# 烧结 NdFeB 永磁体的腐蚀行为

李红英[1,2,3]，郝壮志[1,2]，刘宇晖[4]，朱望伟[4]，陈云志[4]，段俊颖[1,2]

(1. 中南大学，湖南 长沙 410083)

(2. 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室，湖南 长沙 410083)

(3. 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心，湖南 长沙 410083)

(4. 湖南稀土新能源材料有限责任公司，湖南 长沙 410126)

**摘 要**：通过静态腐蚀实验，研究了烧结钕铁硼磁体在 3.5% (质量分数) NaCl 溶液中浸泡不同时间段的腐蚀特征。采用扫描电镜、拉曼光谱分析各个阶段的腐蚀形貌和腐蚀产物组成，通过动电位极化曲线、电化学阻抗谱研究不同腐蚀阶段磁体表面结构的变化及腐蚀机理，采用等效电路模型模拟各阶段的腐蚀行为。结果表明，烧结 NdFeB 磁体在 3.5% NaCl 溶液中依次发生点蚀、选择性晶间腐蚀、全面腐蚀行为，形成的腐蚀产物层结构疏松，只能产生短时减缓腐蚀速率的效果，而富钕相优先溶解会造成主相颗粒脱落，导致磁体粉化、破坏。腐蚀产物类型随腐蚀时间延长而有所变化，主要为铁和钕的氧化物或氢氧化物。

**关键词**：钕铁硼；永磁材料；腐蚀；电化学；阻抗谱

**中图法分类号**：TG172.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1002-185X(2018)05-1451-08

NdFeB 永磁体是以金属间化合物 $Re_2Fe_{14}B$ 为基础的永磁材料[1]，具有很高的矫顽力和磁能积，并因其优异的磁性能、丰富的资源储备和相对低廉的价格，在电子信息、机械仪表、交通运输、新能源等领域得到了广泛应用[2,3]。全球 NdFeB 产业市场需求旺盛，我国作为最主要的 NdFeB 永磁材料生产国、消费国和出口国，主要采用烧结法生产钕铁硼磁体[4]。然而，烧结 NdFeB 永磁体为复杂多相结构，不同相之间腐蚀电位差异显著，耐腐蚀性很差，磁体一旦发生腐蚀，会出现粉化现象，破坏内部结构，甚至造成磁体失效，严重制约了其应用和进一步发展。

提高 NdFeB 磁体耐蚀性主要有两种途径[5,6]，一种是通过改变合金组分、添加合金化元素来增强磁体本身的耐蚀性[7]，另一种是通过表面处理将磁体与腐蚀介质隔离开。不管采用哪种防腐途径，都必须了解磁体的腐蚀行为和腐蚀机理，才能进行有效的腐蚀防护。目前，国内外科技工作者开展了温度、湿度、酸性溶液、碱性溶液等环境因素对 NdFeB 磁体腐蚀特性的研究工作[8]，但是对其长期服役过程中不同阶段具体腐蚀行为和机理的细微研究还不够深入。本实验结合生产实际，选取用于海上风力发电的 N35 型烧结 NdFeB 永磁体，对其在 3.5% NaCl 溶液中的电化学腐蚀规律和腐蚀形态进行系统深入的研究，探究其腐蚀机理，为开展有效的防腐处理及提高磁体服役寿命提供理论指导。

## 1 实 验

实验材料为湖南稀土新能源材料有限责任公司提供的烧结 NdFeB 永磁体，牌号为 N35 型，未充磁，其化学成分如表 1 所示。试样规格为 14 mm×14 mm×3 mm，在试样一端钻孔，连接导线并固定，有效面积为 1 $cm^2$，其余部分用松香封闭。

采用静态全浸泡法测试试样的耐蚀性，腐蚀液为 3.5% NaCl。依次将浸泡不同时间（0，6，12，24，48，96，192，240，360，480，600 和 720 h）的试样取出，用蒸馏水超声清洗并干燥，每组实验重复 3 次。采用 Leica DMI 3000 金相显微镜（OM）和 Philips Sirion 200 扫描电子显微镜（SEM）观察浸泡不同时间试样的表面形貌特征，并通过 Genesis 60 能谱仪（EDS）进行

**表 1 N35 型烧结 NdFeB 永磁材料的化学成分**

**Table 1 Composition of sintered NdFeB magnets (N35) ($\omega$/%)**

| Nd | Dy | Pr | B | Al | Fe |
|---|---|---|---|---|---|
| 16.70 | 0.30 | 16.50 | 1.15 | 0.30 | Bal. |

**收稿日期**：2017-05-01

**基金项目**：长沙市科技计划项目（K1502018-11）

**作者简介**：李红英，女，1963 年生，博士，教授，中南大学材料科学与工程学院，湖南 长沙 410083，电话：0731-88836328，E-mail: lhying@csu.edu.cn

成分分析。采用 LabRAM HR800 显微激光拉曼光谱仪对样品表面进行微区检测，分析腐蚀产物成分。采用德国 ZAGNER 公司的 IM6e 型电化学工作站进行电化学测试，采用典型的三电极测试体系，Pt 电极作为对电极，饱和甘汞电极（SCE）作为参比电极，测定试样在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线和交流阻抗谱。动电位极化曲线测试扫描范围为-1.0 到 0 $V_{SCE}$，扫描速率为 2 mV/s。电化学交流阻抗谱测试在开路电位下测定，频率范围为 $10^{-2}$～$10^{5}$ Hz。

## 2　结果与讨论

### 2.1　原始组织观察

图 1 为 NdFeB 试样的显微组织照片，其中图 1a 为试样经 4%硝酸乙醇侵蚀后的金相组织，图 1b 为试样的背散射（BSE）扫描照片，可以看出，磁体表面存在部分孔洞、夹杂等缺陷，主要由合金粉末烧结过程中产生。图 1a 显示试样的主相晶粒尺寸均匀，其中黑色区域为稳定性差的富钕相和富硼相，富钕相呈团絮状和条带状，富硼相呈颗粒状，主要分布在晶界和多个晶粒的交汇处。图 1b 中的灰色区域为主相区，EDS 结果显示主相为 $Nd_2Fe_{14}B$，这种铁磁性相很大程度上决定了 NdFeB 磁体的磁性能的好坏，图中离散分布的亮白色块区为富钕相偏聚区，主要分布在主相周围，可以发挥较好的去磁耦合作用，能够提高矫顽力[9]。

### 2.2　腐蚀形貌观察

图 2 为在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间试样的表面宏观形貌，其中图 2a 为未浸泡的试样，其他试样的浸泡时间分别为 6，24，96，192，360，480，600 和 720 h。如图 2a 所示，未浸泡试样的表面平整，呈银灰色。浸泡 6 h 后，如图 2b 所示，试样表面出现深灰色层，局部产生浅黄色锈斑，腐蚀开始发生。当浸泡时间延长至 24 h，如图 2c 所示，锈斑面积迅速扩展，疏松的锈层变得更密更厚，布满整个试样表面。浸泡 96 h 后，如图 2d 所示，试样表面的红色锈层逐渐剥落，出现了凹凸不平的腐蚀坑。当浸泡时间由 96 h 延长至 192，360 h 后，如图 2e, 2f 所示，试样表面的深红色腐蚀产物继续扩展、堆积直至剥落。浸泡超过 480 h 后，如图 2g, 2h, 2i 所示，试样表面裸露出灰褐色区域，并随浸泡时间延长，腐蚀程度不断加深，磁体出现粉化、破碎、颗粒脱落现象，烧杯底部观察到大量黄锈。

图 3 为在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间试样表面的扫描电镜照片，图 3a~3f 依次对应浸泡 6，24，48，360，480 和 720 h。浸泡 6 h 后，如图 3a 所示，试样表面发生了点蚀，非均匀分布的不规则胞状腐蚀产物覆盖在孔隙等缺陷处，一定程度堵塞了腐蚀液扩散的通道。浸泡 24 h 后，如图 3b 所示，试样表面呈龟裂状，具有晶界局部选择性腐蚀特征，裂纹附近密集分布着大量针状腐蚀产物，根据 EDS 检测结果，可能是 $Nd(OH)_3$、$Fe(OH)_3$ 沉积偏聚，这主要是因为晶界处富钕相化学稳定性差，发生吸氢反应后生成的腐蚀产物会引起晶界相体积膨胀而导致晶界破坏[10]。浸泡 48 h 后，如图 3c 所示，腐蚀产物形貌由针状变为片层状，分布在试样表面，这是因为晶界富钕相腐蚀破坏了主相晶粒之间的结合，腐蚀范围由晶界扩展至试样表面。浸泡 360 h 后，如图 3d 所示，片状腐蚀产物累积并沿不同方向堆叠生长，基本覆盖了整个试样表面。浸泡 480 h 后，如图 3e 所示，在试样表面可以观察到明显的裂纹和很多深度不一的腐蚀坑，腐蚀产物层溶解于腐蚀液中，主相晶粒脱落，使得表面凹凸不平。浸泡 720 h 后，如图 3f 所示，试样表面残留有部分未脱落的腐蚀产物碎屑，腐蚀延伸到试样内部，开始了更深层次的腐蚀。

### 2.3　腐蚀产物分析

为了测定不同腐蚀时期的腐蚀产物组成，对静态浸泡实验中不同腐蚀阶段的试样进行了拉曼光谱测试，结果如图 4 所示，分别对应腐蚀初期（24 h）、腐蚀中期（48 h）、腐蚀后期（360 h）的拉曼光谱。

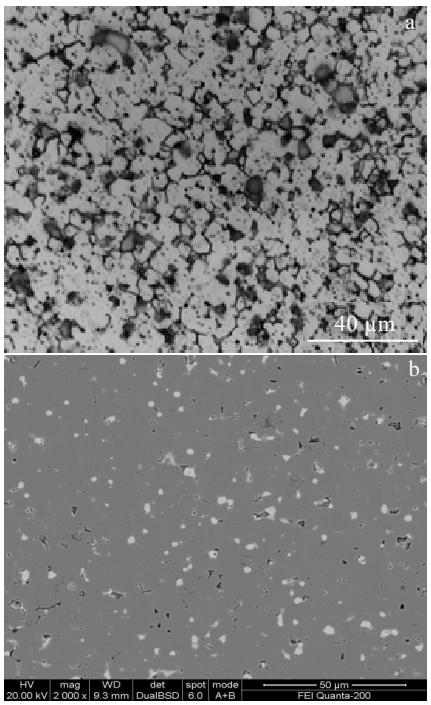



图 1　NdFeB 试样的显微组织

Fig.1　Microstructure of NdFeB magnets: (a) OM image and (b) SEM image

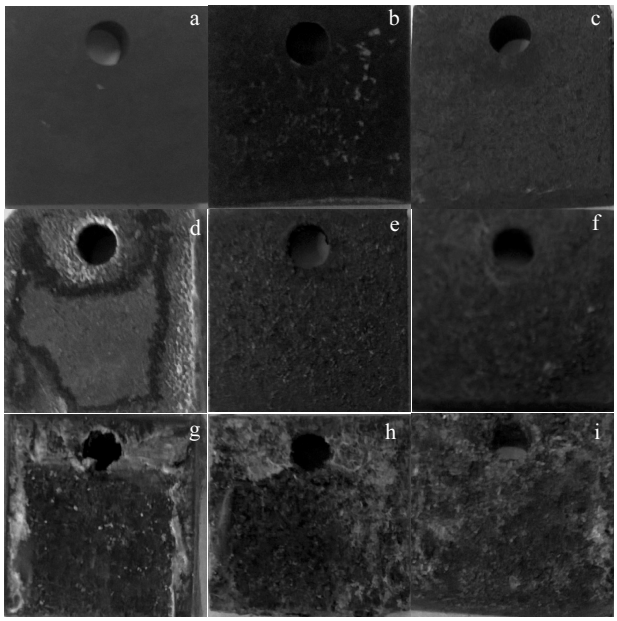



图 2　NdFeB 试样浸泡不同时间的宏观照片

Fig.2　Surface morphologies of samples for different immersion time: (a) 0 h, (b) 6 h, (c) 24 h, (d) 96 h, (e) 192 h, (f) 360 h, (g) 480 h, (h) 600 h, and (i) 720 h

腐蚀初期的结果如图 4a 所示，其中波数为 221 的 $\alpha$-$Fe_2O_3$ 拉曼散射波峰强度大，说明腐蚀介质通过微孔洞渗入磁体内部并诱发点蚀，部分主相 $Nd_2Fe_{14}B$ 发生分解，生成铁氧化物。波数为 275 和 365 的 $NdCl_3$ 拉曼峰也比较明显，表明 $Cl^-$有很强的吸附能力，优先与晶界处富 Nd 相作用。检测结果还发现有 470 的峰值，对应于标准波峰 476 的 $B_2O_3$，源于富硼相的氧化或者主相的分解。1309 的弱峰值与 $\gamma$-FeOOH 的标准拉曼位移 1307 接近，说明还存在极少量 $\gamma$-FeOOH，这与文献报道的研究结果一致[11]，此阶段主要发生了下述反应[11,12]：

$$Nd\text{-}3e+3Cl^-\rightarrow NdCl_3 \quad (1)$$

$$4Fe+3O_2\rightarrow 2Fe_2O_3 \quad (2)$$

$$B+3H_2O\text{-}3e\rightarrow H_3BO_3+3H^+ \quad (3)$$

腐蚀中期的结果如图 4b 所示，除了 $\alpha$-$Fe_2O_3$、$NdCl_3$、$\gamma$-FeOOH 和拉曼位移 687 的 $B_2O_3$，还有波数为 568 的 $Nd(OH)_3$，表明富 Nd 相作为阳极不断溶解，而以主相为主的阴极区发生析氢反应，此阶段主要发生了下述反应[11,12]：

$$2H_2O+2e\rightarrow H_2+2OH^- \quad (4)$$

$$Nd+2/3H_2\rightarrow NdH_3 \quad (5)$$

$$NdH_3+3H_2O\rightarrow Nd(OH)_3+3H_2 \quad (6)$$

腐蚀后期的结果如图 4c 所示，图中出现了波数为 267 的 $\gamma$-$Fe_2O_3$，此时的腐蚀产物主要为 $\alpha$-$Fe_2O_3$ 和 $\gamma$-$Fe_2O_3$，试样已发生全面腐蚀，而 601 的波峰接近 $Nd(OH)_3$ 的标准峰值（604），但强度很弱，表明有少量的 $Nd(OH)_3$ 粘附在试样表面，波数 507 的峰值较弱，表明存在少量的 $B_2O_3$，这主要来自主相的分解，此阶段主相腐蚀占主导地位，主要发生了以下反应[11,12]：

$$Nd_2Fe_{14}B+3O_2\rightarrow 13\alpha\text{-}Fe+Nd_2O_3+FeBO_3 \quad (7)$$

$$4\alpha\text{-}Fe+3O_2\rightarrow 2\alpha\text{-}Fe_2O_3 \quad (8)$$

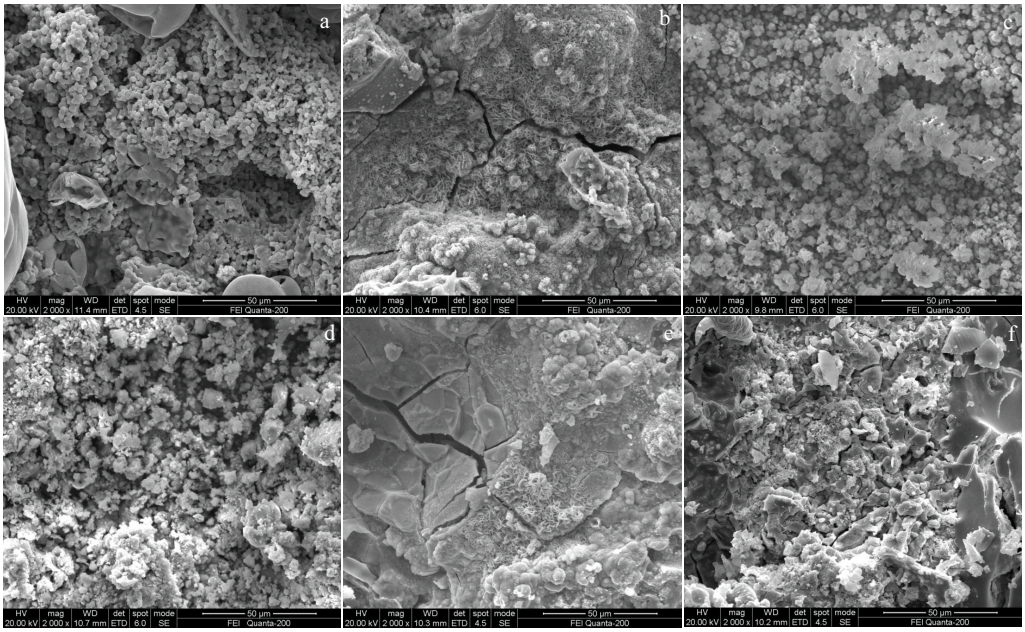



图 3　NdFeB 试样浸泡不同时间后的表面微观腐蚀形貌

Fig.3　SE-SEM images of samples for different immersion time: (a) 6 h, (b) 24 h, (c) 48 h, (d) 360 h, (e) 480 h, and (f) 720 h

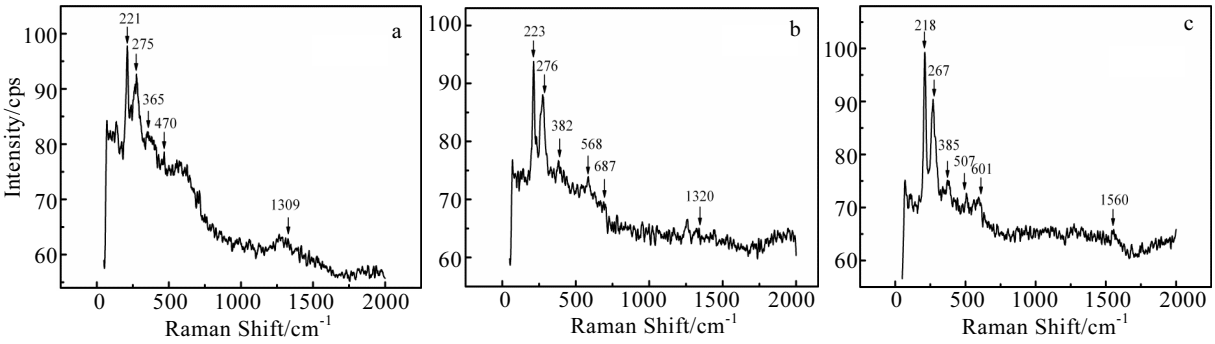



图 4　NdFeB 试样不同腐蚀时期的拉曼光谱测试结果

Fig.4　Raman spectra of samples for different immersion periods: (a) 24 h, (b) 48 h, and (c) 360 h

## 2.4　电化学测试分析

选取静态浸泡实验中不同腐蚀阶段的试样，测定其在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线，结果如图 5 所示。试样在不同腐蚀时期的极化特征非常相似，阴极极化曲线比较平缓，对应析氢反应等，而阳极极化曲线相对较陡，对应富稀土相阳极活性溶解反应[13]。

对极化曲线进行拟合，由塔菲尔外推法[14]求得腐蚀电位（$E_{corr}$）和腐蚀电流密度（$i_{corr}$），主要电化学参数列于表 2。根据金属腐蚀的混合电位理论，在阴极过程相似的情况下，腐蚀电位越负，材料的腐蚀倾向越大，越容易发生腐蚀，而腐蚀电流密度越大，材料的腐蚀速率越大[15]。未浸泡试样在 NaCl 溶液中的起始自腐蚀电位为-709.7 mV（vs. SCE），自腐蚀电流密度仅为 $7.87\times10^{-6}$ A/cm$^2$，尚处于腐蚀诱发期。浸泡 48 h 后，试样的 $i_{corr}$ 增大了 2 个数量级，这是因为富钕相发生活性溶解，腐蚀全面发生。浸泡时间增至 360 h 后，腐蚀电位正移 62.2 mV，自腐蚀电流密度下降了 $5.6\times10^{-5}$ A/cm$^2$，这是因为附着在试样表面的腐蚀产物层，能够增大腐蚀液渗入的阻力，降低腐蚀速率。

图 6 为在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间试样的交流阻抗谱。由图 6a 可以看出，浸泡 6 h 试样的阻抗模值比未浸泡试样提高了 3 个数量级，而浸泡 12 h 试样的阻抗模值约为浸泡 6 h 试样的 2 倍。这是因为试样表面存在烧结气孔等缺陷，腐蚀液容易渗入试样内部，而多相结构的试样极易发生腐蚀，晶界处富钕相能够与主相形成“大阴极小阳极”的原电池而加速腐蚀，但是生成的 $Nd_2O_3$、$Nd(OH)_3$ 能够堵塞微孔等缺陷，提高试样的腐蚀抗力。由图 6b 可知，未浸泡试样存在两个时间常数，对应 Nyquist 图中的两个容抗弧，说明试样先后经历了两个表面过程，高频区对应的是腐蚀介质优先穿过孔洞和缝隙，表面疏松氧化层首先发生腐蚀，低频区与富钕相的活化反应密切相关，低

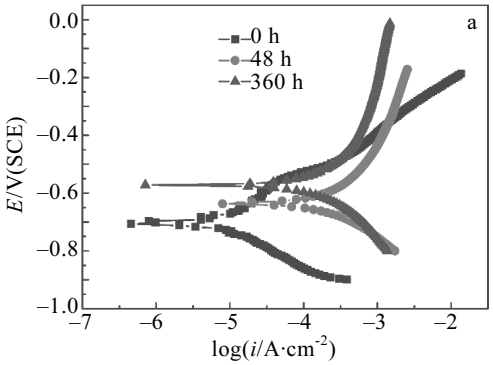



图 5　试样在不同腐蚀阶段的动电位极化曲线

Fig.5　Polarization curves of samples for different immersion periods in 3.5% NaCl solution

表 2　NdFeB 试样不同腐蚀阶段的主要电化学参数

**Table 2　Electrochemical parameters calculated from the potentiodynamic polarization curves**

| Testing time/h | Corrosion potential, $E_{corr}$/mV | Corrosion current density, $i_{corr}/\times10^{-6}$ A·cm$^{-2}$ |
|---|---|---|
| 0 | -709.7 | 7.87 |
| 48 | -628.9 | 188 |
| 360 | -566.7 | 132 |

频端散点是剧烈的析氢反应造成的[6]。浸泡6和12 h 后，高频区容抗弧变得极不明显，低频容抗弧不断扩张，近似为倾斜45°的直线，呈现典型的 Warburg 阻抗特征，相位角变化也异于理想纯电容特性，表明液相传质占主导地位，溶解氧和氯离子渗透疏松多孔的外表面层。

从图 6c, 6d 可以看出，浸泡 48 h 试样低频区出现明显的容抗弧，而且容抗弧直径远小于浸泡 24 h 试样容抗弧，阻抗模值减小了 2~3 个数量级，相位角减小且峰宽变窄，这是因为前期疏松的腐蚀产物层发生脱

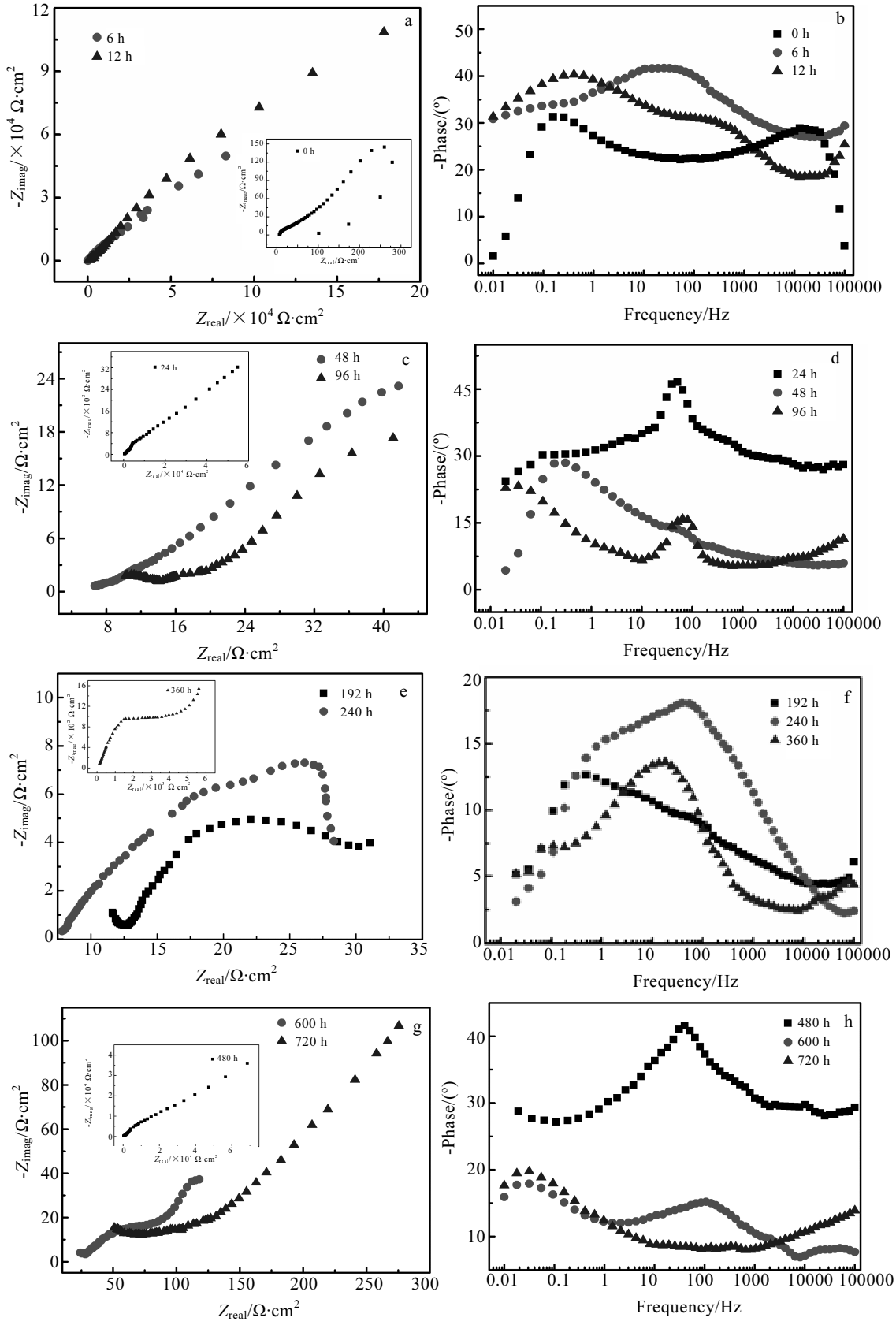



图 6　NdFeB 试样浸泡不同时间的交流阻抗谱

Fig.6　EIS spectra of specimens after immersion for different time in 3.5% NaCl solution: (a, c, e, g) Nyquist map; (b, d, f, h) Bode map

落，腐蚀液已完全进入磁体内部，主相 $Nd_2Fe_{14}B$ 发生腐蚀溶解。结合图 6e, 6f 可以看出，浸泡 192~360 h 试样阻抗模值始终保持在很小的量级，其中浸泡 192 h 后试样 Nyquist 图低频区呈明显扩散控制特征，Bode 图相位角峰值降低，表明试样抗腐蚀性能进一步恶化。试样浸泡 360 h 阻抗骤然增大，这是由于表面多数区域被新形成的腐蚀产物层覆盖，抑制了试样与腐蚀液的进一步反应。

从图6g, 6h 可以看出，浸泡480 h 试样的阻抗模值增至$8.0\times10^4$ Ω·cm$^2$，腐蚀产物对耐蚀性的提高起主要作用。随着浸泡时间进一步延长，腐蚀产物层逐渐松软、剥落，容抗弧迅速减小，浸泡600 h 试样 Bode 图重新出现3个时间常数，这是由于腐蚀中期沉积的腐蚀产物脱落，裸露出新的界面，腐蚀深度增加，腐蚀进入新的周期。

采用 Zview 软件对浸泡不同时间试样的交流阻抗谱进行拟合，得到的等效电路如图 7 所示，其中图 7a 为浸泡 0 h 试样的等效电路，图 7b 为浸泡 6~96 h 试样的等效电路，图 7c 为浸泡 192~720 h 试样的等效电路。图中等效元件 $R_s$ 为工作电极和参比电极之间的溶液电阻，$R_t$ 为双电层结构中的电荷转移电阻，$R_{t1}$ 为覆盖在表面的腐蚀产物（氢氧化物和金属氧化物等）对腐蚀介质产生的阻隔电阻，$CPE_1$ 是其对应的电容，$CPE$ 为试样表面非理想的金属/溶液双电层电容，$W$ 是在腐蚀初期溶液传质的扩散电阻（即 Warburg 阻抗），$L$ 为电感元件，$R_L$ 为电感元件自身的电阻[16]。图 8 为实测阻抗谱与部分拟合结果的对比，可以看出所采用的等效电路模型能够较好模拟各阶段的腐蚀行为。

由于试样腐蚀产物疏松多孔，与基体结合力薄弱，腐蚀速率基本取决于电荷穿越双电层的阻抗$R_t$的大小，电荷转移电阻 $R_t$ 与该体系的腐蚀速率成反比[16]。而溶液电阻 $R_s$ 远小于孔电阻 $R_{po}$ 和电荷转移电阻 $R_t$，所以在计算腐蚀电阻 $R_{corr}$ 时通常忽略溶液电阻 $R_s$，基于 G. J. Brug 等提出的方法[15,16]，直接根据孔电阻 $R_{po}$ 和电荷转移电阻 $R_t$ 确定腐蚀电阻 $R_{corr}$，结果如图9所示。从图9可以看出，试样浸泡初期的 $R_{corr}$ 值保持在$10^4$ Ω·cm$^2$以

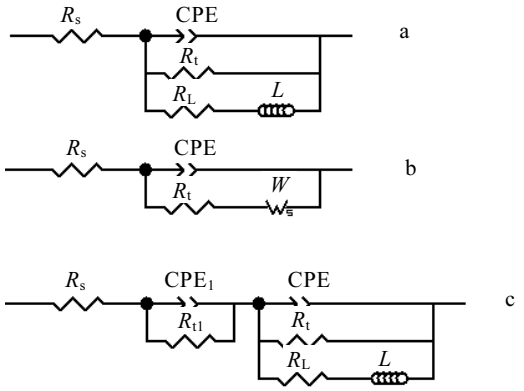



图 7　NdFeB 试样不同腐蚀阶段的等效电路图

Fig.7　Equivalent electrical circuits for samples at different immersion stages: (a) 0 h, (b) 6~96 h, and (c) 192~720 h

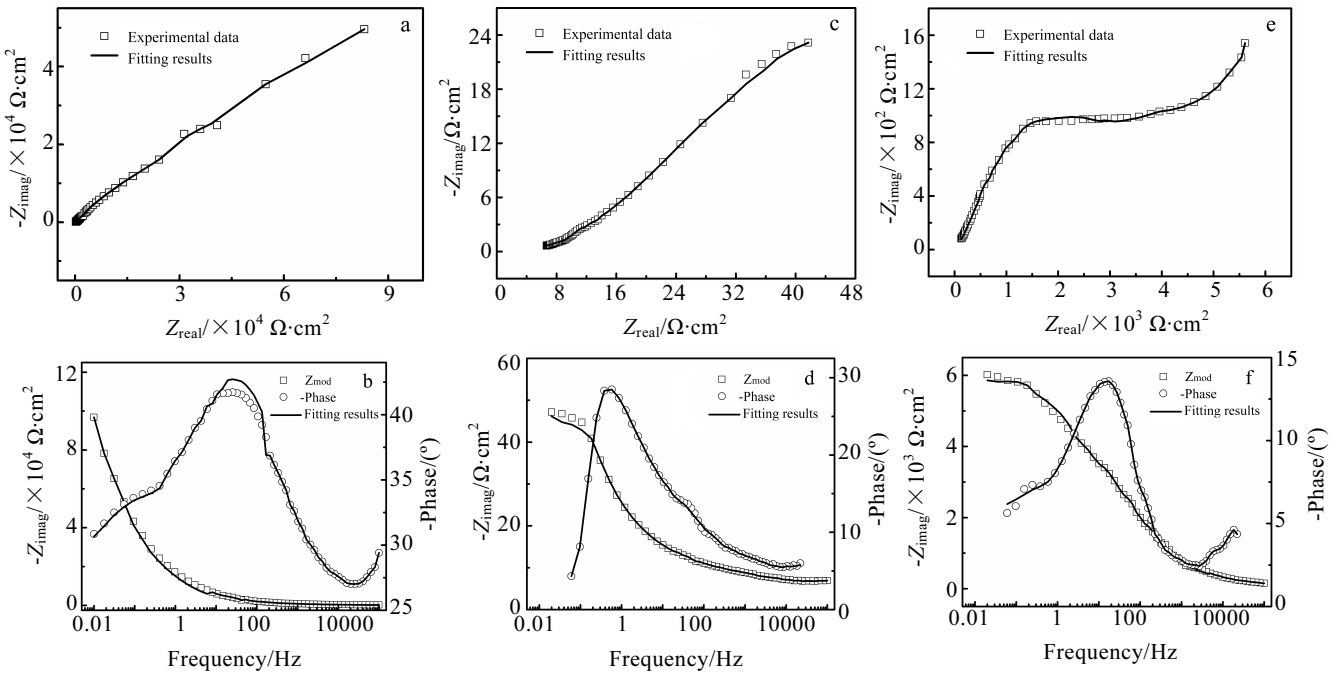



图 8　NdFeB 试样不同腐蚀阶段的拟合结果与实测阻抗谱

Fig.8　Contrast between EIS plots and the fitting curves for samples for different immersion periods (a, b) 6 h, (c, d) 48 h, and (e, f) 360 h

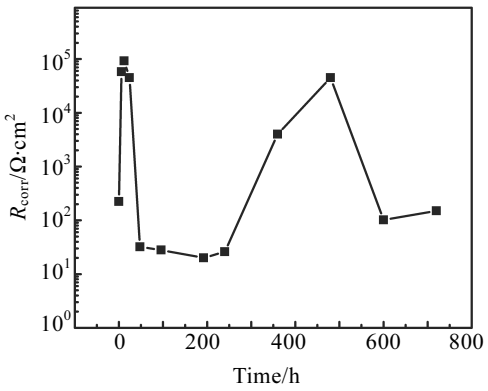



图 9　NdFeB 试样不同腐蚀时间的腐蚀电阻 $R_{corr}$

Fig.9　Fitting values of $R_{corr}$ for samples as a function of immersion time

上，浸泡 48 h 后试样发生全面腐蚀，电阻骤降两个数量级，浸泡 360 h 后阻值又再次回升，达到 $10^3\ \Omega\cdot cm^2$，这主要是腐蚀产物膜的贡献。浸泡 480 h 后试样腐蚀电阻又重新回到 $10^4\ \Omega\cdot cm^2$，表明新一轮的腐蚀已经开始，这一变化规律也与前面的实验分析结果基本一致。

## 3　结　论

1) 烧结 NdFeB 磁体的微观组织主要由晶粒边界平直呈多边形的主相 $Nd_2Fe_{14}B$、薄层状或颗粒状的晶界富钕相和富硼相组成，磁体表面有少量微孔洞和微裂纹存在。

2) 烧结 NdFeB 磁体在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀产物为铁和钕的氧化物或氢氧化物，主要为 $Nd_2O_3$、$Fe_2O_3$ 、$NdCl_3$、$B_2O_3$ 和 $Nd(OH)_3$ 等。

3) 烧结 NdFeB 磁体在 3.5% NaCl 溶液中依次发生点蚀、选择性晶间腐蚀、全面腐蚀行为，形成的腐蚀产物层结构疏松，只能产生短时减缓腐蚀速率的效果，而富钕相优先溶解会造成主相颗粒脱落，导致磁体粉化、破坏。

**参考文献　References**

[1] Liu Xiaoya(刘晓亚), Li Yuping(李玉平), Hu Lianxi(胡连喜). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(10): 1875

[2] 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

[3] Zheng Jingwu(郑精武), Du Zhouyun(都周云), Jiang Meiyan(蒋梅燕) *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(8): 1369

[4] Zhou Shouzeng(周寿增). *Rare Earth Permanent Magnet Materials and Application*(稀土永磁材料及其应用)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1990: 86

[5] Gurappa I. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2003, 360 : 236

[6] Sueptitz R, Tschulik K, Uhlemann M *et al*. *Corrosion Science* [J], 2011, 53(9): 2843

[7] EI-Aziz A M. *J Materials and Corrosion*[J], 2003, 54(2): 88

[8] Davies B E, Mottram R S, Harris I R. *Materials Chemistry and Physics*[J], 2007, 67(1-3): 272

[9] Yu L Q, Wen Y H, Yan M. *Journal of Magnetic and Magnetic Materials*[J], 2004, 283(2-3): 353

[10] Jiang Liqiang(姜力强), Zheng Jingwu(郑精武). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2006, 35(3): 340

[11] Liu Yanchun(刘艳春), Yang Xianchun(杨先春). *Chinese Journal of Light Scattering*(光散射学报)[J], 1993, 5(2): 145

[12] Ni Junjie, Zhang Wenwang *et al*. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*[J], 2014, 367: 60

[13] Xu Jilin, Huang Zhengxian, Luo Junming *et al*. *Rare Metal Materials and Engineering* [J], 2015, 44 (4): 786

[14] EI-Aziz A M, Kirclner A, Gutneisch O *et al*. *J Alloy Compd*[J], 2000, 311(2): 299

[15] Cao Chunan(曹楚南), Zhang Jianqing(张鉴清). *Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy*(电化学阻抗谱导论)[M]. Beijing: Science Press, 2002: 46

[16] EI-Monim A A. *Corrosion Science*[J], 2004, 46(10): 2517

# Corrosion Behavior of Sintered Nd-Fe-B Magnets

Li Hongying[1,2,3], Hao Zhuangzhi[1,2], Liu Yuhui[4], Zhu Wangwei[4], Chen Yunzhi[4], Duan Junying[1,2]

(1. Central South University, Changsha 410083, China)

(2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Changsha 410083, China)

(3. Nonferrous Metal Oriented Advanced Structural Materials and Manufacturing Cooperative Innovation Center, Changsha 410083, China)

(4. Hunan Rare Earth New Energy Materials Co., Ltd, Changsha 410126, China)

**Abstract:** The corrosion behavior of sintered Nd-Fe-B magnets in 3.5 wt% NaCl solution for different time was studied by an immersion test. The morphology and composition of corrosion products were characterized by scanning electron microscope (SEM) and Raman spectroscopy. The microstructure and corrosion behavior of specimens at different stages were investigated by electrochemical impedance spectroscopy (EIS) and potentiodynamic polarization. The electrochemical equivalent circuits were used to fit the EIS data. Results show that pitting corrosion, optional intergranular corrosion and total corrosion occur successively during the immersion process. However, the corrosion product layer is a loose structure that can only temporarily slow down the corrosion rate. The Nd-rich phase at the grain boundary preferentially dissolves in the medium so that the main phase particles are exposed to the corrosive solution and quickly corroded, thereby causing damage to the magnets. The corrosion products are mainly iron and neodymium oxides or hydroxides, the type of which varies with the immersion time.

**Key words:** NdFeB; permanent magnet material; corrosion; electrochemistry; EIS

---

Corresponding author: Li Hongying, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, P. R. China, Tel: 0086-731-88836328, E-mail: lhying@csu.edu.cn