

化学法制备稀土永磁材料的研究进展与挑战

怡裕浩, 贾博谦, 薛 航, 韩光达, 马誉景

(西安稀有金属材料研究院有限公司, 陕西 西安 710016)

摘要: 稀土永磁材料(如Sm-Co, Nd-Fe-B, Sm-Fe-N等)是高性能磁性材料的核心组成部分, 广泛应用于新能源、电子信息及国防领域。相较于物理法, 化学法在制备稀土永磁材料中具有原子级混合、形貌可调控及低温合成等独特优势, 逐渐成为研究热点。本文系统综述了溶胶-凝胶法、水热法、共沉淀法、热分解法以及新兴合成法等化学制备技术的研究进展, 分析了其微观结构调控机制与磁性能优化策略, 并探讨了当前面临的挑战与未来的发展方向。

关键词: 稀土永磁材料; 化学法; 制备工艺; 磁学性能; 晶粒尺寸; 晶界扩散

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.009

中图分类号: TB31; TB34 文献标识码: A 文章编号: 1009-3842(2026)01-0097-14

稀土永磁材料因具有高磁能积、高矫顽力和良好的温度稳定性, 成为计算机、医疗设备、新能源汽车、航空航天等领域的核心材料, 支撑着信息存储、能源转换及高端制造技术的发展。随着21世纪以来电子器件向微型化与集成化方向快速发展, 市场对磁性材料提出了更高要求, 兼具高磁能积、低体积密度以及更高工作温度的稀土永磁材料将成为高价值产品^[1-2]。

稀土永磁材料的磁学性能高度依赖微观结构(如晶粒尺寸、晶界相分布)和化学成分均匀性^[3]。然而, 传统物理制备方法[如熔体快淬法、粉末冶金法、HDDR法(氢化-歧化-脱氢-再复合)等]能耗高、工艺复杂, 且存在晶粒粗化、成分偏析等问题, 为稀土永磁材料的磁学性能提升带来挑战^[4]。化学法通过液相反应实现原子级混合, 可精确控制晶粒尺寸和晶界相分布, 显著提升综合磁学性能。同时, 其以稀土盐或低价氧化物为原料, 减少了稀土元素损失, 可为制备高性能、低成本的稀土永磁材料提供新途径^[5-7]。本文分类介绍化学法制备稀土永磁材料的研究进展, 并对未来的研究趋势进行了展望, 为高性能稀土永磁材料的开发提供参考。

1 化学法制备技术分类与机理

1.1 溶胶-凝胶法

溶胶-凝胶法是将金属氯化盐或硝酸盐的水溶液与偶联剂柠檬酸和反应溶剂溶解混合, 先经水解-缩聚形成溶胶, 再经干燥脱水形成凝胶, 金属离子均匀分布在凝胶中。然后经过煅烧热处理生成的金属氧化物, 最终由还原扩散工艺制备稀土永磁材料。

Emira等^[8]通过溶胶-凝胶法结合还原扩散工艺成功制备了SmCo/Co纳米复合材料, 系统研究了Sm/Co摩尔比为1:4.0, 1:3.5和1:2.0三种样品的结构与磁性。结果表明, 通过调控钴含量可优化相组成与形貌。当Sm:Co=1:2.0时, 材料主要由SmCo₅, Sm₂Co₇和Sm₂Co₁₇硬磁相构成, 形成平均直径为25 nm的纳米线结构, 显著提升矫顽力至2.2 kOe, 同时展现出0.57的最大方形比, 表明其优异的磁化取向一致性。EDTA(乙二胺四乙酸)的添加能够有效降低前驱体颗粒尺寸, 促进纳米线结构形成, 该结构通过形状各向异性提升磁性能, 但需进一步优化工艺以抑制Sm挥发并细化晶粒。

收稿日期: 2025-03-19; 修订日期: 2025-04-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3505900); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2024JC-YBQN-0406); 陕西省秦创原引用高层次创新创业人才项目(QCYRCXM-2022-267)资助

作者简介: 怡裕浩(1996—), 男, 陕西泾阳人, 硕士, 工程师, 研究方向: 稀土永磁材料, E-mail: yyhin0721@163.com; 通信作者: 马誉景, 工程师, E-mail: yujingma17@163.com

Deheri等^[9]利用差示扫描量热分析和XRD(X射线衍射)分析表明,Nd-Fe-B凝胶首先在800℃热处理生成Nd₂O₃,NdFeO₃,Fe₂O₃,B₂O₃,随后的还原扩散工艺经过3个阶段,在692℃时形成Nd₂Fe₁₄B相,其制备流程如图1所示。磁性能测试显示,未洗涤样品的矫顽力为6.1 kOe,饱和磁化强度为20.7 emu/g;洗涤去除CaO后,矫顽力降至3.9 kOe,饱和磁化强度提

升至102.3 emu/g,表明偶极相互作用占主导。此外,他们发现Nd₂Fe₁₄B的形成会经历两个相互竞争的反应^[10]:NdH₂,α-Fe和B直接结合;NdH₂和α-Fe先结合成Nd₂Fe₁₇,然后再与B反应生成Nd₂Fe₁₄B。同时通过实验证明,在还原扩散过程中加入无定形B可以提高Nd₂Fe₁₄B磁粉的磁性能。这两项研究为理解溶胶-凝胶法制备Nd₂Fe₁₄B磁性纳米颗粒的机理奠定了基础。

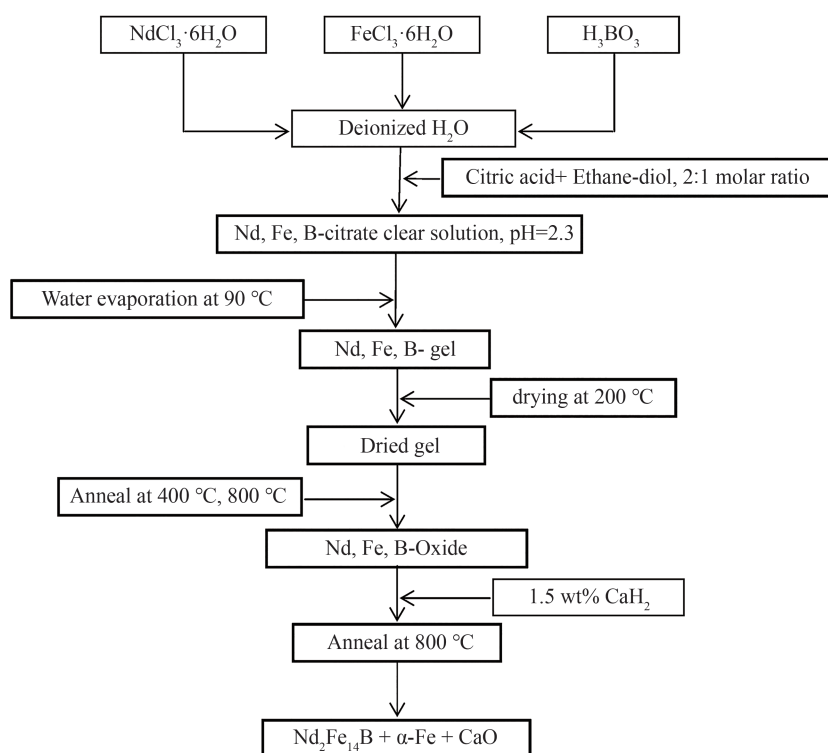


图1 采用溶胶-凝胶法和还原-扩散法制备Nd₂Fe₁₄B磁粉的流程示意图

Fig. 1 Flowchart of preparation of Nd₂Fe₁₄B magnetic powder by sol-gel method followed by reduction-diffusion process^[9]

交换耦合纳米复合材料通过在硬磁基体中嵌入软磁相,利用交换耦合作用提高材料的磁性能,同时需要平衡软硬磁相比例以避免反向畴形核的发生。Hou等^[11]提出了一种改进的溶胶-凝胶策略,并以其制备了具有优异磁性能的Nd₂Fe₁₄B磁性粉末。在前驱体合成过程中,丙酮和硼酸同时作为配位试剂,钕-硼酸-丙酮的配位结构是形成球形氧化物前驱体的关键步骤,SEM(扫描电子显微镜)结果如图2所示。在还原扩散过程中,氧化物前驱体和加热温度决定了Nd₂Fe₁₄B磁粉的纯度和磁性能,950℃时制备的样品具有最高的矫顽力4.8 kOe。适当的还原扩散温度可以优化材料中硬磁相与软磁相的比例,从而增强交换耦合行为,改善磁性能。Umapada等^[12]

通过改变Nd₂Fe₁₄B/Fe-Co交换耦合磁性纳米复合材料中硬磁相与软磁相的比例,以获得最佳矫顽力和剩磁。磁性测试表明,在Nd₂Fe₁₄B中添加7.7 mol%的Fe-Co软磁相能够获得最高矫顽力为5.6 kOe,显著高于单一Nd₂Fe₁₄B粒子(矫顽力为3.9 kOe)。此现象可能源于两种协同机制:首先,软硬磁相晶界处产生的界面自旋耦合效应可能显著影响磁相互作用;其次,软磁相纳米颗粒向硬磁基体的扩散诱导了结构优化,特别是通过提升复合体系结晶度实现性能增强,这些微观结构改良共同促进了复合材料矫顽力的提升。另外,他们还发现在高温还原扩散过程中,Co在硬/软相界面的扩散似乎会恶化交换耦合磁性纳米复合材料的磁学性能。

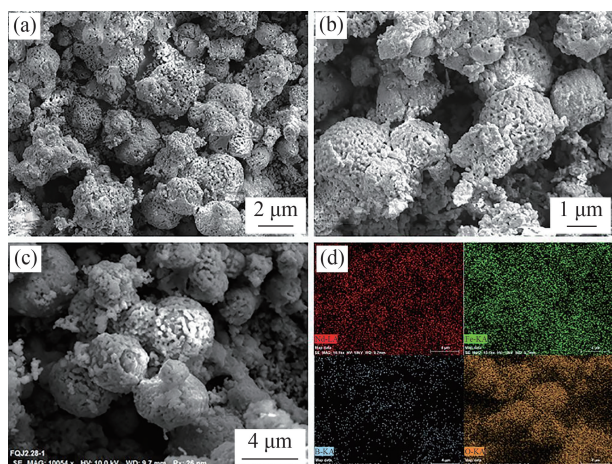


图2 (a~c)氧化物前驱体在不同放大倍率下的球形结构SEM图, (d)对应(c)的元素分布图

Fig. 2 SEM images of (a~c) oxide precursor with sphere structures under different magnification and (d) elemental mapping of (c) [11]

Hono等^[13]基于溶胶-凝胶工艺制备的小尺寸Sm-Fe-O前驱体,在最优工艺条件下(500 °C煅烧、700 °C氢还原、900 °C还原扩散)成功制备出亚微米级 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 单相粉末。所得粉末的平均粒径为 $0.69 \pm 0.17 \mu\text{m}$,矫顽力高达23.2 kOe。研究表明,颗粒尺寸的减小显著提升了矫顽力,且还原扩散工艺形成的等轴形貌降低了局部退磁场。尽管存在团聚现象,但该工作突破传统工艺的尺寸限制,为高矫顽力Sm-Fe-N永磁材料的设计提供了新思路。

1.2 水热法

水热法是先在高温高压条件下,利用稀土或过渡金属盐溶液生成纳米级前驱体(如氢氧化物沉淀

或金属络合物),随后通过热处理将其转化为金属氧化物,再经还原扩散实现稀土-铁/钴原子间均匀合金化,最终形成稀土永磁粉末。

Dai等^[14]通过调节pH值、水解回流、水热反应及氢气还原四步工艺,制备出平均粒径约20 nm的立方钐钴氧化物前驱体,再经金属钠还原得到 SmCo_5 纳米粒子。实验表明,水热过程中聚乙二醇的引入有效调控了晶粒生长动力学,使产物尺寸均匀。磁性能测试显示,300 K下纳米粒子呈超顺磁态,而5 K时转变为铁磁态,矫顽力为0.5 kOe。该方法避免了化学法中有机溶剂的使用,为稀土永磁材料的绿色合成提供了新策略。然而,基于该方法进一步优化合成工艺,以制备更高矫顽力的 SmCo_5 纳米粒子则更为关键。

高矫顽力和高饱和磁化强度的结合可以通过制备具有可控软/硬异质结构的纳米复合材料实现。而现有的物理和化学方法在制备方面面临挑战:物理方法如球磨难以实现有效的交换耦合作用,而化学方法虽然具有自下而上的优势,但在高温退火过程中容易导致颗粒聚集和分离。Ma等^[15]通过水热法在 SmCo_5 -O纳米级前驱体表面均匀负载 Fe_2O_3 纳米颗粒构筑异质结构,随后采用CaO包覆与还原扩散技术,最终获得高性能 SmCo_5/Fe 异质纳米复合材料。如图3(a)所示,CaO修饰的 $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.1}$ 和 $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.2}$ 纳米复合物的衍射峰与标准 SmCo_5 和Fe的衍射峰匹配良好。CaO包覆有效抑制了高温退火过程中的颗粒团聚,使Fe相保持纳米尺度,从而实现了硬

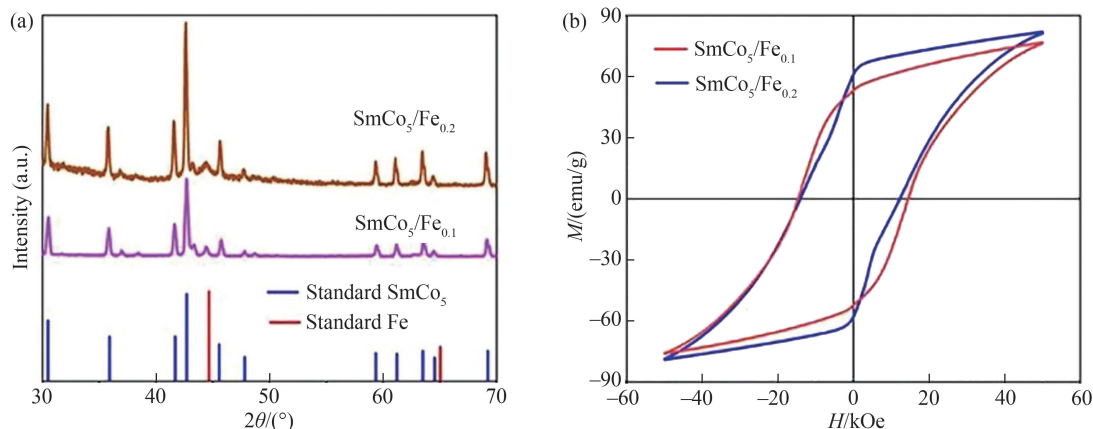


图3 CaO修饰的 $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.1}$ 和 $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.2}$ 纳米复合物表征: (a) XRD图; (b)磁滞回线图

Fig. 3 Characterization of $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.1}$ and $\text{SmCo}_5/\text{Fe}_{0.2}$ nanocomposites with CaO modification: (a) XRD patterns; (b) Magnetic hysteresis loops [15]

磁相高矫顽力(14.7 kOe)与软磁相高饱和磁化强度(76.5 emu/g)的协同效应,如图3(b)所示。 SmCo_5/Fe 异质纳米复合材料的矫顽力较纯 SmCo_5 软磁化样品提升100%,且通过调控Fe含量可优化磁能积。

Wang等^[16]系统揭示了 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁性颗粒的形成机制:首先采用水热法合成均匀分散的纳米级Nd-Fe-B前驱体,后经高温氧化形成 Fe_2O_3 , NdFeO_3 和 NdBO_3 的混合氧化物相,再通过还原扩散反应合成 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 目标相。最终产物经洗涤去除CaO后获得均匀纳米颗粒,其矫顽力为2.0 kOe,饱和磁化强度为90.1 emu/g。随后Wang等^[17]创新性地采用一步水热法实现Dy原位掺杂,如图4所示,并深入探

究Nd含量调控与Dy掺杂对 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 纳米颗粒磁性能的影响。实验发现,提高Nd质量分数(15%~40%)可显著增强矫顽力,最高达3.3 kOe,但会导致饱和磁化强度下降。引入Dy可通过晶格收缩和磁晶各向异性强化大幅提升矫顽力至6.9 kOe,且对剩磁影响较小。此外,该课题组开发了一种基于微波辅助水热法结合还原扩散工艺的高效合成策略,用于制备 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 永磁颗粒^[18]。实验表明,微波加热显著缩短了传统湿化学法的反应时间,且前驱体元素分布均匀。该课题组的系列研究为水热合成高性能 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 磁性材料提供了明确的反应路径与机理依据,并为其磁性能优化指明了方向。

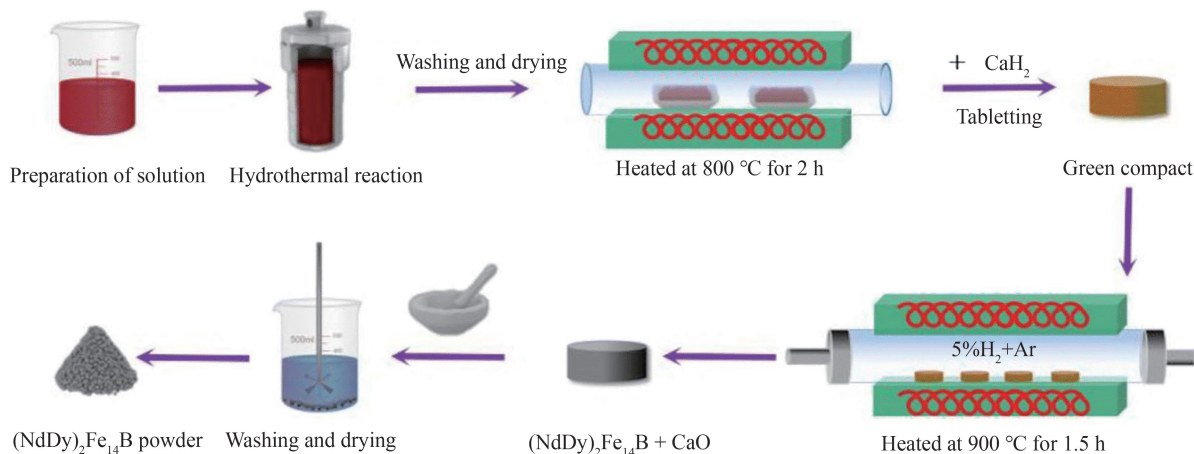


图4 水热法结合还原扩散过程合成 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 和 $(\text{Nd}, \text{Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 粉末的流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of synthesis process of $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ and $(\text{Nd}, \text{Dy})_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ powders by hydrothermal methods followed by a reduction-diffusion process^[17]

现有研究表明,将颗粒尺寸减小至亚微米级可以提高 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 磁粉的矫顽力^[13]。然而,由于颗粒团聚导致剩磁较低,而球磨处理虽然可以提高剩磁,但会降低矫顽力。Okada等^[19]以采用水热法制备出的具有烧结耐受性的纳米级立方氧化铁作为前驱体,有效抑制了后续氢还原和扩散过程中 $\alpha\text{-Fe}$ 颗粒的长大,显著减少了 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 颗粒的团聚现象。实验结果表明,采用新型前驱体制备的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 粉末不仅剩磁显著提高,且矫顽力不降反升(可能与晶界杂质相减少有关)。归因于颗粒分散度改善和取向度提升,这一突破为开发兼具高矫顽力与高剩磁的各向异性 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 磁粉提供了新思路。

1.3 共沉淀法

共沉淀法是在含有稀土与过渡金属阳离子的混

合溶液中加入沉淀剂,利用物质之间的化学反应精准控制各个组分的化学计量比,从而共同沉淀出由多种成分组成的均匀前驱体;再经过高温热分解得到复合氧化物粉末,最终利用还原扩散技术制备出稀土永磁粉末。

Jiang等^[20]将氯化钆和氯化钴溶液共沉淀形成氢氧化物前驱体,然后在高温下还原扩散得到 SmCo_5 纳米颗粒,并通过两种化学包覆法成功制备了 SmCo_5/Co 磁性纳米复合材料。方法一是在300 °C下利用油胺和油酸实现Co纳米颗粒在 SmCo_5 表面的外延生长,导致矫顽力趋近于零,同时饱和磁化强度提升至72.2 emu/g。方法二是在55 °C下通过还原反应生成非晶Co层,后续晶化形成Co壳,结合表面活性剂PVP(聚乙烯吡咯烷酮)优化界面后,复合材

料矫顽力回升至8 kOe, 饱和磁化强度达84.2 emu/g。如图5所示, 方法一制得的复合材料中Co颗粒紧密包覆SmCo₅核心。方法二呈现核壳结构, 非磁性中间层有效调控了两相交换耦合作用, 证实界面工程对提升磁性能具有关键作用, 而添加PVP作为表面活性剂进一步改善了界面结构和Co纳米颗粒的分散性。因此, 制备高性能磁性纳米复合材料需要良好的界面控制和相间交换耦合作用。此外, 纳米颗粒的排列和尺寸控制也是面临的关键挑战。

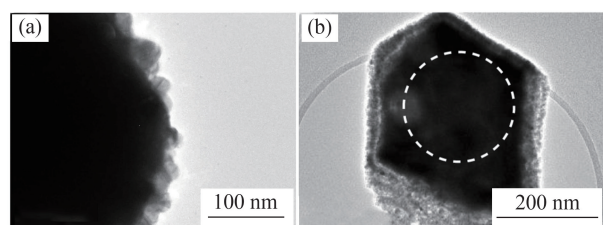


图5 (a)方法一与(b)方法二制备的SmCo₅/Co磁性纳米复合材料的TEM图

Fig. 5 TEM images of SmCo₅/Co magnetic nanocomposites prepared by (a) Method I and (b) Method II [20]

Kang等^[21]通过调节共沉淀过程中硼氢化钠浓度和溶液pH值, 发现pH值显著影响Nd-Fe-B成分分布。当pH=5.5时, B, Nd, Fe质量分数分别为2.4%, 5.7%, 91.9%, 而pH为6.5和4.5的样品中硼完全缺失。磁性表征显示, 未退火的Nd-Fe-B样品饱和磁化强度约为60 emu/g且无矫顽力, 退火后其矫顽力大幅提升至4 kOe, 剩余磁化强度增至30 emu/g。该课题组还基于共沉淀法, 通过表面活性剂介导的自组装将Fe纳米颗粒与Nd-Fe-B合金颗粒结合, 经高温退火处理形成异质结构, 构建了具有强交换耦合效应的Nd₂Fe₁₄B/Fe纳米复合磁体^[22]。磁性测试表明, Fe颗粒呈现超顺磁性, 而复合材料的磁滞回线则展现出显著增强的剩磁特性。热磁分析进一步揭示了复合材料在Nd₂Fe₁₄B相居里温度附近因交换耦合作用导致的磁化强度突跃现象, 验证了硬磁相与软磁相间的界面耦合作用。此外, 研究者们通过对所制备Nd₂Fe₁₄B和Nd_{2-x}Dy_xFe₁₄B颗粒的分析证实, Dy的替代降低了磁矩, 但提高了矫顽力和磁能积, 并且磁各向异性分析表明, “f”位点的替代并未改变晶体各向异性的模式^[23]。

Okada等^[24-25]研究表明, 利用共沉淀—氢还原—

还原扩散工艺制备的Sm₂Fe₁₇超细粉末平均直径约为0.6 μm, 其尺寸接近单畴临界值(0.35 μm), 因而展现出高矫顽力潜力, 并表现出优异的氮化特性; 即使在温和的氮化条件下也能获得Sm₂Fe₁₇N₃磁粉。如图6所示, 工艺优化后成功制备出平均粒径约0.5 μm的Sm₂Fe₁₇N₃磁粉, 其矫顽力高达24.7 kOe, 并展现出优异的热稳定性(温度系数为-0.36%/K)。该研究结合关键脱氢步骤消除了洗涤过程中引入的氢, 解决了传统方法因氢扩散导致的矫顽力下降问题。并证实了粒径减小至0.5 μm可显著提升矫顽力, 且通过温和球磨分散处理后, 粉末最大磁能积可突破40 MGOe, 验证了Sm₂Fe₁₇N₃材料在高温电机应用中的潜力。

1.4 热分解法

热分解法是在含有稳定表面活性剂的高沸点有机溶剂中, 利用易分解的金属有机化合物(如金属羰基盐、乙酰丙酮盐等)加热分解形成金属氧化物前驱体, 随后通过还原扩散形成均匀合金相, 最终获得稀土永磁粉末。合适的表面活性剂如油胺、油酸、二辛基胺等的加入, 在限制颗粒生长聚集的同时, 也起到成核作用。

Sun等^[26]开发了一种通用化学合成方法, 成功制备出具有超高矫顽力和强磁性的稀土基Sm-Co和Sm-Fe-N纳米颗粒。具体通过两步还原法: 先在油胺中热分解乙酰丙酮钐和乙酰丙酮铁/钴生成六方结构的Sm-Co-O或Sm-Fe-O前驱体; 再经CaO包覆和高温还原/氮化处理, 实现50~200 nm可调尺寸的硬磁纳米颗粒的可控合成, 如图7所示。其中, 200 nm的SmCo₅在聚乙二醇基质中磁排列后展现出超高的室温矫顽力(49.2 kOe)和饱和磁矩(88.7 emu/g), 远超此前报道的磁性纳米颗粒。Sm₂Fe₁₇N₃则首次通过化学法合成, 其矫顽力达15.4 kOe, 饱和磁矩高达127.9 emu/g, 磁能积接近传统SmCo₅磁体水平。该方法通过调控稀土金属与过渡金属的比例以及表面钝化策略解决了稀土纳米颗粒的氧化与团聚问题, 为高性能永磁材料的制备提供了重要基础。

此外, 通过调控硬磁相和软磁相的三维交替排列, 可以有效增强磁自旋交换相互作用, 从而提高磁性材料的磁能积。如图8所示, Kang等^[27]利用热分解法分别合成了Co纳米颗粒和Co@SmO_x核壳纳

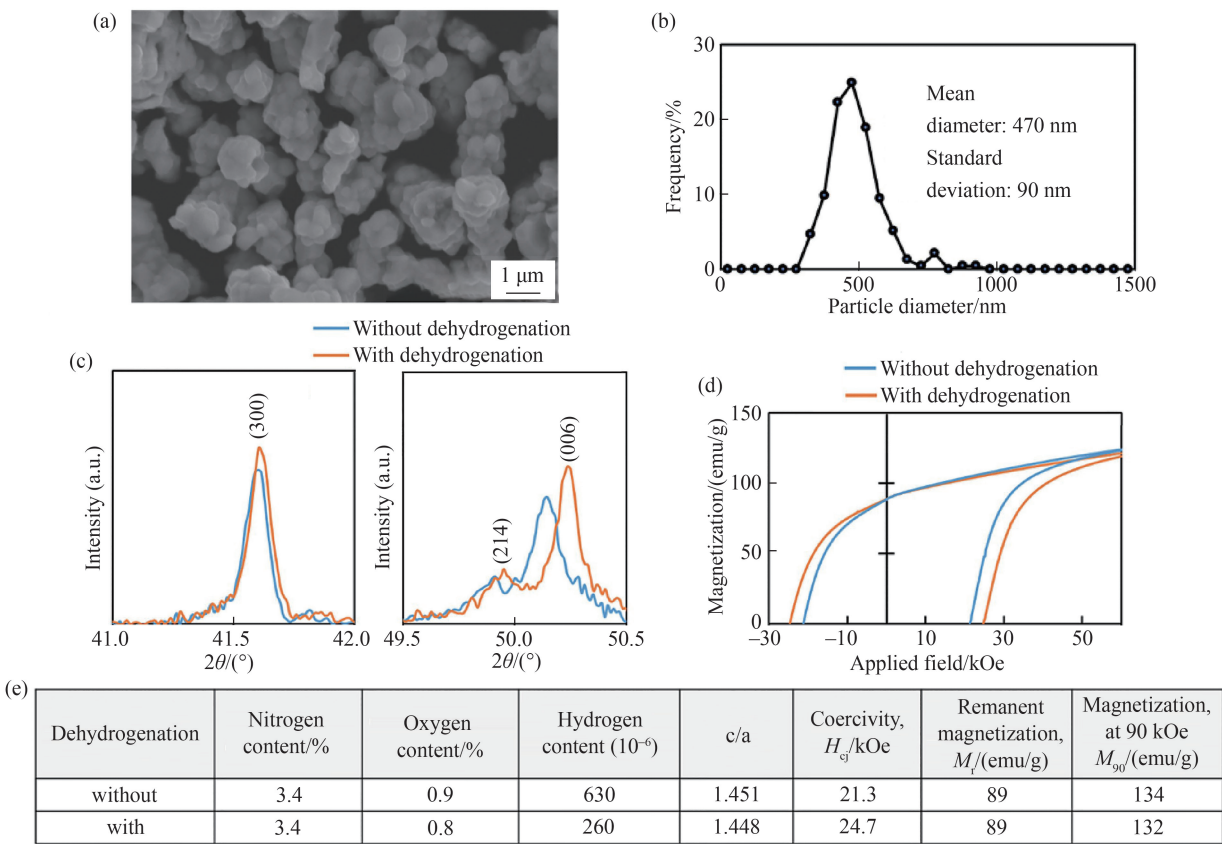


图 6 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 的 (a) SEM 图、(b) 粒径分布、(c) XRD 图、(d) 磁滞曲线、(e) 参数与矫顽力
Fig. 6 (a) SEM image, (b) particle size distribution, (c) XRD patterns, (d) hysteresis curves and
(e) parameters and coercivity of $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ powder^[25]

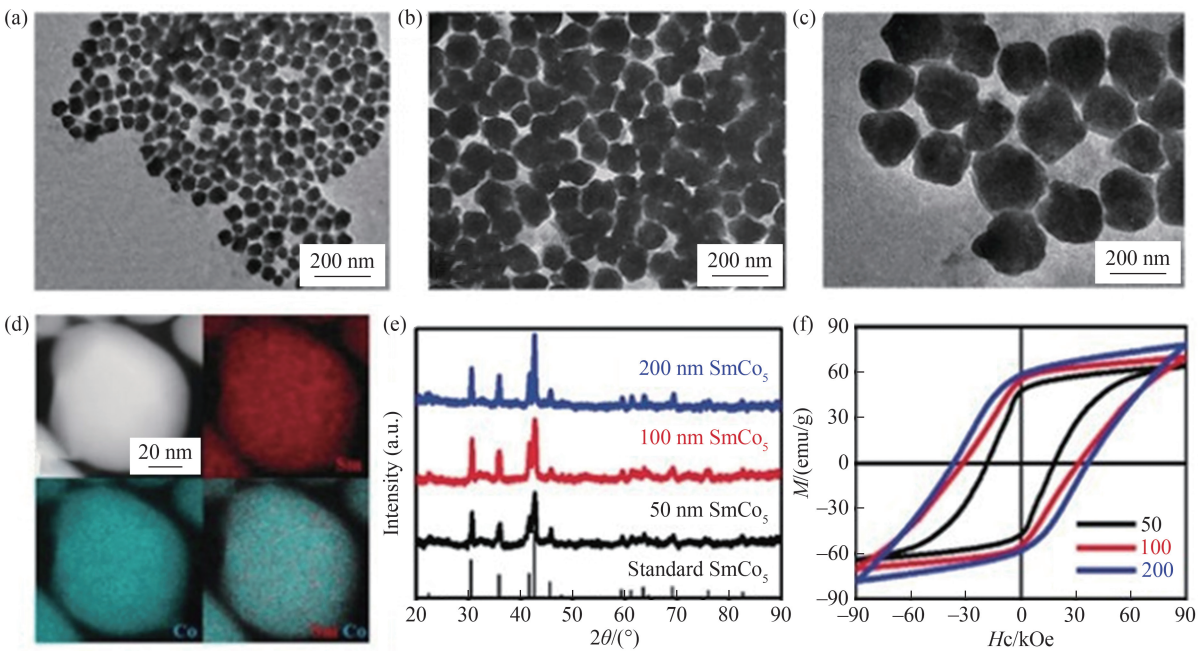


图 7 (a) 50 nm (b) 100 nm (c) 200 nm SmCo_5 纳米粒子的 TEM 图; (d) 100 nm SmCo_5 纳米粒子的 HADD-STEM 图和元素分布图;
(e) SmCo_5 纳米粒子的 XRD 图; (f) 未取向的 SmCo_5 纳米粒子的磁滞回线
Fig. 7 TEM images of (a) 50 nm, (b) 100 nm, and (c) 200 nm SmCo_5 nanoparticles (NPs); (d) HADD-STEM image of a 100 nm SmCo_5 NP and elemental mapping; (e) XRD patterns of SmCo_5 NPs; (f) Hysteresis loops of unaligned SmCo_5 NPs^[26]

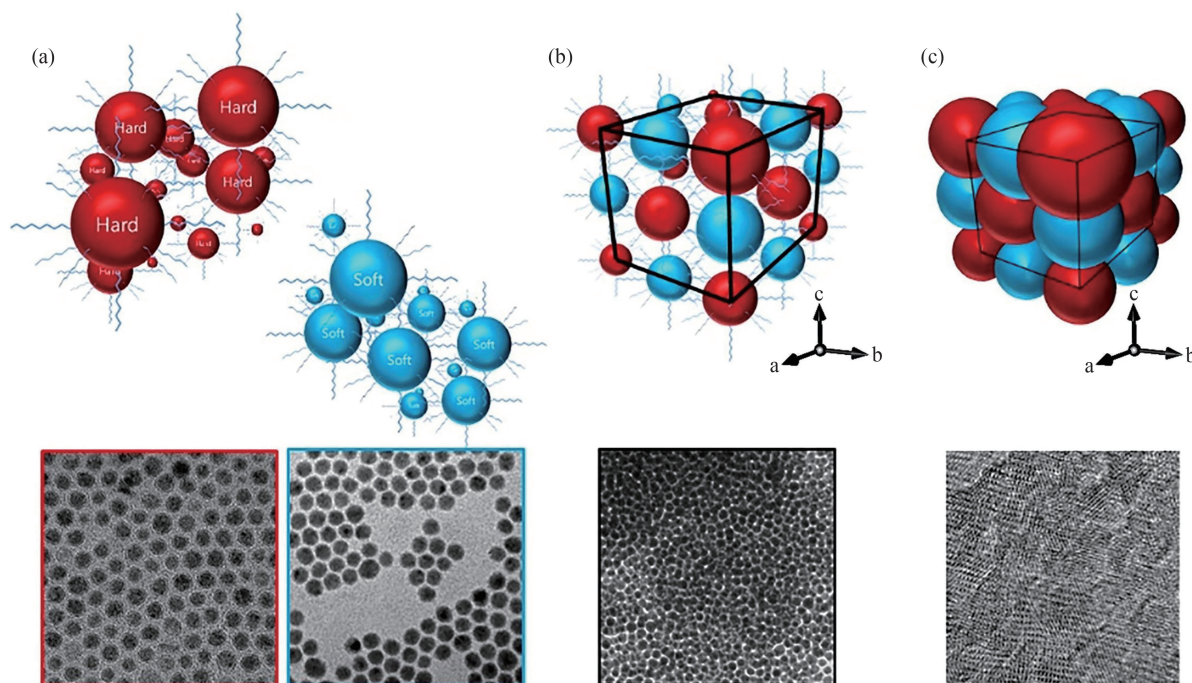


图8 磁自旋相互作用的策略示意图: (a) 软硬相候选物的化学合成; (b) 交替排列; (c) SmCo_5/Co 纳米复合材料的还原扩散过程

Fig. 8 Schematic diagram of strategies for magnetic spin interaction: (a) Chemical synthesis of a soft and a hard phase candidate; (b) Alternating arrangement; (c) Reduction/diffusion process for SmCo_5/Co nanocomposites^[27]

米颗粒, 随后对两种纳米颗粒进行三维交替排列, 以及还原扩散处理, 使 SmO_x 壳层转化为 SmCo_5 , 制备出 SmCo_5/Co 纳米复合材料。该策略旨在通过硬磁相 SmCo_5 与软磁相 Co 的磁自旋交换相互作用提升磁能积。实验结果表明, 50% 质量比的 SmCo_5/Co 复合材料因硬磁相与软磁相的界面接触优化, 展现出显著增强的磁性能, 其最大磁能积达到 3.2 MGOe, 远高于未优化样品的 1.55 MGOe。XRD 与 TEM (透射电子显微镜) 分析证实了 SmCo_5 与 Co 的晶格共存及交替排列结构, 而 VSM (振动样品磁强计) 测试揭示了软磁相的引入在维持矫顽力的同时大幅提升了剩磁。

You 等^[28] 将乙酰丙酮钕和乙酰丙酮铁溶解在油氨溶液中并注入不同量的三乙胺-硼烷, 系统探究了三乙胺-硼烷含量对微观结构及磁性能的影响机制。在油氨介质中, 三乙胺-硼烷热分解产生的 BH_3 可有效还原 Fe_3O_4 并抑制颗粒生长, 而有机腈配体可稳定金属核防止团聚。随着三乙胺-硼烷用量增加, 中间体 Fe_3O_4 粒径逐步细化至 6.51 nm, 退火后 Nd-Fe-B 氧化物中 NdFeO_3 比例先增后减, 最终还原扩散

形成以 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 为主相的纳米颗粒。当三乙胺-硼烷为 3.5 mmol 时, 获得矫顽力约 5.1 kOe、磁能积约 2.9 MGOe 的纯相 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$; 当用量增至 4.5 mmol 时, B 过量引发 $\text{Fe}_2\text{B}/\text{Fe}_3\text{B}$ 杂相, 通过交换耦合作用使矫顽力降至约 3.8 kOe, 但磁能积提升至约 4.9 MGOe。该研究揭示了化学法调控稀土永磁相结构与性能的内在规律。

$\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 合金在传统氮化过程中, 由于其颗粒表面稳定性不足而在高温下容易发生分解, 且水洗步骤可能导致颗粒表面残留的 Ca 或 CaO 与水反应生成氢气, 进而引发氢致膨胀或表面氧化。Teranishi 等^[29] 基于热分解法构建 $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-SmO}_x$ 核壳结构, 随后经空气煅烧、氢气还原、还原扩散生成 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ 合金后, 采用无洗涤原位氮化工艺实现氮化, 成功制备了具有高矫顽力 (13 kOe) 的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 硬磁颗粒。TEM、XRD 及 EDS (能量色散 X 射线光谱) 分析表明, 最终颗粒呈均匀的 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 相, 粒径约 1.3 μm 。该研究证明, 原位氮化通过避免颗粒分解、优化氮化动力学、调控颗粒尺寸, 显著提升了 $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{N}_3$ 的矫顽力和结构稳定性。

1.5 新兴化学合成技术

1.5.1 微波辅助燃烧法

微波辅助燃烧法借助微波辅助加热,利用稀土/过渡金属硝酸盐或氯化盐与有机物(尿素/甘氨酸)之间的充分燃烧产生氧化物前驱体,再经过还原扩散处理后得到稀土永磁粉末。微波加热通过微波辐射与偶极分子和离子的相互作用,升高混合物温度并促进燃烧,保证了整个反应体系内的

均匀性。如图9所示,Yue等^[30]以硝酸盐和尿素为原料,通过微波快速引发氧化还原反应生成均匀Sm-Co氧化物前驱体,再经CaO包覆及还原扩散实现相转变,成功制备出尺寸接近理论单畴临界值(约500 nm)的 SmCo_5 磁性纳米颗粒,其矫顽力高达39.2 kOe,展现出优异的磁性能。Wang等^[31]采用同样的方法成功合成出具有优异磁性能的 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 磁性颗粒。

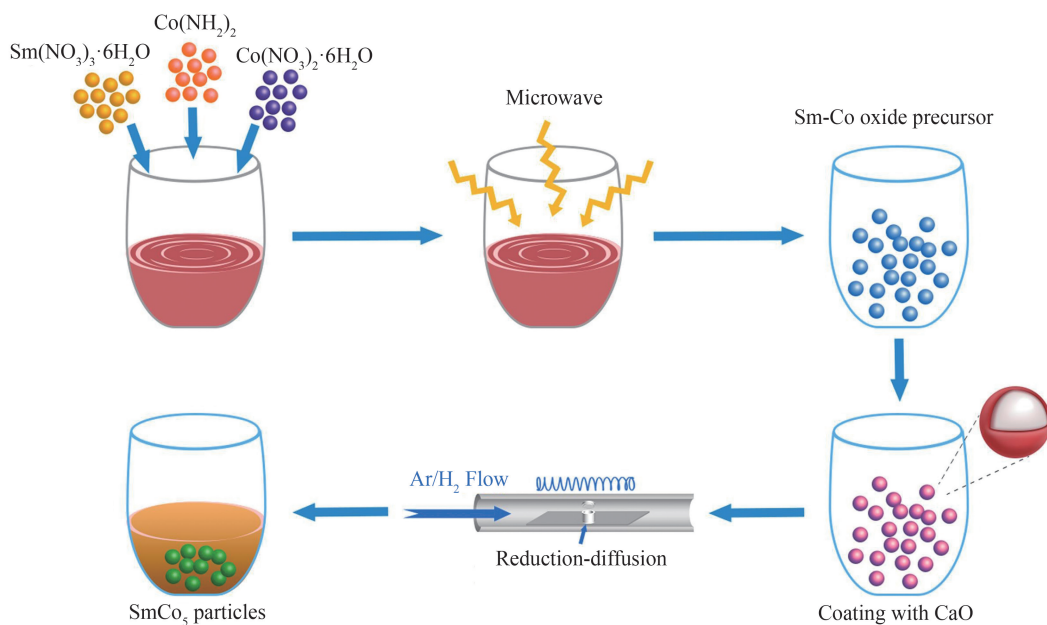


图9 微波辅助燃烧合成Sm-Co颗粒及 CaH_2 还原过程示意图

Fig. 9 Schematic illustration for synthesis of Sm-Co particles by microwave-assisted combustion and the following CaH_2 reduction process^[30]

Ramanujan等^[32]在同一微波腔体中结合微波辅助燃烧法与还原扩散技术,成功制备出高磁能积的交换耦合 $\text{Nd}_2(\text{Fe}_{10}\text{Co}_4)\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米颗粒。TEM显示纳米颗粒呈等轴状,平均粒径约40 nm,XRD和选区衍射证实了 $\text{Nd}_2(\text{Fe},\text{Co})_{14}\text{B}$ 与 $\alpha\text{-Fe}$ 的交换耦合结构。磁性能测试表明,未取向样品的剩磁为65 emu/g,饱和磁化强度达116 emu/g,经磁场取向后剩磁提升至100 emu/g,最大磁能积高达11.4 MGOe,是此前化学法合成的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$ 纳米颗粒中的最高值。

1.5.2 自组装嵌段共聚物模板法

自组装嵌段共聚物模板法制备稀土永磁材料的基本原理是基于嵌段共聚物的微相分离特性与有序自组装能力,利用聚合物模板尺寸均匀、孔道有序的特点定向吸附稀土/过渡金属离子,随后通过化学还原或热处理实现金属离子的原位结晶,并在去

除模板后获得稀土永磁材料。Wakayama等^[33-34]通过使用聚苯乙烯-嵌段-聚(2-乙烯基吡啶)块状共聚物模板,结合化学合成方法成功制备了结构可控的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 纳米复合材料,并通过调节Nd,Fe,B原料的原子比,实现了材料磁性能的调控。富钕配比样品形成 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ /非磁Nd异质结构,因Nd相阻碍磁畴反转而表现出高矫顽力,而接近化学计量比的配比样品则获得高饱和磁化强度(158 emu/g,达理论值94%)的纯相 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$,且两种材料均因低温合成工艺保持了高纯度。

此外,该课题组通过制备的 $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\text{Nd}$ 纳米复合材料,系统研究了钕含量对磁性能的影响。当Nd含量较高时, $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ 颗粒被非磁性Nd相均匀包裹,形成核壳结构。如图10所示,这种结构通过削弱磁耦合效应和阻隔氧/水对颗粒表面的侵蚀,显著提

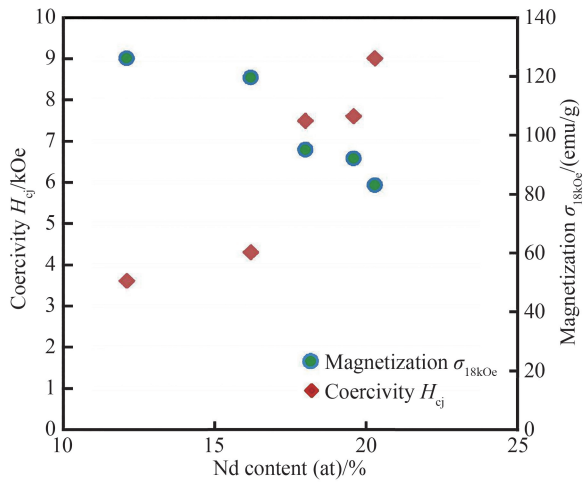


图10 洗涤后1~5样品的矫顽力和磁化强度与Nd含量的关系图

Fig. 10 Relationship between coercivity and magnetization as functions of Nd content for samples 1~5 after washing^[34]

升了矫顽力,且洗涤过程中矫顽力的衰减得到有效抑制。然而,Nd含量的增加会导致饱和磁化强度的轻微下降。XRD和TEM分析表明,Nd₂Fe₁₄B为硬磁

主相,过量Nd通过液相分离在纳米尺度上自组装形成晶界相,其作用类似于传统工艺中添加Dy的效果,但避免了稀土资源依赖问题。

1.5.3 电化学沉积法

电化学沉积法利用电解液中稀土/过渡金属离子在电场驱动下定向迁移至阴极表面并发生还原沉积,通过精确调控电解液成分、电流密度、温度等参数,促使晶粒在基底上有序成核生长,最终形成稀土永磁材料。Cui等^[35-36]通过直流电化学沉积法在多孔氧化铝模板中成功制备了高度有序的Nd-Fe-B纳米线阵列,通过调整电沉积溶液浓度优化了纳米线的相组成与磁性能。不同溶液浓度制备的Nd-Fe-B纳米线的EDS图谱与Nd-Fe-B纳米线中离子的电化学共沉积示意图以及电化学沉积过程溶液中的受力分析和离子转移如图11所示。研究表明,未退火的纳米线主要由Fe基固溶体组成,而退火后转变为包含Nd₂Fe₁₄B硬磁相、Fe_{3.5}B和NdB₄软磁相的多相结构,其中Fe_{3.5}B和NdB₄以簇状颗粒或不

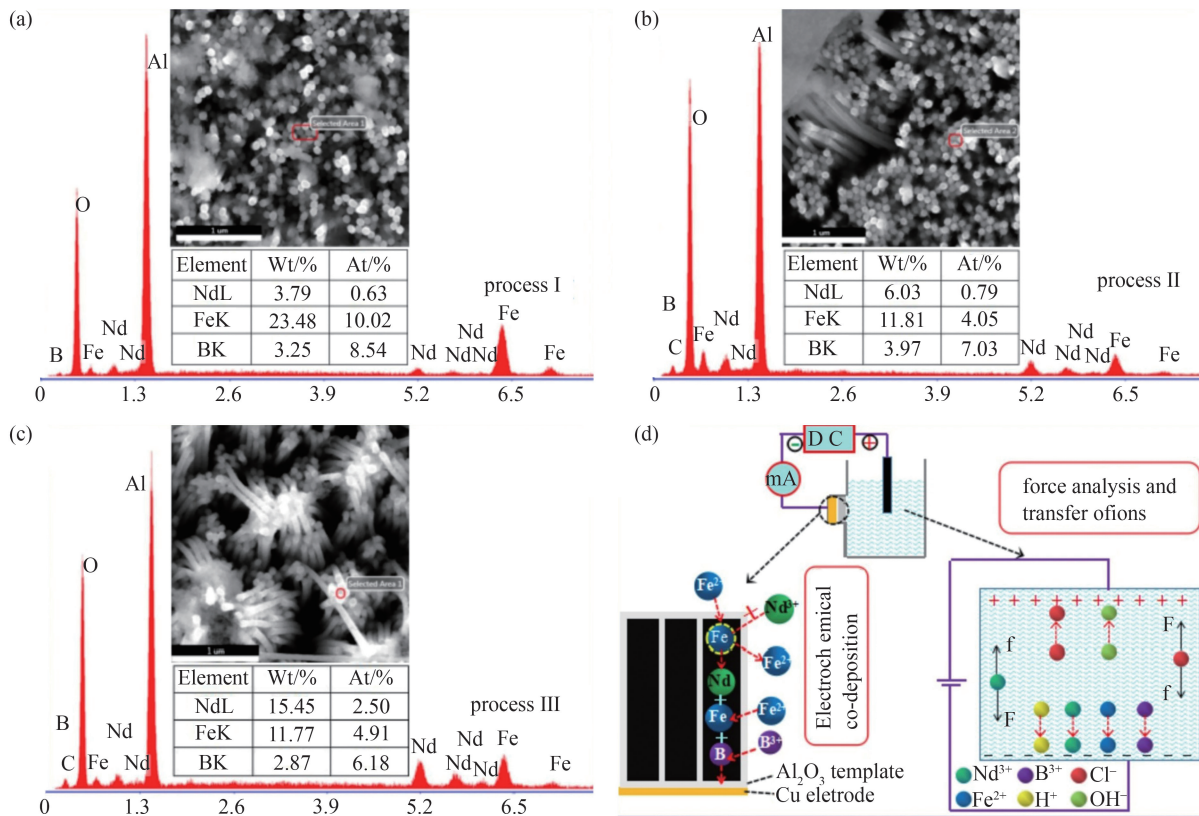


图11 (a~c)不同溶液浓度制备的Nd-Fe-B纳米线的EDS图谱;(d)Nd-Fe-B纳米线中离子的电化学共沉积示意图以及电化学沉积过程中溶液中的受力分析和离子转移

Fig. 11 (a~c)EDS spectra of Nd-Fe-B nanowires prepared at different solution concentrations; (d)Schematic diagram of electrochemical co-deposition of ions in Nd-Fe-B nanowires and force analysis and transfer of ions in solution during electrochemical deposition^[35]

连续条带形式分布于Nd₂Fe₁₄B基体上。退火后纳米线的矫顽力从0.39 kOe显著提升至1.5 kOe，归因于Nd₂Fe₁₄B相的形成及其与Fe_{3.5}B/NdB₄之间的强交换耦合作用，同时形状各向异性导致纳米线沿长轴方向表现出更高的矫顽力。优化溶液浓度使Nd₂Fe₁₄B相比例最大化，综合磁性能最佳(饱和磁化强度68.65 emu/g、剩磁比0.11)。

该课题组在另一项工作中通过交替电化学沉积法制备了Nd-Fe-B/Fe-Co复合纳米线，退火后形成包含高各向异性场的Nd₂(Fe, Co)₁₄B硬磁相与软磁Fe₇Co₃, NdB₄, NdB₆, Fe₇Nd相的多级核壳结构，其矫顽力提升至4.2 kOe，剩磁比达0.89，饱和磁化强度为76.45 emu/g，通过硬磁相的钉扎效应、软硬磁交换耦合作用及相分布调控，实现了高综合磁性能。

1.5.4 静电纺丝法

静电纺丝法是利用高压静电场(10~30 kV)驱动含稀土/过渡金属前驱体的聚合物溶液形成带电射流，在空气或液体环境中拉伸细化成纳米级纤维，通过化学还原或热处理使稀土与过渡金属结合生成稀土永磁材料。Kim等^[37-38]通过静电纺丝技

术结合梯度热处理(250 ℃脱水、500 ℃脱有机物及900~1100 ℃煅烧)成功制备了一维Nd-Fe-B-O纤维。研究发现煅烧温度显著影响相组成与晶体生长，在900 ℃时由Fe₂O₃主导，NdFeO₃比例随温度升高而提升，最终经钙热还原获得的Nd₂Fe₁₄B纤维矫顽力高达7.2 kOe，饱和磁化强度为58.7 emu/g，最大磁能积1.3 MGOe，这也证实高温煅烧优化了形状各向异性并提升了磁性能。此外，针对传统还原扩散法中CaO副产物难分离导致纤维破损的问题，该课题组设计了一种真空环境下通过Ca蒸气蒸发形成纳米级氧化层的创新工艺，有效避免了高温洗涤过程中CaO对纤维结构的破坏。如图12所示，Nd₂Fe₁₄B纤维去除CaO后并没有断裂。由于CaO在高真空中蒸发形成的副产物在Nd₂Fe₁₄B纤维上具有纳米级的厚度，因此可以在不需要大量热量的情况下保持Nd₂Fe₁₄B纤维的形貌。EDS分析表明，用脱氧水洗涤去除CaO后，Nd₂Fe₁₄B纤维中Ca相没有残留。磁性能测试显示，新工艺处理后的Nd₂Fe₁₄B纤维饱和磁化强度达100.7 emu/g，矫顽力为6.4 kOe，最大磁能积高达3.34 MGOe，显著优于含CaO的对照组样品。

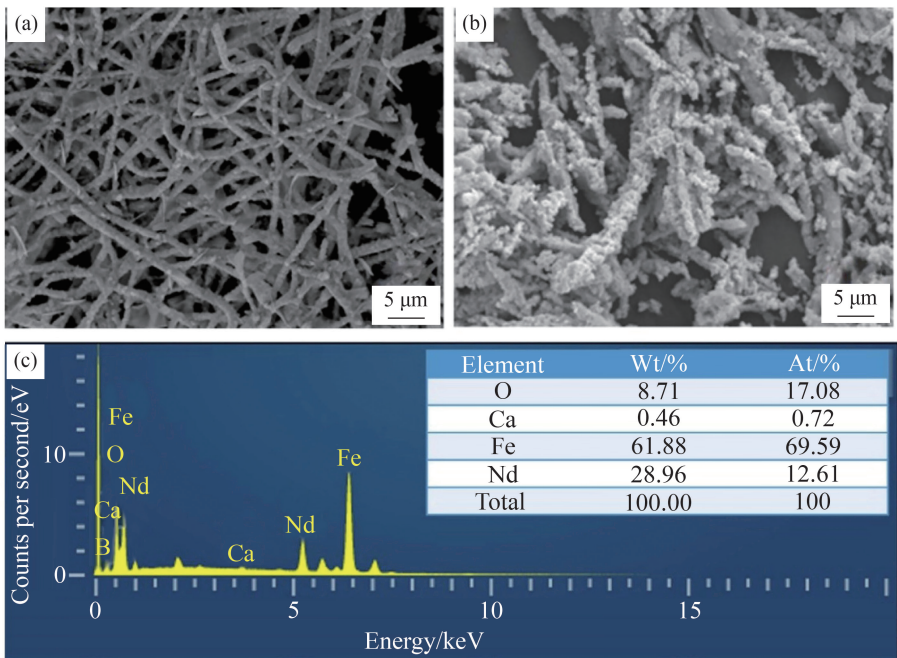


图 12 Nd₂Fe₁₄B 纤维的微观结构：(a) 新还原工艺后的洗涤；(b) 现有还原工艺后的洗涤；(c) 新还原工艺后洗涤的 EDS-SEM 分析

Fig. 12 Microstructures of Nd₂Fe₁₄B fibers: (a) Washed after the proposed reduction process; (b) Washed after the existing reduction process; (c) EDS-SEM analysis of washed fiber after using the proposed reduction process^[38]

2 化学法中的关键科学问题

2.1 晶粒尺寸与磁性能的关联

以化学法制备稀土永磁材料时,晶粒尺寸与磁性能的关系表现为:单畴临界尺寸是矫顽力提升的关键阈值,当硬磁相晶粒尺寸接近该尺寸时,矫顽力显著增强。然而,晶粒尺寸与矫顽力之间呈非线性关系,亚微米级晶粒因抑制畴壁位移达到矫顽力峰值,而过细晶粒极易引入表面缺陷(如氧化层、非磁性相),导致磁性能下降^[39-40]。调节化学反应条件(如热处理温度、反应时长等),优化合成工艺(如表面活性剂、Ti掺杂等)和后处理(如球磨、气流磨等)是调控晶粒尺寸的关键,同时需通过清洗和退火减少晶界缺陷以优化矫顽力。此外,化学法构建的纳米复合结构通过软/硬磁相的交换耦合作用可进一步提升磁能积,但需满足软磁相尺寸小于硬磁相畴壁厚度两倍且均匀分散的条件^[7,41]。

2.2 晶界相工程

在以化学法制备稀土永磁材料过程中,晶界相工程通过调控富稀土相的成分与分布显著影响磁性能^[42]。一方面,重稀土(如Dy/Tb)通过晶界扩散在主相(如Nd₂Fe₁₄B)周围形成非磁性或低磁性的富稀土壳层,利用其高各向异性场抑制磁畴反转提升矫顽力,同时Y的替代策略可优化晶界相的氧亲和力与温度稳定性,降低矫顽力温度系数^[43-45];另一方面,抗氧化涂层通过抑制氧化、形成非磁性界面减少晶间磁耦合作用,进一步优化矫顽力与剩磁平衡^[46]。在制备方法上,还原扩散技术通过CaH₂还原促进富稀土相形核,晶界扩散技术实现厚壳层构建,而电化学沉积法则通过交替沉积构建交换耦合的核壳结构纳米线,综合提升磁能积与热稳定性。

3 当前挑战与未来展望

化学法制备稀土永磁材料在微观结构调控与性能优化方面展现出显著优势,但目前仍面临规模化生产、环保成本与性能稳定性三重核心挑战。

1)规模化方面。实验室级高温高压反应条件在工业级放大过程中,由于反应器尺寸差异,易形成温度梯度,局部过热区域引发晶界扩散不均,从而形成位错、孪晶等缺陷;放大过程中气密性控制难

度增加,导致稀土元素挥发与氧化的损失率较高;工业级合成中不同批次生产的前驱体颗粒尺寸分布波动较大,导致磁粉磁性能不稳定。

2)性能稳定性方面。纳米颗粒在烧结时易因晶粒生长粗化至微米级,导致矫顽力严重下降,而现有包覆技术在高温下易失效;规模化批量生产时由于成分偏析等原因导致磁粉剩磁波动较大。

3)资源与环保方面。钕、铽等稀土价格波动剧烈,磁体成本中稀土占比较高,严重挤压企业的利润空间;热分解法需消耗大量有毒有机试剂,废料中氟磷废水与重金属残留处理难度大;废弃磁体中稀土回收率低下,目前国内采用的湿法回收流程长,且酸碱消耗量大。

化学法制备稀土永磁材料需针对上述瓶颈,结合技术突破、绿色升级与智能化融合,构建系统性解决方案,逐步突破生产瓶颈。

1)优化非高温反应制备工艺,减少高温高压导致的晶格畸变与稀土损失;广泛利用微波辅助合成技术,精准控制晶核形成速率,提升晶粒尺寸均一性,降低设备能耗;筛选壳聚糖等天然生物分子作为新型配体,替代传统有机配体,减少废水污染;利用生物分子自组装特性优化磁粉界面结构。

2)开发梯度包覆技术,采用多层核壳结构,核壳结构外层耐高温、内层抑制晶界扩散,以解决传统单层包覆高温失效问题;通过表面等离子体处理或原子层沉积技术,在磁粉或磁体表面构建富稀土层,修复晶界缺陷,降低剩磁波动;结合机器学习预测核壳结构与表面修饰最优工艺,缩短实验周期。

3)开发废弃磁体与稀土废料高效回收技术,利用氢破、还原扩散等工艺实现废料到稀土磁粉的短流程再生,减少能耗与稀土损失;利用机器视觉与光谱分析技术,实现生产线中磁体缺陷的自动化识别与分类剔除;推动全链条协作,对冲稀土价格波动。

参考文献:

- [1] 张锦山,郑洁,董季玲,等.化学法制备稀土永磁纳米材料研究现状[J].科技创新与应用,2017(21):36,38.
- [2] 杨文龙,杨策,刘飞,等.稀土永磁纳米材料的化学法制备及其磁学性能[J].大学化学,2014,29(3):1-8.
- [3] 曹俊,李仲,刘延丰,等.高铁含量2:17型钕钴永磁

- 材料研究进展[J]. 铜业工程, 2024(4): 142-156.
- [4] ABDURAKHMONOV O E, SHAROPOV U B, ABDURAKHMONOV S E, et al. New method of chemical synthesis for nanostructured Nd-Fe-B alloy [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2024, 589: 171562.
- [5] YANG C, HOU Y L. Advance in the chemical synthesis and magnetic properties of nanostructured rare-earth-based permanent magnets [J]. Rare Metals, 2013, 32(2): 105-112.
- [6] 郑洁, 张锦山, 董季玲, 等. Sm-Co 磁性纳米材料的化学法制备和性能 [J]. 化工设计通讯, 2018, 44(8): 79-80.
- [7] XU J J, ZHU K, GAO S, et al. Rare earth permanent magnetic nanostructures: chemical design and microstructure control to optimize magnetic properties [J]. Inorganic Chemistry Frontiers, 2021, 8(2): 383-395.
- [8] EMIRA S, SHAABAN E R, GELANY S A, et al. Structural and magnetic properties of SmCo/Co nanocomposites elaborated using sol-gel auto-combustion strategy [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34: 2283.
- [9] DEHERI P K, SWAMINATHAN V, BHAME S D, et al. Sol-gel based chemical synthesis of Nd₂Fe₁₄B hard magnetic nanoparticles [J]. Chemistry of Materials, 2010, 22(24): 6509-6517.
- [10] DEHERI P K, SHUKLA S, RAMANUJAN R V. The reaction mechanism of formation of chemically synthesized Nd₂Fe₁₄B hard magnetic nanoparticles [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2012, 186: 224-230.
- [11] WANG X B, ZHU K, LI W, et al. Nd₂Fe₁₄B hard magnetic powders: chemical synthesis and mechanism of coercivity [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2021, 518: 167384.
- [12] NGO H M, LEE G, HAIFER S K, et al. Chemical synthesis of Nd₂Fe₁₄B/Fe-Co nanocomposite with high magnetic energy product [J]. RSC Advances, 2021, 11(51): 32376-32382.
- [13] HIRAYAMA Y, PANDA A K, OHKUBO T, et al. High coercivity Sm₂Fe₁₇N₃ submicron size powder prepared by polymerized-complex and reduction-diffusion process [J]. Scripta Materialia, 2016, 120: 27-30.
- [14] 戴兢陶, 章彬彬, 催冬梅. 磁性纳米粒子SmCo₅的合成及表征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2012, 41(12): 2215-2218.
- [15] YANG K, LIU X D, ZHANG Y L, et al. The chemical fabrication of heterostructured SmCo₅/Fe nanocomposites [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33: 20439-20446.
- [16] WANG L, ZHANG M G, GUO J D, et al. The reaction mechanism in the hydrothermal synthesis of Nd₂Fe₁₄B magnetic particles [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2021, 296: 122003.
- [17] WANG L, ZHANG M G. Hydrothermal synthesis of Nd-Fe-B nanoparticles with enhanced magnetic properties by Nd content tuning and Dy doping [J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2021, 34: 987-994.
- [18] WANG L, XU X F. Facile synthesis of Nd₂Fe₁₄B hard magnetic particles with microwave-assisted hydrothermal method [J]. Molecules, 2023, 28(23): 7918.
- [19] OKADA S, SUZUKI K, NODE E, et al. Improvement of magnetization of submicron-sized high coercivity Sm₂Fe₁₇N₃ powder by using hydrothermally synthesized sintering-tolerant cubic hematite [J]. AIP Advances, 2017, 7(5): 056219.
- [20] DONG Y, ZHANG T L, WANG H, et al. Chemical synthesis and characterization of SmCo₅/Co magnetic nanocomposite particles [J]. Rare Metals, 2021, 40(5): 1224-1231.
- [21] KIM C W, KANG Y S. Preparation of hard phase Nd-Fe-B nanoparticles by coprecipitation method [J]. Solid State Phenomena, 2007, 121: 279-282.
- [22] LEE K, CHA H G, KIM T H, et al. New avenues to efficient chemical synthesis of exchange coupled hard/soft nanocomposite magnet [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2009, 9(7): 4453-4458.
- [23] HAIDER S K, KANG M C, HONG J S, et al. Determination of Dy substitution site in Nd_{2-x}Dy_xFe₁₄B by HAADF-STEM and illustration of magnetic anisotropy of "g" and "f" sites, before and after substitution [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 6347.
- [24] OKADA S, TAKAGI K, OZAKI K. Direct preparation of submicron-sized Sm₂Fe₁₇ ultra-fine powders by reduction-diffusion technique [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 663: 872-879.
- [25] OKADA S, SUZUKI K, NODE E, et al. Preparation of submicron-sized Sm₂Fe₁₇N₃ fine powder with high coercivity by reduction-diffusion process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695: 1617-1623.

- [26] SHEN B, YU C, BAKER A A, et al. Chemical synthesis of magnetically hard and strong rare earth metal based nanomagnets [J]. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 2019, 58(2): 602-606.
- [27] KIM C W, KIM I H, KANG Y S. Magnetic spin exchange interaction in SmCo₅/Co nanocomposite magnet for large energy product [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 589: 157-165.
- [28] GUO Y Z, YOU J H, PEI W L, et al. Effect of (C₂H₅)₃NBH₃ content on microstructure and properties of Nd-Fe-B nanoparticles prepared by chemical and reduction-diffusion method [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 777: 850-859.
- [29] KIM J, WU H L, HSU S, et al. Nanoparticle approach to the formation of Sm₂Fe₁₇N₃ hard magnetic particles [J]. *Chemistry Letters*, 2019, 48(9): 1054-1057.
- [30] WANG Y T, YANG Z, XU H B, et al. Microwave-assisted chemical synthesis of SmCo₅ magnetic particles with high coercivity [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2023, 579: 170855.
- [31] WANG Y T, MA X Y, LU Y N, et al. Microwave-assisted combustion synthesized Sm₂Co₁₇ magnetic particles for permanent magnetic application [J]. *Magnetochemistry*, 2024, 10(9): 63.
- [32] TAN X, PARMAR H, CHAUDHARY V, et al. Synthesis and reaction mechanism of high (BH)_{max} exchange coupled Nd₂(Fe, Co)₁₄B/a-Fe nanoparticles by a novel one-pot microwave technique [J]. *New Journal of Chemistry*, 2018, 42(23): 19214-19223.
- [33] WAKAYAMA H, YONEKURA H. Use of block copolymer templates for chemical synthesis of Nd₂Fe₁₄B nanocomposites with controlled magnetic properties [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2019, 227: 265-268.
- [34] YONEKURA H, WAKAYAMA H. Relationship between Nd content and magnetic properties of Nd₂Fe₁₄B/Nd nanocomposites chemically synthesized using self-assembled block copolymer templates [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 2019, 244: 38-42.
- [35] KANG L C, CUI C X, YANG W, et al. The properties and microstructure of Nd-Fe-B nanowires fabricated by electrochemical deposition using porous Alumina templates [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, 242: 122470.
- [36] KANG L C, YANG W, ZHAO L C, et al. Study on the microstructure and magnetic properties of Nd-Fe-B/Fe-Co composite nanowires [J]. *Materials*, 2023, 16(16): 5541.
- [37] JEON E J, EOM N S A, CHOA Y H, et al. Synthesis of one-dimensional neodymium-iron-boron-oxides [J]. *Materials Letters*, 2020, 264: 127286.
- [38] EOM N S A, JEON E J, HAQ M A, et al. Fabrication and characterization of 1-dimensional neodymium-iron-boron fibers using new reduction-diffusion process [J]. *Materials Letters*, 2020, 268: 127611.
- [39] XU J J, YI Y H, JIA B Q, et al. Composition and microstructural control of Sm₂Fe₁₇N₃ powders: a promising candidate for next-generation permanent magnets [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, 12: 14714-14728.
- [40] YANG Z, WANG Y T, XU H B, et al. Strategies for the synthesis of nanostructured SmCo₅ magnetic particles for permanent magnetic application [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2024, 7(4): 4252-4263.
- [41] PARMAR H, XIAO T, CHAUDHARY V, et al. High energy product chemically synthesized exchange coupled Nd₂Fe₁₄B/ α -Fe magnetic powders [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(37): 13956-13966.
- [42] 刘峰, 李琳穗. 烧结钕铁硼磁性性能提升研究进展[J]. *铜业工程*, 2023(1): 121-126.
- [43] RAHIMI H, GHASEMI A, MOZAFFARINIA R, et al. Coercivity enhancement mechanism in Dy-substituted Nd-Fe-B nanoparticles synthesized by sol-gel base method followed by a reduction-diffusion process [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2017, 429: 182-191.
- [44] KIM T H, SASAKI T T, KOYAMA T, et al. Formation mechanism of Tb-rich shell in grain boundary diffusion processed Nd-Fe-B sintered magnets [J]. *Scripta Materialia*, 2020, 178: 433-437.
- [45] DING G F, LIAO S C, DI J H, et al. Microstructure of core-shell NdY-Fe-B sintered magnets with a high coercivity and excellent thermal stability [J]. *Acta Materialia*, 2020, 194: 547-557.
- [46] YANG X K, LI Q, ZHANG S Y, et al. Microstructure characteristic and excellent corrosion protection properties of sealed Zn-TiO₂ composite coating for sintered NdFeB magnet [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 495(1): 189-195.

Research Progress and Challenges in Chemical Preparation of Rare-earth Permanent Magnets

YI Yuhao, JIA Boqian, XUE Hang, HAN Guangda, MA Yujing

(Xi'an Rare Metal Materials Institute Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Rare-earth permanent magnets (e.g., Sm-Co, Nd-Fe-B, Sm-Fe-N) are core components of high-performance magnetic materials, widely used in new energy, electronic information, and national defense. Compared with physical methods, chemical preparation techniques for rare-earth permanent magnets exhibit unique advantages such as atomic-level mixing, morphology controllability, and low-temperature synthesis, and are gradually becoming research hotspots. This review systematically summarized the research progress of chemical preparation technologies including the sol-gel method, hydrothermal method, co-precipitation method, thermal decomposition method, and emerging synthetic approaches. It analyzed the microstructure regulation mechanisms and magnetic performance optimization strategies, followed by discussion of current challenges and future development directions in this field.

Key words: rare-earth permanent magnet; chemical method; preparation process; magnetic property; grain size; boundary diffusion

doi: 10.3969/j.issn.1009-3842.2026.01.009

引文格式: 怡裕浩, 贾博谦, 薛航, 韩光达, 马誉景. 化学法制备稀土永磁材料的研究进展与挑战[J]. 铜业工程, 2026(1): 97-110.

YI Yuhao, JIA Boqian, XUE Hang, HAN Guangda, MA Yujing. Research progress and challenges in chemical preparation of rare-earth permanent magnets [J]. Copper Engineering, 2026(1): 97-110.

投稿网址: www.tygc.net

微信公众号: jxtygc