

稳恒强磁场在固态相变中应用的研究进展

Research and Development of Homogeneous High Magnetic Field Applied in Solid Phase Transformation

任 晓^{1,2}, 周文龙^{1,2}, 陈国清², 吴承伟¹, 黄朝晖³, 张俊善²

(1 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116085;

2 大连理工大学 材料科学与工程学院, 辽宁 大连 116085; 3 北京航空材料研究院, 北京 100095)

REN Xiao^{1,2}, ZHOU Wen-long^{1,2}, CHEN Guo-qing²,

WU Cheng-wei¹, HUANG Zhao-hui³, ZHANG Jun-shan²

(1 State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial

Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116085, Liaoning, China;

2 School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian

116085, Liaoning, China; 3 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 稳恒强磁场作用下的固态相变受到了广泛的关注, 已成为材料科学中重要的研究领域。本文从固态相变中相稳定性、生成相形貌和晶粒细化方面介绍了稳恒强磁场的影响规律和作用机制。阐述了通过施加稳恒强磁场控制材料微观组织, 从而实现改变材料的性能。稳恒强磁场将成为材料制备与改性极具潜力的手段, 在开发高性能材料方面发挥巨大作用。

关键词: 稳恒强磁场; 固态相变; 相稳定性; 生成相形貌; 晶粒细化

中图分类号: TG111.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2009)03-0082-05

Abstract: Solid phase transformation under the application of homogeneous high magnetic field has attracted much attention and becomes an potential research field of material science. The effect and acting mechanism of high magnetic field on solid phase transformation were summarized concerning phase stability and morphology as well as grain refinement. The microstructure and properties of materials could be controlled by applying high magnetic field, which becomes a powerful facility available for materials preparation and modification. It has a huge potential for developing high performance materials by high magnetic field.

Key words: homogeneous high magnetic field; solid state phase transformation; phase stability; phase morphology; grain refinement

超导稳恒强磁场具有质量轻、费用低、以及易于在较大空间内获得高场强、均匀场强、高梯度磁场等一系列优点, 利用强磁场的研究已拓展到凝聚态物理学、应用化学、材料科学、生物医学等领域, 并已得到大量研究成果, 它的重要性已经在各种程度上被认可^[1]。

世界发达国家如美国、日本和法国等相继投入了大量的人力和物力, 竞相开展强磁场应用方面的研究工作。国内大连理工大学、东北大学、上海大学、中国科技大学和中科院电工所等单位也开展了强磁场材料科学方面的研究。就材料科学而言, 磁场应用的巨大潜力和优势在于“不接触加工”而控制材料微观组织, 是现有其他方法不可以替代的^[1]。强磁场不仅可应用于铁磁性材料^[2~4], 而且可用于非铁磁性材料如金属材

料^[5]、陶瓷材料^[6,7]、高分子材料^[8]和复合材料^[9]等等。在强磁场的作用下, 通过对相变过程中材料的微观组织^[2~4]、性能^[10,11]的影响, 实现新材料制备与改性。

本文综述了稳恒强磁场(以下简称强磁场)作用下, 固态相变中相稳定性、生成相形貌和晶粒细化方面的研究现状。

1 强磁场对固态相变中相稳定性的影响

1.1 对铁基合金相稳定性的影响

由于铁磁性材料和顺磁性材料及抗磁性材料在磁性能方面的巨大差异, 强磁场对铁磁性材料的磁化行为产生显著影响。对于相变过程, 磁场直接改变系统

Gibbs 自由能。关于强磁场作用下,铁基合金相变过程的研究报道较多^[3,13,14]。由于铁基合金中的 α 相是铁磁性相,而 γ 相是顺磁性相,因而强磁场作用不同程度地改变了 Fe-C 相图上所有的相变过程。

采用分子场理论计算发现施加强磁场将增加 γ/α 相平衡温度,同时使 $\alpha + \gamma$ 双相区向高温方向移动,并且磁场强度越高这些影响越明显。外加强磁场作用将增加钢中 α 相的共析碳含量、临界温度(A_{e1} 和 A_{e3})以及碳的固溶度^[15],数值模拟研究^[15-18]得到类似的结论。计算结果显示,在 30T 强磁场下,纯铁 A_{e3} 温度升高 50℃ 以上,Fe-C 二元合金 A_{e1} 温度增加约 30℃^[15]。四探针电阻测量法检测实验很好地验证了分子场理论的计算结果^[19]。

另外,在 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变过程中施加磁场也将升高相变温度。Ludtka^[20]指出 30T 强磁场下 1045 钢在不同冷却速率下 γ 相分解过程中相变温度增加 70~90℃。12T 强磁场下中碳钢 γ 相分解时磁场导致相变温度升高,使相变向高温区移动,并缩短相变时间^[18],见图 1。这是因为 γ 母相与 α 生成相磁化率有巨大差异,在强磁场作用下 α 相的磁化程度比 γ 相磁化程度高, α 相的 Gibbs 自由能降更大,从而产生了附加驱动力 ΔG_M ,即母相与生成相间的 Gibbs 自由能差为 $\Delta G_M + \Delta G_V$ 。附加驱动力 ΔG_M 对总相变驱动力的贡献大于 15%,使 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变过程的孕育期缩短。从图 1 可看出,孕育期缩短, α 相转变曲线向左移动,相变被移向高温区域^[18]。

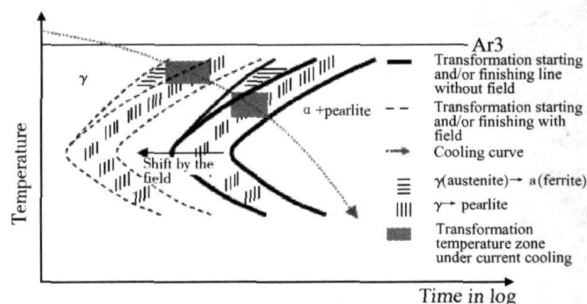


图 1 有无强磁场条件下 CCT 曲线示意图^[18]

Fig. 1 Schematic illustration of the CCT curves, with and without a magnetic field^[18]

到目前为止,对于强磁场能影响铁基合金相稳定性现象的解释仅限于相变动力学和热力学方面,有关具体相变过程磁场作用的机理和理论有待深入的研究探索。

1.2 对其他材料相稳定性的影响

强磁场对非铁磁性材料相稳定性也可产生显著影

响。如在非晶晶化过程中施加强磁场能影响晶化过程。非晶合金 $Fe_{65}Co_{10}Nd_8B_{17}$ 在 5T 和 10T 强磁场下晶化过程中,强磁场抑制 $Nd_3Fe_{23}B_3$ 相析出,而促进 $Nd_2Fe_{14}B$ 相和 $\alpha-Fe$ 相析出^[21]。强磁场的应用还可使相变过程中的中间亚稳相转变为稳定相保留下来或改变生成相结构。研究 Fe_3Al 中 B2 和 DO3 相间的结构转变,发现约 1.7T 强磁场可使相变中出现的中间亚稳相稳定下来^[14]。对 $MnZn$ 铁酸盐施加强磁场,使 ZrO_2 粒子由正方晶体结构变成单斜晶体结构^[14]。在较低温度下,强磁场使 V_3Si 的 A15 结构发生畸变, c/a 由原来的 $c/a > 1$ 变成 $c/a < 1$ ^[22]。强磁场甚至能诱导产生金属向绝缘体的相转变。Kuwahara 等^[23]发现 $Nd_{1/2}Sr_{1/2}MnO_3$ 在磁场作用下被诱导产生一级电子相变(金属向绝缘体)。在特定温度增加和减小外加磁场强度过程中,观察到一个明显的磁滞回线。

2 强磁场对固态相变中生成相形貌的影响

强磁场对固态相变中生成相形貌影响主要有两种机制:一是由于不同相间磁性能的差异,磁场对生成相产生偶极相互作用,形成组织排列;二是由于材料具有磁各向异性、形状各向异性或磁诱导各向异性,在磁场热处理过程中因取向作用形成组织。

2.1 对组织排列的影响

铁基合金的固/固相变中,母相与生成相不但磁矩不同,而且磁晶各向异性、形状各向异性、磁诱导各向异性和磁致伸缩不同都影响生成相的形核和长大速率、转变动力学和微观组织等,从而影响生成相形貌。其中, α 相从 γ 相中析出时,受强磁场作用 α 相在 γ 相中沿磁场方向排列形成链状或柱状微观组织是强磁场影响下形成组织排列的典型现象^[2]。

Shimotomai 等^[2,24]在 8T 强磁场下首次观察到 Fe-0.1% C (质量分数,下同)和 Fe-0.6% C 合金中发生 $\alpha \rightarrow \gamma$ 相变时, γ 相在 α 相中形核并长大形成链状或柱状组织排列。其形成机制是:体积为 v 的 γ 相晶核在磁导率为 μ 的 α 相中形核,其中距离为 r 的两个球状晶核间的偶极相互作用可表示为(1):

$$W_{dd} = [m_1 \cdot m_2 - 3(m_1 \cdot r)(m_2 \cdot r)r^{-2}]/4\pi\mu r^3 \quad (1)$$

平行于磁场方向排列的晶核对间相互吸引,而垂直于磁场方向排列的晶核间相互排斥。从晶核的形状看,球形晶核具有最小的表面能,然而从退磁因素方面考虑拉长的椭球体形状是最有利的,这两种形状折衷的结果是形成椭球形状。因此,综合偶极相互作用和磁场对 γ 相晶粒形状的共同影响,一个个椭球体形状的

γ 晶粒沿磁场方向相互连接形成链状或柱状组织排列。

上述 γ 相在 α 母相中形成排列组织的机制暗示类似的组织也将在强磁场下 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变过程中形成^[25]。通过 8T 磁场下对热轧 Fe-0.6% C 合金 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变研究发现结果与上述的推断相吻合, 但 Shimotomai 等认为对 Fe-0.6% C 合金而言, 在 α 相变前进行预先轧制和相变过程中施加强磁场对于形成平行于磁场方向的排列组织是必需的。然而后来的研究发现, 为获得铁素体排列组织而进行的预变形是不必要的。文献[3]中示出了施加 10T 强磁场时, Fe-0.4% C 合金 $\gamma \rightarrow \alpha$ 相变后的 $\alpha + \gamma$ 双相形貌。从无磁场时生成相形貌图可看出, α 晶粒呈等轴状均匀分布, 而 10T 强磁场下 α 晶粒被拉长且沿磁场方向排列。进一步研究表明, α 晶粒被拉长程度随磁场强度增加, γ 晶粒尺寸减小和相变驱动力减小而增加, 在 α 相居里点温度上下均可观察到 α 晶粒被拉长而形成的排列组织^[3]。

此外, Zhang 等^[26] 根据磁场条件下 α 晶粒受偶极相互作用形成组织排列提出一个 α 晶粒演化模型, 已通过原位观察得到确认^[27]。另据报道, Hao 等^[28] 发现 α 晶粒拉长的程度在至居里温度范围内倾向于随相变温度增加而增加, 在居里温度点存在一个峰值, 然后随相变温度升高而降低。

从铁基合金受强磁场影响形成排列组织的事实推断, 在较高磁场强度的作用下, 非铁基合金相变中也可能发生类似的组织排列现象。随强磁场材料科学研究深入扩展, 必将不断发现新的强磁现象。

2.2 对形成织构的影响

结构化材料具有特殊的性能和用途, 以及强磁场对织构演化产生的显著影响, 研究强磁场对织构演化的作用规律, 探索利用强磁场制备结构化材料新技术具有重要的理论和实际意义。

近年来, 强磁场对钛^[29-31]、锌合金^[32]、铝合金^[33]、硅钢^[34] 和 FePd^[35] 等材料织构的影响已有研究报道。其中 Molodov 和 Sheikh-Ali 所在的研究组在这方面已得到了大量重要的研究成果。通过研究强磁场对金属及合金织构行为的影响^[29, 31-33, 36], 发现对磁各向异性材料而言, 磁场的影响源于材料磁各向异性磁化率引起的磁性附加驱动力^[36], 而对于磁各向同性材料主要是由原子间偶极相互作用造成的。

锌及其合金是典型的磁各向异性材料, 2002 年 Sheikh-Ali 等^[32] 首先分析了磁场热处理对 Zn-1.1% Al 合金织构演化的影响。经过总压下量 99% 的轧制后在 32T 磁场和 663K 温度下退火处理, 实验结果表明合金织构组分强度与晶粒取向有关, 具有最小磁化率晶粒取向的组分强度增加, 而最大磁化率晶粒取向

的织构组分则完全消失。电弧熔炼磁各向异性 FePd 合金^[35] 织构分析结果显示, 磁场退火增加了 c 轴沿磁场方向排列晶粒的体积分数, 延长退火时间晶粒的取向程度将进一步增强。

磁场还可影响磁各向同性材料的织构演化。Bacaltchuk 等^[34] 采用 8T 磁场对晶粒无取向低碳钢织构演化分析表明, 强磁场通过增加高斯织构组分强度和降低 γ 纤维织构强度影响织构发展。研究磁场下中碳钢奥氏体分解过程中织构形成时发现, 磁场增强了沿横向磁场方向 (TFD) $\langle 001 \rangle$ 织构组分 ($\langle 001 \rangle \parallel \text{TFD}$), 这是平行于 TFD 方向 $\langle 001 \rangle$ 晶向晶粒择优形核和长大的结果, 归因于铁原子磁矩间的偶极相互作用^[18]。此外, 在 17T 强磁场下对 AA 3103 铝合金进行织构分析也发现了织构的明显改变^[5]。

实验和理论分析研究结果表明, 强磁场对固态相变中生成相形貌可以产生显著影响, 有希望利用强磁场制备具有组织排列或特定织构的晶体材料; 强磁场影响材料生成相形貌的作用规律比较复杂, 目前的研究成果大多仅限于热力学层面, 广泛深入的研究将加快强磁场材料学技术的工程实用化进程。

3 强磁场对相转变晶粒细化的影响

强磁场作用对材料产生晶粒细化的效果, 对改善结构和功能材料的综合性能具有重要意义。强磁场产生晶粒细化的原因主要是: 强磁场提高形核率, 增加相变冷却速度, 抑制生成相长大; 磁场抑制反常晶粒长大, 使晶粒分布均匀化。

在强磁场作用下, 低碳锰铌钢发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 和 $\gamma \rightarrow \text{P}$ 相变的过程产生晶粒细化效应^[37]。当磁通密度为 1.5T 时, 晶粒尺寸为不加磁场时线性尺寸的 60%, 这是由于强磁场的作用增加了铁原子跃迁的几率, 使热辐射散热系数增加, 同时导致冷却速度增加。相变过程新相形核率与形核驱动力和原子扩散速率有关, 在大的过冷度下, 外加磁场提高了原子的扩散速率, 同时由于冷却速度的提高, 使在较低温度下可得到较高的形核率。冷却速度的提高, 也抑制了相变后铁素体的长大速度, 最终得到了细化的铁素体和珠光体组织。此外, 由于低碳钢的磁导率较大, 磁场产生的晶粒细化作用还使合金显微组织均匀度提高。在 Fe-50% (原子分数) Co 合金^[1] 磁场退火和非晶合金 Fe₆₅Co₁₀Nd₈B₁₇ 晶化过程中^[21] 也得到类似的结论。

强磁场抑制晶粒反常长大的作用对于纳米晶材料而言意义重大。因为纳米晶材料常在晶化或随后的热处理过程中发生反常晶粒长大而导致纳米晶材

料独一无二的性能降低或丧失^[1]。电沉积纳米晶镍退火处理的研究表明,施加磁场很好地抑制了纳米

晶镍的反常晶粒长大过程,使微观组织均匀程度大幅提高(见图2)。

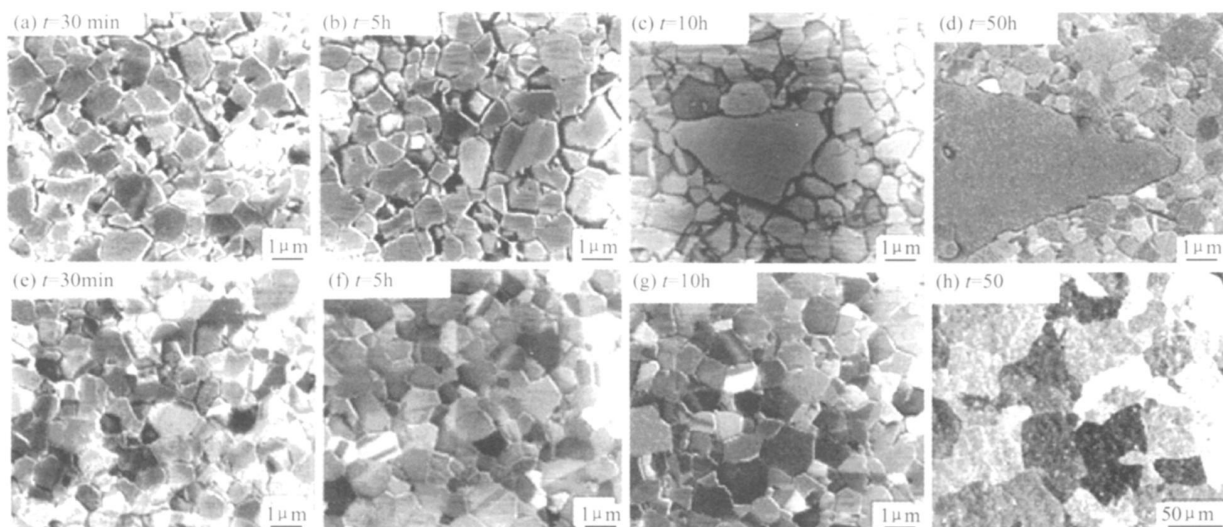


图2 693K退火时电沉积纳米晶镍晶粒长大情况^[1]

(a), (b), (c), (d) 0T; (e), (f), (g), (h) 6T

Fig. 2 SEM micrographs showing the effect of high magnetic field on the heterogeneity of grains and abnormal grain growth in electrodeposited nanocrystalline nickel. Specimens were annealed at 693 K for different annealing times without magnetic field (a), (b), (c), (d); with 6T magnetic field (e), (f), (g), (h)^[1]

利用磁场处理具有晶粒细化和抑制晶粒反常长大的作用效应,改善材料的显微组织,提高材料的综合性能,是具有潜在应用价值的研究方向,深入的理论和实验研究探索将在功能材料开发应用中发挥巨大作用。

4 结束语

超导强磁场科学的发展使其成为材料制备与改性方面独特的技术手段,为强磁场技术的实用化应用提供了基本条件,促进形成了强磁场材料学科。到目前为止,强磁场材料学已经进行了较多的探索性实验研究。就固态相变而言,在相稳定性、生成相形貌和晶粒细化等方面,发现许多有价值的强磁作用现象,开拓出一系列内涵丰富的研究新领域。强磁场材料学仍处于起步阶段,开展强磁场的微纳尺度作用,及其多物理场耦合作用等方面的研究,将有助于揭示强磁现象的本征机理,促进理论和应用技术的发展。

参考文献

[1] WATANABE T, TSUREKAWA S, ZHAO X, et al. A new challenge: grain boundary engineering for advanced materials by magnetic field application[J]. J Mater Sci, 2006, 41: 7747– 7759.
[2] SHIMOTOMAI M, MARUTA K. Aligned two-phase structures in Fe-C alloys[J]. Scripta Mater, 2000, 42: 499– 503.

[3] OHTSUKA H. Effect of strong magnetic field on bainitic transformation[J]. Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2004, 8: 279– 284.
[4] JARAMILLO R A, BABU S S, LUDTKA G M, et al. Effect of 30T magnetic field on transformations in a novel bainitic steel[J]. Scripta Mater, 2005, 52: 461– 466.
[5] BHAUMIK S, MOLODOVA X, MOLODOV D A, et al. Magnetically enhanced recrystallization in an aluminum alloy[J]. Scripta Mater, 2006, 5: 995– 998
[6] LIS Q, SASSA K, ASAI S. Textured crystal growth of Si₃N₄ ceramics in high magnetic field[J]. Mater Lett, 2005, 59: 153– 157.
[7] UCHIKOSHIT, SUZUKI T S, SAKKA Y. Crystalline orientation of alumina ceramics prepared by electrophoretic deposition under a high magnetic field[J]. J Mater Sci, 2006, 41: 8074– 8078.
[8] POL V G, POL S V, JOSE M, et al. The dependence of the oriented growth of carbon filaments on the intensity of a magnetic field[J]. Carbon, 2006, 44: 1913– 1918.
[9] MAHFUZ H, ZAINUDDIN S, PARKER M R. Enhancement of strength and stiffness of epoxy-based composites using nanoparticle infusion and high magnetic fields[J]. Mater Lett, 2007, 61: 2535– 2539.
[10] MAG J, WU C W, ZHOU W L, et al. Initial study of strengthening of NiAl-Cr (Mo)-Hf alloys by strong magnetic field[J]. J Mater Res, 2005, 20(2): 295– 298.
[11] MA Y W, XU A X, LI X H, et al. Improved properties of epitaxial YNi_xMn_{1-x} O₃ films by annealing under high magnetic

- fields[J]. Appl Phys Lett, 2006, 89: 152505(1)–152505(3).
- [12] ZHANG Y D, GEY N, HE C S, et al. High temperature tempering behaviors in a structural steel under high magnetic field[J]. Acta Mater, 2004, 52: 3467–3474.
- [13] KOCH C C. Experimental evidence for magnetic or electric field effects on phase transformations[J]. Mater Sci Eng A, 2000, 287: 213–218.
- [14] 王西宁, 陈铮, 刘兵. 磁场对材料固态相变影响的研究进展[J]. 材料导报, 2000, 16(2): 25–27.
- [15] CHIO J K, OHTSUKA H, XU Y, et al. Effects of a strong magnetic field on the phase stability of plain carbon steels[J]. Scripta Mater, 2000, 43: 221–226.
- [16] JOO H D, CHIO J K, KIM S U, et al. An effect of a strong magnetic field on the phase transformation in plain carbon steels[J]. Met Mater Trans A, 2004, 35: 1663–1670.
- [17] JOO H D, KIM S U, SHIN N S, et al. An effect of high magnetic field on phase transformation in Fe-C system[J]. Mater Lett, 2000, 43: 225–229.
- [18] ZHANG Y D, ESLING C, LECOMTE J S, et al. Grain boundary characteristics and texture formation in a medium carbon steel during its austenitic decomposition in a high magnetic field[J]. Acta Mater, 2005, 53: 5213–5221.
- [19] MIYAUCHI H, FUKUDA T, KAKESHITA T. Current Advances in Materials and Processes, The 148th ISJJ Meeting: Effect of magnetic field on γ - α equilibrium temperature of pure Fe[C]. Akita: The Iron and Steel Institute of Japan, 2004.
- [20] LUDTKA G M, JARAMILLO R A, KISNER R A, et al. In situ evidence of Enhanced transformation kinetics in a medium carbon steel due to a high magnetic field[J]. Scripta Mater, 2004, 51: 171–174.
- [21] 齐民, 王岩, 王轶农, 等. 强磁场对 $\text{Fe}_{65}\text{Co}_{10}\text{Nd}_8\text{B}_{17}$ 非晶薄带晶化行为的影响[J]. 功能材料, 2005, 36(1): 35–37.
- [22] DORFMAN S, FUKS D, GORDON A, et al. Phase growth of smart materials in a magnetic field[J]. J Mater Sci Lett, 1996, 5: 2023–2025.
- [23] KUWAHARA H, TOMIOKA Y, ASAMITSU A. A first-order phase transition induced by a magnetic field[J]. Science, 1995, 270(5238): 961–963.
- [24] MARUTA K, SHIMOTOMAI M. Special issue on effect of magnetic field on phase transformations and essential physical properties of materials[J]. Mater Trans JIM, 2000, 1(8): 902–906.
- [25] SHIMOTOMAI M, MARUTA K, MINE K, et al. Formation of aligned two-phase microstructures by applying a magnetic field during the austenite to ferrite transformation in steels[J]. Acta Mater, 2003, 1: 2921–2932.
- [26] ZHANG Y, HE C S, ZHAO X, et al. New microstructural features occurring during transformation from austenite to ferrite under the kinetic influence of magnetic field in a medium carbon steel[J]. J Mag Mag Mater, 2004, 284: 287–293.
- [27] WATANABE T, OBARA K, TSUREKAWA S, et al. A mechanism of plane matching boundary-assisted α/γ phase transformation in Fe-Cr alloy based on in-situ observations[J]. Z Metallkunde, 2005, 96: 1196–1203.
- [28] HAO X J, OHTSUKA H, WADA H. Structural elongation and alignment in a Fe-0.4C alloy by isothermal ferrite transformation in high magnetic fields[J]. Mater Trans, 2003, 44(12): 2532–2536.
- [29] MOLODOV D A, SHEIKH-ALI A D. Effect of magnetic field on texture evolution in titanium[J]. Acta Mater, 2004, 52: 4377–4383.
- [30] MOLODOV D A, BOLLMANN C, GOTTSTEIN G. Impact of a magnetic field on the annealing behavior of cold rolled titanium[J]. Mater Sci Eng A, 2007, 467: 71–77.
- [31] MOLODOV D A, KONIJNENBERG P J, BOZZOLO N, et al. Magnetically affected texture and grain structure development in titanium[J]. Mater Lett, 2005, 59: 3209–3213.
- [32] SHEIKH-ALI A D, MOLODOV D A, GARMESTANI H. Magnetically induced texture development in zinc alloy sheet[J]. Scripta Mater, 2002, 46: 857–862.
- [33] MOLODOV D A, BHAUMIK S, MOLODOVA X, et al. Annealing behaviour cold rolled aluminum alloy in a high magnetic field[J]. Scripta Mater, 2006, 54: 2161–2164.
- [34] BACALUCHUK C M B, CASTELLO-BRANCO G A, EBRAHIMI M, et al. Effect of magnetic field applied during secondary annealing on texture and grain size of silicon steel[J]. Scripta Mater, 2003, 48: 1343–1347.
- [35] LI D S, GARMESTANI H, YAN S S, et al. Effects of high magnetic field annealing on texture properties of FePd[J]. J Mag Mag Mater, 2004, 281: 272–275.
- [36] MOLODOV D A, GOTTSTEIN G, HERINGHAUS F. Motion of planar grain boundaries in bismuth-bicrystals driven by a magnetic field[J]. Scripta Mater, 1997, 37(8): 1207–1213.
- [37] 冯光宏, 周少雄, 杨钢, 等. 稳恒磁场对低碳锰铌钢晶粒细化的影响[J]. 钢铁研究学报, 2000, 12(4): 27–30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(10477006)和教育部科学技术研究重点项目(106055)资助

收稿日期: 2007-12-19; 修订日期: 2008-07-09

作者简介: 任晓(1979—), 男, 博士研究生, 从事强磁场材料科学研究, 联系地址: 辽宁省大连市凌水路2号大连理工大学材料科学与工程学院(116085), E-mail: renxiaoxiao@student.dlut.edu.cn