

DOI: 10.11883/bzycj-2023-0172

马赫杆加载下无氧铜的动态破碎*

叶川兵¹, 段志伟¹, 李绪海¹, 王曦², 潘昊², 俞宇颖¹, 胡建波¹

(1. 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全国重点实验室, 四川 绵阳 621999;
2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 为了深入了解金属材料在复杂加载下的动态破碎行为, 在有限元模拟的基础上, 设计了两类马赫杆加载实验, 用于研究无氧铜在复杂加载下的动态破碎行为。实验中, 采用火炮加载马赫透镜和激光粒子速度干涉仪测量自由面速度, 实现了峰值压力分别为 95.75 和 32.38 GPa 的动态加载。结果表明, 实验中成功实现了稳定的马赫杆加载, 并且观察到马赫杆加载下无氧铜的 2 种不同近表面破碎模式, 即高压下产生微层裂、低压下产生三角波层裂, 且层裂区呈凸形分布。

关键词: 马赫杆; 微层裂; 无氧铜; 动态破碎

中图分类号: O383 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

Dynamic fragmentation of oxygen-free high-conducting copper under Mach stem loading

YE Chuanbing¹, DUAN Zhiwei¹, LI Xuhai¹, WANG Xi², PAN Hao², YU Yuying¹, HU Jianbo¹

(1. *National Key Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;*
2. *Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

Abstract: To in-depth understand the dynamic fracture behaviors of metal materials under complex loading, based on the finite element simulation, two types of Mach stem loading experiments were designed and carried out to investigate the dynamic fragmentation of oxygen-free high-conducting copper (OFHC Cu) under complex loading. In the experiments, a powder gun was used to impact the Mach lens, and a laser particle-velocity interferometer was applied to measure the free surface velocity. And dynamic loadings with the peak pressures of 95.75 and 32.38 GPa, respectively, were achieved. Stable Mach stem loading was successfully generated, and the Mach stem-related features were consistent with the simulated ones. At the same time, two different near-surface fracture behaviors in the OFHC Cu were observed, namely the micro-spallation under high pressure and the triangular-wave spallation under low pressure, with the cracked area distributed in a convex shape. These findings have a certain value for further understanding the dynamic fracture behaviors of metal materials and can provide new experimental methods for understanding material failure under various complex loading conditions.

Keywords: Mach stem; micro-spallation; OFHC Cu; dynamic fragmentation

金属及合金在强动载荷作用下将发生近表面破碎, 产生大量高速运动碎片和粒子, 对其他结构或器件造成损伤破坏。因此, 金属及合金材料近表面的动态破碎是爆炸与冲击动力学领域高度关注的关键科学问题, 对该问题的研究在装甲防护、航空航天、公共安全等方面具有重要应用价值^[1-5]。Walsh 等^[6]

* 收稿日期: 2023-05-10; 修回日期: 2023-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(12072331)

第一作者: 叶川兵(1997—), 硕士研究生, yuchuanbing@foxmail.com

通信作者: 胡建波(1980—), 博士, 研究员, jianbo.hu@caep.cn

和 Asay 等^[7-9] 早就开始了材料近表面的动态破碎研究。随着诊断技术的不断发展, 研究人员通过实验研究发现, 材料近表面动态破碎存在 3 种主要机制, 即层裂、微层裂和微喷射, 这 3 种机制强烈依赖于冲击压力、温度、相结构、材料微结构和加载波形等因素^[10-12]。目前, 相关研究基本都以简单一维应变加载为主, 关于材料在复杂加载状态下动态破碎的研究还相对较少。因此, 对复杂应变/应力条件下材料近表面动态破碎的认识严重不足。

马赫透镜作为一种高压加载的特殊方法, 通过冲击波的马赫反射和对碰可以在材料内部形成马赫杆加载, 且在马赫透镜的中心位置产生三角波, 它已经被用于高压状态方程^[13-14] 和疏松材料压实^[15] 方面的研究。该三角波与平板撞击、爆轰加载和激光冲击下产生的一维应变三角波存在显著不同。前者的压力幅值在一定的时间内随传播距离的变化几乎不变, 而后的压力幅值则会因为追赶稀疏波的影响随时间的变化急剧衰减。因此, 马赫杆加载虽然是一维应变加载, 但其应力状态更复杂, 为研究复杂加载条件下材料的动态破碎提供了新的机遇。

本文中, 将数值模拟和实验相结合, 利用大口径火炮在无氧铜样品中产生马赫杆加载, 并利用激光粒子速度干涉仪测量样品自由面的粒子速度剖面, 研究在马赫杆加载下无氧铜样品的近表面动态破碎行为, 揭示在不同加载条件下无氧铜样品自由面的 2 种动态破碎机制。

1 马赫杆加载模拟设计

马赫透镜构型如图 1 所示, 内外圆柱由不同波阻抗的金属组成。飞片高速撞击后, 外层圆柱材料中的冲击波速度比内圆柱中的高, 使外侧冲击波能透射入内层圆柱中, 形成锥形收敛, 会聚到中心轴线上, 并与内圆柱中的冲击波叠加产生再加载, 使内圆柱的局部压强和粒子速度显著提升。边界处的外侧冲击波入射可看作是斜冲击波的反射状态, 通过斜冲击波的入射可以在内圆柱材料中心线上产生稳定的马赫杆^[14]。虽然马赫杆加载宏观上表现为一维应变状态, 但整个内圆柱中的冲击波阵面随时间和空间剧烈变化, 因此其实质的加载状态更复杂。

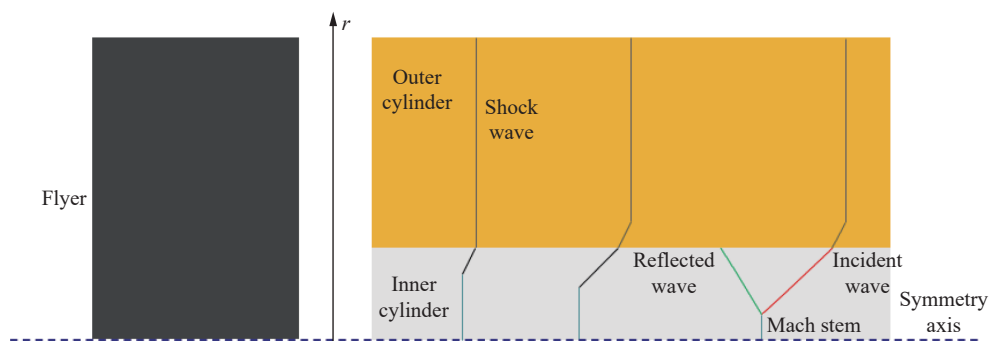


图 1 马赫透镜结构

Fig. 1 Structure of Mach lens

在内圆柱中, 除了波阵面处的斜激波入射与反射, 在界面处还有内外冲击波的相互作用, 结果是向内侧圆柱中反射稀疏波。在入射波向中心汇聚时, 反射的稀疏波也到达中心, 跟随在马赫杆后。从而在马赫杆后形成低压卸载区, 使冲击前沿压强到达峰值后又迅速下降, 马赫杆波形就由方波转变成三角波。

基于马赫透镜的原理分析, 对马赫杆加载进行了模拟设计。利用有限元分析软件 AUTODYN, 采用 Lagrange 方法和二维旋转轴对称结构建立模型。材料动力学模型选用最常见的 Mie-Grüneisen 状态方程^[16] 和 Johnson-Cook(JC)本构模型^[17], 其模型参数分别见表 1^[18-20] 和表 2^[17, 21-23]。模拟设计的两类马赫杆实验 (Mach-1 和 Mach-2) 参数如表 3, 分别对应应在无氧铜中产生最高压力 99.4 和 24.2 GPa。两类马赫杆实验的压力流场随时间的演化如图 2 所示。

表 1 Mie-Grüneisen 状态方程参数^[18-20]

Table 1 Parameters of Mie-Grüneisen equations of state^[18-20]

材料	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$c_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	s	γ	来源
304不锈钢	7.90	4.57	1.49	1.93	文献[18]
LY12铝	2.79	5.37	1.29	2.0	文献[19]
无氧铜	8.93	3.94	1.489	2.02	文献[18]
TC4钛合金	4.42	5.13	1.028	1.23	文献[20]

表 2 Johnson-Cook 本构模型参数^[17, 21-23]

Table 2 Parameters of the Johnson-Cook constitutive model^[17, 21-23]

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m	T_m/K	来源
304不锈钢	310	1000	0.65	0.07	1.0	1673	文献[21]
LY12铝	369	684	0.73	0.0083	1.7	775	文献[22]
无氧铜	90	292	0.31	0.025	1.09	1356	文献[17]
TC4钛合金	862	331	0.34	0.012	0.8	2110	文献[23]

表 3 设计参数

Table 3 Parameters of experimental design

实验编号	材料			飞片速度/ $(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	厚度/mm		直径/mm	
	飞片	外圆	内圆		飞片	样靶	内圆	外圆
Mach-1	304不锈钢	LY12 铝	无氧铜	1.40	3.0	16.0	4.8	38.0
Mach-2	304不锈钢	TC4钛合金	无氧铜	0.50	12.0	26.0	14.0	45.0

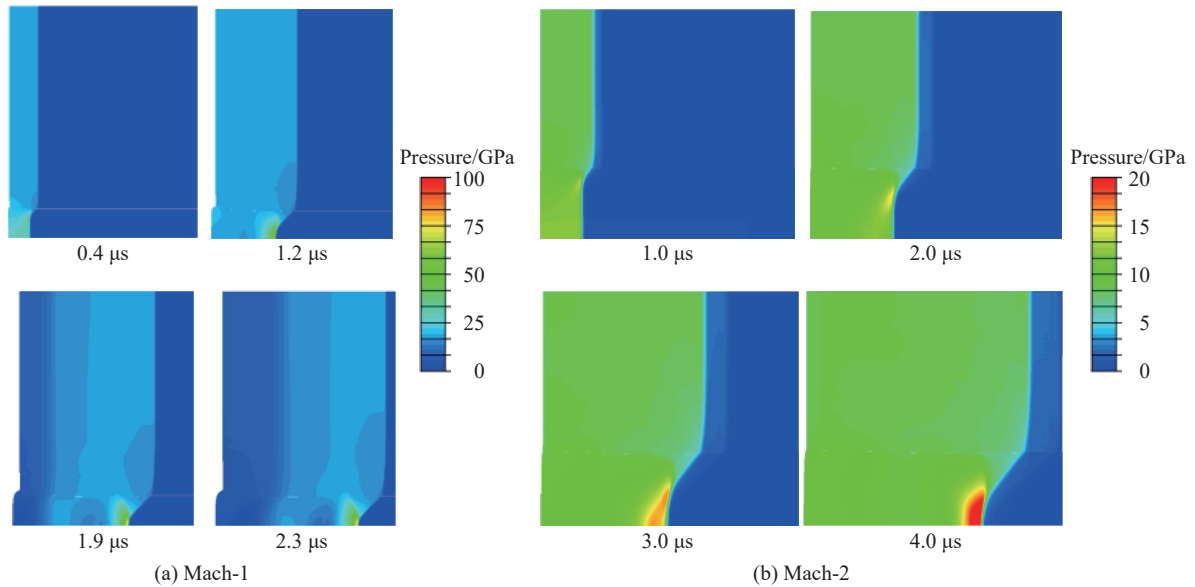


图 2 两类马赫杆加载下压力流场随时间演化的模拟结果

Fig. 2 Numerically-simulated evolutions of pressure contours under two types of Mach stem loading

图 3 为实验 Mach-1 中内圆柱中心线上等间距拉格朗日点的压力和粒子速度剖面模拟结果。0.7 μs 前, 冲击波为方波。0.7 μs 后, 峰值粒子速度开始提升, 且波形开始变化。其变化来自两部分, 分别是斜冲击的入射波和界面反射的稀疏波, 导致在提升峰值粒子速度的同时, 后续的卸载稀疏波也变得更陡峭, 使冲击平台逐步缩短。2.2 μs 时, 粒子速度幅值基本保持不变, 且能在较长时间内保持这种三角波的形式。

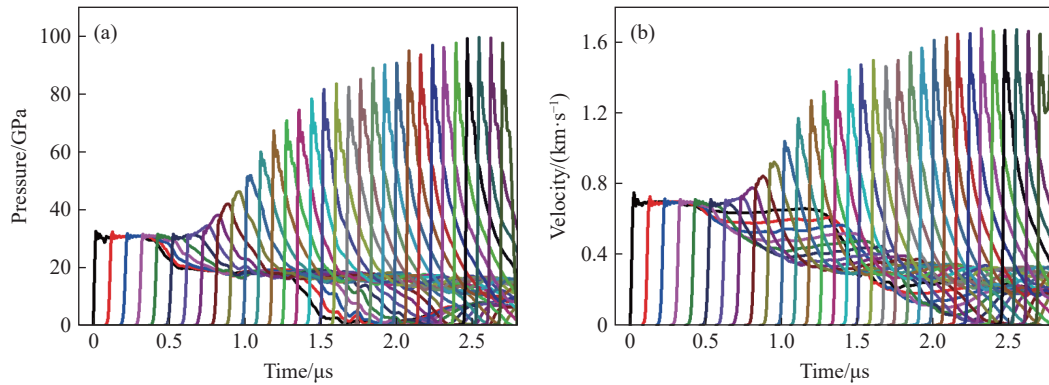


图 3 实验 Mach-1 中圆柱试样靶中心线上等间距拉格朗日点的压强和速度模拟结果

Fig. 3 Simulated velocity- and pressure-time evolutions of equidistant Lagrangian particles on the symmetrical centerline of the cylindrical specimen target in experiment Mach-1

2 马赫杆加载实验技术

内外圆柱之间采用间隙配合,用环氧树脂粘结。为确保冲击实验时飞片与靶装置正面碰撞,将样品安装在有机玻璃支架上,经校准后用样品环将样品固定在炮口上,如图 4(a)所示。火炮驱动 304 钢飞片以设计速度撞击马赫透镜装置。采用多普勒光探针系统(Doppler pin system, DPS)测量内外圆柱自由面的粒子速度, DPS 探头分布见图 4(b)~(c)。在实验 Mach-1 中,在内圆柱中心处设置一根 DPS 探针,用于测量马赫杆中心的运动历程。在铝套筒后表面距圆心 3.0、5.0、7.0、9.0 mm 处,布置系列 DPS 探针,用以判断碰撞的倾斜角度以及比较模拟结果与实验结果,并确定模拟需要的黏性等参数。在 Mach-2 实验中,碰撞速度较低,马赫杆的范围更大,因此在内圆柱的半径 0、1.0、1.4、1.8、2.6 和 3.4 mm 处布置了 DPS 探针,对应图 4(c)中的点 E、F、G、H、I 和 J,用于分析马赫杆的径向行为。飞片的碰撞速度也通过 DPS 测速确定。

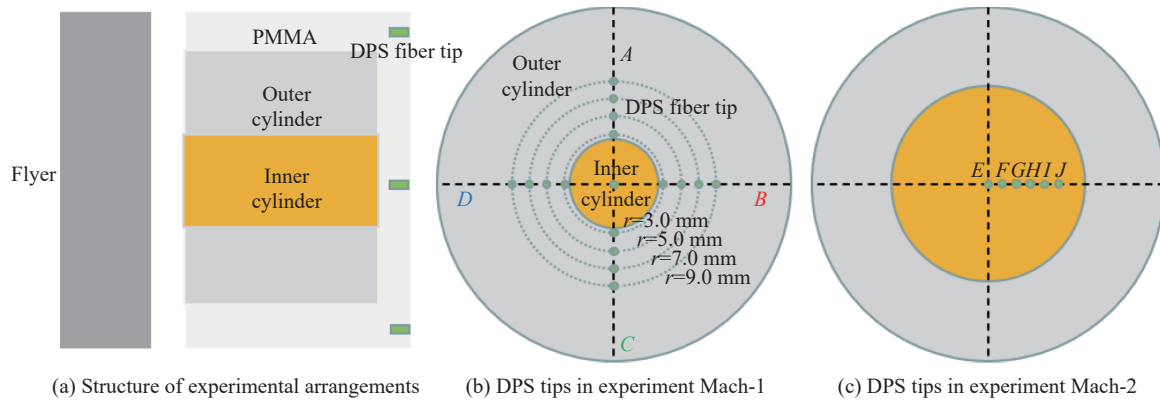


图 4 两类马赫杆加载实验设计

Fig. 4 Experimental arrangements of two types of Mach stem loading

3 实验结果与讨论

DPS 测量获得的飞片碰撞速度分别为 1325 和 605 m/s。在实验 Mach-1 中,铝套筒后表面不同位置处的粒子速度剖面如图 5 所示。由同心圆上 4 个 DPS 信号的起跳时间间隔可知,碰撞倾斜角度为 0.376° ,因此该实验中飞片与靶装置的碰撞可以近似为完全正碰。在实测弹速下,铝套筒后自由面粒子速度的数值模拟结果和实验结果具有较好的一致性,由此证实实验中实现了预期的马赫杆加载。马赫杆稳定加载后的峰值压力分别达到 95.75 和 32.38 GPa。结合模拟进行进一步分析发现,在自由面半径为 3.0 mm 的位置处,由于靠近内外圆柱的界面,受到内边界反射稀疏波的影响,冲击上升沿的峰值强度有所降低;在自由面半径为 5.0 mm 的位置处,冲击波基本没有受到来自外侧和内测边界处卸载稀疏波的

影响, 是一个完整的矩形冲击波; 而在自由面半径为 7.0、9.0 mm 的位置处, 冲击波则是受到了外侧稀疏波的影响, 粒子速度剖面呈现三角波的特征, 冲击波在到达自由面后开始卸载, 粒子速度明显下降。图 5(b)~(d) 的粒子速度剖面在 1.0 μs 左右出现回弹上升, 应该是发生了层裂, 而且越接近外侧, 层裂出现越早。

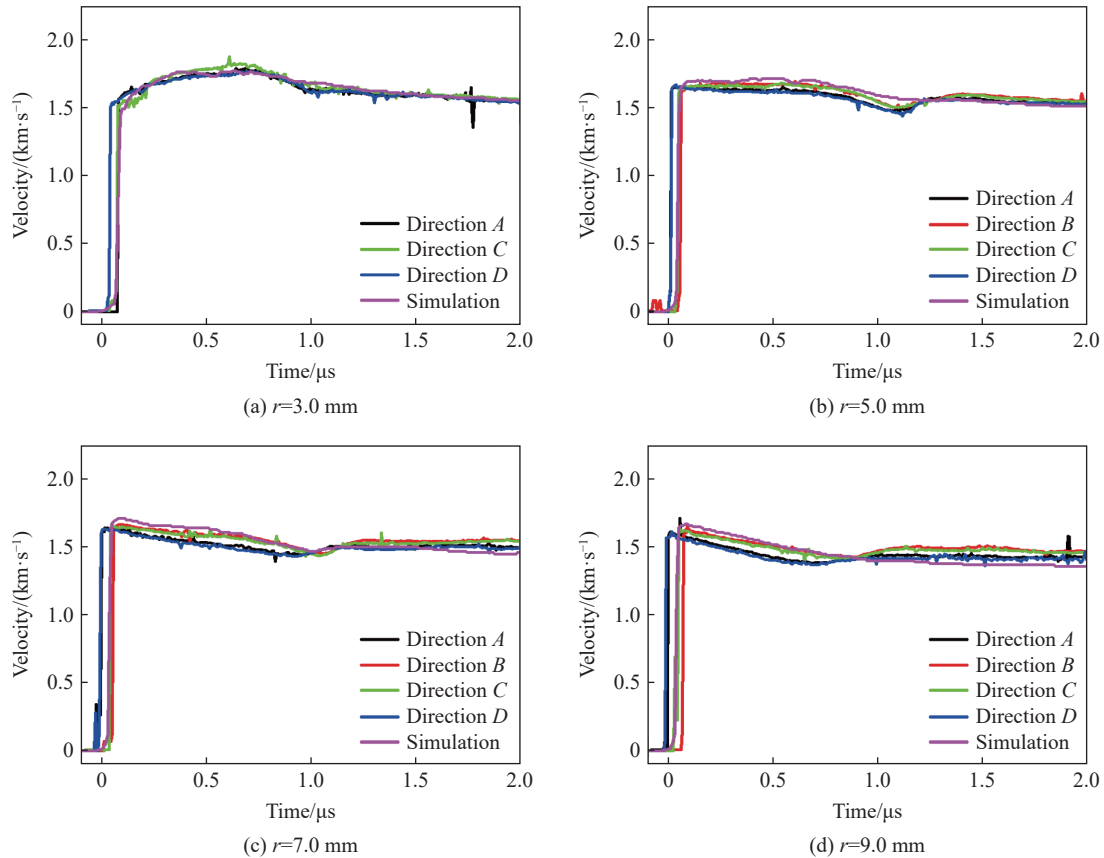


图 5 实验 Mach-1 中铝套筒后自由面粒子速度剖面实验结果与模拟结果的比较

Fig. 5 Comparison of rear free-surface particle velocity profiles of the aluminum sleeve in experiment Mach-1 with the corresponding simulated ones

实验 Mach-1 中内圆柱中心处的 DPS 测量结果见图 6, 可以看出无氧铜后自由面可能发生了微层裂, 导致近表面物质碎化为细小碎片云并以接近自由面的速度脱离基体。这是由于稳定后的马赫杆中心处的压力由碰撞初始的 28.92 GPa 提升到了 95.75 GPa, 使无氧铜在卸载后进入近熔化区。

在实验 Mach-2 中, 由于马赫杆的范围更大, 因此可以研究马赫杆不同位置的动力学过程。模拟设计中, 点 E、F、G 和 H 位于马赫杆平台范围内, 而点 I 和 J 位于过渡区。如图 7 所示, 粒子速度剖面都有明显的三角波层裂信号。为描述该层裂行为, 数值模拟中采用最大拉应力断裂模型(设最大拉应力为 2.6 GPa), 可以获得实验 Mach-2 中不同位置处的粒子速度剖面。模拟结果与实验结果进行比较, 可见两者的一致性较好, 数值模拟较好地复现了不同位置的层裂信号。该层裂行为是由于马赫杆产生的三角波加载到达自由面后经卸载产生拉伸应力所致。如图 8 所示, 马赫透镜中内圆柱冲击波形成的层裂除了轴向应力的影响外还与其在径向分布的差异有关, 不同位置的层裂规模和距离差异较大。内圆柱中的马赫杆冲击波阵面沿径向分布不均, 冲击波阵面为锥状, 点 E~J 的峰值速度和冲击波到达时间分别随半径增大而减小和提前(见图 7)。这与平面加载的层裂行为存在显著的不同, 平面加载的层裂在其径向上并无变化。中心线处的马赫杆虽然到达自由面的时间最迟, 但强度最高, 形成的三角波层裂位置也最靠前, 层裂片速度最快, 而两侧的冲击波强度相对较低, 层裂位置也靠后。最终的层裂片沿径向各个位置的速度和厚度也不同, 整体呈凸形(见图 8)。

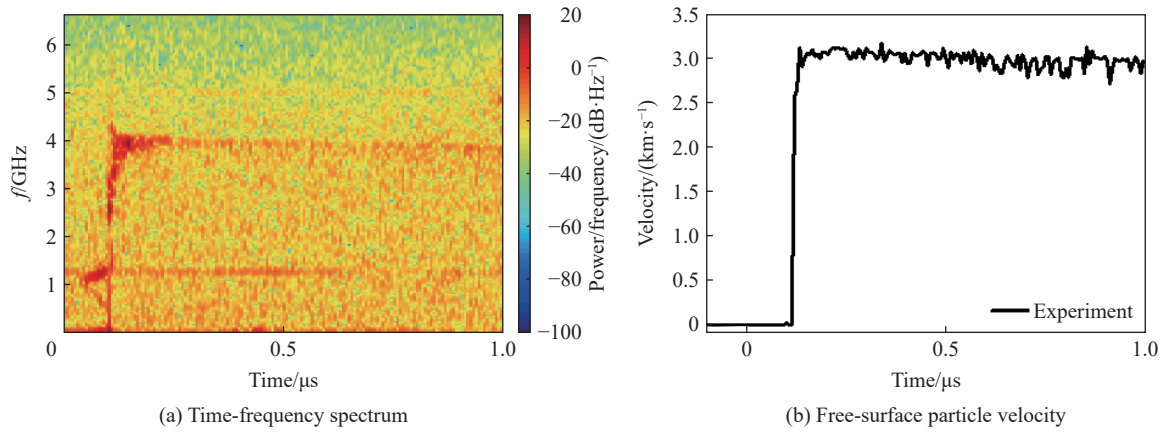


图 6 实验 Mach-1 中内圆柱中心处的 DPS 时谱图和自由面粒子速度剖面

Fig. 6 DPS time-frequency spectrum and free-surface particle velocity profile at the center of the inner cylinder in experiment Mach-1

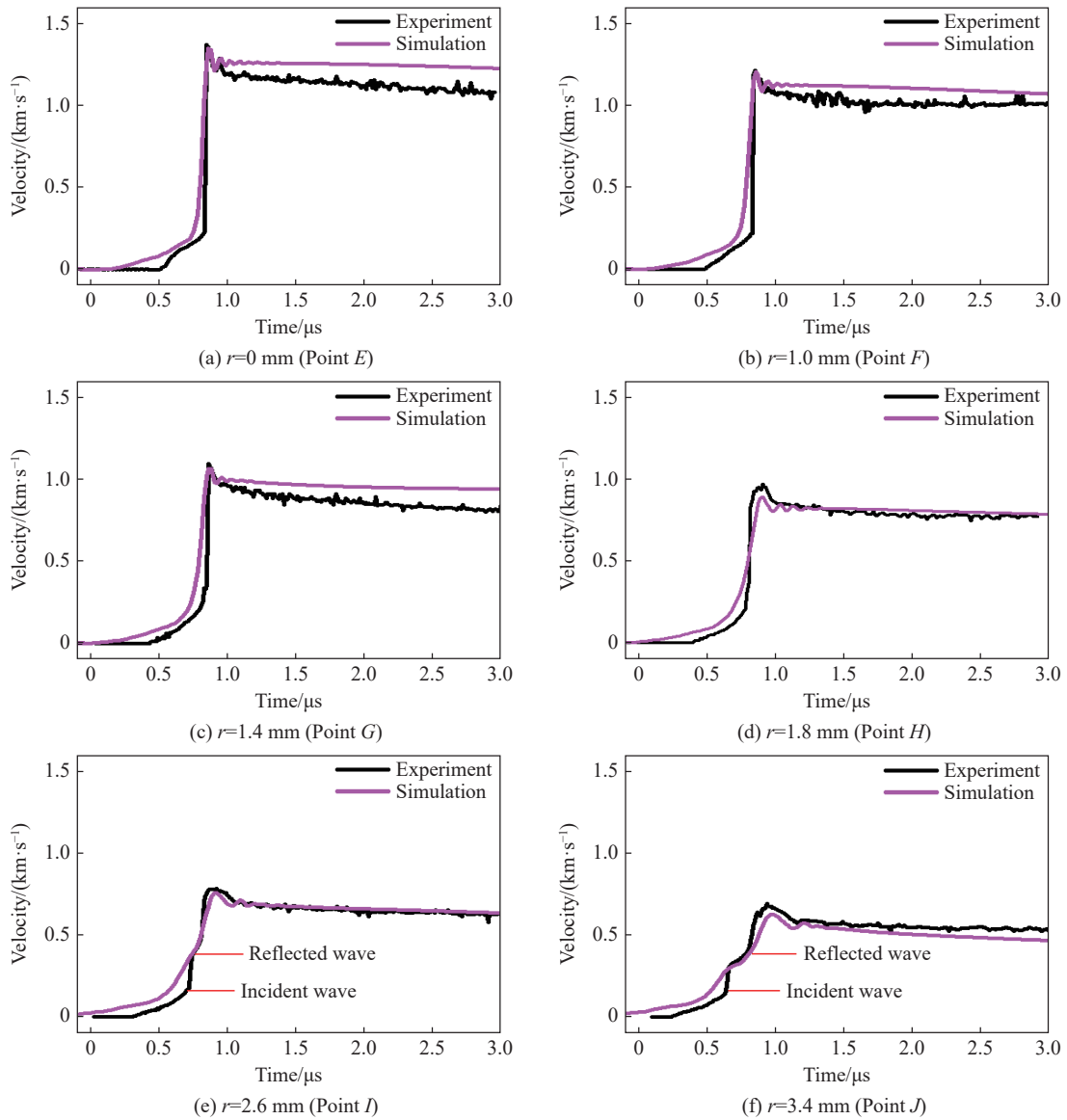


图 7 实验 Mach-2 中不同位置处粒子速度剖面的实验结果与模拟结果的比较

Fig. 7 Comparison of experimental and simulated results of particle velocity profiles at different positions in experiment Mach-2

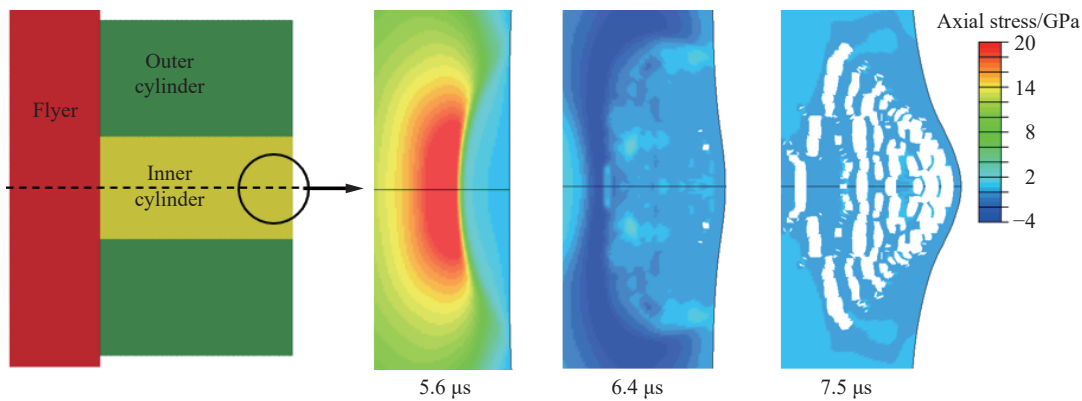


图 8 实验 Mach-2 中试样破坏形貌的模拟结果

Fig. 8 Simulated failure morphologies of the specimen in experiment Mach-2

4 结 论

以无氧铜为研究对象, 模拟设计了 2 类不同冲击波压力的马赫杆加载实验。模拟结果与实验结果十分接近, 马赫杆相关的主要特征也都比较符合, 表明在实验上用马赫透镜实现了马赫杆加载。同时, 观察到了无氧铜在 2 种不同马赫杆加载下产生的 2 种不同近表面破碎模式。在高压下, 由于无氧铜卸载进入近熔化区, 发生微层裂破坏。在低压下, 无氧铜处于固态, 三角波发生自由卸载形成层裂。与平面冲击产生的层裂不同, 由于马赫杆冲击波状态径向分布不均匀, 产生的层裂片呈凸形。

该工作对进一步了解金属材料的动态破碎行为具有一定价值, 并为研究复杂加载状态下的材料破坏提供了新的实验方法。

参考文献:

- [1] 陈华燕, 曾祥国, 朱文吉, 等. 爆炸荷载作用下桥梁动态响应及其损毁过程的数值模拟 [J]. *四川大学学报 (工程科学版)*, 2011, 43(6): 15-19, 97. DOI: 10.15961/j.jsuese.2011.06.001.
CHEN H Y, ZENG X G, ZHU W J, et al. Numerical simulation of dynamic response and damage process for bridge under blast loading [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2011, 43(6): 15-19, 97. DOI: 10.15961/j.jsuese.2011.06.001.
- [2] 朱建士, 胡晓棉, 王裴, 等. 爆炸与冲击动力学若干问题研究进展 [J]. *力学进展*, 2010, 40(4): 400-423. DOI: 10.6052/1000-0992-2010-4-J2009-144.
ZHU J S, HU X M, WANG P, et al. A review on research progress in explosion mechanics and impact dynamics [J]. *Advances in Mechanics*, 2010, 40(4): 400-423. DOI: 10.6052/1000-0992-2010-4-J2009-144.
- [3] 陈大伟, 王裴, 孙海权, 等. 爆炸波对碰驱动平面锡飞层的动力学及动载行为特征研究 [J]. *物理学报*, 2016, 65(2): 024701. DOI: 10.7498/aps.65.024701.
CHEN D W, WANG P, SUN H Q, et al. Loading characteristics and dynamic behaviors of the plane tin flying layer driven by detonation collision [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(2): 024701. DOI: 10.7498/aps.65.024701.
- [4] 张凤国, 刘军, 何安民, 等. 强冲击加载下延性金属卸载熔化损伤/破碎问题的物理建模及其应用 [J]. *物理学报*, 2022, 71(24): 244601. DOI: 10.7498/aps.71.20221340.
ZHANG F G, LIU J, HE A M, et al. Modelling of spall damage evolution and fragment distribution for melted metals under shock release [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(24): 244601. DOI: 10.7498/aps.71.20221340.
- [5] 程素秋, 陈高杰, 高鑫, 等. 不同装药战斗部壳体对水中兵器的爆炸威力 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(6): 1372-1377. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0127.
CHENG S Q, CHEN G J, GAO X, et al. Estimation of underwater explosive energy for different charge warhead shells [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(6): 1372-1377. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0127.
- [6] 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. DOI: 10.1063/1.1721278.

- [7] ASAY J R, MIX L P, PERRY F C. Ejection of material from shocked surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 1976, 29(5): 284–287. DOI: 10.1063/1.89066.
- [8] ASAY J R. Material ejection from shock-loaded free surfaces of aluminum and lead: SAND-76-0542 [R]. Albuquerque, USA: Sandia National Laboratories, 1976. DOI: 10.2172/7136578.
- [9] ASAY J R. Thick-plate technique for measuring ejecta from shocked surface [J]. *Journal of Applied Physics*, 1978, 49(12): 6173–6175. DOI: 10.1063/1.324545.
- [10] SORENSON D S, MINICH R W, ROMERO J L, et al. Ejecta particle size distributions for shock loaded Sn and Al metals [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(10): 5830–5836. DOI: 10.1063/1.1515125.
- [11] OGORODNIKOV V A, MIKHAĬOV A L, BURTSEV V V, et al. Detecting the ejection of particles from the free surface of a shock-loaded sample [J]. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2009, 109(3): 530–535. DOI: 10.1134/S1063776109090180.
- [12] ESCOBEDO J P, DENNIS-Koller D, CERRETA E K, et al. Effects of grain size and boundary structure on the dynamic tensile response of copper [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 110(3): 033513. DOI: 10.1063/1.3607294.
- [13] FOWLES G R, ISBELL W M. Method for Hugoniot equation-of-state measurements at extreme pressures [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(4): 1377–1379. DOI: 10.1063/1.1714313.
- [14] BROWN J L, RAVICHANDRAN G, REINHART W D, et al. High pressure Hugoniot measurements using converging shocks [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(9): 093520. DOI: 10.1063/1.3590140.
- [15] THADHANI N N. Shock compression processing of powders [J]. *Advanced Materials and Manufacturing Processes*, 1988, 3(4): 493–549. DOI: 10.1080/10426918808953217.
- [16] 汤文辉. 冲击波物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 174–181.
- [17] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates, and high temperatures [C]// Proceedings of 7th International Symposium on Ballistics. The Hague, 1983: 541–547.
- [18] ANSYS AUTODYN Material [DB]. ANSYS, 2019.
- [19] 俞宇颖, 谭华, 胡建波, 等. 钽和 LY12 铝的高压声速测量 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(6): 486–491. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0486-06.
- YU Y Y, TAN H, HU J B, et al. Measurements of sound velocities in shock-compressed tantalum and LY12 Al [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(6): 486–491. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)06-0486-06.
- [20] WANG X M, SHI J. Validation of Johnson-Cook plasticity and damage model using impact experiment [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60: 67–75. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.04.010.
- [21] LEE S, BARTHELAT F, HUTCHINSON J W, et al. Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials: experiments and modeling [J]. *International Journal of Plasticity*, 2006, 22(11): 2118–2145. DOI: 10.1016/j.ijplas.2006.02.006.
- [22] 侯日立, 周平, 彭建祥. 冲击波作用下 LY12 铝合金结构毁伤的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 470–474. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)05-0470-05.
- HOU R L, ZHOU P, PENG J X. Numerical simulation of shock damage of LY12 aluminium alloy structure [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 470–474. DOI: 10.11883/1001-1455(2012)05-0470-05.
- [23] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数书册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 139.

(责任编辑 张凌云)