

《晶界扩散钕铁硼永磁材料》国家标准 制定依据和技术要求分析

吕向科¹, 沈国迪^{1*}, 申立汉², 高 兰², 张 民¹

(1. 宁波韵升股份有限公司, 浙江 宁波 315806;

2. 有色金属技术经济研究院有限责任公司, 北京 100080)

摘 要: 为了促进晶界扩散钕铁硼永磁材料新工艺、新材料的应用, 为生产企业和应用企业提供指南, 制定了《晶界扩散钕铁硼永磁材料》国家标准。调查了钕铁硼永磁材料国际标准、国家标准和世界领头企业的技术标准, 结合起草单位意见, 确定了本标准涉及 36 个牌号作为技术要求对象。采用经验公式计算主要磁性技术指标, 并征集了参与企业样品测试数据加以验证。本标准 G55SH、G52UH、G54UH、G48EH 和 G50EH 等综合磁性能高于日本企业标准, 本标准处于国际先进水平。

关键词: 烧结钕铁硼; 晶界扩散; 永磁材料; 国家标准

中图分类号: TM273

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2022)01-0134-08

钕铁硼自 20 世纪 80 年代问世以来, 由于其具有高的剩磁和最大磁能积, 良好的动态回复特性和高的性价比, 是制造效能高、体积小和重量轻的电磁功能器件的理想材料, 约占据了永磁材料市场的一半。经过多年的发展, 中国成为全球最大的稀土永磁材料研发中心和生产基地。未来应用于信息技术、高档数控机床、机器人、轨道交通、节能与新能源汽车、高性能医疗器械和节能家电等领域的钕铁硼市场需求不断扩大, 而且这些应用领域迫切需求高性能钕铁硼永磁材料^[1,2]。

2005 年日本信越化学工业株式会社公布了采用氟化物制备晶界扩散钕铁硼永磁材料的技

术^[3-5], 该技术成为研制高性能钕铁硼永磁材料的热点。晶界扩散技术是在磁体表面获得含有重稀土元素 Dy/Tb 的金属或化合物的涂层, 再通过热处理使 Dy/Tb 经晶界扩散到烧结磁体内, 可有效改善钕铁硼磁体的矫顽力和使用温度, 同时很少影响磁体剩磁, 可制备出常规工艺无法企及的高性能钕铁硼磁体。随着中国对该技术研发、产业化推进^[6-17]以及市场化需求, 2018 年 11 月全国稀土标准化技术委员会论证了建立国家标准的必要性, 将立项报告上报给国家标准化管理委员会, 2020 年 8 月下达计划。2020 年 9 月, 起草单位有 14 家: 宁波韵升股份有限公司、北京中科三环高技术股份有限公司、

收稿日期: 2021-09-01

作者简介: 吕向科 (1981-), 男, 河南焦作人, 博士, 高级工程师, 从事钕铁硼永磁材料研发, E-mail: lvxk@ysweb.com

* 通讯作者: 沈国迪, 高级工程师, E-mail: shengd@ysweb.com

DOI: 10.16533/J.CNKI.15-1099/TF.20220022

安徽大地熊新材料股份有限公司、宁波招宝磁业有限公司、北京工业大学、包头天和磁材科技股份有限公司、宁波永久磁业有限公司、杭州美磁科技有限公司、有研稀土新材料股份有限公司、福建省长汀金龙稀土有限公司、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、包头稀土研究院、赣州富尔特电子股份有限公司和中国北方稀土(集团)高科技股份有限公司,2021 年 7 月完成了标准会议审定。

为了方便移动智能终端、新能源汽车、高档数控机床、机器人以及节能家电等领域应用企业与生产企业间贸易交往,本文结合当前晶界扩散钕铁硼永磁材料的现状,对制定依据和技术要求进行了介绍和分析。

1 编制原则和依据

1.1 术语和定义

晶界扩散钕铁硼永磁材料(grain boundary diffusion neodymium iron boron permanent magnet materials;GBD NdFeB PM materials)定义为采用高温热处理工艺,促使烧结钕铁硼永磁材料表面包覆的重稀土元素沿着其晶界从表面扩散进入内部,提升了内禀矫顽力的永磁材料。

补充了注释:采用机械加工和表面防护处理,或直接表面防护处理,形状和规格逐步接近用户设计的晶界扩散钕铁硼永磁材料,称为晶界扩散钕铁硼永磁体。此注释为本标准的技术要求包括永磁材料磁性能、磁性能温度系数、其它物理性能(包括密度、硬度、抗压强度、抗弯强度、杨氏模量、比热容、热传导率、热膨胀系数、电阻率、最高使用温度)、失重、永磁体的表面防护、磁偶极矩一致性、高温磁通不可逆损失、外观质量和尺寸,提供了晶界扩散钕铁硼永磁材料全面性要求内容的依据。

随着试验方法标准化体系逐步完善,后续会添加如永磁体磁偏角要求等项目。

其他术语引用 GB/T 9637 和 GB/T 13560,重要的是“最高使用温度”定义:热退磁状态 $L/D=0.7$ 的永磁圆柱样品(直径为 D ,高度为 L),饱和磁化

后,在开路状态下从室温加热到某一恒定温度保温 2 h,然后冷却到室温,其开路磁通不可逆磁通损失小于等于 5%的最高保温温度,这是一个通过测试获得的参数^[18]。

1.2 牌号和简化牌号

GB/T 13560-2017《烧结钕铁硼永磁材料》^[18]给出了“字符牌号”和“简化代号”这两个名称,“字符牌号”具有历史版本上的痕迹。本标准对应上述“字符牌号”、“简化代号”,称为“牌号”、“简化牌号”,更加简明,同时提供了本标准的附录 B 晶界扩散钕铁硼永磁材料的简化牌号和对照表,具体见表 1。与 GB/T 40790-2021《烧结钕及富钕永磁材料》^[19]的“产品牌号”和“简化牌号”相比较,本标准的“牌号”和“简化牌号”更加简明。

本标准“牌号”对应了 IEC 60404-8-1 中“简称”(Brief designation)^[20]。与本标准中的简化牌号相比较,IEC“简称”并不简单,使用时不易记住。而 IEC 数字代号(Code number)如 R7-1-1,仅对 IEC 标准文本中排序起作用,几乎被行业忽略了。行业常用“简化牌号”,包括日本日立金属、信越和 TDK 等企业。

1.3 编制原则

本标准的编制原则如下:(1)查询相关标准和收集国内外客户的相关技术要求,参照并采纳相关国际标准、世界领头企业的技术标准,做到标准的先进性;(2)根据目前国内晶界扩散钕铁硼永磁材料生产企业的具体情况及技术水平,结合烧结钕铁硼用户的要求及应用技术的发展趋势,确定技术指标,力求做到标准的合理性、实用性,与时俱进;(3)本标准是在烧结钕铁硼基础上的晶界扩散永磁材料,没有涉及热压钕铁硼永磁材料,主要原因是热压市场小,而且可实现提高内禀矫顽力的技术路线还在研究;没有涉及烧结钕及富钕永磁材料,主要原因是在《烧结钕及富钕永磁材料》标准的附录中已经明确采用晶界扩散工艺^[19]。

1.4 牌号的确定

根据起草单位的意见,确定了本标准《晶界扩散钕

铁硼永磁材料》涉及的牌号即主要技术内容的范围。

晶界扩散钕铁硼永磁材料按内禀矫顽力大小分为高矫顽力 H、特高矫顽力 SH、超高矫顽力 UH、极高矫顽力 EH 及至高矫顽力 TH 五个品种。

目前 N、M 系列(即品种)采用晶界扩散,与 H 以上系列牌号相比,市场需求低、竞争优势表现不

明显、技术成熟度处于雏形阶段。内禀矫顽力达到 40 kOe 品种的需求和市场竞争力的问题。

考虑目前常规工艺制备的晶界扩散基体材料所含的重稀土 Dy、Tb 的水平以及磁性能所处的水平,最后确定 36 个牌号,表 1 为本标准技术指标制定原则与日本企业标准对比。

表 1 本标准技术指标制定原则与日本企业标准比对

Table 1 Principles for the formulation of technical indicators of this standard and comparison with Japanese company standards

This standard					Japanese companies(Shin-Etsu ,Hitachi Metals and TDK) standards					
Grades	Brief designation	H_{cJ}	$(BH)_{\max}/\text{MGOe}$		$H_{cJ} +$ $(BH)_{\max}$	Company Grades ^{Note1}	$H_{cJ}/$	$(BH)_{\max}/\text{MGOe}$		$H_{cJ} +$ $(BH)_{\max}$
		/kOe	Deviation				kOe	Deviation		
		min	Lower	Upper			min	Lower	Upper	
G-NdFeB 415/135	G52H	17	-3	+1	69					
G-NdFeB 440/135	G55H	17	-3	+1	72					
G-NdFeB 455/135	G57H	17	-3	+1	74					
G-NdFeB 360/159	G45SH	20	-2	+1	65	N47TS-GF	22.5	-5	+1	69.5
G-NdFeB 380/159	G48SH	20	-3	+1	68	N49TS-GR	22.5	-5	+1	71.5
						NMX-U48SH	23.0	-3	+2	71
						NMX-E49SH	22.5	-4	+1	71.5
						N50SH-GF	21.0	-4.5	+1	71
G-NdFeB 400/159	G50SH	20	-3	+1	70	N52AS-GF	19.5	-5	+1	71.5
						N52TS-SGF	22.5	-5	+1	74.5
						NMX-E50CH	19.5	-3	0	69.5
						NEOREC51DSX	23.0	-4	0	74
G-NdFeB 415/159	G52SH	20	-3	+1	72					
G-NdFeB 440/159	G55SH	20	-3	+1	75					
G-NdFeB 265/199	G33UH	25	-2	+1	58					
G-NdFeB 280/199	G35UH	25	-2	+1	60					
G-NdFeB 300/199	G38UH	25	-2	+1	63					
G-NdFeB 320/199	G40UH	25	-2	+1	65					
G-NdFeB 335/199	G42UH	25	-2	+1	67	N44TU-GR	26.5	-4.5	+1	70.5
None	None	-	-	-	-	NMX-E45EH	28.0	-4	+1	73
						N44UZ-GR	28.0	-4	+1.5	72
G-NdFeB 360/199	G45UH	25	-3	+1	70					
None	None	-	-	-	-	N48UH-GR	25.0	-5.5	+1	73
						N47TU-SGF	26.0	-5	+1	73
						NMX-U47EH	25.0	-3	+2	72
						NEOREC48DUH	25.0	-4	0	73
						N48UZ-SGR	28.0	-5.5	+1	76

续表 1

This standard		Japanese companies(Shin-Etsu ,Hitachi Metals and TDK) standards								
Grades	Brief designation	H_{cj}	$(BH)_{\max}/\text{MGOe}$		$H_{cj} +$ $(BH)_{\max}$	Company Grades ^{Note1}	$H_{cj}/$	$(BH)_{\max}/\text{MGOe}$		$H_{cj} +$ $(BH)_{\max}$
		/kOe	Deviation				kOe	Deviation		
			Lower	Upper				Lower	Upper	
G-NdFeB 380/199	G48UH	25	-3	+1	73	N50UH-SGF	25. 0	-4. 5	+1	75
G-NdFeB 400/199	G50UH	25	-3	+1	75					
G-NdFeB 415/199	G52UH	25	-3	+1	77					
G-NdFeB 430/199	G54UH	25	-3	+1	79					
G-NdFeB 225/239	G28EH	30	-2	+1	58					
G-NdFeB 240/239	G30EH	30	-2	+1	60					
G-NdFeB 265/239	G33EH	30	-2	+1	63					
G-NdFeB 280/239	G35EH	30	-2	+1	65					
G-NdFeB 300/239	G38EH	30	-2	+1	68					
None	None	30	-	-	-	N41Z-GR	30. 0	-4	+1	71
						N41MZ-GR	32. 5	-4	+1	73. 5
						NMX-E41EH	32. 0	-4	+1	73
G-NdFeB 320/239	G40EH	30	-2	+1	70	NEOREC44DUX	30. 0	-3. 3	+0. 7	74
G-NdFeB 335/239	G42EH	30	-3	+1	72					
None	None	30	-	-	-					
G-NdFeB 360/239	G45EH	30	-3	+1	75	N37EZ-G	35. 0	-4	+1	72
G-NdFeB 380/239	G48EH	30	-3	+1	78					
G-NdFeB 400/239	G50EH	30	-3	+1	80					
G-NdFeB 225/279	G28TH	35	-2	+1	63					
G-NdFeB 240/279	G30TH	35	-2	+1	65					
G-NdFeB 265/279	G33TH	35	-2	+1	68					
G-NdFeB 280/279	G35TH	35	-2	+1	70					
G-NdFeB 300/279	G38TH	35	-2	+1	73					
G-NdFeB 320/279	G40TH	35	-3	+1	75					
G-NdFeB 335/279	G42TH	35	-3	+1	77					
G-NdFeB 360/279	G45TH	35	-3	+1	80					

Note: The prefix of the Japanese company grades is N, belonging to Shin-Etsu Chemical Co. , Ltd. , a subtotal of 16 grades^[21]. The prefix is NMX-, belonging to Hitachi Metals, Ltd. , a subtotal of 6 grades^[22]. The prefix is NEOREC, belonging to TDK Corporation. , a subtotal of 3 grades^[23]. A total of 25 grades

2 主要技术指标和技术水平

2.1 主要磁性能数据的确定

在确定了 36 个牌号后,统一各个品种的 H_{cj} (如表 1)。以综合磁性能 $H_{cj} + (BH)_{max}$ 划条界线,H 品

种的为 67、SH 品种的为 68、UH 品种的为 70、EH 品种的为 72、TH 品种的为 75,界线以上(含界限值),规定 $(BH)_{max}$ 的范围为-3 MGOe~1 MGOe;界线以下,规定 $(BH)_{max}$ 的范围为-2 MGOe~1 MGOe。
依据公式(1)计算 B_r 的最小值:

$$(BH)_{\max} \approx \frac{B_r^2}{4\mu_{\text{rec}}} \quad (1)$$

此时的 $(BH)_{\max}$ 为各个牌号的下限值,其中 H 品种 $\mu_{\text{rec}} = 1.036$, SH、EH、UH、TH 品种 $\mu_{\text{rec}} = 1.035$ 。采用 4 位有效数字、末尾为 0 或 5 进位表达 B_r , 这样防止发生测算 $(BH)_{\max}$ 与实际不一致的现象,特别是防止发生相邻牌号最大磁能积相差 1 MGOe 时,相邻牌号的 B_r 由于原来 3 位有效数字而规定间隔数值太靠近的现象。

依据公式(2)计算 H_{cB} 的最小值:

$$H_{\text{cB}} \approx \frac{B_r}{\mu_{\text{rec}}} \quad (2)$$

此时的 B_r 为各个牌号的最小值,计算 H_{cB} 时统一按 $\mu_{\text{rec}} = 1.04$, 同时 H_{cB} 归整到 3 位有效数字 (CGS 制)。

2.2 方形度

晶界扩散永磁材料在提高其内禀矫顽力的同时,存在着方形度有劣化的规律,根据起草单位协商一致的原则,确定了 H 品种的方形度最低值为 90%、SH 品种的为 88%、UH-TH 品种的为 86%,比较 GB/T 13560-2017《烧结钕铁硼永磁材料》的 H 品种的方形度最低值为 95%、SH-TH 品种的为 90%,合理地降低了要求。但是,方形度跟永磁体的磁通关联,跟高温磁通不可逆损失强关联,标准中规定了“5.6 磁偶极矩”和“5.7 高温磁通不可逆损失”条款,以保障用户需求。

2.3 其他技术内容

标准附录 A 提供了晶界扩散钕铁硼永磁材料制造工艺和流程,给出了 8 mm 晶界扩散永磁材料性能和每磨削去掉 1 mm 厚度测试的性能,表征了原 8 mm 晶界扩散永磁材料的内部性能变化,为更好地推广该新工艺、新材料提供了详尽的参考资料。

提供了附录 C 晶界扩散钕铁硼永磁材料的磁性温度系数,引用 GB/T 24270《永磁材料磁性能温度系数测量方法》和 GB/T 29628《永磁(硬磁)脉冲测量方法指南试验方法》。

提供了附录 D 晶界扩散钕铁硼永磁材料的其他物理性能,包括密度、硬度、抗压强度、抗弯强度、杨氏模量、比热容、热传导率、热膨胀系数、电阻率、最高使用温度,这些性能分别采用以下标准:GB/T 3850《致密烧结金属材料与硬质合金密度测定方法》、GB/T 9097《烧结金属材料(不包括硬质合金)表观硬度和显微硬度的测定》、GB/T 7314《金属材料室温压缩试验方法》、GB/T 31967.2《稀土永磁材料物理性能测试方法第 2 部分:抗弯强度和断裂韧度的测定》、GB/T 22315《金属材料弹性模量和泊松比试验方法》、NB/SH/T 0632《比热容的测定差示扫描量热法》、GB/T 22588-2008《闪光法测量热扩散系数或导热系数》、GB/T 4339《金属材料热膨胀特征参数的测定》、GB/T 5167《烧结金属材料和硬质合金电阻率的测定》和 GB/T 40794《稀土永磁体高温磁通不可逆损失试验方法》。失重采用 GB/T 40792《烧结钕铁硼永磁体失重试验方法》检测。

经过电镀镍、电镀镍铜镍、复合电镀镍与化学镍、电镀镀锌或 PVD 铝等方法处理的永磁体,其表面防护层厚度、耐蚀性和结合力应达到 GB/T 34491《烧结钕铁硼表面镀层》规定的要求;经过磷化、锆化、电泳环氧、喷涂环氧、喷涂锌铝或 CVD Parylene 等方法处理的永磁体,其表面防护层厚度、耐蚀性和结合力应达到 GB/T 40793《烧结钕铁硼表面涂层》规定的要求。

提供了附录 E 晶界扩散钕铁硼永磁体的磁偶极矩一致性、尺寸及形位偏差,引用 GB/T 38437《用抽拉或旋转方式测量铁磁材料样品磁偶极矩的方法》检测磁偶极矩一致性。

系统性地引用了已建立的实验方法,包括新研制的 GB/T 40793《烧结钕铁硼表面涂层》、GB/T 40792《烧结钕铁硼永磁体失重试验方法》和 GB/T 40794《稀土永磁体高温磁通不可逆损失试验方法》,标准技术要求丰富,完整地表达客户需求。

2.4 技术水平

GB/T 13560-2017 牌号和性能已经高于 IEC 60404-8-1:2015,为此,根据国内这一情况,电工标

委会也对 IEC 的 MOD 版本即 GB/T 17951《硬磁材料一般技术条件》做了大幅度的修改。

与 GB/T 13560-2017 相比,本标准的 G52H、G55H、G57H、G50SH、G52SH、G55SH、G48UH、G50UH、G52UH、G54UH、G45EH、G48EH、G50EH、G40TH、G42TH 和 G45TH 16 个牌号是新立的牌号,另外 G48SH、G45UH、G42EH 和 G38TH 4 个牌号的内禀矫顽力比相对应的牌号高 1 kOe。

目前,日本企业信越化工已列出综合磁性能 68.5~73.5 类型的以及属于 S 类综合磁性能为 73~76 的共 16 个牌号^[21],日立金属列出综合磁性能为 69.5~73 共 6 个牌号^[22],TDK 列出综合磁性能为 73~74 的共 3 个牌号^[23]。

对比本标准与日本企业所给出的磁性能,首先关注 H_{cj} 落入的档次,这三家日本企业牌号 H_{cj} 可以划分如下:19.5~21、22.5~23、25、26.5~28、30~32.5 和 35 六档,19.5~21、22.5~23 对应本标准的 SH 的 H_{cj} 20、25、26.5~28 对应本标准的 UH 的 H_{cj} 25、30~32.5 对应本标准的 EH 的 H_{cj} 30、35 对应本标准的 TH 的 H_{cj} 35;其次关注 $(BH)_{max}$ 的下限值,这三家日本企业牌号 $(BH)_{max}$ 的下限值与本标准下限值相同或相近,列入本标准同一行或相近位置。本标准与日本企业对比性能见表 1。

除 H 品种外,本标准 G55SH、G52UH、G54UH、G48EH、G50EH、G42TH 和 G45TH 综合磁性能高于日本企业现有相类似的牌号(见表 1),技术指标处于国际先进水平。本标准积极推向国际化,国家已下达了英文版翻译计划。

3 结论

为了促进晶界扩散钕铁硼永磁材料在移动智能终端、新能源汽车、高档数控机床、机器人以及节能家电等领域推广和应用,制定了《晶界扩散钕铁硼永磁材料》国家标准,与 IEC 和国家其他标准相比,在牌号称谓方面更加简明;技术要求方面,较完整地表达当前客户需求,系统性地引用了已建立的实验方法;在技术指标方面,本标准 G55SH、

G52UH、G54UH、G48EH、G50EH、G42TH 和 G45TH 综合磁性能高于日本企业现有相类似的牌号,标准处于国际先进水平。

参考文献:

[1] Liu Z W, He J Y, Raju V Ramanujan. Significant progress of grain boundary diffusion process for cost-effective rare earth permanent magnets: A review [J]. Materials & Design, 2021, 209:110004.

[2] 胡伯平. 稀土永磁产业现状及展望 [J]. 稀土信息, 2018, (11):14-17.

Hu B P. Current status and prospects of rare earth permanent magnet industry [J]. Rare Earth Information, 2018, (11):14-17.

[3] Hajime Nakamura, Koichi Hirota, Masanobu Shima, Takehisa Minowa, Masakatsu Honshima. Magnetic properties of extremely small Nd-Fe-B sintered magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 3844-3846.

[4] 中村元, 广田晃一, 美浓轮武久. 稀土永磁材料的制备方法: 中国, CN200580001133. X [P]. 2010-05-05.

Hajime Nakamura, Koichi Hirota, Takehisa Minowa. Preparation of rare earth permanent magnet material: China, CN200580001133. X [P]. 2010-05-05.

[5] Hirota K, Nakamura H, Minowa T, Honshima M. Coercivity enhancement by the grain boundary diffusion process to Nd-Fe-B sintered magnets [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 2909-2911.

[6] 刘涛, 周磊, 张昕, 程星华, 林德, 喻晓军, 李波. 晶界扩散 Dy/Tb 烧结 NdFeB 研究进展 [J]. 磁性材料及器件, 2011, 42(4): 6-9, 32.

Liu T, Zhou L, Zhang X, Cheng X H, Lin D, Yu X J, Li B. Progress in sintered NdFeB magnets with Dy/Tb grain boundary diffusion [J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2011, 42(4): 6-9, 32.

[7] 杜世举, 李建, 程星华, 刘涛, 齐彩孜, 喻晓军. 烧结钕铁硼晶界扩散技术及其研究进展 [J]. 金属功能材料, 2016, 23(1): 51-59.

Du S J, Li J, Cheng X H, Liu T, Qi C Z, Yu X J. Grain boundary diffusion technique and research development

- [J]. *Metallic Functional Materials*, 2016, 23(1): 51-59.
- [8] 李建,程星华,周磊,刘涛,喻晓军,李波,干勇. 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 J, Cheng X H, Zhou L, Liu T, Yu X J, Li B, Gan Y. High temperature magnetic propertiuies of Dy grain boundary diffused Nd-Fe-B sintered magnet[J]. *Metallic Functional Materials*, 2018, 25(2): 20-25.
- [9] 张昕,程星华,李建,周磊,刘涛,喻晓军. 晶界扩散烧结永磁体的耐腐蚀性能研究[J]. *金属功能材料*, 2019,26(5):47-52.
- Zhang X, Cheng X H, Li J, Zhou L, Liu T, Yu X J. Corrosion resistance of grain boundary diffusion Nd-Fe-B sintered magnet [J]. *Metallic Functional Materials*, 2019, 26(5): 47-52.
- [10] 程星华,李建,周磊,刘涛,喻晓军,李波. 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 X H, Li J, Zhou L, Liu T, Yu X J, Li B. 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.
- [11] 谭敏,赵扬,陈红升,席龙龙,李安华,冯海波. 钕铁硼晶界扩散研究进展[J]. *粉末冶金工业*,2019,29(2):66-72.
- Tan M, Zhao Y, Chen H S, Xi L L, Li A H, Feng H B. Research progress on grain boundary diffused Nd-Fe-B magnets [J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2019, 29(2): 66-72.
- [12] 武秉晖,肖松,李伟东,丁雪峰,冒守栋,史荣莹,韦习成,宋振纶. 磁控溅射镀钕在烧结钕铁硼中的晶界扩散研究[J]. *稀土*,2019,40(1):66-72.
- Wu B H, Xiao S, Li W D, Ding X F, Mao S D, Shi R Y, Wei X C, Song Z L. 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.
- [13] 丁勇,王春国,吕向科,张民,毛应才. 氧含量对烧结 NdFeB 磁体晶界调控的影响[J]. *中国稀土学报*, 2019,37(6):661-666.
- Ding Y, Wang C G, Lü X K, Zhang M, Mao Y C. Influence of oxygen content on grain boundary control of sintered NdFeB magnet[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2019, 37(6):661-666.
- [14] 潘为茂,刘仁辉,周头军,屈鹏鹏,陶力,陈久昌,邱建民,钟震晨. 烧结 Nd-Fe-B 磁体晶界扩散 TbH₂ 高温稳定性及其机理[J]. *有色金属科学与工程*, 2020,11(3):109-114.
- Pan W M, Liu R H, Zhou T J, Qu P P, Tao L, Chen J C, Qiu J M, Zhong Z C. Study on the high-temperature stability and mechanism of sintered Nd-Fe-B magnet by the grain boundary diffusion of TbH₂ [J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2020, 11(3): 109-114.
- [15] 程星华,李建,刘涛,周磊,喻晓军,李波. 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.
- Cheng X H, Li J, Liu T, Zhou L, Yu X J, Li B. Effect of grain size on magnetic properties in grain boundary diffusion NdFeB magnet [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2020, 38(6):752-758.
- [16] 安仲鑫,李胜利,孙良成,张建国. 晶界扩散 Tb 对烧结 Nd-Fe-B 组织与磁性能的影响[J]. *稀有金属*, 2021,45(1):34-40.
- An Z X, Li S L, Sun L C, Zhang J Y. Microstructure and magnetic properties of sintered Nd-Fe-B magnets with grain boundary diffusion Tb[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2021, 45(1):34-40.
- [17] 张民,王春国,吕向科,竺晓东,毛越,沈国迪,潘佳静. 特高综合磁性能晶界扩散磁体的研究[J]. *中国稀土学报*,2021,39(4):570-574.
- Zhang M, Wang C G, Lü X K, Zhu X D, Mao Y, Shen G D, Pan J J. Grain boundary diffusion magnet with extremely high comprehensiuove magnetic properties [J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2021, 39(4):570-574.
- [18] GB/T 13560-2017. 烧结钕铁硼永磁材料[S].
- GB/T 13560-2017. Sintered Neodymium Iron Boron Permanent Magnets[S].

[19] GB/T 40790-2021. 烧结钕及富钕永磁材料[S].
GB/T40790-2021. Sintered Cerium-based and Cerium-rich Permanent Magnet Materials[S].

[20] IEC 60404-8-1. Magnetic Materials-Part 8-1: Specifications for Individual Materials-Magnetically Hard Materials [S].

[21] Shin-Etsu Chemical Co. , Ltd. Shin-Etsu Rare Earth Magnets[S/OL]. (2019-5-9) [2021-2-4]. [https://](https://www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/products/data_nd.html)

www.shinetsu-rare-earth-magnet.jp/e/products/data_nd.html.

[22] Hitachi Metals , Ltd. Permanent Magnets [S/OL]. (2019-4-5) [2019-12-19]. <https://www.hitachi-metals.co.jp/e/products/item/mag/>.

[23] TDK Corporation. Neodymium Magnets[S/OL]. (2017-3-1) [2017-6-3]. <https://product.tdk.com/en/search/magnet/catalog>.

Basis for Formulation and Technical Requirement Analysis of the National Standard
“Grain Boundary Diffusion Neodymium Iron Boron Permanent Magnet Materials”

LYU Xiang-ke¹, SHEN Guo-di^{1*}, SHEN Li-han², GAO Lan², ZHANG Min¹

(1. Ningbo Yunsheng Co. ,Ltd. ,Ningbo 315806, China;
2. China Nonferrous Metals Techno-economic Research Institute Co. ,Ltd. , Beijing 100080, China)

Abstract: In order to promote the application of new technology and new materials for grain boundary diffusion NdFeB permanent magnet materials, also to provide important guidance to production companies and industrial chain application companies, the national standard of “Grain Boundary Diffusion Neodymium Iron Boron Permanent Magnet Material” was developed. While the international and national standards of NdFeB permanent magnet materials and the technical standards of the world’s leading companies were investigated, and the feedback from the drafting unit was combined with, it is determined that 36 grades involved in this standard are subject to technical requirements. Empirical formulas were used to calculate the main magnetic performance technical indicators, and sample test data from the drafting units were collected for verification. The comprehensive magnetic properties of G55SH, G52UH, G54UH, G48EH and G50EH etc. in the standard are higher than those of Japanese companies, and the standard is at the international advanced level.

Key words: sintered neodymium iron boron; grain boundary diffusion; permanent magnet materials; national standard