

超高应变率载荷下铜材料层裂特性研究

席涛 范伟 储根柏 税敏 何卫华 赵永强 辛建婷 谷渝秋

Spall behavior of copper under ultra-high strain rate loading

Xi Tao Fan Wei Chu Gen-Bai Shui Min He Wei-Hua Zhao Yong-Qiang Xin Jian-Ting Gu Yu-Qiu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 040202 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.040202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.040202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单层二硫化钼纳米带弛豫性能的分子动力学研究

Molecular dynamics study on relaxation properties of monolayer MoS₂ nanoribbons

物理学报.2016, 65(16): 160201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.160201>

碳纳米管中水孤立子扩散现象的模拟研究

Simulation studies on the diffusion of water solitons in carbon nanotube

物理学报.2016, 65(14): 140202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.140202>

碳纳米管阵列水渗透性质的研究

Water permeability in carbon nanotube arrays

物理学报.2015, 64(23): 230201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.230201>

高应变率压缩下纳米孔洞对金属铝塑性变形的影响研究

Plastic deformation in nanoporous aluminum subjected to high-rate uniaxial compression

物理学报.2015, 64(17): 170201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.170201>

利用啁啾脉冲频谱干涉技术研究高应变率载荷下铜膜的动态响应特性

Experiment research on dynamic response of copper film at high strain rate by chirped pulse spectral interferometry

物理学报.2016, 65(15): 150602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.150602>

超高应变率载荷下铜材料层裂特性研究*

席涛 范伟 储根柏 税敏 何卫华 赵永强 辛建婷[†] 谷渝秋[‡]

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 等离子体物理重点实验室, 绵阳 621900)

(2016年8月8日收到; 2016年10月19日收到修改稿)

超高应变率载荷下材料层裂特性研究对理解极端条件下材料动态破坏特性具有重要意义. 利用双温模型结合分子动力学模拟研究分析了超高应变率载荷下铜材料的层裂特性, 发现当应变率在 10^9 s^{-1} — 10^{10} s^{-1} 内时, 铜材料层裂强度在 19 GPa 附近波动. 而当材料发生冲击熔化时, 铜的层裂强度下降到 14.89 GPa. 利用飞秒激光对铜样品靶进行冲击加载, 并利用啁啾脉冲频谱干涉技术开展超快诊断, 通过单次实验测量获得了样品靶的自由面粒子速度演化历史, 结果未见表征样品层裂的速度回跳和速度周期性振荡信号. 结合冲击动力学理论得到样品自由面附近最大加载压强为 8.18 GPa, 小于超高应变率载荷下铜材料的层裂强度. 此外, 对回收样品扫描分析发现, 铜样品未发生层裂且飞秒激光引起的冲击波对样品表面结构产生了很大影响.

关键词: 层裂, 超高应变率, 分子动力学模拟, 频谱干涉

PACS: 02.70.Ns, 47.40.-x, 06.30.Gv, 07.60.Pb

DOI: 10.7498/aps.66.040202

1 引言

层裂是冲击载荷作用下, 材料内部加载稀疏波和自由面反射稀疏波相互作用产生的拉应力满足某种断裂判据时, 材料发生的一种动态损伤破坏行为. 动态损伤破坏问题是力学中最困难、最复杂的问题之一, 钱学森在其“物理力学讲义”中将其归纳为“连基本概念也还不十分清楚的问题”^[1]. 事实上, 层裂破坏起源于原子层次上的点阵缺陷, 经过位错运动促成微孔洞成核, 随后进入细观层次上微孔洞的长大和聚集, 最后在宏观层次上由于损伤局域化而导致材料断裂. 可见层裂过程涉及到从原子结构到宏观结构近十个尺度量级, 涵盖了不同尺度上的动力学过程^[2,3]. 对极端条件下材料层裂特性的研究是高压物理、材料科学、强度物理学和冲击动力学等学科领域重点关注的问题, 研究成果在装甲防护、航空航天器防护、材料切割等领域具有重要的应用价值.

材料层裂过程受加工过程、细观结构、初始温度、初始缺陷、加载应变率等众多因素影响^[4,5], 在这些影响因素中加载应变率的影响非常重要. 研究表明, 材料层裂强度随加载应变率的增加而增大^[6,7], 且在极高应变率下材料层裂强度与材料理论强度接近^[8]. 早期对材料层裂特性的实验研究大多采用霍普金森杆、轻气炮、电炮、化爆等加载手段, 加载应变率在 10^2 s^{-1} — 10^5 s^{-1} 之间. 高功率激光装置的出现, 把加载应变率扩展到 10^6 s^{-1} — 10^9 s^{-1} , 覆盖了传统加载方式不能达到的应变率范围, 成为研究高应变率载荷下材料特性的有力手段.

高功率激光装置上材料层裂特性研究大多采用纳秒束加载^[9-13], 加载应变率一般在 10^6 s^{-1} — 10^7 s^{-1} 之间, 而更高应变率载荷下材料层裂特性实验研究仍十分有限, 实验中通常采用超短脉冲激光(皮秒或飞秒)对样品进行冲击加载来达到该应变率条件. 2001年, Tamura等^[14]利用皮秒和飞秒激光对超高应变率载荷下铝材料层裂

* 中国工程物理研究院重点实验室基金(批准号: 9140C680306150C68298, 9140C680305140C68289)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jane_xjt@126.com

[‡] 通信作者. E-mail: yqgu@caep.ac.cn

特性进行研究,通过对回收样品扫描分析发现,层裂片厚度与靶厚成线性关系,但其没有对层裂过程进行动态诊断. Lelandais等^[15]在Tamura等的研究基础上,利用任意反射面干涉仪对样品自由面粒子速度进行测量,得到了飞秒激光引起的冲击波在样品中的传播特性.但是由于时间分辨不够,自由面粒子速度尚不能反应材料层裂特点.2013年,Ashitkov等^[16]将啁啾脉冲频谱干涉诊断技术应用到飞秒激光加载下金属材料的层裂特性研究中,通过实验测量样品自由面速度获得了超高应变率($\sim 10^9 \text{ s}^{-1}$)载荷下铁、铝等材料的层裂强度.在国内,尚未见超高应变率载荷下金属材料层裂特性方面的实验研究报道.

由于层裂过程中微孔洞成核、生长和汇通过程无法通过实验方法直接观察,因此采用分子动力学模拟再现这一过程非常重要.早在20世纪90年代,Belak^[17]就开展了层裂过程的分子动力学模拟,其模拟了少量孔洞的成核分布,单个孔洞生长规律以及两个孔洞之间的汇通过程.其模拟与实验结果定性一致:微孔洞在金属最脆弱的晶界交叉处成核.随着分子动力学模拟方法的发展和硬件计算能力的提升,利用分子动力学模拟材料层裂过程得到了快速发展.2005年,Ashkenazy和Averback^[18]对Cu-Ti合金的层裂形成过程进行研究,结果表明孔洞的成核过程伴随着材料的局部非晶化;2006年,Dremov等^[19]模拟发现在多晶纳米晶体中孔洞成核主要发生在颗粒边界处,而在单晶纳米晶体中成核主要发生在对叠层错交接处;2009年,Luo等^[20]用分子动力学模拟系统研究了加载波形、宽厚比、脉冲时间等对单晶铜层裂特性的影响;2012年,Durand和Soulard^[21]通过模拟研究微层裂过程发现熔化过程对层裂过程有显著影响.国内研究人员在层裂的分子动力学模拟方面也做了大量工作,如Xiang等^[22]通过模拟发现传统层裂和微层裂都是由于微孔洞的成核、生长、连接等因素引起的,成核数量和大小的差异是两者的主要区别;Shao等^[23]通过模拟研究了铝样品在冲击加载下的动态损伤过程,比较了固体和液体动态损伤的特点.通过分子动力学模拟能够对层裂机理加深认识,但是在这些模拟中加载波形要么为方波,要么是利用飞片碰撞等方式产生的三角波,这些模拟条件和激光加载情况很难对应.

本文利用分子动力学模拟和实验研究相结合

的方式开展了超高应变率载荷下铜材料层裂特性研究.把双温模型与分子动力学模拟相结合,分析了飞秒激光加载下样品内部冲击波传输特性和层裂特性.利用飞秒激光加载金属铜膜,同时采用啁啾脉冲频谱干涉技术开展诊断,获得了样品自由面的速度演化历史,由此得到样品自由面附近峰值加载压强.此外,对回收样品进行扫描分析,得到了飞秒激光作用后,靶材料的结构变化.

2 飞秒激光加载下铜材料层裂特性的分子动力学模拟

飞秒激光与金属材料相互作用时,金属中的自由电子首先通过逆韧致吸收过程吸收激光能量.当趋肤层深度内的自由电子吸收激光能量后,电子温度迅速升高,然后通过自由电子热扩散将热流传入到金属靶内部,并通过电子与晶格耦合过程传递给周围晶格^[24,25],该过程中材料内部电子温度和晶格温度变化可由双温方程描述.因此,在分子动力学模拟过程中,首先利用双温模型计算出材料趋肤深度内的激光沉积能量,然后通过沉积能量对材料形成冲击加载.利用双温模型结合分子动力学模拟研究飞秒激光加载下材料层裂过程,不但能把模拟条件和激光加载条件相对应,而且利用分子动力学模拟的优点,还可以研究不同加载条件对材料层裂特性的影响,同时也方便对层裂过程中难以在实验中观察的微孔洞的成核、生长和汇通等过程进行研究.

2.1 双温模型

早在1974年,苏联学者Anisimov等^[26]就提出了描述超短脉冲激光与金属相互作用过程的双温模型,其描述方程如下:

$$C_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[\kappa_e(T_e) \frac{\partial T_e}{\partial Z} \right] - g(T_e - T_l) + S(Z, t), \quad (1)$$

$$C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[\kappa_l(T_l) \frac{\partial T_l}{\partial Z} \right] + g(T_e - T_l), \quad (2)$$

$$\begin{aligned} S(Z, t) &= I(t)(1 - R)\alpha \exp(-\alpha Z) \\ &= I_0 \exp[-\pi(t/t_p - 1)^2](1 - R) \\ &\quad \times \alpha \exp(-\alpha Z). \end{aligned} \quad (3)$$

其中 T_e 和 T_l 为电子和晶格温度, $C_e = C'_e T_e$ 是电子热容, C_l 是晶格热容, C'_e 是与电子温度无关的常数, g 是电子和晶格的耦合系数, $\kappa_e = \kappa_0 \frac{T_e}{T_l}$ 为电子热传导系数, κ_0 为热平衡时电子热导率, κ_l 为离子热传导系数, 在方程中可以忽略. 这里考虑了电子-声子相互作用力, 并将电子-声子的耦合简化为 $g(T_e - T_l)$. $S(Z, t)$ 是激光热源, 与激光功率密度 $I(t)$ 相关, R 为材料表面反射率, α 为材料吸收系数, I_0 是最大激光能量密度, t_p 为脉冲宽度.

通过微分方程隐式求解算法求解上述方程, 两边采用绝热边界条件. 数值模拟计算参数为: 靶厚 500 nm, 均匀划分为 200 格, 计算时间步长 10 fs,

计算总时长 800 ps, 激光脉宽 25 fs, 靶初始温度 300 K, 双温模型所需其他参数见表 1 [27]. 图 1 是激光功率密度在 2.0×10^{14} W/cm² 时铜材料趋肤深度内电子和晶格温度变化情况, 从图中可以看到电子温度在很短的时间内快速上升, 继而再迅速下降, 而晶格温度一直在缓慢上升, 直到两者慢慢趋于平衡.

双温模型根据飞秒激光和材料相互作用的物理过程, 把材料内部电子和离子温度分别进行处理, 这样得到的数值模拟结果能够和实验很好地符合 [28]. 由此可见, 双温模型可以为分子动力学模拟飞秒激光与物质相互作用过程的温度输入提供良好的基础.

表 1 铜双温模型参数

Table 1. The parameters of two temperature model for copper.

$C'_e / \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-2}$	$C_l / \text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	$g / \text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$	$\kappa_0 / \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	R	α / m^{-1}
96.6	3.44×10^6	1.02×10^{17}	401	0.61	7.1×10^7

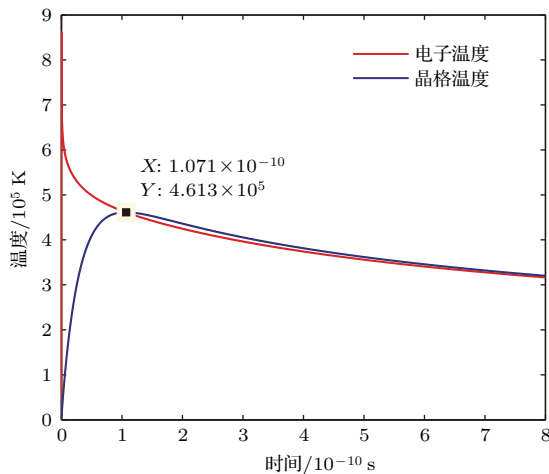


图 1 (网刊彩色) 激光功率密度为 2.0×10^{14} W/cm² 时材料趋肤深度内电子和离子温度随时间的演化

Fig. 1. (color online) The evolution of electron and ion temperature with time in the skin depth under laser power intensity 2.0×10^{14} W/cm².

2.2 分子动力学模拟

在本文的分子动力学模拟过程中, 铜材料原子间相互作用采用 Zhou 等 [29] 提出的原子嵌入式模型 (embedded atom method, EAM). 系统大小为 $5a \times 5a \times 500a$ (a 为晶格常数), x, y, z 坐标分别沿 [100], [010], [001] 方向. 其中 x 方向为激光加载方向, 采用自由边界条件, y, z 方向采用周期性边界

条件, 用以减少模拟过程中的边界效应. 在加载之前对模拟系统进行弛豫, 弛豫温度为 300 K, 弛豫压强为 1 bar. 加载是在一定时间内把趋肤深度内的材料加热到 2.1 节中计算的电子-离子平衡温度, 同时材料其余部分保持在常温状态. 随后, 积累在趋肤深度内的热量通过热传导, 在材料内部形成加载冲击波.

为获得飞秒激光加载下材料内部应力波的演化过程, 沿激光加载方向对样品进行均分, 统计每个均分单元内部材料应力数据的平均值. 然而在强激光加载条件下, 激光和物质相互作用产生大量等离子体, 随后等离子体向激光加载的相反方向喷射, 这导致对该部分的应力状态统计缺乏实际意义, 因此只对样品后 60% 部分进行处理. 通过分析不同时刻材料内部应力状态, 就能得到飞秒激光加载下材料内部应力波演化过程. 图 2 是激光功率密度为 2.0×10^{14} W/cm² 时样品内部应力波随时间的演化过程, 可以看到激光加载形成的冲击波为三角波. 初始时刻, 样品内部无初始应力; $t = 30$ ps 时, 冲击波传播到分析位置; 后面随着时间的增加, 冲击波继续向样品内部传播, 同时伴随着冲击波脉宽的展宽和幅值的衰减; $t = 55$ ps 时, 自由面反射形成的卸载稀疏波导致样品内部冲击波幅值进一步降低.

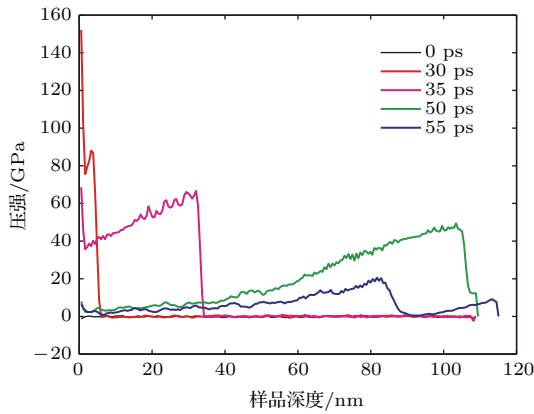


图2 (网刊彩色) 分子动力学模拟得到的应力波演化
Fig. 2. (color online) Evolution of pressure profile from molecular dynamics simulation.

对不同时刻样品自由面粒子速度统计分析, 可以得到特定功率密度加载下材料自由面粒子速度演化历史. 这里选取自由面厚度为 $8a$, 即统计样品后界面长度为 $8a$ 的单元内粒子速度的平均值. 图3是不同功率密度下样品自由面粒子速度演化过程, 可以看到自由面粒子速度有明显的回跳和周期性振荡, 这是明显的层裂信号. 根据自由面粒子速度可以计算出材料自由面附近最大压强、层裂应变率、层裂强度, 计算公式如下所示, 计算结果见表2.

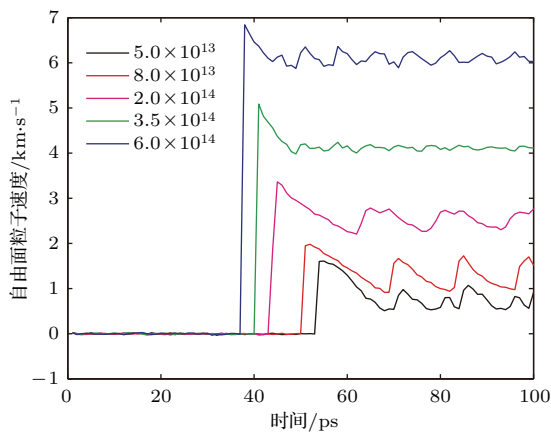


图3 (网刊彩色) 分子动力学模拟得到的自由面粒子速度
Fig. 3. (color online) Evolution of free surface velocity from molecular dynamics simulation.

自由面附近最大压强计算公式为

$$D = c_0 + \lambda u, \quad (4)$$

$$p = \rho_0 D u; \quad (5)$$

层裂应变率计算公式为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta u}{\Delta t} \cdot \frac{1}{2 \cdot c_0}; \quad (6)$$

层裂强度计算公式为

$$\sigma_{\text{spall}} = \frac{1}{2} \rho_0 C_b \Delta u; \quad (7)$$

其中 D 为冲击波速度, u 为波后粒子速度, $c_0 = 3.940$ km/s 和 $\lambda = 1.489$ 为表征铜样品性质的常数^[30], p 为冲击波压强, $\rho_0 = 8.93$ g/cm³ 为铜样品密度, $\dot{\epsilon}$ 为层裂应变率, Δu 为速度回跳大小, Δt 是自由面粒子速度从峰值到回跳的时间间隔, σ_{spall} 为层裂强度, C_b 为铜样品的体声速.

表2 不同激光功率密度下铜样品冲击和层裂参数

Table 2. Shock and spall parameters for copper loading at different laser power intensity.

激光功率密度 /W·cm ⁻²	自由面附近 最大压强/GPa	层裂应变率 /s ⁻¹	层裂强度 /GPa
5.0×10^{13}	22.58	7.7×10^9	19.22
8.0×10^{13}	29.71	7.9×10^9	18.52
2.0×10^{14}	67.18	8.6×10^9	20.37
3.5×10^{14}	130.85	1.76×10^{10}	19.50
6.0×10^{14}	215.80	1.95×10^{10}	14.89

由表2可知, 当加载激光功率密度为 5.0×10^{13} W/cm² 时, 样品已经发生层裂. 这时样品自由面附近最大压强为 22.58 GPa, 层裂应变率为 7.7×10^9 s⁻¹, 层裂强度为 19.22 GPa. 随着加载激光功率密度的增加, 自由面附近最大压强、层裂应变率都随之增大. 但层裂强度的变化相对复杂一些, 样品未发生冲击熔化时, 激光功率密度对层裂强度的影响不大, 当加载激光强度足够大 (6.0×10^{14} W/cm²) 时, 样品会发生冲击熔化现象, 此时样品的层裂强度将下降到 14.89 GPa. 本文得到的铜层裂强度相比 Luo 等^[20] 利用方波加载得到的层裂强度高, 这是因为飞秒激光加载形成的波形为三角波, 这和 Hixson 等^[12] 的研究结果相符合.

2.3 极高应变率下铜材料的层裂机理

为研究极高应变率下铜材料层裂机理, 采用横截面更大的模拟系统, 模拟体系大小为 $30a \times 30a \times 140a$ (a 为晶格常数), 加载激光功率密度为 2.0×10^{14} W/cm². 模拟结果如图4所示. 其中不同颜色代表了样品内部不同的 CNA (common neighbor analysis) 值, 用于描述样品内部的晶体结构, 这里只截取样品断裂部分进行分析. 图4(a) 为材料初始构型, 从图4(b) 可以看到微缺陷开始形

成, 图 4(c) 中孔洞开始生长, 图 4(d) 中孔洞已经连通导致材料断裂. 可以看到超高应变率载荷下, 材料层裂过程也经历了微缺陷的形成、孔洞生长和孔洞连通和断裂过程.

利用分子动力学模拟研究飞秒激光引起的冲

击波在样品中的传播特性及其引起样品的层裂特性, 能够方便地研究不同加载条件下样品的动态响应, 能够从原子尺度分析动态载荷下样品结构演化过程, 这对超高应变率载荷下样品动态响应特性研究具有重要意义.

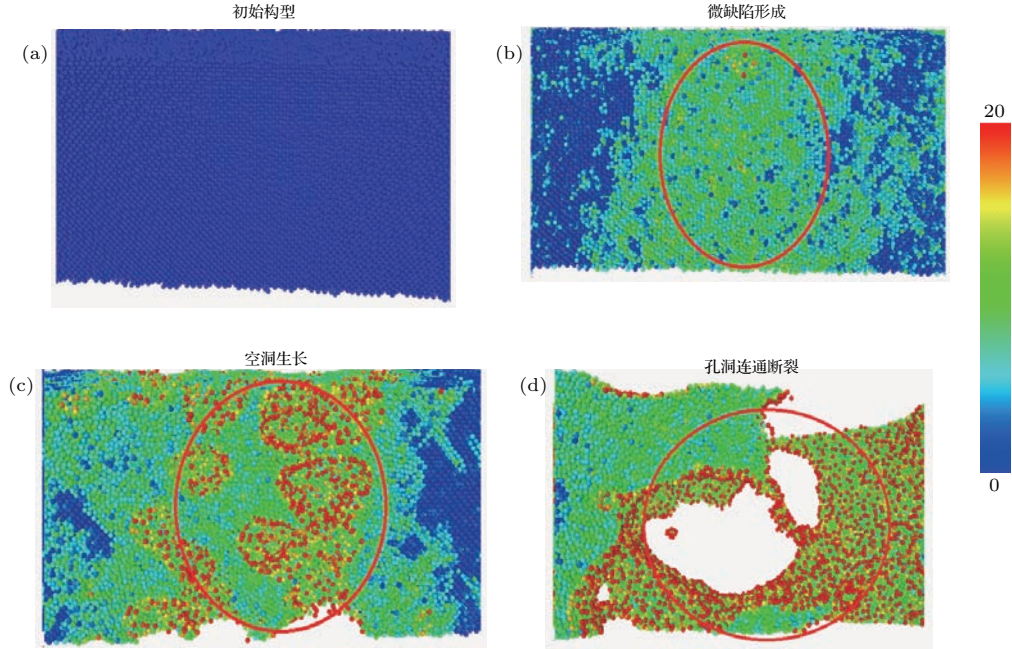


图 4 (网刊彩色) 材料层裂过程 (a) 样品初始构型; (b) 孔洞成核; (c) 孔洞生长; (d) 孔洞连通断裂

Fig. 4. (color online) Spall process: (a) Initial configuration of the simulated sample; (b) void nucleation; (c) void growth; (d) void confluence and fracture.

3 超高应变率载荷下铜层裂特性的实验探索

为研究超高应变率载荷下铜样品的层裂特性, 实验在 45 TW 飞秒激光装置上开展. 该激光装置能以单次或 10 Hz 重复频率打靶, 最高单脉冲输出能量为 1.0 J, 激光脉宽 25 fs (FWHM), 中心波长 800 nm. 实验样品为利用电子束溅射方式制作的厚度为 (502 ± 5) nm 的铜膜, 衬底为 0.18 mm 厚的盖玻片. 实验中激光分为泵浦光和探测光两束, 其中泵浦激光能量为 3.08 mJ, 聚焦光斑直径为 (756 ± 80) μm , 接近高斯型分布, 最大驱动功率密度为 5.5×10^{13} W/cm^2 . 探测激光通过光栅对展宽为线性啁啾脉冲, 用于啁啾脉冲频谱干涉诊断. 实验中啁啾脉冲的啁啾系数为 -1.72×10^{-6} $\text{rad}\cdot\text{fs}^{-2}$, 由此确定的测量系统时间分辨为 1.3 ps.

图 5 是利用啁啾脉冲频谱干涉技术诊断获得

的样品自由面位移和速度演化曲线, 其中图 5(a) 是测量区域中间部分的位移曲线, 蓝色曲线是由实验数据重建得到的结果, 对其进行匀滑处理, 结果如红色曲线所示. 自由面启动时刻选取为位移出现趋势性连续上升的起始位置, 将零时刻之前的位移进行归零处理. 图 5(b) 是对图 5(a) 的红色位移曲线进行微分得到的自由面粒子速度曲线, 其反映了样品内部冲击波的加载和卸载过程, 可以看到曲线没有出现表征样品层裂的速度回跳和周期性振荡信号. 自由面粒子峰值速度为 0.43 km/s, 由 (4) 和 (5) 式可得该冲击波在铜样品自由面附近引起的最大加载压强为 8.18 GPa. 根据前文分析, 该压强尚不能引起铜材料发生层裂. 由 (6) 式可得实验中样品卸载应变率最大值为 7.3×10^9 s^{-1} , 该应变率和分子动力学模拟的卸载应变率 (7.7×10^9 s^{-1} 到 1.95×10^{10} s^{-1}) 具有可比性, 消除了分子动力学模拟和实验应变率效应的影响.

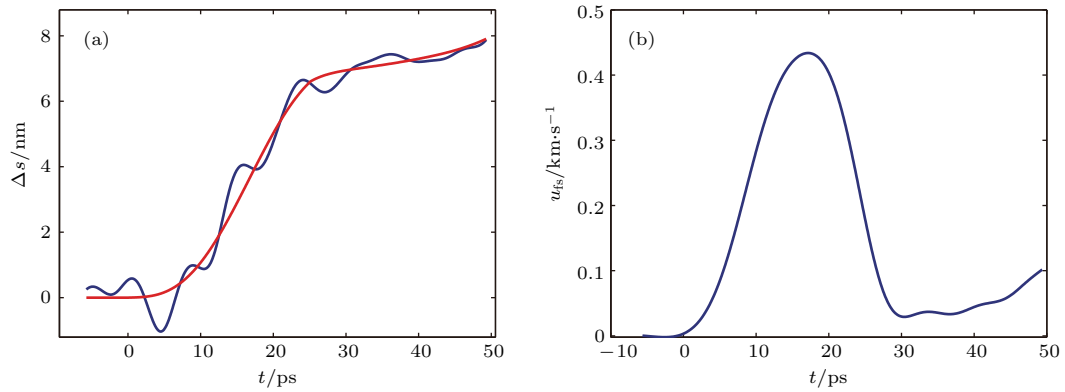


图5 (网刊彩色) 测量区域中间部分自由面位移和速度 (a) 位移图; (b) 速度图

Fig. 5. (color online) The free surface displacement and velocity evolution profile measured in a central part of the measured area: (a) Displacement evolution profile; (b) velocity evolution profile.

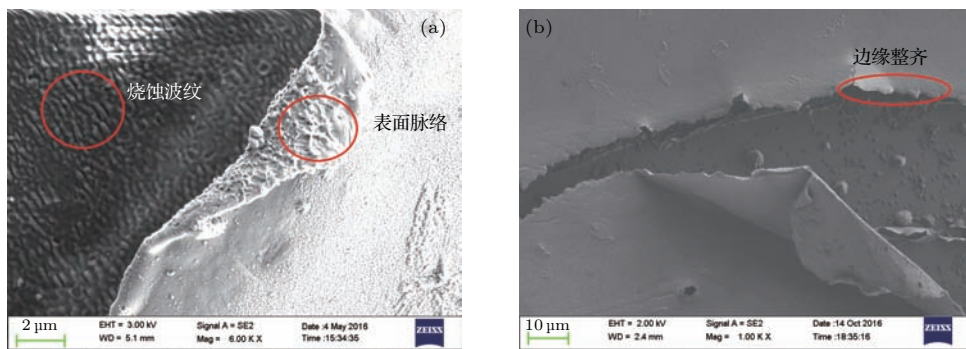


图6 (网刊彩色) 回收靶SEM (a) 加载区; (b) 加载区边缘

Fig. 6. (color online) SEM of the target foil: (a) Loaded area; (b) boundary of loaded area.

对激光加载后的样品进行回收, 并利用扫描电子显微镜 (SEM) 对回收靶进行扫描分析, 结果如图6所示. 其中图6(a)是回收样品加载区的扫描电镜图, 图6(b)是回收样品加载区边缘扫描电镜图. 从图6(a)可以看出: 1) 铜膜和盖玻片基底脱落, 且样品表面无撕裂现象, 这说明样品没有发生层裂, 样品内部拉应力强度介于铜样品层裂强度和铜膜与盖玻片结合强度之间; 2) 盖玻片基底出现波纹结构, 这是因为盖玻片对激光的强吸收导致其发生烧蚀, 因此激光加载到样品的实际能量比估计能量低; 3) 铜膜表面有明显脉络, 这说明飞秒激光引起的冲击波会导致样品表面结构发生变化.

从图6(b)可以看到激光加载区域边缘整齐, 这是因为飞秒激光可以在极短的时间和极小的空间内以极高的功率密度与物质相互作用, 并在极短时间内使电子温度达到极高, 使物质从固态变为等离子态, 迅速以喷射形态脱离样品, 而其周围的物质仍然处于“冷状态”. 这也是工业上把飞秒激光用

于材料加工的重要原因.

4 结 论

利用双温模型结合分子动力学模拟分析了飞秒激光加载下铜材料的动态响应, 发现应变率在 10^9 s^{-1} — 10^{10} s^{-1} 时, 铜样品的层裂强度在 19 GPa 附近波动. 当样品发生冲击熔化时, 层裂强度降低到 14.89 GPa. 在高功率飞秒激光装置上对铜样品进行超高应变率加载实验, 最大加载功率密度为 $5.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$. 利用啁啾脉冲频谱干涉技术测得自由面粒子速度, 未见表征样品层裂的速度回跳和速度周期性振荡信号. 结合冲击波关系式得到样品自由面附近最大加载压强为 8.18 GPa, 小于样品层裂强度. 此外, 回收样品的扫描分析结果也显示样品没有发生层裂. 样品自由面附近最大压强较小的原因是由于实验样品 (500 nm) 比模拟样品 (180 nm) 厚, 飞秒激光加载引起的冲击波在传

输过程中快速衰减, 并且盖玻片基底对加载激光的吸收, 导致实际到达样品加载面的激光能量小于测量值. 下一步研究分析中, 在分子动力学模拟方面, 通过增加模拟系统尺寸, 对材料层裂形成过程中微缺陷的形成、成核、生长和聚集过程进行量化分析; 在实验研究方面, 通过增加金属靶厚度以实现靶自支撑, 消除基底对激光的吸收. 同时在真空中进行实验, 防止空气离子化对加载过程造成影响.

参考文献

- [1] Qian X S 1962 *Notes on Physical Mechanics* (Beijing: Science Press) p190 (in Chinese) [钱学森 1962 物理力学讲义 (北京: 科学出版社) 第 190 页]
- [2] Deng X L 2006 *Ph. D. Dissertation* (Sichuan: Sichuan University) (in Chinese) [邓小良 2006 博士学位论文 (四川: 四川大学)]
- [3] Gray G T, Maudlin P J, Hull L M, Zuo Q K, Chen S R 2005 *J. Fail. Anal. Prev.* **5** 3
- [4] Tan H 2007 *Introduction to Experimental Shock-Wave Physics* (Beijing: National Defense Industry Press) p194 (in Chinese) [谭华 2007 实验冲击波物理导引 (北京: 国防工业出版社) 第 194 页]
- [5] Gray G T, Bourne N T, Millett J C F, Lopez M F, Vecchio K S 2002 *AIP Conf. Proc.* **620** 479
- [6] Pedrazas N A, Worthington D L, Dalton D A, Sherek P A, Steuck S P, Quevedo H J, Bernstein A C, Taleff E M, Ditmire T 2012 *Mater. Sci. Eng. A* **536** 117
- [7] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Soulard L, Berthe L, Rességuier T D, Combis P, Carion J B, Lescoute E 2010 *EPJ Web Conf.* **10** 00014
- [8] Moshe E, Eliezer S, Dekel E, Ludmirsky A, Henis Z, Werdiger M, Goldberg I B, Eliaz N, Eliezer D 1998 *J. Appl. Phys.* **83** 8
- [9] Dalton D A, Brewer J, Bernstein A C, Grigsby W, Milathianaki D, Jackson E, Adams R, Rambo P, Schwarz J, Edens A, Geissel M, Smith I, Taleff E, Ditmire T 2007 *AIP Conf. Proc.* **955** 501
- [10] Jarmakani H, Maddox B, Wei C T, Kalantar D, Meyers M A 2010 *Acta Mater.* **58** 4604
- [11] Signor L, Rességuier T D, Dragon A, Roy G, Fanget A, Faessel M 2010 *Int. J. Impact Eng.* **37** 887
- [12] Hixson R S, Gray G T, Rigg P A, Addressio L B, Yablinsky C A 2004 *AIP Conf. Proc.* **706** 469
- [13] Thissell W R, Zurek A K, Macdougall D A, Miller D, Everett R, Geltmacher A, Brooks R, Tonks D 2002 *AIP Conf. Proc.* **620** 475
- [14] Tamura H, Kohama T, Kondo K, Yoshida M 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 6
- [15] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Berthe L, Rességuier T D, Combis P, Colombier J P, Nivard M, Claverie J 2009 *Phys. D: Appl. Phys.* **42** 065402
- [16] Ashitkov S I, Komarov P S, Ovchinnikov A V, Struleva E V, Agranat M B 2013 *Quantum Elect.* **43** 3
- [17] Belak J 1998 *J. Comput.: Aided Mater.* **5** 193
- [18] Ashkenazy Y, Averback R S 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 051907
- [19] Dremov V, Petrovtsev A, Sapozhnikov P, Smirnova M 2006 *Phys. Rev. B* **74** 144110
- [20] Luo S N, Germann T C, Tonks D L 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 123518
- [21] Durand O, Soulard L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 044901
- [22] Xiang M Z, Hu H B, Chen J, Long Y 2013 *Modelling Simul. Mater. Sci. Eng.* **21** 055005
- [23] Shao J L, Wang P, He A M, Zhang R, Qin C S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 173501
- [24] Corkum P B, Brunel F, Sherman N K, Rao T S 1988 *Phys. Rev. Lett.* **61** 25
- [25] Zhigilei L V, Lin Z B, Ivanov D S 2009 *J. Phys. Chem. C* **113** 11892
- [26] Anisimov S I, Kapeliovich B L, Perelman T L 1974 *J. Exp. Theor. Phys.* **39** 776
- [27] Chen A M, Gao X, Jiang Y F, Ding D J, Liu H, Jin M X 2009 *Acta Phys. Sin.* **59** 10 (in Chinese) [陈安民, 高勋, 姜远飞, 丁大军, 刘航, 金明星 2009 物理学报 **59** 10]
- [28] Wang W T, Zhang N, Wang M W, He Y H, Yang J J, Zhu X N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 21 (in Chinese) [王文亭, 张楠, 王明伟, 何远航, 杨建军, 朱晓农 2013 物理学报 **62** 21]
- [29] Zhou X W, Wadley H N G, Johnson R A, Larson D J, Tabat N, Cerezo A, Petford A K, Smith G D W, Clifton P H, Martens R L, Kelly T F 2001 *Acta Mater.* **49** 4005
- [30] Li W X 2003 *One-Dimension Nonsteady Flow and Shock Waves* (Beijing: National Defense Industry Press) p42 (in Chinese) [李维新 2003 一维不定常流与冲击波] (北京: 国防工业出版社) 第 42 页]

Spall behavior of copper under ultra-high strain rate loading*

Xi Tao Fan Wei Chu Gen-Bai Shui Min He Wei-Hua Zhao Yong-Qiang
Xin Jian-Ting[†] Gu Yu-Qiu[‡]

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

(Received 8 August 2016; revised manuscript received 19 October 2016)

Abstract

The spall behavior of copper at ultra-high strain rate is studied by molecular dynamics simulation combined with an experimental analysis of laser ablation of a bulk copper target by femtosecond laser pulses. In the molecular dynamics simulation, two-temperature model is used, shock wave and spallation characteristics of copper shock-loaded by femtosecond laser are analyzed in detail. It is concluded that the evolution of pressure indicates a triangular waveform of the shock wave, and the spall strength of copper is about 19 GPa at strain rates ranging from 10^9 s^{-1} to 10^{10} s^{-1} , while higher pressure would melt the sample and the spall strength decreases to 14.89 GPa. Normally, the spallation is characterized by the sample free-surface undergoing alternately acceleration and deceleration, and the spallation mechanism could be explained by void nucleation, growth, coalescence that leads to the final fracture. An experiment is conducted to achieve high strain rate load on copper. The driving laser has a pulse width of 25 fs and central wavelength of 800 nm, the thickness values of the shocked copper foils are $(502 \pm 5) \text{ nm}$, fabricated by electron beam sputtering deposition onto $180 \mu\text{m}$ cover slip substrates. The driving laser beam with maximum intensity $5.5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, is focused on the front surface of the copper through the transparent substrate. Movements of the free rear surfaces of the copper foils are detected by chirped pulse spectral interferometry, and the theoretical time resolution is 1.3 ps. As a result, the free surface displacement and velocity evolution profile of the shocked area are obtained in a single measurement, and the results directly show that the maximum free surface velocity is 0.43 km/s and no alternately acceleration and deceleration appears. According to the shock wave relations, the maximum pressure near free-surface is 8.18 GPa. Meanwhile, derived from the velocity evolution profile, the strain rate is $7.3 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$. Combining with the above molecular dynamics simulation results, it is concluded that there is no spallation in the copper foil. Furthermore, we recover the sample targets and observe the microstructures by using scanning electron microscope. The copper foils are peeled off, but no spall scab is observed, indicating that the internal stress is between the copper spall strength and the bonding strength of copper foil with the transparent substrate. Ripple structure on copper surface demonstrates the femtosecond pulsed laser has ablated the copper film, and the propagation of the shock in fs regime is sensitive to microscopic defects.

Keywords: spall, ultra-high strain rate, molecular simulation, spectral interference

PACS: 02.70.Ns, 47.40.-x, 06.30.Gv, 07.60.Pb

DOI: 10.7498/aps.66.040202

* Project supported by the Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, China (Grant Nos. 9140C680306150C68298, 9140C680305140C68289).

[†] Corresponding author. E-mail: jane_xjt@126.com

[‡] Corresponding author. E-mail: yqgu@caep.ac.cn