

# 强激光间接驱动材料动态破碎过程的实验技术研究\*

储根柏<sup>1)†</sup> 于明海<sup>1)</sup> 税敏<sup>1)</sup> 范伟<sup>1)</sup> 席涛<sup>1)</sup> 景龙飞<sup>2)</sup>  
赵永强<sup>1)</sup> 吴玉迟<sup>1)</sup> 辛建婷<sup>1)‡</sup> 周维民<sup>1)</sup>

1) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 高温高密度等离子体物理实验室, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院激光聚变研究中心实验物理部, 绵阳 621900)

(2019年8月16日收到; 2019年11月1日收到修改稿)

强激光驱动加载已成为冲击波作用下材料动态破碎过程研究的一种有效手段. 采用间接驱动方式, 设计合适的腔型进行物理实验研究, 可实现更大且更均匀的冲击加载一维区. 采用数值模拟和物理实验方法, 研究强激光间接驱动材料动态破碎过程的实验技术. 首先, 利用 IRAD 程序设计适用于开展动态破碎过程研究的半柱腔, 其直径为 2 mm、腔长为 2 mm; 进而通过物理实验获得此腔型下多个激光能量点、脉宽 2 ns 和 3 ns 条件下辐射峰值温度和波形; 最后, 利用流体模拟方法给出多种辐射波形下的冲击加载波形. 利用高能 X 射线成像和光子多普勒干涉仪诊断给出间接驱动加载下层裂过程的物理图像和速度历史. 经分析发现, 间接驱动的加载一维区达到 2 mm, 平面性优于 5%, 能有效地开展相关物理实验研究. 研究结果为新型柱腔设计、冲击加载技术及动态破碎过程研究提供了重要的研究基础.

**关键词:** 间接驱动加载, 动态破碎过程, 高能 X 射线成像

**PACS:** 47.40.Nm, 62.20.M-, 87.59.B-

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191245

## 1 引言

冲击加载下材料动态破碎过程研究是目前冲击波物理研究中一个热点问题<sup>[1-5]</sup>, 强激光驱动加载已成为相关物理实验研究的一种有效手段<sup>[2,6-9]</sup>. 激光驱动加载要求冲击加载的一维区达到 mm 级, 且具有较好的均匀性<sup>[1,7]</sup>. 目前的物理实验主要利用强激光直接驱动方式<sup>[10,11]</sup>, 即强激光直接烧蚀材料表面的方式产生冲击波并对样品进行加载; 利用特定设计的连续相位板 (CPP)<sup>[7,12]</sup> 调节加载面大小及均匀性, 将强激光束的焦斑匀滑为直径

2 mm 且均匀分布<sup>[13]</sup>. 在实际使用过程中, 由于 CPP 束匀滑后焦斑均匀分布的区域仅有 1 mm 左右, 且一维加载后产生的冲击波在亚毫米级厚度的金属靶内传输过程中, 受边侧稀疏波的影响, 会持续变小; 冲击波出界面时一维加载区域变得非常小, 不利于开展一维加载下材料动态破碎过程.

目前解决此类加载技术问题的方法主要包括以下几方面. 1) 设计直径更大的均匀光斑加载, 这也要求 CPP 刻蚀深度更深, 存在设计和加工匹配的难题; 同时考虑到刻蚀后光束近场调制造成的光学元件损伤的问题, 激光输出能量需要大幅降低; 焦斑增大后功率密度进一步降低, 这将造成直接驱

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11804319, 11805177) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [cgbcc@sina.com](mailto:cgbcc@sina.com)

‡ 通信作者. E-mail: [jane\\_xjt@126.com](mailto:jane_xjt@126.com)

动的加载压强无法达到预定值. 2) 设计多个均匀光束在靶面上进行交叠, 从而增大光束均匀分布的范围, 这一过程对激光瞄准注入精度要求非常高, 通常很难达到. 3) 采用间接驱动方式<sup>[6,14,15]</sup>, 可设计直径更大的柱腔加载, 这一方面的物理实验开展的较少. 间接驱动实验中, 激光在黑腔中转换为 X 射线, 进而烧蚀平面靶, 因而驱动效率会明显降低. 考虑可行性与实验周期, 采用间接驱动方式, 设计合适的腔型及激光参数开展相关物理实验, 为后续实验提供基础.

本文主要研究强激光间接驱动金属材料动态破碎过程的加载技术. 通过 IRAD 数值模拟设计实验所需的半柱腔, 并通过物理实验获得此腔型下多个激光能量点、脉宽 2 ns 和 3 ns 条件下辐射峰值温度和波形. 同时, 利用流体模拟方法给出 1, 2, 3 ns 辐射波形下冲击加载波形. 动态物理实验给出峰值辐射温度为 138 eV 下间接驱动加载下层裂的物理图像及自由面速度. 经分析, 间接驱动的加载一维区达到 2 mm, 平面性优于 5%. 研究结果为后续物理实验奠定了良好的基础.

## 2 实验与理论设计

### 2.1 实验设计

实验在神光大型激光装置上完成, 实验装置示意图如图 1 所示. 实验利用上四路纳秒激光注入半柱腔中产生 X 射线并对锡平面靶进行冲击加载; 在一定的延迟后, 利用皮秒激光作用产生微焦点、高能 X 射线对加载后样品成像<sup>[13]</sup>, 并采用成像板 (IP) 记录图像; 同时利用光子多普勒干涉仪 (PDV) 对界面速度进行诊断<sup>[16]</sup>. 高能 X 射线成像及 PDV 测速的细节内容已在文献<sup>[13,16]</sup>中报道, 这里不再赘述.

实验中半柱腔为 Au 腔, 其直径为 2 mm, 腔长为 2 mm, 注入口直径为 0.8 mm, 腔壁厚为 0.04 mm. 锡靶厚度为 0.5 mm, 光洁表面, 表面粗糙度优于 0.1  $\mu\text{m}$ . 为了提高辐射驱动压力, 锡靶上表面粘上 CH 层 (薄膜, 只含 C, H 元素), 其厚度为 10  $\mu\text{m}$ . 背光靶为 Au 丝靶, Au 丝直径为 20  $\mu\text{m}$ , 长度为 0.5 mm, Au 丝放置于 CH 基底上. 锡靶置于靶室中心 (通过靶室的外置基准定位靶室中心的

一个点, 定义为靶室中心), 背光靶置于靶室中心偏北 20 mm (靶室平面为赤道面, 再按实际方位分东西南北向).

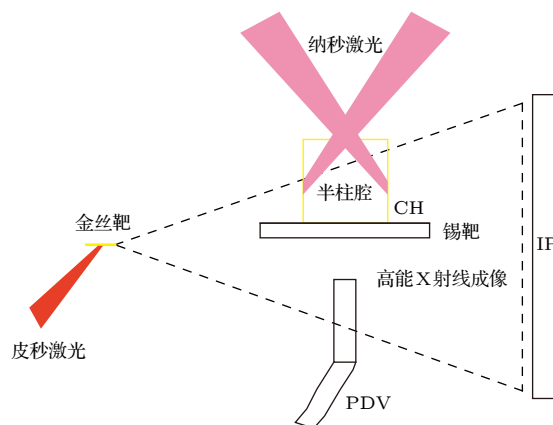


图 1 激光间接驱动冲击加载物理实验示意图

Fig. 1. The schematic view of indirect driving shock wave experiments via lasers.

纳秒激光参数为上四束激光, 激光波长为 0.351  $\mu\text{m}$ , 脉宽为 3 ns 或 2 ns, CPP 束匀滑后焦斑直径为 0.45 mm, 实验中每发次激光能量均实测, 数值在 800—4800 J 范围内, 纳秒激光注入黑腔中. 皮秒激光频率为 1.06  $\mu\text{m}$ , 脉宽为 10 ps, 能量为 450 J, 聚焦光斑  $\Phi 50 \mu\text{m}$ , 注入丝靶中心. 皮秒激光与丝靶相互作用会产生微焦点、高能 X 射线<sup>[13,17,18]</sup>, 能段范围为 50—200 keV, 前期实验表明  $\Phi 20 \mu\text{m}$  丝靶产生 X 射线可用于高空间分辨成像, 成像空间分辨在 20  $\mu\text{m}$  左右. 典型发次的动态诊断实验中, 纳秒激光注入时刻提前皮秒激光 600 ns.

### 2.2 理论设计

主要采用 IRAD 方法模拟激光注入黑腔的辐射温度和辐照均匀性<sup>[19]</sup>, 模拟的半柱腔直径为 2 mm, 腔长为 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mm 条件下样品处的辐射场分布; 模拟使用的激光参数为总能量 6000 J (以当时激光输出最大能量为输入条件, 获取该腔型下最高的峰值辐射温度)、波长为 0.351  $\mu\text{m}$ 、脉宽为 3 ns、入射角度为 50°. Multi 流体软件模拟不同辐射波形下冲击加载波形, 模拟的辐射峰值温度为 140 eV, 脉宽分别为 1, 2, 3 ns, 输入的辐射波形为实测辐射波形中取几个特征点, 输入的靶参数为锡靶, 其厚度为 0.5 mm.

### 3 结果

#### 3.1 辐射烧蚀均匀性的模拟优化

利用 IRAD 软件模拟半柱腔直径为 2 mm、不同腔长下样品处峰值辐射温度分布, 结果如图 2 所示. 在腔长为 1 mm 条件下, 辐射温度分布图上显示 4 个局域高温点且温度分布极为不均匀. 在腔长

为 1.5, 2.0, 2.5 mm 下, 整个样品处的辐射温度分布较为均匀. 以直径为 2 mm, 腔长为 2 mm 为例, 中心处辐射温度为 152 eV, 边缘处辐射温度为 143 eV, 这个辐射场的均匀性在 10% 以内. 辐射温度在  $(150 \pm 2)$  eV 区域的直径为 1.5 mm, 均匀性优于 2%. 考虑到实验中存在着激光注入时束间平衡、激光等离子体效应等诸多效应影响, 实验中半柱腔尺寸设计为直径 2 mm, 腔长 2 mm.

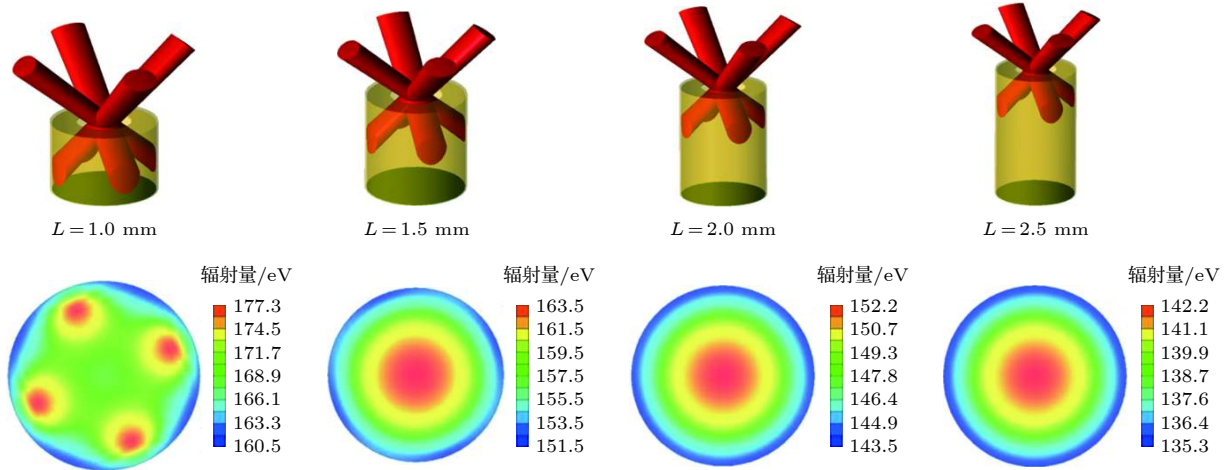


图 2 不同腔长下样品处的辐射分布

Fig. 2. Radiation distribution in the surface of the sample for hohlraum with different lengths.

#### 3.2 辐射波形

利用强激光注入半柱腔中产生均匀辐射场, 通过纳秒针孔相机监测光斑注入正常, 未形成挂边等异常注入情况. 再利用平响应 X 射线衍射 (FXRD) 获得不同能量、不同脉宽下辐射波形, 如图 3 所示. 在激光脉宽为 3 ns 情况下, 辐射温度峰值时刻为 4.0 ns 处, 考虑到测量信号的起点为 1.1 ns, 实际辐射峰值温度时刻为 2.9 ns. 峰值温度在激光能量 1000 J 时为 138 eV, 且随激光能量提高而上升. 在 2 ns 情况下, 实际辐射温度峰值时刻为 1.9 ns. 这里, 激光能量 1314 J 时辐射温度反而略比 844 J 低, 经分析发现此次 FXRD 的信噪比较大, 但在误差范围内.

#### 3.3 冲击加载波形

冲击加载波形指的是冲击波到达靶后界面时靶内压力分布情况, 此加载波形还与辐射波形与靶厚度有关. 利用一维流体软件模拟不同辐射波形下加载波形, 结果如图 4 所示. 从模拟结果看出, 3 种

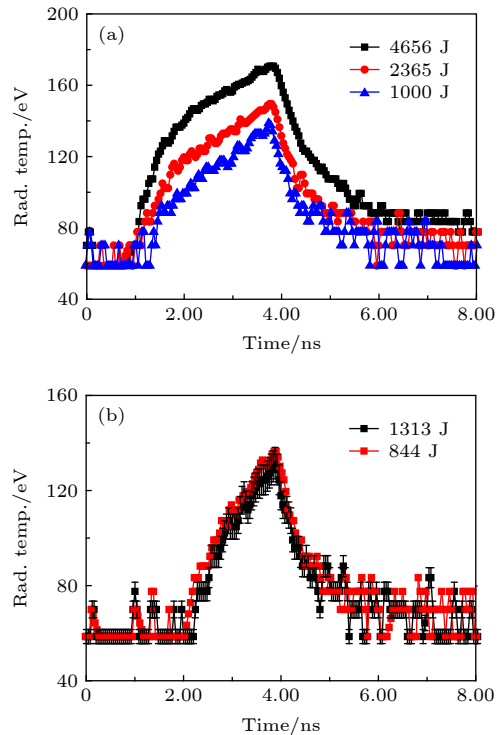


图 3 辐射波形 (a) 激光脉宽 3 ns; (b) 激光脉宽 2 ns

Fig. 3. Radiation wave at different pulse duration of laser: (a) 3 ns; (b) 2 ns.

不同脉宽的辐射波形下, 辐射驱动的加载波形均为三角波结构分布, 且随着脉宽增加, 峰值压力有所增加.

为了开展更高加载压强的物理实验, 在金属靶表面贴上厚度为 10  $\mu\text{m}$  薄的 CH 层, 通过辐射烧蚀 CH 层进行增压. 在这种条件下, 通过 Multi 软件模拟获得加上 CH 层和未加 CH 层的加载压力, 进行比较, 模拟结果显示金属样品表面增加 CH 层能使得加载压力增大约 50%.

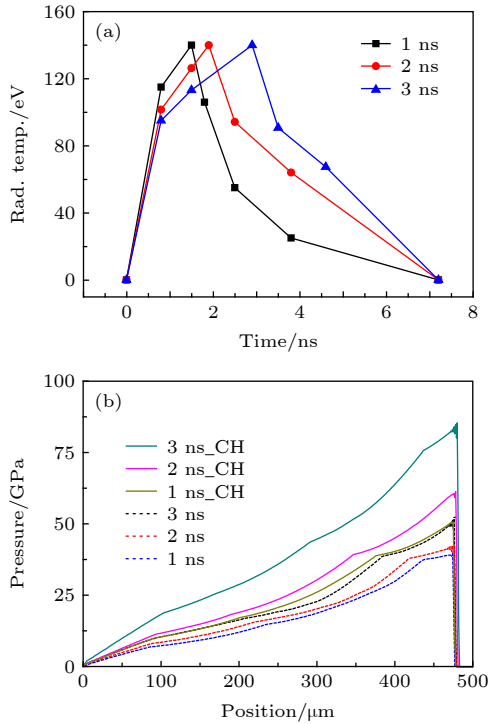


图 4 (a) 不同辐射波形; (b) 冲击加载波形

Fig. 4. (a) Radiation wave; (b) loading shock wave at different pulse duration of laser.

### 3.4 动态诊断结果

实验通过上四束激光注入柱腔中, 产生辐射烧蚀加载样品; 并利用高能 X 射线诊断加载后样品动态破碎过程. 典型发次的实验结果 (总能量为 1000 J, 脉宽为 3 ns) 如图 5 所示. 动态图像清晰地显示半柱腔已经膨胀到一定程度但尚未完全解体, 在柱腔侧壁上仍能清楚地看到激光弹着点, 柱腔顶端注入入口已与侧壁分离并飞行了一段距离.

从图 5 还可以看到靶支撑结构和未扰动自由面位置. 冲击加载后的锡样品形成块状层裂片, 其厚度为 0.06 mm, 脱离基底向前飞出, 相对未扰动自由面运动的距离为 0.3 mm. 在自由面速度曲线中, 该动态过程为典型的层裂行为<sup>[20]</sup>, 起跳速度为

0.65 km/s, 起跳时间为 131 ns, 平均运动速度为 0.55 km/s. 由图中层裂片运动距离为 0.3 mm、运动时间为 469 ns (诊断时刻 600 ns 减去自由面起跳时刻 131 ns), 由此推出层裂片平均运动速度为  $(0.63 \pm 0.1)$  km/s, 与 PDV 的测试结果一致 (如图 6 所示).

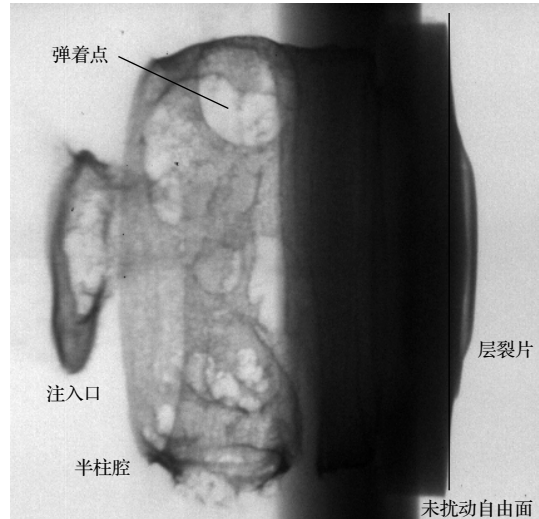


图 5 高能 X 射线动态诊断间接驱动(layer)的层裂过程

Fig. 5. High energy X-ray radiography of spall from indirect drive by laser.

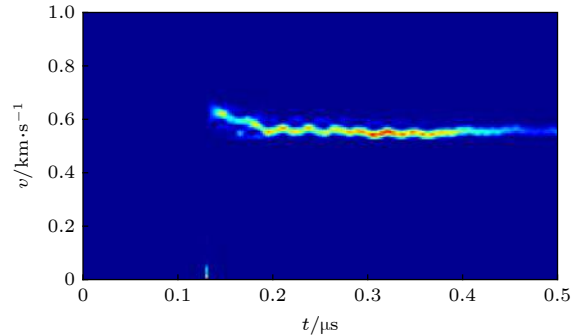


图 6 间接驱动层裂过程的自由面速度历史

Fig. 6. Velocity of free surface of spall from indirect drive by laser.

## 4 讨论

通过设计合适的半柱腔并开展强激光物理实验, 获得间接驱动金属样品动态破碎过程的物理图像. 在不考虑激光注入束间平衡、激光等离子体效应等条件下, 通过模拟获得较为理想的加载一维区; 通过实验获得辐射波形, 并利用流体模拟获得辐射驱动的加载波形; 通过高能 X 射线动态成像, 获得

层裂过程物理图像. 在此基础上, 仍需要对加载过程和一维平面性进行分析.

#### 4.1 加载过程分析

强激光间接驱动的方式利用柱腔将激光转换为 X 射线, 并利用辐射烧蚀驱动对样品进行加载. 在考虑激光正常注入的条件下, 即激光注入口未堵孔和激光等离子体效应不太显著等条件, 样品处的辐射分布均匀. 通过物理实验获得实测辐射波形, 在激光脉宽为 1, 2, 3 ns 条件下, 辐射脉宽均与激光脉宽相当; 利用流体模拟软件给出这 3 种辐射波形, 辐射行为的加载波均为三角波加载, 且同一辐射温度、3 种不同脉宽的辐射波形下, 辐射驱动的加载波形均为三角波结构分布, 且随着脉宽增加峰值压力有所增加. 这种加载方式与直接驱动加载方式有较好的相似性. 同时, 辐射烧蚀驱动加载中, 在激光利用效率较低的情况下, 可以通过对 CH 材料烧蚀实现对样品增压.

在激光惯性聚变过程研究中, 因聚变过程在数 ns 时间范围内, 只用考虑辐射烧蚀效应对加载过程的影响; 而在激光直接驱动材料动态烧蚀过程中, 激光作用产生的等离子体会向外膨胀并飞散, 不用考虑约束的等离子体对加载过程的影响; 而利用间接驱动加载材料动态过程研究中, 时间尺度在  $\mu\text{s}$  量级, 同时在实验中观察到数百 ns 后金腔仍未完全解体, 这须要考虑到腔内约束的等离子体的影响, 而这一方面的影响目前还难以用现有的流体力学软件模拟. 进一步的研究需要通过实验测量冲击波的波形, 对动力学状态进行定标.

#### 4.2 平面性分析

在考虑激光正常注入的条件下, 由 IRAD 模拟给出间接驱动的样品辐射分布在直径 2 mm 范围内均匀性优于 10%; 辐射温度在  $(150 \pm 2)$  eV 区域的直径为 1.5 mm, 均匀性优于 2%. 这一加载过程可能受到束间平衡、等离子体堵孔及激光等离子体效应等影响, 因而须要利用动态诊断结果来判定加载一维加载大小及平面性. 本研究在层裂片头部区域选取一维平面区, 并在此区段内选取多个点来评估加载平面性. 选取的一维区大小为 1.5 mm, 多个点统计获得平面性为 5%, 此时获得的一维区为后界面加载一维区.

在辐射烧蚀样品表面上, 辐射驱动的一维区分

布需要考虑边侧稀疏波对冲击波在靶内传输过程中的影响, 因此在由诊断图像得到的加载一维区基础上, 需加上两侧的边侧稀疏波影响的区域. 两侧的边侧稀疏影响区域为锡材料的声速与冲击波在靶内传输的时间的乘积. 锡材料的声速为 2.61 km/s, 冲击波在靶内传播时间由速度历史结果给出为 131 ns. 按此估算, 两侧的边侧稀疏影响区域总共为  $2 \times 2.61 \text{ km/s} \times 131 \text{ ns} = 0.68 \text{ mm}$ , 辐射驱动面的一维区大小估算为  $1.5 \text{ mm} + 0.68 \text{ mm} = 2.18 \text{ mm}$ , 略大于柱腔直径 2 mm. 实际上, 半柱腔直径为 2 mm, 因此加载区域只能限定为 2 mm. 这一结果说明辐射驱动面的一维区在  $\Phi 2 \text{ mm}$  内分布较为均匀.

## 5 结 论

通过物理实验和数值模拟研究了强激光间接驱动冲击加载金属材料动态破碎过程的加载技术. 利用 IRAD 程序优化设计直径为 2 mm 的半柱腔, 在腔长为 2 mm 条件下, 样品处的辐射场均匀性能够满足物理实验需求. 进一步通过物理实验获得此腔型下多个激光能量点, 脉宽为 2 ns 和 3 ns 条件下的辐射峰值温度和波形, 为后续大直径的腔型物理实验提供了基础数据. 同时, 利用流体模拟方法给出多种辐射波形下的冲击加载波形. 最后, 利用高能 X 射线成像方法给出间接驱动加载下层裂过程物理图像, 清晰地显示半柱腔膨胀但尚未完全解体, 同时获得层裂片物理图像及其厚度, 分析得到平均运动速度. 物理过程及运动速度与自由面速度历史的诊断结果相符合. 经分析, 间接驱动的加载一维区达到 2 mm, 平面性优于 5%, 能有效地开展相关物理实验研究. 研究结果能够为新型柱腔设计、冲击加载技术及动态破碎过程研究提供重要的研究基础.

感谢中国工程物理研究院激光聚变研究中心靶制备部门的同事及上海神光 II 升级激光装置运行团队的合作.

#### 参考文献

- [1] Signor L, Lescoute E, Loison D, de Rességuier T, Dragon A, Roy G 2010 *EPJ Web of Conferences* **6** 39012
- [2] Resseguier T 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 1015
- [3] Buttler W T, Lamoreaux S K, Schulze R K, Schwarzkopf J D, Cooley J C, Grover M, Hammerberg J E, La Lone B M,

- Llobet A, Manzanares R, Martinez J I, Schmidt D W, Sheppard D G, Stevens G D, Turley W D, Veerer L R 2017 *J. Dyn. Behav. Mater.* **3** 334
- [4] Buttler W T, Williams R J R, Najjar F M 2017 *J. Dyn. Behav. Mater.* **3** 151
- [5] Rességuier T, Signor L, Dragon A, Roy G 2009 *Int. J. Fract.* **163** 109
- [6] Smith R F, Eggert J H, Jeanloz R, Duffy T S, Braun D G, Patterson J R, Rudd R E, Biener J, Lazicki A E, Hamza A V, Wang J, Braun T, Benedict L X, Celliers P M, Collins G W 2014 *Nature* **511** 330
- [7] Xin J, He W, Shao J, Li J, Wang P, Gu Y 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 325304
- [8] Rességuier T, Lescoute E, Signor L, Loison D, Dragon A, Boustie M, Cuq-Lelandais J P, Berthe L 2011 *EPJ Web of Conferences* **10** 00023
- [9] Rességuier T, Loison D, Dragon A, Lescoute E 2014 *Metals* **4** 490
- [10] Campbell E M, Goncharov V N, Sangster T C, Regan S P, Radha P B, Betti R, Myatt J F, Froula D H, Rosenberg M J, Igumenshchev I V, Seka W, Solodov A A, Maximov A V, Marozas J A, Collins T J B, Turnbull D, Marshall F J, Shvydky A, Knauer J P, McCrory R L, Sefkow A B, Hohenberger M, Michel P A, Chapman T, Masse L, Goyon C, Ross S, Bates J W, Karasik M, Oh J, Weaver J, Schmitt A J, Obenschain K, Obenschain S P, Reyes S, van Wousterghem B 2017 *Matt. Rad. Extre.* **2** 37
- [11] Millot M, Coppari F, Rygg J R, Correa Barrios A, Hamel S, Swift D C, Eggert J H 2019 *Nature* **569** 251
- [12] Su X, Xia L, Liu K, Zhang P, Li P, Zhao R, Wang B 2018 *Chin. Opt. Lett.* **16** 102201
- [13] Chu G, Xi T, Yu M, Fan W, Zhao Y, Shui M, He W, Zhang T, Zhang B, Wu Y, Zhou W, Cao L, Xin J, Gu Y 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 115106
- [14] Song T M, Yang J M, Zhu T, Yi R Q, Huang C W 2013 *High Pow. Las. Part. Beam.* **25** 3115 (in Chinese) [宋天明, 杨家敏, 朱托, 易荣清, 黄成武 2013 强激光与粒子束 **25** 3115]
- [15] Li H, Pu Y D, Jing L F, et al. 2013 *Acta. Phys. Sin.* **62** 225204 (in Chinese) [黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 等 2013 物理学报 **62** 225204]
- [16] Kondratev A N, Andriyash A V, Astashkin M V, Baranov V K, Golubinskii A G, Irinichev D A, Khatunkin A Y, Kuratov S E, Mazanov V A, Rogozkin D B, Stepushkin S N 2018 *AIP Conf. Proc.* **1979** 080008
- [17] Park H S, Chambers D M, Chung H K, Clarke R J, Eagleton R, Giraldez E, Goldsack T, Heathcote R, Izumi N, Key M H, King J A, Koch J A, Landen O L, Nikroo A, Patel P K, Price D F, Remington B A, Robey H F, Snavely R A, Steinman D A, Stephens R B, Stoeckl C, Storm M, Tabak M, Theobald W, Town R P J, Wickersham J E, Zhang B B 2006 *Phys. Plasmas* **13** 056309
- [18] Park H S, Maddox B R, Giraldez E, Hatchett S P, Hudson L T, Izumi N, Key M H, Le Pape S, MacKinnon A J, MacPhee A G, Patel P K, Phillips T W, Remington B A, Seely J F, Tommasini R, Town R, Workman J, Brambrink E 2008 *Phys. Plasmas* **15** 072705
- [19] Jing L, Jiang S, Yang D, Li H, Zhang L, Lin Z, Li L, Kuang L, Huang Y, Ding Y 2015 *Phys. Plasmas* **22** 022709
- [20] Videau L, Combis P, Laffite S, Lescoute E, Jadaud J P, Chevalier J M, Raffestin D, Ducasse F, Patissou L, Geille A, Resseguier T 2012 *AIP Conf. Proc.* **1426** 1011

# Experimental technique for dynamic fragmentation of materials via indirect drive by high-intensity laser\*

Chu Gen-Bai<sup>1)†</sup> Yu Ming-Hai<sup>1)</sup> Shui Min<sup>1)</sup> Fan Wei<sup>1)</sup> Xi Tao<sup>1)</sup>  
Jing Long-Fei<sup>2)</sup> Zhao Yong-Qiang<sup>1)</sup> Wu Yu-Chi<sup>1)</sup>  
Xin Jian-Ting<sup>1)‡</sup> Zhou Wei-Min<sup>1)</sup>

1) (*Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Departments of Experiments, Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

(Received 16 August 2019; revised manuscript received 1 November 2019)

## Abstract

High intensity laser is an efficient method for shock generator to study the dynamic fragmentation of materials, in which the direct drive is widely utilized. The continuum phase plate is used for smoothing the focal spot of the laser, but the loading region is usually smaller than the designed value. In this work, we study an experimental technique for investigating the dynamic fragmentation of metal via indirectly driving a high-intensity laser. Firstly, the radiation distributions on the sample for four different hohlraums each with a diameter of 2 mm but different length are simulated via the IRAD software, in which the proper hohlraum with a diameter of 2 mm and a height of 2 mm is selected for the experiments. Secondly, the peak temperatures and radiation waves under different laser energy and pulse durations are measured. The peak temperature decreases simultaneously as the laser energy decreases. In addition, the loading shock waves under a peak temperature of 140 eV and different radiation waves are estimated via the hydrodynamic simulation. It is revealed that a peak pressure of several tens of gigapascals is acquired and the peak pressure is greatly increased when the 10  $\mu\text{m}$  CH layer is placed on the sample. In the end, the dynamic fragmentation process via indirect drive is investigated by using the high energy X-ray radiography and photonic Doppler velocimetry. The radiograph is a snapshot at 600 ns and shows a typical result of the spall process. The first layer is measured to be 0.06 mm thick and 0.3 mm away from the unperturbed free surface. It is also exhibited that the hohlraum is expanded to a large extent but is not broken up. The jump-up velocity and time of spall are measured to be 0.65 km/s and 131 ns, respectively. The average velocity of the first layer is estimated to be  $(0.63 \pm 0.1)$  km/s, obtained via the distance of 0.3 mm divided by the time difference of 469 ns (600 ns minus 131 ns). The one-dimensional loading region is 2 mm, and the flatness is better than 5 %. This work provides a reference for designing new hohlraum, shock wave loading technique and dynamic fragmentation process.

**Keywords:** indirect drive, dynamic fragmentation, high energy X-ray radiography

**PACS:** 47.40.Nm, 62.20.M-, 87.59.B-

**DOI:** 10.7498/aps.69.20191245

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11804319, 11805177).

† Corresponding author. E-mail: [cgbcc@sina.com](mailto:cgbcc@sina.com)

‡ Corresponding author. E-mail: [jane\\_xjt@126.com](mailto:jane_xjt@126.com)