强冲击作用下疏松锡的动态响应特性

王维荣*, 李欣竹, 陈书杨, 吴强

中国工程物理研究院流体物理研究所, 冲击波物理与爆轰物理重点实验室, 绵阳 621900

*联系人, E-mail: wwr1988@caep.cn

收稿日期: 2020-02-26; 接受日期: 2020-05-06; 网络出版日期: 2020-09-08

科学挑战专题(编号: TZ2016001)资助项目

摘要 金属材料在多次强冲击加卸载过程中的复杂动力学行为研究在惯性约束核聚变、冲击防护等领域具有重要的应用价值。多次冲击加载下, 材料内部除冲击波与物质相互作用外, 还包含首次加载形成的破碎体中颗粒间相互作用, 研究三维分布状态已知的疏松材料冲击动态响应将有助于认识该问题。本研究以典型尺度为微米、亚毫米、毫米, 初始状态清晰的三种疏松锡为实验样品; 采用X光照相、激光干涉测速、可见光高速分幅照相等测试技术; 实验观测了10 GPa量级冲击波作用下3种疏松锡的动力学响应。结果显示, 激波过后破碎体不能被完全压实, 表面产生大量远高于理论自由面速度的喷射物; 波后密度、高速喷射物的状态与初始疏松态密切相关。采用SPH方法对实验结果进行了数值模拟分析, 揭示了波后材料分布特征及产生高速喷射物的机理。

关键词 强冲击, 疏松锡, 多次冲击加载

PACS: 61.43.Gt, 62.20.Mk, 47.40.Nm

1 引言

强冲击作用下的金属材料动态破碎过程, 既包含简单的单次加载微喷、层裂/微层裂破碎^[1-13], 也有复杂多次加载产生的表面微射流、主体区域反复冲击再破碎、主体区域对微射流颗粒回收等一系列复杂过程^[14-16], 是耦合材料特性、加载状态、样品初始状态等多因素的复杂多尺度问题, 在惯性约束核聚变、冲击防护等领域有重要的工程价值和科学意义, 最近几十年被广泛研究^[17-19]。

实验结合数值模拟对首次加载后表面微喷射有较为深入的认识, 对其中主导因素及作用机理已较为明

确, 并且给出了普适性较好的模型^[1-5]。然而对较为稠密的层裂/微层裂则仅限于由自由面速度测量反映出的层裂片厚度^[20]及X光/质子成像给出层裂/微层裂区的平均密度分布^[10,21], 爆轰加载下典型层裂片厚度为亚毫米到毫米量级。近年来, 采用激光加载结合多种测试手段, 对微层裂区内部状态有了进一步的认识: 在出自由面压力约为28 GPa加载压力下, 采用回收的方式测得微层裂区破碎成典型尺度分布为1–100 μm 的颗粒^[22]; 采用Mie散射获得了激光加载铝产生的碎片尺寸分布, 结果显示碎片尺度分布范围为1–7 μm , 同时观察到碎片尺寸越小速度越大的分布规律^[23]; 针对加载压力增加时, 冲击波出自由面后样品从固态到

引用格式: 王维荣, 李欣竹, 陈书杨, 等. 强冲击作用下疏松锡的动态响应特性. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 104707

Wang W R, Li X Z, Chen S Y, et al. Dynamics behavior of porous tin under strong shockwave impact (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2020, 50: 104707, doi: [10.1360/SSPMA-2020-0053](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0053)

液态转变, 样品破碎模式由层裂转变为微层裂, 系列激光加载实验结果显示破碎尺度从亚毫米变化成微米, 卸载熔化状态时典型尺度为 $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m}$ ^[6,8,24,25].

综合来看, 单次加载样品的动态破碎特征已有较多研究, 对样品破碎特征取得了初步认识. 其中破碎尺度与加载强度密切相关, 加载强度高于卸载熔化压力时, 金属卸载后完全熔化, 发生微层裂破碎, 典型破碎颗粒尺寸为微米量级; 而加载压力较低时, 卸载不熔化或者部分熔化, 发生层裂/微层裂破碎, 生成毫米、亚毫米破碎颗粒. 目前实验能力仅能对微层裂区的平均量以及较长时间演化后破碎颗粒的尺度分布进行测量, 尚未有实验研究能直接给出首次加载较短时间后较稠密主体破碎区内物质的三维分布结构.

LANL实验室Buttler研究组^[14]在二次冲击加载实验中发现, 三种初始加载压力条件下(18.5, 24.5, 26.4 GPa), 相同样品的首次喷射量分别为 <0.1 , 4, 6 mg/cm^2 ; 二次喷射量为 $(4\pm 1)\text{ mg}/\text{cm}^2$. 但是在18.5, 24.5, 26.4 GPa中都有一个LN (Lithium-Niobate)探针测得微喷量有较大差异, 分别为31, 18, 12 g/cm^2 . 其中给出的一个可能的解释是二次加载后喷射量与两个因素相关, 其一是自由面扰动的Richtmyer-Meshkov不稳定性^[26-29], 另外一个首次加载后金属内部的层裂及孔隙. 其中自由面RM失稳形成新的高速射流和首次加载微沟槽形成喷射的原理一致, 源于样品表面扰动; 而金属内部的层裂及孔隙是如何作用的尚无法给出准确的描述, 主要原因就是金属破碎体的中小尺度三维结构未知, 其再次加载的演化过程难以通过实验和数值模拟精确研究.

为深化多次加卸载下材料动态破碎的物理认识, 本研究采用初始状态清晰的亚毫米颗粒和微米粉末堆积, 及3D打印疏松锡样品模拟典型首次加载后的破碎状态, 利用X光照相、激光干涉测速、可见光高速分幅照相等测试技术, 实验研究了10 GPa量级冲击波作用下, 3种不同初始状态的金属锡疏松体的动力学响应. 结果显示, 激波过后破碎体不能被完全压实且在表面产生大量的远高于理论自由面速度的喷射物; 材料波后密度、高速喷射物的状态与初始疏松态密切相关. 采用SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics)方法^[30,31]对实验结果进行了数值模拟, 分析了波后材料分布特征及产生高速喷射物的机理, 均在于激波驱动颗粒体间发生大量碰撞破碎射流. 研究结果揭示了多

次强冲击作用下材料复杂动力学响应行为的基本机理, 即除冲击波与物质相互作用外, 还包括破碎体内部颗粒间相互碰撞作用, 对多次加卸载材料动态破碎的进一步研究有重要意义.

2 实验方法

2.1 实验系统简介

本文采用接触爆轰的方式产生强冲击加载, 实验系统见图1, 具体为单根雷管点起爆传爆药柱(JH9005, $\Phi 20\text{ mm}\times 3\text{ mm}$), 进而引爆主炸药(TNT, $\Phi 20\text{ mm}\times 15\text{ mm}$), 主炸药紧贴着厚度为4 mm的304不锈钢基板(SS304), 不锈钢基板的另一面黏接了不同状态的疏松样品, 厚度为3 mm. 3D打印样品尺寸为粉末及颗粒样品通过薄壁圆环使其形状固定, 圆环直径为28 mm, 壁厚1 mm, 采用沿竖直向上方向加载. 炸药产生的冲击波穿过基板后作用于样品上, 样品发生动态演化.

实验中利用激光干涉测速(Photon Doppler Velocimetry, PDV)技术^[13,32]测量了击波加载不同初始状态疏松锡样品的自由面及微喷颗粒速度特征; 可见光高速摄影(High Speed Photograph, HSP)给出了直观的疏松样品动态演化过程; X光(X-ray)成像技术可给出典型时刻面密度和体密度的空间分布. 其中PDV探针垂直于样品初始表面; X光成像和高速摄影的成像轴与样品初始表面平行, 且两者互相垂直.

2.2 加载系统标定

首先对加载系统的做功能力进行标定. 采用与前

图1 实验装置及测试系统示意图

Figure 1 Schematic of experimental setup and test system.

述基本相同的实验装置, 但不放置样品, 通过PDV探针直接测量炸药加载后不锈钢自由面运动速度. 图2给出了PDV探针测速结果, 钢基板自由面速度在首次起跳时出现振荡, 后续则较为平稳. 将测速结果结合不锈钢的状态参数代入压力计算公式: $p = \rho_0 D u$, $D = c_0 + \lambda u$, 其中 ρ_0 是初始密度, c_0 是声速, λ 是系数, 已知钢的响应参数为 $\rho_0 = 7.9 \text{ g/cm}^3$, $c_0 = 4.57 \text{ km/s}$, $\lambda = 1.49$, 而自由面速度 u_{fs} 与粒子速度 u 的关系为: $u \approx \frac{1}{2} u_{fs}$, 由此计算得到冲击波出钢自由面的压力为最大值20.8 GPa ($u_{fs} = 0.99 \text{ km/s}$)及平均值15.2 GPa ($u_{fs} = 0.75 \text{ km/s}$). 通过阻抗匹配可以计算出, 加载系统在密实锡样品中将产生约15.6 GPa(最大)和11.2 GPa(平均)的压力, 11.2 GPa的压力作用在密实锡产生的自由面速度约为0.9 km/s.

图2 (网络版彩图) 不锈钢基板自由面速度全息
Figure 2 (Color online) Measured velocity of SS304 free surface versus time.

2.3 实验样品状态

图3展示了三种样品的实物图及相应的微介观结构表征结果. (a)为3D打印样品, (b)为亚毫米不规则锡颗粒(锡屑)堆积样品, (c)为微米锡粉堆积样品. 体密度大致相同, 都约为1/3密实锡体密度. 其状态特征如表1所示.

3 结果与讨论

3.1 实验结果对比分析

图4–6展示了三种疏松锡样品分别采用高速摄影、X光成像及PDV测速的实验结果, 时间零点为控制系统发出起爆信号时刻, 约4.5 μs 后冲击波进入样品. 其中高速摄影给出了每种样品在8个动态时刻的演化状态, 对比发现亚毫米颗粒(b)及微米颗粒(c)堆积样品结果的“前界面”都较为光滑, 而3D打印样品(a)前端则出现了较多不规则的“尖钉”, 且此类尖钉的尺度为mm级以上.

从X光照相结果来看, 上述现象则更为明显, 特别是在高速摄影无法穿透的区域内, 沿着加载方向有“头发丝”状结构, 其长度从(a)到(c)依次递减, 并且其前端到初始样品表面长度与高速摄影结果基本一致.

而PDV测速结果则定量地反映了上述规律, 可以看到, (a)样品表面首次起跳速度为2.49 km/s, (b)和(c)

图3 (网络版彩图) 样品初始状态及微介观状态表征. (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品

Figure 3 (Color online) Status of experimental samples. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

表 1 样品状态参数

Table 1 Parameters of porous tin samples

序号	典型尺寸 (μm)	结构状态	密度 (g/cm^3)	疏松度 (ρ_0/ρ)
(a) 3D打印	~ 1000	开孔骨架	2.48	2.94
(b) 亚毫米锡颗粒	100–1000	颗粒堆积	2.29	3.19
(c) 微米锡粉	1–30	粉末堆积	2.65	2.75

图 4 (网络版彩图)三种样品不同时刻高速摄影图像. (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品

Figure 4 (Color online) High speed photograph of different samples at different time. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

图 5 X光成像结果原始图像. (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品

Figure 5 X-ray images of different samples. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

分别为1.50和1.43 km/s. 样品“前界面”速度逐渐降低, 随后趋于稳定, 达到平衡速度时, 有 $v_{(a)} > v_{(b)} > v_{(c)}$.

提取三种测试结果所测得的三种样品在强冲击作用下“前界面”位置随时间变化规律如图7所示. X光和高速度摄影前界面位置通过图像像素点与真实长度的定标关系给出, 其误差主要来源于对界面位置的判读, 误

差不超过1 mm; PDV给出前界面由速度信号带中谱信号最强处的值积分所得, 反映了“前界面”的平均运动状态.

高速摄影图像中提取的“前界面”位置随时间变化规律和PDV测速积分结果是一致的, 即与图6的“前界面”减速规律一致, 该现象源于本实验是在常压空气条

图 6 (网络版彩图)不同样品自由面速度频谱结果. (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品
Figure 6 (Color online) Free-surface velocity spectrogram of different samples. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

图 7 (网络版彩图)三种测试方法“前界面”位置定量对比. (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品

Figure 7 (Color online) The front interface position versus time for different porous tin samples using different diagnostics. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

件下开展的, 高速颗粒受到空气阻力发生了显著的减速现象. 不同初始状态样品之间的“前界面”运动规律差异较大, 随着样品内部结构典型尺度的增大, 产生“前界面”速度递增. 本研究组在早期的研究中^[33], 已经揭示了数微米尺度颗粒堆积产生微喷射的规律: 即颗粒粒径越大, 产生的微喷射速度越快. 本研究中疏松锡样品典型特征尺度从微米跨越到毫米, 此规律依然存在. 而3D打印样品的X光结果显著低于高速摄影及PDV, 后续将结合数值模拟进行分析.

图8为X光原始结果结合由标记块给出的X光随穿透深度衰减规律, 利用Abel反演获得的空间面密度及体密度分布特征. 由此可见, 前述“前界面”实际并非稠密的物质界面, 而是稀薄的高速颗粒(碎片). 而三种样品较为稠密的物质界面基本都处于同一位置, 并且都远小于密实锡的密度 7.3 g/cm^3 , 即未被压实. 较稠密界面附近的物质分布有较大不同, 随着初始典型结构尺寸的增大, 稠密区域的物质分布更加不均匀, 此结

果解释了Buttler实验^[14]中某些压电探针测得二次喷射量偏大的原因.

3.2 实验与数值模拟分析讨论

本研究组早期研究中^[33], 利用SPH方法分析粒径从 $0.1\text{--}10 \mu\text{m}$ 变化时发现, 由颗粒堆积产生的三维孔隙作为喷射源(缺陷)时随粒径增大而增大, 较大的缺陷产生的微喷射速度更高, 其内在机理较为清楚. 而3D打印样品特征与粉末堆积样品特征存在较大差异, 为了分析其内在物理机理, 采用ANSYS软件中的AutoDyn模块进行了数值模拟分析, 样品初始状态如图3(a)所示, 是截取样品 $3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 区域构建初始的模型(3 mm 为样品轴向, 5 mm 为样品径向的一部分), 采用SPH方法计算, 颗粒间距为 0.01 mm . 加载方式将前述基板标定结果简化为 4 mm 钢飞片以 0.75 km/s 的速度撞击样品(图中未给出, 采用Lagrange网格计算), 为防止颗粒横向飞散, 在垂直于加载方向的两个边界上设置里固壁边界条件. 计算采用AutoDyn中锡和SS304不锈钢默认参数, 未开启强度及失效模型.

图9对比了同一时刻实验面密度分布和SPH模拟的粒子分布, 模拟结果与X光面密度结果虚线框部分对应, 二维SPH模拟结果中的颗粒数目等价于面密度. 从定性上来看, 两者的分布特征基本一致. 但SPH结果显示运动最快的粒子比X光结果高出约 7 mm , 结合图7中同一时刻X光结果的“前界面”位置比高速摄影提取结果及PDV积分结果都低, 定性说明部分高速颗粒处于X光分辨限以下, 而高速摄影和PDV能分辨. 在SPH模拟中, 边界附近部分高速粒子还可能是由于固壁边界条件奇异产生的, 从而导致部分最高速粒子是非物理的, 但因数量有限, 对从前到后物质分布规律无显著影响.

图 8 (网络版彩图) X光成像结果面密度(上)和体密度图像(下). (a) 3D打印样品; (b) 亚毫米不规则锡颗粒堆积样品; (c) 微米锡粉堆积样品

Figure 8 (Color online) Areal density (upper) and bulk density (lower) of different samples using X-ray images. (a) Millimeters 3D printing sample; (b) sample with sub-millimeters irregular particles; (c) sample with micrometers powders.

图 9 (网络版彩图) X光面密度(左)与SPH模拟结果(右)对比
Figure 9 (Color online) Areal density of X-ray image (left) and material distribution of SPH simulation (right).

图10比较了X光结果与SPH模拟结果的从钢飞片与样品界面到样品最前端的体密度分布. 在靠近钢基板区域, 计算结果未统计钢的质量分布, 而X光结果又

图 10 (网络版彩图)实验与数值模拟体密度沿加载方向分布的比较

Figure 10 (Color online) Comparison of bulk density distribution along loading direction between experiment and simulation.

无法将基板扣除, 因此计算结果和模拟值存在较大偏差; 远离基板的区域, 两者的密度分布趋势及绝对值是基本一致的. 由此可见, 在仅使用基本的材料参数的条件下, SPH方法可定性地模拟出强冲击作用下3D打印样品的动态演化.

基于前文对SPH方法计算该问题可靠性的讨论, 图11利用样品在强冲击作用下动态演化过程序列图像

图 11 (网络版彩图)物质分布随时间演化的SPH模拟图像

Figure 11 (Color online) Images sequence of materials distribution at different time using SPH simulation.

分析了其中的作用机制. 骨架尺寸为mm量级的3D打印样品内部, 颗粒间形成了有大量易产生微喷射的“V”字型结构, 这些结构在冲击加载下产生碰撞、摩擦、挤压等作用, 产生高速喷射能通过空隙直接到达样品表面并形成高速射流; 样品内部高速喷射之间也存在碰撞汇聚加速机制, 从而使得样品表面微喷射最大速度增加, 成为“前界面”高速物质的主要来源; 样品表面的缺陷对于射流的产生也至关重要, 每一个表面缺陷或临近表面的孔都会演化成较强的射流柱, 形成X光图像中的丝状结构; 由于缺陷尺寸大, 相应地单位面积的缺陷数量则少, 从而导致平均统计的面密度和体密度分布不均匀. 总的来说, 表面缺陷的作用机理与一般的粉末堆积样品是一致的, 是高速喷射物的主要来源, 并影响较稠密区域的物质分布; 样品内部结构对最高微喷射速度及总量有较大影响.

4 结论

综合实验和数值模拟结果, 强冲击作用下疏松锡的动态响应特性研究主要结论如下.

典型冲击作用下疏松锡的速度、密度随时间演化

与疏松锡初始结构相关, 对结构典型尺度分布敏感. 即在冲击加载状态一致且样品疏松度相近的条件下, 典型结构尺度越大, 高速喷射物最高速度越大, 较稠密区域物质分布越不均匀.

采用SPH方法模拟疏松锡在冲击作用下的动力学过程, 在仅已知密实锡及304不锈钢飞片材料参数的条件下, 定性地给出了结构已知疏松锡的动态响应过程, 获得了与实验一致的规律; 相关结果深化了疏松材料内部及表面结构对形成高速微喷射及内部物质分布的作用机理, 即冲击波与疏松体作用过程中, 存在冲击波与颗粒、颗粒与颗粒两种作用, 颗粒之间的作用导致疏松材料的动态响应与密实材料有显著差异. 研究结果对多次复杂加卸载下材料动态破碎特性理论模型构建有一定支撑作用.

不过本文仅讨论了三种典型状态疏松锡的强冲击动态响应, 从微米尺度到毫米尺度存在大量中间尺度尚待研究. 此外, 疏松材料中颗粒除了碰撞射流过程中动能之间的转换, 还存在动能到热能的转换, 导致疏松材料冲击压缩产热显著异于密实材料, 热量对物质分布及状态也将产生影响. 后续将有针对性地进行研究, 不断深化对多次加卸载下材料动态响应的认识.

致谢 本文工作得到了中国工程物理研究院流体物理研究所诸多同事的帮助, 傅秋卫、景海华、张汉钊、陈万新、赵新才、刘振清等人在保障实验顺利运行及获得有效测试数据方面付出了辛勤劳动; 危才华和景越峰协助处理了图像类结果; 赵信文在数值模拟方面提供了诸多建议, 在此向他们表示衷心的感谢.

参考文献

- 1 Hammerberg J E, Buttler W T, Cherne F J, et al. A source model for ejecta. *J Dynamic Behav Mater*, 2017, 3: 316–320

- 2 Chen Y, Hu H, Tang T, et al. Experimental study of ejecta from shock melted lead. *J Appl Phys*, 2012, 111: 053509
- 3 Buttler W T, Lamoreaux S K, Schulze R K, et al. Ejecta transport, breakup and conversion. *J Dynamic Behav Mater*, 2017, 3: 334–345
- 4 Wu B, Wu F C, Zhu Y B, et al. Molecular dynamics simulations of ejecta production from sinusoidal tin surfaces under supported and unsupported shocks. *AIP Adv*, 2018, 8: 045002
- 5 Wu F C, Zhu Y B, Li X Z, et al. Peculiarities in breakup and transport process of shock-induced ejecta with surrounding gas. *J Appl Phys*, 2019, 125: 185901
- 6 de Rességuier T, Couturier S, David J, et al. Spallation of metal targets subjected to intense laser shocks. *J Appl Phys*, 1997, 82: 2617–2623
- 7 Holtkamp D B, Clark D A, Crain M D, et al. Development of a non-radiographic spall and damage diagnostic. *AIP Conf Proc*, 2004, 706: 473–476
- 8 de Rességuier T, Signor L, Dragon A, et al. Experimental investigation of liquid spall in laser shock-loaded tin. *J Appl Phys*, 2007, 101: 013506
- 9 Luo S N, An Q, Germann T C, et al. Shock-induced spall in solid and liquid Cu at extreme strain rates. *J Appl Phys*, 2009, 106: 013502
- 10 Chen Y, Hong R, Chen H, et al. An improved assay window technique for investigating the micro-spall of an explosively-driven tin. *Rev Sci Instrum*, 2017, 88: 013904
- 11 Gray G T, Knapp C M, Jones D R, et al. Structureproperty characterization of spallation in wrought and additively manufactured tantalum. *AIP Conf Proc*, 2018, 1979: 060002
- 12 Franzkowiak J E, Prudhomme G, Mercier P, et al. PDV-based estimation of ejecta particles' mass-velocity function from shock-loaded tin experiment. *Rev Sci Instrum*, 2018, 89: 033901
- 13 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 Appl Phys*, 2018, 123: 243102
- 14 Buttler W T, Oró D M, Olson R T, et al. Second shock ejecta measurements with an explosively driven two-shockwave drive. *J Appl Phys*, 2014, 116: 103519
- 15 Karkhanis V, Ramaprabhu P, Buttler W T, et al. Ejecta production from second shock: Numerical simulations and experiments. *J Dynamic Behav Mater*, 2017, 3: 265–279
- 16 Buttler W T, Hixson R S, King N S P, et al. Method to separate and determine the amount of ejecta produced in a second-shock material-fragmentation event. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 151921
- 17 Buttler W T, Williams R J R, Najjar F M. Foreword to the special issue on ejecta. *J Dynamic Behav Mater*, 2017, 3: 151–155
- 18 Asay J R, Shahinpoor M. High Pressure Shock Compression of Solids II. Albuquerque: Springer-Verlag, 1993
- 19 Antoun T, Seaman L, Curran D R, et al. Spall Fracture. Berlin: Springer-Verlag, 2002
- 20 McCluskey C W, Wilke M D, Anderson W W, et al. Assay window: A new spall diagnostic. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 113902
- 21 Holtkamp D B, Clark D A, Fern E N, et al. A survey of high explosive-induced damage and spall in selected metals using proton radiography. *AIP Conf Proc*, 2004, 706: 477–482
- 22 He W, Xin J, Zhao Y, et al. Fragment size distribution statistics in dynamic fragmentation of laser shock-loaded tin. *AIP Adv*, 2017, 7: 065306
- 23 Arad B, Eliezer S, Henis Z, et al. A new method for studying debris from laser-induced spall in metals. *Rev Sci Instrum*, 1995, 66: 5590–5597
- 24 de Rességuier T, Signor L, Dragon A, et al. On the dynamic fragmentation of laser shock-melted tin. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 131910
- 25 de Rességuier T, Signor L, Dragon A, et al. Spallation in laser shock-loaded tin below and just above melting on release. *J Appl Phys*, 2007, 102: 073535
- 26 Zhai Z G, Zhang F, Zhou Z B, et al. Numerical study on Rayleigh-Taylor effect on cylindrically converging Richtmyer-Meshkov instability. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 124712
- 27 Wu Z, Huang S, Ding J, et al. Molecular dynamics simulation of cylindrical Richtmyer-Meshkov instability. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2018, 61: 114712
- 28 Meshkov E E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave. *Fluid Dyn*, 1972, 4: 101–104
- 29 Richtmyer R D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. *Comm Pure Appl Math*, 1960, 13: 297–319
- 30 Liu G R, Liu M B, Li S. “Smoothed particle hydrodynamics—A meshfree method”. *Comput Mech*, 2004, 33: 491
- 31 Liu M, Zhang Z. Smoothed particle hydrodynamics (SPH) for modeling fluid-structure interactions. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2019, 62: 984701
- 32 Weng J, Tan H, Hu S, et al. New all-fiber velocimeter. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76: 093301

- 33 Zhao X W, Li X Z, Zhang H, et al. Dynamical behaviors of Sn micro-sphere particles under shock wave action (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2017, 66: 104701 [赵信文, 李欣竹, 张航, 等. 冲击波作用下微米尺度金属颗粒群的动力学行为. *物理学报*, 2017, 66: 104701]

Dynamics behavior of porous tin under strong shockwave impact

WANG WeiRong^{*}, LI XinZhu, CHEN ShuYang & WU Qiang

Laboratory for Shockwave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China

The dynamic fracture and fragmentation of solid materials subjected to shocks have been widely studied for several decades. Motivations for investigating shock-induced damage behavior are both practical and scientific. In many cases, the loading conditions are two or more continuous shockwaves, causing complex dynamic behavior. Understanding the complex dynamics of metal materials under multiple strong shockwave loadings is important for inertial confinement fusion and impact protection. Under multiple shockwave loadings, the shockwaves not only interact with the material, but also cause interactions among the particles in the porous structure produced by the first impact. These complex dynamics might be revealed by studying the impact response of metals with a clear three-dimensional pore distribution. In this study, experiments were performed on three kinds of porous tin with typical dimensions (millimeters, sub-millimeters, and micrometers) and a clear initial structure. The dynamic behaviors of the porous tins under a 10 GPa-order shockwave loading were characterized by X-ray images, high-speed photography, and photon Doppler velocimetry. The porous tin was not completely compacted after the shockwave, and many particles were ejected at velocities far exceeding the theoretical free-surface velocity. The post-shockwave material density and status of the high-speed ejection were closely related to the initial structure of the porous tin. The distribution characteristics of the material after the shockwave, and the generation mechanism of the high-speed jets, were determined in numerical simulations. After the shock loading, the surface spray was ejected at high speed and the particles inside the porous structure collided with each other, also at high speed. The particle collisions in the porous structure contributed significantly to the high-speed ejections and the distribution of material density. This study is significant for understanding the dynamic responses of metal materials under multiple shockwave loadings.

shockwave impact, porous tin, multiple shockwave loadings

PACS: 61.43.Gt, 62.20.Mk, 47.40.Nm

doi: [10.1360/SSPMA-2020-0053](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2020-0053)