文章编号: 1007 - 4252(2024) 05 - 0005 - 274 DOI: 10.20027/j.gncq.2024.0033

晶界添加氢化镝制备耐高温烧结钕铁硼的研究

申明辉[1,2],胡贤君[1,2],卢其云[1,2*]

(1.广东晟源永磁材料有限责任公司,广东 河源 517000; 2.河源市广晟广科稀土永磁创新研究院,广东 河源 517000)

摘要: 为了将晶界添加氢化镝 DyH_x 制备耐高温烧结钕铁硼应用于生产实践,本文对比了在无镝基材中分别通过熔炼添加、晶界添加 0.5wt.%的 Dy 所制备得到磁体的磁性能、热稳定性,对晶界添加磁体的均匀性进行了验证分析,对晶界添加 DyHx 提升矫顽力 H_{cj}和热稳定性的机理进行了研究。结果表明: 室温 20 ℃下,晶界添加相比熔炼添加的磁体其 H_{cj}提高 0.32 kOe,B_r 提高 0.09 kGs,热损降低 21%以上; 晶界添加磁体的剩磁 B_r 的均匀性、不可逆磁通损失 H_{irr}的均匀性均与单合金熔炼工艺无差别; 晶界添加磁体矫顽力以及热稳定性的提升主要归因于 D_y 元素直接利用率的提高和硬磁的(Nd, Dy) - Fe-B 壳层的形成。

关键词: 烧结钕铁硼; 晶界添加; 耐高温; 热稳定性

中图分类号: (TM273) **文献标志码:** A

Preparation of high temperature resistant sintered neodymium iron boron magnet by adding dysprosium hydride DyHx at grain boundaries

SHEN Minghui[1,2],HU Xianjun[1,2],LU Qiyun[1,2*]

(1. Guangdong Shengyuan Permanent Magnetic Materials Co., Ltd, Heyuan 517000, China; 2. Heyuan Guangsheng Guangke Rare Earth Permanent Magnet Innovation Institute, Heyuan 517000, China)

Abstract: In order to apply the method of adding DyH_x at grain boundaries to produce high temperature resistance sintered NdFeB magnet on the production line, this work compared the magnetic properties and thermal stability of magnets prepared by melting adding and grain boundaries adding the same amount of 0.5wt.% Dy at a dysprosium-free substrates, and analyzed the uniformity of the DyH_x grain boundaries added magnet. The mechanism of the increase of H_{cj} and the improvement of thermal stability by adding DyHx to grain boundary was also studied. The results show that when at room temperature of 20 ℃ and compared with the melting adding magnet,the grain boundaries adding magnet has a H_{cj} increased of 0.32

收稿日期: 2023-11-10; **修订日期:** 2024-08-16

基金项目: 河源市科技计划项目-支持稀土产业高质量发展专项-《稀土永磁材料强基及产业化集成创新》(No. 221125091604109).

作者简介: 申明辉(1987-),男,硕士,工程师,主要研究方向为稀土永磁材料(E-mail: smh2000@126.com).

通信作者: 卢其云(1973-),男,本科,教授级高工,主要研究方向为稀土永磁材料(E-mail: luqiyun2002@163.com).

kOe and B_r increased of 0.09 kGs, and the H_{irr} decreased more than 21%. The uniformity of the grain boundaries adding magnet is the same as the single alloy melting processes magnet when consider the standard deviation of residual magnetic B_r and irreversible magnetic flux loss H_{irr}.The improvement of coercive force H_{cj} and thermal stability of the grain boundaries adding magnets is mainly attributed to the increase of the direct utilization rate of Dy elements and the formation of hard magnetic (Nd, Dy) - Fe-B shells.

Key words: Sintered NdFeB; Grain Boundary Addition; High Temperature Resistance; Thermal Stability

0 引言

烧结 NdFeB 磁体实际矫顽力 H_{cj} 仅为理论值的 1/4~1/3，磁体的温度稳定性差，在高温下产生的热退磁限制了其在电动汽车驱动电机、风力发电机等高温领域的应用[1-2]。NdFeB 磁体的矫顽力是由主相晶粒外延层缺陷区域的反磁化畴形核场决定[3]，将 $Nd_2Fe_{14}B$ 晶粒的外延层磁硬化是提高磁体矫顽力的有效途径之一，$Dy_2Fe_{14}B$ 的磁晶各相异性场 H_A 为 $Nd_2Fe_{14}B$ 磁晶各相异性场的 2.24 倍，如果使重稀土元素 Dy 分布于主相晶粒的外延区域，则可提高磁体矫顽力且可避免传统熔炼合金化工艺添加 Dy 所带来的剩磁降低效应[4]，由此晶界添加工艺被提出并逐渐完善[5-7]，其也被称做晶界改性、晶界修饰、原位晶界扩散[8]、内扩散等。

在晶界添加方法中，不同重稀土 Dy 添加物(纯金属、合金、化合物) 在烧结热处理过程中从晶界向主相晶粒边界层的扩散能力大小、烧结后 Dy 在主相和晶界相中的分布情况以及相同 Dy 含量晶界添加后矫顽力的提高程度等各不相同[9-13]。添加相的粒度可分为纳米级、微米级，其中纳米粉的制备、保存、添加工艺复杂且对真空度要求高，难以大规模的工业应用，微米级含 Dy 晶界添加相主要有 Dy_2O_3、DyF、DyH_x、低熔点含 Dy 合金粉末等，其中 DyH_x 制粉简单，粉末容易细化，能均匀包覆主相，不会带入多余有害的杂质元素，可大规模应用到工业化生产中[14-17]。

目前晶界添加 DyH_x 的相关研究都只是对比了晶界添加前后磁性能的变化，并没有将晶界添加工艺的技术经济指标与传统熔炼合金化添加相同量 Dy 进行对比，也没有对晶界添加磁体的磁性能的均匀性进行验证分析，本试验完成了上述将晶界添加 DyH_x 应用于工业化生产必不可少的对比验证研究，并对晶界添加 DyH_x 提高磁体矫顽力 H_{cj}、高温稳定性的机理进行了研究。

1 实验方法与路线

1.1 氢化镝 DyH_x 的制备

将金属 Dy 剪切成块径 1-3 cm 小块，通过氢碎炉吸氢-脱氢并经过 100 目筛网过筛制备得到晶界添加相 DyH_x 粗粉。

1.2 无镝基材、熔炼添加、晶界添加生坯制备

按照质量分数 $(PrNd)_{30.3}Gd_{2.4}Al_{1.0}Cu_{0.26}Co_{1.5}Ga_{0.25}Nb_{0.25}Zr_{0.1}Fe_{63.01}B_{0.93}$ 熔炼并氢碎得到粗粉 80 kg，取其中 40 kg 记作“无镝基材”，在另外 40 kg 粗粉中加入 0.2 kg 上述 DyH_x 粉颗粒记作“晶界添加 0.5wt.%Dy”，按照质量分数 $(PrNd)_{30.3}Gd_{2.4}Dy_{0.5}Al_{1.0}Cu_{0.26}Co_{1.5}Ga_{0.25}Nb_{0.25}Zr_{0.1}Fe_{63.01}B_{0.93}$ 熔炼并氢碎得到粗粉 40 kg 记作“熔炼添加 0.5wt.%Dy”。3 份粗粉均通过气流磨制得平均粒度 SMD 为 2.80 μm 的细粉，并在 1.7 T 的磁场下一次取向成型制得密度为 4.1g/cm^3 的生坯。

1.3 最佳烧结、时效温度的确认

将上述三种不同的生坯分别在 1045 ℃、1055 ℃、1065 ℃、1075 ℃、1085 ℃ 分别烧结 6 h，烧结过程中设置在 900 ℃ 进行 3 h 的保温，测试其高温出炉的磁性能与毛坯密度，选择烧结致密且剩磁最高，无晶粒异常长大的温度为最佳烧结温度。将上述最佳烧结温度获得的毛坯进行 900 ℃×2 h 的一级时效处理后，分别在 480 ℃、500 ℃、520 ℃ 进行 4 h 的二级时效处理，选择 $(BH)_{max}+H_{cj}$ 最大值为其最佳时效温度。

1.4 测试设备

采用 HELOS/BR 激光粒度分析仪测量细粉粒度，采用 NIM-62000TB 永磁精密测量系统进行常温及高温磁性能测量，采用 ONH836 氧氮氢分析仪检测 DyH_x 的氢含量，采用 ICAP PRO 电感耦合等离子体发射光谱仪对甩片及烧结后的毛坯成分进行分析，采用 Scios 2 Hivac 场发射扫描电镜和 JXA-IHP200F 电子探针显微分析仪进行微观结构及成分的表征与分析，采用综合物性测量系统 PPMS 表征了磁体在外磁场中的技术磁化曲线。

2 结果与讨论

2.1 氢化镝的粒度及氢含量

通过吸氢-脱氢并经过 100 目筛网过筛得到的氢化镝的粒度如表 1 所示，其平均粒度 SMD 为 11.01 μm，而烧结钕铁硼细粉的平均粒度为 2.8 μm，因此在钕铁硼粗粉中加入 DyH_x 粗粉并在气流磨流化床状态下共同破碎、细化的过程更加有利于 DyH_x 与钕铁硼细粉的混合均匀，即 DyH_x 粗粉加入粒度约为 1-2 mm 的钕铁硼粗粉并经过粗混、气流磨制粉、细混可最大程度的保证 DyHx 在磁体中均匀分布。

表 1 氢化镝的粒度

Table1 Particle size of dysprosium hydride

粒度	*D*10/μm	*D*50/μm	*D*90/μm	*SMD*/μm
DyH_x 粉	5.57	20.81	65.28	11.01

氢化镝的氢含量为 10100 ppm 即 1.01%，相关研究表明 Dy 金属充分吸氢后获得的 DyH_3 在加热至 352.4 ℃脱氢形成 DyH_2，在加热至 984.5 ℃脱氢至纯 Dy[16]，当前钕铁硼行业的氢碎炉最高加热温度为 600 ℃，本实验脱氢温度设定为 550 ℃，即 DyH_3 不能脱氢完全，氢含量为 10100 ppm 的 DyHx 粉可以认为是由 83%的 DyH_2 和 17%纯 Dy 组成，而 DyH_2 会在高温烧结过程中进一步脱氢形成金属 Dy，相关研究表明高温脱氢后的 Dy 具有更加高的化学活性，从晶界向主相晶粒边界层的扩散能力越大[16]。

2.2 ICP 成分分析

对制备的 2 种甩片的稀土元素含量进行 ICP 分析，结果如表 2 所示，其中 Pr、Nd、Gd、Dy(以镝铁合金加入)均低于配方的设计值，即在熔炼阶段加入稀土金属无论是以金属单质还是合金的形式，都会存在一定的氧化烧损。

表 2 甩片 ICP 成分分析

Table2 ICP Analysis of SC

项目	Nd/%	Pr/%	Gd/%	Dy/%
无镝基材	22.85	6.71	2.33	<0.001
熔炼添加	22.74	6.93	2.38	0.48

对制备的 3 种毛坯的稀土元素含量进行 ICP 分析，结果如表 3 所示，晶界添加磁体的 Dy 含量大于熔炼添加磁体，这是因为熔炼添加的金属 Dy 在熔炼过程中存在一定氧化烧损，同时也可证明通过气流磨晶界添加的 DyH_x 粉并没有在制粉的过程中变成超细粉流失，即气流磨晶界添加 DyH_x 粉相比熔炼添加金属 Dy 提高了重稀土 Dy 的直接利用率，最终 Dy 元素收率提高了 4.76%。

表 3 毛坯 ICP 成分分析

Table3 ICP Analysis of Semi-finished Product

项目	Nd	Pr	Nd+Pr	Gd	Dy
无镝基材	22.02	7.06	29.08	2.31	<0.001
熔炼添加	21.92	6.72	28.64	2.30	0.42
晶界添加	21.56	6.94	28.50	2.30	0.44

2.3 最佳烧结时效温度

无镝基材、熔炼添加磁体均在 1065 ℃×6 h+900 ℃×2 h+480 ℃×4 h 获得最佳磁性能，晶界添加磁体在 1075 ℃×6 h+900 ℃×2 h+520 ℃×4 h 获得最佳磁性能，同时无镝基材、熔炼添加磁体在 1085 ℃烧结后出现肉眼可见的晶粒异常长大，而晶界添加磁体在 1085 ℃烧结后晶粒尺寸正常，即晶界添加 DyHx 粉后最佳烧结温度需提高 10 ℃，并且起到抑制晶粒异常长大的作用。

2.4 磁性能对比

2.4.1 常温 20 ℃磁性能

毛坯样品的常温磁性能如表 4 所示，相较于无镝基材，熔炼添加 0.5wt.%Dy 后，H_{cj} 提高 1.27 kOe，

B_r 降低 0.21 kGs，这是因为熔炼添加 0.5wt.%Dy 后由于 Dy 元素进入主相与 Fe 元素形成反铁磁耦合，导致主相的饱和磁极化强度 J_s 降低; H_{cj} 升高是因为 Dy-Fe-B 的各向异性场高于 Nd-Fe-B 的磁晶各向异场。

表 4　常温 20 ℃磁性能

Table4 Magnetic properties at room temperature of 20 ℃

项目	B_r/ kG_s	H_{cb}/ kOe	H_{cj}/ kOe	$(BH)_{max}$/ $MGOe$	H_k/H_{cj}
无镝基材	12.43	12.02	18.46	37.30	0.984
熔炼添加	12.22	11.82	19.73	36.06	0.985
晶界添加	12.31	11.93	20.05	36.83	0.985

晶界添加 0.5wt.%Dy 粉后，H_{cj} 提高 1.59 kOe，B_r 降低 0.12 kGs，晶界添加相比熔炼添加 B_r 高出 0.09 kGs，H_{cj} 高出 0.32 kOe，具有更高的综合磁性能。

2.4.2 高温 100 ℃、150 ℃磁性能对比

将上述常温 20 ℃测试磁性能的 D10×10 样柱分别在 100 ℃、150 ℃保温 5 min 后测试其高温磁性能，如表 5 所示。在 100 ℃时晶界添加磁体比熔炼添加磁体 H_{cj} 高出 0.4 kOe，B_r 高出 0.14 kGs; 150 ℃时晶界添加磁体比熔炼添加磁体 H_{cj} 高出 0.54 kOe，B_r 高出 0.23 kGs; 即随着温度的升高，晶界添加磁体相比熔炼添加磁体的综合磁性能更加优异。

2.4.3 温度系数对比

如表 5 所示，熔炼添加磁体的剩磁温度系数 α(B_r) 比无镝基材低，晶界添加磁体的剩磁温度系数 α(B_r) 与无镝基材基本一致。

熔炼添加、晶界添加磁体的矫顽力温度系数 β(H_{cj}) 均比无镝基材更优，尤其晶界添加磁体改善更加明显，相比熔炼添加磁体，晶界添加磁体的 β(H_{cj}) 的绝对值在 20 - 100 ℃区间降低了 0.028%/℃，在 20-150 ℃区间降低了 0.024%/℃，说明晶界添加磁体具有最优的温度稳定性。

2.5　高温热损对比

将上述测试用的 D10×10 mm 样柱在全开状态下进行 200 ℃×1.5 h 的热损实验，将三种毛坯分别机加工成 8 块 28×18×3.8 的黑片方块，在全开路 120 ℃×2 h 的条件下进行热损实验，其热损数据如表 6 所示: 相比熔炼添加磁体，晶界添加磁体的热损分别降低了 21.45%、21.15%。

2.6　晶界添加磁体均匀性分析

在晶界添加 DyH_x 的工艺中，DyH_x 粉的比重、颗粒大小与钕铁硼合金粉均不相同，二者能否实现均匀混合并保证晶界添加磁体磁性能的一致性是该工艺工业化生产过程必须加以考量的重要问题[18]。

当前除了剩磁 B_r 和内禀矫顽力 H_{cj} 两项磁性能指标外，客户越来越多的关注磁通 Φ、热减磁 H_{irr} 等的一致性。因此有必要对晶界添加磁体的磁性能的一致性进行验证。

表 5　高温 100 ℃、150 ℃磁性能及 B_r 及 H_{cj} 温度系数

Table5 Magnetic properties at temperature of 100 ℃、150℃ and temperature coefficient of B_r and H_{cj}

温度	项目	B_r/ kGs	Hcb/ kOe	H_{cj}/ kOe	$(BH)_{max}$/ $MGOe$	H_k/H_{cj}	α(B_r) / (%/℃)	β(H_{cj}) / (%/℃)
100 ℃	无镝基体	11.31	8.92	8.99	30.40	0.986	−0.113%	−0.641%
	熔炼添加	11.05	9.39	9.86	29.12	0.988	−0.120%	−0.625%
	晶界添加	11.19	10.09	10.26	30.06	0.985	−0.114%	−0.611%
150 ℃	无镝基体	10.44	5.23	5.25	25.47	0.984	−0.123%	−0.551%
	熔炼添加	10.10	5.32	5.62	23.86	0.987	−0.133%	−0.550%
	晶界添加	10.33	6.14	6.16	25.29	0.986	−0.124%	−0.533%

表 6 高温加热不可逆磁通损失对比

Table6 H_{irr} of 3 kinds of magnets

热损 H_{irr}	D10×10 mm 样柱 开路 200 ℃×1.5 h	F28×18×3.8 黑片 开路 120 ℃×2 h
无镝基材	15.75%	9.70%
熔炼添加	11.75%	3.31%
晶界添加	9.23%	2.61%

2.6.1 磁通 Φ 及热损 *H*irr 的一致性

同一台电机的各磁钢的磁通 Φ 存在一致性差异，会造成电机振动、功率降低进而影响整体电机的功能，电机磁钢一般都会对磁通一致性有要求，影响成品磁通一致性的因素主要有：剩磁的一致性、公差的一致性、倒角及镀层的一致性等，在机加工误差忽略不计的情况下，相同规格黑片的磁通一致性反应了毛坯各处剩磁 B_r 的一致性。

一般认为任一方向尺寸<1 mm 的钕铁硼磁钢为特微磁体，将三种钕铁硼毛坯分别机加工成 10 个 D5×0.7 mm 的圆片，在微型磁体专用磁通计中测量其常温磁通 Φ_0，并测量其经过 140 ℃半开路烘烤后冷却至室温的磁通 Φ_T，计算其磁通不可逆损失，结果如表 7 所示：

晶界添加磁体常温磁通 Φ_0 的标准方差、高温烘烤后冷却至室温的磁通 Φ_t 的标准方差、热损 H_{irr} 的标准方差均优于无镝基材、熔炼添加等单合金熔炼工艺磁体，由此可以佐证因为晶界添加 Dy 导致的剩磁 B_r 值的降低和 H_{cj} 的提高在磁体内部的各处是同等程度的，晶界添加的 Dy 元素在烧结磁体中宏观上是均匀分布的，即使是特微磁体也不影响其表观磁性能的一致性，产业化上是可行的。

表 7 D5×0.7 mm 磁体磁通、热损均匀性

Table7 Φ_0、Φ_T and H_{irr} of D5×0.7 mm magnet

类别	磁通 Φ_0/mWb 均值、方差		磁通 Φ_T/mWb 均值、方差		热损 H_{irr} 均值、方差	
基材	17.90	0.32	15.39	0.33	14.02%	0.007
熔炼	17.56	0.13	16.06	0.25	8.54%	0.012
晶界	17.73	0.14	16.65	0.16	6.09%	0.006

2.6.2Dy 元素分布的均匀性

将晶界添加、熔炼添加磁体毛坯分别在 5 个不同的位置取样通过 ICP 进行 Dy 元素含量测试，结果如表 8 所示，晶界添加毛坯的 Dy 含量比熔炼添加高 0.02%，虽然添加了相同量的 Dy，但熔炼添加是通过镝铁合金的形式在熔炼过程中加入，晶界添加是通过 DyH_x 粉末的形式在气流磨过程加入，相比而言，晶界添加工艺中 Dy 的直接利用率更高。

从 Dy 元素含量的标准方差可以看出，晶界添加磁体的 Dy 元素分布均匀性比熔炼添加磁体更优，由此可以证明 DyH_x 粉经过气流磨时并没有因为粒度、比重等与钕铁硼粉不同而分布在特定区域，也没有在烧结时效过程中因为熔点的不同而出现偏析聚集现象造成分布的不均。

表 8 Dy 元素质量分数对比

Table8 Comparison of Dy content of 3 kinds magnet

项目	Dy 元素含量质量分数(%)	均值(%) /方差
熔炼	0.420、0.411、0.396、0.428、0.417	0.417 / 0.0049
晶界	0.436、0.435、0.438、0.434、0.440	0.437 / 0.0027

2.7 机理分析

2.7.1EPMA 线扫

如图 1 所示分别在熔炼添加磁体、晶界添加磁体的大颗粒富钕相周边的 2 个晶粒中心连线进行 10 μm 的 Nd、Dy 元素的线扫分析。

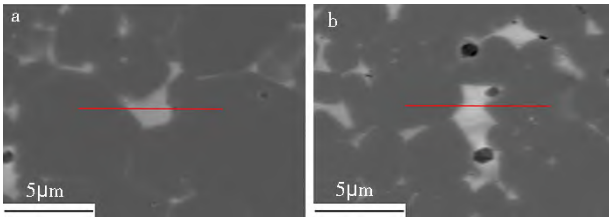


图 1 EPMA 线扫(a) 熔炼添加(b) 晶界添加

Fig. 1 EPMA line scanning (a) melting addition (b) grain boundary addition

从图 2 的 Nd 元素线扫图中可以看出，晶界添加磁体晶界相中的 Nd 元素含量远大于熔炼添加磁体的晶界相中 Nd 含量，说明晶界添加的 DyH_x 将晶粒主相边界处的 Nd 置换后形成(Nd,Dy)-Fe-B 相，置换出来 Nd 元素在晶界处富集。

从图 3 的 Dy 元素线扫图中可以看出熔炼添加 0.5wt.%Dy 的磁体主相、晶界相中均含元素 Dy，且晶界相中的 Dy 含量比主相中低；晶界添加磁体主相中基本不含 Dy 元素，主相晶粒的边缘处 Dy 含量有 2 个凸起的峰，晶界处 Dy 含量高于主相并低于主

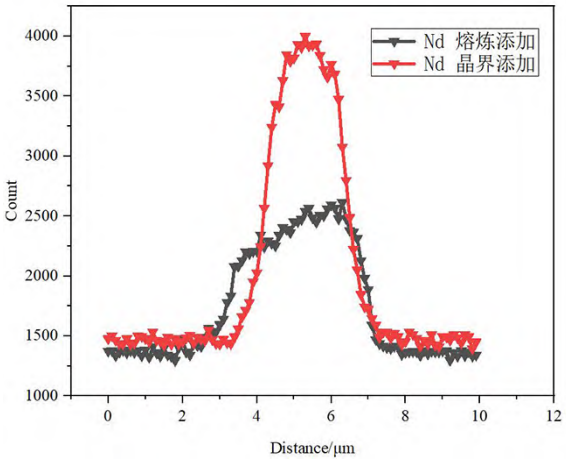


图 2　Nd 元素线扫描

Fig. 2 Line Scanning of Nd Element

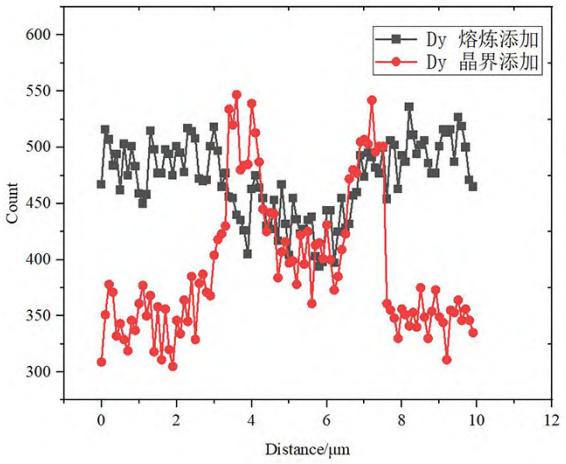


图 3　Dy 元素线扫描

Fig. 3 Line Scanning of Dy Element

相晶粒边缘处。

2.7.2EPMA **面扫**

图 4 为熔炼添加磁体、晶界添加磁体分别在 5 μm 标尺下的背散射图像和 Dy 元素分布图。从图中可以看出熔炼添加磁体的 Dy 元素在主相、晶界相均有分布，晶界处 Dy 含量低于主相; 晶界添加磁体主相中基本不含 Dy，Dy 元素缠绕分布于主相与晶界交界处，形成明显的(Nd，Dy) －Fe－B 核壳结构，该核壳结构提高了主相晶粒外延层缺陷区域的反磁化畴形核场，起到磁硬化的作用，提高了磁体的内禀矫顽力 H_{cj}，改善磁体高温稳定性，同时减小剩磁 B_r 的降低，获得综合磁性能最佳的低成本耐高温磁钢。

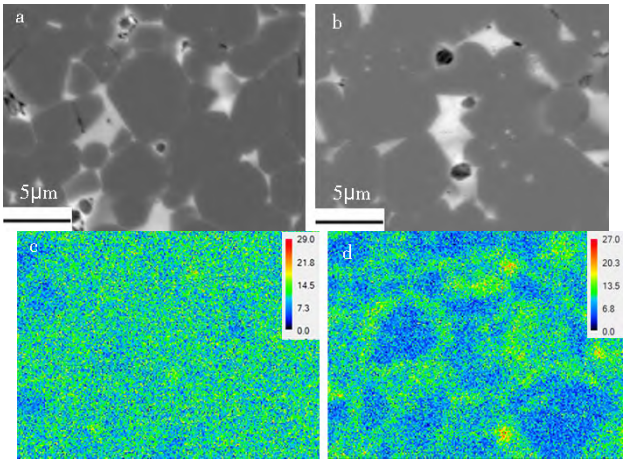
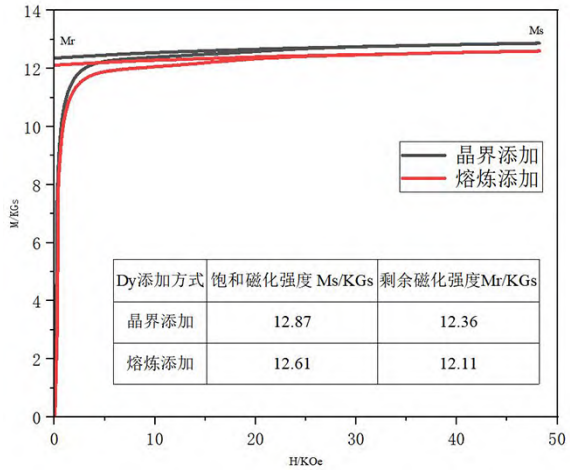


图 4　EPMA 面扫(a) 熔炼添加背散射图(b) 晶界添加背散射图(c) 熔炼添加 Dy 元素分布(d) 晶界添加 Dy 元素分布

Fig. 4 EPMA surface scanning (a) Backscattered electron morphology of melting addition magnet (b) Backscattered electron morphology of grain boundary addition magnet (c) Dy distribution of melting addition magnet (d) Dy distribution of grain boundary addition magnet

2.7.3M－H **磁化曲线**

图 5 为熔炼添加磁体、晶界添加磁体分别在外磁场中技术磁化至饱和后移去外磁场的 M－H 磁化曲线。



Dy添加方式	饱和磁化强度 Ms/KGs	剩余磁化强度Mr/KGs
晶界添加	12.87	12.36
熔炼添加	12.61	12.11

图 5　熔炼添加、晶界添加磁体 M－H 磁化曲线

Fig.5 M－H magnetization curve of melting addition magnet and grain boundary addition magnet

二者初始磁化曲线均很陡，都符合形核型矫顽力机制的特征: 在外磁场作用下磁体内的畴壁位移

十分容易，很容易磁化到饱和[1]；而存在钉扎点的铁磁体的典型磁化曲线初始阶段非常平缓[19]，即晶界添加的 DyH_x 粉并没有在晶界或者畴壁处形成钉扎效应，而是将晶粒主相边缘处的 Nd 置换后原位形成高磁晶各向异性场的(Nd,Dy)-Fe-B 合金相。

晶界添加磁体的饱和磁化强度 M_s 和剩余磁化强度 Mr 比熔炼添加磁体高约 0.25KGs，这也是晶界添加磁体具有较高的剩磁 Br 的原因。

3 结论

常规的晶界添加研究侧重于分析添加前后磁体的矫顽力 H_{cj} 的提高[15]，而加入重稀土必然提高磁体矫顽力，所以其并不能证明晶界添加工艺的产业化价值，也没有人对晶界添加磁体的均匀性进行验证分析，而上述问题是将晶界添加 DyH_x 工艺产业化实施并供给市场时必须加以考量的。

本研究证实晶界添加相比熔炼添加相同量的 0.5wt.%Dy 时，磁体的 H_{cj} 提高 0.32 kOe，B_r 提高 0.09 kGs，晶界添加磁体的高温磁性能更优，矫顽力温度系数更优，其制备得到的产品的热损值降低 21%以上，同时晶界添加磁体的磁性能的均匀性与单合金熔炼工艺无差别甚至更优，本研究对该工艺的产业化实施具有指导意义。

参考文献：

[1] 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.2011：95.

[2] 谭春林，包大新，严密.高工作温度烧结钕铁硼磁体的研究现状[J].材料导报，2005(04)：97-100+104.

[3] K.D.Durst，H.Kronmuller.The Coercive Field of Sintered and Melt-Spun NdFeB Magnets[J].Journal of Magnetism and Magnetic Materials.1987，68(1)：63-75

[4] 胡盛青，陈洪，周朝辉.添加 Dy 烧结 NdFeB 磁体的研究进展[J].金属功能材料，2014，21(06)：52-57.

[5] M.Velicescu，P.Schrey，W.Rodewald.Dy Distribution in the Grains of High-Energy (Nd,Dy)-Fe-B magnets[J].IEEE Trans-actionson Magnetics.1995，31(6)；3623-3625

[6] R.S.Mottram，A.Kianvash，I.R.Harris. The Use Of Metal Hydrides in Powder Blending for the Production of NdFeB Ty-pe Magnets[J].Journal of Alloys and Compounds.1999，283：282-288

[7] G. Yan，P. J. McGuiness，J. P. G. Farr，I. R. Harris. Optimisation of the Processing of Nd-Fe-B with Dysprosium Addition[J].Journal of Alloys and Compounds.2010，491(1-2)：L20-L24.

[8] 刘仲武，何家毅.钕铁硼永磁晶界扩散技术和理论发展几个问题[J].金属学报，2021，57(09)：1155-1170

[9] X.L.Liu，X.J.Wang，L.P.Liang. Rapid Coercivity Increment of Nd-Fe-B Sintered Magnets by Dy69Ni31 Grain Boundary Restructuring[J].Journal of Magnetism and Magnetic Materials.2014，370：76-80.

[10] 宋小明，张廷安等.晶界添加 Dy79.73Fe20.27 对烧结钕铁硼微观结构和磁性能的影响[J].稀土，2020，41(03)：10-16.

[11] M. Yue，W. Q. Liu，D. T. Zhang，Z. G. Jian，A. L. Cao，J. X. Zhang.Tb Nanoparticles Doped Nd-Fe-B Sintered Permanent Magnet with Enhanced Coercivity[J].Applied Physics Letters.2009，94(9)：092501.

[12] K.H.Bae，T.H.Kim，S.R.Lee，Namkung，T.S.Jang.Effects of DyHx and Dy203 Powder Addition On Magnetic and Microstructural Properties of Nd-Fe-B Sintered Magnets[J].Journal of Applied Physics.2012，112(9)：093912.

[13] T.H.Kim，S.R.Lee，H.J.Kim，W.M.Lee，T.S.Jang. Magnetic and Microstructural Modification of the NdFeB Sintered Magnet by Mixed DyF3/DyHx Powder Doping[J].Journal of Applied Physics.2014，115(17)

[14] Y.H.Liu，S.Guo，X.M.Liu，D.Lee，A.R.Yan.Magnetic Properties and Microstructure of Nd-Fe-B Sintered Magnets with DyHx Addition[J].Journal of Applied Physics.2012，111(7)：07A705.

[15] 向丽君，P.J.McGuiness，Robin Stuart Mottram 等.镝氢化物掺杂钕铁硼稀土永磁体的研究[J].中国稀土学报，2014，32(05)：555-562.

[16] 刘攀.镝氢化物对烧结 Nd-Fe-B 磁体性能和显微结构影响的研究[D].杭州.浙江大学，2015.

[17] 汪雪娇.稀土氢化物重构烧结钕铁硼磁体晶界组织研究[D].杭州.浙江大学，2016.

[18] 蔡岭文.一种高温压应力提高稀土永磁材料性能的方法.CN106952721B[P].2019-02-05

[19] 周寿增.畴壁的钉扎与矫顽力[J].仪表材料，1980(03)：66-74