SmF₃/NdF₃复合夹层钕铁硼磁体结构和 性能研究

毕斯诺1,朱明刚2,赵立新1,3,方以坤3,郑立允1*,李成林1,黄光伟1

¹河北工程大学河北省稀土永磁材料与应用工程研究中心,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河北工程大学机械装备与工程学院,河北 邯郸

收稿日期: 2025年3月14日; 录用日期: 2025年4月12日; 发布日期: 2025年4月27日

摘要

为了满足钕铁硼磁体在高温下运作的需求,减少磁体产生的涡流损耗,本文以夹层的方式制备了高电阻率的SmF₃/NdF₃复合钕铁硼磁体,探究了SmF₃/NdF₃复合粉添加量和比例对于钕铁硼磁体的电阻率、磁性能及力学性能的影响。研究表明,当SmF₃/NdF₃比例为3:1时,随着添加量的增加,磁体夹层的厚度提高,电阻率增大,磁能积和抗弯强度呈现下降趋势。当单位面积添加量达到6.52×10⁻⁴g/mm²时,磁体电阻率增大到6.12 mΩ·cm,较未夹层的钕铁硼磁体电阻率146 μΩ·cm提高了一个数量级,但是磁体的最大磁能积和抗弯强度分别下降到39.61 MGOe/164 MPa;当保持夹层添加量不变,随着复合夹层中SmF₃占比减小,夹层粉体逸散现象减弱,磁体的电阻率增大,当复合夹层SmF₃/NdF₃比例为1:5时电阻率最高,为24.3 mΩ·cm;当复合夹层SmF₃/NdF₃比例为1:1时,磁体的磁能积最高为43.91 MGOe,复合SmF₃/NdF₃的比例对磁体的抗弯强度影响并不相同,当复合夹层SmF₃/NdF₃比例为3:1时抗弯强度提高到了270 MPa,较无夹层钕铁硼磁体抗弯强度254 MPa提高了6%。

关键词

Nd₂Fe₁₄B,夹层,电阻率,磁性能,抗弯强度

Structural and Functional Analysis of NdFeB Magnets with SmF₃/NdF₃ Composite Sandwich Layers

Sinuo Bi¹, Minggang Zhu², Lixin Zhao^{1,3}, Yikun Fang³, Liyun Zheng^{1*}, Chenglin Li¹, Guangwei Huang¹

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

*通讯作者。

文章引用:毕斯诺,朱明刚,赵立新,方以坤,郑立允,李成林,黄光伟.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. DOI:10.12677/ms.2025.154084

University of Engineering, Handan Hebei ²Central Iron & Steel Research Institute Group, Division of Functional Materials, Beijing ³School of Mechanical and Equipment Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: Mar. 14th, 2025; accepted: Apr. 12th, 2025; published: Apr. 27th, 2025

Abstract

To meet the operational requirements of NdFeB magnets under high-temperature conditions and mitigate eddy current losses, this study fabricates high-resistivity SmF₃/NdF₃ composite NdFeB magnets via a laminated structure. The effects of SmF₃/NdF₃ composite powder contents and stoichiometric ratios on resistivity, magnetic properties, and mechanical performance were systematically investigated. Results demonstrate that at a SmF₃/NdF₃ ratio of 3:1, increasing additive contents enhances interlayer thickness and resistivity of the magnets, reaching 6.12 m Ω ·cm when the additive content achieves 6.52×10^{-4} g/mm². While the magnetic energy product (BH)_{max} was reduced to 39.61 MGOe and flexural strength to 164 MPa. Notably, the achieved resistivity of 6.12 $m\Omega$ ·cm represents a one-order-of-magnitude improvement compared to non-laminated NdFeB magnets, which exhibit a resistivity of 146 $\mu\Omega$ ·cm. Under constant interlayer additive content, the reduction of SmF₃ proportion in the composite interlayer mitigates powder dispersion phenomena and enhances interlayer density, leading to increased resistivity. The resistivity reaches its maximum value of 24.3 m Ω ·cm at a SmF₃/NdF₃ ratio of 1:5. The magnetic energy product peaks at 43.91 MGOe for a 1:1 SmF₃/NdF₃ ratio. The influence of SmF₃/NdF₃ ratios on flexural strength exhibits distinct trends, with the SmF₃/NdF₃ ratio of 3:1 demonstrating optimal mechanical performance. Specifically, the flexural strength increases to 270 MPa at a 3:1 ratio, representing a 6% enhancement compared to non-laminated NdFeB magnets (254 MPa).

Keywords

Nd₂Fe₁₄B, Interlayer, Resistivity, Magnetic Properties, Flexural Strength

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). <u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>

CC O Open Access

1. 引言

钕铁硼作为第三代稀土永磁材料,具有优异的磁性能,通常被应用于各种设备包括电机、发电机和 医疗器械中。在这些设备运行过程中,钕铁硼磁体会因其较低的居里温度,当电机工作温度过高时会导 致磁体的磁性能尤其是矫顽力大大降低[1]-[3]。解决该问题的常用方法是使用重稀土如 Dy 或 Tb 取代钕 铁硼磁体中的 Nd,从而增强磁体的矫顽力[4] [5]。另外提高电阻率也是一种方法[6]-[8],磁体升温的原因 主要是由于低电阻率会产生较大的涡流损耗,进而通过焦耳热提高磁体的温度,所以当电阻率提高时就 会起到抑制磁体升温的作用。

为了提高钕铁硼磁体的电阻率,本文选择以夹层的方式[9] [10],通过在热压磁体间添加一层氟化物 复合粉体进行热变形从而制备出高电阻率钕铁硼磁体,探究氟化物复合粉体不同添加量和不同比例对于 钕铁硼磁体的微观组织、磁性能、电阻率以及力学性能的影响。为开发针对与高工作温度相关的问题的 有效技术提供思路,从而减少使用稀缺昂贵的 HRE 来提高矫顽力的做法。

2. 实验

本实验所用磁粉为商业快淬磁粉,其成分为(Nd_{29.1}Pr_{0.2}Fe_{63.66}Co_{5.5}Ga_{0.5}Dy_{0.01}B_{0.87}),商业化 SmF₃和 NdF₃ 粉体,纯度为 99.99%。

实验首先需要称取 20 g 钕铁硼快淬磁粉制备热压磁体,在真空环境 500℃~600℃下进行热压实验, 压力约 370 MPa 下热压一分钟获得热压磁体,将制备好的热压磁体沿垂直于后续热变形压力水平切开获 得两个小毛坯,将切开的毛坯表面进行打磨超声去除表面杂质,然后称取适量的 SmF₃和 NdF₃粉体放于 研钵中进行手动混粉,在混合好的粉体表面滴几滴丙酮使其润湿,利用药品勺将润湿后的复合粉置于切 开的毛坯表层,轻微按压使得复合粉使其能够水平均匀的覆盖在毛坯层表面,最后将两个毛坯重新组合 好放于热变形模具中,在氩气环境 800℃~900℃温度下,约 100 MPa 压力下进行热变形,变形时间为 80 s,制备出具有一层水平致密绝缘层的热变形钕铁硼磁体。在本工作中,热压磁体的直径和高度分别为 13 mm、20 mm,制备的热变形磁体的直径和高度分别为 25 mm、6 mm,变形量约为 70%。

使用线切割机于中心处切割出 φ6 mm × 5 mm 的试样,使用四探针电阻率测试仪对试样进行电阻率 测试,后使用 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。重新制备 样品使用电火花线切割机从热变形磁铁上切下矩形条测试抗弯强度,长度为 19 mm,宽度为 6 mm,高度 为 5 mm,试样的抗弯强度在 MTS880-25T 万能试验机上采用三点弯曲试验进行测定。实验使用 Olympus 全自动金相显微分析系统对热变形钕铁硼夹层磁体样品进行微观形貌分析。

3. 结果与讨论

3.1. SmF₃/NdF₃复合夹层(3:1比例)不同含量对钕铁硼磁体的影响

本研究通过复合粉体夹层工艺制备了钕铁硼(NdFeB)永磁体,其夹层结构由质量比为 3:1 的 SmF₃/NdF₃复合氟化物构成。为系统研究夹层特性影响,实验根据不同添加含量设置了四个梯度化的面密 度参数,分别为 0.815、1.63、3.26 和 6.52 × 10⁻⁴ g/mm²,该参数序列按单位面积涂覆量由低到高依次递 增,覆盖了从基准值到四倍基准值的剂量范围。

Table 1.	Interlayer	thickness a	and resistivity	of magnetic	materials	with va	arying	content	levels a	at a S	SmF ₃ /NdF ₃	composite
powder ra	atio of 3:1											
		ヘッパトレイ		ᆿᇫᆗᆊᄮ	ムナロ同時		0					

复合粉体含量 10 ⁻⁴ (g/mm ²)	0.815 (a)	1.63 (b)	3.26 (c)	6.52 (d)
夹层厚度范围(μm)	16.98~37.35	35.80~54.32	54.94~87.65	42.33~75.33
夹层平均厚度(μm)	29.20	46.33	74.32	63.00
电阻率(mΩ·cm)	1.86	3.83	5.39	6.12

表 1. SmF3/NdF3 复合粉体比例为 3:1 时不同含量磁体的夹层厚度和电阻率

表 1 为 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时不同含量磁体的夹层厚度和电阻率,从表中可以了解到随着夹层添加含量的提高,磁体电阻率呈现持续上升趋势。当添加含量达到 6.52 × 10⁻⁴ g/mm²时,磁体获得最大电阻率 6.12 mΩ·cm,较添加含量为 0.815 × 10⁻⁴ g/mm²的磁体提升 229%。另外,夹层厚度虽总体与添加含量呈正相关,但在复合粉体添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²时出现异常,该样品夹层平均厚度达 74.32 μm,反而高于添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²样品夹层的平均厚度。经分析,此现象是由于夹层水平方向的不均匀分布,当一侧厚度增加时必然伴随另一侧厚度的缩减,这种"此消彼长"效应导致平均厚度出现波动。在制备过程中,虽然添加了丙酮并按压以保证复合粉体的水平致密,但是在热变形过程中 钕铁硼磁体升温变形也会对其存在一定的影响。

特别需要指出的是,尽管添加含量为 3.26×10⁻⁴ g/mm²组的平均厚度优于 6.52×10⁻⁴ g/mm²组,但其 电阻率(5.39 mΩ·cm)仍低于后者。这表明复合粉体添加含量才是决定电阻率的关键因素,而夹层厚度对电 阻率的贡献居于次要地位。



Figure 1. Olympus images of interlayer magnets with varying content levels at a SmF₃/NdF₃ composite powder ratio of 3:1; (a) 0.815×10^{-4} g/mm²; (b) 1.63×10^{-4} g/mm²; (c) 3.26×10^{-4} g/mm²; (d) 6.52×10^{-4} g/mm² 图 1. SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时不同含量的磁体夹层面 Olympus 图; (a) 0.815×10^{-4} g/mm²; (b) 1.63×10^{-4} g/mm²; (c) 3.26×10^{-4} g/mm²; (d) 6.52×10^{-4} g/mm²; (e) 3.26×10^{-4} g/mm²; (f) 1.63×10^{-4} g/mm²; (h) 1.63×10^{-4} g/m²; (h) 1.6

图 1 所示为 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 添加含量梯度变化的热变形夹层磁体显微结构(压力方向 切面)。图 1(a)显微分析表明: 灰白色钕铁硼主相基体中分布着 NdF₃ 复合粉体夹层, 平均厚度为 29.2 μm。

该夹层主体呈连续性颜色为黑色,局部存在暗红色区域,边缘呈现非平整界面并伴有粉体逸散现象, 部分复合粉体扩散至钕铁硼晶界,其中黑色区域应该为 NdF₃粉体富集区,其 Nd 元素与富钕相相互作用, 强化磁体结合强度;暗红色区域应该为 SmF₃相,除夹层间外还分布在夹层边缘区域,因 SmF₃相在热变 形过程中会优先发生表面扩散,因其热力学稳定性较低,另外还有较高的扩散系数导致。随着添加含量 $从 0.815 \times 10^{-4}$ g/mm² 增加到 6.52 × 10⁻⁴ g/mm²,夹层边缘逸散面积扩大,暗红色区域占比也增加。





图 2 为添加 SmF₃和 NdF₃复合粉体比例为 3:1 不同添加含量的热变形钕铁硼磁体的磁性能图。根据数据图可以看出,随着添加含量的提高,磁体的矫顽力 H_{cj} 基本保持稳定,在添加含量为 0.815×10^{-4} g/mm²、 1.63×10^{-4} g/mm²和 6.52×10^{-4} g/mm²时保持在 9.5 kOe 左右,但是异常的是在添加含量为 3.26×10^{-4} g/mm²时,矫顽力略微提高到了 10.57 kOe,提高了 1 kOe 左右,其原因归结于 Sm 离子导致的晶界钉扎效应,形成了局部各向异性场。

磁体的剩磁 Br随着添加含量的增加略微提高而后大幅下降,在添加含量为 0.815×10⁻⁴ g/mm² 时,磁体的剩磁 Br为 13.65 kGs,当添加含量提高到 1.63×10⁻⁴ g/mm² 时,磁体的剩磁 Br提高到了 13.84 kGs,提高了 0.19 kGs,而后大幅下降到 13.1 kGs 左右,下降了 4.03%。

最大磁能积(BH)_{max}的变化趋势与剩磁 B_r相似,在添加含量为 1.63×10⁻⁴ g/mm²时最大磁能积(BH)_{max} 达到最高为 45.07 MGOe,而后随着添加含量的增加持续下降,在添加量为 6.52×10⁻⁴ g/mm²时下降到了 最低为 39.61 MGOe,整体下降了 8.14%。

总体来说, SmF₃/NdF₃复合粉体添加含量的提高对磁体有较大的影响, 是由于引入的氟化层会形成层 压, 同时会有较多的 SmF₃ 粉体逸散和扩散到钕铁硼主相中, 影响磁体的基本相从而降低磁体的磁性能。



Content of SmF₃/NdF₃ Composite Powder (10⁻⁴)(g/mm²)

Figure 3. Flexural strength plots of laminated magnets with SmF₃/NdF₃ composite powder at a 3:1 ratio under varying additive contents

图 3. SmF₃/NdF₃复合粉体比例为 3:1 时不同含量的夹层磁体的抗弯强度图

氟化层的引入相当于引入了一层脆性层,虽然磁体在打磨抛光测试性能过程中并没有因此发生断裂, 但是对于磁体的力学性能还是存在一定的影响,所以本实验探究了夹层对磁体抗弯强度的影响。

图 3 为夹层 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 不同添加含量的抗弯强度图,由图中可知,纯粉磁体的 抗弯强度为 254 MPa,添加含量从 0 增加到 1.63 × 10⁻⁴ g/mm²时,磁体的抗弯强度随着添加含量的增加 略微下降,在添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²时,磁体的抗弯强度反而升高达到了 270 MPa,原因应与该添 加含量下矫顽力提高的原因相同,由于晶界钉扎效应提升了磁体的抗弯强度,当添加含量提高到 6.52 × 10⁻⁴ g/mm²时,抗弯强度骤降到最低为 164 MPa,下降了 33.1%,总体来说,磁体的抗弯强度随着添加含 量的增加而下降。

3.2. SmF₃/NdF₃复合夹层不同比例对钕铁硼磁体的影响

本节实验已经探究了 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 下不同梯度添加含量对于磁体的电阻率、磁性

能和力学性能的影响,为了更加深入的探究复合粉体夹层对于钕铁硼磁体的影响,将选择探究在同一添加含量下不同比例的复合粉体夹层对钕铁硼磁体的影响,经过以上分析,发现在添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm² 时磁体的磁性能、电阻率以及抗弯强度都较为优异,所以本节选择继续添加 SmF₃/NdF₃ 复合粉体添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²时不同比例对于磁体的影响。

Table 2. Interlayer thickness and resistivity of laminated magnets with varying SmF3/NdF3 composite powder r	ratios
表 2. SmF3/NdF3 复合粉体不同比例磁体的夹层厚度及电阻率	

SmF3/NdF3粉体比例	1:5 (a)	1:3 (b)	1:1 (c)	3:1 (d)
夹层厚度范围(μm)	39.26~71.47	55.00~68.67	54.63~66.98	54.94~87.65
夹层平均厚度(μm)	54.63	63.03	59.48	74.32
电阻率(mΩ·cm)	24.3	7.6	6.43	5.39



Figure 4. Olympus micrographs of magnet interlayers with SmF₃/NdF₃ composite powder at varying ratios under a fixed content of 3.26×10^{-4} g/mm²; (a) 1:5; (b) 1:3; (c) 1:1; (d) 3:1

图 4. SmF₃/NdF₃ 复合粉体含量为 3.26×10⁻⁴ g/mm² 时不同比例的磁体夹层面 Olympus 图; (a) 1:5; (b) 1:3; (c) 1:1; (d) 3:1

表 2 给出了 SmF₃/NdF₃ 复合粉体相同添加含量时不同比例下磁体夹层的厚度范围以及平均厚度,可 以从表中了解到除了 SmF₃/NdF₃ 复合粉体的比例为 3:1 的磁体夹层厚度偏高,其余比例下的磁体夹层平 均厚度在 60±5 μm 范围,说明 SmF₃ 和 NdF₃ 复合粉体添加含量相同的情况下,夹层厚度并无太大差距。

不同复合粉体比例的夹层磁体的电阻率随着 SmF₃ 粉体的占比提高而降低, SmF₃ 粉体的占比由低到 高为 1:5、1:3、1:1、3:1,比例为 3:1 时电阻率最低为 5.39 mΩ·cm,比例为 1:5 时最高,为 24.3 mΩ·cm, 说明 SmF₃ 粉体占比的提高对于磁体的电阻率并无益处。

图 4 所示为 SmF₃/NdF₃ 复合粉体添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²时不同比例的热变形夹层磁体显微结构(压力方向切面),从图中可以看出,随着 SmF₃粉体的占比提高,由图(a)~(d),磁体夹层区域中暗红色更加明显,夹层边缘与钕铁硼主相间结合的更加紧密,另外夹层边缘区域的逸散更加严重,比例为 1:5 时如图(a),夹层边缘区域几乎没有逸散现象,而当比例为 3:1 时如图(d),逸散现象十分明显,同样这也是导致电阻率下降的原因,虽然夹层的厚度相差不大,但是随着粉体逸散到钕铁硼主相间就会导致夹层密度下降,对于电流的阻碍就会降低,电阻率就会降低。





图 5. SmF₃/NdF₃混合粉体添加含量为 3.26×10^{-4} g/mm²时不同比例的夹层磁体磁性能曲线

图 5 为 SmF₃/NdF₃ 复合粉体(添加含量为 3.26 × 10⁻⁴ g/mm²)不同比例的热变形夹层磁体磁性能曲线, 由图中可以看出,添加含量相同比例不同的 SmF₃/NdF₃ 复合粉体所制备出的磁体性能都较优异,磁体的 最大磁能积(BH)_{max} 都在 40 MGOe 往上,复合粉体比例的改变对于磁体的最大磁能积(BH)_{max} 的影响并不 大,SmF₃ 粉体占比的提高至比例为 1:1 时磁体的最大磁能积(BH)_{max} 达到最高,为 43.91 MGOe,当 SmF₃ 粉体占比提高到 3:1 时就导致磁体的最大磁能积下降,说明 SmF₃ 粉体占比过高时大量粉体逸散到主相间 影响磁体的性能,比例为 1:1 时最合适。

磁体的矫顽力 H_{cj} 整体呈现升高的趋势,从而可以看出当复合粉体中 SmF₃ 粉体占比越高,对磁体的 矫顽力越有益,矫顽力 H_{cj} 最高达到了 10.57 kOe,磁体的剩磁 B_r并没有显著的提高或降低,基本保持在 13~14 kGs 范围内,在复合粉体比例为 1:1 时最高,剩磁 B_r达到了 13.66 kGs。



Figure 6. Flexural strength of laminated magnets with SmF_3/NdF_3 composite powder at varying ratios under a fixed content of $3.26 \times 10^{-4} \text{ g/mm}^2$

图 6. SmF₃和 NdF₃复合粉体添加含量为 3.26×10^{-4} g/mm²时不同比例的磁体抗弯强度

图 6 添加 SmF₃和 NdF₃复合粉体添加含量为 3.26×10⁻⁴ g/mm²时不同比例的热变形夹层磁体的抗弯强度 度,从图中看出,同等添加含量的情况下,不同比例的 SmF₃/NdF₃ 复合粉体制备的夹层磁体的抗弯强度 受到的影响并不相同,只有 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 3:1 时磁体的抗弯强度提高,其余比例下磁体的 抗弯强度都受到了较大的影响。该原因与不同比例下的复合粉体夹层和主相的界面结合有关,结合图 4, 添加复合粉体比例为 1:5 和 1:3 时,夹层与钕铁硼主相间并没有紧密结合,其间存在空隙,当 SmF₃ 粉体 占比提高到 1:1 和 3:1 时夹层和钕铁硼主相结合十分紧密,这也是导致磁体抗弯强度变化的原因,所以当 复合粉体比例为 3:1 时磁体的抗弯强度结合最好,抗弯强度达到最高为 270 MPa,但是复合粉体比例为 1:1 时,如图 4(c)虽然也结合较好,但是其抗弯强度还是大幅下降,说明 SmF₃ 粉体占比仍然较低不足以 形成有效的强化。其中 SmF₃ 粉体比例为 1:3 时磁体的抗弯强度受到的影响最大,降到最低为 128 MPa。

4. 总结

本研究采用热压热变形工艺成功制备了复合夹层钕铁硼磁体,系统研究了 SmF₃/NdF₃ 复合夹层对磁体磁性能、电阻率及力学性能的影响机制,主要结论如下:

(1) 当 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:3 时,磁体电阻率随添加含量的提高呈单调上升趋势,添加含量为 6.52 × 10⁻⁴ g/mm² 时达到 6.12 mΩ·cm,较无夹层钕铁硼磁体提升了一个数量级。然而,过量添加导致复合粉体逸散到钕铁硼主相间,导致磁体的磁能积大幅下降,同添加含量下,磁体的最大磁能积 BH_{max} 降到了最低为 39.61 MGOe,同时磁体抗弯强度也显著降低,从 254 MPa 至 164 MPa,相较于无夹层的钕铁硼磁体降低了 35.4%。

(2) 在 3.26×10^{-4} g/mm² 的固定添加量下, SmF₃/NdF₃ 复合粉体不同比例下, SmF₃ 粉体占比越高矫顽 力越高, SmF₃ 占比增加至 3:1 时, 矫顽力提升至 10.57 kOe, 较 1:5 比例组提高 24.7%, 但是也会导致电 阻率越低,在 SmF₃/NdF₃ 复合粉体比例为 1:5 时电阻率最高为 24.3 mΩ·cm。当比例为 1:1 时,磁体的最 大磁能积(BH)_{max} 和剩磁最高,最大磁能积(BH)_{max}为 43.91 MGOe, 剩磁 B_r为 13.66 kGs。另外磁体的抗 弯强度方面, SmF₃/NdF₃ 比例为 1:5、1:3、1:1 时,磁体的抗弯强度都大幅下降,只有比例为 3:1 时,抗弯 强度提高达到 270 MPa。

参考文献

- Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., Hadjipanayis, G., et al. (2018) Current Progress and Future Challenges in Rare-Earth-Free Permanent Magnets. Acta Materialia, 158, 118-137. <u>https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.049</u>
- [2] Hono, K. and Sepehri-Amin, H. (2012) Strategy for High-Coercivity Nd-Fe-B Magnets. Scripta Materialia, 67, 530-535. <u>https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2012.06.038</u>
- [3] 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 ID: 168855. <u>https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.168855</u>
- [4] Sepehri-Amin, H., Ohkubo, T. and Hono, K. (2010) Grain Boundary Structure and Chemistry of Dy-Diffusion Processed Nd-Fe-B Sintered Magnets. *Journal of Applied Physics*, **107**, 09A745. <u>https://doi.org/10.1063/1.3351247</u>
- [5] Kim, J.Y., Kwon, H.W., Lee, J.G. and Yu, J.H. (2016) Improvement of Magnetic Performance of Nd-Fe-B-Type Die-Upset Magnet by RF3-Doping. *IEEE Transactions on Magnetics*, **52**, 1-4. <u>https://doi.org/10.1109/tmag.2016.2529060</u>
- [6] Komuro, M., Satsu, Y., Enomoto, Y. and Koharagi, H. (2007) High Electrical Resistance Hot-Pressed NdFeB Magnet for Low Loss Motors. *Applied Physics Letters*, **91**, Article ID: 102503. <u>https://doi.org/10.1063/1.2775037</u>
- [7] Kwon, H. and Kang, M. (2019) Prospect of Developing Nd-Fe-B-Type Magnet with High Electrical Resistivity. *Rare Metals*, 39, 2-12. <u>https://doi.org/10.1007/s12598-019-01336-w</u>
- [8] Kang, M.S., Kim, K.M., Kwon, H.W., Kim, D.H., Lee, J.G. and Shin, K.H. (2019) Electrical Resistivity and Magnetic Performance of Ceramics-Bonded Nd-Fe-B-Type Magnet Consolidated Using Dielectric Oxide Binder. *IEEE Transactions on Magnetics*, 55, 1-5. <u>https://doi.org/10.1109/tmag.2019.2896889</u>

- [9] 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. <u>https://doi.org/10.1109/tmag.2014.2331763</u>
- [10] Gabay, A.M., Marinescu-Jasinski, M., Liu, J. and Hadjipanayis, G.C. (2013) Internally Segmented Nd-Fe-B/CaF₂ Sintered Magnets. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49, 558-561. <u>https://doi.org/10.1109/tmag.2012.2207734</u>