

高电阻率高矫顽力DyF₃/NdF₃夹层钕铁硼复合磁体研究

李鹏波¹, 毕斯诺¹, 郑立允^{1,2}, 周磊³, 刘涛³, 冯海波², 左志军^{4,5}, 李建³, 姜华^{4,5}, 赵立新^{1*}

¹河北工程大学稀土永磁材料与应用河北省工程研究中心, 河北 邯郸

²钢铁研究总院有限公司功能材料研究院, 北京

³安泰科技股份有限公司, 北京

⁴京磁材料科技股份有限公司, 北京

⁵廊坊京磁精密材料有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2025年11月6日; 录用日期: 2025年12月9日; 发布日期: 2025年12月18日

摘要

为了提高钕铁硼磁体的电阻率, 降低其在高频高速永磁电机工作时的涡流损耗和温升, 本文采用热压热变形工艺制备了含DyF₃/NdF₃复合绝缘夹层的高电阻率钕铁硼磁体, 研究了绝缘夹层成分、含量及热变形温度对磁体微观结构、磁性能、电阻率和抗弯强度的影响。结果表明, 随着DyF₃/NdF₃含量或者NdF₃占比的增大, 夹层钕铁硼复合磁体的电阻率逐渐提高, 当DyF₃/NdF₃比例为1:5、含量为 6.52×10^{-4} g/mm²时, 磁体电阻率最高, 为11.5 mΩ·cm。当DyF₃/NdF₃比例为1:5、1:3时, 磁体抗弯强度随添加量的增加呈先下降后增加变化, 复合粉体以1:1、3:1比例添加时, 磁体抗弯强度也是整体降低, 但随添加量的增加呈波动性变化。DyF₃/NdF₃含量越高, 对磁体的性能影响越大, 但是夹层钕铁硼复合磁体的矫顽力(H_{cj})都比较高, 最低也接近10 kOe。当DyF₃/NdF₃比例3:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm²时, 复合磁体最大磁能积(BH)_{max}最高, 为46.47 MGOe。热变形温度对夹层钕铁硼复合磁体的磁性能和电阻率影响较大, 在825℃热变形制备的夹层钕铁硼复合磁体的矫顽力最高, 为15.6 kOe, 在850℃热变形制备的夹层钕铁硼复合磁体的剩磁B_r、(BH)_{max}和电阻率最大, 分别达到了13.42 kGs、42.95 MGOe和9.37 mΩ·cm。

关键词

钕铁硼磁体, 氟化镱, 矫顽力增强机制, 电阻率, 复合夹层

Research on High Resistivity and High Coercivity DyF₃/NdF₃ Interlayered NdFeB Composite Magnets

Pengbo Li¹, Sinuo Bi¹, Liyun Zheng^{1,2}, Lei Zhou³, Tao Liu³, Haibo Feng², Zhijun Zuo^{4,5}, Jian Li³, Hua Jiang^{4,5}, Lixin Zhao^{1*}

*通讯作者。

文章引用: 李鹏波, 毕斯诺, 郑立允, 周磊, 刘涛, 冯海波, 左志军, 李建, 姜华, 赵立新. 高电阻率高矫顽力DyF₃/NdF₃夹层钕铁硼复合磁体研究[J]. 材料科学, 2025, 15(12): 2198-2210. DOI: 10.12677/ms.2025.1512234

¹Hebei Engineering Research Centre for Rare Earth Permanent Magnetic Materials & Applications, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

²Research Institute of Functional Materials, Central Iron & Steel Research Institute Group Co., Ltd., Beijing

³Advanced Technology & Materials Co., Ltd., Beijing

⁴Jingci Material Technology Co., Ltd., Beijing

⁵Langfang Jingci Precision Material Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: November 6, 2025; accepted: December 9, 2025; published: December 18, 2025

Abstract

In this paper, in order to enhance the resistivity of NdFeB magnets and reduce their eddy current losses and temperature rise during operation in high-frequency and high-speed permanent magnetic motors, high-resistivity NdFeB magnets with DyF₃/NdF₃ composite insulating interlayers through hot-pressing and hot-deformation processes have been fabricated. The effects of insulating interlayer composition, amount, and hot-deformation temperature on the microstructure, magnetic properties, resistivity and bending strength of the magnets are systematically investigated. The results show that as the DyF₃/NdF₃ amount or NdF₃ proportion increases, the resistivity of the interlayered NdFeB composite magnets gradually increases. When the DyF₃/NdF₃ ratio is 1:5 and the amount is 6.52×10^{-4} g/mm², the resistivity of the magnets reaches a maximum of 11.5 mΩ·cm. When the DyF₃/NdF₃ ratio is 1:5 or 1:3, the overall bending strength of the magnet initially decreases and then increases as the addition's amount increases. When the DyF₃/NdF₃ ratio is 1:1 or 3:1, the magnet's bending strength also generally decreases, but fluctuates with the increase of the addition's amounts. The higher the DyF₃/NdF₃ content, the greater the impact on the magnetic properties of the magnets, but the coercivity, H_{ci} , of the interlayered NdFeB composite magnets is relatively high, with a minimum value close to 10 kOe. When the DyF₃/NdF₃ ratio is 3:1 and the content is 3.26×10^{-4} g/mm², the maximum magnetic energy product, $(BH)_{max}$, of the composite magnets reaches a maximum of 46.47 MGOe. The hot-deformation temperature has a significant impact on the magnetic properties and resistivity of the interlayered NdFeB composite magnets. The coercivity of the interlayered NdFeB composite magnets hot-deformed at 825°C reaches a maximum of 15.6 kOe, while the remanence, B_r , $(BH)_{max}$ and resistivity of the interlayered NdFeB composite magnets hot-deformed at 850°C are the highest, reaching 13.42 kGs, 42.95 MGOe and 9.37 mΩ·cm, respectively.

Keywords

NdFeB Magnets, DyF₃, Coercivity Increase Mechanism, Resistivity, Composite Interlayer

Copyright © 2025 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

钕铁硼磁体是永磁电机装配的关键组件。在新能源汽车、风力发电、航空航天、电子信息、先进轨道交通、高档数控机床和人形机器人等战略领域具有不可替代的重要作用，尤其是牵引电机和发动机等旋转电力设备[1]。在当前全球推进新一轮科技革命与“碳中和”目标背景下，钕铁硼永磁材料已成为支撑产业变革的核心功能材料，同时构成了国际地缘政治竞争的关键技术要素。然而在高频高速电机中，

磁体运行时产生的涡流损耗会导致磁体局部温升[2],造成磁性能衰减,进而降低系统效率,这些问题已严重制约其在高端领域的应用拓展。

针对这一技术瓶颈,提高磁体电阻率是一种有效降低涡流损耗的方法。不论是粘结、热压/热变形,还是烧结磁体,基本都是通过在钕铁硼基体中引入高电阻率基元[3],目前,用于提高磁体电阻率的常用绝缘包覆材料包括有机聚合物和高电阻率无机物两大类。已报道的有机物主要是具有高电阻率和良好相容性的聚合物,常用的有绝缘环氧聚酯漆、聚乙烯醇缩丁醛等[4],Pan等[5]使用粘结技术,将环氧聚酯和聚偏丁醛作为绝缘剂,环氧树脂和硅烷偶联剂作为粘结剂,制作的钕铁硼磁体虽巨幅提升了磁体的电阻率,但磁性能损失严重,很难满足现在的牵引电机使用要求。无机物包括氟化物[6]、硫化物[7]、氧化物[8]等。Gabay等[7]通过在钕铁硼磁体中引入 CaS 、 Dy_2S_3 、 CaF_2 、 FeS 、 Fe_3P 和 MoS_2 绝缘层,发现硫化物、磷化物添加会形成 NdS 、 NdP 等,消耗磁体的钕,并使冶金结合降低,或造成不连续,难以提高电阻率;而 CaF_2 的引入,可以形成 $\text{Nd}_{1-x}\text{Ca}_x(\text{F},\text{O})_2$ 界面相,提高界面结合强度和电阻率。氧化物掺杂 Nd-Fe-B 复合磁体中,由于 Nd 极易与氧化物中的氧结合形成钕的氧化物,造成磁性主相和富钕相的损失,降低磁体性能[9],张等[10]采用晶间掺杂法在钕铁硼合金粉体中掺入 Al_2O_3 ,制备了 Al_2O_3 掺杂的烧结钕铁硼磁体,磁体电阻率随 Al_2O_3 掺杂量的增加而增大,但磁体的矫顽力先上升后下降。相对于氧化物、硫化物、磷化物来讲,氟化物与稀土永磁材料之间的惰性是最好的[11]。

但是,人们通常采用的是单一氟化物掺杂或夹层提高钕铁硼磁体的电阻率,少有用复合氟化物作为夹层提高钕铁硼磁体电阻率的报道[12],如Wang等[13]通过将 MQU-F 粉末与不同含量的 NdF_3 混合,作为添加层使用,随着 NdF_3 添加量的增加,由于形成了连续的分段氟化物层,电阻率单调上升,磁能积和剩磁单调下降,而矫顽力有所上升,Kautsar等[14]通过用电泳沉积将 DyF_3 涂覆在 Nd-Fe-B 熔体快速凝固薄片上并且和掺杂 DyF_3 以及无处理的磁粉作为对照组,将磁粉进行热变形,不仅成功提高了各向异性 Nd-Fe-B 基磁体在 c 轴平行和垂直方向的电阻率,矫顽力也有所增加。因此,本文采用 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体作为夹层制备了热压夹层钕铁硼复合磁体,研究 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体含量、比例和热变形温度对于磁体磁性能、电阻率以及力学性能的影响,探讨了磁体矫顽力增强机制,为开发新一代高效永磁器件提供理论支撑。

2. 实验

实验采用 DyF_3 和 NdF_3 粉体纯度均为99.99%,选择了不同含量及成分比例的 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 夹层钕铁硼复合磁体。制备热压钕铁硼磁体的步骤如下:1)首先在 $500^\circ\text{C}\sim 600^\circ\text{C}$ 、 350 MPa 真空条件下热压制备各向同性热压磁体;2)将制备的热压磁体沿垂直于后续热变形压力方向水平切开获得两个小毛坯,将切开的毛坯表面用砂纸打磨光滑,清洁干燥处理;3)根据不同比例和不同含量称取所需的 DyF_3 和 NdF_3 并在研钵中进行充分混合,将粉体混合好后在其表面滴几滴丙酮使其润湿,利用药品勺将润湿后的粉体置于切开的毛坯表层,轻微按压使得粉体能够水平均匀地覆盖在毛坯层表面,然后将两个毛坯重新拼接在一起;4)将含有夹层的毛坯在 $800^\circ\text{C}\sim 900^\circ\text{C}$ 、 350 MPa 进行变形,变形时间为 80 s ,制备出具有一层水平致密绝缘层的夹层钕铁硼复合磁体。

采用电火花线切割机于样品中心处切割出 $\Phi 6\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的测试用样,使用 FT-300A1 导电材料电阻率测试仪和四探针电阻率测试仪对试样进行电阻率测试;采用 PM-1 脉冲充磁机进行充磁,采用 NIM-6200C 永磁精密测试仪进行磁性能测试,获得退磁曲线。采用电火花线切割机从样品上切下长度为 19 mm 、宽度为 6 mm 、高度为 5 mm 抗弯强度测试样品,在 MTS880-25T 万能试验机上采用三点抗弯试验进行测定;使用 $\text{Olympus Corporation}$ 全自动金相显微分析系统对夹层钕铁硼复合磁体进行断面微观形貌分析和夹层厚度测量,夹层厚度采用同一放大倍数下测量10个位置厚度的平均值。

3. 结果与讨论

3.1. DyF₃/NdF₃ 复合夹层含量对钕铁硼磁体电阻率和磁性能的影响

表 1 为 DyF₃/NdF₃ 复合粉不同比例、不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的夹层厚度和电阻率，从表 1 可以看出，随着夹层添加含量的提高，夹层厚度逐渐增大，DyF₃/NdF₃ 夹层钕铁硼复合磁体的电阻率都比不含夹层的纯钕铁硼磁体大一个数量级，当 DyF₃/NdF₃ 含量为 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时，复合磁体的电阻率达到最大，为 $11.5 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ ，可见氟化物复合夹层对磁体的电阻率提升效果显著。

Table 1. Interlayer thicknesses and resistivities of the interlayered NdFeB composite magnets with different amounts and ratios of DyF₃/NdF₃

表 1. 不同含量和比例的 DyF₃/NdF₃ 夹层钕铁硼复合磁体的夹层厚度和电阻率

DyF ₃ /NdF ₃ 比例		DyF ₃ /NdF ₃ 含量(10^{-4} g/mm^2)			
		0.815	1.63	3.26	6.52
夹层厚度(μm)	1:5	25.96	41.58	60.19	67.07
	1:3	41.33	41.65	62.93	70.99
	1:1	19.30	34.82	50.31	53.64
	3:1	33.46	36.32	58.38	73.27
电阻率($\text{m}\Omega\cdot\text{cm}$)	1:5	8.55	2.13	6.25	11.5
	1:3	1.25	5.22	5.43	11.24
	1:1	3.78	6.32	9.37	10.15
	3:1	0.21	0.37	0.46	1.81

图 1 为 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:5 时不同含量的 DyF₃/NdF₃ 夹层钕铁硼复合磁体断面(平行于压力方向)金相照片。从图 1 可以看出，DyF₃/NdF₃ 夹层的衬度是黑色，夹层表面却更显得十分粗糙，夹层粉体呈颗粒状分布其中，层间可以看到有灰白色的小点分布于其中，另外在夹层边缘存在小块状的凸起。

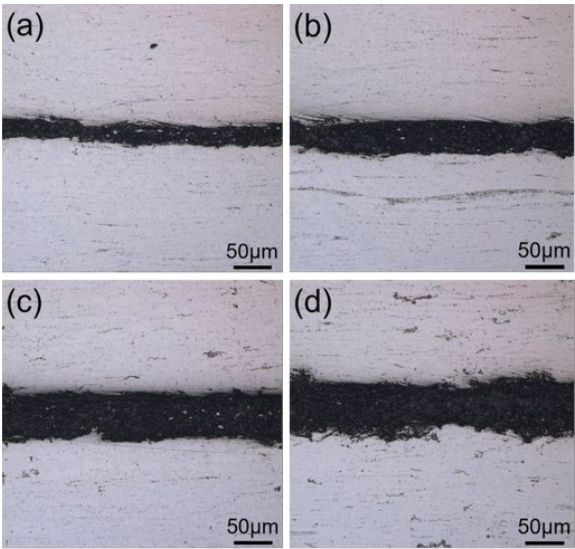


Figure 1. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of (a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ and (d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ of DyF₃/NdF₃ at a ratio of 1:5

图 1. DyF₃/NdF₃ 比例为 1:5，含量为(a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 和(d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 的夹层钕铁硼复合磁体断面金相图

图 2(a)为 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:5 时不同含量的钕铁硼磁体磁性能变化曲线。由图 2(a)可以看出,随着 DyF₃/NdF₃ 含量的增加,磁体的矫顽力 H_{cj} 整体持续升高且保持在 10 kOe 以上,原因是随着 DyF₃ 含量的增加,在高温高压外力条件下, DyF₃ 在升高温度下分解[14], Dy 部分取代 Nd 进入主相晶粒表层,通过形成(Nd, Dy)₂Fe₁₄B 壳层结构增强磁晶各向异性场,抑制反磁化畴形核,提高了磁体的矫顽力[15],矫顽力最高达到了 10.6 kOe,但是由于夹层原因,矫顽力提升的十分有限。磁体的剩磁 B_r 以及最大磁能积 $(BH)_{max}$ 随着含量的增大呈现先增大后减小的趋势,当含量为 $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 有略微提高,剩磁 B_r 和最大磁能积 $(BH)_{max}$ 分别从 13.42 kGs、43.03 MGOe 提高到了 13.63 kGs、44.1 MGOe,而后随着含量的增加迅速下降,这是由于氟化物的存在还是会影响到磁体的组织,当含量增加到 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时,复合磁体的 B_r 和 $(BH)_{max}$ 分别下降到 13.08 kGs、40.79 MGOe。图 2(b)为 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:5 时不同含量的钕铁硼磁体抗弯强度变化图,可以看到在零添加量时磁体的抗弯强度最高,添加复合粉体后为先下降后上升变化,结合图 1 磁体金相图可以看到夹层见有一些灰色的主相,导致夹层区域变得并不致密,随着复合粉体添加量的增加,一些粉体扩散进上下磁体中,由于晶界钉扎效应提高矫顽力的同时,也提升了磁体的抗弯强度[9]。

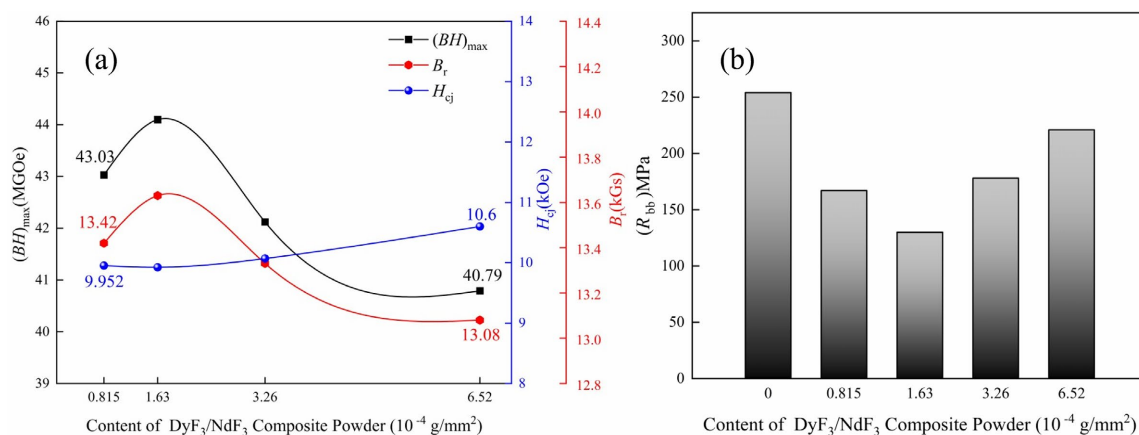


Figure 2. (a) Magnetic property curves of the interlayered NdFeB composited magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ at a ratio of 1:5; (b) Flexural strength plots of interlayered NdFeB composited magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ at a ratio of 1:5

图 2. (a) DyF₃/NdF₃ 比例为 1:5 时不同含量夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线; (b) DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:5 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的抗弯强度图

图 3 是 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:3 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体断面金相照片。由图 3 可以看出,随着 DyF₃ 占比的提高,夹层中心出现有更大区域的灰白色,随着含量的增加,该现象越来越明显,另外在添加含量达到 $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时,夹层边缘区域也出现了扩散现象,这种现象如同添加 Sm 元素相同[9],说明 Dy 元素除了与主相发生反应,还有部分扩散到主相间,这也就导致了磁体间的夹层对于电流的阻碍几乎没有,电阻率更低。

图 4(a)为 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:3 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体磁性能曲线。由图 4(a)可以看出,随着夹层 DyF₃/NdF₃ 含量的增加,磁体的矫顽力 H_{cj} 整体大幅下降后保持稳定,当 DyF₃/NdF₃ 含量为 $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时,磁体的矫顽力高达 14.24 kOe,结合图 3 可知,该含量的复合磁体夹层较紧密,致密化隔离层的存在阻碍了磁体间晶粒耦合,抑制了反磁化畴的扩展,另外还会与主相反应提高磁体的矫顽力;随着含量的提高,夹层致密度降低,无法起到有效阻隔电子输运的作用,但是磁体的矫顽力仍然保持在 10 kOe 以上,相较于 SmF₃/NdF₃ 夹层钕铁硼复合磁体的矫顽力更高[9]。

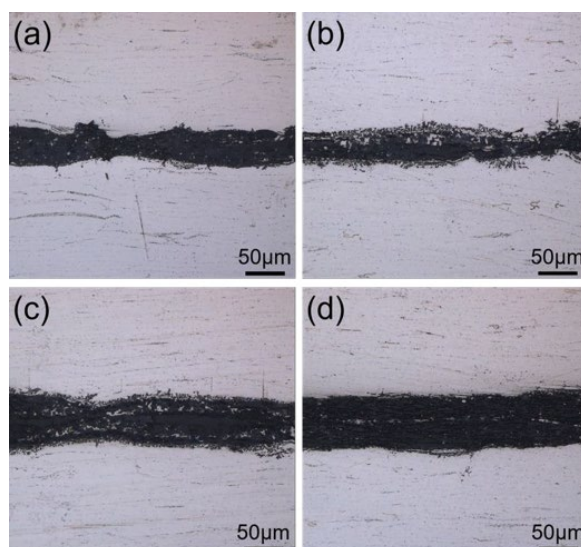


Figure 3. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of (a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ and (d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ of $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ at a ratio of 1:3

图 3. $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:3, 含量为(a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 和(d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 的夹层钕铁硼复合磁体断面金相图

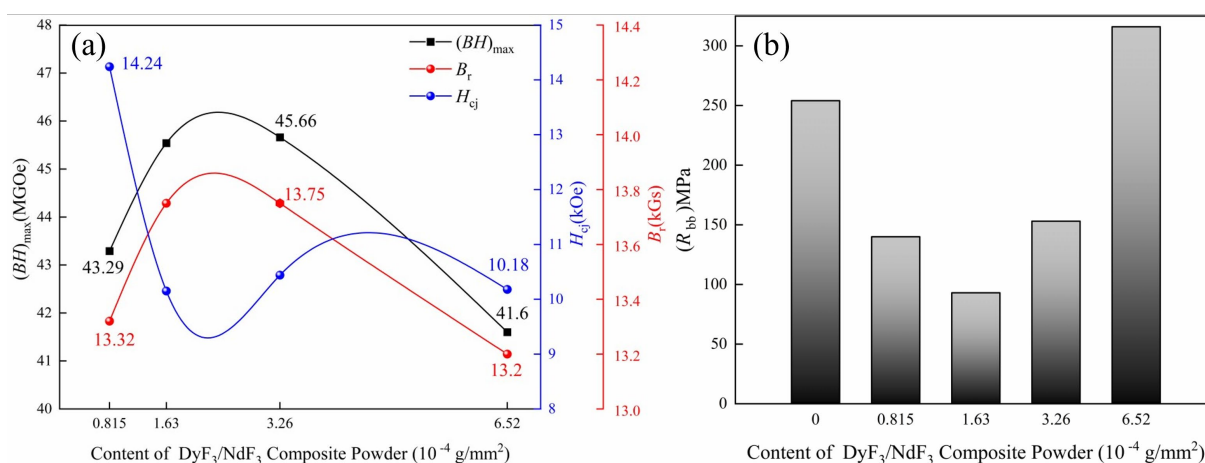


Figure 4. (a) Magnetic property curves of interlayered NdFeB composite magnets with different amounts of $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ at a ratio of 1:3; (b) Flexural strength plots of interlayered NdFeB composite magnets different amounts of $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ at a ratio of 1:3

图 4. (a) $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:3 时不同含量夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线; (b) $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:3 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的抗弯强度图

$\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 夹层复合磁体的 B_r 以及 $(BH)_{\max}$ 随着 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量的增加先升高后降低, 在添加含量 $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 绝缘层的致密度下降导致磁体矫顽力降低的同时, 提高了磁体的剩磁以及磁能积, 添加含量 $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 和 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的剩磁达到了 13.75 kGs 左右, 相较于添加含量为 $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时提高了 0.43 kGs, 而磁体的 $(BH)_{\max}$ 达到了 45.55 MGOe 左右, 提高了 2.3 MGOe, 但是添加含量达到 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的剩磁和最大磁能积大幅下降, 含量过高的氟化物夹层也会大幅影响了磁体的性能。图 4(b) 为 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:3 时不同含量的钕铁硼磁体抗弯强度变化图, 可以看出随夹层复合粉体添加含量的增加, 磁体的抗弯强度同样呈现先下降后上升的变化, 添加含量为 1.63×10^{-4}

g/mm^2 时, 磁体的抗弯强度降低到了 93 MPa, 结合图 3 可以发现, 夹层中间的灰白色主相比比例为 1:5 的磁体的要多, 夹层边缘的扩散现象也较比例为 1:5 的磁体的明显, 主要是由于层间密度下降, 添加含量达到 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的抗弯强度增加超过了纯粉制备磁体的抗弯强度, 达到了 316 MPa, 结合表 1 可以看出, 添加含量为 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的夹层区域厚度与添加含量为 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 的夹层厚度相差甚小, 层间灰白色主相区域占比也减小, 夹层区域结合得更加致密, 导致磁体的抗弯强度增大。

从表 1 可知, 当 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:1 时, 随着 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量的增大, 钕铁硼磁体夹层厚度和电阻率依旧稳定增高, 平均厚度与其余比例组基本无差距, 磁体电阻率提高到了 $10.15 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$ 。图 5 是 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:1 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的断面金相照片, 从图 5 可以看出, 当 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:1 时, 绝缘夹层区域相较于 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:3 组较疏松, 在 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量为 $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时就出现了明显扩散, 说明采用 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 与 $\text{SmF}_3/\text{NdF}_3$ 复合夹层相似[9], 随着 DyF_3 的占比增加、含量增大, 夹层边缘区域也会出现扩散。另外, 层间灰白色主相区域增大, 这也就导致了夹层所能起到提高电阻率的作用更低。

图 6(a) 为 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:1 时不同含量的钕铁硼磁体磁性能曲线。由图 6(a) 可以看出, 随着添加含量的增加, 磁体的 H_{cj} 从 9.68 kOe 升高到 10.46 kOe, 同样是因为 DyF_3 粉体的作用。随着 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量的增加, 磁体的 B_r 和 $(BH)_{\text{max}}$ 整体呈现下降趋势, 当 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量达到 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的 B_r 和 $(BH)_{\text{max}}$ 降到最低, B_r 从 13.82 kGs 降低到了 13.05 kGs, 下降了 5.5%, $(BH)_{\text{max}}$ 从 45.91 MGOe 降低到了 40.07 MGOe, 下降了 12.7%。当 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量为 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时有略微提高, B_r 从 13.28 kGs 提高到了 13.42 kGs, 磁体的最大磁能积 $(BH)_{\text{max}}$ 从 41.41 MGOe 提高到了 42.95 MGOe。图 6(b) 为 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:1 时不同含量的钕铁硼磁体抗弯强度变化图, 夹层磁体抗弯强度波动性变化, 由图中可以看出, 在添加含量为 $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的抗弯强度下降到了 135 MPa, 比其余添加含量的夹层磁体的抗弯强度都要低, 结合图 5(a), 磁体的夹层松散以及有严重的扩散, 而且夹层的厚度最低, 所以其抗弯强度最低。添加含量在 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 磁体的抗弯强度略高于 $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 虽然在添加含量在 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时磁体的夹层区域结合较为松散, 但是磁体夹层间的复合粉体与钕铁硼主相结合得更加充分, 添加含量达到 $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 并没有像添加 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:3 时, 磁体的抗弯强度有大幅的增加, 但是也有略微提高。

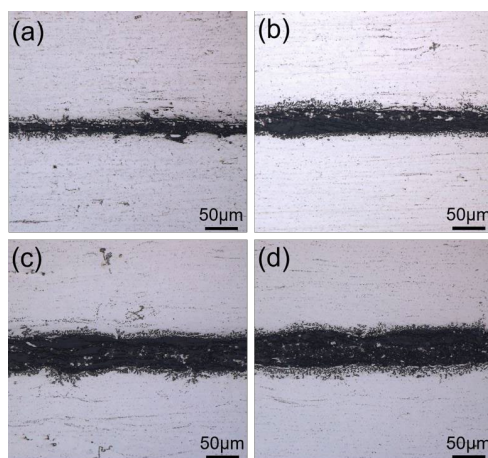


Figure 5. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of (a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$, (c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ and (d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ of $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ at a ratio of 1:1

图 5. $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 比例为 1:1, 含量为(a) $0.815 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(b) $1.63 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 、(c) $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 和(d) $6.52 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 的夹层钕铁硼复合磁体断面金相照片

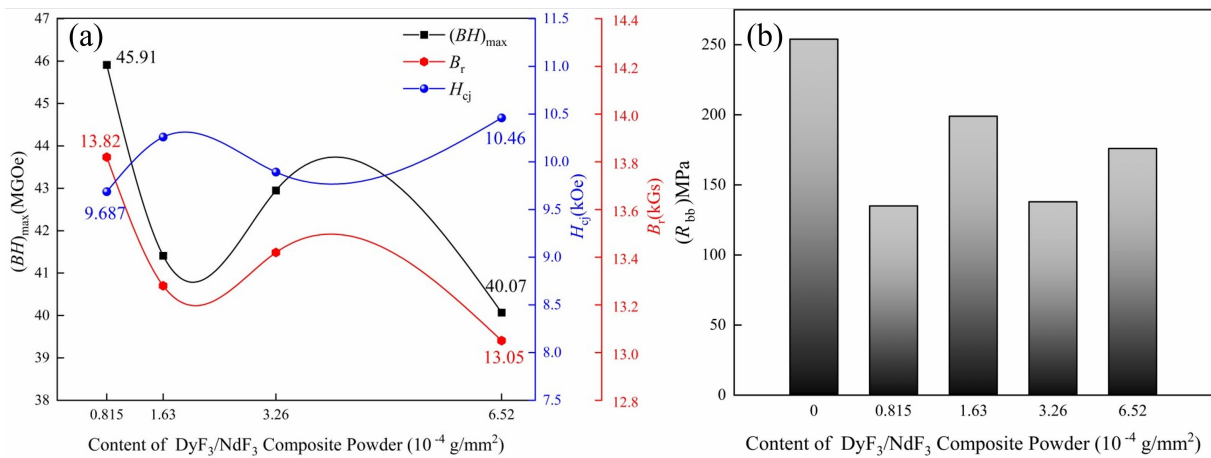


Figure 6. (a) Magnetic property curves of the interlayered NdFeB composite magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ at ratio of 1:1, (b) Flexural strength plots of interlayered NdFeB composite magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ composite powder at a 1:1 ratio

图 6. (a) DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1 时不同含量夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线; (b) DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:1 时不同含量夹层钕铁硼复合磁体的抗弯强度图

图 7 是 DyF₃/NdF₃ 比例为 3:1 时夹层复合磁体的断面金相照片, 从图 7 可以看出, 随着 DyF₃/NdF₃ 含量的增加, 磁体绝缘夹层区域变得不致密, 边缘区域的扩散现象更加明显。结合表 1 中的电阻率可以看出, 当 DyF₃/NdF₃ 含量为 0.815×10^{-4} g/mm² 时, 磁体的电阻率仅为 0.21 mΩ·cm, 相较于纯钕铁硼磁体电阻率提升较小, 说明复合粉体中 DyF₃ 粉体占比越高, 磁体的电阻率提升效率越低。

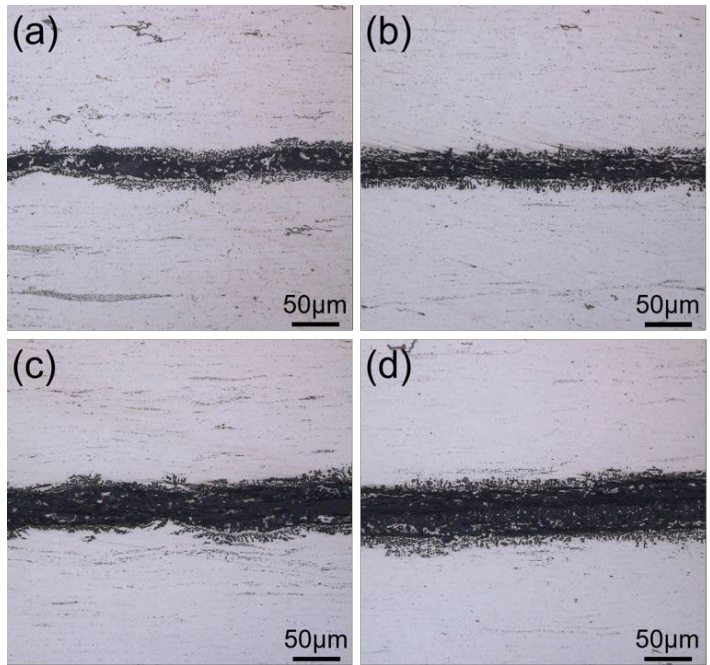


Figure 7. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of (a) 0.815×10^{-4} g/mm², (b) 1.63×10^{-4} g/mm², (c) 3.26×10^{-4} g/mm² and (d) 6.52×10^{-4} g/mm² of DyF₃/NdF₃ at a ratio of 3:1

图 7. DyF₃/NdF₃ 比例为 3:1, 含量为(a) 0.815×10^{-4} g/mm²、(b) 1.63×10^{-4} g/mm²、(c) 3.26×10^{-4} g/mm² 和(d) 6.52×10^{-4} g/mm² 的夹层钕铁硼复合磁体断面金相照片

图 8(a)为 DyF₃/NdF₃ 比例为 3:1 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体磁性能曲线。由图 8(a)可以看出,随着 DyF₃/NdF₃ 含量的增加,磁体的 H_{cj} 整体还是十分的平稳,稍有下降,从 11.06 kOe 降低到 10.47 kOe。磁体的 B_r 和(BH)_{max} 随着 DyF₃/NdF₃ 含量的增加而降低,当 DyF₃/NdF₃ 含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时,磁体的 B_r 从 13.56 kGs 提高到了 13.83 kGs,而磁体的最大磁能积(BH)_{max} 从 44.05 MGOe 提高到了 46.47 MGOe,提高了 2.5 MGOe 左右。当 DyF₃/NdF₃ 含量达到 6.52×10^{-4} g/mm² 时,磁体的 B_r 和(BH)_{max} 便大幅下降,B_r 降低到了 12.83 kGs,(BH)_{max} 降低到了 38.9 MGOe。图 8(b)为 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时不同含量的钕铁硼磁体抗弯强度变化图,从图中可以看出,磁体的抗弯强度都有所下降,磁体的夹层区域的复合粉体相较于添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:1 虽然更加的松散以及更严重的扩散,但是夹层磁体的抗弯强度要更高一些,原因是比例的不同,在添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时,对于磁体的抗弯强度影响较轻。

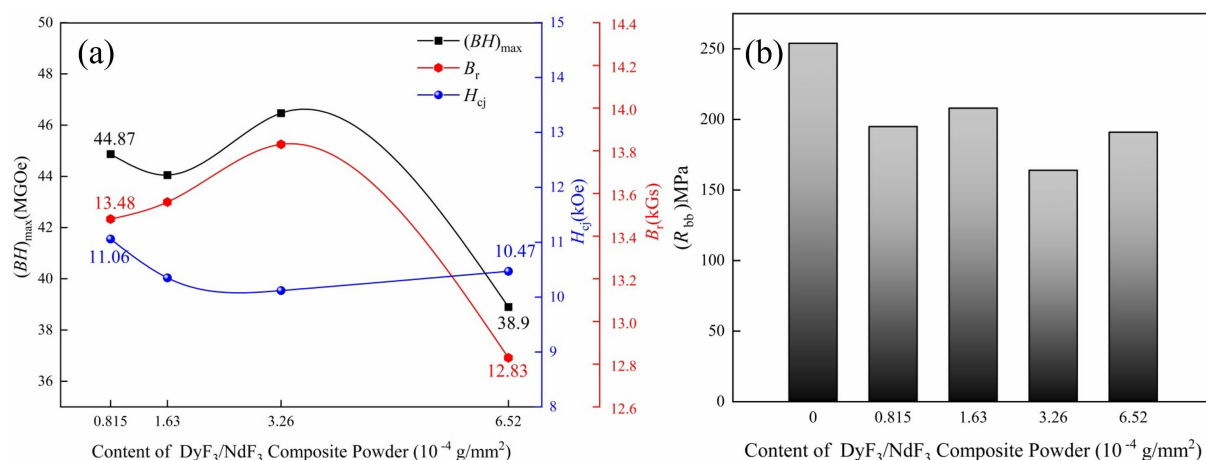


Figure 8. (a) Magnetic property curves of the interlayered NdFeB composite magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ at a ratio of 3:1; (b) Flexural strength plots of interlayered NdFeB composite magnets with different amounts of DyF₃/NdF₃ composite powder at a 3:1 ratio

图 8. (a) DyF₃/NdF₃ 比例为 3:1、不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线; (b) DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时不同含量的夹层钕铁硼复合磁体的抗弯强度图

3.2. DyF₃/NdF₃ 复合夹层成分比例对钕铁硼磁体的影响

当 DyF₃/NdF₃ 含量保持 3.26×10^{-4} g/mm² 不变时,研究了成分配比 DyF₃/NdF₃ 为 3:1、1:1、1:3 和 1:5 的夹层钕铁硼复合磁体的磁性能和电阻率。由表 1 可知,当 DyF₃/NdF₃ 含量保持 3.26×10^{-4} g/mm² 时,随着 DyF₃/NdF₃ 的比例增大,绝缘夹层的平均厚度相差不大,在 60 μm 左右,复合磁体的电阻率却逐渐降低。但当 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1 时,磁体的绝缘夹层厚度较低,为 50.31 μm,说明夹层更致密,这可能是其电阻率提高的原因。

图 9 为 DyF₃/NdF₃ 含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时不同比例的夹层复合磁体断面金相照片。从图 9 可以看出,磁体夹层间存在着一些灰白色的小点,这些灰白色的点是钕铁硼主相,原因可能为 DyF₃ 粉体中的 Dy 元素部分取代了钕铁硼磁体中的 Nd 元素生成了 (Dy, Nd)₂Fe₁₄B 相,随着 DyF₃ 占比的提高,绝缘夹层间出现了越来越多的灰白色主相,同时夹层边缘区域的扩散更加严重,导致夹层区域的致密度大幅下降,对于电流的阻碍降低,所以电阻率也随着复合粉体中 DyF₃ 的占比提高而降低。

图 10(a)为相同含量下不同比例的 DyF₃/NdF₃ 复合粉体制备的夹层钕铁硼磁体的磁性能。由图 10(a)可以看出,添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体制备磁体的性能都较优异,每个比例的磁体的最大磁能积都在 42 MGOe 以上,在添加比例为 3:1 时达到了最高,为 46.67 MGOe。相较于添加 SmF₃/NdF₃ 夹层制备的磁体

的性能要高,磁体的矫顽力基本保持在 10 kOe 以上, DyF_3 粉体的添加有利于磁体的矫顽力,磁体的剩磁 B_r 也十分优异,不同比例的磁体剩磁都达到了 13 kGs。图 10(b)为相同含量下不同比例的 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体制备的夹层钕铁硼磁体抗弯强度图。可以从图中看出,添加 $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体比例为 1:5 时,磁体的抗弯强度为 245 MPa,相较于纯粉制备的磁体的 258 MPa 只是略微下降,随着 DyF_3 粉体占比的提高,磁体的抗弯强度大幅度下降,添加比例为 1:1 时,磁体的抗弯强度最低,为 138 MPa。结合图 9 夹层复合磁体断面金相照片,可知复合粉体比例为 1:5 时夹层表现为均匀致密,而其他三个比例的金相照片中的夹层都或多或少地向上下磁体扩散,且复合粉体中夹杂着灰白色磁体主相,这是影响磁体抗弯强度的关键因素。

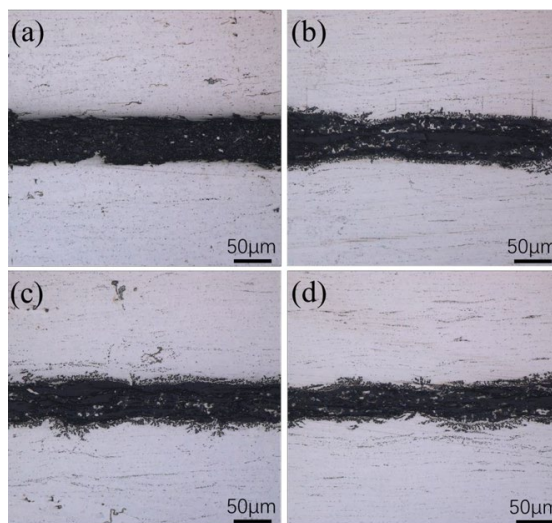


Figure 9. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ of $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ at ratios of (a) 1:5, (b) 1:3, (c) 1:1 and (d) 3:1

图 9. $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 含量为 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 比例为(a) 1:5、(b) 1:3、(c) 1:1 和(d) 3:1 的夹层钕铁硼复合磁体断面金相照片

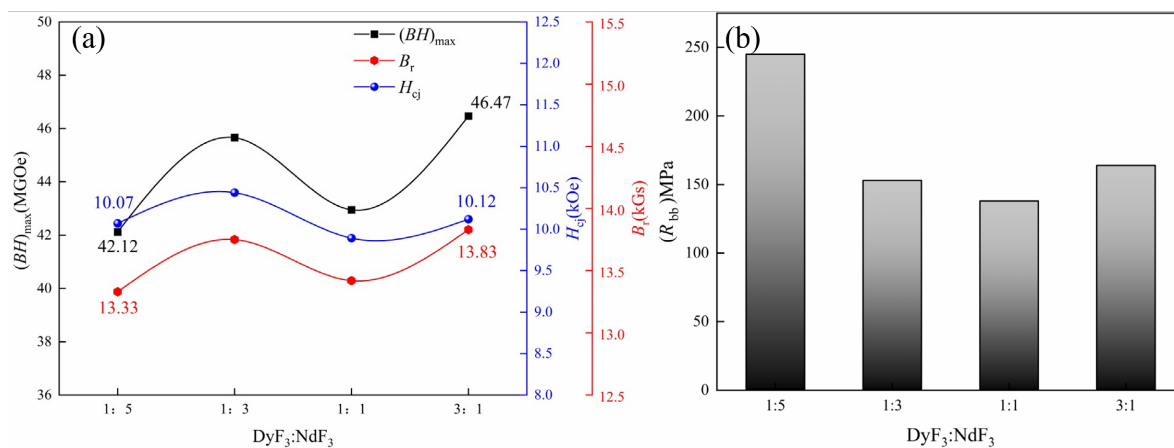


Figure 10. (a) Magnetic property curves of the interlayered NdFeB composite magnets with $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ composite powder content of $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ at ratios of 1:5, 1:3, 1:1 and 3:1; (b) Flexural strength plots of interlayered NdFeB composite magnets with $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ composite powder content of $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ at ratios of 1:5, 1:3, 1:1, and 3:1

图 10. (a) $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体含量为 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 比例为 1:5、1:3、1:1 和 3:1 的夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线; (b) $\text{DyF}_3/\text{NdF}_3$ 复合粉体含量为 $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$ 时, 比例为 1:5、1:3、1:1 和 3:1 的夹层钕铁硼复合磁体的抗弯强度图

3.3. 热变形温度对 DyF₃/NdF₃ 夹层钕铁硼复合磁体的影响

本实验同样选择了在 800℃、825℃和 850℃下进行热变形实验制备夹层磁体，选择了 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 的情况进行探究。表 2 列出了 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时不同热变形温度的夹层钕铁硼磁体的夹层厚度和电阻率。由表 2 可知，在添加含量相同的情况下，磁体夹层的平均厚度在 800℃和 825℃时相差只有 2 μm 左右，但是当热变形温度提高到 850℃时，磁体的平均厚度降低了 20 μm 左右，为 50.31 μm，说明温度的升高促进了夹层与磁体的结合，另外磁体的电阻率随着温度的升高明显提高，800℃下磁体电阻率为 4.32 mΩ·cm，升高到 850℃时，磁体电阻率最高，达到了 9.37 mΩ·cm。

Table 2. Interlayer thickness and resistivity of the interlayered NdFeB magnets with a ratio of 1:1 and amount of 3.26×10^{-4} g/mm² of DyF₃/NdF₃ prepared at different hot-deformation temperatures

表 2. DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时不同热变形温度的夹层钕铁硼磁体的夹层厚度和电阻率

热变形温度(℃)	800	825	850
夹层平均厚度(μm)	71.33	73.95	50.31
电阻率(mΩ·cm)	4.32	5.15	9.37

图 11 是 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时不同热变形温度下夹层复合磁体断面金相照片。从图 11 可以看出，在 800℃时，夹层间存在十分明显的灰白色主相区域，随着变形温度的增加，从 800℃升高到 850℃，磁体夹层间的灰白色主相区域大幅减少，另外磁体夹层边缘区域出现了较明显的扩散现象，说明温度升高促进了磁体间结合的同时，也促进了 Dy 元素的反应与扩散。

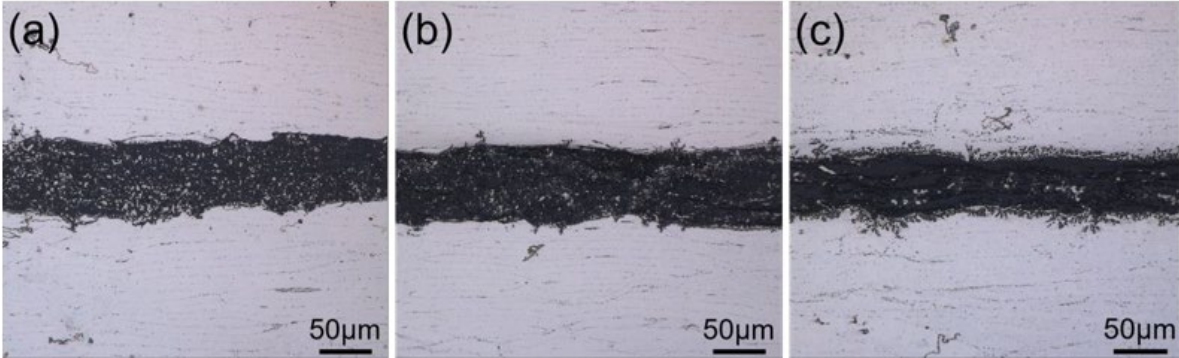


Figure 11. Metallographic images of the cross-section of the interlayered NdFeB composite magnets with an amount of 3.26×10^{-4} g/mm² and a ratio of 1:1 of DyF₃/NdF₃ prepared at hot-deformed temperatures of (a) 800℃, (b) 825℃, and (c) 850℃

图 11. 在(a) 800℃、(b) 825℃、(c) 850℃热变形制备的 DyF₃/NdF₃ 含量为 3.26×10^{-4} g/mm²、比例为 1:1 的夹层复合磁体断面金相照片

图 12 为 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时不同热变形温度下钕铁硼磁体的磁性能曲线。由图 12 可以看出，随着热变形温度的升高，磁体的矫顽力 H_{cj} 先提高后降低，在 825℃下 H_{cj} 最高，达到了 15.6 kOe，温度升高到 850℃时大幅下降，可能是由于高温下主相晶粒异常长大，磁畴尺寸增大，反磁化畴扩展阻力降低。磁体的 B_r 和 (BH)_{max} 随着热变形温度的升高先降低后提高，在热变形温度为 850℃下达到最高，B_r 为 13.42 kGs，是由于高温下会促进塑性变形与动态再结晶，增强晶粒 c 轴取向，提升 B_r。(BH)_{max} 为 42.95 MGOe，说明热变形温度的提高有利于提高磁体的整体性能，而且温度的提高会使绝缘夹层致密化减少导电通道，电阻率随之提高。

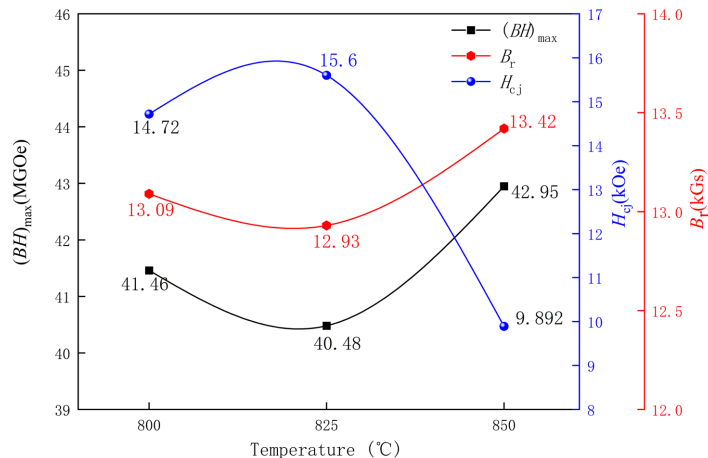


Figure 12. Magnetic property curves of the interlayered NdFeB composite magnets with a ratio of 1:1 and an amount of 3.26×10^{-4} g/mm² of DyF₃/NdF₃ prepared at different hot-deformed temperatures

图 12. 在不同热变形温度下制备的 DyF₃/NdF₃ 比例为 1:1、含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 的夹层钕铁硼复合磁体的磁性能曲线

4. 总结

通过使用夹层的方式添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体进行制备热压夹层复合钕铁硼磁体,研究了 DyF₃/NdF₃ 复合夹层含量、成分比例和热变形温度对于夹层复合磁体磁性能、电阻率以及力学性能的影响,获得以下结论:

- 1) 随着复合粉体的含量增大,或者 NdF₃ 占比的提高,夹层复合磁体的电阻率增大,当 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:5、含量为 6.52×10^{-4} g/mm² 时,夹层复合磁体的电阻率最高,达到了 11.5 mΩ·cm。当同含量复合粉体不同比例,且比例为 1:5 时,磁体的抗弯强度为四个比例中最高,达到 245 MPa。
- 2) 添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体含量越高,对于磁体的性能影响越大,但是在添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体时,磁体的矫顽力 H_{cj} 都比较高,磁体的矫顽力最低也接近 10 kOe,另外磁体的最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 在添加 DyF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1、添加含量为 3.26×10^{-4} g/mm² 时最高,磁体的最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 达到了 46.47 MGOe。
- 3) 热变形温度在 825℃ 时制备的磁体的矫顽力最高,为 15.6 kOe,在 850℃ 时磁体的剩磁 B_r 和最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 最优异,剩磁 B_r 为 13.42 kGs,最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 为 42.95 MGOe,而且在 850℃ 制备出的磁体的电阻率最高,为 9.37 mΩ·cm。

基金项目

感谢国家重点研发计划项目(2022YFB3505600)对本研究工作的支持。

参考文献

- [1] Sepehri-Amin, H., Une, Y., Ohkubo, T., Hono, K. and Sagawa, M. (2011) Microstructure of Fine-Grained Nd-Fe-B Sintered Magnets with High Coercivity. *Scripta Materialia*, **65**, 396-399. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2011.05.006>
- [2] Fukuma, A., Kanazawa, S., Miyagi, D. and Takahashi, N. (2005) Investigation of AC Loss of Permanent Magnet of SPM Motor Considering Hysteresis and Eddy-Current Losses. *IEEE Transactions on Magnetics*, **41**, 1964-1967. <https://doi.org/10.1109/tmag.2005.846282>
- [3] 黄光伟, 陆通, 王亚娜, 等. 高电阻率钕铁硼永磁材料的研究进展与展望[J]. 中国稀土学报, 2024, 42(5): 826-841.
- [4] 常颖, 李卫, 喻晓军, 等. 高温稳定、高磁性能 2:17 型 SmCo 永磁体绝缘特性的研究[J]. 功能材料, 2008, 39(6):

- 899-904.
- [5] Pan, W., Li, W., Cui, L.Y., Li, X.M. and Guo, Z.H. (1999) Rare Earth Magnets Resisting Eddy Currents. *IEEE Transactions on Magnetics*, **35**, 3343-3345. <https://doi.org/10.1109/20.800519>
 - [6] Li, W., Zheng, L., Bi, W., *et al.* (2014) Effect of CaF₂ Addition on the Microstructure and Magnetic and Electrical Properties of Sintered Nd-Fe-B Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, **50**, Article ID: 1001504.
 - [7] Gabay, A.M., Marinescu-Jasinski, M., Liu, J.F., *et al.* (2012) Internally Segmented Nd-Fe-B Sintered Magnets for Motor Applications. *Proceedings of the 22nd International Workshop on Rare-Earth Permanent Magnets and Their Applications*, Nagasaki, 2-5 September 2012, 2-18.
 - [8] Imaoka, N., Koyama, Y., Nakao, T., Nakaoka, S., Yamaguchi, T., Kakimoto, E., *et al.* (2008) High Electrical Resistance Composite Magnets of Sm₂Fe₁₇N₃ Powders Coated with Ferrite Layer for High Frequency Applications. *Journal of Applied Physics*, **103**, 07E129. <https://doi.org/10.1063/1.2832864>
 - [9] Zheng, L., Li, W., Zhu, M., Ye, L. and Bi, W. (2013) Microstructure, Magnetic and Electrical Properties of the Composite Magnets of Nd-Fe-B Powders Coated with Silica Layer. *Journal of Alloys and Compounds*, **560**, 80-83. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.01.107>
 - [10] 张梦成, 冯泉好, 刘友好, 等. Al₂O₃ 掺杂对烧结钕铁硼磁体电阻率和磁性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(4): 95-102.
 - [11] Gabay, A.M., Marinescu-Jasinski, M., Chinnasamy, C.N., Liu, J.F. and Hadjipanayis, G.C. (2012) Eddy-Current-Resistant SmCo₅/CaF₂ Magnets Produced via High-Energy Milling in Polar and Non-Polar Liquids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **324**, 2879-2884. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.04.033>
 - [12] 毕斯诺, 朱明刚, 赵立新, 等. SmF₃/NdF₃ 复合夹层钕铁硼磁体结构和性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(4): 796-804.
 - [13] Wang, Z., Chen, R., Yin, W., Yan, C., Tang, X., Jin, C., *et al.* (2014) Enhanced Electric Resistivity of Die-Upset Magnets by Segmented NdF₃ Addition. *IEEE Transactions on Magnetics*, **50**, 1-3. <https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2331763>
 - [14] Kautsar, Z.H., Sepehri-Amin, H., Tang, X., Iguchi, R., Uchida, K., Ohkubo, T., *et al.* (2023) High-Resistivity Anisotropic Hot-Deformed Nd-Fe-B Magnets Prepared from DyF₃ Electrophoretic Deposited Powders. *Journal of Alloys and Compounds*, **942**, Article 168855. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168855>
 - [15] Chang, R., Bai, G., Li, Y., Yan, Z., Qin, X., Guo, J., *et al.* (2025) Synergistic Regulation and Optimization of Microstructure, Coercivity, and Thermal Stability in Sintered NdFeB Magnets through Grain Boundary Diffusion of Dy and Al Elements. *Journal of Materials Research and Technology*, **34**, 2183-2192. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.12.235>