

钕铁硼基体镱含量对晶界扩散磁性能的影响

李 建, 张紫毅

安泰科技股份有限公司北京空港新材分公司, 北京

收稿日期: 2026年6月17日; 录用日期: 2026年7月17日; 发布日期: 2026年7月27日

摘 要

文章对含量分别为0 wt.%、1 wt.%和4 wt.%的3种钕铁硼基体进行了Dy晶界扩散, 并分析比较了其磁性能。结果显示, 所有样品在经过Dy扩散后均提升3 kOe~4 kOe的矫顽力, 矫顽力提升幅度与基体初始Dy含量未发现单调或线性关联。电子探针Dy元素面分布图显示, 无论基体中原有的Dy含量多与少, 经过晶界扩散后Dy含量均显著增加。1 Dy和4 Dy样品中的晶界扩散, 是将原有晶界Dy富集浓度进一步提高; 而0 Dy样品中的晶界扩散, 是磁体的晶界附近区域实现从无重稀土到高浓度重稀土覆盖的过程。对比三种样品的各向异性场, 4 Dy样品的各向异性场增量只有5.33 kOe, 小于0 Dy和1 Dy样品, 验证了已含有Dy的磁体中进行扩散后各向异性场的增加幅度会小于0 Dy磁体。

关键词

烧结钕铁硼, 晶界扩散, 矫顽力, Dy元素分布, 各向异性场

Effect of Dy Content in Base Nd-Fe-B Magnets on Magnetic Properties after Grain Boundary Diffusion

Jian Li, Ziyi Zhang

Beijing Airport New Materials Branch, Advanced Technology and Materials Co., Ltd., Beijing

Received: June 17, 2026; accepted: July 17, 2026; published: July 27, 2026

Abstract

In this work, grain boundary diffusion of Dy was performed on three types of Nd-Fe-B substrates with Dy contents of 0 wt.%, 1 wt.%, and 4 wt.%, and their magnetic properties were analyzed and compared. The results indicate that the coercivity of all samples increases by 3 kOe to 4 kOe after Dy diffusion, and no obvious correlation is observed between the enhancement magnitude of coercivity

and the initial Dy content of the substrates. Elemental mapping of Dy obtained by electron probe microanalysis (EPMA) reveals that the Dy concentration rises remarkably in all samples after grain boundary diffusion, regardless of the initial Dy content in the substrates. For the 1 Dy and 4 Dy samples, grain boundary diffusion further elevates the pre-existing Dy enrichment at grain boundaries. In contrast, grain boundary diffusion in the 0 Dy sample realizes the coverage of heavy rare earth elements with high concentration near grain boundaries, where heavy rare earths were originally absent. By comparing the anisotropy field of the three samples, the 4 Dy sample only presents an anisotropy field increment of 5.33 kOe, which is lower than that of the 0 Dy and 1 Dy samples. This finding verifies that the increase in anisotropy field caused by grain boundary diffusion is less significant for Nd-Fe-B magnets initially containing Dy than for Dy-free magnets.

Keywords

Nd-Fe-B Sintered Magnet, Grain Boundary Diffusion, Coercivity, Dy Mapping, Anisotropic Field

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

多数电机设备工况严苛,磁体工作温度可达 200℃,极易产生热退磁失效问题,严重影响电机服役性能与使用寿命[1]。为改善磁体高温抗退磁性能,需保障其优异的室温矫顽力。传统工艺主要通过掺杂大量镨、铽等重稀土元素提升矫顽力[2][3],但该方式会大幅降低磁体剩磁与磁能积,且重稀土的大量使用显著提高生产成本,制约磁体规模化推广。晶界扩散技术(GBDP)有效突破了传统掺杂工艺的局限,是当前低成本、高效率优化钕铁硼磁体性能的核心技术,可在大幅提升磁体矫顽力的同时,基本保留剩磁与最大磁能积性能优势[1]-[7]。该技术通过多种方式将镨、铽等重稀土物质附着于成型烧结钕铁硼磁体表面,再经高温热处理,使重稀土元素沿晶界通道向磁体内部扩散,最终在主相晶粒外围形成重稀土富集壳层。

钕铁硼磁体属于形核型矫顽力机制,主相晶粒外延区域易因结构与成分不均形成反磁化形核中心[8][9],而扩散形成的重稀土壳层可有效提升该区域各向异性场,抑制反磁化核萌生,从微观层面强化磁体矫顽力与热稳定性。目前,晶界扩散技术已广泛适用于 N 牌号至 EH 牌号全系列烧结钕铁硼磁体的性能升级,可在大幅提升不同等级磁体矫顽力的同时实现重稀土资源的高效利用。现有研究多聚焦于扩散温度、保温时间、扩散源组分等外部工艺参数的优化调控,而忽视了磁体基体初始重稀土含量对扩散行为与改性效果的内在影响。不同商用牌号钕铁硼磁体的核心差异体现在基体初始重稀土掺杂量,该基体本征参数直接影响重稀土晶界微观组织结构演化及最终磁性能增益水平。基于现有研究的不足,本文选取 3 种不同初始 Dy 含量的烧结钕铁硼磁体作为研究基体,结合微磁学理论阐明基体成分与扩散复合作用下的磁性能改性机制。

2. 实验方法

本实验中选用 0 wt.%、1 wt.%、4 wt.% 三种不同 Dy 含量的钕铁硼磁体作为实验样品,按照表 1 中的成分方案制得合金,然后采用制粉、压型、烧结等工序制作出所需扩散用的烧结钕铁硼基体样品,并按照通用量产品工艺参数制备。为了更明确表示不同样品之间稀土添加量的关系,表 1 中的各样品名义成分是以原子百分比标示。利用磁控溅射晶界扩散的方式进行 Dy 扩散,工艺为 900℃ 下扩散 10 h。为了减少扩散工艺条件误差导致的影响,本研究中的所有样品统一在同一个扩散设备中同时进行处理。扩散用

的样品尺寸为 15 mm × 12 mm × 3 mm，其中 3 mm 是样品取向方向的尺寸。扩散前后的样品磁性能由 PFM14 型的脉冲场磁测系统(Pulse Field Magnetometer)测得，测试样品为 D8 mm × 3 mm 的圆柱。磁体的各向异性场值是用综合物理性能测量系统(PPMS)中的磁测系统对磁体样品沿着难、易磁化方向分别施加 9T 磁场，并将两条磁化曲线延长相交获得，样品为 3 mm × 3 mm × 3 mm 的立方块体，最终曲线则根据样品形状对应退磁因子经历修正。为了尽量减少设备状态导致的误差，将渗镨前后的样品在 ICP 中同一批测量。此外，还使用日本岛津 EPMA-1720 型电子探针显微镜观测样品中 Dy 元素的微观分布。

Table 1. Sample names and designed compositions
表 1. 样品名称和设计成分

Sample No.	Dy wt.%	Nd wt.%	Dy/ΣRE × 100% wt.%	Composition at.%
0 Dy	0.0	32.8	0.00	Nd _{32.8} Cu _{0.1} Al _{0.1} Fe _{0.1} B
1 Dy	1.0	31.8	3.05	Nd _{31.8} DyCu _{0.1} Al _{0.1} Fe _{0.1} B
4 Dy	4.0	28.8	12.20	Nd _{28.8} Dy ₄ Cu _{0.1} Al _{0.1} Fe _{0.1} B

3. 结果与讨论

图 1 和表 2 显示了 0 Dy、1 Dy、4 Dy 样品进行晶界扩散处理前后的矫顽力 H_{cj}、拐点矫顽力 H_k、剩磁 Br 的变化。从图 1 可以观察到，经过晶界扩散处理后所有基体的内禀矫顽力 H_{cj} 以及矫顽力拐点 H_k 均提高了 3~4 kOe，而剩磁变化很小，降低幅度约为 0.23~0.27 kGs。将不同基体之间进行比较可以发现，随着基体中 Dy 含量增加，基体的内禀矫顽力 H_{cj} 和拐点矫顽力 H_k 基本呈线性增加趋势，而剩磁 Br 逐步降低；晶界扩散处理后，各项磁性能参数的趋势与处理前的基本相同。需要注明，晶界扩散过程不仅提高了矫顽力，同时也明显提高了拐点矫顽力。

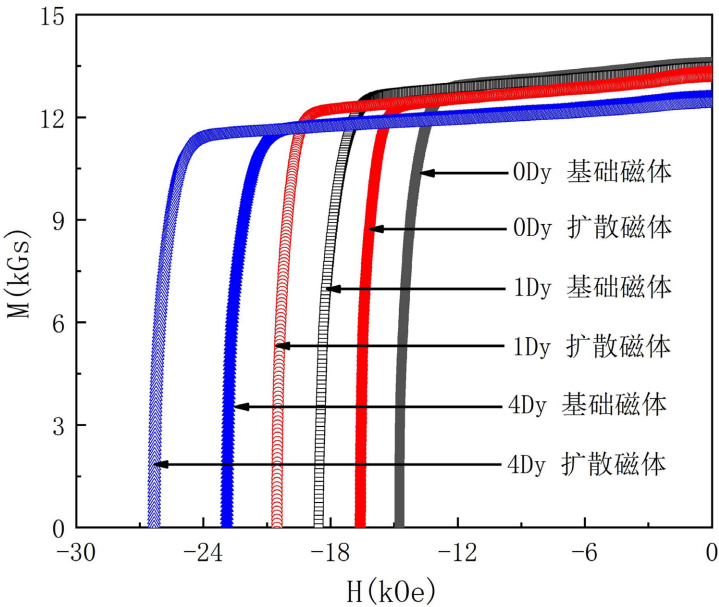


Figure 1. Demagnetization curves of substrates with different Dy contents before and after grain boundary diffusion

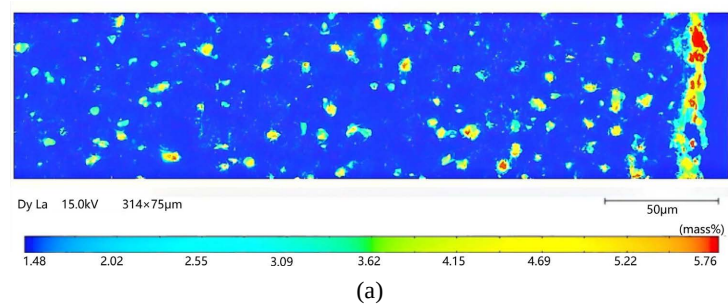
图 1. 不同 Dy 含量基体晶界扩散前后退磁曲线

Table 2. Magnetic properties of substrates with different Dy contents before and after grain boundary diffusion
表 2. 不同 Dy 含量基体晶界扩散前后磁性能

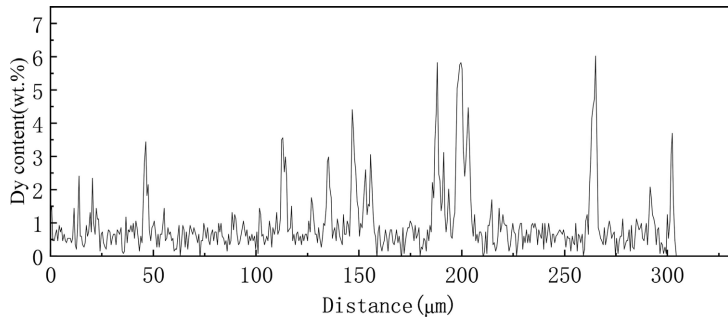
样品	Hcj (kOe)		Hk (kOe)		Br (kGs)		BHmax (MGoe)	
	前	后	前	后	前	后	前	后
0 Dy	14.75	18.56	13.24	16.90	13.62	13.39	43.50	42.69
1 Dy	16.59	20.53	14.96	18.48	13.43	13.16	42.46	41.57
4 Dy	22.89	26.33	21.07	24.66	12.59	12.36	37.47	36.98

图 2 进一步对扩散处理前后的 0 Dy、1 Dy 和 4 Dy 样品进行 EPMA 面扫描, 并比较了 Dy 元素分布状况。元素面分布图的底部颜色标尺标志对应元素浓度高低, 越靠近红色代表对应元素浓度越高, 越靠近蓝色代表元素浓度越低。通过面分布图可以针对特定元素表征其在区域内的分布情况以及每一点的偏聚浓度。由图 2(a)和图 2(b)可知, 0 Dy 样品晶界相区域中明显偏聚了高浓度 Dy 元素, 在图 2(a)最右侧可以看到一层高浓度 Dy 富集层, 这对应于表面沉积下来的金属 Dy 富集层。随着距离样品表面深度逐渐加深, Dy 富集区的颜色逐渐从红色变成浅绿色, 而且 Dy 富集的亮点密度也逐渐变稀松, 即表明 Dy 富集浓度随着深度加深逐渐下降。另外, 图中除了鲜明的红色以及浅绿色 Dy 富集亮点区域之外, 亮点之间模糊的棉絮状浅蓝色条纹, 表示其中的 Dy 浓度较低。从图 2(b)线上浓度分布来看, 图中大部分明显的 Dy 富集亮点的浓度都在 2 wt.%以上, 部分红色富集区浓度达到了 5~6 wt.%。本研究的剩余其他电子探针图的分析方法与上述方法基本相同。图 2(c)显示了 1 Dy 样品扩散后的 Dy 分布情况, 在扩散后样品内再次出现诸多鲜明的 Dy 富集亮点。由图 2(d)中 Dy 浓度分布曲线可知, 扩散后的样品中只有在少数几个点出现 4 wt.%~8 wt.%不等的高浓度 Dy 峰, 其他区域中的浓度则是 0 wt.%~2 wt.%。图 2(e)显示了 4 Dy 样品扩散后的 Dy 分布状态, 经过晶界扩散处理后, 4 Dy 样品内的 Dy 富集亮点变得更密集。所有晶界相区域都高浓度富集 Dy, 相对于 0 Dy 或 1 Dy 样品, 各个富集点的浓度变得更高(颜色变红), 而各个主相内部也仍然存在着 Dy 富集区, 图中显示为绿色或浅蓝色。在图 2(f)的线浓度分布对比中可以看到, 扩散后的大部分峰值达到 7 wt.%~12 wt.%不等, 再次证明晶界中 Dy 富集浓度明显提高。由此可知, 即便是在基体已含有高达 4 wt.%的情况下进行扩散, 仍然能明显改变 Dy 富集特征, 即 Dy 的富集区分布得更密集且浓度更高。无论是 1 Dy 样品还是 4 Dy 样品, 扩散过程使得一方面在原来没有富集 Dy 的晶界相中补充富集高浓度 Dy, 从而在所有晶界相中皆能高浓度富集 Dy, 另一方面使晶界相中进一步增加了 Dy 浓度。上述电子探针得出的 Dy 分布特征也很好佐证了磁性能分析结果, 即无论基体中原有的 Dy 含量多与少, 经过晶界扩散后 Dy 含量均显著增加。1 Dy 和 4 Dy 样品在扩散前就在主相及晶界各处随机分布着一定量 Dy 元素。在这种已含 Dy 磁体中的晶界扩散, 其作用主要是将原有晶界 Dy 富集浓度进一步提高。相比而言, 0 Dy 样品中的晶界扩散, 是磁体的晶界附近区域实现从无重稀土到高浓度重稀土覆盖的过程, 这时晶界扩散对于矫顽力的提升效果最优。

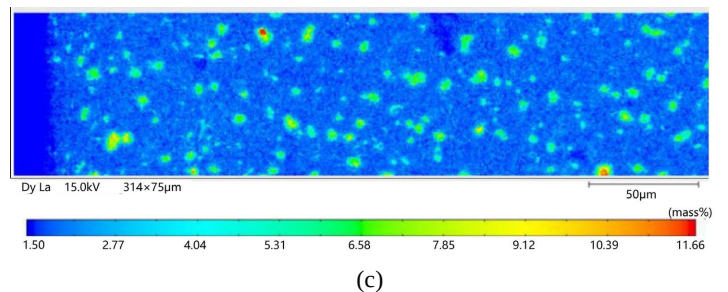
依据形核场矫顽力理论, 磁性相本征的磁晶各向异性场是烧结钕铁硼磁体矫顽力的核心本源。然而, 磁体内部存在的各类微观结构缺陷会造成局部磁晶各向异性场衰减, 同时产生干扰性微观杂散磁场, 使得磁体实际矫顽力远低于其本征磁晶各向异性场。在烧结钕铁硼磁体中, Nd₂Fe₁₄B 主相与晶界相的过渡区域具备典型的成分与结构非均匀特征, 是微观结构缺陷的集中区域, 因此该区域在反向磁场作用下会优先发生反磁化形核, 成为磁体矫顽力衰减的关键薄弱位点。现有多数晶界扩散相关研究证实, 渗入磁体内部的重稀土元素能够持续向 Nd₂Fe₁₄B 主相晶粒内部扩散, 置换主相中的部分 Nd 原子并生成(Nd, Dy)₂Fe₁₄B 固溶化合物, 有效改善主相晶粒边缘的微观结构、提升该区域的磁晶各向异性场。该改性效果



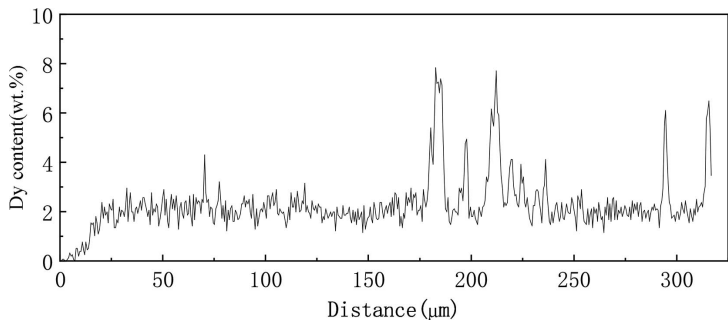
(a)



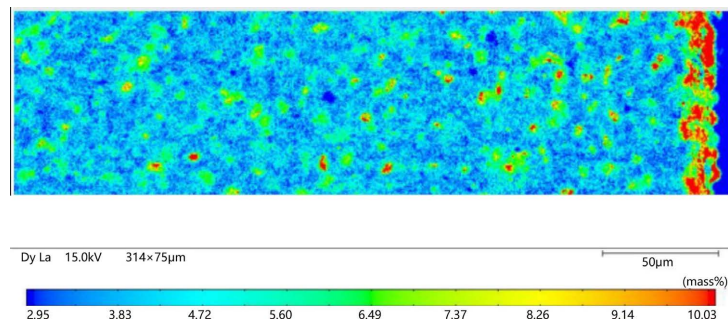
(b)



(c)



(d)



(e)

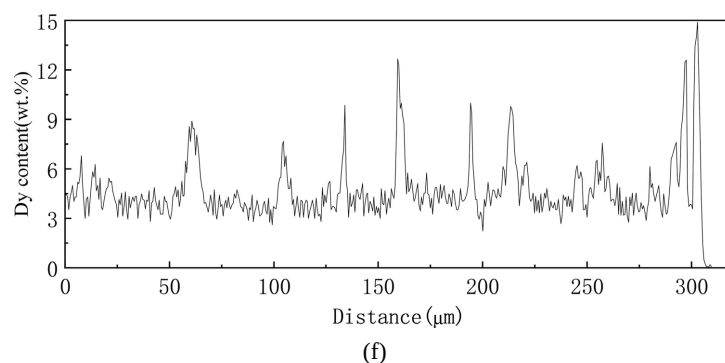


Figure 2. EPMA mapping of Dy element in different samples after diffusion: (a) Elemental mapping of 0 Dy sample; (b) Line scan of 0 Dy sample; (c) Elemental mapping of 1 Dy sample; (d) Line scan of 1 Dy sample; (e) Elemental mapping of 4 Dy sample; (f) Line scan of 4 Dy sample

图 2. 不同样品扩散后电子探针 Dy 元素分布图: (a) 0 Dy 样品面分布图; (b) 0 Dy 样品线扫描浓度分布; (c) 1 Dy 样品面分布图; (d) 1 Dy 样品线扫描浓度分布; (e) 4 Dy 样品面分布图; (f) 4 Dy 样品线扫描浓度分布

可显著提高主相边缘反磁化核的形核临界外加磁场, 抑制局部优先反磁化行为, 最终实现烧结钕铁硼磁体矫顽力的有效提升。本文对含有不同初始 Dy 含量的磁体样品进行了 Dy 晶界扩散处理并使各个样品矫顽力均提高了 3~4 kOe。电子探针微观表征结果显示, 初始已含 Dy 的磁体基体矫顽力原本就比初始 0 Dy 基体高, 原因是前者的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相晶粒中的部分 Nd 原子位已被 Dy 取代, 而后的主相则全部是由 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 组成。可以想象, 在体积一定的磁体中主相晶粒的边缘区域的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 晶包数是有限的, 对应的 Nd 原子位也是有限的。在含 Dy 基体中已经有部分 Nd 原子位被 Dy 取代, 后续的扩散过程只是把剩余没有填充的原子位中继续补充 Dy 原子取代 Nd 原子; 而 0 Dy 磁体中则是可以将任何 Nd 取代为 Dy。在主相晶粒边缘区域原子位数量一定的情况下, 后者主相中能被 Dy 取代的 Nd 原子位当然多于前者, 主相的各向异性提高幅度也可能高于前者。

为了比较验证上述猜测, 本文测试了扩散前后各个样品的各向异性场。具体测试方法是, 分别沿着样品的难磁化方向和易磁化方向测试了磁化曲线(如图 3(a)~(c)所示), 在难磁化方向的磁化曲线上选取一点并作了切线, 根据切线斜率推算出其与易磁化方向的曲线的交点, 此交点对应的横坐标即为各向异性场。本次测试的最大外加场为 90 kOe, 为便于比较, 所有样品统一在难磁化方向曲线上 80 kOe 对应点处作切线, 如图 3(d)所示。虽然这种方法测试的是整个磁体样品的各向异性场, 与具体每一个主相晶粒内的各向异性场有所区别, 但是也可以通过扩散前后磁体各向异性场差值, 作为比较不同样品的各向异性场变化的参考值。

曲线的各关键交点、切线斜率和据此推算得出的各向异性场值及扩散前后的差值列于图 4。图中未扩散的 1 Dy 样品和 4 Dy 样品的各向异性场分别为~97 kOe 和~107 kOe, 比 0 Dy 样品高出 3 kOe 和 13 kOe, 即在初始基体磁体制备过程中通过合金化添加 Dy 时, 1 wt.% 的 Dy 约可增加 3 kOe 的各向异性场, 该增量仅为晶界扩散所致增量的 1/2 左右。三种样品进行扩散后其各向异性场均有明显提升, 其差值为 5 kOe~6 kOe 左右。对比三种样品的各向异性场增加量, 4 Dy 样品的各向异性场增量只有 5.33 kOe, 小于 0 Dy 和 1 Dy 样品。虽然烧结钕铁硼磁体整体的各向异性场是各个主相晶粒内各向异性场的矢量叠加结果, 但是本文认为该结果在某种程度上间接验证了上述猜测, 即在已含有 Dy 的磁体中进行扩散后各向异性场的增加幅度会小于 0 Dy 磁体。

4. 结论

含有 0 wt.%~4 wt.% 不等量 Dy 的 3 种磁体样品在经过 Dy 扩散后均能提升 3~4 kOe 的矫顽力,

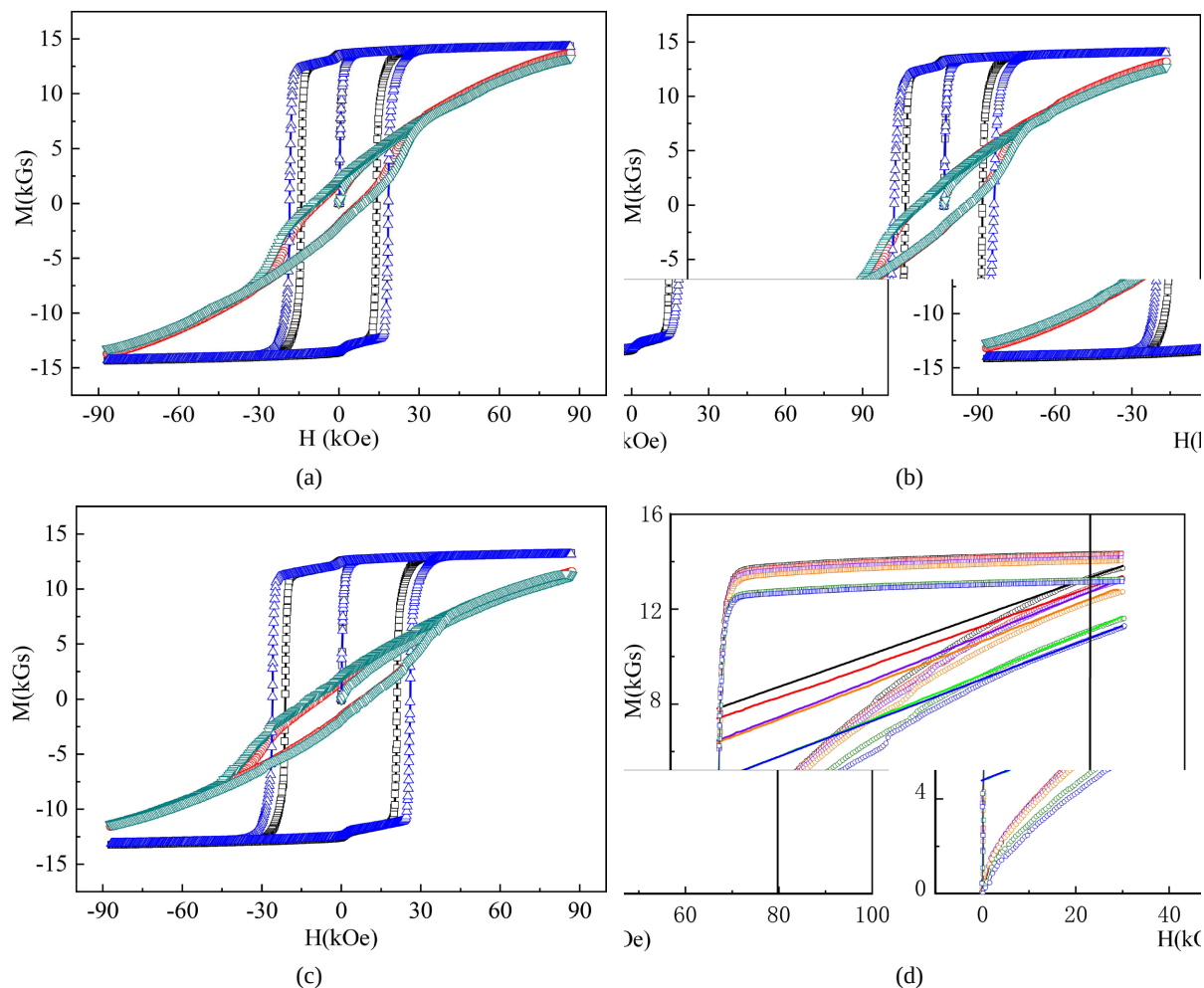


Figure 3. Hysteresis loops of samples after diffusion in different directions: (a) 0 Dy; (b) 1 Dy; (c) 4 Dy; (d) Combined magnetization curves and tangent line at 80 kOe

图 3. 样品扩散后不同方向磁滞回线曲线: (a) 0 Dy; (b) 1 Dy; (c) 4 Dy; (d) 合并后磁化曲线及 80 kOe 切线

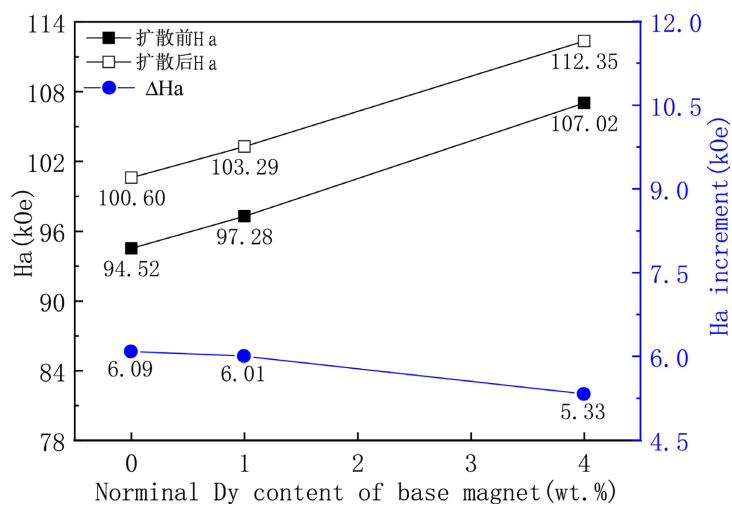


Figure 4. Variation of anisotropy field for 0 Dy, 1 Dy and 4 Dy samples

图 4. 0 Dy、1 Dy、4 Dy 样品各向异性场变化

矫顽力提升幅度与基体初始 Dy 含量未发现单调或线性关联。电子探针 Dy 元素面分布图显示, 无论基体中原有的 Dy 含量多与少, 经过晶界扩散后 Dy 含量均显著增加。1 Dy 和 4 Dy 样品中的晶界扩散, 是将原有晶界 Dy 富集浓度进一步提高; 0 Dy 样品中的晶界扩散, 是磁体的晶界附近区域实现从无重稀土到高浓度重稀土覆盖的过程。对比三种样品的各向异性场, 4 Dy 样品的各向异性场增量只有 5.33 kOe, 小于 0 Dy 和 1 Dy 样品, 证明已含有 Dy 的磁体中进行扩散后各向异性场的增加幅度会小于 0 Dy 磁体。

参考文献

- [1] Satoh, H., Akutsu, S., Miyamura, T. and Shinoki, H. (2004) Development of Traction Motor for Fuel Cell Vehicle. *SAE 2004 World Congress & Exhibition*, Detroit, 8 March 2004. <https://doi.org/10.4271/2004-01-0567>
- [2] Sagawa, M., Fujimura, S., Yamamoto, H., Matsuura, Y. and Hiraga, K. (1984) Permanent Magnet Materials Based on the Rare Earth-Iron-Boron Tetragonal Compounds. *IEEE Transactions on Magnetics*, **20**, 1584-1589. <https://doi.org/10.1109/tmag.1984.1063214>
- [3] Hirose, S., Yamaguchi, Y., Tokuhara, K., Yamamoto, H., Fujimura, S. and Sagawa, M. (1987) Magnetic Properties of $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{1-x}\text{M}_x)_{14}\text{B}$ Measured on Single Crystals ($\text{M} = \text{Al, Cr, Mn and Co}$). *IEEE Transactions on Magnetics*, **23**, 2120-2122. <https://doi.org/10.1109/tmag.1987.1065623>
- [4] Hirota, K., Nakamura, H., Minowa, T. and Honshima, M. (2006) Coercivity Enhancement by the Grain Boundary Diffusion Process to Nd-Fe-B Sintered Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, **42**, 2909-2911. <https://doi.org/10.1109/tmag.2006.879906>
- [5] Li, D., Suzuki, S., Kawasaki, T. and Machida, K. (2008) Grain Interface Modification and Magnetic Properties of Nd-Fe-B Sintered Magnets. *Japanese Journal of Applied Physics*, **47**, Article No. 7876. <https://doi.org/10.1143/jjap.47.7876>
- [6] Watanabe, N., Itakura, M., Kuwano, N., Li, D., Suzuki, S. and Machida, K. (2007) Microstructure Analysis of Sintered Nd-Fe-B Magnets Improved by Tb-Vapor Sorption. *Materials Transactions*, **48**, 915-918. <https://doi.org/10.2320/matertrans.48.915>
- [7] Givord, D., Lu, Q., Rossignol, M.F., Tenaud, P. and Viadieu, T. (1990) Experimental Approach to Coercivity Analysis in Hard Magnetic Materials. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **83**, 183-188. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90479-a](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90479-a)
- [8] 高汝伟, 姜寿亭, 李华, 丘梅影, 郭贻诚. 取向烧结钕铁硼永磁合金反磁化过程及矫顽力机理研究[J]. 物理学报, 1989(38): 439.
- [9] Kronmüller, H. (1987) Theory of Nucleation Fields in Inhomogeneous Ferromagnets. *Physica Status Solidi (b)*, **144**, 385-396. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221440134>