



·强激光物理与技术·综述·

强激光加载下金属材料微喷诊断实验研究进展*

王洪建^{1,2}, 冯永祯², 罗笔瀚², 张绍军¹, 马 毓¹, 刘吉祥², 刘红杰³

(1. 重庆工商大学 制造装备机构设计与控制重庆市重点实验室, 重庆 400067; 2. 重庆工商大学 机器人与激光智能制造研究所, 重庆 400067; 3. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 强激光加载下金属材料产生的微喷射现象及其内在的机理分析是冲击压缩科学与工程领域研究的前沿问题, 相关研究对于认识材料在极端载荷条件下的动力学行为具有重要意义。近年来国内外科学家们基于各大激光装置开展了大量微喷射诊断实验研究, 在喷射物性质、金属界面不稳定性增长以及微喷混合问题等方面取得了一系列重要进展。通过回顾微喷静态和动态诊断实验的研究历程, 对微喷诊断实验研究方法的重要应用作了详细介绍, 同时对微喷产生的主要作用机制、影响因素以及微喷混合等问题进行回顾、梳理和总结。根据当前国内外微喷诊断实验发展趋势, 归纳总结目前微喷诊断实验研究结果中仍存在的不足, 并对微喷射实验研究未来发展方向进行展望。

关键词: 微喷射; 冲击波; 回收; 动态诊断; X 射线成像

中图分类号: O358

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230225

Progress of experimental research on micro-ejection diagnosis of metal materials under intense laser loading

Wang Hongjian^{1,2}, Feng Yongzhen², Luo Bihan², Zhang Shaojun¹, Ma Yu¹, Liu Jixiang², Liu Hongjie³

(1. Chongqing Key Laboratory of Manufacturing Equipment Mechanism Design and Control, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

2. Smart Manufacturing Institute of Robot and Laser, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;

3. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The micro-ejection phenomenon and its internal mechanism analysis of metal materials under intense laser shock are the frontier issues in the field of shock compression science and engineering. Related research is of great significance for understanding the dynamic behavior of materials under extreme loading conditions. With the continuous development of laser technology, scientists at home and abroad have carried out numerous micro-ejection diagnostic experiments based on some large laser devices in various countries in recent years, and made a series of significant progress in the properties of ejection, the growth of instability at the metal interface and the mixing mechanism of ejection. By reviewing the research history of ejecta static and dynamic diagnostic experiments, this paper describes the main mechanism of ejection, influencing factors and ejecta interface mixing mechanism in detail, and then it reviews, classifies and summarizes the important applications of micro-ejection experimental diagnostic methods. Finally, according to the current development trend of ejecta diagnostic experiments at home and abroad, the deficiencies in the current ejection experimental research results are summarized, and the future development direction of ejection experimental research is prospected.

Key words: micro-ejection, shock wave, recovery, dynamic diagnostics, X-ray radiography

强冲击波作用于金属材料表面时, 受冲击压缩的材料内部将会形成衰减的冲击波, 衰减冲击波与材料内部或自由表面的几何缺陷(如孔洞、沟槽或微坑)相互作用时, 金属自由表面将会产生高速颗粒物向外喷出, 形成物质

* 收稿日期: 2023-07-20; 修订日期: 2023-09-17

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金项目(U2030120); 国家重点研发计划项目(2018YFB1306602); 重庆市技术创新与应用发展项目(CSTB2022TIAD-LDX0014); 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj- msxmX0088); 重庆工商大学科研平台项目(KFJJ2017052、KFJJ2016031、1952038)

联系方式: 王洪建, whj_cqu@163.com。

喷射;当冲击波从金属材料自由面卸载时,也会形成微小的液滴从材料自由面喷出,这一物理过程被称为微喷射^[1]。20世纪50年代,Walsh等在炸药轰击金属板的实验中首次观测到了微喷射现象^[2],国内外众多学者相继开展了大量实验研究^[3-10]。由于微喷射具有喷射过程时间短、喷射颗粒尺寸小、速度高等特点,给实验的精确测量带来了极大的挑战。在有关微喷射实验诊断测试技术方面,先后发展了Asay膜^[11]、石英计^[12]、质子照相^[13-14]、激光全息照相^[15]、高速摄影^[16-17]、可见光分幅阴影照相^[18]以及X射线照相^[19-21]等多种微喷过程的诊断测试方法。丰富的测量手段为深入认识微喷射现象产生的物理机理、主导机制以及其动态响应过程提供了重要诊断方法和规律性认识,使得微喷实验研究取得了长足进步。

大量的实验研究及模拟工作表明,微喷射产生的物理机制十分复杂,影响因素众多,与加载条件、材料性质、表面缺陷及样品熔化状态等都有关系,是涉及材料冲击相变、微缺陷演化、损伤断裂等复杂过程的冲击动力学现象^[22-26]。已有研究表明,材料在不同表面缺陷以及熔化状态下产生微喷射的主导机制也各不相同。在不断总结微喷射实验规律的基础上,研究人员逐渐发现衰减冲击波作用下近表面熔化物质动态拉伸破坏引起的微层裂以及冲击波与表面微缺陷相互作用形成的微射流是造成物质喷射的两种主导机制^[27]。微层裂引起物质喷射主要取决于材料近表面的拉伸破坏状态,与冲击加载波形以及材料熔化状态有关;而微射流主要是与材料表面缺陷相关,因聚能效应产生高速喷射物。对于激光或炸药轰击等加载方式,其产生的冲击波属于非支撑泰勒冲击波,这种加载方式会导致材料内部产生极高应变率,从而使材料更容易达到熔化状态,近表面附近将会同时发生微层裂和微射流。总之,微喷射过程是涉及材料表面缺陷、熔化状态、相变等多物理因素的复杂动力学行为,涵盖了近表面区域的变形、熔化、损伤断裂及界面处物质混合等一系列复杂物理问题^[28]。图1为喷射物可能的形成机制示意图。

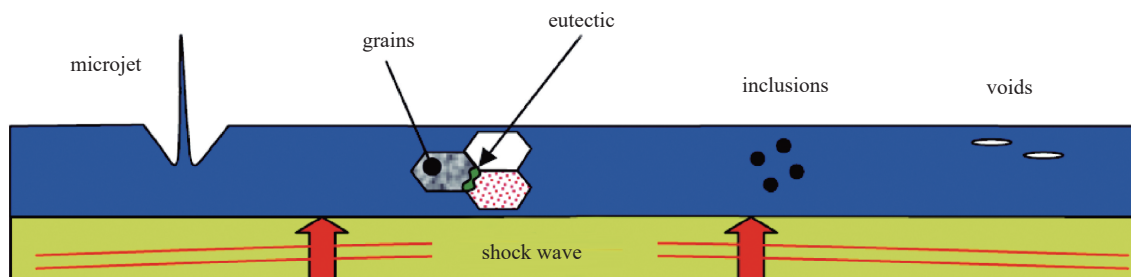


Fig. 1 Illustration of possible ejecta formation mechanisms under shock^[28]

图1 冲击波作用下喷射物可能的形成机制^[28]

随着对微喷射现象认识的不断深入,喷射物性质、金属界面不稳定性增长与微喷混合等问题逐渐成为冲击压缩工程领域的关注重点。喷射物性质主要包含喷射物形状、尺寸、速度、喷射质量以及喷射物面密度分布等数据信息,是微喷射研究不可或缺的重要研究对象。金属界面不稳定性增长与微喷混合问题属于多尺度、多物理的界面动力学问题,包含了界面扰动增长、微喷颗粒气动破碎等复杂物理过程,使得界面扰动不稳定增长与微喷混合研究具有极大的挑战性。目前相关研究主要分为实验^[29-30]、理论^[31-33]和数值模拟^[34-39]三大方向,其中实验研究具有客观真实性,为验证模拟仿真结果和建立理论模型提供坚实基础,是微喷射现象研究的关键一环。如何获得更加真实和准确的喷射数据信息一直是实验研究领域所关注的重点和难点问题。

为此,本文综述了强激光加载下金属材料微喷诊断实验研究现状,从微喷射形成机理和影响因素,在不同加载条件下和不同诊断测试方法上对喷射物性质、金属界面不稳定性增长与微喷混合问题进行回顾、梳理和总结。最后归纳总结了目前微喷诊断实验研究中仍存在的难点问题,为实验研究物质喷射现象提供参考。

1 强激光“加载-探测”技术

自20世纪60年代以来,激光技术得到快速发展,激光脉冲功率从兆瓦(10^6 W)量级逐渐增加到了吉瓦(10^9 W)量级^[40],目前激光脉冲的峰值功率已能够达到拍瓦(10^{15} W)量级^[41],脉冲激光系统输出峰值功率密度能够达到 10^{22} W/cm²量级^[42]。当激光聚焦强度大于 10^{18} W/cm²时,激光与等离子体作用进入相对论领域^[43],相对论强度激光与物质相互作用不但能够实现超高强度和超高应变,同时还能驱动产生高能质子^[44-45]、新型X射线辐射源^[46]、太赫兹辐射源^[47-48]等高强度探测源,在生物医学^[49]、高能质子照相、高时空分辨率透视成像、高分辨太赫兹成像等方面被广泛应用。

随着激光聚焦强度的不断增加,强激光冲击加载逐渐成为在很小空间尺度(μm)、极高应变率(10^9 s⁻¹)和极短

加载脉冲(ns)范围内研究微喷射现象的一种新的重要实验途径。激光冲击加载技术可分为激光直接冲击加载和激光间接驱动加载,激光直接冲击加载是指将固体脉冲激光发生器产生的高能量、短脉冲激光辐照在样品靶表面,靶表面物质由于吸收辐射能量而迅速汽化并形成等离子体,等离子体在吸收一定能量以后向后喷射,其反作用力将形成一束强冲击波向靶材内部传输,使靶材受到冲击加载,这种激光直接冲击加载靶样品的方式能够实现超快加载和超高应变,但是激光直接冲击加载过程中通常会出现能量耗散,这大大地限制了激光直接冲击加载所能达到的最大加载压力。激光间接驱动加载是指强激光辐照在高Z金属材料黑腔内壁上,形成高温等离子体并发射X射线,黑腔吸收X射线能量形成平衡的辐射场作用于固体靶上,向靶内传输强冲击波,强冲击波在靶内传输形成冲击加载,激光间接驱动加载具有加载峰值压力高的特点,已经从最初的0.2 TPa发展到了NOVA装置上激光驱动高速飞片产生75 TPa的峰值冲击压力^[50],具有代表性的研究成果是美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)利用国家点火装置(NIF)在金刚石砧座上实现了高达材3.9倍的材料压缩率^[51]。强激光冲击加载与炸药爆轰驱动^[52]、轻气炮^[53]和激光驱动飞片^[54]等加载方法相比,其具有加载压强范围宽、应变率高、可操作性好、实验精密度高,便于开展静态回收分析和动态诊断测试等优点,因此在材料力学性质研究方面得到广泛应用。Luo等认为强激光诱导冲击波技术为材料动态性能的研究提供了重要的技术手段,是传统冲击波技术的补充^[55]。

强激光在与物质相互作用过程中,形成的等离子体吸收激光能量后产生大量的超热电子,其中部分超热电子在原子核的库仑力的作用下急剧减速,产生连续韧致辐射,从而形成连续X射线。随着加载激光强度的增强,当激光强度超过相对论强度时,相对论强度激光与物质相互作用能够产生品质优异的高能X射线源以及电子、离子和中子等各类次级粒子^[56]。在高强度激光产生的各类次级辐射源中,高能X射线因其独特的透视照相能力在强冲击加载下材料动态特性的研究中被广泛应用。高能X射线是开展材料动力学特性研究的理想光源,可用于稠密物质深度穿透的透视照相,获取高密物质在某个瞬态的物象变化,捕获物质在某个时刻的空间行为特征。此外,高能X射线还具有亮度高、能量高、脉宽短以及单色性好等特点,在高时空分辨透视照相^[57]和动态物理过程诊断^[58]等方面具有良好的应用前景。近年来,美国、法国、印度和中国等国家的研究人员相继利用短脉宽、高强度的皮秒激光冲击加载高Z金属丝靶产生焦斑小、脉宽窄的高能X射线,建立了具有高时空分辨能力的照相技术,用于探测由纳秒激光加载下金属材料的微喷射动态演化过程,获取材料微喷射演化过程的喷射物总质量、喷射速度以及面密度分布等重要物理信息,获得了良好的诊断测试结果。

2 微喷射诊断实验研究进展

微喷射实验中主要采用的诊断方法大致可分为静态诊断、动态诊断两大类:微喷射静态诊断是指利用回收介质对受载后样品进行回收分析,采用X射线CT扫描技术获取喷射物的二维平面信息,再通过图像重建技术获取喷射物的三维图像,从而得到喷射物的形态尺寸和粒度分布等定量结果;微喷射动态诊断主要是获取微喷射过程相关数据的即时信息,利用可见光阴影成像技术、速度剖面测试技术和X射线照相技术等对微喷射物理过程进行动态观测,获取喷射物的总质量、喷射速度、面积和体积密度分布等重要数据信息。图2和图3分别显示了强激光加载下微喷射静态回收分析和动态诊断实验典型排布示意图。

2.1 微喷射静态诊断研究进展

为了认识微喷射的形成机制和影响因素,微喷射过程产生喷射物的形状、尺寸和粒度分布是不可或缺的研究对

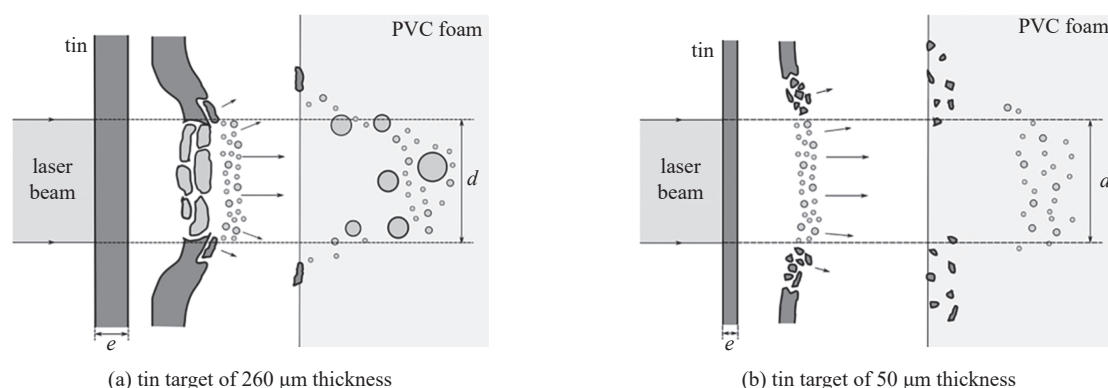


Fig. 2 Typical static recovery experiment layout^[59]

图2 典型静态回收实验布局图^[59]

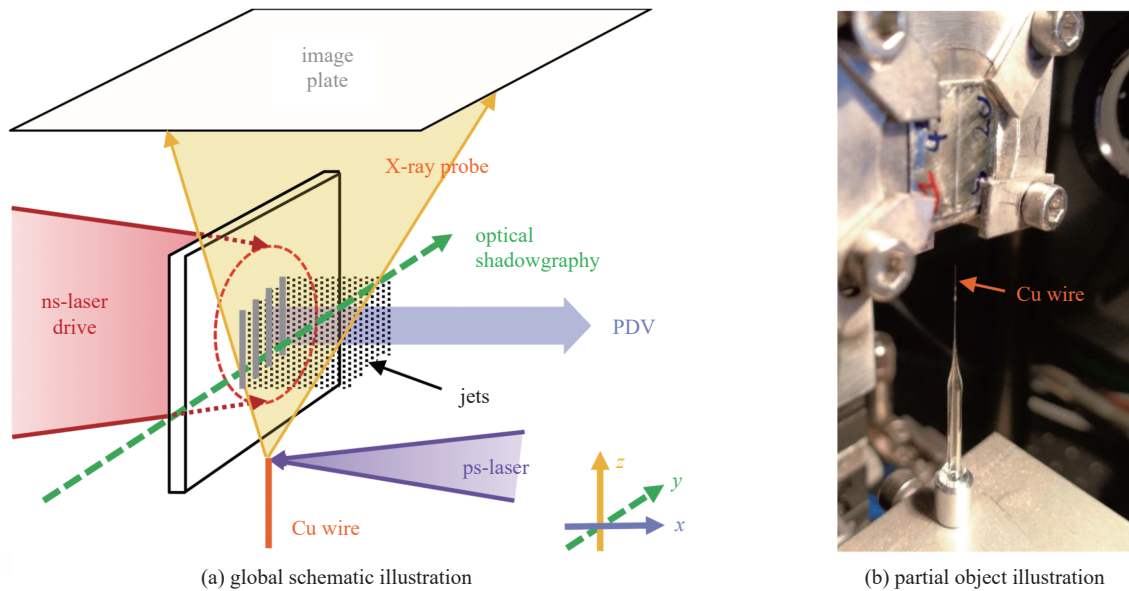


Fig. 3 Typical experimental layout of picosecond laser X-ray dynamic radiography^[60]

图3 典型皮秒激光X射线动态照相实验排布图^[60]

象。2007年,法国国家科学研究中心的研究人员开始采用激光驱动加载开展了大量微喷静态诊断实验研究,他们先后采用聚碳酸酯防护罩^[61-62]、低密度塑料泡沫^[63]、透明凝胶^[64]等材料作为回收介质对受载样品进行回收分析,利用X射线断层扫描分析和图像重建技术获得了喷射物终态的二维平面图像和三维重建立体图像,对喷射物的形状、大小以及空间分布规律有了初步的认识。Lescoute等采用强激光驱动加载金、铝和铁三种典型金属^[65],采用低密度凝胶作为回收介质,对不同加载压强下的静态回收物进行扫描分析,发现随着加载压强的增加,微喷颗粒的总数量不断增加,射流尾部呈现连续的层状分布,头部颗粒尺寸较射流尾部明显减小,分析认为微喷颗粒在回收介质中可能经历了二次破碎过程。辛建婷等采用低密度泡沫作为回收介质^[66],研究了不同加载压强下锡的微喷颗粒的形状尺寸及空间分布,喷射物前端集中分布了几微米到十几微米的圆型颗粒,中段主要分布几百微米量级的片状颗粒,而喷射物后端仍以几十微米的圆型颗粒分布为主,如图4所示。静态回收分析结果说明,材料表面微缺陷引起的微射流、近自由面熔融物质拉伸引起的微层裂和碎裂过程较为复杂。

回收实验中采用的X射线CT技术分析回收介质中微喷颗粒的形状、大小及尺寸分布虽然能够提供喷射物的整体分布信息,但是这种方法局限于表面检查,所能达到的空间分辨率不足以探测到尺寸更小、穿透程度更深的微喷射颗粒。Signor等提出了一种半自动阈值方法来分割聚碳酸酯防护罩回收的电子显微扫描照片中锡的微喷颗粒^[59],定量分析穿透程度更深、尺寸更小的微喷颗粒,其中较大的微喷颗粒尺寸与累积数量之间呈现递减的累积函数分布,而颗粒整体呈现近似指数分布。微喷颗粒图像分割是获取细小颗粒分布的重要步骤,分割结果将直接影响颗粒大小分布和其他特征参数的估计精度。为了避免梯度分水岭^[67](gradient watershed)和水平集^[68](level-set)等传统方法的过分割和欠分割问题,何卫华等提出了一种基于改进分水岭图像分割策略的自动分析方法^[69],利用扩展的极小值变换和分水岭方法相结合来粗略地标记片段区域,然后对每个标记区域采用自适应阈值技术来进一步细化分割,取得良好的分割效果,同时保持较低时间成本。辛建婷等采用改进后的分水岭图像分析方法^[70],对微喷颗粒三维图像中颗粒的体积分布进行统计分析,获得回收微喷颗粒尺寸与累积数量之间更为符合双指数分布规律。与真空实验条件下回收微喷颗粒图像进行对比分析,认为微喷颗粒在与气体混合过程中发生了二次破碎,导致微喷颗粒尺度明显减小。

目前,国内外对于回收喷射物的扫描分析精度能够达到微米尺度,对微喷颗粒的形状、大小和空间分布已有较为准确的认识,通过对回收样品进行扫描分析和图像处理,能够得到微喷颗粒整体且清晰的可视化图像,同时也能够获取微喷颗粒形状、大小以及粒度分布等定量结果。但是必须指出的是,采用静态回收分析技术得到的微喷颗粒状态始终是实验终态,由于喷射物产生过程中细小颗粒与回收介质之间的相互作用可能引发微喷颗粒的二次破碎,从而导致喷射颗粒总数量、大小及空间分布都与实际喷射过程存在差异,因此静态回收分析的实验结果不能直接反映微喷射过程,还需要探索具有高时空分辨能力的动态诊断方式来获得微喷动态演化过程的即时信息。

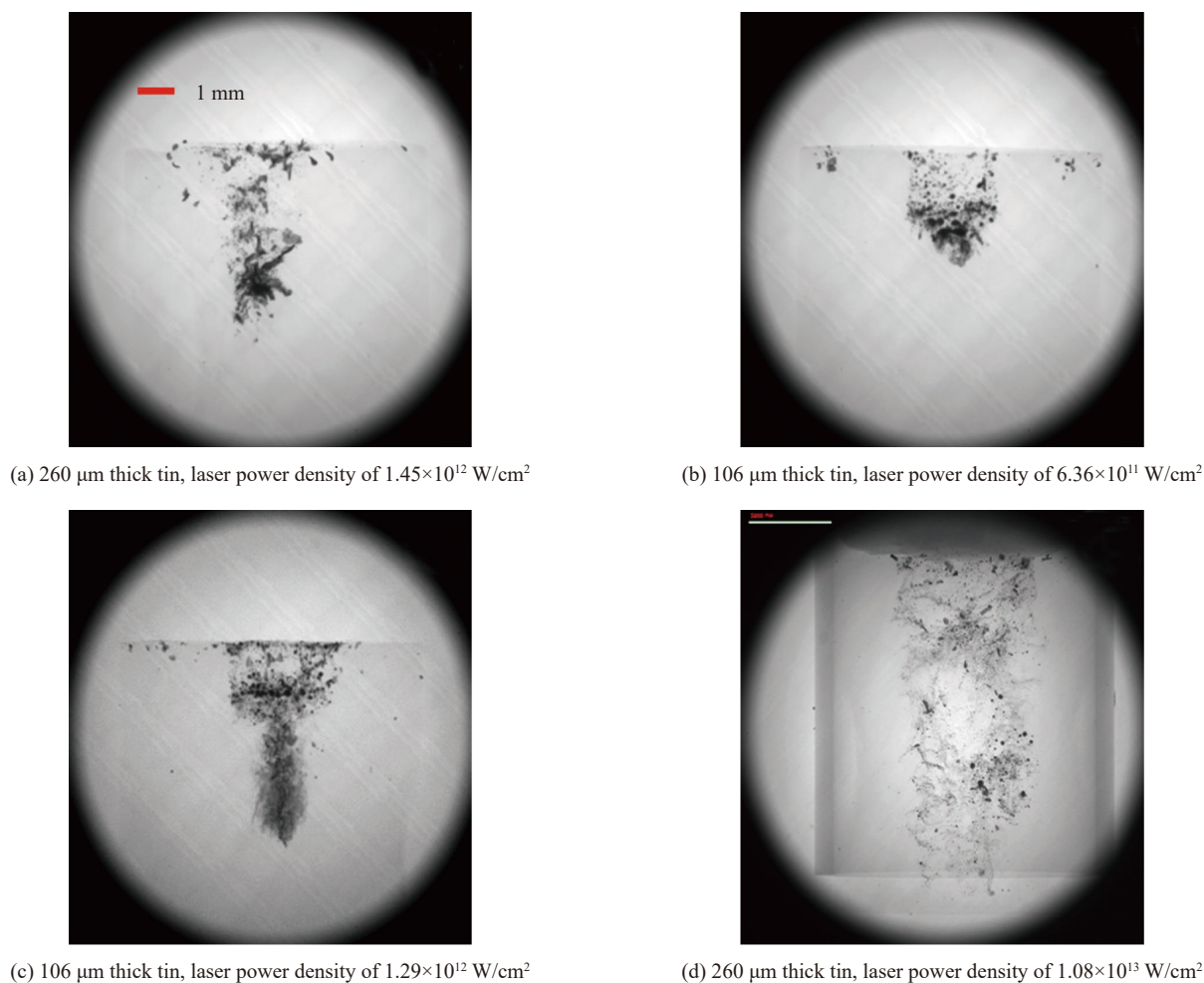


Fig. 4 Two dimensional CT images of micro-ejection particles in foam cylinder under different laser loading^[66]

图4 不同激光加载条件下泡沫筒中微喷颗粒的二维CT图像^[66]

2.2 微喷动态诊断研究进展

动态诊断技术是指通过对材料微喷瞬态过程的测量来获取微喷过程的即时信息,如喷射质量、喷射速度、喷射物面密度分布等,对于认识微喷形成过程和主导机制具有重要意义,是开展相关理论及数值模拟研究的重要依据。大量的实验和模拟研究表明,喷射物的产生同时受多种因素影响,不同加载条件和不同影响因素作用下喷射物产生的物理机制也有所差异。国内外相继报道了一系列动态诊断技术来探测金属表面喷射物质的实时演化特征,包括喷射物性质、分布规律、界面混合状态以及金属/气体界面不稳定性增长等。

目前,主要的动态诊断技术包括:可见光阴影分幅照相技术^[71]、速度剖面测量技术^[72-73]、X射线照相技术^[74-75]等。其中,速度剖面测量技术通常用来测量自由面速度,从而间接地获得材料微喷过程的加载状态,通过这种测量方式虽然能够获得自由面速度测量结果,但却不能直接得到材料微喷过程的动态演化信息;而可见光阴影分幅照相技术通过照相结果可以得到喷射物的形状、尺寸、空间分布及自由面速度等数据信息,适用于研究较高空间分辨率的运动轮廓和平均速度,但却不具有任何面密度信息。关于可见光阴影分幅照相技术和速度剖面测量技术在金属微层裂和微喷射过程中的诊断测试应用,赵永强等的综述作了详细介绍^[76],此处就不再赘述。相较于上述两种诊断方式,X射线照相技术具有高亮度和高时间同步性的X射线源,可以穿透微喷区域并探测其内部结构,能够提供更清晰、更高分辨率的照片,在材料微喷动态诊断实验研究中占据着至关重要的地位。

X光照相技术利用图像灰度来表征穿透厚度从而实现对喷射物密度分布的诊断。传统上多采用X光机作为照相光源,如Kalantar等的微喷射实验^[77],但这种光源能量较低、时间同步性较差,不能满足高时空分辨照相的要求。为了解决惯性约束聚变^[78-79](Inertial Confinement Fusion, ICF)中内爆照相的诊断问题,美国LLNL的研究人员在2007年提出了以高强度激光与高原子序数金属固体靶相互作用产生X射线作为光源的Compton照相方案^[80]。这种照相方式具有高穿透性、高时空分辨特性等特点,在激光驱动材料动力学特性研究^[81-83]、动态集成实验诊断^[84]

以及高时空分辨透视成像^[85-86]等方面发挥着重要作用。

随着激光输出能量和输出功率的提升,在众多超高功率激光驱动产生的各种高通量粒子源中,基于皮秒脉冲激光驱动加载产生的高能 X 射线源具有其独特的优异性能,能够提升强穿透性和高光子能量,为开展材料微喷射动力学特性研究提供了新的定量研究手段。Rességuier 等在法国卢利(LULI)高强度激光实验室 NANO2000 装置上开展了皮秒激光 X 射线照相实验,研究了强激光加载下含缺陷金属铜和锡的近自由表面破碎现象^[87],讨论分析了材料属性、表面缺陷、冲击加载压强等因素对微喷射形成的影响。实验中利用皮秒激光加载铜丝靶产生超短 X 射线脉冲,用于拍摄由纳秒激光加载下的铜和锡样品自由表面沟槽扩展形成的微射流。X 射线照相结果记录了铜和锡样品表面物质喷射的动态演化图像,获得了放大倍率约为 21 倍,空间分辨率优于 20 μm 的高质量 X 射线照片,如图 5 所示。结果表明:微喷射形成过程及其演化机理十分复杂,与材料性质、表面沟槽形状以及样品熔化状态等多个因素相关,强冲击波作用下材料表面存在的初始扰动易引发表面物质喷射,且样品处于熔化(或部分熔化)状态下会产生更多的喷射总量。Chu 等采用皮秒脉冲激光驱动加载金丝靶产生高能 X 射线作为背光源^[88],锡对纳秒激光加载下平面靶微喷射过程进行动态照相,在国内首次报道了 X 射线能量在 50~200 keV 范围内的锡微喷射动态照相结果,获得了高信噪比、二维空间分辨率达 12 μm 的图像。

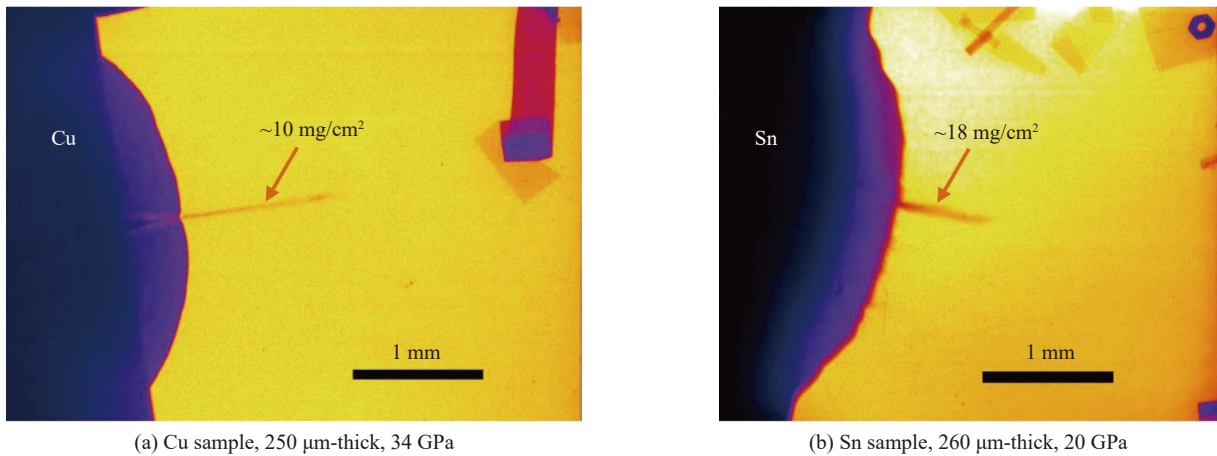
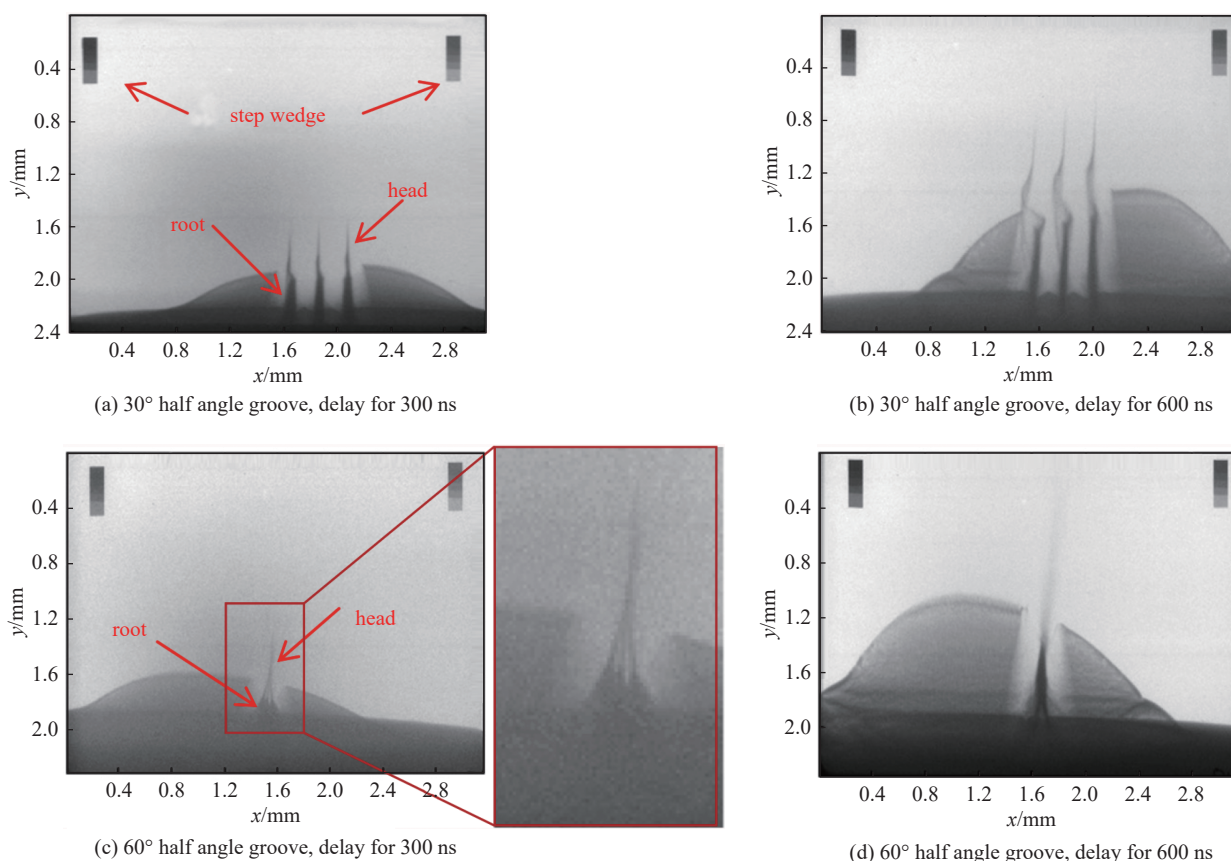


Fig. 5 Radiographs recorded 400 ns after copper and tin samples had been put under laser shock loading^[87]

图 5 激光加载后经 400 ns 延时记录的铜和锡样品照片^[87]

在研究金属材料微喷射动力学特性实验中,材料表面缺陷形貌是影响喷射物性质的重要因素。叶雁等利用脉冲 X 光照相技术研究了表面具有不同沟槽深度的锡样品在真空和大气压强为 0.1 MPa 条件下的喷射物性质^[89],锡自由面喷射物呈现头部小、尾部大的密度分布,射流宽度和微喷射总质量均随沟槽深度的增大而增大。相同沟槽深度情况下,0.1 MPa 时,锡表面物质喷射速度较小,射流宽度明显变窄。Xin 等采用皮秒激光 X 射线照相技术研究了由金属材料表面的三角形沟槽扩展形成的微射流性质^[90],沟槽深度为 60 μm ,半角分别为 30°和 60°,低密度高速微喷射头部区域和高密度低速根部区域,微射流头部速度几乎是自由表面速度的 2 倍,如图 6 所示。Roland 等将静态回收分析与动态诊断技术相结合,探究了强激光驱动冲击加载下,沟槽深度和角度对微喷射流头部速度以及头部颗粒尺寸分布的影响^[91],射流头部速度与自由面速度之间的比值在 2~3 之间,高于常规冲击载荷(炸药和平板冲击)下的观测值,随着沟槽角度增大,射流头部速度呈现减小趋势,射流头部速度与自由面速度之比也随之减小,微喷颗粒尺寸与颗粒累积数量之间呈现近似幂律分布。Sollier 等利用皮秒激光 X 射线照相技术对比研究了 V 型沟槽与 U 型沟槽产生喷射物的弹道特性^[92],其 U 型沟槽所产生的喷射物具有类似弯曲梁形状的平滑射流尖端,而 V 型沟槽所产生的喷射物则由一系列准平行的尖峰组成,且相互之间存在横向联系,射流头部呈现封闭性的致密网状结构。分析认为,V 型沟槽中的射流阵列可能是由于衰减冲击波与 V 型沟槽底部作用时,金属材料界面处出现里克特迈耶-梅什科夫(Richtmyer-Meshkov, RM)不稳定性^[93]发展,初始扰动沿射流方向产生持续不稳定性增长,这种不稳定性增长由开始时的线性增长阶段逐渐过渡到非线性增长阶段,导致喷射物累积质量进一步增加。Monfared 等认为喷射总量与扰动振幅成近似线性比例,在相同的沟槽深度和扰动波长下,具有类似 V 型沟槽的三角形扰动要比类似 U 型沟槽的等腰扰动产生出更多的喷射总量^[94]。

在机加工过程中,金属表面可能出现单一或周期性沟槽结构,导致强冲击载荷作用下金属表面形成物质喷射,

Fig. 6 X-ray radiographic results of tin micro-ejection^[90]图6 锡样品微喷射的X射线照相结果^[90]

因此材料表面粗糙度也是微喷射形成过程中不可忽视的影响因素。陈永涛等探究了不同表面粗糙度对喷射物产生及其性质的影响^[95],发现锡样品表面喷射物的累积质量、喷射速率以及喷射面密度均随着材料表面粗糙度增大而增大。Rességuier等采用皮秒X射线照相技术探究了激光冲击加载下锡材料表面表征不同粗糙度的初始扰动振幅 h 和扰动波长 λ 对喷射物性质的影响规律^[96],比较分析了激光冲击载荷下射线照片记录的锡射流头部速度与基于RM不稳定性理论模型的预测结果。Prudhomme等采用PDV测速、光学阴影成像以及皮秒激光X射线背光照相技术开展联合诊断^[97]。当初始扰动振幅一定,样品表面粗糙度一定时,射流总质量随着扰动波长的增大而增加。为了进一步厘清界面处RM不稳定性增长对喷射物性质的影响规律,Rességuier课题组继续探究了冲击熔化压强下锡材料界面处具有周期性正弦扰动的不稳定性增长过程^[60],当加载压强一定时,随着表征初始扰动振幅的增加,喷射物头部速度也会随之增大,喷射物的面密度随时间变化特征基本符合Cherne等提出的抛物线气泡形状喷射源模型^[32]。

如果金属表面沟槽在冲击加载过程中发生了复杂的固液相变过程,则会进一步加剧微射流的产生。Zellner等通过可见光分幅阴影照相、PDV测速和X射线照相等多种联合诊断技术^[98],探究了锡在固态和熔融状态下喷射物的总质量和面密度分布与冲击加载压强之间的关系。He等采用X射线背光照相技术获得了含有锡喷射物内部信息和拓扑结构的高质量射线照片^[99],当冲击加载压强大于锡的卸载熔化压强时,锡开始由固态转变为固液混合状态,所产生喷射物的总质量会急剧增加,大约是固态释放状态下的5倍,分析认为,强度效应对界面不稳定性抑制作用明显减弱,从而导致界面物质产生了不稳定性增长,进一步加剧了物质喷射。

对于金属材料微喷过程的研究,除了上述所探讨的激光加载材料表面缺陷、表面粗糙度和材料相变过程影响喷射物性质,一些实验还关注了后续射流运输、破碎、界面不稳定性增长与混合问题。Elias等率先研究了微喷物质与气体的混合规律^[100],发现充气条件下喷射物的分布规律与真空条件下有明显差异,充气条件下喷射物的运动速度受到明显的抑制,在气动阻力效应作用下形成了金属界面混合层。Oro等开展了强冲击波作用下金属材料界面处于氩气、氙气和真空三种条件下的微喷混合实验^[101],对比分析了真空与充气环境下喷射物尺寸分布、运动速度与加载压力之间的关系。结果表明:充气环境下,喷射物的颗粒尺寸明显减小,头部颗粒运动速度相较于真空环

境下受到明显抑制。

根据强度介质不稳定性理论,强度效应会抑制界面不稳定性的发展,但当界面存在初始扰动时,冲击波与界面相互作用将导致界面处不稳定性持续增长,从而引起界面两侧物质发生混合。税敏等研究了锡微喷颗粒与低密度泡沫混合过程中出现的界面不稳定性发展演化过程^[58],讨论分析了在几个典型加载压强下金属锡的微喷射流与低密度介质的混合规律。背光照相结果显示,在泡沫与锡靶紧贴放置的情况下,当加载压强达到锡样品卸载熔化压强点附近时,微喷颗粒在泡沫中的穿透深度出现先增大后减小的趋势,而非紧贴放置则出现穿透深度随着压强的增大而增加的情况。随着加载压强增大,锡样品从部分卸载熔化状态逐渐过渡到完全卸载熔化状态(>33 GPa),在泡沫与锡靶紧贴的情况下,微喷头部颗粒的平均速度反而呈现减小的趋势。分析认为可能是紧贴情况下,当冲击波压强增大到一定值时,波阵面的温升很快,导致泡沫发生分解碳化,强度提高,对射流的阻滞作用进一步增强,进而导致头部颗粒的平均速度先增大后减小。可以看出,两种情况下锡微喷颗粒的破碎和混合过程具有明显差异,分析认为可能是受材料表面初始扰动振幅影响,界面处附近出现了RM不稳定性增长,从而影响了混合形态。为了进一步研究强冲击载荷下金属界面不稳定性增长与混合过程,税敏等继续采用皮秒激光X射线侧向透视照相技术探究了锡与低密度泡沫界面混合问题^[102],研究了材料强度对界面不稳定性增长与混合的影响,获得了具有高时空分辨的锡卸载熔化压强点和冲击熔化压强点附近的界面混合演化过程图像。

对于微喷射流后续运输、破碎、界面不稳定性增长与混合问题,目前国内外所开展的微喷射混合实验大多集中在金属/真空界面与金属/气体界面两种情况,对于金属/连续低密度介质界面情况下的微喷射混合研究还较少。大多数实验数据仍是在真空条件下得到的,微喷物质在含气环境下或与低密度介质的混合问题还处于初步探索阶段,对于实验中观测到的物理现象还缺乏相关的理论模型对其进行描述。对于金属界面处于气体或低密度介质环境下的混合问题,包含了众多影响因素,包括界面初始扰动振幅、界面不稳定性发展以及微喷颗粒的气动破碎等复杂过程,后续的研究工作仍然具有很大的挑战性,需要开展更进一步的实验研究。

3 结 论

随着高强度激光技术的快速发展,金属材料在极高冲击载荷下近自由面附近产生微喷射现象的物理机理探究取得了一系列重要成果。世界各地的研究人员基于各国大激光装置开展了大量的强激光加载金属材料微喷静态回收分析和动态X射线成像诊断研究实验,发展了多种联合诊断测试技术,针对喷射物性质、金属界面不稳定性增长以及微喷混合等问题作了深入研究,为进一步厘清微喷演化机理与混合过程的影响因素和主导机制提供了基础,丰富了微喷界面不稳定性增长与混合问题等研究内容。

基于强激光驱动产生的高能X射线源,为开展材料动力学特性研究提供了一种新的研究手段,使得微喷射动态诊断技术方面取得了长足进步。但目前强激光加载下微喷射动态诊断实验研究的结果仍然存在不足,微喷动态演化过程的各种物理图像仍不是十分清晰,缺少足够时空分辨能力的X射线或高能粒子等测量诊断工具,是微喷射动态诊断研究的一个技术瓶颈。需要发展光、电子学相结合的突破材料动态响应能力的综合诊断方法,来探索材料喷射物性质以及后续运输、破碎和混合问题的主导规律,追踪典型金属材料的微喷射动态演化信息。利用皮秒激光X射线照相技术所获得的喷射物总质量可能受限于延迟时间而导致被低估,实验研究还需发展更先进的诊断测试技术,实现对微喷动态演化过程的多尺度、高分辨、大视场的整体测量,从而得到更加准确的实验结果。针对目前的研究现状,未来微喷射及其混合问题的实验研究主要包括以下两个方面:

(1)金属材料微喷射现象的多尺度协同诊断研究。在实际工程问题中,微喷射形成的影响因素众多,而现有的实验诊断技术仍停留在单一尺度、单一物理诊断测试方法上,所能获得的图像的时空分辨率仍需进一步提升。所能捕捉到的微喷动态演化信息有限,无法对微喷射发生、运输或混合的整个过程进行观测。需要关注不同尺度下的耦合协同诊断方法,建立材料微喷射的多尺度高分辨诊断方案,获得对微喷射现象的量化规律认识。

(2)金属材料与低密度连续介质的界面不稳定性增长与混合过程研究。目前国内外科研人员所开展的微喷射混合实验大多集中在金属/真空界面与金属/气体界面两种情况,金属/连续低密度介质界面情况下的微喷射混合实验研究目前还处于起步阶段,相关的实验数据信息还不全面,对于金属/连续低密度介质界面的不稳定性增长的演化机制和形成机理尚不明确,需要开展进一步的实验研究来厘清金属/连续低密度介质界面的不稳定性增长机制与混合过程的作用机理,这对丰富微喷混合问题的研究内容具有重要意义,能够为相关的理论和数值模拟研究提供重要基础。

参考文献:

- [1] De Ressaiguier T, Signor L, Dragon A, et al. Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101: 013506.
- [2] Walsh J M, Shreffler R G, Willig F J. Limiting conditions for jet formation in high velocity collisions[J]. *Journal of Applied Physics*, 1953, 24(3): 349-359.
- [3] Jones A H, Isbell W M, Maiden C J. Measurement of the very-high-pressure properties of materials using a light-gas gun[J]. *Journal of Applied Physics*, 1966, 37(9): 3493-3499.
- [4] Remiot C, Chapron P, Demay B. A flash X-ray radiography diagnostic for studying surface phenomena under shock loading[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1994, 309(1): 1763-1766.
- [5] Andriot P, Chapron P, Olive F. Ejection of material from shocked surfaces of tin, tantalum and lead-alloys[J]. *AIP Conference Proceedings*, 1982, 78(1): 505-509.
- [6] 韩长生, 经福谦, 丁敬, 等. 不同加载速率下铝自由面微粒子喷射现象研究[J]. *高压物理学报*, 1989, 3(2): 97-106. (Han Changsheng, Jing Fuqian, Ding Jing, et al. Study on the phenomena of the mass ejection from the free surface of aluminum at different dynamic loading rates[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1989, 3(2): 97-106.)
- [7] Buttler W T, Oró D M, Olson R T, et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shockwave drive[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 103519.
- [8] Chen Yongtao, Hong Renkai, Chen Haoyu, et al. Experimental examination of ejecta production on shock-melted Sn targets under various surface roughnesses[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(2): 174-179.
- [9] Andriyash A V, Astashkin M V, Baranov V K, et al. Application of photon Doppler velocimetry for characterization of ejecta from shock-loaded samples[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123: 243102.
- [10] Stöffler D, Gault D E, Wedekind J, et al. Experimental hypervelocity impact into quartz sand: distribution and shock metamorphism of ejecta[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, 80(29): 4062-4077.
- [11] Asay J R. Effect of shock wave risetime on material ejection from aluminum surfaces[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 1977.
- [12] Vogan W S, Anderson W W, Grover M, et al. Piezoelectric characterization of ejecta from shocked tin surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98: 113508.
- [13] Li C K, Séguin F H, Frenje J A, et al. Study of direct-drive capsule implosions in inertial confinement fusion with proton radiography[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2009, 51: 014003.
- [14] Tamura H, Kohama T, Kondo K, et al. Femtosecond-laser-induced spallation in aluminum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, 89(6): 3520-3522.
- [15] Pedrini G, Osten W, Gusev M E. High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(15): 3456-3462.
- [16] 汪伟, 李作友, 李欣竹, 等. 用超高速阴影摄影技术研究微喷射现象[J]. *应用光学*, 2008, 29(4): 526-529. (Wang Wei, Li Zuoyou, Li Xinzhu, et al. Study on micro-jet on ultra-high speed shadow photography[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(4): 526-529.)
- [17] Kirugulige M S, Tippur H V, Denney T S. Measurement of transient deformations using digital image correlation method and high-speed photography: application to dynamic fracture[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5083-5096.
- [18] De Ressaiguier T, Signor L, Dragon A, et al. Dynamic fragmentation of laser shock-melted tin: experiment and modelling[J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163(1/2): 109-119.
- [19] Ohira S, Fujioka S, Sunahara A, et al. X-ray backlight measurement of preformed plasma by kJ-class petawatt LFEX laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112: 063301.
- [20] Zhao Cang, Fezzaa K, Cunningham R W, et al. Real-time monitoring of laser powder bed fusion process using high-speed X-ray imaging and diffraction[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 3602.
- [21] Calta N P, Martin A A, Hammons J A, et al. Pressure dependence of the laser-metal interaction under laser powder bed fusion conditions probed by *in situ* X-ray imaging[J]. *Additive Manufacturing*, 2020, 32: 101084.
- [22] Buttler W T, Lamoreaux S K, Schulze R K, et al. Ejecta transport, breakup and conversion[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(2): 334-345.
- [23] Buttler W T, Cooley J C, Hammerberg J E, et al. Studies of reactive and nonreactive metals-ejecta-transporting nonreactive and reactive gases and vacuum[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2272: 120003.
- [24] Durand O, Soulard L, Colombet L, et al. Influence of the phase transitions of shock-loaded tin on microjetting and ejecta production using molecular dynamics simulations[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127: 175901.
- [25] Soulard L, Durand O. Observation of phase transitions in shocked tin by molecular dynamics[J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127: 165901.
- [26] Germann T C, Hammerberg J E, Lee Holian B. Large-scale molecular dynamics simulations of ejecta formation in copper[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 285-288.
- [27] 王裴, 何安民, 邵建立, 等. 强冲击作用下金属界面物质喷射与混合问题数值模拟和理论研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2018, 48(9): 106-116. (Wang Pei, He Anmin, Shao Jianli, et al. Numerical and theoretical investigations of shock-induced material ejection and ejecta-gas mixing[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2018, 48(9): 106-116.)
- [28] 邵建立, 何安民, 王裴. 微喷射现象数值模拟研究进展概述[J]. *高压物理学报*, 2019, 33: 030110. (Shao Jianli, He Anmin, Wang Pei. Brief review of

- research progress on numerical simulation of ejection phenomena[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33: 030110.)
- [29] Zellner M B, Vunni G B. Photon Doppler velocimetry (PDV) characterization of shaped charge jet formation[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 58: 88-97.
- [30] Georgievskaya A, Raevsky V A. Estimation of spectral characteristics of particles ejected from the free surfaces of metals and liquids under a shock wave effect[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1426(1): 1007-1010.
- [31] Dimonte G, Terrones G, Cherne F J, et al. Ejecta source model based on the nonlinear Richtmyer-Meshkov instability[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 024905.
- [32] Cherne F J, Hammerberg J E, Andrews M J, et al. On shock driven jetting of liquid from non-sinusoidal surfaces into a vacuum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 118: 185901.
- [33] 何安民, 刘军, 邵建立, 等. 基于强度介质 Richtmyer-Meshkov 不稳定性理论的微缺陷喷射模型[J]. *计算物理*, 2018, 35(5): 505-514. (He Anmin, Liu Jun, Shao Jianli, et al. Theoretical ejecta model for elastic-plastic solids based on Richtmyer-Meshkov instability[J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2018, 35(5): 505-514.)
- [34] Durand O, Soulard L. Large-scale molecular dynamics study of jet breakup and ejecta production from shock-loaded copper with a hybrid method[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111: 044901.
- [35] Shao Jianli, Wang Pei, He Anmin, et al. Molecular dynamics study on the failure modes of aluminium under decaying shock loading[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 113: 163507.
- [36] He Anmin, Wang Pei, Shao Jianli. Molecular dynamics simulations of ejecta size distributions for shock-loaded Cu with a wedged surface groove[J]. *Computational Materials Science*, 2015, 98: 271-277.
- [37] He Anmin, Liu Jun, Liu Chao, et al. Numerical and theoretical investigation of jet formation in elastic-plastic solids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124: 185902.
- [38] Soulard L, Durand O, Prat R, et al. High velocity impact of a spherical particle on a surface: theory and simulation of the jet formation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129: 205104.
- [39] Xu Yihua, Xu Ruicong, Cheng Hui, et al. Numerical simulation of jet breakup phenomenon during severe accident of sodium-cooled fast reactor using MPS method[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2022, 172: 109087.
- [40] DeMaria A J, Stetser D A, Heynau H. Self mode-locking of lasers with saturable absorbers[J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 8(7): 174-176.
- [41] Strickland D, Mourou G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communications*, 1985, 55(6): 447-449.
- [42] Bahk S W, Rousseau P, Planchon T A, et al. Generation and characterization of the highest laser intensities (10^{22} W/cm²)[J]. *Optics Letters*, 2004, 29(24): 2837-2839.
- [43] Eliezer S. The interaction of high-power lasers with plasmas[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2003, 45: 181.
- [44] 宾建辉, 雷安乐, 余玮, 等. 等离子体初始温度对强激光与等离子体相互作用中的高能质子产生的影响[J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1416-1419. (Bin Jianhui, Lei Anle, Yu Wei. Influence of initial plasma temperature on energetic proton generation from laser-plasma interactions[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1416-1419.)
- [45] 马文君, 刘志鹏, 王鹏杰, 等. 激光加速高能质子实验研究进展及新加速方案[J]. *物理学报*, 2021, 70: 084102. (Ma Wenjun, Liu Zhipeng, Wang Pengjie, et al. Experimental progress of laser-driven high-energy proton acceleration and new acceleration schemes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70: 084102.)
- [46] 周维民, 于明海, 张天奎, 等. 基于皮秒拍瓦激光的高分辨 X 射线背光照相研究[J]. *中国激光*, 2020, 47: 0500010. (Zhou Weimin, Yu Minghai, Zhang Tiankui, et al. High-resolution X-ray backlight radiography using picosecond petawatt laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47: 0500010.)
- [47] 曹丙花, 张宇盟, 范孟豹, 等. 太赫兹超分辨率成像研究进展[J]. *中国光学*, 2022, 15(3): 405-417. (Cao Binghua, Zhang Yumeng, Fan Mengbao, et al. Research progress of terahertz super-resolution imaging[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 405-417.)
- [48] 谭智勇, 万文坚, 黎华, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的实时成像研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(1): 68-76. (Tan Zhiyong, Wan Wenjian, Li Hua, et al. Progress in real-time imaging based on terahertz quantum-cascade lasers[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 68-76.)
- [49] 张佳茹, 管迎春. 超快激光制备生物医用材料表面功能微结构的现状及研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(2): 199-213. (Zhang Jiaru, Guan Yingchun. Surface functional microstructure of biomedical materials prepared by ultrafast laser: a review[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(2): 199-213.)
- [50] Cauble R, Phillion D W, Hoover T J, et al. Demonstration of 0.75 Gbar planar shocks in X-ray driven colliding foils[J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(14): 2102-2105.
- [51] Smith R F, Eggert J H, Jeanloz R, et al. Ramp compression of diamond to five terapascals[J]. *Nature*, 2014, 511(7509): 330-333.
- [52] Li Kebin, Li Xiaojie, Wang Xiaohong, et al. A simple electrometric method for parametric determination of Jones-Wilkins-Lee equation of state from underwater explosion test[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124: 215906.
- [53] Jones D R, Fensin S J, Ndefru B G, et al. Spall fracture in additive manufactured tantalum[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 124: 225902.
- [54] Wang Xiaofeng, Liu Yang, Shi Tongya, et al. Strain rate dependence of mechanical property in a selective laser melted 17-4 PH stainless steel with different states[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2020, 792: 139776.
- [55] Luo Shengnian, An Qi, Germann T C, et al. Shock-induced spall in solid and liquid Cu at extreme strain rates[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106: 013502.
- [56] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(3): 1229-1285.
- [57] Tian Chao, Yu Minghai, Shan Lianqiang, et al. Radiography of direct drive double shell targets with hard X-ray generated by a short pulse laser[J]. *Nuclear*

- [Fusion](#), 2019, 59: 046012.
- [58] 税敏, 于明海, 储根柏, 等. 激光加载下金属锡材料微喷颗粒与低密度泡沫混合实验研究[J]. [物理学报](#), 2019, 68: 076201. (Shui Min, Yu Minghai, Chu Genbai, et al. Observation of ejecta tin particles into polymer foam through high-energy X-ray radiography using high-intensity short-pulse laser[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2019, 68: 076201.)
- [59] Signor L, De Ressaiguier T, Dragon A, et al. Investigation of fragments size resulting from dynamic fragmentation in melted state of laser shock-loaded tin[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2010, 37(8): 887-900.
- [60] Prudhomme G, De Ressaiguier T, Roland C, et al. Velocity and mass density of the ejecta produced from sinusoidal grooves in laser shock-loaded tin[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2020, 128: 155903.
- [61] De Ressaiguier T, Signor L, Dragon A, et al. Spallation in laser shock-loaded tin below and just above melting on release[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2007, 102: 073535.
- [62] Lescoute E, De Ressaiguier T, Chevalier J M, et al. Soft recovery technique to investigate dynamic fragmentation of laser shock-loaded metals[J]. [Applied Physics Letters](#), 2009, 95: 211905.
- [63] Morard G, De Ressaiguier T, Vinci T, et al. High-power laser shock-induced dynamic fragmentation of iron foils[J]. [Physical Review B](#), 2010, 82: 174102.
- [64] Loison D, De Ressaiguier T, Dragon A. Micro-tomography to characterize size distribution of fragments created by laser shock-induced micro-spallation of metallic sample[J]. [Applied Mechanics and Materials](#), 2014, 556: 225-231.
- [65] Lescoute E, De Ressaiguier T, Chevalier J M, et al. Ejection of spalled layers from laser shock-loaded metals[J]. [Journal of Applied Physics](#), 2010, 108: 093510.
- [66] 辛建婷, 谷渝秋, 李平, 等. 强激光加载下金属材料微喷回收诊断[J]. [物理学报](#), 2012, 61: 236201. (Xin Jianting, Gu Yuqiu, Li Ping, et al. Study on metal ejection under laser shock loading[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2012, 61: 236201.)
- [67] Gauch J M. Image segmentation and analysis via multiscale gradient watershed hierarchies[J]. [IEEE Transactions on Image Processing](#), 1999, 8(1): 69-79.
- [68] Vese L A, Chan T F. A multiphase level set framework for image segmentation using the Mumford and Shah model[J]. [International Journal of Computer Vision](#), 2002, 50(3): 271-293.
- [69] He Weihua, Xin Jianting, Chu Genbai, et al. Investigation of fragment sizes in laser-driven shock-loaded tin with improved watershed segmentation method[J]. [Optics Express](#), 2014, 22(16): 18924-18933.
- [70] 辛建婷, 赵永强, 储根柏, 等. 强激光加载下锡材料微喷颗粒与气体混合回收实验研究及颗粒度分析[J]. [物理学报](#), 2017, 66: 186201. (Xin Jianting, Zhao Yongqiang, Chu Genbai, et al. Experimental investigation of tin fragments mixing with gas subjected to laser driven shock[J]. [Acta Physica Sinica](#), 2017, 66: 186201.)
- [71] De Ressaiguier T, Signor L, Dragon A, et al. On the dynamic fragmentation of laser shock-melted tin[J]. [Applied Physics Letters](#), 2008, 92: 131910.
- [72] Franzkowiak J E, Prudhomme G, Mercier P, et al. PDV-based estimation of ejecta particles' mass-velocity function from shock-loaded tin experiment[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2018, 89: 033901.
- [73] Seisson G, Prudhomme G, Frugier P A, et al. Dynamic fragmentation of graphite under laser-driven shocks: identification of four damage regimes[J]. [International Journal of Impact Engineering](#), 2016, 91: 68-79.
- [74] Olbinado M P, Cantelli V, Mathon O, et al. Ultra high-speed X-ray imaging of laser-driven shock compression using synchrotron light[J]. [Journal of Physics D: Applied Physics](#), 2018, 51: 055601.
- [75] Pradel P, Malaise F, De Ressaiguier T, et al. Fast X-ray radiography to study the dynamic compaction mechanisms in a rigid polyurethane foam under plate impact[J]. [AIP Conference Proceedings](#), 2020, 2272: 110010.
- [76] 赵永强, 辛建婷, 席涛, 等. 强激光加载下材料微层裂过程研究进展[J]. [激光杂志](#), 2017, 38(10): 1-7. (Zhao Yongqiang, Xin Jianting, Xi Tao, et al. Progress on material micro-spalling under intense laser-driven loading[J]. [Laser Journal](#), 2017, 38(10): 1-7.)
- [77] Kalantar D H, Belak J F, Collins G W, et al. Direct observation of the α - ϵ transition in shock-compressed iron via nanosecond X-ray diffraction[J]. [Physical Review Letters](#), 2005, 95: 075502.
- [78] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. [Physics of Plasmas](#), 1995, 2(11): 3933-4024.
- [79] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility[J]. [Physics of Plasmas](#), 2004, 11(2): 339-491.
- [80] Tommasini R, Hatchett S P, Hey D S, et al. Development of Compton radiography of inertial confinement fusion implosions[J]. [Physics of Plasmas](#), 2011, 18: 056309.
- [81] Schick D, Borchert M, Braenzel J, et al. Laser-driven resonant magnetic soft-X-ray scattering for probing ultrafast antiferromagnetic and structural dynamics[J]. [Optica](#), 2021, 8(9): 1237-1242.
- [82] Bhan L, Covington C, Varga K. Signatures of atomic structure in subfemtosecond laser-driven electron dynamics in nanogaps[J]. [Physical Review B](#), 2022, 105: 085416.
- [83] Zhu Wei, Fauseweh B, Chacon A, et al. Ultrafast laser-driven many-body dynamics and Kondo coherence collapse[J]. [Physical Review B](#), 2021, 103: 224305.
- [84] Zhu Qihua, Zhou Kainan, Su Jingqin, et al. The Xingguang-III laser facility: precise synchronization with femtosecond, picosecond and nanosecond beams[J]. [Laser Physics Letters](#), 2018, 15: 015301.

- [85] Park H S, Chambers D M, Chung H K, et al. High-energy K_{α} radiography using high-intensity, short-pulse lasers[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13: 056309.
- [86] Kulpe S, Dierolf M, Günther B, et al. Dynamic K-edge subtraction fluoroscopy at a compact inverse-Compton synchrotron X-ray source[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9612.
- [87] De Rességuier T, Roland C, Prudhomme G, et al. Picosecond radiography combined with other techniques to investigate microjetting from laser shock-loaded grooves[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979: 080011.
- [88] Chu Genbai. High-energy X-ray radiography of laser shock loaded metal dynamic fragmentation using high-intensity short-pulse laser[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(11): 115106.
- [89] 叶雁, 李军, 朱鹏飞, 等. 脉冲 X 光照相在微物质喷射诊断中的应用[J]. 高压物理学报, 2013, 27(3): 398-402. (Ye Yan, Li Jun, Zhu Pengfei, et al. Flash X-ray radiography for diagnosing the ejecta from shocked metal surface[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2013, 27(3): 398-402.)
- [90] Xin Jianting, He Anmin, Liu Wenbin, et al. X-ray radiography of microjetting from grooved surfaces in tin sample subjected to laser driven shock[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29: 095011.
- [91] Roland C, De Rességuier T, Sollier A, et al. Ejection of micron-scale fragments from triangular grooves in laser shock-loaded copper samples[J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(2): 156-163.
- [92] Sollier A, Lescoute E. Characterization of the ballistic properties of ejecta from laser shock-loaded samples using high resolution picosecond laser imaging[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 136: 103429.
- [93] Dimonte G, Ramaprabhu P. Simulations and model of the nonlinear Richtmyer–Meshkov instability[J]. *Physics of Fluids*, 2010, 22: 014104.
- [94] Monfared S K, Oro D M, Grover M, et al. Experimental observations on the links between surface perturbation parameters and shock-induced mass ejection[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116: 063504.
- [95] 陈永涛, 洪仁楷, 汤铁钢, 等. 熔化状态下锡样品微喷射现象的诊断[J]. 高压物理学报, 2016, 30(4): 323-327. (Chen Yongtao, Hong Renkai, Tang Tiegang, et al. Experimental diagnostic of ejecta on Sn sample in shock melting[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2016, 30(4): 323-327.)
- [96] De Rességuier T, Prudhomme G, Roland C, et al. Material ejection from surface defects in laser shock-loaded metallic foils[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2272: 120023.
- [97] Prudhomme G, Franzkowiak J E, De Rességuier T, et al. Ejecta from periodical grooves in tin foils under laser-driven shock loading[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979: 080010.
- [98] Zellner M B, Grover M, Hammerberg J E, et al. Effects of shock-breakout pressure on ejection of micron-scale material from shocked tin surfaces[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102: 013522.
- [99] He Weihua, Xi Tao, Shui Min, et al. High-energy X-ray radiography investigation on the ejecta physics of laser shock-loaded tin[J]. *AIP Advances*, 2019, 9: 085002.
- [100] Elias P, Chapron P, Mondot M. Experimental study of the slowing down of shock-induced matter ejection into argon gas[M]//Schmidt S C, Johnson J N, Davison L W. *Shock Compression of Condensed Matter-1989*. Amsterdam: North-Holland, 1990.
- [101] Oro D M, Hammerberg J E, Buttler W T, et al. A class of ejecta transport test problems[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2012, 1426(1): 1351-1354.
- [102] 税敏, 杨曦, 于明海, 等. 锡-泡沫界面不稳定性增长与混合实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48: 0703002. (Shui Min, Yang Xi, Yu Minghai, et al. Instability growth of tin-foam interface and mixing experiment[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48: 0703002.)