, 另一块同样的母合金在没有脉冲电流的情况下凝固(其它条件相同)。试样凝固冷却后, 经切割、研磨、抛光和腐蚀, 在 LECO-IA32 图像分析仪进行显微组织观察和分析。

2 实验结果

图 3(a) 和(b) 所示分别为未经电脉冲处理和经电脉冲处理的 Al-19Si 过共晶铝合金凝固组织。可见, 经过电脉冲处理的试样凝固组织中初生相形貌发生很大变化, 初生 Si 相由长的杆条状转变为块状, 并且晶粒长宽比减小。图 4(a) 和(b) 分别为未经和经过电脉冲处理的 Al-19Si 共晶组织照片。可见, 没有经过电脉冲处理的试样组织中共晶 Si 尺寸较大; 而经过电脉冲处理以后, 共晶 Si 尺寸明显变小。

另外, 电脉冲处理后, Al-19Si 合金共晶组织的旁边显示有犹如爆炸产生的颗粒状组织, 如图 5(a) 和(b) 所示, 经过分析, 这些颗粒状组织为尺寸微小的 Si 粒子。

3 脉冲电流对熔体作用机制分析

当铝熔体中有脉冲电流通过时, 由于电流随时间而变化, 并且变化速度非常快, 因此根据 Maxwell 方程可知, 变化的电场可以产生变化的磁场, 电磁场相互作用在铝熔体中产生快速变化的电磁力, 其大小可以由式(3)表示:

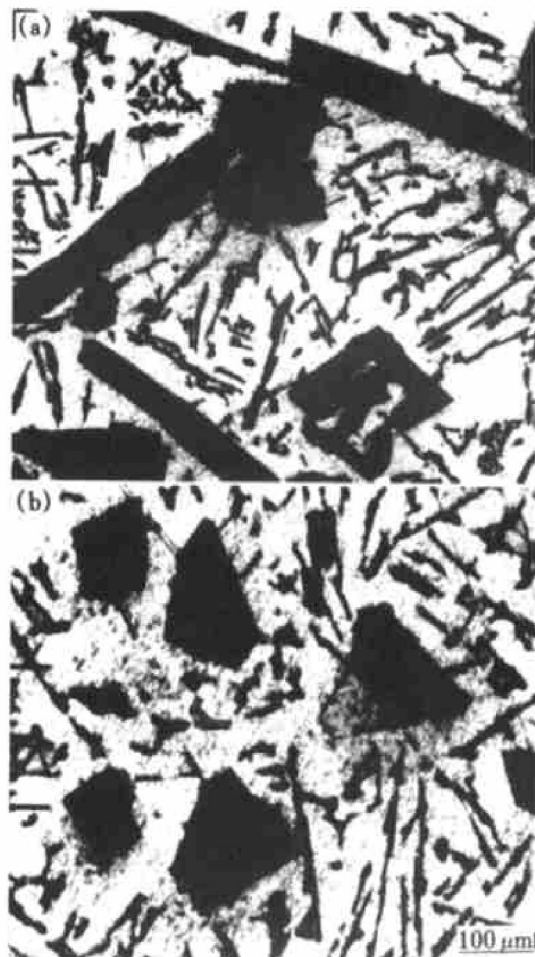


图 3 Al-19Si 合金过共晶组织

Fig. 3 Microstructures of Al-19Si hypereutectic alloy

(a) —Without pulse current treatment;
(b) —With pulse current treatment

$$\nabla f = \nabla [B(t) \cdot I(t)] \cdot dl \quad (3)$$

式中 $B(t)$ —垂直于电流方向的磁感应强度, f —电磁力, $I(t)$ —电流, l —电流作用距离。由于脉冲电流在瞬间也是变化的, 因此在熔体中存在着一定的集肤效应, 电流将聚集于导电熔体的表面, 从而导致电流和感生磁场在熔体中的分布不均匀, 形成一磁感应强度梯度, 靠近熔体表面的电流较大, 感生磁场较强; 而靠近熔体中心电流较小, 感生磁场较弱, 从而导致电磁力也呈梯度分布, 不同的电磁力(大小和方向不同)将导致导电熔体的不同部分产生不同的运动加速度, 从而熔体内各部分间存在一定的剪切力作用:

$$\begin{aligned} \tau_x &= -\eta \partial v_x / \partial y, \quad \tau_y = -\eta \partial v_y / \partial x, \\ \tau_z &= -\eta \partial v_z / \partial xy \end{aligned} \quad (4)$$

式中 v_x, v_y, v_z 分别为金属熔体在 x, y 和 z 方向上的运动速度, η 为动力粘度, τ_x, τ_y, τ_z 分别为 x, y 和 z 方向上的剪切应力。

当剪切应力达到足够高时, 凝固过程中长的树



图 4 Al-19Si 合金共晶组织形貌

Fig. 4 Eutectic structures of Al-19Si alloy

(a) —Without HDPEC; (b) —Treated with HDPEC

枝晶组织就有可能被粉碎成球状或近球状组织。在每一个放电周期内, 脉冲电流随时间的变化非常快, 导致磁场变化迅速, 由此产生的磁场力将在熔体内部形成极强烈的振荡作用, 促使熔体反复被压缩, 不断地前进和后退。电脉冲对熔体的振荡作用: 1) 可以使熔体迅速失去过热, 增加过冷度, 从而减小临界形核尺寸, 提高形核率^[7]; 2) 能够促进溶质的再分配, 使得凝固组织发生改变; 3) 强大的剪切力可以碎断长的杆状枝晶, 产生更多的形核质心, 促进枝晶向块状晶生长。

当振荡作用发生于固液相间的时候, 对于尺寸较大的以小平面生长方式长大的初生 Si 晶粒而言, 强烈的电磁振荡就有可能“摧毁”这种结合强度不高的小平面晶体, 导致局部 Si 晶粒的粉碎, 形成更多的微细颗粒, 这显然有利于增加形核质心的数量, 达到细化或改良凝固组织的目的。但在本实验中, 这种微细颗粒组织只发生在试样局部。

关于凝固组织中共晶组织的变化, 分析认为, 在常规凝固过程中, Al 相在共晶 Si 前沿产生的成分过冷比 Si 在 $\alpha(\text{Al})$ 相前沿产生的过冷度大得多,

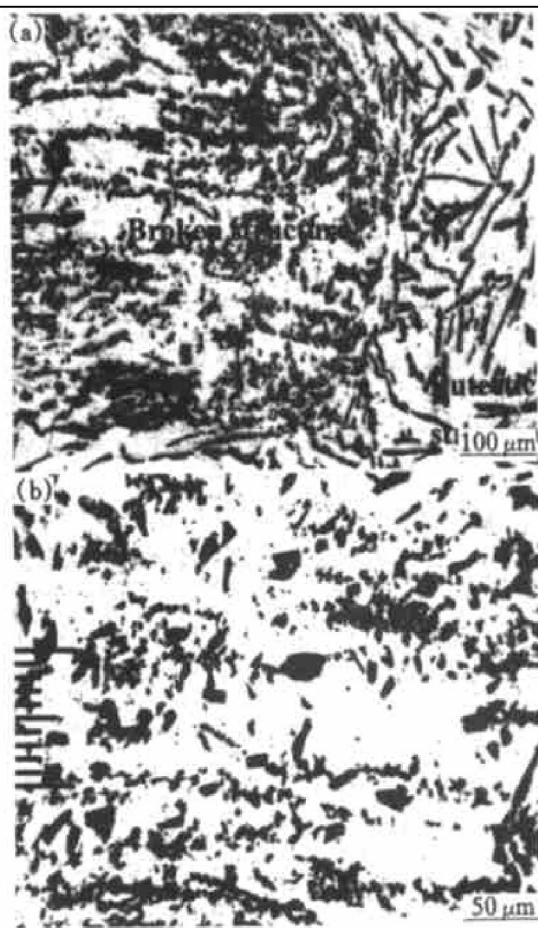


图 5 强电脉冲作用下被粉碎的试样局部初生 Si 相

Fig. 5 Primary Si phase broken under

high pulse current

从而造成硅相领先生长而突出界面^[10]。当通以脉冲电流时, 由于硅是半导体, 而 $\alpha(\text{Al})$ 相是良导体, 所以电流几乎全部从 $\alpha(\text{Al})$ 相中流过, 由电场作用下的界面稳定性动力学理论^[11]分析可知, 此时 $\alpha(\text{Al})$ 相前沿的成分过冷度增大, 所以 $\alpha(\text{Al})$ 相的生长速度将随之增大, 形成初生 $\alpha(\text{Al})$ 胞晶突出界面, 这必然会抑制共晶硅相的进一步生长, 从而导致共晶组织中的共晶硅相对减少, 并且尺寸减小。

4 结论

1) 高密度脉冲电流能够明显改善过共晶 Al-19Si 合金凝固组织, 初生 Si 相由长杆形转变为方块形, 晶粒长宽比显著减小。

2) 经过高密度脉冲电流处理后, 共晶 Si 尺寸明显减小。

3) 高密度脉冲电流产生的强烈的震荡作用能够“摧毁”初生 Si 晶粒, 细化凝固组织。

4) 熔体中呈梯度分布的高密度脉冲电流是导致凝固组织发生变化的根本原因。

[REFERENCES]

- [1] Mesra A K. A novel solidification technique of metals and alloys: under the influence of applied potential [J]. Metall Trans A, 1985(16A): 1354.
- [2] Mesra A K. Mesra technique applied to solidification of cast iron [J]. Metall Trans, 1986(17A): 358– 359.
- [3] Nakada M, Shiohara Y, Flemings M. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. ISIJ International, 1990(30): 27– 31.
- [4] Ahmed S, Bond R, McKannan E. Solidification processing superalloy in an electric field [J]. Adv Mater Proc, 1991, 140(4): 30– 33.
- [5] Ahmed S, McKannan E. Control of morphology in nickel base superalloys through alloy design and densification processing under electric field [J]. Mater Sci Technol, 1994(10): 941– 943.
- [6] Jianming L, Sheng Li, Jin L. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. Scripta Metall, 1994(31): 1691– 1694.
- [7] Barnak J, Sprecher A F S, Conrad H. Colony (Grain) size reduction in eutectic Pb-Sn casting by electropulsing [J]. Scripta Metall Mater, 1995(32): 879– 881.
- [8] 鄢红春, 何冠虎, 周本濂. 脉冲电流对 Sn-Pb 合金凝固组织的影响 [J]. 金属学报, 1997, 33(4): 352– 356.
- YAN Hong-chun, HE Guan-hu, ZHOU Ben-lian. Effect of pulse current on the solidification structure of Sn-Pb alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(4): 352– 356.
- [9] 唐 勇, 王建中, 苍大强. 电脉冲对高碳钢凝固组织的影响 [J]. 钢铁研究学报, 1999, 11(4): 44– 47.
- TANG Yong, WANG Jian-zhong, CANG Da-qiang. Effect of pulse electric discharging on solidification structure of high carbon steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 1999, 11(4): 44– 47.
- [10] 顾根大. 电场作用下金属定向凝固行为的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1989.
- GU Gen-da. Directional solidification behavior of metals under an electric field [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1989.
- [11] 常国威. 电渣感应连续定向凝固技术与电流扰动对枝晶间距的影响 [D]. 北京: 北京科技大学, 1998.
- CHANG Guo-wei. Technology of electroslag induction continuous unidirectional solidification and effect of electric current disturbing to primary space [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1998.

Effect of high density pulse current on solidification structure of hypereutectic Al-19Si alloy

HE Shu-xian, WANG Jun, SUN Bao-de, ZHOU Yao-he

(School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

[Abstract] The influence of high density pulse electric current (HDPEC) on the solidification structure of hypereutectic Al-19Si alloy was studied. The results show that there exist lots of primary Si phases with long pole shape in the solidification structure when the specimen are not treated by HDPEC, and the aspect ratio of Si grain is larger. The size of eutectic Si is large. However, through HDPEC, the morphology of the primary Si phases changes into blocky structure greatly, and the aspect ratio of Si grain becomes smaller. The eutectic Si phases appear short pole, and the size of them decreases obviously. Moreover, there exist some smallest and broken Si grains in certain area of the specimen, which is resulted from the non-equilibrium distribution of the electric magnetic force existed in the melt.

[Key words] Al-19Si alloy; solidification structure; high density pulse current; electric magnetic force

(编辑 杨 兵)