

特约专栏

# 强磁场下金属凝固研究进展

任忠鸣

(上海大学材料科学与工程学院 上海市现代冶金和材料制备重点实验室, 上海 200444)

**摘要:** 强磁场下金属凝固研究是一个新开辟的研究方向, 有着广阔的前景。叙述了强磁场的基本效应, 综述了强磁场下金属凝固的研究进展。重点介绍了磁场对凝固动力学、固/液界面稳定性、单相合金生长、共晶生长、热电磁流动及其作用、第二相颗粒运动的影响等方面的研究工作。指出了需要进一步研究的主要问题, 以及所需的相关物理参数。

**关键词:** 凝固; 金属; 强磁场; 磁力; 晶体生长

**中图分类号:** TG249; TM153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2010)06-0040-10

## Progress in Research of Solidification of Metals under a Strong Magnetic Field

REN Zhongming

(Department of Material Science and Engineering, Shanghai University Key Lab. of Modern Metallurgy and Processing of Materials of Shanghai, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** Solidification of metals under a strong magnetic field is a new area for research. Here, progress in the area is reviewed along with presentation of the fundamental effects of magnetic field. Focus is paid on the subjects of influence of a magnetic field on kinetics of solidification, instability of S/L interface, crystal growth of monophasic alloy, eutectic growth, thermoelectrical magnetic convection and its effects, and behavior the secondary phase. The core problems which should be investigated deeply and the key parameters needed are addressed.

**Key words:** solidification; metal; strong magnetic field; magnetic force; crystal growth

### 1 前言

磁场对物质具有力的作用, 基本的力有磁力

$$\vec{F} = X/\mu_0 (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \quad (1)$$

和与电流相互作用产生的洛伦兹力

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

其中,  $X$  为磁化率,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $B$  为磁感应强度。

物质在磁场中还将受到磁化, 生成磁化能量

$$G_M = - \int_0^H \mu_0 M dH_{ex} \quad (3)$$

其中,  $G_M$  为磁 Gibbs 自由能,  $M$  为磁化强度,  $H$  为磁场强度。

金属在磁场中凝固时, 将受到磁力的作用和因磁化能量而改变热力学状态。金属中的任何电流也将与磁场

相互作用产生洛伦兹力。因而, 磁场将对金属凝固产生影响, 进而改善材料性能。为此, 人们开展了长期研究。

磁场可分为时变磁场(包括交变和脉冲磁场)和静磁场。时变磁场对金属凝固的影响主要是利用其在金属液中感生的搅拌力, 从而改善凝固组织, 这方面已有大量研究。

静磁场通常是利用其抑制金属流动的作用而影响金属凝固。近十余年来, 由于磁场发生技术的发展, 主要是超导技术的发展, 使得 10 T 左右的强磁场的获得变得容易, 因而强静磁场下金属凝固的研究得到迅速发展。发现强磁场除抑制流动外, 还具有其他重要的作用。这期间, 大量有重要价值的现象和规律被发现, 相应理论也有很大进展, 为利用强磁场控制金属凝固, 改善材料性能, 获得常规方法难以获得的新材料, 开辟了新途径。

### 2 磁场中纯金属凝固的热力学分析

金属在凝固点温度多数为非铁磁性, 其在磁场中凝固过程中所产生的磁吉布斯自由能变化为<sup>[1]</sup>。

$$\Delta G_M = G_{M,n}^S - G_{M,n}^L = -\frac{1}{2} \mu_0 \Delta X^{S-L} H_{ex}^2 \quad (4)$$

收稿日期: 2009-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(5067106008, 5091130365); 上海市科学技术委员会课题(08dj1400404, 071005103, 08D21130100)

通信作者: 任忠鸣, 男, 1958 年生, 教授, 长江学者

因而磁场中纯金属凝固的自由能变化  $\Delta G$  为:

$$\Delta G = \Delta G_v + \Delta G_m \quad (5)$$

其中,  $\Delta G_v$  为形成单位体积固相的体积吉布斯自由能差值,  $\Delta G_m$  为磁场中形成单位体积固相的磁吉布斯自由能的变化。

磁场下凝固过冷度为:

$$\Delta T = \frac{\Delta X^{S-L} B^2}{2\mu_0 \Delta H_m} T_m \quad (6)$$

金属在凝固温度的体积磁化率通常在  $10^{-4} \sim 10^{-7}$  之间, 如果取金属液固相磁化率差值  $\Delta X^{S-L} = 10^{-4}$ , 金属凝固潜热为  $10^7 \text{ J/m}^3$ , 真空磁导率  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ , 外磁场磁感应强度为 10 T, 金属无磁场时凝固点温度  $T_m \approx 10^3 \text{ K}$ , 带入式(6)得:

$$\Delta T \approx T_m \left( \frac{10^{-4} \times 10^2}{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 10^7} \right) \approx 0.1 \text{ K}$$

可见, 在弱磁材料的凝固中, 10 T 磁场对凝固点的影响较小。

对于磁性合金, 磁场的影响则比较显著。Bi-Mn 合金在凝固过程中发生顺磁向铁磁的转变, 因而磁场对其凝固点影响较大。图 1 所示为实验测定磁场下凝固点变化的结果, 表明该合金中  $\text{BiMn}_{1.08} + \text{L} \rightarrow \text{BiMn}$  转变点温度随磁场的增大而提高。在 10 T 磁场中, 该凝固点温度可升高 20 °C 左右<sup>[2]</sup>。

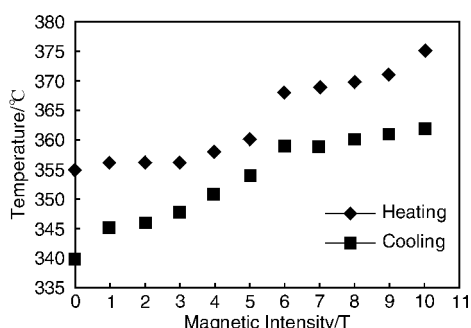


图1 磁场对 Bi-6% Mn 合金凝固点温度影响

Fig. 1 Influence of magnetic field on solidification temperature of Bi-6% Mn alloy

理论分析其凝固点温度与磁场的关系, 可得关系式

$$T_2 - T_1 \approx \frac{2\mu_0 M_s H_{ex}}{(S_A^\beta - S_A^\alpha) + (S_A^\beta - S_A^L) + R \ln \frac{(\alpha_A^\beta)^2}{\alpha_A^\alpha \alpha_A^L}} \quad (7)$$

其中,  $S$  为熵,  $a$  为活度, 上标  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $L$  分别代表  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $L$  相, 下标  $A$  代表  $A$  组元。该式表明凝固点的变化与磁场成正比关系, 与实验结果一致。

DTA 测量合金在磁场中凝固过程, 更深入揭示了磁场的作用。图 2<sup>[3]</sup> 和图 3<sup>[4]</sup> 分别为纯 Bi 和 Al-Al<sub>2</sub>Cu 共晶合金的 DTA 测量结果。可见, 两种材料加热时的熔化点温度基本不受磁场的影响, 这说明它们的热力学相

变点温度基本不变, 这与前述分析一致。但在冷却结晶时, Bi 的形核温度随磁场的增大而提高, Al-Al<sub>2</sub>Cu 共晶的形核温度则随磁场增加而降低, 其变化值达 10 °C 左右。这说明磁场对结晶的动力学过程产生明显影响。值得注意的是, Bi 为抗磁性, Al 为顺磁性, 因而可以推

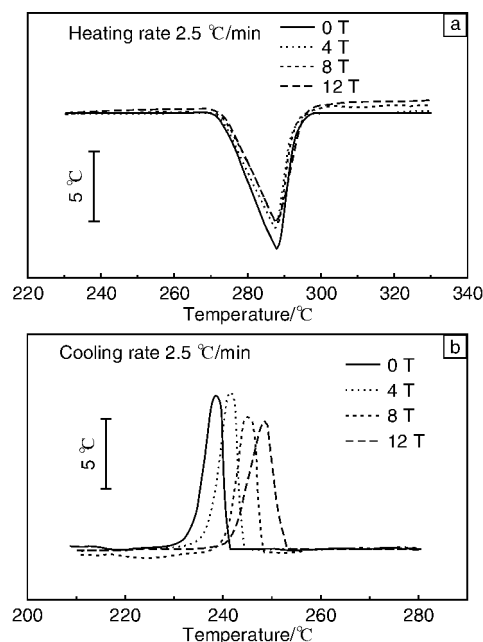


图2 Bi 熔化和凝固时的 DTA 测量结果

Fig. 2 DTA of Bi during melting and solidification; (a) melting and (b) solidification

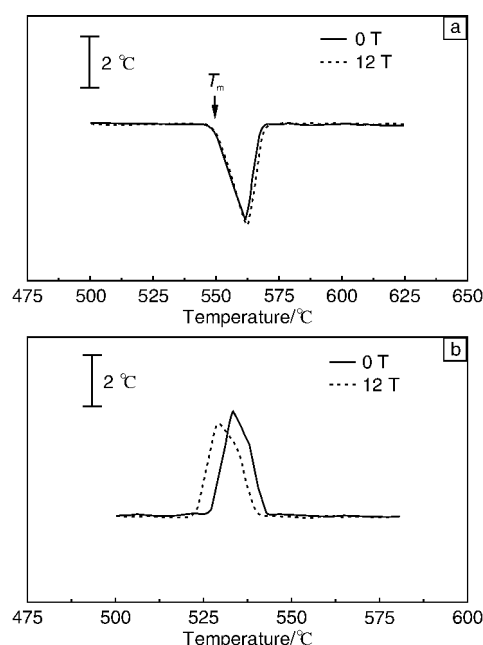


图3 Al-Al<sub>2</sub>Cu 共晶熔化和凝固时的 DTA 测量结果

Fig. 3 DTA of Al-Al<sub>2</sub>Cu eutectic during melting and solidification; (a) melting and (b) solidification

测磁场的影响与物质的磁性相关。另一方面,在共晶定向凝固中,具有铁磁性的 Bi-Mn 共晶的棒间距增大<sup>[5]</sup>,而弱磁性的 Al-Al<sub>2</sub>Cu 共晶片间距减小<sup>[6]</sup>,其原因可归结为磁场增强了铁磁性 Mn 原子的扩散,减弱了弱磁性 Cu 原子的扩散,因而导致共晶组织的变化。在 Al-Si 合金凝固中也发现磁场可抑制 Si 扩散,使得初生硅颗粒和共晶硅细化<sup>[7]</sup>。同样说明磁场可影响扩散。

磁场影响结晶动力学和扩散过程的本质应归结为磁场对原子迁移行为的影响,文献<sup>[8]</sup>发现磁场对扩散激活能影响较小,而对扩散系数  $D_0$  影响较大,这提出了值得研究的更深层次问题,其意义深远。

### 3 胞枝晶生长

实验表明,在 Al-0.85% Cu 合金定向凝固中施加磁场降低了凝固界面的稳定性<sup>[9-10]</sup>。如图 4 所示,施加

10 T 磁场后,凝固界面在较低的生长速度下便失稳,出现点状和胞晶组织。同时,界面的形状也发生变化,变得不规则。在胞晶生长时也可看到磁场导致胞晶侧向分枝和端部的分裂,加速向枝晶的转变。这可归结为液体中由于磁场的作用而产生流动<sup>[11]</sup>,从而破坏界面的稳定性。实际上,除了通常的对流外,在液体金属中还会产生热电磁对流<sup>[11]</sup>,这种对流对凝固有较大影响,后面将对此进行探讨。静磁场对金属中的流动还具有抑制作用,当磁场强度达到数个特斯拉时,流动基本停止。因此,关于强磁场导致界面失稳的另一种机制可能是磁场在固相中诱发的应力作用<sup>[12]</sup>。Yang 等人通过分析和实验证明固相中应力对界面稳定性有影响<sup>[13]</sup>。

磁场对枝晶生长同样有着明显的影响。在 Al-4.5% Cu 合金定向凝固中施加纵向的静磁场,枝晶变得紊乱和细小,如图 5a 和 b 所示<sup>[14]</sup>。从图中也可观察到

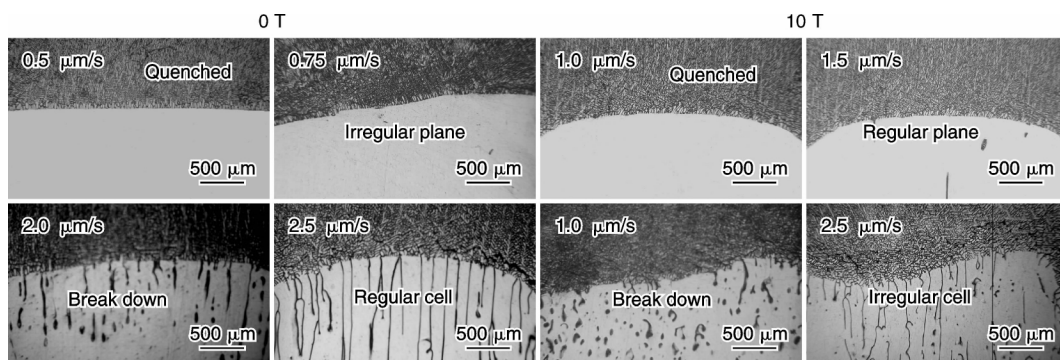


图 4 磁场对定向凝固界面稳定性的影响

Fig. 4 Influence of magnetic field on instability of S/L interface Al-0.85% Cu alloy ( $G=62.8$  K/cm)

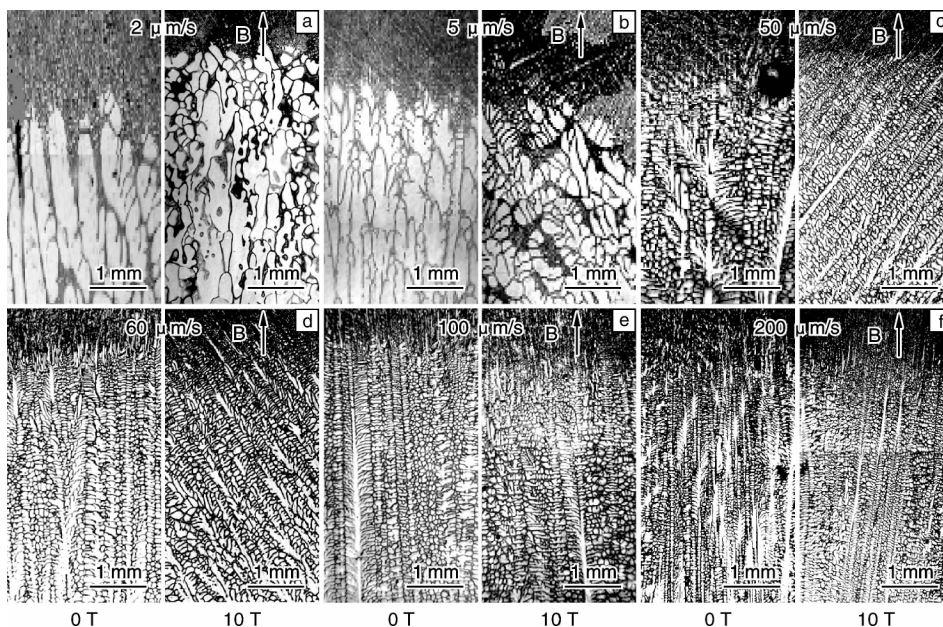


图 5 磁场对 Al-4.5% Cu 合金定向凝固组织的影响 ( $G=60$  °C/cm)

Fig. 5 Influence of magnetic field on unidirectional solidification of Al-4.5% Cu alloy

枝晶发生倾斜。当凝固速度增加后,枝晶生长变得规则,但枝晶倾斜的状态仍保持(图 5c, d)。当速度达到  $100 \mu\text{m/s}$  以上时,枝晶基本保持竖直,如图 5e, f 所示。

倾斜的枝晶的晶体位向也发生改变。如图 6 所示, X 射线衍射结果表明,在磁场中晶体倾向以  $\langle 111 \rangle$  方向指向磁场方向,即凝固方向。即使图 5 中所示的紊乱枝晶的方向,经 EBSD 分析,仍为  $\langle 111 \rangle$  方向<sup>[15]</sup>。其原因可归结为  $\alpha\text{-Al}$  晶体的易磁化方向为  $\langle 111 \rangle$ ,在磁场中晶体将以其易磁化方向转向磁场方向,从而导致晶体的倾斜。

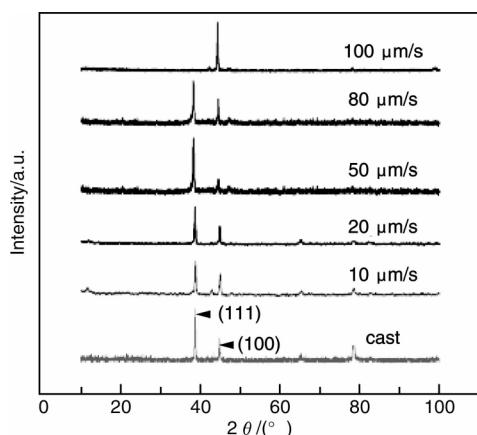


图6 图5中10 T试样的X射线衍射结果

Fig. 6 XRD of the specimens with 10 T magnetic field as shown in Fig. 5

磁场还影响了枝晶间距。从图 5 可看出,磁场细化了高次枝晶间距,但增大了一次枝晶间距。枝晶间距的变化往往与对流相关,热电磁对流无疑将起很大的作用。

当磁场与定向凝固方向垂直时,易于产生宏观偏析,试棒的一侧溶质浓度富集,而另一侧贫化。枝晶间距则是贫化区域细化,富集区粗化<sup>[16]</sup>。这也与热电磁对流相关。

热电势的产生源于 Seebeck 效应,当两种物质的接触点处于不同温度时,因热电功率不同而在这两点之间生成热电势,类似于热电偶。金属在凝固过程中存在温度梯度,金属的固相和液相之间的热电功率不同,从而产生热电势,进而产生热电流,合金浓度的差别(如枝晶干与枝晶间)也使得热电功率不同,同样会产生热电流。热电流与磁场相互作用,从而产生热电磁力和热电磁对流(Thermoelectrical Magnetic Convection, TEMC)。Al-Cu 合金中的热电势约为  $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,因此在 10 T 磁场中所产生的力约为  $10^4 \text{N/m}^3$ ,大致与重力相当,所以对凝固产生明显的影响。在横向施加磁场的情况下,热电流方向与温度梯度方向平行,因此热电磁力的方向垂直于温度梯度方向,从而将一侧的溶质携带至另一侧,造成宏观

偏析。文献[17-21]从实验、理论分析和数值模拟等方面研究了 TEMC 对定向凝固界面行为的影响。

磁场对 TEMC 的影响具有双重性。磁场与热电流作用产生 TEMC 的驱动力为:

$$F_s = \sigma S \vec{\nabla} T \times \vec{B} \quad (8)$$

其中,  $S$  为 Seebeck 系数;  $\vec{\nabla} T$  为温度梯度;  $\sigma$  为导电率。

另一方面,静磁场对液体金属流动  $\vec{u}$  产生阻尼作用,该阻尼力为:

$$F_R = \sigma (\vec{u} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (9)$$

由式(8)和(9)可得到金属流动速度有下式<sup>[18]</sup>:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -p + \sigma \vec{E} \times \vec{B} + \sigma S \vec{\nabla} T \times \vec{B} + \sigma (\vec{u} \times \vec{B}) \times \vec{B} + \rho \nu \nabla^2 \vec{u} \quad (10)$$

其中,  $p$  为压力,  $\vec{E}$  为电场强度,  $\nu$  为运动粘度。

由此式可知流速的变化如图 7 所示。随磁场的增加,流动先增大,达到临界值后,磁场的阻尼作用大于热电磁力,流动开始减弱。

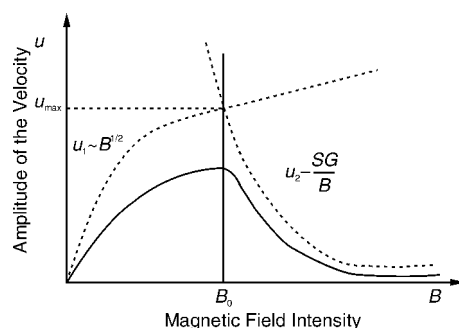


图7 液体金属中存在 TEMC 时磁场对金属中流动的影响

Fig. 7 Influence of magnetic field on convection in the melt with presence of TEMC

Al-Cu 和 Al-Si 合金中均观察到热电磁对流对凝固组织产生明显影响<sup>[22-24]</sup>。Pericleous 数值模拟研究了枝晶间热电磁流动<sup>[25]</sup>,表明 TEMC 将改变枝晶的形态,促进侧枝生长,提高尖端的生长速度。

由于热电流在各种金属的凝固过程中均存在,因此 Shercliff<sup>[26]</sup>提出利用 TEMC 影响凝固组织,从而克服普通电磁搅拌受限于金属集肤层的设想。运用磁场所产生的 TEMC 和阻尼对流的作用可以控制枝晶间的流动,从而达到控制枝晶组织的目的<sup>[27]</sup>。

因热电流产生的区域和机制的差别,存在多尺度的 TEMC,既有试样尺度( $> \text{mm}$  尺度)的,也有枝晶尺度( $10^2 \mu\text{m}$  尺度),还有共晶片间距尺度( $\mu\text{m}$  尺度)的对流,即微尺度的对流。对于微尺度的对流,尚缺乏研

究, 其对枝晶等生长的影响了解很少, 需要加强研究。

## 4 共晶生长

在 Al - Cu 共晶合金定向凝固中施加强磁场将细化

片共晶间距, 如图 8 所示<sup>[28]</sup>。但也发生共晶退化的现象。但在棒状 Bi - Mn 共晶合金定向凝固中施加磁场, 则使得 BiMn 棒粗化, 棒间距增加, 共晶组织更加规则<sup>[29]</sup>。

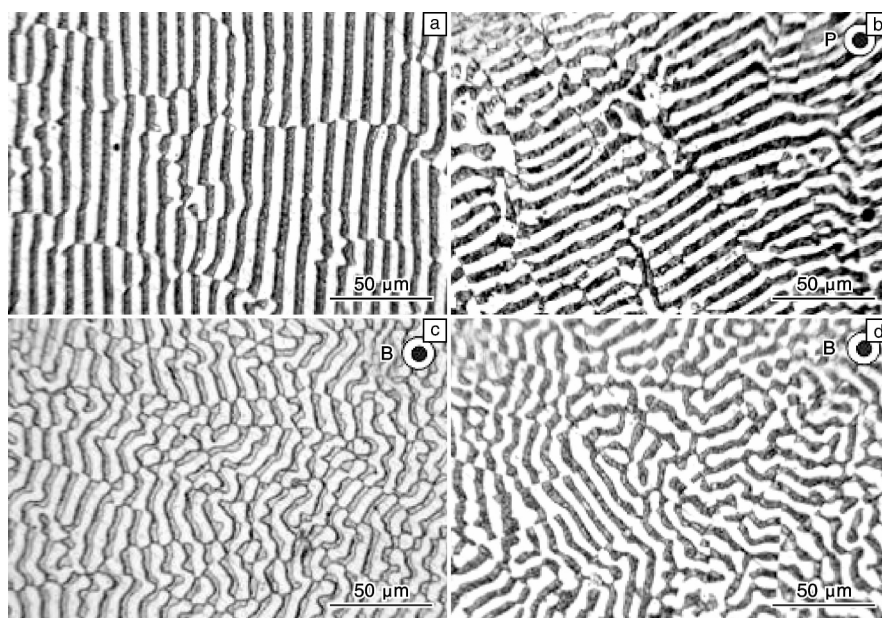


图 8 磁场对 Al - Cu 共晶组织的影响

Fig. 8 Effect of magnetic field on the Al - Cu eutectic structure

值得注意的是, 磁场下共晶的生长方向固定为  $\text{Al}_2\text{Cu}$  的  $\langle 001 \rangle$ , 而通常该共晶的生长并无固定的晶体取向, 如图 9 所示<sup>[27]</sup>。在 10 T 强磁场下对 Pb - Sn 共晶合金沿磁场方向进行定向凝固实验发现<sup>[30]</sup>, 强磁场下定向凝固耦合生长的 Pb - Sn 共晶两相组织的排列方向明显偏离磁场方向(即定向生长方向), 在较小拉速的情况下甚至出现横向起伏生长。这种现象的产生与领先相 Pb 的磁性能相关。因抗磁性的 Pb 相的易磁化方向与最优生长方向不一致, 因而导致磁场下生长方向的改变。这说明磁场具有对共晶生长取向的作用。共晶生长

受凝固界面处液体中横向扩散控制, 片(棒)间距的变化意味着扩散过程的变化。文献[17]认为磁场在固液界面处发生陡峭的变化, 从而产生较大的磁场梯度, 从而影响了扩散过程。对于铁磁物质, 如 Mn, 加速其扩散。对于弱磁物质, 如 Cu, 则抑制其扩散。所以, Bi - Mn 共晶棒间距增大, 而 Al - Cu 共晶的片间距减小。

形成共晶的两相的物性差别较大, 因而产生较大的热电势, 因此热电磁力较大, 即在共晶中产生较大的应力。这在实验中得到证实, 已在 Al - Cu 共晶中的 Al 相中观察到大量位错。另一方面, 强磁场强制共晶中领先相取向, 从而诱发应力。这些应力将使得共晶组织发生变化, 甚至退化<sup>[31]</sup>。

偏晶合金定向凝固具有与共晶类似的行为, Yasuda<sup>[32]</sup>开展了磁场控制偏晶合金定向凝固的研究, 通过施加强磁场在 Al - In 合金中获得规则排列的纤维组织。

## 5 晶体取向

1981 年 Savitsky 等<sup>[33]</sup>观察到近共晶和过共晶成分的 Bi - Mn 合金在 2.5 T 强磁场中凝固时, MnBi 相沿磁场方向取向排列。磁性能的测量表明, 合金的磁化和磁导率为各向异性。几乎同时, Mikelson 和 Karklin<sup>[34]</sup>对 Al - Ni, Cd - Zn, Bi - Cd, Al - Cu 合金体系进行了磁

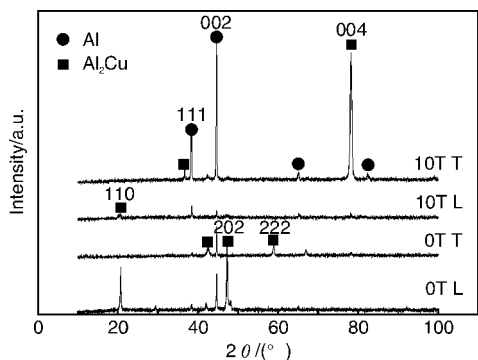


图 9 磁场对 Al - Cu 共晶取向的影响

Fig. 9 Effect of magnetic field on Al - Cu eutectic orientation

场下的凝固研究,发现在一定磁场强度下,合金中的析出相形成取向组织。Y. L. Jiao 等在 7 T 磁场下凝固  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ , 结果表明这种样品有很强的磁各向异性,  $c$ -轴平行和垂直磁场时样品的临界转变温度显著不同<sup>[35]</sup>。Asai 等<sup>[36]</sup>研究了 Al-11% Si-2% Fe 合金分别在 4.5 T 和 5 T 强磁场中的凝固现象,发现析出相垂直于磁场方向排列。在 Al-12% Ni(质量分数)合金中也观察到  $\text{Al}_3\text{Ni}$  相垂直磁场方向排列<sup>[37]</sup>, 如图 10 所示。

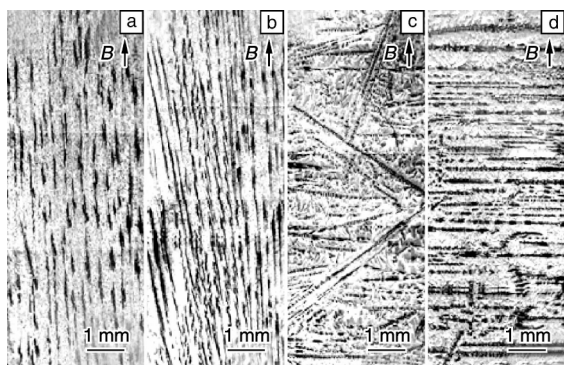


图 10 Al-12% Ni 定向凝固组织

Fig. 10 Unidirectional solidification structure of Al-12% Ni ( $R=100 \mu\text{m/s}$ ,  $G=60 \text{ K/cm}$ ): (a) 0 T, (b) 2 T, (c) 6 T, and (d) 12 T

在 Fe-49% Sn 偏晶合金中,随磁感应强度增加,富 Fe 相沿平行磁场方向定向排列程度增加,  $\alpha$ -Fe 的 (110) 晶面衍射强度增强<sup>[38]</sup>。对于非磁性材料,发生磁取向通常需要满足 3 个条件<sup>[39]</sup>: 第一是晶体元胞具有磁各向异性;第二是磁各向异性能大于热能,即:

$$|\Delta U| V > kT \quad (11)$$

其中,  $V$  是粒子的体积,  $k$  是 Boltzmann 常数,  $T$  是热力学温度。  $\Delta U$  是晶体不同方向的磁化能差,被定义为:

$$\Delta U = U_i - U_j$$

$$U_i = -\frac{X_i}{2\mu_0(1+NX_i)}B^2 \quad (12)$$

其中,下标  $i, j$  表示晶体的不同晶向,  $X$  为磁化率,  $\mu_0$  为真空磁导率,  $N$  为退磁因子。第三是介质的约束较弱以至弱磁化力能使晶体发生转动。把旋转晶粒当作球体处理<sup>[40-41]</sup>,假定晶粒具有磁晶各向异性,其转动的驱动力矩为:

$$T = \frac{1}{2\mu_0} V \Delta X B^2 \sin\theta \quad (13)$$

其中,  $\Delta X = X_1 - X_2$ ,  $\theta$  为磁化方向( $X_1$ )与磁场强度方向的夹角。阻碍晶粒转动的阻力矩由洛伦兹力和粘滞阻力产生,分别为:

$$L = \frac{4}{15} \pi r^5 \sigma B^2 \frac{d\theta}{dt} \quad (14)$$

$$R = 8\pi\eta r^3 \frac{d\theta}{dt} \quad (15)$$

其中,  $r$  晶粒半径,  $\sigma$ ,  $\eta$  分别表示熔体的电导率和动力学粘度。

根据受力平衡可得下式:

$$V_{pa} = T = \frac{1}{2\mu_0} V \Delta X B^2 \sin\theta - L = \frac{4}{15} \pi r^5 \sigma B^2 \frac{d\theta}{dt} - R \quad (16)$$

由此式可计算颗粒完成转动所需时间。

实际上,磁场还有诱导晶体沿某方向生长的作用,但金属的磁各向异性较小,因而这一作用不明显。在金属间化合物的凝固中这一作用显现,高温超导材料  $\text{YB-CO}$ <sup>[42]</sup>和磁性材料  $\text{SmCo}$  在磁场中凝固时获得织构,其磁性能显著提高<sup>[43]</sup>。

## 6 第二相在液体金属中迁移

由式(1)可知,在梯度磁场中,物质将受到磁力  $F_m$  作用。磁场下金属凝固中析出的第二相也将因该力作用而具有迁移的倾向。已观察到,在过共晶 Al-Si 合金中凝固中,初生 Si 颗粒发生宏观偏聚<sup>[44-46]</sup>。实际上,硅为抗磁性,而 Al 为顺磁性,因此 Si 颗粒受到磁场的排斥力而发生迁移。实验还发现,梯度磁场中过共晶铝硅合金凝固时的初生硅明显细化,且偏聚程度随磁场的增加存在极值<sup>[47-49]</sup>。

在金属液体中的颗粒受到的磁力为

$$\vec{F} = \Delta X / \mu_0 (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} \quad (17)$$

其中,  $\Delta X$  为颗粒与液体间的磁化率差。

在液体金属中颗粒的运动还受到粘滞力和感生的磁粘滞力,其受力如图 11 所示<sup>[48-50]</sup>。根据该图可得到以下关系式:

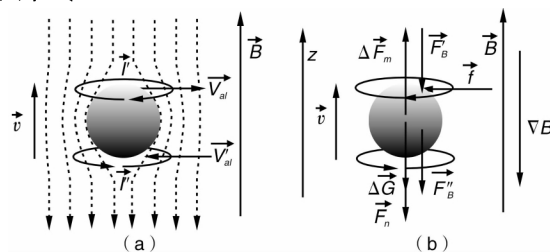


图 11 磁场下液体金属中颗粒受力分析: (a) 晶粒排开熔体运动的水平分量在磁场中引起感应电流, (b) 磁场中 Lorentz 力引起磁粘滞阻力

Fig. 11 Forces on particle in melt with presence of a magnetic field: (a) The electric current induced from the lateral component of movement of melt due to repelling by the particle, and (b) The magnetic field induced viscous force from the Lorentz force in the magnetic field

$$\vec{F} = \Delta \vec{F}_m + \Delta \vec{G} + \vec{F}_\eta + \vec{F}_B + \vec{F}_B'' + \iint_s \vec{f} ds \quad (18)$$

其中,  $\Delta F_m = V(X_s - X_l) \frac{1}{\mu_0} B_z \frac{dB_z}{dz}$ ,  $V$  是颗粒的体积,  $X_s$ 、 $X_l$  分别是颗粒和液体的磁化率,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ , 为真空磁导率。  $\Delta G = V(\rho_p - \rho_l)g$ ,  $\rho_p$ ,  $\rho_l$  分别是颗粒和液相介质的密度。  $F_\eta$  与颗粒的形状和运动速度有关, 如果假定颗粒是半径为  $r$  的球体, 则由 Stokes 定律有:  $F_\eta = 6\pi\eta rv$ ,  $v$  是颗粒运动的速度,  $\eta$  为熔体的动力学粘度。  $\iint_s \vec{f} ds$  为晶粒上部受到的全部 Lorentz 力, 颗粒向前运动时此力将对晶粒的上部产生挤压, 成为颗粒前进的附加阻力。因此,

$$F = V(X_s - X_l) \frac{1}{\mu_0} B_z \frac{dB_z}{dz} - V(\rho_p - \rho_l)g - 6\pi(\eta + kB_z^2)rv \quad (19)$$

颗粒的终极速度为:

$$v_t = \frac{2r^2}{9(\eta + kB_z^2)} \left[ (X_s - X_l) \frac{1}{\mu_0} B_z \frac{dB_z}{dz} - (\rho_p - \rho_l)g \right] \quad (20)$$

可以看出, 在磁场梯度不变的情况下, 随磁场强度的增加, 该速度增大到最大值后, 开始降低, 即速度具有极值。

另一方面, 利用磁场力也可减轻体积质量偏析, 甚至制备梯度复合材料等。在 Cu - 80% Pb 过偏晶合金凝固中施加 12 T 强磁场能够抑制富 Cu 液滴的上浮和富 Pb 相的沉积, 对 Cu - Pb 合金的重力偏析产生一定的抑制作用<sup>[51]</sup>。AL - CuAl - Mg 中凝固的偏析发生改变<sup>[52]</sup>。通过调整磁场控制了 Ti<sub>3</sub>Al 颗粒在 Al - Si 合金中的分布<sup>[53]</sup>。利用磁场力可制备 MnSb/Sb - MnSb 梯度复合材料<sup>[54-55]</sup>。

## 7 磁场对凝固的其他影响

在施加静磁场条件下, 进行亚共晶 Al - 6% Si 合金和共晶 Al - 12.6% Si 合金的 Na 变质处理发现<sup>[56-57]</sup>: 通常重熔使 Na 变质失效, 但施加磁场后重熔可保持变质的效果; 并使共晶硅细化, 呈现一定程度的粒状化, 其变质效果明显优于不施加静磁场的。分析认为, 亚共晶 Al - 6% Si 合金在强磁场下没有发生重熔失效是因为强磁场对熔体的对流有强烈的抑制作用<sup>[58]</sup>。在强磁场下对过共晶铝硅合金进行磷盐变质处理, 发现凝固组织中的初晶 Si 相集中在试样周边附近, 试样中心处为共晶组织<sup>[59]</sup>。而无强磁场, 其他条件相同时凝固组织中的初晶 Si 相分布在整个试样中, 并且施加强磁场后试样中的初晶 Si 的尺寸比没有施加强磁场的试样中的初晶

Si 尺寸大。而在 Sb - 4.8% Mn 合金凝固中施加磁场将使初生相小平面特征更明显, 但这种影响具有极值特点<sup>[60]</sup>。另外, 实验结果表明 Bi - Mn 合金凝固过程中施加磁场在晶粒内部产生应力, 导致晶粒破裂, 从而得到细化<sup>[2]</sup>。

Bi - Mn 合金在磁场中凝固可获得取向组织, 使得磁性能具有各向异性, 沿取向方向的磁性能大幅提高<sup>[61]</sup>。磁场中定向凝固 Tb<sub>0.3</sub>Dy<sub>0.7</sub>Fe<sub>1.9</sub>, 其磁致伸缩性能提高<sup>[62]</sup>。Zabaras<sup>[63-65]</sup>开展了优化磁场和流动, 进而控制凝固及其组织的研究。

## 8 结 语

已有的研究表明强磁场对金属凝固的影响是多效应和多方面的, 也为凝固控制提供了有效的新手段, 具有广阔的前景。但由于磁场影响的复杂性, 因此对于磁场的影响人们了解得不多, 存在许多未知的问题需要研究, 也提供了产生重大突破的机遇。

现今需要解决的主要问题有:

- (1) 强磁场对晶体生长界面动力学的影响机制;
- (2) 强磁场对凝固界面稳定性的影响规律;
- (3) 强磁场下微尺度的 TEMC 等流动及其对凝固的影响;
- (4) 强磁场诱导晶粒取向的规律;
- (5) 强磁场对凝固中晶体形态的影响规律;
- (6) 强磁场下凝固中偏析规律;
- (7) 强磁场在凝固中诱发应力的规律。

为搞清这些问题, 一些基础性参数的获得十分必要。这些参数有: 强磁场下物质扩散系数; 弱磁晶体的磁各向异性参数; 热电参数等。无疑这些问题的解决需要多学科的合作。

## 参考文献 References

- [1] Wang Hui(王 晖), Ren Zhongming(任忠鸣), Xu Kuangdi(徐匡迪). 纯物质凝固的磁场热力学分析[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报), 2004, 14: 945 - 948.
- [2] Ren Zhongming, Li Xi, Sun Yanhui, et al. Influence of High Magnetic Field on Peritectic Transformation during Solidification of Bi - Mn Alloy[J]. *Calphad*, 2006, 30: 277 - 285.
- [3] Li Chuanjun, Ren Zhongming, Ren Weili. Effect of a High Magnetic Fields on Solid-Melt Phase Transformation in Prebismuth[J]. *Materials Letters*, 2009, 63: 269 - 271.
- [4] Li Chuanjun, Ren Zhongming, Ren Weili, et al. Design and Application of Differential Thermal Analysis Apparatus in High Magnetic Fields[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2009, 80: 073 907.

- [5] Li X, Ren Z M, Fautrelle Y. Effect of High Magnetic Fields on the Microstructure in Directionally Solidified Bi - Mn Eutectic Alloy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 299: 41 - 47.
- [6] Li X, Ren Z M, Fautrelle Y. The Spiral Growth of Lamellar Eutectics in a High Magnetic Field during the Directional Solidification Process[J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56: 505 - 508.
- [7] Jin Fangwei(晋芳伟). *Effect of Gradient Magnetic Field on Solidification of the Al - Si Hypereutectic Alloy*(梯度强磁场对 Al - Si 过共晶合金凝固的影响)[D]. Shanghai: Shanghai University, 2007.
- [8] Li Z F, Dong J, Zeng X Q, *et al.* Influence of Strong Static Magnetic Field on Intermediate Phase Growth in Mg - Al Diffusion Couple[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 440: 132 - 136.
- [9] Li X, Fautrelle Y, Ren Z M. Influence of an Axial High Magnetic Field on the Liquid-Solid Transformation in Al-Cu Hypoeutectic Alloys and on the Microstructure of the Solid[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 1 377 - 1 386.
- [10] LI Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Influence of Thermoelectric Effects on the Solid-Liquid Interface Shape and Cellular Morphology in the Mushy Zone during the Directional Solidification of Al - Cu Alloys under the Magnetic Field[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 3 803 - 3 813.
- [11] Li Xi, Zhang Yudong, Fautrelle Yves, *et al.* Effect of a High Magnetic Field on the Morphology Instability and Irregularity of the interface of a Binary Alloy during Directional Solidification [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 1 689 - 1 703.
- [12] Li Xi, Zhang Yudong, Fautrelle Yves, *et al.* Experimental Evidence for Liquid/Solid Interface Instability Caused by the Stress in the Solid during Directional Solidification under a Strong Magnetic Field[J]. *Scripta Materialia*, 2009, 60: 489 - 492.
- [13] Yang W H, Srolovitz D J. Cracklike Surface Instabilities in Stressed Solids[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 71: 1 593 - 1 596.
- [14] Li Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Influence of a High Magnetic Field on the Columnar Dendrite Growth during the Directional Solidification[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 5 333 - 5 347.
- [15] Li Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Morphological Instability of Cell and Dendrite during Directional Solidification under a High Magnetic Field[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56: 3 146 - 3 161.
- [16] Dong Jianwen(董建文), Ren Zhongming(任忠鸣), Ren Weili(任维丽), *et al.* 横向磁场对镍基高温合金定向凝固组织的影响[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2010, to be published.
- [17] Li X, Ren Z M, Fautrelle Y. Effect of a Vertical Magnetic Field on the Dendrite Morphology during Bridgman Crystal Growth of Al - 4.5 wt% Cu [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, 290: 571 - 575.
- [18] Li X, Fautrelle Y, Ren Z M. Influence of an Axial High Magnetic Field on the Liquid-Solid Transformation in Al - Cu Hypoeutectic Alloys and on the Microstructure of the Solid[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 1 377 - 1 386.
- [19] LI Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Influence of Thermoelectric Effects on the Solid-Liquid Interface Shape and Cellular Morphology in the Mushy Zone during the Directional Solidification of Al - Cu Alloys under the Magnetic Field[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 3 803 - 3 813.
- [20] LI Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Influence of a High Magnetic Field on the Columnar Dendrite Growth during the Directional Solidification[J]. *Acta Materialia*, 2007, 55: 5 333 - 5 347.
- [21] Li X, Gagnoud A, Ren Z M, *et al.* Investigation of Thermoelectric Magnetic Convection and Its Effect on Solidification Structure during Directional Solidification [J]. *Acta Materialia*, 2009, 57: 2 180 - 2 197.
- [22] Gao Zhiyu(高志玉), Sun Weitao(孙维涛), Zhang Weiqiang(张伟强). 直流稳恒磁场对 Al - 11% Si 共晶定向凝固组织的影响[J]. *China Foundry*(铸造), 2007, 56: 523 - 525.
- [23] Gao Zhiyu(高志玉), Xiu Fengliang(修凤玲), Zhang Weiqiang(张伟强). 热电磁流体动力学对 Al - 4Cu 合金定向凝固组织的影响[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金), 2007, 27: 16 - 18.
- [24] Wang Yan(王岩), Zhang Weiqiang(张伟强), Huang Xiaoxia(黄晓霞), *et al.* Al - 4.0% Cu 合金定向凝固中热电磁流体动力学效应的数值模拟[J]. *Casting Forging Welding Hot Working Technology*(金属铸锻焊技术), 2009, 38(13): 12 - 15.
- [25] Kao A, Pericleous K, Patel M K, *et al.* Effects of Magnetic Fields on Crystal Growth[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2009, 22: 147 - 150.
- [26] Shercliff J A. Thermoelectric Magnetohydrodynamics[J]. *J Fluid Mech*, 1979, 91: 231 - 251.
- [27] Lehmann P, Moreau R, Camel D. *et al.* Modification of Interdendritic Convection in Directional Solidification by a Uniform Magnetic Field [J]. *Acta Materialia*. 1998, 46: 4 067 - 4 079.
- [28] Li Xi, Ren Zhongming, Fautrelle Yves. Effect of a High Axial Magnetic Field on the Microstructure in a Directionally Solidified Al - Al<sub>2</sub>Cu Eutectic Alloy [J]. *Acta Materialia*, 2006, 54: 5 349 - 5 360.
- [29] Li X, Ren Z M, Fautrelle Y. Effect of High Magnetic Fields on the Microstructure in Directionally Solidified Bi - Mn Eutectic Alloy[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 299: 41 - 47.
- [30] Ma Juanping(马娟萍), Ren Zhongming(任忠鸣), Deng Kang(邓康), *et al.* 强磁场对定向凝固 Pb - Sn 共晶生长影响的初步研究[J]. *Progress in Natural Science*(自然科学进展), 2004, 14: 837 - 840.



- [31] Li Xi, Ren Zhongming, Fautrelle Yves. The Spiral Growth of Lamellar Eutectics in a High Magnetic Field during the Directional Solidification Process [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56: 505–508.
- [32] Hideyuki Yasuda, Itsuo Ohnaka, Shinji Fujimoto, *et al.* Fabrication of Aligned Pores in Aluminum by Electrochemical Dissolution of Monotectic Alloys Solidified under a Magnetic Field [J]. *Scripta Materialia*, 2006, 54: 527–532.
- [33] Savitsky E M, Torchinova R S, Turanov. Effect of Crystallization in Magnetic Field on the Structure and Magnetic Properties of Bi–Mn Alloys [J]. *J Crystal Growth*, 1981, 52: 519–523.
- [34] Mikelson A E, Karklin Y K. Control of Crystallization Processes by Means of Magnetic Field [J]. *J crystal Growth*, 1981, 52: 524–529.
- [35] Jiao Y L, Cui C G, Jing X N, *et al.* The Study of AC Susceptibility of MTG YBCO Sample under High Magnetic Fields [J]. *Solid State Communications*, 1992, 84: 591–594.
- [36] Morikawa H, Sassa K, Asai S. Control of Precipitating Phase Alignment and Crystal Orientation by Imposition of a High Magnetic Field [J]. *Mater Trans JIM*, 1998, 39: 814–818.
- [37] Li Xi, Fautrelle Yves, Ren Zhongming. Effect of a High Magnetic Field on the Microstructure in Directionally Solidified Al–12wt% Ni Alloy [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2007, 306: 187–194.
- [38] Zuo Xiaowei (左小伟), Wang Engang (王恩刚), Han Huan (韩欢), *et al.* 强磁场下 Fe–49% Sn 偏晶合金凝固组织及磁性能 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2008, 44: 1 219–1 223.
- [39] Shigeo A, Kensuke S, Masahiro T. Crystal Orientation of Non-Magnetic Materials by Imposition of a High Magnetic Field [J]. *Sci Tech Adv Mater*, 2003(4): 455–460.
- [40] Tsubasa S, Masahira T, Kensuke S, *et al.* The Control of Crystal Orientation in Non-Magnetic Metals by Imposing of a High Magnetic Field [J]. *ISIJ Int*, 2003, 43: 855–861.
- [41] Zhang Bangwen (张邦文), Ren Zhongming (任忠鸣), Wang Hui (王晖), *et al.* 合金凝固过程中晶粒取向的动力学研究 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2004, 40: 604–608.
- [42] Rango P de, Lees M R, Lejay P, *et al.* Texturing of Magnetic Materials at High Temperature by Solidification in a Magnetic Field [J]. *Nature*, 1991, 349: 770–772.
- [43] Legrand B A, Chateigner D, Perrier De La Bathie R, *et al.* Orientation by Solidification in a Magnetic Field A New Process to Texture SmCo Compounds Used as Permanent Magnets [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1997, 173: 20–28.
- [44] Sassa K, Waki N, Asai S. Elimination of Inclusions in a Molten Metal by Using a High Magnetic Field [C]//*Second International Conference on Processing Materials for Properties*. San Francisco: TMS, 2000: 565–568.
- [45] Wang Yan (王艳), Bian Xiufang (边绣房), Xu Changye (徐昌业), *et al.* 直流磁场作用下 Al–18Si 合金的凝固行为 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2000, 36(2): 159–161.
- [46] Ran Xintian (冉新天), Ren Zhongming (任忠鸣), Deng Kang (邓康), *et al.* Al–18% Si 合金在梯度强磁场中凝固时初生硅的行为 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2005, 15(1): 72–78.
- [47] Jin Fangwei (晋芳伟), Ren Zhongming (任忠鸣), Ren Weili (任维丽), *et al.* 梯度强磁场下 Al–18% Si 合金中初生硅的细化 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2007, 43: 521–528.
- [48] Jin Fangwei (晋芳伟), Ren Zhongming (任忠鸣), Ren Weili (任维丽), *et al.* 强梯度磁场下金属熔体中析出相晶粒迁移的动力学研究 [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2007, 56(7): 1 851–1 860.
- [49] Jin Fangwei (晋芳伟), Ren Zhongming (任忠鸣), Ren Weili (任维丽), *et al.* 强磁场下过共晶铝硅合金凝固过程中初生硅的迁移行为 [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报), 2007, 17: 313–319.
- [50] Jin Fangwei, Ren Zhongming, Ren Weili, *et al.* Effects of a High-Gradient Magnetic Field on the Migratory Behavior of Primary Crystal Silicon in Hypereutectic Al–Si Alloy [J]. *Sci Technol Adv Mater*. 2008(9): 024 202.
- [51] Zhang Lin (张林), Wang Engang (王恩刚), Zuo Xiaowei (左小伟), *et al.* 强磁场对 Cu–80% Pb 过偏晶合金凝固组织的影响 [J]. *Acta Metallurgica Sinica* (金属学报), 2008, 44: 165–171.
- [52] Pang Xuejun (庞雪君), Wang Qiang (王强), Wang Chunjiang (王春江), *et al.* 强磁场对铝合金中溶质组分分布状态的影响效果 [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 2006, 55: 5 129–5 134.
- [53] Lou Changsheng, Wang Qiang, Wang Chunjiang. Migration and Rotation of TiAl<sub>3</sub> Particles in an Al-Melt Solidified under High Magnetic Field Conditions [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 472: 225–229.
- [54] Wang Qiang, Liu Tie, Gao Ao. A Novel Method for in Situ Formation of Bulk Layered Composites with Compositional Gradients by Magnetic Field Gradient [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 56: 1 087–1 090.
- [55] Liu Tie, Wang Qiang, Gao Ao. Fabrication of Functionally Graded Materials by a Semi-Solid Forming Process under Magnetic Field Gradients [J]. *Scripta Materialia*, 2007, 57: 992–995.
- [56] Lian Feng (连峰), Li Tingju (李廷举), Hu Guobing (胡国兵). 静磁场对铝硅合金 Na 变质处理的影响 [J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys* (特种铸造及有色合金), 2005, 25: 306–308.
- [57] Lian F, Qi F, Li T, *et al.* Effects of High Magnetic Field on Modification of Al–Si Alloy [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2005, 15: 1 089–1 095.

- [58] Lian Feng(连 峰), Li Tingju(李廷举), Hu Guobing(胡国兵), *et al.* 强磁场对亚共晶铝2 硅合金变质处理的影响[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*(轻合金加工技术), 2005, 33: 8-12, 36.
- [59] Lian Feng(连 峰), Li Tingju(李廷举), Hu Guobing(胡国兵), *et al.* 强磁场对过共晶铝硅合金中初晶 Si 分布的影响[J]. *Journal of Materials Engineering*(材料工程), 2005(12): 41-44.
- [60] Zhang Chang(张 超), Wang Qiang(王 强), Gao Ao(高 翱), *et al.* 强磁场对 Sb-4.8% Mn 合金初生相生长行为的影响[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2008, 44: 713-717.
- [61] Li Xi(李 喜), Ren Zhongming(任忠鸣), Wang Hui(王 晖), *et al.* 强磁场下 Bi-Mn 合金中形成的 MnBi 相凝固组织[J]. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报), 2004, 40: 40-45.
- [62] Hideki Minagawaa, Keiji Kamadab, Hideaki Nagai. Synthesis of Tb0.3Dy0.7Fe1.9 Magnetostrictive Alloy by Unidirectional Solidification in Magnetic Field and Microgravity[J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, 248: 230-235.
- [63] Baskar Ganapathysubramanian, Nicholas Zabarar. On the Control of Solidification Using Magnetic Fields and Magnetic Field Gradients[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48: 4 174-4 189.
- [64] Baskar Ganapathysubramanian, Nicholas Zabarar. Using Magnetic Field Gradients to Control the Directional Solidification of Alloys and the Growth of Single Crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2004, 270: 255-272.
- [65] Baskar Ganapathysubramanian, Nicholas Zabarar. Control of Macroseggregation during the Solidification of Alloys Using Magnetic Fields[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, 49: 4 850-4 866.



### 专栏特约编辑介万奇

**介万奇**：男，1959年生，西北工业大学材料学院教授；1988年在西北工业大学铸造专业获工学博士学位并留校任教至今；1991年获联邦德国洪堡研究基金，1993年破格晋升教授，1998年入选国家级“百千万人才工程”，并获得国家杰出青年基金，1999年被评为教育部“长江学者”特聘教授，2007年被评为全国模范教师；曾先后主持国家重点基础研究项目(973)、国防基础研究项目、国家自然科学基金



特约撰稿人黄卫东

金重点项目、国防预研基金、国家杰出青年科学基金等30余项项目的研究,科研经费超过3600万元;发表学术论文300余篇,合作专著2部,申请专利16项,以第一完成人分别获国家技术发明二等奖1项,省部级科技成果奖7项;指导博士研究生48人,其中已毕业30人,1人获全国百篇优秀博士学位论文。

黄卫东:男,1956年生,西北工业大学教授,凝固技术国家重点实验室主任,国家杰出



特约撰稿人杜 勇

青年科学基金获得者，教育部“长江计划”特聘教授，中国铸造学会副理事长，国家自然科学基金委员会金属学科评审专家，教育部理工科教学指导委员会委员，中国光学学会激光加工专业委员会委员；主要从事凝固与晶体生长理论、高性能致密金属零件的激光快速成形技术、大型复杂薄壁铸件精密铸造技术等方面的研究，出版了国防重点专著《激光立体成形》。

杜 勇：男，1964  
年生，中南大学教授，



特约撰稿人任忠鸣

博士生导师；先后在东京工业大学、维也纳大学等5所国外著名大学从事材料热力学、动力学及材料设计研究，在德国为洪堡学者；2004年获国家杰出青年科学基金，2006年被评为教育部“长江学者”特聘教授，2007年被评为国家自然科学基金委员会创新研究群体科学基金项目负责人；现任《CALPHAD》杂志副主编，先后在25种国际刊物上发表论文近226篇，被SCI收录167篇，获专利一项。

**任忠鸣：**男，1958年生，博士，上海大学教授，“长江学者”特聘教授，国家杰出青年科学基金获得者；长期从事电磁场下冶金和材料制备研究；先后承担了国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金重点项目、省市重大科研课题和企业课题 50 余项；发现强磁场具有强制金属凝固枝晶和共晶生长取向、细化枝晶、影响界面稳定性和形核动力学等作用，提出金属连铸中初始凝固波动导致铸坯振痕的新机理，开发了调幅磁场控制连铸凝固技术、电磁连铸生产高性能无氧铜技术和电磁净化金属液技术，并在企业中推广应用；发表论文 190 余篇，所指导的博士论文先后获全国优秀博士论文奖和提名奖。