

# 晶界添加 MgO/Mg 纳米粉对烧结钕铁硼磁性和抗腐蚀性的影响

杨 洋, 李志杰, 吕森浩, 庄博文, 智鹏远

(沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

**摘 要:** 为了提高烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能和抗腐蚀性能, 采用二元合金法, 通过晶界添加 MgO/Mg 纳米粉烧结成  $(\text{PrNd})_{15.5}\text{B}_6\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{\text{bal}}\text{Mg}_x$  ( $x=0.1\sim 0.3$ , 质量分数, %) 永磁体。利用永磁特性自动测量仪、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪和 CHI660E 电化学工作站对不同添加量的 MgO/Mg (质量比为 1:2) 纳米粉的烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能、微观结构及抗腐蚀性能进行了研究。结果表明: 当 MgO/Mg 纳米粉添加量为 0.1% 时, 磁体综合磁性能表现最好, 此时磁体矫顽力 1183 kA/m, 剩磁 1.22 T, 最大磁能积 288 kJ/m<sup>3</sup>。由塔菲尔曲线可知, 随着 MgO/Mg 纳米粉添加量的增多, 腐蚀电位从 -1.093 V 提高到 -0.929 V; 腐蚀电流密度从 223.87  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  降低到 42.66  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 由电化学阻抗谱图可知, 添加了适量的 MgO/Mg 纳米粉的磁体的高频容抗弧的半径大于未添加磁体的高频容抗弧的半径, 增大了电荷迁移阻力。因此晶界添加适量的 MgO/Mg 纳米粉提高了烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能和抗腐蚀性能。

**关键词:** 烧结钕铁硼; MgO/Mg 纳米粉; 磁性能; 微观结构; 抗腐蚀性

中图分类号: TM273

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2020)04-1366-06

自 1983 年烧结 Nd-Fe-B 永磁体成功发明以来, 由于其优异的综合性能被广泛应用于多种领域<sup>[1-5]</sup>。然而烧结 Nd-Fe-B 磁体较低的矫顽力和较差的抗腐蚀性能大大限制了对它们进一步的使用<sup>[6]</sup>。因此, 寻找一种更有效的方法来改善烧结 Nd-Fe-B 磁体的不足一直以来是研究者们研究的重点。

有研究表明, 磁体的晶界相对磁体的磁性能和抗腐蚀性能都有非常重要的影响<sup>[7-10]</sup>。近年来, 大量的研究集中在通过添加元素来改善磁体的性能, 特别是对富钕晶界相的微结构改性上, 通过添加 Co/Cu<sup>[11]</sup>、Dy-Mn<sup>[12]</sup>、Al<sub>85</sub>Cu<sub>15</sub><sup>[13]</sup>、Sn<sup>[14]</sup> 在晶界处形成新的 NdFeCoCu 相、(Nd,Dy)<sub>2</sub>(Fe,Mn)<sub>14</sub>B 相、Cu-rich 相、Nd<sub>6</sub>Fe<sub>13</sub>Sn 相, 这是提高烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能和抗腐蚀性能的有效途径之一。Zhou<sup>[15]</sup> 等通过晶界添加 Dy<sub>20</sub>Al<sub>80</sub> 和 Liang<sup>[16]</sup> 等通过晶界添加 Dy<sub>71.5</sub>Fe<sub>28.5</sub> 来提高磁体的矫顽力和耐腐蚀性, 添加量(质量分数)分别为 4% 和 3% 时综合性能最优; 虽然重稀土的添加提高了磁体的性能, 但由于重稀土资源的匮乏, 以及其昂贵的价格, 很大程度上限制了对它们的使用, 因此寻找更廉价的替代元素来提高磁体的性能具有重要意义。Bae<sup>[17]</sup> 等研究了晶界复合添加 WS<sub>2</sub>/Al 和

Cu<sup>[18]</sup> 等研究了晶界添加 Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 对磁体的热稳定性和耐腐蚀性的影响, 虽然磁体的热稳定性和耐腐蚀性提高明显, 但同时也付出了降低磁体剩磁和磁能积的代价。通过晶界添加适量低熔点的 Mg 利于磁体的液相烧结, 有助于提高磁体的密度和磁体的磁性能, 同时晶界添加 MgO 可以提供晶界区少量的氧<sup>[19,20]</sup>, 在晶界形成新的 Nd-O-Fe-Mg 相, 抑制晶粒长大, 这有助于提高磁体的矫顽力。根据 Tomashov 关于合金腐蚀的理论, 添加标准电极电位高于钕的合金元素可使富 Nd 晶界相更稳定。Zhang<sup>[21]</sup> 和 Sun<sup>[22]</sup> 等人选取了电极电位更高的 Cu (0.3419 V) 作为添加物, 在晶界形成更稳定的含 Cu 新相, 从而提高磁体的耐腐蚀性。Mg<sup>2+</sup>/Mg 的标准电极电位 (-2.37 V) 高于 Nd<sup>3+</sup>/Nd (-2.431 V), 所以 Mg<sup>[23]</sup> 或 MgO<sup>[24,25]</sup> 的添加可以提高磁体的抗腐蚀性。

因此利用 MgO/Mg 纳米复合粉的共同作用来提高磁体的性能是十分可行的。实验采用二元合金法, 通过晶界添加 MgO/Mg 纳米复合粉对磁体晶界相进行改性, 研究了不同比例复合粉对磁体磁性能、微观结构及耐腐蚀性能的影响。

收稿日期: 2019-04-15

基金项目: 国家自然科学基金 (21571132); 辽宁省自然科学基金 (20170540670)

作者简介: 杨 洋, 男, 1993 年生, 硕士生, 沈阳工业大学理学院, 辽宁 沈阳 110870, 电话: 024-25497102, E-mail: 514589435@qq.com

## 1 实验

按合金成分  $(\text{PrNd})_{15.5}\text{B}_6\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{\text{bal}}$  (质量分数) 以钕钷合金、金属铁、金属铜(纯度  $\geq 99.0\%$ ) 和硼铁合金为原材料, 在真空中频感应炉中熔炼并甩带, 将甩片氢破处理, 而后在氮气环境保护下用气流磨制成约为  $5\ \mu\text{m}$  的合金粉末。将添加量分别为  $0.1\% \sim 0.3\%$  的 MgO/Mg 纳米复合粉(质量比为 1:2) 和  $(\text{PrNd})_{15.5}\text{B}_6\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{\text{bal}}$  合金粉末在真空混料机中混合 2 h, 将混匀后的磁粉在 1.5 T 磁场下取向压制成形, 然后在 200 MPa 的压力下进行冷等静压, 将压坯在  $1085\ \text{C}$  下烧结 3 h, 接下来在  $460\ \text{C}$  下进行回火 2 h, 然后通入氩气冷却至  $50\ \text{C}$  以下取出。将样品切成测试尺寸, 表面研磨处理, 进行显微组织结构分析和性能检测。

使用 FE-2100H 型永磁特性自动测量仪测试磁体的磁性能。选用 PhenomProX 型扫描电子显微镜对磁体表面相图进行观察和元素分布进行分析; 采用 Nikon LV150N 型光学显微镜进行金相组织观察。根据阿基米德排水法测量磁体密度。使用 CHI660E 电化学工作站测试烧结 Nd-Fe-B 磁体的耐腐蚀性, 试验采用标准的“三电极”体系, 待测样品作为工作电极, 饱和甘汞电极和铂电极分别作为参比电极和辅助电极, 实验在 3.5% 氯化钠溶液中进行, 极化曲线的测量采取动电位扫描法, 扫描速率为 2 mV/s; 在  $10^0 \sim 10^5\ \text{Hz}$  频率范围内信号幅值为 5 mV 条件下测试了磁体电化学阻抗谱(EIS); 在  $120\ \text{C}$ 、0.2 MPa 和 100% 相对湿度的环境中, 对磁体进行了不同时间的加速腐蚀试验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁性能

图 1 是添加了不同含量的 MgO/Mg 对烧结 Nd-Fe-B 磁体的内禀矫顽力  $H_{\text{cj}}$ 、剩磁  $B_{\text{r}}$ 、以及最大磁能积  $(BH)_{\text{max}}$  影响的变化曲线。从图中可知, 随 MgO/Mg 纳米复合粉添加量的不断增加, Nd-Fe-B 磁体的矫顽力  $H_{\text{cj}}$ 、剩磁  $B_{\text{r}}$  和最大磁能积  $(BH)_{\text{max}}$  均是先上升后下降。当 MgO/Mg 纳米复合粉添加量为 0.1% 时, 磁体磁性能表现最好, 此时磁体矫顽力 1183 kA/m, 剩磁 1.22 T, 最大磁能积  $288\ \text{kJ/m}^3$ , 相比未添加的磁体磁性能稍有提高, 分别提高了 0.2%、0.6%、1.7%。继续添加, 矫顽力  $H_{\text{cj}}$  近似呈线性下降, 而剩磁  $B_{\text{r}}$  和最大磁能积  $(BH)_{\text{max}}$  下降变缓。

磁体密度是影响烧结 Nd-Fe-B 磁体磁性能的重要因素之一, 尤其是对剩磁的影响。图 2 是不同 MgO/Mg 纳米复合粉添加量的 Nd-Fe-B 磁体的密度。由图可知, 磁体密度是先上升后下降, 当 MgO/Mg 纳米复合粉的

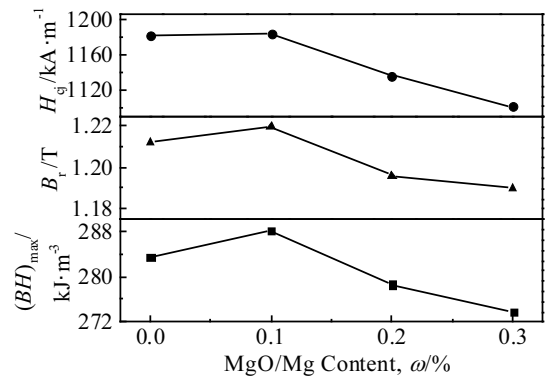


图 1 MgO/Mg 添加量对 Nd-Fe-B 磁体磁性能的影响

Fig.1 Relationship between magnetic properties of Nd-Fe-B magnets and MgO/Mg additions

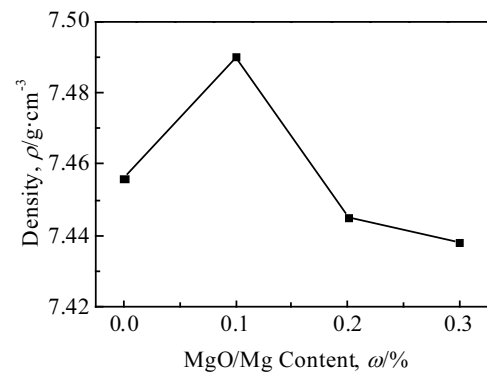


图 2 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体的密度

Fig.2 Density of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions

添加量为 0.1% 时, 磁体密度升高到  $7.49\ \text{g/cm}^3$ 。这是因为少量低熔点的 Mg 纳米粉的添加, 有利于磁体的液相烧结, 使主相间结合更加致密, 从而提升磁体的密度。磁体密度的提高是磁体剩磁提高的主要原因之一。当 MgO/Mg 的添加量继续增多时, 磁体密度急剧下降, 并低于未添加磁体的密度。这由于过量的 MgO 的添加与晶界处富稀土形成新相阻碍了烧结 Nd-Fe-B 致密化过程中 (Pr, Nd) 的传质过程。

### 2.2 微观结构和取向

图 3 是不同 MgO/Mg 添加量的 Nd-Fe-B 磁体的光学显微照片。金相分析结果表明, 当 MgO/Mg 纳米粉的添加量为 0.1% 时, 平均晶粒尺寸由无 MgO/Mg 磁体的  $6.75\ \mu\text{m}$  减小到  $6.06\ \mu\text{m}$ 。随着 MgO/Mg 含量的进一步增加, 添加 0.2% 和 0.3% 的 MgO/Mg 的磁体的平均晶粒尺寸略有增加, 分别为  $6.83$  和  $6.85\ \mu\text{m}$ 。此外, 由图可知, 未添加 MgO/Mg 纳米复合粉的磁体的晶粒大小不均, 并且有个别较大晶粒出现, 空洞较多, 而

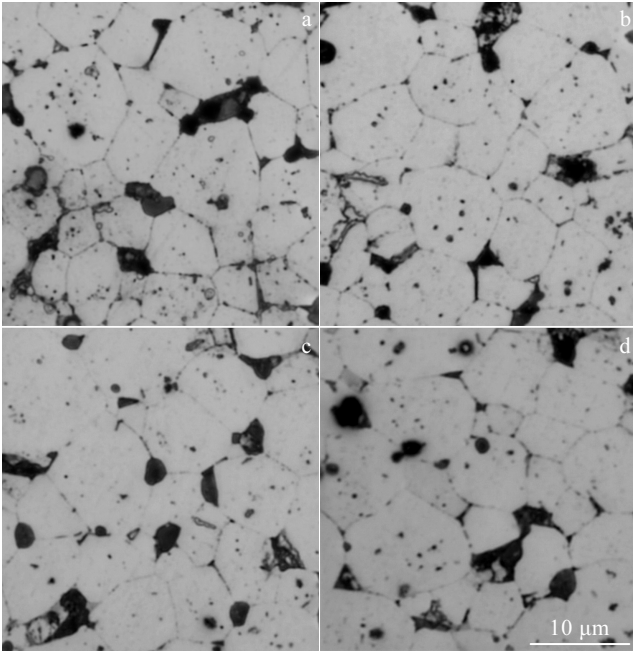


图 3 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体的光学显微照片

Fig.3 Optical micrographs of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions: (a) 0%, (b) 0.1%, (c) 0.2%, and (d) 0.3%

添加 0.1%的 MgO/Mg 纳米粉磁体的晶粒大小比较均匀, 主相和晶界相空洞较少, 晶界相变得清晰光滑, 主相晶粒隔离良好, 这都有益于磁体矫顽力和剩磁的提升。

图 4a 为 MgO/Mg 添加量为 0.1%的 Nd-Fe-B 磁体的 SEM 图, 图 4b 为图 4a 中标记点 2 的相的 EDS 能谱。表 1 是通过 EDS 分析的添加 0.1%MgO/Mg 纳米粉的磁体主相和富 Nd 晶界相的元素组成。由结果可知, MgO/Mg 纳米粉的确被添加到晶界相, 未进入主相, 磁体主相的元素组成没有改变, 并且在磁体晶界处形成了新的 Nd-O-Fe-Mg 相<sup>[24,25]</sup>。在烧结回火过程中, 添加的 MgO 与富 Nd 晶界相发生反应, 形成 Nd-O-Fe-Mg 相, 少量新相的形成有助于磁体的致密性, 从而提高磁体的剩磁; 然而随着 MgO 添加量的增多, 在晶界处沉积较多的新相, 破坏了磁体的微观结构, 导致磁体磁性能的下降。

图 5 是不同 MgO/Mg 添加量的烧结 Nd-Fe-B 磁体的 XRD 图谱。由图 5 可知, 各磁体的衍射峰强度不一样, 由于磁体取向度的不同, 有些衍射峰强, 有些衍射峰弱。磁体晶粒 C 轴平行外磁场方向时 (006) 峰强, 而 C 轴与外磁场方向成 15.44°时 (105) 峰强, 因此 (105) 峰强弱反映错取向晶粒数。因此一般利用 XRD 谱线的(006)、(105)衍射峰强度比值  $A=I_{(006)}/I_{(105)}$

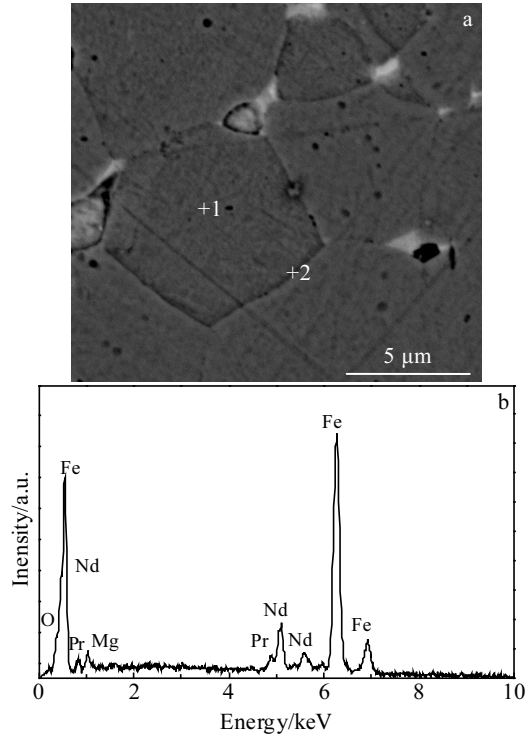


图 4 MgO/Mg 添加量为 0.1%的 Nd-Fe-B 磁体的 SEM 图和图 4a 中标记点 2 的 EDS 能谱

Fig.4 SEM image of Nd-Fe-B magnet with intergranular addition of 0.1% MgO/Mg (a) and EDS spectrum of marked point 2 in Fig.4a (b)

表 1 图 4a 中相的 EDS 分析

Table 1 EDS analysis of phases in Fig.4a (at%)

Point	Fe	Pr	Nd	Mg	O
1	88.64	2.11	7.81	0	0
2	55.06	5.23	17.93	2.94	16.52

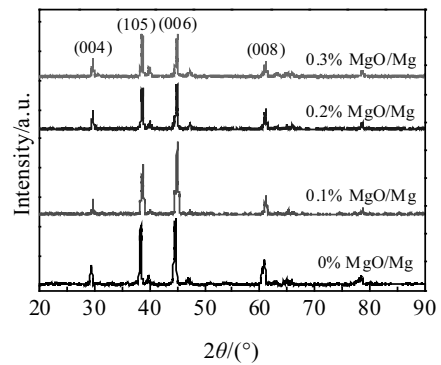


图 5 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体的 XRD 图谱

Fig.5 XRD patterns of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions

来判断烧结 Nd-Fe-B 磁体的晶体的取向度大小，该比值越大，说明它的取向度越大。当 MgO/Mg 添加量从 0% 增长到 0.1%、0.2%、0.3% 时，相应的  $A$  值分别为 1.104、1.466、1.093、0.972。因此，MgO/Mg 的适量添加可以有效提高磁体的取向度。

### 2.3 抗腐蚀性

图 6 是未添加和添加了不同 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体利用 CHI660E 电化学工作站在 3.5%NaCl 溶液中测得的极化曲线。采用 Tafel 直线外延法对添加不同 MgO/Mg 的磁体的极化曲线进行拟合，得到了腐蚀电位  $E_{corr}$  和腐蚀电流密度  $i_{corr}$ 。MgO/Mg 的添加提高了磁体的腐蚀电位，导致磁体的腐蚀电流密度降低。图 7 是不同 MgO/Mg 添加量的 Nd-Fe-B 磁体在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度。当 MgO/Mg 添加量从 0% 增长到 0.1%、0.2%、0.3% 时，相应的腐蚀电位分别为 -1.093、-1.065、-0.985、-0.929 V；相应得到腐蚀电流密度分别为 223.87、162.18、53.7、42.66  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，相应的腐蚀电位  $E_{corr}$  和腐蚀电流密度  $i_{corr}$  如表 2 所示。其中 MgO/Mg 的添加量为 0.3% 时，Nd-Fe-B 磁体的耐腐蚀性能最优，腐蚀电位相比未添加磁体提高 15%，腐蚀电流密度相比未添加磁体降低 81%。因此，MgO/Mg 的适量添加可以很大程度上提高磁体的耐腐蚀性。

图 8 是未添加和添加了不同量 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体利用 CHI660E 电化学工作站在 3.5%NaCl 溶液中测得的电化学阻抗谱图。由图可知，添加和未添加 MgO/Mg 的磁体的 Nyquist 图都是高频容抗弧，阻抗谱曲线形状相似，这表明了 MgO/Mg 的添加并不会改变 EIS 光谱的特性；并且发现添加了适量的 MgO/Mg 的磁体的高频容抗弧的半径大于未添加的磁体，在电

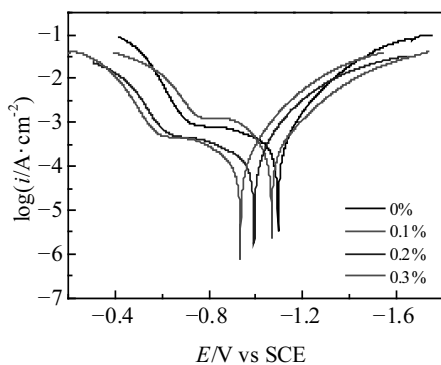


图 6 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线

Fig.6 Polarization curves of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions in 3.5%NaCl solution

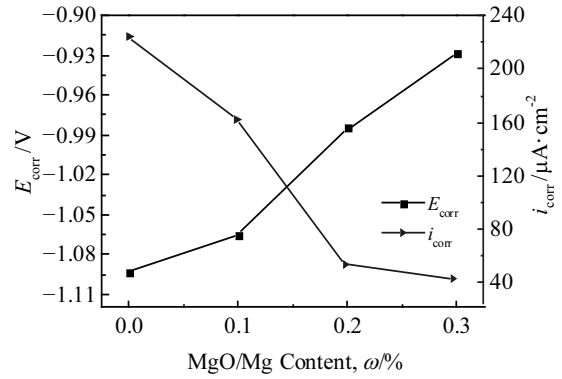


图 7 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀电压和腐蚀电流密度

Fig.7  $E_{corr}$  and  $i_{corr}$  values of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions in 3.5%NaCl solution

表 2 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体的腐蚀电位与腐蚀电流密度

Table 2 Corrosion potential and current density of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions

MgO/Mg content, $\omega/\%$	$E_{corr}/\text{V}$	$i_{corr}/\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$
0	-1.093	223.87
0.1	-1.065	162.18
0.2	-0.985	53.70
0.3	-0.929	42.66

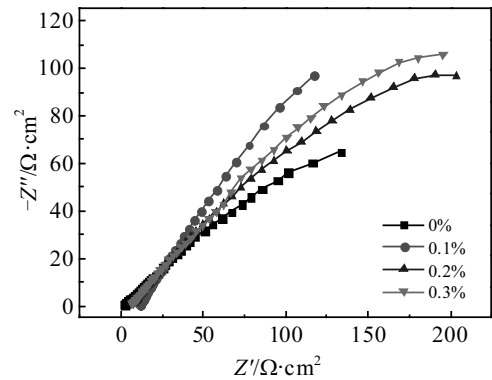


图 8 添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体在 3.5%NaCl 溶液中的阻抗谱图

Fig.8 EIS spectra of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions in 3.5%NaCl solution

化学腐蚀过程中电荷的迁移阻力增大。因此适量 MgO/Mg 的添加可以提高 Nd-Fe-B 磁体的耐腐蚀性。

图 9 是不同 MgO/Mg 添加量的 Nd-Fe-B 磁体随时间在 120 °C、0.2 MPa 和 100% 相对湿度的环境中的质量损失。从图中可以看出，随着 MgO/Mg 纳米复合粉

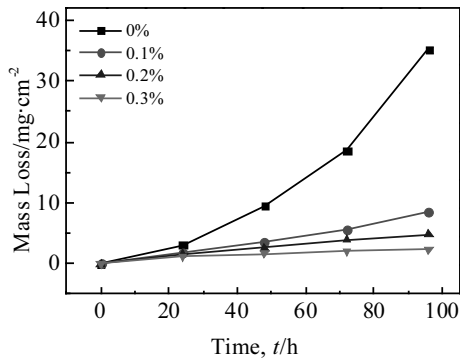


图 9 在 120℃、0.2 MPa 和 100% 相对湿度的环境中添加 MgO/Mg 的 Nd-Fe-B 磁体随时间的质量损失

Fig.9 Mass loss of Nd-Fe-B magnets with MgO/Mg additions with different time measured in 120 °C, 0.2 MPa and 100% relative humidity atmosphere

添加量的增多，烧结磁体腐蚀程度逐渐降低，质量损失变小，并且随着时间的延长，这种情况就更加明显。当磁体腐蚀 96 h 后，未添加的烧结磁体质量损失为 35.2 mg/cm<sup>2</sup>，而添加 0.3% MgO/Mg 纳米复合粉的烧结磁体质量损失仅仅为 1.8 mg/cm<sup>2</sup>，抗腐蚀性提高明显。因此，晶界添加 MgO/Mg 纳米复合粉可以提高磁体的抗腐蚀性。

晶界添加 MgO/Mg 纳米粉提高磁体的抗腐蚀性主要由于新的 Nd-O-Fe-Mg 相的形成、更高标准电极电位的 Mg<sup>2+</sup>/Mg 的添加和磁体的密度提高有关。一方面，MgO 的添加与晶界相形成的 Nd-O-Fe-Mg 相更稳定，能够抑制晶粒长大，细化晶粒，使磁体的晶间腐蚀通道变窄，有效抑制了磁体的晶间腐蚀。另一方面，Mg<sup>2+</sup>/Mg 的标准电极电位 (-2.37 V) 高于 Nd<sup>3+</sup>/Nd (-2.431 V)，提高了晶界相的电极电位。还有，低熔点的 Mg 的添加有助于磁体液相烧结，提高了磁体密度，磁体致密性较高，孔洞较少，减少了磁体与外界环境接触面的比表面积。在这 3 个因素综合作用下，添加 0.3% MgO/Mg 纳米粉的 Nd-Fe-B 磁体耐腐蚀性能最好。

### 3 结 论

1) 通过晶界添加 MgO/Mg 纳米复合粉提高了烧结 Nd-Fe-B 磁体的磁性能，其中剩磁和最大磁能积提高明显。当添加量为 0.1% 时，(PrNd)<sub>15.5</sub>B<sub>6</sub>Cu<sub>0.1</sub>Fe<sub>ba1</sub>Mg<sub>x</sub> (x=0.1~0.3, 质量分数, %) 磁体性能最佳，磁体矫顽力 1183 kA/m，剩磁 1.22 T，最大磁能积 288 kJ/m<sup>3</sup>。这归因于磁体微观结构的改变和磁体密度的增加。

2) 通过晶界添加 MgO/Mg 纳米复合粉提高了烧

结 Nd-Fe-B 磁体的抗腐蚀性。当添加量为 0.3% 时，磁体的抗腐蚀性能最佳；腐蚀电位从 -1.093 V 提高到 -0.929 V，提高了 15%；腐蚀电流密度从 223.87 μA/cm<sup>2</sup> 降低到 42.66 μA/cm<sup>2</sup>，降低 81%；磁体质量损失由 35.2 mg/cm<sup>2</sup> 降低到 1.8 mg/cm<sup>2</sup>，提升明显。这与 Mg<sup>2+</sup>/Mg 的标准电极电位更高和形成的 Nd-O-Fe-Mg 新相有关。

### 参考文献 References

[1] Gutfleisch O, Willard M A, Brück E *et al. Advanced Materials* [J], 2011, 23(7): 821

[2] Yu Lianqing(于 谦 清), Huang Cuicui(黄 翠 翠). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(3): 465

[3] Löwe K, Brombacher C, Katter M *et al. Acta Materialia*[J], 2015, 83: 248

[4] Zheng X F, Li M, Jin C X *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2017, 728: 607

[5] Yang Hengxiu(杨恒修), Mao Shoudong(冒守栋), Song Zhenlun(宋振纶). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(12): 2241

[6] Li Hongying(李红英), Hao Zhuangzhi(郝壮志), Liu Yuhui(刘宇晖) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2018, 47(5): 1451

[7] Ding G F, Guo S, Chen L *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 735: 795

[8] Zhang Y J, Ma T Y, Liu X L *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2016, 399: 159

[9] Ni Junjie(倪俊杰), Wang Yongkang(王永康), Jia Zhengfeng(贾正峰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2016, 45(8): 2111

[10] Zhang P, Liang L P, Jin J Y *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 616: 345

[11] Kim A S, Camp F E. *IEEE Transactions on Magnetics*[J], 1995, 31(6): 3620

[12] Li X B, Liu S, Cao X J *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2016, 407: 247

[13] Ni J J, Ma T Y, Cui X G *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2010, 502(2): 346

[14] Ni J J, Zhou S T, Jia Z F *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2014, 588: 558

[15] Zhou B B, Li X B, Liang X L *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2017, 429: 257

[16] Liang L P, Ma T Y, Zhang P *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2015, 384: 133

[17] Bae K H, Lee S R, Kim H J *et al. Journal of Alloys and*

- Compounds*[J], 2016, 673: 321
- [18] Cui X G, Cui C Y, Cheng X N *et al. Intermetallics*[J], 2014, 55: 118
- [19] Chen Z M, Yan A R, Wang X T *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 1996, 162(2-3): 307
- [20] Mo W J, Zhang L T, Liu Q Z *et al. Journal of Rare Earths*[J], 2008, 26(2): 268
- [21] Zhang P, Ma T Y, Liang L P *et al. Materials Chemistry and Physics*[J], 2014, 147(3): 982
- [22] Sun C, Liu W Q, Sun H *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2012, 28(10): 927
- [23] Li Z J, Wang X E, Li Ji Y *et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2017, 442: 62
- [24] Mo W J, Zhang L T, Shan A D *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2008, 461(1-2): 351
- [25] Yan A R, Chen Z M, Song X P *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 1996, 239(2): 172

## Effect of MgO/Mg Nanopowders Added to Grain Boundary on Magnetic Properties and Corrosion Resistance of Sintered Nd-Fe-B

Yang Yang, Li Zhijie, Lv Senhao, Zhuang Bowen, Zhi Pengyuan  
(Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** In order to improve the magnetic properties and corrosion resistance of sintered Nd-Fe-B magnets,  $(\text{PrNd})_{15.5}\text{B}_6\text{Cu}_{0.1}\text{Fe}_{\text{bal}}\text{Mg}_x$  ( $x=0.1\sim 0.3$ , wt%) permanent magnet was sintered by binary alloy method with adding MgO/Mg nanopowders at grain boundary. The magnetic properties, microstructures and corrosion resistance of sintered Nd-Fe-B magnets with different amounts of MgO/Mg (mass ratio 1:2) nanopowders were studied by permanent magnet automatic measuring instrument, scanning electron microscopy, X-ray diffractometer and CHI660E electrochemical workstation. The results show that when the content of MgO/Mg nanopowders is 0.1%, the comprehensive magnetic properties of the magnet are the best. At this time, the coercivity of the magnet is 1183 kA/m, the remanence is 1.22 T, and the maximum magnetic energy product is  $288 \text{ kJ/m}^3$ . The Tafel curve shows that the corrosion potential increases from  $-1.093 \text{ V}$  to  $-0.929 \text{ V}$  and the corrosion current density decreases from  $223.87 \mu\text{A/cm}^2$  to  $42.66 \mu\text{A/cm}^2$  with the increase of MgO/Mg nanopowders content. The electrochemical impedance spectroscopy shows that the radius of the high frequency capacitive arc of the magnet with an appropriate amount of MgO/Mg nanopowders is larger than that of the high frequency capacitive arc of the magnet without adding MgO/Mg, and the charge transfer resistance is increased. Therefore, the magnetic properties and corrosion resistance of sintered Nd-Fe-B magnets are improved by adding an appropriate amount of MgO/Mg nanocomposite powder at grain boundaries.

**Key words:** sintered Nd-Fe-B; MgO/Mg nanopowders; magnetic properties; microstructure; corrosion resistance

---

Corresponding author: Li Zhijie, Ph. D., Professor, School of Science, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China, Tel: 0086-24-25497102, E-mail: zjli1963@126.com