

高密度脉冲电流对 A356 铝合金低温熔体凝固组织的影响 *

何树先 王 俊 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 铝合金低温熔体凝固组织的影响。实验中对 680 和 630 ℃ 的低温熔体施加脉冲电流处理, 对比试验和凝固曲线测试结果表明, 低温熔体中施加脉冲电流有利于增大凝固过冷度, 提高冷却速率, 缩短凝固时间, 细化凝固组织。同时, 经脉冲电流处理后, 随熔体的保温时间延长, 凝固组织逐渐粗化。分析认为, 低温熔体结构比凝固过程本身更能影响最终凝固组织。

关键词 A356 铝合金、低温熔体、凝固组织、高密度脉冲电流

中图分类号 TG113.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)05-0479-04

EFFECT OF HIGH DENSITY PULSE ELECTRIC CURRENT ON THE SOLIDIFICATION STRUCTURE OF LOW TEMPERATURE MELT OF A356 ALUMINIUM ALLOY

HE Shuxian, WANG Jun, ZHOU Yaohe

School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030

Correspondent: HE Shuxian, Tel: (021)62932870, E-mail: sxhe922@mail1.sjtu.edu.cn

Supported by GM (China) Co. Funds

Manuscript received 2001-09-06, in revised form 2002-01-06

ABSTRACT The effect of high density pulse electric current (HDPEC) on the solidification structure of the low temperature melt(LTM) of commercial A356 aluminum alloy was investigated. In the experiments, the HDPEC was discharged in the LTM(680 and 630 ℃). The control experiments and cooling curve test show that HDPEC discharged in LTM can increase the undercooling and cooling rate of the solidification, shorten the cooling time and refine the solidification structure. Meanwhile, the holding time of melt treated has an adverse effect on the solidification structure. The longer of the holding time of the melt treated with HDPEC, the coarser the microstructure is. It is analyzed that the effect of the structure of LTM on the final solidification structure is more important than that of the solidification course.

KEY WORDS A356 aluminum alloy, low temperature melt, solidification structure, high density pulse electric current

亚共晶 A356 铝合金是重要的工业材料, 近年来, 围绕着提高 A356 铝合金的力学性能, 研究利用各种方法, 如添加细化剂、低温浇注、超声波及电磁搅拌等, 以达到细化凝固组织, 提高力学性能的目的。电脉冲处理是近年来发展起来的一种新型的改善凝固组织的方法, 从已有的研究成果来看^[1-5], 电脉冲对低熔点 Pb-Sn 合金凝固组织有着明显的细化效果。随着凝固技术和团簇理论的发展, 越来越多的研究者开始探讨液态金属结构对最终凝固组织的影响作用, 有关研究发现^[6-9], 在液相线以上温

度较低的熔体中存在许多类固相原子团簇, 当温度降低到液相线以下时, 这些类固相原子团簇长大析出形成初生固相。这些类固相原子团簇与析出固相及凝固组织之间的关系对于控制和细化凝固组织无疑是相当重要的。根据前人主要针对合金凝固过程放电的研究现状, 作者推测低温熔体中的团簇同样可以通过物理或者化学方法加以改变。因此, 本文研究了在 A356 铝合金低温熔体中施加高密度脉冲电流对最终凝固组织的影响作用。

1 实验方法

采用工业应用的 A356 铝合金作为实验材料, 其化学成分(质量分数, %)为: Si 7.1, Mg 0.403, Fe 0.096, Cu 0.052, Zn 0.007, Ti 0.134, Al 为余量。

* 美国 GM(中国) 公司基金资助项目

收到初稿日期: 2001-09-06, 收到修改稿日期: 2002-01-06

作者简介: 何树先, 男, 1972 年生, 博士生

利用自制的 JD-1 型高密度脉冲电流发生器, 等效电容为 $1000 \mu\text{F}$ 、最高充电电压为 5000 V 。实验装置如图 1 所示。采用 TDS-210 实时数字示波器定量测试放电过程各种参数, 如放电电压及频率等。实验中为了弄清楚电脉冲处理对熔体冷却过程的影响, 采用自制的 ADS 测温系统软件进行冷却曲线测试。

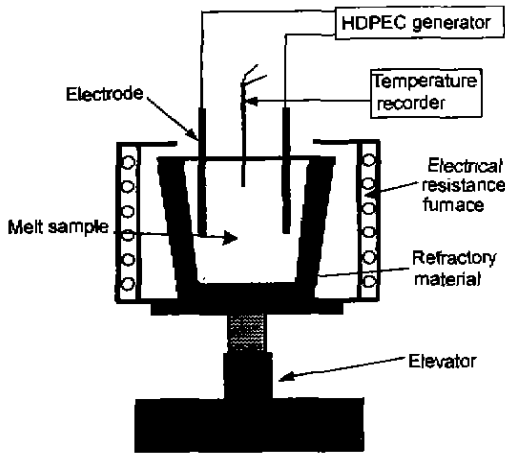


图 1 电脉冲处理低温熔体实验装置示意图

Fig.1 Schematic of HDPEC setting treated low temperature melt

利用电阻炉在 $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔合金并通过 C_2Cl_6 进行精炼, 然后随炉冷却到实验温度 (680 和 $630 \text{ }^\circ\text{C}$) 并保温 30 min 。电极材料为 Ce-W , 电极在插入铝合金液之前进行预热。实验中, 预先设定充电电压为 1000 V , 放电次数为 10 次。每次放电实验完毕, 分别在 0.300 和 600 s 的时刻, 利用石英玻璃管从坩埚内取适量合金液, 凝固成试样; 同时制作没有经过电脉冲处理的对比试样, 然后通过 LECO-IA32 图像分析仪观察和分析。

图 2 为 TDS-210 实时数字示波器记录的脉冲电流放电过程图。从图中可以看出, 当充电电压为 1000 V 时, 作用在试样上的最大电压降约为 750 V 、放电过程中振荡频率为 6 kHz , 放电有效时间为 440 ms 。实验中利用 ZY9858 微电阻测试仪测试试样的电阻为 $2.2 \text{ m}\Omega$, 因此可以计算出经过熔体试样的最大电流约为 $3.4 \times 10^5 \text{ A}$ 。

2 实验结果

2.1 凝固组织观察

图 3a—d 分别为 680 和 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 的 A356 低温熔体经过和未经过脉冲电流处理的凝固组织照片 (熔体不经过保温处理)。图中白色相为初生 $\alpha\text{-Al}$ 相, 灰色相为共晶组织。从照片中可以清晰的看出, 没有经过脉冲电流处理的 680 和 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 低温熔体凝固组织呈现粗大树枝状晶, 一次枝晶和二次枝晶间距 (DAS) 都比较粗大, 分别为 46.5 和 $41.5 \mu\text{m}$ (如图 3a, c)。经过 HDPEC 处理后, 凝固组织得到明显细化, 原来的 $680 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体凝固粗大树枝晶组织被细小的非枝晶组织所取代, DAS 平均尺寸为 $28.9 \mu\text{m}$

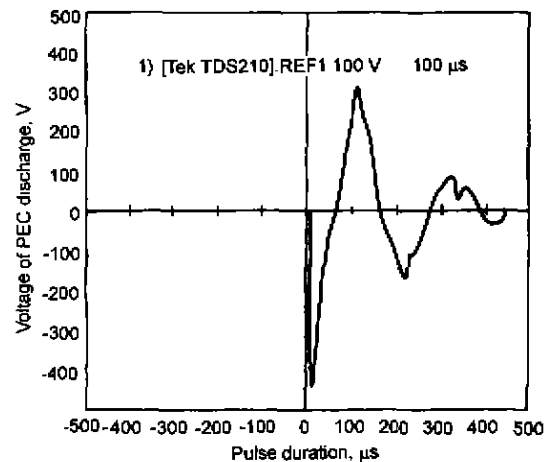


图 2 充电电压为 1000 V 时, 脉冲放电数据测试

Fig.2 The measured voltage drop across the specimen during discharge for an initial capacitor bank voltage of 1000 V

(如图 3b); 而 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 的凝固组织虽然也得到细化, DAS 平均为 $31.7 \mu\text{m}$, 但凝固组织的形貌却没有变化, 即 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体凝固组织仍然呈树枝状晶 (如图 3d)。

图 4a, b 为经过 HDPEC 处理后, 680 和 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体分别经过 600 s 保温时间的凝固组织照片。可以看出, 经过保温以后, 熔体凝固组织变得比较粗大, DAS 增大。图 5 为多个组织照片测量的统计平均值, 表明了不同温度的低温熔体凝固组织随保温时间的粗化率不同。其中 $680 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体凝固组织随保温时间延长粗化率最大, 而 $630 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体凝固粗化率则较小。然而, 经过 600 s 保温时间后, $680 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体的凝固组织形貌仍然保持非枝晶组织, 如图 4a。因此从实验结果可以推断, 脉冲电流处理后, 熔体保温时间改变的只是促使凝固组织粗化, 而不能改变由于脉冲电流作用而形成的凝固组织形貌。

2.2 熔体冷却曲线测试

图 6a, b 为 $680 \text{ }^\circ\text{C}$ 熔体经过和未经过 HDPEC 处理的空凝固曲线, 其中图 6a 没有经过脉冲电流处理; 图 6b 经过充电电压为 1000 V 、放电次数为 10 次的脉冲电流处理。从冷却曲线可以看出, 没有经过脉冲电流处理的熔体冷却曲线近似为直线段, 凝固区间经过的时间 t_s 约为 650 s ; 而经过脉冲电流处理后, 冷却曲线在凝固开始段呈明显向上凸起, 如图中 A 所示, 说明凝固开始时, 熔体中结晶核心的数目明显增多, 导致熔体凝固过冷度增大, 凝固区间 t_s 也明显缩短, 约为 580 s , 这证明经过电脉冲处理后, 熔体的凝固速率提高。

3 讨论

在低温熔体中含有许多类固相团簇结构^[9], 随着熔体温度的升高, 熔体中的类固相原子团簇不断溶解和分

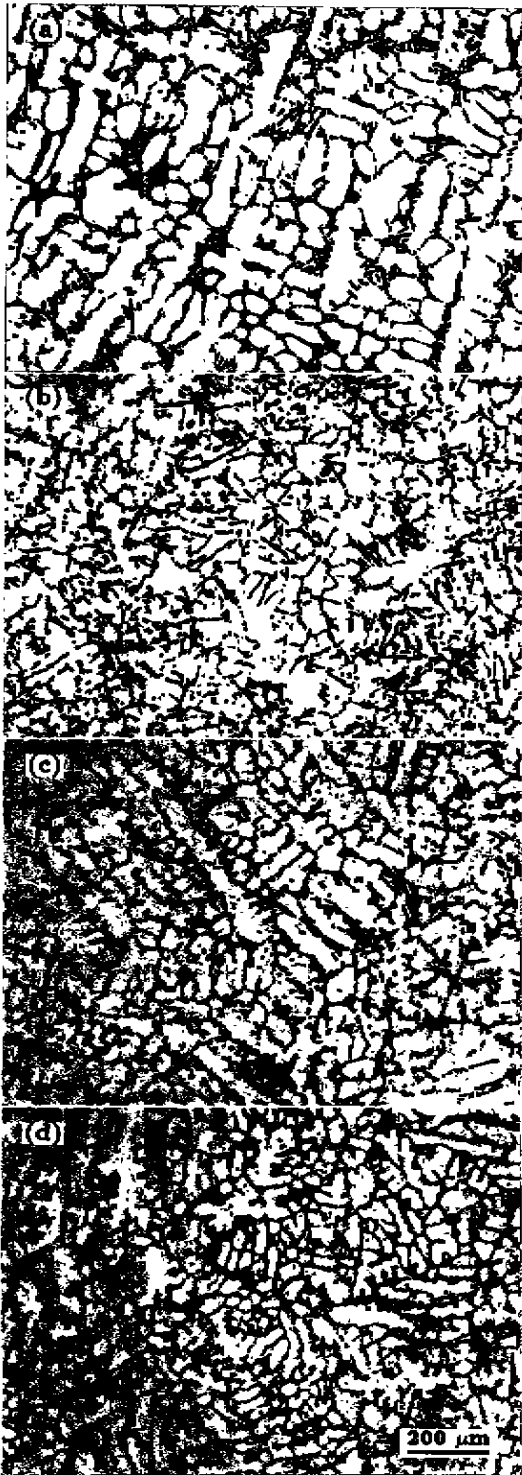


图 3 熔体凝固组织照片

Fig.3 Solidification structures of the melt

- (a) treated at 680 °C without HDPEC
- (b) treated at 680 °C with 1000 V charge voltage HDPEC for 10 times discharge
- (c) treated at 630 °C without HDPEC
- (d) treated at 630 °C with 1000 V charge voltage HDPEC for 10 times discharge

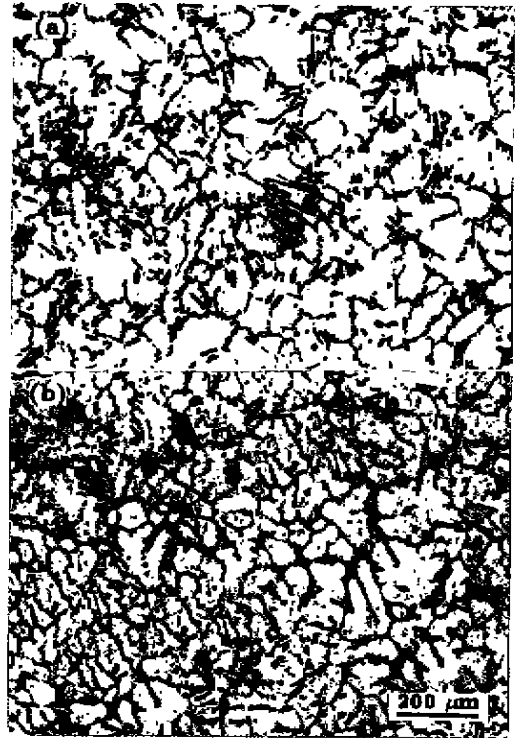


图 4 经过 HDPEC 处理后，保温 600 s 后的凝固组织照片
 Fig.4 Solidification structures of melt holding at different temperatures for 600 s after HDPEC treatment
 (a) at 680 °C (b) at 630 °C

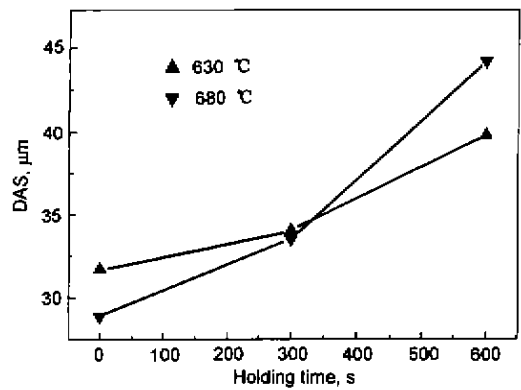


图 5 熔体保温时间与凝固组织 DAS 之间的关系

Fig.5 Relationship between the holding time of the melt treatment and dendrite arm spacing (DAS)

散，最后熔体的结构将变成没有团簇的无序均匀结构。

当在低温熔体中施加高密度脉冲电流时，脉冲放电所产生的瞬间电磁力将不可避免的作用于熔体的原子团簇上，可以想象，当此电磁力足够大时，就能够破碎原子团簇，减小团簇的尺寸，增加团簇的数量。至于脉冲电流所产生的 Joule 热问题，文献 [10] 的研究表明，由 Joule 热导致的熔体温度升高可以忽略不计，因此可以推断，当熔体的温度开始降低时，熔体中被破碎的、尺寸更小的团

簇就有可能作为凝固结晶核心形核长大, 这样导致最终凝固组织的细化。

另一方面, 通过冷却曲线测试可知, 脉冲电流处理可以增加熔体凝固过冷度, 提高熔体凝固速度, 这再次证明了前人的实验结果的正确性^[5,11], 凝固过程中过冷度的增大将导致凝固形核率的提高, 凝固速度的加快有利于减小 DAS, 从而促进凝固组织的细化。

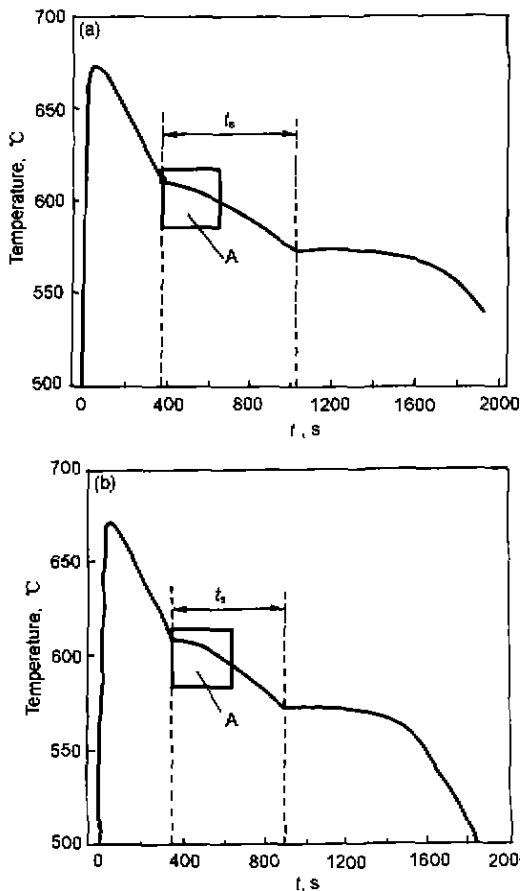


图6 680 °C熔体经过和不经脉冲电流处理的空冷凝固曲线
Fig.6 Air cooling curve of 680 °C melt with or without HDPEC treatment
(a) without HDPEC treatment
(b) with HDPEC treatment for 10 times

在低温熔体中施加电脉冲, 不仅能够细化凝固组织, 而且根据实验结果, 即当熔体的结构呈现树枝晶时, 最终凝固组织也显示出树枝晶; 而当熔体的结构被破坏时, 最终凝固组织也随之发生变化, 如图3a,b所示。因此我们推断低温熔体的结构对最终凝固组织的影响程度要甚于凝固过程本身。关于较高温度(如680 °C)的低温熔体结构容易被破坏, 而温度较低(如630 °C)的熔体结构没有被明显改变。分析认为, 这是由于凝固是一个连续的过程, 即从低温熔体中的类固相团簇转变为初生固相也是连续的。随熔

体温度的降低, 熔体中类固相原子团簇尺寸逐渐变大, 结合强度逐渐变强, 凝固过程中析出的固相强度要远大于熔体中原子团簇的强度。因而, 当一定功率的脉冲电流通过熔体时, 结合强度较小的团簇将首先被破坏, 而结合强度较高的团簇或固相则需要更大的脉冲电流强度才能被摧毁。关于脉冲电流处理后熔体的保温时间对凝固组织的影响, 分析认为, 这是由于熔体结构的改变具有一定的时效性, 从平衡理论角度分析, 一定的熔体温度对应着一定的熔体结构, 当通过外界因素(如脉冲电流)改变了熔体的结构, 熔体必然处于一种非平衡状态, 经过相当长的时间, 熔体中原子将通过迁移或扩散逐渐恢复到新的平衡状态, 熔体温度越高, 原子扩散速率越快, 从而团簇恢复到新的平衡状态的时间就越快, 具体表现为凝固组织的粗化率提高, 如图5。由此看来, 在一定温度下保温将必然导致凝固组织的粗化。

4 结论

(1) 在 A356 铝合金低温熔体中施加高密度脉冲电流, 能够明显细化凝固组织, 其中, 680 °C熔体的凝固组织由原来的枝晶组织完全转变为非枝晶组织; 而630 °C熔体的凝固组织虽然得到细化, 但仍然维持树枝晶形貌。

(2) 低温熔体中施加脉冲电流有利于增大凝固过冷度, 提高凝固速率, 缩短凝固时间。

(3) 经过脉冲电流处理后, 随熔体保温时间的延长, 凝固组织逐渐粗化。

(4) 分析认为, 低温熔体结构对最终凝固组织的影响程度要大于凝固过程本身。

参考文献

- [1] Misra A K. *Metall Trans*, 1985; 16A: 1354
- [2] Ahmed S, McKannan E C. *Mater Sci Technol*, 1994; 10: 941
- [3] Nakada M, Shiohara Y, Flemings M C. *ISIJ Int*, 1990; 30(1): 27
- [4] Li J M, Li S L, Li J. *Scr Metall Mater*, 1994; 31: 1691
- [5] Barnak J, Sprecher A F S, Conrad H. *Scr Metall Mater*, 1995; 32: 879
- [6] Zhang L, Bian X F, Ma J J. *Foundry*, 1995; 10: 7
(张林, 边秀房, 马家骥. 铸造, 1995; 10: 7)
- [7] Li P J, Gui M C, Jia J. *Foundry*, 1995; 9: 15
(李培杰, 桂满昌, 贾均. 铸造, 1995; 9: 15)
- [8] Wang W M, Bian X F, Qin J Y. *Trans Nonferrous Met Soc Chin*, 1998; 8: 230
- [9] Moon F C. *Magneto-solid Mechanics*. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1984: 1
- [10] Nakada M. *Master Thesis*. Massachusetts Inst Tech, 1985
- [11] Yan H C, He G H, Zhou B L. *Acta Metall Sin*, 1997; 33: 352
(颜红春, 何冠虎, 周本廉. 金属学报, 1997; 33: 352)