

动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的 时间精确同步技术*

刘盛刚, 李加波, 李俊, 薛桃, 王翔, 翁继东, 李泽仁

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 分析了轻气炮实验中飞片速度漂移带来的冲击波到达样品/窗口界面时刻漂移问题、主要影响因素以及动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时序要求, 采用镀膜光纤探针作为同时测量实验中动态发射率测量照明光源的触发装置, 设计了光纤探针-样品之间的距离, 并对设计余量进行了简单分析, 解决了同时测量实验中的时间精确同步问题。在 2 发动态考核实验中, 设计的飞片速度为 4.1 km/s, 实测飞片速度漂移量分别为 70 和 210 m/s, 动态发射率测量信号按照实验预期叠加在了样品/窗口界面热辐射信号平台之上, 时序控制能够满足动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时间精确同步要求。

关键词: 动态发射率; 辐射亮度; 同时测量; 时间精确同步

中图分类号: TN247; O521.3 **文献标识码:** A

冲击温度的精确测量是检验各种物理模型和构建各类物态方程的关键参数之一^[1], 基于 Planck 热辐射理论的辐射法冲击温度测量是冲击波物理实验研究中使用最广泛、最可靠的瞬态温度测量方法, 其基本原理是通过测量样品在冲击稳态下、多个离散波长处的光谱辐射亮度, 在灰体模型的基本假设条件下, 根据普朗克定律, 拟合得到冲击温度和发射率^[2-6]。但是, 现有实验数据均表明, 在近红外波段对应的低温区开展冲击温度测量时, 由于涉及的波长覆盖范围宽(典型波长覆盖范围 1~3 μm), 有关样品表面发射率的灰体模型假设已经不成立^[7-9], 并且样品的发射率又是与样品的表面粗糙度、氧化等表面状态紧密相关的^[10]。在 Seifter 等^[7-9]的实验中, 动态发射率和辐射亮度数据是通过不同的实验发次分别获取的, 因此实验结果与理论计算之间存在较大的差异, 他们认为这种差异很可能就来源于样品表面状态以及实验加载状态的差异。为了去除不同实验中样品以及加载状态的差异, 就需要在单发次实验中实现动态发射率和辐射亮度的同时测量。Poulsen 等^[11-12]基于信号叠加的思想, 提出了一种动态发射率和辐射亮度同时测量的方法, 但是并没有解决二级气体炮上飞片速度漂移带来的时间精确同步问题, 用于动态发射率测量的氙灯信号不能有序叠加在样品的热辐射信号之上, 因此仅验证了技术的可行性, 并没有获得一个预期的实验结果。

基于信号叠加的思想, 提出了一种动态发射率和辐射亮度同时测量的方法, 并简要介绍了测量的基本原理, 分析了二级气体炮上飞片速度漂移带来的时间精确同步问题及其主要影响因素; 根据动态发射率和辐射亮度同时测量实验中的时序要求, 采用镀膜光纤探针作为动态发射率测量照明光源的触发装置, 设计了光纤探针-样品之间的距离, 解决了动态发射率和辐射亮度同时测量实验中的时间精确同步问题。在 2 发动态考核实验中, 设计的 Cu 飞片速度为 4.1 km/s, 实测其速度漂移量分别为 70 和 210 m/s, 动态发射率测量信号均按实验设计, 叠加在了 Al/LiF 界面的热辐射信号之上, 时序控制满足动态发射率和辐射亮度同时测量实验的要求。

* 收稿日期: 2017-08-22; 修回日期: 2017-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(11604313); 中国工程物理研究院科学技术发展基金(2013B040162)

作者简介: 刘盛刚(1983—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事光学测试技术研究. E-mail: liushenggangpla@126.com

1 实验方案

1.1 动态发射率与辐射亮度同时测量的基本原理

Seifter 等^[7-9]根据能量守恒定律和 Kirchhoff(基尔霍夫)热辐射理论,推导出非透明样品法线方向的发射率 $\epsilon_{\lambda,\perp}$ 与法线方向照明、 2π 空间反射率 $\rho_{\lambda,\perp,2\pi}$ 之间的关系为

$$\epsilon_{\lambda,\perp} = 1 - \rho_{\lambda,\perp,2\pi} \quad (1)$$

因此,对发射率 $\epsilon_{\lambda,\perp}$ 的测量可以通过对反射率 $\rho_{\lambda,\perp,2\pi}$ 的测量而间接实现。根据光路可逆原理,法线方向照明、 2π 空间反射率 $\rho_{\lambda,\perp,2\pi}$ 等于 2π 空间照明、法线方向反射率 $\rho_{\lambda,2\pi,\perp}$,因此对 $\epsilon_{\lambda,\perp}$ 的测量还可以通过对 $\rho_{\lambda,2\pi,\perp}$ 的测量而实现。

基于 Poulsen 等^[11-12]信号叠加思想的动态发射率与辐射亮度同时测量的原理如图 1 所示。通过时间的精确同步,在冲击波到达样品/窗口界面前后,分别将两个脉冲光照射到样品/窗口界面,利用高温计记录叠加有反射信号的热辐射信号。从叠加信号中提取出样品/窗口界面达到冲击平衡时的热辐射信号幅值 h ,结合高温计的标定结果,得到样品/窗口界面的辐射亮度。再从叠加信号中分别提取冲击前后反射信号的幅值 h_1 、 h_2 ,结合实验前测得的样品/窗口界面的静态反射率 ρ_0 ,得到样品/窗口界面的动态反射率 $\rho(\rho = h_2\rho_0/h_1)$,进而得到样品/窗口界面的动态发射率 $\epsilon(\epsilon = 1 - \rho = 1 - h_2\rho_0/h_1)$ 。最后利用动态发射率和辐射亮度数据,求解样品/窗口界面的冲击温度。

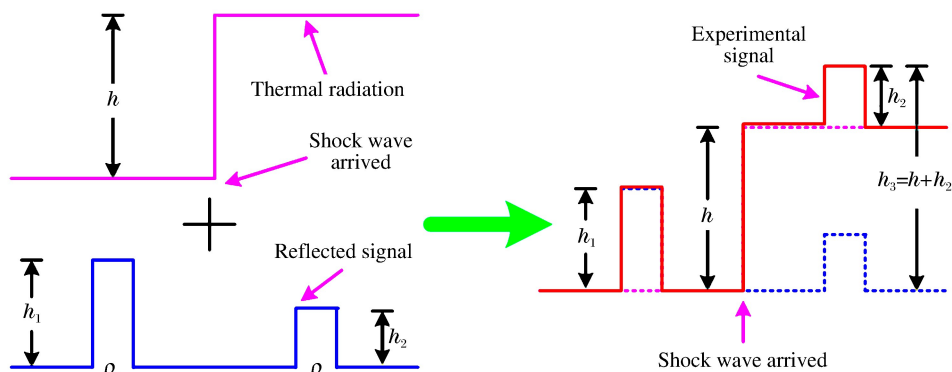


图 1 动态发射率与辐射亮度同时测量的原理示意图

Fig. 1 Schematic of simultaneous measurement of dynamic emissivity and radiance

从叠加法的原理可以看出,由于实现了动态发射率和辐射亮度的同时、独立测量,原则上只需要单一波长即可实现冲击温度的精确测量。由于该方法回避了灰体模型假设,因此在近红外波段和红外波段对应低温区的冲击温度测量中具有较好的应用前景。但是,该方法的前提是需要根据实验冲击温度区间选择合适波长的照明脉冲光(在热辐射波长覆盖范围内),并实现照明脉冲光和冲击波到达样品/窗口界面时刻的精确同步。

1.2 飞片速度漂移带来的时间精确问题

从上述描述可以看出,基于信号叠加思想的动态发射率与辐射亮度同时测量的关键技术之一就是用于动态发射率测量的照明脉冲光(脉冲激光或氙灯)能够在合适的时刻到达样品/窗口界面,即要求照明脉冲光与冲击波到达样品/窗口界面的时刻能够精确同步。在二级气体炮上开展冲击加载实验时,通常采用磁测速^[13-14]或者光束遮断装置^[15]给出的信号作为记录系统或者外部设备的触发信号。假设触发信号的产生位置(触发位置)-样品之间的距离为 l ,则飞片以速度 u 飞跃这段距离的飞行时间为

$$t = \frac{l}{u} \quad (2)$$

假设飞片的飞行速度漂移量为 Δu ,则飞片飞跃这段距离 l 对应的飞行时间漂移量为

$$\Delta t = \frac{l}{u^2} \Delta u \quad (3)$$

由于飞片速度漂移带来的冲击在样品中的走时漂移较小(以 Cu 飞片平面撞击 Al 样品为例,假设 Cu 飞片速度为 4.0 km/s, Al 样品厚度为 3 mm, Cu 飞片速度漂移为 200 m/s,则对应冲击波在 Al 样品中的走时漂移约为 6 ns),因此,可以认为(3)式即代表了飞片速度漂移带来的冲击波到达样品/窗口界面的时间漂移,主要由触发位置-样品之间距离 l 、飞片速度 u 和飞片速度漂移 Δu 决定。触发位置-样品之间距离 l 的典型值为 100 mm,假设飞片速度为 4 km/s,速度漂移为 200 m/s,则由(3)式计算得到的冲击波到达时刻漂移为 1.25 μ s。由于样品/窗口界面在冲击波作用下的热辐射平衡时间一般小于 1.0 μ s,而飞片速度漂移具有一定的随机性,且是不可避免的,从而导致冲击波到达样品/窗口界面时刻与照明脉冲光到达时刻很难同步,这也是 Poulsen 等在实验中未能取得一个理想结果的主要原因之一。

1.3 实验方案设计

从(3)式可以看出,若能大幅减小触发位置-样品之间的距离 l ,则能有效减小由于飞片速度漂移带来的冲击波到达样品/窗口界面的时间漂移。若将触发位置-样品之间的距离 l 设置在 10 mm 以内,则在相同的实验条件下,冲击波到达样品/窗口界面时刻的漂移将会控制在 125 ns 以内,可以满足动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时间精确同步要求。由此可见,为了实现动态发射率测量信号与样品/窗口界面热辐射信号在时间上的精确同步,就需要大幅减小触发位置-样品之间的距离。

考虑到触发位置-样品之间的距离仅为几毫米,而为了实现法线方向 2π 空间反射率 $\rho_{\lambda, \perp, 2\pi}$ 的测量,还必须使用积分球,由于受积分球几何尺寸的限制,很难再使用靶面探针。为了满足时间精确同步的要求,在本研究工作中,设计了镀膜光纤探针作为动态发射率测量照明光源(矩形脉冲激光器)的触发装置,并将两根镀膜光纤探针安装在与飞片运动相垂直的方向;根据时间精确同步中的时序要求,设计光纤探针-样品之间的距离。设计的动态发射率与辐射亮度同时测量光路示意图如图 2 所示。

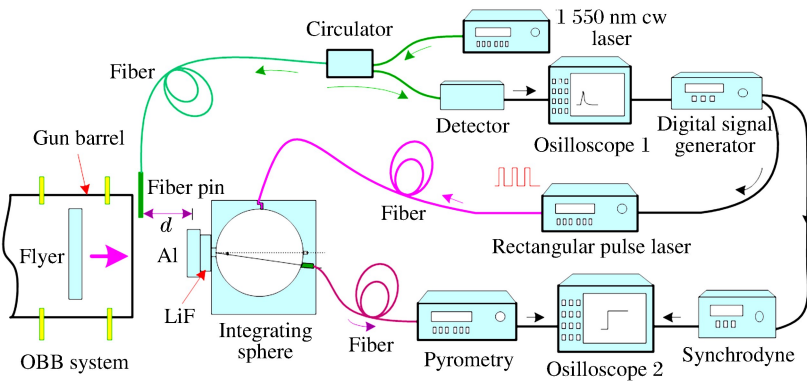


图 2 动态发射率与辐射亮度同时测量实验光路示意图

Fig. 2 Experimental layout of simultaneous measurement of dynamic emissivity and radiance

在图 2 中,1550 nm 连续光激光器、三端口环形器、镀膜光纤探针、光电探测器和示波器 1 组成矩形脉冲激光器的触发光路;当镀膜光纤探针被飞片撞断之后,光电探测器给出一个幅度快速下降的信号,由示波器 1 记录,并触发数字信号发生器;数字信号发生器输出一个 TTL 信号触发矩形脉冲激光器出光,同时输出另一路触发同步机,同步机再触发示波器 2 记录实验信号;矩形脉冲激光器发出的光经光纤传输之后,从积分球侧面进入并充分均匀化,然后再从 2π 空间照明样品,样品的反射光由积分球出光孔的准直透镜收集(偏离样品法线 8°),经红外光纤传输至近红外高温计之后,转化为电信号并由示波器 2 记录。飞片由二级轻气炮发射,其实际击靶速度由 OBB 测速系统给出。

1.4 时序关系

动态过程的时序关系如图 3 所示。飞片在 t_0 时刻撞击镀膜光纤探针,在 t_1 时刻撞击样品并在样品

中产生冲击波,冲击波在 t_2 时刻到达样品/窗口界面。与此同时,飞片撞击镀膜光纤探针之后,光电探测器在 t_3 时刻输出幅度下降的信号并触发示波器 1,示波器 1 的输出信号触发数字信号发生器,数字信号发生器在 t_4 时刻输出 TTL 信号触发矩形脉冲激光器,矩形脉冲激光器在 t_5 时刻开始出光,其 3 个矩形激光脉冲分别在 t_6 、 t_7 、 t_8 时刻到达样品/窗口界面。

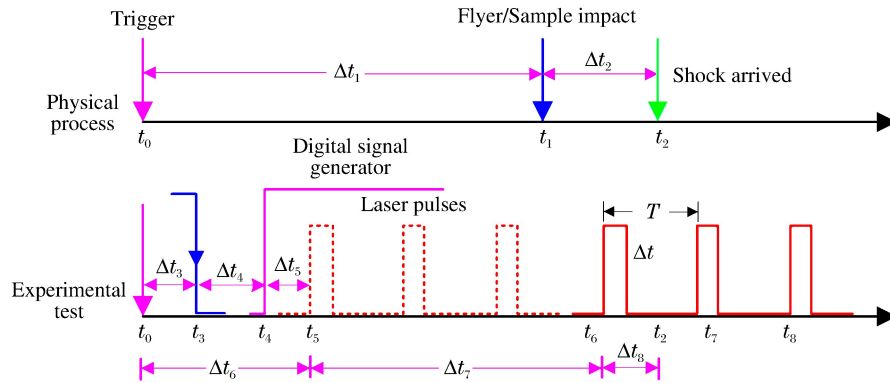


图3 时序关系示意图

Fig. 3 Schematic of time sequence

为了实现冲击波和照明矩形激光脉冲到达样品/窗口界面时刻的精确同步,要求 $t_6 + \Delta t < t_2$,同时要求 t_7 ($t_7 = t_6 + T$) 或 t_8 ($t_8 = t_7 + T$) 大于 t_2 ,其中 Δt 为矩形激光脉冲的脉冲宽度, T 为矩形激光脉冲的时间间隔。假设冲击波到达样品/窗口界面的时刻刚好位于第一个矩形激光脉冲和第二个矩形激光脉冲之间,即有

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = \Delta t_6 + \Delta t_7 + T/2 \quad (4)$$

式中: Δt_6 为镀膜光纤探针撞断到矩形脉冲激光器第一个脉冲出光的延迟时间, Δt_7 为矩形脉冲激光器第一个激光脉冲到达样品/窗口界面的延迟时间,这两个延迟时间主要由仪器的本征响应时间和传输光纤的长度决定,可以通过实验前的标定而精确得到; Δt_1 由镀膜光纤探针-样品之间的距离 l 以及飞片的速度 u 决定, Δt_2 可以由预估冲击波速度以及样品厚度得到。

利用(4)式,得到飞片在镀膜光纤探针-样品之间允许的飞行时间为

$$\Delta t_1 = (\Delta t_6 + \Delta t_7 + T/2) - \Delta t_2 \quad (5)$$

再结合飞片预估速度 u ,得到镀膜光纤探针-样品之间的距离 l 为

$$l = u\Delta t_1 \quad (6)$$

采用上述触发方式以及相应的 l 值设计(典型值为几个毫米),就可以满足动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时间精确同步要求。

2 实验结果及分析

2.1 实验设计

为了验证上述触发方式的可行性以及时序关系的准确性,在二级气体炮上开展了 2 发动态考核实验。实验中采用的飞片为 Cu($\varnothing 26 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$),设计弹速为 4.1 km/s,样品为 Al($\varnothing 36 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$),窗口材料为 z 切 LiF 单晶($\varnothing 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$),结合 Hugoniot 参数预估冲击波在 Al 样品中的走时约为 330 ns。采用的矩形脉冲激光器主要技术指标为:中心波长为 1064 nm,谱线宽度小于 1 nm,脉冲时间间隔 500 ns,脉冲宽度 100 ns,脉冲上升沿小于 5 ns,脉冲个数为 3 个,脉冲能量稳定性优于 2%,最大平均功率 800 mW,出光延迟时间 1.260 μs 。采用的积分球直径为 30 mm,样品孔直径为 6 mm。红外低氢光纤芯径 200 μm ,数值孔径 0.22。

动态实验前,标定得到镀膜光纤探针撞断到矩形脉冲激光器出光的延迟时间 Δt_6 为 1677.0 ns(其中镀膜光纤探针撞断到光电探测器输出信号的延迟时间 Δt_3 为 363.1 ns);矩形脉冲激光器的第一个脉

冲,从出光到样品/窗口界面的延迟时间 Δt_7 为 275.7 ns。将相关参数带入(5)式中,得到飞片在镀膜光纤探针-样品之间允许的飞行时间为 1872.7 ns,再根据(6)式计算得到对应镀膜光纤探针-样品之间的距离为 7.7 mm。正式实验时,样品盒装配完毕之后,实测镀膜光纤探针-样品之间的距离分别为 7.5 和 7.9 mm。

2.2 实验结果及分析

在 1# 实验中,OBB 弹速测量结果以及镀膜光纤探针输出的信号如图 4 所示,结合实验前测得 OBB 装置每一组发射/接收探针之间的距离为 100 mm,得到飞片的实际击靶速度为 4.03 km/s,与设计弹速 4.1 km/s 基本吻合,弹速漂移量为 70 m/s。两根镀膜光纤探针被飞片撞断之后,输出信号之间的差值为 40 ns,结合两根镀膜光纤探针端面之间的距离(25 mm)和弹速(4.03 km/s),得到飞片的倾斜角度约为 0.4°。

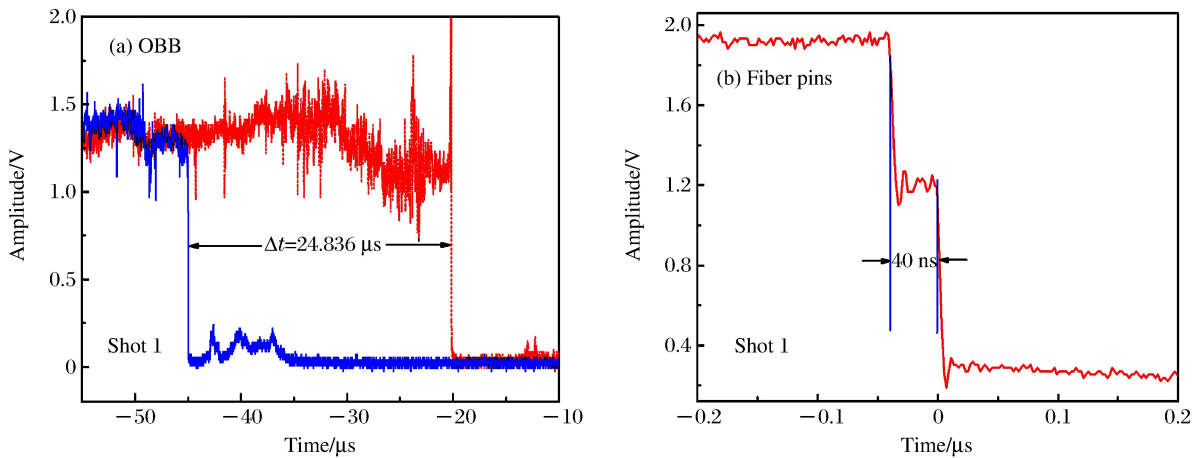


图 4 OBB 弹速测量结果(a)和镀膜光纤探针输出信号(b)

Fig. 4 Velocity measurement of OBB system (a) and output signal of two coating fiber pins (b)

2 发实验获取的样品/窗口界面动态发射率测量信号与热辐射信号的叠加结果如图 5 所示,动态发射率测量信号均叠加在了样品/窗口界面的热辐射平台信号之上。

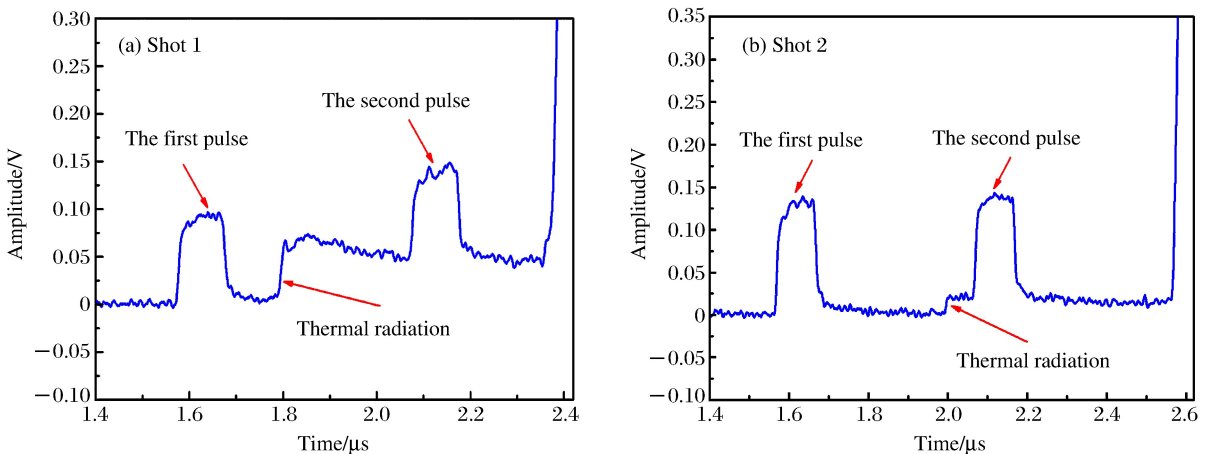


图 5 获取的叠加信号

Fig. 5 Superimposing signals

在 1# 实验中,从叠加信号中判读得到样品/窗口界面发出热辐射时刻(冲击波到达样品/窗口界面时刻)为 1790.5 ns;从图 4(b)中,判读得到第一根镀膜光纤探针输出下降沿信号的时刻为 -38.8 ns;

实验标定得到镀膜光纤探针撞断到探测器输出信号的时间延迟为 363.1 ns,因此,飞片撞击第一根镀膜光纤探针的时刻为 -401.9 ns;得到飞片撞击第一根镀膜光纤探针到冲击波到达样品/窗口界面的时间延迟为 2192.4 ns。实验上设计的飞片撞击镀膜光纤探针到冲击波到达样品/窗口界面的时间延迟为 2159.3 ns,理论设计与正式实验之间的时间差值为 33.1 ns,这部分时间差异主要是由弹速漂移(31.7 ns)带来的。而在 2[#] 实验中,实测弹速为 3.89 km/s,比预期弹速低了 210 m/s,从图 4(b)中也可以明显看出,由于弹速比预期偏低,因此冲击波到达样品/窗口界面时刻(热辐射开始时刻)偏晚,但是动态发射率测量信号也叠加在了样品/窗口界面的热辐射信号之上。

事实上,由(3)式可以得到容许的弹速漂移量 Δu 与触发位置-样品之间距离 l 、弹速 u 和容许的冲击波到达样品/窗口界面漂移时间 Δt 之间的关系为

$$\Delta u = \frac{u^2}{l} \Delta t \quad (7)$$

信号叠加法对时序的要求是 $t_6 + \Delta t < t_2$,同时要求 $t_7 = t_6 + T$,其中 Δt 为矩形激光脉冲的脉冲宽度, T 为矩形激光脉冲的时间间隔。假设预期设计的冲击波恰好在两个矩形激光脉冲中间到达样品/窗口界面,并且不考虑样品/窗口界面间隙发光和其他杂散光对信号提取的影响,因此容许的冲击波到达样品/窗口界面时刻漂移为 $(T - \Delta t)/2$ 。实验中采用的矩形脉冲激光器的脉冲间隔为 500 ns,脉冲宽度为 100 ns,因此允许的冲击波到达样品/窗口界面的时间漂移为 200 ns。结合实验的预期飞片速度 4.1 km/s,实验设计的触发位置-样品之间距离 7.5 和 7.9 mm,得到容许的弹速漂移量分别为 448 和 426 m/s。而在两发动态考核实验中,实测的弹速漂移量分别为 70 和 210 m/s,均在实验设计的余量之内,因此两发实验的动态发射率测量信号均能够叠加在样品/窗口界面的热辐射信号之上。

3 结 论

提出了一种基于信号叠加思想的动态发射率和辐射亮度同时测量的方法,为了能够从叠加信号中分别提取出动态发射率和辐射亮度信息,要求用于动态发射率测量的照明光和冲击波均要在特定时刻到达样品/窗口界面。为了实现照明光和冲击波到达时刻的精确同步,首先分析了轻气炮实验中,飞片速度漂移带来的冲击波到达样品/窗口界面的时刻漂移问题及其主要影响因素,发现减小飞片在触发装置与样品之间的飞行时间,能够有效控制冲击波到达样品/窗口界面时刻的漂移,因此采用镀膜光纤探针作为动态发射率测量照明光源的触发装置;通过分析动态发射率与辐射亮度同时测量实验中的时序要求,设计了光纤探针-样品之间的距离,并对设计余量进行了简单分析。在 2 发动态考核实验中,飞片速度漂移量分别为 70 和 210 m/s,均在设计余量之内,动态发射率测量信号均按要求叠加在了样品/窗口界面的热辐射平台信号之上,时序的控制满足动态发射率与辐射亮度同时测量实验的要求。

参考文献:

- [1] 谭华. 实验冲击波物理导引 [M]. 北京:国防工业出版社,2007.
TAN H. Introduction to experimental shock wave physics [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2007.
- [2] KORMER S B, SINTISYN M V, KILILLOV G A, et al. Experimental determination of temperature in shock-compressed NaCl and KCl and of their melting curves at pressures up to 700 kbar [J]. Soviet Journal of Experimental & Theoretical Physics, 1965, 21(4): 689.
- [3] LYZENGA G A, AHRENS T J. Multiwavelength optical pyrometer for shock compression experiments [J]. Review of Scientific Instruments, 1979, 50(11): 1421-1424.
- [4] RADOUSKY H B, MITCHELL A C. A fast UV/visible pyrometer for shock temperature measurements to 20 000 K [J]. Review of Scientific Instruments, 1989, 60(12): 3707-3780.

- [5] HOLMES N C. Fiber-coupled optical pyrometer for shock wave studies [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66(3):2615-2618.
- [6] FAT'YANOV O V, ASIMOW P D. Contributed review: absolute spectral radiance calibration of fiber-optic shock-temperature pyrometers using a coiled-coil irradiance standard lamp [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(10):229-276.
- [7] SEIFTER A, GROVER M, HOLTKAMP D B, et al. Emissivity measurements of shocked tin using a multi-wave-length integrating sphere [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(9):093508.
- [8] TURLY W D, HOLTKAMP D B, VEER L R, et al. Infrared emissivity of tin upon release of a 25 GPa shock into a lithium fluoride window [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(10):103510.
- [9] LA LONE B M, STEVENS G D, TURLY W D, et al. Release path temperature of shock-compressed tin from dynamic reflectance and radiance measurements [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(6):063506.
- [10] WEN C D. Emissivity characteristics of aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry emissivity models [D]. West Lafayette, IN: Purdue University, 2005.
- [11] POULSEN P, HARE D E. Temperature and emissivity of a shocked surface; a first experiment; UCRL-ID-146845 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2002.
- [12] CAZAMIAS J U, HARE D E, POULSEN P. Progress in infrared pyrometry measurements of shocked solids; UCRL-JC-146049 [R]. Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.
- [13] KONDO K, SAWAOKA A, SAITO S. Magnetoflyer method for measuring gas-gun projectile velocities [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 48(12):1581-1582.
- [14] 施尚春, 陈攀森, 黄跃. 高速弹丸的磁感应测速方法 [J]. *高压物理学报*, 1991, 5(3):205-214.
SHI S C, CHEN P S, HUANG Y. Velocity measurement of magnet induced system for projectile [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1991, 5(3):205-214.
- [15] 史有程, 刘风琴. 一个测量气炮弹丸速度的激光测量装置 [J]. *爆炸与冲击*, 1986(1):73-81.
SHI Y C, LIU F Q. A laser system for measuring the projectile velocity in gas gun [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1986(1):73-81.

Time Precision Synchronization in Simultaneous Measurement of Dynamic Emissivity and Radiance

LIU Shenggang, LI Jiabo, LI Jun, XUE Tao,
WANG Xiang, WENG Jidong, LI Zeren

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, China*)

Abstract: In this paper we analyzed the shock wave breakout time shift at the sample/window due to the flyer velocity shift and the time sequence relationship in the simultaneous measurement of the dynamic emissivity and the radiance. Then, we designed the fiber pins with a total reflection coating film at their edges to trigger the illumination pulse laser. The distance between the fiber pins and the sample was designed elaborately and the design residue was analyzed briefly. In the tests of two shots, the expected flyer velocity was 4.1 km/s and the measured velocity shift of the flyer was 70 m/s and 210 m/s respectively, but the dynamic emissivity signals were successfully superimposed on the thermal radiation of the sample/window interface at the time expected, and the time sequence controlling satisfied the demand of the simultaneous measurement experiments.

Keywords: dynamic emissivity; radiance; simultaneous measurement; time precision synchronization