



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105181492 B

(45)授权公告日 2018.01.19

(21)申请号 201510437043.0

(22)申请日 2015.07.23

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 105181492 A

(43)申请公布日 2015.12.23

(73)专利权人 中国科学院力学研究所  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72)发明人 张诗佳 谢季佳 孙成奇 洪友士

(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理  
事务所(普通合伙) 11390  
代理人 胡剑辉

(51)Int.Cl.  
G01N 3/32(2006.01)

(56)对比文件  
SU 1642310 A1,1991.04.15,  
US 2002/139194 A1,2002.10.03,

US 4164874 A,1979.08.21,  
CN 101413901 A,2009.04.22,  
EP 2682740 A1,2014.01.08,  
CN 102645366 A,2012.08.22,  
CN 86103893 A,1988.02.10,  
CN 102645385 A,2012.08.22,  
CN 102262701 A,2011.11.30,  
CN 103439194 A,2013.12.11,  
汝继钢 等.喷丸强化对7A12铝合金微观组织  
和疲劳性能的影响.《航空材料学报》.2013,第  
33卷(第6期),第52页第1栏1段和图2.

石铠源.灰口铸铁等离子表面强化组织与疲  
劳性能的研究.《中国优秀硕士学位论文全文数  
据库工程科技I辑》.2013,(第7期),第20页第  
1段,第22页第1、2段,第23页第1段,第43页最后  
一段,第63页最后一段,第64页第1、2段,第65页第  
1、2段,第67页最后一段.

审查员 赵悦

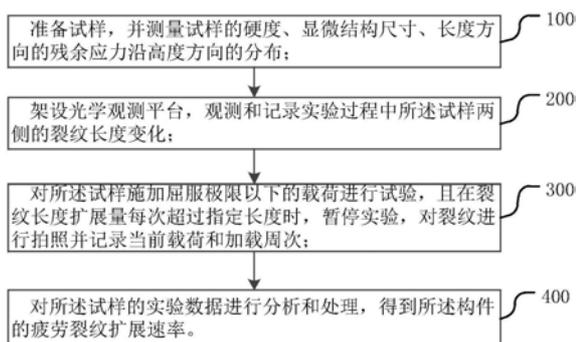
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

## (54)发明名称

一种表面强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定方法

## (57)摘要

本发明提供了一种表面强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定方法,包括以下步骤:准备试样,并测量试样的硬度、显微结构尺寸、长度方向的残余应力沿高度方向的分布;架设光学观测平台,观测和记录实验过程中所述试样两侧的裂纹长度变化;对所述试样施加屈服极限以下的载荷进行试验,且在裂纹长度扩展量每次超过指定长度时,暂停实验,对裂纹进行拍照并记录当前载荷和加载周次;对所述试样的实验数据进行分析,得到所述构件的疲劳裂纹扩展速率。本发明的测定方法直接在全尺寸构件上截取试样,保持了试样与构件的一致性。有效解决了全尺寸构件实验时间和物质成本高,难以获得大量实验数据的问题,实现了表面强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定。



CN 105181492 B

1. 一种表面梯度强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定方法,其特征在于,包括以下步骤:  
步骤100,准备试样,并测量试样的硬度、显微结构特征、长度方向的残余应力沿高度方向的分布以及预制缺陷的长度;

步骤200,架设光学观测平台,观测和记录实验过程中所述试样两侧的裂纹长度变化;

步骤300,对所述试样施加适当的载荷进行实验,且在裂纹长度扩展量每次超过指定长度时,暂停实验,对裂纹进行拍照并记录当前载荷和加载周次;

步骤400,对所述试样的实验数据进行分析 and 处理,得到所述试样的疲劳裂纹扩展速率;

需要观察并测量液氮条件下快速打断的试样断面,并根据实验要求修正裂纹长度;所述修正裂纹长度的具体操作为:找到明显的裂纹前沿痕迹,沿与裂纹扩展垂直的方向等间距取5个数据测量点,分别测量每个点的裂纹长度后取平均值,即为相应数据测量点的修正裂纹长度;没有明显前沿痕迹的位置通过相邻两个修正裂纹长度线性插值修正。

2. 根据权利要求1所述的测定方法,其特征在于,

所述步骤100中,准备所述试样的过程包括:

步骤110,从全尺寸所述试样上截取包含表面在内的矩形试样,并确定试样的跨度长度,所述试样的高度至少为所述试样的梯度强化层厚度的10倍;步骤120,在所述试样上预制缺陷类型。

3. 根据权利要求1所述的测定方法,其特征在于,

所述步骤300中,若所述裂纹长度在当前加载载荷级且加载周次超过 $10^6$ 时不再变化,则提高一个加载载荷级;

若所述裂纹长度扩展后超过所述试样的1/2高度,则结束所述试样的实验。

4. 根据权利要求1所述的测定方法,其特征在于,

所述步骤300中,所述试样应分别在强化层、过渡层和基体至少有10个位置的测量数据;判定提高载荷级的加载周次取值根据裂纹扩展量调整,需要每加载周次的裂纹扩展量小于 $10^{-7}$ mm/cycle。

5. 根据权利要求1所述的测定方法,其特征在于,

所述步骤300中,暂停实验继续后,需要在前一次实验的基础上进行加载载荷的调整,调整的载荷级差应保证所述试样的数据在强化层、过渡层和基体每个测量点附近的裂纹扩展速率能够绘制出一条完整的Paris曲线。

6. 根据权利要求1所述的测定方法,其特征在于,

所述步骤400中,当前构件的疲劳裂纹扩展速率计算公式为:

$$\frac{da}{dN} = \frac{(\text{第}N\text{周裂纹长度} - \text{第}M\text{周裂纹长度})}{(N - M)};$$

$$\frac{da}{dN} = C(a)\Delta K^{n(a)};$$

其中,da/dN为裂纹扩展速率,ΔK为应力强度因子幅值,a为裂纹长度,C,n为试样材料的裂纹扩展速率特性参数。

7. 根据权利要求6所述的测定方法,其特征在于,

对构件的疲劳裂纹扩展速率计算公式进行积分，

$$N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(a)\Delta K^{n(a)}};$$

得到深为 $a_0$ 的裂纹，扩展到危险值 $a_c$ 所需周次 $N_c$ 。

8. 根据权利要求7所述的测定方法，其特征在于，通过对构件不同位置处试样的测试结果的数据拟合，得到所述构件不同位置的类Paris公式。

## 一种表面强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及材料力学领域,特别是涉及一种表面梯度强化构件疲劳裂纹扩展速率测定方法。

### 背景技术

[0002] 疲劳破坏是承力构件的关键力学问题之一。而疲劳损伤又常常从构件表面起源,因此通过表面强化来提高构件的整体疲劳性能是常用的方法。通过淬火方法强化的构件,表面会形成一层强化层,并存在较大的残余压应力,内部的基体材料有较小的拉应力,强化层和基体之间存在一段过渡层。实际上,从表面到基体之间的微结构和力学性能呈梯度变化的特征。对于均质材料构件,采用传统的裂纹扩展实验,通过记录裂纹长度与疲劳周次数,进一步数据处理可得到裂纹扩展速率与裂纹尖端应力强度因子幅值的关系曲线,即Paris曲线。而对于表面强化构件,在梯度强化层内不同深度位置的Paris曲线参数是不同的,传统的裂纹扩展实验无法得到梯度强化层内完整的裂纹扩展表征参数。目前针对含有表面梯度强化层构件的疲劳分析还缺乏理论与实验的方法。全尺寸的构件实验由于时间、成本的因素,不能得到大量的实验数据。

### 发明内容

[0003] 本发明的目的是要提供一种表面梯度强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定方法,以获得构件不同梯度层位置的疲劳裂纹扩展速率。具体步骤如下:

[0004] 步骤100,准备试样,并测量试样的硬度、显微结构特征、长度方向的残余应力沿高度方向的分布以及预制缺陷的长度;

[0005] 步骤200,架设光学观测平台,观测和记录实验过程中所述试样两侧的裂纹长度变化;

[0006] 步骤300,对所述试样施加适当的载荷进行实验,且在裂纹长度扩展量每次超过指定长度时,暂停实验,对裂纹进行拍照并记录当前载荷和加载周次;

[0007] 步骤400,对所述试样的实验数据进行分析 and 处理,得到所述构件的疲劳裂纹扩展速率。

[0008] 进一步地,所述步骤100中,准备所述试样的过程包括:

[0009] 步骤110,从全尺寸所述构件上截取包含表面在内的矩形试样,并确定试样的跨度长度,所述试样的高度至少为所述试样的梯度强化层厚度的10倍;步骤120,在所述试样上预制缺陷类型。

[0010] 进一步地,所述步骤300中,若所述裂纹长度在当前加载载荷级且加载周次超过 $10^6$ 时不再变化,则提高一个加载载荷级;

[0011] 若所述裂纹长度扩展后超过所述试样的1/2高度,则结束所述试样的实验。

[0012] 进一步地,所述步骤300中,所述试样应分别在强化层、过渡层和基体至少有10个位置的测量数据;所述判定提高载荷级的加载周次取值根据裂纹扩展量调整,需要每加载

周次的裂纹扩展量小于 $10^{-7}$ mm/cycle。

[0013] 进一步地,所述步骤300中,暂停实验继续后,需要在前一次实验的基础上进行加载载荷的调整,调整的载荷级差应保证所述试样的数据在强化层、过渡层和基体每个测量点附近的裂纹扩展速率能够绘制出一条完整的Paris曲线。

[0014] 进一步地,所述步骤400,需要观察并测量液氮条件下快速打断的试样断面,并根据实验要求修正裂纹长度。

[0015] 进一步地,所述修正裂纹长度的具体操作为:找到明显的裂纹前沿痕迹,沿与裂纹扩展垂直的方向等间距取5个数据测量点,分别测量每个点的裂纹长度后取平均值,即为该点的修正裂纹长度;没有明显前沿痕迹的位置通过相邻两个修正裂纹长度线性插值修正。

[0016] 进一步地,所述步骤400中,当前构件的疲劳裂纹扩展速率计算公式为:

$$[0017] \quad \frac{da}{dN} = \frac{(\text{第}N\text{周裂纹长度} - \text{第}M\text{周裂纹长度})}{(N - M)};$$

$$[0018] \quad \frac{da}{dN} = C(a)\Delta K^{n(a)};$$

[0019] 其中,da/dN为裂纹扩展速率, $\Delta K$ 为应力强度因子幅值,a为裂纹长度,C,n为试样材料的裂纹扩展速率特性参数。

[0020] 进一步地,对构件的疲劳裂纹扩展速率计算公式进行积分,

$$[0021] \quad N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(a)\Delta K^{n(a)}};$$

[0022] 得到深为 $a_0$ 的裂纹,扩展到危险值 $a_c$ 所需周次 $N_c$ 。

[0023] 进一步地,通过对构件不同位置处试样的测试结果的数据拟合,得到所述构件不同位置的类Paris公式。

[0024] 本发明提供的表面梯度强化构件疲劳裂纹扩展速率测定方法,直接在全尺寸构件上截取试样,保持了试样与全尺寸构件在硬度、微结构梯度变化和残余应力梯度分布上的一致性。通过物理、力学特征量的测量和疲劳裂纹扩展实验获得的大量不同位置的裂纹扩展速率数据,可得到 $\Delta K$ 、da/dN和X(硬度、微结构尺寸、残余应力)的关联数据。可有效解决全尺寸构件实验时间和物质成本高,难以获得大量实验数据的问题。可实现表面强化构件疲劳裂纹扩展速率的测定。

[0025] 本发明由于在全尺寸构件上截取试样进行实验,保持了与全尺寸构件相同的硬度、显微结构和残余应力分布,使测定结果可反映全尺寸构件的情况,预测全尺寸构件的疲劳寿命,节约实验成本。此外,最终计算结果是从强化层、过渡层、基体每一个深度位置都得到的相关数据,对构件的寿命评估更准确、可信。

## 附图说明

[0026] 图1是根据本发明一个实施例的测定方法流程示意图;

[0027] 图2是根据本发明一个实施例的试样结构示意图。

## 具体实施方式

[0028] 如图1、2所示,本发明的测定方法一般性地包括以下步骤:

[0029] 步骤100,准备试样;并测量试样的硬度、显微结构尺寸、长度方向的残余应力沿高度方向的分布以及预制缺陷的长度。

[0030] 在该步骤中,试样从全尺寸构件上直接截取,需要包含表面梯度强化层在内,截取后形状可以是矩形。然后测量出试样的长度L、宽度W和高度H,并确定出试样的跨度长度 $L_0$ ;该试样的高度至少为试样表面强化层厚度的10倍,这样可以使试样与全尺寸构件的残余应力分布相同。而针对圆柱形构件,其宽度W可以小于或等于其直径的六分之一,这样可以使试件表面的圆弧面近似为矩形表面。

[0031] 其中试样的长度L、跨距长度 $L_0$ 、宽度W和高度H之间的比例可参考国家标准设定为10:8:2:1。然后在试样上预制缺陷,该缺陷可以是直线型缺陷或其它类型的缺陷。其中试样的总长度、跨度长度、宽度和高度的比例参考国家标准GB/T6398-2000。

[0032] 步骤200,架设光学观测平台,以观测和记录实验过程中试样两侧的裂纹长度变化。

[0033] 步骤300,对试样施加适当的载荷进行实验,且在裂纹长度每次扩展量超过指定长度时,暂停实验,对裂纹进行拍照并记录当前载荷和加载周次;其中:

[0034] 若裂纹长度在当前加载载荷级下且加载周次超过 $10^6$ 时不再变化,则提高一个加载载荷级;

[0035] 若裂纹长度扩展后超过试样的1/2高度,则结束该试样的实验。

[0036] 在该步骤中,指定裂纹长度扩展量根据测量系统的精度和实验要求设定,如0.01mm。在暂停实验后,每次分别在试样上的强化层、过渡层和基体上至少10个位置处得到测量数据,以获得足够多的数据点。每次实验需要在前一次实验的基础上进行加载载荷级的调整,载荷级差应保证测量的试样数据在强化层、过渡层和基体每个测量点附近的裂纹扩展速率能够绘制出一条完整的Paris曲线。而判定提高加载载荷级的加载周次取值,可以根据裂纹扩展量进行调整,需要每加载周次裂纹扩展量小于 $10^{-7}$ mm/cycle,即低于通常的疲劳裂纹扩展速率门槛值。

[0037] 步骤400,对实验数据进行分析 and 处理,得到当前构件的疲劳裂纹扩展速率。

[0038] 在该步骤中,需要观察在液氮条件下快速打断的试样断面状态,以修正裂纹长度;该修正裂纹长度的具体操作为:找到明显的裂纹前沿痕迹,沿与裂纹扩展垂直的方向等间距取5个数据测量点,分别测量每个点的裂纹长度后取平均值,即为该点的修正裂纹长度;当没有明显前沿痕迹的位置时,则通过相邻两个修正裂纹长度的线性插值进行修正。

[0039] 当前构件的疲劳裂纹扩展速率可以通过下式得到:

$$[0040] \quad \frac{da}{dN} = \frac{(\text{第}N\text{周裂纹长度} - \text{第}M\text{周裂纹长度})}{(N - M)};$$

[0041] 这一步通过前面的实验周次得到。

$$[0042] \quad \frac{da}{dN} = C(a)\Delta K^{n(a)};$$

[0043] 其中,da/dN为裂纹扩展速率, $\Delta K$ 为应力强度因子幅值,a为裂纹长度,C,n为试样材料的裂纹扩展速率特性参数。

[0044] 对上式进行积分：

$$[0045] \quad N_c = \int_0^{N_c} dN = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C(a)\Delta K^{n(a)}};$$

[0046] 可以得到深为 $a_0$ 的裂纹,扩展到危险值 $a_c$ 所需的周次 $N_c$ 。根据上述结果可以得到 $\Delta K$ 、 $da/dN$ 和裂纹长度距构件表面距离 $X$ 的关联数据。通过将每个试样的计算数据拟合,则可以得到构件不同位置的类Paris公式。当再次遇到该材料时,即可利用其 $C$ 和 $n$ 值直接得到该材料的裂纹扩展速率。

[0047] 本发明使用与全尺寸构件表层强化后微结构和力学特征量相同的试样,通过一种经济、可行的新的表层梯度结构试样疲劳实验技术,建立了一种新的表层梯度构件疲劳裂纹扩展速率测量、表征方法,达到测量全尺寸表面强化构件含缺陷的安全评估目的。

[0048] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

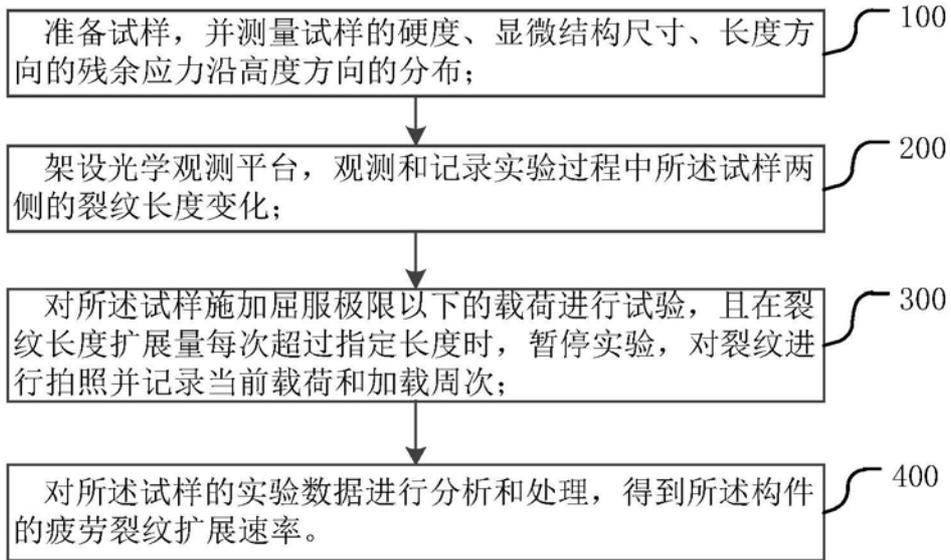


图1

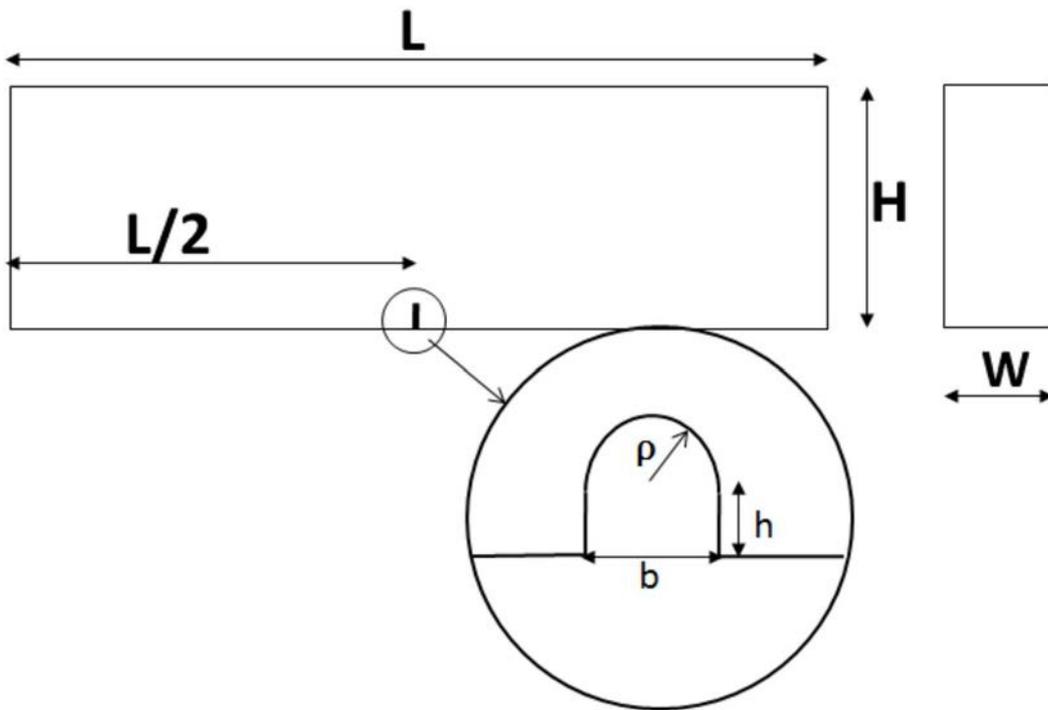


图2