

## 强磁场与交流电叠加对纯铝凝固组织的影响

余建波, 任忠鸣, 邓 康, 任维丽, 李 喜, 王 俊

(上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

**摘 要:** 研究强磁场和交流电叠加对纯铝凝固组织的影响。结果表明: 强磁场和交流电叠加对纯铝的凝固组织产生明显的细化作用, 磁场强度一定时(10 T), 随电流强度增大, 细化效果变好; 电流强度一定时(10 A), 随着磁场强度的增大, 晶粒细化程度先增强后略为减弱, 其最佳值为 6 T; 液体金属在叠加场中受电磁振荡力和电磁粘滞力的共同作用, 其合力随着磁场强度的增大先增加后减小, 存在极值点, 而晶粒细化与该合力直接相关。

**关键词:** 纯铝; 强磁场; 交流电; 电磁力; 细化

**中图分类号:** TG 146.2

**文献标识码:** A

## Effects of simultaneously imposing high magnetic field and alternative current on solidification structures of pure aluminum

YU Jian-bo, REN Zhong-ming, DENG Kang, REN Wei-li, LI Xi, WANG Jun

(School of Material Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** The refinement of solidified structure of pure aluminum by locally and simultaneously imposing a static magnetic field and an alternating current that generated a vibration in the melt was investigated. It is shown that the imposition refines the crystal grains greatly. The extent of grain refinement is increased with increase magnitude of alternating current. At a certain alternating current, the refinement is increased firstly with increasing magnetic field and then reaches the optimum value at 6 T. With further increase of the magnitude of magnetic field, the refining effect is diminished. Two forces arise from the magnetic field, one is the magnetic vibration force and the other is magnetic viscous force, and the refinement of grains is related to the resultant force from these forces.

**Key words:** aluminum; high magnetic field; AC current; electromagnetic vibration force; refinement

利用电磁场在液体金属中产生的振荡来细化金属凝固晶粒一直受到人们关注。早在 20 世纪 70 年代, Asai 等<sup>[1-2]</sup>就对磁场作用下的金属凝固进行了研究, 发现在金属凝固过程中施加一个交变磁场可以细化晶粒, 缩小柱状晶区; 单一直流磁场作用于凝固体系时反而扩大了柱状晶区, 并预言只有同时应用电场和磁场时凝固组织才能明显细化。1983 年, Bassyouni 等<sup>[3]</sup>发现单一交变磁场能够明显细化晶粒, 但磁感应强度过高或过低都不能取得良好的细化效果。1989 年, 葛丰德等<sup>[4]</sup>发现脉冲磁场细化晶粒不仅仅取决于

磁感应强度, 还与电流强度、电流波形及频率等因素有关。20 世纪 90 年代 Vives 等<sup>[5-7]</sup>发明电磁振荡方法, 其原理是在合金的凝固过程中, 同时施加一个静磁场  $B$  和一个与之垂直的交变磁场, 它们相互作用在熔体内部产生一个交变电磁力  $F$ , 迫使熔体发生振动, 从而细化晶粒、去除气体以及提高充型能力, 且这种振动对熔体基本无污染。Radjai 等<sup>[8-9]</sup>研究了电磁振动对 Al-Si 亚、过共晶合金组织细化的影响, 验证了空化现象, 并探索频率和振荡强度影响晶粒细化的规律。Iwia 等<sup>[10-11]</sup>则研究了强磁场和大电流对低熔点合

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(50225416)上海市科委重点基金资助项目(04DZ14002)

**收稿日期:** 2006-07-12; **修订日期:** 2006-09-26

**通讯作者:** 任忠鸣, 教授; 电话: 021-56331102; 传真: 021-56332939; E-mail: zmren@staff.shu.edu.cn

金 Pb-Sn 的凝固组织的影响, Asai 等<sup>[12]</sup>和王强等<sup>[13-14]</sup>先后运用交流磁场、高强度静磁场+交流电, 高强度静磁场+交流磁场 3 种方式在液态金属内生成高频电磁力, 从而产生电磁超声波。理论分析表明: 磁声波的强度和所施加的磁感应强度和电流密度的乘积成正比, 实验中测定的磁声波压力和理论解析结果基本一致。对于磁场和交流电叠加场的研究主要集中在操作参数对细化效果的影响, 而对其细化机理还不清楚。本文作者采用纯金属铝研究稳恒强磁场和交电流叠加作用使凝固组织细化的规律, 重点研究了磁场强度和电流密度对纯铝凝固组织细化的作用, 并对细化机理进行了探讨。

## 1 实验

实验装置图如图 1 所示, 主要由水冷套、超导强磁体、工频激振电源、加热炉和温控系统组成。超导强磁体中心的磁场强度在 0~14 T 之间连续可调, 方向竖直向上。通电电极宽 4 mm, 厚 2 mm, 插入深度 15 mm, 电极间距 17 mm。将 99.9% Al 在感应加热炉中熔成直径 25 mm、长 80 mm 的试棒, 经打磨表面后装入长 100 mm、内径 25 mm 的刚玉管中。实验时将试棒在磁场中加热至 720 °C 并保温 30 min, 随后, 在预定的磁场强度(0~10 T)和工频电流(1~10 A)下随炉冷却至 600 °C。试棒冷却后, 将其从刚玉管中取

出, 并沿电极下端 2 mm 处分别横剖和纵剖, 经研磨、腐蚀后观察金相组织。

## 2 实验结果

### 2.1 磁场强度对凝固组织的影响

图 2 和 3 所示是电流强度为 10 A 时不同磁场强度下纯铝的横截面和纵截面晶粒组织。在无磁场和电流条件下凝固时(图 2(a)和图 3(a)), 晶粒为粗大的等轴

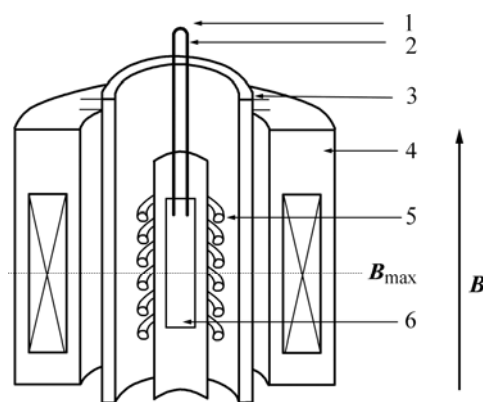


图 1 实验装置图

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment: 1 AC power; 2 Electrodes; 3 Water cooling sheath; 4 Superconducting magnet; 5 Heating furnace; 6 Sample

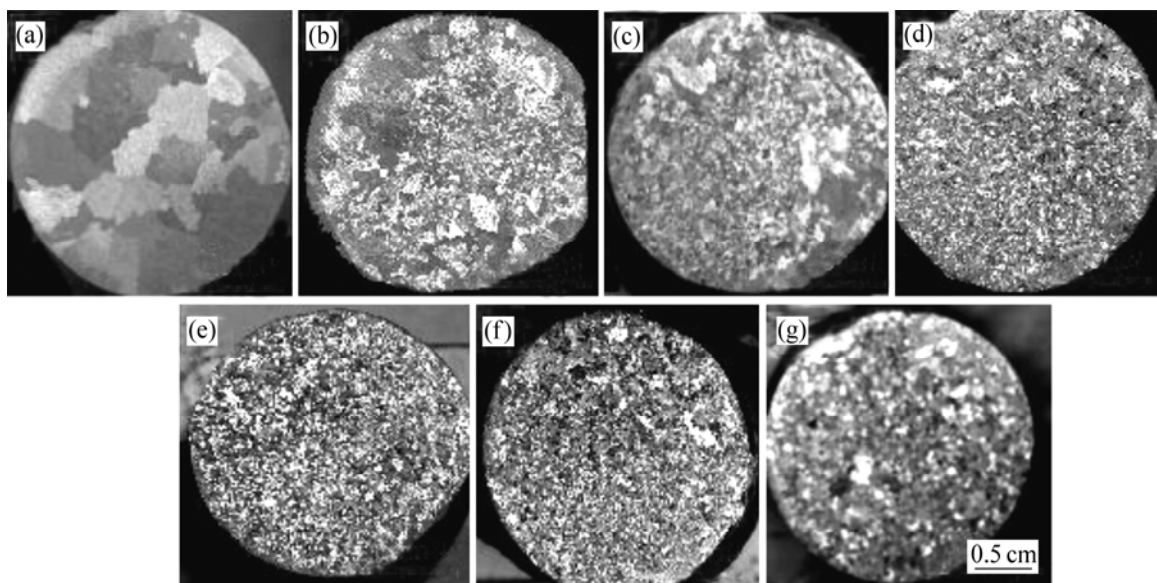


图 2 不同交流电与磁感应强度复合对纯铝横截面凝固组织的影响

Fig.2 Effects of various magnetic intensities on cross-sectional macrostructure of aluminum: (a)  $B=0$  T,  $I=0$  A; (b)  $B=1$  T,  $I=10$  A; (c)  $B=2$  T,  $I=10$  A; (d)  $B=4$  T,  $I=10$  A; (e)  $B=6$  T,  $I=10$  A; (f)  $B=8$  T,  $I=10$  A; (g)  $B=10$  T,  $I=10$  A

晶, 大小不均匀; 同时施加磁场和交流电后, 晶粒明显细化(图 2(b)~(g)和图 3(b)~(e)); 随磁场强度提高, 晶粒进一步细化, 细化的传递范围随之增加, 并在磁场强度为 6 T 时, 细化程度达到最大, 传递范围最深(图 2(e)和图 3(c)); 再进一步增加磁场强度, 晶粒反而粗化。这说明磁场与电流复合所产生的细化作用存在极值。

## 2.2 电流强度对凝固组织的影响

图 4 所示是磁感应强度为 10 T 时不同电流强度下试样横截面的晶粒组织。由图可见, 当电流较小时(图 4(b)), 晶粒细化程度不均匀, 随电流增大(图 4(c)和(d)), 晶粒进一步细化, 而且趋于均匀。比较图 2(b)和图 4(b)可知, 虽然代表振荡力大小的电流与磁场乘积两者相同, 但磁场较小的试样的晶粒较为细小, 细化范围较大。

图 5 所示是图 4 中试样的纵截面宏观组织。由图可知, 随着电流的增大, 细化的传递范围进一步增加(图 5(c)和(d))这说明同一磁场强度下, 电流强度越大, 细化传递范围越大。

试样的晶粒尺寸测量结果如图 6 所示。图 6(a)所示是电流强度为 10 A 时不同磁场强度下试样横截面单位面积的平均晶粒数。由图可以看出, 当电流一定、磁场强度小于 6 T 时, 随磁场强度的增加单位面积的晶粒数急剧增加; 当磁场强度为 6 T 时, 晶粒最细小, 平均晶粒尺寸约为 200  $\mu\text{m}$ 。但当磁场强度大于 6 T 时, 随着磁场强度的增加, 单位面积的晶粒数反而下降。图 6(b)所示是磁场强度为 10 T 时不同电流强度下试样横截面的平均晶粒数。由图可以看出, 在同一磁场下随着电流的增大, 单位面积的晶粒数逐渐增加, 而且电流较小时, 晶粒数随电流的递增趋势更明显。

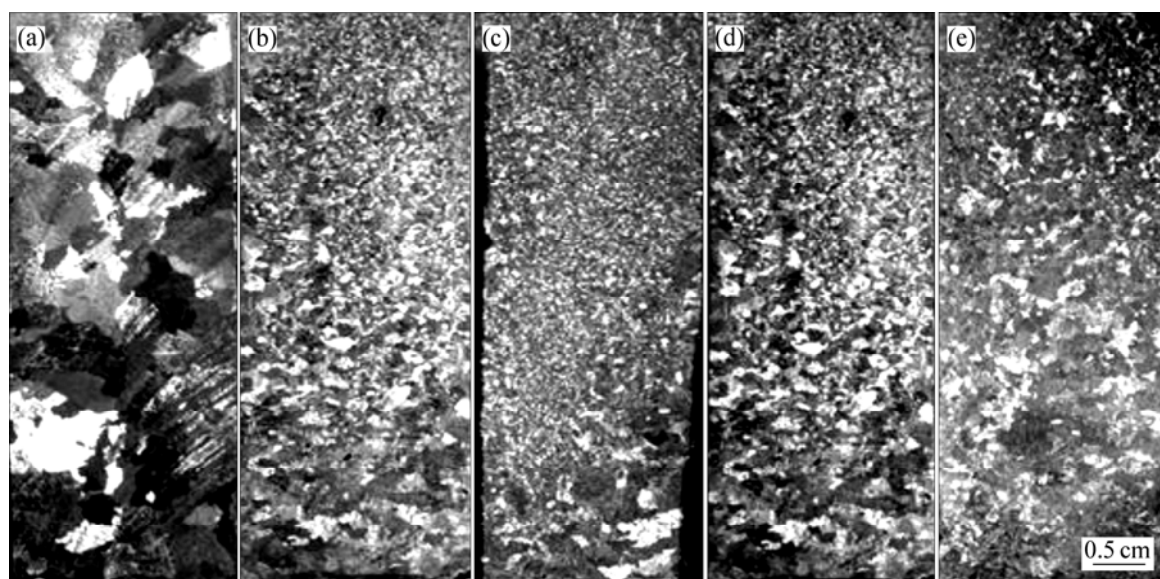


图 3 10 A 交流电与不同磁感应强度复合对纯铝纵截面细化范围的影响

**Fig.3** Effects of magnetic fields on vertical section macrostructures of specimen at 10 A: (a)  $B=0$  T; (b)  $B=4$  T; (c)  $B=6$  T; (d)  $B=8$  T; (e)  $B=10$  T

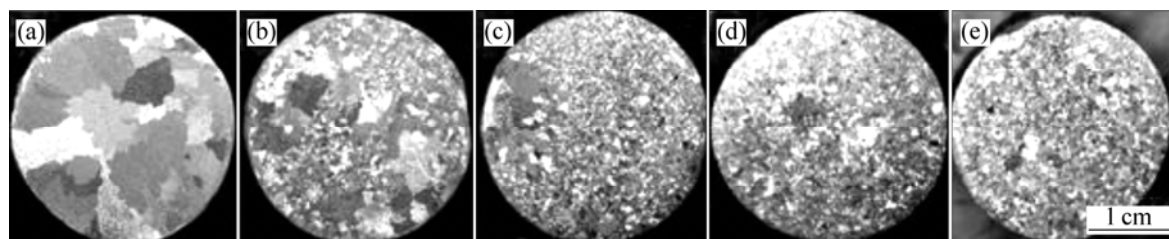


图 4 10 T 强磁场与不同交流电复合对纯铝横截面凝固组织的影响

**Fig.4** Effects of current intensity on cross-sectional macrostructures of specimen at 10 T: (a)  $I=0$  A; (b)  $I=1$  A; (c)  $I=3$  A; (d)  $I=7$  A; (e)  $I=10$  A

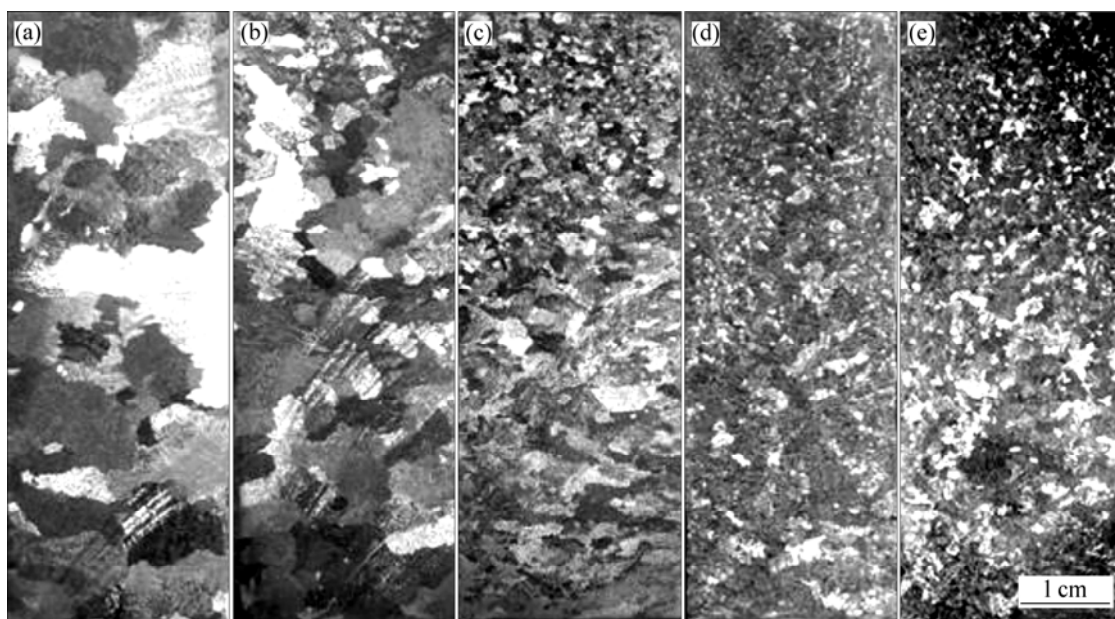


图 5 10 T 强磁场与不同交流电复合对纯铝纵截面细化范围的影响

**Fig.5** Effects of various current intensities on refine depth on vertical section of specimen at 10 T: (a)  $I=0$  A; (b)  $I=1$  A; (c)  $I=3$  A; (d)  $I=7$  A; (e)  $I=10$  A

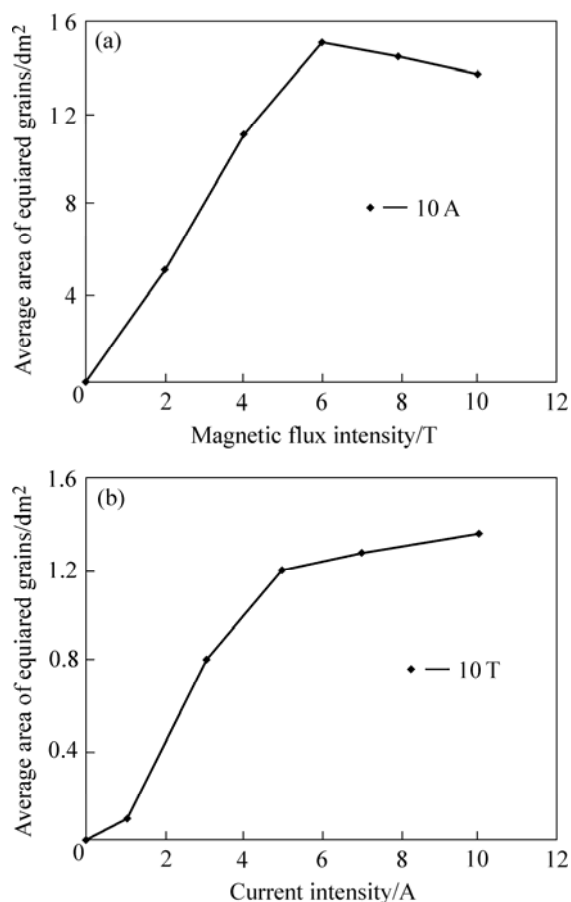


图 6 纯铝横截面的平均晶粒度比较

**Fig. 6** Comparisons of average grain number in cross section of aluminum: (a) 10 A; (b) 10 T

### 3 分析与讨论

磁场与交变电流叠加在液体金属中产生振荡波动, 通常这种波动导致空化效应, 从而促进形核, 细化晶粒。但经计算可知, 本实验中磁场强度最大为 10 T, 电流密度最大为  $10^3$  A/m<sup>2</sup>, 熔体受到的电磁压力为  $10^4$  Pa 量级, 小于空化效应的临界压力  $10^5$  Pa, 说明本实验中空化效应不是细化的主要原因。

众所周知, 金属的冷却速度越快, 晶粒越细小, 而液体金属的振荡促进传热, 将加速热量的传递, 使冷却速度提高<sup>[8]</sup>。为了研究磁场与电流复合对晶粒组织影响机制, 对凝固温度进行了测量, 结果如图 7 所示。由图可见: 1) 单独施加电流时(0 T、10 A)的降温曲线几乎与 0 T、0 A 时的重叠, 其凝固组织晶粒也比较粗大(图 3(a)), 说明单独施加电流对凝固过程和组织影响并不明显; 2) 施加磁场时的平衡凝固温度明显升高<sup>[16-17]</sup>, 10 T 时达 7 °C, 通常凝固点提高, 则过冷度增大, 晶粒应该细化, 然而比较图 3(a)和图 5(a), 发现晶粒反而粗化, 说明磁场的作用很小, 相反强磁场抑制对流, 不利于晶核脱离形核位置和晶粒的分裂, 所以导致晶粒粗大; 3) 虽然各条件下的凝固点温度不同, 但冷却速度相近, 说明施加磁场和电流基本不影响冷却过程。因此, 本实验的晶粒细化非因冷却

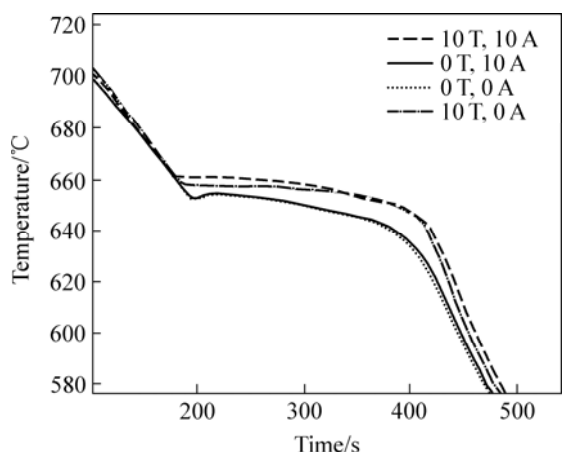


图 7 不同电磁场条件下试样的冷却曲线

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

条件变化所致。进而表明，磁场与电流叠加产生的振荡力在晶粒细化中发挥主要作用。

通常纯铝凝固时难以生成枝晶，因此不易以枝晶熔断机制使晶粒细化。更可能的细化机理是振动力使晶核快速脱离形核位置，导致形核位置不断产生新晶核，从而细化晶粒。为了判定形核位置，测定了试样顶部和中部的温度，结果如图 8 所示。可见，顶部温度低于中部温度。因此可以认为，金属液上表面因直接与空气接触而成为形核位置。而电磁振荡的振源恰在该处，因而在电磁振荡力作用下，生成的晶核来不及长大就快速脱离该处，使其得到不断更新，从而晶核源源不断产生。当金属液的温度梯度不足以使其重熔时，分离出来的晶核就成为核心，其在生长过程中又受到强大振荡力作用，可能发生破碎和增值现象，

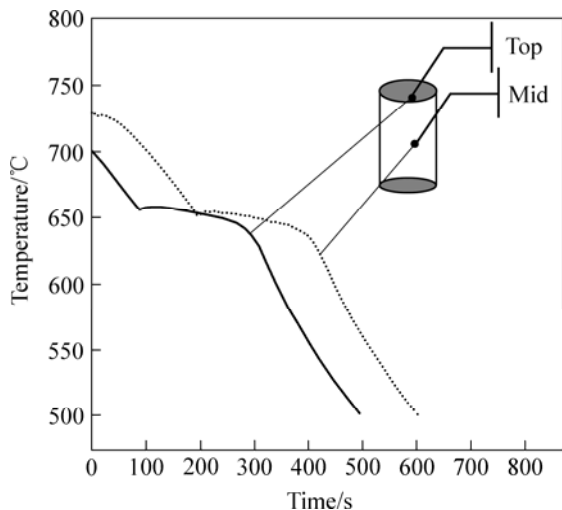


图 8 试样不同位置的冷却曲线

Fig.8 Temperature profiles in different zones of sample

使晶粒细化。

为进一步分析强磁场与交变电流叠加的细化作用，对所产生力进行分析。设在金属液凝固过程中同时施加稳恒强磁场  $B$  和交变电流  $j$ ，两者叠加作用在金属内部产生与交变电流频率相同的电磁振荡力  $F_{\text{drive}}$ ：

$$F_{\text{drive}} = j \times B \quad (1)$$

同时，在静磁场  $B$  中，导电金属液体的运动将切割磁力线会产生阻碍熔体流动的 Lorentz 力  $F_{\text{drag}}$ ，抑制熔体流动

$$F = j_{\mu\text{-induced}} \times B = \sigma(v \times B) \times B \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为金属导电率； $v$  为液体金属运动速度。

因此，液体金属所受合力为

$$F_{\text{em}} = F_{\text{drive}} - F_{\text{drag}} = j \cdot B - \sigma(v \times B) \times B \quad (3)$$

图 9 所示为  $F_{\text{em}}$  随磁场强度的变化曲线。由图可知，液态金属所受的电磁合力随着磁场强度的增大先增加后减小，存在极大值点。在较小的磁场下，驱动力  $F_{\text{drive}}$  占优势，随着磁场强度的增大，由于  $F_{\text{drive}} \propto B$ 、 $F_{\text{drag}} \propto B^2$ ，粘滞力  $F_{\text{drag}}$  增长较快，在一定磁场强度下，合力达到最大，然后减小，甚至趋近于零。

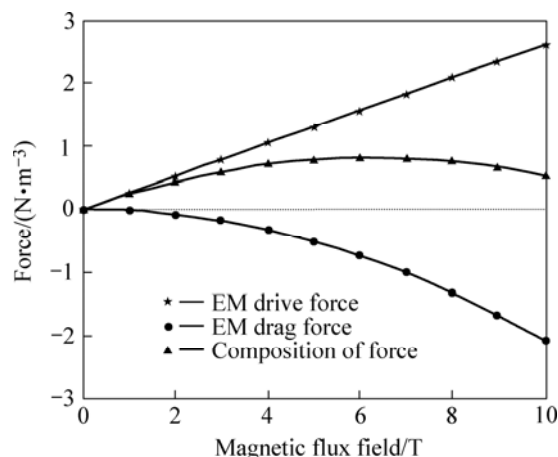


图 9 不同磁场条件下液态金属的受力图

Fig.9 Force of liquid metal under different magnetic fields

在本实验中，随磁场强度增加，振荡力增加较快，因而晶粒随之细化，在 6 T 时振荡力达到最大，晶粒亦最细，细化范围最大；此后增加磁场强度，磁场粘滞力增加速度大于振荡力的，所以导致晶粒细化程度降低，范围缩小。10 T 磁场条件下，晶粒

已明显粗于 6 T 的, 细化区域也显著缩小。

## 4 结论

稳恒强磁场与交流电叠加对纯铝的凝固组织具有明显的细化作用。同一磁感应强度下, 随着电流强度的增大, 细化效果增强。在同一电流强度下, 晶粒的细化程度随磁场强度的增加先增加而后减小。当电流强度为 10 A 时, 在 6 T 处存在细化的极值, 这是磁场驱动力和磁场粘滞力共同作用的结果。适当控制电流密度和磁场强度, 可以获得细小、均匀的组织。

## REFERENCES

- [1] Asai S, Yasui K, Muchi I. Effects of electric and magnetic forces on the solidified structure [J]. ISIJ International, 1978, 18: 754–760.
- [2] Asai S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of Materials[J]. ISIJ International, 1989, 29(12): 981–992.
- [3] Bassyouni T A, Badr A A, Abdel A N, Lakner J, Olah Z. Effect of electromagnetic forces on aluminum cast structure[J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1983, 33(12): 733–742.
- [4] 葛丰德, 何洪亮, 霍树海. 脉动磁场铸造[J]. 机械工程学报, 1989, 25(1): 1–6.  
GE Feng-de, HE Hong-liang, HUO Shu-hai. Solidification in pulse magnetic field[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1989, 25(1): 1–6.
- [5] Vives C. Effect of electromagnetic vibration on the microstructure of continuously cast aluminum alloys[J]. Mater Sci Eng A, 1993, 173(1): 169–172.
- [6] Vives C. Crystalization of aluminium alloys in the presence of cavitation phenomena induced by vibrating electromagnetic pressure[J]. Journal of Crystal Growth, 1996, 158(1): 118–127.
- [7] Vives C. Effects of forced electromagnetic vibrations during the solidification of aluminum alloys: part II. Solidification in the presence of colinear variable and stationary magnetic fields[J]. Metall Mater Trans B, 1996, B27: 457–464.
- [8] Radjai A, Miwa K, Nishio K. An investigation of the effect caused by electromagnetic vibration in a hypereutectic Al-Si alloy melt[J]. Metall Mater Trans A, 1998, A29(5): 1477–1484.
- [9] Radjai A, Miwa K. Structural refinement of gray iron by electromagnetic vibration[J]. Metall Mater Trans A, 2002, A33(9): 3025–3030.
- [10] Takagi T, Iwai K, Asai S. Solidified structure of Al alloys by a local imposition of an electromagnetic oscillation force[J]. ISIJ International, 2003, 43(6): 842–848.
- [11] Sugiura K, Iwai K. Effect of operating parameters of an electromagnetic refining process on the solidified structure[J]. ISIJ International, 2004, 44(8): 1410–1415.
- [12] Sugiura K, Iwai K. Refining mechanism of solidified structure of alloy by electromagnetic refining process [J]. ISIJ International, 2005, 45: 962–966.
- [13] Wang Q, Kawai S, Iwai K, Asai S. Generation of compression waves in a liquid metal by simultaneous imposition of static magnetic field and high frequency electric current [J]. CAMP-ISIJ, 2000, 13(1): 150–153.
- [14] 王 强, 赫冀成, Kawai S, Iwai K, Asai S. 磁声波对金属凝固组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38: 961–965.  
WANG Qiang, HE Ji-cheng, Kawai S, Iwai K, Asai S. Effect of magneto-acoustic wave on solidification structures of metal[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38: 961–965.
- [15] Iwai K, Sugiura K. Control of solidified structure by using electromagnetic oscillation[J]. Materials Science Forum, 2005, 475–479: 2695–2698.
- [16] Kawai S, Wang Q, Iwai K, Asai S. Generation of compression waves by simultaneously imposing a static magnetic field and an alternating current and its use for refinement of solidified structure[J]. Materials Transactions, 2001, 42(2): 275–280.
- [17] 李 喜, 任忠鸣, 高 云, 邓 康, 壮云乾, 徐匡迪. 强磁场对 Bi-Mn 合金 355 °C 包晶相变点的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15 : 397–403.  
LI Xi, REN Zhong-ming, GAO Yun, DENG Kang, ZHUANG Yun-qian, XU Kuang-di. Effect of high magnetic field on peritectic reaction in Bi-Mn alloys at 355 °C[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15: 397–403.

(编辑 龙怀中)