

Tb-Al-Cu/Nd 复合扩散源对烧结钕铁硼磁性能的影响

刘宏雄, 王志恒, 刘延丰, 曹 俊, 刘乔波, 黄 强, 杨金金, 陈奕欣

(江西铜业技术研究院有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 晶界扩散技术可以通过调控重稀土元素分布, 显著提升钕铁硼磁体的矫顽力, 是突破传统单合金法低成本、高剩磁损耗瓶颈的关键手段。本文提出以重稀土合金 Tb-Al-Cu 与纯钕粉按不同比例混合形成复合扩散源, 系统研究了其对无重稀土基材与含重稀土基材的扩散效果。实验结果表明, 在最佳比例扩散源下, 两类基材最高矫顽力分别提升 1.036 T 与 0.959 T, 剩磁衰减量分别控制在 0.59 kGs 与 0.43 kGs 以内。当 Tb-Al-Cu 与纯钕粉质量比为 3:2 (无重稀土基材) 和 2:3 (含重稀土基材) 时, 磁体综合性能最优, 分别达到 48UH 与 45EH 牌号水平。微观分析表明, 无重稀土基材扩散后晶界相增多并形成核壳结构, 而含重稀土基材扩散后非磁晶界相明显增多。本研究通过复合扩散源设计, 实现了低重稀土用量下磁性能的显著提升, 为高性能钕铁硼的绿色制备与资源高效利用提供了新策略。

关键词: 烧结钕铁硼; 晶界扩散; 复合扩散源; 低重稀土; 磁性能

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.008

中图分类号: TM273 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0090-07

烧结钕铁硼永磁材料因其卓越的磁性能, 已成为新能源汽车驱动电机、风力发电机、工业机器人等高端装备的核心材料^[1]。随着“双碳”目标的推进, 全球永磁材料的需求量逐年增加, 但其高温工况下矫顽力不足的缺陷, 长期限制着其在极端环境中的应用。传统单合金工艺需在主相中直接掺杂重稀土 (Dy, Tb) 以提升矫顽力, 导致重稀土消耗量高达 1%~5%, 不仅显著增加成本, 还会因重稀土进入主相晶粒而降低剩磁性能^[2-4]。晶界扩散技术的出现突破了这一瓶颈, 其通过表面沉积重稀土并结合真空热处理, 使重稀土沿晶界选择性扩散至磁体内部, 形成高矫顽力壳层结构, 在仅需少量重稀土的情况下, 矫顽力可提升 0.5~1.1 T, 且剩磁损失较小^[5-10]。晶界扩散技术兼顾了高磁能积与高矫顽力, 成为当前高性能钕铁硼制备的主流技术。

近年来, 晶界扩散技术在工艺创新与扩散源设计上取得显著进展。在工艺方面, 磁控溅射、蒸镀、丝网印刷、喷涂扩散^[11-15]等多样化方法已实现规模化应用。在扩散源设计上, 初期研究集中于单一重稀土化合物 (如 DyF₃, TbH₂) 的扩散行为^[16-17], 但其表面堆积严重、渗透深度受限。随后单一重稀土扩散源逐渐向合金化、复合化发展^[18-19], 例如, Tb-Cu 合金通过降低熔点 (从纯 Tb 的 1356 °C 降至 900 °C 以

下), 使重稀土用量减少 60%~70%, 同时矫顽力提升幅度达 0.8~1.2 T^[20]。重稀土合金扩散源因其成分可调控性强、资源利用率高等优势, 在行业内得到了广泛应用^[21]。复合扩散源 (如 Pr-Al/DyF₃) 可利用轻稀土与重稀土的协同效应, 在优化晶界结构的同时抑制主相 Nd 元素缺失, 使磁体综合性能进一步提升^[22]。

本文提出以重稀土化合物 Tb-Al-Cu (TAC) 和纯钕粉混合作为复合扩散源的设计策略, 并研究了改变 TAC 和纯钕粉的混合比例对无重稀土基材与含 Tb 基材的晶界扩散改性效果。结果表明, 随着 TAC 占比的增多, 两种磁体的矫顽力均得到显著提升, 而剩磁衰减较弱。本实验选取两类样品中综合性能最佳的磁体进行了微观结构和元素分布研究, 对比发现扩散样品与基材相比晶界相增多, 其中无重稀土基材经扩散后形成了明显的核壳结构。本研究为高磁性能钕铁硼的低成本制备提供了新思路, 同时为重稀土资源的高效利用开辟了可行路径。

1 实 验

1.1 样品制备

采用感应熔炼法分别制备了两种基材和 TAC 速凝片。其中: 无重稀土基材名义成分为 (PrNd)_{30.3}M_{4.8}B_{0.96}Fe_{bal}, M=Cu, Al, Ga, Co, Ti, 记为无 Tb 基材;

收稿日期: 2025-04-09; 修订日期: 2025-09-12

基金项目: 国家重点研发专项 (2023YFB3507501); 赣鄱俊才支持计划项目 (20232BCJ23056) 资助

作者简介: 刘宏雄 (1997—), 男, 甘肃天水人, 博士, 工程师, 研究方向: 稀土永磁, E-mail: 13621357626@163.com

含重稀土基材名义成分为 $(\text{PrNd})_{28.5}\text{Tb}_2\text{M}_{2.3}\text{B}_{0.92}\text{Fe}_{\text{bal}}$, $\text{M}=\text{Cu}, \text{Al}, \text{Ga}, \text{Co}, \text{Ti}$, 记为含Tb基材。将熔炼得到的两种基材和TAC速凝薄片依次进行氢破、气流磨后得到磁粉和TAC粉末。其中, 在TAC的气流磨过程中将电机转速提高, 以得到更小粒径的扩散源粉末。经磁场成型、冷等静压和真空烧结工序后, 得到两种基材的烧结态磁体。将磁体切割成直径为10 mm, 厚度为3.5 mm的薄片, 用砂纸打磨, 随后用酒精超声清洗, 得到表面光洁的待扩散磁体薄片。

本实验采用喷涂法进行扩散。先将TAC和纯钕粉末按不同比例混合得到5种扩散源粉末各5 g: TAC:Nd粉=1:4, TAC:Nd粉=2:3, TAC:Nd粉=3:2, TAC:Nd粉=4:1和纯TAC粉, 以上分别记为T1, T2, T3, T4, T5。然后将扩散源粉末和商用扩散剂按照质量比1:1混合得到扩散浆料, 采用高压喷枪将扩散浆料均匀喷涂在两种基材上下表面。随后将样品放入120 °C烘箱烘烤3 min后进行称重。最后将喷涂得到的薄片样品和两种基材放入真空管式烧结炉中进行热处理: 先在炉体真空度为 $(5 \times 10^{-3}) \sim$

$(5 \times 10^{-4})\text{Pa}$ 、温度为840~940 °C的条件下扩散数小时, 然后速冷, 随后进行 $(480 \sim 540 \text{ °C}) \times (2 \sim 4 \text{ h})$ 二级回火, 得到回火态基材和晶界扩散磁体。

1.2 测试与表征

利用NIM-6500C超高温永磁测量系统测量20 °C时扩散前后样品的磁性能, 用X射线衍射仪(XRD)测试样品的物相组成和晶体结构, 用场发射扫描电子显微镜(SEM)观察扩散前后样品的微观组织结构图, 同时利用能量色散X射线谱仪(EDS)分析样品元素种类及分布。

2 结果与讨论

2.1 磁性能

无Tb基材及其扩散样品的退磁曲线如图1(a)所示, 从图1(a)中得到样品的剩磁 B_r 、内禀矫顽力 H_{cj} 和最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 数据并绘制于图1(b)。对于无Tb基材, 随着扩散源中Tb含量的增加, 样品内禀矫顽力逐渐增大, 但并非线性增加。当扩散源成分为T1和T2时, 内禀矫顽力有明显增加; 当扩散源

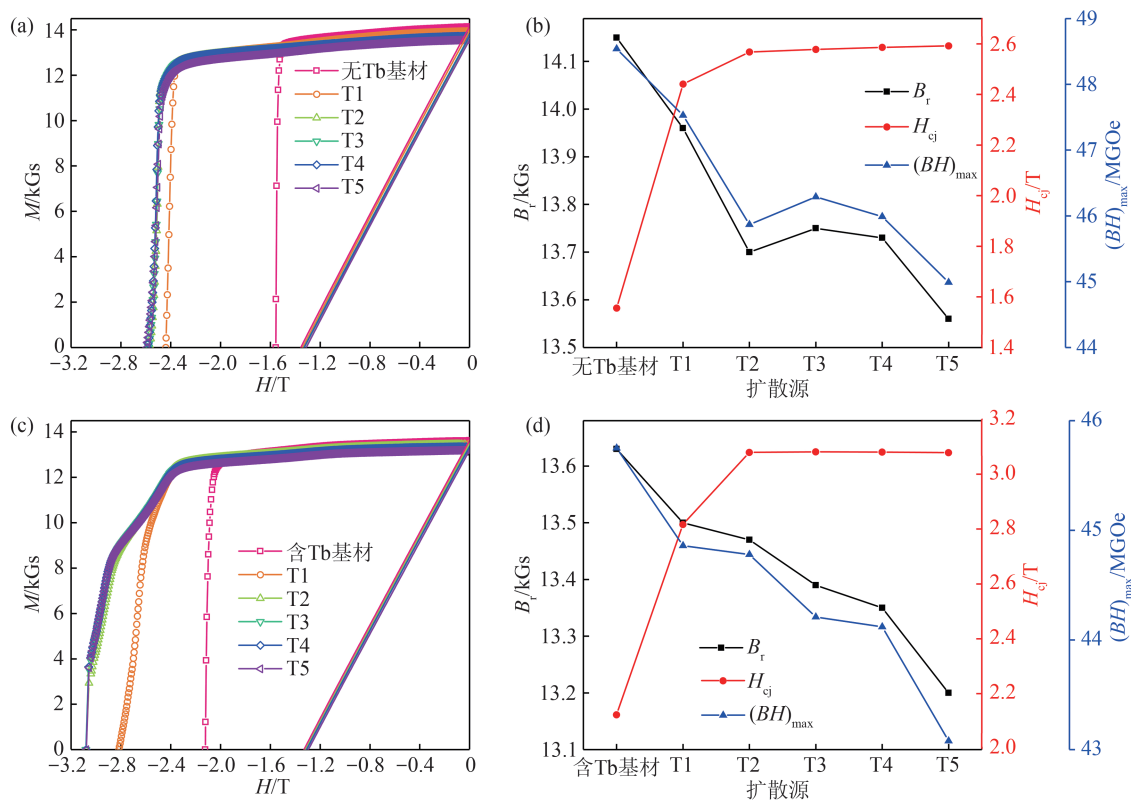


图1 (a) 无Tb基材扩散前后退磁曲线和(b)各项磁性能; (c) 含Tb基材扩散前后退磁曲线和(d)各项磁性能

Fig. 1 (a) Demagnetization curves before and after diffusion and (b) various magnetic properties of Tb-free substrate; (c) Demagnetization curves before and after diffusion and (d) various magnetic properties of Tb-containing substrate

中 Tb 含量继续增加时(T3, T4, T5), 矫顽力仅缓慢增长。在扩散过程中, 重稀土 Tb 沿晶界逐渐进入主相晶粒, 代替 Pr 和 Nd 元素形成具有高矫顽力的 Tb₂Fe₁₄B 硬磁相壳层^[8, 23], 样品矫顽力快速增大。剩磁和最大磁能积变化基本相同, 随着扩散源中 Tb 含量的逐渐增加, 剩磁呈下降趋势, 但当扩散源成分为 T1 和 T2 时, 下降明显, 增加扩散源中 Tb 含量(T3, T4), 剩磁下降变缓, 甚至在 T3 时略有回升, 进一步增加 Tb 含量, 剩磁又加速衰减。扩散前后磁性能具体数值如表 1 所示。扩散后, 剩磁最大衰减量为 0.59 kGs, 此时矫顽力增量也达到最大, 为 1.036 T。综合分析 3 种磁性能指标发现, 当扩散源为 T3 时, 扩散样品综合性能最佳, 达到 48UH 牌号水平。

含 Tb 基材及其扩散样品的退磁曲线如图 1(c) 所示。从图 1(c) 中得到样品的 B_r , H_{cj} 和 $(BH)_{max}$ 数据并绘制于图 1(d) 中。对于含 Tb 基材, 随着扩散源中 Tb 含量的增加, 内禀矫顽力先增加, 然后基本保持不变。当扩散源成分为 T1 和 T2 时, 矫顽力有明显增加; 当扩散源中 Tb 含量继续增加时(T3, T4, T5), 矫顽力基本保持不变。剩磁和最大磁能积变化基本相同, 随着扩散源中 Tb 含量的逐渐增加, 剩磁呈下降趋势。扩散前后磁性能具体数值如表 2 所示。扩散后, 剩磁最大衰减量为 0.43 kGs(T5 扩散),

矫顽力最大增量为 0.959 T, 矫顽力提升效果略低于无 Tb 基材的扩散样品。综合分析 3 种磁性能指标发现, 当扩散源为 T2 时, 扩散样品综合性能最佳, 达到 45EH 牌号水平。

由上述两类实验结果可知, 对于无 Tb 基材和含 Tb 基材, TAC 和纯钕粉混合的扩散源均能在剩磁衰减较少的情况下大幅提升基材矫顽力。矫顽力提升与扩散源中重稀土 Tb 的增加并非线性变化, 故选取合适的 TAC 和纯钕粉比例可达到扩散最佳性能, 以此进一步减少 Tb 的用量, 实现低重稀土含量超高性能磁体的制备。为了进一步研究扩散前后样品晶体结构和微观组织形貌, 探究矫顽力增长的原因, 分别选取两类实验中性能最佳的样品(无 Tb 基材 T3 扩散样品和含 Tb 基材 T2 扩散样品)及其对应基材进行晶体结构和微观组织表征。

2.2 结构分析

无 Tb 基材和 T3 扩散后样品 XRD 图谱如图 2(a) 所示, 将 35°~50°数据放大后绘制于图 2(b)。当 Tb 元素替代 Nd₂Fe₁₄B 中 Nd 元素位置时, 由于镧系收缩会使晶胞参数减小^[1, 22], 对比两样品(006)衍射峰, 发现并未出现明显的偏移, 说明扩散前后样品晶胞参数并未出现明显变化, 表明此处 Tb 元素仅进行了少量替代, 并未大量进入主相晶粒内部。XRD 图谱

表 1 无 Tb 基材扩散前后磁性能及其变化量

Table 1 Magnetic properties of Tb-free substrate before and after diffusion						
样品	Tb 名义增量 /%	B_r /kGs	ΔB_r /kGs	H_{cj} /T	ΔH_{cj} /T	$(BH)_{max}$ /MGOe
无 Tb 基材	0.0	14.15		1.556		48.54
T1 扩散	0.3	13.96	-0.19	2.441	0.885	47.53
T2 扩散	0.6	13.70	-0.45	2.568	1.012	45.87
T3 扩散	0.9	13.75	-0.40	2.578	1.022	46.29
T4 扩散	1.2	13.73	-0.42	2.586	1.030	45.99
T5 扩散	1.5	13.56	-0.59	2.592	1.036	44.99

表 2 含 Tb 基材扩散前后磁性能及其变化量

Table 2 Magnetic properties of Tb-containing substrate before and after diffusion						
样品	Tb 名义增量 /%	B_r /kGs	ΔB_r /kGs	H_{cj} /T	ΔH_{cj} /T	$(BH)_{max}$ /MGOe
含 Tb 基材	0.0	13.63		2.123		45.75
T1 扩散	0.3	13.50	-0.13	2.817	0.694	44.86
T2 扩散	0.6	13.47	-0.16	3.080	0.957	44.78
T3 扩散	0.9	13.39	-0.24	3.082	0.959	44.21
T4 扩散	1.2	13.35	-0.28	3.081	0.958	44.12
T5 扩散	1.5	13.20	-0.43	3.079	0.956	43.08

中(006)和(105)衍射峰的强度之比[记为 $I_{(006)}/I_{(105)}$]可以定性判断样品晶粒沿晶体学 c 轴的取向度^[22],在无Tb基材中, $I_{(006)}/I_{(105)}=0.99$,T3扩散后样品 $I_{(006)}/I_{(105)}=1.04$,表明扩散后样品沿 c 轴的取向度较基材有很大提升。与基材相比,扩散后样品衍射峰明显变宽,根据谢乐公式可定性判断出扩散后晶粒尺寸变小。取向度的增加和晶粒细化是提升磁材综合磁性能的重要因素,前者可以提升样品的剩磁和矫顽力,后者有助于矫顽力的增长。

含Tb基材和T2扩散后样品XRD图谱如图2(c)所示,将 $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 数据放大后绘制于图2(d)。对比两样品(006)衍射峰,同样未出现明显的偏移,说明扩散前后样品晶胞参数并未出现明显变化。在含Tb基材中, $I_{(006)}/I_{(105)}=1.04$,T2扩散后样品 $I_{(006)}/I_{(105)}=1.04$,表明扩散前后样品沿 c 轴的取向度无明显变化。衍射峰宽度在扩散前后同样也无明显改变。说明对于含Tb基材,重稀土Tb扩散后样品的主相晶粒并未出现明显改变,这与无Tb基材的扩散表现出一定的差异性。

2.3 形貌及元素分布

图3(a, d)分别为无Tb基材、无Tb基材-T3扩散、含Tb基材和含Tb基材-T2扩散样品的SEM图像。对比图3(a)和图3(b)发现:扩散前基材中晶界相(白色区域)较少,主相晶粒(深灰色区域)相互接触,去磁耦合作用弱,故矫顽力较小;扩散后,非磁晶界相明显增多,起到很好的去磁耦合作用;主相晶粒无明显棱角;在主相晶粒周围,存在浅灰色壳层,该区域为典型的核壳结构,这是Tb元素通过晶界扩散至晶粒的外层,形成 $(\text{Nd}, \text{Tb})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 壳层,由于和晶粒内部的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 成分有所不同,在SEM图像中表现为明暗灰度的不同。由电镜照片分析可知,扩散后矫顽力大幅提升的主要原因是:晶界相增多,晶粒形状更加规则,形成了核壳结构。由图3(c, d)可见,对于含Tb基材及其扩散样品,晶界相明显增多,但晶粒尺寸并未明显改变,与XRD结论一致,未观察到明显的核壳结构。

为了进一步探究扩散后重稀土元素Tb在样品中

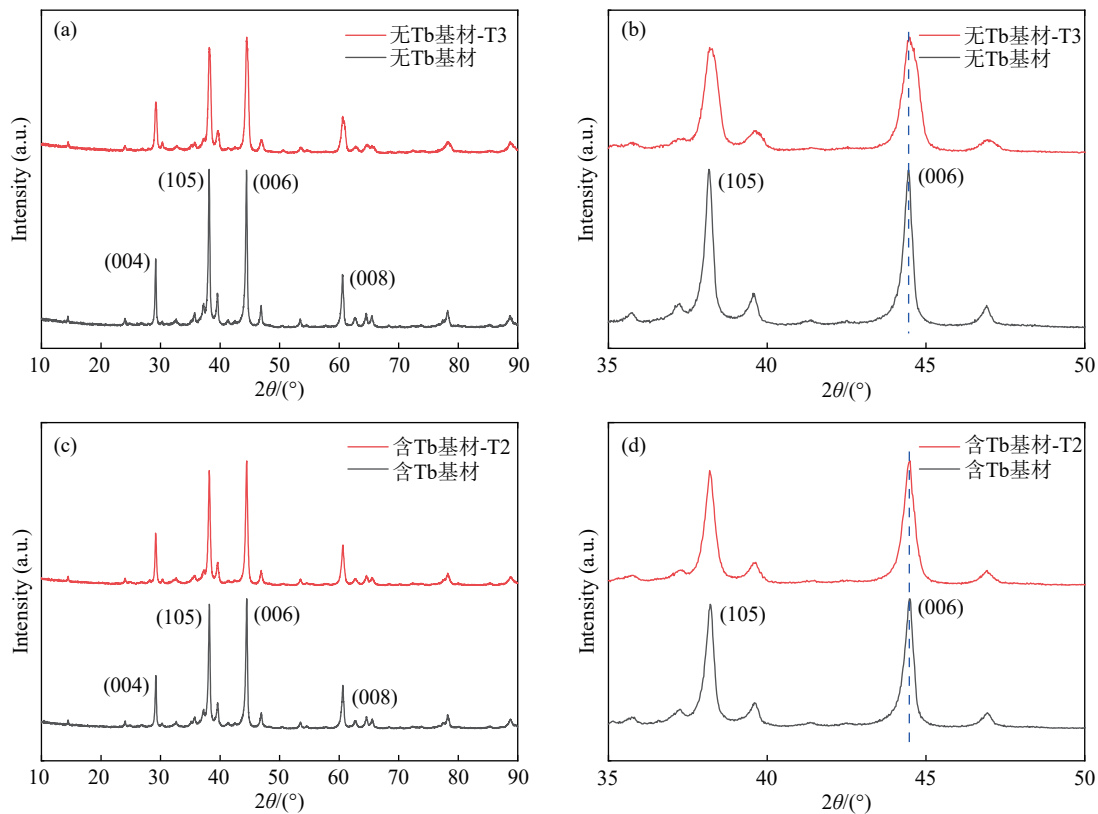


图2 (a)无Tb基材及T3扩散后XRD图和(b) $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 放大图;(c)含Tb基材及T2扩散后XRD和(d) $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 放大图
Fig. 2 (a)XRD patterns and (b)enlarged views of $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ of Tb-free substrate and T3-diffused sample; (c)XRD patterns and (d)enlarged views of $35^{\circ}\sim 50^{\circ}$ of Tb-containing substrate and T2-diffused sample

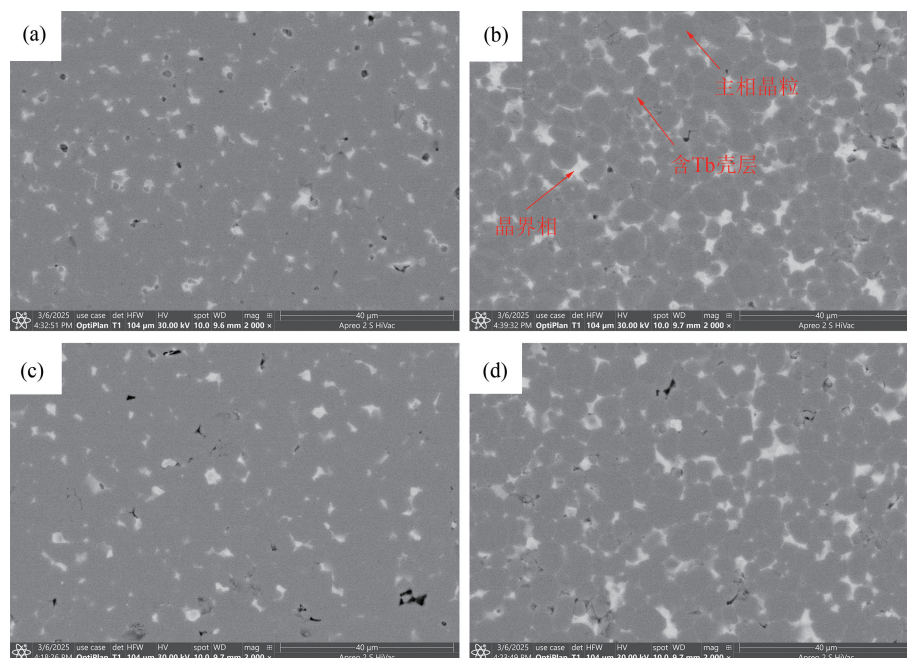


图3 (a)无Tb基材和(b)无Tb基材-T3扩散后SEM图;(c)含Tb基材和(d)含Tb基材-T2扩散后SEM图

Fig. 3 (a) SEM images of Tb-free substrate and (b) Tb-free substrate after T3 diffusion; (c) SEM images of Tb-containing substrate and (d) Tb-containing substrate after T2 diffusion

的分布情况,利用EDS对无Tb基材-T3扩散、含Tb基材和含Tb基材-T2扩散样品进行元素面分布扫描,结果分别如图4(a1~a4)、图4(b1~b4)和图4(c1~c4)所示。可以看出,图4(a1)中存在明显的核壳结构,

重稀土扩散产生的壳层如图中紫色虚线所示,由元素面扫描结果可知,部分Pr, Nd元素分布在晶界相中形成非磁富稀土相,起到磁隔绝作用。扩散后,重稀土Tb元素主要分布在主相晶粒的壳层结

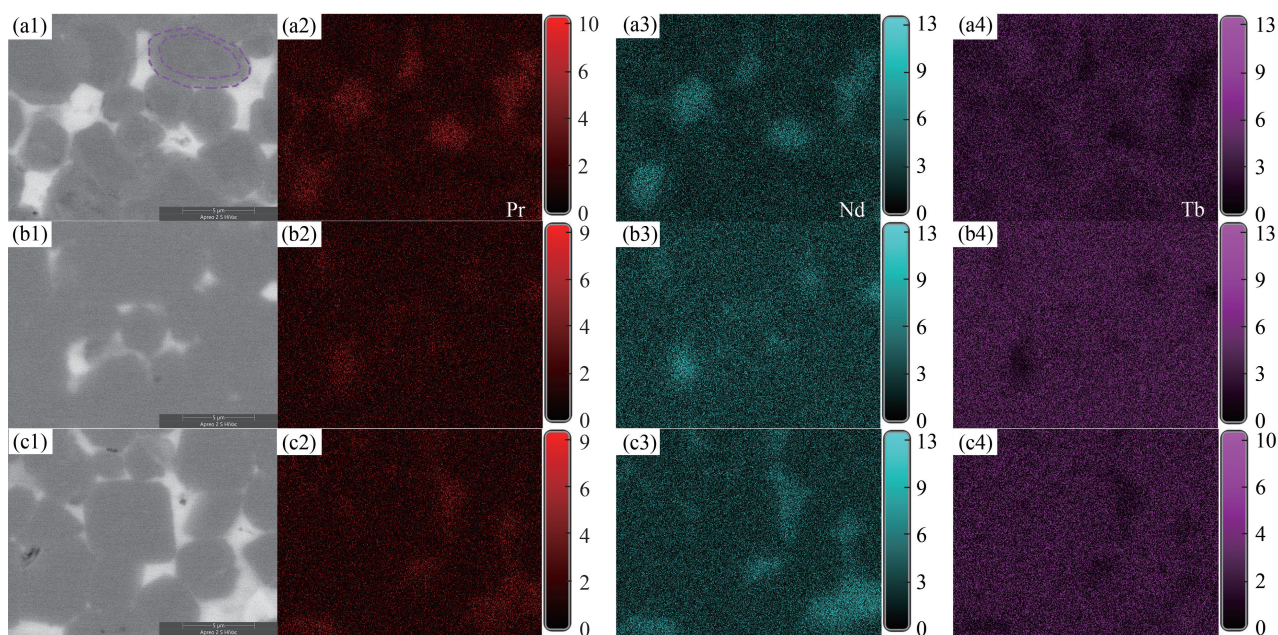


图4 (a1~a4)无Tb基材-T3扩散后SEM图及元素分布;(b1~b4)含Tb基材SEM图及元素分布;(c1~c4)含Tb基材-T2扩散后SEM图及元素分布

Fig. 4 (a1~a4) SEM images and elemental distributions of Tb-free substrate after T3 diffusion; (b1~b4) SEM images and element distributions of Tb-containing substrate; (c1~c4) SEM images and element distributions of Tb-containing substrate after T2 diffusion

构中,在晶界相中含量较少。对于含Tb基材,Tb元素已经均匀分布在主相晶粒之中,如图4(b4)所示。图4(c4)显示,扩散后并未发现明显的核壳结构,这是因为含Tb基材中晶粒内部已经均匀分布了Tb元素,晶界扩散后晶粒中Tb元素没有明显的浓度差别,故在含Tb基材扩散后并未发现明显的核壳结构。扩散源中的Tb元素主要分布在主相晶粒中,几乎未进入晶界相。

3 结 论

本文以重稀土Tb合金与纯钕粉混合作为复合扩散源,在无Tb基材和含Tb基材两类烧结钕铁硼磁体中进行晶界扩散,研究不同比例TAC和纯钕粉的扩散源在不同基材中的扩散效果,并挑选出性能最佳的样品,研究复合扩散源提升基材磁性能的关键机制,研究得到以下结论:

1)复合扩散源在减少Tb元素用量的情况下可以大幅提升基材矫顽力且剩磁无明显下降,在无Tb基材和含Tb基材中矫顽力最大增量分别为1.036 T和0.959 T。

2)基材磁性能的提升和扩散源中Tb元素的增加并无线性关系,故对于不同的基材,选择合适比例的扩散源是提升其磁性能的关键。

3)无Tb基材扩散后矫顽力大幅提升的主要原因有以下三方面:非磁晶界相增多,晶粒形状更加规则,Tb元素进入主相晶粒形成核壳结构。含Tb基材扩散后矫顽力提升的主要原因是非磁晶界相增多和Tb元素进入主相晶粒,形成了各向异性场更强的 $(\text{Nd}, \text{Tb})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相。

参考文献:

- [1] NAKAMURA H. The current and future status of rare earth permanent magnets [J]. *Scripta Materialia*, 2018, 154: 273-276.
- [2] GUTFLEISCH O, WILLARD M A, BRÜCK E, et al. Magnetic materials and devices for the 21st century: stronger, lighter, and more energy efficient [J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(7): 821-842.
- [3] PÉRIGO E A, TITOV I, WEBER R, et al. Small-angle neutron scattering study of coercivity enhancement in grain-boundary-diffused Nd-Fe-B sintered magnets [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2016, 677: 139-142.
- [4] TRENCH A, SYKES J P. Rare earth permanent magnets and their place in the future economy [J]. *Engineering*, 2020, 6(2): 115-118.
- [5] OIKAWA T, YOKOTA H, OHKUBO T, et al. Large-scale micromagnetic simulation of Nd-Fe-B sintered magnets with Dy-rich shell structures [J]. *AIP Advances*, 2016, 6(5): 056006.
- [6] LV M, KONG T, ZHANG W H, et al. Progress on modification of microstructures and magnetic properties of Nd-Fe-B magnets by the grain boundary diffusion engineering [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2021, 517: 167278.
- [7] LI W F, SEPEHRI-AMIN H, OHKUBO T, et al. Distribution of Dy in high-coercivity (Nd, Dy)-Fe-B sintered magnet [J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(8): 3061-3069.
- [8] 鲁飞, 刘树峰, 李慧, 等. 稀土合金扩散烧结钕铁硼磁体研究进展 [J]. *材料导报*, 2024, 38(16): 164-171.
- [9] 刘仲武, 何家毅. 钕铁硼永磁晶界扩散技术和理论发展的几个问题 [J]. *金属学报*, 2021, 57(9): 1155-1170.
- [10] 刘峰, 李琳穗. 烧结钕铁硼磁性性能提升研究进展 [J]. *铜业工程*, 2023(1): 121-126.
- [11] WU B H, ZHANG Q K, LI W D, et al. Grain boundary diffusion of magnetron sputter coated heavy rare earth elements in sintered Nd-Fe-B magnet [J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(24): 245112.
- [12] TANG J, HUANG W C, LI D. Improvements in properties of NdFeB magnets obtained via magnetron sputtering and thermal diffusion [J]. *Journal of Rare Earths*, 2024, 42(9): 1710-1716.
- [13] WU H H, WANG Z J, LIU W Q, et al. Strategy for co-enhancement of interface adhesion and coercivity of Nd-Fe-B grain boundary diffusion magnet: TbH_3 nanopowders used in screen printing [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2024, 610: 172595.
- [14] HE J Y, CAO J L, YU Z G, et al. Grain boundary diffusion sources and their coating methods for Nd-Fe-B permanent magnets [J]. *Metals*, 2021, 11(9): 1434.
- [15] KIM J, JANG Y R, LEE D H, et al. Dependence of magnetic performance on coating method in grain boundary diffusion processed Nd-Fe-B sintered magnets [J]. *Materials Today Communications*, 2024, 38: 108004.
- [16] HIROTA K, NAKAMURA H, MINOWA T, et al. Coercivity enhancement by the grain boundary diffusion

- process to Nd-Fe-B sintered magnets [J]. IEEE transactions on magnetics, 2006, 42(10): 2909-2911.
- [17] LOEWE K, BENKE D, KÜBEL C, et al. Grain boundary diffusion of different rare earth elements in Nd-Fe-B sintered magnets by experiment and FEM simulation [J]. Acta Materialia, 2017, 124: 421-429.
- [18] DI J H, DING G F, TANG X, et al. Highly efficient Tb-utilization in sintered Nd-Fe-B magnets by Al aided TbH₂ grain boundary diffusion [J]. Scripta Materialia, 2018, 155: 50-53.
- [19] LU K C, BAO X Q, TANG M H, et al. Influence of annealing on microstructural and magnetic properties of Nd-Fe-B magnets by grain boundary diffusion with Pr-Cu and Dy-Cu alloys [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2017, 441: 517-522.
- [20] LU K C, BAO X Q, TANG M H, et al. Boundary optimization and coercivity enhancement of high $(BH)_{\max}$ Nd-Fe-B magnet by diffusing Pr-Tb-Cu-Al alloys [J]. Scripta Materialia, 2017, 138: 83-87.
- [21] 贾镐阳, 洪源, 赵利忠, 等. 多元素协同晶界扩散: 现状与发展 [J]. 金属功能材料, 2024, 31(6): 157-171.
- [22] 李飞飞. 复合粉末晶界扩散制备高矫顽力烧结钕铁硼磁体的研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2022: 37-58.
- [23] 王志恒, 刘乔波, 曹俊, 等. 晶界扩散中 Tb 对烧结 NdFeB 磁体微观组织和磁性能的影响 [J]. 铜业工程, 2024(2): 54-60.

Effect of Composite Diffusion Sources on Magnetic Properties of Sintered NdFeB Magnets

LIU Hongxiong, WANG Zhiheng, LIU Yanfeng, CAO Jun, LIU Qiaobo, HUANG Qiang, YANG Jinjin, CHEN Yixin
(Jiangxi Copper Technology Institute Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Grain boundary diffusion technology has emerged as a pivotal approach to overcome bottlenecks of high cost and significant remanence loss in traditional single-alloy methods by precisely regulating the distribution of heavy rare earths (HREs), thereby markedly enhancing the coercivity of NdFeB magnets. This study proposed composite diffusion sources formed by blending Tb-Al-Cu HRE alloys with pure Nd powder at varying ratios, systematically investigating their diffusion modification effects on both HRE-free and HRE-containing substrates. Experimental results demonstrated that under optimal diffusion source ratios, the maximum coercivity enhancements for the two substrates reached 1.036 T and 0.959 T, respectively, with remanence attenuation controlled within 0.59 kGs and 0.43 kGs. When TbAlCu-to-pure-Nd ratio was 3:2 (for HRE-free substrates) or 2:3 (for HRE-containing substrates), the magnets exhibited optimal comprehensive performance, achieving 48UH and 45EH grade levels, respectively. Microstructural analysis revealed that HRE-free substrates developed increased grain boundary phases, refined grains, and core-shell structures after diffusion, while HRE-containing substrates showed a significant increase in non-magnetic grain boundary phases. By designing composite diffusion sources, this study achieved remarkable magnetic performance improvements with low HRE consumption, offering a novel strategy for the green preparation and resource-efficient utilization of high-performance NdFeB magnets.

Key words: sintered NdFeB; grain boundary diffusion; composite diffusion source; low heavy rare earth; magnetic property

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.008

引文格式: 刘宏雄, 王志恒, 刘延丰, 曹俊, 刘乔波, 黄强, 杨金金, 陈奕欣. Tb-Al-Cu/Nd 复合扩散源对烧结钕铁硼磁性能的影响 [J]. 铜业工程, 2026(1): 90-96.

LIU Hongxiong, WANG Zhiheng, LIU Yanfeng, CAO Jun, LIU Qiaobo, HUANG Qiang, YANG Jinjin, CHEN Yixin. Effect of composite diffusion sources on magnetic properties of sintered NdFeB magnets [J]. Copper Engineering, 2026(1): 90-96.