废旧钕铁硼再生制造高性能磁体的研究现状及前景

徐成亮[1,2],周巧英[1*],黄伟超[3],闫阿儒[1]

(1. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所 稀土永磁材料联合创新中心,浙江 宁波 315201;
2. 浙江工业大学 化学工程学院,浙江 杭州 310032;
3. 中稀(广西)金源稀土新材料有限公司,广西 贺州 542899)

摘 要:钕铁硼作为科学技术快速发展的关键材料之一,其应用领域持续延伸,需求量逐年递增。钕铁硼磁体应用主要以各类永磁电机为主,随着服役年限的增加,报废永磁电机带来的废旧磁体大量堆积,造成严重的环境污染和稀土资源浪费。回收利用这些“城市矿产”有助于缓解稀土供不应求的资源危机,还能降低对环境的污染,对构建闭环生态具有重要意义。本文综述了废旧钕铁硼再生制造高性能磁体各个工艺的技术特点,对现有技术存在的不足和未来研究的重点给出部分建议。

关键词:稀土;资源利用;废旧钕铁硼;高性能;再生制造

中图分类号:TF125.2^{+}4; X705 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-0277(2026)03-0140-12

钕铁硼作为综合性能优异的永磁材料,广泛应用于新能源汽车驱动电机、风力发电机、工业自动化设备等关键领域[1]。实际应用中,钕铁硼磁体产品很容易受热退磁(高温导致磁畴无序)、化学腐蚀(潮湿/酸性环境侵蚀晶界)、机械应力(振动引发微裂纹)及交变磁场等,这些协同作用使钕铁硼产品性能失效[2]。据统计,2020 年中国稀土消费产业结构中,以钕铁硼为主的稀土永磁材料需求占比高达 42%[3,4]。随着新一轮科技、产业变革大趋势的引领,新能源汽车、人工智能、风力发电以及低空经济等新兴领域快速延伸,钕铁硼材料的需求将持续攀升。预计到 2030 年,钕铁硼全球年需求量将达到 40 万吨,中国市场份额占比将超过 85%[5,6],这必将加速稀土资源的消耗,届时稀土原生矿供给将无法满足稀土资源快速消耗的增量。

行业统计数据显示:如果新能源汽车永磁同步电机的寿命周期按 8 至 10 年计算,2023 年全球新能源车销量约 1400 万辆,对应 2030 年后每年将产生 3 至 4 万吨废旧磁体;直驱永磁风力发电机寿命约 20 至 25 年,2020 年前安装的机组将在 2040 年前达到服役期限;工业电机与自动化设备,按 10 至 15 年更新周期,年废旧磁体量或达 1.5 万吨;医疗设备、航空航天、国防等钕铁硼磁体年报废量分别约数百吨[7,8]。2030 年随着全球机器人和低空经济等设备中磁体需

收稿日期:2025-06-23
基金项目:贺州市中央引导地方科技发展专项资金项目(贺科 ZY2022002)
作者简介:徐成亮(2001-),男,江西景德镇人,硕士研究生,主要从事稀土永磁材料二次资源循环利用研究,E-mail:xuchengliang@nimte.ac.cn
*通信作者:周巧英,高级工程师,E-mail:zqy@nimte.ac.cn
DOI:10.3724/S1004-0277.20260008

求的快速增长,应用领域陆续报废和退役的废旧磁体将大规模到来,叠加“双碳”政策的有力支撑,通过开发再生制造磁体技术对废旧钕铁硼进行循环利用,必将成为稀土资源更重要的原料支撑[9~11]。

废旧钕铁硼再生制造高性能磁体是从“磁体到磁体”的一种短流程循环利用技术,相较于传统工艺,再生制造能够避免熔炼时高能耗、提纯时酸性废水的产生。随着《欧盟关键原材料法案》《电池新规》等法规的实施,再生稀土材料的市场需求将持续扩大,预计到 2035 年,全球再生稀土的供给占比将达到 30%[12],再生钕铁硼在市场中的份额也将随之增加,有望从“补充角色”升级为“主流选择”。本文围绕废旧钕铁硼磁体退磁、退镀、破碎、制粉以及烧结成型等关键工艺过程,梳理了国内外再生制造高性能磁体的技术现状和存在的问题,并对该技术未来的发展前景提出展望。

1　废旧钕铁硼再生制造高性能磁体的全工艺流程

报废电机拆解的废旧钕铁硼磁体通常含有残余磁性和各类型防护镀层,首先要对废旧磁体进行退磁、去镀层处理,再通过机械粉碎、氢破碎、气流磨或球磨等工艺制备得微米级形貌、粒度分布均匀的磁粉。最后,通过压制成型和烧结工艺制备再生磁体。

1.1　废旧钕铁硼磁体退磁工艺

废旧磁体保留的余磁会导致磁体之间吸附、黏连,影响后续破碎、筛分等物理处理效率。通过退磁处理能够有效避免磁体在机械破碎过程因磁性作用而形成结块,从而提高破碎均匀性和稀土元素的回收率。磁体退磁后制备的磁粉流动性好,混粉更均匀,更易实现高密度成型[13,14]。最常用的退磁工艺有热退磁和电流退磁。

1.1.1　热退磁

钕铁硼合金的磁性能依赖于磁体内部磁畴一致性有序排列的程度,当环境温度达到钕铁硼合金居里点(约 310 ℃)时,磁畴在热扰动作用下将不再有序排列,磁体磁性能迅速降低直到失去磁性。热退磁工艺就是利用钕铁硼合金这一特点,达到退磁的目的[15]。Sarikprueck 等[16]采用 PID(Proportional-integral-derivative)温控电烘炉来控制测试温度,研究了从 100 ℃到 340 ℃不同温度对钕铁硼磁体的退磁影响。如图 1 所示,钕铁硼磁体的磁通密度随着温度和加热时间的增加而显著下降,当温度超过 300 ℃时,38UH 的钕铁硼磁体仅需 1 h 即可完全退磁。Bahl 等[17]在平面感应加热装置上对尺寸为 10 cm×7 cm×2 cm 的大块 NdFeB 磁体进行退磁处理。结果表明,当磁体表面加热至 225 ℃时,磁体的初始磁化强度在 30 min 内降低 10 倍。该方法简化了钕铁硼磁体的退磁过程,能有效提高废旧钕铁硼的再生循环效率。Kim 等[18]研究了氮气流量和加热温度对 N35 钕铁硼磁体的退磁影响。结果表明,磁体在 300 ℃、氮气流量为 1 L/min ~ 2 L/min 时能完全退磁,而氮气流量为 3 L/min ~ 4 L/min 时磁体仍有残留磁性;当温度为 350 ℃和 400 ℃时钕铁硼磁体表现出完全退磁,且与氮气流量大小无关。

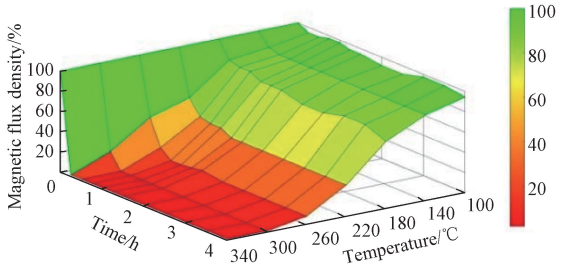


图 1　温度和加热时间对钕铁硼磁体磁通密度的影响[18]

Fig. 1　The influence of temperature and holding time on the magnetic flux density of neodymium iron boron magnets[18]

热退磁工艺通常操作简便,不需要复杂的操作系统,适合大规模废旧磁体的回收,退磁过程中也不受磁体形状和大小的限制。但能耗较高,处理过程废旧磁体会进一步发生氧化,同时,高温会导致稀土元素挥发,引起磁体成分偏析严重。

1.1.2　电流退磁

电流退磁是利用交流磁场给磁体施加一个等于

或大于原磁场的强度,确保能够克服材料的矫顽力,让磁畴开始重新排列。然后不断改变磁场方向,同时逐渐减小强度,使得磁畴在每次反转时无法完全对齐,最终在磁场降到零时,各个方向的磁化相互抵消,整体剩磁为零,交流退磁原理如图 2[19]。

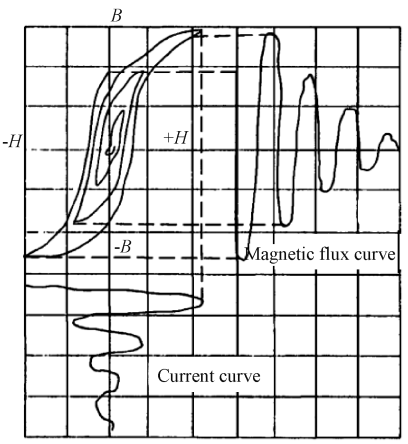


图 2 交流退磁原理[19]

Fig. 2 Principle of AC demagnetization[19]

Wu 等[20]采用由 8 个 160 μF/50 kJ 的电容器并联组成的电容功率模块与线圈形成振荡电路,对 N38SH 钕铁硼永磁体块进行交流退磁研究。发现当退磁电路放电产生的交变退磁场达到 1.6 T 时磁体剩磁降低至 1.5%。该方法能够在短时间内对磁体进行高效退磁处理。

电流退磁速度快、能耗低,但可能会出现退磁不完全的问题;同时电流退磁易受磁体尺寸与形状限制。对小到中型规则形状磁体效果最佳,大尺寸或异形磁体易因磁场衰减或分布不均导致退磁效果差。

1.2 废旧钕铁硼磁体去镀层工艺

稀土元素由于具有较高的反应活性,钕铁硼磁体很容易发生腐蚀。实际应用中,根据工况环境不同,需要在磁体外表面加装各类防护镀层,提高其耐腐蚀性能,延长磁性器件的服役寿命。常见的金属镀层有 Ni、Zn、Ni-Cu-Ni 以及复合金属镀层[21~24],有机涂层主要有电泳环氧、喷涂环氧以及各类转化膜层。废旧磁体在进行再制造时,需要经过破碎和制粉处理,其中,如果在氢碎过程中未去除或残留较多镀层,则镀层会破碎成粒径范围较宽(150 μm~3000 μm)的片状颗粒(图 3)[25],而这些颗粒会对再生磁体的性能产生不利影响。因此,废旧钕铁硼磁体去镀层工艺是再生制造高性能磁体的关键工艺之一。Prokofev 等[26]研究表明,当废旧磁体制备的磁粉中残留镍量较高时,再生磁体的微观结构存在明显的缺陷,磁体密度降低,矫顽力恶化。因此,废旧钕铁硼磁体去镀层处理,是制备高性能再生磁体的关键工艺之一,常见的去镀层工艺主要有机械法和化学法。

1.2.1 机械法去镀层

现阶段,大规模去除磁体表面镀层的机械方法有表面打磨、喷砂、抛光等。Zakotnik 等[27]针对废旧磁体镀层先喷砂处理 15 min,再将磁体置于体积分数为 5%的 HNO_3 酸浴中浸泡 3 min,使磁体表面镀层、氧化层及残留杂质彻底去除。该方法能有效去除磁体表面镀层,减少杂质进入再生磁体,为制备高性能再生烧结钕铁硼磁体奠定基础。Sepehri-Amin 等[28]将废旧磁体置于喷砂设备,设定钢丸冲击速度为 680 kg/min,去除覆盖在磁体表面的镍、锌和铝镀层。冯泉好等[29]利用喷砂+超声清洗复合处理的方式,除去废旧烧结钕铁硼磁体表面的镀层、氧化层和其他污染物。机械法去镀层不涉及化学药品,减少了环境污染的风险。但去镀层过程中会导致材料表面粗糙度增加、稀土元素损失,喷砂过程会产生大量粉尘污染。

1.2.2 化学法去镀层

化学法去镀层是通过化学溶液对镀层进行选择性溶解,以达到去镀层的目的,该过程往往会对磁体基体造成不同程度的损伤,因此,去镀层处理时通常需要加入缓蚀剂来保护基体。如六次甲基四胺、柠檬酸三铵等缓蚀剂,其分子通过选择性吸附在 Nd/Fe 活性点位形成保护膜,六次甲基四胺分解产生的胺基与 Nd^{3+} 螯合,会强化晶界防护,柠檬酸三铵的羧基则覆盖在主相表面,抑制铁元素溶解[30,31]。化学溶液通常有以下几类:酸性退镀液、碱性退镀液、有机退镀液。

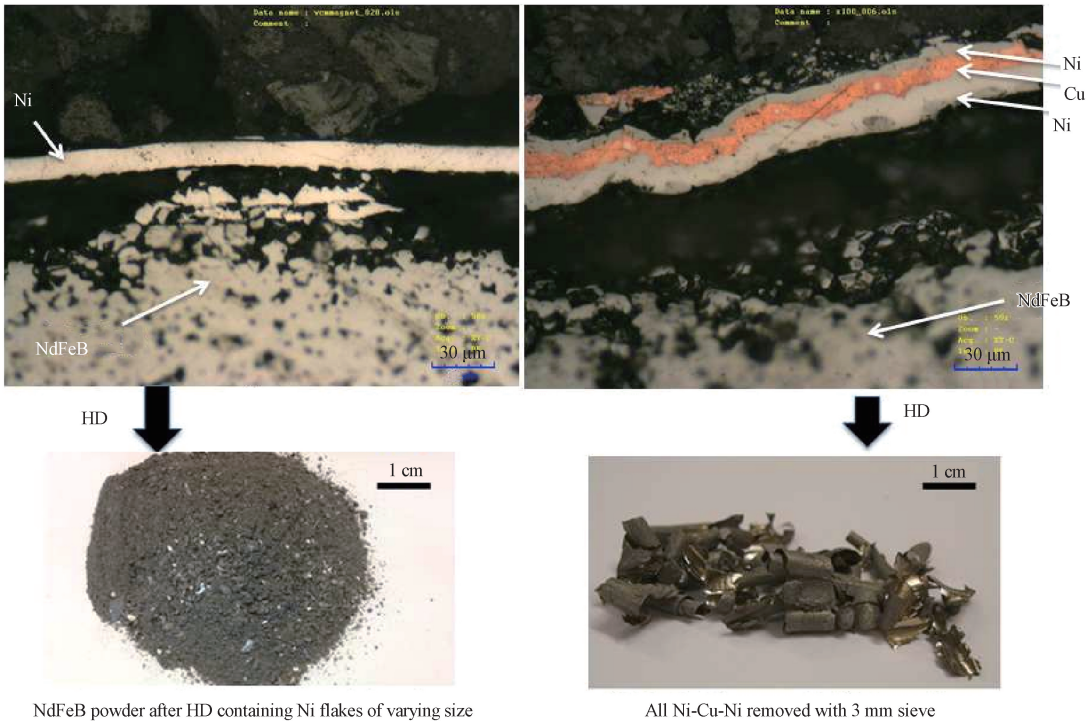


图 3　NdFeB 的 Ni-Cu-Ni 镀层横截面的共焦激光显微镜图像[25]

Fig. 3　Confocal laser microscope images of the cross-section of Ni-Cu-Ni coating on NdFeB[25]

(1)酸性退镀液。裴明刚等[32]采用硝酸和氢氟酸按 90 g/L~130 g/L∶30 g/L~55 g/L 的比例配制酸性去镀液,研究了其对烧结钕铁硼 Ni-Cu-Ni 镀层的退镀效果。结果表明,硝酸和氢氟酸酸性去镀液能使镀层完全去除,且对磁体基材的腐蚀较小。祝肖安[33]采用浓度为 27.5%的双氧水(20 g/L)与盐酸(120 g/L)配制质量比为 1∶6 的酸性退镀液,同时加入六水硝酸钕、缓蚀剂等成分保护磁体基体,实验中将带有镍镀层的 N50 磁体置于退镀液中处理 10 min 后,通过超声波进行清洗、干燥后测试其磁性能,使用该退镀液对 N50 磁体退镀后,磁体矫顽力和磁能积均在 N50 牌号磁性能指标范围内。

(2)碱性退镀液。张友亮等[34]选择氢氧化钠(75 g/L~85 g/L)、亚硫酸钠(55 g/L~65 g/L)、缓蚀剂(硫脲/六次甲基四胺)及表面活性剂配制了一种碱性退镀液,研究其对 35SH 钕铁硼磁体表面锌镀层的去处效果。结果表明,对于 6 μm 镀锌层的 35SH 钕铁硼磁体,完全退镀时间仅需 10 min~12 min,并且退镀后磁体的磁通量几乎没有变化。牛庆章等[35]采用 3-硝基苯磺酸钠、乙二胺、硝酸、柠檬酸钠与去离子水混合制备了碱性退镀液。结果表明,该退镀液对钕铁硼基体损伤较小,能够快速、同步去除磁体表面 Ni-Cu-Ni 镀层。Couto 等[36]使用氨基溶液,对钕铁硼磁体表面 Ni 和 Zn 镀层进行了选择性去除,结果表明,氨基溶液能够对钕铁硼表面镍和锌镀层选择性去除,溶液中镍的溶解浓度在 6 h 内从 4×10^{-6} 增加至 29×10^{-6},锌的溶解浓度在 1 h 内超过 100×10^{-6},并在 3 h 内达到约 130×10^{-6} 的峰值。

(3)有机退镀液。Orefice 等[37]将 Ni-Cu-Ni 三层镀层的磁体样品,浸泡在含有 1%(体积分数)溴的二甲基甲酰胺或乙醇的有机溶液中,研究得到,磁体表面的 Ni-Cu-Ni 三层镀层能够在 1 h 内达到完全溶解。

化学法去镀层优势在于能够快速、高效、选择性去除钕铁硼表面的镀层元素。但该类方法的去

镀液需要使用大量化学试剂,产生大量的废水污染,特别是含溴有机溶剂,虽然效率高,但溴的毒性与二甲基甲酰胺的生物累积会引发环境与安全风险。

总之,不管哪种去镀层工艺在快速、高效去除镀层的同时,需尽可能减少对磁体表面损伤以及稀土、铁等元素腐蚀损失。

1.3 废旧钕铁硼磁体破碎、制粉工艺

废旧磁体退磁去镀后需要再通过机械粉碎将磁体破碎成毫米级大小的颗粒,在氢气气氛中通过温度、氢气压力等工艺调控,将磁体颗粒进一步破碎为微米级。氢破碎工艺是在一定温度和氢气压力下钕铁硼合金发生氢化反应,引起磁体局部区域体积膨胀和内应力变化,从而使磁体粉碎成块状或粉末状[38]。在该过程中,通常晶界处富钕相首先发生氢化反应引起晶界断裂,之后是 $Nd_2Fe_{14}B$ 主相与氢反应引起穿晶断裂,反应方程式见式(1)和式(2)[39],氢破碎分解模拟见图 4。$Nd_2Fe_{14}B$ 主相穿晶断裂产生的裂纹在气流磨制粉环节仍会以裂纹或缺陷的形式保留,因此,废旧钕铁硼再生制造高性能磁体过程中氢破碎环节是最关键的工艺之一,应当通过工艺控制(如适当调节氢压、降低吸氢温度)使氢化反应集中在晶界相中,尽可能减少穿晶断裂的发生,保证晶粒的完整性。

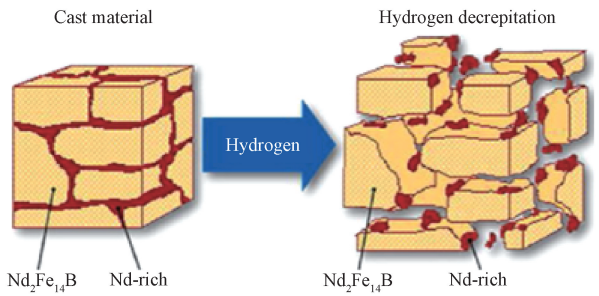


图 4 氢碎分解模型[40]

Fig. 4 Hydrogen decrepitation decomposition model[40]

氢碎反应方程见式(1)至式(4)[39]。

室温条件下富 Nd 相与氢气的反应:

$$Nd + H_2 \rightarrow NdH_2 \quad (1)$$

200 ℃~300 ℃条件下:

$$2NdH_2 + H_2 \rightarrow 2NdH_3 \quad (2)$$

$Nd_2Fe_{14}B$ 相与氢气的歧化反应见式(3)和式(4)。

150 ℃~200 ℃条件下:

$$Nd_2Fe_{14}B + \frac{x}{2}H_2 \leftrightarrow Nd_2Fe_{14}BH_x \quad (3)$$

650 ℃条件下:

$$Nd_2Fe_{14}B + (2 \pm x)H_2 \rightarrow 2NdH_{2\pm x} + 12\alpha\text{-}Fe + Fe_2B \quad (4)$$

氢破碎后磁体颗粒度大小较为离散,表面缺陷较多,还需要通过气流磨,即在氮气或氩气气氛中通过一定压力将磁体颗粒研磨到 5 μm~10 μm。同时,在此过程中,通过气流撞击对颗粒表面和晶界进行修饰,最终获得形貌、粒度分布均匀的磁粉。

Michalski 等[41]分别在 50 kPa 和 200 kPa 压力条件下,研究了氢气压力和反应温度对废旧烧结钕铁硼磁体氢破碎的影响。结果表明,在吸氢压力为 50 kPa、脱氢温度为 50 ℃以及 780 ℃时氢碎粉末的磁性能最佳,H_{cj} = 497 kA/m,B_r = 1.1 T,$(BH)_{max}$ = 121 kJ/m^3。Zakotnik 等[42]针对废旧硬盘驱动器拆解的钕铁硼磁体,研究脱氢温度对再生磁粉、磁体磁性能的影响。结果表明,废旧磁体氢破碎的最佳脱氢温度为 700 ℃,粉末的剩磁约为 1350 mT,矫顽力约为 750 kA·m^{-1}。对制备的氢破粉球磨 30 min 后进行取向压制,并在 1080 ℃下真空烧结 1 h,制备的再生钕铁硼磁体磁性能为:$(BH)_{max}$ = 290 kJ·m^{-3},B_r = 1240 mT,H_{cj} = 830 kA·m^{-1},再生磁体性能分别达到初始磁体的 85%、90% 和 80%。Nayebossadri 等[43]将废磁体置于氢气容器中,抽真空后充氢气至 2×10^5 Pa,在室温下对磁体进行氢碎处理,氢破粉通过手动研磨、筛分去除锌镀层,再与 5%(质量分数,下同)的 NdH_3 磁粉混合制备再生烧结钕铁硼磁体。结果表明,再生磁体的磁性能为:B_r = 1.06 T,H_{cj} = 1240 kA·m^{-1},$(BH)_{max}$ = 220 kJ/m^3,再生性能达到了扬声器中商用 N30 和 N33 牌号磁体的磁性能。

氢破碎是制备高性能再生钕铁硼磁体的核心工

艺,对再生磁体性能有决定性影响。再生磁体的磁粉已经发生过晶化和取向,因此,在氢破碎过程中尽可能发生式(1)和式(2)的反应,使得磁体沿晶界断裂,同时保留晶粒的完整性。通常选择低温(50 ℃、100 ℃)、低压(50 kPa)吸氢和破碎,但这有可能导致晶界断裂不完全、磁体矫顽力偏低;其次,氢破碎后通过球磨来改善磁粉晶粒大小和形貌,能够有效提高再生磁体的磁性能,但过度球磨可能导致晶粒氧化。

1.4　再生制造高性能钕铁硼磁体

商业钕铁硼磁体,随着服役年限增加,磁体稀土元素会不断氧化、挥发。此外,磁体在不同工况环境应用,环境温/湿度、强腐蚀或者振动都会使磁体表面以及内部产生裂纹、空隙等缺陷,这些缺陷会削弱晶界对磁畴壁的钉扎作用,导致磁体磁晶各向异性降低,使得磁体的磁性能不断下降[44],直至失效。因此,如何将失效的废旧磁体通过再生制造进行资源循环利用,对稀土行业持续良性发展至关重要。

Sepehri-Amin 等[28]对废旧钕铁硼磁体微观形貌分析得到,其内部晶界区域存在明显的裂纹和空隙,磁体矫顽力显著降低。研究者首先将废旧磁体在 80 ℃、0.9×10^5 Pa 氢气压力下氢破碎成粗粉,随后与 5%的 $Nd_6Dy_{21}Co_{19}Cu_{2.5}Fe$ 合金混合均匀,共同进行气流磨制粉。结果表明,回收磁体的微观裂纹和空隙得到了明显修复(图 5),再生磁体的矫顽力由 1.30 T 提高至 2.36 T,磁体剩磁由 1.37 T 降低至 1.29 T。表 1 中编号 1、2、3 均采用了不同成分合金混粉工艺对废旧磁体进行微观改性,制备的再生磁体综合性能都得到了较好的恢复效果。通过添加稀土合金可以提高再生磁体的矫顽力,但磁体剩磁会降低。因此,在制备再生磁体过程中,需要选择合适的稀土合金组分以及配比,能够提高矫顽力的同时平衡磁体的剩磁,以达到最佳的回收效果。

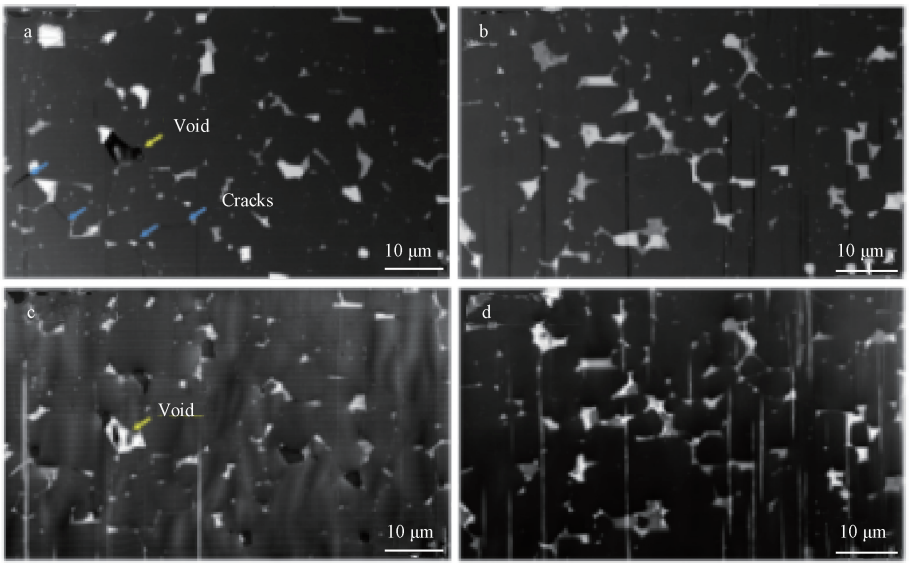


图 5　废旧磁体(a)和再生磁体(b)的背散射电子(BSE)图像;废旧磁体(c)和再生磁体(d)二次电子(IL-SE)图像[27]

Fig. 5　Backscattered electron images of waste magnets(a) and recycled magnets(b); Secondary electron (IL-SE) images of waste magnets(c) and recycled magnets(d)[27]

现阶段,为降低钕铁硼磁体成本,通常采用晶界扩散少量重稀土元素的工艺来获得高性能磁体,从而满足磁体在高端领域的应用需求。这类磁体在未来同样也会产生大批量的废旧磁体。Schönfeldt 等[45]对晶界扩散制备的工业用废旧磁体进行了研究,原磁体中 Tb、Dy 含量分别为 1.76%和 0.24%,磁体初始剩磁 1.38 T、矫顽力 2143 kA·m^{-1}。废旧磁体经过氢破碎、气流磨制粉后,1100 ℃真空

烧结 4 h,再经 700 ℃和 500 ℃真空回火各 1 h,得到再生磁体的矫顽力为 1703 kA·m^{-1}(室温下较原磁体下降 21%)、剩磁为 1.31 T(较原磁体下降 5%)。随后采用 1.5%纯 Tb 箔作为扩散源,在 900 ℃下对再生磁体进行了 9 h 扩散处理。得到扩散处理后的再生磁体在 50 ℃时矫顽力为 1780 kA·m^{-1},在高温 150 ℃和 200 ℃时矫顽力与原磁体相当,剩磁则降至 1.31 T。表 1 中编号 4 同样采用了对再生磁体进行晶界扩散处理,得到的废旧磁体综合磁性能参数恢复率都超过了 100%。

废旧磁体的原磁体若采用晶界扩散工艺制备,其磁体内部会形成独特的核壳结构,这是其高矫顽力的关键。然而,在再生制造的氢破碎-制粉环节中,磁体会沿晶界碎裂,导致核壳结构被破坏。图 6b 和 c 为氢碎及气流磨后粉末微观形貌,可以看到,这一微观结构的退化直接导致再生磁体的矫顽力大幅下降。因此,仅通过物理回收无法恢复磁体性能,必须进行二次晶界扩散处理才能得到高性能的再生磁体。

表 1 采用混粉或晶界扩散工艺制备再生钕铁硼磁体[46~49]

Table 1 Preparation of recycled NdFeB magnets produced via mixed-powder or grain boundary diffusion process[46~49]

Number	Scrap magnet performance			Recycled magnet performance			Recovery efficiency/%		
	H_{cj}/(kA·m^{-1})	B_r/T	$(BH)_{max}$/(kJ/m^3)	H_{cj}/(kA·m^{-1})	B_r/T	$(BH)_{max}$/(kJ/m^3)	H_{cj}	B_r	$(BH)_{max}$
1	1345	1.40	378.0	1402	1.38	369.5	104.2	98.78	97.72
2	1444	1.28	320.7	1487	1.26	318.5	103.0	98.90	99.31
3	601	1.09	196	898	1.04	198	149.4	95.41	101.02
4	763	1.08	202	1287	1.10	221	168.7	101.85	109.41

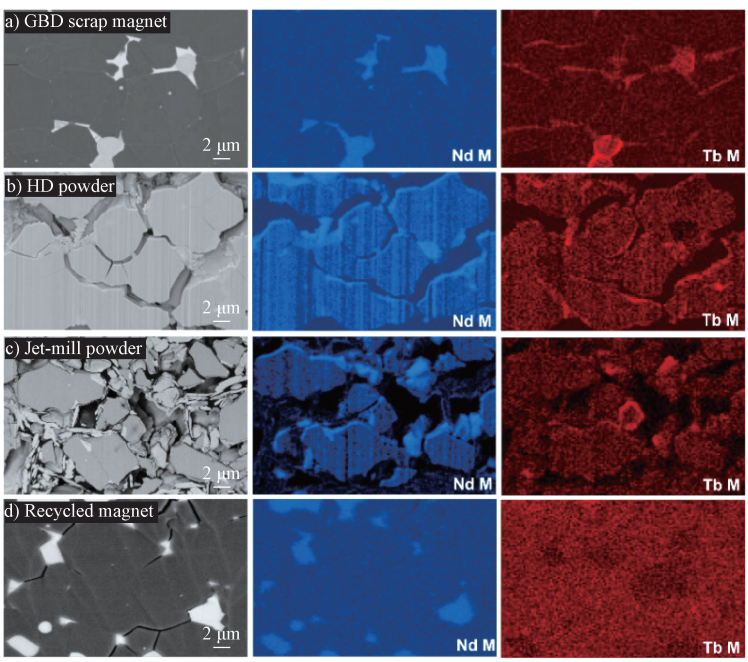


图 6 GBD 废料磁体(a)、HD 粉末(b)、气流磨粉末(c)和再生磁体(d)的 SEM-BSE 图像与 EDS 元素分布图[45]

Fig. 6 SEM-BSE images and EDS elemental distribution maps of GBD scrap magnet (a), HD powder (b), jet-milled powder (c) and recycled magnet (d)[45]

因此对于废旧钕铁硼磁体再生制造,想要获得高性能再生磁体,通常需要添加稀土合金或晶界扩散处理。对回收磁体的微观结构特别是晶界相结构进行改性,以及修复因回收过程被污染的晶界(如晶界增加的 O 含量),提高晶界相的连续性,优化稀土元素的分布,可达到提高磁体磁性能的目的。

2　再生制造高性能磁体的前景与展望

钕铁硼磁体作为现代工业的核心功能材料,随着全球磁体需求量的快速增长,大规模磁体报废潮必将到来。短流程的再制造技术能够实现资源高效闭环循环利用,缓解稀土资源的快速消耗,未来必将成为解决稀土资源供给与环境污染的核心技术。目前,科研工作者们在再生循环利用技术方面取得了显著进展,但仍存在诸多不足和待解决的问题。

2.1　废旧磁体拆解技术

回收的废旧磁体尺寸形态各异,限制了回收过程的效率。废旧磁体中的微观结构劣化同样制约着再生磁体的磁性能。未来亟需发展以下技术:(1)开发 AI 等智能化技术对废旧磁体进行识别,确定拆解的方式、拆解装置及仪器,减小拆解过程对磁体的损伤;(2)通过对废旧磁体内部缺陷探伤,指导再生技术的发展。

2.2　镀层去除技术

废旧磁体再生制造之前,必须要将其表面镀层去除干净,否则残留的高含量镀层元素会导致再生磁体磁性能下降。在去镀层技术方面需要解决以下关键难题:(1)环保性去镀溶液开发,减少废水对环境的影响;(2)发展机械法+去镀溶液洗涤复合技术,降低对磁体表面状态、稀土元素的影响。

2.3　高效再生技术的开发

废旧磁体再生制造过程,稀土元素损失和氧含量控制是该技术的难点。未来可能的研究热点:(1)针对不同应用场景产生的废旧磁体建立破碎、制粉关键工艺数据库,对再制造技术规范化、系统化;(2)对再生磁体磁学、力学、电学、环境使役性能等的综合特性进行研究;(3)随着高丰度铈基磁体制备技术的发展,该类磁体也将迎来退役潮,针对铈基磁体的再生利用,应发展怎样的技术,也是未来再生制造高性能磁体需要攻克的关键技术难点。

参考文献:

[1] 程春东. 稀土永磁材料在现代工业中的应用现状与发展趋势[J]. 现代盐化工,2025,52(2):21-23.
Cheng C D. Application status and development trend of rare earth permanent magnet materials in modern industry [J]. Modern Salt Chemical Industry, 2025, 52(2): 21-23.

[2] Liang S H, Shao X H, Que Y S, et al. Recent advances in mechanical properties of sintered NdFeB magnets[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 1003: 175689.

[3] 中信证券研究部. 稀土永磁:性能突出,前景广阔[R]. 深圳:中信证券,2022.
Research Department of CITIC Securities. Rare Earth Permanent Magnets: Outstanding Performance and Broad Prospects [R]. Shenzhen: CITIC Securities, 2022.

[4] 吴一丁, 彭子龙, 赖丹, 等. 稀土产业链全球格局现状、趋势预判及应对战略研究[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(2): 255-264.
Wu Y D, Peng Z L, Lai D, et al. Exploring international rare earth industry landscape changes and China's strategic responses[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(2): 255-264.

[5] 胡伯平. 稀土永磁产业现状及展望[R]. 贵阳:中国稀土行业协会,2023.
Hu B P. Current Situation and Prospect of Rare Earth Permanent Magnet Industry [R]. Guiyang: China Rare Earth Industry Association, 2023.

[6] 中研普华产业研究院. 2025-2030 年稀土材料行业市场深度调研及投资策略预测报告[R]. 深圳: 中研普华产业研究院, 2025.
CIC Industry Research Institute. In-depth Market Research and Investment Strategy Forecast Report on Rare

Earth Materials Industry (2025-2030)[R]. Shenzhen: CIC Industry Research Institute, 2025.

[7] 中信证券. 稀土行业专题报告(四):稀土永磁,智能驱动,伺服核心[R]. 深圳:中信证券,2022.
CITIC Securities. Rare Earth Industry Special Report (4): Rare Earth Permanent Magnets, Intelligent Drive, Servo Core [R]. Shenzhen: CITIC Securities, 2022.

[8] 2025-2030 年中国废旧稀土永磁体环保拆解工艺行业前景趋势预测及发展战略咨询报告[R]. 北京: 中国产业研究院, 2025.
China Industry Research Institute. Prospects and Trend Forecast of Environmental Dismantling Technology for Waste Rare Earth Permanent Magnets in China (2025-2030) and Development Strategy Consulting Report [R]. Beijing: China Industry Research Institute, 2025.

[9] 赵燊. 钕铁硼永磁体的稀土资源再生潜力与环境效益分析[D]. 赣州: 江西理工大学, 2024.
Zhao S. Rare Earth Elements Recycling Potential and Environmental Benefits in NdFeB Permanent Magnet [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2024.

[10] 国家标准委. GB/T 34490-2017 再生烧结钕铁硼永磁材料[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
National Rare Earth Standardization Technical Committee. GB/T 34490-2017. Recycled Sintered Neodymium Iron Boron Permanent Magnets[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.

[11] 于立超, 丛利颖, 路清梅, 等. 烧结钕铁硼永磁二次资源再利用技术进展[J]. 稀土, 2023, 44(4): 71-90.
Yu L C, Cong L Y, Lu Q M, et al. Recent progress in recycling technology of recyclable sintered Nd-Fe-B magnets[J]. Chinese Rare Earths, 2023, 44(4): 71-90.

[12] 中研普华产业研究院. 2024-2029 年中国再生资源回收行业运营格局分析及发展前景预测研究报告[R]. 深圳: 中研普华产业研究院, 2024.
CIC Industry Research Institute. Operation Pattern Analysis and Development Prospect Forecast Report on China Recycled Resources Recovery Industry (2024-2029)[R]. Shenzhen: CIC Industry Research Institute, 2024.

[13] Heim M, Wirth F, Boschert L, et al. An approach for the disassembly of permanent magnet synchronous rotors to recover rare earth materials[J]. Procedia CIRP, 2023, 116: 71-76.

[14] Grau L, Moreno López R, Kubelka P, et al. Effects of thermal demagnetization in air on the microstructure and organic contamination of NdFeB magnets[J]. Materials, 2024, 17(22): 5528.

[15] 任波. 浅述退磁技术的原理及方法[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2011, 21(2): 64-67.
Ren B. Brief discussion on the principles and method of demagnetization technology[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology, 2011, 21(2): 64-67.

[16] Sarikprueck P, Lumyong P, Niroiana C N, et al. Magnetization of NdFeB permanent magnet considering demagnetization effect[A]. Proceedings of the 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)[C]. Piscataway: IEEE, 2018. 649-652.

[17] Bahl C R H, Eder M A, Boland G, et al. A simple method for demagnetizing large NdFeB permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2020, 56(8): 2100906.

[18] Kim B J, Kim Y S. Effect of nitrogen flow rate on demagnetization heat treatment of NdFeB rare earth magnets [J]. Journal of the Korean Society for Production Management, 2021, 30(6): 432-440.

[19] 赵强, 王彦龙. 正弦波交流退磁机的设计与仿真[J]. 船电技术, 2018, 38(6): 56-58.
Zhao Q, Wang Y L. Design and simulation of sinusoidal AC demagnetization machine[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2018, 38(6): 56-58.

[20] Wu T, Wang Q J, Yang Y P, et al. Magnetization and demagnetization characteristics of NdFeB blocks in pulsed magnetic field[A]. Proceedings of the 2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)[C]. Piscataway: IEEE, 2021.

[21] Burkhardt C, Lehmann A, Fleissner P, et al. Comparative evaluation of anti-corrosion coatings for NdFeB-type magnets with respect to performance and recyclability *via* hydrogen-assisted recycling (HPMS)[J]. Materials Proceedings, 2021, 5(1): 87.

[22] Jiang W, Shen L D, Wang K, et al. Study on Ni-Ni(S)-Ni(P) multilayer coating by friction-assisted jet electroplating on sintered NdFeB[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 787: 1089-1096.

[23] Chen J, Yang H Y, Xu G Q, et al. Rare earth passivation and corrosion resistance of zinc coated NdFeB magnets[J]. Journal of Rare Earths, 2022, 40(2): 302-308.

[24] Nababan D C, Mukhlis R, Durandet Y, et al. Kinetics of high temperature oxidation of end-of-life Ni/Cu/Ni coated NdFeB rare earth permanent magnets[J]. Corrosion Science, 2021, 189: 109560.

[25] Walton A, Yi H, Rowson N A, et al. The use of hydrogen to separate and recycle neodymium-iron-boron-type magnets from electronic waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 236-241.

[26] Prokofev P A, Kolchugina N B, Skotnicova K, et al. Blending powder process for recycling sintered Nd-Fe-B magnets[J]. Materials, 2020, 13(14): 3049.

[27] Zakotnik M, Tudor C O. Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with 'designer properties' that exceed those of starting materials[J]. Waste Management, 2015, 44: 48-54.

[28] Sepehri-Amin H, Ohkubo T, Zakotnik M, et al. Microstructure and magnetic properties of grain boundary modified recycled Nd-Fe-B sintered magnets[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 694: 175-184.

[29] 冯泉好,周志国,陈静武,等. 一种再生烧结钕铁硼永磁体的制备方法[P]. 中国: CN201811328506. X, 2019-01-11.
Feng Q Y, Zhou Z G, Chen J W, et al. A method for preparing regenerated sintered neodymium iron boron permanent magnets [P]. China: CN201811328506. X, 2019-01-11.

[30] 李广宇, 孟瑶, 娄桂艳. 水溶性缓蚀剂对钕铁硼永磁材料的防腐蚀性能[J]. 材料保护, 2009, 42(12): 49-51.
Li G Y, Meng Y, Lou G Y. Effect of several water-solubility inhibitors on corrosion[J]. Materials Protection, 2009, 42(12): 49-51.

[31] 刘东, 林修洲, 朱想明. 六次甲基四胺对碳钢缓蚀行为的研究[J]. 当代化工, 2011, 40(2): 111-113.
Liu D, Lin X Z, Zhu X M. Inhibiting behavior of hexamethylenetetramine on carbon steel[J]. Contemporary Chemical Industry, 2011, 40(2): 111-113.

[32] 裴明刚,李小定,袁敏. 降低基材腐蚀的烧结钕铁硼镍铜镍镀层退镀工艺[P]. 中国:CN202211281453. 7, 2024-05-17.
Pei M G, Li X D, Yuan M. Process for removing sintered neodymium iron boron nickel copper nickel coating to reduce substrate corrosion [P]. China: CN202211281453. 7, 2024-05-17.

[33] 祝肖安. 一种钕铁硼磁性材料的退镀液[P]. 中国: CN201410431176. 2,2014-12-10.
Zhu X A. A plating solution for neodymium iron boron magnetic material [P]. China: CN201410431176. 2, 2014-12-10.

[34] 张友亮,孙菲菲,仉喜峰. 一种钕铁硼永磁材料表面镀锌层退镀液及制备方法[P]. 中国: CN201810101598. 1,2018-07-06.
Zhang Y L, Sun F F, Su X F. A zinc plating solution and preparation method for surface zinc coating of neo-

dymium iron boron permanent magnet material [P]. China: CN201810101598.1, 2018-07-06.

[35] 牛庆章,牛凯,牛凯莉. 烧结钕铁硼表面镍铜镍镀层的退镀液及其退镀工艺[P]. 中国:CN201210265778.6, 2014-05-14.
Niu Q Z, Niu K, Niu K L. Stripping solution and process for nickel copper nickel coating on sintered neodymium iron boron surface [P]. China: CN201210265778.6, 2014-05-14.

[36] Couto C P, van de Ven J J M M, Yang Y X, et al. On the pre-treatment for recycling spent NdFeB permanent magnets: From disassembling, characterisation to decoating[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2024, 41: e01041.

[37] Orefice M, Eldosouky A, Škulj I, et al. Removal of metallic coatings from rare-earth permanent magnets by solutions of bromine in organic solvents[J]. RSC Advances, 2019, 9(26): 14910-14915.

[38] 李现涛. 烧结钕铁硼废料的再制造技术及机理研究[D]. 北京:北京工业大学,2016.
Li X T. Study on Regeneration Technique and Mechanism for NdFeB Sintered Magnet Wastes[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[39] Piotrowicz A, Pietrzyk S, Noga P, et al. The use of thermal hydrogen decrepitation to recycle Nd-Fe-B magnets from electronic waste[J]. Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 2020, 56(3): 415-424.

[40] Kaya M. An overview of NdFeB magnets recycling technologies[J]. Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 2024, 46: 100884.

[41] Michalski B, Szymanski M, Gola K, et al. Experimental evidence for the suitability of the hydrogen decomposition process for the recycling of Nd-Fe-B sintered magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, 548: 168979.

[42] Zakotnik M, Devlin E, Harris I R, et al. Hydrogen decrepitation and recycling of NdFeB-type sintered magnets[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2006, 13: 289-295.

[43] Nayebossadri S, Awais M, Arnold R, et al. Hydrogen-assisted recycling of Nd-Fe-B magnets from the end-of-life audio products[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 603: 172239.

[44] Woodcock T G, Gutfleisch O. Multi-phase EBSD mapping and local texture analysis in NdFeB sintered magnets[J]. Acta Materialia, 2011, 59(3): 1026-1036.

[45] Schönfeldt M, Rossa J, Opelt K, et al. Functional recycling of grain boundary diffusion processed Nd-Fe-B sintered magnets [J]. Acta Materialia, 2025, 283: 120532.

[46] Huang C C, Mo C C, Ou S F. Influence of Nd-base alloy addition on improving the characteristics of recycled sintered NdFeB permanent magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 600: 172166.

[47] Mo C C, Kuan C C, Wang Y H, et al. Effect of Nd-CoGa alloy addition to waste wind turbine magnets to enhance the characteristics of recycled sintered NdFeB permanent magnets[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023, 578: 170808.

[48] Li C C, Sun A Z, Tian Z Y, et al. Efficient reuse of the waste sintered NdFeB magnet with Dy_2O_3 addition [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2018, 462: 41-45.

[49] Liu Y K, He J Y, Yu H Y, et al. Restoring and enhancing the coercivity of waste sintered (Nd, Ce, Gd)FeB magnets by direct Pr-Tb-Cu grain boundary diffusion [J]. Applied Physics A, 2020, 126(8): 657.

Research Status and Prospects of High-performance Magnet Manufacturing from Recycled NdFeB Waste

XU Cheng-liang[1,2], *ZHOU Qiao-ying*[1*], *HUANG Wei-chao*[3], *YAN A-ru*[1]

(1. *Joint Innovation Center for Rare-earth Permanent Magnetic Materials*, *Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering*, *Chinese Academy of Sciences* (*CAS*), *Ningbo* 315201, *China*;

2. *School of Chemical Engineering*, *Zhejiang University of Technology*, *Hangzhou* 310032, *China*;

3. *Sino* (*Guangxi*) *Jinyuan Rare Earth New Material Co.*, *Ltd.*, *Hezhou* 542899, *China*)

Abstract: As a critical functional material in rapidly advancing scientific and technological fields, neodymium-iron-boron (NdFeB) magnets have witnessed continuous expansion of application domains and sustained year-on-year growth in global demand. NdFeB magnets are predominantly employed in permanent magnet motors across diverse industrial and consumer applications. As these motors reach end-of-life, the resulting decommissioned units yield significant quantities of spent magnets—Posing dual challenges of environmental contamination and inefficient utilization of critical rare earth elements. Recycling these urban minerals can mitigate the rare earth resource imbalance, reduce associated environmental burdens, and support the establishment of a circular magnet economy. This review systematically analyzes the technical characteristics of key remanufacturing processes for high-performance NdFeB magnets derived from end-of-life sources, and critically evaluates current technological limitations and emerging research priorities.

Key words: rare earth; resource utilization; NdFeB waste; high-performance; recycling manufacturing