



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114062136 A

(43) 申请公布日 2022. 02. 18

(21) 申请号 202111354767.0

(22) 申请日 2021.12.20

(71) 申请人 辽宁东科电力有限公司

地址 110006 辽宁省沈阳市浑南新区新果街3-1号

(72) 发明人 孙明成 王天鹏 李宏强

(74) 专利代理机构 沈阳杰克知识产权代理有限公司 21207

代理人 王洋

(51) Int. Cl.

G01N 3/08 (2006.01)

G01N 3/42 (2006.01)

权利要求书2页 说明书5页 附图4页

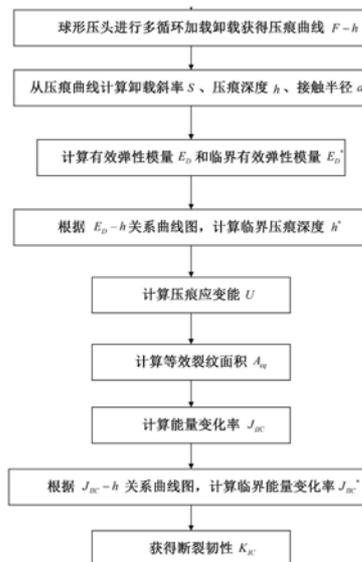
(54) 发明名称

一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法

(57) 摘要

本发明涉及一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法,属于力学性能分析领域。该方法包括以下步骤:一:通过球形压头进行多循环加载卸载获得金属材料压痕曲线F-h;二:从压痕曲线应用循环迭代的方法计算卸载斜率S、压痕深度h、压头和试样接触半径a、接触面积Ac、应变硬化指数n、原始弹性模量E0;三:计算有效弹性模量Ed和临界有效弹性模量Ed\*;四:绘制压痕深度h和有效弹性模量Ed关系曲线,计算临界压痕深度h\*;步骤五:计算压痕应变能U;步骤六:计算压入过程中的等效裂纹面积Aeq;七:计算压痕应变能U对等效裂纹面积Aeq的能量变化率JIIIC;八:绘制能量变化率JIIIC和压痕深度h关系曲线图,计算临界压痕深度h\*处的JIIIC;九:计算断裂韧性KIC和KIIIC。本发明能够极大节约制样和试验成本,可以准确有效地测量出断裂韧性数值,为准确选材、损伤容限设计、寿命评估提供参考依据。

据。



CN 114062136 A

1. 一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法,其特征在于,该方法包括如下步骤:

步骤一:通过球形压头进行多循环加载卸载获得金属材料压痕曲线F-h;

步骤二:从压痕曲线应用循环迭代的方法计算卸载斜率S、压痕深度h、压头和试样接触半径a、接触面积 $A_c$ 、应变硬化指数n、原始弹性模量 $E_0$ ;

步骤三:计算有效弹性模量 $E_D$ 和临界有效弹性模量 $E_D^*$ ;

步骤四:绘制压痕深度h和有效弹性模量 $E_D$ 关系曲线,计算临界压痕深度 $h^*$ ;

计算在不同压痕深度h卸载时有效弹性模量 $E_D$ ;将所有卸载时得到的 $\ln(h)$ 和 $\ln(E_D)$ 线性拟合得到h和 $E_D$ 的关系曲线图;从h和 $E_D$ 的关系曲线图中,得到临界压痕深度 $h^*$ 对应的临界有效弹性模量 $E_D^*$ ;

步骤五:计算压痕应变能U;

$$U = \frac{1}{2} * F * (h_d - \frac{F}{S_0}) = \frac{F^2}{4a} (\frac{1-v^2}{E_D} - \frac{1-v^2}{E_0}) \quad (4)$$

式中,U为压痕应变能;F为压痕力; $h_d$ 为弹性压痕深度; $S_0$ 为卸载斜率;a为球形压头和试样的接触半径;v为测试材料的泊松比; $E_D$ 为有效弹性模量; $E_0$ 为原始弹性模量;

步骤六:计算压入过程中的等效裂纹面积 $A_{eq}$ ;

$$A_{eq} = \pi a^2 D \quad (5)$$

$$a = \sqrt{\frac{h_r R R_0}{R_0 - R}} \quad (6)$$

式中,D为损伤因子;R为球形压头半径; $R_0$ 为残余压痕半径; $h_r$ 为卸载曲线的切线深度;

步骤七:计算压痕应变能U对等效裂纹面积 $A_{eq}$ 的能量变化率 $J_{IIC}$ ;

根据J积分的定义,能量变化率 $J_{IIC}$ 是压痕应变能U对等效裂纹面积 $A_{eq}$ 的变化率

$$J_{IIC} = \frac{dU}{dA_{eq}} \quad (7)$$

步骤八:绘制能量变化率 $J_{IIC}$ 和压痕深度h关系曲线图,计算临界压痕深度 $h^*$ 处的 $J_{IIC}$ ;

步骤九:计算断裂韧性 $K_{IC}$ 和 $K_{IIC}$ ;

对于平面应变下的裂纹扩展

$$K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_D J_{IIC}}{1-v^2}} \quad (8)$$

$$K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha} \quad (9)$$

$\alpha$ 对于钢铁材料是一个常数,一般取 $\alpha=0.35$ 。

2. 根据权利要求1所述的一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法,其特征在于,所述步骤三的具体计算过程如下:

有效弹性模量 $E_D$ 可以通过压痕曲线参数表示为

$$E_D = \frac{1-\nu^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}} = \frac{1-\nu^2}{\frac{2\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{1-\nu_i^2}{E_i}} \quad (1)$$

$\nu$ 为材料的泊松比； $\nu_i$ 为球形压头的泊松比； $E_r$ 为折算的弹性模量； $E_i$ 为压头的弹性模量； $A_c$ 为压头和试样的接触面积； $S$ 为压痕曲线的卸载斜率。

3. 根据权利要求1所述的一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法，其特征在于，所述步骤三的具体计算过程如下：

损伤因子 $D$ 可以由有效弹性模量 $E_D$ 和原始弹性模量 $E_0$ 确定：

$$D = 1 - \frac{E_D}{E_0} \quad (2)$$

临界损伤因子 $D^*$ 可以由临界孔洞率 $f^*$ 确定：

$$D^* = \frac{\pi}{\left(\frac{4}{3}\pi\right)^{\frac{2}{3}}} f^{*\frac{2}{3}} \quad (3)$$

根据研究，临界孔洞率一般取 $f^*=0.2$ 。

## 一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于力学性能分析领域,具体涉及一种利用压痕曲线得到金属材料断裂韧性的方法。

### 背景技术

[0002] 断裂韧性是材料强度和韧性的综合反映,用来表征材料抵抗裂纹失稳扩展能力,在评估在役设备结构完整性、估算设备的剩余寿命中具有重要作用。金属材料高温长期运行或辐照后脆化,存在突然断裂的风险,这需要通过断裂韧性来计算判断。传统的断裂韧性测试方法需要一系列步骤复杂的试验过程,包括破坏性取样、标准紧凑拉伸试样加工、疲劳裂纹预制和断裂韧性测试等,需要的试验材料多,周期长,而且无法应用于在役设备、微小试样的断裂韧性测试。

[0003] 材料断裂韧性的测试方法以 $K_{IC}$ 、J积分和CTOD三种方法为主。在断裂力学中, $K_{IC}$ 属于线弹性断裂力学,发展比较成熟;J积分和CTOD属于弹塑性断裂力学,发展并不完善。目前普遍采用 $K_{IC}$ 来评价金属材料的断裂韧性。平面断裂韧性 $K_{IC}$ 测量需要足够厚度的材料制成标准试样,但是很多材料的样品尺寸无法满足 $K_{IC}$ 标准要求。因此,大家尝试采用小试样或者无损检测方法对平面断裂韧性 $K_{IC}$ 进行估算。球形压痕试验不需要进行破坏取样,属于近乎无损的性能检测方法,因此能够应用于在役设备。随着压入深度的增加,压头下方材料产生孔洞损伤,孔洞率的增加使材料的有效横截面积减小,材料刚度减小,有效弹性模量减小,利用压痕曲线能够用来计算断裂韧性。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是克服现有断裂韧性测试方法的不足,从多循环压痕试验曲线开始,通过压痕能量法解决无裂纹试件的断裂问题,无需破坏取样制样,获取在役设备的断裂韧性。

[0005] 本发明的技术方案如下:一种基于压痕能量计算金属材料断裂韧性的方法,该方法包括如下步骤:

[0006] 步骤一:通过球形压头进行多循环加载卸载获得金属材料压痕曲线F-h;

[0007] 步骤二:从压痕曲线计算卸载斜率S、压痕深度h、压头和试样接触半径a、接触面积 $A_c$ 、应变硬化指数n、原始弹性模量 $E_0$ 等性能参数。

[0008] 步骤三:计算有效弹性模量 $E_D$ 和临界有效弹性模量 $E_D^*$ ;

[0009] 随着压头下压深度的增加,压头下方材料产生的损伤也会增加,有效弹性模量 $E_D$ 可以通过压痕曲线参数表示为

$$E_D = \frac{1 - \nu^2}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} = \frac{1 - \nu^2}{\frac{2\sqrt{A_c}}{\sqrt{\pi}S} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (1)$$

[0011]  $\nu$ 为材料的泊松比; $\nu_i$ 为球形压头的泊松比; $E_r$ 为折算的弹性模量; $E_i$ 为压头的弹性

模量;  $A_c$  为压头和试样的接触面积;  $S$  为压痕曲线的卸载斜率。

[0012] 根据等效应变原理, 损伤因子  $D$  可以由有效弹性模量  $E_D$  和原始弹性模量  $E_0$  确定。

$$[0013] \quad D = 1 - \frac{E_D}{E_0} \quad (2)$$

[0014] 临界损伤因子  $D^*$  和临界孔洞率  $f^*$  关系为

$$[0015] \quad D^* = \frac{\pi}{\left(\frac{4}{3}\pi\right)^{\frac{2}{3}}} f^{*\frac{2}{3}} \quad (3)$$

[0016] 根据研究, 临界孔洞率一般取  $f^* = 0.2$ 。

[0017] 步骤四: 绘制压痕深度  $h$  和有效弹性模量  $E_D$  关系曲线, 计算临界压痕深度  $h^*$ ;

[0018] 计算在不同压痕深度  $h$  卸载时有效弹性模量  $E_D$ 。将所有卸载时得到的  $\ln(h)$  和  $\ln(E_D)$  线性拟合得到  $h$  和  $E_D$  的关系曲线图。从  $h$  和  $E_D$  的关系曲线图中, 临界有效弹性模量  $E_D^*$  对应临界压痕深度  $h^*$ 。

[0019] 步骤五: 计算压痕应变能  $U$ ;

[0020] 如果要通过压痕法求出断裂韧性  $K_{IC}$ , 就必须通过压痕曲线参数求出压痕应变能  $U$ 。通过压痕曲线下方包围的面积, 得到压入过程中所做的功, 也就是压痕试样在整个过程中变形所吸收的能量。

[0021] 压入过程中的压痕应变能  $U$  为

$$[0022] \quad U = \frac{1}{2} * F * \left(h_d - \frac{F}{S_0}\right) = \frac{F^2}{4a} \left(\frac{1-\nu^2}{E_D} - \frac{1-\nu^2}{E_0}\right) \quad (4)$$

[0023] 式中,  $U$  为压痕应变能;  $F$  为压痕力;  $h_d$  为弹性压痕深度;  $S_0$  为卸载斜率;  $a$  为球形压头和试样的接触半径;  $\nu$  为测试材料的泊松比;  $E_D$  为有效弹性模量;  $E_0$  为原始弹性模量。

[0024] 步骤六: 计算压入过程中的等效裂纹面积  $A_{eq}$ ;

[0025] 压入过程中的等效裂纹面积  $A_{eq}$  为

$$[0026] \quad A_{eq} = \pi a^2 D \quad (5)$$

$$[0027] \quad a = \sqrt{\frac{h_r R R_0}{R_0 - R}} \quad (6)$$

[0028] 式中,  $D$  为损伤因子;  $R$  为球形压头半径;  $R_0$  为残余压痕半径;  $h_r$  为卸载曲线的切线深度。

[0029] 步骤七: 计算压痕应变能  $U$  对等效裂纹面积  $A_{eq}$  的能量变化率  $J_{IIC}$ ;

[0030] 根据  $J$  积分的定义, 能量变化率  $J_{IIC}$  是压痕应变能  $U$  对等效裂纹面积  $A_{eq}$  的变化率

$$[0031] \quad J_{IIC} = \frac{dU}{dA_{eq}} \quad (7)$$

[0032] 步骤八: 绘制能量变化率  $J_{IIC}$  和压痕深度  $h$  关系曲线图, 计算临界压痕深度  $h^*$  处的  $J_{IIC}$ ;

[0033] 压痕能量变化率  $J_{IIC}$  与压痕深度  $h$  并非呈线性关系, 随着压痕深度增大, 逐渐变为一条平行的渐近线。

[0034] 步骤九:计算断裂韧性 $K_{IC}$ 和 $K_{IIC}$ ;

[0035] 对于平面应变下的裂纹扩展

$$[0036] \quad K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_D J_{IIC}}{1-\nu^2}} \quad (8)$$

$$[0037] \quad K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha} \quad (9)$$

[0038]  $\alpha$ 对于钢铁材料是一个常数,一般取 $\alpha=0.35$ 。

[0039] 本发明创造的有益效果:采用本发明提供的技术方案,与现有技术相比,具有如下有益效果:

[0040] 1、本发明方法不但能够极大节约制样和试验成本,而且对于尺寸受限或者无法取样的成品设备,本发明方法都可以准确有效地测量出断裂韧性数值,为准确选材、损伤容限设计、寿命评估提供参考依据。

[0041] 2、计算断裂韧性所需要的材料基本性能参数,包括弹性模量、应变硬化指数、接触半径和接触面积,都从压痕曲线直接计算得到,不需要借助单轴拉伸等实验获得额外材料参数,节省了试验时间,简化了试验流程。

[0042] 3、由于球形压头不同于Berkovich、Vickers、圆锥压头等几何自相似压头,球形压头接触半径 $a$ 和压入深度 $h$ 之间为非线性关系,随着压痕接触角度 $\beta$ 变化。球形压头的压痕曲线能够提供压入过程中更丰富的信息。

[0043] 4、断裂韧性计算模型中考虑了压入试验中堆积/凹陷效应的影响,对压痕接触半径进行修正,使接触半径更符合实际,计算结果更准确。

[0044] 5、压痕能 $U$ 和等效裂纹面积 $A_{eq}$ 并非呈线性关系,因此 $\frac{dU}{dA_{eq}}$ 与压痕深度有关,并不是一个常数。本发明既计算了 $\frac{dU}{dA}$ ,又计算了临界压深 $h^*$ ,将临界压深处的 $\frac{dU}{dA}$ 作为 $J_{IIC}$ ,再计算 $K_{IC}$ ,断裂韧性计算结果更准确可靠。

## 附图说明

[0045] 图1为基于能量法计算压痕断裂韧性的流程图。

[0046] 图2为P22材料的压痕实验曲线图。

[0047] 图3为从压痕曲线获取材料基本性能参数。

[0048] 图4为有效弹性模量 $E_D$ 与压痕深度 $h$ 之间关系曲线图。

[0049] 图5为压痕应变能 $U$ 与等效裂纹面积 $A_{eq}$ 的关系曲线图。

[0050] 图6为压痕能量变化率 $J_{IIC}$ 与压痕深度 $h$ 关系曲线图。

## 具体实施方式

[0051] 下面将结合本发明创造实施例中的附图,对本发明创造实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明创造一部分实施例,而不是全部的实施例。

[0052] P22钢属于2.25Cr-1Mo型铁素体热强钢,具有良好的抗氧化性、高温强度好和韧性佳,广泛应用于火电、核电等服役条件较苛刻的高温管道和压力容器中。通过球形压痕试验得到P22管道的压痕曲线,基于压痕能量计算P22断裂韧性。

[0053] 1、通过球形压头加载卸载试验,获取P22材料的压痕实验曲线,如图2所示,为15个循环的加载卸载曲线。

[0054] 2、从压痕曲线计算断裂韧性 $K_{IC}$ 所需要的材料基本性能参数,包括弹性模量 $E$ 、应变硬化指数 $n$ 等,如图3所示,P22材料通过迭代法计算得到的弹性模量 $E=221400\text{MPa}$ ,应变硬化指数 $n=0.095$ ,屈服强度 $S_y=475\text{MPa}$ ,抗拉强度 $S_u=623\text{MPa}$ 。

[0055] 3、对压痕深度 $h$ 和有效弹性模量 $E_D$ 线性拟合:

[0056] 计算在不同压痕深度 $h$ 卸载时有效弹性模量 $E_D$ 。将所有卸载时得到的 $\ln(h)$ 和 $\ln(E_D)$ 线性拟合得到 $E_D-h$ 的关系曲线图,如图4所示。从临界有效弹性模量 $\ln E_D^*=5.27$ ,即 $E_D^*=194416\text{MPa}$ ,得到临界压痕深度 $\ln h^*=2.9\mu\text{m}$ ,即 $h^*=18.2\mu\text{m}$ 。

[0057] 4、计算压痕应变能 $U$ 与等效裂纹面积 $A_{eq}$ 的能量变化率 $J_{IIC}$ ,能量变化率 $J_{IIC}$ 曲线如图5所示。

[0058] 压入过程中的压痕应变能 $U$ 为

$$[0059] \quad U = \frac{1}{2} * F * (h_d - \frac{F}{S_0}) = \frac{F^2}{4a} (\frac{1-v^2}{E_D} - \frac{1-v^2}{E_0}) \quad (4)$$

[0060] 式中, $U$ 为压痕应变能; $F$ 为压痕力; $h_d$ 为弹性压痕深度; $S_0$ 为卸载斜率; $a$ 为球形压头和试样的接触半径; $v$ 为测试材料的泊松比; $E_D$ 为有效弹性模量; $E_0$ 为原始弹性模量。

[0061] 压入过程中的等效裂纹面积 $A_{eq}$ 为

$$[0062] \quad A_{eq} = \pi a^2 D \quad (5)$$

$$[0063] \quad a = \sqrt{\frac{h_r R R_0}{R_0 - R}} \quad (6)$$

[0064]  $R$ 为球形压头半径; $R_0$ 为残余压痕半径。

[0065] 根据 $J$ 积分的定义,能量变化率 $J_{IIC}$ 是压痕应变能 $U$ 对等效裂纹面积 $A_{eq}$ 的变化率

$$[0066] \quad J_{IIC} = \frac{dU}{dA_{eq}} \quad (7)$$

[0067] 4、拟合能量变化率 $J_{IIC}$ 和压痕深度 $h$ 关系曲线如图6所示,计算临界压痕深度 $h^*$ 处的 $J_{IIC}$ ,计算断裂韧性 $K_{IC}$ 和 $K_{IIC}$ 。

[0068] 压痕能量变化率 $J_{IIC}$ 与压痕深度 $h$ 并非呈线性关系,随着压痕深度增大,逐渐变为一条渐近线。

[0069] 对于平面应变下的裂纹扩展

$$[0070] \quad K_{IIC} = \sqrt{\frac{E_D J_{IIC}}{1-v^2}} \quad (8)$$

$$[0071] \quad K_{IC} = \frac{K_{IIC}}{\alpha} \quad (9)$$

[0072]  $\alpha$ 对于钢铁材料是一个常数,一般取 $\alpha=0.35$ 。

[0073] 如图6所示,计算得到的断裂韧性数值

$$K_{IC} = 130.76 \text{MPa}\sqrt{m}, K_{IIC} = 45.77 \text{MPa}\sqrt{m}。$$

[0074] 作为对比,采用紧凑拉伸试样,对P22材料进行断裂韧性标准试验,得到的断裂韧性数值为  $138.35 \text{MPa}\sqrt{m}$ 。本发明计算得到的断裂韧性数值为  $130.76 \text{MPa}\sqrt{m}$ , 误差为 5.49%, 精度较高, 满足工程应用需要。表1传统标准紧凑拉伸试样和本发明的断裂韧性对比

材料	断裂韧性 $K_{IC}$ (标准试验)	断裂韧性 $K_{IC}$ (本发明)	误差
P22钢	138.35	130.76	5.49%

。

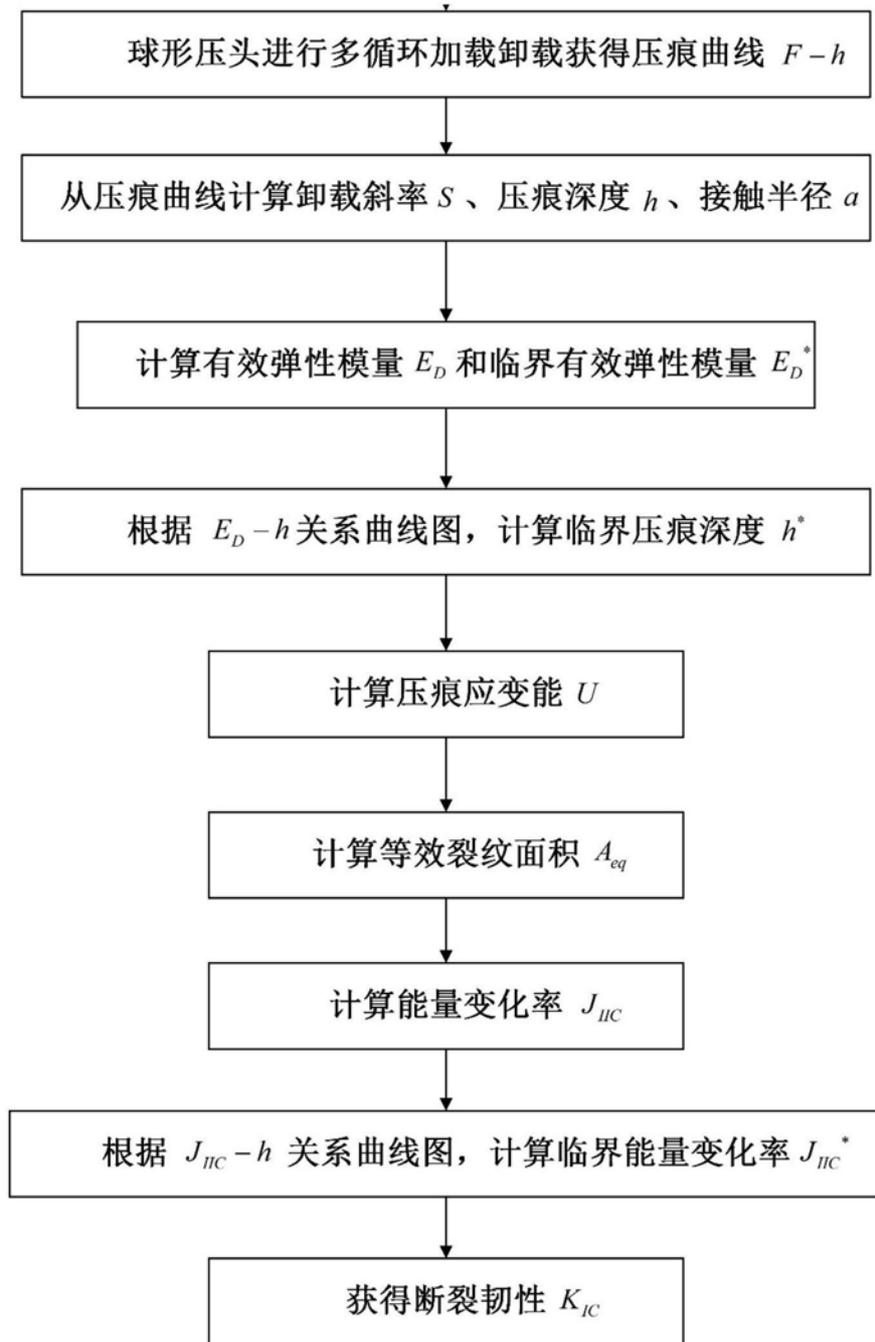


图1

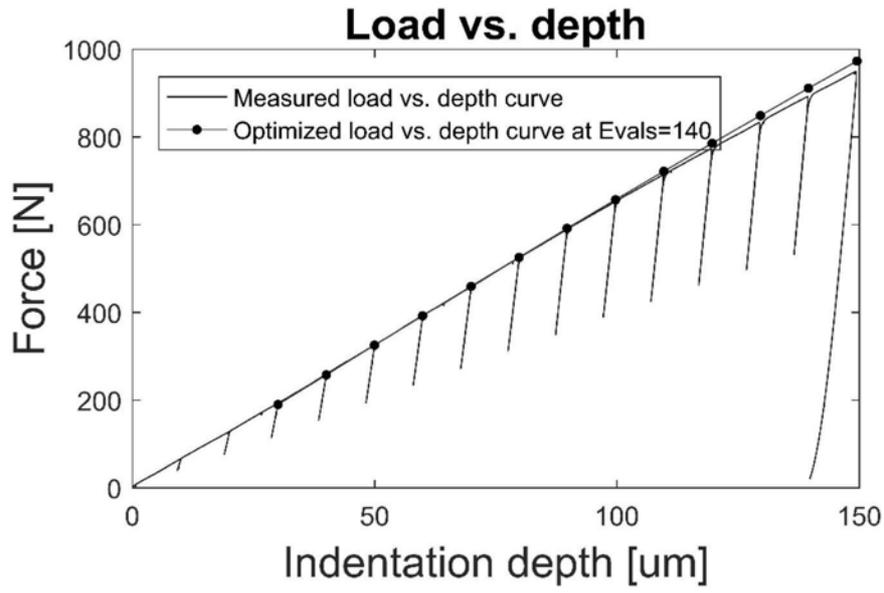


图2

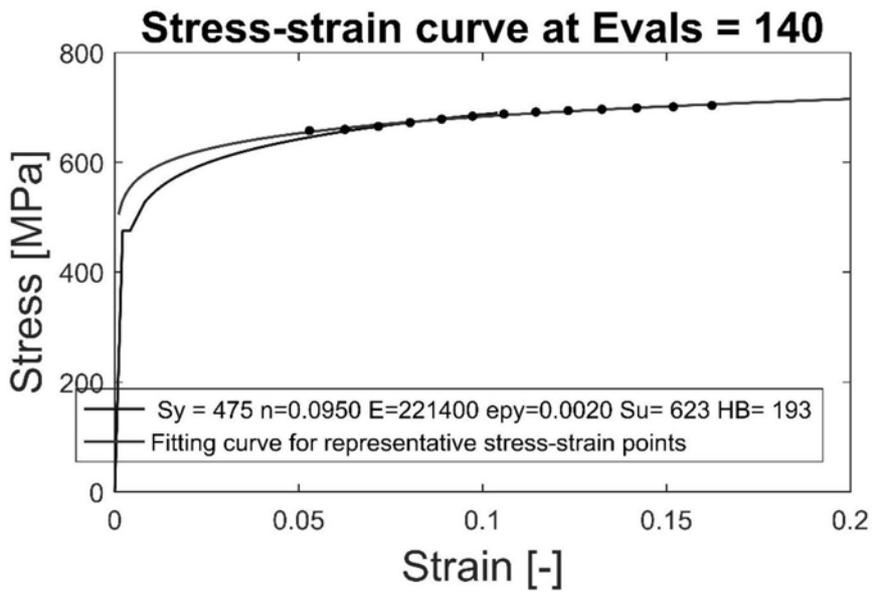


图3

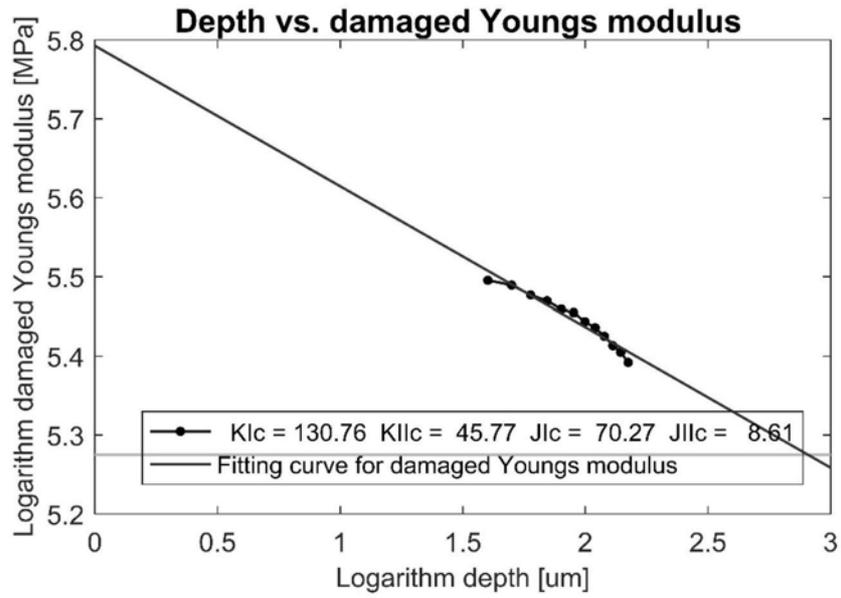


图4

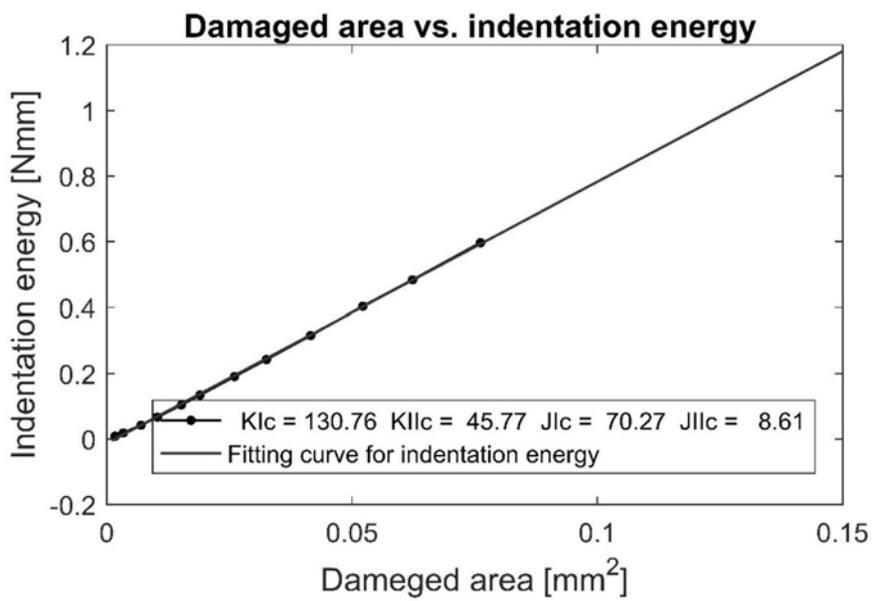


图5

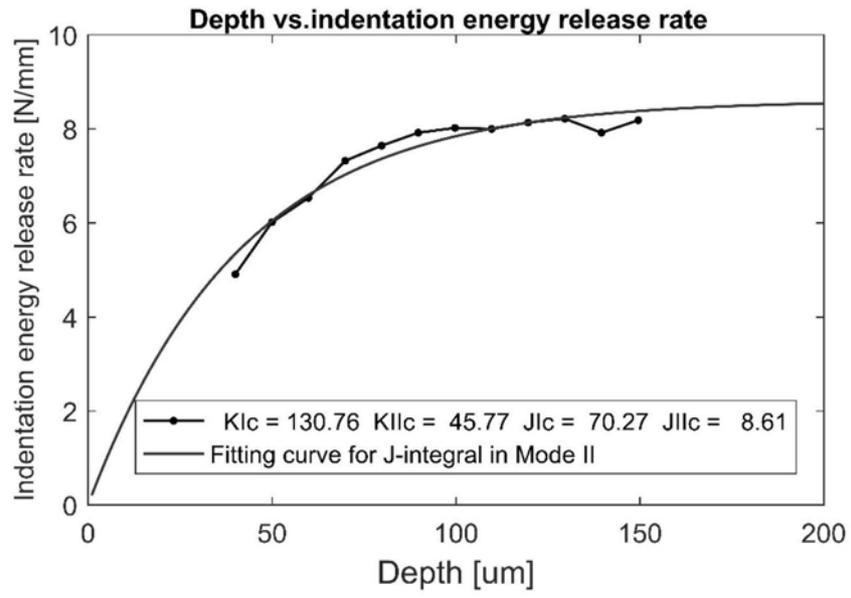


图6