

Fe-Nd-Al 系非晶合金条带的磁性机理

何建明, 白琴, 赵清, 徐晖, 夏爽

(上海大学微结构重点实验室, 上海 200444)

摘要: 对 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的磁性能、磁粘滞行为和微观结构进行研究, 分析了该合金条带的矫顽力机理。结果表明: Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的剩余磁化强度 M_r 分别为 33.50 和 36.05 (A m²) kg⁻¹, 矫顽力 H_c 为 62.00 和 121.50 kA/m。40 m/s 条带样品的热涨落场 H_f , 激活体积 V_a 和激活直径 D_a 分别为 2.47 mT, 3.90×10^{-18} cm³ 和 19.53 nm; 而 20 m/s 条带样品为 2.73 mT, 3.53×10^{-18} cm³ 和 18.89 nm。40 m/s 条带样品里面存在直径小于 5 nm 的纳米团簇, 而 20 m/s 条带样品的纳米团簇直径为 5~10 nm, 且纳米团簇数量更多。Fe-Nd-Al 非晶条带里面同时存在交换耦合和钉扎 2 种作用, 纳米团簇的尺寸和数量, 以及多个团簇组成的作用单元是影响非晶条带矫顽力的主要原因。

关键词: 磁粘滞行为; 交换耦合; 钉扎作用

中图分类号: TG139⁺.8; TG115.27

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)11-2878-06

自 A. Inoue 等人^[1,2]1996 年成功制备出室温下具有硬磁性的 Nd-Fe-Al 大块非晶合金以来, 该系列非晶合金良好的非晶形成能力和磁性能引起了研究者的广泛关注。通常, 非晶合金由于其具备的结构各向同性, 作为磁性材料应该表现为软磁性。然而, Nd-Fe-Al 非晶合金室温下的矫顽力可以达到 300 kA/m, 属于硬磁性材料。研究者们^[1-9]对其微观结构和磁性能已经进行了多年的研究, 但对于矫顽力机理并没有一致的认识。

目前, 对于该系列非晶合金具有较高矫顽力的原因主要有 3 种解释: 随机各向异性模型; 交换耦合模型; 强钉扎模型。

A. Inoue 等人^[3-5]在 Nd(Pr)-Fe-Al 系非晶合金中观察到 Nd(Pr)-Fe 团簇和 Nd(Pr)-Fe-Al 团簇, 这些具有各向异性的团簇对矫顽力有很大影响。R. Ortega-Zempoalteca 等人^[6]也观察到了类似的结构。穆斯堡尔谱测试也证实了 Nd(Pr)-Fe 纳米团簇的存在^[9]。

磁性颗粒间相互作用时, 不同取向的磁矩会产生交换耦合作用, 使混乱取向的磁矩趋于平行排列, 产生剩磁增强效应。H. Chiriac 等人^[10]认为非晶基体中的铁磁性团簇之间的交换耦合作用使材料内部形成了磁畴, 试样的磁滞回线越平滑说明交换耦合作用越好。R. W. McCallum 等人^[11]也得到了类似的结果, 并通过亨克曲线进行了验证。

S. J. Collocott 等人^[12]运用 P. Gaunt^[13]的强钉扎模型证实了 Nd-Fe-Al 非晶合金矫顽力与温度的关系; A. Bracchi 等人^[14]也得到了类似的结果, 认为矫顽力来源于顺磁性相、纳米晶等对畴壁移动的阻碍但钉扎作用的强弱会有所不同。

磁粘滞现象是铁磁材料的一个显著特征, 是热激活过程中铁磁材料由亚稳态转变为稳态时引起的, 也是铁磁材料被磁化时磁历史的反应^[15]。通过研究磁性材料的磁粘滞行为, 可以更好地理解磁性材料的磁性机理。在一定的时间范围内, 磁极化强度 J 随时间 t 的变化, 可以用下式来描述^[15,16]:

$$J(t) = s \ln(t) + \text{const} \quad (1)$$

式中, s 是磁粘滞系数。热涨落场 (H_f) 定义如下^[15]:

$$\Delta H = \frac{k_B}{\partial E / \partial H} T \ln(t_1) = H_f \ln(t_1) \quad (2)$$

式中, t_1 是磁极化强度, J 为某一定值时与曲线交点的时间值。

近年来, S. J. Collocott 等人^[17-20]通过观察磁粘滞行为对 Nd-Fe-Al-(Co) 和 Pr-Fe-Al 非晶合金的磁性机理进行研究, 得到了热涨落场 H_f 、激活体积 V_a 、激活直径 D_a 等磁粘滞参数, 例如 $H_f(\text{Nd}_{60}\text{Fe}_{30}\text{Al}_{10})=11.1$ mT, $H_f(\text{Nd}_{60}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}\text{Al}_{10})=9.4$ mT。

本课题组前期研究结果表明, 铜辊甩带速度在 20 m/s 以上时 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金条带基本是非晶态结

收稿日期: 2015-11-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51001066)

作者简介: 何建明, 男, 1989 年生, 硕士生, 上海大学微结构重点实验室, 上海 200444, E-mail: hejianming89@163.com

构^[21,22], 微观结构简单, 适用于矫顽力机理研究。本研究选择甩带速度为 40 和 20 m/s 的 $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 合金条带样品进行磁性能、磁粘滞行为和微观结构的观察, 研究 Fe-Nd-Al 非晶合金条带的矫顽力机理。

1 实验

用电弧炉熔炼法在高纯氩气气氛下制备名义成分为 $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 的母合金(各组元的纯度高于 99.9%)。为保证母合金成分的均匀性, 每个铸锭反复熔炼 4 次。实验所需条带样品由熔体快淬法在高纯氩气气氛保护下制成, 辊轮的线速度分别为 40 和 20 m/s。采用 D/max-2200V 型全自动 X 射线衍射仪(Cu 靶, $K\alpha$ 射线)进行物相分析; JEM-2010F/200KV 发射透射电子显微镜进行结构分析; 采用 NETZSCH DSC 404C 高温差示扫描热量仪进行热分析, 实验中加热速度为 20 K/min; 磁性能和磁粘滞行为测量在 Lake Shore 7407 型振动样品磁强计(VSM)上进行。

磁粘滞行为研究通常采用“一步法”(也叫等待时间法^[20]), 即先给样品加正向磁场 H_s (本实验为 1.8 T)至饱和, 然后磁场以一定速度下降至负矫顽力附近一个合适的值($\mu_0 H_a$)并保持不变, 测量磁极化强度 J 随时间 t 的变化。取不同的外加磁场 $\mu_0 H_a$, 可以得到一系列的 $J-t$ 曲线, 在 $J-t$ 曲线中分别取不同的磁极化强度 J 值, 得到外加磁场 $\mu_0 H_a$ 和时间 t 的关系, 通过公式(2)计算得到热涨落场 H_f 。

2 结果与讨论

2.1 相组成和显微结构

$\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 XRD 图谱如图 1 所示。可知 2 个冷却速度的条带样品均主要为非晶态结构。与 40 m/s 条带样品相比,

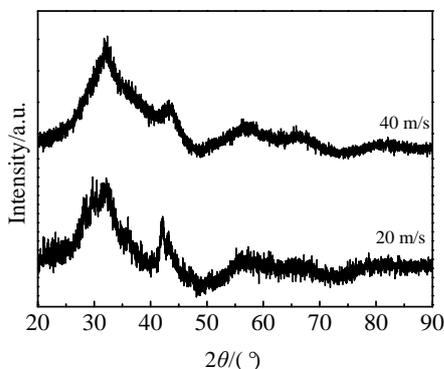


图 1 $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of the ribbons of the $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ alloy with different cooling rates

20 m/s 条带样品 XRD 图谱上有更多小的衍射峰, 表明 20 m/s 条带样品里面可能含有更多的纳米团簇。为进一步研究条带样品的微观结构, 采用 HRTEM 进行微观结构观察, 如图 2 和图 3 所示。

从图 2 可以看出, 两样品形貌均一, 没有明显的衬度, 主体为非晶相结构, 该结论与 XRD 图谱(图 1)显示的结果一致。观察图 3 可知, 两样品的非晶基体上均匀分布着纳米团簇, 40 m/s 条带样品的纳米团簇直径小于 5 nm, 而 20 m/s 条带样品的纳米团簇直径为 5~10 nm, 且纳米团簇数量更多。这些团簇会阻碍畴壁的移动, 对磁畴有钉扎作用。类似的情况在 Nd (Pr)-Fe-Al 非晶合金中也有报道, R. W. McCallum 等人^[11]在 $\text{Nd}_{60}\text{Fe}_{30-x}\text{Al}_{10+x}$ ($-2 \leq x \leq 6.5$) 条带中发现了平均直径为 1.2 nm 左右的团簇($\text{Nd}_6\text{Fe}_{13-x}\text{Al}_{1+x}$); A. Bracchi 等人^[23]在 $\text{Nd}_{60}\text{Fe}_{30}\text{Al}_{10}$ 快淬条带中观察到平均直径为 15 nm 的团簇; N. Lupu 等人^[24]通过蒙特卡洛法计算 $\text{Nd}_{90-x}\text{Fe}_x\text{Al}_{10}$ ($x=20\sim60$) 条带样品中均匀存在直径为 2~3 nm 的团簇; M. X. Pan 等人^[25]在 $\text{Nd}_{60}\text{Fe}_{20}\text{Co}_{10}\text{Al}_{10}$ 大块金属玻璃中观察到平均直径为 5 nm 的团簇。

图 4 是 $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 DSC 曲线。从中可以看出两样品在晶化前有明显的玻璃转变和过冷液相区。40 m/s 条带样品的过冷液相区宽度为 72 K, 在 823 K 附近出现放热峰,

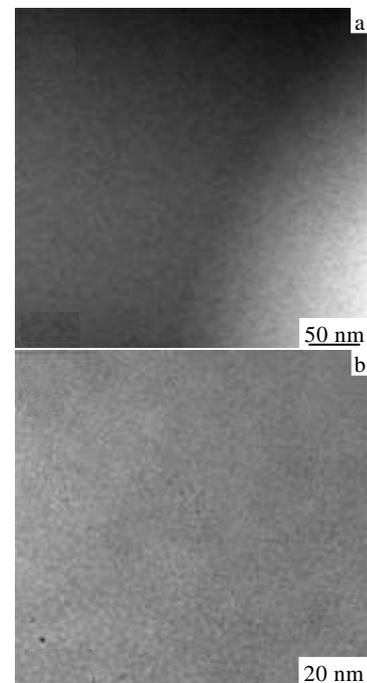


图 2 $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 HRTEM 图

Fig.2 HRTEM images of the ribbons of the $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ alloy with cooling rates of 40 m/s (a) and 20 m/s (b)

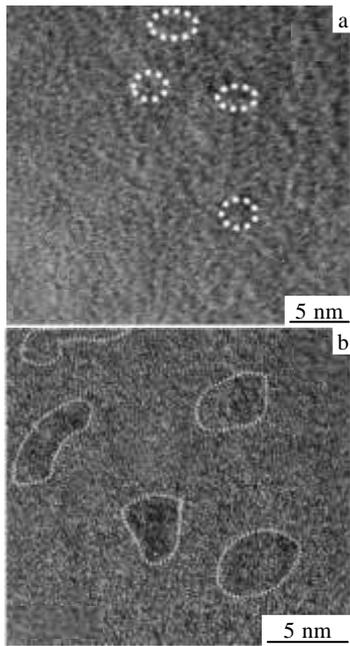


图 3 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 HRTEM 照片

Fig.3 HRTEM images of the ribbons of the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ alloy with cooling rates of 40 m/s (a) and 20 m/s (b)

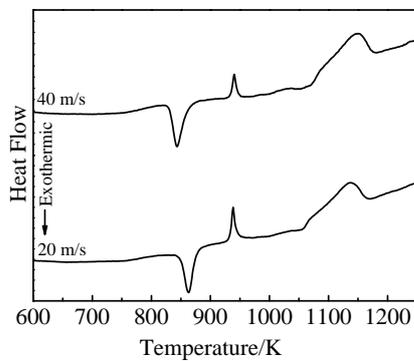


图 4 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的 DSC 曲线

Fig.4 DSC curves of the ribbons of the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ alloy with different cooling rates

放热焓为 12.37 J/g; 20 m/s 条带样品的过冷液相区宽度为 81 K, 放热峰温度为 840 K, 放热焓为 11.87 J/g, 表明两条带样品有良好的非晶形成能力, 且 40 m/s 条带样品里面含有更多的非晶相。该结果与 XRD 和 HRTEM 关于相组成和微观结构得到的结论一致。

2.2 磁性能和磁粘滞测试

图 5 是 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的磁滞回线, 图中的磁滞回线平滑, 说明交

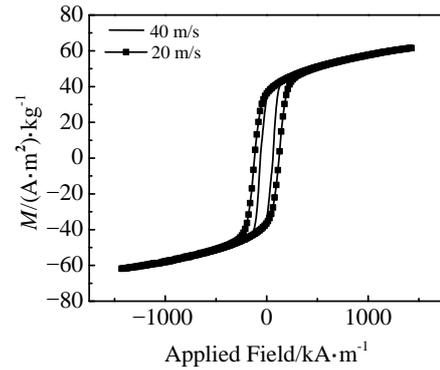


图 5 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的磁滞回线

Fig.5 Hysteresis loops for the ribbons of the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ alloy with different cooling rates

换耦合作用较好。两样品在室温下均表现为硬磁性, 且最大外加磁场下的磁化强度 M 很接近, 而两者的矫顽力相差较大, 40 和 20 m/s 条带样品的矫顽力 iH_c 分别为 62.00 和 121.50 kA/m。

40 和 20 m/s 条带样品的不可逆磁化率曲线如图 6 所示, 两者的不可逆磁化率曲线在各自的矫顽力附近都出现了单峰, 说明两样品均为单磁性相; 且 20 m/s 条带样品的峰更尖锐, 说明其磁性相(团簇)尺寸更大^[16,26]。与 HRTEM 观察到的纳米团簇尺寸结论一致。

“一步法”测得 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的磁极化强度 J 随时间 $\ln t$ 的变化, 如图 7 和图 8。图 7 中的外加磁场 $\mu_0 H_a$ (从上到下) 分别为 -38, -40, -44, -46, -47 mT; 图 8 中的外加磁场 $\mu_0 H_a$ (从上到下) 分别为 -75, -77, -79, -81, -83 mT。在图 7 和图 8 中分别取不同磁极化强度 (J)

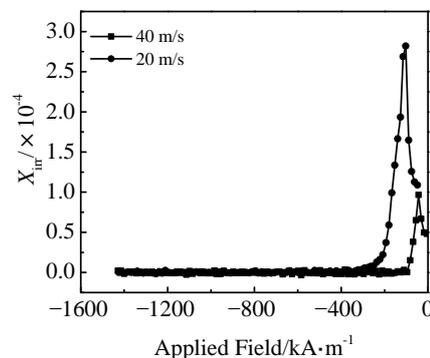


图 6 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的不可逆磁化率曲线

Fig.6 Irreversible magnetic susceptibility curves for the ribbons of Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ alloy with different cooling rates

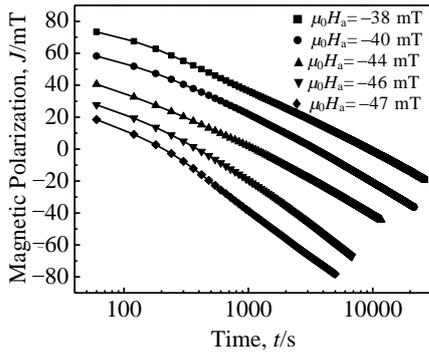


图 7 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 m/s 条带, 在一定外加磁场(μ_0H_a)下, 磁极化强度(J)随时间(t)的变化关系

Fig.7 Experimental results for the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ amorphous alloy with the cooling rate of 40 m/s, showing the decay of the magnetic polarization (J) as a function of time (t) (note the logarithmic time dependence)

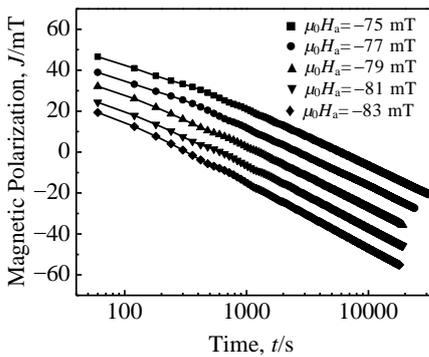


图 8 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 20 m/s 条带, 在一定外加磁场(μ_0H_a)下, 磁极化强度(J)随时间(t)的变化关系

Fig.8 Experimental results for the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ amorphous alloy with the cooling rate of 20 m/s, showing the decay of the magnetic polarization (J), as a function of time (t) (note the logarithmic time dependence)

值与各曲线的交点, 将对应交点的外加磁场 μ_0H_a 与时间 $\ln(t_i)$ 做线性拟合, 如图 9 和图 10。

根据公式 (2), 直线的斜率即为热涨落场 H_f , 通过计算可知 40 和 20 m/s 条带样品的热涨落 H_f 分别为 2.47 和 2.73 mT, 2 条带样品的热涨落 H_f 很接近。说明合金甩带速度在 20 m/s 以上时, 冷却速度对 Fe₅₃-Nd₃₇Al₁₀ 非晶条带的热涨落场 H_f 影响很小。Fe₅₃Nd₃₇-Al₁₀ 条带样品的热涨落场 H_f 小于其他稀土基非晶合金的(Nd₅₁Pr₉Fe₃₀Al₁₀ 大块非晶合金的热涨落场 H_f 为 10.4 mT^[16], Pr₅₈Fe₂₄Al₁₈ 大块非晶合金的热涨落场 H_f 为 5.9 mT^[17], Nd₆₀Fe₂₀Co₁₀Al₁₀ 大块非晶合金的热涨落场 H_f

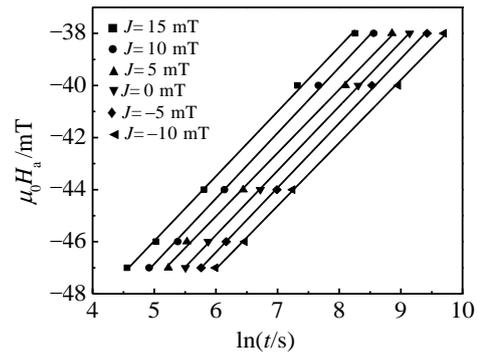


图 9 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 40 m/s 条带, 外加磁场 (μ_0H_a) 与时间对数 $\ln(t_i)$ 拟合的直线 (图中直线的斜率即热涨落场(H_f), 为 2.47 mT)

Fig.9 μ_0H_a and $\ln(t_i)$ determined from the intersections of lines from the experimental curves in Fig.7 for the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ amorphous alloy with the cooling rate of 40 m/s. The average slope of the lines is 2.47 mT, which is the fluctuation field (H_f)

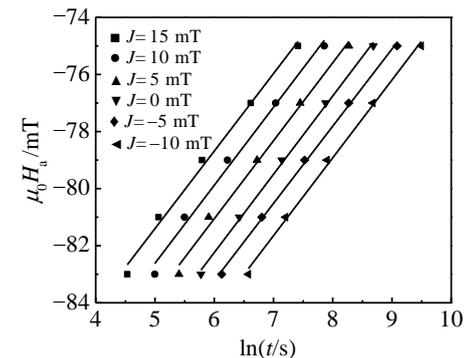


图 10 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 合金甩带速度为 20 m/s 条带, 外加磁场 (μ_0H_a) 对时间对数 $\ln(t_i)$ 拟合的直线 (图中直线的斜率即热涨落场 (H_f), 为 2.73 mT)

Fig.10 μ_0H_a and $\ln(t_i)$ determined from the intersections of lines for the Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ amorphous alloy with the cooling rate of 20 m/s. The average slope of the lines is 2.73 mT, which is the fluctuation field (H_f)

为 9.4 mT^[18], NdFeB 条带的热涨落场 H_f 为 8.0 mT^[27], 表明 Fe₅₃Nd₃₇Al₁₀ 非晶条带比其他稀土基非晶合金具有更好的稳定性。

微观结构影响材料的磁性能, 其中激活体积 V_a 可看作热激活过程中磁畴在 2 个钉扎中心翻转时畴壁移动的体积^[15,16]:

$$V_a = \frac{k_B}{H_f M_s} T \tag{3}$$

式中, k_B 是玻尔兹曼常数, T 是开尔文温度, M_s 是饱和磁化强度。根据公式 (3) 可得到激活体积 V_a , 如果把团簇当作球型, 可算得激活直径 D_a (见表 1)。

从表 1 可以看出 $Fe_{53}Nd_{37}Al_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的剩余磁化强度 M_r 接近; 而两者的矫顽力 iH_c 相差较大。40 和 20 m/s 条带样品的激活直径 D_a 分别为 19.53 和 18.89 nm, 相当于多个团簇之间的距离。本课题组前期研究结果^[22]已用实验手段证明 $Fe_{53}Nd_{37}Al_{10}$ 非晶条带里面同时存在交换耦合和钉扎 2 种作用, 但不同甩带速度条带里面的交换耦合和钉扎作用各自对矫顽力的贡献有所不同。在前期研究工作的基础上, 探讨了交换耦合和钉扎作用对条带样品矫顽力共同作用的途径和方法, 与磁粘滞测试结果结合起来分析可以发现, 纳米团簇不是单独作用的, 可能是邻近的多个团簇组成一个作用单元再与其他单元相互作用, 从而影响非晶条带的矫顽力^[28]。20 m/s 条带比 40 m/s 条带含有更多的团簇, 从而作用单元更多, 使得矫顽力较大。 $Fe-Nd-Al$ 非晶条带里面同时存在交换耦合和钉扎 2 种作用, 纳米团簇的尺寸和数量, 以及多个团簇组成的作用单元是影响非晶条带矫顽力的主要原因^[22]。

表 1 $Fe_{53}Nd_{37}Al_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的矫顽力(iH_c)、剩磁 (M_r)、热涨落场 (H_f)、激活体积 (V_a)、激活直径 (D_a)

Table 1 Coercivity (iH_c), remanent magnetization (M_r), fluctuation field (H_f), activation volume (V_a) and activation diameter (D_a) for the $Fe_{53}Nd_{37}Al_{10}$ alloy with different cooling rates

Cooling rate/m s ⁻¹	iH_c /kA m ⁻¹	M_r /(A m ²) kg ⁻¹	H_f /mT	V_a /×10 ⁻¹⁸ cm ³	D_a /nm
40	62.00	33.50	2.47	3.90	19.53
20	121.50	36.05	2.73	3.53	18.89

3 结 论

1) $Fe_{53}Nd_{37}Al_{10}$ 合金甩带速度为 40 和 20 m/s 条带样品的剩余磁化强度 M_r 分别为 33.50 和 36.05 (A m²)/kg, 相差不大; 而矫顽力 iH_c 差别较大, 分别为 62.00 和 121.50 kA/m。

2) 40 m/s 条带的热涨落场 H_f , 激活体积 V_a 和激活直径为 D_a 分别为 2.47 mT, 3.90×10^{-18} cm³ 和 19.53 nm; 而 20 m/s 条带的分别为 2.73 mT, 3.53×10^{-18} cm³ 和 18.89 nm。由磁粘滞研究得到的磁粘滞参数变化不大。

3) 40 和 20 m/s 条带的非晶基体上均匀分布着纳米团簇。40 m/s 条带里面的纳米团簇直径小于 5 nm, 而 20 m/s 条带里面的纳米团簇直径为 5~10 nm, 且纳

米团簇数量更多。 $Fe-Nd-Al$ 非晶条带里面同时存在交换耦合和钉扎 2 种作用, 纳米团簇的尺寸和数量, 以及多个团簇组成的作用单元是影响非晶条带矫顽力的主要原因。

参考文献 References

[1] Inoue A, Zhang T, Zhang W *et al. Mater Trans JIM*[J], 1996, 37(2): 99

[2] Inoue A, Zhang T, Takeuchi A *et al. Mater Trans JIM*[J], 1996, 37(4): 636

[3] Inoue A, Takeuchi A, Zhang T. *Metall Mater Trans A*[J], 1998, 29: 1779

[4] Li J C M E ed. *Microstructure and Properties of Materials*[M]. Tokyo: World Scientific Publishing Company C/O Science Press, 2000: 351

[5] Inoue A, Zhang T, Takeuchi A. *IEEE Trans Magn*[J], 1997, 33(5): 3814

[6] Ortega-Zempoalteca R, Valenzuela R, Betancourt I. *Phys Status Solidi*[J], 2011, 8(11-12): 3062

[7] Kramer M J, O'Connor A S, Dennis K W *et al. IEEE Trans Magn*[J], 2001, 37(41): 2497

[8] Schneider S, Bracchi A, Samwer K *et al. Appl Phys*[J], 2002, 80(10): 1749

[9] Chiriac H, Lupu N, Rao K V *et al. IEEE Transactions on Magnetics*[J], 2001, 37(41): 2509

[10] Chiriac H, Marinescu M, Tiberto P *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2001, 304-306: 957

[11] McCallum R W, Lewis L H, Kramer M J *et al. J Magn Magn Mater*[J], 2006, 299(2): 265

[12] Collocott S J. *J Magn Magn Mater*[J], 2010, 322(16): 2281

[13] Gaunt P. *Philos Mag B*[J], 1983, 48(3): 261

[14] Bracchi A, Schneider S, Thiyagarajan P *et al. J Magn Magn Mater*[J], 2004, S272-276(2): 1423

[15] Street R, Brown S D. *J Appl Phys*[J], 1994, 76(10): 6386

[16] Fan Haipin(范海平), Xu Hui(徐 晖), Tan Xiaohua(谭晓华) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(7): 1251

[17] Collocott S J, Dunlop J B. *J Magn Magn Mater*[J], 2009, 321(19): 3293

[18] Collocott S J, Dunlop J B. *J Phys Conf Ser*[J], 2009, 144: 012 059

[19] Collocott S J, Dunlop J B. *Phys Rev B*[J], 2002, 66: 224 420

[20] Collocott S J. *J Appl Phys*[J], 2010, 107(9): 09A 720

[21] Bai Q, Xu H, Tan X H *et al. J Alloy Compd*[J], 2009, 473: 11

[22] Bai Q, Wang J, Hao Y F *et al. Phys B*[J], 2014, 438: 131

- [23] Bracchi A, Samwer K, Niermann T *et al. Appl Phys Lett*[J], 2004, 116(10): 343
- [24] Lupu N, McGreevy R L, Chiriac H *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2004, 375-377: 1105
- [25] Pan M X, Wang B C, Xai L *et a. Intermetallics*[J], 2002, 10(11-12): 1215
- [26] Billoni O V, Villafuerte M, Urreta S *et al. Phys B*[J], 2002, 320: 288
- [27] Ferguson G B, O'Grady K, Popplewell J *et al. J Appl Phys*[J], 1991, 69(8): 5495
- [28] Tan X H, Xu H, Man H *et al. J Appl Phys*[J], 2011, 109(8): 083 9271

Mechanism of the Magnetic Behavior in Fe-Nd-Al Amorphous Alloy Ribbons

He Jianming, Bai Qin, Zhao Qing, Xu Hui, Xia Shuang

(Laboratory for Microstructures, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Ribbons of the $\text{Fe}_{53}\text{Nd}_{37}\text{Al}_{10}$ alloy with different cooling rates, 40 and 20 m/s, were prepared by a melt spinning method. The magnetic behavior, magnetic viscosity behavior and microstructure of the ribbons were investigated. The remanent magnetization M_r of the ribbons with the cooling rate of 40 and 20 m/s is 33.50 and 36.05 ($\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$), and the coercivity iH_c is 62.00 and 121.50 kA/m, respectively. The fluctuation field H_f , activation volume V_a and activation diameter D_a of the ribbons with the cooling rate of 40 m/s are 2.47 mT, $3.90\times 10^{-18}\text{cm}^3$ and 19.53 nm, respectively. The H_f , V_a , and D_a of the ribbons with the cooling rate of 20 m/s are 2.73 mT, $3.53\times 10^{-18}\text{cm}^3$ and 18.89 nm, respectively. The size of nanoclusters in the ribbons with the cooling rate of 40 m/s is less than 5 nm. However, the size of nanoclusters in the ribbons with the cooling rate of 20 m/s is 5~10 nm and there are more nanoclusters in the ribbons. The hard magnetic property of the ribbons melt-spun at 40 and 20 m/s would be due to the exchange coupling interactions and pinning effect. The main influencing factors of the coercivity of Fe-Nd-Al amorphous alloy ribbons are the size and amount of nanoclusters and the interactive units composed of many nanoclusters.

Key words: magnetic viscosity behavior; exchange coupling interactions; pinning effect

Corresponding author: Bai Qin, Ph. D., Associate Professor, Laboratory for Microstructures, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China, Tel: 0086-21-66135030, E-mail: baiqin31@shu.edu.cn