# (19) 国家知识产权局



# (12)发明专利申请



(10)申请公布号 CN 115825061 A (43)申请公布日 2023.03.21

- (21)申请号 202211456248.X
- (22)申请日 2022.11.21
- (71) 申请人 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 宋宏伟 马特 袁武 王睿星
- (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

专利代理师 焦海峰

(51) Int.Cl.

GO1N 21/84(2006.01)
GO1M 9/02(2006.01)

**G01M 9/06** (2006.01)

#### (54) 发明名称

一种高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原 位观测方法

(57)摘要

本发明提供了一种高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,主要包括以下步骤: (1)搭建原位测量系统,获取激光辐照面动态烧 蚀行为的物理图像;(2)搭建高能激光器与高速 风洞联合试验装置;(3)通过图像处理方法对动 态烧蚀物理图像进行数据挖掘并获取瞬时烧蚀 深度数据。本发明能够获取到清晰的材料激光辐 照面动态烧蚀过程,解决了以往无法在复杂风洞 环境内对激光诱导的热化学烧蚀以及机械剥蚀 效应烧蚀特征的物理成像及动态测量的难题,为 高速目标激光毁伤机理研究提供了更具支撑性 和验证性的试验数据。 权利要求书2页 说明书6页 附图4页



CN 115825061 A

1.一种高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于,主要包括以下步骤:

(1) 搭建原位测量系统,获取激光辐照面动态烧蚀行为的物理图像;

(2) 搭建高能激光器与高速风洞联合试验装置;

(3) 通过图像处理方法对动态烧蚀物理图像进行数据挖掘并获取瞬时烧蚀深度数据。

2.如权利要求1所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于: 所述步骤(1)中所述原位测量系统包括高速摄像机、脉冲辅助光源、窄带通滤光片、衰减片、 同步仪、计算机和万兆网线;所述步骤(2)中所述高能激光器与高速风洞联合试验装置,包 括高能激光器、超声速风洞以及Q9同轴电缆连接器;

所述计算机通过所述万兆网线分别与所述脉冲辅助光源、所述高能激光器的控制器及 所述高速摄像机相连;所述同步仪通过所述Q9同轴电缆连接器分别与所述脉冲辅助光源、 所述高能激光器的控制器及所述高速摄像机相连;

所述高能激光器为光纤固体连续激光器,所述超声速风洞为直连式超声速燃烧实验 台;所述超声速风洞分为试验试件装载区及与试验试件装载区成对立面的观测区;所述试 验试件装载区设置有夹具;所述观测区设置有光学石英玻璃,用来避免光反射与折射对图 像采集的影响;通过所述Q9同轴电缆连接器将所述超声速风洞的触发信号传输给所述同步 仪,以保证所述高能激光器出光时间与所述原位观测系统采样时间的一致性。

3.如权利要求2所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于, 所述步骤(1)的具体过程为:

(1.1)通过所述计算机对脉冲激光的出光频率、延迟时间、光源强度和采集状态进行设置,使脉冲激光器在实验开始前处于外触发状态;通过所述计算机对高能激光器的激光功率、辐照时间和采集状态进行设置,使高能激光器在实验开始前处于外触发状态;通过所述计算机对所述高速摄像机的曝光时间、采样频率和采集状态进行设置,使所述高速摄像机 在实验开始前处于外触发状态;当高速风洞可开展激光实验后发出触发信号到所述同步仪中,通过所述同步仪统一触发所述脉冲辅助光源、高能激光器与高速摄像机,使所述脉冲辅助光源的出光时间、所述高能激光器的出光时间以及所述高速摄像机的采集时间一致;

(1.2)采用所述脉冲辅助光源照射到高能激光辐照试验试件表面,由于高温以及高能 激光的辐射强度很高,首先通过所述衰减片降低辐射强度,然后利用对应辅助光源中心波 长的所述窄带滤光片阻止偏离该波段意外的两侧光信号并允许材料表面反射的背景光通 过;通过所述Q9同轴电缆连接器将所述高速摄像机、所述脉冲辅助光源、所述同步仪以及所 述计算机之间进行信号传递;所述同步仪实现所述高速摄像机的采样频率与所述脉冲辅助 光源脉冲频率之间的帧同步;通过所述计算机分别设置所述高速摄像机的曝光时间以及所 述脉冲辅助光源的脉宽时间,以保证所述脉冲辅助光源所提供的背景光在所述高速摄像机 采样期间保持强度不变;最后通过所述高速摄像机对超声速切向气流条件下激光诱导的动 态烧蚀行为进行采集。

4.如权利要求3所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于: 所述脉冲辅助光源提供的背景光强度与范围可根据不同试验试件以及不同高能激光试验 工况通过扩束器进行调节。

5.如权利要求3所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于:

所述脉冲辅助光源与所述窄带通滤光片的中心波长均为红外波段,选取具体波长时则根据 普朗克定律得到的不同温度条件下光谱密度变化来避免高强度光谱特征谱线,并一定避免 所用高能激光器的波长。

6.如权利要求2所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于, 所述步骤(3)的具体步骤如下:

(3.1)若原位观测系统中所述高速摄像机采用的是彩色相机,则需将采集到的物理图像进行彩色图像转灰度图像处理,得到灰度图像的灰度级矩阵;若所述高速摄像机采用的 是黑白相机,则无需进行灰度处理;

(3.2)试验试件表面的不平整度所引起的非均匀反射光会导致低频背景信息,需要通 过高斯高通滤波器抑制图像中的低频信息并保留图像中纤维的高频信息;

(3.3)通过互相关算法确定两幅灰度图像之间的对应关系;

(3.4)通过补偿最小二乘法平滑互相关算法得到速度结果;

(3.5)最后通过纤维运动速度方向的变化来获得碳纤维增强环氧树脂CFRP层合板复合 材料的瞬态烧蚀深度。

7.如权利要求6所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于, 所述步骤(3.2)中的高斯高通滤波器传递函数为:

$$H(u,v) = 1 - e^{-D^2(u,v)/2D_0^2}$$
(1);

其中上式(1)中D(u,v)为距傅里叶变换中心原点的距离,D\_为截止频率。

8.如权利要求6所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于, 所述步骤(3.3)中建立灰度图像中的判读区f(M,N),其中判读区为选取图像中重点关注的 区域;t时刻纤维特征粒子存在于判读区(x,y)处,而t+Δt时刻特征粒子的所在判读区位置 (x+Δx,y+Δy)则需要利用互相关算法获得:

$$R(x, y, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right] \times \sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right] / \\ \left\{ \sqrt{\sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right]^2} \times \sqrt{\sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right]^2} \right\}$$
(2);

其中上式 (2) 中I<sub>1</sub>和I<sub>2</sub>分别表示t时刻和t+ $\Delta$  t时刻的图像灰度值,而 $\overline{I}_1$ 和 $\overline{I}_2$ 分别为:

$$\bar{I}_{1} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_{1}(x+i, y+j)$$
  
$$\bar{I}_{2} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_{2}(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j)$$
  
(3).

9.如权利要求6所述的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其特征在于, 所述步骤(3.4)中通过互相关算法得到的速度结果存在一定噪声信号,须通过基于补偿最 小二乘法的平滑算法对速度结果进行处理:

$$F(\hat{y}) = RSS + sP(\hat{y}) = \|\hat{y} - y\|^2 + sP(\hat{y})$$
(4):

其中上式(4)中RSS为残差平方和,P为补偿项,|| ||为欧式范数。

## 一种高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法

#### 技术领域

[0001] 本发明涉及高能激光毁伤效应研究领域,具体涉及一种高速气流下激光诱导超高 温烧蚀的原位观测方法。

#### 背景技术

[0002] 激光毁伤效应研究作为激光应用的重要领域,是指导高能激光作战能力的基础与前提。考虑高速气流对激光毁伤行为的影响,对激光而言更具实际意义,所以为满足国家激光武器领域的重大战略需求,研究超高速风洞条件下的激光毁伤机理是必要的。高速来流条件下激光辐照靶目标,尤其是复合材料,可能因物理、化学和力学因素造成质量损失,从而引起材料发生烧蚀,包含氧化、热解、升华、热裂破坏和机械剥蚀等多种复杂过程;而清晰的靶目标激光辐照面瞬态烧蚀行为能够为复杂的激光烧蚀机理分析提供明确的物理认知以及相应的验证性数据。

[0003] 超高速风洞环境中存在强干扰信号,运行时的振动以及高能激光诱导的靶目标激 光辐照面高温强辐射以及自身反射等多种原因,导致获取靶目标激光辐照面的烧蚀演化以 及失效过程变得极为困难,常采用试验前后对比的方式来获取靶目标的烧蚀形貌、烧蚀深 度以及烧蚀质量等试验数据,并通过多种材料分析手段,包括扫描电镜(SEM)、能谱分析 (EDS)、X射线衍射(XRD)以及微计算机断层扫描技术(μ-CT)等方式来推测、分析激光烧蚀机 理。但高速气流下的激光烧蚀机理是复杂的、非线性变化的,对比、推测的分析方法无法有 效说明其中的变化过程,也导致高能激光与高速气流联合作用时的烧蚀机理还不明确。 [0004] 因此,迫切需要针对激光烧蚀形貌发展一种在线、实时的测量方法,为高速气流条 件下激光诱导的复杂热力烧蚀行为研究提供瞬态物理图像以及相关试验数据。

#### 发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种适用于超高声速风洞内激光诱导材料高温烧蚀的原 位观测方法,该方法能够获取到清晰的材料激光辐照面动态烧蚀过程,解决了以往无法在 复杂风洞环境内对激光诱导的热化学烧蚀以及机械剥蚀效应烧蚀特征的物理成像及动态 测量的难题,为高速目标激光毁伤机理研究提供了更具支撑性和验证性的试验数据。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明提供的一种高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位 观测方法,主要包括以下步骤:(1)搭建原位测量系统,获取激光辐照面动态烧蚀行为的物 理图像;(2)搭建高能激光器与高速风洞联合试验装置;(3)通过图像处理方法对动态烧蚀 物理图像进行数据挖掘并获取瞬时烧蚀深度数据。

[0007] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中:所述步骤(1)中所述 原位测量系统包括高速摄像机、脉冲辅助光源、窄带通滤光片、衰减片、同步仪、计算机和万 兆网线;所述步骤(2)中所述高能激光器与高速风洞联合试验装置,包括高能激光器、超声 速风洞以及Q9同轴电缆连接器;

[0008] 所述计算机通过所述万兆网线分别与所述脉冲辅助光源、所述高能激光器的控制

器及所述高速摄像机相连;所述同步仪通过所述Q9同轴电缆连接器分别与所述脉冲辅助光源、所述高能激光器的控制器及所述高速摄像机相连;

[0009] 所述高能激光器为光纤固体连续激光器,所述超声速风洞为直连式超声速燃烧实验台;所述超声速风洞分为试验试件装载区及与试验试件装载区成对立面的观测区;所述试验试件装载区设置有夹具;所述观测区设置有光学石英玻璃,用来避免光反射与折射对图像采集的影响;通过所述Q9同轴电缆连接器将所述超声速风洞的触发信号传输给所述同步仪,以保证所述高能激光器出光时间与所述原位观测系统采样时间的一致性。

[0010] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中,所述步骤(1)的具体 过程为:

[0011] (1.1)通过所述计算机对脉冲激光的出光频率、延迟时间、光源强度和采集状态进行设置,使脉冲激光器在实验开始前处于外触发状态;通过所述计算机对高能激光器的激光功率、辐照时间和采集状态进行设置,使高能激光器在实验开始前处于外触发状态;通过 所述计算机对所述高速摄像机的曝光时间、采样频率和采集状态进行设置,使所述高速摄 像机在实验开始前处于外触发状态;当高速风洞可开展激光实验后发出触发信号到所述同 步仪中,通过所述同步仪统一触发所述脉冲辅助光源、高能激光器与高速摄像机,使所述脉 冲辅助光源的出光时间、所述高能激光器的出光时间以及所述高速摄像机的采集时间一 致;

[0012] (1.2)采用所述脉冲辅助光源照射到高能激光辐照试验试件表面,由于高温以及 高能激光的辐射强度很高,首先通过所述衰减片降低辐射强度,然后利用对应辅助光源中 心波长的所述窄带滤光片阻止偏离该波段意外的两侧光信号并允许材料表面反射的背景 光通过;通过所述Q9同轴电缆连接器将所述高速摄像机、所述脉冲辅助光源、所述同步仪以 及所述计算机之间进行信号传递;所述同步仪实现所述高速摄像机的采样频率与所述脉冲 辅助光源脉冲频率之间的帧同步;通过所述计算机分别设置所述高速摄像机的曝光时间以 及所述脉冲辅助光源的脉宽时间,以保证所述脉冲辅助光源所提供的背景光在所述高速摄 像机采样期间保持强度不变;最后通过所述高速摄像机对超声速切向气流条件下激光诱导 的动态烧蚀行为进行采集。

[0013] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中:所述脉冲辅助光源 提供的背景光强度与范围可根据不同试验试件以及不同高能激光试验工况通过扩束器进 行调节。

[0014] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中:所述脉冲辅助光源 与所述窄带通滤光片的中心波长均为红外波段,选取具体波长时则根据普朗克定律得到的 不同温度条件下光谱密度变化来避免高强度光谱特征谱线,并一定避免所用高能激光器的 波长。

[0015] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中,所述步骤(3)的具体步骤如下:

[0016] (3.1) 若原位观测系统中所述高速摄像机采用的是彩色相机,则需将采集到的物理图像进行彩色图像转灰度图像处理,得到灰度图像的灰度级矩阵;若所述高速摄像机采用的是黑白相机,则无需进行灰度处理;

[0017] (3.2)试验试件表面的不平整度所引起的非均匀反射光会导致低频背景信息,需

要通过高斯高通滤波器抑制图像中的低频信息并保留图像中纤维的高频信息;

[0018] (3.3) 通过互相关算法确定两幅灰度图像之间的对应关系;

[0019] (3.4) 通过补偿最小二乘法平滑互相关算法得到速度结果;

[0020] (3.5)最后通过纤维运动速度方向的变化来获得碳纤维增强环氧树脂CFRP层合板 复合材料的瞬态烧蚀深度。

[0021] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中,所述步骤(3.2)中的高斯高通滤波器传递函数为:

$$[0022] H(u,v) = 1 - e^{-D^2(u,v)/2D_0^2} (1)$$

[0023] 其中上式(1)中D(u,v)为距傅里叶变换中心原点的距离,D<sub>0</sub>为截止频率。

[0024] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中,所述步骤(3.3)中建 立灰度图像中的判读区f(M,N),其中判读区为选取图像中重点关注的区域;t时刻纤维特征 粒子存在于判读区(x,y)处,而t+Δt时刻特征粒子的所在判读区位置(x+Δx,y+Δy)则需 要利用互相关算法获得:

$$[0025] \qquad R(x, y, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right] \times \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right] / \\ \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right]^2} \times \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right]^2} \end{cases}$$
(2);

[0026] 其中上式 (2) 中 $I_1$ 和 $I_2$ 分别表示t时刻和t+ $\Delta$ t时刻的图像灰度值,而 $\overline{I}_1$ 和 $\overline{I}_2$ 分别为:

[0027] 
$$\bar{I}_1 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_1(x+i, y+j)$$

$$[0028] \qquad \bar{I}_2 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_2 (x + \Delta x + i, y + \Delta y + j)$$
(3).

[0029] 所述高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,其中,所述步骤(3.4)中通 过互相关算法得到的速度结果存在一定噪声信号,须通过基于补偿最小二乘法的平滑算法 对速度结果进行处理:

[0030] 
$$F(\hat{y}) = RSS + sP(\hat{y}) = \|\hat{y} - y\|^2 + sP(\hat{y})$$
 (4);

[0031] 其中上式(4)中RSS为残差平方和,P为补偿项,|| ||为欧式范数。

[0032] 采用上述技术方案,本发明具有如下有益效果:

[0033] 本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法构思合理,能够获取到清晰的材料激光辐照面动态烧蚀过程,解决了以往无法在复杂风洞环境内对激光诱导的热化 学烧蚀,热物理烧蚀以及机械剥蚀效应烧蚀特征的物理成像及动态测量的难题,有效地避 免了高能激光反射以及高能激光诱导材料高温辐射所导致的图像采集过度曝光问题,并对 获取到的清晰动态烧蚀过程进行图像处理和数据挖掘,得到了烧蚀对象的瞬时烧蚀深度, 为高速目标激光毁伤机理研究提供了更具支撑性和验证性的试验数据。

#### 附图说明

[0034] 为了更清楚地说明本发明具体实施方式或现有技术中的技术方案下面将对具体 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 附图是本发明的一些实施方式,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,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0035] 图1为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中原位观测系统、 高能激光器与高速风洞联合试验装置的结构连接示意图;

[0036] 图2为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中运用高速摄像机 在无其它辅助设备拍摄条件下获取到的结果图;

[0037] 图3为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法拍摄到的CFRP复合 材料在激光辐照与超高速气流联合作用下的动态烧蚀行为图;其中图3(a)-图3(d)分别为 激光辐照时间为0.8s,1.6s,2.4s,4.0s时的拍摄结果图;

[0038] 图4为为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中对瞬态烧蚀形 貌数据挖掘的图像处理流程图;

[0039] 图5为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中在所选判读区内通过高斯高通滤波器处理得到的结果图;其中图5(a)-图5(d)分别为激光辐照时间为0.8s, 1.6s,2.4s,4.0s时通过高斯高通滤波获取到的图像高频信号结果图;

[0040] 图6为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中通过互相关算法 以及数据平滑后获得的纤维运动速度矢量云图,其中图6(a)-图6(d)分别为激光辐照时间 为0.8s,1.6s,2.4s,4.0s时的速度矢量云图结果;

[0041] 图7为本发明高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法中通过速度矢量云 图获得的瞬时烧蚀深度曲线图。

## 具体实施方式

[0042] 下面将结合附图对本发明的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例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。

[0043] 下面结合具体的实施方式对本发明做进一步的解释说明。

[0044] 如图1所示,本实施例提供的高速气流下激光诱导超高温烧蚀的原位观测方法,主要包括以下步骤:

[0045] (1) 搭建原位测量系统,获取激光辐照面动态烧蚀行为的物理图像;

[0046] 如图1所示,原位测量系统包括高速摄像机、脉冲辅助光源、窄带通滤光片、衰减 片、同步仪、计算机和万兆网线;其中,该计算机通过万兆网线分别与脉冲辅助光源、高能激 光器的控制器、高速摄像机相连;该同步仪通过Q9同轴电缆连接器分别与脉冲辅助光源、高 能激光器的控制器和高速摄像机相连。

[0047] 上述步骤(1)具体包括以下步骤:

[0048] (1.1)通过计算机对脉冲激光的出光频率、延迟时间、光源强度和采集状态进行设置,使脉冲激光器在实验开始前处于外触发状态;通过计算机对高能激光器的激光功率、辐照时间和采集状态进行设置,使高能激光器在实验开始前处于外触发状态;通过计算机对

高速摄像机的曝光时间、采样频率和采集状态进行设置,使高速摄像机在实验开始前处于 外触发状态;当高速风洞可开展激光实验后发出触发信号到同步仪中,通过同步仪统一触 发脉冲辅助光源、高能激光器与高速摄像机,使脉冲辅助光源的出光时间、高能激光器的出 光时间以及高速摄像机的采集时间一致。

[0049] (1.2)采用脉冲辅助光源照射到高能激光辐照试验试件表面,由于高温以及高能激光的辐射强度很高,首先通过所述衰减片降低辐射强度,然后利用对应辅助光源中心波长的所述窄带滤光片阻止偏离该波段意外的两侧光信号并允许材料表面反射的背景光通过;通过Q9同轴电缆连接器将高速摄像机、脉冲辅助光源、同步仪以及计算机之间进行信号传递;同步仪实现高速摄像机的采样频率与脉冲辅助光源脉冲频率之间的帧同步;通过计算机分别设置高速摄像机的曝光时间以及脉冲辅助光源的脉宽时间,从而保证脉冲辅助光源所提供的背景光在高速摄像机采样期间保持强度不变;最后通过高速摄像机对超声速切向气流条件下激光诱导的动态烧蚀行为进行采集(如图2)。

[0050] 同时,该脉冲辅助光源提供的背景光强度与范围可根据不同试验试件以及不同高 能激光试验工况通过扩束器进行调节;该脉冲辅助光源与窄带通滤光片的中心波长均为红 外波段,选取具体波长时则根据普朗克定律得到的不同温度条件下光谱密度变化来避免高 强度光谱特征谱线,并一定避免所用高能激光器的波长。

[0051] (2) 搭建高能激光器与高速风洞联合试验装置;

[0052] 如图1所示,高能激光器与高速风洞联合试验装置,包括高能激光器、超声速风洞 以及Q9同轴电缆连接器;所述高能激光器为光纤固体连续激光器,超声速风洞为直连式超 声速燃烧实验台;该超声速风洞分为试验试件装载区及与试验试件装载区成对立面的观测 区;该试验试件装载区设置有夹具;该观测区设置有光学石英玻璃,用来避免光反射与折射 对图像采集的影响;通过所述Q9同轴电缆连接器将超声速风洞的触发信号传输给所述同步 仪,从而保证所述高能激光器出光时间与所述原位观测系统采样时间的一致性。

[0053] (3) 通过图像处理方法对动态烧蚀物理图像(如图3所示)进行数据挖掘并获取瞬时烧蚀深度数据;如图4所示,具体步骤如下:

[0054] (3.1) 若原位观测系统中所述高速摄像机采用的是彩色相机,则需将采集到的物理图像进行彩色图像转灰度图像处理,得到灰度图像的灰度级矩阵;若所述高速摄像机采用的是黑白相机,则无需进行灰度处理;

[0055] (3.2)试件表面的不平整度所引起的非均匀反射光会导致低频背景信息,所以需要通过高斯高通滤波器抑制图像中的低频信息并保留图像中纤维的高频信息(如图5);高斯高通滤波器传递函数为:

[0056]  $H(u,v) = 1 - e^{-D^2(u,v)/2D_0^2}$  (1);

[0057] 其中上式(1)中D(u,v)为距傅里叶变换中心原点的距离,D<sub>0</sub>为截止频率;

[0058] (3.3)通过互相关算法确定两幅灰度图像之间的对应关系(如图6)。更进一步的, 建立灰度图像中的判读区f(M,N),其中判读区为选取图像中重点关注的区域;t时刻纤维特 征粒子存在于判读区(x,y)处,而t+Δt时刻特征粒子的所在判读区位置(x+Δx,y+Δy)则 需要利用互相关算法获得:

$$[0059] \qquad R(x, y, \Delta x, \Delta y) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right] \times \sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right] / \\ \left\{ \sqrt{\sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_1(x+i, y+j) - \bar{I}_1 \right]^2} \times \sqrt{\sum_{i=0}^{M=1} \sum_{j=0}^{N=1} \left[ I_2(x+\Delta x+i, y+\Delta y+j) - \bar{I}_2 \right]^2} \right\} (2); \end{cases}$$

[0060] 其中上式 (2) 中 $I_1$ 和 $I_2$ 分别表示t时刻和t+ $\Delta$ t时刻的图像灰度值,而 $\overline{I}_1$ 和 $\overline{I}_2$ 分别为:

 $[0061] \qquad \bar{I}_1 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_1(x+i, y+j)$ 

$$[0062] \qquad \bar{I}_2 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} I_2 (x + \Delta x + i, y + \Delta y + j)$$
(3);

[0063] (3.4)通过补偿最小二乘法平滑互相关算法得到的速度结果。通过互相关算法得到的速度结果会存在一定噪声信号,数据平滑可以有效降低噪声。更进一步的,通过基于补偿最小二乘法的平滑算法对速度结果进行处理:

[0064] 
$$F(\hat{y}) = RSS + sP(\hat{y}) = \|\hat{y} - y\|^2 + sP(\hat{y})$$
 (4):

[0065] 其中上式(4)中RSS为残差平方和,P为补偿项,||||为欧式范数;

[0066] (3.5) 最后通过纤维运动速度方向的变化来获得碳纤维增强环氧树脂CFRP层合板 复合材料的瞬态烧蚀深度(如图7)。

[0067] 本发明能够获取到清晰的材料激光辐照面动态烧蚀过程,解决了以往无法在复杂风洞环境内对激光诱导的热化学烧蚀以及机械剥蚀效应烧蚀特征的物理成像及动态测量的难题,为高速目标激光毁伤机理研究提供了更具支撑性和验证性的试验数据。

[0068] 最后应说明的是:以上各实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述各实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分或者全部技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的范围。



图1



图2



图3



图4





图5



图6



图7