

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0124

基于 Z 箍缩 X 射线源的热-力学效应实验*

张朝辉, 张思群, 任晓东, 王贵林, 黄显宾, 周少彤, 王昆仑, 徐 强, 蔡红春

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 材料或结构对强脉冲 X 射线的响应如热激波的传播和喷射冲量等, 统称为 X 射线热-力学效应, 在抗辐射加固研究、天体物理、行星科学等领域具有重要应用。利用驱动电流近 10 MA 脉冲功率装置上的丝阵 Z 箍缩 X 射线源开展了初步的热-力学效应实验。采用 20 mm 直径的双层铝丝阵产生了约 230 kJ 的 X 射线总辐射能, 其中铝的 K 壳层产额约为 30 kJ, 距离源中心 5 cm 处的样品上的 X 射线能注量为 732 J/cm²。受辐照样品为厚度 2 mm、直径 10 mm 的铝制圆盘, 其背面设置有铝衬套, 样品与衬套的总质量为 585 mg。采用全光纤光子多普勒测速 (PDV) 系统来测量受辐照样品后表面的运动过程。PDV 测量的样品后表面速度历程显示, 当热激波到达后表面时的自由面速度为 2.12 km/s, 样品最终的整体运动速度为 180 m/s。根据冲击波关系式以及动量守恒原理, 推导出 X 射线在样品中产生的热激波应力为 19.2 GPa, 单位面积上的喷射冲量为 1341 Pa·s, 进而由喷射冲量和 X 射线能注量测量结果可以推出冲量耦合系数为 1.83 Pa·s·cm²/J。同时, 对实验测量结果的可靠性和不确定度进行了讨论和分析。这些实验结果初步验证了将 PDV 技术应用于热-力学效应研究的可行性。

关键词: Z 箍缩 X 射线源; 热-力学效应; 光子多普勒测速; 热激波; 喷射冲量

中图分类号: O536 国标学科代码: 13015 文献标志码: A

Experiments for thermomechanical effects based on Z-pinch X-ray sources

ZHANG Zhaohui, ZHANG Siqun, REN Xiaodong, WANG Guilin, HUANG Xianbin,

ZHOU Shaotong, WANG Kunlun, XU Qiang, CAI Hongchun

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: Responses of materials and structures to intense pulsed X-ray radiation, such as thermal shock wave propagation and blowoff impulse generation are referred to collectively as X-ray thermomechanical effects, which have been applied to radiation hardening, astrophysics, and planetary science. Preliminary experiments for thermomechanical effects have been performed utilizing wire array Z-pinch X-ray sources on a pulsed power facility with a drive current of about 10 MA. A total X-ray radiation energy of about 230 kJ was produced by a nested aluminum wire array of 20 mm in outer diameter, and the K-shell yield of about 30 kJ for aluminum was measured. An X-ray energy fluence up to 732 J/cm² was produced on an irradiated target which was positioned at 5 cm away from the X-ray source center. The irradiated target was an aluminum disk 2 mm in thickness and 10 mm in diameter, backed by an aluminum liner. The total weight of the disk and liner was 585 mg. An all-fiber photonic Doppler velocimeter (PDV) was used to monitor the motion of the rear surface of the irradiated target. The velocity history measured by PDV suggested a free-face velocity of 2.12 km/s when the shock wave arrived at the rear surface of the target, and the final velocity of the target is 180 m/s. Based on the Hugoniot relationships and the law of momentum conservation, a stress of the thermal shock wave of 19.2 GPa and a blowoff impulse per unit target area of 1341 Pa·s were deduced. Furthermore, a consequent coupling coefficient of 1.83 Pa·s·cm²/J was estimated from the measurements of blowoff impulse and the X-ray energy fluence. Finally, discussions on the reliability and uncertainty of the measurement were

* 收稿日期: 2021-04-09; 修回日期: 2021-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(11605188, 11905208)

第一作者: 张朝辉(1979—), 男, 博士研究生, 副研究员, zhangzh108@caep.cn

通信作者: 任晓东(1983—), 男, 硕士, 助理研究员, amsorxd@163.com

presented. These experimental results described here preliminarily validated the feasibility of the application of PDV to the research of X-ray thermomechanical effect.

Keywords: Z-pinch X-ray sources; thermomechanical effects; photonic Doppler velocimeter; thermal shock wave; blowoff impulse

强脉冲 X 射线照射到材料表面时, 较低光子能量的 X 射线由于穿透能力弱, 容易被物质吸收, 因此会在物体表层瞬时沉积大量的能量, 形成高温梯度和高压力梯度, 进而产生非定常的应力波传播, 即热激波^[1-3]。当热激波传播到材料的自由面时卸载形成反射稀疏波, 回传的稀疏波与热激波的稀疏段相互作用产生拉伸应力, 当这种拉伸应力超过材料的动态断裂强度时, 会引起层裂破坏。X 射线诱发的热激波和层裂破坏等效应称为材料响应。足够高能注量的 X 射线还会使表层物质熔化、汽化, 出现反冲喷射现象, 反冲喷射一方面也会在材料中形成热激波, 另一方面将对整体结构施加一个冲量载荷, 使结构体产生动态应变、弹塑性变形和动屈曲等一系列的结构响应^[3-5]。X 射线在材料和结构中引起的这一系列热物理和力学的响应统称为 X 射线的热-力学效应^[5]。

X 射线热-力学效应的研究与应用主要集中在军事领域, 如战略武器与航天器在极端 X 射线辐射环境中的加固设计以及生存能力评估等问题^[6], 此外, 在天体物理、行星科学以及近地目标抑制等领域的研究中也有一定的应用^[7]。自 20 世纪 60 年代, 国外便开始重视对 X 射线热-力学效应的研究, 由于在实验室条件下难以创造出所需的强脉冲 X 射线源, 因此逐渐发展了多种模拟加载技术^[8], 如利用化爆来模拟 X 射线产生的喷射冲量载荷开展结构响应研究^[8-9], 利用强流电子束来模拟 X 射线引起的热激波等材料响应^[10-11]。

此外, 美国、俄罗斯等国家一直非常重视强脉冲 X 射线源的发展, 先后建立了多台可用于 X 射线热-力学效应研究的大型 X 射线源模拟装置, 如 Decade-Quad、Double Eagle、Saturn、Z 等。其中, 美国圣地亚实验室的 Z 装置利用 Z 箍缩等离子体产生了实验室内最强的脉冲 X 射线源, 总的 X 射线辐射能超过 2 MJ, 功率超过 200 TW^[12], 为 X 射线热-力学效应研究提供了前所未有的实验能力。此前, 由于受到装置驱动能力的限制, 我国在强 X 射线源方面一直存在空缺, 主要依靠闪光二号电子束加速器来模拟 X 射线引起的热-力学效应^[10-11], 同时在强光一号加速器上开展了一些脉冲软 X 射线辐照冲量实验^[5, 13]。目前, 我国已经拥有了驱动能力近 10 MA 的大型脉冲功率装置^[14-16], 并利用钨丝阵 Z 箍缩等离子体内爆获得了近 500 kJ 的软 X 射线产额^[15]。强脉冲 X 射线源的发展展现了大型脉冲功率装置在 X 射线热-力学效应研究领域的巨大应用潜力。

本文中, 拟给出利用 10 MA 装置丝阵 Z 箍缩 X 射线源开展热-力学效应研究的初步结果, 并介绍一种新型的热-力学效应测试方法, 该方法将光子多普勒测速系统 (photonic Doppler velocimeter, PDV) 引入到热-力学效应测试中, 通过 PDV 获取受辐照样品自由面的速度历程, 进而利用冲击波关系式以及动量守恒原理回推得到样品中的热激波应力、喷射冲量以及冲量耦合系数等热-力学效应数据。

1 实验原理与实验设计

1.1 实验设计

在驱动能力近 10 MA 的脉冲功率装置上开展实验, 实验的总体设计如图 1 所示。实验采用的 X 射线源为钨丝阵 Z 箍缩等离子体辐射源, 丝阵产生的 X 射线直接辐照到近距离放置的铝样品上。铝样品为圆片形, 放置在不锈钢飞行腔内, 飞行腔的底部放置有 PDV 光纤探头, 用于测量样品后表面运动速度历程, 并由此推导出样品受辐照后产生的热激波应力和喷射冲量等数据。

铝样品的厚度约 2 mm, 直径约 10 mm。样品与丝阵等离子体源的轴心距离为 5 cm, 在这一距离下, 可以保证样品表面能够产生足够高的 X 射线能注量。为了尽可能获得高能注量, 样品与光源之间未放置任何滤片, 这使得样品可以接收所有能谱范围内 X 射线的辐照。样品受 X 射线辐照后, 将沿着不锈钢腔体的内壁以一定速度滑行, 为了防止飞行过程中样品姿态的变化导致 PDV 探头测量信号的丢失, 在样

品后表面留有 4 mm 长的防倾斜衬套, 衬套的壁厚为 0.5 mm。包含衬套的铝样品总质量在实验前测量为 585 mg。飞行腔内总长度为 23 mm, 初始时刻样品的迎光面与飞行腔口的端面平齐, 因此样品在腔内的最大飞行距离为 17 mm。飞行腔的后端面底盖的中心位置为 PDV 光纤探头, 用于收集来自样品后表面的反射信号, 另外, 在端盖上还开有多个小孔, 以避免装置在抽真空的过程中样品发生位移。PDV 探头的信号通过光纤连接到屏蔽测试间内的专用信号探测器上, 然后将探测信号传输至示波器记录。

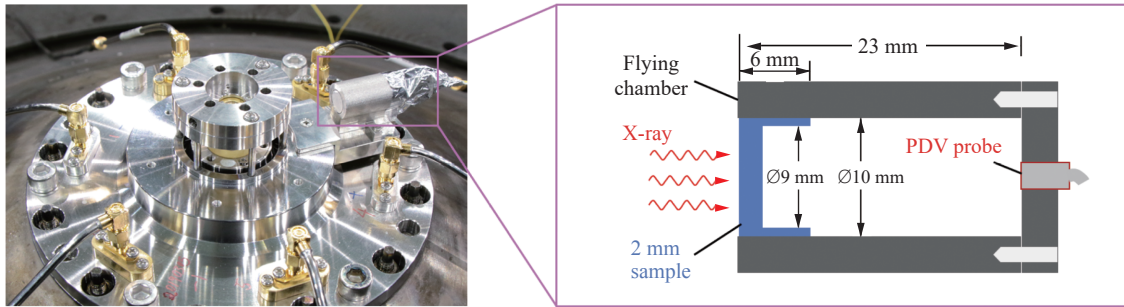


图 1 X 射线热-力学效应实验布局

Fig. 1 Setup of the X-ray thermomechanical effect experiment

1.2 铝丝阵 Z 箍缩 X 射线源

实验中所使用的 X 射线源由双层铝丝阵 Z 箍缩产生, 采用铝丝阵的目的是希望通过铝的 K 壳层辐射(大约 1.6~2.3 keV)尽可能多地产生 1 keV 以上的 X 射线。所使用的双层丝阵内外层半径分别为 5 和 10 mm, 内外层丝数分别为 90 和 180, 铝丝的直径为 15.6 μm , 丝阵的线质量约为 1.5 mg/cm, 高度为 15 mm。实验中装置的 Marx 发生器的充电电压为 65 kV, 相应的初始储能约为 3 MJ, 实验中负载电流峰值接近 8 MA, 电流上升时间(10%~90%)约为 60 ns。

铝丝阵产生的 X 射线功率和能量采用称为平响应 XRD^[17] 的 X 射线探测器进行测量, 该探测器在 0.1~4 keV 范围内具有较平坦的谱响应灵敏度, 并在实验前经过同步辐射装置进行灵敏度标定。在不使用任何滤片的情形下, 该探测器可以直接对总的 X 射线进行测量。在探测器前放置 20 μm 铍滤片后, 小于 1 keV 的光子几乎全部被滤片吸收, 此时平响应 XRD 探测器的测量结果可以认为主要为铝 K 壳层辐射。图 2 给出了典型发次铝丝阵实验测量的总 X 射线以及 K 壳层辐射功率和能量, 该结果均假定在 4 π 空间立体角内辐射为均匀分布。图 2 所示的发次中, 总的 X 射线峰值功率约为 29 TW, 脉冲半高宽约为 3.5 ns, X 射线的总能量约为 230 kJ; 大于 1 keV 的 X 射线(铝的 K 壳层辐射为主)峰值功率约为 7 TW, 半高宽约为 2.6 ns, 产额约 30 kJ, 由此可以粗略估计该发次实验中 K 壳层辐射占 X 射线总能量的份额约为 13%。进一步根据辐射场的强度与距离平方成反比, 可以立即得到任意距离处 X 射线的能注量。

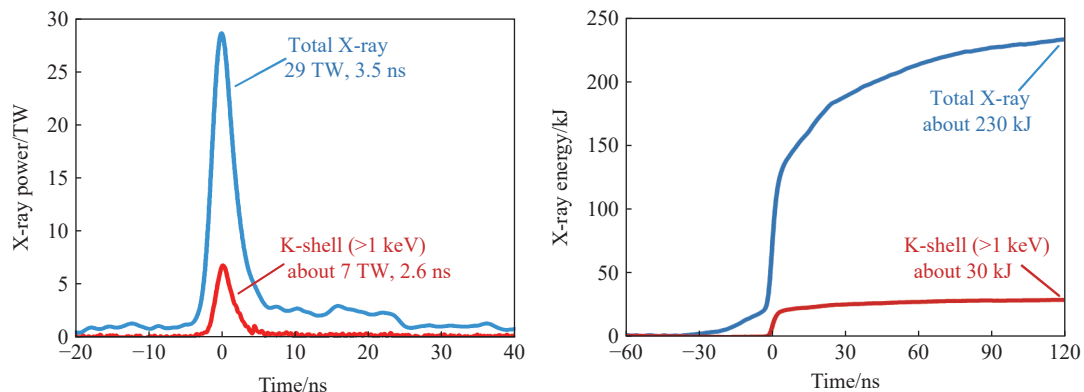


图 2 双层铝丝阵典型实验结果(Shot 477)

Fig. 2 Typical results from the nested Al wire array experiment (Shot 477)

图 3(a) 给出了由 X 射线分幅相机拍摄的双层铝丝阵内爆图像, 图像显示峰值发射时刻附近等离子体获得了较高的内爆压缩, 且箍缩等离子体柱具有较好的均匀性, 由该图像估计的最小箍缩半径不超过 1 mm。图 3(b) 则给出了相似类型铝丝阵实验中由晶体谱仪测量的时间积分铝 K 壳层辐射谱。从光谱测量结果可以清楚地分辨出铝的 K 壳层谱线, 该光谱主要包含了铝的类氢(Ly α 、Ly β 、Ly γ 、Ly δ)和类氦(He α 、He β 、He γ 、He δ)两个谱线系。其中最强的谱线为 Ly α , 这表明相应的铝等离子体经过内爆压缩后被加热到了相当高的温度。

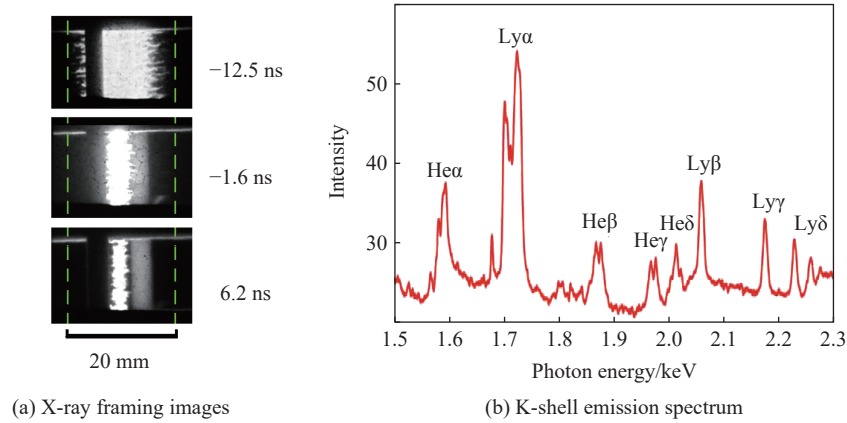


图 3 典型铝丝阵 X 射线分幅图像和 K 壳层辐射谱

Fig. 3 Typical X-ray framing images and K-shell emission spectrum from the Al wire array experiment

1.3 基于 PDV 的热-力学效应测量原理

PDV 测速技术^[18-19]在冲击波物理与爆轰物理研究中已有非常广泛的应用^[20], 目前已经发展得比较成熟。本文中采用了一种全光纤 PDV 测速仪来测量受辐照样品的后表面运动速度。

高能注量 X 射线辐照到样品上时样品内会产生热激波, 当热激波传播到样品后表面自由面时将呈现出速度阶跃, 此时若采用 PDV 获得热激波在自由面产生的阶跃速度, 可以通过该速度换算出热激波在后表面产生的压力。设样品自由面阶跃速度为 u_p , 根据弱激波的自由面速度倍增定律, 可以确定粒子速度 $u_p \approx u_f/2$, 对于已知的固体材料, 可以应用冲击波直线关系式得到热激波的传播速度^[21]:

$$D = C_0 + \lambda u_p \quad (1)$$

式中: D 为冲击波速度, C_0 为材料中的声速, λ 为经验常数, u_p 为粒子速度。

进而由冲击波关系可以得到受辐照样品材料后表面的压力:

$$p = \rho_0 D u_p \quad (2)$$

式中: p 为材料后表面处的压力, ρ_0 为材料的初始密度。

PDV 不仅可以捕捉热激波到达后表面时产生的自由面速度阶跃, 同时还可以捕捉后表面自由面完整的速度历程。当样品充分经历了热激波加卸载过程后进入自由飞行段, 样品内部各位置处具有一个整体的平衡速度, 此时 PDV 测量的后表面速度即反映了样品的整体运动速度。利用样品的整体运动速度, 根据动量守恒原理, 可以方便地计算出样品受 X 射线辐照后所获得的喷射冲量^[5]:

$$I = (m - \Delta m) u_e / S \quad (3)$$

式中: I 为比冲量, 即单位面积上样品获得的喷射冲量; m 为样品初始质量; Δm 为样品受辐射面表层喷射出的质量, 一般情况下其值极小可忽略; u_e 为样品受辐照后自由飞行所达到的整体运动速度; S 为样品的受辐照面积。

进一步可以计算出样品材料的喷射冲量耦合系数^[5]:

$$\beta = I / \Phi \quad (4)$$

式中: β 为样品材料的喷射冲量耦合系数; Φ 为样品受辐照表面的 X 射线能注量, 即单位面积上的 X 射线能量。

2 实验结果与分析

2.1 样品后表面速度 PDV 测量结果

图 4(a) 给出了典型发次 PDV 探测信号通过短时快速傅里叶分析获得的时频谱, 它反映了不同时刻 PDV 探测器输出光信号的频率分布, 图中的频率正比于样品后表面的速度。通过提取不同时间窗的频率峰值, 可以获得如图 4(b) 所示的样品后表面速度历程。

图 4(b) 所示速度曲线清楚地显示了样品后表面的整个运动过程。首先, 在约 $3 \mu\text{s}$ 附近, 速度曲线上出现一个明显的速度阶跃, 这对应了样品中的热激波到达后界面, 其后的卸载过程中, 后界面速度逐渐降低, 并在 $20 \mu\text{s}$ 附近速度趋于平衡, 样品处于整体的飞行状态。此后, 由于样品侧面与飞行腔之间存在摩擦, 导致样品在飞行过程缓慢地减速。在约 $106 \mu\text{s}$ 时样品衬套最先到达飞行腔后端面, 并与腔体底盖碰撞而导致速度骤降。对图 4(b) 中的速度曲线进行积分即可得到样品后界面的运动位移曲线, 如图 4(c) 所示。可以看到, 样品后表面的最终位移为 17 mm , 与飞行腔允许样品飞行的最大距离相一致, 这在一定程度上表明了 PDV 测量的样品后表面速度具有合理性。

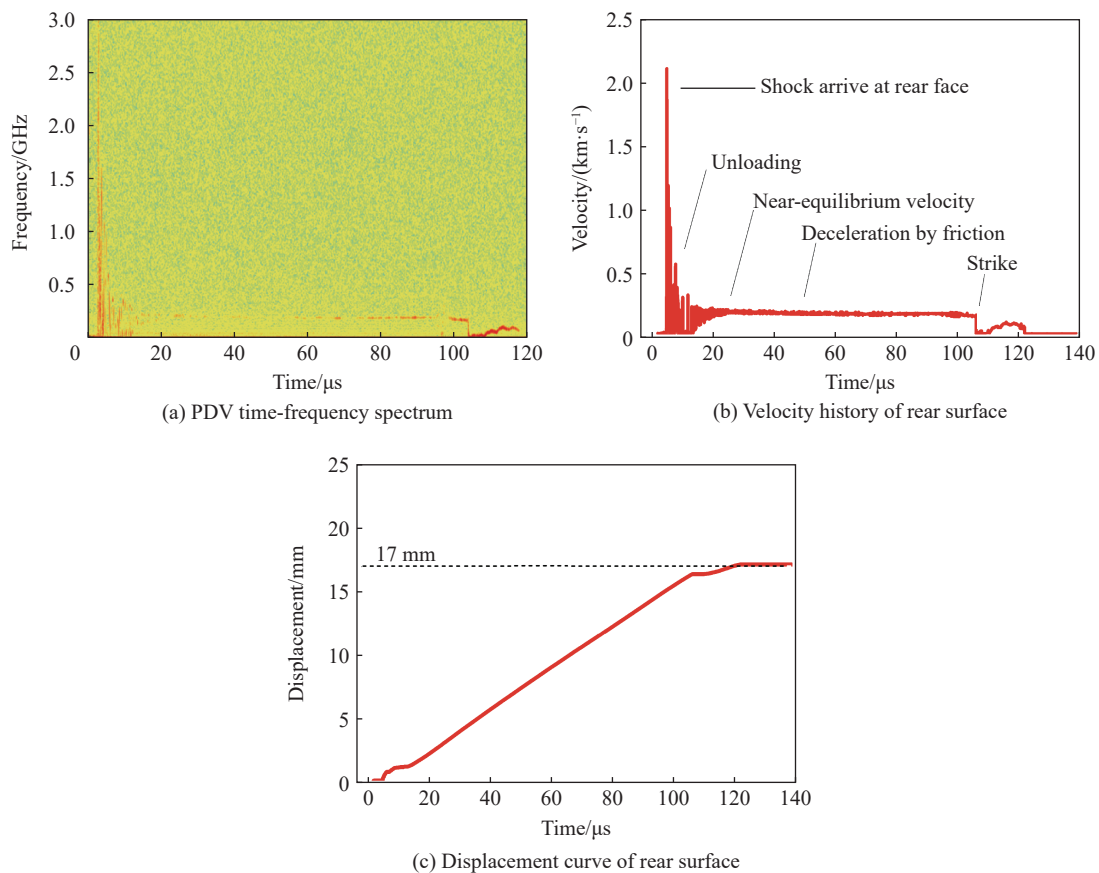


图 4 典型 PDV 测量结果(Shot 477)

Fig. 4 Typical results of the PDV measurement (Shot 477)

2.2 热激波应力

图 4(b) 中速度曲线上出现速度阶跃对应了热激波到达后界面时的自由面速度, 根据自由面速度倍增定律可以得到此时后界面处的粒子速度。Shot 477 发次实验中, 热激波到达样品后界面时测得的自由

面速度为 2.12 km/s, 可得粒子速度为 1.06 km/s。对于本实验中采用的铝样品, 可以利用式 (1) 得到热激波的传播速度, 取铝中的声速为 5.25 km/s, 经验常数 λ 取 1.39^[21], 则可以得到后界面处的冲击波速度为 6.7 km/s。再根据式 (2) 可以得到受辐照样品材料后表面的热激波应力为 19.2 GPa。

2.3 喷射冲量与冲量耦合系数

从图 4(b) 可以估算出该发次样品的整体运动速度约为 180 m/s。通过实验后对回收样品的称重显示, 回收样品质量相较于初始质量减小了约 1 mg (受限于所采用的电子秤测量精度, 本文中未能给出更精确的质量测量结果), 以此作为受辐照样品表层喷射物质质量的估计, 根据动量守恒, 可以估算出喷射速度约为 100 km/s。利用式 (3) 可计算出样品所获得的比冲量, 代入样品的整体运动速度, 忽略样品的喷射质量, 得到图 4(b) 对应发次样品所获得的比冲量为 1341 Pa·s。由图 2(b) 中所示总 X 射线能量, 根据距离平方反比律, 可换算出该发次实验中样品表面的 X 射线能注量为 732 J/cm², 进而根据式 (4) 可以得到相应的冲量耦合系数为 1.83 Pa·s·cm²/J。

2.4 分析讨论

值得指出, 由于在单发次实验中仅采用了一个 PDV 探头, 为了获得样品的整体运动速度以及显示完整的飞行历程, 采集 PDV 信号的示波器记录时间设置为 200 μ s, 如此长的记录时长降低了示波器记录信号的时间分辨。相较于样品的整体运动, 热激波的时间尺度要小得多 (约数百纳秒), 因此实验中的设置并不利于捕捉高分辨的热激波信号, 这可能导致热激波到达自由面的阶跃速度测量以及推导的热激波应力数据存在较大的偏差。因此, 上述对热激波应力的相关推导计算仅作为方法与过程的演示, 而更可靠的测量有待于后续实验设计的优化和改进, 如增加 PDV 探头和记录示波器的数量, 以及更具有针对性的热激波实验设计。

由式 (3) 可知, 喷射冲量测量的可靠性主要取决于样品辐照后的剩余质量和样品整体运动速度的测量精度。如 2.3 节所述, 本文中实验前后样品的质量变化相当微小, 相较于样品初始质量, 反冲喷射所带来的质量亏损可忽略不计, 即使不对回收样品进行精密的质量测量 (由于实验本身破坏性很强, 并非所有发次都能对样品进行回收), 仅以初始质量作为样品剩余质量的估计所引起的测量结果不确定度可以忽略 (小于 0.2%)。本文中所采用的 PDV 测速系统的测速精度约为 5 m/s, 由此带来的样品整体运动速度测量相对不确定度估计为 3%。此外, 样品飞行过程中所受摩擦力对样品的速度也有重要影响, 通过适当的方法, 如对减速阶段的速度历程进行线性拟合和外插, 可以得到接近初始时刻的样品整体运动速度, 由此引起的样品整体运动速度测量相对不确定度估计为 5%。综上, 总的喷射冲量 (比冲量) 测量结果的相对不确定度约为 6%。而对于冲量耦合系数, 由式 (4) 可知, 其测量结果不确定度还取决于样品表面 X 射线能注量的测量, 本实验中所采用的平响应 XRD 探测器的典型测量不确定度约为 12%^[22], 由此可得, 总的冲量耦合系数测量不确定度约为 14%。

另外, 实验中样品直接暴露于丝阵等离子体源, 这使得等离子体碎片可以直接入射到样品表面, 从而可能对测量结果产生影响。对此可以作如下分析: 首先, 根据已有的经验和观测, 等离子体碎片的速度在 10 km/s 左右, 等离子体碎片对样品产生的冲击在时间上要远滞后于辐射引起的热激波, 因此并不会对热激波的测量产生影响。其次, 由于总的丝阵负载质量不超过 3 mg, 能够入射到样品上的等离子体相较于样品质量低近 5 个量级, 其入射碎片携带的动量相较于喷射冲量也可忽略。因此, 可以认为等离子体碎片对于上述测量结果并不会产生大的影响。

3 结 论

大型脉冲功率装置上脉冲 X 射线源技术的发展, 为开展 X 射线热-力学效应研究创造了难得的条件。利用 10 MA 装置上的铝丝阵 Z 箍缩 X 射线源, 可为辐照样品提供超过 700 J/cm² 的高 X 射线能注量。本文中介绍了一种基于 PDV 的热-力学效应测试方法, 并经过初步的实验与分析对该方法进行了原

理性验证, 通过测量受辐照样品材料后表面的速度历程, 获得了样品材料中的热激波应力、喷射冲量、冲量耦合系数等 X 射线热-力学效应数据。该方法不仅适用于 Z 箍缩装置上的热-力学效应实验, 还可以方便地移植到电子束等装置上开展的同类实验。

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心为实验提供负载。

参考文献:

- [1] 周南. 脉冲辐照热激波与压缩应力波 [J]. *高压物理学报*, 1994, 8(3): 190–199. DOI: 10.11858/gywlb.1994.03.006.
ZHOU N. The thermal shock wave induced by X-ray and electron beam radiation and compressive stress wave [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1994, 8(3): 190–199. DOI: 10.11858/gywlb.1994.03.006.
- [2] 汤文辉, 张若棋, 赵国民. 脉冲 X 射线诱导的热击波 [J]. *高压物理学报*, 1995, 9(2): 107–111. DOI: 10.11858/gywlb.1995.02.004.
TANG W H, ZHANG R Q, ZHAO G M. Thermal shock wave induced by impulsive X-ray [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1995, 9(2): 107–111. DOI: 10.11858/gywlb.1995.02.004.
- [3] LANGLEY R W. Analytical relationships for estimating the effects of X-rays on materials: AFRPL-TR-74-52 [R]. USA: AFRPL, 1974.
- [4] 彭常贤, 刘晋, 胡泽根, 等. 强脉冲 X 光辐照硬铝靶产生喷射冲量的研究 [J]. *强激光与粒子束*, 1998, 10(3): 383–386.
PENG C X, LIU J, HU Z G, et al. Studies of the blowoff impulses in the aluminum alloy targets irradiated by intense soft X-ray [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(3): 383–386.
- [5] 彭常贤, 谭红梅, 林鹏, 等. 脉冲软 X 光辐射三种材料的喷射冲量实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(1): 89–93.
PENG C X, TAN H M, LIN P, et al. Experimental studies of blowoff impulse in materials irradiated by pulsed soft X-ray [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(1): 89–93.
- [6] 张永民. 电子束热力学效应研究的关键技术分析 [J]. *现代应用物理*, 2010, 1(4): 380–386.
ZHANG Y M. Key technologies for study on thermal mechanical effects of electron beams [J]. *Modern Applied Physics*, 2010, 1(4): 380–386.
- [7] REMO J L, FURNISH M D, LAWRENCE R J. Plasma-driven Z-pinch X-ray loading and momentum coupling in meteorite and planetary materials [J]. *Journal of Plasma Physics*, 2013, 79(2): 121–141. DOI: 10.1017/S0022377812000712.
- [8] 毛勇建, 邓宏见, 何荣建. 强脉冲软 X 光喷射冲量的几种模拟加载技术 [J]. *强度与环境*, 2003, 30(2): 55–64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2003.02.008.
MAO Y J, DENG R J, HE Y J. Several simulation techniques of blow-off impulse by intense pulsed cold X-rays [J]. *Structure and Environment Engineering*, 2003, 30(2): 55–64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2003.02.008.
- [9] 赵国民, 张若棋, 陈刚, 等. 铅壳柔爆索爆炸特性实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2001, 15(2): 91–96. DOI: 10.11858/gywlb.2001.02.003.
ZHAO G M, ZHANG R Q, CHEN G, et al. Investigations of explosion characteristics of lead shield mild detonating fuse [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2001, 15(2): 91–96. DOI: 10.11858/gywlb.2001.02.003.
- [10] 彭常贤, 王占江, 王伟. “闪光二号”电子束辐照平板靶产生热击波的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 1995, 9(1): 20–28. DOI: 10.11858/gywlb.1995.01.004.
PENG C X, WANG Z J, WANG W. Experimental studies of the thermal shock wave produced in the flat plate targets bombarded by electron beam on FLASH- II [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1995, 9(1): 20–28. DOI: 10.11858/gywlb.1995.01.004.
- [11] 彭常贤, 林鹏, 谭红梅, 等. PVDF 在电子束辐射材料产生的热激波测量中的应用 [J]. *高压物理学报*, 2002, 16(1): 7–15. DOI: 10.11858/gywlb.2002.01.002.
PENG C X, LIN P, TAN H M, et al. Application of PVDF for thermal shock wave measurement in materials radiated by electron beam [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2002, 16(1): 7–15. DOI: 10.11858/gywlb.2002.01.002.
- [12] SPIELMAN R B, DEENEY C, CHANDLER G A, et al. Tungsten wire-array Z-pinch experiments at 200 TW and 2 MJ [J].

- [Physics of Plasmas](#), 1998, 5(5): 2105–2111. DOI: 10.1063/1.872881.
- [13] 林鹏, 王等旺, 陈博. 脉冲软 X 射线汽化喷射冲量 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(S1): 111–115.
LIN P, WANG D W, CHEN B. Vaporized blow-off impulse induced by pulse soft X-ray [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(S1): 111–115.
- [14] DENG J J, XIE W P, FENG S P, et al. Initial performance of the primary test stand [J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2013, 41(10): 2580–2583. DOI: 10.1109/TPS.2013.2274154.
- [15] HUANG X B, ZHOU S T, DAN J K, et al. Preliminary experimental results of tungsten wire-array Z-pinch on primary test stand [J]. [Physics of Plasmas](#), 2015, 22(7): 072707. DOI: 10.1063/1.4926532.
- [16] HUANG X B, REN X D, DAN J K, et al. Radiation characteristics and implosion dynamics of Z-pinch dynamic hohlraums performed on PTS facility [J]. [Physics of Plasmas](#), 2017, 24(9): 092704. DOI: 10.1063/1.4998619.
- [17] LI Z C, JIANG X H, LIU S Y, et al. A novel flat-response x-ray detector in the photon energy range of 0.1–4 keV [J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2010, 81(7): 073504. DOI: 10.1063/1.3460269.
- [18] STRAND O T, GOOSMAN D R, MARTIMESEZ C, et al. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques [J]. [Review of Scientific instruments](#), 2006, 77(8): 083108. DOI: 10.1063/1.2336749.
- [19] JENSEN B J, HOLTKAMP D B, RIGG P A, et al. Accuracy limits and window corrections for photon Doppler velocimetry [J]. [Journal of Applied Physics](#), 2007, 101(1): 013523. DOI: 10.1063/1.2407290.
- [20] 李建中, 王德田, 刘俊, 等. 多点光子多普勒测速仪及其在爆轰物理领域的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(4): 0422001. DOI: 10.3788/IRLA201645.0422001.
LI J Z, WANG D T, LIU J, et al. Multi-channel photonic Doppler velocimetry and its application in the field of explosion physics [J]. [Infrared and Laser Engineering](#), 2016, 45(4): 0422001. DOI: 10.3788/IRLA201645.0422001.
- [21] 经福谦. 实验物态方程导引 [M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999: 90–91.
- [22] 王昆仑, 任晓东, 黄显宾, 等. 用于“聚龙一号”上软 X 光通量探测的平响应 X 光二极管 [J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(4): 045009. DOI: 10.11884/HPLPB201628.045009.
WANG K L, REN X D, HUANG X B, et al. Flat spectral response XRD for diagnosing soft X-ray flux on PTS [J]. [High Power Laser and Particle Beams](#), 2016, 28(4): 045009. DOI: 10.11884/HPLPB201628.045009.

(责任编辑 蔡国艳)