(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 110489848 B
(45)授权公告日 2020.12.11

(21)申请号 201910740873.9

(22)申请日 2019.08.12

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 110489848 A

(43)申请公布日 2019.11.22

(73)专利权人 武汉钢铁有限公司
地址 430083 湖北省武汉市青山区厂前2号门内

(72)发明人 刘冬 杜丽影 费金凡 孔君华 薛欢 尚伦

(74)专利代理机构 湖北武汉永嘉专利代理有限公司 42102
代理人 钟锋 王杰

(51)Int.Cl.
G06F 30/20(2020.01)
G06F 119/14(2020.01)

(56)对比文件
CN 109670278 A,2019.04.23
CN 105067457 A,2015.11.18
CN 105021473 A,2015.11.04

审查员 于湃

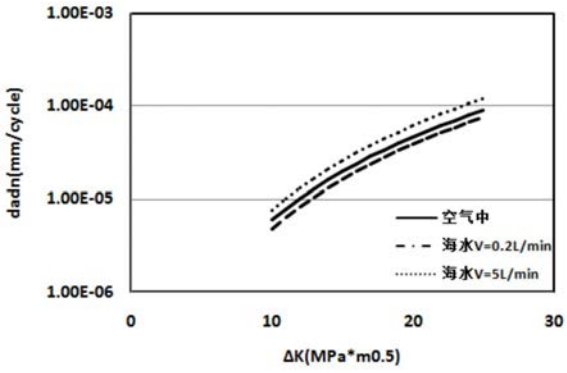
权利要求书2页 说明书7页 附图3页

(54)发明名称

一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法

(57)摘要

本发明涉及一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法，该方法通过空气介质中裂纹扩展速率试验，和少量不同流速裂纹扩展速率试验，构造数学模型，用于预测各种不同海水流速条件下的腐蚀疲劳裂纹扩展速率。本发明建立的预测模型可依据空气介质中测试裂纹扩展速率推测材料在不同海水流速下腐蚀疲劳裂纹扩展速率，不用大量开展不同速率的海水流速下腐蚀疲劳试验，试验周期大大缩短；海水腐蚀疲劳试验相对空气中疲劳试验测试成本成倍增加，通过预测模型预测腐蚀环境下疲劳性能可以大大减少腐蚀疲劳试验经费投入；采用归一化方法通过两种极限流速下海水腐蚀疲劳试验建立数学模型在预测不同的海水流速下裂纹扩展速率时可靠性高，预测结果准确。



CN 110489848 B

1.一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

S1、开展1#试样在空气介质中的裂纹扩展速率试验,得到裂纹扩展速率dadN与裂纹尖端应力场幅值ΔK曲线,拟合中速区Paris公式:

$dadN_{air}=C(\Delta K)^{n}$ (1)

其中:C为拟合曲线系数,n为拟合曲线指数;

S2、在常规疲劳试验机上安装海水腐蚀环境箱,提供循环流动海水,指定加载频率,控制载荷,海水温度,对2#试样和3#试样分别开展最大海水流速V_1和最小海水流速V_2下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验;

S3、将2#试样和3#试样测试结果拟合成dadN-ΔK曲线,得到中速区Paris公式:

$$dadN_{cor}^{V_1}=C_1(\Delta K)^{n_1} \quad (2)$$

$$dadN_{cor}^{V_2}=C_2(\Delta K)^{n_2} \quad (3)$$

S4、将公式(1)、(2)、(3)对应曲线绘制于同一坐标系下,确认流速对裂纹扩展的影响是两面的:相对空气介质中测试结果,低流速抑制裂纹扩展,高流速加速裂纹扩展,即存在一个转变点流速V_t,该流速下与空气介质中结果基本一致,低于转变点流速V_t抑制裂纹扩展,高于转变点流速V_t加速裂纹扩展;

S5、假定海水腐蚀疲劳裂纹扩展过程中存在流速影响因子F(V),流速影响因子F(V)定义为不同流速下裂纹扩展速率与空气介质中裂纹扩展速率的加速比例,流速影响因子F(V)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK呈线性关系,表达式为:

$F(V)=a\Delta K+b$ (5)

其中,a是加速系数,b是加速常数;

S6、依据步骤S5中流速影响因子F(V)的模型,将不同海水流速下的裂纹扩展速率表示为:

$$dadN_{cor}^{V_i}=C_i(\Delta K)^{n_i}=\big(1+F(V)\big)dadN_{air} \quad (8)$$

式中,$V=V_i$,V_i表示被预测流速。

2.根据权利要求1所述的不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法,其特征在于,步骤S1之前,还包括如下步骤:针对某一被测材料,加工拉伸试样N1件,通过拉伸试验,获取材料的基本力学性能参数,包括屈服强度、抗拉强度、弹性模量和延伸率,材料的基本力学性能参数取N1个拉伸试样各参数的平均值作为疲劳试验输入参数;加工标准裂纹扩展速率试样N2件,N2≥3,包括1#、2#、3#试样,测量各试样的基本参数,包括长度、宽度、厚度、缺口深度和跨距。

3.根据权利要求1所述的不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法,其特征在于,步骤S1中,1#试样在空气介质中的裂纹扩展速率试验按照国家标准GB/T6398-2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》开展,步骤S3中,2#试样和3#试样测试结果拟合成dadN-ΔK曲线按照国家标准GB/T6398-2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》进行。

4.根据权利要求1所述的不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法,其特征在于,步骤S5中,流速影响因子F(V)的计算方法为:

$$F(V)=\left(\frac{dadN_{cor}^{V_i}}{dadN_{air}}-1\right)\times 100\% \qquad (4)$$

式中，$V=V_i$，V_i表示被预测流速，$dadN_{air}$是空气介质中的裂纹扩展速率，$dadN_{cor}^{V_i}$是不同流速下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率。

5.根据权利要求4所述的不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法，其特征在于，转变点流速V_t的计算方法为：分别计算不同应力场强度因子ΔK取几个特定值时的流速影响因子F(V)，统计两种极限流速V_1和V_2下的流速影响因子平均值$\overline{F(V_1)}$和$\overline{F(V_2)}$，建立流速影响因子平均值$\overline{F(V)}$与流速V的函数关系；

$$\overline{F(V)}=cV+d \qquad (6)$$

当流速影响因子平均值$\overline{F(V)}=0$时对应流速V即为转变点流速V_t。

6.根据权利要求1所述的不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法，其特征在于，步骤S5中，加速系数a的计算方法为：分别拟合两种极限流速下流速影响因子F(V)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK曲线，两条曲线基本平行，斜率一致，即加速系数a基本不变，为一常数，则加速系数a为任一流速下流速影响因子F(V)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK曲线的斜率；

加速常数b与实时流速V及转变点流速V_t有关，表达式为：

$b=k(V-V_t)+m$ (7)

其中，k为转变点系数，m转变点常数；k和m通过两种极限流速下的加速常数b与当前流速减转变点流速值$(V-V_t)$线性拟合得到。

一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及金属材料力学性能测试技术领域，具体涉及一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法。

背景技术

[0002] 疲劳裂纹扩展速率试验是评价金属材料疲劳性能的一项重要试验。在海水腐蚀环境下，材料疲劳裂纹扩展将加速，因此考察腐蚀环境下材料的疲劳裂纹扩展速率对于耐蚀钢品种更具有针对性。但是，海水腐蚀环境中又存在很多不断变化的试验条件，譬如：载荷谱、温度、频率、流速、盐度、PH值等。对于不同水域的海水工程结构的服役条件是变化的，测试不同条件下的腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验周期长，且价格相对空气环境下成倍增长，如果可以通过测试空气中疲劳性能或者少量一定条件下的腐蚀疲劳性能去预测复杂的不同条件下的腐蚀疲劳性能，这对于产品研发和工程结构设计来说意义十分重大。

[0003] 发明专利CN201310227157.3《一种疲劳裂纹扩展速率归一化预测方法》提出了一种基于能量释放率的疲劳裂纹扩展速率归一化预测方法。该发明通过预设数学模型并依靠常见的设定金属材料所获参数进行反推补充的方法，最终依靠由R＝i下的疲劳裂纹扩展速率曲线实现了对待测金属材料的不同应力比R≠i下的数据进行归一化预测，以能量作为控制参量对不同类型应力强度因子进行组合，其物理意义较为明确，形式也较为简单，并且对应力比归一化系数进行了统一表述，具有方法简单、适用范围广等特点。

[0004] 发明专利CN201410020016.9《一种预测不同应力比下疲劳裂纹扩展门槛值的方法》提出了一种预测不同应力比下疲劳裂纹扩展门槛值的方法，由材料在已知应力比下疲劳裂纹扩展门槛值的测试数据，即疲劳裂纹扩展速率da/dN和应力强度因子幅ΔK之间的关系，求得在双对数坐标上疲劳裂纹扩展稳定扩展区和近门槛区数据点的直线拟合斜率和两者交界点，根据不同应力比下稳定扩展区和近门槛区交界点处最大应力强度因子K_{max}＝ΔK/R相等的条件进行计算，能够预测未知应力比R的疲劳裂纹扩展门槛值，所述R＞0。

[0005] 以上两种方法分别通过某一单一应力比下测试的裂纹扩展速率和门槛值，实现了对其他未知应力比R下裂纹扩展速率和门槛值的预测，有具体数学模型，并通过实验对比了不同应力比R下实测结果与预测结果的差异，验证了预测模型的准确性。但以上两种模型仅针对空气介质中的结果，对于腐蚀环境下是否适用还需要加入腐蚀条件对模型进行修正。另外该模型仅针对不同应力比R，对于其他试验条件变化的裂纹扩展速率预测没有指导性。

[0006] 开展不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率测试的难点在于：1)海水流速范围宽泛，测试不同流速下的腐蚀疲劳裂纹扩展速率需要开展大量的不同流速下的系列试验，总体试验周期长；2)相对空气介质环境下的裂纹扩展速率试验，海水腐蚀环境下测试价格成倍增长，且要考虑系列流速，测试费用十分昂贵；3)如考虑采用归一化方法通过少量海水腐蚀疲劳试验建立数学模型来预测不同的海水流速下裂纹扩展速率需要保证数学模型的可靠性及预测结果的准确性。

发明内容

[0007] 本发明要解决的技术问题在于针对上述现有技术存在的不足，提供一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法，能通过空气介质中裂纹扩展速率试验，和少量不同流速裂纹扩展速率试验，构造数学模型，用于预测各种不同海水流速条件下的腐蚀疲劳裂纹扩展速率，能有效解决以上难点。

[0008] 本发明为解决上述提出的技术问题所采用的技术方案为：

[0009] 一种不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法，具体包括以下步骤：

[0010] 第一步、针对某一被测材料，加工拉伸试样N1件，通过拉伸试验，获取材料的基本力学性能参数，包括屈服强度、抗拉强度、弹性模量和延伸率，材料的基本力学性能参数取N1个拉伸试样各参数的平均值作为疲劳试验输入参数；加工标准裂纹扩展速率试样N2件，N2≥3，包括1#、2#、3#试样，测量各试样的基本参数，包括长度、宽度、厚度、缺口深度和跨距；

[0011] 第二步、开展1#试样在空气介质中的裂纹扩展速率试验，得到裂纹扩展速率dadN与裂纹尖端应力场幅值ΔK曲线，拟合中速区Paris公式：

[0012] $dadN_{air}=C(\Delta K)^{n}$ (1)

[0013] 其中：C为拟合曲线系数，n为拟合曲线指数；

[0014] 第三步、在常规疲劳试验机上安装海水腐蚀环境箱，提供循环流动海水，指定加载频率，控制载荷，海水温度，对2#试样和3#试样分别开展最大海水流速V_1和最小海水流速V_2下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验；

[0015] 第四步、将2#试样和3#试样测试结果拟合成dadN-ΔK曲线，得到中速区Paris公式：

[0016] $$\mathrm{dadN}_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{V1}}=\mathrm{C}_1(\Delta\mathrm{K})^{n_1} \qquad (2)$$

[0017] $$\mathrm{dadN}_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{V2}}=\mathrm{C}_2(\Delta\mathrm{K})^{n_2} \qquad (3)$$

[0018] 第五步、将公式(1)、(2)、(3)对应曲线绘制于同一坐标系下，确认流速对裂纹扩展的影响是两面的：相对空气介质中测试结果，低流速抑制裂纹扩展，高流速加速裂纹扩展，即存在一个转变点流速V_t，该流速下与空气介质中结果基本一致，低于转变点流速V_t抑制裂纹扩展，高于转变点流速V_t加速裂纹扩展；

[0019] 第六步、假定海水腐蚀疲劳裂纹扩展过程中存在流速影响因子F(v)，流速影响因子F(v)定义为不同流速下裂纹扩展速率与空气介质中裂纹扩展速率的加速比例，计算公式为：

[0020] $$\mathrm{F(v)}=\left(\frac{\mathrm{dadN}_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{Vi}}}{\mathrm{dadN}_{\mathrm{air}}}-1\right)\times 100\% \qquad (4)$$

[0021] 式中，$\mathrm{dadN}_{\mathrm{cor}}^{\mathrm{Vi}}$是空气介质中的裂纹扩展速率，$dadN_{air}$是不同流速下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率。

[0022] 流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK呈线性关系，表达式为：

[0023] $F(v)=a\Delta K+b$ (5)

[0024] 其中，a是加速系数，b是加速常数。

[0025] 分别计算不同应力场强度因子△K取几个特定值时(譬如10MPa.$m^{0.5}$，15MPa.$m^{0.5}$，

20MPa.$m^{0.5}$,25MPa.$m^{0.5}$)的流速影响因子F(v),统计两种极限流速V_1和V_2下的流速影响因子平均值$\overline{F(v_1)}$和$\overline{F(v_2)}$,建立流速影响因子平均值$\overline{F(v)}$与流速V的函数关系;

[0026] $$\overline{F(v)} = cV + d \qquad (6)$$

[0027] 当流速影响因子平均值$\overline{F(v)} = 0$时对应流速V即为转变点流速V_t。

[0028] 分别拟合两种极限流速下流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK曲线可以发现,对于同一钢种不同流速下拟合曲线基本平行,斜率一致,即加速系数a基本不变,为一常数,则加速系数a为任一流速下流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK曲线的斜率。

[0029] 但加速常数b与实时流速V及转变点流速V_t有关,表达式为:

[0030] $b=k(V-V_t)+m$ (7)

[0031] 其中,k为转变点系数,m转变点常数;k和m通过两种极限流速下的加速常数b与当前流速减转变点流速值$(V-V_t)$线性拟合得到。

[0032] 第七步、依据第六步中流速影响因子F(v)的模型,将不同海水流速下的裂纹扩展速率表示为:

[0033] $$dadN_{cor}^{Vi} = C_i(\Delta K)^{n_i} = \big(1 + F(V)\big)dadN_{air} \qquad (8)$$

[0034] 第八步、将公式(5)和公式(7)带入公式(8)中,得到依据空气介质中裂纹扩展速率试验结果预测不同海水流速下海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率的数学模型:

[0035] $$dadN_{cor}^{Vi} = (1 + a\Delta K + k(V_i - V_t) + m)C(\Delta K)^n \qquad (9)$$

[0036] 可展开为两项:

[0037] $$dadN_{cor}^{Vi} = (k(V_i - V_t) + m + 1)C(\Delta K)^n + aC(\Delta K)^{n+1} \qquad (10)$$

[0038] 其中:V_i为被预测流速。

[0039] 本发明的有益效果在于:

[0040] 1)该发明专利建立的预测模型可依据空气介质中测试裂纹扩展速率推测材料在不同海水流速下腐蚀疲劳裂纹扩展速率,不用大量开展不同速率的海水流速下腐蚀疲劳试验,试验周期大大缩短。

[0041] 2)海水腐蚀疲劳试验相对空气中疲劳试验测试成本成倍增加,通过预测模型预测腐蚀环境下疲劳性能可以大大减少腐蚀疲劳试验经费投入。

[0042] 3)采用归一化方法通过两种极限流速下海水腐蚀疲劳试验建立数学模型在预测不同的海水流速下裂纹扩展速率时可靠性高,预测结果准确。

附图说明

[0043] 下面将结合附图及实施例对本发明作进一步说明,附图中:

[0044] 图1是本发明实施例中海水两种流速与空气中疲劳裂纹扩展速率曲线对比图;

[0045] 图2是本发明实施例中流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场幅值ΔK关系曲线图;

[0046] 图3是本发明实施例中流速影响因子平均值与流速关系示意图;

[0047] 图4是本发明实施例中加速常数和当前流速减流速转变点差值关系示意图;

[0048] 图5是本发明实施例中流速V＝1L/min实测曲线与预测曲线对比图；

[0049] 图6是本发明实施例中流速V＝3L/min实测曲线与预测曲线对比图。

具体实施方式

[0050] 为了对本发明的技术特征、目的和效果有更加清楚的理解，现对照附图详细说明本发明的具体实施方式。

[0051] 选取海工钢D36作为验证对象，采用本发明不同海水流速腐蚀疲劳裂纹扩展速率预测方法的具体实施过程如下：

[0052] 1、加工3件拉伸圆棒试样，测试常规力学性能如表1所示。取各参数平均值作为疲劳试验输入参数。

[0053] 表1海工钢D36拉伸性能

[0054]

编号	弹性模量 E/GPa	屈服强度 Rp0.2/MPa	抗拉强度 Rm/MPa	延伸率 A/%
S01	210	407	557	34.5
S02	209	400	548	32.5
S03	194	392	534	31.0
平均值	204	400	546	32.5

[0055] 2、加工三点弯曲SEB试样5件，分别测试长度、宽度、厚度、缺口深度等基本参数，如表2所示。

[0056] 表2疲劳裂纹扩展速率试验试样参数

[0057]

编号	长度 L /mm	宽度 W /mm	厚度 B /mm	缺口深度 a_n /mm	跨距 S /mm
1#	199.6	39.98	19.98	17.12	160
2#	199.8	39.89	20.02	17.25	160
3#	199.5	39.95	20.03	17.20	160
4#	200.3	39.96	20.00	17.12	160
5#	200.1	39.95	20.01	17.19	160

[0058] 3、按照国家标准GB/T6398-2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》开展1#试样在空气介质中的裂纹扩展速率试验，得到裂纹扩展速率dadN与裂纹尖端应力场幅值ΔK曲线，拟合中速区Paris公式：

[0059] $dadN_{air}=6.708E-09(\Delta K)^{2.951}$ (11)

[0060] 即，C＝6.708E-09，n＝2.951。

[0061] 4、在常规疲劳试验机上安装海水腐蚀环境箱，提供循环流动海水，指定加载频率，控制载荷，海水温度，对2#试样和3#试样分别开展最大海水流速V_1＝5L/min和最小海水流速V_2＝0.2L/min下的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验。

[0062] 5、按照国家标准GB/T6398-2017《金属材料疲劳试验疲劳裂纹扩展方法》将2#试样和3#试样测试结果拟合成dadN-ΔK曲线，得到中速区Paris公式：

[0063] $$dadN_{cor}^{V1}=7.549E-09(\Delta K)^{3.006} \quad (12)$$

[0064] $$dadN_{cor}^{V2}=4.351E-09(\Delta K)^{3.019} \quad (13)$$

[0065] 即，C_1＝7.549E-09，n_1＝3.006；C_2＝4.351E-09，n_2＝3.019。

[0066] 6、将公式(11)、(12)、(13)对应曲线绘制于同一坐标系下，如图1所示。可以确认流速对裂纹扩展的影响是两面的：相对空气介质中测试结果，低流速抑制裂纹扩展，高流速加速裂纹扩展。也就是说存在一个转变点流速V_t，该流速下与空气介质中结果基本一致，低于转变点流速V_t抑制裂纹扩展，高于转变点流速V_t加速裂纹扩展。

[0067] 7、假定海水腐蚀疲劳裂纹扩展过程中存在流速影响因子F(v)，流速影响因子F(v)定义为不同流速下裂纹扩展速率与空气介质中裂纹扩展速率的加速比例，计算公式为：

[0068] $$F(v)=\left(\frac{dadN_{cor}^{Vi}}{dadN_{air}}-1\right)\times 100\% \quad (4)$$

[0069] 计算比例计算结果如表3所示，其中裂纹扩展速率单位1m/GC＝1×10^6mm/cycle。

[0070] 表3不同海水流速对应扩展速率对比统计表

[0071]

ΔK $MPa\bullet\sqrt{m}$	dadN m/GC			流速影响因子F(v)	
	V=5L/min	V=0.2L/min	空气中	V=5L/min	V=0.2L/min
25	120.25	76.09	89.52	0.343	-0.150
20	61.49	38.66	46.34	0.327	-0.166
15	25.89	16.14	19.83	0.306	-0.186
10	7.65	4.72	5.99	0.278	-0.211
平均值				0.313	-0.178

[0072] 流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场幅值ΔK关系的关系如图2所示，可以观察到两种极限流速下，流速影响因子F(v)与裂纹尖端应力场强度因子幅值ΔK呈线性关系，表达式应为：

[0073] $F(v)=a\Delta K+b$ (5)

[0074] 通过图2可得，两种极限流速下流速影响因子F(v)与应力场幅值ΔK关系均为线性，且基本平行，只是截距不同，且有：

[0075] $a=0.004$，$b_1=0.237$(V=5L/min)，$b_2=-0.249$(V=0.2L/min)。

[0076] 8、依据表3中统计的流速影响因子平均值与对应流速的关系绘制曲线如图3所示。其中，流速影响因子平均值表达式具体为：

[0077] $$\overline{F(v)}=0.102V-0.198 \quad (14)$$

[0078] 其中，$\overline{F(v)}$为流速影响因子平均值，V为对应流速。当$\overline{F(v)}$为零时，可以求得转变点速率V_t为1.94L/min。

[0079] 9、以当前流速减流速转变点差值$V-V_t$为变量，拟合加速常数b的函数，数据统计见表4，拟合曲线如图4所示。可以求得加速常数表达式为：

[0080] $b=0.101(V-V_t)-0.072$ (15)

[0081] 表4不同流速下加速常数与当前流速减流速转变点差值$V-V_t$统计

[0082]

流速V L /min	当前流速减流速转变点差值$V-V_t$ L /min	加速常数 b
0.2	-1.74	-0.249
5	3.06	0.237

[0083] 因此，海水腐蚀疲劳裂纹扩展过程中存在的流速影响因子F(v)的表达式应为：

[0084] $F(v)=0.004\Delta K+0.101(V-V_t)-0.072$ (16)

[0085] 那么，预测模型相应为：

[0086] $$dadN_{cor}^{Vi}=(0.004\Delta K+0.101(V-V_t)+0.928)dadN_{air} \quad (17)$$

[0087] 10、由于修正系数项中有变量ΔK存在，而空气中裂纹扩展速率模型$dadN_{air}=C(\Delta K)^n$同样存在变量ΔK，整理后预测模型变为：

[0088] $$dadN_{cor}^{Vi}=(0.101(V-V_t)+0.928)C\Delta K^n+0.004C\Delta K^{n+1} \quad (18)$$

[0089] 其中，$V_t=1.94$L/min，C=6.708E-09，n=2.951。

[0090] 为验证公式(18)对应预测模型的准确性，指定4#试样和5#试样分别测试海水流速V=1L/min和V=3L/min的海水腐蚀疲劳裂纹扩展速率，实测结果拟合曲线方程为：

[0091] V=1L/min实测：$$dadN_{cor}^{Vi=1}=4.869E-09(\Delta K)^{3.053} \quad (19)$$

[0092] V=3L/min实测：$$dadN_{cor}^{Vi=3}=8.405E-09(\Delta K)^{2.897} \quad (20)$$

[0093] 将流速V=1L/min和V=3L/min分别代入公式(18)得到预测曲线方程为：

[0094] V=1L/min预测：

[0095] $$dadN_{cor}^{Vi=1}=5.588E-09(\Delta K)^{2.951}+2.683E-11(\Delta K)^{3.951} \quad (21)$$

[0096] V＝3L/min预测：

[0097] $$dadN_{cor}^{Vi=3} = 6.943E-09(\Delta K)^{2.951} + 2.683E-11(\Delta K)^{3.951} \quad (22)$$

[0098] 两种流速下，实测数据分布、实测数据拟合幂函数以及预测曲线如图5和图6所示。预测曲线与实测数据拟合幂函数曲线吻合性很高。根据公式(19)-公式(22)，分别计算不同裂纹尖端应力场条件下裂纹扩展速率实测值与预测值，如表4所示。定量对比结果显示，预测值相对实测值标准偏差在10％以内。

[0099] 表4不同流速扩展速率实测值与预测值对比验证统计表

[0100]

ΔK $MPa\bullet\sqrt{m}$	dadN m/GC			dadN m/GC		
	V=3L/min	V=3L/min	相对标准偏差/%	V=1L/min	V=1L/min	相对标准偏差/%
	实测值	预测值		实测值	预测值	
10	6.63	6.44	-2.84	5.50	5.23	-4.90
15	21.46	21.71	1.16	18.97	17.71	-6.66
20	49.39	51.67	4.62	45.65	42.31	-7.33
25	94.27	101.61	7.78	90.23	83.52	-7.43

[0101] 本说明书中各个实施例采用递进的方式描述，每个实施例重点说明的都是与其他实施例的不同之处，各个实施例之间相同相似部分互相参见即可。

[0102] 上面结合附图对本发明的实施例进行了描述，但是本发明并不局限于上述的具体实施方式，上述的具体实施方式仅仅是示意性的，而不是限制性的，本领域的普通技术人员在本发明的启示下，在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下，还可做出很多形式，这些均属于本发明的保护之内。

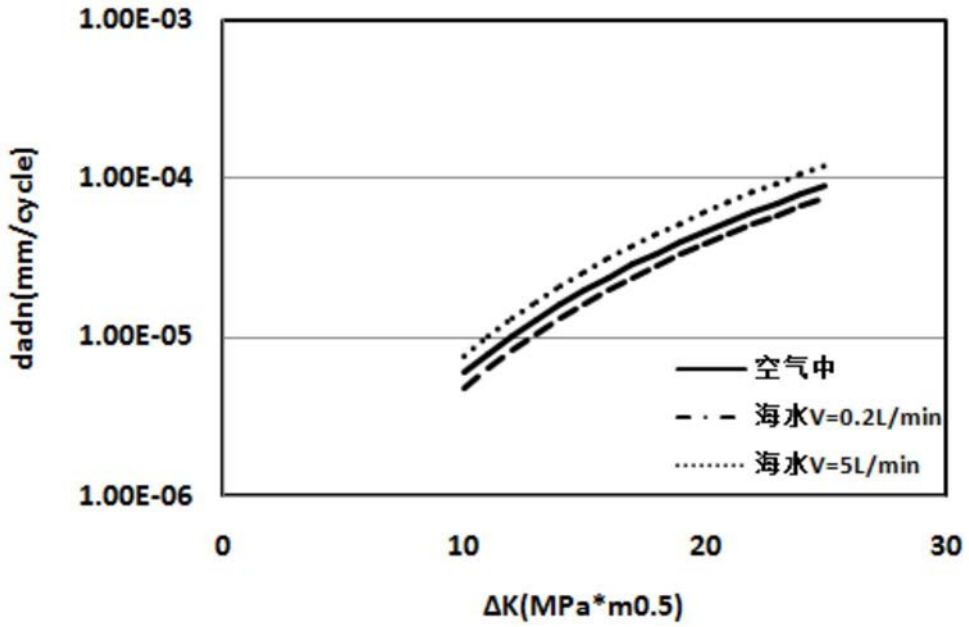

1.00E-03
1.00E-04
1.00E-05
1.00E-06
dadn(mm/cycle)
0
10
20
30
ΔK(MPa*m0.5)
空气中
海水V=0.2L/min
海水V=5L/min

图1

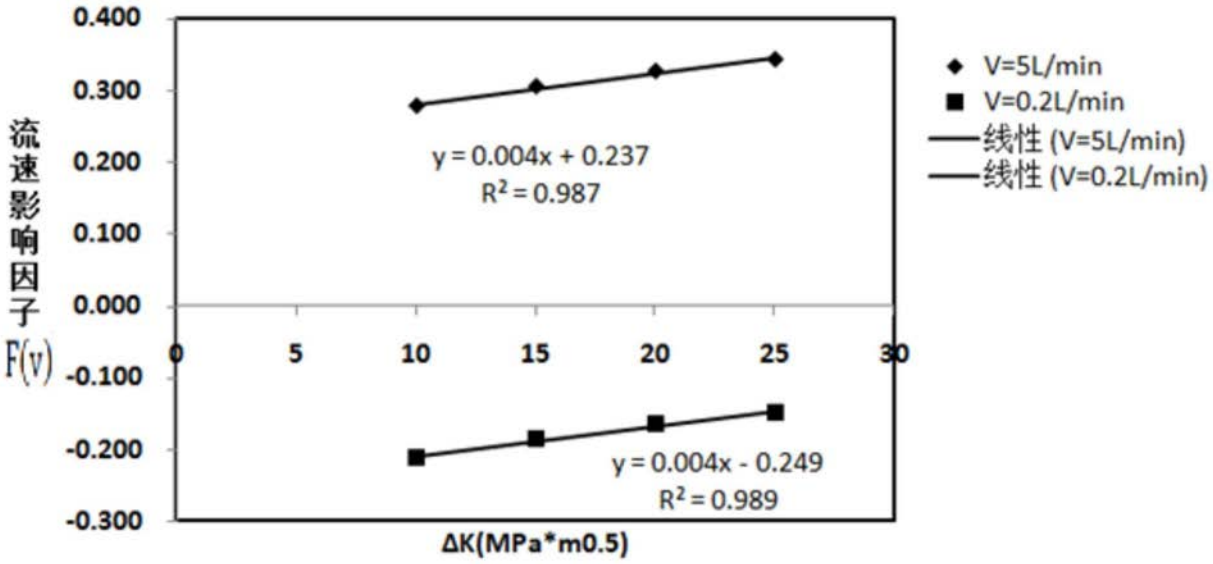

0.400
0.300
0.200
0.100
0.000
-0.100
-0.200
-0.300
流速影响因子 F(v)
0
5
10
15
20
25
30
ΔK(MPa*m0.5)
y = 0.004x + 0.237
R² = 0.987
y = 0.004x - 0.249
R² = 0.989
V=5L/min
V=0.2L/min
线性 (V=5L/min)
线性 (V=0.2L/min)

图2

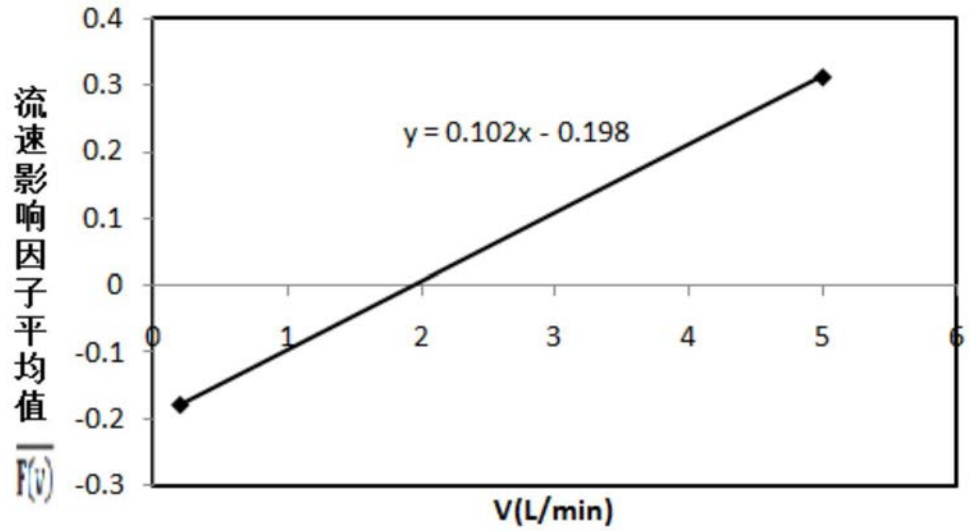

流速影响因子平均值 $\overline{F(v)}$
y = 0.102x - 0.198
V(L/min)
0.4
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
0
1
2
3
4
5
6

图3

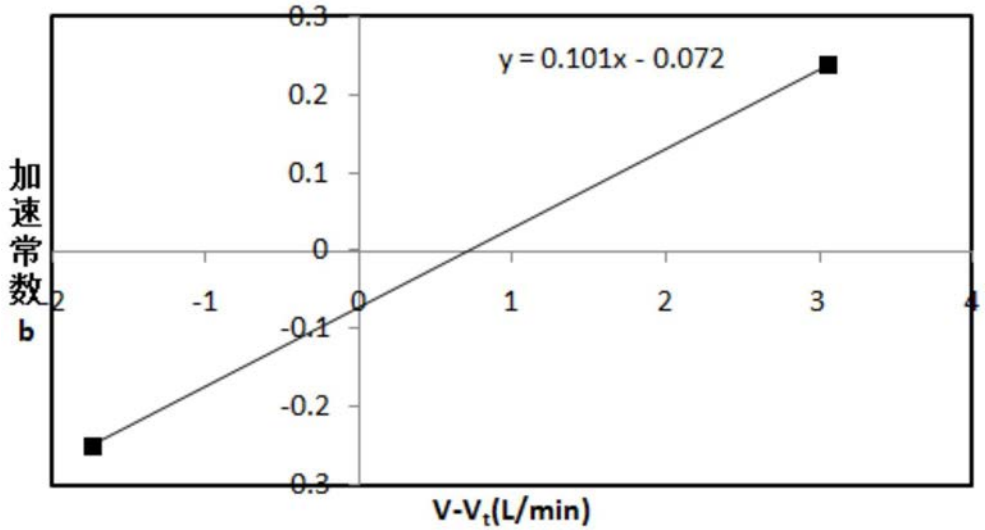

加速常数 b
y = 0.101x - 0.072
V-Vt(L/min)
0.3
0.2
0.1
0
-0.1
-0.2
-0.3
-2
-1
0
1
2
3
4

图4

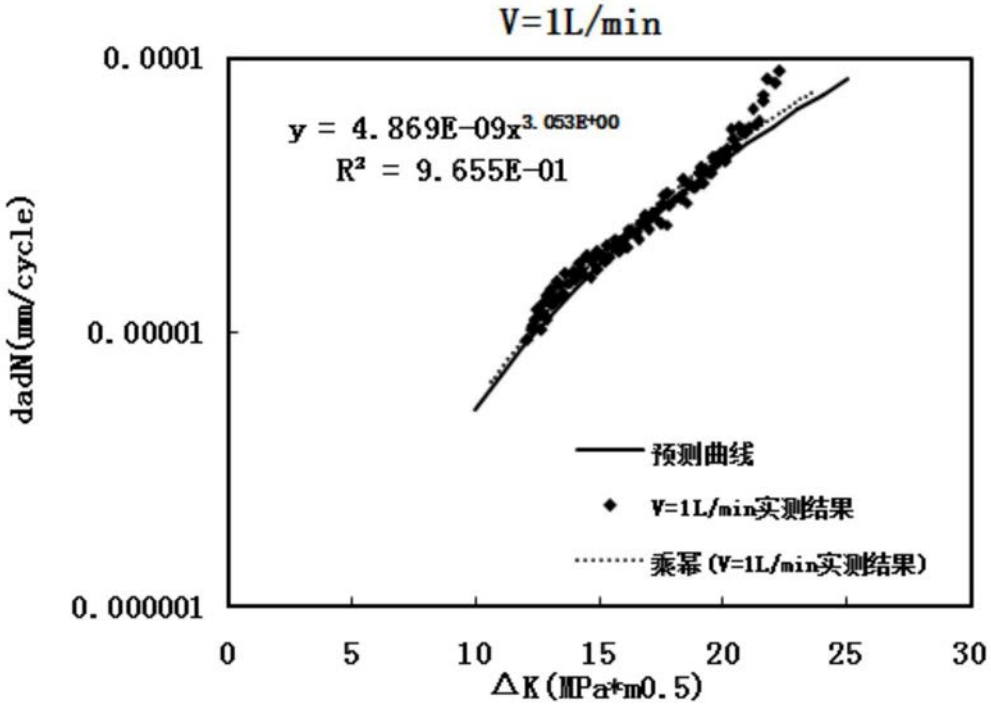

V=1L/min
0.0001
0.00001
0.000001
y = 4.869E-09x^3.053E+00
R² = 9.655E-01
dadN(mm/cycle)
预测曲线
V=1L/min实测结果
乘幂(V=1L/min实测结果)
0
5
10
15
20
25
30
ΔK(MPa*m0.5)

图5

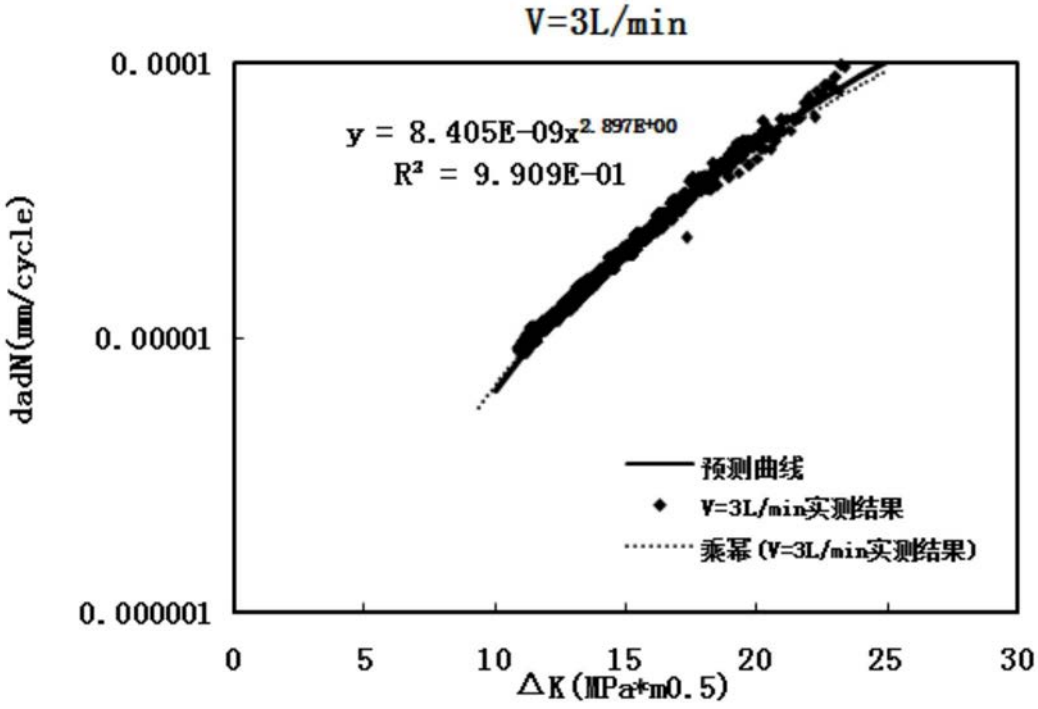

V=3L/min
0.0001
0.00001
0.000001
y = 8.405E-09x^2.897E+00
R² = 9.909E-01
dadN(mm/cycle)
预测曲线
V=3L/min实测结果
乘幂(V=3L/min实测结果)
0
5
10
15
20
25
30
ΔK(MPa*m0.5)

图6