



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102778317 B

(45) 授权公告日 2014.07.02

(21) 申请号 201210227594.0

(22) 申请日 2012.07.02

(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 黄晨光 吴先前 魏延鹏 宋宏伟
王曦

(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.

G01L 5/00 (2006.01)

审查员 董晶

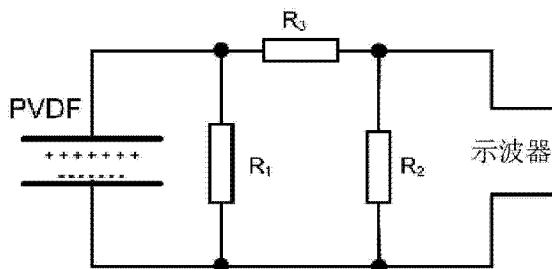
权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54) 发明名称

一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系
统和方法

(57) 摘要

本发明公开了一种激光冲击强化过程中冲击
波压力测量系统，包括：依次串联的第一电阻、第
三电阻和第二电阻，PVDF 传感器的一端连接在所
述第一电阻和第三电阻之间，另一端连接在所述
第一电阻和第二电阻之间；示波器的一端连接在所
述第三电阻和第二电阻之间，另一端连接在所
述第一电阻和第二电阻之间。本发明还公开了
一种采用上述测量系统进行冲击波压力测量的
方法。本发明减小了采集设备测量的电压。同时，由
于测量电路采用电阻模式，保证示波器两端的等
效电阻小于 50 欧姆，并解决 PVDF 对较高压力测量
时限幅。



1. 一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统,其特征在于,包括:依次串联的第一电阻、第三电阻和第二电阻,PVDF 传感器的一端连接在所述第一电阻和第三电阻之间,另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间;示波器的一端连接在所述第三电阻和第二电阻之间,另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间;其中,所述第一电阻、第二电阻和第三电阻满足如下条件:

$$R_1 / (R_2 + R_3) < 1, \quad \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} < 50\Omega.$$

2. 一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量的方法,其特征在于,包括如下步骤:

- 1) 将激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统的 PVDF 传感器分别置于厚度为 h_1 和 h_2 的铝膜的底端,然后通过激光对铝膜进行辐照,产生等离子体压力;
- 2) 经过对厚度为 h_1 和 h_2 的铝膜的测量,得到厚度为 h_1 时测量得到的峰值压力为 σ_1 ,半峰宽时间为 τ_1 ;厚度为 h_2 时测量得到的峰值压力为 σ_2 ,半峰宽时间为 τ_2 ;则激光诱导的压力峰值 σ_m 和半峰宽时间 τ_m 为:

$$\sigma_m = \frac{h_1 \sigma_2 - h_2 \sigma_1}{h_1 - h_2}$$

$$\tau_m = \frac{h_1 \tau_2 - h_2 \tau_1}{h_1 - h_2}$$

从而得到激光诱导的压力特征;

其中,所述激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统包括:依次串联的第一电阻、第三电阻和第二电阻,PVDF 传感器的一端连接在所述第一电阻和第三电阻之间,另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间;示波器的一端连接在所述第三电阻和第二电阻之间,另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间;其中,所述第一电阻、第二电阻和第三电阻满足如下条件:

$$R_1 / (R_2 + R_3) < 1, \quad \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} < 50\Omega.$$

一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统和方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统和方法。

背景技术

[0002] 激光冲击强化(Laser shock peening, LSP)是一种有效利用高功率密度激光对金属材料进行表面改性的机械处理方法。它利用短脉冲激光与金属材料表面相互作用形成的高幅值冲击波对材料冲击表面附近区域进行加工硬化,形成残余压应力,来提高材料的疲劳寿命、耐磨损和抗腐蚀等机械性能。

[0003] 激光诱导的压力特征是激光冲击强化过程中的一个关键因素,它直接决定冲击强化的效果。一般认为,激光诱导的峰值压力在2~2.5倍的材料Hugoniot弹性极限(Hugoniot elastic limit, HEL)值时,可以得到比较好的强化效果,超过2.5倍HEL时,冲击区域表面的最大塑性应变反而减小。

[0004] 激光冲击强化诱导的压力特征具有短瞬时、高幅值等特点。如图1所示,在ns量级半峰宽(Full width at half maximum, FWHM)、GW/cm²量级峰值功率密度的短脉冲强激光作用下,诱导的等离子体压力特征的半峰宽时间约为激光功率密度的FWHM的2~3倍左右,压力峰值可以达到几个GPa。

[0005] 为了搞清楚激光冲击强化过程中的压力特征,需要对激光诱导的压力特征,包括峰值压力和半峰宽时间进行实验测量,从而获得工艺参数对压力特征的影响,对激光冲击强化的效果进行直接评估。

[0006] 通过以上的描述可知,激光诱导的压力特征具有时间短、峰值压力高的特点,压力变化快、频率高。对具有这样特征的冲击压力进行测量时,常规测量手段采用如石英晶体压力计以及锰铜计等,由于受到的测量量程、测量精度以及频响等方面的制约,在实验中难以准确测量。

[0007] 近年来,PVDF压电薄膜传感被逐步应用到激光诱导的压力测量。PVDF压电薄膜传感器是利用PVDF薄膜的压电特性实现压力的测量。当PVDF薄膜受到外压力差 Δp 作用时,PVDF薄膜内部的正负电荷将分离,分别在上下表面聚集。通过对电荷量进行测量,就可以建立起压力 Δp 与表面电荷量 ΔQ 之间的关系 $\Delta Q=K \cdot A \cdot \Delta p$ 。其中A为压力作用的有效面积,K为PVDF薄膜的压电系数,表示单位面积单位压力产生的电荷量,单位为C/N。PVDF传感器由于两个表面的压力差产生的电荷需要经过外部电路进行采集,从而利用压电特性得到冲击波特征。

[0008] PVDF的外部测量电路分为电流模式和电荷模式(或称电压模式)。电流模式采用50Ω电阻与PVDF并联放电,示波器采集电阻两端的电压来间接得到放电电荷。这种电路的好处是频率响应高,但是进行高压测量时,测量的电压值容易超量程。电荷模式直接采用电荷积分器对电荷进行测量,但是对于高频响压力测量时,由于电荷积分器带宽的限制,不能准确反映压力的时间分布特性。激光冲击强化诱导的压力特征幅值高,频响快。

[0009] 因此,采用电流模式对压力特征进行测量。通常采用电流测量模式对冲击靶体背

表面位置的压力进行测量。由于冲击波需要经过靶体传播到背表面，其压力幅值和半峰宽时间都会发生改变，需要建立冲击表面压力的直接测量方法。另外，由于激光诱导的压力幅值较高，采用电流测量模式对激光诱导的压力进行测量时，会出现测量限幅的问题。

发明内容

[0010] 针对现有技术存在的问题，本发明的目的在于提供一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统和方法，在确保压力测量精度的同时，能够解决 PVDF 对较高压力测量时限幅的问题。

[0011] 本发明的一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统包括：依次串联的第一电阻、第三电阻和第二电阻，PVDF 传感器的一端连接在所述第一电阻和第三电阻之间，另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间；示波器的一端连接在所述第三电阻和第二电阻之间，另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间；其中，所述第一电阻、第二电阻和第三电阻满足如下条件：

$$[0012] R_1 / (R_2 + R_3) < 1, \quad \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} < 50\Omega.$$

[0013] 本发明的一种激光冲击强化过程中冲击波压力测量的方法包括如下步骤：

[0014] 1) 将激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统的 PVDF 传感器分别置于厚度为 h_1 和 h_2 的铝膜的底端，然后通过激光对铝膜进行辐照，产生等离子体压力；

[0015] 2) 经过对厚度为 h_1 和 h_2 的铝膜的测量，得到厚度为 h_1 时测量得到的峰值压力为 σ_1 ，半峰宽时间为 τ_1 ；厚度为 h_2 时测量得到的峰值压力为 σ_2 ，半峰宽时间为 τ_2 ；则激光诱导的压力峰值 σ_m 和半峰宽时间 τ_m 为：

$$[0016] \sigma_m = \frac{h_1 \sigma_2 - h_2 \sigma_1}{h_1 - h_2}$$

$$[0017] \tau_m = \frac{h_1 \tau_2 - h_2 \tau_1}{h_1 - h_2}$$

[0018] 从而得到激光诱导的压力特征；

[0019] 其中，所述激光冲击强化过程中冲击波压力测量系统包括：依次串联的第一电阻、第三电阻和第二电阻，PVDF 传感器的一端连接在所述第一电阻和第三电阻之间，另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间；示波器的一端连接在所述第三电阻和第二电阻之间，另一端连接在所述第一电阻和第二电阻之间；其中，所述第一电阻、第二电阻和第三电阻满足如下条件：

$$[0020] R_1 / (R_2 + R_3) < 1, \quad \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} < 50\Omega.$$

[0021] 本发明通过在 PVDF 传感器与采集设备(即示波器)之间搭建等效测量电路。对 PVDF 电路而言，第二电阻和第三电阻串联后与第一电阻并联；对采集设备而言，第一电阻和第三电阻串联后与第二电阻并联。这样，PVDF 两极放电形成的电流经过第二电阻和第三电阻分流，减小了采集设备测量的电压。同时，由于测量电路采用电阻模式，保证示波器两端的等效电阻小于 50 欧姆，并解决 PVDF 对较高压力测量时限幅。实验中第一、第二和第三

个电阻分别为 50 欧姆、50 欧姆、500 欧姆。采用该方法测量得到的电压峰值为 3.5 伏特。而如果采用传统的测量方法，测量的电压峰值为 38.5 伏特，远远超过示波器的测量量程。

附图说明

- [0022] 图 1 为短脉冲强激光诱导的压力特征曲线图；
- [0023] 图 2 为本发明的 PVDF 测量系统；
- [0024] 图 3 为本发明实施例激光功率密度时间分布曲线图；
- [0025] 图 4 为本发明实施例铝膜厚度分别为 $60 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 时，PVDF 测量得到的电路电压信号曲线图；
- [0026] 图 5 为本发明实施例铝膜厚度分别为 $60 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 时，PVDF 测量得到的压力时间波形曲线图。

具体实施方式

[0027] 如图 2 所示，本发明的测量系统包括：依次串联的第一电阻 R1、第三电阻 R3 和第二电阻 R2，PVDF 传感器的一端连接在第一电阻 R1 和第三电阻 R3 之间，另一端连接在第一电阻 R1 和第二电阻 R2 之间；采集设备（即示波器）的一端连接在第三电阻 R3 和第二电阻 R2 之间，另一端连接在第一电阻 R1 和第二电阻 R2 之间。其中，第一电阻 R1、第二电阻 R2 和第三电阻 R3 满足如下条件：

$$[0028] R_1 / (R_2 + R_3) < 1, \quad \frac{R_2 \times (R_1 + R_3)}{R_2 + R_1 + R_3} < 50\Omega.$$

[0029] 本发明通过在 PVDF 传感器与采集设备（即示波器）之间搭建等效测量电路。对 PVDF 电路而言，第二电阻 R2 和第三电阻 R3 串联后与第一电阻 R1 并联；对采集设备而言，第一电阻 R1 和第三电阻 R3 串联后与第二电阻 R2 并联。

[0030] 这样，PVDF 两极放电形成的电流经过第二电阻 R2 和第三电阻 R3 分流，减小了采集设备测量的电压。设示波器测量的电压为 U_m ，PVDF 两端的电压为 U。则

$$[0031] U_m/U = R_2 / (R_2 + R_3),$$

[0032] 可以通过设置较大的第三电阻 R3，来减小 U_m ，保证示波器测量的电压值不限幅，从而得到完整的电压波形。另外，等效测量电路为电桥模式，频响高，保证了测量的精度，测量的精度能够达到传统的电流电路测量模式。

[0033] 在具体测量的过程中，采用上述 PVDF 测量系统进行直接测量。将 PVDF 传感器分别置于厚度为 h_1 和 h_2 的铝膜的底端，然后通过激光对铝膜进行辐照，产生等离子体压力。通过对两种不同厚度的铝膜进行测量，来得到激光诱导的压力特征。铝膜厚度要足够小，设两次实验中的铝膜厚度分别为 h_1 和 h_2 。厚度为 h_1 时测量得到的峰值压力为 σ_1 ，半峰宽时间为 τ_1 ；厚度为 h_2 时测量得到的峰值压力为 σ_2 ，半峰宽时间为 τ_2 。通过线性插值，则激光诱导的压力峰值 σ_m 和半峰宽时间 τ_m 为

$$[0034] \sigma_m = \frac{h_1 \sigma_2 - h_2 \sigma_1}{h_1 - h_2}$$

$$[0035] \quad \tau_m = \frac{h_1\tau_2 - h_2\tau_1}{h_1 - h_2}$$

[0036] 通过这种方法,由两次的测量结果就可以直接得到激光诱导的压力特征,为LSP过程中的压力测量提供了一种实验方法。

[0037] 实验对厚度分别为60 μm和100 μm时激光作用下的等离子体压力进行了测量。实验中的激光时间波形如图3所示,激光功率密度时间和空间分布近似为高斯分布,其半峰宽约为12.1ns。在激光到达后4.0ns开始采集PVDF输出的电压信号。

[0038] 图4为铝膜厚度分别为60 μm和100 μm时,示波器测量得到的电压信号。在压力初始作用时,电压迅速上升,此时对应的压力迅速升高。在80.0ns后,电压变为负值,此时对应卸载阶段,压力开始下降。图5为铝膜厚度分别为60 μm和100 μm时对应的压力特征。铝膜厚度为60 μm时,压力在5.6ns开始升高,与激光的初始时间差Δt₁=9.6ns。在52.9ns到达压力峰值σ_{m1}=1.32GPa,随后在120ns附近降到零。压力的半峰宽τ₁为64.8ns,为激光半峰宽的5.35倍。铝膜厚度为100 μm时,压力在11.9ns位置开始上升,与激光的初始时间差Δt₂=15.9ns。在74.6ns到达压力峰值σ_{m2}=1.02GPa,随后在180ns附近降到零。压力的半峰宽τ₂为92.9ns,为激光半峰宽的7.68倍。

[0039] 一般认为等离子体压力的半峰宽时间近似为激光功率密度半峰宽时间的2-3倍左右。在实验测量过程中,激光诱导的等离子体需要经过铝膜传播,由于弹塑性波速的不同,导致压力的半峰宽逐渐增大。铝膜越厚,压力的持续时间越长,半峰宽越大。

[0040] 另外,铝膜厚度分别为60 μm和100 μm时,测量的压力峰值从1.32GPa衰减到1.02GPa。上述PVDF压电薄膜传感器测量的压力是光斑作用范围内的平均压力。对于激光功率密度空间分布为高斯分布的激光,峰值压力可以近似认为是平均压力的2倍,因此对60 μm和100 μm厚度的铝膜,实际测量的峰值压力可以近似认为是2.64GPa和2.04GPa。假定峰值压力和压力半峰宽时间在100 μm内线性衰减,因此可以确定在冲击表面等离子体压力峰值大约为3.54GPa,压力半峰宽时间为22.7ns。由此得到激光作用表面的等离子体压力特征。

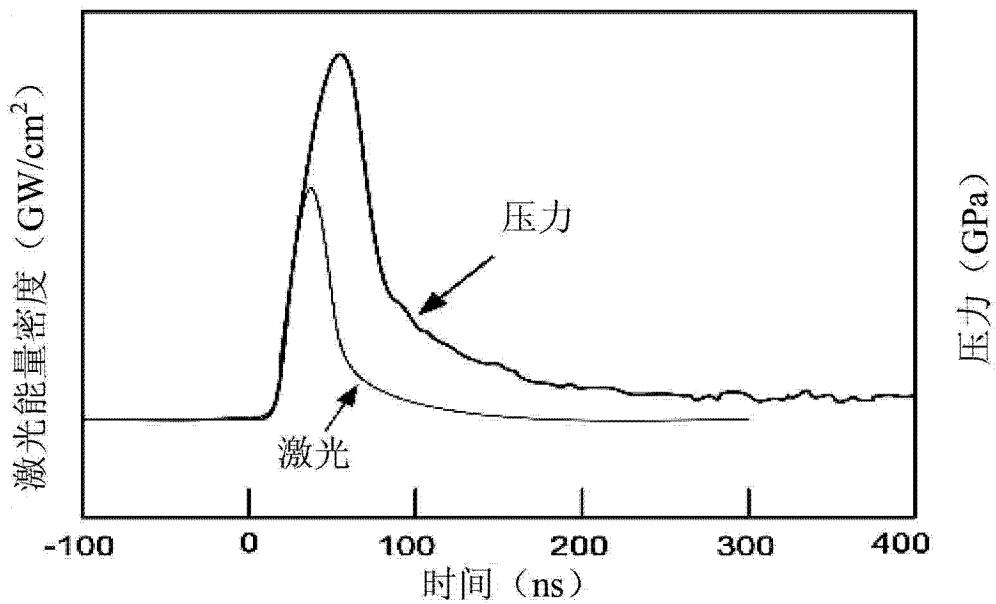


图 1

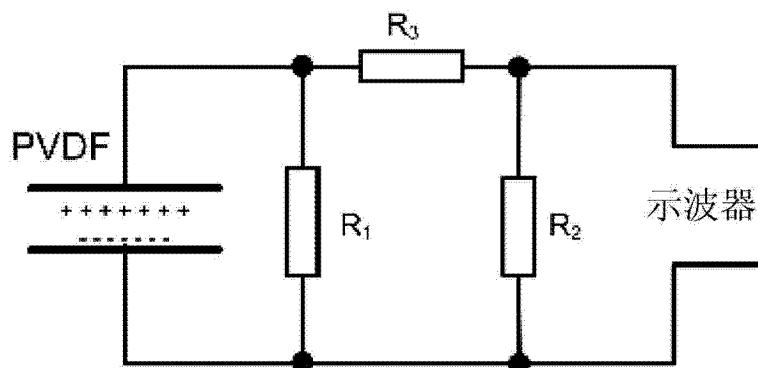


图 2

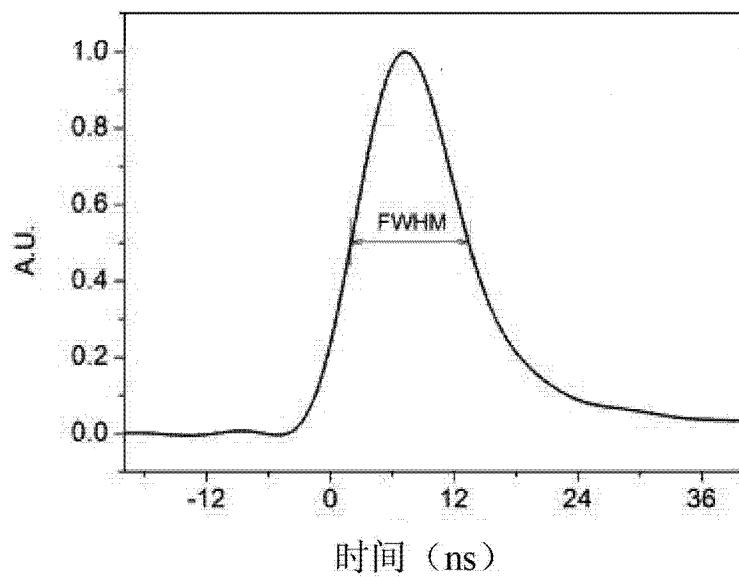


图 3

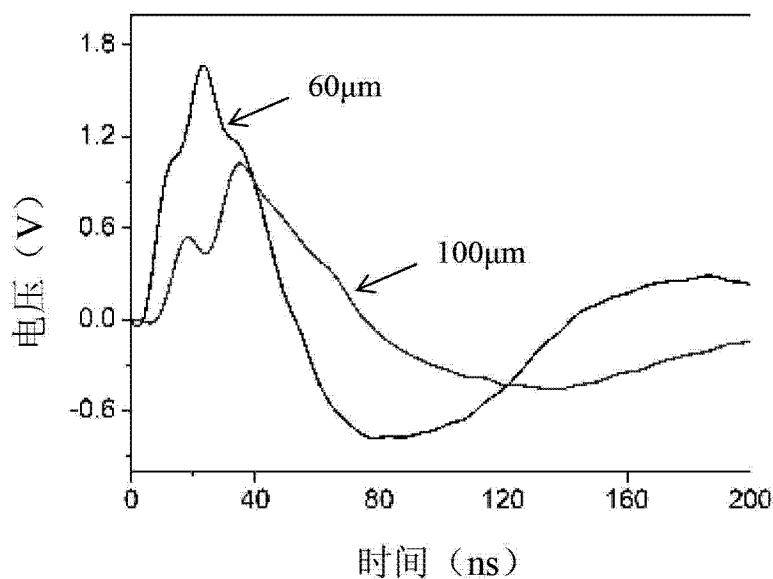


图 4

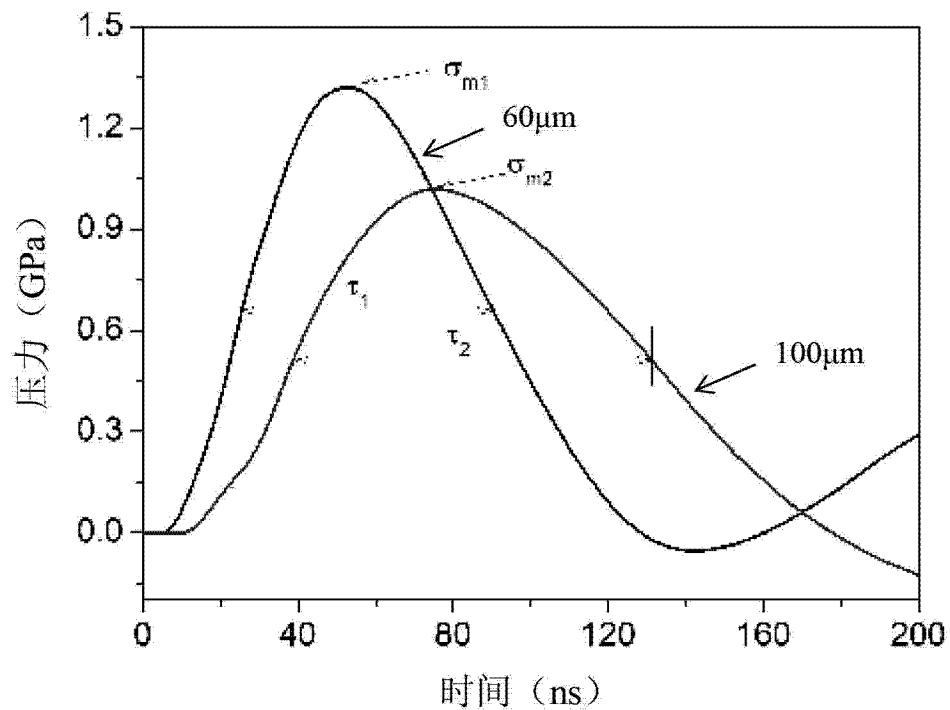


图 5