



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114088762 B

(45) 授权公告日 2022.04.12

(21) 申请号 202210020468.1

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2022.01.10

G01N 25/00 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114088762 A

审查员 程丹

(43) 申请公布日 2022.02.25

(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 张坤 胡铮 张万昊 韩明
王志涛 金孔杰 魏炳忱 张国洪
戴国文 许成法

(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 焦海峰

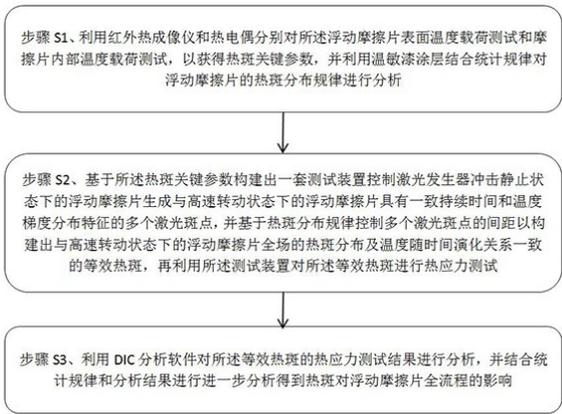
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷测试方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷测试方法及装置,包括以下步骤:步骤S1、利用红外热成像仪和热电偶获得热斑关键参数,并利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析;步骤S2、基于所述热斑关键参数构建出一套测试装置,利用所述测试装置对所述等效热斑进行热应力测试;步骤S3、利用DIC分析软件对所述等效热斑的热应力测试结果进行分析,并进一步分析得到热斑对浮动摩擦片全流程的影响。本发明保证关键参数一致的情况下对热斑进行复现,将对浮动摩擦片的热斑的分析从高速旋转和振动工况下的测量转变为静止状态下的测量,实现对浮动摩擦片上随机热斑的影响的精确测量。



1. 一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S1、利用红外热成像仪和热电偶分别对浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,以获得热斑关键参数,并利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,所述热斑关键参数表征为热斑在浮动摩擦片内外层的持续时间和温度梯度分布特征,所述热斑分布规律表征为浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系;

步骤S2、基于所述热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,并基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,再利用所述测试装置对所述等效热斑进行热应力测试;

步骤S3、利用DIC分析软件对所述等效热斑的热应力测试结果进行分析,并结合统计规律和分析结果进行进一步分析得到热斑对浮动摩擦片全流程的影响。

2. 根据权利要求1所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于:所述利用红外热成像仪和热电偶分别对所述浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,包括:

选择红外热成像仪对浮动摩擦片表面进行周向温度测量,得到浮动摩擦片表面热疲劳载荷的特征,以实现所述浮动摩擦片表面温度载荷测试;

选择热电偶预埋至浮动摩擦片板芯处对板芯表面进行耐热极限工况下的径向温度测量,得到板芯表面热疲劳载荷的特征,以实现所述浮动摩擦片内部温度载荷测试。

3. 根据权利要求2所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于:所述利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,包括:

在浮动摩擦片表面喷涂温敏漆涂层,对具有温敏漆涂层的浮动摩擦片进行服役实验;

在服役实验完成后根据不同温度下所述浮动摩擦片表面温敏漆涂层发光强度的变化,拟合得到发光强度与热斑温度之间的关系,并将发光强度的局部极值点作为热斑分布的区域;

将发光强度的时间属性映射为对应的所述热斑温度、热斑分布的区域的属性,以构成浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系。

4. 根据权利要求3所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于:所述基于所述热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,包括:

将浮动摩擦片、激光发生器、红外热像仪、LED光源、高速相机以及相应设备的控制电脑构建为所述测试装置;

依据所述热斑关键参数,控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片,并生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,以使得激光发生器在浮动摩擦片上形成的激光斑点的影响效果和热斑的影响效果保持一致。

5. 根据权利要求4所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特

征在于:所述基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,包括:

依据所述热斑分布规律控制多个激光斑点的间距,并研究出多个激光斑点之间的相互影响;

构建出将多个激光斑点的影响效果等效为单个激光斑点的影响效果的等效模型,并基于所述等效模型将多个激光斑点在影响效果上进行等效以实现激光斑点数量的压缩,再将压缩后的激光斑点作为与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,所述等效模型的函数表达式为:

$$\begin{cases} Q(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} q_{ij} \\ F(t, P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} f(t)_{ij} \end{cases};$$

式中, λ_{ij} 表征为等效转换参数, q_{ij} 表征为被等效的多个激光点的影响区域, $Q(P)$ 表征为等效激光点的影响区域, $F(t, P)$ 表征为等效激光点的热应力在这个作用时间内的温度演化, f_{ij} 表征为被等效的多个激光点的温度演化, t 表征整个作用时间;

依据等效热斑的关键参数,控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成所述等效热斑。

6. 根据权利要求5所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于:所述利用所述测试装置对所述等效热斑进行热应力测试,包括:

利用红外热成像仪获取等效热斑的热斑温度,同步利用高速相机获得等效热斑的热斑温度下的散斑图像。

7. 根据权利要求6所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,其特征在于,所述利用DIC分析软件对所述等效热斑的热应力测试结果进行分析,包括:

利用DIC分析软件处理高速相机获取到的散斑图像,得到浮动摩擦片的第一主应变云图,寻找第一主应变云图中的最大值点,并导出所述最大值点的主应变随时间变化的数据,进行热应力分析;

选取第一主应变最大值接近平台时的数据计算其平均值作为温度最高时的DIC测得的总应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$, 所述总应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 的分量表达式为:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{total} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{pmatrix};$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 表征为总应变, $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 由三个应力分量 ε_{xx} 、 ε_{yy} 和 ε_{xy} 构成, ε_{xx} 和 ε_{yy} 分别表征为两个垂直方向上的正应变, ε_{xy} 表征切应变;若选取的两个垂直的方向刚好为两个主方向,则 $\varepsilon_{xy} = 0$;

根据红外热像仪测得的最高温度与最低温度的温差 ΔT , 计算浮动摩擦片材料的热膨胀应变,并基于所述热膨胀应变得到热应力机械应变,再根据浮动摩擦片材料的本构模型求得浮动摩擦片的热应力,从而可以得到材料的热疲劳载荷,其中,

所述热膨胀应变的计算公式为：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{thermal} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix};$$

式中， $\boldsymbol{\varepsilon}_{thermal}$ 表征为热膨胀应变， ΔT 表征为最高温度与最低温度的温差， α 表征为温度变化导致的应变改变量与温度改变量的比值；

所述热应力机械应变的计算公式为：

$$\boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{\varepsilon}_{total} - \boldsymbol{\varepsilon}_{thermal};$$

式中， $\boldsymbol{\varepsilon}_M$ 表征为热应力机械应变；

所述热应力的计算公式为：

$$\boldsymbol{\sigma}_F = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-2\nu^2} & \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & \frac{E}{1-2\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^M \\ \varepsilon_{yy}^M \\ \varepsilon_{xy}^M \end{Bmatrix};$$

式中， $\boldsymbol{\sigma}_F$ 表征为热应力， E 表征为弹性模量、 ν 表征为波动比， G 表征为剪切模量， ε_{xx}^M 、 ε_{yy}^M 、 ε_{xy}^M 表征为热应力机械应变在两个互相垂直方向上的正应变分量和切应变分量。

8. 根据权利要求7所述的一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法，其特征在于，在导出最大值点的主应变随时间变化的数据之前构建表征主应变和时间映射关系的第一主应变随时间变化曲线，并基于第一主应变随时间变化曲线导出最大值点的主应变随时间变化的数据。

9. 一种如权利要求1-8任一项所述的浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法的测试装置，其特征在于，包括：

等效热斑生成装置，包括可调节多种参数的激光发生器，用于通过控制激光发生器的发生激光功率与持续时间，以改变浮动摩擦片被加热位置的升温温度；

温度测量系统，包括红外热像仪，用于通过红外热像仪拍摄的视频，获取加热过程中整个被测量区域的温度变化；

应变测量系统，用于在浮动摩擦片被测量区域，用耐高温自喷漆制作数字散斑，通过高速相机可以捕获被测量单位区域内的主应变变化及其数值。

10. 根据权利要求9所述的一种测试装置，其特征在于，所述应变测量系统包括浮动摩擦片、LED光源、高速相机、控制电脑，其中，

所述浮动摩擦片，其上面含有热斑及散斑；

所述LED光源，用于辅助照明；

所述高速相机，用于对实验过程中的散斑变化进行拍摄；

所述控制电脑，用于DIC数据处理及进行热应力分析。

一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷测试方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及浮动摩擦片热疲劳载荷测量技术领域,具体涉及一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法及装置。

背景技术

[0002] 浮动摩擦片在服役过程中会在表面出现热斑,实际应用中发现,热斑的出现会导致摩擦片芯板出现局部高热能量密度,进而对浮动摩擦片全场的热应力分布产生影响,最终影响浮动摩擦片的寿命。

[0003] 由于热斑出现的位置具有很强的随机性,且热斑持续的时间较短,具有瞬时性。出现位置的随机性和持续时间的瞬时性给热斑相关参数的测量造成很大困难,且热斑的出现往往伴随着浮动摩擦片的高速旋转和振动,工况较为恶劣,故现有的测量方法仅能通过红外测温传感器测量表面温度,无法获得更多的包括内外层温度分布、内外层热应力大小和影响区在内的各种信息。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法及装置,以解决现有技术中仅能通过红外测温传感器测量表面温度,无法获得更多的包括内外层温度分布、内外层热应力大小和影响区在内的各种信息的技术问题。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0006] 一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S1、利用红外热成像仪和热电偶分别对所述浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,以获得热斑关键参数,并利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,所述热斑关键参数表征为热斑在浮动摩擦片内外层的持续时间和温度梯度分布特征,所述热斑分布规律表征为浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系;

[0008] 步骤S2、基于所述热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,并基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,再利用所述测试装置对所述等效热斑进行热应力测试;

[0009] 步骤S3、利用DIC分析软件对所述等效热斑的热应力测试结果进行分析,并结合统计规律和分析结果进行进一步分析得到热斑对浮动摩擦片全流程的影响。

[0010] 作为本发明的一种优选方案,所述利用红外热成像仪和热电偶分别对所述浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,包括:

[0011] 选择红外热成像仪对浮动摩擦片表面进行周向温度测量,得到浮动摩擦片表面热疲劳载荷的特征,以实现所述浮动摩擦片表面温度载荷测试;

[0012] 选择热电偶预埋至浮动摩擦片板芯处对所述板芯表面进行耐热极限工况下的径向温度测量,得到板芯表面热疲劳载荷的特征,以实现与所述浮动摩擦片内部温度载荷测试。

[0013] 作为本发明的一种优选方案,所述利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,包括:

[0014] 在浮动摩擦片表面喷涂温敏漆涂层,对具有温敏漆涂层的浮动摩擦片进行服役实验;

[0015] 在服役实验完成后根据不同温度下所述浮动摩擦片表面温敏漆涂层发光强度的变化,拟合得到发光强度与热斑温度之间的关系,并将发光强度的局部极值点作为热斑分布的区域;

[0016] 将发光强度的时间属性映射为对应的所述热斑温度、热斑分布的区域的的时间属性,以构成浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系。

[0017] 作为本发明的一种优选方案,所述基于所述热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,包括:

[0018] 将浮动摩擦片、激光发生器、红外热像仪、LED光源、高速相机以及相应设备的控制电脑构建为所述测试装置;

[0019] 依据所述热斑关键参数,控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片,并生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,以使得激光发生器在浮动摩擦片上形成的激光斑点的影响效果和热斑的影响效果保持一致。

[0020] 作为本发明的一种优选方案,所述基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,包括:

[0021] 依据所述热斑分布规律控制多个激光斑点的间距,并研究出多个激光斑点之间的相互影响;

[0022] 构建出将多个激光斑点的影响效果等效为单个激光斑点的影响效果的等效模型,并基于所述等效模型将多个激光斑点在影响效果上进行等效以实现激光斑点数量的压缩,再将压缩后的激光斑点作为与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,所述等效模型的函数表达式为:

$$[0023] \quad \begin{cases} Q(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} q_{ij} \\ F(t, P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} f(t)_{ij} \end{cases};$$

[0024] 式中, λ_{ij} 表征为等效转换参数, q_{ij} 表征为被等效的多个激光点的影响区域, $Q(P)$ 表征为等效激光点的影响区域, $F(t, P)$ 表征为等效激光点的热应力在这个作用时间内的温度演化, f_{ij} 表征为被等效的多个激光点的温度演化, t 表征整个作用时间;

[0025] 依据等效热斑的关键参数,控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动

摩擦片生成所述等效热斑。

[0026] 作为本发明的一种优选方案,所述利用所述测试装置对所述等效热斑进行热应力测试,包括:

[0027] 利用红外热成像仪获取等效热斑的热斑温度,同步利用高速相机获得等效热斑的热斑温度下的散斑图像。

[0028] 作为本发明的一种优选方案,所述利用DIC分析软件对所述等效热斑的热应力测试结果进行分析,包括:

[0029] 利用DIC分析软件处理高速相机获取到的散斑图像,得到浮动摩擦片的第一主应变云图,寻找第一主应变云图中的最大值点,并导出所述最大值点的主应变随时间变化的数据,进行热应力分析;

[0030] 选取第一主应变最大值接近平台时的数据计算其平均值作为温度最高时的DIC测得的总应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$,所述总应变 $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 的分量表达式为:

$$[0031] \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{total} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{Bmatrix};$$

[0032] 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 表征为总应变, $\boldsymbol{\varepsilon}_{total}$ 由三个应力分量 ε_{xx} 、 ε_{yy} 和 ε_{xy} 构成, ε_{xx} 和 ε_{yy} 分别表征为两个垂直方向上的正应变, ε_{xy} 表征切应变;若选取的两个垂直的方向刚好为两个主方向,则 $\varepsilon_{xy} = 0$;

[0033] 根据红外热像仪测得的最高温度与最低温度的温差 ΔT ,计算浮动摩擦片材料的热膨胀应变,并基于所述热膨胀应变得到热应力机械应变,再根据浮动摩擦片材料的本构模型求得浮动摩擦片的热应力,从而可以得到材料的热疲劳载荷,其中,

[0034] 所述热膨胀应变的计算公式为:

$$[0035] \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{thermal} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix};$$

[0036] 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{thermal}$ 表征为热膨胀应变, ΔT 表征为最高温度与最低温度的温差, α 表征为温度变化导致的应变改变量与温度改变量的比值;

[0037] 所述热应力机械应变的计算公式为:

$$[0038] \quad \boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{\varepsilon}_{total} - \boldsymbol{\varepsilon}_{thermal};$$

[0039] 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_M$ 表征为热应力机械应变;

[0040] 所述热应力的计算公式为:

$$[0041] \quad \boldsymbol{\sigma}_F = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-2\nu^2} & \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & \frac{E}{1-2\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^M \\ \varepsilon_{yy}^M \\ \varepsilon_{xy}^M \end{Bmatrix};$$

[0042] 式中, $\boldsymbol{\sigma}_F$ 表征为热应力, E 表征为弹性模量、 ν 表征为波动比, G 表征为剪切模

量, ε_{xx}^M 、 ε_{yy}^M 、 ε_{xy}^M 表征为热应力机械应变在两个互相垂直方向上的正应变分量和切应变分量;

[0043] 作为本发明的一种优选方案,在导出最大值点的主应变随时间变化的数据之前构建表征主应变和时间映射关系的第一主应变随时间变化曲线,并基于第一主应变随时间变化曲线导出最大值点的主应变随时间变化的数据。

[0044] 作为本发明的一种优选方案,本发明提供了一种如所述的浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法的测试装置,包括:

[0045] 等效热斑生成装置,包括可调节多种参数的激光发生器,用于通过控制激光发生器的发生激光功率与持续时间,以改变浮动摩擦片被加热位置的升温温度。

[0046] 温度测量系统,包括红外热像仪,用于通过红外热像仪拍摄的视频,获取加热过程中整个被测量区域的温度变化;

[0047] 应变测量系统,用于在浮动摩擦片被测量区域,用耐高温自喷漆制作数字散斑,通过高速相机可以捕获被测量单位区域内的主应变变化及其数值。

[0048] 作为本发明的一种优选方案,所述应变测量系统包括浮动摩擦片、LED光源、高速相机、控制电脑,其中,

[0049] 所述浮动摩擦片,其上面含有热斑及散斑;

[0050] 所述LED光源,用于辅助照明;

[0051] 所述高速相机,用于对实验过程中的散斑变化进行拍摄;

[0052] 所述控制电脑,用于DIC数据处理及进行热应力分析。

[0053] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0054] 本发明提取热斑的关键参数,并通过其他的手段在保证关键参数一致的情况下对热斑进行复现,将对浮动摩擦片的热斑的分析从高速旋转和振动工况下的测量转变为静止状态下的测量,实现对浮动摩擦片上随机热斑的影响的精确测量,利用人工控制等效热斑生成位置克服随机性的问题,并依据高速相机和DIC分析方法克服瞬时性的问题。

附图说明

[0055] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0056] 图1为本发明实施例提供的浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法流程图;

[0057] 图2为本发明实施例提供的热斑相互影响示意图;

[0058] 图3为本发明实施例提供的第一主应变随时间变化曲线示意图;

[0059] 图4为本发明实施例提供的测试装置结构示意图。

[0060] 图中的标号分别表示如下:

[0061] 1-激光发生器;2-红外热像仪;3-浮动摩擦片;4-LED光源;5-高速相机;6-高速相机;7-高速相机同步触发装置;8-交换机;9-控制电脑。

具体实施方式

[0062] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明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一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0063] 如图1所示,为了实现对热斑的精确分析,得到热疲劳载荷,进而分析其对浮动摩擦片的影响,主要需要解决热斑的出现位置随机性和持续时间瞬时性这两个难点,本发明提供了一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,提取热斑的关键参数,并通过其他的手段在保证关键参数一致的情况下对热斑进行复现。将对浮动摩擦片的热斑的分析从高速旋转和振动工况下的测量转变为静止状态下的测量,利用人工控制等效热斑生成位置克服随机性的问题,并依据高速相机和DIC分析方法克服瞬时性的问题。

[0064] 一种浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,包括以下步骤:

[0065] 步骤S1、利用红外热成像仪和热电偶分别对浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,以获得热斑关键参数,并利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,热斑关键参数表征为热斑在浮动摩擦片内外层的持续时间和温度梯度分布特征,热斑分布规律表征为浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系;

[0066] 利用红外热成像仪和热电偶分别对浮动摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度载荷测试,包括:

[0067] 选择红外热成像仪对浮动摩擦片表面进行周向温度测量,得到浮动摩擦片表面热疲劳载荷的特征,以实现对浮动摩擦片表面温度载荷测试;

[0068] 选择热电偶预埋至浮动摩擦片板芯处对板芯表面进行耐热极限工况下的径向温度测量,得到板芯表面热疲劳载荷的特征,以实现对浮动摩擦片内部温度载荷测试。

[0069] 现有的方法无法对包括内外层温度分布、内外层热应力大小和影响区在内的热斑的具体影响进行测量。本实施例提供的方法基于对已有方法的改造,在表面温度测量之外,实现对内部温度的测量,获得热斑本身的关键参数。热斑本身的关键参数测量分为摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度测试。根据浮动摩擦片的实验工况和特点,选择高速红外测温传感器进行周向温度测量,可以得到摩擦片表面热疲劳载荷的特征。为了实现摩擦片芯板的温度测量,设计了热电偶接触测量法,开展了摩擦片芯板表面径向温度测试,选择与工况匹配的快响应热电偶提高接触法测温的响应速度,通过在摩擦片上预埋热电偶实现了耐热极限工况下温度场测量研究。

[0070] 利用温敏漆涂层结合统计规律对浮动摩擦片的热斑分布规律进行分析,包括:

[0071] 在浮动摩擦片表面喷涂温敏漆涂层,对具有温敏漆涂层的浮动摩擦片进行服役实验;

[0072] 在服役实验完成后根据不同温度下浮动摩擦片表面温敏漆涂层发光强度的变化,拟合得到发光强度与热斑温度之间的关系,并将发光强度的局部极值点作为热斑分布的区域;

[0073] 将发光强度的时间属性映射为对应的热斑温度、热斑分布的区域的时间属性,以构成浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系。

[0074] 热斑的分布规律测量主要通过温敏漆涂层结合统计规律进行分析。在实验过程中,摩擦片高速转动,其全场热斑分布难以通过热电偶或红外测温方法获得,温敏漆的应用可以解决这一问题。温敏漆主要由发光染料等构成。发光染料是一种以高分子为基质的涂料,涂料中含有对温度敏感的发光分子。温度的历史加载会导致其发光性能发生变化。根据不同温度下实验件表面温敏漆涂层发光强度的变化,可以拟合得到发光强度与温度加载之间的关系。温敏漆涂层的另一个重要特点为这种温度加载历史导致的光敏变化具有不可逆性。实验完成后,局部的极值点即为热斑出现过的区域,因而可以在实验后通过温敏漆涂层的分析获得散斑的分布规律。通过上述摩擦片表面温度载荷测试和摩擦片内部温度测试,可以得到热斑的关键参数,即热斑在内外层的持续时间和温度梯度分布。通过温敏漆涂层可以得到热斑的分布规律。将高速红外测温传感器、热电偶、温敏漆涂层的结果综合分析,可以得到浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系。

[0075] 步骤S2、基于热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,并基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,再利用测试装置对等效热斑进行热应力测试;

[0076] 基于热斑关键参数构建出一套测试装置控制激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,包括:

[0077] 将浮动摩擦片、激光发生器、红外热像仪、LED光源、高速相机以及相应设备的控制电脑构建为测试装置;

[0078] 依据热斑关键参数,控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片,并生成与高速转动状态下的浮动摩擦片具有一致持续时间和温度梯度分布特征的多个激光斑点,以使得激光发生器在浮动摩擦片上形成的激光斑点的影响效果和热斑的影响效果保持一致。

[0079] 基于热斑分布规律控制多个激光斑点的间距以构建出与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,包括:

[0080] 依据热斑分布规律控制多个激光斑点的间距,并研究出多个激光斑点之间的相互影响;

[0081] 构建出将多个激光斑点的影响效果等效为单个激光斑点的影响效果的等效模型,并基于等效模型将多个激光斑点在影响效果上进行等效以实现激光斑点数量的压缩,再将压缩后的激光斑点作为与高速转动状态下的浮动摩擦片全场的热斑分布及温度随时间演化关系一致的等效热斑,等效模型的函数表达式为:

$$[0082] \quad \begin{cases} Q(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} q_{ij} \\ F(t, P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_{ij} f(t)_{ij} \end{cases};$$

[0083] 式中, λ_{ij} 表征为等效转换参数, q_{ij} 表征为被等效的多个激光点的影响区域, $Q(P)$ 表

征为等效激光点的影响区域, $F(t, P)$ 表征为等效激光点的热应力在这个作用时间内的温度演化, f_y 表征为被等效的多个激光点的温度演化, t 表征整个作用时间;

[0084] 依据等效热斑的关键参数, 控制测试装置中的激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片生成等效热斑。

[0085] 等效热斑的生成需要依据第一步测量的热斑关键参数与分布规律作为参照。依据所获取的关键参数, 采用激光发生器冲击静止状态下的浮动摩擦片, 通过控制热斑内外层的持续时间和温度梯度分布的一致性, 确保激光的影响效果和热斑保持一致。通过这种方式, 形成了一套测试装置, 实现了摩擦副的热疲劳载荷的方便测量, 解决了在实际工作过程中难以测试的问题。该套系统由浮动摩擦片、激光发生器、红外热像仪、LED光源、高速相机以及相应设备的控制电脑组成。摩擦片表面温度分布情况采用红外热成像仪获取, 获取表面热载荷的同时, 同步采用DIC测试的方法获得该温度下的散斑图像, 处理可得芯板表面热应力, 通过分析可以得到浮动摩擦片的热疲劳载荷。

[0086] 依据所获取的分布规律可以得到热斑之间的距离, 并进一步研究邻近热斑之间的影响。浮动摩擦片在实验过程中会产生多个热斑, 部分热斑之间距离较近, 且相互之间有影响, 如图2所示的不同热斑之间的相互影响。本实施例中提到的“等效热斑”中的“等效”, 不仅仅体现在单个实验中热斑和单个模拟热斑(激光斑点)之间的等效, 更体现在多个实验中热斑和单个模拟热斑(激光斑点)之间的等效。本实施例中还构建了一种新的等效方法, 通过等效模型的公式, 依据一定概率下影响效果的一致性, 实现了从多个实验中热斑到单个模拟热斑之间的等效。两者之间的等效主要是依据影响效果在一定概率下的一致性。

[0087] 利用测试装置对等效热斑进行热应力测试, 包括:

[0088] 利用红外热成像仪获取等效热斑的热斑温度, 同步利用高速相机获得等效热斑的热斑温度下的散斑图像。

[0089] 步骤S3、利用DIC分析软件对等效热斑的热应力测试结果进行分析, 并结合统计规律和分析结果进行进一步分析得到热斑对浮动摩擦片全流程的影响。

[0090] 利用DIC分析软件对等效热斑的热应力测试结果进行分析, 包括:

[0091] 利用DIC分析软件处理高速相机获取到的散斑图像, 得到浮动摩擦片的第一主应变云图, 寻找第一主应变云图中的最大值点, 并导出最大值点的主应变随时间变化的数据, 进行热应力分析;

[0092] 选取第一主应变最大值接近平台时的数据计算其平均值作为温度最高时的DIC测得的总应变 ϵ_{total} , 总应变 ϵ_{total} 的分量表达式为:

$$[0093] \quad \epsilon_{total} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{xx} \\ \epsilon_{yy} \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix};$$

[0094] 式中, ϵ_{total} 表征为总应变, ϵ_{total} 由三个应力分量 ϵ_{xx} 、 ϵ_{yy} 和 ϵ_{xy} 构成, ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 分别表征为两个垂直方向上的正应变, ϵ_{xy} 表征切应变; 若选取的两个垂直的方向刚好为两个主方向, 则 $\epsilon_{xy} = 0$;

[0095] 根据红外热像仪测得的最高温度与最低温度的温差 ΔT , 计算浮动摩擦片材料的热膨胀应变, 并基于热膨胀应变得到热应力机械应变, 再根据浮动摩擦片材料的本构模型

求得浮动摩擦片的热应力,从而可以得到材料的热疲劳载荷,其中,

[0096] 热膨胀应变的计算公式为:

$$[0097] \quad \boldsymbol{\varepsilon}_{thermal} = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix};$$

[0098] 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{thermal}$ 表征为热膨胀应变, ΔT 表征为最高温度与最低温度的温差, α 表征为温度变化导致的应变改变量与温度改变量的比值;

[0099] 热应力机械应变的计算公式为:

$$[0100] \quad \boldsymbol{\varepsilon}_M = \boldsymbol{\varepsilon}_{total} - \boldsymbol{\varepsilon}_{thermal};$$

[0101] 式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_M$ 表征为热应力机械应变;

[0102] 热应力的计算公式为:

$$[0103] \quad \boldsymbol{\sigma}_F = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-2\nu^2} & \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-2\nu^2} & \frac{E}{1-2\nu^2} & 0 \\ 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx}^M \\ \varepsilon_{yy}^M \\ \varepsilon_{xy}^M \end{Bmatrix};$$

[0104] 式中, $\boldsymbol{\sigma}_F$ 表征为热应力, E 表征为弹性模量、 ν 表征为波动比, G 表征为剪切模量, ε_{xx}^M 、 ε_{yy}^M 、 ε_{xy}^M 表征为热应力机械应变在两个互相垂直方向上的正应变分量和切应变分量。

[0105] 如图3所示,在导出最大值点的主应变随时间变化的数据之前构建表征主应变和时间映射关系的第一主应变随时间变化曲线,并基于第一主应变随时间变化曲线导出最大值点的主应变随时间变化的数据。

[0106] 如图4所示,基于上述浮动摩擦片等效热斑局部热疲劳载荷的测试方法,本发明提供了一种测试装置,包括:

[0107] 等效热斑生成装置,包括可调节多种参数的激光发生器1,用于通过控制激光发生器的发生激光功率与持续时间,以改变浮动摩擦片被加热位置的升温温度。

[0108] 温度测量系统,包括红外热像仪2,用于通过红外热像仪拍摄的视频,获取加热过程中整个被测量区域的温度变化;

[0109] 应变测量系统,用于在浮动摩擦片被测量区域,用耐高温自喷漆制作数字散斑,通过高速相机可以捕获被测量单位区域内的主应变变化及其数值。

[0110] 应变测量系统包括浮动摩擦片、LED光源、高速相机、控制电脑,其中,

[0111] 浮动摩擦片3,其上面含有热斑及散斑;

[0112] LED光源4,用于辅助照明;

[0113] 高速相机5、6,用于对实验过程中的散斑变化进行拍摄;

[0114] 控制电脑9,用于DIC数据处理及进行热应力分析。

[0115] 应变测量系统还集成有高速相机同步触发装置7和交换机8,交换机用于储存高速相机拍摄图像,并和控制电脑进行数据交换。

[0116] 本发明提取热斑的关键参数,并通过其他的手段在保证关键参数一致的情况下对热斑进行复现,将对浮动摩擦片的热斑的分析从高速旋转和振动工况下的测量转变为静止状态下的测量,实现对浮动摩擦片上随机热斑的影响的精确测量,利用人工控制等效热斑生成位置克服随机性的问题,并依据高速相机和DIC分析方法克服瞬时性的问题。

[0117] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

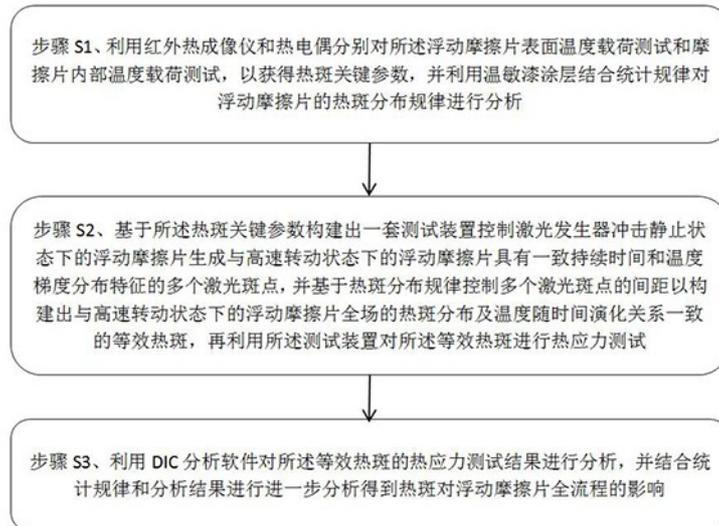


图1

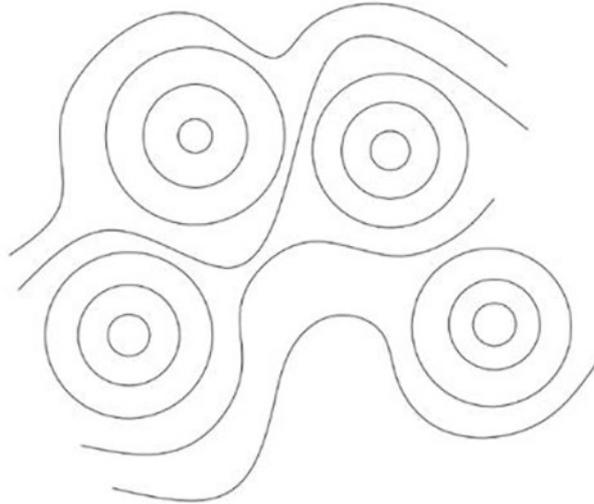


图2

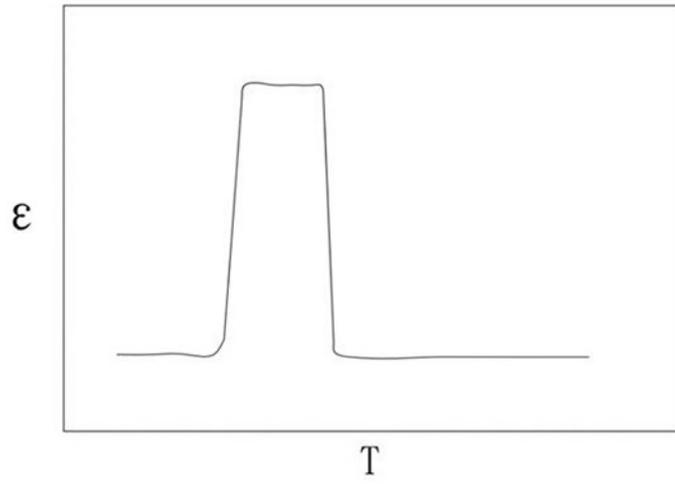


图3

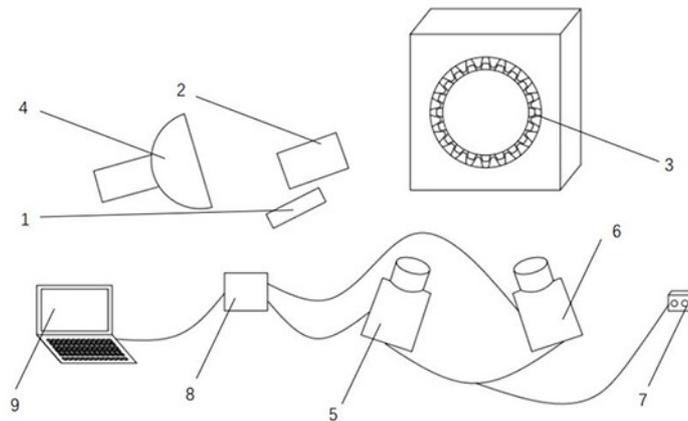


图4