(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 102778257 A
(43)申请公布日 2012.11.14

(21)申请号 201210249341.3

(22)申请日 2012.07.18

(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 黄晨光 魏延鹏 吴先前

(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 王艺

(51)Int.Cl.
G01D 21/02(2006.01)

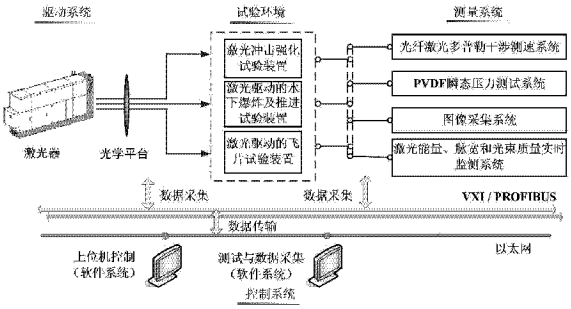
权利要求书 3 页 说明书 9 页 附图 3 页

(54)发明名称

强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台

(57)摘要

本发明公开一种强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台，包括依次相连的驱动系统、试验环境和测量系统，以及与所述驱动系统、试验环境和测量系统分别相连的控制系统。本发明通过一体化的设计和不同试验环境的研制，实现多种激光驱动爆炸与冲击功能，具有开放性；而且，通过多种高速、高分辨率的测试手段的协同与协调，对多个物理场（速度、压力、图像）进行实时测量，可对激光驱动爆炸与冲击试验过程进行较全面的表征。



CN 102778257 A

1. 一种强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台，其特征在于，包括依次相连的驱动系统、试验环境和测量系统，以及与所述驱动系统、试验环境和测量系统分别相连的控制系统，其中，

所述驱动系统用于将强激光光束传输至所述试验环境；

所述试验环境用于实现多种激光驱动的爆炸与冲击效应试验，包括激光冲击强化试验、激光驱动的水下爆炸及推进试验和激光驱动的飞片试验；

所述测量系统用于对上述几种试验进行实时的质点速度、冲击波压力、运动图像等多物理场同步测量，以及激光的能量、脉宽和光束质量等试验条件同步监测；

所述控制系统用于对所述驱动系统、试验环境和测量系统进行同步控制以及数据采集。

2. 如权利要求 1 所述的试验平台，其特征在于，

所述驱动系统包括相连的激光器和光学平台，

所述激光器用于产生短脉冲强激光光束；

所述光学平台用于将所述激光器所产生的强激光光束通过光路调节与柔性传输发送至所述各类试验环境。

3. 如权利要求 1 所述的试验平台，其特征在于，

所述试验环境包括激光冲击强化试验装置、激光驱动的水下爆炸及推进试验装置和激光驱动的飞片试验装置；

所述激光冲击强化试验装置用于进行金属材料的激光冲击强化处理试验；

所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置用于开展水下冲击波与结构响应的相互作用机理、爆炸产物气泡脉动规律等研究；

所述激光驱动的飞片试验装置用于开展材料在超高应变率下的本构关系、状态方程及冲击波传播过程研究。

4. 如权利要求 3 所述的试验平台，其特征在于，

所述激光冲击强化试验装置包括：箱体、温度控制单元、夹持单元、垫底层、吸收层、约束层和温度测试单元；其中，

所述箱体，具有预定大小的容积；

所述温度控制单元，用于将所述箱体内的温度加热并控制在预定的范围；

所述夹持单元，用于夹持待测金属材料；

所述垫底层，用于支撑所述待测金属材料；

所述吸收层，设置在所述待测金属材料之上，用于吸收激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体；

所述约束层，设置在所述吸收层之上，用于约束住所述等离子体的快速膨胀；

所述温度测试单元，用于测量所述待测金属材料在接受激光冲击强化过程中的温度变化。

5. 如权利要求 3 所述的试验平台，其特征在于，

所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置包括：具有一定体积的容器，在该容器放置有预定量的水；在所述容器中固定有透光的约束单元，模拟冲击的水下结构放置所述容器中，所述约束单元临近所述水下结构；在所述水下结构的临近所述约束单元的一面上还设

置有吸收单元；

所述吸收单元吸收所述驱动系统发出的激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体，等离子体膨胀并与约束单元变形耦合，产生短脉冲、高幅值的等离子体压力，具有一定体积的等离子体湮灭后形成的气泡，从而推动所述水下结构移动。

6. 如权利要求 3 所述的试验平台，其特征在于，

所述激光驱动的飞片试验装置包括：真空环境靶箱，飞片产生装置、飞片回收装置、光路调节装置和密封装置；其中，

所述真空环境靶箱，具有预定大小的容积，其上设置有观察窗口；

所述飞片产生装置位于所述真空环境靶箱内部，其用于接收驱动系统的强激光光束，产生等离子体，驱动金属膜形成飞片，并将所产生的飞片发射至所述飞片回收装置；

所述飞片回收装置用于接收所述飞片产生装置产生的飞片，以便后续对飞片样品进行分析，同时还保护试验装置，从而可以重复开展多次试验；

所述光路调节装置包括多个反光镜和透镜，用于观测所述飞片，并对其自由表面速度进行测量；

所述密封装置位于透明介质与真空环境靶箱连接处，用于使真空环境靶箱保持真空环境。

7. 如权利要求 1 所述的试验平台，其特征在于，

所述测量系统包括光纤激光多普勒干涉测速系统、PVDF 瞬态压力测试系统、图像采集系统以及激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统，其中，

所述光纤激光多普勒干涉测速系统用于对运动靶面质点速度进行测量，其测速范围为 100~104m/s 量级，测量时间分辨率为纳秒量级；

所述 PVDF 瞬态压力测试系统用于强激光驱动的冲击波压力测量，测量量程为 25GPa，时间分辨率为纳秒量级；

所述图像采集系统用于对试验过程中的靶体运动以及介质扰动时序过程进行图像采集；

所述激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统用于每一次试验的激光能量记录、脉宽波形记录与功率密度空间分布记录。

8. 如权利要求 7 所述的试验平台，其特征在于，所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括：通讯激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器，其中，通讯激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连，聚焦透镜与光纤环形器相连；

所述通讯激光器用于发射通讯激光至光纤环形器的第一端口；

所述光纤环形器用于将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜，以及，将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器；

所述聚焦透镜用于将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口，另一部分输出至运动靶面；并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口；

所述探测器用于探测所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号，并发送至示波器；

所述示波器用于记录所述差拍干涉信号，并将所记录的差拍干涉信号发送至所述控制系统。

9. 如权利要求 7 所述的试验平台，其特征在于，

所述 PVDF 瞬态压力测试系统包括：PVDF 传感器、示波器和三个电阻，其中，PVDF 传感器与第一电阻并联，所述第一电阻的一端连接第三电阻，另一端连接第二电阻；所述第二电阻的一端与第一电阻相连，另一端与第三电阻相连；所述第二电阻与所述示波器并联；

所述激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统包括：光电探测器、示波器、能量计、光路系统和电荷耦合器件 (CCD)；其中，所述光电探测器，用于测量衰减后的激光脉宽波形；所述示波器，其与光电探测器相连，用于记录衰减后的激光脉宽波形，并利用脉宽波形的上升前沿作为触发，控制多物理场实时测量的同步进行；所述能量计，用于记录单脉冲激光能量；所述光路系统，包含棱镜等光学器件，用于对激光能量进行衰减；所述 CCD，与所述光路系统相连，用于记录激光功率密度的空间分布，进一步分析其光束质量。

10. 如权利要求 1 所述的试验平台，其特征在于，

所述控制系统包含针对于激光驱动的爆炸与冲击试验全自动控制软件，软件集成了对驱动系统、试验环境和测量系统实时控制，能够实现特定复杂运动轨迹的控制，并对激光驱动的爆炸与冲击过程中的参数进行实时监控，实现了全过程的自动控制。

强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台

技术领域

[0001] 本发明涉及爆炸与冲击效应领域，特别是涉及一种强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台。

背景技术

[0002] 激光驱动爆炸与冲击是爆炸与冲击动力学研究的发展方向，是力学学科的前沿领域。通过激光驱动开展爆炸与冲击研究，在效率、安全性、精细测量技术的配备上具有明显的优势。特别是激光驱动爆炸与冲击可以获得常规的爆炸与冲击手段所不能达到的超高压力（GPa 量级以上）、超短脉冲（ns 量级）、高冲击速度（km/s 量级）和超高应变率（106/s 量级以上），是开展尖端科技研究不可或缺的手段。

[0003] 激光驱动的爆炸与冲击产生的强动载荷具有高强度、短历时和小尺度的特点，对测量技术和测试装备提出了更高的要求。最近，高速摄影技术、X 闪光照相技术、高速数字示波器以及相关的传感器、光源和快电子学设备已经开始应用于爆炸与冲击实验。诊断技术发展的主流是以激光和光电子学技术为基础的快响应、高分辨率、高灵敏度的非接触测量技术，例如各种激光干涉测量和光谱技术（速度和位移干涉仪、VISAR（任意反射面测速）、FPI 等）、散斑技术、激光诱导荧光和拉曼光谱技术、光学窗口技术等。

[0004] 迄今为止，激光驱动的冲击波压力的准确测量问题都没能得到很好的解决。激光诱导的冲击波压力高（GPa 量级），作用时间短（纳秒量级），衰减快，普通的压电石英传感器、锰铜传感器等由于受到量程、频响和尺寸的限制，测量结果不能令人满意。近年来，PVDF（聚偏二氟乙烯）压电薄膜传感器的出现成为对波剖面测量的一次革命，其最大特点是响应快（为纳秒量级），测压范围大（可达 20GPa 以上）。国内这方面的工作开展较晚，目前多是利用 PVDF 薄膜手工制作不同的传感器进行应用研究，尚未形成标准化、商业化的 PVDF 传感器。

[0005] 自由表面速度测量是爆炸与冲击实验研究的另一重点与难点。在 LSP（激光冲击强化）研究中，通常激光脉宽为几个纳秒，压力持续作用时间为十几个纳秒，弹性前驱波到达毫米量级厚度的靶材背表面所需的时间约为一两百个纳秒，在十几个纳秒内自由表面速度就由几米每秒上升至数百米每秒。因此，LSP 自由表面测速对测试设备的灵敏度、时间分辨率和频率响应范围都提出了非常高的要求。Berther 等人曾经尝试采用 VISAR 进行测量，但未能观察到数值计算能够模拟出的弹性前驱波。Arrigoni 等人采用 Fabry-Perot 干涉仪初步观测到了 LSP 背表面弹性前驱波，但 Fabry-Perot 干涉仪价格过于昂贵。

[0006] 综上所述，激光驱动的爆炸和冲击具有超短脉冲、超高压力、高冲击速度和超高应变率的特点，相关实验与测试手段还远未发展成熟。目前，国内在纳秒级响应时间的压力传感器的研制还处于起步阶段，装备于实验室的高速摄影和 VISAR 系统也难以满足高速、高分辨率的需求。

发明内容

[0007] 针对现有技术没有用于进行爆炸与冲击实验的一体化的实验平台的缺陷，本发明

提供一种强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台，在同一平台上可以开展多种激光驱动爆炸与冲击实验。

[0008] 为了解决上述技术问题，本发明提供一种强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台，包括依次相连的驱动系统、试验环境和测量系统，以及与所述驱动系统、试验环境和测量系统分别相连的控制系统，其中，

[0009] 所述驱动系统用于将强激光光束传输至所述试验环境；

[0010] 所述试验环境用于实现多种激光驱动的爆炸与冲击效应试验，包括激光冲击强化试验、激光驱动的水下爆炸及推进试验和激光驱动的飞片试验；

[0011] 所述测量系统用于对上述几种试验进行实时的质点速度、冲击波压力、运动图像等多物理场同步测量，以及激光的能量、脉宽和光束质量等试验条件同步监测；

[0012] 所述控制系统用于对所述驱动系统、试验环境和测量系统进行同步控制以及数据采集。

[0013] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0014] 所述驱动系统包括相连的激光器和光学平台，

[0015] 所述激光器用于产生短脉冲强激光光束；

[0016] 所述光学平台用于将所述激光器所产生的强激光光束通过光路调节与柔性传输发送至所述各类试验环境。

[0017] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0018] 所述试验环境包括激光冲击强化试验装置、激光驱动的水下爆炸及推进试验装置和激光驱动的飞片试验装置；

[0019] 所述激光冲击强化试验装置用于进行金属材料的激光冲击强化处理试验；

[0020] 所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置用于开展水下冲击波与结构响应的相互作用机理、爆炸产物气泡脉动规律等研究；

[0021] 所述激光驱动的飞片试验装置用于开展材料在超高应变率下的本构关系、状态方程及冲击波传播过程研究。

[0022] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0023] 所述激光冲击强化试验装置包括：箱体、温度控制单元、夹持单元、垫底层、吸收层、约束层和温度测试单元；其中，

[0024] 所述箱体，具有预定大小的容积；

[0025] 所述温度控制单元，用于将所述箱体内的温度加热并控制在预定的范围；

[0026] 所述夹持单元，用于夹持待测金属材料；

[0027] 所述垫底层，用于支撑所述待测金属材料；

[0028] 所述吸收层，设置在所述待测金属材料之上，用于吸收激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体；

[0029] 所述约束层，设置在所述吸收层之上，用于约束住所述等离子体的快速膨胀；

[0030] 所述温度测试单元，用于测量所述待测金属材料在接受激光冲击强化过程中的温度变化。

[0031] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0032] 所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置包括：具有一定体积的容器，在该容器

放置有预定量的水；在所述容器中固定有透光的约束单元，模拟冲击的水下结构放置所述容器中，所述约束单元临近所述水下结构；在所述水下结构的临近所述约束单元的一面上还设置有吸收单元；

[0033] 所述吸收单元吸收所述驱动系统发出的激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体，等离子体膨胀并与约束单元变形耦合，产生短脉冲、高幅值的等离子体压力，具有一定体积的等离子体湮灭后形成的气泡，从而推动所述水下结构移动。

[0034] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0035] 所述激光驱动的飞片试验装置包括：真空环境靶箱，飞片产生装置、飞片回收装置、光路调节装置和密封装置；其中，

[0036] 所述真空环境靶箱，具有预定大小的容积，其上设置有观察窗口；

[0037] 所述飞片产生装置位于所述真空环境靶箱内部，其用于接收驱动系统的强激光光束，产生等离子体，驱动金属膜形成飞片，并将所产生的飞片发射至所述飞片回收装置；

[0038] 所述飞片回收装置用于接收所述飞片产生装置产生的飞片，以便后续对飞片样品进行分析，同时还保护试验装置，从而可以重复开展多次试验；

[0039] 所述光路调节装置包括多个反光镜和透镜，用于观测所述飞片，并对其自由表面速度进行测量；

[0040] 所述密封装置位于透明介质与真空环境靶箱连接处，用于使真空环境靶箱保持真空环境。

[0041] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0042] 所述测量系统包括光纤激光多普勒干涉测速系统、PVDF 瞬态压力测试系统、图像采集系统以及激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统，其中，

[0043] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统用于对运动靶面质点速度进行测量，其测速范围为 100~104m/s 量级，测量时间分辨率为纳秒量级；

[0044] 所述 PVDF 瞬态压力测试系统用于强激光驱动的冲击波压力测量，测量量程为 25GPa，时间分辨率为纳秒量级；

[0045] 所述图像采集系统用于对试验过程中的靶体运动以及介质扰动时序过程进行图像采集；

[0046] 所述激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统用于每一次试验的激光能量记录、脉宽波形记录与功率密度空间分布记录。

[0047] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0048] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统包括：通讯激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器，其中，通讯激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连，聚焦透镜与光纤环形器相连；

[0049] 所述通讯激光器用于发射通讯激光至光纤环形器的第一端口；

[0050] 所述光纤环形器用于将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜，以及，将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器；

[0051] 所述聚焦透镜用于将接收到的通讯激光的一部分作为参考光从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口，另一部分输出至运动靶面；并将从运动靶面反射回的信号光发送至光纤环形器的第二端口；

[0052] 所述探测器用于探测所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号，并发送至示波器；

[0053] 所述示波器用于记录所述差拍干涉信号，并将所记录的差拍干涉信号发送至所述控制系统。

[0054] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0055] 所述 PVDF 瞬态压力测试系统包括 PVDF 传感器、示波器和三个电阻，其中，PVDF 传感器与第一电阻并联，所述第一电阻的一端连接第三电阻，另一端连接第二电阻；所述第二电阻的一端与第一电阻相连，另一端与第三电阻相连；所述第二电阻与所述示波器并联。

[0056] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0057] 所述激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统包括：光电探测器、示波器、能量计、光路系统和电荷耦合器件 (CCD)；其中，

[0058] 所述光电探测器，用于测量衰减后的激光脉宽波形；

[0059] 所述示波器，其与光电探测器相连，用于记录衰减后的激光脉宽波形，并利用脉宽波形的上升前沿作为触发，控制多物理场实时测量的同步进行；

[0060] 所述能量计，用于记录单脉冲激光能量；

[0061] 所述光路系统，包含棱镜等光学器件，用于对激光能量进行衰减；

[0062] 所述 CCD，与所述光路系统相连，用于记录激光功率密度的空间分布，进一步分析其光束质量。

[0063] 优选地，上述试验平台具有以下特点：

[0064] 所述控制系统包含针对于激光驱动的爆炸与冲击试验全自动控制软件，软件集成了对驱动系统、试验环境和测量系统实时控制，能够实现特定复杂运动轨迹的控制，并对激光驱动的爆炸与冲击过程中的参数进行实时监控，实现了全过程的自动控制。

[0065] 本发明具有如下优点：

[0066] (1) 通过一体化的设计和不同试验环境的研制，实现多种激光驱动爆炸与冲击功能，系统具有开放性；

[0067] (2) 通过多种高速、高分辨率的测试手段的协同与协调，对多个物理场(速度、压力、图像) 进行实时测量，可对激光驱动爆炸与冲击试验过程进行较全面的表征。

附图说明

[0068] 图 1 为本发明实施例的强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台示意图；

[0069] 图 2 为本发明实施例的激光冲击强化实验装置示意图；

[0070] 图 3 为本发明实施例的激光驱动的水下爆炸及推进试验装置示意图；

[0071] 图 4 为本发明实施例的激光驱动的飞片试验装置示意图；

[0072] 图 5 为本发明实施例的光纤激光多普勒干涉测速系统示意图；

[0073] 图 6 为本发明实施例的 PVDF 瞬态压力测试系统示意图。

具体实施方式

[0074] 下文中将结合附图对本发明的实施例进行详细说明。需要说明的是，在不冲突的情况下，本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互任意组合。

[0075] 本发明通过一体化的设计和不同试验环境的研制，在同一平台上可以开展多种激光驱动爆炸与冲击实验，可以对具有强瞬态特征的速度、压力、图像等多个物理场进行同步测量，实现对激光驱动爆炸与冲击实验过程的较全面表征。

[0076] 在本发明中，采用如下技术：

[0077] (1) 以短脉冲强激光器为驱动源，利用光路的柔性设计，可实现激光驱动不同介质中的微爆炸、激光冲击硬化、激光驱动的飞片、激光水下推进等多种试验。

[0078] (2) 以激光和光电子学技术为基础的快响应（纳秒）、高分辨率（微米）、高灵敏度的非接触测量在线技术，包括光纤激光多普勒干涉测速、纳秒级响应的 PVDF 压力测量、激光脉宽、能量及光束质量测量、高速图像测量、高带宽数据采集等技术。

[0079] 如图 1 所示，本发明实施例的强激光驱动的爆炸与冲击效应试验平台，包括依次相连的驱动系统、试验环境和测量系统，以及与所述驱动系统、试验环境和测量系统分别相连的控制系统，其中，

[0080] 所述驱动系统以短脉冲(脉宽为纳秒量级)、高能量激光器为主体，用于将强激光(单脉冲能量为几焦耳到百焦耳，功率密度为 $10^9 W/cm^2$ 及以上)光束传输至所述试验环境；该驱动系统可以产生试验环境中各试验装置所需要的强激光，并灵活地传输至相应的试验装置。

[0081] 所述试验环境，主体是开展微爆炸试验的环境箱、高速冲击的试验靶箱和试样高温加热环境，用于实现多种激光驱动的爆炸与冲击效应试验，包括激光冲击强化试验、激光驱动的水下爆炸及推进试验和激光驱动的飞片试验；

[0082] 所述测量系统用于对上述几种试验进行实时的质点速度、冲击波压力、运动图像等多物理场同步测量，以及激光的能量、脉宽和光束质量等试验条件同步监测；

[0083] 所述控制系统为基于现场总线和网络通讯协议的数据采集与传输的同步控制与软件系统，用于对所述驱动系统、试验环境和测量系统进行同步控制以及数据采集。

[0084] 本发明的试验平台工作过程是：将强激光光束引入到试验环境中；试验环境的主体是可开展微爆炸实验的环境箱和可开展高速冲击实验的环境箱，它们都配有耐高温、高压的光学观察窗口，并配套以试样高温加热装置以满足某些特殊需求；通过光纤激光多普勒干涉测速系统、ns 级响应时间、大量程的 PVDF 薄膜压力传感器、高速图像采集系统等，实现对速度、压力、图像等多个物理场进行测量；通过软件系统的研制，基于现场总线和网络通讯协议实现多个子系统的协同与协调控制，数据采集与数据传输的同步控制。

[0085] 下面对本发明各个组成部分进行详细描述：

[0086] (一) 驱动系统：

[0087] 驱动系统包括相连的激光器和光学平台，

[0088] 所述激光器用于产生短脉冲强激光光束；

[0089] 所述光学平台用于将所述激光器所产生的强激光光束通过光路调节与柔性传输发送至所述各类试验环境。

[0090] (二) 试验环境

[0091] 试验环境可具有耐高温高压的光学观察窗口、测试光路变换与调节的装置、冲击防护等装置，可以实现多种激光驱动的爆炸与冲击效应试验，具体包括：激光冲击强化试验装置、激光驱动的水下爆炸及推进试验装置和激光驱动的飞片试验装置；

[0092] 所述激光冲击强化试验装置用于进行金属材料的激光冲击强化处理试验；

[0093] 所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置用于开展水下冲击波与结构响应的相互作用机理、爆炸产物气泡脉动规律等研究；

[0094] 所述激光驱动的飞片试验装置用于开展材料在超高应变率下的本构关系、状态方程及冲击波传播过程研究。

[0095] 其中，激光冲击强化试验装置为研究激光冲击硬化、高应变率下材料的动态力学行为的试验环境，如图 2 所示，包括：箱体 1、温度控制单元 7、夹持单元 2、垫底层 4、吸收层 5、约束层 6 和温度测试单元 8。

[0096] 箱体 1 具有预定大小的容积，用于放置待测金属材料 3。

[0097] 温度控制单元 7 用于将箱体 1 内的温度加热并控制在预定的范围。

[0098] 夹持单元 2 用于夹持待测金属材料 3，垫底层 4 用于支撑待测金属材料 3，吸收层 5 设置在待测金属材料 3 之上，用于吸收激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体。约束层 6 设置在吸收层 5 之上，用于约束住等离子体的快速膨胀。

[0099] 温度测试单元 8 用于测量待测金属材料 3 在接受激光冲击强化过程中的温度变化。在本发明实施例中，温度测试单元 8 包括设置在约束层 6 表面的第一热电偶 81 和设置在垫底层 4 上的第二热电偶 82。这样，就可以测出约束层 6 表面的温度 T1 和垫底层 4 的温度 T2，从而可以通过各层材料的厚度估算出待测金属材料 3 的温度 T。

[0100] 其中，在本发明实施例中，上述垫底层 4 的材料为熔融石英玻璃，上述吸收层 5 的材料为铜膜，其面积超过激光作用靶体面积，约束层 6 的材料为水或者玻璃。

[0101] 在 LSP 过程中，约束层 6、吸收层 5 以及待测金属材料 3 被夹持单元 2 紧密夹持。激光透过约束层 6 材料辐照待测金属材料 3 表面的吸收层 3，诱导产生的等离子体压力对待测金属材料 3 进行处理。

[0102] 所述激光驱动的水下爆炸及推进试验装置为激光驱动不同介质(液、气、含能材料)中微爆炸的试验环境，如图 3 所示，包括具有一定体积的容器 12，在容器 12 放置有预定量的水 14。在容器 12 中固定有透光的约束单元 15，模拟冲击的水下结构 17 放置容器 12 中，约束单元 15 临近水下结构 17。在水下结构 17 的临近约束单元 15 的一面上还设置有吸收单元 16。在本发明实施例中，约束单元 15 为具有一定厚度的玻璃，吸收单元 16 为具有一定厚度的铝膜。

[0103] 吸收单元 16 吸收驱动系统发出的激光能量后发生熔化、气化以及电离，形成高温高压等离子体，等离子体膨胀并与约束单元 15 变形耦合，产生短脉冲、高幅值的等离子体压力，具有一定体积的等离子体湮灭后形成的气泡，从而推动水下结构 17 移动。可以通过图像采集系统拍摄记录水下结构 17 移动的过程。

[0104] 气泡膨胀到水的自由表面时，首先在自由表面溃灭，沿着航行体水平线位置分成两部分。一部分形成“喷泉”现象，喷泉高度可达几厘米。另一部分受到气泡溃灭部分的反向作用，向左下方快速运动。水下结构 17 在推力作用下运动。

[0105] 激光驱动的水下爆炸及推进试验装置的建立，为激光与物质相互作用、水下爆炸冲击波压力传播和衰减规律、结构的动态响应等规律的研究提供了精细、方便的实验环境。

[0106] 激光驱动的水下爆炸及推进试验装置通过短脉冲强激光与吸收单元相互作用，使其熔化、气化、电离，形成等离子体。等离子体继续与激光作用，吸收激光能量，内能快速升

高，一部分转化为等离子体的热能，另外一部分转化为等离子体的电离能。在该过程中等离子体膨胀与约束单元变形耦合，产生短脉冲、高幅值的等离子体压力，具有一定体积的等离子体湮灭后形成的气泡，并可对水下结构作用，从而使其运动。再通过图像采集系统进行拍摄，就能够很好地模拟水下爆炸的过程。

[0107] 此外，由于激光驱动的水下爆炸及推进试验装置可以通过精确计算得到等离子体的压力特征，因此能够精确地模拟水下爆炸过程。

[0108] 如图 4 所示，所述激光驱动的飞片试验装置包括：真空环境靶箱 21，飞片产生装置 22、飞片回收装置 23、光路调节装置 24 和密封装置 25；其中，

[0109] 所述真空环境靶箱 21，具有预定大小的容积，其上设置有观察窗口 26；

[0110] 所述飞片产生装置 22 位于所述真空环境靶箱 21 内部，其用于接收驱动系统的强激光光束，产生等离子体，驱动金属膜形成飞片，并将所产生的飞片发射至所述飞片回收装置 22；

[0111] 所述飞片回收装置 23 用于接收所述飞片产生装置 22 产生的飞片，以便后续对飞片样品进行分析，同时还可以保护飞片试验装置，从而可以重复开展多次试验；

[0112] 所述光路调节装置 24 包括多个反光镜和透镜，用于观测所述飞片，并对其自由表面速度进行测量；

[0113] 所述密封装置 25 位于透明介质 27（通常为玻璃）与真空环境靶箱 21 连接处，用于使真空环境靶箱 21 保持真空环境。

[0114] （三）测量系统

[0115] 所述测量系统包括光纤激光多普勒干涉测速系统、PVDF 瞬态压力测试系统、图像采集系统以及激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统，其中，

[0116] 所述光纤激光多普勒干涉测速系统用于对运动靶面质点速度进行测量，其测速范围为 100~104m/s 量级，测量时间分辨率为纳秒量级；

[0117] 所述 PVDF 瞬态压力测试系统用于强激光驱动的冲击波压力测量，最大压力测量为 25GPa，测量的时间分辨率为纳秒量级；

[0118] 所述图像采集系统通常为高速 CCD 或 ICCD（相增强型）图像采集装置，具有亚微米量级的时间分辨率和微米量级的空间分辨率，可用于对试验过程中的靶体运动以及介质扰动时序过程进行图像采集。

[0119] 所述激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统用于每一次试验的激光能量记录、脉宽波形记录与功率密度空间分布记录，其中该系统还利用脉宽波形的上升前沿作为触发，控制多物理场实时测量的同步进行。

[0120] 如图 5 所示，光纤激光多普勒干涉测速系统包括：通讯激光器、光纤环形器、聚焦透镜、探测器和示波器，其中，通讯激光器、光纤环形器、探测器和示波器依次相连，聚焦透镜与光纤环形器相连；其中，

[0121] 激光器发射通讯激光（其初始频率为 f_0）至光纤环形器的第一端口；

[0122] 所述光纤环形器将接收到的通讯激光从其第二端口发送至聚焦透镜；

[0123] 所述聚焦透镜将接收到的通讯激光的一部分作为参考光（其频率仍为 f_0）从其端面反射回所述光纤环形器的第二端口，另一部分输出至运动靶面；并将从运动靶面反射回的信号光（因多普勒频移效应而具有频率 f_b）发送至光纤环形器的第二端口；

[0124] 所述光纤环形器将接收到的参考光和信号光从其第三端口发送至探测器；

[0125] 所述探测器探测到所述参考光和信号光产生的差拍干涉信号，并发送至示波器；

[0126] 所述示波器记录所述差拍干涉信号，并将所记录的差拍干涉信号发送至控制系统。

[0127] 参考光和信号光产生差拍干涉信号，被探测器探测和示波器记录，其瞬时光强为

[0128]

$$I(t)=I_0(t)+I_b(t)+2\sqrt{I_0(t)I_b(t)}\cos\left[\frac{4\pi}{\lambda}\int_0^t u(t)dt+\varphi_0\right] \quad (1)$$

[0129] 其中，$I_0(t)$ 和 $I_b(t)$ 分别为参考光和信号光光强幅值，$u(t)$ 为运动靶面瞬时质点速度，λ 为激光波长，φ_0 为初始相位差。运动靶面的质点速度为

[0130] $$u(t)=\frac{\lambda}{2}[f_b(t)-f_0]=\frac{\lambda}{2}\Delta f_b(t) \quad (2)$$

[0131] $\Delta f_b(t)$ 为拍频，由瞬时干涉条纹的疏密决定，可取相邻两个波峰或波谷时间间隔的倒数。可见，速度历程隐藏在干涉信号的频域内，而与光强变化无关，因此光纤激光多普勒干涉测速系统的抗干扰能力较强。主要的系统误差来源于通讯激光器波长的不稳定性和基频噪声。

[0132] 在一优选实例中，该光纤激光多普勒干涉测速系统采用美国 JDSU 公司 CQF938/400 型窄线宽通讯激光器，输出光的波长为 1550nm，线宽为 200kHz，最大输出功率 100mW。探测器采用 New Focus 公司 1544-A 型 InGaAs PIN 产品，带宽为 12GHz；示波器采用 Lecoy 公司 WaveMaster808Zi 型产品，带宽为 8GHz，单通道最大写入速度 40Gs/s。

[0133] 如图 6 所示，PVDF 瞬态压力测试系统包括 PVDF 传感器、示波器和三个电阻，其中，PVDF 传感器与第一电阻 R1 并联，所述第一电阻 R1 的一端连接第三电阻 R3，另一端连接第二电阻 R2；所述第二电阻 R2 的一端与第一电阻 R1 相连，另一端与第三电阻 R3 相连；所述第二电阻 R2 与所述示波器并联。其中，第一电阻 R1、第二电阻 R2 和第三电阻 R3 满足如下条件：

[0134] $R_1/(R_2+R_3)<1$，$\frac{R_2\times(R_1+R_3)}{R_2+R_1+R_3}<50\Omega$。

[0135] PVDF 瞬态压力测试系统通过在 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。

[0136] 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

[0137] $U_m/U=R_2/(R_2+R_3)$，

[0138] 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。

[0139] 在 LSP 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 h1 和 h2 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 h1 和 h2。厚度为 h1 时测量得到的峰值压力为 σ_1，半峰宽时间为 τ_1；厚度为 h2 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

[0140] $$\sigma_m = \frac{h_1\sigma_2 - h_2\sigma_1}{h_1 - h_2}$$

[0141] $$\tau_m = \frac{h_1\tau_2 - h_2\tau_1}{h_1 - h_2}$$

[0142] 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实验方法。

[0143] 激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统包括：

[0144] 光电探测器，用于测量衰减后的激光脉宽波形；

[0145] 示波器，其与光电探测器相连，用于记录衰减后的激光脉宽波形，并利用脉宽波形的上升前沿作为触发，控制多物理场实时测量的同步进行；

[0146] 能量计，用于记录单脉冲激光能量；

[0147] 光路系统，包含棱镜等光学器件，用于对激光能量进行衰减；

[0148] CCD（电荷耦合器件），与所述光路系统相连，用于记录激光功率密度的空间分布，进一步分析其光束质量。

[0149] （四）控制系统

[0150] 控制系统采用 PXI 或 PROFIBUS 现场总线和网络传输技术实现多个驱动系统、试验环境和测量系统的同步与协调控制；采用 LABVIEW 系统编制激光驱动的爆炸与冲击试验全自动控制软件；并能够实现多物理场数据采集与数据传输的同步控制。

[0151] 其中，采用 LABVIEW 系统编制了一套针对于激光驱动的爆炸与冲击试验全自动控制软件，该软件集成了对驱动系统、试验环境和测量系统实时控制，能够实现特定复杂运动轨迹的控制，并对激光驱动的爆炸与冲击过程中的参数进行实时监控，实现了全过程的自动控制。

[0152] 综上所述，在本发明中，通过一体化的设计和不同试验环境的研制，在同一平台上可以开展多种激光驱动爆炸与冲击实验；基于光纤激光多普勒干涉测速系统、PVDF 瞬态压力测试系统、高速图像采集系统和激光脉宽、能量及光束质量实时测量系统，可以对具有强瞬态特征的速度、压力、图像等多个物理场进行同步测量，实现对激光驱动爆炸与冲击实验过程的较全面表征。

[0153] 本发明建立了一套强激光驱动的爆炸与冲击实验平台，其综合指标达到国际先进水平，为前沿科学问题研究提供装备平台。本发明中提出了相应的光纤激光多普勒干涉测速系统、PVDF 瞬态压力测试系统、高速图像采集系统和激光脉宽 / 能量及光束质量实时测量系统，并实验平台上开展激光驱动的爆炸与冲击前沿科学问题研究，具有高起点和高水平。

[0154] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

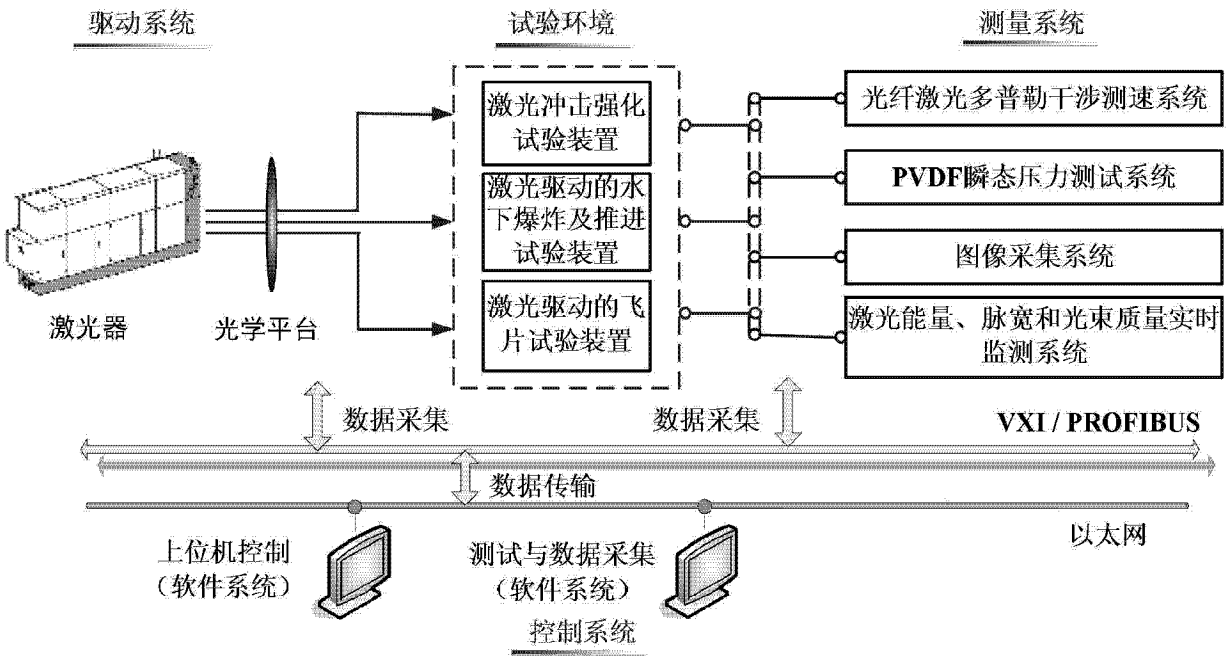

驱动系统
试验环境
测量系统
激光冲击强化试验装置
激光驱动的水下爆炸及推进试验装置
激光驱动的飞片试验装置
光纤激光多普勒干涉测速系统
PVDF瞬态压力测试系统
图像采集系统
激光能量、脉宽和光束质量实时监测系统
激光器
光学平台
数据采集
数据采集
VXI / PROFIBUS
数据传输
以太网
上位机控制（软件系统）
测试与数据采集（软件系统）
控制系统

图 1

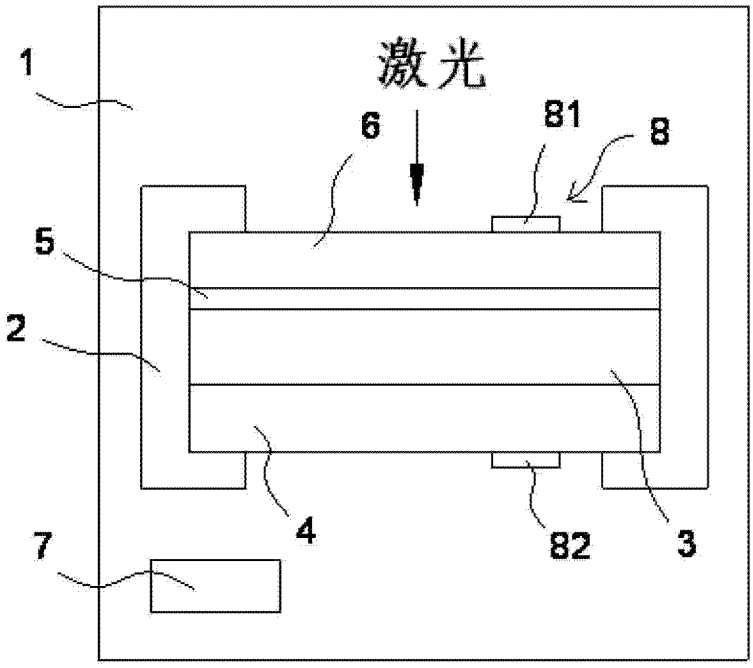

激光
1
6
81
8
5
2
4
82
3
7

图 2

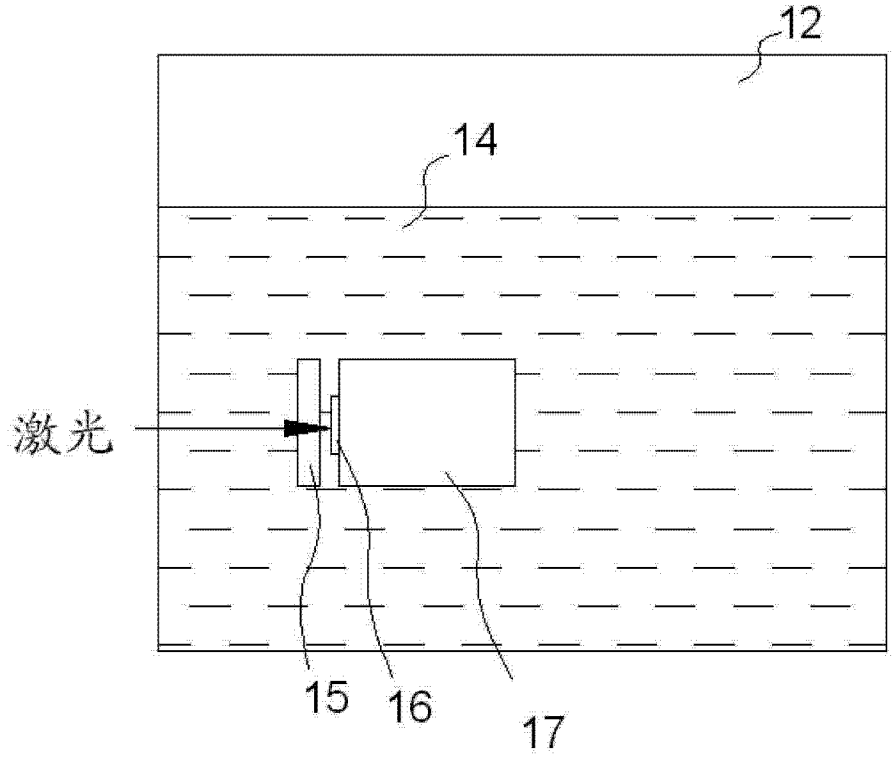


图 3

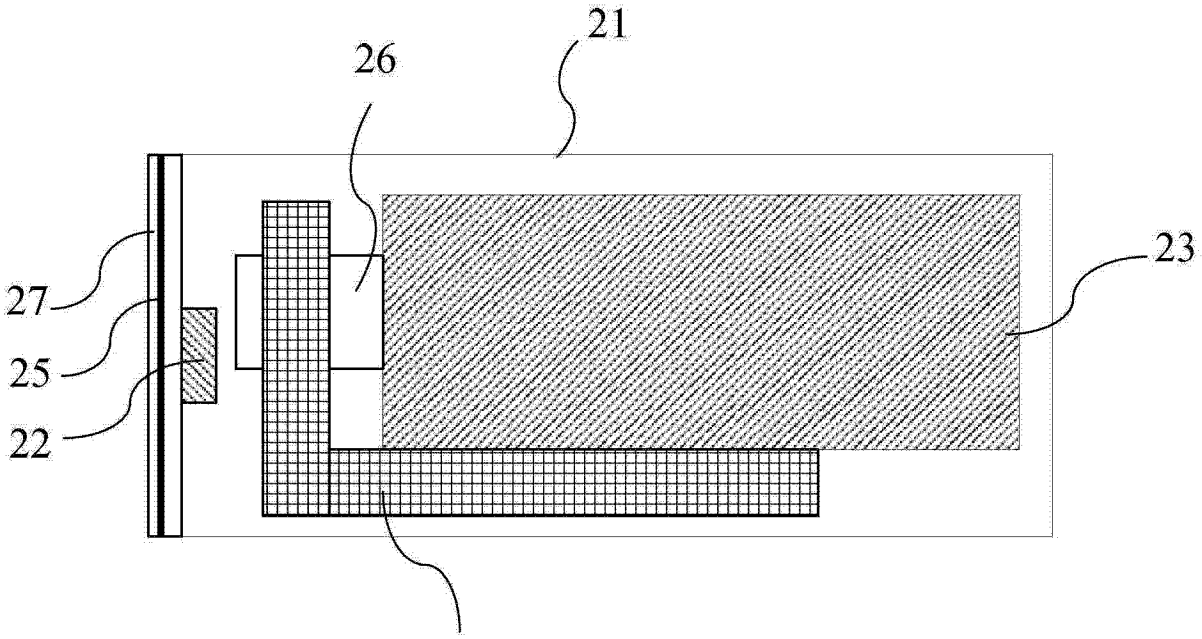


图 4

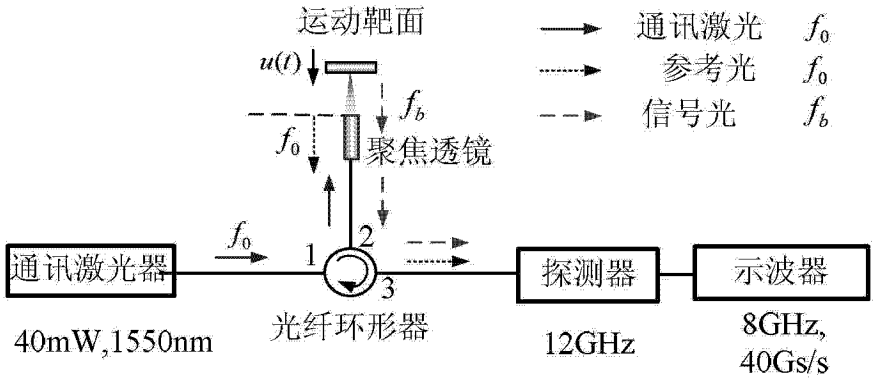

运动靶面
u(t)
f_b
f_0
聚焦透镜
通讯激光 f_0
参考光 f_0
信号光 f_b
通讯激光器
f_0
1
2
3
探测器
示波器
40mW,1550nm
光纤环形器
12GHz
8GHz,
40Gs/s

图 5

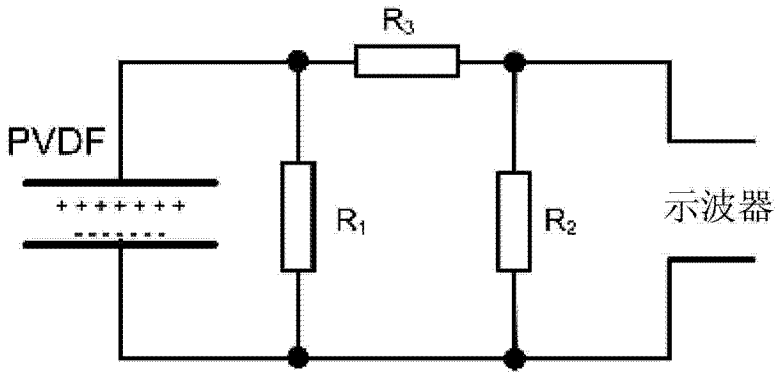

R_3
PVDF
R_1
R_2
示波器

图 6