

基于磁控溅射工艺的晶界扩散对不同晶粒尺寸烧结钕铁硼磁体组织性能的影响研究

杨文佳

中国稀土集团国际贸易有限公司, 江西 赣州

收稿日期: 2026年4月7日; 录用日期: 2026年5月18日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

通过气流磨制备出不同粒径的钕铁硼磁粉, 经相同的制备工艺及晶界扩散工艺形成晶界扩散磁体, 经实验分析, 研究了不同晶粒尺寸烧结NdFeB磁体经Tb晶界扩散改性后的组织演变、磁性能及力学性能变化规律, 明确了兼顾高矫顽力、高剩磁与重稀土利用率的最优晶粒尺寸区间, 结果表明: 原始粉末粒径对烧结磁体的微观结构与密度起决定性作用。粉末粒径越小, 烧结驱动力越大, 磁体晶粒越细、密度越高; 细晶磁体扩散后边界结构优化增益小、剩磁损失大, 粗晶磁体基体性能差、优化后仍不理想, 因此理想晶粒尺寸为6.5~7.0 μm , 该区间磁性能与扩散源利用率均较高; 晶界扩散能有效提升磁体抗弯强度, 且细晶磁体因晶界相强化作用更显著而增益更大, 粗晶磁体则以穿晶断裂为主、扩散效果较差, 故强度提升不明显。

关键词

烧结钕铁硼, 晶界扩散, 晶粒尺寸, 磁性能, 力学性能

Study on the Effect of Magnetron Sputtering-Based Grain Boundary Diffusion on Microstructure and Properties of S-NdFeB Magnets with Varying Grain Sizes

Wenjia Yang

China Rare Earth Group International Trade Co., LTD., Ganzhou Jiangxi

Received: April 7, 2026; accepted: May 18, 2026; published: May 29, 2026

Abstract

NdFeB magnetic powders with different particle sizes were prepared by jet milling, and grain

文章引用: 杨文佳. 基于磁控溅射工艺的晶界扩散对不同晶粒尺寸烧结钕铁硼磁体组织性能的影响研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(3): 739-749. DOI: 10.12677/me.2026.143074

boundary diffusion magnets were formed through the same preparation process and grain boundary diffusion process. Through experimental analysis, the evolution of microstructure, magnetic properties, and mechanical properties of sintered NdFeB magnets with different grain sizes modified by Tb grain boundary diffusion was investigated, and the optimal grain size range that balances high coercivity, high remanence, and heavy rare earth utilization efficiency was determined. The results show that the original powder particle size plays a decisive role in the microstructure and density of the sintered magnet. The smaller the powder particle size, the greater the sintering driving force, resulting in finer grain size and higher density of the magnet. After diffusion, fine-grained magnets exhibit limited marginal benefit in boundary structure optimization but significant remanence loss, while coarse-grained magnets possess poor intrinsic magnetic properties and remain unsatisfactory even after optimization. Therefore, the ideal grain size range is 6.5~7.0 μm , within which both magnetic properties and diffusion source utilization efficiency are high. Grain boundary diffusion can effectively enhance the flexural strength of magnets, and fine-grained magnets show greater improvement due to more significant grain boundary phase strengthening, whereas coarse-grained magnets, dominated by transgranular fracture with poor diffusion effect, exhibit limited strength enhancement.

Keywords

Sintered NdFeB, Grain Boundary Diffusion, Grain Size, Magnetic Properties, Mechanical Properties

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. 前言

烧结钕铁硼磁体因其优越的磁性能，成为了新能源汽车驱动电机、风力发电及高端智能制造等领域不可或缺的功能材料[1]-[4]。在镝(Dy)、铽(Tb)等重稀土战略资源日趋紧缺的背景下，如何以低重稀土消耗实现内禀矫顽力高效提升，同时最大限度抑制剩磁与磁能积损失，是稀土永磁领域的核心科学问题与产业技术瓶颈[5]-[8]。基于 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 主相的理论磁晶各向异性场与实际磁体所能实现的矫顽力之间存在巨大差距[9] [10]。这一“矫顽力悖论”主要源于磁体内部晶界相的结构与成分缺陷，在反磁化过程中，薄弱区域易成为反磁化核的萌生地，导致磁体过早退磁[11] [12]。因此，利用晶界扩散(GBDP)技术有效优化晶界相，已成为突破钕铁硼磁体性能瓶颈的重要途径。晶界扩散工艺通过使用少量的重稀土，使其沿晶界渗入、取代主相表层 Nd 原子形成高磁晶各向异性场壳层；这种结构有效地提高晶粒边缘的磁晶各向异性场，抑制反磁化畴形核的产生，从而显著提升矫顽力[13]-[15]。

晶界扩散的本质是重稀土沿晶界通道的传质与晶格扩散行为，粉末粒径与晶粒尺寸作为烧结 Nd-Fe-B 磁体的核心微观结构参量，直接决定晶界密度、晶界相网络分布、缺陷及晶粒取向度等是调控扩散效率、元素分布与核壳结构的关键因素[16]-[19]。有研究表明[20]，晶粒尺寸对晶界扩散效果具有显著调控作用，晶粒尺寸越小，基体的面内晶界密度越高，为重稀土原子提供的扩散通道越丰富，相同扩散工艺下重稀土的扩散总量与矫顽力增量呈显著正相关，同时晶界扩散过程中磁体晶粒存在轻微长大现象，细晶磁体扩散后仍能保持更高的晶界密度与扩散优势。此外，双粉末法相关研究[21]也证实，粉末粒径与晶粒尺寸直接决定了烧结过程中重稀土的扩散行为及核壳结构厚度。然而，晶粒尺寸调控重稀土晶界扩散的内在机制尚未形成完整理论体系，粉末粒径 - 晶粒尺寸 - 扩散行为之间的定量关联缺乏系统的实验验证与理论分析。

基于此，本文以不同粉末粒径制备的烧结 Nd-Fe-B 磁体为扩散基体，以纯度 99% 的 Tb 作为扩散源，

采用磁控溅射工艺,在相同工艺条件下进行晶界扩散处理。通过磁性能测试、扫描电子显微镜(SEM)、电子探针微区分析(EPMA)等表征手段,系统研究晶粒尺寸对 Tb 元素扩散深度、分布均匀性及核壳结构形成规律的影响,对比分析不同晶粒尺寸磁体扩散前后的磁性能与力学性能演变规律,阐明晶粒尺寸对晶界扩散后磁体的组织性能影响机制,揭示晶粒尺寸与扩散效率之间的内在关联,为开发高矫顽力、低重稀土用量的高性能钕铁硼磁体提供理论依据和技术支撑。

2. 实验方法

2.1. 样品制备

本实验采用双合金工艺,将 $(\text{Nd}_{23.7}\text{Pr}_{7.9})_{31.6}\text{Fe}_{\text{bal}}\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.4}\text{Cu}_{0.15}\text{Co}_{0.9}\text{B}_{0.9}$ 与 $(\text{Nd}_{24.8}\text{Pr}_{6.2}\text{Ho}_{0.2})_{31.2}\text{Fe}_{\text{bal}}\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.3}\text{Cu}_{0.25}\text{CoB}_{0.94}$ 氢破粉,按 1:1 比例配制,并加入硅油。经 YSR-50 型三维运动混合机混粉后,采用不同制粉工艺在 QLMR-100G 型气流磨中进行粉碎,采用 HELOS/BR-OM 型激光粒度仪对等效粒径(SMD)以及粒度分布 D90/D10(D10、D90 分别代表某一尺寸的颗粒积累百分数为 10%和 99%所对应的粉末颗粒尺寸的直径)进行检测。具体工艺参数及粉末物性参数如表 1 所示。

Table 1. Process parameters and powder properties of airflow milling

表 1. 气流磨工艺参数及粉末物性参数

序号	转速/rpm	研磨气体压力/MPa	SMD/ μm	D90/D10
1	1500	0.5	2.15	2.65
2	1700	0.5	2.18	2.69
3	1900	0.5	2.40	2.91
4	2100	0.5	2.78	2.97
5	2300	0.5	3.16	3.74
6	2500	0.5	3.21	4.18

在 JDY15-260 磁场成型压机和等静压机上采用模压加冷等静压的方法将粉体压制尺寸为 $45\text{ mm} \times 43\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 的压坯,最后将压坯在 SRVS-50G 手套箱保护进料真空炉中进行 $1060^\circ\text{C} \times 4\text{ h}$ 的真空烧结,再进行 $900^\circ\text{C} \times 2.5\text{ h}$ 一次时效和 $490^\circ\text{C} \times 5\text{ h}$ 的二次时效热处理。

2.2. 晶界扩散

将样品切割成尺寸为 $30\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm T}$ (取向方向)的长方体,进行晶界扩散。首先处理掉样品表面油污,然后依次在 HNO_3 溶液,柠檬酸和去离子水中超声清洗,最后将样品放入酒精中超声 5 min 并用无尘布擦干。将处理完的样品放在样品盘上固定并安装在磁控溅射仪中,抽真空并镀膜。溅射源配备 Tb 靶材(纯度: >99.9%),磁控溅射工艺参数如表 2 所示。

Table 2. Magnetron sputtering process parameters

表 2. 磁控溅射工艺参数

工艺因素	功率/kW	电压/V	电流/A	流量设定/SCCM	真空度/Pa	冷却压力/MPa	冷却时间/s
工艺参数	15	411	36.5	165	0.13 ± 0.1	0.07	1200

2.3. 表征分析

将烧结磁体沿取向方向线加工成 $\text{O}10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的圆柱,依据阿基米德原理测试磁体的密度,每

份试样测量 3 次取平均值,采用 Hirst-PFM14 型脉冲场磁测仪测试扩散前后磁体的剩磁 B_r 和矫顽力 H_{cj} , 每份试样测量 3 次取平均值。试样经机械抛光后用体积分数为 5% 的三氯化铁酒精溶液腐蚀。采用 JSM-6010LA 型扫描电子显微镜对磁体腐蚀前后的微观结构进行表征; 采用 MiniFiex 600 型 X 射线衍射仪对磁体进行物相分析, 工作电压为 40 kv, 工作电流为 15 mA, 扫描角度 $10^\circ\sim 90^\circ$; 通过电子探针(EPMA)观察不同样品中 Tb 的扩散深度和各元素分布情况; 将溅射后经热处理的磁体进行切片处理, 采用 ICP 检测磁体中不同深度的元素浓度; 根据 GB/T 31967.2-2015, 将磁体抗弯强度试样采用线切割法制成 $5\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 的标准试样。采用 CMT4304 型万能试验机对试样进行三点弯曲抗弯强度实验, 实验跨距设为 14.5 mm, 并按式(1)计算磁体的抗弯强度。

$$F_{bb} = \frac{3F_{bb}L_s}{2bh^2} \tag{1}$$

3. 结果与讨论

3.1. 粉末粒径对磁体组织性能的影响

本研究通过制备不同粉末粒径磁粉进而制备出不同晶粒尺寸烧结钕铁硼磁体, 通过对磁体的组织性能进行表征检测, 发现原始粉末粒径与磁体组织性能具有较强的相关性, 具体参数如表 3 所示。

Table 3. Microstructure and property parameters of magnets prepared with different powder particle sizes
表 3. 不同粉末粒径制备磁体的组织性能参数

SMD/ μm	D90/D10	磁体密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	B_r/kGs	H_{cj}/kOe	磁体晶粒尺寸/ μm
2.15	2.65	7.49	13.21	16.63	4.26
2.18	2.69	7.50	13.21	15.93	4.38
2.40	2.91	7.49	13.23	16.06	4.4
2.78	2.97	7.49	13.19	15.62	6.77
3.16	3.74	7.44	12.91	15.05	7.65
3.21	4.18	7.40	12.95	14.14	7.8

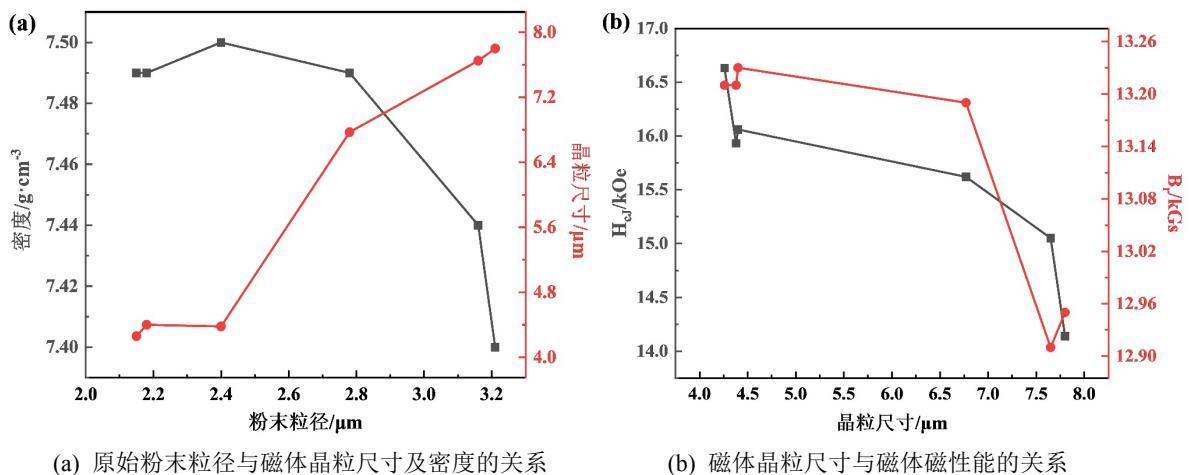


Figure 1. Magnet physical properties corresponding to different powder particle sizes
图 1. 不同粉末粒径对应的磁体物性参数

图 1 展示的是原始粉末粒径与磁体组织性能之间的联系。如图 1(a)及图 2 所示,随着粉末粒径的增大,磁体晶粒尺寸整体呈增大趋势,磁体密度逐渐下降。这是因为在气流磨等破碎工序中,细小的粉末颗粒多为单晶颗粒,烧结时单位体积内晶核数量更多,在致密化过程中晶粒长大所需合并的颗粒数相对较少;同时细粉烧结的相对表面积大,表面能较高,具有致密化倾向以及烧结驱动力,可在较低温度或较短时间内实现致密化,有效抑制晶粒粗化和异常长大,磁体更致密。图 1(b)为磁体晶粒尺寸与磁性能之间的关系,随着磁体晶粒尺寸增大,磁体磁性能逐渐下降。这是因为粗粉制备的磁体致密度下降,烧结过程中液相烧结效果减弱,孔洞增多,导致磁体有效磁化截面减小,剩磁降低;晶粒尺寸越小,晶界密度越大,其富钕相分布相对均匀且稠密。研究表明,磁体第 II 类边界结构,即基体相直接接触的边界结构存在磁耦合作用,降低磁体矫顽力[9] [22]。同理,随着晶界密度的增大,同样为晶界扩散提供更多的扩散通道,理论上有利于提高晶界扩散效率,但具体效果仍需进一步分析。

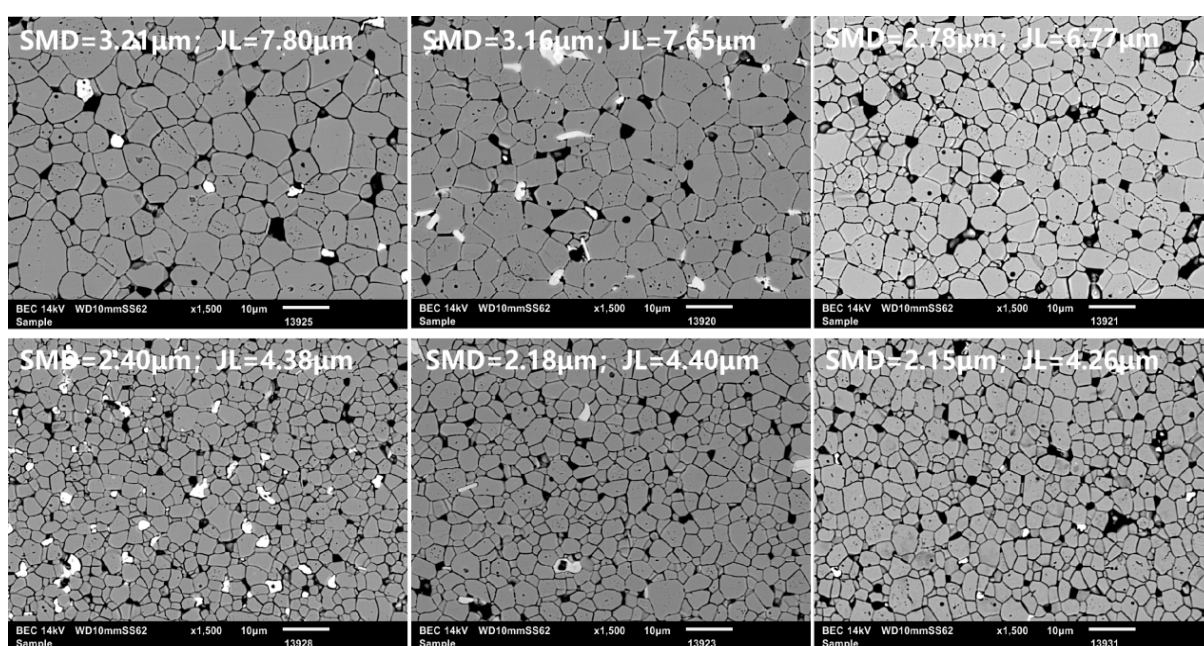


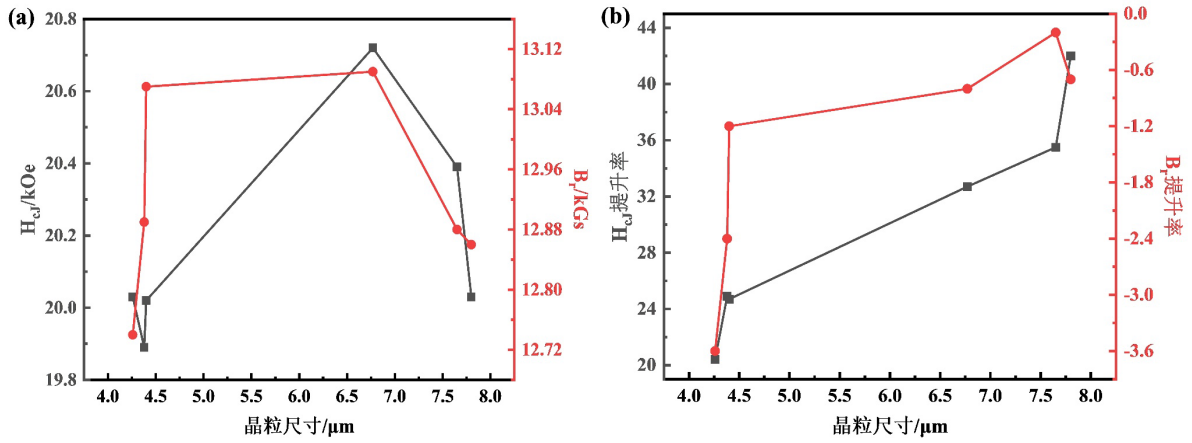
Figure 2. SEM images of magnets prepared with different powder particle sizes

图 2. 不同粉末粒径所制备磁体的 SEM 像

3.2. 晶粒尺寸对磁体晶界扩散后微观组织与磁性能的影响

为进一步分析晶粒尺寸对磁体晶界扩散后磁性能的影响,本研究将扩散后的磁体进行了磁性能检测,结果如图 3 所示。图 3(a)表明,随着晶粒尺寸的增加,磁体的 B_r 和 H_{cJ} 均呈现先上升后下降的趋势,细晶基体的磁性能优势并没有得到体现,磁性能峰值集中在晶粒尺寸为 $6.5 \mu\text{m}$ 左右。图 3(b)则表示,随着晶粒尺寸增加, H_{cJ} 和 B_r 的提升率整体上呈上升趋势,因溅射工艺相同,扩散源附着量基本一致,则随着晶粒尺寸的增加,扩散元素的利用率会提高。

考虑到磁体晶界扩散过程除晶粒尺寸这一影响因素外,可能还会受磁体密度影响。为此,本研究对晶粒尺寸与磁体密度对晶界扩散效果的影响进行了分析。如图 4 所示, H_{cJ} 提升率较高区域只要集中在低密度、大尺寸晶粒区域,提升梯度沿对角线分布,这表明,密度和晶粒尺寸对 H_{cJ} 提升率均有较大影响,而低密度、大尺寸晶粒磁体,主要由原始粉末粒径较粗的磁粉制备; B_r 提升率较高区域只要集中在晶粒尺寸较大区域,整体的提升梯度呈水平分布,这意味着 B_r 提升率主要与晶粒尺寸相关。



(a) 磁体晶粒尺寸与晶界扩散后磁体磁性能的关系 (b) 磁体晶粒尺寸与晶界扩散后磁体磁性能提升率的关系

Figure 3. Relationship between magnet grain size and magnetic properties of the magnet after grain boundary diffusion
图 3. 磁体晶粒尺寸与晶界扩散后磁体磁性能的关系

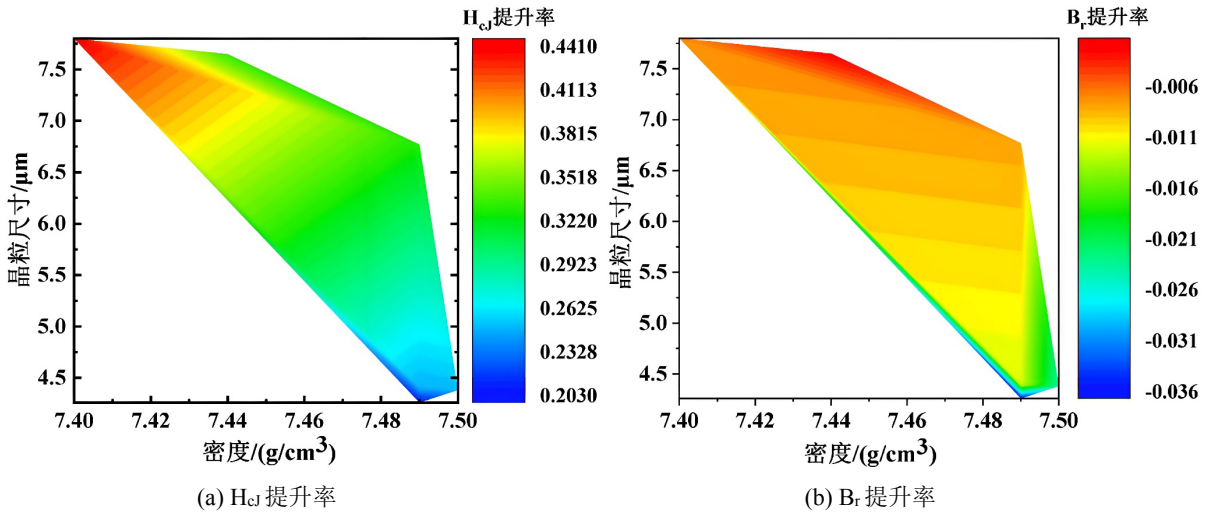


Figure 4. Effect of magnet grain size and density on the magnetic properties of the magnet after grain boundary diffusion
图 4. 磁体晶粒尺寸与密度对晶界扩散后磁体磁性能的影响

为分析上述实验结果，对磁体进行了 XRD 表征，结果如图 5 所示。据检测结果显示，磁体衍射峰基本相同，但特征峰均向更高角度偏移，这表明晶间距减小，Tb 原子半径大于 Nd，因此推断是 Tb 取代部分 Nd，形成了(Nd,Tb)₂Fe₁₄B 相。而晶粒尺寸越小，特征峰偏移量越大，这表明有更多的 Tb 取代了 Nd，实现了更充分的晶界/晶内元素扩散与晶格重构。

结合 Bragg 定律($2d\sin\theta = n\lambda$)分析，衍射角 θ 的升高直接对应晶面间距 d 的减小，这一变化源于 Tb³⁺ (离子半径 0.923 Å，配位数 CN = 6)与 Nd³⁺ (离子半径 0.983 Å，CN = 6)的离子尺寸差异：Tb 原子以置换固溶的方式进入 Nd₂Fe₁₄B 主相晶格，取代 Nd 原子的晶格位点，引发晶格发生收缩畸变，进而推动特征峰向高角度偏移。同时，细晶磁体的晶界体积分数更高、晶界扩散通道更丰富，为 Tb 元素的渗透与置换提供了更多反应位点，因此在相同热处理工艺下，细晶磁体中 Tb 的固溶度显著提升，特征峰偏移幅度更明显。而 Tb 取代 Nd 后，因其磁矩远大于 Nd，在亚铁磁性反平行耦合下对 Fe 磁矩的抵消作用显著增强，同时晶格收缩进一步削弱了铁磁交换作用，最终导致饱和磁化和磁化强度降低，从而使剩磁下降。

图 6 所示为不同晶粒尺寸磁体晶界扩散后 EPMA 图。大尺寸晶粒磁体 Tb 主要富集在磁体表层区域，

而随着晶粒尺寸减小, 扩散深度逐渐增加, 扩散越均匀, 但随着晶粒尺寸减小, 磁体内部分区域存在 Tb 元素富集现象, 这与 XRD 表征分析结果相吻合。

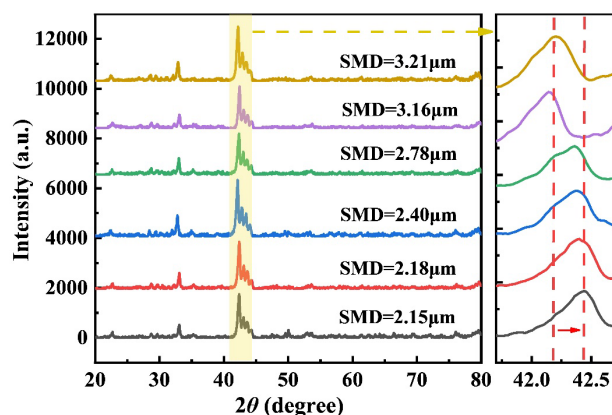
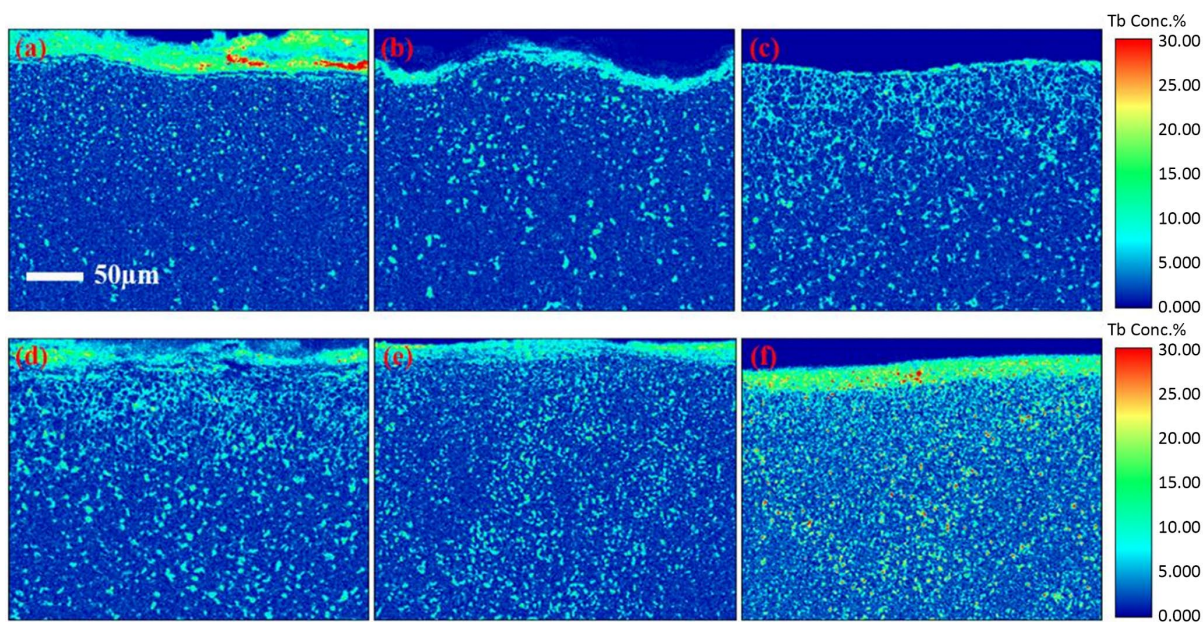


Figure 5. XRD patterns and characteristic peak evolution of magnets with different grain sizes

图 5. 不同晶粒尺寸磁体的 XRD 图谱及特征峰演变规律



(a) SMD = 3.21 μm ; (b) SMD = 3.16 μm ; (c) SMD = 2.78 μm ; (d) SMD = 2.40 μm ; (e) SMD = 2.18 μm ; (f) SMD = 2.15 μm

Figure 6. EPMA images of magnets with different grain sizes after diffusion at grain boundaries on the surface

图 6. 不同晶粒尺寸磁体表层晶界扩散后 EPMA 图

图 7 为距扩散表面 120 μm 处 EPMA 图, 如图所示, 晶粒尺寸越大, Tb 元素分布越少, 但 Tb 主要沿晶界处分布, 而晶粒尺寸越小, 则该区域 Tb 元素分布较多, 但偏聚现象明显。

结合磁体原始基体对比, 磁体经晶界扩散后, 能够完善磁体的边界结构, 使得晶界相分布均匀且稠密的显微结构, 第 II 类边界比例减少, 有效降低了磁耦合作用, 进而提升磁体矫顽力。

如图 8 所示, 随着晶粒尺寸增加, Tb 含量逐渐减小, 这意味着在该区域 Tb 扩散效果随晶粒尺寸减小逐渐下降。结合上述实验表征结果分析, 细晶磁体 H_c 提升率较低, 并非扩散效果影响导致。众所周知, 磁体矫顽力的提升主要由两个因素影响: 一方面重稀土元素沿晶界扩散形成核壳层微结构, 产生磁硬化,

另一方面，完善磁体的边界结构，二者共同作用提高磁体 H_{cJ} 。在等量充分的晶界扩散工艺条件下，由图 9 可知，细晶磁体基体晶界相分布均匀稠密，充分的晶界扩散过程对边界结构的优化增益较小，重稀土元素取代现象明显，剩磁下降率较高；而晶粒尺寸较大的磁体，随经晶界扩散后，晶界相得到优化，剩磁下降率较低，但磁体基体磁性能较差，优化后的磁体，其磁性能仍不理想。因此，晶界扩散理想的晶粒尺寸在 $6.5\sim 7.0\ \mu\text{m}$ 之间，磁性能保持在较高水平，扩散源利用率较高。

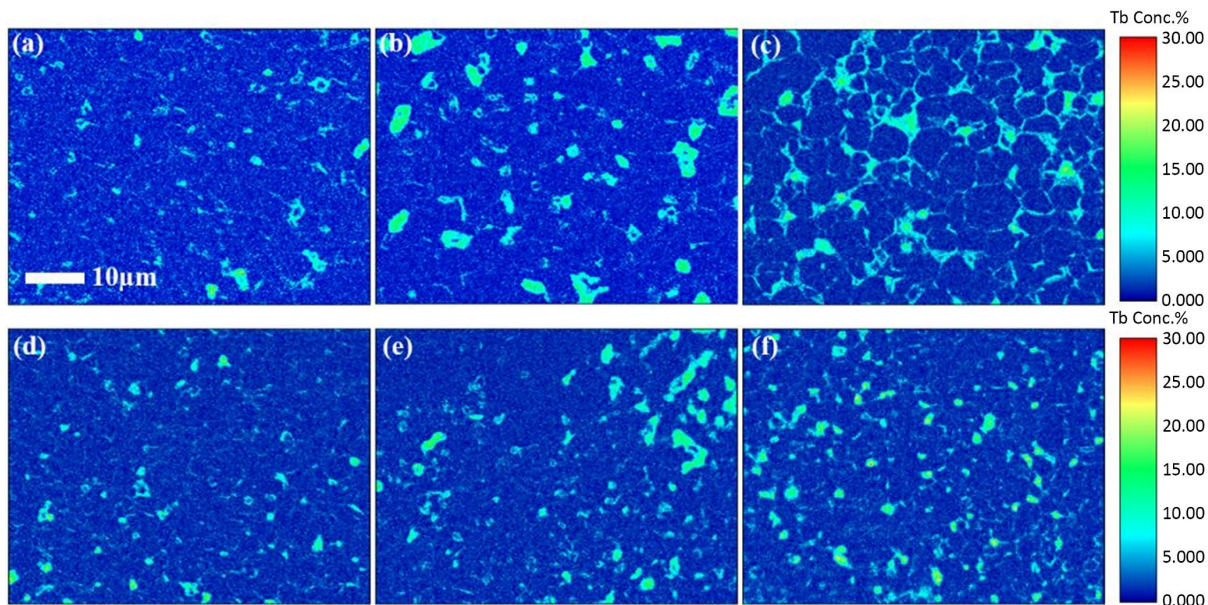


Figure 7. EPMA images of magnets with different grain sizes at a distance of $120\ \mu\text{m}$ from the diffusion surface
图 7. 不同晶粒尺寸磁体距扩散表面 $120\ \mu\text{m}$ 处 EPMA 图

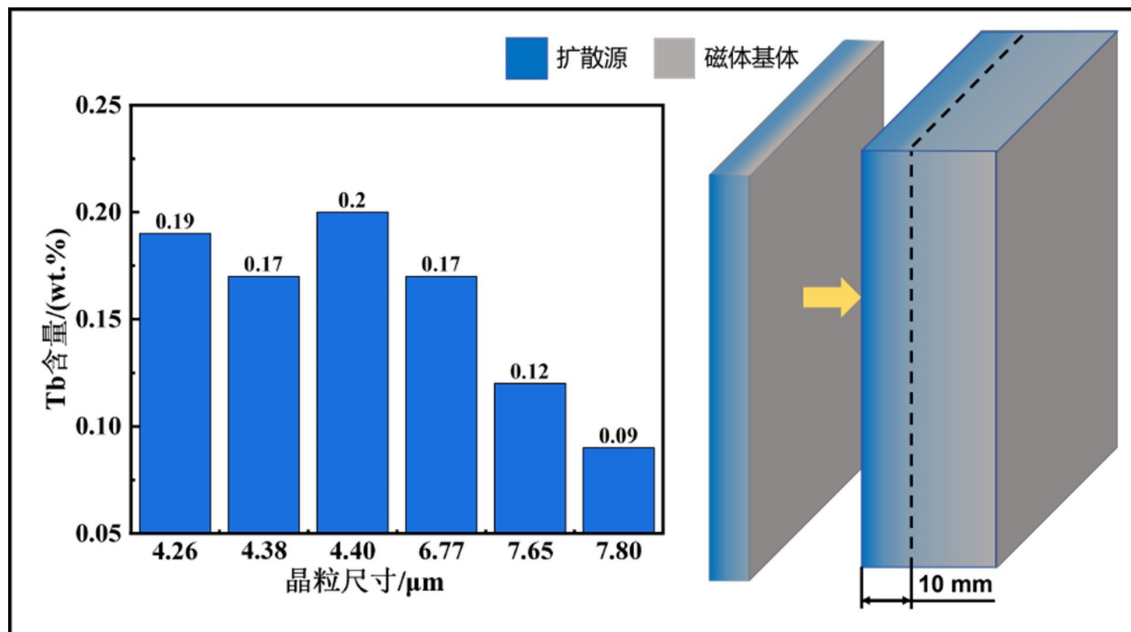


Figure 8. Schematic diagram of Tb content within $1000\ \mu\text{m}$ of the diffusion surface after diffusion of magnets with different grain sizes
图 8. 不同晶粒尺寸磁体扩散后磁体距扩散表面 $1000\ \mu\text{m}$ 内 Tb 含量示意图

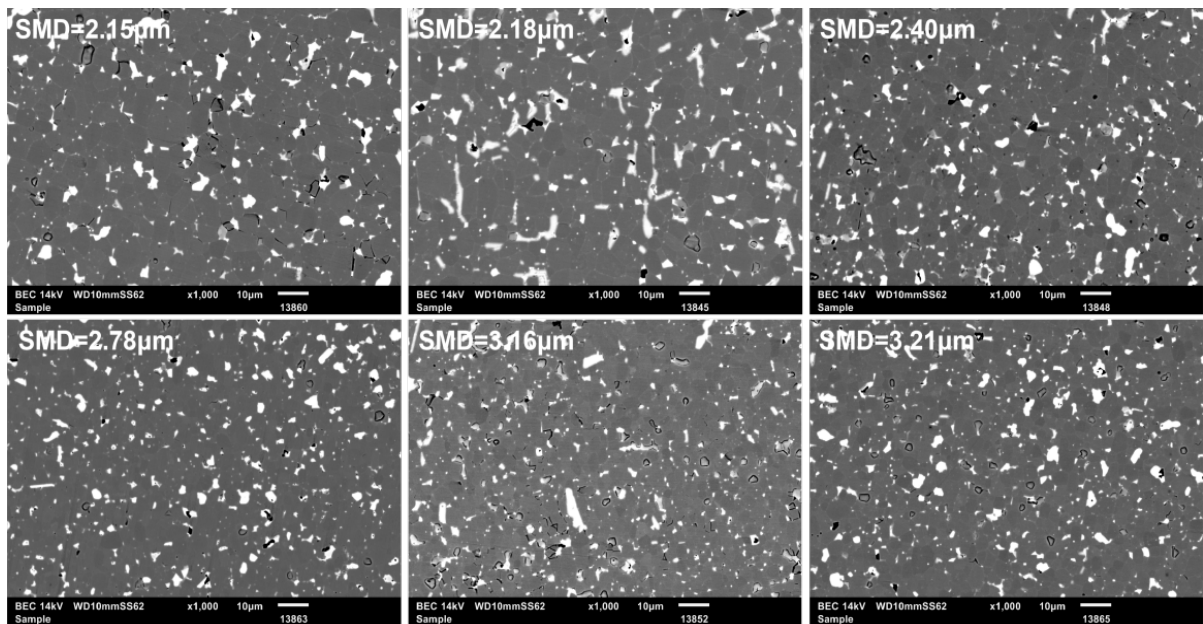


Figure 9. SEM backscattered images of magnet substrates with different grain sizes

图 9. 不同晶粒尺寸磁体基体 SEM 背散射像

3.3. 晶粒尺寸对磁体扩散前后力学性能的影响

对不同粉末粒径制备磁体进行了抗弯强度表征。结果如图 10 所示，晶界扩散能够有效提升磁体抗弯强度，但随晶粒尺寸的增加，增益效果越差。如图 11 所示，磁体断裂形式只要分为沿晶和穿晶，晶粒越粗大，断裂时发生穿晶断裂的概率越大，而晶界间结合力弱，在宏观表现为抗弯强度较大。而晶界扩散则是以晶界相强化作用提升磁体抗弯强度，改良磁体微观结构，而晶粒越粗大，扩散效果较差，对磁体的晶界相强化作用也就不甚明显。

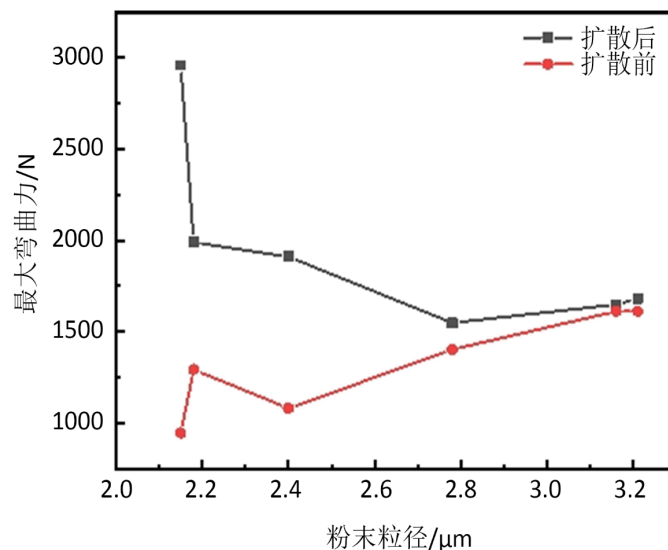


Figure 10. Schematic diagram of the flexural strength of magnets prepared with different powder particle sizes before and after grain boundary diffusion

图 10. 不同粉末粒径制备磁体晶界扩散前后的抗弯强度示意图

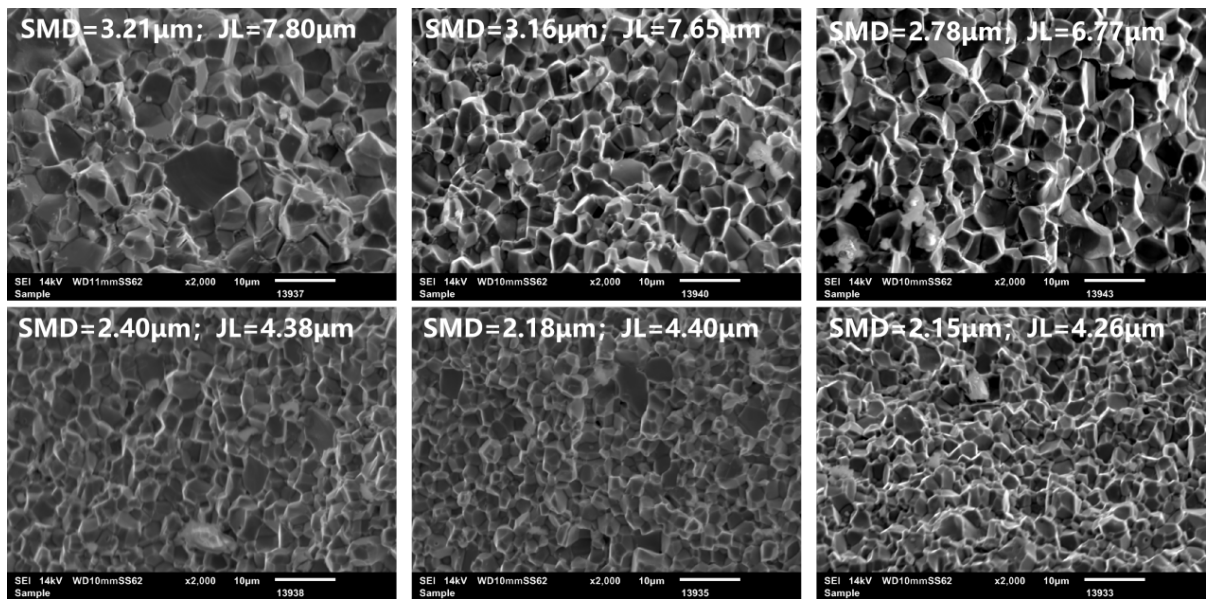


Figure 11. SEM images of fracture morphology of magnet substrates with different grain sizes
图 11. 不同晶粒尺寸磁体基体断口形貌 SEM 像

4. 结论

1) 原始粉末粒径对烧结磁体的微观结构与密度起决定性作用。粉末粒径越小，烧结驱动力越大，磁体晶粒越细、密度越高。当粉末粒径从 3.21 μm 减小至 2.15 μm 时，磁体晶粒尺寸由 7.80 μm 细化至 4.26 μm ，密度由 7.40 g/cm^3 提升至 7.49 g/cm^3 。

2) 晶粒尺寸显著调控 Tb 扩散效率与磁性能增益。细晶磁体中 Tb 扩散深度更大、固溶度更高，但因原始晶界相已较完善，扩散优化边界结构的边际效益低，导致矫顽力提升率仅 7.8%，剩磁下降明显；而晶粒尺寸较大的磁体，随经晶界扩散后，晶界相得到优化，剩磁下降率较低，但磁体基体磁性能较差，优化后的磁体，其磁性能仍不理想。因此，晶界扩散理想的晶粒尺寸在 6.5~7.0 μm 之间，磁性能保持在较高水平，扩散源利用率较高。

3) 晶界扩散可有效提升磁体抗弯强度，其强化效果与晶粒尺寸负相关。细晶磁体扩散后抗弯强度提升约 12%，粗晶磁体提升不足 5%。细晶磁体以沿晶断裂为主，扩散后晶界相强化作用显著。

参考文献

- [1] 刘涛, 李瑞雨, 周磊, 等. 烧结钕铁硼磁体矫顽力提升技术研究进展[J]. 中国稀土学报, 2025, 43(1): 44-56.
- [2] 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.
- [3] Xu, J., Meng, R., Liu, J., Zhang, J., Han, R., Fang, Y., *et al.* (2024) Thermal Stability Improvement and Microstructure Optimization of High Cobalt Content Nd-Fe-B Magnets via Terbium Grain Boundary Diffusion. *Journal of Rare Earths*, **42**, 1531-1538. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.10.023>
- [4] Huang, L., Luo, J.M., Wang, C.Y., Chai, W.X., Zhang, X.S., Hou, Y.H., *et al.* (2024) Significantly Improved Magnetic Properties and Thermal Stability for Sintered Nd-Fe-B Magnets via Grain Boundary Diffusion of DyCo Alloy. *Intermetallics*, **165**, Article ID: 108158. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2023.108158>
- [5] Liu, Z., He, J. and Ramanujan, R.V. (2021) Significant Progress of Grain Boundary Diffusion Process for Cost-Effective Rare Earth Permanent Magnets: A Review. *Materials & Design*, **209**, Article ID: 110004. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110004>
- [6] Herbst, J.F. (1991) $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Materials: Intrinsic Properties and Technological Aspects. *Reviews of Modern Physics*, **63**, 819-898. <https://doi.org/10.1103/revmodphys.63.819>

- [7] 刘涛, 李建, 邓志伟, 等. 高温下晶界扩散钕铁硼组织行为及矫顽力[J]. 金属功能材料, 2022, 29(3): 107-112.
- [8] 李家节, 郭诚君, 周头军, 等. 烧结钕铁硼磁体溅射渗镱工艺与磁性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(4): 17-20, 35.
- [9] 周寿增, 董清飞, 高学绪. 烧结钕铁硼稀土永磁材料与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011.
- [10] Jin, Z., Ding, G., Fan, X., Cao, S., Fan, S., Wang, Z., *et al.* (2022) Temperature-dependent Microstructure and Magnetic Properties Evolution in the Sintered Nd-Fe-B Magnets with Pr-Al-Cu Diffusion. *Journal of Alloys and Compounds*, **926**, Article ID: 166725. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166725>
- [11] Mo, C., Wang, M., Ou, S. and Huang, C. (2025) Optimizing Grain Boundary Diffusion and Aging Heat Treatment for Enhancing Coercivity, Thermal Stability, and Corrosion Resistance in NdFeB Permanent Magnets. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, **36**, Article No. 1888. <https://doi.org/10.1007/s10854-025-15934-1>
- [12] Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T. and Hono, K. (2013) The Mechanism of Coercivity Enhancement by the Grain Boundary Diffusion Process of Nd-Fe-B Sintered Magnets. *Acta Materialia*, **61**, 1982-1990. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2012.12.018>
- [13] Tang, J., Huang, W. and Li, D. (2024) Improvements in Properties of NdFeB Magnets Obtained via Magnetron Sputtering and Thermal Diffusion. *Journal of Rare Earths*, **42**, 1710-1716. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2023.09.002>
- [14] 田广科, 张希, 崔光宇, 等. 磁控溅射涂镀重稀土晶界扩散渗入钕铁硼磁体的能效分析[J]. 表面技术, 2025, 54(16): 221-230.
- [15] Lee, D.H., Kim, S.C., Kim, J., Baek, J., Yun, T., Kim, J.T., *et al.* (2024) Coercivity and Thermal Stability Enhancement of Nd-Fe-B Sintered Magnets by Grain Boundary Diffusion with Tb-Al-Cu Alloys. *Materialia*, **36**, Article ID: 102161. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2024.102161>
- [16] 刘路军. 晶界调控对烧结钕铁硼重稀土扩散与磁性能的影响及其机制研究[D]: [博士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2022.
- [17] Zhou, Z., Liu, W., Wu, D., Yue, M., Lu, Q., Zhang, D., *et al.* (2019) Origin of the Coercivity Difference in Sintered Nd-Fe-B Magnets by Grain Boundary Diffusion Process Using TbH₃ Nanoparticles and TbF₃ Microparticles. *Intermetallics*, **110**, Article ID: 106464. <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2019.04.007>
- [18] Zhu, W., Luo, Y., Wang, Z., Bai, X., Peng, H. and Yu, D. (2021) Magnetic Properties and Microstructures of Terbium Coated and Grain Boundary Diffusion Treated Sintered Nd-Fe-B Magnets by Magnetron Sputtering. *Journal of Rare Earths*, **39**, 167-173. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2020.02.017>
- [19] 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.
- [20] 程星华, 李建, 刘涛, 等. 晶粒尺寸对 NdFeB 晶界扩散效果的影响[J]. 中国稀土学报, 2020, 38(6): 752-758.
- [21] Luo, S., Yang, M., Xu, Z., Zhao, T., Rehman, S.U., Yu, X., *et al.* (2023) Dependence of Grain Size on Grain Boundary Diffusion Mechanism of Nd-Fe-B Sintered Magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, **942**, Article ID: 168999. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168999>
- [22] 吴树杰, 包小倩, 向丹丽, 朱杰, 高学绪. (Nd, Pr, Ce)-Fe-B 磁体的组织与磁学性能[J]. 北京科技大学学报, 2013, 35(6): 777-784.