

# 基于灰色理论的高强铝合金应力腐蚀开裂预测模型的建立与应用

Stress Corrosion Cracking Model Based on Experiment and Gray Theory for High Strength Aluminum Alloy

刘建华, 郝雪龙, 李松梅, 于 美

(北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191)

LIU Jian-hua, HAO Xue-long, LI Song-mei, YU Mei

(School of Materials Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**摘要:** 采用 3.5% NaCl 溶液中预制裂纹的方法测试了 2124 高强铝合金的应力腐蚀裂纹扩展长度随时间的变化, 获得了裂纹扩展速率随腐蚀时间的变换规律及应力腐蚀断裂韧性界限值, 并对断口进行分析。根据裂纹扩展的基本规律, 运用灰色理论 GM (1, 1) 模型, 依据 2124 铝合金应力腐蚀开裂裂纹扩展长度的原始数据进行了灰色预测, 并对预测结果进行检验。结果表明: 裂纹扩展速度随腐蚀时间的延长而逐渐降低, 断口呈沿晶断裂, 腐蚀产物堆积导致了裂纹的继续扩展, 建立的应力腐蚀开裂裂纹预测模型 GM (1, 1) 的 MATLAB 程序, 与实测数据相比, 误差较小, 具有一定的实用价值。为减少实验时间、快速、科学评价材料的应力腐蚀开裂敏感性提供科学依据。

**关键词:** 高强铝合金; 应力腐蚀开裂; 应力腐蚀断裂韧性  $K_{ISCC}$ ; 灰色理论

**中图分类号:** V250.2    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381(2011)03-0060-05

**Abstract:** The making precrack in 3.5% NaCl solution was used for testing the variation of the stress corrosion crack length with time for 2124 high strength aluminum alloy. The variation law of the crack growth rate with the time and the threshold stress intensity for stress corrosion cracking were obtained. The fractograph was also analyzed. According to the fundamental rules of crack propagation, the grey prediction model GM (1, 1) was used for predicting the stress corrosion crack length based on the values experimentally measured, and the predicted results were examined. The results showed that the crack growth rate reduced with the increasing of the corrosion time, and intergranular fracture could be observed. The crack resumed growth was driven by the corrosion production accumulation. It is also shown that the stress corrosion crack length prediction model GM (1, 1) realized by the MATLAB program can produce values closely approximating the measured ones, and the errors were relatively small, which indicated the practical valuation of the model. Using the model, the test time can be reduced, that is to say, the model has provided a scientific evidence for evaluating the material stress corrosion cracking sensitivity rapidly and scientifically.

**Key words:** high strength aluminum alloy; stress corrosion cracking; threshold stress intensity for stress corrosion cracking  $K_{ISCC}$ ; gray model

超高强度铝合金, 具有强度高、密度低、耐热性能和加工性能良好的特点而被广泛地应用于航空航天、海洋工程和军事工程等长期服役的结构件领域<sup>[1-3]</sup>, 随着超高强度铝合金应用的进一步推广, 也逐渐暴露出其在载荷和腐蚀环境联合作用下会产生裂纹、并不断扩展, 最终导致断裂破坏的应力腐蚀开裂 (SCC) 敏感性问题<sup>[4]</sup>。

超高强度铝合金应力腐蚀的特点是低应力性和突发性, 往往表现为在显著低于设计强度的应力作用下

发生结构的突然破坏, 具有不可预测性。故结构材料应用之前必须对它的应力腐蚀开裂敏感性进行测试。鉴于此, 许多国内外研究人员对结构材料的上述性能进行了研究。魏群义、彭晓东等<sup>[5]</sup>就超高强度铝合金应力腐蚀开裂问题进行了详细的阐述, 介绍了应力腐蚀开裂的机理及其影响因素等, 并对这一研究领域的未来进行了展望; 刘晓东等<sup>[6]</sup>用 X 射线原位观测了恒载荷晶间应力腐蚀开裂情况; 卢占鹏等<sup>[7]</sup>采用交流电势落差法 (ACPD) 测量了腐蚀条件下疲劳破坏中的表

面裂纹增长和破坏过程等。近年来,随着灰色理论的发展,它在材料腐蚀断裂中应用的优越性(由于应力腐蚀过程的不确定性)越来越明显地显现出来,徐晖等<sup>[8]</sup>采用了灰色预测与支持向量相结合的预测方法,成功地预测了疲劳裂纹的扩展情况。刘延利、钟群鹏等利用灰色模型对铝合金预腐蚀与疲劳性能进行了研究,结果表明灰色模型能较好地反映铝合金腐蚀过程的变化趋势及其对疲劳性能的影响<sup>[9]</sup>。韩恩厚、柯伟等<sup>[10]</sup>用灰色模型对碳钢、低合金钢的大气腐蚀速率建立了预测模型,结果表明该模型具有较高的精度,同时用灰色关联分析方法研究了环境因素对大气腐蚀影响的程度,表明RH>80%的年时数、相对湿度RH、温度是影响大气腐蚀的主要因素。运用灰色模型还可以对管道腐蚀进行预测,可以得到与实测数据相接近的数据<sup>[11]</sup>。

本工作应用恒位移双悬臂测试样(DCB)测试应力腐蚀开裂的方法,以预制裂纹后的少量裂纹扩展数据为基础,首次建立高强铝合金腐蚀裂纹扩展的灰色模型,对应力腐蚀裂纹扩展情况与应力腐蚀开裂进行预测。同时测量了其裂纹扩展的实时裂纹长度,获得了材料的应力腐蚀断裂韧性 $K_{ISCC}$ 值。通过对比研究预

测值与测量值之间的差异,认为该灰色预测模型可以提供一个快速、科学、有效的评价材料应力腐蚀开裂性能的途径。

1 实验方法

实验材料为超高强2124-T851铝合金,其主要化学成分如表1所示。其屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 为455MPa,抗拉强度 $\sigma_b$ 为538MPa,弹性模量 $E$ 为71GPa。应力腐蚀开裂试样的取样方向为S-L方向,几何形状与尺寸如图1所示,按GB12445.1—90和HB5294—84标准尺寸精度要求对材料进行机械加工。将加工好的应力腐蚀开裂试样进行螺钉恒位移加载预制开裂,控制预制裂纹长度在2.5~4mm之间,并计算加载前后加载中心线处裂缝的张开位移 $V$ 。加载后,将试样竖直放入3.5%的中性NaCl溶液中进行应力腐蚀实验。实验过程中,裂纹始终浸没在溶液中,保持温度恒定( $35\pm1$ )℃,每天用读数显微镜跟踪测量并记录裂纹扩展长度,当裂纹扩展速率小于 $10^{-9}$ m/s时,停止实验并根据式(1)计算出应力腐蚀断裂韧性界限值 $K_{ISCC}$ ,单位: $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。

表 1 2124 铝合金的化学组成

Table 1 Chemical composition of aluminum alloy 2124

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Sc	Ti	Al
Mass fraction/ %	0.20	0.30	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8	0.10	0.25	0.21	0.15	Bal

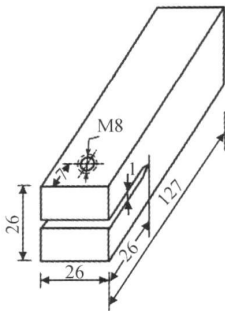


图 1 双悬臂梁试样图

Fig. 1 Schematic diagram of the sample DCB

$$K_{ISCC} = \frac{EVh[3h(\bar{a} + 0.6h)^2 + h^3]^{1/2}}{4[(\bar{a} + 0.6h)^3 + \bar{a}h^2]} \quad (1)$$

式中: $\bar{a}$ 为裂纹扩展的平均长度; $h$ 为试样的半

高; $V$ 加载前后加载中心线处裂纹的张开位移; $E$ 为弹性模量。

2 实验结果与分析

预制裂纹长度为3.178mm,加载后的张开位移 $V$ 为0.923mm,试样在35℃的3.5%的中性NaCl溶液中裂纹扩展长度如表2所示数据,实验进行7天时,裂纹扩展的平台速率为 $0.59\times10^{-9}$ m/s(见图2),停止实验打开试样测量裂纹扩展的平均长度 $\bar{a}$ (从螺孔中心位置到裂纹扩展结束的总长度,见图4)为32.31mm,根据公式(1)计算出材料的应力腐蚀断裂韧性界限值为 $24.5226\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 。对应力腐蚀裂纹扩展速率 $da/dt$ 和该点的应力强度因子 $K_I$ 作图,如图3所示。

表 2 实验测量裂纹扩展情况

Table 2 Crack propagating situation during stress corrosion cracking testing

Time/d	0	1	2	3	4	5	6	7
Crack length/mm	3.178	3.498	3.586	3.632	3.702	3.752	3.805	3.856

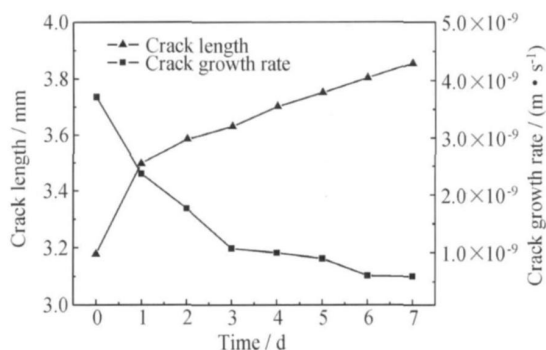


图2 裂纹长度及裂纹扩展随时间变化图

Fig. 2 Curves of crack length and crack growth vs time

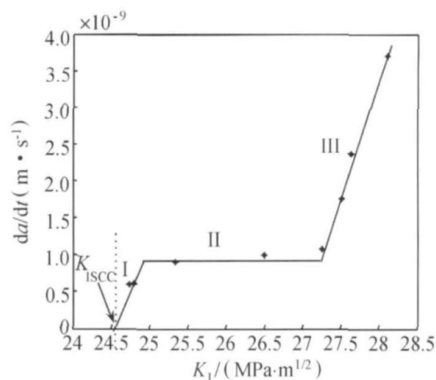
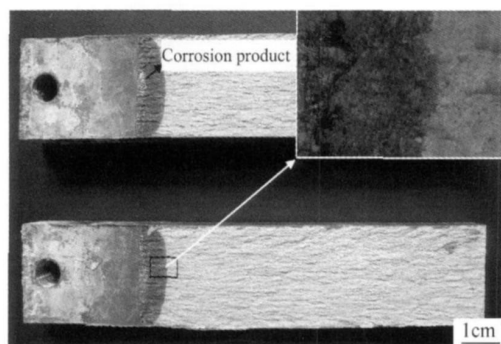
图3 应力腐蚀裂纹扩展速率  $da/dt$ - $K$  曲线图Fig. 3 Curve of stress corrosion crack growth rate  $da/dt$ - $K$ 

图4 2124 铝合金应力腐蚀开裂裂纹扩展形貌图

Fig. 4 Morphology of stress corrosion crack growth of aluminum alloy 2124

由图2可知,裂纹扩展长度随时间呈递增,第1天的扩展长度增加幅度最大,这是因为材料在浸泡时的溶液较新鲜,裂纹尖端受力也最大,介质很容易将裂尖腐蚀而引起裂纹的迅速扩展,裂纹扩展速率也最快,当裂纹扩展后,由加载中心位置到裂纹尖端的距离增加,其裂纹尖端的受力成比例下降(恒位移加载),裂纹扩展的速度随之放慢,随着腐蚀的进行,腐蚀产物堆积在裂纹尖端,逐渐地阻止了新鲜腐蚀介质与裂尖新界面的接触,裂纹扩展增幅降低,随着腐蚀时间的延长,腐

蚀产物堆积的楔入力促使了裂纹扩展加快(第4天裂纹扩展增幅增加),其速度随时间的延长而逐渐降低,最后接近一个较稳定的速率缓慢扩展直至裂纹扩展停止,此时的I型裂纹扩展强度因子为材料在腐蚀介质中扩展的最低值,即应力腐蚀断裂韧性界限值。

图3为应力腐蚀裂纹扩展速率  $da/dt$  与应力强度因子  $K_I$  曲线,该曲线可以分为三个阶段:第III阶段为应力腐蚀裂纹失稳扩展区,裂纹扩展速率与  $K_I$  呈线性变化;第II阶段的裂纹扩展速率与  $K_I$  无关,为应力腐蚀裂纹稳态扩展速率;第I阶段应力腐蚀裂纹扩展速率逐渐降低,同时  $K_I$  值也降低,图中虚线与横坐标交点为  $K_{ISCC}$  值。

将试样裂纹打开,断口形貌如图4所示,由于试样是S-L取样,其材料在轧制成型过程中晶粒沿L向分布,可见裂纹沿片状晶粒边界裂开后,断口成河流状。试验开始时,预制裂纹在腐蚀介质中反应较快,生成较多的腐蚀产物如图3黑色箭头所示,将裂纹扩展的尖端放大,可以发现应力腐蚀开裂的裂纹尖端没有发现腐蚀产物,由此可知,应力腐蚀开始进行时腐蚀产物大量堆积在预制裂纹处,反应进行很快,随着腐蚀产物的堆积,逐渐隔离了腐蚀介质与新鲜的裂纹尖端,同时可以发现腐蚀产物堆积的楔入力导致了裂纹尖端的继续向前扩展,裂纹尖端应力与腐蚀产物楔入力达到平衡时裂纹停止扩展。

### 3 灰色预测模型的建立

#### 3.1 灰色模型原理

灰色数列预测模型是以灰色系统概念为核心,利用部分信息已知部分信息未知的灰色系统推测未来的一种新兴数学预测模型系统,可较易建立小样本容量下的预测裂纹扩展长度的灰色模型(GM),为裂纹扩展预测提供了一种简易而可靠的新途径。由于它所需的数据量小,在工程预测中优势突出。灰色模型GM(1,1)是一种对含有不确定因素的系统进行预测的方法,通过对原始数据进行生成处理来寻找系统变动的规律,弱化数据的随机因素,生成较强规律性的数据,建立相应的微分方程,从而预测事物未来的发展趋势。

#### 3.2 灰色GM(1,1)模型的建立

裂纹在腐蚀介质中的扩展随时间变化序列为等时间序列,设时间序列  $X^{(0)}$  有  $n$  个观察值即原始非负时间序列为  $X^{(0)}(i) = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), \dots, X^{(0)}(n)\}$ 。

通过累加,  $X^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i X^{(0)}(j)$  生成新序列,即

$$X^{(1)}(i) = \{X^{(1)}(1), X^{(1)}(2), \dots, X^{(1)}(n)\} \quad (2)$$

则 GM (1, 1) 模型相应的微分方程为:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = \mu \tag{3}$$

其中:  $\alpha$  为待辨识参数, 亦称为发展灰数;  $\mu$  称为辨识内生变量, 亦称灰作用量。经推导, 可得到 (3) 式的白化响应式为:

$$X^{(1)}(i+1) = \left[ X^{(0)}(1) - \frac{\mu}{a} \right] e^{-ai} + \frac{\mu}{a}$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  (4)

此即腐蚀裂纹扩展模型的表达式。式中  $\mu$  和  $a$  可根据最小二乘法, 由下式确定:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \mu \end{pmatrix} = \hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y \tag{5}$$

其中:

$$B = \begin{vmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(2) + X^{(1)}(3)) & 1 \\ \dots\dots & \dots\dots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{vmatrix}$$

$$Y = \begin{vmatrix} X^{(1)}(2) \\ X^{(1)}(3) \\ \dots\dots \\ X^{(1)}(n) \end{vmatrix}$$

由式 (4) 得到的预测值可以经下式还原:

$$\hat{X}^{(0)}(i+1) = \hat{X}^{(1)}(i+1) - \hat{X}^{(1)}(i)$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  (6)

本研究应用残差检验、后验差检验和关联度检验的方法对灰色预测模型进行了检验。

3.3 应力腐蚀开裂的灰色预测

将实测裂纹扩展长度值(表 2) 作为 GM (1, 1) 预测模型程序的原始输入值, 运用 MATLAB 进行计算模拟, 得到表 3 所示预测模型的预测值和相关参数。预测值 1 是根据所有实测值进行模拟的结果, 预测值 2 是根据前 4 次测量值进行裂纹扩展情况的预测, 结果表明有较好的预测精度。从表中参数可以看出预测 2 中对前 4 次灰色预测精度高, 而模拟 1 的整体结果的误差小, 两种预测均能很好的描述应力腐蚀开裂的发展趋势。

表 3 2124 铝合金应力腐蚀裂纹扩展实测值与灰色预测值的比较

Table 3 Comparison between experimentally measured crack length and grey predicted ones of aluminum alloy 2124

Time/d	0	1	2	3	4	5	6	7
Measured data/mm	3.178	3.498	3.586	3.632	3.702	3.752	3.805	3.856
Predicted date by gray model 1/mm	3.1780	3.5179	3.5738	3.6306	3.6882	3.7468	3.8064	3.8668
Residual error e	0	0.0199	- 0.0122	- 0.0014	- 0.0138	- 0.0052	0.0014	0.0108
Predicted date by gray model 2/mm	3.1780	3.5052	3.5715	3.6390	3.7077	3.7778	3.8492	3.9219
Residual error e	0	0.0072	- 0.0145	0.0070	0.0057	0.0258	0.0442	0.0659

将应力腐蚀试样沿裂纹扩展方向打开, 测得的裂纹扩展平均长度与试样表面裂纹长度的比值, 经统计得到该材料在 3.5% 氯化钠溶液中的比值为 1.53, 计算得到材料应力腐蚀断裂韧性界限值的预测值。结合表 3 数据计算得, 预测值 1 的  $K_{ISCC}$  为 24 9859MPa ·

$m^{1/2}$ , 预测值 2 的  $K_{ISCC}$  为 24 8860MPa ·  $m^{1/2}$ 。从表 3 的数据可以看出, 尽管局部预测的最终预测值偏大, 但实测值与预测值的相对误差在工程许可范围以内, 具有较高的可靠性。

所得的预测值与实测值折线比较如图 5 所示。通

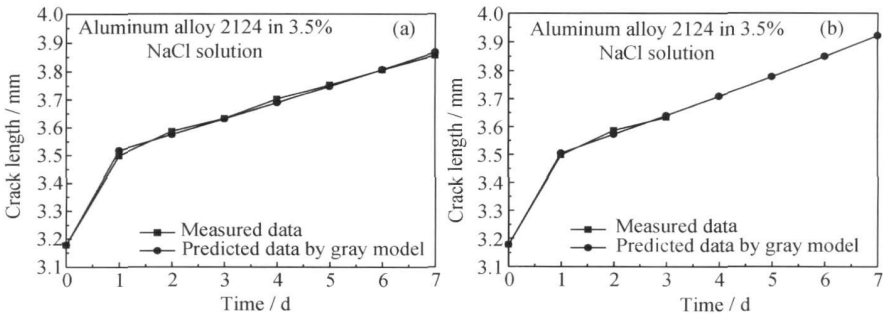


图 5 2124 铝合金应力腐蚀裂纹扩展长度的实测值与预测值的比较

(a) 实测值与模拟所有实测值; (b) 实测值与应用前四个实测值进行滚动预测的值

Fig. 5 Comparison between actual stress corrosion crack length and grey predicted ones of aluminum alloy 2124

(a) comparison of measured data and predicted; (b) based on the former 4 measured data and predicted date date by gray model predicted the whole cracking procedure by gray model

过对比残差值、后验差比的值(残差序列的均方差与原始数列的均方差的比值)、小误差概率值及关联度检验了模型的精度。由表 3 数据计算得到预测值的参数检验数据如表 4 所示。后验差比越小越好,小误差概率越大越好,根据一般模型精度等级划分,模型精度等级为好时  $c < 0.35$ ,  $P > 0.9$ 。从表 4 中的数据可以看出,模型的精度等级均为好,小误差概率均为 1,后验差比的值略有差异,模拟值 1 的后验差比的值  $c$  为 0.0521,而预测值 2 的值为 0.0498,预测 2 的结果较好,关联度值大,也充分说明了预测值 2 的结果与实测值更接近,少数数据点的多点预测具有较高的预测精度。这是因为,一般说来,裂纹某时刻的长度与接近时刻裂纹长度的关联度较大,距离的时间越长,关联越不明显,从而使预测值受到影响。

表 4 灰色预测值的参数检验

Table 4 Parametric test of grey predicted value

Time/d	Predicted date by	Predicted date by
	gray model 1	gray model 2
Posterior difference ratio $c$	0.0521	0.0498
Small error probability $p$	1	1
Correlation $w$	0.7271	0.7815

## 4 结论

(1) 建立了高强度铝合金 2124 在 3.5% 氯化钠中性溶液中应力腐蚀裂纹扩展灰色 GM(1,1) 预测模型,预测结果经检验表明具有较高的预测精度,少数数据点的多数据裂纹扩展预测能更好地预测未知的实际情况。

(2) 裂纹长度以及裂纹扩展随时间的变化规律表明,腐蚀开始时裂纹扩展速率较快,随后逐渐降低,2124 铝合金在 3.5% 氯化钠腐蚀介质中的应力腐蚀断裂韧性界限值为  $K_{ISCC} = 24.5226 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ,裂纹扩展的平台速度为  $5.9 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 。

(3) 断口形貌表明,应力腐蚀开裂为河流状的沿晶断裂,试验开始腐蚀速度较快,裂纹扩展较快;随着腐蚀产物在裂纹尖端的集聚,裂纹扩展速度下降。腐蚀产物堆积的楔入力导致了裂尖的继续扩展,当其与裂

纹尖端应力平衡时裂纹停止扩展。

## 参考文献

- [1] FILATOV Y A, YELAGIN V I, ZAKHAROV V V. New Al-Mg-Sc alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 280: 97-101.
- [2] 陶斌武,王克然,刘建华,等. Sc 对 Al-6Mg-Zr 铝合金在模拟海水中耐蚀性能的影响研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2005, 34(9): 1485-1488.
- [3] LIN J C, LIAO H L, JEHNG W D, et al. Effect of heat treatments on the tensile strength and SCG-resistance of AA7050 in an alkaline saline solution [J]. Corrosion Science, 2006, 48(10): 3139-3156.
- [4] SANCHEZ J, FULLEA J, ANDRADE C, et al. Stress corrosion cracking mechanism of prestressing steels in bicarbonate solutions [J]. Corrosion Science, 2007, 49(1): 4069-4080.
- [5] 魏群义,彭晓东,谢卫东,等. 超高强度铝合金的应力腐蚀开裂[J]. 机械工程材料, 2003, 27(6): 8-10.
- [6] LIU X D, FRANKEL G S, ZOOFFAN B, et al. In-situ observation of intergranular stresscorrosion cracking in AA2024-T3 under constant load conditions [J]. Corrosion Science, 2007, 49(1): 139-148.
- [7] LU Z P, SHOJI TETSU O, TAKEDA YOICHI, et al. The dependency of the crack growth rate on the loading pattern and temperature in stress corrosion cracking of strain-hardened 316L stainless steels in a simulated BWR environment [J]. Corrosion Science, 2008, 50(31): 698-712.
- [8] 徐晖,谢正文,孔凡玉. 疲劳裂纹扩展预测模型及其应用[J]. 中国计量学院学报, 2008, 19(3): 229-232.
- [9] 刘延利,钟群鹏,王宇魁. 铝合金预腐蚀与疲劳性能灰色模型研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(2): 129-132.
- [10] 王海涛,韩恩厚,柯伟. 碳钢、低合金钢大气腐蚀的灰色模型预测及灰色关联分析[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(4): 278-280.
- [11] 刘武,季寿红,兰志林,等. 灰色 GM(1,1) 模型在管道腐蚀预测中的应用[J]. 管道技术与设备, 2008, 15(5): 52-55.

收稿日期: 2010-01-18; 修订日期: 2010-06-25

作者简介: 刘建华(1957—),男,教授,博导,理学博士,长期从事电化学、材料物理与化学、材料腐蚀与防护、隐身材料等方面的研究,联系地址: 北京航空航天大学材料科学与工程学院 103 教研室(100191), E-mail: liujh@buaa.edu.cn

(上接第 5 页)

- [8] 吕申峰,李季,夏举学. 国内外预合金粉末在金刚石工具中的应用[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2006, (4): 81-84.
- [9] 闵乃本. 晶体生长的物理基础[M]. 上海: 上海科技出版社, 1982.

基金项目: 广西科学基金资助(桂科青 0832089); 广西科技开发计划资

助(桂科攻 0992001-10); 广西超硬材料研究开发重点实验室基金资助(2009-K-02); 广西科技基础条件平台建设项目计划资助(08-05-01B)

收稿日期: 2009-11-20; 修订日期: 2010-07-25

作者简介: 谢志刚(1967—),男,教授级高工,博士生,主要从事超硬材料研究,联系地址: 桂林矿产地质研究院国家特种矿物材料工程技术研究中心(541004), E-mail: yxyxl@163.com.