

加载应力幅值对高纯铜动态损伤演化特性研究

裴晓阳 彭辉 贺红亮 李平

Study on the effect of peak stress on dynamic damage evolution of high pure copper

Pei Xiao-Yang Peng Hui He Hong-Liang Li Ping

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054601 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054601

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054601>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

延性金属层裂自由面速度曲线物理涵义解读

Discussion on the physical meaning of free surface velocity curve in ductile spallation

物理学报.2015, 64(3): 034601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034601>

黏弹性流体充模过程中凝固现象的数值模拟

Simulation of solidification with phase-change in viscoelastic moldfilling process

物理学报.2014, 63(8): 084601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.084601>

晶粒尺度对延性金属材料层裂损伤的影响

Effects of grain size on the dynamic tensile damage of ductile polycrystalline metall

物理学报.2013, 62(16): 164601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.164601>

黏弹性熔体充模流动诱导残余应力模拟

Simulation of residual stress in viscoelastic mold filling process

物理学报.2012, 61(23): 234602 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.234602>

加载应力幅值对高纯铜动态损伤演化特性研究*

裴晓阳^{1)†} 彭辉¹⁾²⁾ 贺红亮¹⁾ 李平¹⁾

1) (中国工程物理研究院, 流体物理研究所, 绵阳 621900)

2) (北京理工大学, 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

(2014年7月25日收到; 2014年8月25日收到修改稿)

研究了加载应力幅值对延性金属高纯无氧铜动态损伤演化特性的影响. 层裂实验在一级轻气炮上开展, 利用不同的飞片击靶速度实现不同加载应力幅值 (2.5 GPa, 2.75 GPa 和 3.75 GPa), 采用 DISAR 位移干涉诊断技术测量样品自由面的速度剖面, 利用基于白光轴向色差的表面轮廓测试技术测试软回收的样品截面. 结果显示: 随着加载应力幅值的升高, 层裂强度几乎没有变化, 但自由面速度剖面上 Pull back 信号后的回跳速率和幅值显著增大, 损伤演化速率显著升高. 进一步分析表明: 延性金属动态损伤演化过程中微孔洞成核对加载应力幅值单一因素不敏感, 但加载应力幅值是微孔洞长大和聚集的主导因素之一.

关键词: 层裂, 加载应力幅值, 动态损伤演化

PACS: 46.35.+z, 46.50.+a, 02.10.Yn, 33.15.Vb

DOI: 10.7498/aps.64.054601

1 引言

延性金属的层裂在爆炸、高速碰撞、航空航天器和装甲的防护等相关领域都具有非常广泛的应用背景. 在一维应变情况下, 当一个薄飞片撞击一个厚样品, 分别由飞片后自由面和样品自由面反射的两束稀疏波在样品中相遇, 形成局域化的拉伸, 如果拉伸应力足够强, 经过一定的孕育时间, 样品将发生层裂. 在广泛实验研究基础上, 微孔洞成核、长大和聚集的动力学过程是目前公认的延性金属层裂破坏的基本模式和物理内涵^[1-3]. 然而, 尽管认识到宏观加载方式和材料的微观结构特征是延性金属损伤演化动力学的主要依赖因素, 但对加载应力波形^[4]、应变率^[5]、拉伸时间^[6]加载应力幅值等对层裂损伤演化的影响还没有得到很好的理解. 主要原因是上述因素常常相互耦合, 很难分解性的考虑单一因素对损伤演化过程的影响, 例如, 不同的加载波形将导致不同的拉伸应变率和拉伸时间, 进而导致不同的损伤图案^[4].

加载应力幅值也是延性金属动态损伤演化的主要影响因素之一, 自从认识到拉伸时间的重要性, Tuler 和 Butcher^[7] 引入了阈值应力的概念, 提出了断裂时间和加载应力的幂指数型断裂判据关系式: $\int_0^{t_f} (\sigma - \sigma_0)^\lambda dt = K$, 其中 t_f 为断裂时间, σ_0 为材料开始破坏的阈值应力, λ 和 K 为材料常数. Davison 和 Stevens^[8] 基于连续介质损伤累积的物理思想, 通过数值模拟得出断裂时间和加载应力幅值的关系曲线. 俄罗斯科学家们在上世纪 90 年代提出了层裂过程中动力学不变量 ($P^\alpha t = \text{常数}$, 其中 P 为应力幅值, t 为断裂时间) 的概念^[9], 并通过大量实验结果确定了相关材料参数. 上述结论形式上大同小异, 得出的结果也定性一致, 即断裂时间随加载应力幅值的升高而减小, 对于满足工程模型的需求尚可, 但距离预测金属材料在何时何处发生破坏的目标则相距甚远. 因为预测模型需要理解在外载荷环境下微孔洞是如何萌生、长大和聚集的损伤演化动力学规律, 但对加载应力幅值究竟是如何影响分布式微孔洞损伤演化的物理图象和

* 中国工程物理研究院发展基金 (批准号: 2011A 0201002)、国家自然科学基金 (批准号: 11202196) 和国防基础科研计划 (批准号: B1520110003, B1520132013) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: peixiaoyang2000@sina.com

过程还不十分清楚.

针对高纯无氧铜开展了不同加载应力幅值条件下的层裂实验, 并通过实时波剖面测量、软回收样品金相表征获得了不同加载应力幅值条件下的自由面速度曲线和损伤分布特征, 并分析了宏观响应和损伤状态之间的关联. 结果表明: 损伤演化过程中微孔洞的成核对加载应力幅值单一因素不敏感, 但加载应力幅值是微孔洞长大和聚集的主导因素之一.

2 实验原理和方法

2.1 加载应力幅值设计原理

为了获得不同的加载应力幅值, 同时又保证其他参量如加载应变率、拉伸时间等基本一致, 进而研究加载应力幅值单一因素对层裂损伤演化特性的影响, 本文通过控制飞片速度产生不同应力幅值的加载脉冲, 同时保证飞片和样品的厚度不变, 使拉伸应变率和拉伸时间基本不变. 在冲击加载情况下, 加载应力依赖于飞片撞击靶板速度和材料特性^[10]. 当一个飞片以速度 W 与靶碰撞后, 将在飞片和样品中产生冲击波, 如果飞片和靶由同种标准材料制成, 由冲击波的守恒关系可知飞片和靶中的加载应力为

$$p = \rho_0 D u = \rho_0 (C_0 + \lambda u) u = \frac{1}{2} \rho_0 (C_0 + \frac{1}{2} \lambda W) W, \quad (1)$$

其中, ρ_0 为材料初始密度, D 为冲击波速度, u 为粒子速度, c_0 和 λ 为冲击波速度和粒子速度关系式参数.

此外, 本文采用双层靶损伤冻结分层技术^[11]来有效控制同一损伤演化路径下拉伸应力的持续时间, 可获得损伤演化中间环节实验信息. 层裂区域的拉伸时间由声学近似解析计算确定:

$$\Delta t = \frac{h_2 - h_1}{c}, \quad (2)$$

其中, h_1 为第一层靶板厚度, h_2 为第二层靶板厚度, c 为材料声速.

2.2 层裂实验

层裂实验在 $\Phi 100$ mm 口径轻气炮上实施, 实验装置示意图如图 1 所示. 该装置同时实现自由面速度的测量和样品软回收. 弹托和飞片在炮管中加

速, 飞片与靶架之间的测速探针用于飞片击靶前的速度测量. 实验中第二层靶样品直径小于飞片和第一层靶直径, 击靶后飞片和第一层靶被回收桶阻挡, 不能进入回收桶, 避免二次碰撞, 同时在回收桶中填入软性物质, 实现样品的软回收. 采用 DISAR 光学测速技术对自由面速度剖面进行诊断, 采用白光干涉仪对软回收样品进行分析, 可获得样品中微损伤的分布特征、尺寸及数量分布等信息^[12].

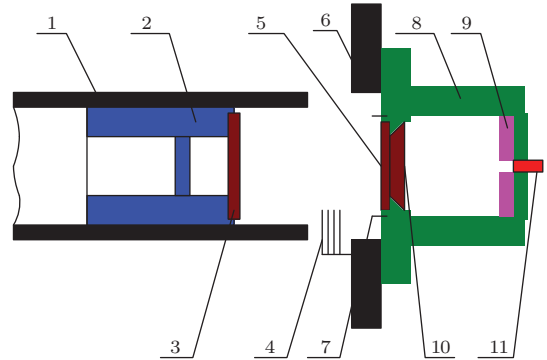


图 1 实验装置示意图 1-炮管; 2-弹托; 3- 飞片; 4-刷子探针; 5-第一层靶; 6-靶架; 7-触发探针; 8-回收桶; 9-真空橡皮; 10-第二层靶; 11-DPS

飞片和靶都为无氧铜, 其力学和冲击波物理特性参数列于表 1. 共开展了三个不同加载应力幅值下的系列层裂实验, 分别为 2.55 GPa, 2.75 GPa 和 3.75 GPa, 其中每个加载应力包括三个拉伸时间, 分别为 0.5 μ s, 1.0 μ s 和 1.5 μ s, 具体实验参数列于表 2.

表 1 OFHC 力学和物理特性

密度/(kg/m ³)	8924
剪模量/GPa	46.6
屈服强度/GPa	0.2
Hugoniot 参量 c_0 /(km/s)	3.91
λ	1.51

表 2 实验条件和参数

实验编号	飞片厚度 /mm	h_{t1} /mm	h_{t2} /mm	碰撞速度 / (m/s)	峰值应力 /GPa	拉伸时间 / μ s
1-1	3.11	2.08	4.02	142	2.61	0.5
1-2	3.07	1.09	5.10	139	2.56	1.0
1-3	3.06	0	6.10	138	2.54	1.5
2-1	3.06	2.08	4.04	149	2.75	0.5
2-2	3.10	1.08	5.05	148	2.73	1.0
2-3	3.06	0	6.05	149	2.75	1.5
3-1	3.08	2.07	4.11	197	3.70	0.5
3-2	3.08	1.09	5.07	202	3.80	1.0
3-3	3.10	0	6.10	198	3.72	1.5

3 实验结果

3.1 自由面速度曲线

图2(a)—(c)是实验的实测自由面速度曲线. 根据自由面速度曲线下降段的斜率(图3(a)所示)可以估算拉伸应变率, 计算公式为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{u}_{f1}}{2c_b} \quad (3)$$

式中, \dot{u}_{f1} 为卸载段的自由面速度变化率, c_b 为体波声速. 采用Novikov^[13]在声学近似条件下提出的层裂强度计算公式计算层裂强度:

$$\sigma_f = \frac{1}{2}\rho_0 c_0 \Delta u_1, \quad (4)$$

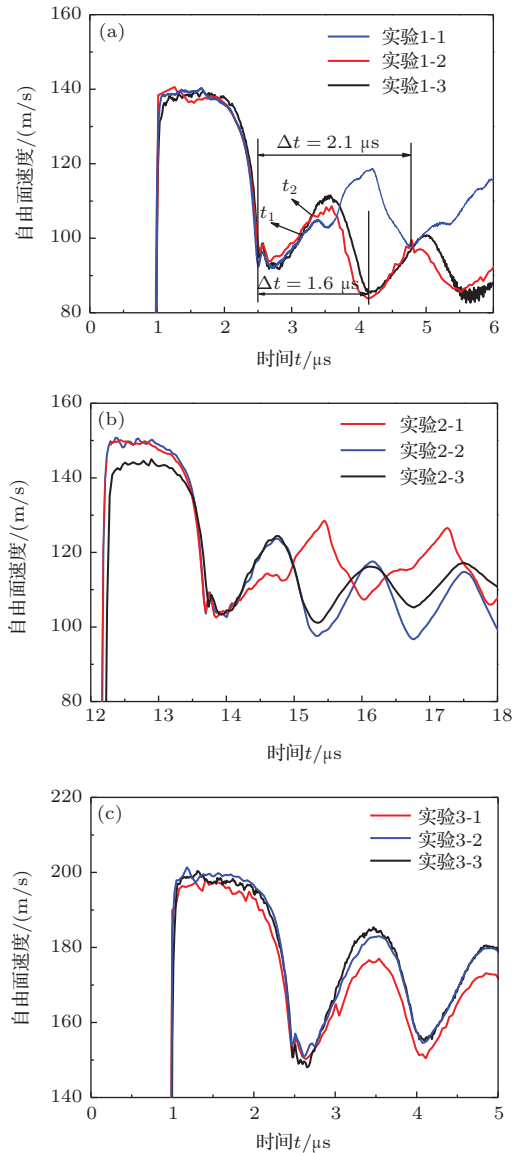


图2 (网刊彩色) 实测自由面速度曲线

式中 Δu_1 为自由面速度最大值与信号第一次反弹时自由面速度最小值之差.

根据(3)和(4)式及实测自由面速度曲线计算的拉伸应变率、层裂强度等参数列于表3. 图3(b)为不同加载应力幅值下自由面速度对比, 图中把自由面速度峰值平台放在同一高度. 结合表3和图3可知, 在不同加载幅值情况下, 速度卸载段几乎重合, 表明随着加载应力幅值升高, 拉伸应变率和层裂强度几乎没有变化. 但是, Pull back之后的速度上升斜率和回跳幅值随着随着加载应力幅值的升高而显著升高.

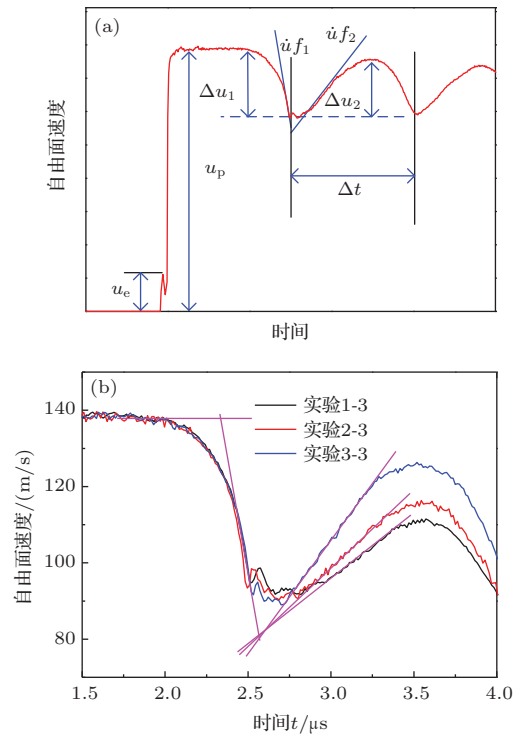


图3 (网刊彩色) 不同加载应力幅值自由面曲线对比 (a) 自由面曲线特征量; (b) 三种加载应力幅值下的速度曲线对比

表3 实测自由面速度剖面特性参数

实验编号	拉伸应变率 / 10^4s^{-1}	层裂强度 / GPa	回跳幅值 / (m/s)	回跳斜率 / (10^7m/s^{-2})
1-1	2.63	0.94	12.27	3.20
1-2	2.81	0.91	14.62	3.20
1-3	2.95	0.92	18.90	3.20
2-1	2.68	0.95	11.61	3.72
2-2	2.65	0.95	20.82	3.72
2-3	2.71	0.96	23.64	3.72
3-1	3.50	0.96	25.55	6.00
3-2	3.70	0.94	31.99	6.00
3-3	3.76	0.95	36.40	6.00

3.2 软回收样品的损伤分析

图4为实验1-1, 2-1和3-1的软回收样品显微照片, 表明在相同拉伸时间情况下, 随着加载应力幅值的升高, 微孔洞尺寸显著增大. 图5(a)为损伤度曲线的空间分布, 可以看出随着加载应力幅值的升高, 损伤分布的宽度和范围几乎不变, 但损伤局域化程度明显加剧; 由图5(b)可知, 孔洞的数量分布也变化不大, 仅是在3.75 GPa情况下的最大孔洞的分布有差异, 这是由于实验3-1发生了孔洞

聚集.

图6给出了三组实验层裂面区域最大损伤度和拉伸时间的关联曲线, 这里假设初始损伤为零. 可以看出, 对于三组实验, 损伤演化速率(损伤度-时间曲线的斜率)都随拉伸时间不断增大, 而且都是在微孔洞发生聚集之后, 损伤度发展速率显著加快. 从三组实验结果的对比来看, 损伤演化速率随加载应力幅值的增大而显著提高, 孔洞发生聚集的时间和断裂时间(从经受拉伸应力到完全断裂的时间)都随加载应力幅值而缩短.

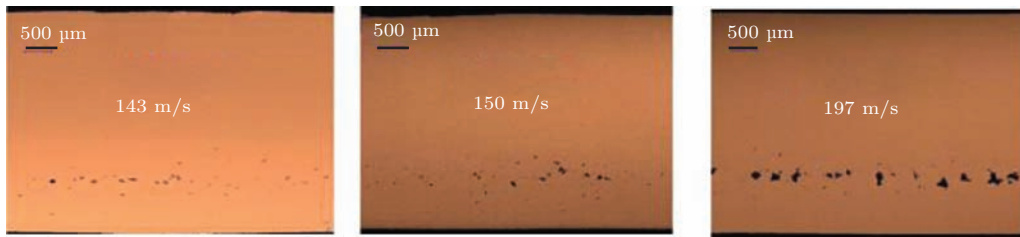


图4 不同加载幅值的软回收样品的损伤分布(实验1-1, 2-1和3-1)

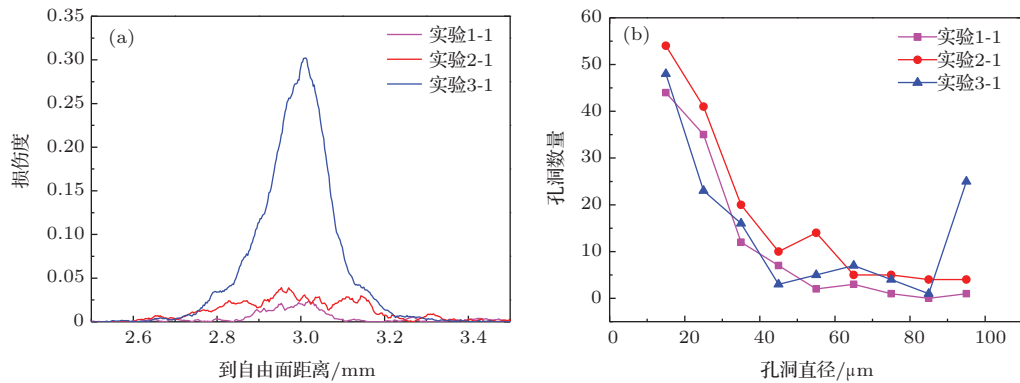


图5 (网刊彩色) 损伤的空间分布和微孔洞孔径分布 (a) 损伤的空间分布; (b) 微孔洞尺寸分布

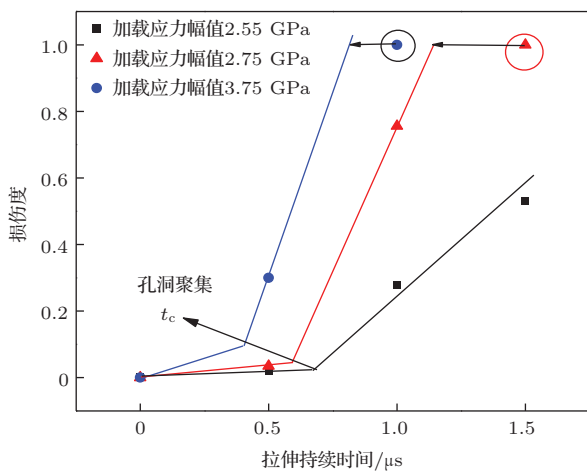


图6 不同加载应力幅值下损伤-拉伸时间关联曲线

4 讨论

综合上述实验结果可知, 随着加载应力幅值的升高, 实测自由面速度上的Pull back回跳斜率变大, 损伤演化速率增大, 这两者之间是相互关联的. Kanel^[14]针对这一阶段, 基于特征线方法建立了自由面速度上升斜率和材料内部损伤演化速率的定性关联, 具体形式如下:

$$\frac{dFSV}{dt} = A(\dot{V}_V - B), \quad (5)$$

式中FSV代表自由面速度, \dot{V}_V 代表损伤演化速率, A和B为材料参数. 上述关系式表明自由面速度中Pull back速度回跳的斜率和损伤演化速率存在

正比关系, 而本文的实验结果验证了这一观点. 由图7的层裂过程的波系分析可知, 自由面速度回跳的这一段响应是由于层裂面发射的压缩波造成的, 而该压缩波是由于损伤演化伴随的能量耗散引起的应力松弛形成的. 因此, Pull back斜率越大, 表明应力松弛越强烈, 能量耗散越剧烈, 损伤度演化速度越快. 同理, 回跳幅值则从一定程度上代表了损伤程度(如表3和图3所示).

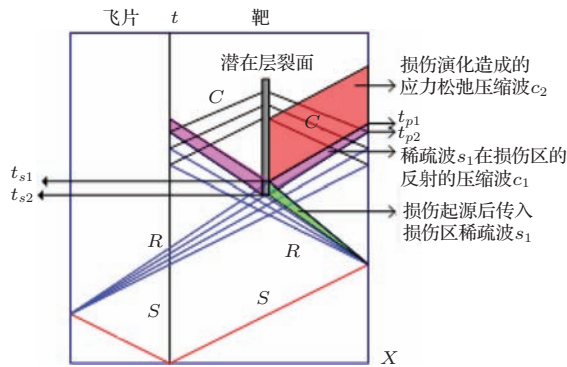


图7 延性金属层裂过程的波系分析

另外, 从本文的实验结果来看, 随着应力幅值的升高, 层裂强度几乎不变, 微孔洞空间分布范围及数量变化不大, 表明在保证其他因素几乎不变情况下, 在该加载应力幅值范围内微孔洞的成核(孔洞密度和空间分布)没有明显改变. 文献[15]的分子动力学模拟结果表明影响微孔洞成核的主要影响因素是加载应变率, 而在本文的实验条件下, 应变率变化并不明显, 所以微孔洞成核分布和层裂强度的变化并不大. 因此, 可以推断微孔洞成核过程对加载应力幅值不敏感.

在微孔洞成核数量一定情况下, 损伤演化速率的差异主要取决于微孔洞的长大速率[16,17]. 因此, 综合上述结果分析可知, 随着加载应力幅值的升高, 微孔洞长大速率显著提高. 对于单孔洞而言, 基于孔洞长大能量的观点[18,19], 其长大过程主要是孔洞周围基体储存的弹性能不断耗散, 转化为塑性功和表面能和动能. 而储存的弹性能是孔洞长大的主要驱动力, 孔洞周围基体材料的强度和孔洞尺寸等耦合构成了孔洞长大的阻力. 随着加载应力幅值的升高, 尽管微孔洞的成核几乎相同, 但成核孔洞周围储存的弹性能随加载应力幅值的升高而显著增大, 造成孔洞长大的驱动力更大, 长大速率自然较快. 因此, 加载应力幅值是动态损伤演化过程中微孔洞长大的主要依赖因素之一.

5 结 论

本文通过实验研究了加载应力幅值对高纯无氧铜对动态损伤演化特性, 获得了不同加载应力幅值条件下的自由面速度曲线和损伤演化特征, 并分析了应力幅值影响损伤演化的物理过程, 得出的结论如下:

1) 随着加载应力幅值的升高, 自由面速度剖面 pull back 信号的回跳幅值和回跳速率都增大; 损伤演化速率升高, 微孔洞发生聚集和断裂的临界时间都减小, 而且两者之间是关联对应的.

2) 在加载应变率基本不变条件下, 微孔洞成核过程对加载应力幅值不敏感, 但随着加载应力幅值的升高, 微孔洞周围储存的弹性能是决定微孔洞的长大速率起主导因素.

参考文献

- [1] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [2] Meyers M A, Aïmone C T 1983 *Progress in Materials Science* **28** 1
- [3] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall Fracture* (New York: Springer-Verlag)
- [4] Koller D D, Hixson R S 2005 *J. Appl. Phys.* **98** 103518
- [5] Belak J, Minich R 2003 UCRL-JC-132650
- [6] Johnson J N, Gray G T, Bourne N K 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4892
- [7] Tuler F R, Butcher B M 1968 *Int. J. Fract. Mech.* **4** 431
- [8] Davison L. 1972 *J. Appl. Phys.* **43** 988
- [9] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 1995 *High-Pressure shock compression of solids II* (New York: Springer-Verlag)
- [10] Jing F Q 1999 *Introduction to Experimental Equation of State* (Beijing: Science) (in Chinese) [经福谦 1999 实验物态方程导引 (北京: 科学出版社)]
- [11] Pei X Y 2013 *Ph. Dissertation D* (Mian Yang: CAEP) (in Chinese) [裴晓阳 2013 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [12] Peng H, Li P, Pei X Y, He H L, Cheng H P, Qi M L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 226201 (in Chinese) [彭辉, 李平, 裴晓阳, 贺红亮, 程和平, 祁美兰 2013 物理学报 **62** 226201]
- [13] Novikov S A 1967 *J. Appl. Meth. Tech. Phys.* **3** 109
- [14] Kanel G, Razorenov S, Bogatch A, Utkin A, Grady D 1997 *Int. J. Impact Eng.* **20** 467
- [15] Belak J 1998 *Journal of Computer-Aided Materials Design* **5** 193
- [16] Zhang F G, Zhou H Q, Zhang G C, Hong T 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 074601 (in Chinese) [张凤国, 周洪强, 张广财, 洪滔 2011 物理学报 **60** 074601]

[17] Wang Y G, Hu J D, Qi M L, He H L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 126201 (in Chinese) [王永刚, 胡剑东, 祁美兰, 贺红亮 2011 物理学报 **60** 126201]

[18] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601

[19] Qi M L, He H L 2010 *Chin. Phys. B* **19** 036201

Study on the effect of peak stress on dynamic damage evolution of high pure copper*

Pei Xiao-Yang^{1)†} Peng Hui¹⁾²⁾ He Hong-Liang¹⁾ Li Ping¹⁾

1) (*Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*State Key Laboratory of Explosion and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

(Received 25 July 2014; revised manuscript received 25 August 2014)

Abstract

Effects of peak stress on the properties of dynamic damage evolution of oxygen free high-pure copper (OFHC) are investigated. The spall fracture experiments are conducted in gas gun, and the damage evolution process is studied using the time-resolved free-surface velocity interferometry, also the post-experiment metallurgical analysis of the soft-recovered samples. It is indicated that, with the increase of peak stress, the spall strength has little changed, but distinct differences are observed in the magnitude and rate of damage at which the velocity rises to the first peak beyond the minima, and the rate of damage evolution increases remarkably. It is concluded that the peak stress is not sensitive to the nucleation of voids, but is one of the most important factors for the growth of voids.

Keywords: spall fracture, peak stress, dynamic damage evolution

PACS: 46.35.+z, 46.50.+a, 02.10.Yn, 33.15.Vb

DOI: 10.7498/aps.64.054601

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2011A0201002), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11202196), and the National High Technology Research and Development Program of China (Grant Nos. B1520110003, B1520132013).

† Corresponding author. E-mail: peixiaoyang2000@sina.com