

[文章编号] 1004- 0609(2002) 03- 0426- 04

高密度脉冲电流对 A356 铝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 A356 铝合金凝固组织的影响, 实验中对液相线以下熔体的凝固过程在不同阶段进行电脉冲处理。对比实验结果表明: 经过电脉冲处理后, A356 的合金凝固组织得到明显细化; 在同样的电脉冲条件下, 凝固组织细化效果与电脉冲放电开始时间有关, 凝固过程中放电开始时间越早, 凝固组织细化效果越明显; 反之, 凝固组织细化效果较差; 同时, 脉冲充电电压越高, 凝固组织细化程度越大。定量计算了脉冲电流产生的电磁力并分析了脉冲电流影响凝固组织的作用机制。

[关键词] A356 铝合金; 凝固组织; 脉冲电流; 细化

[中图分类号] TG 113.1

[文献标识码] A

近 10 年来, 利用电流改善凝固组织的方法日益受到人们的关注^[1~ 4], 其中特别引人注目的是有关脉冲电流对凝固组织的作用^[5~ 10]。据现有的研究结果分析, 脉冲电流处理很有可能成为一种新兴的、发展潜力巨大的凝固组织控制工艺。但由于设备或者工艺方法的限制, 近年来有关脉冲电流的研究没有取得实质性的进展, 脉冲电流对凝固组织的影响机理仍不清楚, 并且大多数研究集中在低熔点的 Pb-Sn 合金方面, 对于高熔点合金研究得较少。为了探讨电脉冲对亚共晶铝合金的作用, 本文作者研究了高密度脉冲电流(HDPEC)对工业常用铝合金 A356 的凝固组织的影响。

1 实验方法

1.1 实验材料

采用工业 A356 合金作为实验原材料, 其成分如表 1 所示。

表 1 A356 合金化学成分(质量分数, %)

Table 1 Composition of A356 alloy
(mass fraction, %)

Si	Mg	Fe	Cu	Zn	Ti	Al
7.1	0.403	0.096	0.052	0.007	0.134	Bal.

1.2 实验装置

自行设计的 R-C-L 实验电路和实验装置包括两部分: 一部分是由充电电源、电容器组(由 10 个

100μF 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

$$I(t) = \frac{V}{R} \exp(-\frac{t}{RC}) \quad (1)$$

$$J(t) = \frac{I(t)}{A} \quad (2)$$

式中 V —电容器充电电压, V; R —整个充放电电路电阻, Ω; C —电容, F; A —试样截面积, m²。

为了能够定量的评价电脉冲放电过程参数(如放电电压、振荡频率、脉冲电流有效作用时间等), 实验中采用 TDS-210 型实时数字示波器进行测试和记录。

1.3 实验过程

实验装置如图 1 所示。先将母合金放入石墨坩埚中, 通过电阻炉加热到 750 ℃进行熔化。然后通过精炼除气、除渣, 随炉冷却到凝固开始。脉冲电极在插入熔体之前经过预热。首先考察放电开始时间对凝固组织的影响, 充电电压设定为 1 000 V, 脉冲放电间隔时间为 1.5 s, 分别在凝固过程开始阶段(614.5~ 605 ℃)和结束阶段(590~ 570 ℃)进行放电处理, 凝固过程由计算机控温, 如图 2 所示。然后考察充电电压对凝固组织的影响, 选择凝固过程结束阶段进行电脉冲处理。作为对比试验, 熔体在相同条件下凝固制备对比试样。试样凝固冷却后,

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

[收稿日期] 2001- 08- 30; [修订日期] 2001- 10- 19

[作者简介] 何树先(1972-), 男, 博士研究生。

经过切割、研磨、抛光和侵蚀(侵蚀剂为 0.5% HF 溶液), 通过 LECO-IA32 图像分析仪进行显微组织观察和分析。

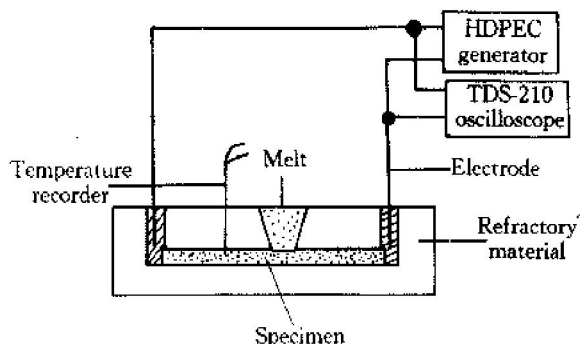


图 1 对凝固区间熔体实施电脉冲处理的实验装置

Fig. 1 Discharging setup for solidification course of A356 alloy

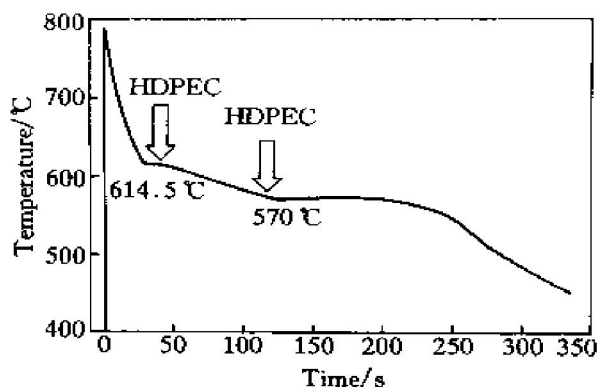


图 2 A356 合金凝固过程中不同时刻施加电脉冲作用图

Fig. 2 Discharge of HDPEC at different stage of solidification of A356 alloy

2 实验结果

2.1 脉冲电流放电过程测试与观察

为了能够定性和定量的分析电脉冲的放电过程, 通过 TDS-210 型实时数字示波器测试电脉冲放电波形, 如图 3 所示。从测试结果可知, 当充电电压为 1 000 V 时, 加在试样两端的瞬时放电电压约为 450 V, 脉冲放电过程振荡频率约为 6 kHz, 脉冲有效放电时间约为 500 μ s, 脉冲放电振荡频率和有效放电时间不随初始充电电压的变化而变化, 始终保持恒定。利用 ZY9858 微电阻测试仪测的放电电路电阻为 2.2 m Ω , 通过公式 (1), (2) 计算可得, 瞬间通过熔体的最大电流约为 2.2×10^5 A。

2.2 凝固组织观察

图 4 为常规砂型凝固组织金相照片, 图中白色

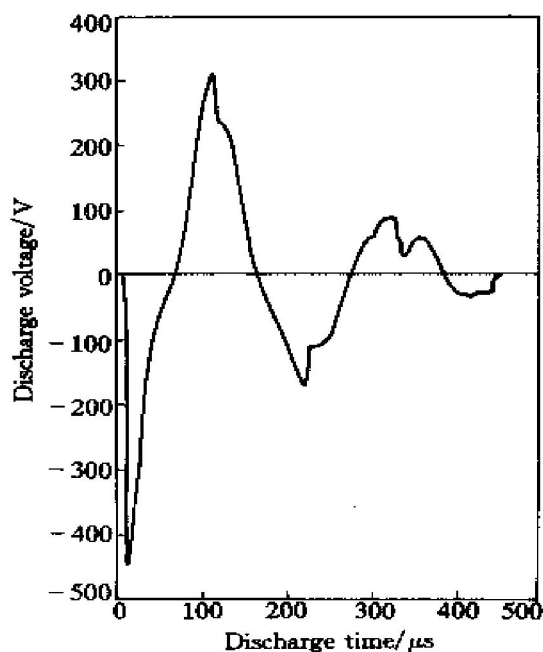


图 3 充电电压为 1 000 V 时电脉冲放电过程测试结果

Fig. 3 Measured voltage drop across specimen during discharge for initial capacitor bank voltage of 1 000 V

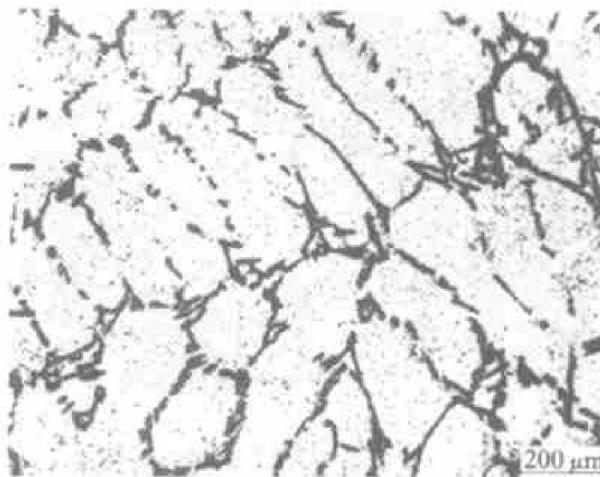


图 4 720 °C 浇注 A356 合金常规砂型凝固组织

Fig. 4 Typical A356 alloy sand mold solidification structure poured at 720 °C without HDPEC treatment

相为 α (Al) 基体, 灰色相为共晶组织。可以看出, 没有经过电脉冲处理的凝固组织呈粗大树枝晶状。图 5 为充电电压为 1 000 V 时, 经过电脉冲处理的砂型凝固组织金相照片, 其中图 5(a) 为电脉冲施加于凝固开始阶段, 图 5(b) 为电脉冲施加于凝固结束阶段。从图中可以看出, 在电脉冲施加条件相同的情况下, 电脉冲在凝固开始阶段放电与在凝固结束阶段放电对凝固组织的影响不同。图 5(a) 中凝固组织呈非树枝晶组织, 并且晶粒细小; 图 5(b) 中凝

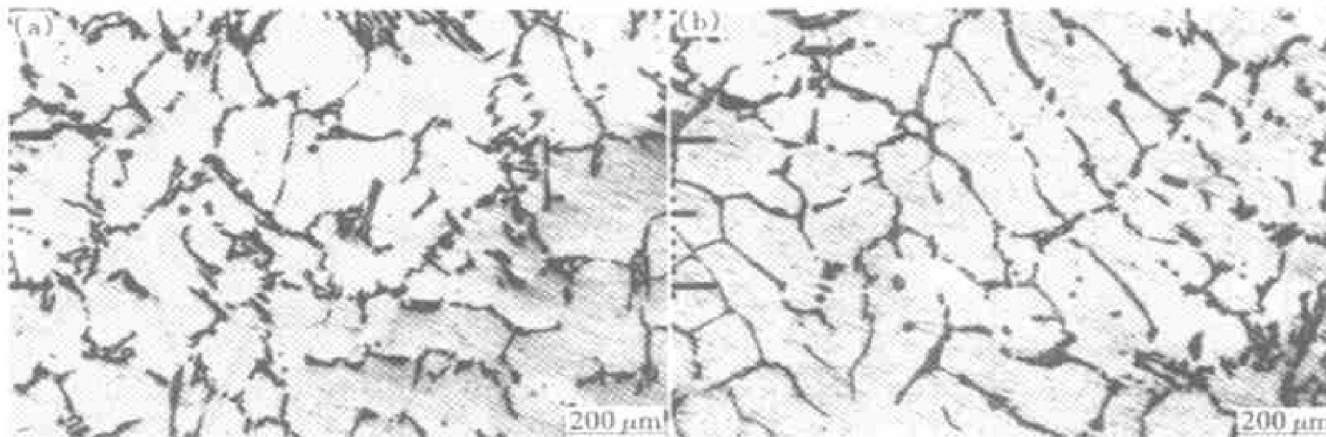


图 5 充电电压为 1 000 V 时不同阶段放电对凝固组织的影响

Fig. 5 A356 solidification structure with 1 000 V HDPEC discharging during different solidification course
(a) —Discharge at onset of solidification; (b) —Discharge at end of solidification

固组织则呈现明显的树枝晶组织，晶粒比较粗大。图 6 所示为充电电压为 2 000 V 时，在凝固结束阶段施加电脉冲时的凝固组织，对比图 5(b) 可以看出，图 6 中的组织形貌发生明显改变，呈等轴晶状组织，二次枝晶间距(DAS)较大。

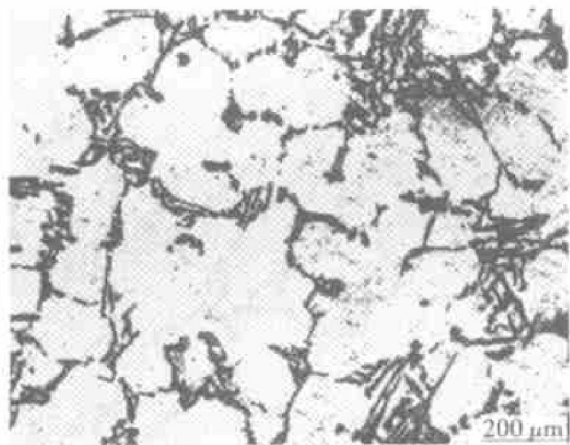


图 6 充电电压为 2 000 V 时在凝固结束阶段施加电脉冲时的凝固组织

Fig. 6 A356 solidification structure with 2 000 V HDPEC discharging during end stage of solidification course

3 讨论

以上实验结果表明，在亚共晶 A356 铝合金凝固过程中施加电脉冲能够达到细化或改善凝固组织的目的。但在凝固过程中不同时刻施加电脉冲对凝固组织影响作用不同，电脉冲施加时间越早，组织细化效果越明显；反之，则越差。分析认为，高密度脉冲电流细化凝固组织的主要原因在于电脉冲在金属熔体中所产生的电磁力。单位面积上所产生的最大电磁力为^[11]

$$F = \frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2 a^2} \quad (3)$$

式中 μ_0 —真空磁导率， $4\pi \times 10^{-7}$ H/m； I —通过熔体试样的最大电流，A； a —试样半径，m。

在本试验中，当充电电压为 1 000 V 时，通过公式(1)计算得到最大电流为 2.2×10^5 A，试样有效半径为 10^{-2} m，从而电脉冲通过单位面积熔体所产生的最大电磁力为 7.7×10^6 N。而当充电电压为 2 000 V 时，根据公式(3)知，脉冲电流在熔体中产生的最大电磁力将增大到原来的 4 倍，远大于文献[6]所报道的电磁力数值。式(3)同时表明，电磁力的大小与通过熔体的电流的平方成正比，电流越大，单位面积产生的电磁力就越大，对熔体的作用就越强。

当熔体温度降低到液相线以下时，熔体中将有固相析出，在通常凝固条件下，熔体中的原子根据晶体连续长大原理，按照非小平面长大方式在已有的初生固相上趋向生长，形成树枝晶组织形貌。通过杠杆定律计算得，610 °C 熔体中约含有 9.1% 的固相，而 570 °C 的熔体中则含有约 90% 的固相，并且可以想象，熔体温度越高，熔体中的初生固相强度越小；反之，熔体温度越低，熔体中形成的固相强度越高。因此，当具有一定功率的电脉冲输入到不同温度的熔体中时，电脉冲所产生的电磁力对熔体结构的影响作用也就不同。当熔体温度较高，固相强度较低，只需适当强度的电磁力就能够破碎熔体中的初生固相，干扰晶体的正常生长过程；而当熔体温度较低，熔体中固相强度较高时，则需要相当大的电磁力，才能够达到破碎固相树枝晶的目的(如图 6)。这样经过电脉冲处理后，熔体凝固过程中便形成很多非枝晶或类枝晶组织，随着熔体温度

的降低, 这些非枝晶或类枝晶组织可以作为形核质心, 进一步长大成非枝晶或等轴晶组织。另外, 当电脉冲在熔体中所产生的电磁力不足以粉碎已有的树枝晶组织时, 如充电电压为 1 000 V, 施加于凝固过程后期时, 电脉冲可以起到干扰金属原子的正常迁移规律, 减慢枝晶生长速度的作用, 从而达到细化凝固组织的目的, 但不能改变已有凝固组织的形貌(如图 5(b))。

4 结论

1) 在凝固过程中施加电脉冲, 亚共晶 A356 铝合金的凝固组织能够得到不同程度的细化。

2) 电脉冲充电电压为 1 000 V 时, 电脉冲在凝固过程开始阶段放电对凝固组织的细化效果比在凝固过程后期放电更明显。

3) 电脉冲充电电压为 2 000 V, 并且在凝固后期放电时, 能够明显改变最终凝固组织形貌, 由树枝晶转变为等轴晶组织。

[REFERENCES]

- [1] Mesra A K. Misra technique applied to solidification of cast iron [J]. *Metall Trans*, 1985, 16A: 1354.
- [2] 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 electro-slag induction continuous unidirectional solidification and effect of electric current disturbing to primary space [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 1998.
- [3] Ahmed S, Bond R. Solidification processing superalloys

in an electric field [J]. *Advanced Material and Processes*, 1991, 10: 30– 33.

- [4] Ahmed S, McKannan E. Control of γ' morphology in nickel base superalloys through alloy design and densification processing under electric field [J]. *Mater Sci Technol*, 1994, 10: 941– 943.
- [5] Nakada M, Shiohara Y, Flemings M. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. *ISIJ International*, 1990, 30(1): 27– 31.
- [6] Li J M, Li S L, Li J, et al. Modification of solidification structure by pulse electric discharging [J]. *Scripta Metall*, 1994, 31(12): 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(6): 879– 881.
- [8] 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 Jianzhong, 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.
- [9] 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.
YAN Hong-chun, HE Guan-hu, ZHOU Ben-lian. Effect of pulse electric discharging on solidification structure of high carbon steel [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(4): 352– 356.
- [10] 秦荣山. 电脉冲作用下的非平衡转变研究 [D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 1996.
QIN Rong-shan. Investigations on the nonequilibrium transformation by pulse electric current [D]. Shenyang: Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Science, 1996.

Effect of high density pulse current on solidification structure of A356 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 effect of high density pulse electric current (HDPEC) on the solidification structure of A356 alloy was investigated. In the experiments, the HDPEC was discharged at different stage of the solidification of A356 alloy. The control results showed that the solidification structure of A356 alloy was refined apparently when the HDPEC was discharged during the solidification. And the microstructure refinement is related to the beginning time of the HDPEC discharge, the earlier the discharge during the solidification, the better the refinement. Meanwhile, the higher HDPEC discharge is beneficial to modification of solidification structure. The mechanism of HDPEC discharge was analyzed quantitatively.

[Key words] A356 alloy; solidification structure; electric pulse current; refinement

(编辑 袁赛前)