

强脉冲电磁场对金属凝固组织影响的研究 *

訾炳涛 巴启先 崔建忠 白玉光 那兴杰

(东北大学 沈阳 110006)

(1999 年 9 月 19 日收到; 1999 年 11 月 16 日收到修改稿)

提出了用强脉冲磁场和电流细化金属凝固组织的新工艺. 与未经磁场或电流处理的凝固样品相比, 强脉冲电磁场能够显著地改善 LY12 铝合金的凝固组织, 使晶粒明显细化、球化; 电磁场的强度愈强, 这种改善效果愈明显. 对该新工艺的细化机理进行了理论分析, 同时, 指出了实验中的新现象和新问题.

PACC : 8130F A765

1 引 言

电磁细化是一种新兴的细化金属凝固组织的技术. 它是利用金属和电磁场的相互作用, 在凝固过程中给金属熔体施加电磁场, 使之振荡, 从而细化金属的凝固组织. 它具有无污染、操作简便等优点; 大致分为两种: 一是让电流通过凝固中的金属(即电流处理), 二是让金属熔体在磁场中凝固(即磁场处理).

Vives^[1]采用后一种方式研究了铝合金在工频交流磁场中的结晶行为, 取得了一定效果, 很多学者随后又陆续开展了在铝合金凝固过程中同时施加稳恒磁场和交流磁场、同时施加稳恒磁场和交流电流、施加旋转磁场的研究工作^[2-5]. 而 Misra 提出了用电流细化金属凝固组织的 Misra 技术^[6]. 他在 Pb-Sb-Sn 合金凝固过程中施加直流电流、交流电流, 后来人们又改用高密度的脉冲电流处理 Sn-Pb 合金的凝固过程^[7-10], 均使这些合金的凝固组织得到了不同程度的改善. 这些工作虽是初步的、探索性的, 但却为用强脉冲电磁场研究细化金属凝固组织提供了新的思路.

然而, 把脉冲磁场用于细化金属凝固组织的研究尚未见报道; 用脉冲电流来细化金属凝固组织的研究尚处于起步阶段, 且多集中于低熔点($\sim 183^{\circ}\text{C}$)便于实验研究的 Pb-Sn 合金^[7-11]. 本工作首次把强脉冲电磁场技术应用于细化熔点较高($\sim 640^{\circ}\text{C}$)实验难度较大的 LY12 铝合金的凝固组织, 并取得了显著效果. 因此, 本研究是一项细化金属凝固组织的新工艺, 具有创新性、开拓性和较大的应用价值.

2 实验材料与方法

实验所用材料为 LY12 铝合金. 选用该合金为研究对象, 是基于其在工业上应用广泛, 以便本成果能推广应用.

实验装置主要由高压电脉冲发生器、螺线管工作线圈或固定夹具、高压放电开关和电阻炉四部分组成. 脉冲发生器通过放电开关与线圈或正负电极相联. 当开关接通时, 脉冲发生器通过对工作线圈或正负电极释放大脉冲电流, 使在线圈内产生的强脉冲磁场或通过电极的强脉冲电流直接作用于样品.

先用高频感应炉熔炼出 LY12 母合金, 切成小块. 把小块母合金装入圆柱形陶瓷管内, 放入电阻炉中加热, 在高于熔点 $\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的温度保温 10 min 后, 再放入线圈内(或固定夹具内, 接好正负电极). 当金属熔体冷至液相线时, 即开始向试样施加不同强度的脉冲磁场或电流, 约 30 s 一次, 直至试样冷至固相线以下完全凝固成锭, 再拿出空冷.

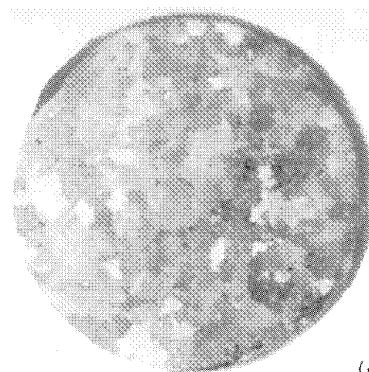
另一组作为对照, 不施加任何磁场或电流, 其他条件同上.

然后, 将这些圆柱形铸锭沿横断面截开, 经研磨、抛光、腐蚀后, 制成金相样品. 在德国产的 21 型金相显微镜下观察凝固组织.

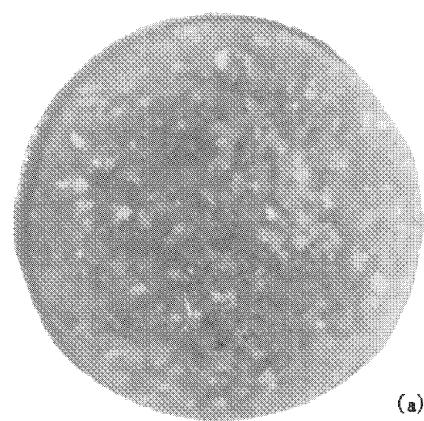
3 实验结果

图 1 给出了未经磁场或电流处理样品的凝固组织, 这是正常凝固条件下的典型铸态组织: 晶粒粗大

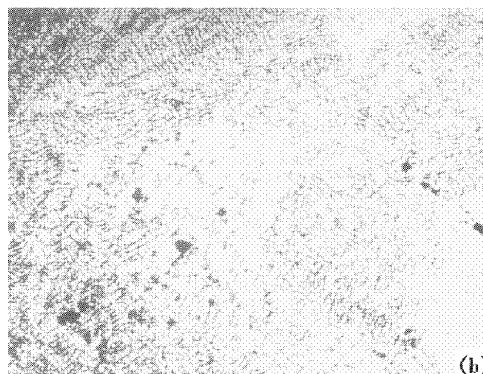
* 国家重大基础研究发展计划项目基金(批准号 G1999064900-05)资助的课题.



(a)

(a) 宏观组织($3\times$)

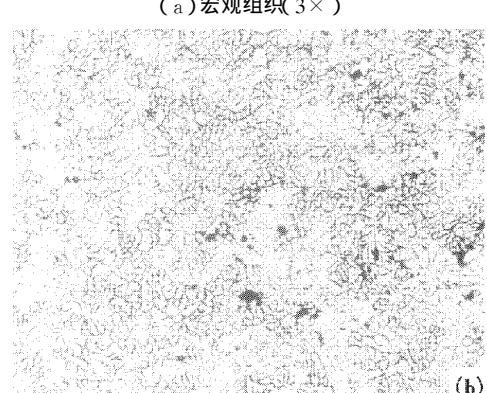
(a)

(a) 宏观组织($3\times$)

(b)

(b) 显微组织($15\times$)

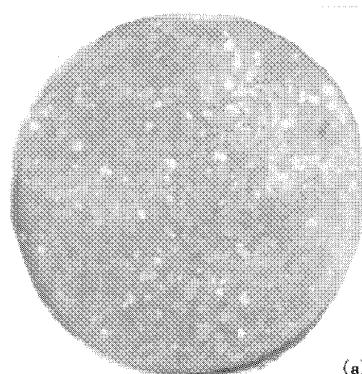
图1 未经磁场或电流处理的样品的凝固组织



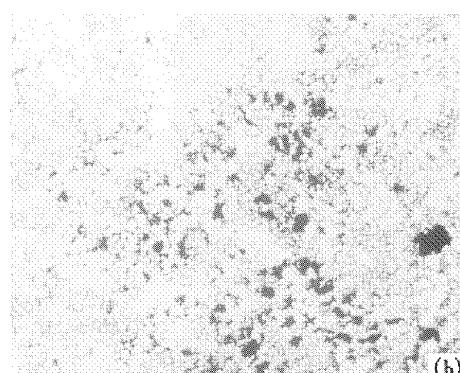
(b)

(b) 显微组织($15\times$)

图3 强脉冲电流处理后样品的典型凝固组织



(a)

(a) 宏观组织($3\times$)

(b)

(b) 显微组织($15\times$)

图2 强脉冲磁场处理后样品的典型凝固组织

(a) 树枝晶明显 (b) 图2和图3分别给出了经过强脉冲磁场和强脉冲电流处理后样品的典型凝固组织. 和图1相比较可知, 经强脉冲磁场或强脉冲电流处理后, 凝固后的晶粒明显细化、树枝晶被折断、粉碎了.

随着脉冲磁场或脉冲电流强度的增加, 晶粒的平均尺寸逐渐减少、树枝晶逐步消失, 组织也变得更加均匀和改善. 图4给出了强脉冲电磁场强度对凝固组织晶粒尺寸的影响. 随着强度的增加, 凝固晶粒的平均尺寸单调减少.

4 结果分析

4.1 脉冲磁场的影响

当开关接通时, 通过放电回路中的脉冲电流 J_0 就在螺管线圈内产生一快速变化的强脉冲磁场 B . 根据法拉第电磁感应定律可知, 螺管线圈中的金属熔体内会感生一高强度、且快速变化的脉冲涡流 J_e .

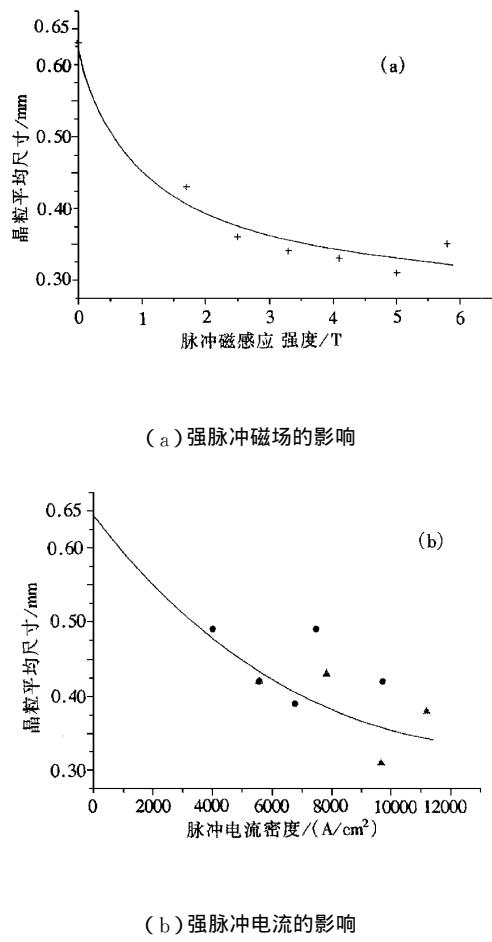


图 4 强脉冲磁场和电流对晶粒平均尺寸的影响
 ● 电容量(80 μF)固定不变, 改变电压(0→7 kV)
 ▲ 电压(4 kV)固定不变, 改变电容量(0→400 μF)

涡流 J_e 和磁场 B 之间相互作用即产生洛伦兹磁力

$$f = J_e \times B, \quad (1)$$

它是一个体积力. 根据麦克斯韦方程

$$\nabla \times B = \mu_0 J_e,$$

得

$$f = \frac{1}{\mu_0} \left[(B \cdot \nabla) B - \frac{1}{2} \nabla B^2 \right],$$

对其进行体积分, 再用高斯定理整理后, 得到

$$\int_V f dV = \frac{1}{\mu_0} \int_s \left(B^2 b \cos\theta - \frac{B^2}{2} n \right) ds, \quad (2)$$

式中 b 为沿磁场方向的单位矢量, n 为积分面元的外法向单位矢量, θ 为矢量 b 与 n 的夹角. (2)式右边两项表明该磁力由两部分组成: 前一项是一沿磁场方向的作用力, 后一项为垂直于受力面的作用力. 对本实验的细长圆柱体样品来说, 前一项可忽略, 后一项主要为垂直于试样圆柱面的作用力.

磁压强可表示为

$$p = \frac{B^2}{2\mu_0}. \quad (3)$$

因 B 是高速变化的强脉冲磁场, 则磁压强 p 是剧烈变化的、且其强度远大于金属熔体的动力压强, 这就使金属熔体产生了强烈振荡. 这种振荡的一个作用是增加了金属熔体在凝固过程中的过冷度 ΔT ^[7]. 对于均匀形核, 形核率 N 和过冷度 ΔT 之间存在以下关系^[12],

$$N \propto \exp\left(-\frac{A}{\Delta T^2 kT}\right), \quad (4)$$

式中 k, A 为常数. 所以, 该作用导致了金属熔体结晶时形核率的增加.

这种振荡的另一作用是在熔体中造成了剧烈的强迫对流. 这使凝固过程中正在生长中的树枝晶或难以长大, 或被折断、击碎; 而这些破碎的枝晶颗粒又会成为新的生长中心^[4,7]. 所以, 强脉冲磁场处理可改善结晶组织就不难理解了. 而且磁场强度愈大, 效果愈显著.

值得提及的是, 我们在实验中发现了一些有趣的新现象和新问题. 比如, 当熔体温度尚高时就过早地施加脉冲磁场, 铝液就会从圆柱形陶瓷管内溅出; 当脉冲磁场较强时, 铝液将大量溅出. 这些现象说明了在强脉冲磁场作用下熔体振荡非常强烈. 再如, 在稍低于液相线温度给样品施加脉冲磁场处理后, 在样品上对应于螺线管线圈中部磁场最强处的外表面形成细沙状颗粒的粗糙表面; 当脉冲磁场较强时, 这种现象暂称之为“沙化现象”更加明显, 甚至样品难以凝固块状金属而形成细沙状的金属颗粒, 以至样品从该处断成两节, 且断面的形状很不规则. 而引起样品“沙化现象”的具体机制目前还不清楚, 有待于进一步研究.

4.2 脉冲电流的影响

当高压放电开关接通时, 会有快速变化的强脉冲电流沿轴向通过圆柱形熔体样品, 这时在样品内产生快速变化的强脉冲磁场. 强脉冲电流和强脉冲磁场之间的相互作用会导致熔体产生沿径向的收缩效应^[7-10]. 由于强脉冲电流的大小和方向是快速变化的, 其产生的脉冲磁场的大小和方向也是快速变化的, 所以这种相互作用会在金属熔体内产生很强的收缩力, 使熔体反复地被压缩, 并使熔体在垂直于电流方向作往复运动, 这种运动近似看作二维的运动^[10]. 我们在实验中明显观察到的冲击波

动也证明了这点。

由电磁学可知,该收缩力可表示为

$$df = Idl \times B, \quad (5)$$

式中, I 为脉冲电流的密度, dl 为沿脉冲电流方向的积分线元, B 为垂直于脉冲电流方向的磁通密度, f 为收缩力, B 和 I 随在熔体中的不同位置而不同, 因而在熔体中产生了收缩力梯度, 各流团之间形成局部流速差, 从而引起剪切应力^[7]

$$\tau_x = -\eta \frac{\partial V_x}{\partial y}, \quad \tau_y = -\eta \frac{\partial V_y}{\partial x}, \quad (6)$$

式中 V_x, V_y 分别为熔体在 x, y 方向上的流动速度, η 为熔体的粘度, τ_x, τ_y 分别为在 x, y 方向上的剪切应力。当 τ_x, τ_y 足够大时, 熔体中的树枝晶即可被碎断为小碎块, 从而形成新的晶粒生长中心^[7], 使凝固后的晶粒得到细化和球形化。

另一方面, 这种收缩力和冲击波还会对凝固过程中的形核率和晶粒长大产生影响。当强脉冲电流通过熔体时, 熔体处于一种非平衡状态。此时, 可认为脉冲电流所产生的瞬态磁压强 p 远远大于熔体内部的动力压强 p_d (即 $p \gg p_d$), 熔体会被反复地压缩 (即熔体不断前进和后退)。这种运动除了碎断树枝晶外, 同时还使熔体迅速失去过热、增加过冷度、提高形核率的作用^[9-10]。所以, 经过强脉冲电流处理后, 样品的凝固组织均得到了不同程度的细化, 而且脉冲电流愈强, 其细化效果也愈显著。

以上仅对脉冲电流改善金属凝固组织的机制作了初步地探讨, 但这种机制的许多细节目前还不清楚^[10]。例如, 上面和很多文献只提到收缩效应, 但严格地说, 熔体中的脉冲电流与其所产生的脉冲磁场间的相互作用是一个动态过程, 它们之间存在着位相差或不完全同步。因此, 在给熔体样品施加脉冲电流的过程中, 熔体不仅受到收缩力的作用, 产生收缩效应, 而且我们认为, 熔体还可能受到舒张力的作用。

用, 产生舒张效应。这方面的深入研究正在我们实验室进行中。

5 结 论

1. 提出了用强脉冲磁场细化金属凝固组织的新工艺, 用该工艺明显地改善了 LY12 铝合金的凝固组织。强脉冲磁场作用下, 磁压强引起的熔体振荡导致了凝固组织的细化。当脉冲磁场较强时, 会导致样品出现“沙化现象”, 但其机制目前还不清楚。

2. 研究了强脉冲电流对铝合金凝固组织的影响。强脉冲电流可显著细化其凝固组织。它使熔体在凝固中受到很大的收缩力和冲击波, 反复地被压缩和运动, 造成树枝晶被碎断成小块, 提高形核率, 从而凝固组织得到细化和改善。

3. 施加的强脉冲磁场或电流的强度愈强, 细化效果愈显著。

- [1] C. Vives, *Metall. Trans.*, **20**(1989), 623.
- [2] C. Vives, *Mater. Sci. Eng.*, **173**(1993), 169.
- [3] A. Radjai, *et al.*, *Metall. Mater. Trans.*, **29**(1998), 1477.
- [4] C. Vives, *Metall. Mater. Trans.*, **27**(1996), A45.
- [5] W. Q. Zhang, *et al.*, *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **10**(6)(1997) A61.
- [6] A. K. Misra, *Metall. Trans.*, **16**(1985), 1354.
- [7] M. Nakada, *et al.*, *ISIJ Inter.*, **30**(1)(1990), 27.
- [8] J. M. Li, *et al.*, *Scr. Metall. Mater.*, **31**(2)(1994), 1691.
- [9] J. P. Barnak, *et al.*, *Scr. Metall. Mater.*, **32**(6)(1995), 879.
- [10] Hong-chun Yan, *et al.*, *Acta Metallurgica Sinica*, **33**(4)(1997), 352 [in Chinese]; 郭红春等, *金属学报*, **33**(4)(1997), 352.]
- [11] J. Wang, *et al.*, *Materials Review*, **13**(2)(1999), 19 [in Chinese]; 王俊等, *材料导报*, **13**(2)(1999), 19.]
- [12] H. Q. Hu, *Solidification of Metals (Metallurgical Industry Press, Beijing, 1985)*, 301 [in Chinese]; 胡汉起, *金属凝固*, *冶金工业出版社*, 北京, 1985, 301].

EFFECT OF STRONG PULSED ELECTROMAGNETIC FIELD ON METAL 'S SOLIDIFIED STRUCTURE^{*}

ZI BING-TAO BA QI-XIAN CUI JIAN-ZHONG BAI YU-GUANG NA XING-JIE

(Northeastern University, Shenyang 110006, China)

(Received 19 September 1999; revised manuscript received 16 November 1999)

ABSTRACT

It was studied by us that new technologies using strong pulsed magnetic field and electric current were applied to refine metal 's solidified structure. These technologies improved remarkably the solidified structure of LY12 aluminum alloy and made the solidified grains more equiaxed and apparently finer compared with that of the normal sample, which is of more dendrite grains. The stronger the strength of the pulsed electromagnetic field, the better the improvement effect was. The refinement mechanisms of the new technologies were analyzed theoretically. New phenomena and problems occurred in our experiments were also pointed out in this paper.

PACC : 8130F ; 4765

^{*} Project supported by the National Fundamental Research Program of China (Grant No. G1999064900-05).