



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102419224 B

(45) 授权公告日 2013.09.25

(21) 申请号 201110153054.8

(22) 申请日 2011.06.09

(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 吴臣武 陈光南

(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 王艺

(51) Int. Cl.

G01L 1/00(2006.01)

(56) 对比文件

CN 1065931 A, 1992.11.04, 全文.

CN 1374508 A, 2002.10.16, 全文.

JP 特开 2009-14606 A, 2009.01.22, 全文.

CN 101887472 A, 2010.11.17, 全文.

姚国凤等. 激光熔凝加工中瞬时温度场及残余应力数值模拟. 《应用激光》. 2002, 第 22 卷(第 2 期), 第 241-243, 222 页.

洪毅等. 超声红外热像技术及其在无损检测中的应用. 《南京大学学报(自然科学)》. 2003, 第 39 卷(第 4 期), 第 547-552 页.

审查员 吴艳苹

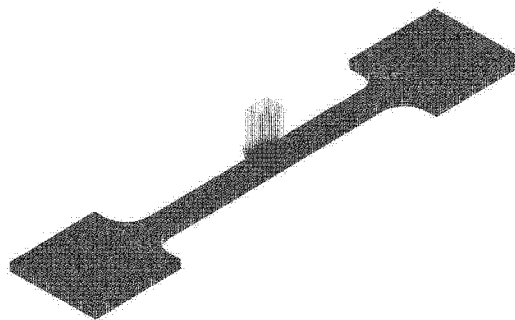
权利要求书1页 说明书3页 附图1页

(54) 发明名称

残余应力测试分析的局部热扰动方法

(57) 摘要

本发明公开了一种残余应力测试分析的局部热扰动方法,包括如下步骤:1)对材料的待测区域加热至该局部区域产生包含初始残余应力贡献的足够大的弹性变形,同时通过红外测温单元测量关键点温度,并通过摄像单元采集所述材料的表面变形过程的图像信息;2)根据所述图像信息通过计算得到热扰动后该局部区域的视应变场  $\epsilon_{SH}$ ,同时,基于有限元法计算局部加热所形成的温度场,并根据温度场 T 计算得到热弹性应变场  $\epsilon_{TE}$ ;3)根据  $\epsilon_{SH} = \epsilon_{TE} + \Delta \epsilon_{IN}$  的公式计算得到对应初始残余应力贡献的应变场增量  $\Delta \epsilon_{IN}$ ;4)根据公式  $\Delta \epsilon_{IN} = [K] \times \epsilon_{IN}$  计算获得初始残余应力。由于本发明采用局部热扰动的方式来检测材料的局部残余应力分布,因此不仅不用破坏材料本身,并且可以得到被测区域的残余应力分布结果。



1. 一种残余应力测试分析的局部热扰动方法,包括如下步骤:

1) 对材料的待测局部区域加热至该局部区域产生足够的温升、使该局部区域的初始残余应力/应变被扰动而重新分布,产生包含初始残余应力贡献的足够的弹性变形,同时通过红外测温单元测量关键点温度,并通过摄像单元采集所述材料的表面变形过程的图像信息;

2) 根据所述图像信息通过计算得到热扰动后该局部区域的视应变场  $\varepsilon_{SH}$ ,基于有限元法计算局部加热所形成的温度场 T,并根据温度场 T 计算得到热弹性应变场  $\varepsilon_{TE}$ ;

3) 根据  $\varepsilon_{SH} = \varepsilon_{TE} + \Delta \varepsilon_{IN}$  的公式计算得到残余应力/应变重新分布所导致的应变场增量  $\Delta \varepsilon_{IN}$ ;

4) 根据公式  $\sigma_{IN} = [K] \times \Delta \varepsilon_{IN}$  计算出初始残余应力场,其中的系数矩阵 [K] 的低阶形式为

$$[K] = \frac{-E^3}{(1+\nu)(1-2\nu)((\Delta E)^2 + E\Delta E\Delta\nu)} \times \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu & \Delta\nu & -\Delta\nu \\ -\Delta\nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu & \Delta\nu \\ \Delta\nu & -\Delta\nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \nu & \nu \\ \nu & 1 & \nu \\ \nu & \nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_{IN}^i \\ \Delta\varepsilon_{IN}^j \\ \Delta\varepsilon_{IN}^k \end{pmatrix}, \text{该式中 } E、\nu \text{ 为初始状态材料弹性模量和泊松比, } \Delta E、\Delta \nu \text{ 为热扰动后材料弹性模量和泊松比的变化量。}$$

性模量和泊松比,  $\Delta E$ 、 $\Delta \nu$  为热扰动后材料弹性模量和泊松比的变化量。

2. 如权利要求 1 所述的残余应力测试分析的局部热扰动方法,其特征在于,以红外测温结果对热边界条件进行修正以提高温度场计算精度。

3. 如权利要求 1 所述的残余应力测试分析的局部热扰动方法,其特征在于,所述摄像单元为高分辨率 CCD 相机。

4. 如权利要求 1 所述的残余应力测试分析的局部热扰动方法,其特征在于,采用激光束、电子束或火焰枪对所述局部区域进行加热。

5. 如权利要求 1 所述的残余应力测试分析的局部热扰动方法,其特征在于,所述足够的弹性变形是指弹性模量 E 的变化量  $\Delta E \geq 10\%$ 。

6. 如权利要求 1 所述的残余应力测试分析的局部热扰动方法,其特征在于,所述关键点是指所述局部区域中心点、距离中心点分别为 2 倍、1 倍、1/2 倍、1/4 倍和 1/8 倍中心点和边缘连线长度的点。

## 残余应力测试分析的局部热扰动方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种残余应力测试分析的局部热扰动方法。

### 背景技术

[0002] 残余应力是自平衡的结构 / 材料内部相互作用的体现,对残余应力的充分描述是全面评价材料力学性能和结构可靠性的重要前提,也是进行材料 / 结构合理设计的重要依据。对于制备过程很简单的材料 / 结构来说,或许能通过现有的理论计算来较准确的预测其残余应力状态;但是对于大多数的材料 / 结构体系而言,其残余应力特征需要以试验结合理论来进行测试分析。

[0003] 目前主要的残余应力测试原理和技术包括机械释放法和物理测试法。其中机械释放法如钻孔法、塑性变形法等大多具有破坏或半破坏性,这在很多场合是难以适用的。以 X 射线衍射法等为代表的物理测试法,主要通过测试残余应力导致材料微观结构如点阵常数的变化来反演残余应力水平。遗憾的是 X 射线对环境和操作人员有一定影响,且 X 射线衍射设备相对比较昂贵、测试过程相对比较复杂,这就使得该方法且目前只能针对有限点作较精确的分析。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在的问题,本发明的目的在于提供一种测量精确且不会破坏材料的残余应力测试分析的局部热扰动方法。

[0005] 本发明提供的一种残余应力测试分析的局部热扰动方法包括如下步骤:

[0006] 1) 对材料的待测局部区域加热至该局部区域产生包含初始残余应力贡献的弹性变形,同时通过红外测温单元测量关键点温度,并通过摄像单元采集所述材料的表面变形过程的图像信息;

[0007] 2) 根据所述图像信息通过计算得到热扰动后该局部区域的视应变场  $\epsilon_{SH}$ ,基于有限元法计算局部加热所形成的温度场 T,并根据温度场 T 计算得到热弹性应变场  $\epsilon_{TE}$ ;

[0008] 3) 根据  $\epsilon_{SH} = \epsilon_{TE} + \Delta \epsilon_{IN}$  的公式计算得到残余应力应变场增量  $\Delta \epsilon_{IN}$ ;

[0009] 4) 根据公式  $\sigma_{IN} = [K] \times \Delta \epsilon_{IN}$  计算出初始残余应力场,其中的系数矩阵 [K] 的低阶形式为

$$[0010] \quad [K] = \frac{-E^3}{(1+\nu)(1-2\nu)((\Delta E)^2 + E\Delta E\Delta\nu)} \times \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{pmatrix}$$

$$[0011] \quad \begin{pmatrix} \frac{\Delta E}{E} + \Delta \nu & \Delta \nu & -\Delta \nu \\ -\Delta \nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta \nu & \Delta \nu \\ \Delta \nu & -\Delta \nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta \nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \nu & \nu \\ \nu & 1 & \nu \\ \nu & \nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \varepsilon_{TN}^i \\ \Delta \varepsilon_{TN}^j \\ \Delta \varepsilon_{TN}^k \end{pmatrix}, \text{该式中 } E、\nu \text{ 为初}$$

[0012] 始状态材料弹性模量和泊松比,  $\Delta E$ 、 $\Delta \nu$  为热扰动后材料弹性模量和泊松比的变化量。

[0013] 优选地,以红外测温结果对有限元计算的热边界条件进行修正。

[0014] 优选地,所述摄像单元为高分辨率 CCD 相机。

[0015] 优选地,采用激光束、电子束或火焰枪等对所述局部区域进行加热。

[0016] 优选地,所述足够的弹性变形是指弹性模量  $E$  的变化量  $\Delta E \geq 10\%$ 。

[0017] 优选地,所述关键点是指所述局部区域中心点、距离中心点分别为 2 倍、1 倍、1/2 倍、1/4 倍和 1/8 倍中心点和边缘连线长度的点。

[0018] 本发明通过对待测结构进行局部加热制造局部热扰动,热影响区的材料因温度升高而发生弹性性能变化、导致初始残余应力/应变重新分布;残余应力/应变的重新分布将在结构表面视应变中产生一个增量;通过对视应变的构成进行计算分离初始残余应力的贡献,从而获得初始残余应力的分布。由于本发明采用局部热扰动的方式来检测材料的局部残余应力分布,因此不仅不用破坏材料本身,并且可以得到被测区域的残余应力分布结果,而通常采用的 X 射线衍射法通常只能得到若干测点的残余应力结果。此外,本发明通过控制红外测量精度和 CCD 摄像的分辨率可以使得测量结果更加准确,从而大大提高分析的准确性。

## 附图说明

[0019] 图 1 为本发明实施示例试样拉伸状态示意图。

## 具体实施方式

[0020] 下面结合具体的材料来对本发明的局部热扰动法进行说明。

[0021] 采用试验机弹性拉伸钛合金 (Ti6Al4V) 材料条状平板试样至有效段的应变为  $4e-3$ , 然后以激光辐照局部加热试样并保持试样总变形使应力在局部热扰动下发生松弛, 以 CCD 拍摄表面变形, 以红外测温仪测试获得典型测点温度历程, 如图 1 所示。

[0022] 测量的区域是激光光斑覆盖范围, 如图 1 所示。

[0023] 根据材料的热-机械特性可以确定将材料加热到  $425^\circ\text{C}$  (中心温度, 下同) 的时候, 弹性模量  $E$  的变化量  $\Delta E$  可以大于或等于  $10\%$ , 但不能超过  $500^\circ\text{C}$  度, 防止材料发生塑性变形。

[0024] 采用激光束 (也可以是电子束或火焰枪等, 只要能够产生较高能量密度的能束的仪器或是设备就可以) 对图 1 所示的待测局部区域进行加热至  $425^\circ\text{C}$ 。采用红外测温仪测量该局部区域的关键点的温度, 这里的关键点是指加热区域中心点、距离中心点分别为 2 倍、1 倍、1/2 倍、1/4 倍和 1/8 倍中心点和边缘连线长度的点。

[0025] 同时,通过高分辨率 CCD 摄像机采集该局部区域变形的图像信息并通过相关分析获取表面视变形场  $u_{SH}$ ,通过计算得到热扰动后该局部区域的视应变场  $\varepsilon_{SH}$ ,其分量

形式为  $\varepsilon_{SH}^{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j}^{SH} + u_{j,i}^{SH})$ 。通过图像信息得到视变形场  $u_{SH}$  可以采用已知的计算方法,例如,文章【实验力学 22(2007)556 - 567 和 International Journal of Impact Engineering 31(2005)329 - 339】公开的计算方法。对于本示例,  $\varepsilon_{SH} \approx 2.55e-3$ 。

[0026] 通过有限元法求解结构热传导方程、计算温度场  $T$ ,同时以前述关键点红外测温结果与对应点的有限元计算结果作比较。若二者的差别大于 1%,则修正热边界条件参数并再次求解热传导方程,如此反复、直至二者的差别小于 1%时,可基于该温度场  $T$  求解结构热弹性问题的基本方程获得结构变形场  $u_{TH}$ ,从结构变形场可以直接计算出结构单纯由材料热扰动导致的应变场(含热应变)  $\varepsilon_{TE}$ ,其求解方法可以参考文献【王洪纲,热弹性力学概论,北京:清华大学出版社 1989.】。对于本示例,  $\varepsilon_{TE} \approx 1.71e-3$ 。

[0027] 然后,由于在给定温度水平,线弹性材料变形和应变满足叠加原理。因此有矢量方程  $\varepsilon_{SH} = \varepsilon_{TE} + \Delta \varepsilon_{IN}$  成立,据此方程可以计算得到残余应力部分释放所导致的应变场增量  $\Delta \varepsilon_{IN}$ ,  $\Delta \varepsilon_{IN} = \varepsilon_{SH} - \varepsilon_{TE} \approx 0.84e-3$ 。

[0028] 最后,基于线弹性材料本构方程组及其增量形式与结构热扰动前后表层残余应力的平衡方程等,可推导得到在被测区域表层  $\sigma_{IN} = [K] \times \Delta \varepsilon_{IN}$ ,其中的系数矩阵  $[K]$  的低阶形式为

$$[0029] \quad [K] = \frac{-E^3}{(1+\nu)(1-2\nu)((\Delta E)^2 + E\Delta E\Delta\nu)} \times \begin{pmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{pmatrix}$$

$$[0030] \quad \begin{pmatrix} \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu & \Delta\nu & -\Delta\nu \\ -\Delta\nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu & \Delta\nu \\ \Delta\nu & -\Delta\nu & \frac{\Delta E}{E} + \Delta\nu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \nu & \nu \\ \nu & 1 & \nu \\ \nu & \nu & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon_{IN}^i \\ \Delta\varepsilon_{IN}^i \\ \Delta\varepsilon_{IN}^i \end{pmatrix}, \text{该式中 } E、\nu \text{ 为初始状态}$$

材料弹性模量和泊松比,  $\Delta E$ 、 $\Delta \nu$  为热扰动后材料弹性模量和泊松比的变化量。对于本示例,  $[K]$  可取其最简单的一维形式,即  $[K] = -E^2 / \Delta E \approx -526\text{GPa}$ 。因此,对于本示例,  $\sigma_{IN} \approx 441.91\text{MPa}$ 。这与实际施加的初始应力  $440\text{MPa}$  的相对误差  $<1\%$ 。

[0031] 本发明所获得的表层残余应力将是热影响区范围内的残余应力场,通过控制加热区域的空间分布,可获得所有关注区域的残余应力分布状态;并且由于本发明所涉及的加热能束、红外测温 and CCD 变形测试都是非接触式手段,因此本发明可实现残余应力场的非接触测试分析,分析的误差水平可控制在 1% 的量级。

[0032] 此外,本发明也适合各种不同的材料 / 结构进行局部残余压力测试分析,从而为材料力学性能评价和结构强度分析提供初始应力条件的依据。

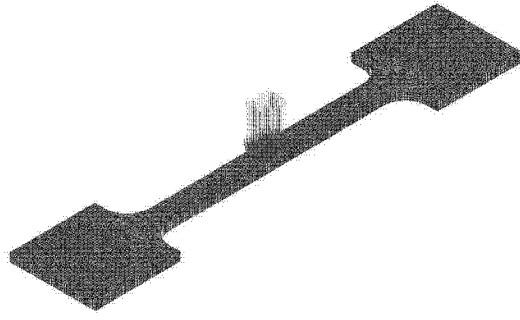


图 1