

Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的抗盐酸腐蚀性能

吴 靓, 董虹星, 贺跃辉

(中南大学 粉末冶金国家重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 以 Ni、Al 元素混合粉末为原料, 用偏扩散-反应合成-烧结的粉末冶金法制备 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料, 在室温 20 °C 下 pH 为 2 和 3 时以及 90 °C 下 pH=2 时研究 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料在盐酸溶液中的腐蚀动力学曲线、孔结构稳定性和表面形貌变化以及 Tafel 曲线, 并与 Ni 金属多孔材料进行比较。结果表明: Ni₃Al 金属间化合物多孔材料在盐酸中的质量损失率显著地低于 Ni 多孔材料的, 且 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的孔结构在腐蚀介质中长期稳定, 并显示出优异的抗盐酸腐蚀能力。

关键词: Ni₃Al 金属间化合物; 多孔材料; 抗腐蚀性

中图分类号: TG 125.24

文献标志码: A

Corrosion resistance of porous Ni₃Al intermetallics in hydrochloric acid solution

WU Liang, DONG Hong-xing, HE Yue-hui

(State Key Laboratory of Powder Metallurgy, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The porous Ni₃Al intermetallics was fabricated using mixed Ni and Al powders as materials by P/M technique of diffusing and reaction composing and sintering. The corrosion resistance of porous Ni₃Al intermetallics in HCl solution (pH=2 and 3 at room temperature (20 °C), pH=2 at 90 °C) was studied by corrosion kinetic curves, change of pore structure, surface morphology and Tafel polarization curves. The corrosion resistance of porous Ni₃Al intermetallics was compared with that of porous Ni. The results show that the mass loss of porous Ni₃Al intermetallics is much lower than that of porous Ni, and the Ni₃Al porous configuration is stable in acid environment. The corrosion resistance of porous Ni₃Al materials is very high.

Key words: Ni₃Al intermetallics; porous material; corrosion resistance

Ni-Al 金属间化合物在高温条件下依然能够保持 Ni 和 Al 之间的强键合作用, 与超合金及陶瓷相比, 具有熔点高、密度低、强度高以及抗腐蚀和氧化性能优异等特点^[1-4]。Ni₃Al 金属间化合物致密体材料在高温结构件及涂层等应用领域得到广泛关注^[5-8]。至今, Ni₃Al 基合金主要用于制作炉辊、锻模及化学工业中的耐腐蚀件等。按照预期用作于未来航空航天发动机轻质高温结构材料, Ni₃Al 在应用中的主要问题是其室温塑性。研究发现, 添加少量的硼元素可以显著提高它的室温塑性, 但未能彻底解决其本质脆性问题。

多孔材料具有优良的渗透性, 主要用于过滤与分离^[10]。多孔材料的孔道对相对较大尺度的固体颗粒有阻碍作用, 从而能从液体中过滤分离出固体颗粒或悬浮物。在湿法冶金行业, 如对金属氧化钨进行酸浸出, 进行金属的提取^[11], 这时可以采用多孔材料过滤除去杂质相。当前通常采用的过滤多孔布, 虽然在一定程度上解决工业上的过滤问题, 但由于孔隙大、过滤精度低、材质为柔性, 反冲效果差, 且耐腐蚀性的滤布材料的价格昂贵^[12]。为此, 期望以一种理想的多孔材料进行替代。

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年基金资助项目(50285102); 国家重大基础研究发展计划资助项目(2009CB623406); 国家自然科学基金资助项目(20636020, 50721003)

收稿日期: 2009-10-15; 修订日期: 2010-03-11

通信作者: 贺跃辉, 教授, 博士; 0731-88836144; E-mail: yuehui@mail.csu.edu.cn

金属间化合物具有优异的物理和化学性质,研究者^[13-15]基于 Al 系金属间化合物的原料元素混合粉之间显著的偏扩散效应,提出金属间化合物多孔材料。且在制备过程中实现了孔结构的精确控制^[16-17]和制件的净近成型。

由于多孔材料的比表面积大,表面曲率半径小,所以,多孔材料的腐蚀行为较同样成分的块体材料可能呈现不同特性,孔的形貌、孔隙度、孔隙大小及孔的表面特征都会影响腐蚀过程。因为多孔材料的腐蚀不仅发生在材料的外表面,内部孔隙的表面也会有腐蚀行为的发生^[18]。基于 Ni₃Al 金属间化合物块体致密材料较优异的耐酸腐蚀性能,针对 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料这种新型材料,研究其在酸性环境中的抗腐蚀性能,以拓展 Ni₃Al 金属间化合物的应用领域。

1 实验

1.1 试验样品

采用 Ni 和 Al 元素混合粉,通过偏扩散-反应合成-烧结的粉末冶金方法,制备 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料,Al 的质量分数为 14%。并采用同样尺寸的 Ni 金属多孔材料与其进行比较。研究用试样采用多孔圆片状试样($d=26\text{ mm}$, $\delta=2\text{ mm}$)。材料制备工艺如表 1 所列^[19]。

表 1 多孔材料的主要制备参数

Table 1 Main preparation parameters of porous materials

| Material | Powder granularity | Pressing pressure/MPa | Sintering temperature/°C |
|---------------------------|--|-----------------------|--------------------------|
| Porous Ni ₃ Al | $d_{\text{Ni}} < 38\ \mu\text{m}$ $d_{\text{Al}} < 38\ \mu\text{m}$ | 200 | 1 000 |
| Porous Ni | $d_{\text{Ni}} < 38\ \mu\text{m}$ | 200 | 900 |

采用 BTP- 型多孔材料性能检测仪测定样品的最大孔径和透气度。用气体泡压法测定样品的最大孔径^[20],采用气体透过法测量多孔样品的透气度。几种多孔材料的孔结构参数如表 2 所列。

采用同样方法制备 $d=10\text{ mm}$, $\delta=1.5\text{ mm}$ 的 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料,工作电极的工作面积为 0.785 cm^2 ,非工作面采用 704 胶封装。电化学试验中用同样尺寸的块体 Ni₃Al 作对比。试验前在酒精介质中用超声波清洗 30 min,取出后经去离子水

表 2 多孔材料的孔结构参数

Table 2 Main porosity parameters of porous materials

| Material | Maximum pore size/ μm | Permeability/ $(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kPa}^{-1})$ | Open porosity/% |
|---------------------------|----------------------------------|--|-----------------|
| Porous Ni ₃ Al | 8~11 | 18~22 | 30 |
| Porous Ni | 3~4 | 11~15 | 19 |

冲洗,冷风吹干。

1.2 浸泡试验

采用分析纯的盐酸和去离子水分别配制 pH=2 和 pH=3 的盐酸溶液各 2 组,将 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料和 Ni 多孔材料圆片试样经洗涤、干燥、称取质量后分别在室温 20 下浸泡在配制的盐酸溶液中,进行总时间为 125 h 的循环腐蚀试验。其中,前 5 次每 5 h 为一个周期,之后以 25 h 为一个周期。每次循环后更换腐蚀液,采用去离子水和酒精将样品经过 10 min 超声波洗涤后,在 90 真空干燥箱中干燥 30 min,称取质量并检测孔结构,包括最大孔径、孔隙率、透气度等。将 pH=2 的盐酸溶液放在 90 水浴箱中,重复以上试验。获得试验样品的腐蚀动力学曲线,以及透气度的变化率曲线。用扫描电镜(SEM, JSM-6360LV 型)观测腐蚀后的样品形貌变化及孔结构变化。将 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料、Ni 多孔材料试样在室温下 pH=2 的盐酸中连续浸泡 125h 后,腐蚀溶液的化学成分运用诱导耦合等离子发射光谱仪(ICP PE, OP IMA 2000,USA)分析。

1.3 电化学试验

Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的电化学性能采用 CHI660C 型电化学工作站进行测试,测试过程中采用常用的三电极体系,其中,研究电极为 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料和 Ni 多孔材料,参比电极为饱和甘汞电极,辅助电极为大片铂电极。以室温下 pH=2、pH=3 及 90 水浴下 pH=2 的盐酸溶液为电解液。在扫描 Tafel 曲线之前,工作电极在电解液中浸泡 1 h,以保证充分浸润。Tafel 曲线的扫描速度为 10 mV/s ,用 Tafel 曲线表征材料的腐蚀电位和腐蚀电流。

2 结果与讨论

2.1 腐蚀动力学曲线

图 1 所示分别为 20 下 pH=2 和 pH=3 以及 90 水浴下 pH=2 的盐酸中 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料

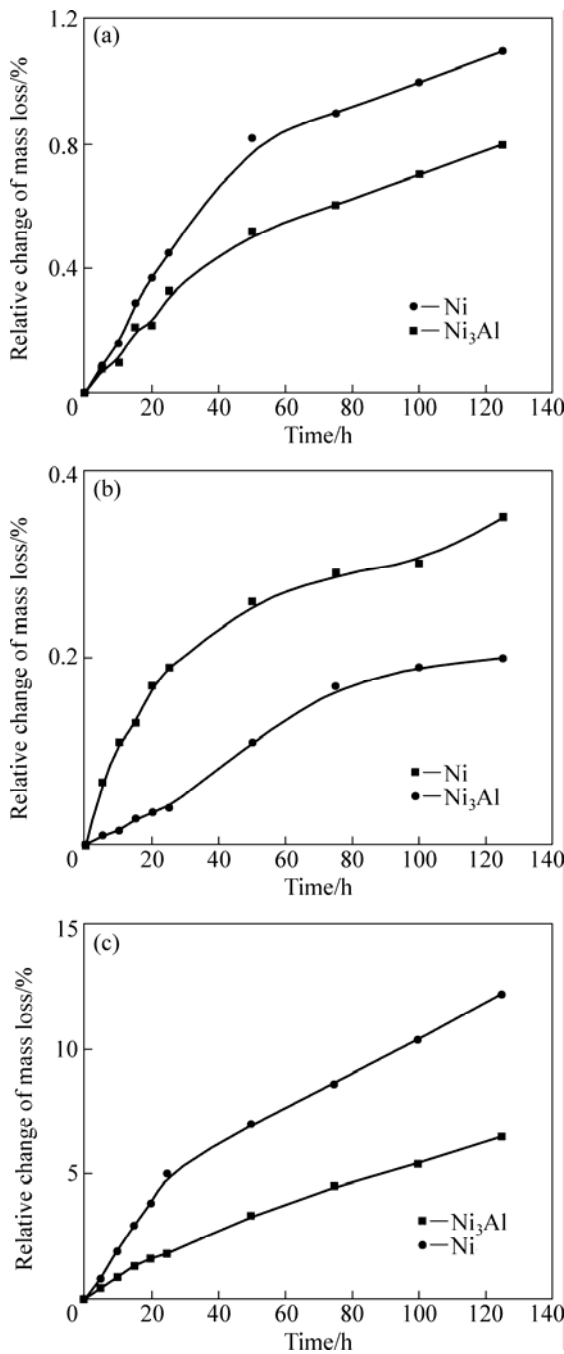


图1 Ni₃Al金属间化合物多孔材料及Ni多孔材料在盐酸中的腐蚀动力学曲线

Fig.1 Corrosion kinetic curves of porous Ni₃Al intermetallics and Ni in HCl solution: (a) pH=2, 20 °C; (b) pH=3, 20 °C; (c) pH=2, 90 °C

及Ni多孔材料的腐蚀动力学曲线。表3所列为对应的腐蚀动力学方程。由图1(a)中可以看出Ni₃Al金属间化合物多孔材料及Ni多孔材料的腐蚀质量损失呈抛物线规律,比较可以看出,Ni₃Al金属间化合物多孔材料的质量损失显著低于Ni多孔材料的。125 h后,

Ni₃Al金属间化合物多孔材料的总质量损失率为0.8%,仅为Ni多孔材料的69%。两种材料的腐蚀动力学曲线都很好的符合抛物线规律,且Ni₃Al金属间化合物的判定系数较大,回归程度更好。在研究的条件下,Ni₃Al金属间化合物的腐蚀速率常数均比Ni多孔材料的小,即表现出较好的耐腐蚀性能。由图1(b)可以看出,与pH=2时相比,当溶液的酸度降低,pH=3时两种多孔体的腐蚀质量损失都有所降低,但其变化规律及相对变化行为基本相似。经过总时间为125 h的循环腐蚀之后,Ni₃Al金属间化合物多孔材料的质量损失率为0.2%,是Ni多孔材料的57%,为相同腐蚀时间下pH=2时Ni₃Al金属间化合物多孔材料腐蚀质量损失的20%。由此可见,在pH=3时,Ni₃Al金属间化合物多孔材料具有较好的抗腐蚀性能,其腐蚀程度大幅度减轻。由图1(c)看出,与室温下相比,90 °C水浴下两种多孔体的腐蚀质量损失有明显提高,变化规律及相对变化行为基本相似,即溶液温度对材料的腐蚀行为有很大影响。经过总时间为125 h的循环腐蚀之后,Ni₃Al金属间化合物多孔材料的质量损失率为6.5%,比相同腐蚀时间下室温时Ni₃Al金属间化合物多孔材料腐蚀质量损失率(0.8%)大得多。在水浴条件下,Ni₃Al金属间化合物多孔材料的质量损失率仅为Ni金属多孔材料的42%,显示出在高温腐蚀下更加明显的优势。

表3 Ni₃Al金属间化合物多孔材料及Ni多孔材料在盐酸中的腐蚀动力学方程

Table 3 Corrosion kinetic equations of porous Ni₃Al intermetallics and Ni in HCl solution

| Condition | Material | Corrosion kinetic equation | Determinant coefficient |
|-----------|--------------------|--|-------------------------|
| pH=2, 20 | Ni ₃ Al | $\Delta m/m = 0.01988 + 0.01156t - 4.42317 \times 10^{-5}t^2$ | 0.98814 |
| | Ni | $\Delta m/m = 0.01069 + 0.01887t - 8.40371 \times 10^{-5}t^2$ | 0.98912 |
| pH=3, 20 | Ni ₃ Al | $\Delta m/m = -0.01133 + 0.00293t - 9.48735 \times 10^{-6}t^2$ | 0.98615 |
| | Ni | $\Delta m/m = 0.0442 + 0.00552t - 2.63053 \times 10^{-5}t^2$ | 0.94970 |
| pH=2, 90 | Ni ₃ Al | $\Delta m/m = 0.14793 + 0.07089t - 1.67273 \times 10^{-4}t^2$ | 0.99796 |
| | Ni | $\Delta m/m = 0.46722 + 0.15605t - 5.2622 \times 10^{-4}t^2$ | 0.98480 |

2.2 孔结构参数演变

图 2 所示为 20 和 90 下 pH 为 2 和 3 时盐酸溶液中 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料的透气度变化率。由图 2(a)中可以看出,随着时间的延长, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的透气度比较稳定,而 Ni 多孔材料的透气度明显减小。这是由于 Ni 多孔

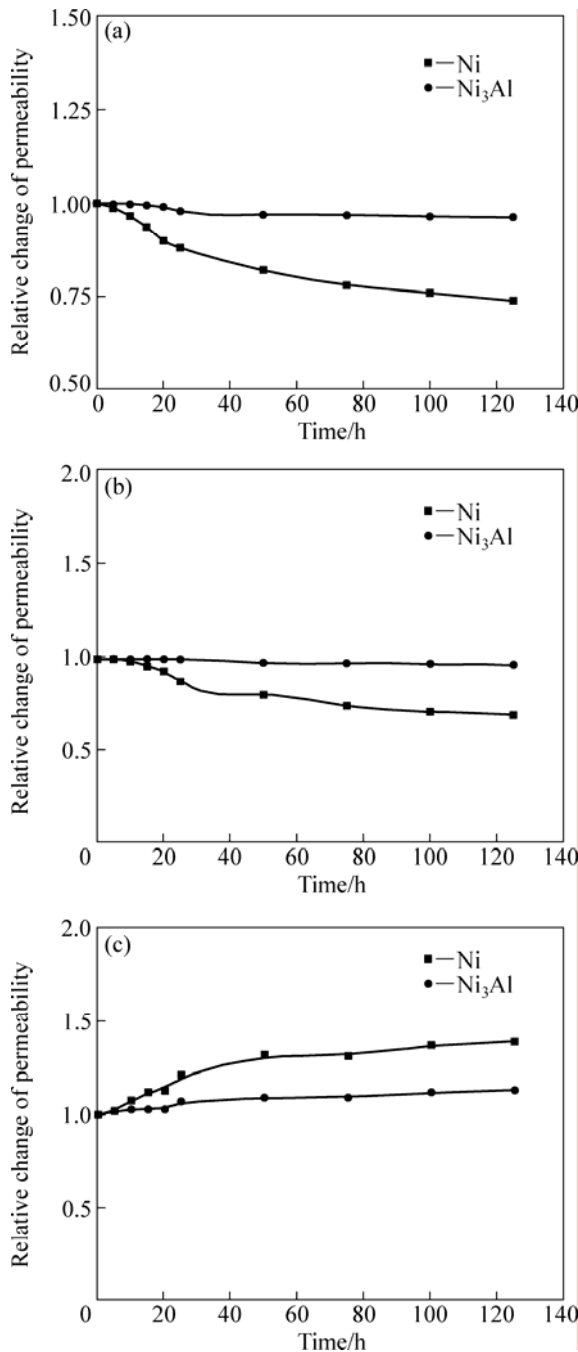


图 2 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料在盐酸中透气度的变化

Fig.2 Relative change of permeability of porous Ni₃Al and Ni in HCl solution: (a) pH=2, 20 ; (b) pH=3, 20 ; (c) pH=2, 90

材料腐蚀后, 腐蚀产物在孔洞中聚集使孔径减小, 透气度随之减小所致。由图 2(b)可看出, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 金属多孔材料的变化规律与 pH=2 时相似, 但透气度变化率均有所减小, 表明酸度的降低腐蚀程度减弱。由图 2(c)可看出, 与室温下不同, 在加热水浴条件下, 随着时间的增加, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料的透气度均增大, 且 Ni 金属多孔材料的增加更加明显, 在 125 h 后, 多孔 Ni₃Al 的透气度为初始值的 1.13 倍。这是由于在加温条件下, 腐蚀速率加快, 致使材料中的金属离子迅速溶解, 透气度增加。

表 4 所列为试样腐蚀 125 h 后最大孔径的变化率。由表 4 可看出, 室温下, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的最大孔径均基本保持不变, 而 Ni 金属多孔材料的最大孔径有所减小; 在 pH=2 时, 减小程度稍大。水浴条件下, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料的最大孔径增大, Ni 金属多孔材料的增大程度更大。根据 Hagen-Poiseuille 方程^[21]:

$$\eta = Kd^2\theta \tag{1}$$

式中: η 是透气度; d 和 θ 为多孔材料的平均孔径和开孔隙度; K 为常数。由式(1)可知, 孔隙率越大, 孔隙尺寸越大, 而透气性能也越好。所以, 最大孔径的变化规律与透气度的变化规律一致。

表 4 腐蚀 125 h 后试样最大孔径的变化

Table 4 Change of maximum pore sizes of different samples after being corroded for 125 h

| Condition | Sample | Maximum pore size/ μm | | Change rate of maximum pore size/% |
|-----------|--------------------|----------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| | | Before corrosion | After corrosion | |
| pH=2, 20 | Ni ₃ Al | 8.98 | 8.97 | -0.11 |
| | Ni | 3.45 | 3.32 | -3.7 |
| pH=3, 20 | Ni ₃ Al | 8.52 | 8.52 | 0 |
| | Ni | 3.46 | 3.35 | -3.17 |
| pH=2, 90 | Ni ₃ Al | 11.78 | 12.06 | 2.3 |
| | Ni | 3.06 | 3.27 | 6.8 |

工业上常用的 Ti 金属多孔材料和 316 不锈钢多孔材料在 90 下, pH=2 的 HCl 溶液中腐蚀 50 h 后, 透气度约为初始值的 40%和 10%, 最大孔径的变化率为-1.71%和-8%, 出现严重堵孔现象^[22]。相比之下, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的孔结构稳定性更加优异。

2.3 表面形貌变化

图 3 所示为多孔材料在 90 盐酸溶液中经过

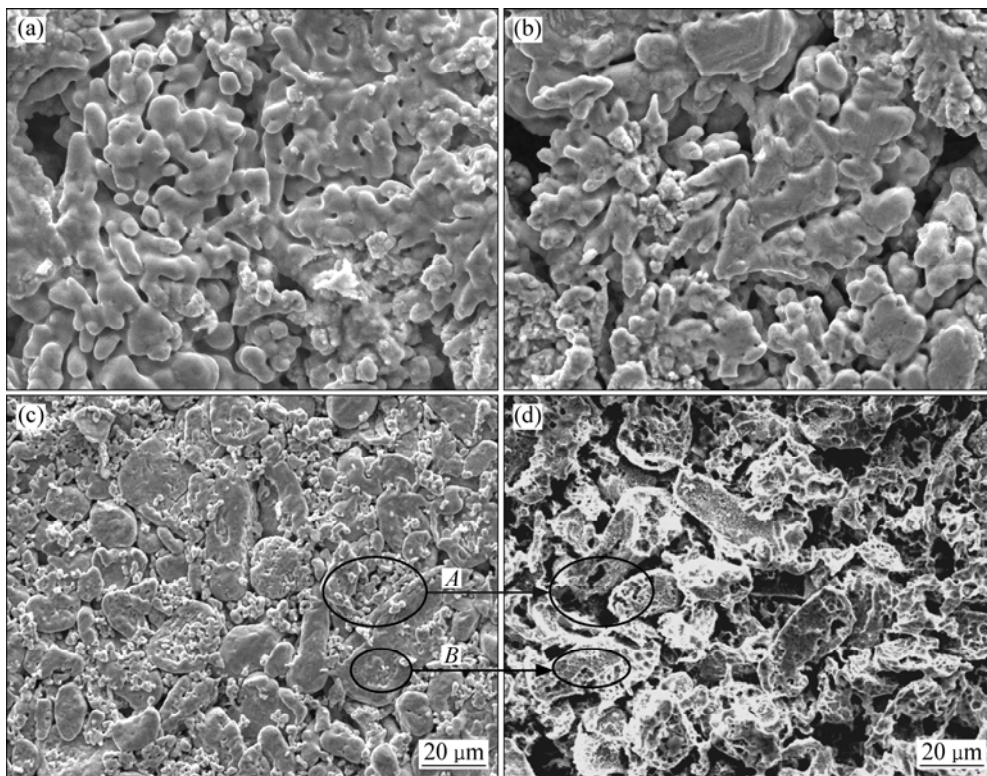


图3 Ni_3Al 多孔材料经盐酸溶液循环腐蚀 125 h 前、后孔结构形貌

Fig.3 Morphologies of pore structures of Ni_3Al porous alloy before and after corrosion in HCl solution for 125 h: (a) Porous Ni_3Al , before corrosion; (b) Porous Ni_3Al , 90 min, pH=2; (c) Porous Ni, before corrosion; (d) Porous Ni, 90 min, pH=2

125 h 循环腐蚀前后孔结构的形貌。从图 3 中可以看出, Ni_3Al 金属间化合物多孔材料在在 90 min 盐酸溶液中腐蚀后, 其孔结构形貌几乎保持不变, 表面未发现腐蚀坑或点蚀迹象, 多孔体的孔隙基本保持初始状态的尺寸和形状。Ni 金属多孔材料在腐蚀前表面均匀分布着大量非常细小的孔洞, 经 90 min 盐酸溶液中腐蚀后(见图 3 中箭头所指 A 区), 原有的小颗粒溶解, 原有细小孔洞因孔壁的溶解而连接、坍塌, 孔隙明显增大。大颗粒表面出现大量坑蚀。其表面显示出明显的溶解迹象, 表面形貌变得疏松、粗糙, 有明显的腐蚀坑和点蚀迹象(见图 3 中箭头所指 B 区)。

2.4 极化曲线

图 4 所示为 Ni_3Al 金属间化合物多孔材料和块体 Ni_3Al 在室温下 pH=2 盐酸中的 Tafel 极化曲线。表 5 所列为图 4 对应的腐蚀参数。由于多孔材料的比表面积大, 表面曲率半径小, 所以, 多孔材料的腐蚀行为较同样成分的块体材料可能呈现不同特性。由图 4 可以看出, Ni_3Al 金属间化合物多孔材料的自腐蚀电位相对较负, 而 Ni_3Al 金属间化合物多孔材料的腐蚀电流较大, 对应的腐蚀速率也较高, 这是由于多孔材料

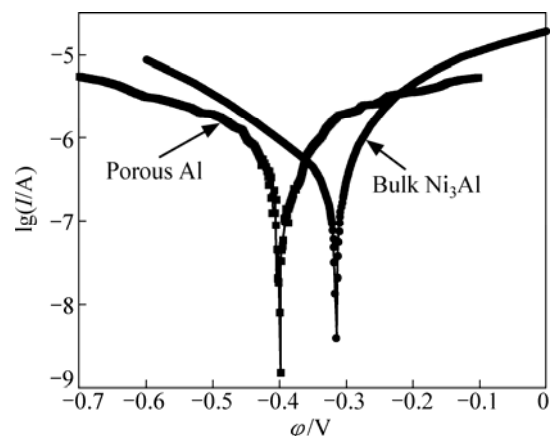


图4 Ni_3Al 在 20 °C、pH=2 盐酸中的 Tafel 极化曲线

Fig.4 Tafel polarization curves of Ni_3Al alloys in HCl solution at 20 °C and pH=2

发达的表面积所致。假设在腐蚀过程中多孔材料的腐蚀速率保持不变, 较大的表面积导致在金属和溶液的界面上更多的离子参与了电化学反应, 这样实际上是增加参与反应的电子, 而这正是反应进行的原动力, 从而导致电流的增大。同时, 多孔结构产生的一些缝

隙使得试样保护层的生成发生一些变化, 这些缝隙也阻碍了腐蚀产物的移动, 使得在某些局部的区域酸度很高, 所以较致密体有更多的离子移动, 从而加快了腐蚀速率。图 5 和 6 所示分别为 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料和 Ni 多孔材料在盐酸中的 Tafel 极化曲线。表 6 所列为其所对应的腐蚀参数。由表 6 可以看出, 在相同的腐蚀条件下, Ni 多孔材料的自腐蚀电位明显低于 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料的, 腐蚀倾向大, 且 Ni 多孔材料的腐蚀速度较 Ni₃Al 金属间化合物多孔

表 5 Ni₃Al 在 20 ℃, pH=2 盐酸中的电化学参数

Table 5 Electrochemical parameters of Ni₃Al in hydrochloric acid at 20 ℃, pH=2

| Sample | ϕ_{corr}/V | $J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$ |
|---------------------------|------------------------|--|
| Porous Ni ₃ Al | -0.399 | 6.60×10^{-4} |
| Bulk Ni ₃ Al | -0.315 | 4.89×10^{-4} |

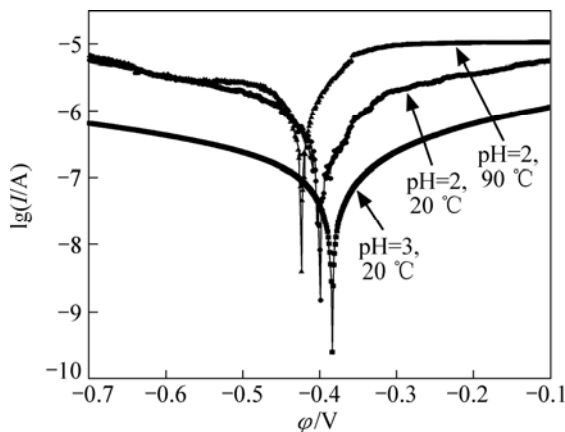


图 5 Ni₃Al 金属间化合物在盐酸中的 Tafel 极化曲线
Fig.5 Tafel polarization curves of porous Ni₃Al alloys in HCl solution

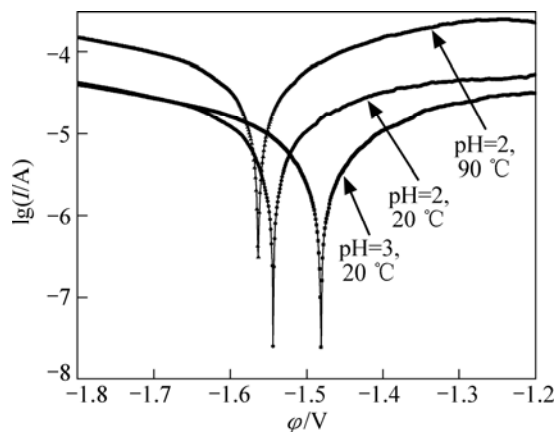


图 6 Ni 多孔材料在盐酸中的 Tafel 极化曲线
Fig.6 Tafel polarization curves of porous Ni in HCl solution

表 6 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料及 Ni 多孔材料在盐酸中的电化学参数

Table 6 Electrochemical parameters for porous Ni₃Al and porous Ni in HCl solution

| Condition | Ni | | Ni ₃ Al | |
|-----------|------------------------|--|------------------------|--|
| | ϕ_{corr}/V | $J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$ | ϕ_{corr}/V | $J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$ |
| pH=2, 20 | -1.544 | 0.015 | -0.399 | 6.6×10^{-4} |
| pH=3, 20 | -1.481 | 0.0075 | -0.384 | 0.9×10^{-4} |
| pH=2, 90 | -1.563 | 0.054 | -0.424 | 4.65×10^{-3} |

材料大。这说明 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料与 Ni 多孔材料相比, 表现出更优异的耐腐蚀性能。

2.5 腐蚀过程分析

将 Ni₃Al 金属间化合物多孔材料和 Ni 多孔材料试样在室温 20 ℃ 下 pH=2 的盐酸中连续浸泡 125 h 后, 取腐蚀液进行离子浓度分析, 结果如表 7 所列。

表 7 腐蚀前、后溶液离子浓度的变化

Table 7 Change of ion concentration of solution before and after corrosion

| Ion | Ion concentration/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) | | |
|------------------|--|----------------------------|--|
| | Before corrosion | After corrosion, porous Ni | After corrosion, porous Ni ₃ Al |
| Ni ²⁺ | 0.50 | 2.65×10^3 | 1.2×10^3 |
| Al ³⁺ | 0.35 | - | 299.5 |

由表 7 可看出, Ni₃Al 金属间化合物多孔材料试样在盐酸溶液中的腐蚀主要来自于 Ni 的溶解, 且溶解量不到 Ni 多孔材料的 1/2。众所周知, 金属 Ni 具有一定的钝化能力, 是耐腐蚀性较为良好的金属材料。NELSON 和 ORIANI^[23]对硫酸体系中镍表面形成的钝化膜成分进行分析。结果表明, 其主要成分为 Ni(OH) 和 NiO。而在本试验中, 当溶液中含有一定浓度的卤素离子时, 钝化膜难以形成, 具体反应如下:



Ni₃Al 金属间化合物多孔材料耐 HCl 腐蚀, 其原

因主要在于 Ni_3Al 金属间化合物中的化学键结构。 Ni_3Al 金属间化合物中原子的键合结构有两种,即占主要成分的共价键和一小部分金属键。其中,以 $\text{Ni}-\text{Ni}$ 键为主的金属键在一定浓度的酸性溶液具有很高的钝性系数^[24],而共价键的存在则束缚大量 Ni 、 Al 原子中的自由电子,在盐酸溶液的阳极反应中阻碍电子的释放,由此造成 Ni_3Al 金属间化合物多孔材料比 Ni 金属多孔材料具有更为优异的抗强酸腐蚀性能。

3 结论

1) 在相同的腐蚀条件下, Ni_3Al 金属间化合物多孔材料较 Ni 多孔材料质量损失小,孔结构稳定,表面形貌无明显变化,且自腐蚀电位偏大,自腐蚀电流偏小,表现出更为优异的抗腐蚀性能。

2) 当腐蚀液浓度的 pH 由 3 降至 2,或者温度由室温变为 90 时,腐蚀质量损失率增加,孔隙略微增大,自腐蚀电位向负方向移动,自腐蚀电流增大,表现出腐蚀程度的增大。

3) Ni_3Al 金属间化合物多孔材料因其特有的化学键以及 Al 元素相对较高的钝化系数,所以表现出优异的抗腐蚀性能。

REFERENCE

- [1] NOEBE R D, BOWMAN R R, NATHAL M V. Physical and mechanical property of B2 compound NiAl [J]. *Inter Mater Rev*, 1993, 38(4): 193–232.
- [2] MIRACLE D B. The physics and mechanical properties of NiAl [J]. *Acta Metal Mater*, 1993, 41(3): 649–678.
- [3] CHEN Guo-xiang, WANG Dou-dou, ZHANG Jian-min, HUO Hang-ping, XU Ke-wei. Self-diffusion of Ni in the intermetallic compound Ni_3Al [J]. *Physica B*, 2008, 403(19/20): 3538–3542.
- [4] WANG Rong-shan, HOU Huai-yu, NI Xiao-dong. Molecular dynamics simulation of Ni_3Al melting[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing: Mineral, Metallurgy, Material*, 2008, 15(4): 425–429.
- [5] OZDEMIR O, ZEY TIN S, BINDAL C. Tribological properties of NiAl produced by pressure-assisted combustion synthesis[J]. *Wear*, 2008, 265(7/8): 979–985.
- [6] MOSHK SAR M M, MIRZ AEE M. Formation of NiAl intermetallic by gradual and explosive exothermic reaction mechanism during ball milling[J]. *Intermetallics*, 2004, 12(12): 1361–1366.
- [7] HAO Y L, YANG R, SONG Y, CUI Y Y, LI D, NIINOMI M. Formation of point defects in TiAl and NiAl [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(7/9): 951–956.
- [8] HAZZLEDINE P M, SUN Y Q. The interaction and concentration of vacancies in NiAl [J]. *Intermetallics*, 2004, 12(7/9): 899–902.
- [9] 张永刚, 韩雅芳, 陈国良, 郭建亭, 万晓景, 冯 漆. 金属间化合物结构材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 586–589. ZHANG Yong-gang, HAN Ya-fang, CHEN Guo-liang, GUO Jiang-ting, WAN Xiao-jing, FENG Di. *Structural intermetallics*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2001: 586–589.
- [10] 宝鸡有色金属研究院. 粉末冶金多孔材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1978: 137–141. Baoji Research Institute for Nonferrous Metals. *Powder Metallurgy porous materials*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1978: 137–141.
- [11] 张子岩, 简椿林. 溶液萃取法在钨湿法冶金中的应用[J]. *湿法冶金*, 2006, 25(1): 1–9. ZHANG Zi-yan, JIAN Chun-lin. Application of solvent extraction process in tungsten hydrometallurgy[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2006, 25(1): 1–9.
- [12] 王玉华. 两种滤料耐腐蚀性研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2005. WANG Yu-hua. Research on resistance to corrosion of two filter materials[D]. Shenyang: Northeastern University, 2005.
- [13] 张丰收, 贺跃辉, 江 垚. 压制压力对 TiAl 合金孔结构及过滤性能的影响[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2006, 11(4): 214–218. ZHANG Feng-shou, HE Yue-hui, JIANG Yao. Effect of pressing pressure on pore structure and filtering performance in porous TiAl alloy[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2006, 11(4): 214–218.
- [14] 贺跃辉, 江 垚, 林小芹. 孔径梯度均质钛铝金属间化合物过滤膜的制备方法: 中国 200410002601.2[P]. 2005–07–20. HE Yue-hui, JIANG Yao, LIN Xiao-qin. Fabrication method of Ti-Al intermetallic compound filtration membrane with gradient aperture: CN 200410002601.2[P]. 2005–07–20.
- [15] JIANG Yao, HE Yue-hui, XU Nan-ping. Effects of the Al content on pore structures of porous Ti-Al alloys[J]. *Intermetallics*, 2008, 16(2): 327–332.
- [16] NAKAJIMA H, IKEDA T, HYUN S K. Cellular Metals: Manufacture, properties and application[M]. Berlin: Verlag MIT Publications, 2003: 191–202.
- [17] Fabrication of lotus-type porous metals and their physical properties[J]. *Adv Eng Mater*, 2004, 6(6): 377–384.
- [18] ALVAREZ K, HYUN S K, TSUCHIYA H. Corrosion behaviour of lotus-type porous high nitrogen nickel-free stainless steels[J]. *Corrosion Science*, 2008, 50: 183–193.

- [19] DONG H X, JIANG Y, HE Y H, SONG M, ZOU J, XU N P, HUANG B Y, LIU C T, LIAW P K. Formation of porous Ni-Al intermetallics through pressureless reaction synthesis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484(1/2): 907–913.
- [20] VENKATARAMAN K, CHOATE W T, TORRE E R, HUSUNG R D, BATCHU H R. Characterization studies of ceramic membranes: A novel technique using a coulter porometer[J]. *Journal of Membrane Science*, 1988, 39(3): 259–271.
- [21] LEE T K, MOSUNOV E I, HWANG S K. Consolidation of a gamma TiAl-Mn-Mo alloy by elemental powder metallurgy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 1997, 239/240: 540–545.
- [22] 武治峰, 贺跃辉, 江 堯, 汤烈明, 黄伯云, 徐南平. 多孔 TiAl 金属间化合物的抗热盐酸腐蚀性能[J]. *粉末冶金材料科学与工程*, 2007, 12(5): 310–315.
- [23] WU Zhi-feng, HE Yue-hui, JIANG Yao, TANG Lie-ming, HUANG Bai-yun, XU Nan-ping. Corrosion resistance of porous TiAl alloy in hot hydrochloric acid solution[J]. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 2007, 12(5): 310–315.
- [24] NELSON J C, ORIANI R A. Stresses produced by the anodic oxidation of nickel[J]. *Electrochemical Acta*, 1992, 137(11): 2051–2057.
- [24] 张承忠. 金属的腐蚀与保护[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985: 95.
- ZHANG Cheng-zhong. *Corrosion and protection of metals*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985: 95.

(编辑 李艳红)