

强磁场条件下材料制备及其研究进展

马衍伟 肖立业 严陆光

(中国科学院电工研究所, 北京 100080. E-mail: ywma@mail.iee.ac.cn)

摘要 强磁场极端条件下材料制备是当前国际上的研究热点. 全面介绍了稳态强磁场应用于材料制备过程的研究进展, 包括超导、磁性、金属以及纳米等新型材料, 并从强磁场作用下产生的磁化力角度重点讨论了其影响各种新型材料制备过程的机理. 最后, 对强磁场材料科学的研究趋势进行了展望.

关键词 强磁场 新材料 磁场取向 磁化力

磁场是与温度、压力一样重要的物理参数, 强磁场作为一种极端条件的特殊电磁场形态, 能够将高强度的能量无接触地传递到物质的原子尺度, 改变原子和分子的排列、匹配和迁移等行为, 从而对材料的组织和性能产生巨大而深刻的影响, 强磁场加工已成为开发新型材料的一种重要技术手段. 特别是随着传导冷却的新型超导磁体技术的发展, 强磁场的产生和使用变得比较方便, 从而为强磁场下材料制备技术的研究提供了技术基础^[1,2].

强磁场材料科学作为一门新兴的交叉学科引起了国际上的广泛重视^[3], 而且强磁场与高温、超高压以及极低温等极端条件相结合, 还会产生许多新现象. 本文着重介绍强磁场在新材料制备方面的研究现状和进展, 并对其应用前景进行了探讨.

1 强磁场作用的原理

在高温制备过程中, 利用材料的磁各向异性特性, 可以通过施加强磁场来控制材料中晶粒的取向, 这是因为材料在磁场中沿不同方向磁化时, 会产生磁化能量差值. 磁场取向不仅适用于磁性材料, 还可以应用于顺磁性材料甚至抗磁性材料^[4,5]. 当材料被置于均匀磁场中时, 其磁化能可以表示为

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

其中 V 表示晶粒的体积, B 为磁场强度的大小, χ 表示材料的磁化率. 磁化能的大小与晶粒相对于磁场的方向有关. 我们定义 $\Delta\chi$ 为材料在不同磁场方向上最大和最小磁化率的差值, 则各向异性能为

$$\Delta E = -\frac{1}{2\mu_0} \Delta\chi V B^2. \quad (2)$$

如果晶粒的体积足够大、磁场足够强, 根据(2)式, 磁各向异性能可以将大于热扰动能, 这样晶粒在磁场

的作用下发生取向效应. 对于磁性和顺磁性材料, 由于磁化率大于零, 在磁场取向的作用下, 磁化率最大的方向将平行于磁场方向; 而对于抗磁性材料, 磁化率最小的方向平行于磁场方向. 磁场的取向作用与材料磁化率各向异性大小以及磁场强度有关. 磁场取向作用主要应用于电沉积、气相沉积、定向凝固、陶瓷烧结处理和铸造等材料制备过程.

另一方面, 当梯度磁场的 z 分量平行于磁场方向时, 梯度磁场对放置于其中的材料产生的磁化力可以表示为

$$F = -\text{grad}E = \frac{\chi}{\mu_0} B \frac{dB}{dz}. \quad (3)$$

从(3)式看出, 当材料置于非均匀场或梯度场中时, 其所受磁化力的方向取决于材料磁化率的正负. 当材料所受到的磁化力和重力相等且方向相反时, 材料可以在地球空间上实现无接触漂浮的状态称为磁悬浮, 它等同于宇宙环境的失重状态^[6]. 一般而言, 只有磁化率为负时, 才能实现稳定的磁悬浮. 磁悬浮可以实现材料制备过程中的无接触加工.

2 强磁场在材料制备过程中的应用研究

2.1 超导材料

利用高温超导材料 c 轴方向的磁化率大于 a, b 轴方向磁化率的特性, 在合成超导材料时进行强磁场处理是提高晶粒取向织构的一种有效方法. 早在 1991 年, Rango 等人^[5]发现, 通过在 YBCO 超导块材制备过程中施加 5 T 的磁场, 可以有效提高 YBCO 材料的晶粒取向和超导性能. 这一工作导致了强磁场下超导材料制备研究的热潮. 随后, Noudem 等人^[7]在 8 T 磁场下制备 Bi-2223 块材时, 也诱导出很强的取向织构. Ma 等人^[8]通过磁场下的熔融处理获得了具有高度织构度的 Bi-2223/Ag 带材. Liu 等人^[9]报道了在

Bi-2212 厚带的制备过程中施加 10 T 磁场不仅可以提高织构度, 还可以提高材料的临界电流密度. 另外, 日本仙台的研究小组也得到了类似的结果^[10]. 图 1 为 10 T 磁场下所制备 Bi-2212 带材的微观组织. 从图中可以看出, 经过磁场熔融处理, 晶粒的取向性得到了显著提高.

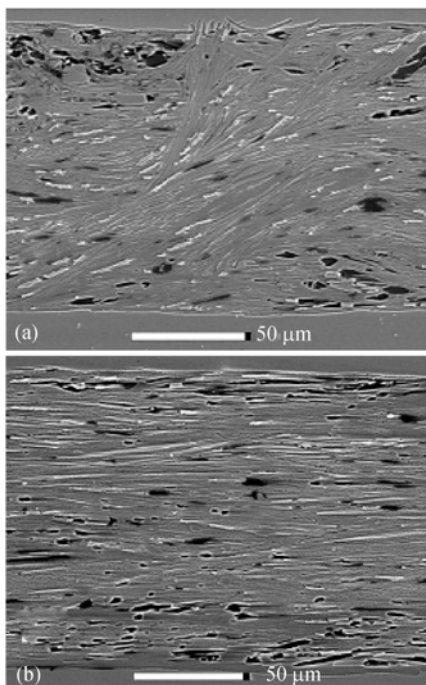


图 1 磁场中制备的 Bi-2212 带材的微观组织
(a) 0 T; (b) 10 T

最近, Awaji 等人^[11]报道在 YBCO 块材的熔融生长过程中外加磁场时, 晶粒织构度提高明显. 同时发现结晶生长速度随磁场的增加而降低. Ma 等人^[12~14]系统研究了强磁场下 YBCO 超导薄膜的生长过程以及磁场对 YBCO 薄膜结构、组织及超导性能的影响. 实验结果表明, 磁场对 YBCO 沉积过程中晶粒的形貌具有很大的影响, 在不加外磁场的条件下, 超导晶粒为 8 ~ 10 μm 的方形. 随着磁场强度的增加, 晶粒尺寸减小, 晶粒形状由原来的方形逐渐转变为约 1 μm 的不规则形状. 同时发现外加磁场还可以改变 YBCO 薄膜的生长模式, 即由零场下的螺旋生长模式转变为磁场下的三维岛生长模式. 最重要的是, 随着薄膜沉积过程中外加磁场的增加, 晶粒连接性得到了显著改善, 相应地薄膜的临界电流密度 J_c 也得到大幅度提高, 如图 2 所示.

2001 年发现的新型超导体二硼化镁 (MgB_2) 同样具有各向异性结构. 如果在 MgB_2 的制备过程中施加

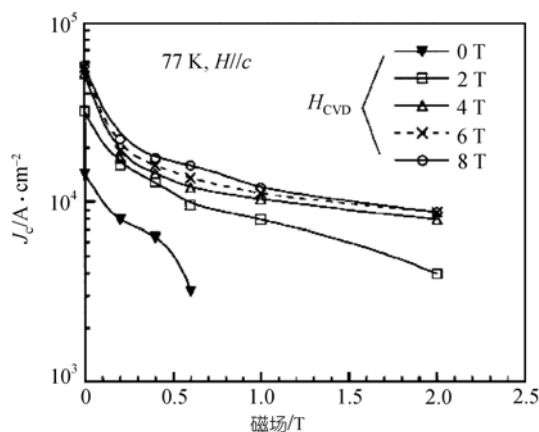


图 2 不同磁场下生长的 YBCO 薄膜的临界电流密度

强磁场, 与高温超导体类似, 是否可以提高其超导性能呢? 在国家自然科学基金的支持下, 我们首次进行了强磁场下 MgB_2 块材和带材的制备研究^[15]. 实验结果证明, 强磁场处理确实可以使 MgB_2 材料的微观组织变得比较均匀, 有效改善了晶粒连接性. 因此, 相对于零场下制备的样品, 磁场下制备的 MgB_2 材料的临界电流密度得到很大的提高.

2.2 磁性材料

在实际应用中, 具有织构和各向异性的磁性材料一般具有比较高的性能. 对永磁材料而言, 疏松的单晶颗粒可以通过在磁场中旋转, 使易磁化轴平行于磁场方向排列, 从而达到取向的目的; 也可以通过在磁场下定向凝固过程而得到高矫顽力和高磁能积的永磁材料. 对于铁磁合金, 可以通过以下两种方法提高其织构度: () 在保证足够过冷的条件下, 从铁磁态直接进行磁场下定向凝固处理; () 在居里温度以下, 对淬火样品进行磁场退火处理.

磁场下定向凝固工艺可以获得高度取向的钕钴合金, 其矫顽场可高达 2250 kA/m, 磁能积大于 160 kJ/m³^[16]. 这种磁场处理方法可以替代目前工业上以粉末合金技术为基础的传统技术. 最近, Cui 等人^[17]发现经过磁场退火以后, $Nd_{2.4}Pr_{5.6}DyFe_{85}B_6$ 和 $Nd_2Fe_{14}B/Co$ 纳米化合物的磁性能不仅得到了明显改善, 同时还可以提高磁性材料的织构性和增强交换耦合效应. 另外, 强磁场退火还可以有效提高 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力^[18], 如含有 1.3% Dy 和 0.32% Al (原子百分比) 的 Nd-Fe-B 样品在 14 T 磁场、823 K 下经磁场处理后, 矫顽场达到 1.92 T, 高出零场下退火样品的 37%, 这主

要由于在磁场退火的条件下,富钕相在定向凝固时会发生取向效应,改善了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相之间的晶格匹配,从而提高了样品的矫顽力.对于冷轧Fe-Si板等软磁性材料而言,10 T磁场退火可大幅度提高Fe-Si板 $\langle 001 \rangle$ 轴取向的选择性,相应地改善了其机械性能^[19].而FePd材料在780 K,10 T磁场下退火以后,Tanaka等人^[20]发现了奇特的 L_{10} 型单形体结构.

如果磁相互作用发生在铁磁态,将会出现更强或者新的磁效应.Gaucherand等人^[21]观察到了铁磁Co-B合金在高温磁场下出现的织构现象,如图3所示,钴粒子在铁磁态下凝固时,材料的微观组织呈现出较强的各向异性,也就是说所有钴粒子会沿着施加磁场的方向堆积成针状.相反,在零场下定向凝固的样品,没有出现有序化现象,钴粒子随机分布.

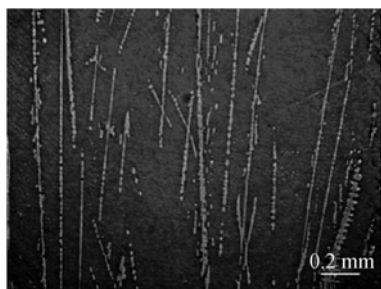


图3 铁磁Co-B合金经高温磁场处理后的微观组织

2.3 金属材料

在金属凝固过程中,利用夹杂物和金属熔体具有不同磁化率的特点,强磁场可以用来控制金属熔体的对流和物质传输,有效去除夹杂物,从而达到改善金属凝固组织的目的.另外,利用结晶体磁化率各向异性的特点以及母相和生成相的磁矩差,在金属材料的再结晶、扩散析出等相变等过程中施加磁场作用时,可以使金属组织结构发生变化或者改善晶体组织的取向,从而改善材料的性能,甚至可以制备出新型金属材料.

基于磁化力原理,Takagi等人^[22]主要研究了非磁性颗粒在强磁场中发生移动的情况.当Al-18%Si合金在强磁场中进行凝固时,由于夹杂物、沉积Si粒子以及熔融合金分别具有抗磁性和顺磁性,这样在零场下,Si颗粒主要分布在底部(图4(a)).相反,在强磁场下磁化力迫使Si颗粒迁移到样品的上部,另外还有部分Si颗粒附着在容器壁,如图4(b)所示.Yasuda等人^[23]发现强磁场不仅可以降低富Cu液滴的上升速度,还可以降低液滴的聚合速度,从而减少

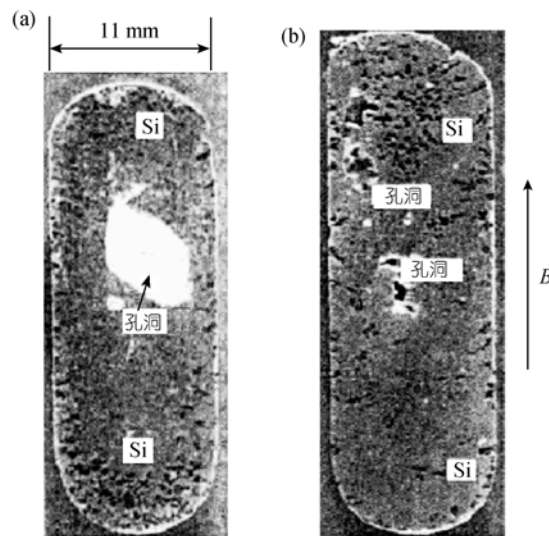


图4 磁场中Al-18%Si合金凝固的微观组织

(a) 0 T; (b) 外加磁场

Cu-Pb合金固化过程中的宏观偏析.当Al-4.5%Cu合金在10 T的磁场下定向凝固时,形成了取向结构,沿 $\langle 111 \rangle$ 方向平行于磁场方向排列,而枝晶沿 $\langle 100 \rangle$ 方向生长^[24].我们知道,强磁场对液态金属的流动具有抑制效果.然而,Lehmann等人^[25]发现,当AlCu合金和AgCu合金被放置于横向磁场下的水平装置中进行凝固时,磁化力与液体浮力相反.据此,他们得出结论,在存在较高温度梯度的情况下,在强磁场下进行凝固时,磁场导致的热电洛伦兹力不可忽略.

当Bi-Mn合金在强磁场中凝固时,由于沿c轴较强的磁力矩作用,MnBi晶粒发生择优生长,并沿c轴方向聚集,在中等强度的磁场下就可以实现MnBi合金晶粒的高度取向^[26].这是因为金属Bi的a、b轴方向的磁化率比c轴方向的要小,在强磁场作用下,晶粒发生旋转使得c轴方向和磁场方向一致.另外,Bi-20%Mn合金(原子百分比)在4 T磁场下进行快速凝固时也观察到了结晶取向效应^[27].因此,在Bi-Mn合金的凝固过程中施加强磁场,不仅改善了MnBi化合物的结晶性,而且由于磁场抑制了液体对流和物质传输,也改善了Bi基体材料的质量.另外,采用电磁离心铸造方法制备不锈钢管坯时,发现在电磁搅拌作用下,管坯铸态微观组织被细化,管坯的塑性加工性能得到很大提高^[28].

2.4 纳米材料

纳米材料是指尺度处于1~50 nm之间的材料.纳米材料的物理性能取决于材料的物理尺寸.纳米

材料在纳米尺度上非匀质结构使它具有非常诱人的机械、电、热和化学特性。具有大量取向排列纳米粒子的宏观材料对外表现出各向异性,因而具有极大的潜在应用前景。

利用碳纳米管磁化率的各向异性, Walters等人^[29]制备出了高度取向的单壁碳纳米管薄膜,如图5所示。他们首先将提纯后的单壁碳纳米管制备成悬浮液,然后把它们放到25 T的强磁场中,在磁场的作用下过滤,从而产生保持高度取向的碳纳米管阵列。由于单壁碳纳米管,如(n, n)系列,沿着它们长轴的方向上是顺磁性的,所以它们平行于周围的磁场;而其他系列的碳纳米管是反磁性的,但是它们在垂直于管轴方向上的磁化系数多数是负的,因此在磁场的作用下也可使其平行于磁场。使两种顺磁性和反磁性碳纳米管产生取向的磁化强度大致相等,通过碳纳米管磁化率计算可以预测,室温下使碳纳米管产生取向所需的最小磁强度是10 T。类似于Walters的实验, Kimura等人^[30]将碳纳米管分散在非饱和聚合物的单分子基体溶液中,然后施加10 T的磁场使碳纳米管发生取向,从而得到了具有各向异性电导和机械特性的纳米化合物。Choi等人^[31]也通过实验证明了单壁碳纳米管聚合物的热电特性通过在制备过程中施加磁场可以得到很好地改善。

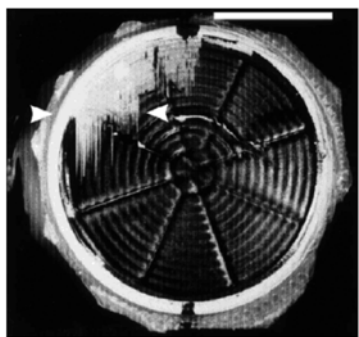


图5 25 T 磁场中处理后获得的高度取向单壁碳纳米管薄膜(标尺示1 cm)

另一方面,铁磁纳米线的一维结构决定了其独特的磁特性,它将有可能应用于高密度垂直场记录方面,因而在科学研究领域具有重要的地位。Lee等人^[32]在强磁场条件下制备了具有取向排列的铁钴纳米线。纳米线的直径介于8~10 nm之间,长度为几个毫米。纳米线通过沿磁场方向的纳米簇聚集生长得到。在不加磁场的条件下,只能得到纳米簇,而得不到纳米线。Hangarter等人^[33]在利用模板定向电沉

积法制备Ni/Au/Ni和Ni/Bi/Ni纳米线的过程中施加较低的外磁场就可以得到百分之百取向排列的纳米线。另外,钴多晶线一般是由钴纳米晶通过自组装方法获得,当制备过程中无磁场作用时,虽然纳米晶具有单畴结构,但是单畴之间是随机排列的。而施加0.25 T磁场时,球形粒子沿着磁场方向排列并且形成线性链^[34]。因此,在制备高度取向的均匀纳米线和改善纳米磁性材料的性能方面,强磁场取向处理具有广阔的应用前景。

2.5 其他材料

由于抗磁性材料的磁化率非常小,长期以来,磁场对抗磁性材料的作用一直被人们所忽略。近年来,由于超导技术的发展,强磁场被应用到了抗磁性材料的制备过程中。这是由于磁化力正比于磁感应强度的平方,10 T下非磁性体所受到的磁化力和0.01 T下的强磁性体所受到的磁化力相当。例如,8 T的外加磁场对二苯甲酮晶体的生长过程有很大的影响^[35]。10 T强磁场也可以改变蛋白质晶体的形貌并改善其质量^[36]。而且磁场取向效应还适用于生物材料,例如在8 T磁场中聚合的蛋白纤维取向良好^[37]。对于改善晶须加强型材料的性能,晶须取向是一种非常有效的技术。Sakka等人^[38]发现,在钛晶须悬浮液的过滤过程中,施加垂直于流体方向10 T的磁场,可以控制钛晶须的取向。另外,对新型钙钛矿 $\text{YNi}_x\text{Mn}_{1-x}\text{O}_3$ 氧化物薄膜进行的强磁场热处理研究发现,强磁场对晶粒生长具有促进作用,相应地结晶性获得较大改善,薄膜的磁性能也得到大幅度提高^[39]。

得益于超导磁体技术的发展,不仅磁性材料,而且非磁性材料都可以在强磁场下进行加工处理。通过外加磁场使材料发生取向或改性,进而改善材料的电、磁、热以及机械性能,得到新型功能材料。因此,强磁场将会成为制备新型功能材料的有效工具,而且强磁场技术的进步将会进一步推动新型功能材料研究的发展。

3 结论

本文从磁化能的角度,系统总结了强磁场在材料制备领域的应用原理和研究进展,主要包括超导材料、磁性材料、金属材料和纳米材料等新材料。强磁场不仅可以用来控制金属熔体的对流和物质传输,有效去除夹杂物;而且可以对磁性或者非磁性材料进行加工处理,得到取向排列的新材料。强磁场技术具有非常广阔的应用前景,可以相信在未来几年内,

强磁场的应用领域将不断扩展,尤其在强磁场新材料合成、化学反应、晶体生长以及一些新领域的应用将会有很大的突破。

致谢 感谢许爱霞同学在材料整理过程中提供的帮助。本工作受国家自然科学基金(批准号: 50472063, 50572104)和中国科学院“百人计划”资助。

参 考 文 献

- Watanabe K, Yamada Y, Sakuraba J, et al. (Nb,Ti)₃Sn superconducting magnet operated at 11 K in vacuum using high- T_c (Bi,Pb)₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ current leads. *Jpn J Appl Phys*, 1993, 32: L488—L490[DOI]
- Watanabe K, Awaji S. Cryogen-free superconducting and hybrid magnets. *J Low Temp Phys*, 2003, 133: 17—30[DOI]
- Asai S, Sassa K, Tahashi M. Crystal orientation of non-magnetic materials by imposition of a high magnetic field. *Sci Techn Adv Mater*, 2003, 4: 455—460[DOI]
- Beaugnon E, Tournier R. Levitation of organic materials. *Nature*, 1991, 349: 470[DOI]
- De Rango P, Lees M, Lejay P, et al. Texturing of magnetic materials at high temperature by solidification in a magnetic field. *Nature*, 1991, 349: 770—772[DOI]
- Tournier R F, Beaugnon E, Noudem J, et al. Materials processing in a magnetic force opposed to the gravity. *J Magn Magn Mater*, 2001, 226: 2094—2100[DOI]
- Noudem J G, Beille J, Bourgault D, et al. Bulk textured Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O (2223) ceramics by solidification in a magnetic field. *Physica C*, 1996, 264: 325—330[DOI]
- Ma Y W, Wang Z T. To enhance J_c of Bi-2223 Ag-sheathed superconducting tapes by improving grain alignment with magnetic field. *Physica C*, 1997, 282: 2619—2620[DOI]
- Liu H B, Ferreira P J, Vander Sande J B. J_c enhancement of Bi₂Sr₂CaCu₂O₈/Ag thick films melt-grown under an elevated magnetic field (0-10 T). *Physica C*, 1999, 316: 261—266
- Awaji S, Ma Y W, Chen W P, et al. Magnetic field effects on synthesis process of high- T_c superconductors. *Curr Appl Phys*, 2003, 3: 391—395[DOI]
- Awaji S, Watanabe K, Motokawa M, et al. Melt textured process for YBCO in high magnetic fields. *IEEE Trans Appl Supercond*, 1999, 9: 2014—2017[DOI]
- Ma Y W, Watanabe K, Awaji S, et al. Effect of magnetic field on growth of YBa₂Cu₃O₇ films on MgO substrates by metalorganic chemical vapor deposition. *Physica C*, 2001, 353: 283—288[DOI]
- Ma Y W, Watanabe K, Awaji S, et al. J_c enhancement of YBa₂Cu₃O₇ films on polycrystalline silver substrates by metalorganic chemical vapor deposition in high magnetic fields. *Appl Phys Lett*, 2000, 77: 3633—3635[DOI]
- Ma Y W, Watanabe K, Awaji S, et al. Observation of growth-mode change under a magnetic field in YBa₂Cu₃O_{7-x}. *Phys Rev B*, 2002, 65: 174528[DOI]
- Ma Y W, Xu A X, Li X H, et al. Enhanced critical current density of MgB₂ superconductor synthesized in high magnetic fields. *Jpn J Appl Phys*, 2006, 45: L493—L496[DOI]
- Legrand B A, Perrier de La Bathie R, Tournier R, et al. Orientation by solidification in a magnetic field: A new process to texture SmCo compounds used as permanent magnets. *J Magn Magn Mater*, 1997, 173: 20—28[DOI]
- Cui B Z, Huang M Q, Yu R H, et al. Magnetic properties of (Nd,Pr,Dy)₂Fe₁₄B/ α -Fe nanocomposite magnets crystallized in a magnetic field. *J Appl Phys*, 2003, 93: 8128—8130[DOI]
- Kato H, Miyazaki T, Sagawa M, et al. Coercivity enhancements by high-magnetic-field annealing in sintered Nd-Fe-B magnets. *Appl Phys Lett*, 2004, 84: 4230—4232[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: 457—461
- Tanaka K, Ichitsubo T, Koima M. Effect of external fields on ordering of FePd. *Mater Sci Eng A*, 2001, 312: 118—127[DOI]
- Gaucherand F, Beaugnon E. Magnetic texturing in ferromagnetic cobalt alloys. *Physica B*, 2004, 346: 262—266[DOI]
- Takagi T, Iwai K, Asai S. Solidified structure of Al alloys by a local imposition of an electromagnetic oscillating force. *ISIJ Intern*, 2003, 43: 842—848
- Yasuda H, Ohnaka I, Kawakami O, et al. Effect of magnetic field on solidification in Cu-Pb monotectic alloys. *ISIJ Intern*, 2003, 43: 942—949
- Li X, Ren Z M, Sun Y, et al. Effect of high longitudinal magnetic field on the microstructure of directionally solidified Al-4.5% Cu alloy. *Acta Meta Sinica*, 2006, 42: 147—152
- Lehmann P, Moreau R, Camel D, et al. Modification of interdendritic convection in directional solidification by a uniform magnetic field. *Acta Mater*, 1998, 46: 4067—4079
- Liu Y S, Zhang J C, Cao S X, et al. Microstructure, crystallization, and magnetization behaviors in Mn-Bi composites aligned by applied magnetic field. *Phys Rev B*, 2005, 72: 214410[DOI]
- Yasuda H, Ohnaka I, Yamamoto Y, et al. Alignment of BiMn crystal orientation in Bi-20 at% Mn alloys by laser melting under a magnetic field. *Mater Trans*, 2003, 44: 2550—2554[DOI]
- 林刚, 杨院生, 花福安, 等. 电磁离心 1Cr18Ni9Ti 不锈钢的凝固组织与变形性能. *金属学报*, 2003, 39(12): 1233—1237
- Walters D A, Casavant M J, Qin X C, et al. In-plane-aligned membranes of carbon nanotubes. *Chem Phys Lett*, 2001, 338: 14—20[DOI]
- Kimura T, Ago H, Tobita M, et al. Polymer composites of carbon nanotubes aligned by a magnetic field. *Adv Mater*, 2002, 14: 1380—1383[DOI]
- Choi E S, Brooks J S, Eaton D L, et al. Enhancement of thermal and electrical properties of carbon nanotube polymer composites by magnetic field processing. *J Appl Phys*, 2003, 94: 6034—6039[DOI]
- Lee G H, Huh S H, Park J W, et al. Arrays of ferromagnetic iron and cobalt nanocluster wires. *J Phys Chem B*, 2002, 106: 2124—2126
- Hangarter C M, Myung N V. Magnetic alignment of nanowires. *Chem Mater*, 2005, 17: 1320—1324[DOI]
- Niu H L, Chen Q W, Zhu H F, et al. Magnetic field-induced growth and self-assembly of cobalt nanocrystallites. *J Mater Chem*, 2003, 13: 1803—1805[DOI]
- Fujiwara M, Fukui M, Tanimoto Y. Magnetic orientation of benzophenone crystals in fields up to 80.0 kOe. *J Phys Chem B*, 1999, 103: 2627—2630[DOI]
- Sasaki G, Yoshida E, Komatsu H, et al. Effects of a magnetic field on the nucleation and growth of protein crystals. *J Cryst Growth*, 1997, 173: 231—234[DOI]
- Torbet J. Magnetic orientation in biology: Virus structure – blood clot assembly—cell guidance. In: *Proceedings of International Workshop on Materials Analysis and Processing in Magnetic Fields*, Tallahassee, USA, 2004, 249—256
- Sakka Y, Suzuki T S, Tanabe N, et al. Alignment of titania whisker by colloidal filtration in a high magnetic field. *Jpn J Appl Phys*, 2002, 41: L1416—L1418[DOI]
- Ma Y W, Xu A, Li X. Improved properties of epitaxial YNi_xMn_{1-x}O₃ films by annealing under high magnetic fields. *Appl Phys Lett*, 2006, 89: 152505[DOI]

(2006-07-02 收稿, 2006-11-06 接受)