

## Al-B<sub>4</sub>C 复合材料腐蚀行为研究

石建敏, 雷家荣, 张 玲, 沈春雷

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 对 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料进行了室温和 40 °C 下不同浓度硼酸溶液中的腐蚀试验, 以约每 3 天检测 1 次的频率测量溶液电导率和 pH, 测试腐蚀溶液成分的变化, 观测材料在腐蚀过程中宏观形貌的变化。结果表明: 试样的腐蚀主要是由材料成分中的 Al 引起的; 500~2 500 ppm 间存在 1 个临界硼酸浓度, 在该浓度下硼酸溶液对试样的腐蚀速率最慢; 40 °C 下试样的腐蚀速率明显快于室温下试样的腐蚀速率; 40 °C 下溶液电导率的增加速率为  $2.25 \times 10^{-2} \sim 3.23 \times 10^{-2} \mu\text{S}/(\text{cm}\cdot\text{h})$ , pH 无明显变化; 室温下溶液电导率的增加速率为  $0.91 \times 10^{-2} \sim 1.13 \times 10^{-2} \mu\text{S}/(\text{cm}\cdot\text{h})$ , pH 变化量为  $-0.3 \sim -0.5$ ; 为了提高 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料在硼酸溶液中的抗腐蚀性能, 需要对材料进行表面保护处理。

**关键词:** Al-B<sub>4</sub>C 复合材料; 腐蚀; 硼酸; 电导率; pH

中图分类号: TG174.21 文献标志码: A 文章编号: 1000-6931 (2010) S0-0159-07

## Corrosion Behaviors of Al-B<sub>4</sub>C Composite Materials

SHI Jian-min, LEI Jia-rong, ZHANG Ling, SHEN Chun-lei

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The corrosion tests of Al-B<sub>4</sub>C composite materials were set in different concentrations of boric acid solution at room temperature or 40 °C. The conductivity and pH of each boric acid solution were measured at an approximate frequency of once per three days. The solution composition changes before and after corrosion tests were tested and the changes of the specimens' surface were compared. The corrosion of specimens is due to the aluminum. From 500 ppm to 2 500 ppm, there is a specific boric acid concentration. The corrosion rate of specimens in this solution is the slowest. The corrosion rate of specimens at 40 °C is faster than that at room temperature. At 40 °C, the conductivity of boric acid solution increases with the rate of  $2.25 \times 10^{-2} \sim 3.23 \times 10^{-2} \mu\text{S}/(\text{cm}\cdot\text{h})$ . But the pH does not change significantly. At room temperature, the conductivity of the solution increases with the rate of  $0.91 \times 10^{-2} \sim 1.13 \times 10^{-2} \mu\text{S}/(\text{cm}\cdot\text{h})$ . The pH of the solution decreases 0.3-0.5. To improve the corrosion resistance of Al-B<sub>4</sub>C composite material, surface protection treatment is necessary.

**Key words:** Al-B<sub>4</sub>C composite materials; corrosion; boric acid; conductivity; pH

随着核能源及各种核反应堆的发展, 辐射 防护对屏蔽体材料的综合物理力学性能要求越

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-08-30

基金项目: 中国工程物理研究院军民两用重大项目资助 (JMZD200903)

作者简介: 石建敏 (1986—), 男, 云南建水人, 硕士研究生, 核技术及应用专业

来越高,屏蔽材料的优化设计、结构/功能一体化要求变得越来越重要<sup>[1]</sup>。研究表明,元素硼具有很大的热中子吸收截面,其中同位素<sup>10</sup>B的热中子吸收截面可达 $3.84 \times 10^{-25} \text{ m}^2$ ,是一种良好的热中子吸收核素。天然硼中<sup>10</sup>B的丰度为19.9%,通常将富硼化合物应用在辐射屏蔽领域。

碳化硼密度低( $2.52 \text{ g/cm}^3$ ),硬度高,有较高的热中子俘获截面,且无二次辐射污染,价格低廉,是常用的中子吸收材料。铝及其铝合金材质轻,韧性好,成本低,密度( $2.7 \text{ g/cm}^3$ )与碳化硼接近<sup>[2-4]</sup>。Al-B<sub>4</sub>C复合材料结合了铝和碳化硼的优点,具有良好的机械力学性能和热中子吸收性能,是很好的结构/功能一体化材料,被广泛应用在核辐射防护领域中。

能够最终被应用在辐射屏蔽中的Al-B<sub>4</sub>C复合材料需同时具备良好的机械力学性能、热中子吸收性能、热稳定性、抗辐照性能和抗腐蚀性能。随着核能源应用的快速发展,核电站乏燃料的贮存必将是一个严峻的问题,在乏燃料贮存水池中引入中子吸收材料,能够有效增加贮存格架的贮存系数<sup>[5]</sup>。针对乏燃料的湿法贮存,结合贮存水池的水质情况,在Al-B<sub>4</sub>C复合材料使用前研究其腐蚀行为十分必要。

## 1 实验

### 1.1 实验材料的制备

实验中所用的Al-B<sub>4</sub>C复合材料通过粉末冶金的方法制备,腐蚀试样切割为矩形小块。在试验前分别对试样进行抛光处理,通过丙酮溶液浸泡除去表面油污,将除去油污后的试样置于去离子水中进行超声波清洗,最后将试样置于真空干燥箱内干燥。对干燥后的试样进行尺寸测量、干重测量、表观形貌分析等腐蚀实验前的性能测试。

### 1.2 实验的设计

根据乏燃料贮存水池的典型水质环境可知:乏燃料水池的冷却水通常维持在40℃左右运行,短期异常不超过60℃。沸水堆、加压重水堆的乏燃料贮存水池为pH5.3~7.5的去离子水溶液。压水堆乏燃料贮存水池为pH4.0~6.0、含硼酸2 000 ppm的去离子水溶液<sup>[6]</sup>。水池环境中酸碱度、电导率、温度、杂

质离子含量等因素对材料的腐蚀行为有影响。

为了研究温度和硼酸浓度这两个腐蚀因子对Al-B<sub>4</sub>C复合材料的腐蚀行为,实验中设置了室温和40℃两个不同的温度,0、500、2 500、10 000和25 000 ppm这5种不同浓度的硼酸溶液进行温度/硼酸浓度正交腐蚀实验。

### 1.3 实验设备及实验参数

实验中,将分析纯的硼酸(H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>)溶于去离子水得到硼酸溶液,腐蚀溶液体积/表面积大于20 mL/cm<sup>2</sup>,腐蚀容器中置于恒温水浴锅内进行恒温。在两个温度下对试样腐蚀行为进行研究,一组在常温水环境中浸泡,腐蚀溶液温度22.3~28.6℃,平均温度(24.5±1.8)℃;另一组将水浴锅的控制温度设置为40℃,腐蚀溶液温度为39.3~39.7℃,平均温度(39.4±0.1)℃。为了方便讨论,后面用室温和40℃分别代替实际腐蚀温度进行讨论。

### 1.4 试样分析及测试

腐蚀实验开始后,以约每间隔3 d的频率对腐蚀溶液进行测量,测试项目为溶液的温度、pH和电导率。当腐蚀试样表面出现较为严重的腐蚀现象时,对腐蚀溶液取样进行成分分析。目前对腐蚀实验的研究更多地着重于腐蚀溶液参数的变化以及腐蚀试样宏观表现形貌的变化。更多关于材料性能的变化有待于今后进行更加详细的研究。

腐蚀过程中,通过对腐蚀溶液的成分变化、pH变化规律和电导率变化规律,结合试件表面的宏观表现形貌变化,可初步分析出Al-B<sub>4</sub>C复合材料的腐蚀行为,并对材料的抗腐蚀性能给出初步评价。

## 2 结果与讨论

### 2.1 腐蚀介质成分的变化

腐蚀溶液的成分采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)进行测量,腐蚀600 h后再次对腐蚀溶液进行ICP分析,通过比较腐蚀过程中溶液成分的变化来间接判断Al-B<sub>4</sub>C复合材料的腐蚀情况。不同温度下腐蚀溶液的ICP测试结果列于表1和2。从表1可看出:在室温下,腐蚀前溶液中Al离子的浓度<0.003 ppm,腐蚀600 h后,浓度增大了60~1 300倍;腐蚀前溶液中Mg离子浓度<0.02 ppm,腐蚀600 h后,

浓度增大了 2.5~13 倍。从表 2 的数据可看出: 40 °C 下, 腐蚀 600 h 后, 溶液中 Al 离子的浓度较本底值增大了 2~500 倍; 溶液中 Mg 离子的浓度较本底值增大了 5~9 倍。

表 1 室温下腐蚀后溶液成分的变化

**Table 1 Compositions of solution at room temperature** ppm

硼酸浓度	Al 离子浓度		Al 离子浓度 变化	Mg 离子浓度		Mg 离子浓 度变化	其它离子 浓度变化
	腐蚀前	腐蚀后		腐蚀前	腐蚀后		
0	0.000 2	0.257	0.257	0.005 6	0.071	0.066	<0.003
500	0.002 1	0.284	0.282	0.006 0	0.035	0.029	<0.003
25 00	0.001 9	0.126	0.124	0.006 7	0.018	0.011	<0.003
10 000	0.002 1	0.173	0.171	0.006 7	0.019	0.012	<0.003
25 000	0.002 3	0.220	0.218	0.010 1	0.031	0.021	<0.003

表 2 40 °C 下腐蚀后溶液成分的变化

**Table 2 Compositions of solution at 40 °C** ppm

硼酸浓度	Al 离子浓度		Al 离子浓度 变化	Mg 离子浓度		Mg 离子浓 度变化	其它离子 浓度变化
	腐蚀前	腐蚀后		腐蚀前	腐蚀后		
0	0.000	0.006	0.006	0.005	0.035	0.030	<0.003
500	0.002	0.005	0.003	0.006	0.050	0.044	<0.003
25 00	0.001	0.192	0.190	0.006	0.038	0.031	<0.003
10 000	0.002	0.434	0.432	0.006	0.036	0.029	<0.003
25 000	0.002	1.16	1.158	0.010	0.068	0.057	<0.003

从表 1 和 2 中可看出, 溶液中 Al 离子和 Mg 离子的浓度在腐蚀前后变化较大。因 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料中以 Al 作为基体材料, 材料中虽含有 B<sub>4</sub>C, 但 B<sub>4</sub>C 性能稳定, 耐腐蚀性能好, 所以材料腐蚀过程主要考虑 Al 的腐蚀。材料中使用的 Al 含有活性较大的微量元素 Mg, 因此, 在材料置于腐蚀溶液中时, 材料的腐蚀主要是 Al 以及其中的部分微量元素与溶液相互作用, 进而导致材料被腐蚀, 影响材料的各种性能变化。所以, 腐蚀后能够在腐蚀溶液中检测到比本地浓度高得多的 Al 离子和 Mg 离子浓度。

通过室温和 40 °C 下不同硼酸浓度中 Al 离子浓度的变化规律可看出: 室温下, 随着硼酸浓度的增加, 溶液中 Al 离子浓度的增加量呈现先减小后增加的规律; 而对于 40 °C 下, 随着硼酸浓度的增加, 溶液中 Al 离子浓度的增加量也呈现相同的规律, 但后面随着硼酸浓度增加量较室温下的增加量大。这一现象的产生可用 3 个过程来描述: 1) 铝与水的反应, 实际上, 该过程是 Al 与水中 OH<sup>-</sup>相互作用的过程, 化学

反应式可表示为  $2Al+6H_2O=2Al(OH)_3+3H_2\uparrow$ , Al 的活性较大, 能够与水反应生成氢气, 且其生成的氢氧化铝会在表面形成一层保护膜, 在保护膜未被除去的情况下阻止腐蚀的继续进行; 2) 硼酸的加入对水水解过程的影响, 纯水中存在一电离平衡的过程,  $H_2O \rightleftharpoons H^+ + OH^-$ , 硼酸的加入引入了较多的 H<sup>+</sup>, 在一定程度上抑制了溶液中 OH<sup>-</sup>的生成; 3) 硼酸加入后, 溶液中的 H<sup>+</sup>会进一步与 Al(OH)<sub>3</sub> 反应, 使 Al 离子以离子态的形式存在于溶液中。实际上, 上述的 3 个化学过程从微观上是可逆的, 各种离子在溶液中均是保持一动态平衡的结果。

本腐蚀实验中试样中 Al 与溶液的腐蚀过程是上面 3 个过程共同作用的结果, 当硼酸浓度低于某个临界值时, 随着硼酸浓度的增加, 过程 2 抑制了 1、3 的反应速率, 溶液中的 Al 离子浓度增加量随着硼酸浓度的增加而减少。当硼酸浓度高于某个临界值时, 随着硼酸浓度的增加, 过程 2 促进了过程 1、3 的反应速率, 所以体现为溶液中 Al 离子浓度的增加随着硼

酸浓度的增加而增加。而腐蚀过程中的这种抑制或促进作用与温度有关,温度越高,各反应速率越大,过程2对过程3的促进或抑制作用更明显,所以,在40℃时,0 ppm和500 ppm的溶液中Al离子的浓度增量要小于室温下两种溶液中的Al离子浓度增量。40℃时,2 500、10 000、25 000 ppm中溶液Al离子的浓度增量要大于室温下3种溶液中的Al离子浓度增量。

此外,可用溶液中Al离子浓度的改变量来表述试样的腐蚀速率。根据两种温度下溶液中Al离子浓度增加量的变化规律,可得出如下结论:在硼酸溶液对Al-B<sub>4</sub>C复合材料的腐蚀中,存在某个临界硼酸浓度值,在该硼酸浓度下,溶液对材料的腐蚀速率最低,该临界值介于500~2 500 ppm之间。

对于溶液中Mg的变化规律,其化学作用

机理与Al的作用机理相似,只不过由于试样中Mg仅以微量元素的方式存在,所以变化规律不如Al离子浓度的变化规律明显。

## 2.2 腐蚀介质电导率的变化

溶液的电导率间接反映了溶液中离子浓度的大小,通常溶液电导率大,腐蚀速率也大。由于不同浓度溶液的电导率不同,实验中可通过比较电导率的变化量和变化率来分析试样的腐蚀行为。腐蚀前后溶液的电导率值列于表3。从表3中的数据可看出:1)相同浓度的溶液电导率随着温度的升高而增加;2)相同温度下不同浓度溶液的电导率随着硼酸浓度的升高先减小再增加;3)在腐蚀过程中,溶液中的电导率数值均在以不同的速率增加,且可明显看到,40℃下溶液的电导率增加速率要高于室温下溶液电导率的增加速率。

表3 腐蚀前后溶液的电导率值

Table 3 Conductivity of corrosion solution before and after corrosion tests

硼酸浓度/ ppm	室温下电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )			平均变化率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )	40℃下电导率/( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )			平均变化率/ ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )
	腐蚀前	腐蚀后	变化量		腐蚀前	腐蚀后	变化量	
0	17.0	26.6	9.6	$1.13\times 10^{-2}$	17.7	30.4	12.7	$2.25\times 10^{-2}$
500	7.6	13.4	5.8	$0.91\times 10^{-2}$	10.7	26.2	15.5	$3.23\times 10^{-2}$
2 500	6.8	12.4	5.6	$0.78\times 10^{-2}$	7.2	24.8	17.6	$3.18\times 10^{-2}$
10 000	8.0	9.2	1.2	$0.17\times 10^{-2}$	8.8	20.6	11.8	$2.32\times 10^{-2}$
25 000	18.9	21.1	2.2	$0.30\times 10^{-2}$	18.7	34.9	16.2	$2.81\times 10^{-2}$

图1示出了腐蚀前不同温度下电导率随硼酸浓度的变化。从图1中两种温度下溶液电导率的变化规律可看出,溶液电导率随着硼酸浓度的增加先减少,到2 500 ppm浓度时达到最低值,然后再随着硼酸浓度的增加而变大。这一现象可用2.1节中的过程2进行解释,在纯水中存在电离平衡: $\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{OH}^-$ ,当硼酸溶于去离子水中时,由于硼酸的电离平衡常数更小,硼酸的加入抑制了水的电离,进而导致加入少量硼酸时溶液电导率随着硼酸浓度的增加反而降低。当电导率达到一最小值后,随着硼酸浓度的增加,溶液电导率开始缓慢增加。硼酸虽是一种弱电解质,但当其浓度超过一定数值后,随着浓度的增加,溶液里的离子浓度也会逐渐增加。当然,硼酸中的杂质离子含量对溶液的电导率也可能有所贡献。

从表3中电导率的变化规律可看出,腐蚀一定时间后,室温下不同硼酸浓度溶液的电导率和40℃下不同硼酸浓度溶液的电导率均有

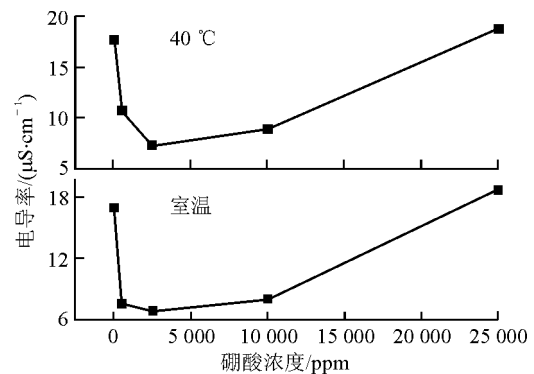


图1 腐蚀前电导率随硼酸浓度的变化

Fig. 1 Conductivity of corrosion solution versus boric acid concentration before corrosion test

所增加, 40 °C 下硼酸溶液中电导率的增加速率要快于室温下硼酸溶液电导率的增加速率。腐蚀开始后电导率的增加是因在腐蚀过程中, 试样中的杂质和成分溶解到腐蚀溶液中而引起的。表 1 和表 2 虽只列出了 Al 离子和 Mg 离子的浓度, 但其它离子浓度的微小变化也会影响到溶液的电导率, 所有离子浓度的变化速率之和决定了溶液电导率的变化速率。

### 2.3 腐蚀介质 pH 的变化

pH 是电离平衡常数的一个体现, 当温度改变时, 溶液的电离平衡常数也会随之改变, 进而影响到溶液的 pH。

对 pH 的测试结果表明: 腐蚀实验开始阶段, 溶液的 pH 在一短暂的时期内有微小的增加, 产生这一现象的原因是腐蚀开始后, 溶液中溶解的 CO<sub>2</sub> 被释放, 进而导致溶液 pH 的微小升高。对于室温下腐蚀的溶液, 该过程较为

缓慢, 且因溶液的温度随外界温度的变化而波动, pH 受温度波动的影响大于 CO<sub>2</sub> 从溶液中被释放的过程, 所以 pH 的这一微小上升不是很明显。对于 40 °C 下的腐蚀溶液, 在实验开始阶段可发现, 在腐蚀容器内壁和腐蚀试样表面附着有大量气泡, 这些气泡是由溶解在溶液中的气体在腐蚀加热的过程中析出的。溶解在溶液中气体的析出带走了溶液中的 CO<sub>2</sub> 气体, 进而在一定程度上导致溶液 pH 的增加。

除去开始阶段溶液 pH 的略微升高, 室温下, pH 的总体变化趋势是递减的, 表 4 列出了腐蚀后溶液的 pH。表 4 中的数据反映出这一变化规律, 这一过程可归因于试样中的 Al 与溶液相互作用而引起的。对于 40 °C 腐蚀溶液中, 溶液的 pH 变化很小, 与腐蚀试验前的 pH 相比基本稳定。腐蚀前后溶液的 pH 变化趋势如图 2 所示。

表 4 腐蚀后溶液的 pH

Table 4 pH of corrosion solution after corrosion test

硼酸浓度/ppm	室温下 pH			40 °C 下 pH		
	腐蚀前	腐蚀后	变化量	腐蚀前	腐蚀后	变化量
0	6.633	6.128	-0.505	6.915	6.720	-0.195
500	6.187	5.861	-0.326	6.647	6.599	-0.048
2 500	5.712	5.413	-0.299	6.060	6.096	0.036
10 000	5.090	4.618	-0.472	5.232	5.249	0.017
25 000	4.267	4.147	-0.120	4.346	4.415	0.070

### 2.4 试样宏观表现形貌的变化

室温介质下腐蚀的试样, 0 ppm 和 500 ppm 硼酸溶液中的试样在腐蚀 244 h 后, 开始在试样表面形成氧化膜, 表面颜色开始变暗; 腐蚀进行 671 h 后, 两块试样表面均被比较均匀的氧化膜所覆盖, 且 0 ppm 中试样表面氧化膜的形成要严重于 500 ppm 中的试样。对于其它浓度硼酸溶液中的试样, 并未观察到明显的氧化膜形成现象。此外, 在试样表面形成的氧化膜上部分区域出现白色物质沉积, 估计这是由于试样表面的杂质所引起的。图 3 示出室温下不同浓度腐蚀溶液中试样宏观表现形貌的变化。

40 °C 介质腐蚀的试样, 腐蚀进行 72 h 后可在试样表面和腐蚀容器内壁观察到大量气泡附

着, 继续往后腐蚀, 发现气泡消除, 可分析这

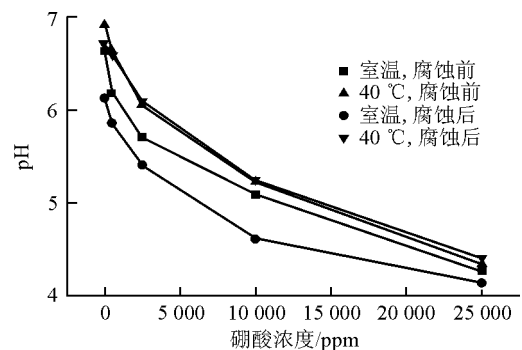


图 2 腐蚀前后溶液 pH 随浓度的变化

Fig. 2 pH of corrosion solution versus boric acid concentration

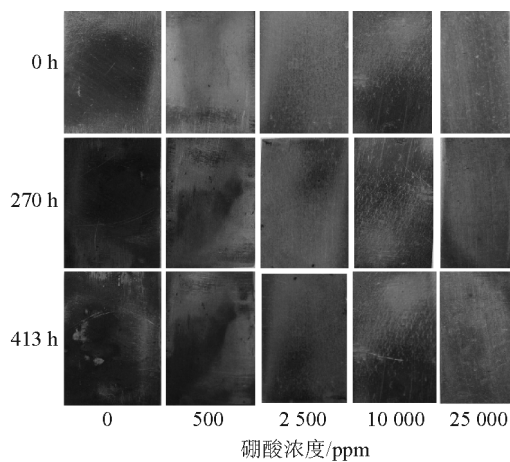


图3 室温下试样宏观腐蚀形貌

Fig. 3 Macroscopic corrosion morphology of specimens at room temperature

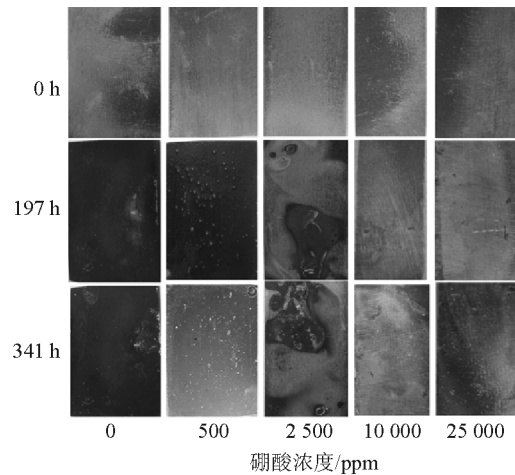


图4 40 °C下试样宏观腐蚀形貌

Fig. 4 Macroscopic corrosion morphology of specimens at 40 °C

些气泡是由于溶解在溶液中的空气析出所致, 试样中的铝与溶液生成的  $H_2$  气很少, 不会对此造成很大贡献。腐蚀 173 h 后, 0 ppm 和 500 ppm 硼酸溶液中的试样表面开始出现氧化膜, 表面颜色变为暗, 且在氧化膜上观察到白色小点的沉积; 2 500 ppm 硼酸溶液中的试样, 表面颜色未见形成氧化膜, 但部分区域开始沉积有白色小点; 10 000 ppm 和 25 000 ppm 硼酸溶液中的试样, 并未观察到明显变化。腐蚀进行 599 h 后, 对于 0 ppm 和 500 ppm 硼酸溶液中的试样, 表面仍有为均匀的氧化膜覆盖, 试样取出风干后可发现, 氧化膜变为灰白色, 且在表面边缘的部分区域可观察到白色小点沉积; 2 500 ppm 硼酸溶液中的试样, 在试样表面开始形成局部氧化膜, 个别区域观察到腐蚀沉积, 而其它区域未见明显改变; 10 000 ppm 和 25 000 ppm 硼酸溶液中的试样, 虽可观察到试样表面局部小区域颜色改变, 但未观察到明显的表观腐蚀现象。图 4 示出了 40 °C 下不同浓度溶液中试样宏观表观形貌的变化。

从两个不同温度下硼酸溶液中试样宏观表观形貌的变化来看, 40 °C 下的试样氧化膜的形成长要大于室温下试样氧化膜的形成长。这与表 1 和表 2 中给出的溶液中 Al 离子浓度的变化是相匹配的, 且试样宏观表观形貌的变化也验证了 2.1 节中关于腐蚀机理的讨论。

从目前的实验结果来看, 腐蚀首先发生在

低硼酸浓度 (0 ppm 和 500 ppm) 的溶液中, 且在低硼酸浓度溶液中的试样表面形成较为均匀的氧化膜, 氧化膜的形成可能进一步阻止了溶液对材料的腐蚀。由于材料表面存在杂质和微小缺陷, 可在形成的氧化膜上观察到腐蚀沉积现象, 表现为白色小点或区域, 这些微小区域的腐蚀可能会发展成为点腐蚀。对于 2 500 ppm 硼酸溶液中, 试样表面局部形成氧化膜, 但在试样表面也出现了较多的腐蚀沉积。对于高硼酸浓度的溶液中, 虽从宏观上并未观察到明显的腐蚀现象, 但结合腐蚀溶液成分的变化来看, 高浓度的硼酸溶液对试样的腐蚀速率更大。

## 2.5 温度对试样腐蚀行为的影响

从前面的分析可知, 温度越高, 材料的腐蚀速率越大。对表 1~3 进一步进行分析, 分别通过对不同温度下溶液中 Al 离子浓度的变化量和电导率的变化速率来分析比较试样在不同温度下的腐蚀速率。从表 1~3 中的数据可看出: 无论是从腐蚀溶液中 Al 离子浓度的变化量还是腐蚀溶液电导率的变化速率来看, 均可得出 40 °C 更易对试样造成腐蚀的结论。

为进一步说明温度对试样腐蚀速率的影响, 对表 1、2 中 2 500、10 000 和 25 000 ppm 溶液的数据作图 5。对 2 500 ppm 浓度下不同温度下电导率随腐蚀时间的变化作图 6。从腐蚀结果看, 温度越高, 溶液对材料的腐蚀速率越大, 且这种加速程度随硼酸浓度的增加而加大。

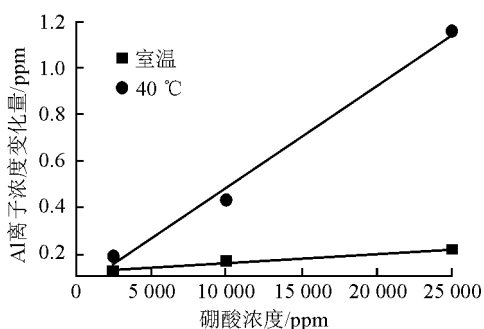


图5 溶液 Al 离子浓度随硼酸浓度的变化

Fig. 5 Variation of Al versus boric acid concentration

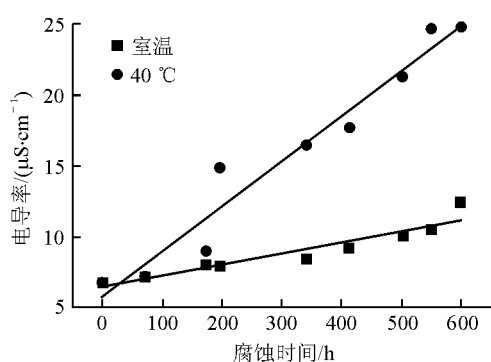


图6 2500 ppm 硼酸溶液电导率随时间的变化

Fig. 6 Conductivity of 2500 ppm boric acid solution versus time

## 2.6 腐蚀介质对试样腐蚀行为的影响

由前面的分析可知, 硼酸溶液的电导率随着浓度的增加而呈现先减小后增大的规律。且在同样温度下, 存在一临界硼酸浓度, 在该浓度下, 溶液对 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料的腐蚀速率最慢。最终应用的贮存环境 2 000~2 500 ppm 处于该临界值附近。浓度低于临界硼酸浓度值时, 溶液在材料表面溶液形成氧化膜, 氧化膜能在一定程度上对材料起到保护作用。浓度高于临界硼酸浓度值时, 随着硼酸浓度的增加, 腐蚀速率增加较快。

## 3 结论

1) 在相同腐蚀温度下, 存在一临界硼酸浓度值, 在该值下, 溶液对 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料的腐蚀速率最低, 该浓度临界值在 500~2 500 ppm 之间。

2) 在相同浓度的硼酸溶液中, Al-B<sub>4</sub>C 复合材料在 40 °C 溶液中的腐蚀速率要大于室温

溶液的腐蚀速率。且硼酸浓度越大, 腐蚀加速作用越明显。

3) 0 ppm、500 ppm 的硼酸溶液易在 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料表面形成氧化膜, 2 500 ppm 的硼酸溶液在试样表面同时形成氧化膜和腐蚀沉积, 10 000 ppm 和 25 000 ppm 的溶液观察不到氧化膜的形成。

4) 欲提高 Al-B<sub>4</sub>C 复合材料的抗腐蚀性能, 需对材料进行表面保护处理。

## 参考文献:

- [1] 杨文锋, 刘颖, 杨林, 等. 核辐射屏蔽材料的研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21 (5): 82-85.  
YANG Wenfeng, LIU Ying, YANG Lin, et al. Research progress in shielding materials for nuclear radiation[J]. Materials Review, 2007, 21(5): 82-85 (in Chinese).
- [2] 王零森. 碳化硼屏蔽吸收芯块的研制及其在快堆中的性能考核[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16 (9): 1 481-1 485.  
WANG Lingsen. Preparation of boron carbide pellets and testing in fast breeder reactor[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(9): 1 481-1 485(in Chinese).
- [3] 樊建中, 姚忠凯, 李义春, 等. 颗粒增强铝基复合材料研究进展[J]. 材料导报, 1997, 11 (3): 48-51.  
FAN Jianzhong, YAO Zhongkai, LI Yichun, et al. The progress in the research of particulate-reinforced aluminium matrix composites[J]. Materials Review, 1997, 11(3): 48-51(in Chinese).
- [4] 王东山, 薛向欣, 刘然, 等. B<sub>4</sub>C/Al 复合材料的研究进展及展望[J]. 材料导报, 2007, 21 (8): 388-390.  
WANG Dongshan, XUE Xiangxin, LIU Ran, et al. Research progress and development B<sub>4</sub>C/Al composite materials[J]. Materials Review, 2007, 21(8): 388-390(in Chinese).
- [5] 姜圣阶. 动力堆核燃料后处理厂设计[M]. 北京: 原子能出版社, 1996: 54-62.
- [6] 任凤仪. 国外核燃料后处理[M]. 北京: 原子能出版社, 2006: 21.