

磁声波对金属凝固组织的影响 *

王 强 赫冀成

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110004)

川合悟 岩井一彦 浅井滋生

(名古屋大学工学研究科, 日本名古屋, 464-8603)

摘 要 提出了运用强磁场和交流电流的共同作用直接在金属液中产生声波(磁声波)的新方法, 并研究了所生成的磁声波在细化合金凝固组织晶粒的效果. 该方法可以从根本上解决机械声波无法在高温生产领域应用的难题. 理论解析表明, 运用交变电磁力在液体金属内生成的磁声波的强度和所施加的静磁场的磁感应强度和交流电流的电流密度的乘积成正比; 电磁力的频率越大, 生成的磁声波越接近于由机械振动产生的声波. 实验中测定的磁声波压力和理论解析结果基本一致. 这种方法产生的磁声波具有促进金属凝固组织晶粒细化的作用.

关键词 静磁场, 磁声波, 交变电磁力, 凝固过程

中图法分类号 TG113.1

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2002)09-0961-05

EFFECT OF MAGNETO-ACOUSTIC WAVES ON SOLIDIFICATION STRUCTURES OF METAL

WANG Qiang, HE Jicheng

Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004

KAWAI Satoru, IWAI Kazuhiko, ASAI Shigeo

Department of Materials Processing Engineering, Nagoya University, Japan, 464-8603

Correspondent: WANG Qiang, associate professor, Tel: (024)83682417, Fax: (024)23906316,

E-mail: wangqiangks@yahoo.com.cn

Supported by Visiting Scholar Foundation of Key Lab. in University and National Key Basic Research and Development Programme of China (No.G1998061510)

Manuscript received 2001-10-10, in revised form 2002-03-25

ABSTRACT The simultaneous imposition of a high static magnetic field and an alternating electrical current was utilized to excite acoustic waves (magneto-acoustic waves) directly in a liquid metal instead of conventional mechanical vibration method. The effect of the generated waves on solidification structures was also examined. The theoretical analysis shows that the intensity of the generated waves is in proportion to the product of the imposed static magnetic field and alternating electrical current. And when the frequency of imposed alternating electromagnetic force increased, the characteristic of the generated waves becomes more similar to that of those excited by mechanical vibration. Pressure perturbations detected experimentally in liquid gallium appropriately agreed with the theoretical predictions. The generated magneto-acoustic waves improved solidified structures of Sn-Pb alloys. This study indicates a new method to generate acoustic waves by imposing alternating electromagnetic force locally on a metal, which can overcome the difficulties happened when the waves excited by mechanical vibration applied in high temperature environment.

KEY WORDS static magnetic field, magneto-acoustic wave, electromagnetic force, solidification process

* 高等学校实验室访问学者基金及国家重点基础研究发展规划

G1998061510 资助项目

收到初稿日期: 2001-10-10, 收到修改稿日期: 2002-03-25

作者简介: 王 强, 男, 1971 年生, 副教授, 博士后

实验室条件下的研究表明, 在金属材料制备过程中声波具有细化凝固组织晶粒^[1-3]、提高精炼速度^[4]、去除金属中夹杂物^[5]等突出效果. 然而, 传统的由机械振动产生的声波至今无法在实际冶金生产领域广泛应用. 这是由于机械振动产生的声波强度不足、声波传播介质在高

温环境中的易溶化而造成金属污染等原因^[6]造成的. 因此, 开发新的声波生成法来代替传统的方法是使其成功地应用于冶金生产领域的关键环节. 随着材料电磁过程研究的深入展开, 特别是近年来 10T 以上的强磁场的有效利用变得可能^[7], Iwai 等^[8], Wang 等^[9,10] 开始利用高强度电磁力在熔融金属内直接生成声波. 这种声波不但具有传统声波的所有效果, 而且可以在高温领域使用. 本研究提出了一种新的声波生成法, 即利用强磁场和交流电流的局部作用在所要求的金属液处理范围内生成磁声波. 运用数学模型推导出影响磁声波强度的操作参数; 对生成的电磁声波的强度进行了测量并和理论解析的结果进行了比较; 考察了这种磁声波对细化金属合金凝固组织的影响.

1 理论解析

解析坐标如图 1 所示. x 方向长为 l 且断面为矩形的液态金属 (密度 ρ_0 、透磁率 μ_0 、电导率 σ) 被放置在 z 方向的静磁场 B_{DC} 中. 而且在该金属液的 $x=0$ 平面施加了 y 方向的交流电流 $\sqrt{2}J_{AC}\cos(\omega t)$. 这时, 液态金属表面的交流电流将沿 x 方向向金属液内扩散. 假定交流电流密度在 $y-z$ 平面内是均一的. 由电磁理论可以得到金属内扩散电流的分布如 (1) 式所示.

$$J = \sqrt{2}J_{AC}\exp(-\frac{x}{\delta})\cos(-\frac{x}{\delta} + \omega t) \quad (1)$$

式中, J_{AC} 为交流电流强度的有效值, δ 是集肤层厚度, $\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma\omega\mu_0}}$, 且 $\delta \ll l, \omega$ 是角频率.

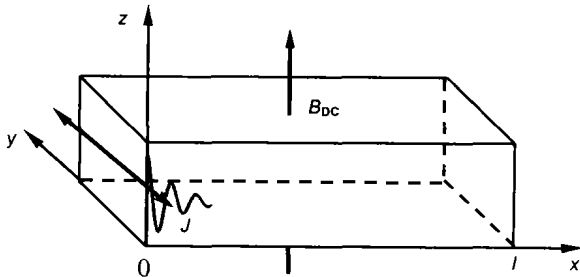


图 1 强磁场和交流电流作用下生成磁声波的解析坐标系

Fig.1 Coordinate system used in analysis of magneto-acoustic waves induced by high static magnetic field and alternating electrical current

在扩散到金属液内的交流电流和所施加的静磁场的相互作用下, 在液态金属的 $x=0$ 表面附近生成了交变电磁力

$$F_{AC} = (0, 0, \vec{B}_{DC}) \times (0, \vec{J}, 0) \\ = \sqrt{2}J_{AC}B_{DC}\exp(-\frac{x}{\delta})\cos(-\frac{x}{\delta} + \omega t) \quad (2)$$

这种周期性变化的电磁力将使液态金属将从平衡状态以速度 v_x 沿 x 方向开始振动. 金属的密度、压力也随之

发生搅动. 密度和压力的微小变化分别由 ρ, p 表示. 这里假定密度和压力的变化以及振动速度 v_x 与 y 和 z 无关, 而且密度变化比初始密度相比要少得多, 即 $\rho \ll \rho_0$.

另一方面, 压缩性流体内声波传播方程式如下式所示.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = -c^2 \frac{\partial F_x}{\partial x} \quad (3)$$

式中, F_x 是流体所受外力之和, 声波的传播速度

$$c = \sqrt{\left. \frac{\partial p}{\partial \rho} \right|_{\text{isotropic}}}$$

这里需要强调的是放在静磁场中的金属流体沿磁力线的垂直方向以速度 v_x 振动时, 由于诱导电流和静磁场的相互作用, 将生成一个作用在整个流体上的电磁力 F_m ,

$$F_m = -\frac{B_{DC}}{\mu_0} \frac{\partial b_z}{\partial x} \quad (4)$$

式中 $b_z(x, t)$ 为静磁场磁感应强度的微小搅动. 假定金属流体的电导率足够大时 ($\sigma \rightarrow \infty$), 可以得到 $b_z(x, t)$ 和 v_x 的关系式

$$\frac{\partial b_z}{\partial t} = -B_{DC} \frac{\partial v_x}{\partial x} \quad (5)$$

从以上的分析得知, 作用在液态金属的外力 F_x 为 F_{AC} 及 F_m 之和, 即 $F_x = F_{AC} + F_m$. 其中 F_{AC} 由所施加的高频电流而产生, 且只作用于 $x=0$ 表面附近. 而 F_m 则是由于导电性流体的振动所引起, 作用在金属液整体范围. 图 2 定性地表明了这两种电磁力的差异. 将 F_x 代入方程式 (3) 中, 就可以得到由于这种方法而产生的声波与压力有关的传播方程式

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = c^2 \frac{\partial F_{AC}}{\partial x^2} \\ = -2c^2 J_{AC} B_{DC} \frac{1}{\delta} \exp(-\frac{x}{\delta}) \cos(-\frac{x}{\delta} + \omega t - \frac{\pi}{4}) \quad (6)$$

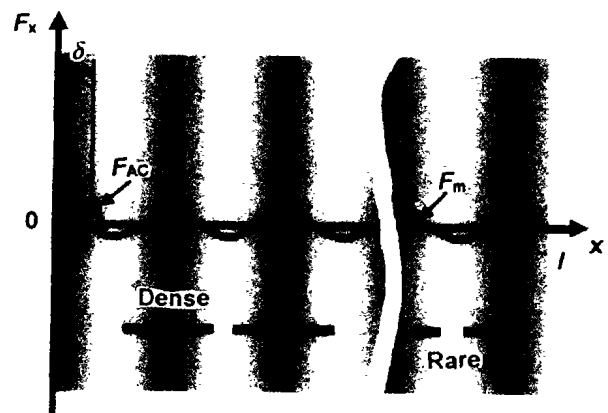


图 2 电磁力 F_m 和 F_{AC} 的差异

Fig.2 Differences between electromagnetic forces F_m and F_{AC}

式中, $a = \sqrt{c^2 + \frac{B_{DC}^2}{\rho_0 \mu_0}}$, 表示生成的声波的传播速度, 这种声波在电磁流体力学领域被称为磁声波. 传播速度 a 是静磁场的函数, 它大于普通声波的传播速度 c .

由于金属的固有声抗 ($\rho_0 c$) 远大于空气的固有声抗, 在金属中传播的声波垂直入射在金属和空气的界面上时将发生全反射, 因而在边界上其压力接近于零. 即

$$p|_{x=0} = 0, p|_{x=l} = 0 \quad (7)$$

利用式 (6) 和 (7) 可以得到磁声波在液态金属内的压力分布为

$$p = p_m \frac{N}{\sqrt{1+M^2}} [\exp(-\frac{x}{\delta} \sin(-\frac{x}{\delta} + \omega t - \phi)) + \frac{1}{\sin(kl)} \sin(\omega t - \phi) \sin(kx - kl)] \quad (8)$$

式中, $p_m = \delta B_{DC} J_{AC}$, $N = \frac{2c^2}{\delta^2 \omega^2}$, $M = \frac{2a^2}{\delta^2 \omega^2}$, $\phi = \tan^{-1} M + \frac{\pi}{4}$, $k = \frac{\omega}{a}$.

由于液态金属的密度足够大, 导致磁声波在液态金属内的传播速度约等于普通声波的传播速度, 即 $a \approx c$, 从而使得系数 $N/\sqrt{1+M^2} \approx 1$. 由式 (8) 中可以看出, 生成的磁声波的强度和所施加的静磁场的磁感应强度及交流电流的电流强度的乘积成正比. 图 3 示出了 $B_{DC}=10\text{T}$, $J_{AC} = 5.5 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ 的条件下, 生成的不同频率的磁声波在液态金属内的理论分布. 从图中可以看出, 由这种方法产生的磁声波的频率越大, 越接近于由机械振动而产生的声波, 且当 $l \geq \frac{\pi a}{\omega}$ 时, 液态金属内将生成驻波.

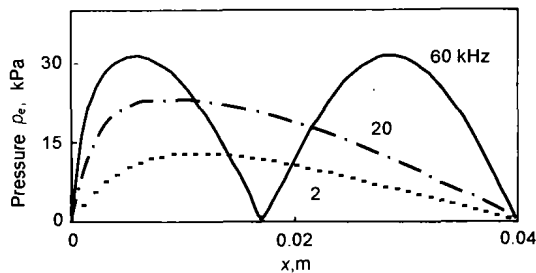


图 3 不同频率电磁力作用下生成的磁声波的理论压力分布
Fig.3 Predicted pressure distributions of generated magneto-acoustic waves by electromagnetic force F_{AC} with various frequencies

2 实验结果

2.1 磁声波的压力测定

如图 4 所示, 将 0.27 kg 的液态金属 Ga 倒入水平断面为 25 mm×40 mm 的玻璃制矩形容器中, 然后对其施加一垂直方向的静磁场 B_{DC} . 同时在容器的短边附近插入一对铜制电极 (厚度、宽度、插入深度分别为 2, 2 和 35 mm), 并通入频率为 2 kHz 的交流电流. 在这

种实验状态下, 通过设置在电极相对侧的压力传感器 (最大外径为 6 mm) 测定了液态金属内生成的磁声波的的压力. 压力传感器被设置在距集肤层厚度数倍远的位置以防止扩散电流对压力测定的影响. 测定结果去除杂音后在示波器上记录下来.

图 5 和图 6 分别表示液态金属内磁声波的压力随所施加的静磁场磁感应强度、交流电流强度的变化而变化的

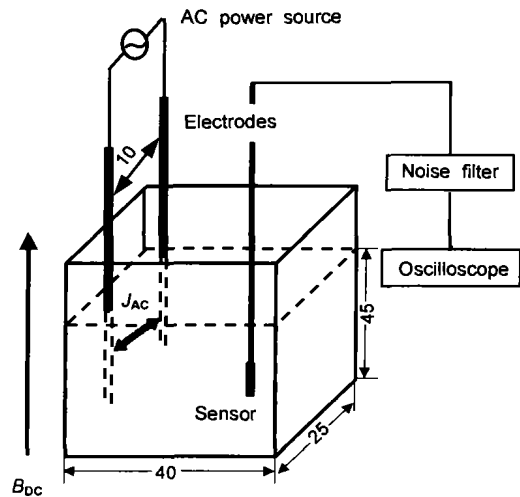


图 4 实验装置简图
Fig.4 Schematic view of experimental apparatus

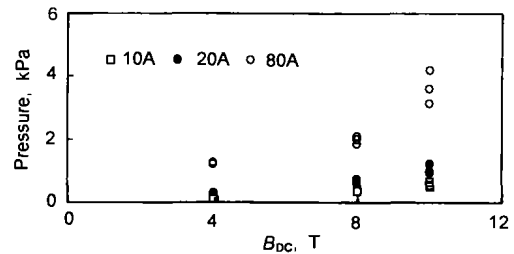


图 5 测定压力和静磁场磁感应强度 B_{DC} 的关系
Fig.5 Detected pressures as a function of B_{DC}

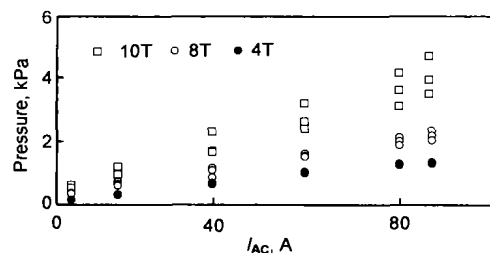


图 6 测定压力和交流电流强度 I_{AC} 的关系
Fig.6 Detected pressures as a function of I_{AC}

情况. 从图中可以看出, 生成的压力大体上和静磁场磁感应强度、交流电流强度成正比例关系, 这和理论解析结果基本一致.

2.2 磁声波对凝固组织晶粒的细化作用

实验装置类似于图 4, 只是将金属 Ga 更换成 Sn-10%Pb 合金, 而且在金属的长边壁的中心位置安装了 K 型热电偶, 记录了合金凝固过程中的温度变化. 从高于液相温度的 250 °C 到合金完全凝固的 170 °C 的温度区间内, 在有无磁声波作用的条件下, 对合金进行了凝固实验. 得到的试样的纵断面经研磨腐蚀后, 观察合金的宏观凝固组织.

静磁场和低频电流分别是 0T, 0A; 0T, 90A; 10T, 0A; 10T, 90A 的条件下所得到的凝固的冷却曲线如图 7 所示. 可以看出, 由于交流电流的 Joule 热并没有对冷却曲线造成太大影响, 施加了 10T 强磁场的合金的冷却速度比没有施加强磁场的要大些. 强磁场对冷却速度的影响到目前为止尚无法做出合理的理论解释. 各实验条件下得到的宏观凝固组织照片分别如图 8 所示. 0T, 0A 和 10T, 0A 的条件下都得到了粗大的晶粒组织. 0T, 90A 的条件下, 电极附近的晶粒比前两种都得到了细化, 这可能是由于高频电流和其自身所产生的磁场的作用下生成

的电磁力的作用而引起的. 10T, 90A 的条件下的合金的凝固组织得到了显著细化. 这是由于 10T 的强磁场和交流电流的共同作用下生成的磁声波的作用而引起的. 磁声波对细化晶粒的作用机理目前正在进一步研究中.

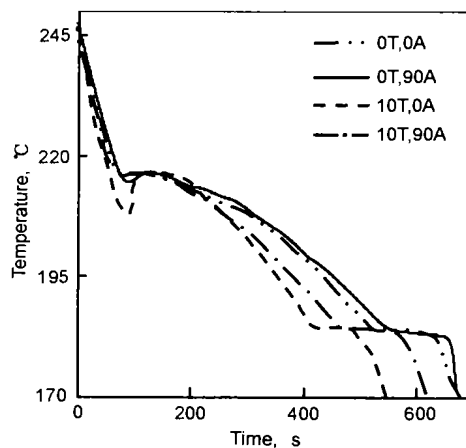


图 7 不同电磁场条件下试样的冷却曲线

Fig.7 Cooling curves of the samples under different conditions of electrical current and magnetic field

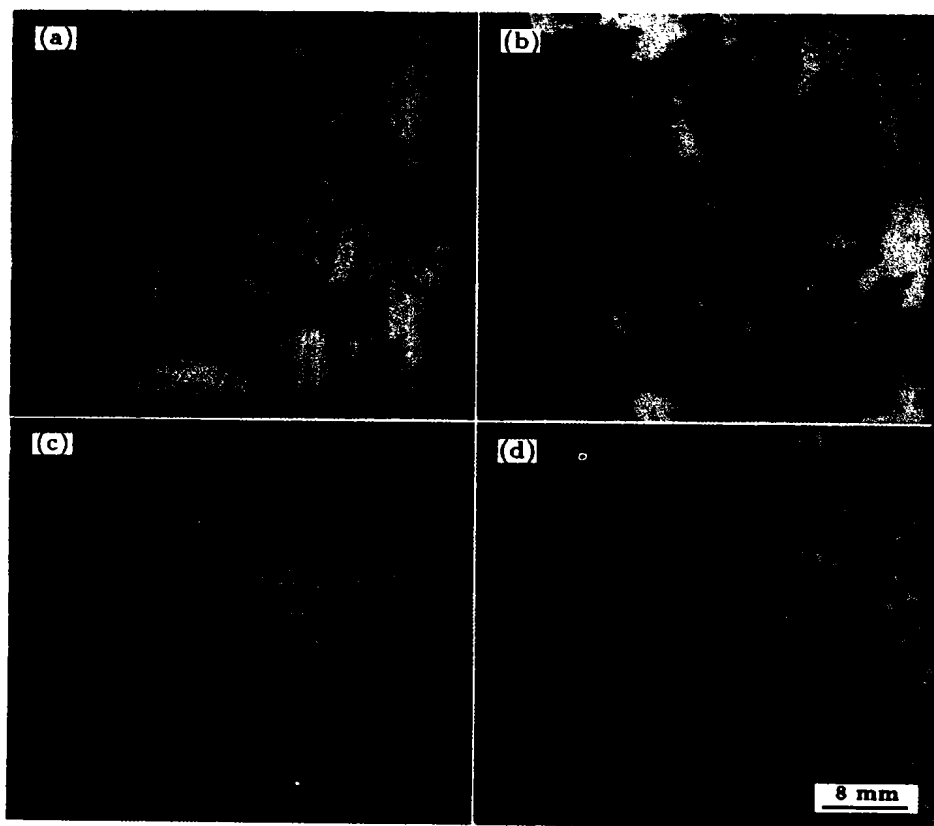


图 8 不同条件下试样的宏观凝固组织

Fig.8 Macrostructures of samples under experimental conditions of 0T, 0A (a), 10 T, 0 A (b), 0 T, 90 A (c) and 10 T, 90 A (d)

3 结论

(1) 利用静磁场和交流电流的共同作用在液态金属局部生成的交变电磁力可在液态金属全域内产生磁声波。

(2) 生成的磁声波的强度和所施加的静磁场的磁感应强度和交流电流的电流密度的乘积成正比。理论解析结果和实验结果基本一致。

(3) 磁声波具有促进凝固组织晶粒细化的作用。

本文得到 LOI 热工工程有限公司的资助, 作者在此表示感谢。

参考文献

- [1] Abramov O V. *Ultrasound in Liquid and Solid Metals*, Florida: CRC Press Int, 1994: 273
- [2] Campbell J. *Int Met Rev*, 1981; 26, 71
- [3] Osawa Y, Arakane G, Takamori S, Sato A, Ohashi O. *J Jpn Foundry Eng Soc*, 1999; 71: 98
- [4] Kawakami M, Tono N, Dowaki S, Ito K. *Tetsu Hagane*, 1990: 76, 856
(川上正博, 户野直之, 堂脇正市, 伊藤公允. 铁と钢, 1990; 76: 856)
- [5] Bai X Q, He J C. *Acta Metall Sin*, 2001: 14, 375
(白晓清, 赫冀成. 金属学报, 2001: 14, 375)
- [6] Miyoshi J, Kikuchi Y, Noumoto O. *Ultrasonic Technique Handbook*. Tokyo: Daily Industry Newspaper Publication Company, 1983: 394
- [7] Burgoyne J W. *3rd Int Sym on Electromagnetic Processing of Materials*, Institute of Iron and Steel of Japan, Nagoya, 2000: 618
- [8] Iwai K, Asai S, Wang Q, Momiyama T, Amano S. *CAMP-ISIJ*, 1999; 12: 45
- [9] Wang Q, Momiyama T, Iwai K, Asai S. *CAMP-ISIJ*, 1999; 12: 850
- [10] Wang Q, Kawai S, Iwai K, Asai S. *CAMP-ISIJ*, 2000; 13: 150
(大洋嘉昭, 荒金吾郎, 高森晋, 佐藤彰, 大桥修. 铸造工学 (日本), 1999; 71: 98)