

文章编号: 1000-4750(2016)11-0020-09

CRO 试样的疲劳裂纹扩展行为试验方法研究

赵兴华, 蔡力勋, 包 陈

(西南交通大学力学与工程学院应用力学与结构安全四川省重点实验室, 四川, 成都 610031)

摘 要: 考虑到如紧凑拉伸和三点弯曲等标准试样的大尺寸要求以及高试验成本等突出问题, 该文发展了含外侧径向裂纹 C 形环小试样(C-ring with an outer radial crack, CRO)的疲劳裂纹扩展行为试验方法。利用有限元分析建立了 CRO 小试样的高精度应力强度因子算式以及基于柔度法理论的裂纹长度预测公式。采用 5083-H112 铝合金分别完成了 CRO 试样和标准 CT 试样的疲劳裂纹扩展速率试验, 获得了相应的 Paris 方程中的幂指数。通过对比发现, CRO 和 CT 试样的疲劳裂纹扩展规律基本一致, 验证了新方法的有效性。基于上述方法对 C250 钢两种厚度 CRO 试样的疲劳裂纹扩展行为进行了应用研究。

关键词: 固体力学; 疲劳裂纹扩展; 柔度法; CRO 试样; 5083-H112 铝合金; C250 马氏体钢

中图分类号: TB302 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.04.0291

TESTING METHOD STUDY ON FATIGUE CRACK PROPAGATION BEHAVIOR OF CRO SPECIMEN

ZHAO Xing-hua , CAI Li-xun , BAO Chen

(Applied Mechanics and Structure Safety Key Laboratory of Sichuan Province, School of Mechanics and Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: Recognizing the large size requirement and high cost associated with the test of the standard specimens such as compact tension (CT) and single edged notched bending (SEB) specimen, a testing method for fatigue crack propagation of small size C-ring specimen with an outer radial crack (CRO) has been developed. With finite element analyses, expressions of stress intensity factor and crack length based on compliance principle were established with good accuracy. A type of 5083-H112 aluminum alloy was employed to complete the tests of fatigue crack growth rate by using CRO and CT specimens, respectively. Correspondingly, the power exponent of Paris equation of the two types of specimens were also obtained. The comparison shows that the fatigue crack propagation behaviors of CRO and CT specimens are similar, implying that the new method is valid and effective. Based on the above method, the fatigue crack propagation of two CRO samples of C250 steel with different thicknesses has been studied.

Key words: solid mechanics; fatigue crack propagation; compliance method; CRO specimen; 5083-H112 aluminum alloy; C250 maraging steel

管道在长期服役过程中往往会产生裂纹, 如果不能及时发现, 裂纹在交变载荷作用下会不断扩展并最终破坏, 严重威胁结构整体的安全性。对于含

裂纹的结构件, 其疲劳裂纹扩展^[1-2]性能的表现通常采用紧凑拉伸试样(Compact tension, CT)以拉伸加载或用单边裂纹弯曲(Single edged notch Bending,

收稿日期: 2015-04-13; 修改日期: 2015-09-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202174; 11472228); 四川省青年科技创新团队项目(2013TD0004)

通讯作者: 蔡力勋(1959—), 男, 四川人, 教授, 硕士, 博导, 主要从事材料本构关系、疲劳与断裂力学研究(E-mail: lix_cai@263.net).

作者简介: 赵兴华(1988—), 男, 山东人, 硕士生, 主要从事材料的疲劳与断裂力学研究(E-mail: xinghua19881105@126.com);

包 陈(1982—), 男, 重庆人, 讲师, 博士生, 主要从事材料本构关系、疲劳与断裂力学研究(E-mail: bchxx@163.com).

SEB)试样以三点弯曲加载两类方式进行。由于 CT 试样需预留加载孔的位置,而 SEB 试样又需在跨距之间安装用于测量裂纹张开位移的位移计,使两类试样的标准尺寸均较大。随着薄板、薄壁管件^[3-5]以及贵重金属零部件在航空航天、核反应堆、化工等工程中的广泛应用,使得特征尺寸在十几毫米甚至几毫米的小尺寸构件的断裂性能测试需求日益凸显。对于小尺寸管材而言,从中截取标准 CT 或 SEB 试样几乎不可能。此外,对于一些造价昂贵的特殊工程材料,采用标准试样必将大幅增加试验成本。因此,从小尺寸构件取样方便和有效降低试验成本两方面考虑,研究非标准小试样的疲劳裂纹扩展行为试验方法具有重要理论意义和工程应用价值。

国内外关于裂纹扩展速率的研究十分广泛,已经涉及到多种材料^[6-8]、不同环境^[9-10]甚至不同工艺^[11-13]等方面,然而对特殊试样构型特别是小尺寸试样疲劳裂纹扩展的研究却少见文献报道。1974 年 Jones^[14]等开发了含有一条或两条径向裂纹的圆环试样,并用柔度法对试样 I 型裂纹扩展的裂尖的应力强度因子进行了研究,该构型试样充分利用了管材的结构形状,可以实现小尺寸管材的取样,其后有部分国内学者开始对含裂纹圆环试样的疲劳裂纹扩展进行研究^[15-16]。但晨等^[17-18]开发了含内侧裂纹的 C 形环试样,并对其进行了裂纹扩展试验方法的研究,但内侧开裂纹的 C 形环试样模拟的是管道内压对裂纹扩展的影响,且受加载方式和 COD 引伸计安装的影响,其相对尺寸仍然较大。

含外侧径向裂纹的试样设计成 C 形环而不是圆环,是由于含外侧径向裂纹圆环加载时裂纹面受到较大挤压作用,使圆环裂纹闭合效应严重,不易扩展。含外侧径向裂纹 C 形环(CRO)小试样针对的是深埋、高压流体或高压气体内的小尺寸管件的疲劳裂纹扩展研究,由于该类管件受到较大外部压强,因此其裂纹扩展形式是由外向内的。在此基础上,本文首先设计了 CRO 小试样的疲劳裂纹扩展速率试验加载装置,通过有限元分析得出了 CRO 小试样的应力强度因子算式和基于柔度法原理的裂纹长度预测公式。根据上述有限元结果,完成了 5083-H112 铝合金 CRO 小试样的疲劳裂纹扩展速

率试验,获得了相应的疲劳裂纹扩展性能,并与 CT 试样裂纹扩展结果进行了对比,发现两者结果比较接近,证明了含外侧径向裂纹 C 形环小试样疲劳裂纹扩展试验方法的可行性。基于文中发展的试验方法,完成了 C250 马氏体钢 CRO 小试样两种厚度下的疲劳裂纹扩展试验,获得了其疲劳裂纹扩展行为。

1 试验条件

1.1 试验材料

为了获得 5083-H112 铝合金和 C250 马氏体钢的单轴力学性能,设计了图 1 所示的单拉试样。单拉试验采用试验在 MTS809(最大拉力 250 kN)电液伺服材料试验机上完成,传感器为 0.5 级精度。应变通过 MTS632.68F-08(标距 25 mm,轴向测量范围 -5%~5%)引伸计测量。

对 CRO 小试样的疲劳裂纹扩展行为试验方法的可行性研究选用的材料为 5083-H112 铝合金,化学成分见表 1。其具有使用范围广泛,耐腐蚀性好,焊接性优良,冷加工性较好等优点,常用于制造飞机油箱、油管、压力容器、以及交通运输设备、导弹元件、装甲等。图 2(a)是应变 ε 在 0.02 以内时 5083-H112 铝合金的单轴拉伸应力-应变曲线,根据试验结果,5083-H112 铝合金的弹性模量 $E=76$ GPa,屈服强度 $\sigma_s=141$ MPa。将试样拉伸直至破坏后又可得到其抗拉强度 $\sigma_b=297$ MPa。

C250 马氏体钢是 18Ni 马氏体时效钢的一种,马氏体时效钢以低碳或无碳马氏体为基体,在特定温度下经时效所产生金属间化合物沉淀硬化的超高强度钢^[19],其化学组成详见表 2。因其具有高强度、低硬化指数、良好成形性、简单的热处理工艺、时效时几乎不变形、以及良好的焊接性能等优点,C250 马氏体钢被广泛应用于科技含量较高的航空、航天以及军事领域^[20],比如火箭和导弹发动机壳体、飞机起落架、发动机阀门弹簧、浓缩用离心机高强度螺栓、发动机转子、高性能齿轮、挤压杆、无级变速机多层钢带、高压容器、精密锻模及塑料模具等^[21-22]。图 2(b)是室温下 C250 马氏体钢的单轴拉伸曲线,由 1#和 2#试样得到的平均材料参数为:弹性模量为 $E=191$ GPa,屈服强度 $\sigma_s=1832$ MPa,抗拉强度 $\sigma_b=1898$ MPa。

表 1 5083-H112 铝合金的主要化学成分

Table 1 Chemical composition of 5083-H112 aluminum alloy

化学成分	Cu(铜)	Si(硅)	Fe(铁)	Mn(锰)	Mg(镁)	Zn(锌)	Cr(铬)	Ti(钛)	其它	Al(铝)
含量 w(%)	0.1	0.4	0.4	0.3~1.0	4.0~4.9	0.25	0.05~0.25	0.15	0.15	余量

表 2 C250 马氏体钢的化学成分

Table 2 Chemical composition of C250 maraging steel

化学成分	C(碳)	Ni(镍)	Co(钴)	Mo(钼)	Ti(钛)	Al(铝)	Mn(锰)	P(磷)	Cu(铜)	V(钒)	S(硫)	Fe(铁)
含量 w(%)	0.01	17.69	7.89	4.97	0.47	0.054	0.03	0.027	0.02	0.007	0.006	余量

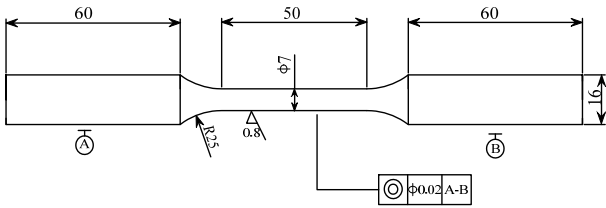
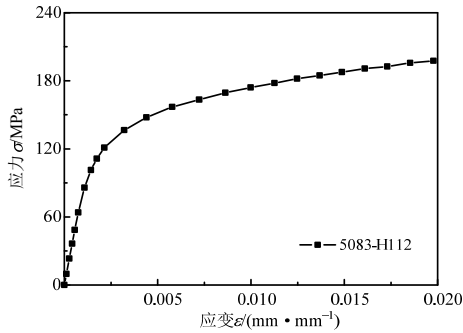
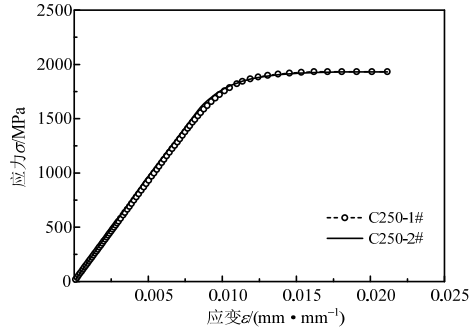


图 1 单轴拉伸试样构型及尺寸

Fig.1 Configuration and size of uniaxial tensile specimen



(a) 5083-H112 铝合金单轴拉伸应力-应变曲线



(b) C250 马氏体钢单轴拉伸应力-应变曲线

图 2 两种材料的单轴拉伸应力-应变曲线

Fig.2 The uniaxial tensile stress-strain curves of two materials

1.2 试样和加载装置

图 3 是 CT 试样构型图，试样宽度 $W=50\text{ mm}$ ，试样厚度 B 有 5 mm 和 10 mm 两种，初始裂纹长 $a_0=10\text{ mm}$ ，试验中可以直接在加载线上安装 COD 引伸计，测量裂纹加载线张开位移。图 4 是 CRO 试样的构型图，试样结构简单，容易加工，便于细小管件的直接取材，如果试验机量程和精度满足，

试样可以进一步缩小。试样侧面加工了一条垂直裂纹并且过圆心的标记线，保证试样安装过程中初始裂纹尽可能水平。表 3 为 CRO 小试样的分类，包含两种材料共 4 种工况。其中韧带宽度 b 为试样厚度 t 与初始裂纹长度 a_0 的差值，即 $b=t-a_0$ 。

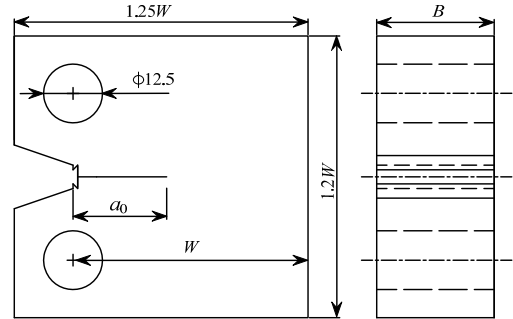


图 3 CT 试样构型

Fig.3 Diagram of CT specimen

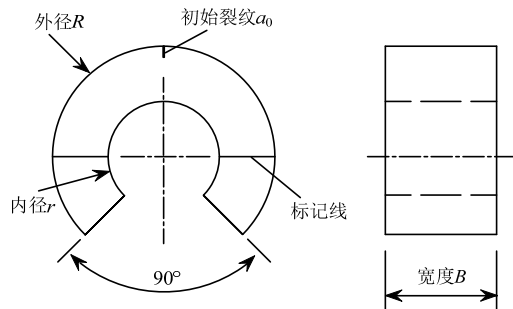


图 4 CRO 试样构型

Fig.4 Diagram of CRO specimen

表 3 两种材料 CRO 试样的初始参数

Table 3 CRO sample's initial parameters of the two materials

材料	宽度 B/mm	外径 R/mm	内径 r/mm	内外 径比 W_c	壁厚 t/mm	初始裂纹 长度 a_0/mm	韧带 宽度 b/mm	数量/ 个
5083-H112 铝合金	10 15	10	5	0.5	5	1	4	2 2
C250 马氏体钢	2 5	10	5	0.5	5	1	4	3 3

由于 CRO 试样尺寸小，难以直接加工 COD 引伸计安装刀口，故设计了图 5 所示的加载装置。装

置由上下对称两部分组成,包括圆柱形压块,连接试验机的 M6 螺栓,可移动的刀片,以及用来紧固刀片的 M5 螺栓。由于刀片有通孔滑槽,可以上下移动,因此能够适应不同尺寸试样 COD 引伸计的

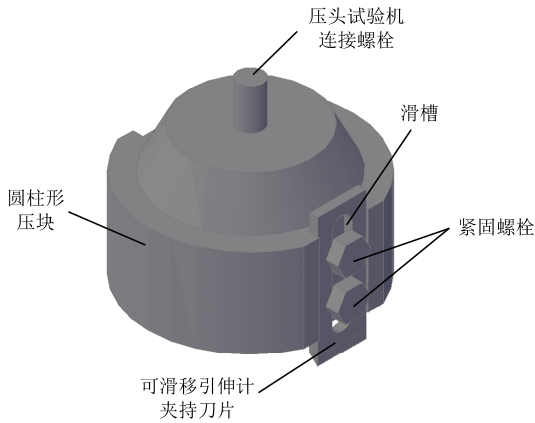
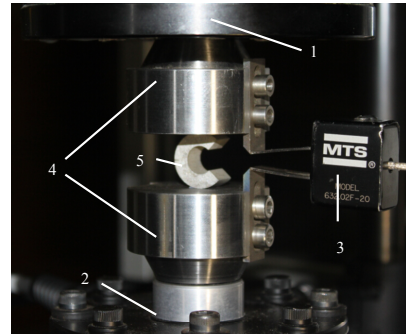


图 5 加载装置三维示意图

Fig.5 3D assembly drawing of the loading device

1.3 试验设备及加载

CT 试样采用美国 MTS809 25 kN/200 N·m 电液伺服材料试验机进行试验,其控制系统为 TestStarII,应用软件为 MTS790.10。CRO 试样试验采用 MTS Acumen Electro-dynamic Test System 1 kN 电磁力材料试验机完成,控制器为 MTS Flex Test 40,控制软件为 MTS Series 793。用于测量变形的 COD 引伸计为 632.02F-20,标距 5 mm,量程 -1 mm~4 mm。图 6 是 CRO 试样试验系统照片。



1. 作动筒; 2. 载荷传感器; 3. COD 引伸计; 4. 加载装置; 5. CRO 试样

图 6 CRO 试样试验系统照片

Fig.6 Test system photograph for a CRO specimen

2 拟静力计算方法对比研究

为了获得 CRO 试样的裂纹长度预测公式和应力强度因子公式,需要通过有限元模拟试样的加载过程,获得载荷-位移以及裂尖应力强度因子等参量。考虑到试样对称性,建立图 7 所示的 1/2 平面有限元模型和三维有限元模型,并对裂尖网格进行细化,平面模型单元类型为 Plane182,三维模型单元类型为 Solid185,弹性模量 $E=70$ GPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。为了尽可能与试验的实际情况相吻合,分析采用接触算法,建立刚性线和刚性面来模拟加载装置,通过控制节点来施加位移荷载,裂纹面为自由状态,韧带区施加对称约束。计算工况:内外径比 $W_c=r/R=0.5、0.55、0.6、0.67、0.7、0.75、0.8$,每种 W_c 下又分若干 a/t ,其中 a 是裂纹长度, $t=R-r$ 。

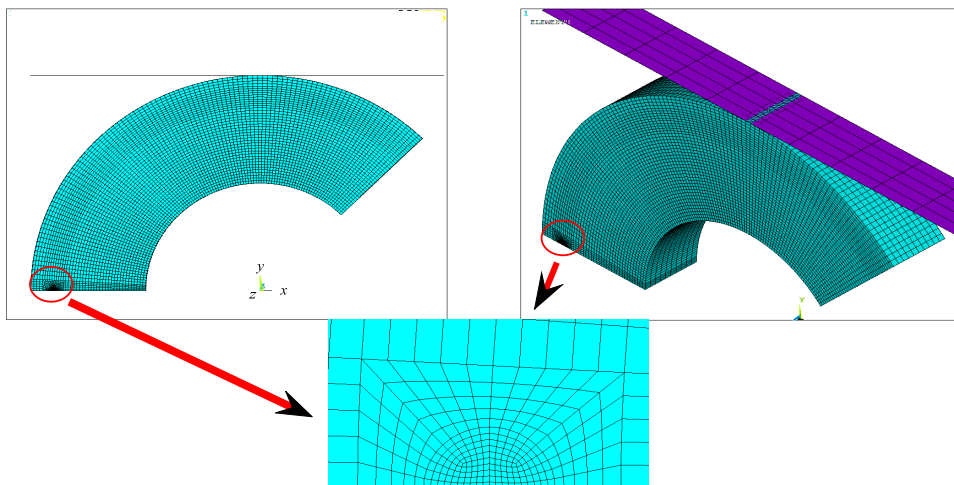


图 7 CRO 试样的有限元模型及其网格划分

Fig.7 Finite element model and its meshing of CRO specimen

2.1 基于柔度法原理的裂纹长度预测公式

所谓的柔度是指位移除以相应的载荷得到的系

数,即柔度 $C=V/P$ 。也就是说,相同载荷不同裂纹长度下,试样的裂纹张开位移是不同的,裂纹长度

越大裂纹张开位移越大，即柔度越大。因此柔度的变化反应了裂纹长度的变化，通过有限元得到不同裂纹长度下的柔度变化规律，就可以在试验过程中实时监测裂纹长度变化。

根据有限元分析结果，将柔度 C 按照下式进行无量纲化处理，得到无量纲量 U_x ：

$$U_x = [(BEC)^{0.5} + 1]^{-1} \quad (1)$$

式中： B 为试样厚度； E 为弹性模量； C 为柔度系数。

图 8 是 CRO 试样不同内外径比的无量纲量 U_x 与 b/t 关系，其中 $b=t-a$ 为剩余韧带长度。由图知，平面模型和三维模型的模拟结果是非常接近的，符合同一函数规律，且在 $0.5 \leq W_c \leq 0.8$ 范围内， $b/t-U_x$ 曲线都很好的满足下式所示的函数关系：

$$b/t = \frac{c_1 + U_x}{c_2 + c_3 U_x} + c_4 U_x \quad (2)$$

式中： b 为试样剩余韧带厚度； t 为试样壁厚； $c_1 \sim c_4$ 为公式待定系数。由该式可得裂纹长度预测：

$$a/t = 1 - \frac{c_1 + U_x}{c_2 + c_3 U_x} - c_4 U_x \quad (3)$$

公式适用范围为 $0.2 \leq a/t \leq 0.8$ ，式中不同内外径比 W_c 下的公式系数详见表 4。

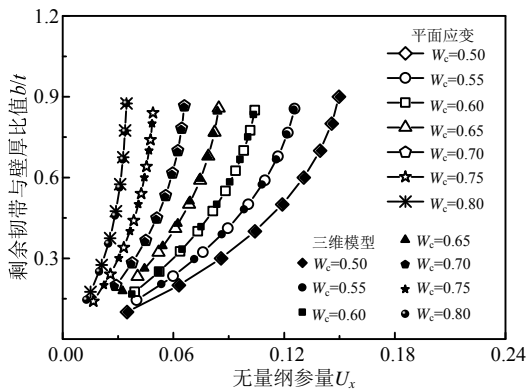


图 8 不同 W_c 下 $b/t-U_x$ 关系

Fig.8 Curves of $b/t-U_x$ with different W_c

表 4 CRO 试样裂纹尺寸预测公式系数

Table 4 Parameters for compliance formula of CRO pecimen

W_c	c_1	c_2	c_3	c_4
0.50	-2.3911×10^{-2}	1.4161	-7.7228	2.5107
0.55	-1.4418×10^{-2}	1.1184	-7.0230	2.8063
0.60	-1.1517×10^{-2}	0.94479	-7.1803	3.3764
0.65	-4.1850×10^{-3}	0.73862	-6.8850	3.7311
0.70	-3.5502×10^{-3}	0.65303	-8.0504	4.8351
0.75	-8.2573×10^{-4}	0.49883	-8.3481	5.7264
0.80	3.7086×10^{-3}	0.37645	-9.0874	6.3936

图 9 是式(3)精度示意图，即有限元计算结果与式(3)计算结果相对误差的大小。图中所有计算结果

的误差均在 1.2% 以内，且 96% 的点误差小于 1%，可见式(3)满足测试精度要求。

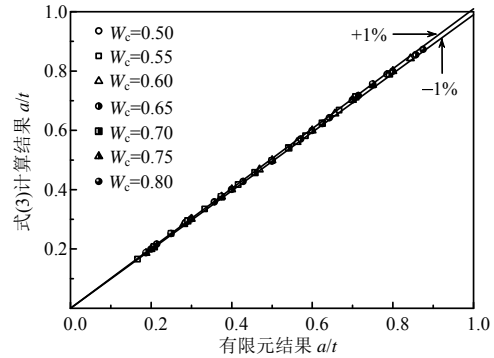


图 9 式(3)精度示意图

Fig.9 Schematic diagram of formula (3) accuracy

2.2 应力强度因子 K 公式

应力强度因子 K 是反映线弹性条件下 I 型裂纹尖端附近应力场强度程度的参量。为了得到不同 W_c 下的应力强度因子 K 和无量纲裂纹长度 a/t 的关系，首先建立下式所示的无量纲参数 f ：

$$f = \frac{KB\sqrt{t}}{P} \quad (4)$$

式中： B 为试样厚度； t 为试样壁厚； K 为应力强度因子； P 为每个循环下峰值载荷。图 10 给出了平面应变模型和三维模型下无量纲参数 f 与 a/t 的关系，发现两者非常模拟结果基本一致，并可由下式描述：

$$\ln(f) = d_1 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{d_2} \cdot \left(1 - \frac{a}{t}\right)^{d_3} \quad (5)$$

式中， $d_1 \sim d_3$ 为公式待定系数。结合式(4)和式(5)可得应力强度因子表达式：

$$K = \frac{P}{B\sqrt{t}} \cdot f = \frac{P}{B\sqrt{t}} \cdot e^{d_1 \cdot \left(\frac{a}{t}\right)^{d_2} \cdot \left(1 - \frac{a}{t}\right)^{d_3}} \quad (6)$$

公式适用范围为 $0.5 \leq W_c \leq 0.8$ ， $0.2 \leq a/t \leq 0.8$ 。

式(6)系数详见表 5。

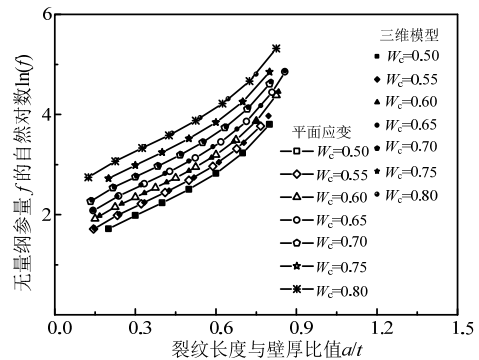


图 10 不同 W_c 下 $\ln(f)-a/t$ 关系

Fig.10 Curves of $\ln(f)-a/t$ with different W_c

表5 CRO试样应力强度因子公式系数

Table 5 Parameter for K factor formula of CRO specimen

W_c	d_1	d_2	d_3
0.50	2.3748	0.25136	-0.32147
0.55	2.5152	0.22542	-0.31149
0.60	2.6760	0.20375	-0.30091
0.65	2.8425	0.18509	-0.29080
0.70	3.0524	0.17304	-0.27356
0.75	3.1240	0.13168	-0.29232
0.80	3.3833	0.12589	-0.28035

图 11 是式(6)精度示意图,即有限元计算结果与式(6)计算结果据对误差的大小。图中所有计算结果的误差均在 0.8%以内,且误差小于 0.6%的数据点占比 94%,说明式(6)精度较高。

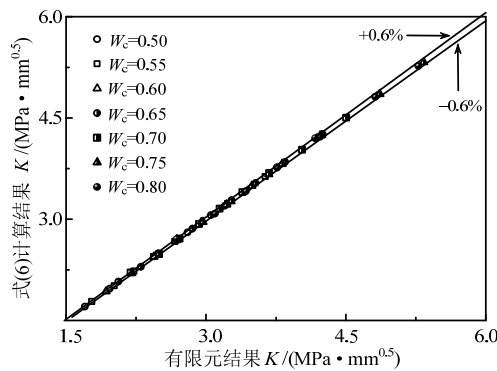


图 11 式(6)精度示意图

Fig.11 Schematic diagram of formula (6) accuracy

3 有效性验证

根据材料疲劳裂纹扩展速率标准试验方法要求,对CRO试样和CT试样均进行了疲劳裂纹的预制。CT试样的疲劳裂纹预制采用MTS 790.50标准断裂软件根据降 K 方式实现,预制裂纹增量约 2 mm~3 mm; CRO试样的疲劳裂纹预制根据初始裂纹的扩展速率逐级卸载的方式实现,预制裂纹增量 0.5 mm~1 mm。在预制疲劳裂纹完成后,CT试样和CRO试样加载比(载荷比)均为0.1,CT试样的裂纹扩展增量 11 mm~14 mm, CRO试样扩展量 1 mm~2 mm。CRO试样试验无法实现间隔采数,故数据容量较大,难以操作,须通过VB自编程序进行处理,得到各试样的 $a-N$ (裂纹长度-寿命)曲线,及 $da/dN \sim \Delta K$ 曲线。

图 12 是 5083-H112 铝合金 CT 试样和 CRO 试样疲劳裂纹扩展速率试验的 a/a_p-N 曲线,其中 a 是疲劳裂纹长度, a_p 是疲劳预制后的裂纹总长度。由图可知,CT 试样比 CRO 试样疲劳裂纹扩展的 a/a_p-N 曲线更为平缓。图 13 是 CT 试样和 CRO 试

样疲劳裂纹扩展的 $da/dN-\Delta K$ 曲线,图中两种试样的结果基本分布在同一条幂函数曲线上,且结果比较接近,证明了含外侧径向裂纹 CRO 试样疲劳裂纹扩展试验方法的有效性。因此,对于其他小尺寸管件或材料可以使用 CRO 试样进行疲劳裂纹扩展试验。

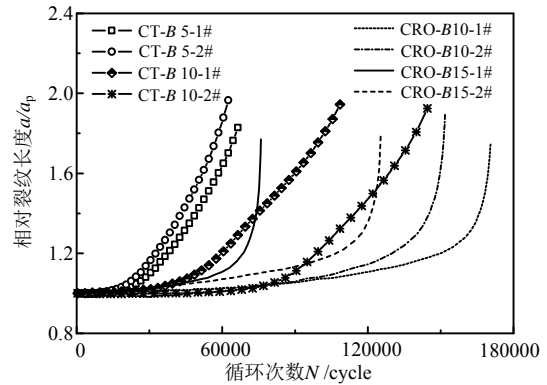


图12 CT试样和CRO试样的 a/a_p-N 曲线

Fig.12 a/a_p-N curves of CT specimens and CRO specimens

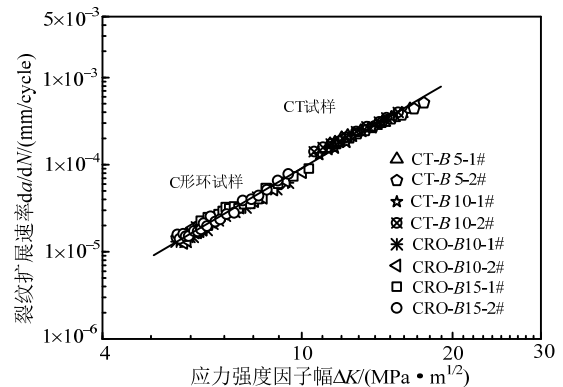


图 13 CT 试样和 CRO 试样的 $da/dN-\Delta K$ 曲线

Fig.13 $da/dN-\Delta K$ curves of CT specimens and CRO specimens

表6 CRO试样和CT试样疲劳裂纹扩展Paris公式拟合参数

Table 6 Paris fomula fitting parameters of CRO specimens and CT specimens

材料	试样类型	厚度 B/mm	试样编号	C	m
5083-H112 铝合金	CRO 试样	10	1#	6.15×10^{-8}	3.11
			2#	6.61×10^{-8}	3.02
	CT 试样	15	1#	7.25×10^{-8}	3.20
			2#	4.95×10^{-8}	3.36
		10	1#	3.79×10^{-7}	2.42
			2#	3.01×10^{-7}	2.59
5	1#	1.03×10^{-7}	3.00		
	2#	2.41×10^{-7}	2.70		

图 13 中的 $da/dN-\Delta K$ 曲线满足下式所示的 Paris 律关系:

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K^m \quad (7)$$

式中, C 、 m 为材料常数。CRO 试样和 CT 试样的 Paris 律模型参数如表 6 所示。

4 C250 钢疲劳裂纹扩展试验结果

由于含外侧径向裂纹的 CRO 试样的疲劳裂纹扩展行为试验方法已经通过 5083-H112 铝合金得到验证, 因此可以通过该方法对 C250 马氏体钢的疲劳裂纹扩展行为进行研究。图 14 和图 15 分别是 C250 钢 CRO 试样疲劳裂纹扩展的 a/a_p - N 曲线和 da/dN - ΔK 曲线。由图 14 可以看出, 在裂纹扩展量基本相等相等时, 循环次数存在一定分散性; 图 15 中不同规格试样 da/dN - ΔK 曲线基本重合, 与 5083-H112 铝合金相比其分散性更小。

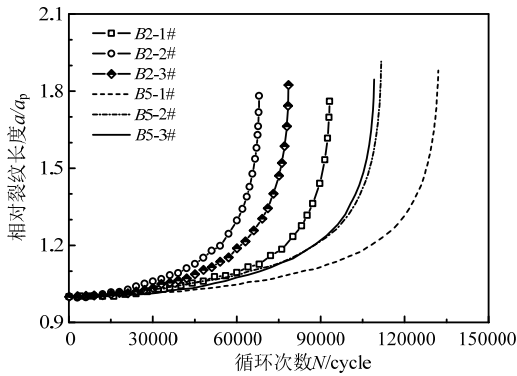


图14 CRO试样的 a/a_p - N 曲线
Fig.14 a/a_p - N curves of CRO specimens

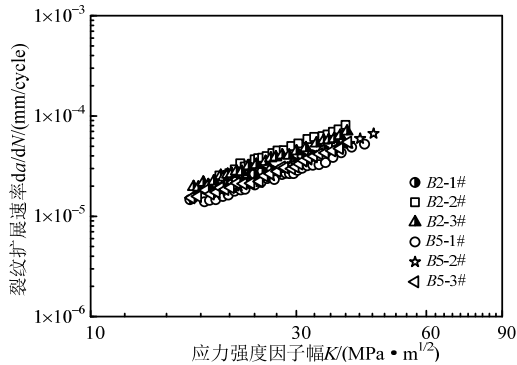


图 15 CRO 试样的 da/dN - ΔK 曲线
Fig.15 da/dN - ΔK curves of CRO specimens

C250 钢 CRO 试样的 Paris 律模型参数见表 7, 表中不同尺寸试样的参数 m 和 C 非常接近。

图 16 是 C250 钢两种厚度尺寸 CRO 试样的疲劳裂纹扩展断口图。由于预制疲劳裂纹采用降 ΔK 方式控制, 而正式疲劳裂纹扩展采用恒载方式控制, 二者实际控制的载荷幅差异明显, 因而使得试样断面上预制疲劳裂纹区与正式裂纹扩展区之间的

界限非常清晰。通过物理测量证实, 裂纹扩展区的平均长度与柔度法预测的裂纹长度吻合较好, 相对误差不超过 1%。

表7 CRO试样疲劳裂纹扩展Paris公式拟合参数
Table 7 Paris fomula fitting parameters of CRO specimens

材料	试样类型	厚度 B/mm	最大载荷/N	试样编号	$C/(\times 10^{-7})$	m
C250 马氏体钢	CRO 试样	2	200	1#	1.99	1.53
				2#	1.44	1.73
				3#	2.44	1.53
		5	500	1#	1.57	1.53
				2#	1.38	1.55
				3#	2.09	1.49

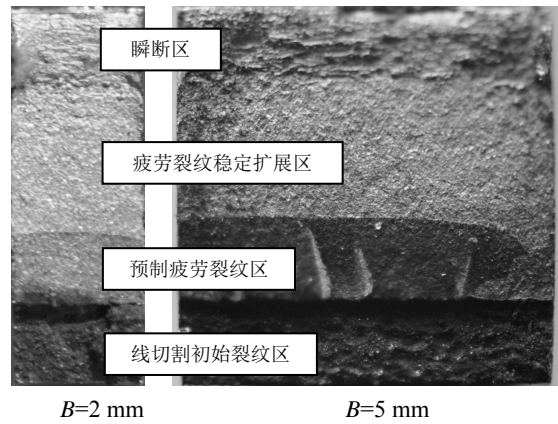


图 16 CRO 试样的疲劳裂纹扩展断口
Fig.16 The C-ring specimen fracture due to fatigue crack propagation

从图 16 中还可以看到, 试样裂纹前沿表现为一定的弧状, 且试样厚度两侧边缘的裂纹扩展速率稍低于试样厚度中间部位。这是由于试样裂纹前沿的平直度与试样裂纹尖端区域的应力状态相关, 裂纹尖端局部越接近平面应变状态, 表明裂尖局部的拘束度越高, 裂纹越易扩展, 反之, 裂尖局部越接近平面应力状态, 则裂纹扩展相对缓慢。对于有限厚度的 CRO 试样或 CT 试样, 试样厚度中间部位接近平面应变状态, 而两侧接近于平面应力状态, 因此出现了图示的弧状裂纹前沿。另一方面, 试样厚度越小, 试样裂纹尖端的应力状态更加接近于平面应力状态, 也就是说试样厚度中间部位的应力状态与两侧更为接近, 从而从图 16 中可以看到, 试样厚度越小, 试样的平直度越理想; 反之, 图中厚度为 5 mm 的试样, 其厚度中部的裂纹扩展速率与两侧之间的差异更大。

5 结论

(1) 为了适应小尺寸管件疲劳裂纹扩展的研究, 设计了外开径向裂纹的CRO试样, 并基于该小试样的特点设计了可夹持COD引伸计的加载装置。

(2) 基于线弹性有限元分析和柔度测试理论, 获得了C形环试样的疲劳裂纹长度预测公式和应力强度因子公式, 且公式具有较高精度。

(3) 结合铝合金5083-H112, 完成了2种规格CT试样和2种规格CRO小试样的疲劳裂纹扩展试验, 获得了其 a/a_p - N 曲线和 da/dN - ΔK 曲线, 且不同规格、不同构型试样的 da/dN - ΔK 曲线十分接近, 证明了基于含外侧裂纹CRO试样的疲劳裂纹扩展试验方法的有效性。

(4) 基于上述方法, 对C250马氏体钢的疲劳裂纹扩展速率进行了试验, 得到基于CRO小试样的材料 a/a_p - N 曲线和 da/dN - ΔK 曲线, 并给出了Paris幂函数模型参数。结果表明, 新方法得到的试验结果分散性较小, 能较好的描述C250钢的疲劳裂纹扩展速率行为特性。

参考文献:

- [1] 唐雪松, 赵小鹏. 疲劳裂纹扩展行为的跨尺度分析方法[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 20—26.
Tang Xuesong, Zhao Xiaopeng. Multiscale analysis approach of fatigue crack growth behavior [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 20—26. (in Chinese)
- [2] 陈龙, 蔡力勋. 基于材料低周疲劳的裂纹扩展预测模型[J]. 工程力学, 2012, 29(10): 34—39.
Chen Long, Cai Lixun. The low cyclic fatigue crack growth prediction model based on material's low cyclic fatigue properties [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(10): 34—39. (in Chinese)
- [3] 龚明, 赵建华, 董本涵, 等. 含孔薄板孔边疲劳裂纹的萌生和扩展[J]. 航空学报, 2002, 23(3): 202—205.
Gong Ming, Zhao Jianhua, Dong Benhan, et al. Initiation and propagation of fatigue crack in edge region of hole in a sheet with central hole [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(3): 202—205. (in Chinese)
- [4] 郭加林, 尹志民, 王华, 等. 微量Sc和Zr对2524SZ合金薄板疲劳裂纹扩展特性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 8278—8278.
Guo Jialin, Yin Zhimin, Wang Hua, et al. Effects of minor Sc and Zr on fatigue crack development characteristics of 2524SZ alloy sheet [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(5): 8278—8278. (in Chinese)
- [5] 邹世坤, 王健, 王华明, 等. 激光冲击处理金属板材后的裂纹扩展速率[J]. 激光技术, 2002, 26(3): 189—191.
Zou Shikun, Wang Jian, Wang Huaming, et al. Fatigue growth rate of laser shock processed metal sheet [J]. Laser Technology, 2002, 26(3): 189—191. (in Chinese)
- [6] 赵荣国, 罗希延, 任璐璐, 等. 航空发动机涡轮盘用GH4133B合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(18): 55—65.
Zhao Rongguo, Luo Xiyan, Ren Lulu, et al. Research on fatigue crack propagation behavior of GH4133B superalloy used in turbine disk of aero-engine [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(18): 55—65. (in Chinese)
- [7] 熊纓, 陈冰冰, 郑三龙, 等. 16MnR钢在不同条件下的疲劳裂纹扩展规律[J]. 金属学报, 2009, 45(7): 849—855.
Xiong Ying, Chen Bingbing, Zheng Sanlong, et al. Study on fatigue crack growth behavior of 16MnR steel under different conditions [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(7): 849—855. (in Chinese)
- [8] 杨健, 董建新, 张麦仓, 等. 新型镍基粉末高温合金FGH98的高温疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 金属学报, 2013, 49(1): 71—80.
Yang Jan, Dong Jianxin, Zhang Maicang, et al. High temperature fatigue crack growth behavior of a novel powder metallurgy superalloy FGH98 [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(1): 71—80. (in Chinese)
- [9] 杨胜, 易丹青, 杨守杰, 等. 腐蚀环境下2E12航空铝合金疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 材料工程, 2007(12): 26—29.
Yang Sheng, Yi Danqing, Yang Shoujie, et al. Effect of corrosive environment on fatigue crack propagation of 2E12 aerospace aluminum alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2007(12): 26—29. (in Chinese)
- [10] 卜文平, 孙鹏波. X70管道钢在碳酸盐/碳酸氢盐溶液中的疲劳裂纹扩展试验研究[J]. 石油矿场机械, 2006, 35(1): 73—76.
Bu Wenping, Sun Pengbo. Fatigue crack growth in X70 line-pipe steel in a carbonate-bicarbonate solution [J]. Oil Field Equipment, 2006, 35(1): 73—76. (in Chinese)
- [11] 于兰兰, 毛小南, 李辉. 温度对TC4-DT损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展行为的影响[J]. 稀有金属快报, 2008, 26(12): 20—23.
Yu Lanlan, Mao Xiaonan, Li Hui. Effects of Temperature on fatigue crack growth behavior of TC4-DT damage tolerance titanium alloy [J]. Rare Metals Letters, 2008, 26(12): 20—23. (in Chinese)
- [12] 王新南, 朱知寿, 童路, 等. 锻造工艺对TC4-DT和TC21损伤容限型钛合金疲劳裂纹扩展速率的影响[J]. 稀有金属快报, 2008, 27(7): 12—16.
Wang Xinnan, Zhu Zhishou, Tong Lu, et al. The influence of forging processing on fatigue crack propagation rate of

- damage-tolerant titanium alloy [J]. *Rare Metals Letters*, 2008, 27(7): 12–16. (in Chinese)
- [13] 张伟. 共晶Al-Si合金的硅相形貌控制及其对合金断裂韧性, 疲劳裂纹扩展行为的影响[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- Zhang Wei. Control of Si morphology in eutectic Al-Si alloy and its effect on fracture toughness and fatigue crack growth of the alloy [D]. Zhengzhou: Zheng Zhou University, 2007. (in Chinese)
- [14] Jones A T. A radially cracked, cylindrical fracture toughness specimen [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1974(6): 435–466.
- [15] 马德林. 集中力加载下含径向裂纹圆环试样的 K_I 解[J]. *兵器材料科学与工程*, 1987(12): 6–11.
- Ma Delin. The K_I solution of tube containing radial symmetric cracks under the concentrate loading [J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 1987(12): 6–11. (in Chinese)
- [16] Shi H J, Niu L S, Mesmacque G, et al. Branched crack growth behavior of mixed-mode fatigue for an austenitic 304L steel [J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(6): 457–465.
- [17] 但晨. 小尺寸试样材料断裂性能测试方法与应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- Dan Chen. The fracture toughness testing methods for small size specimens and their application [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [18] 但晨, 蔡力勋, 包陈. C形环小试样疲劳裂纹扩展试验方法与应用[J]. *工程力学*, 2015, 32(12): 27–32.
- Dan Chen, Cai Lixun, Bao Chen. Test method and application of fatigue crack propagation with C-ring specimen [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(12): 27–32. (in Chinese)
- [19] Decker R F, Loreen S. Maraging steels-the first 30 years [C]// *Maraging Steels-Recent Development and Applications*. Warrendale PA, America, Trans. TMS-AIME, 1988: 1–38.
- [20] 姜越, 尹钟大, 朱景川, 等. 超高强度马氏体时效钢的发展[J]. *特殊钢*, 2004, 25(2): 1–5.
- Jiang Yue, Yin Zhongda, Zhu Jingchuan, et al. Development of ultra-high strength maraging steel [J]. *Special Steel*, 2004, 25(2): 1–5. (in Chinese)
- [21] 尹航, 李金许, 宿彦京, 等. 马氏体时效钢的研究现状与发展[J]. *钢铁研究学报*, 2014, 26(3): 1–4.
- Yin Hang, Li Jinxu, Su Yanjing, et al. Current situation and development of maraging steel [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2014, 26(3): 1–4. (in Chinese)
- [22] Rack H J, Kalish D. Improved fatigue resistance of 18Ni (350) maraging steel through thermomechanical treatments [J]. *Metallurgical Transactions*, 1974, 5(3): 685–694.