

烧结钕铁硼磁体等离子喷涂-晶界扩散氧化镱研究

赵鹏翔¹, 白玉¹, 马文¹, 尹雪¹, 王誉^{2,3}, 娄树普^{2,3}, 王强^{2,3}

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院 内蒙古自治区薄膜与涂层重点实验室, 呼和浩特 010051; 2. 包头稀土研究院, 内蒙古 包头 014010; 3. 瑞科稀土冶金及功能材料国家工程研究中心有限公司, 内蒙古 包头 014030)

摘要: **目的** 采用悬浮液等离子喷涂技术, 在烧结 Nd-Fe-B 磁体表面制备结构完整、厚度可控、结合力较强的 Dy₂O₃ 涂层, 并通过晶界扩散提高 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力。**方法** 制备 Dy₂O₃ 悬浮液, 在烧结 Nd-Fe-B 表面, 利用悬浮液等离子喷涂技术制备 Dy₂O₃ 涂层。利用激光粒度仪测试粉体粒度。采用光学显微镜、扫描电子显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射仪 (XRD) 对 Dy₂O₃ 涂层的显微形貌、组织结构和物相组成进行分析。通过涂层附着力自动划痕仪测试涂层的结合力。利用 NIM-2000H 自动磁性能测量仪对烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能进行测试分析。**结果** 875 °C 的晶界扩散 Dy₂O₃ 使磁体的矫顽力从 1161.19 kA/m 增加到 1277.74 kA/m, 剩磁下降 0.01 T。矫顽力得到较高提升, 且剩磁略微下降。SEM 和 EDS 分析结果表明, 晶界组织形貌的改善和 (Nd,Dy)₂Fe₁₄B 外延层的形成是矫顽力提升的主要原因。**结论** 证实了悬浮液等离子喷涂-晶界扩散技术能够控制涂层厚度, 绿色高效地制备高矫顽力烧结 Nd-Fe-B 磁体

关键词: Nd-Fe-B 磁体; 悬浮液等离子喷涂; 晶界扩散; 扩散温度; 磁性能

中图分类号: TG132; TM273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)01-0325-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.01.035

Study on Dysprosium Oxide Diffused at Grain Boundary by Plasma Spraying of Sintered Nd-Fe-B Magnet

ZHAO Peng-xiang¹, BAI Yu¹, MA Wen¹, YIN Xue¹, WANG Yu^{2,3}, LOU Shu-pu^{2,3}, WANG Qiang^{2,3}

(1. Inner Mongolia Key Laboratory of Thin Film and Coatings, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014010, China; 3. Reke Rare Earth Metallurgy and Functional Materials National Engineering Research Center Co., Ltd., Baotou 014000, China)

ABSTRACT: The suspension plasma spraying technology is used to prepare a Dy₂O₃ coating with complete structure, controllable thickness and high bonding force on the surface of the sintered Nd-Fe-B magnet, and the coercivity of the Nd-Fe-B magnet is improved by the grain boundary diffusion. The method is to prepare Dy₂O₃ suspension, and prepare Dy₂O₃ coating on

收稿日期: 2021-03-05; 修订日期: 2021-06-18

Received: 2021-03-05; Revised: 2021-06-18

基金项目: 内蒙古自治区科技重大专项项目 (2018810); 内蒙古自治区留学人员科技活动项目 (2020122); 大学生创新实验计划项目 (2020043008)

Fund: Science and Technology Major Project of Inner Mongolia Autonomous Region (2018810), Scientific and Technological Activities for Students Studying Abroad in Inner Mongolia Autonomous Region (2020122), Innovation Experiment Project for College Students (2020043008)

作者简介: 赵鹏翔 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事磁性材料研究。

Biography: ZHAO Peng-xiang (1996—), Male, Master degree candidate, Research focus: magnetic materials.

通讯作者: 白玉 (1981—), 女, 博士, 副教授, 主要从事表面工程及磁性材料研究。

Corresponding author: BAI Yu (1981—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering and magnetic materials.

引文格式: 赵鹏翔, 白玉, 马文, 等. 烧结钕铁硼磁体等离子喷涂-晶界扩散氧化镱研究[J]. 表面技术, 2022, 51(1): 325-331.

ZHAO Peng-xiang, BAI Yu, MA Wen, et al. Study on Dysprosium Oxide Diffused at Grain Boundary by Plasma Spraying of Sintered Nd-Fe-B Magnet[J]. Surface Technology, 2022, 51(1): 325-331.

the surface of sintered Nd-Fe-B by using suspension plasma spraying technology. The particle size of the powder is tested by a laser particle size analyzer. The microscopic morphology, structure and phase composition of the Dy_2O_3 coating is analyzed by the optical microscope, scanning electron microscope (SEM), energy spectrometer (EDS), and X-ray diffractometer (XRD). The coating adhesion is tested by the coating adhesion automatic scratch tester. The magnetic properties of sintered Nd-Fe-B magnets were tested and analyzed by the NIM-2000H automatic magnetic property measuring instrument. The result is that the grain boundary diffusion Dy_2O_3 at 875 °C increases the coercivity of the magnet from 1161.19 kA/m to 1277.74 kA/m, and the remanence decreases by 0.01 T. The coercivity is improved higher and the remanence decreases slightly. SEM and EDS analysis results show that the improvement of grain boundary structure and the formation of $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ epitaxial layer are the main reasons for the increase in coercivity. It is proved that the suspension plasma spraying-grain boundary diffusion technology is a green and efficient technology for preparing high-coercivity sintered Nd-Fe-B magnets that can control the thickness of the coating.

KEY WORDS: Nd-Fe-B magnets; suspension plasma spraying; grain boundary diffusion; diffusion temperature; magnetic property

近些年来,烧结 Nd-Fe-B 磁体因其优异的磁性能 (Magnetic Properties), 在新能源汽车、家用电器、风力发电、通信、医学等领域得到广泛的应用。但随着科学技术的不断进步,人们对烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能和温度稳定性提出了更高的要求,要求其具有更高的矫顽力和高温稳定性^[1-3]。随着这些新兴领域的出现及发展,对稀土永磁材料的需求日益增加,因此低稀土量、高矫顽力磁体成为了磁性材料研究的重要目标^[4]。

目前,提高烧结 Nd-Fe-B 磁体矫顽力的途径主要有两种:细化晶粒 (Grain Refinement) 和添加重稀土元素 (Add Heavy Rare Earth Elements)。其中,细化晶粒是通过将平均晶粒尺寸减小,使富 Nd 相更多地参与到阻隔 Nd-Fe-B 主相晶粒间的磁交换耦合作用,使烧结 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力得以提升^[5]。但在磁粉细化和烧结过程中,细晶磁粉容易出现氧化、分散困难、粉末团聚等问题,因此目前还难以实现大规模产业化生产^[6-8]。另一种途径是添加重稀土元素(如 Dy 或 Tb 元素), Dy 或 Tb 元素能够取代 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相中的 Nd 元素,形成具有更高磁晶各向异性场的 $(\text{Nd,Dy/Tb})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相。但 Dy 元素和 Tb 元素会与 Fe 元素形成反铁磁耦合,剩磁将不可避免地降低^[9-11]。添加重稀土元素的方式主要有合金法和晶界扩散法。

合金法 (Alloy Method) 是添加重稀土元素常用的传统方法,烧结 Nd-Fe-B 磁体在合金熔炼过程中,添加 Dy/Tb 重稀土元素可使其矫顽力提高。但是在添加重稀土元素的过程中,重稀土元素添加量不易控制,容易过多地进入烧结 Nd-Fe-B 磁体中,导致磁体的剩磁和磁能积大幅降低,不能满足制备高矫顽力高磁能积磁体的要求。另一点则是,重稀土元素自身比较稀少,大量的重稀土元素进入磁体内部不仅会使磁能积和剩磁降低,也会造成重稀土元素的浪费,生产成本大幅增加,造成资源浪费^[12]。

晶界扩散法 (Grain Boundary Diffusion) 作为一

种新型高效利用重稀土元素的方法,可以在保证剩磁基本不降低的前提下,显著提高磁体的矫顽力,同时有效减少重稀土元素的使用量。晶界扩散法一般是在磁体表面沉积重稀土化合物,然后在合适的热处理过程中,重稀土元素从磁体表面沿晶界扩散到磁体内部,使重稀土元素主要存在于晶界及晶粒的外围而不过多地进入晶粒内部,形成具有高磁晶各向异性场的壳层结构^[13-17]。较少的稀土元素(如 Dy)进入主相晶粒边缘取代富 Nd 相,重新凝固形成了 $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 化合物,改变了烧结 Nd-Fe-B 磁体主相晶粒边缘的结构,抑制了反磁化畴的形成,最终大幅度提高烧结 Nd-Fe-B 磁体的矫顽力^[18]。为此,晶界扩散工艺已受到国内外相关领域的广泛关注。到目前为止,其制备工艺主要有涂覆^[19]、磁控溅射^[20]、蒸镀^[21]和电泳沉积^[22]等,首先是要在磁体表面形成具有一定厚度的薄膜或涂层。

本文采用悬浮液等离子喷涂技术^[23-26]在烧结 Nd-Fe-B 磁体表面制备 Dy_2O_3 涂层,并通过晶界扩散方法,将 Dy 元素渗入磁体内部。研究晶界扩散温度对磁性能的影响,分析磁体微观组织结构的变化和矫顽力提升的原因。此方法为制备高矫顽力高剩磁的 Nd-Fe-B 磁体提供了可能。

1 实验

1.1 材料

实验采用包头金蒙汇磁有限公司 N42 牌号烧结态 Nd-Fe-B 磁体,尺寸为 $\phi 24.5 \text{ mm} \times \phi 5 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 。样品经除油处理后,依次放入 2.5% 的硝酸溶液中酸洗 30 s, 2% 的柠檬酸溶液中活化 2 min, 乙醇中超声洗涤,干燥备用。

Dy_2O_3 悬浮液的制备: 向 10% (质量分数) 的 Dy_2O_3 水性分散液中加入 1% 的聚丙烯酸作为分散剂,球磨 2 h 后,直接用于喷涂。

1.2 涂层制备及热处理工艺

采用悬浮液等离子喷涂系统（model MC 60, Medicoat AG, 瑞士）在烧结 Nd-Fe-B 磁体表面制备 Dy₂O₃ 涂层，喷涂工艺参数如表 1 所示。将喷涂后的样品放入真空烧结炉中进行热处理，在 850~925 ℃ 下扩散 10 h，500 ℃ 回火 2 h。

1.3 性能表征

利用 X 射线衍射仪（XRD, D/MAX-2500/PC, 日本）对扩散前后磁体的物相进行分析，具体测试条件：扫

描角度为 5°~90°，扫描时间 10 min，扫描速率 8.5(°)/min。使用 ZEISS sigma 500 型扫描电子显微镜（SEM）和能谱仪（EDS）观察扩散前后磁体的微观组织形貌及组成变化。通过涂层附着力自动划痕仪（WS-2005, 兰州中科凯华）测试涂层的结合强度，具体测试条件：加载速度 100 N/min，终止载荷 100 N，划痕长度为 10 mm，测试方式是声发射，其中加载压头为金刚石，锥角为 120°，尖端半径 R=0.2 mm。采用 BT2003 型激光粒度仪检测粉体粒度；采用 NIM-2000H 自动磁性测量仪测试样品的磁性能。

表 1 悬浮液等离子喷涂工艺参数
Tab.1 Process parameters of suspension plasma spraying

Power/ kW	Plasma gas Ar/(L·min ⁻¹)	Plasma gas H ₂ /(L·min ⁻¹)	Spray distance/mm	Liquid flow rate/(mL·min ⁻¹)	Atomization pressure/MPa
36	40	6	50	40	1.2

2 结果和讨论

2.1 悬浮液的性能表征

利用悬浮液等离子喷涂技术制备高矫顽力高剩磁的烧结 Nd-Fe-B 磁体的前提之一是，制备高固含量、低黏度、高分散性且稳定的 Dy₂O₃ 悬浮液，使悬浮液能均匀、流畅、稳定地输送到喷射焰流中。图 1 为原始和经球磨处理后 Dy₂O₃ 粉体的粒度分布和悬浮液静置 12 h 后的光学照片。由图 1 可知，原始 Dy₂O₃ 粉体的中位径为 2.83 μm，经 2 h 球磨处理后，中位径降低到 2.21 μm，且粒度分布发生了明显改变。静

置 12 h 后，原始粉体的悬浮液出现了明显分层，上清液几乎变为透明。而经球磨分散处理后的悬浮液未观察到分层现象，依然稳定。球磨后，Dy₂O₃ 悬浮液的黏度为 1.03 mm²/s，表面张力为 38.7 mN/m。

2.2 涂层结合力及微观结构分析

稳定、分散性良好的悬浮液保证了 Dy₂O₃ 涂层的理想结构。图 2 为 Dy₂O₃ 涂层表面和截面的 SEM 形貌。由图 2b 可以看出，Dy₂O₃ 涂层厚度约为 30 μm，与 Nd-Fe-B 磁体表面结合良好，在交界处没有观察到横向裂纹。根据图 3 划痕试验结果可知，涂层与基体间的临界载荷约为 79.10 N。在划痕试验中，常用临界试验力来代表结合力，临界试验力越大，则结合力越大，良好的结合力有利于热处理过程中 Dy 元素向 Nd-Fe-B 磁体中的渗入。图 2c、2d 为涂层表面的 SEM 形貌。涂层结构具有悬浮液等离子喷涂的典型微观结构，主要由堆积的扁平状颗粒和细球形颗粒组成，这主要是由于等离子体射流飞溅的液滴和涂层堆积机制所导致。

2.3 磁体的物相分析

图 4 为原始磁体和不同温度扩散 Dy₂O₃ 后磁体的 XRD 图谱。可以看出，扩散前后磁体的相组成主要包括主相 RE₂Fe₁₄B 和富 Nd 相，扩散后的相组成没有发生明显的变化。但对比原始磁体，扩散后磁体的衍射峰向大角度发生了微小的偏移，这表明 RE₂Fe₁₄B 主相晶胞的晶格参数发生了变化。这种变化是由于少量 Dy 原子扩散进入磁体取代 Nd 原子的位置，在晶粒外延形成(Nd,Dy)₂Fe₁₄B 相所致。因 Dy₂Fe₁₄B 相的晶格参数 a=0.8757 nm，c=1.1990 nm，比 Nd₂Fe₁₄B 相的晶格参数（a=0.8792 nm，c=1.2177 nm）小，所以在 Dy 原子取代以后，衍射峰会向大角度方向移动^[27-28]。

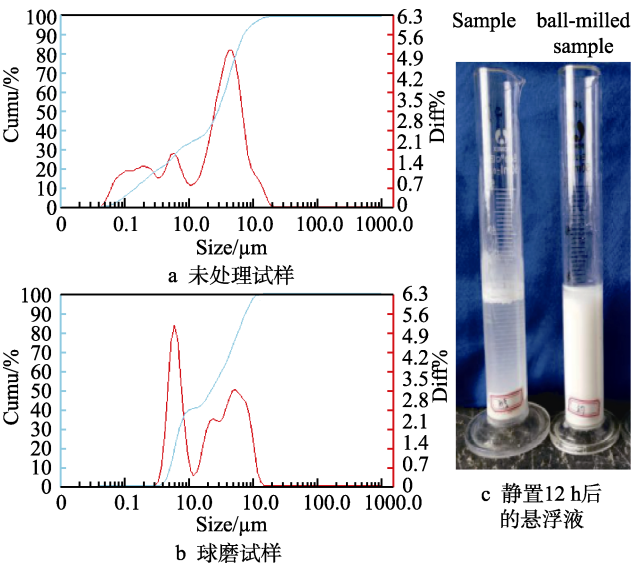


图 1 球磨处理前后 Dy₂O₃ 粉体的粒度分布图和静置 12 h 后的悬浮液光学照片
Fig.1 Particle size distribution of Dy₂O₃ powders before and after ball milling and optical pictures of suspension after standing for 12 h: a) untreated sample; b) ball-milled sample; c) suspension after standing for 12 h

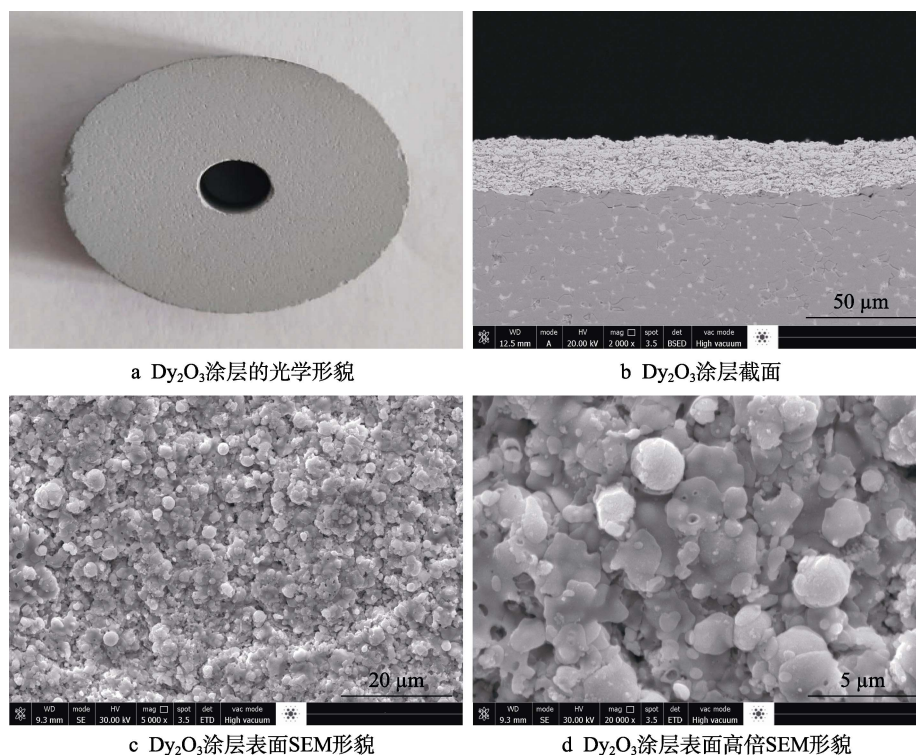


图 2 悬浮液等离子喷涂后烧结 Nd-Fe-B 磁体形貌

Fig.2 Morphology of sintered Nd-Fe-B magnet after suspension plasma spraying: a) optical picture; b) cross-section of the Dy₂O₃ coating; c) surface of the Dy₂O₃ coating; d) high-resolution SEM image of Dy₂O₃ coating surface

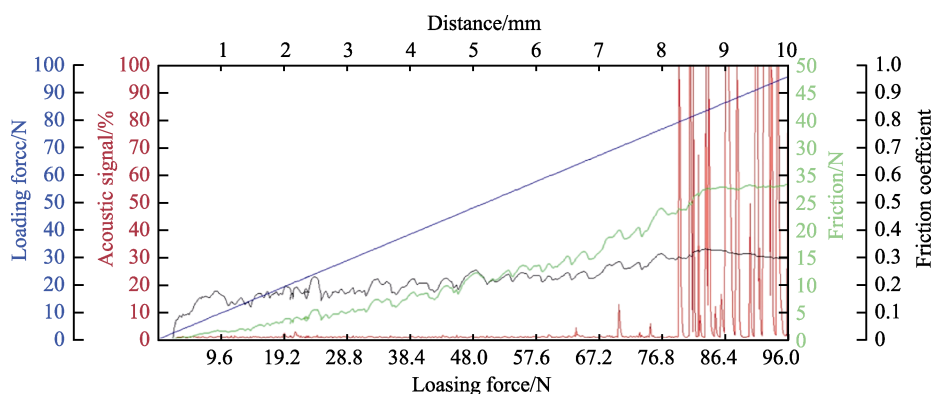


图 3 划痕试验结合力测试图

Fig.3 Scratch test adhesion test chart

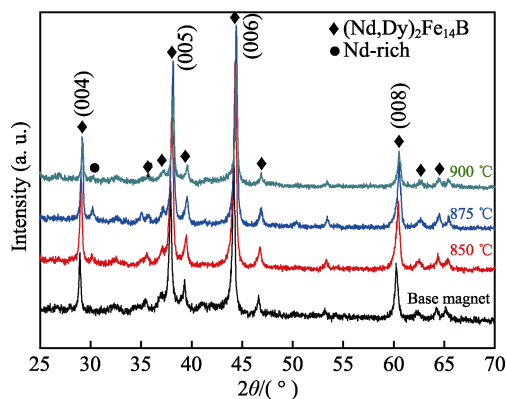


图 4 原始磁体和不同温度扩散后磁体的 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of the base magnet and diffused magnet at different temperatures

2.4 磁性能及微观结构分析

图 5 和表 2 给出了原始磁体和不同温度扩散 Dy₂O₃ 磁体的磁性能。原始磁体和每个扩散温度的磁体都测试了三个样品,且每个温度的三个磁体样品的磁性能差异不明显,取其平均值得到了矫顽力及剩磁。与原始磁体相比,扩散磁体的剩磁和最大磁能积虽略有降低,但矫顽力却有了一定程度的提升。随扩散温度的增加,矫顽力呈现先增加后降低的趋势。当扩散温度为 875 °C 时,磁性能最优,矫顽力由原始磁体的 1161.19 kA/m 提高到 1277.74 kA/m,剩磁降低 0.01 T。磁性能的提升与扩散后磁体微观结构的改变密不可分。图 6 为原始磁体和不同温度扩散后磁体截面的光学形貌。在红色标记范围内可以明显看出,热

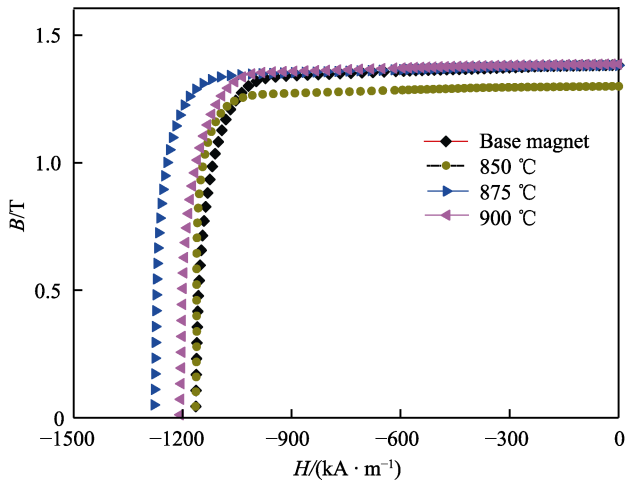


图 5 原始磁体和不同温度扩散后磁体的退磁曲线
Fig.5 Demagnetization curves of base magnet and diffused magnet at different temperatures

处理后，磁体内部的晶界相变得连续，相邻的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相晶粒能够被完全隔离开来。875 °C 的热处理使得晶界相的连续性明显增强，这有助于 Dy 元素晶界扩散的进行，一方面增加硬磁相主相晶粒的磁孤立作用，从而提升磁体的矫顽力；另一方面，大部分 Dy 元素沿晶界进行扩散，减少了 Dy 元素进入主相晶粒的量，降低了 Dy 元素与主相晶粒中 Fe 元素的反铁磁耦合作用，因此剩磁损失得很少。

表 2 原始磁体和扩散磁体的磁性能
Tab.2 Magnetic properties of the base magnet and diffusion magnet

Sample	B_r/T	$H_{ci}/(\text{kA}\cdot\text{m}^{-1})$	$(BH)_{\max}/(\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3})$
Base magnet	1.39	1161.19	384.13
850 °C	1.38	1163.32	382.65
875 °C	1.38	1277.74	383.27
900 °C	1.38	1204.71	382.95

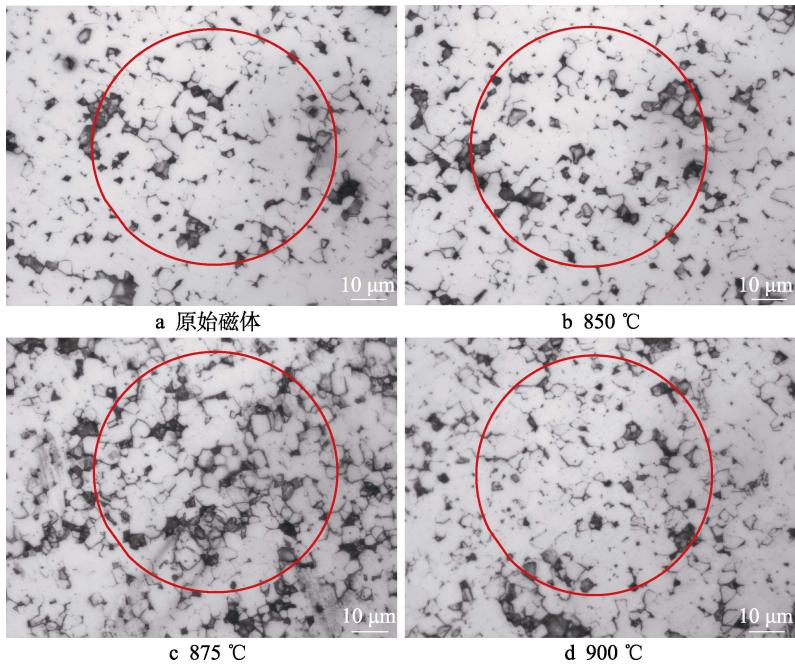


图 6 原始磁体和不同温度扩散后磁体截面的光学形貌
Fig.6 Cross-sectional optical pictures of base magnets and diffused magnets at different temperatures: a) base magnets

图 7 为 875 °C 热扩散后从磁体表面向磁体内部区域进行的线扫描结果。磁体表面在图片的右侧。从图谱中可以清晰看到，Dy 元素渗透了大约 20 μm 的深度。磁体更深处的 Dy 元素含量较低。图 8 为 875 °C 扩散后，截面上靠近表面处微区的 SEM 形貌及 EDS 线扫描结果。不难发现，此处形成了明显的核壳结构，壳层连续且较厚。通过对横穿整个晶粒的线扫描分析可知，在 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相晶粒的外围出现了较强的 Dy 元素峰。这表明，通过晶界扩散，Dy 元素已从磁体表面的 Dy_2O_3 涂层中到达磁体的内部，并且替代了在 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相晶粒外围的 Nd 元素，形成了富 Dy 的 $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相。众所周知，具有高磁晶各向异性场的 $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相的形成有助于获得高矫顽力的磁体。

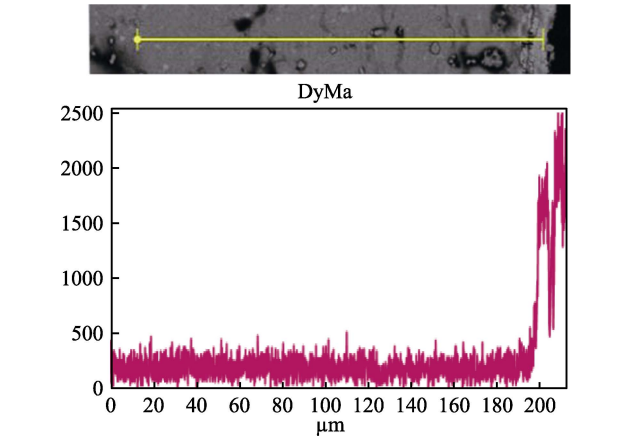


图 7 磁体表面到内部区域线扫描图
Fig.7 Line scan from the surface of the magnet to the inner area

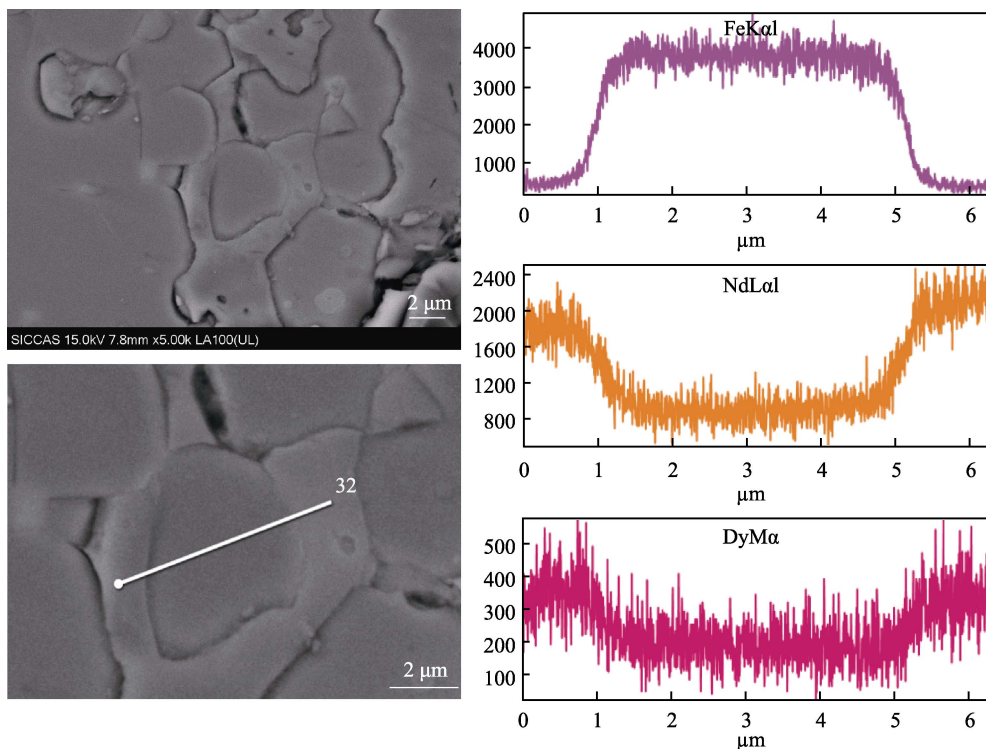


图8 875 °C扩散后磁体内部微区的SEM形貌和EDS线扫描图谱

Fig.8 SEM images and EDS line scan pattern of the micro-area inside the magnet after diffusion at 875 °C

3 结论

1) 利用悬浮液等离子喷涂技术在烧结 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁体表面制备了结构完整、厚度可控、结合力较高的 Dy_2O_3 涂层。

2) 875 °C 的晶界扩散使磁体的矫顽力从 1161.19 kA/m 提高到 1277.74 kA/m, 剩磁降低 0.01 T。矫顽力的提升主要来源于两方面, 一是磁体内部形成的连续的富 Nd 相晶界, 二是形成了高磁晶各向异性场 $(\text{Nd,Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 相壳层结构。

3) 悬浮液等离子喷涂-晶界扩散是一种能够控制涂层厚度且能绿色高效地制备高矫顽力 Nd-Fe-B 磁体的技术。

参考文献:

- [1] 屈鹏鹏, 曾亮亮, 黄祥云, 等. 晶界扩散 Dy-Al-Ga 对钕铁硼磁体的磁性能和微观组织的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(3): 64-68.
QU Peng-peng, ZENG Liang-liang, HUANG Xiang-yun, et al. Effect of Grain Boundary Diffusing Dy-Al-Ga on the Microstructure and Magnetic Properties of NdFeB Magnets[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(3): 64-68.
- [2] 张丽娇, 冒守栋, 杨丽景, 等. 磁控溅射法渗镨对烧结钕铁硼性能及显微结构的影响[J]. 稀土, 2018, 39(1): 90-97.
ZHANG Li-jiao, MAO Shou-dong, YANG Li-jing, et al. Microstructural and Magnetic Properties of Sintered Nd-Fe-B Magnets by Grain Boundary Diffusion with Sputtering Pure Dy[J]. Chinese Rare Earths, 2018, 39(1): 90-97.
- [3] 李家节, 郭诚君, 周头军, 等. 烧结钕铁硼磁体溅射渗镨工艺与磁性性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 17-20.
LI Jia-jie, GUO Cheng-jun, ZHOU Tou-jun, et al. Magnetic Properties and Dysprosium Infiltration of Sintered Nd-Fe-B Magnets by Magnetron Sputtering[J]. Materials Review, 2017, 31(4): 17-20.
- [4] 曹学静. 电泳沉积晶界扩散钕铁硼磁体磁性及机制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
CAO Xue-jing. Magnetic Properties and Mechanism of Diffusion Processed Sintered Nd-Fe-B Magnets by Electrophoretic Deposition[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [5] 李岩峰, 赖彬, 朱明刚, 等. 烧结钕铁硼磁体边界相的调控技术机制[J]. 稀有金属, 2015, 39(11): 988-992.
LI Yan-feng, LAI Bin, ZHU Ming-gang, et al. Mechanism on Control Technology of Grain Boundary Phase in Sintered Nd-Fe-B Magnets[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2015, 39(11): 988-992.
- [6] 陈虞才. 钕铁硼晶粒微细化技术的发展[C]//中国磁性材料与应用产业发展论坛文集. 上海: 中国电子材料行业协会, 2012: 75-82.
CHEN Yu-cai. Development of Nd-Fe-B Grain Refinement Technology[C]//China Magnetic Materials and Application Industry Development Forum. Shanghai: China Electronic Materials Industry Association, 2012: 75-82.
- [7] SCOTT D W, MA B M, LIANG Y L, et al. The Effects of Average Grain Size on the Magnetic Properties and Corrosion Resistance of NdFeB Sintered Magnets[J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(8): 5501-5503.
- [8] CHEN Ling, CAO Xue-jing, GUO Shuai, et al. Coercivity Enhancement of Dy-free Sintered Nd-Fe-B Magnets by

- Grain Refinement and Induction Heat Treatment[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-3.
- [9] ZHOU Tou-jun, QU Peng-peng, PAN Wei-mao, et al. Sintered NdFeB Magnets with Tb-Dy Double-layer Core/Shell Structure were Fabricated by Double Alloy Method and Grain Boundary Diffusion[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 856: 158191.
- [10] 彭聪. 钕铁硼电泳法晶界扩散渗镧研究[J]. 冶金与材料, 2020, 40(2): 29-30.
- PENG Cong. Grain Boundary Diffusion of Dysprosium Nd-Fe-B Sintered Magnet with Electrophoretic Deposition[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(2): 29-30.
- [11] 武秉晖, 肖松, 李伟东, 等. 磁控溅射镀铽在烧结钕铁硼中的晶界扩散研究[J]. 稀土, 2019, 40(1): 66-72.
- WU Bing-hui, XIAO Song, LI Wei-dong, et al. Study on the Grain Boundary Diffusion of Tb in Sintered NdFeB Magnet from a Magnetron Sputtered Coating[J]. Chinese Rare Earths, 2019, 40(1): 66-72.
- [12] 李建, 程星华, 周磊, 等. 晶界扩散 Dy 钕铁硼的高温磁性能研究[J]. 金属功能材料, 2018, 25(2): 20-25.
- LI Jian, CHENG Xing-hua, ZHOU Lei, et al. High Temperature Magnetic Properties of Dy Grain Boundary Diffused Nd-Fe-B Sintered Magnet[J]. Metallic Functional Materials, 2018, 25(2): 20-25.
- [13] 楼俊奕, 熊军, 田元丰, 等. 渗镧处理工艺参数对烧结 Nd-Fe-B 磁体结构与磁性能的影响[J]. 磁性材料及器件, 2019, 50(6): 5-8.
- LOU Jun-yi, XIONG Jun, TIAN Yuan-feng, et al. Dependence of Microstructure and Magnetic Properties of Sintered Nd-Fe-B Magnets on the Dy-diffusion Process Parameters[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2019, 50(6): 5-8.
- [14] 周军, 徐鹏, 孙红军, 等. 晶界扩散 Dy 合金对烧结 NdFeB 磁体磁性能的影响[J]. 金属功能材料, 2019, 26(2): 26-29.
- ZHOU Jun, XU Peng, SUN Hong-jun, et al. Influence of Grain Boundary Diffusing Dy Alloy on the Magnetic Properties of Sintered NdFeB Magnet[J]. Metallic Functional Materials, 2019, 26(2): 26-29.
- [15] LU Ke-chao, BAO Xiao-qian, CHEN Gui-xian, et al. Coercivity Enhancement of Nd-Fe-B Sintered Magnet by Grain Boundary Diffusion Process Using Pr-Tb-Cu-Al Alloys[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 477: 237-243.
- [16] SODERŽNIK M, KORENT M, ŽAGAR SODERŽNIK K, et al. High-coercivity Nd-Fe-B Magnets Obtained with the Electrophoretic Deposition of Submicron TbF₃ Followed by the Grain-boundary Diffusion Process[J]. Acta Materialia, 2016, 115: 278-284.
- [17] LÖWE K, BROMBACHER C, KATTER M, et al. Temperature-dependent Dy Diffusion Processes in Nd-Fe-B Permanent Magnets[J]. Acta Materialia, 2015, 83: 248-255.
- [18] 李建, 周磊, 刘涛, 等. 烧结钕铁硼晶界扩散 Dy 工艺进展[J]. 稀土, 2013, 34(3): 86-92.
- LI Jian, ZHOU Lei, LIU Tao, et al. Progress of Grain Boundary Diffusion Technique with Dy for Sintered Nd-Fe-B Magnet[J]. Chinese Rare Earths, 2013, 34(3): 86-92.
- [19] 章晓峰. 低熔点 Dy-Co 合金在烧结钕铁硼中的晶界改性研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- ZHANG Xiao-feng. Study on Grain Boundary Modification of Low Melting Point Dy-Co Alloy in Sintered Nd-Fe-B[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
- [20] 郭敬东. 磁控溅射法渗镧对烧结钕铁硼性能及显微结构的影响分析与研究[J]. 中国金属通报, 2020(6): 212-213.
- GUO Jing-dong. Analysis and Research on the Influence of Magnetron Sputtering Dysprosium on the Properties and Microstructure of Sintered Nd-Fe-B[J]. China Metal Bulletin, 2020(6): 212-213.
- [21] 程星华, 李建, 周磊, 等. 氧含量对烧结钕铁硼磁体 Dy 晶界扩散的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 2009-2013.
- CHENG Xing-hua, LI Jian, ZHOU Lei, et al. Influence of Oxygen Content on Dy Grain Boundary Diffusion in Nd-Fe-B Sintered Magnets[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 2009-2013.
- [22] 李建, 王琳, 周磊, 等. 钕铁硼电泳法晶界扩散渗镧研究[J]. 中国稀土学报, 2013, 31(3): 275-281.
- LI Jian, WANG Lin, ZHOU Lei, et al. Grain Boundary Diffusion of Dysprosium Nd-Fe-B Sintered Magnet with Electrophoretic Deposition[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2013, 31(3): 275-281.
- [23] YIN Xue, BAI Yu, ZHOU Sheng-jian, et al. Solubility, Mechanical and Biological Properties of Fluorinated Hydroxyapatite/Calcium Silicate Gradient Coatings for Orthopedic and Dental Applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2020, 29(3): 471-488.
- [24] 杨晖, 陈礼洲. 液相等离子喷涂制备纳米涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(9): 58-60.
- YANG Hui, CHEN Li-zhou. Progress in Research on Nano-coatings Prepared by Liquid Precursor Plasma Spraying[J]. Materials Review, 2008, 22(9): 58-60.
- [25] 李威, 叶卫平, 程旭东, 等. 悬浮液等离子喷涂热障涂层的沉积机制及热循环特性[J]. 材料保护, 2014, 47(6): 23-26.
- LI Wei, YE Wei-ping, CHENG Xu-dong, et al. Deposition Mechanism and Thermal Cycle Characteristics of Thermal Barrier Coatings Produced by Suspension Plasma Spraying[J]. Materials Protection, 2014, 47(6): 23-26.
- [26] 王超会. 悬浮液等离子喷涂 La₂Zr₂O₇/8YSZ 梯度热障涂层的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- WANG Chao-hui. Fabrication and Properties of Graded La₂Zr₂O₇/8YSZ Thermal Barrier Coatings by Suspension Plasma Spraying[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [27] 黄祥云, 何磊, 曾亮亮, 等. 晶界扩散 Dy₆₀Co₃₅Ga₅ 合金对烧结钕铁硼磁体磁性能及热稳定性的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(2): 104-109.
- HUANG Xiang-yun, HE Lei, ZENG Liang-liang, et al. Effect of Grain Boundary Diffusion Dy₆₀Co₃₅Ga₅ Alloys on Magnetic Properties and Thermal Stability of Sintered NdFeB Magnets[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2019, 10(2): 104-109.
- [28] JIN Chao-xiang, CHEN Ren-jie, YIN Wen-zong, et al. Magnetic Properties and Phase Evolution of Sintered Nd-Fe-B Magnets with Intergranular Addition of Pr-Co Alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 670: 72-77.