

高纯铜初始层裂的微损伤特性研究

彭辉 裴晓阳 李平 贺红亮 柏劲松

Micro-damage characteristics of incipient spall in high-purity copper

Peng Hui Pei Xiao-Yang Li Ping He Hong-Liang Bai Jin-Song

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 216201 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.216201

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.216201>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

平面冲击下铜的拉伸应变率相关特性研究

Rate-dependent characteristics of copper under plate impact

物理学报.2014, 63(19): 196202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.196202>

动态损伤演化的空间不连续性实验研究

Experimental study of the spatial discontinuity of dynamic damage evolution

物理学报.2013, 62(22): 226201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.226201>

TiN 薄膜在纳米压痕和纳米划痕下的断裂行为

Fracture behavior of TiN coating under nanoindentation and nanoscratch test

物理学报.2013, 62(13): 136201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.136201>

三角波加载下金属铝动态破坏现象的微观模拟

Microscopic simulation on the dynamic failure of metal Al under triangular wave loading

物理学报.2013, 62(7): 076201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.076201>

基于单孔洞近似的高纯铝部分层裂实验的数值模拟研究

Simulation of incipient spallation experiments of high purity aluminum based on a single void growth model

物理学报.2011, 60(12): 126201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.126201>

## 高纯铜初始层裂的微损伤特性研究\*

彭辉<sup>1)2)</sup> 裴晓阳<sup>1)</sup> 李平<sup>1)2)†</sup> 贺红亮<sup>1)</sup> 柏劲松<sup>1)</sup>

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)

(2015年5月18日收到; 2015年8月26日收到修改稿)

本文对平面冲击加载下高纯铜初始层裂的微损伤特性进行了研究. 利用准三维的表面轮廓测试技术, 对冲击加载“软回收”的样品截面进行测试. 通过对测试数据的重构、量化和统计分析, 结果表明: 拉伸应力持续时间和加载应力幅值的增加, 都会加剧样品内部损伤局域化程度. 样品内损伤区域宽度是亚微米尺度的损伤演化的结果, 并且亚微米尺度的演化速率随着拉伸应变率的增加而单调递增. 通过统计获得了样品内微损伤的尺寸分布特征, 并分析了其与损伤演化进程的关联.

**关键词:** 高纯铜, 初始层裂, 微损伤特征

**PACS:** 62.20.mm, 62.50.Ef, 46.50.+a, 81.40.Np

**DOI:** 10.7498/aps.64.216201

## 1 引言

材料损伤研究是一个经典而独特的主题, 其历史悠久、问题复杂, 但是应用需求强烈. 随着科学技术的发展, 对性能更加优良的材料的需求日益强烈<sup>[1]</sup>, 对材料更加苛刻和严格的要求, 促进了对材料的损伤演化行为的系统而细致的研究, 以期揭示损伤的机理和本质<sup>[2-5]</sup>. 材料损伤问题本身是一个多因素相互耦合的复杂问题, 具有丰富的内涵和重要的学术价值.

层裂作为动态损伤的一种典型形式, 一直是损伤特性和损伤机理研究的重点课题<sup>[6-12]</sup>. 平面冲击下的层裂, 是实验样品中两束相向行驶的稀疏波相互作用, 产生的拉伸应力脉冲超过材料极限时, 激活材料内部非均匀的微结构, 导致损伤形核、增长和聚集的多尺度强耦合的物理力学过程. 已有的研究, 多集中在对宏观动力学特性和微观机理的研

究<sup>[13-16]</sup>, 对于损伤演化面临巨大挑战的介观尺度特性却很少涉及. 1987年, Curran等<sup>[17]</sup>通过对大量实验样品的统计分析, 建立了一套完整的介观损伤量化方法, 并在此基础上建立了著名的形核与增长模型(NAG模型). Qi等<sup>[18]</sup>在Curran的基础上, 简化了介观尺度的损伤量化方法, 并发现了铝样品损伤随加载冲量变化而呈现临界特性. 随着新的测试表征技术在损伤测试上的运用, 损伤的增长演化具有一定的方向性<sup>[19]</sup>, 同一样品中存在着分布的微区不均匀性. 等<sup>[20]</sup>新的规律不断被发现, 并对传统的各项同性的描述模型造成了极大的冲击. 从材料的角度来看, 材料介观尺度的晶粒特征也影响着材料的性能和损伤演化的特征<sup>[21]</sup>. 这些研究, 虽然深化了对材料动态损伤演化的认识, 但是相对于介观尺度所蕴含的丰富的物理图像, 还远远不能满足建立具有高预测能力的物理模型的需求, 因此, 有必要对介观尺度的微损伤特征开展细致的研究, 获得对损伤特征的更为丰富的规律性认识.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11202196, 11532012, 11372294)、国防基础科研计划 (批准号: B1520132013)、冲击波物理与爆炸物理国防科技重点实验室基金 (批准号: 9140C670301150C67290) 和中国工程物理研究院院长基金 (批准号: 201402084) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: lp0703@263.net

本文以多晶高纯无氧铜 (OFHC) 作为样品材料, 在一级轻气炮上开展平面冲击实验. 利用专门设计的实验回收装置, 实现对样品“软回收”, 采用基于白光轴向色差的表面轮廓系统<sup>[22]</sup>对样品截面进行测量, 并对结果进行可视化重构和量化分析, 并重点关注微损伤特性与外在加载条件的关联.

## 2 实验技术与测试方法

本文冲击实验所采用的装置如图 1 所示, 实验中采用  $\Phi 57$  mm 一级轻气炮作为加载设备. 飞片安装在弹托上, 在轻气炮的驱动下, 弹托与飞片获得一定的速度, 经过一段时间的自由飞行后, 飞片与样品发生碰撞. 设计的样品直径小于飞片和弹托直径, 碰撞后, 飞片与弹托被阻挡在回收舱外, 而样品则在回收舱内部飞行, 并最终与回收舱内部的缓冲材料接触, 使得样品的速度逐渐衰减下来, 有效的避免二次撞击对样品造成损伤, 实现对样品的“软回收”. 通过样品前的磁测速线圈, 测试飞片击靶前的速度, 即冲击加载速度. 本文采用对称碰撞形式, 即飞片和样品均采用高纯度的无氧铜 (纯度  $> 99.99\%$ ). 实验所用飞片和样品均在真空炉中加热到  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  保温 1 h, 炉冷去应力退火. 为了调控加载过程中的动力学条件, 本文采用不同的飞片和样品的厚度组合, 对拉伸应力持续时间和应变率进行调控, 相关实验参数和结果列于表 1.

将实验中回收的样品沿着径向对称切割, 对所得的截面研磨、抛光, 获得包含冲击损伤的光滑样品截面. 为了避免边侧稀疏波对测试结果的影响, 选取样品截面中间部分作为测试区域, 如图 2 (a)

所示. 利用光学轮廓测试系统对该区域进行准三维测试 (测试点距为  $3\text{ }\mu\text{m}$ ), 获得其表面轮廓数据, 对获得的数据进行可视化重构, 如图 2 (b) 所示.

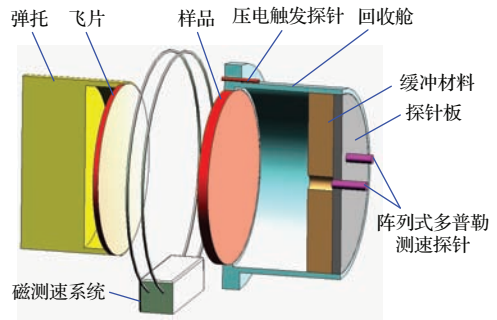


图 1 (网刊彩色) 实验装置示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of experimental configuration.

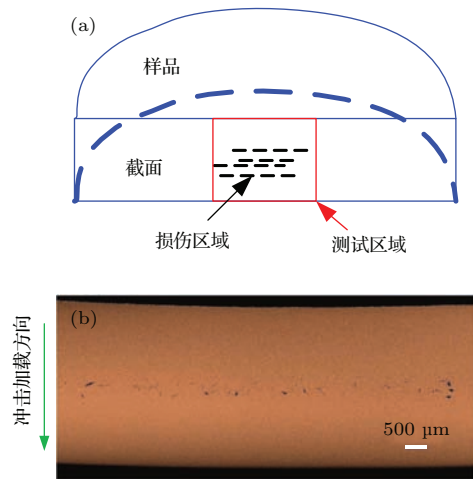


图 2 (网刊彩色) 实验样品截面的测试与重构 (a) 样品测试区域; (b) 实验 7 样品截面轮廓可视化重构图像  
Fig. 2. (color online) Measurement and reconstruction of sample cross-section (a) test area of sample; (b) reconstructed cross-section image of Exp.7.

表 1 高纯铜层裂实验参数和结果

Table 1. Experimental parameters and results of high-purity copper.

实验编号	飞片厚度/mm	样品厚度/mm	击靶速度/(m/s)	加载应力/GPa	拉伸应变率/ $\text{s}^{-1}$	拉伸应力持续时间/ $\mu\text{s}$
1	0.22	0.43	127	2.29	$2.97 \times 10^5$	0.11
2	0.32	0.63	247	4.54	$2.71 \times 10^5$	0.16
3	0.42	0.82	246	4.53	$1.35 \times 10^5$	0.21
4	0.53	1.03	138	2.49	$8.74 \times 10^4$	0.26
5	1.04	2.05	118	2.12	$4.63 \times 10^4$	0.52
6	1.54	3.05	114	2.05	$2.93 \times 10^4$	0.77
7	2.02	4.05	138	2.49	$1.66 \times 10^4$	1.03
8	3.01	6.04	94	1.68	$8.95 \times 10^3$	1.53

### 3 结果与讨论

#### 3.0.1 损伤局域化与动力学条件的关联

损伤度曲线是样品内部损伤状态及损伤局域化程度的体现, 由于实验1—实验4的回收样品中, 并没有见到明显的微损伤, 不能对其损伤进行量化, 因此图3所示为实验5-实验8损伤度曲线. 传统的损伤度曲线在准层裂面处出现最大值, 随着聚集层裂面位置的增加, 损伤度曲线的数值逐渐较小[23]. 但是当样品内损伤处于早期的形核和初始增长阶段时, 受到形核效应和初始增长的尺寸效应影响[22], 实验5—实验8的损伤度曲线呈现出多个峰值的结构, 如图3所示.

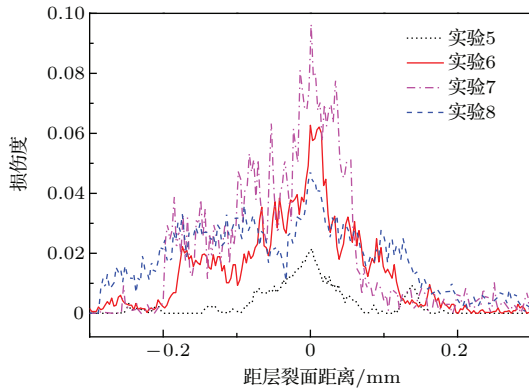


图3 (网刊彩色) 回收样品的损伤量化曲线

Fig. 3. (color online) Damage curves of recovered samples.

实验5与实验6具有相同的冲击加载速度, 但是实验6的拉伸应力持续时间更长. 在长的拉伸应力作用时间下, 一方面, 孔洞的形核是一个连续的过程[17,24], 形核的总数量会更多; 另一方面, 样品内部孔洞有更多的增长时间, 可以长到更大的尺寸. 在形核和增长两方面因素共同作用下, 拉伸应力持续时间越长, 材料内部的损伤程度越严重, 局域化程度越明显, 其最大的损伤度值也更大.

实验7和实验8与实验6相比都增加了拉伸应力持续时间, 所不同的是: 实验7的冲击加载速度为138 m/s, 大于实验6的114 m/s; 而实验8的冲击加载速度为94 m/s, 小于实验6的冲击加载速度. 从损伤度曲线上来看, 实验7的最大损伤度值0.096大于实验6的最大损伤度值0.063; 实验8的最大损伤度值0.047小于实验6的最大损伤度值. 冲击加载速度越大, 冲击波后压力也就越大, 进入拉伸应力状态后, 拉伸应力幅值也越大. 一方面, 对于多

晶材料, 加载应力幅值越大, 材料内部的位错密度越大[25], 潜在形核点更容易形核, 由形核产生的总孔洞数量越多; 另一方面, 孔洞在增长过程中需要一个驱动力, 并且其增长速度随着驱动力增加而单调增加[17], 高的加载应力幅值能够为孔洞增长阶段提供更大的驱动力. 因此, 应力幅值越高, 损伤程度越严重, 局域化越明显.

综上所述, 拉伸应力持续时间和加载应力幅值的增加, 都会加剧样品内部损伤局域化程度.

#### 3.1 微损伤演化的时间相关性分析

材料内部的损伤, 实质为样品内部复杂波系相互作用, 当满足损伤发展演化临界条件时, 微结构随之演化的结果. 图3损伤度曲线显示, 不同的实验样品截面上损伤区域宽度存在着比较明显的差异. 显然, 处于损伤区域的样品是满足损伤演化临界条件的, 在损伤区域以外的样品则不满足损伤演化的临界条件. 而实验1—实验4的样品中并没有观测到明显的损伤, 可以推断其不满足演化的临界条件.

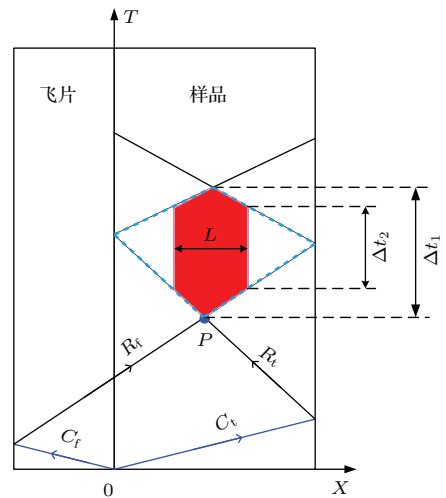


图4 (网刊彩色) 损伤区域宽度与演化临界关联的示意图

Fig. 4. (color online) Relationship between damage width and criticality of damage evolution.

图4所示为平面冲击加载下, 实验样品内部波相互作用示意图简图. 当飞片与样品发生碰撞时, 在碰撞面产生的冲击波 $C_f$ 和 $C_t$ 分别向飞片和样品中传播. 当这两个相背传播的冲击波, 到达各自的自由面时, 将在飞片自由面反射稀疏波 $R_f$ , 在样品自由面反射稀疏波 $R_t$ . 两束相向行驶的稀疏波在样品中 $P$ 点交汇, 在交汇之后样品内部处于拉伸应

力状态, 图中虚线框内即为拉伸应力区. 由于损伤的发展演化, 需要拉伸应力超过临界应力条件, 并且经过一定时间的孕育<sup>[26]</sup>. 如图4所示,  $\Delta t_1$  为实验设计上的理论最大拉伸应力持续时间, 满足

$$\Delta t_1 = \frac{h}{c}, \quad (1)$$

其中  $h$  为样品厚度,  $c$  为平均声速. 当样品内部损伤区域宽度为  $L$ , 其对应的损伤演化的临界孕育时间  $\Delta t_2$  为

$$\Delta t_2 = \left(1 - \frac{L}{2h}\right)\Delta t_1 = \left(1 - \frac{L}{2h}\right)\frac{h}{c}. \quad (2)$$

图5所示三角图标, 是通过测试回收样品截面上损伤区域宽度, 计算所得的临界孕育时间与样品厚度之间的关系, 经拟合

$$\Delta t_2 = 0.2h + 0.052. \quad (3)$$

只有当理论上的最大拉伸应力持续时间大于临界孕育时间时, 才能从截面上观测到损伤 (实验5—实验8). 图5中空圆图标, 为拟合的实验1—实验4的临界孕育时间, 除实验4的孕育时间与最大拉伸应力持续时间非常接近外, 其余三发实验的最大拉伸应力持续时间均小于孕育时间, 即拉伸应力对样品内部作用时间不足以产生可观测的微损伤, 因此实验1—实验4中不能观测到损伤.

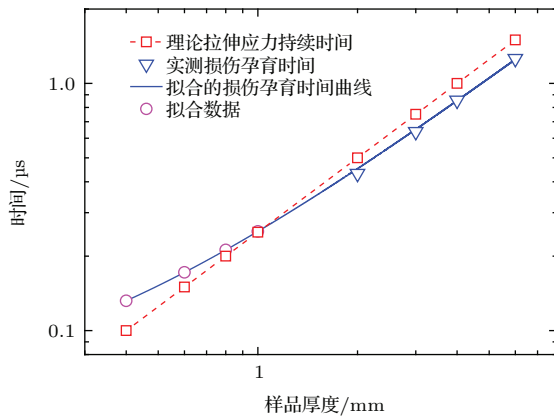


图5 (网刊彩色) 微损伤演化的时间相关性特征  
Fig. 5. (color online) Temporal characteristics of micro-damage evolution.

需要指出的是, 损伤的演化行为起源于原子尺度的点阵缺陷<sup>[14]</sup>, 而上述测试手段所能观测到的极限尺度在  $\mu\text{m}$  量级, 因此所观测的孔洞实际上是包含了亚微米尺度的孔洞增长. 也就是说损伤孕育时间内的微结构演化, 包含微孔洞的形核以及微孔

洞增长的到微米尺度的过程. 对于本文实验, 随着样品厚度的减小, 临界孕育时间越短, 即损伤增长到微米尺度所需时间越短, 其亚微米尺度的损伤演化速率越快. 而样品厚度的减小, 在宏观动力学条件上主要表现为拉伸应变率的升高, 表1所示. 由此不难推断; 亚微米尺度的损伤演化速率是随着拉伸应变率的增加而增加.

### 3.1.1 微孔洞分布规律

受损样品内部的孔洞分布规律, 是损伤演化过程与外加场相互关系的直接证据, 也是建立损伤演化物理模型的重要参数<sup>[27]</sup>. 图6所示为实验5—实验8样品截面上孔洞面密度分布. 基于光学轮廓测试精度, 这里只对样品截面上所有平均直径大于  $10 \mu\text{m}$  的孔洞进行统计, 考虑到平均直径大于  $60 \mu\text{m}$  的孔洞数量很少, 在统计中按照  $60 \mu\text{m}$  计数. 可以看到, 孔洞的面密度数随着平均尺寸的增加而单调减小, 这与 Strachan 等<sup>[28]</sup> 利用分子动力学计算的孔洞早期分布结果一致.

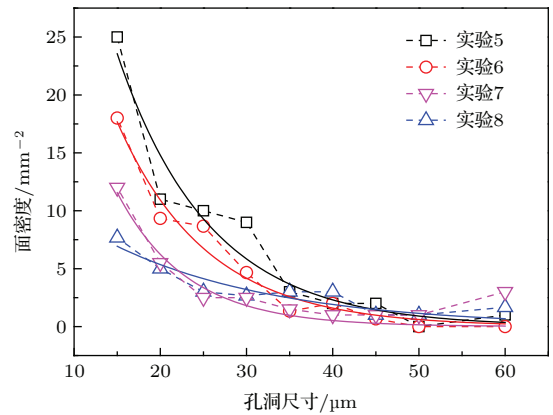


图6 (网刊彩色) 微孔洞面密度分布  
Fig. 6. (color online) Density distribution of micro-voids.

孔洞的形核是拉伸应力激活了材料内部非均匀的微结构, 其对拉伸应变率有强依赖性<sup>[29,30]</sup>. 应变率敏感性将延迟材料力学失稳的起始条件, 应变率的增加将导致损伤发展演化需要更高的临界应力, 这个高的临界应力使得材料内部的位错密度增加, 更多的滑移系被启动, 更多潜在的形核点能够形成孔洞, 形核的饱和程度越高. 因此, 随着应变率的增加, 实验样品的形核密度逐渐增加. 由图6可以看出, 应变率越高的实验样品其微孔洞面密度曲线位置越高, 即单位面积上的孔洞数量越多.

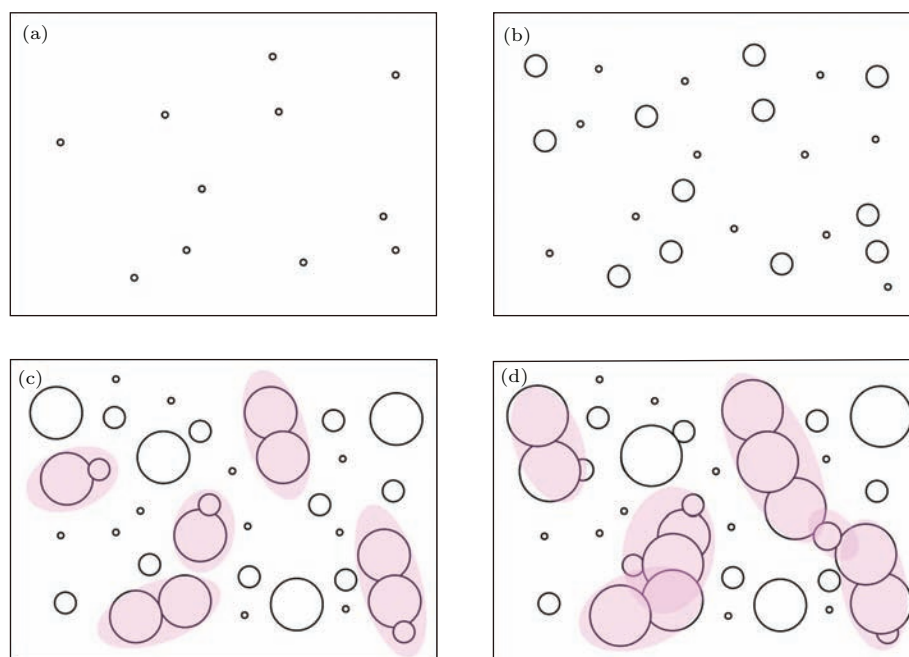


图7 (网刊彩色) 损伤演化过程的拓扑形态 (a) 微孔洞的形核; (b) 微孔洞的增长; (c) 微孔洞聚集演化初期; (d) 微孔洞聚集演化后期

Fig. 7. (color online) Topological characteristic during damage evolution: (a) Nucleation of micro-voids; (b) growth of micro-voids; (c) early stage of voids coalescence; (d) late stage of voids coalescence.

高强动载下延性金属的动态损伤包含微孔洞的形核、增长和聚集三个阶段, 每个阶段的演化均包含微孔洞数量或者尺寸的变化. 因此, 样品内部孔洞的分布是一个随损伤演化物理过程变化的. 如图7所示, 当处于损伤演化的初期, 即孔洞形核和增长阶段时, 受到材料微区织构和力学状态影响, 孔洞形核有先后, 其数量分布满足随着尺寸的增加逐渐减小, 如图6所示. 随着损伤的发展演化, 部分孔洞之间开始相互聚集, 如图7(c)所示. 孔洞的密度分布随着尺寸的增加呈现出先减小后增加的格局<sup>[28,31]</sup>. 当损伤局域化程度进一步加剧, 大尺度的孔洞相互连接, 形成更大的孔洞或者断裂面, 如图7(d)所示. 其结果将会导致大孔洞数量的减小, 最大孔洞的尺寸急剧增加, 损伤局域化进一步加剧. 综上所述, 样品内部孔洞分布的规律是依赖于损伤演化的物理过程的.

## 4 结 论

本文以高纯无氧铜为样品材料, 在一级轻气炮上开展平面冲击实验, 利用专门的实验回收装置, 获得了“软回收”的实验样品. 采用光学轮廓测试系统对回收样品截面进行了准三维测试, 通过数值重构和统计分析研究了高纯铜初始层裂的微损伤

伤特性. 样品内部微损伤是在外加场作用下, 非均匀的微结构演化的结果, 拉伸应力持续时间和加载应力幅值的增加, 都会加剧样品的损伤局域化程度. 通过对实验数据的拟合, 获得了损伤临界孕育时间与样品厚度之间的关系, 并指出亚微米尺度的损伤演化速率随着拉伸应变率的增加而增加. 以统计的孔洞分布为基础, 解读了微损伤分布与损伤演化进行之间的关联.

## 参考文献

- [1] Lu K 2010 *Science* **328** 319
- [2] Chen M W, McCauley J W, Dandekar D P, Bourne N K 2006 *Nat. Mater.* **5** 614
- [3] Kawamura H, Hatano T, Kato N, Biswas S, Chakrabarti B K 2012 *Rev. Mod. Phys.* **84** 839
- [4] Sagis L M C 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 1367
- [5] Zhang Z F, Wang Z G 2008 *Prog. Mater. Sci.* **53** 1025
- [6] Han W Z, An Q, Luo S N, Germann T C, Tonks D L, Goddard W A 2012 *Phys. Rev. B* **85** 024107
- [7] Jarmakani H, Maddox B, Wei C T, Kalantar D, Meyers M A 2010 *Acta Mater.* **58** 4604
- [8] Kanel G I 2010 *Int. J. Fracture* **163** 173
- [9] Lebensohn R A, Escobedo J P, Cerreta E K, Dennis-Koller D, Bronkhorst C A, Bingert J F 2013 *Acta Mater.* **61** 6918
- [10] Mayer A E, Krasnikov V S 2011 *Eng. Fract. Mech.* **78** 1306

- [11] Shao J L, Wang P, He A M, Zhang R, Qin C S 2013 *J. Appl. Phys.* **114** 173501
- [12] Wang Y G, He H L, Wang L L 2013 *Mech. Mater.* **56** 131
- [13] Cuitino A M, Ortiz M 1995 *Acta Mater.* **44** 427
- [14] Fensin S J, Escobedo-Diaz J P, Brandl C, Cerreta E K, Gray III G T, Germann T C, Valone S M 2014 *Acta Mater.* **64** 113
- [15] Razorenov S V, Zaretsky E B, Savinykh A S 2014 *Journal of Physics: Conference Series* **500** 112053
- [16] Whelchel R L, Sanders T H, Thadhani N N 2014 *Scr. Mater.* **92** 59
- [17] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [18] Qi M L, Luo C, He H L, Wang Y G, Fan D, Yan S L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 043506
- [19] Kondrokhina I N, Podurets A M, Ignatova O N, Nadezhin S S, Skokov V I, Malyshev A N, Bat'kov Y V 2012 *19th European Conference on Fracture* p1
- [20] Bontaz-Carion J, Pellegrini Y 2006 *Adv. Eng. Mater.* **8** 480
- [21] Qi M L, Zhong S, He H L, Fan D, Zhao L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 046203
- [22] 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]
- [23] Qi M L, Bie B X, Zhao F P, Hu C M, Fan D, Ran X X, Xiao X H, Yang W G, Li P, Luo S N 2014 *AIP Advances* **4** 077118
- [24] Peng H, Li P, Pei X Y, He H L, Qi M L 2013 *Opt. Pre. Eng.* **21** 3008 (in Chinese) [彭辉, 李平, 裴晓阳, 贺红亮, 祁美兰 2013 光学精密工程 **21** 3008]
- [25] Williams C L 2012 *Ph. D. Dissertation* (Baltimore, Maryland: Johns Hopkins University)
- [26] Tuler F R, Butcher B M 1968 *Int. J. Fracture* **4** 431
- [27] Molinari A, Wright T W 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 1476
- [28] Strachan A, Çaın T, Goddard W 2001 *Phys. Rev. B* **63** 060103
- [29] Belak J 1998 *J. Comput.-Aided Mater.* **5** 193
- [30] Reina C, Marian J, Ortiz M 2011 *Phys. Rev. B* **84** 104117
- [31] Pei X Y 2013 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [裴晓阳 2013 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]

# Micro-damage characteristics of incipient spall in high-purity copper\*

Peng Hui<sup>1)2)</sup> Pei Xiao-Yang<sup>1)</sup> Li Ping<sup>1)2)†</sup> He Hong-Liang<sup>1)</sup> Bai Jin-Song<sup>1)</sup>

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 18 May 2015; revised manuscript received 26 August 2015 )

## Abstract

Dynamic damage of material is a complex process that is dependent on lots of effects on a mesoscale, including grain size, morphology and micro-voids. In order to study the shocked lead micro-damage characteristics in oxygen-free high-purity copper, the variational thickness values of flyers and samples are designed to vary pulse duration and strain rate in plate-impact experiment, and the special recovery chamber and surface profile measurement system are used for soft-recovery and cross-section measure respectively. Based on the reconstruction, quantitative and statistical analysis, it is found that the longer pulse duration and higher shock loading stress bring about more serious local damage in oxygen-free high-purity copper. The measurable damage width of sample cross-section results from the damage evolution on a sub-micron scale. Critical evolution time of sub-micron is observed to decrease with strain rate increasing, suggesting that damage evolution speed of sub-micron becomes faster as strain rate increases. The void size distribution of recovered sample is presented, and the topological characteristic transition accompanied with nucleation, growth, and coalescence processes of microscopic voids is also discussed. Through a comparison of difference between this work and the literature of previous research, a physical explanation of voids size distribution characteristics of oxygen-free high-purity copper is presented.

**Keywords:** high-purity copper, incipient spall, characteristics of micro-damage

**PACS:** 62.20.mm, 62.50.Ef, 46.50.+a, 81.40.Np

**DOI:** 10.7498/aps.64.216201

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11202196, 11532012, 11372294), National Defense Basic Scientific Research program of China (Grant No. B1520132013), the National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics (Grant No. 9140C670301150C67290), and the Foundation of President of China Academy of Engineering Physics (Grant No. 201402084).

† Corresponding author. E-mail: [lp0703@263.net](mailto:lp0703@263.net)