

# 强磁场下不同溶质含量过共晶Al-Ni合金 凝固组织中Al<sub>3</sub>Ni初生相的定向排列

王忠英, 王强\*, 王春江, 刘铁, 张超, 娄长胜, 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

\* E-mail: wangq@mail.neu.edu.cn

收稿日期: 2008-01-30; 接受日期: 2008-06-07

国家自然科学基金(批准号: 50374027)、教育部新世纪人才资助计划(批准号: NCET-06-0289)和高等学校学科创新引智计划(批准号: B07015)资助项目

**摘要** 在不同溶质元素含量的过共晶Al-Ni合金的凝固过程中施加均恒强磁场, 研究了Al<sub>3</sub>Ni初生相的定向排列行为. 结果发现, 均恒磁场能够使Al<sub>3</sub>Ni初生相均匀分布. 而且, 在平行于磁场方向的截面上Al<sub>3</sub>Ni初生相沿垂直于磁场方向发生定向排列, 呈相互平行的链条状组织. 但是, Al<sub>3</sub>Ni初生相晶体取向和定向排列是不同的, 当初生相发生晶体取向时, 却不一定发生定向排列. 当溶质元素含量增大时, 发生定向排列的Al<sub>3</sub>Ni初生相的量会明显减少. 分析认为, 合金中Ni溶质元素含量越低, 磁场强度对溶质浓度场的影响越显著, Al<sub>3</sub>Ni初生相的定向排列效果越好.

**关键词**

强磁场  
合金成分  
Al<sub>3</sub>Ni初生相  
定向排列  
凝固

强磁场是理想的定向物理场, 能够诱导晶体取向和相定向排列, 有望应用在材料的多种处理过程中, 改善材料的组织和性能<sup>[1-8]</sup>. 随着强磁场技术的发展, 利用强磁场使金属材料在凝固过程中产生定向排列的规则组织, 已经成为材料研究的新方法<sup>[9-12]</sup>. 非共晶成分的Al-Ni合金中Al<sub>3</sub>Ni相的体积分数变化范围较大, 能够适用不同的需要, 是功能梯度材料一个重要的发展方向<sup>[13-16]</sup>. 有研究表明, 当Al-Ni合金中的Al<sub>3</sub>Ni初生相发生定向排列后, 在Al<sub>3</sub>Ni定向排列的方向上拉伸强度和抗疲劳性能最好<sup>[17]</sup>. 因此, 通过控制组织形成过程来获得定向排列的Al<sub>3</sub>Ni组织, 从而进一步提高Al-Ni合金性能具有重要应用前景. 1981年, Mikelson等人<sup>[18]</sup>首先报道了0.5~1.5 T磁场能够使Al-10wt%Ni过共晶合金中Al<sub>3</sub>Ni初生相垂直磁场定向生长的现象, 但未作深入分析. 近年来, 王晖等人<sup>[19]</sup>发现强磁场诱导Al-8wt%Ni中初生Al<sub>3</sub>Ni

相以c轴平行磁场方向取向, 并且在垂直磁场方向上, Al<sub>3</sub>Ni初生相发生了聚合. 李喜等人<sup>[20]</sup>分析了磁场强度和温度对Al-8wt%Ni和Al-10wt%Ni合金中初生Al<sub>3</sub>Ni晶体取向程度的影响. 上述研究分析了强磁场下Al<sub>3</sub>Ni晶体的取向现象, 但是对Al<sub>3</sub>Ni初生相的定向排列现象却没有进行深入分析. 由于晶体取向和定向排列是不同的, 所以有必要进行深入研究. 本文以初生相Al<sub>3</sub>Ni的定向排列为主要, 研究在不同溶质元素含量的过共晶Al-Ni合金中, 随着Ni含量的变化, 磁场强度对Al<sub>3</sub>Ni初生相定向排列的影响, 并进一步分析晶体取向和定向排列的关系.

## 1 实验

将金属Al (99.99wt%)和Ni (99.999wt%)放入石墨坩埚中并一起进行真空封装, 在超音频感应加热炉中熔炼制取了3种成分均匀的母合金. 化学分析表

明, 合金成分分别为 Al-6.8wt%Ni, Al-7.4wt%Ni 和 Al-8.5wt%Ni. 根据 Al-Ni 合金平衡相图(图1)可知, 3 种合金都为过共晶成分的 Al-Ni 合金. 将母合金铸锭加工成直径为 9 mm、长度为 15 mm 的圆柱形试样, 供强磁场实验使用.

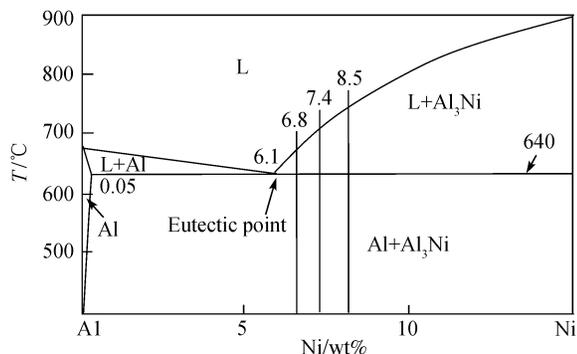


图 1 Al-Ni 合金平衡相图

强磁场装置如图 2 所示, 超导磁体可以产生纵向的均恒磁场, 其磁感应强度可在 0~12 T 间调节. 加热炉置于超导磁体的空腔内, 加热温度可达 1200°C. 炉温由放在炉体中心的 R 型热电偶测量. 实验时, 将圆柱形试样放在坩埚内, 固定于超导磁体的中心位置. 加热炉以 5°C/min 的升温速度将试样加热到 800°C, 保温 30 min 使其完全熔化并均匀化, 再以 10°C/min 的降温速度冷却到 550°C, 最后空冷到室温. 在上述过程中, 都施加均恒强磁场, 磁场条件如表 1 所示. 将获得的试样沿平行磁场的方向剖开, 研磨抛光后, 用氢氟酸溶液侵蚀, 利用 Leica-500 型金相显微镜观察凝固组织中 Al<sub>3</sub>Ni 初生相的分布, 采用 X 射线仪分

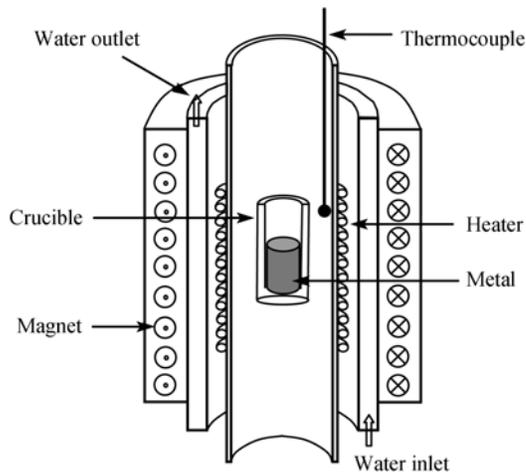


图 2 强磁场实验装置示意图

表 1 Al-Ni 合金凝固实验的磁场条件

Magnetic flux density, $B$ / T	0	4.4	8.8	11.5
Al-6.8wt%Ni	✓	-	✓	✓
Al-7.4wt%Ni	✓	✓	✓	✓
Al-8.5wt%Ni	✓	✓	✓	✓

析凝固组织中 Al<sub>3</sub>Ni 的晶体取向.

## 2 实验结果

Al-6.8wt%Ni 试样在不同磁场条件下的宏观凝固组织如图 3 所示. 图 3 中灰色条状物为 Al<sub>3</sub>Ni 初生相, 黑色孔洞为凝固缺陷, 其余为 Al-Al<sub>3</sub>Ni 共晶组织. 由图 3 可知, 当没有施加磁场时, 链条状 Al<sub>3</sub>Ni 初生相分布不均匀, 多集中于试样的底部. 这是凝固过程中首先析出的 Al<sub>3</sub>Ni 相的密度 ( $\rho_{Al_3Ni}=3950 \text{ kg/m}^3$ ) 大于周围熔体的密度 ( $\rho_{Al}=2360 \text{ kg/m}^3$ ) 而产生沉积的结果.

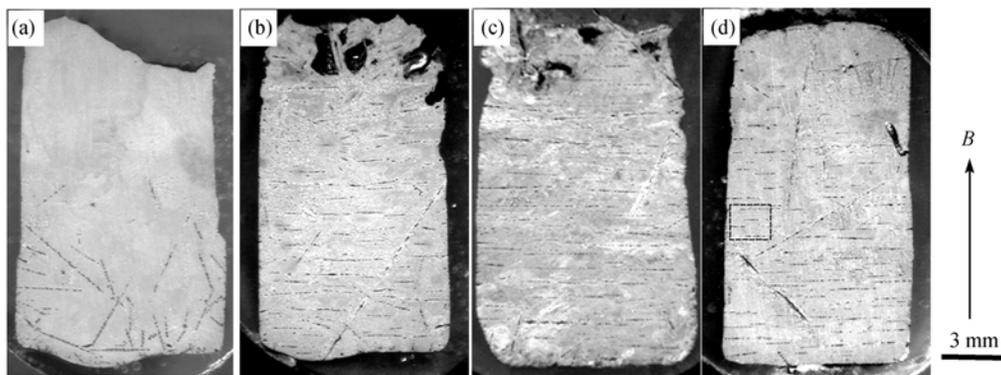


图 3 不同磁场条件下 Al-6.8wt%Ni 合金的宏观凝固组织  
(a)  $B=0 \text{ T}$ ; (b)  $B=4.4 \text{ T}$ ; (c)  $B=8.8 \text{ T}$ ; (d)  $B=11.5 \text{ T}$

$\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相没有发生定向排列现象. 当施加磁场后,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相分布变得均匀, 并且在垂直磁场方向上发生了不同程度的定向排列, 随着磁场强度的增加, 定向排列的效果更明显. 11.5 T 磁场条件下试样(图 3(d) 中虚线框内)的微观凝固组织照片如图 4 所示, 从图 4 中可以明显看到垂直于磁场方向定向排列的灰色的

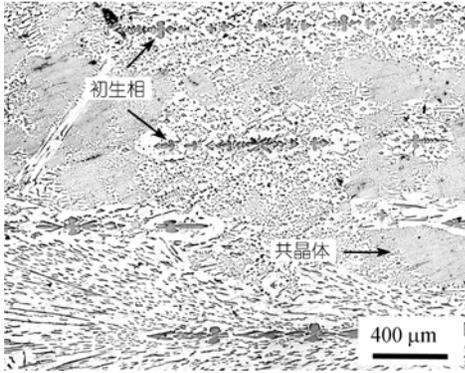


图 4 Al-6.8wt%Ni 合金微观组织的金相照片( $B=11.5\text{ T}$ )

链条状 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相.

Al-7.4wt%Ni 试样在不同磁场条件下的宏观凝固组织如图 5 所示. 由图 5 可知, 在无磁场时,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相的分布与图 3(a)基本相同. 当施加磁场时,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相分布变得均匀. 但是与 Al-6.8wt%Ni 试样相比, 在相同的磁场强度下, 发生定向排列的 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相明显减少.

Al-8.5wt%Ni 试样在不同磁场条件下的宏观凝固组织如图 6 所示. 由图 6 可知, 当没有磁场时,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相分布仍然不均匀, 并且没有定向排列现象. 当施加磁场后, 虽然 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相的分布变得均匀, 但是只有少数初生相发生定向排列.

通过以上实验发现, 对不同溶质元素含量的试样施加磁场后, 在平行磁场的纵截面上, 凝固组织中的 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相分布都很均匀, 说明在磁场强度相同时, 溶质元素含量不会影响到 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相的均匀分

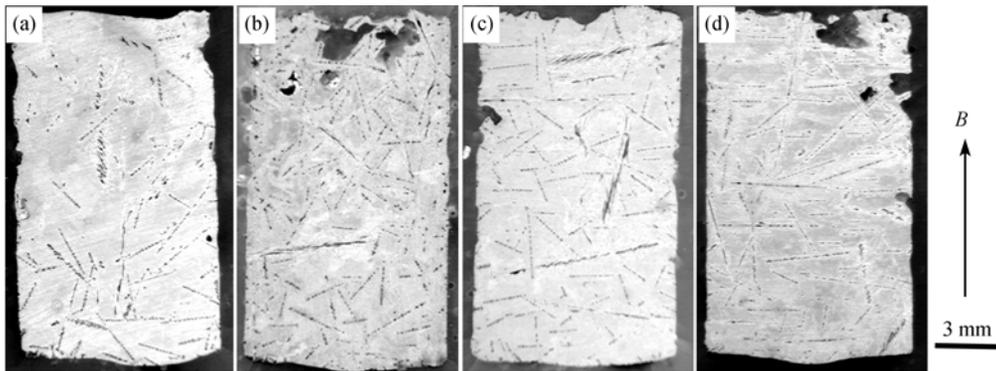


图 5 不同磁场条件下 Al-7.4wt%Ni 合金的宏观组织  
(a)  $B=0\text{ T}$ ; (b)  $B=4.4\text{ T}$ ; (c)  $B=8.8\text{ T}$ ; (d)  $B=11.5\text{ T}$

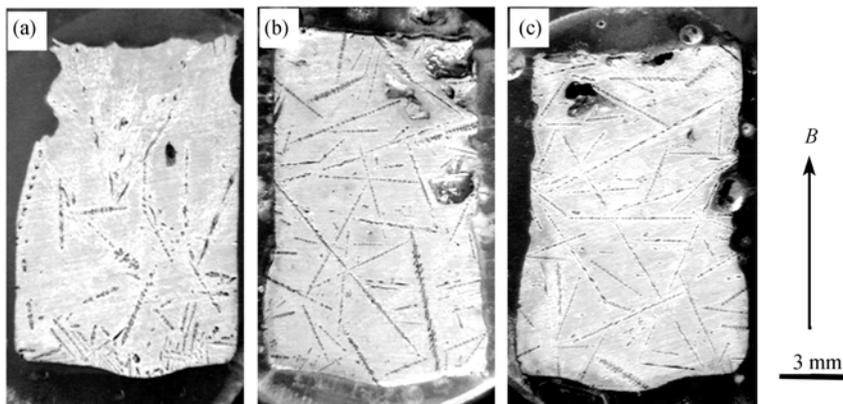


图 6 不同磁场条件下 Al-8.5wt%Ni 合金的宏观组织  
(a)  $B=0\text{ T}$ ; (b)  $B=8.8\text{ T}$ ; (c)  $B=11.5\text{ T}$

布状况. 但是对  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列效果来说, 溶质含量的影响却很明显. 下面对试样中  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相定向排列程度进行分析. 为了表征排列程度, 将定向排列的  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相平面法线方向与磁场方向形成的夹角在  $5^\circ$  以内定义为定向排列, 则定向排列程度可以表示为  $P=N_p/N$ . 其中  $N$  为单位面积内总的  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相,  $N_p$  为单位面积上发生定向排列的  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相. 3 种 Ni 含量合金中  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相定向排列程度与磁场强度的关系如图 7 所示.

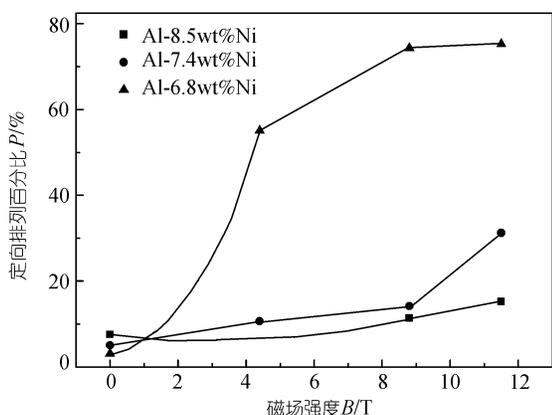


图 7 不同溶质元素含量合金中  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列程度

由图 7 可知, 当合金成分一定时, 随着磁场强度的增加,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列效果得到不同程度

的加强, 但是磁场对不同成分合金中  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列影响有很大差异. 在  $B=11.5$  T 的磁场条件下, 当合金中 Ni 的含量为 6.8wt% 时,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相定向排列效果显著, 达到 75% 左右, 说明此时磁场的作用效果很明显. 但是当 Ni 含量为 7.4wt% 时, 磁场的作用效果已明显变弱, 定向排列程度降低到约 30%; 当溶质含量进一步增加到 8.5wt% 时,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列降低到 10% 左右, 磁场的作用更加不明显. 上述结论表明, 对于  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相的定向排列来说, 过共晶合金中溶质元素含量越低, 磁场的作用效果越明显.

为了考察成分对  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相取向的影响, 对 3 种 Al-Ni 合金无磁场和施加 11.5 T 磁场的试样进行 X 射线衍射分析, 结果如图 8 所示. 由图 8 可知, 无磁场时, 不同合金中的  $\text{Al}_3\text{Ni}$  相在所有的晶面都有衍射峰, 说明无磁场条件下试样没有特定的晶体学取向. 而在施加了 11.5 T 的强磁场后,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  相 (020), (210), (220), (230), (040) 晶面衍射强度都不同程度的增强, 即在 (hk0) 面的衍射强度增强, 在其它方向的衍射强度减弱甚至消失,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相发生 c 轴取向. 由此可见, 对溶质含量不同的合金施加一定的磁场后,  $\text{Al}_3\text{Ni}$  初生相晶体都会以 c 轴平行磁场方向取向, 但是定向排列的效果差异很大, 这说明初生相的晶体取向和初生相的定向排列是不同的.

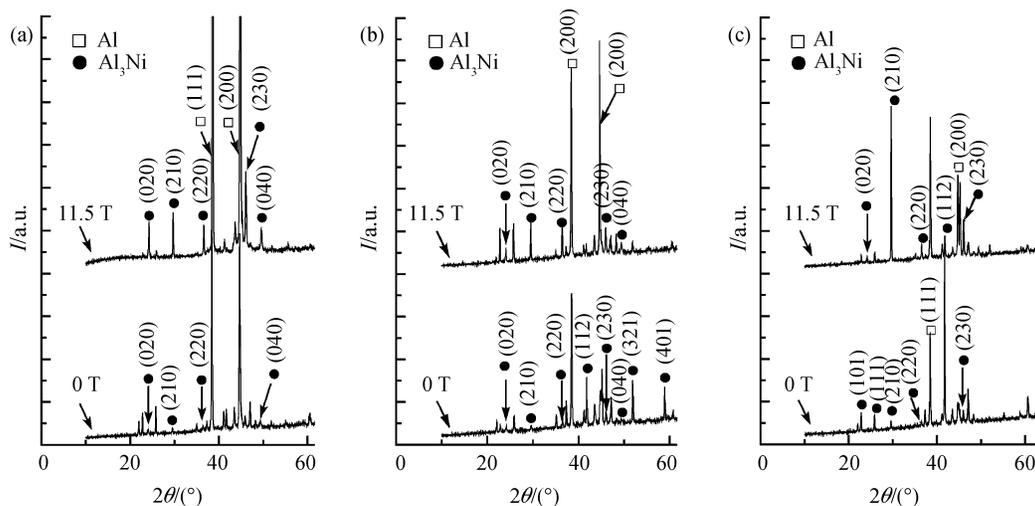


图 8 不同溶质元素含量的 Al-Ni 合金平行于磁场方向 X 射线衍射图谱  
(a) Al-6.8wt%Ni 合金; (b) Al-7.4wt%Ni 合金; (c) Al-8.5wt%Ni 合金

### 3 实验结果分析

对 3 种合金试样所做的 X 射线衍射结果表明, 施加磁场后, Al<sub>3</sub>Ni 初生相发生了取向, 并且不同溶质元素含量 Al-Ni 合金中的 Al<sub>3</sub>Ni 初生相都是以晶体 *c* 轴沿平行磁场方向取向. 当物质放在均匀磁场中时, 其磁化能 *E* 可以表示为<sup>[7]</sup>

$$E = -\frac{1}{2\mu_0} \chi VB^2, \quad (1)$$

其中,  $\mu_0$  为真空磁导率, *V* 为物质的体积, *B* 为磁感应强度的大小,  $\chi$  为物质的磁化率. 物质在均恒磁场中沿不同方向磁化时, 所需要的磁化能大小不同, 这样就会产生磁化能差值  $\Delta E$ , 其表达式为<sup>[21]</sup>

$$\Delta E = -\frac{1}{2\mu_0} \Delta\chi VB^2, \quad (2)$$

式中的  $\Delta\chi$  为物质不同方向上磁化率的差值. 由(2)式可知, 磁场会诱导物质沿磁化能最小的方向取向. Al<sub>3</sub>Ni 为顺磁性物质, 且 *c* 轴为磁化率最大的方向<sup>[20]</sup>. 在 Al-Ni 合金凝固过程中施加磁场后, Al<sub>3</sub>Ni 初生相将以 *c* 轴平行磁场方向取向. 根据(1)式, 因为溶质元素含量对磁化能没有影响, 所以当 Al-Ni 合金溶质元素含量改变时, 不会影响到 Al<sub>3</sub>Ni 的取向, 这与前面的实验结果是一致的.

观察不同溶质元素含量 Al-Ni 合金的宏观照片(图 3, 5 和 6)发现, Al-Ni 合金溶质元素含量发生变化时, 施加磁场后, Al<sub>3</sub>Ni 初生相的分布变得均匀, 这是洛仑兹力的作用效果<sup>[21]</sup>. 但是 Al<sub>3</sub>Ni 初生相的定向排列效果有很大差异, 下面分析不同溶质元素含量合金中 Al<sub>3</sub>Ni 初生相的定向排列机制.

在 Al-Ni 合金中, 凝固初始时刻熔体中析出的 Al<sub>3</sub>Ni 初晶 *P*<sub>1</sub> 其空间取向是任意的. 由于 Al<sub>3</sub>Ni 的优先生长方向是 [010] 晶向<sup>[22]</sup>, 沿着 *b* 轴优先长大, 将以 *b* 轴为中心的局部区域形成浓度梯度场. 无磁场时, 对流速度 ( $\approx 10^{-6}$  m/s) 远大于扩散速度 ( $\approx 10^{-7}$  m/s)<sup>[23,24]</sup>, 熔体内部的溶质再分配主要通过对流传质控制, 纳米尺度的 Al<sub>3</sub>Ni 初晶在生长过程中产生的浓度梯度场能够通过对流传质而迅速消除. 与枝晶迎流生长特性相同, 新的 Al<sub>3</sub>Ni 晶核 *P*<sub>2</sub> 出现在迎流方向, 且其生长方向平行于初晶 *P*<sub>1</sub> 的 *b* 轴. 由于在无磁场条件下, 对流并没有特定方向, 因此形成的 Al<sub>3</sub>Ni 初生相不存在特定的方向.

而施加较强的磁场后, 熔体内部的对流被强烈抑制, 熔体内部的溶质再分配主要通过扩散传质控制<sup>[25]</sup>, 带电粒子在磁场中的扩散系数可以表示为<sup>[26]</sup>

$$D_{\perp} \approx D/(1+\omega^2\tau^2), \quad (3)$$

$$D_{\parallel} = D, \quad (4)$$

其中,  $\tau$  为平均碰撞时间, *D* 为无磁场时的扩散系数,  $\omega = qB/m$ , *q/m* 为荷质比, 下标  $\perp$  和  $\parallel$  分别表示垂直于磁场方向和平行于磁场方向. 可见, 扩散在垂直于磁场的方向上受到抑制, 而在平行于磁场的方向保持不变, 形成的浓度梯度场是椭圆场, 如图 9(a) 所示. 晶体形核理论认为, 晶核形成的必要条件之一是熔体内的局部区域具有足够大的浓度起伏. 由图 9(a) 可知, 施加磁场后, 新的 Al<sub>3</sub>Ni 晶核 *P*<sub>2</sub> 在垂直于磁场方向的短轴上出现的几率最高, 依次形核、生长下去, 最终在平行磁场的截面上形成了垂直于磁场方向上定向排列的链条状 Al<sub>3</sub>Ni 相.

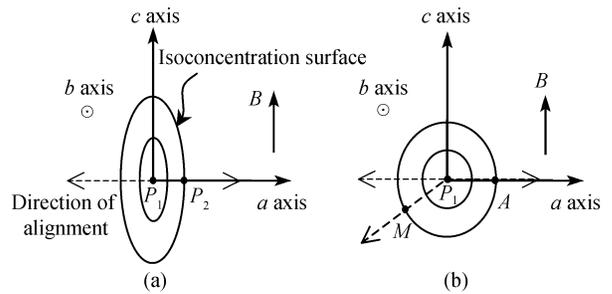


图 9 不同成分合金中溶质分配示意图

- (a) 磁场对低溶质元素含量合金溶质分配的影响;
- (b) 磁场对高溶质元素含量合金溶质分配的影响

以上分析解释了磁场作用下初晶 Al<sub>3</sub>Ni 相沿垂直于磁场的方向发生定向排列的机理. 但是观察图 3~6 可知, 当合金溶质元素含量发生变化后, 初晶 Al<sub>3</sub>Ni 相的定向排列效果有很大差异. 所以初晶 Al<sub>3</sub>Ni 相的定向排列不但要考虑磁场的影响, 还应该考察溶质元素含量的影响. 当溶质元素含量增加时, 施加磁场后, 形成的浓度梯度场也将变成椭圆形, 如图 9(b) 所示. 但是由于含量的增加, 椭圆的短轴和长轴将逐渐接近, 即磁场形成的溶质分配效果减弱. 因为根据(3)和(4)式, 随着含量的增加, 会使溶质平均碰撞时间  $\tau$  变小,  $D_{\perp}$  变大, 逐渐接近  $D_{\parallel}$ . 新的 Al<sub>3</sub>Ni 晶核 *P*<sub>2</sub> 在垂直于磁场方向的短轴上(比如图 9(b) 中的 *A* 点)和其它方向(比如图 9(b) 中的 *M* 点)出现的几率越来越接近,

导致初晶 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 相沿垂直于磁场的方向存在定向排列的概率减小, 定向排列效果变的不明显. 由此分析可知, 磁场强度一定时, 合金中溶质含量越低, 磁场的定向排列作用效果越明显, 随着含量提高, 磁场的定向排列作用将减弱. 因此, 我们在利用磁场制备理想的取向排列功能材料时, 不但要考虑磁场的参数, 同时也要考虑合金溶质元素的含量.

## 4 结论

1) 对不同溶质元素含量的 Al-Ni 合金施加磁场

后,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相都会均匀分布, 这是洛仑兹力的作用产生的.

2) 磁场能够使不同溶质元素含量的 Al-Ni 合金中的 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相晶体都发生晶体取向, 但是定向排列的效果不同, 说明晶体取向和定向排列的机理是不同的.

3) 合金溶质元素含量对 $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相的定向排列有很大影响. 在相同的磁场条件下, 合金中溶质含量越低, 磁场的作用效果越明显,  $\text{Al}_3\text{Ni}$ 初生相定向排列效果越好.

## 参考文献

- Savitsky E M, Torchinova R S, Turanov S A. Effect of crystallization in magnetic field on the structure and magnetic properties of Bi-Mn alloys. *J Cryst Growth*, 1981, 52(2): 519—523 [DOI](#)
- Rango P D, Lees M, Lejay P, et al. Texturing of magnetic materials at high temperature by solidification in a magnetic field. *Nature*, 1991, 349(6312): 770—772 [DOI](#)
- Masahashi N, Matsuo M, Watanabe K. Development of preferred orientation in annealing of Fe-3.25%Si in a high magnetic field. *J Mater Res*, 1998, 13(2): 457—461 [DOI](#)
- Ohtsuka H, Xu Y, Wada H. Alignment of ferrite grains during austenite to ferrite transformation in a high magnetic field. *Mater Trans, JIM*, 2000, 41(8): 907—910
- 许爱霞, 马衍伟. 高温超导材料强磁场下的制备研究. *低温物理学报*, 2005, 27(5): 812—818
- Watanabe T, Tsunekawa S, Zhao X, et al. A new challenge: Grain boundary engineering for advanced materials by magnetic field application. *J Mater Sci*, 2006, 41(23): 7747—7759 [DOI](#)
- 马衍伟, 肖立业, 严陆光. 强磁场条件下材料制备及其研究进展. *科学通报*, 2006, 51(24): 2825—2829
- Wang K, Wang Q, Wang C J, et al. Formation of aligned two-phase microstructure in Fe-0.25 mass% C alloy under gradient high magnetic fields. *Mater Lett*, 2008, 62(10-11): 1466—1468 [DOI](#)
- Farrell D E, Chandrasekhar B S, DeGuire M R, et al. Superconducting properties of aligned crystalline grains of  $\text{Y}_1\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7.6}$ . *Phys Rev B*, 1987, 36(7): 4025—4027 [DOI](#)
- 佐佐健介, 森川拓, 浅井滋生. 强磁场による晶出相の配向と結晶方位の制御. *日本学会誌*, 1997, 61(12): 1283—1287
- Asai S, Sassa K, Tahashi M. Crystal orientation of non-magnetic materials by imposition of a high magnetic field. *Sci Tech Adv Mater*, 2003, 4(5): 455—460 [DOI](#)
- Sugiyama T, Tahashi M, Sassa K, et al. The control of crystal orientation in non-magnetic metals by imposition of a high magnetic field. *ISIJ Inter*, 2003, 43(6): 855—861 [DOI](#)
- Tregilgas J H, Kattamis T Z. Tensile properties of directionally solidified Al- $\text{Al}_3\text{Ni}$  composites with off-eutectic compositions. *J Mater Sci*, 1976, 11(7): 1239—1245
- Uan J Y, Chen L H, Lui T S. Study on the subgrain superplasticity of extruded Al- $\text{Al}_3\text{Ni}$  eutectic alloy. *Metall Mater Trans A*, 1997, 28A(2): 401—409 [DOI](#)
- Fukui Y, Okada H, Kumazawa N, et al. Near-net-shape forming of Al- $\text{Al}_3\text{Ni}$  functionally graded material over eutectic melting temperature. *Metall Mater Trans A*, 2000, 31A(10): 2627—2636 [DOI](#)
- Watanabe Y, Yamanaka N, Oya-Seimiya Y, et al. Micro-hardness measurements to evaluate composition gradients in metal based functionally graded materials. *Z Metall*, 2001, 92(1): 53—57
- Goto S, Aso S, Komatsu Y. Effect of fiber orientation of fatigue and fracture properties of fiber eutectic Al- $\text{Al}_3\text{Ni}$  composite alloy. *Key Eng Mater*, 2000, 171(1): 161—168 [DOI](#)
- Mikelson A E, Karklin Y K. Control of crystallization processes by means of magnetic fields. *J Cryst Growth*, 1981, 52(2): 524—529 [DOI](#)
- 王晖, 任忠鸣, 徐匡迪, 等. 强磁场作用下 Al-Ni 合金中  $\text{Al}_3\text{Ni}$  析出相的凝固行为. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(7): 1033—1035
- 李喜, 任忠鸣, 王晖, 等. 强磁场下 Al-Ni 合金凝固初生相  $\text{Al}_3\text{Ni}$  析出相的取向行为. *中国有色金属学报*, 2006, 16(3): 476—481
- Wang Q, Wang C J, Liu T, et al. Control of solidified structures in aluminum-silicon alloys by high magnetic fields. *J Mater Sci*, 2007, 42(24): 10000—10006
- Garmong G, Rhodes C G, Spurling R A. Crystallography and morphology of as-grown and coarsened Al- $\text{Al}_3\text{Ni}$  directionally solidified eutectic. *Metall Mater Trans B*, 1973, 3(4): 707—714
- Inatomi Y. Buoyancy convection in cylindrical conducting melt with low Grashof number under uniform static magnetic field. *Int J Heat Mass Transfer*, 2006, 49(25-26): 4821—4830 [DOI](#)
- Kassem M, Barsi S, Alexander J I D, et al. *J Cryst Growth*, 2005, 276(3-4): 621 [DOI](#)
- Miyake T, Inatomi Y, Kuribayashi K. Measurement of diffusion coefficient in liquid metal under static magnetic field. *Jpn J Appl Phys*,

Part 2, 2002, 41(7A): L811—L813 [DOI](#)

26 胡希伟. 等离子体理论基础. 北京: 北京大学出版社, 2006. 559—561