

平面冲击下铜的拉伸应变率相关特性研究*

彭辉¹⁾²⁾ 李平^{1)2)†} 裴晓阳²⁾ 贺红亮²⁾ 程和平²⁾ 祁美兰³⁾

1) (北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

2) (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)

3) (武汉理工大学理学院, 武汉 430070)

(2014年4月21日收到; 2014年7月2日收到修改稿)

本文对冲击加载下高纯无氧铜的拉伸应变率相关特性进行了实验研究. 实验中利用磁测速系统测试撞击前飞片速度, 利用光纤位移仪——多普勒探针系统测试样品自由面粒子速度剖面. 对自由面速度剖面的特征参量进行计算分析, 结果表明: 铜样品的层裂强度随着拉伸应变率的增加而增加, 对比发现层裂强度不仅受加载条件的影响, 同时受到材料本身微细观结构影响; 同时随着拉伸应变率的增加, 自由面速度的回跳斜率呈现出先缓慢增加后迅速增加的临界特性; 最后, 通过层裂样品中波系相互作用, 给出了自由面速度回跳过程中的振荡特征随着拉伸应变率增加而逐渐消失的物理过程.

关键词: 高纯无氧铜, 层裂, 自由面速度, 率相关特性

PACS: 62.20.mm, 62.20.fk, 62.20.M-, 62.50.Ef

DOI: 10.7498/aps.63.196202

1 引言

率相关特性是材料动态损伤演化区别于准静态损伤的重要标志. 随着航空航天、国防科技以及汽车工业等领域的发展, 对材料在动态加载下的率相关特性研究提出了现实需求^[1,2]. 作为一种易于实现理论与实验比对的典型动态损伤形式, 层裂一直是材料动态损伤研究和损伤演化机理研究的热点^[3-8]. 平面冲击下的层裂是由飞片和样品的自由面分别反射的稀疏波在材料内部作用产生拉伸应力, 当拉伸应力超过材料极限时, 损伤在拉伸区域开始发展演化直到断裂. 系统而深入的理解材料的率相关特性, 是材料在未来更加苛刻条件下应用的基石.

受到原位-实时测量技术发展的限制, 目前层裂的实验研究主要从两个方面展开: 分析解读自由面速度历史或材料内部应力历史^[9-12]以及对回

收样品表征测试和统计分析^[13-15]. 自由面速度历史是应力波在样品中相互作用的重要体现. Chen等^[16]通过对铝材料的自由面剖面分析, 获知了铝的层裂强度是受到材料初始微结构、加载应力等因素综合作用. Qi等^[17]在铝材料中观察到了不同的自由面速度回跳曲线. 然而, 这些材料是否是延性行金属的一个共有特性, 并没有有得到证实, 同时由于自由面速度蕴含着丰富的损伤状态和损伤演化信息, 对其进行深入分析和解读是非常必要的, 也是获得损伤信息的重要手段之一.

本文选用纯度大于99.99%的高纯无氧铜 (OFHC) 作为实验材料, 通过改变飞片和样品厚度在一级轻气炮上开展不同应变率的实验, 并且采用磁测速系统测量飞片的冲击速度, 利用光纤位移仪——多普勒探针系统 (DPS) 测量样品后自由面多点速度历史. 对自由面速度历史进行了分析和解读, 着重关注了层裂强度、回跳斜率等自由面特征.

* 中国工程物理研究院科学基金重点项目 (批准号: 2011A0201002) 和国家自然科学基金 (批准号: 11202196, 11172221) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lp0703@263.net

2 实验技术与方法

2.1 实验方法

实验在 $\Phi 57$ mm 一级轻气炮上完成, 装置原理如图 1 所示. 飞片与样品之间的磁测速系统用于飞片击靶前的速度测量, 其基本原理是利用示波器测试金属飞片通过两匝距离为 50 mm 的线圈时的电信号, 利用两个信号的时间差, 计算出飞片的速度. 实验采用对称碰撞方式, 即飞片与样品均为纯度大于 99.99% 的无氧铜, 其主要杂质及含量 (%) 如下: P(0.0003), Bi(0.0003), Sb(0.0004), As(0.0005), Fe(0.001), Ni(0.001), Pb(0.0005), Sn(0.0002), Zn(0.0001), O(0.0005). 阵列式 DPS 用于测量样品后自由面历史. 为了保证信号具有较好的信噪比, 样品后自由面经过研磨抛光处理来提

高反光度. 实验中, 采用不同的飞片和样品的厚度组合, 改变飞片后自由面反射的稀疏波到达样品自由面的距离, 在样品自由面上得到不同的稀疏波扇形区宽度, 即不同的卸载时间, 从而获得不同的拉伸应变率, 相关实验参数列于表 1.

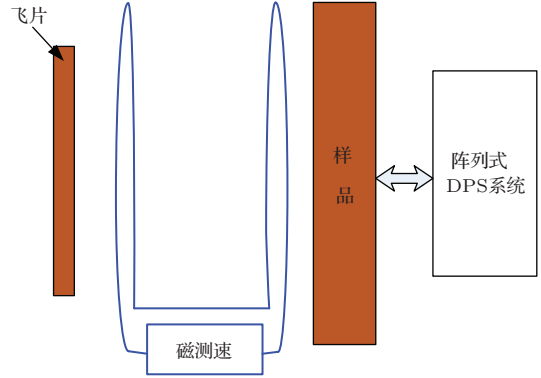


图 1 (网刊色彩) 测试装置示意图

表 1 无氧铜层裂实验参数和结果

实验编号	飞片厚度/(mm)	样品厚度/(mm)	飞片速度/(m/s)	应变率 /s ⁻¹	层裂峰值速度/(m/s)	回跳斜率 /s ⁻¹	层裂强度/GPa
1	0.32	0.63	247	2.71×10^5	34.5	7.074×10^4	1.39
2	0.42	0.82	246	1.35×10^5	38.07	5.434×10^4	1.30
3	0.53	1.03	138	8.74×10^4	18.61	3.178×10^4	1.08
4	1.04	2.05	118	4.63×10^4	11.70	5.31×10^3	0.85
5	1.54	3.05	114	2.93×10^4	13.79	4.06×10^3	0.72
6	2.02	4.05	138	1.66×10^4	17.01	3.93×10^3	0.71

2.2 自由面速度剖面基本特征

图 2 为典型的自由面速度剖面, 剖面上的第一个峰值到第一个极小值之间的差值为回跳速度 (Δu_{pb}), 第一个极小值与第二个峰值之间的差值为层裂峰值速度 (Δu_{sp-pk}), 计算冲击加载下材料的拉伸应变率的公式为

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2c_b} \frac{\Delta u_f}{\Delta t}, \quad (1)$$

其中 c_b 是材料的体波声速, 对于本文采用的 OFHC 为 3940 m/s, Δu_f 为卸载段的自由面速度差, Δt 为卸载段的时间差. 然而, 对于实际的自由面速度剖面, 难以找到其对应的拉伸应力起点. 因此采用自由面上速度最大值和第一个极小值之间的速度差和时间差, 来计算平均应变率 [18-20], (1) 式改写为

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2c_b} \frac{\Delta u_{pb}}{\Delta t_1}. \quad (2)$$

同时, 为了对自由面速度剖面展开系统的讨论, 本文还对自由面速度回跳斜率, 即极小值到峰值速度之间的斜率进行计算, 其公式如下:

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2c_b} \frac{\Delta u_{sk-pk}}{\Delta t_2}. \quad (3)$$

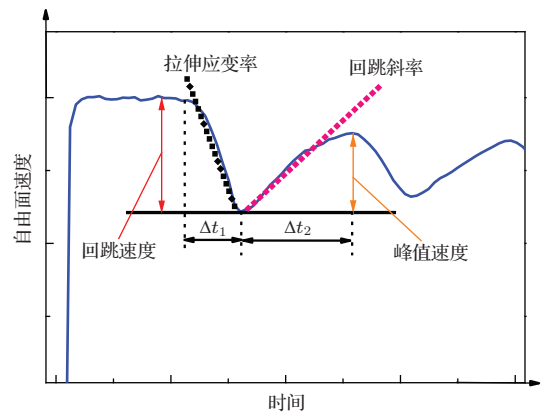


图 2 (网刊色彩) 典型自由面速度随时间变化剖面示意图

3 结果与讨论

实验测得的自由面速度剖面如图3所示, 从峰值速度来看实验1与实验2峰值速度相当大约为245 m/s, 实验3与实验6峰值速度相同为138 m/s, 实验4和实验5速度相当约为115 m/s. 从图中可以看出, 随着样品厚度的增加, 自由面速度峰值平台的持续时间逐渐增加. 这是由于随着样品厚度的增加, 飞片后自由面反射的稀疏波到达样品自由面的距离增加, 在相同加载速度下, 导致自由面速度衰减的稀疏波波头到达自由面的时间增加, 所以自由面速度的衰减需要等待更长的时间, 自由面速度测量上表现为峰值平台随着样品厚度的增加而增加.

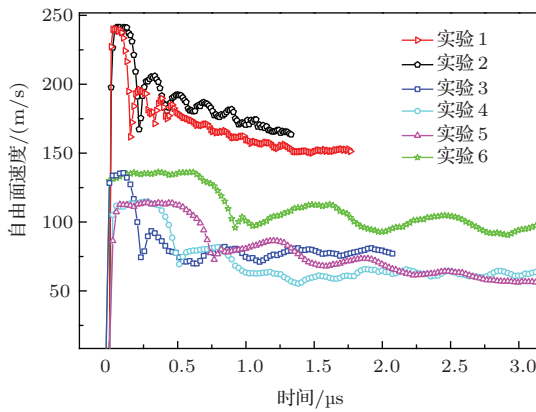


图3 (网刊色彩) 实验测得自由面速度剖面

3.1 层裂强度分析

层裂强度是材料动态损伤的重要参数之一, 由于在平面冲击实验中不能测量到真实的强度, 因此采用基于声学近似的层裂强度计算公式^[21,11]

$$\sigma_s = \frac{1}{2} \rho_0 c_b \Delta u_{pb}, \quad (4)$$

其中 ρ_0 为材料的初始密度. 采用(4)式所计算的层裂强度均列于表1中.

在不同的加载条件下, 材料表现出不同的强度性质的结论受到广泛的认可^[22,23]. 图4为本文实验的层裂强度随着加载应变率的变化. 不难发现层裂强度与冲击加载速度没有明确的对应关系, 即层裂强度不是一个仅仅受到加载速度影响的参量. 从图中可以看出, 层裂强度随着加载应变率的增加而单调增加, 由(2)不难推断出就加载条件而言, 层裂强度是加载速度和应力脉冲时间综合作用的结果.

即层裂强度并不是材料本身的一个内禀参数, 受到加载条件的变化而变化. 文献[3]给出了铜材料的层裂强度与加载应变率的经验拟合公式

$$\sigma_s = 0.15 \times \dot{\epsilon}^{0.2}. \quad (5)$$

利用数值方法, 对本文实验数据进行拟合, 得到

$$\sigma_s = 0.046 \times \dot{\epsilon}^{0.275}. \quad (6)$$

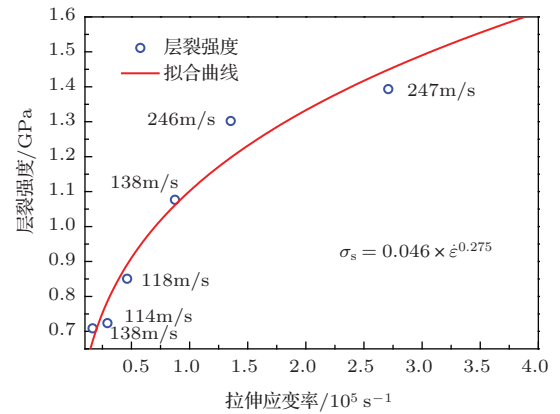


图4 (网刊色彩) 层裂强度与应变率关系

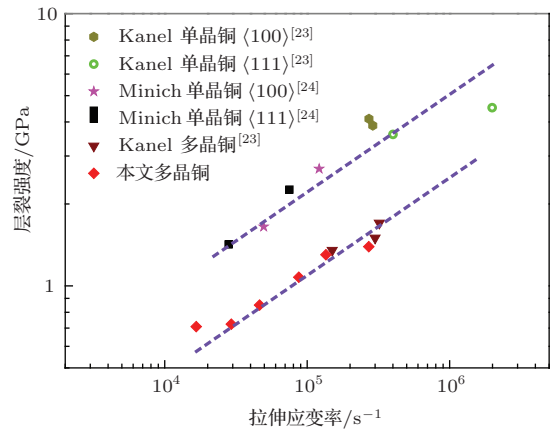


图5 (网刊色彩) 不同魏结构铜材料的层裂强度与应变率关系

(5)式和(6)式的拟合参数存在比较大的差别. 为了寻找到造成这种差距的原因, 将本文实验数据与前人研究结果^[24,25]进行对比, 如图5所示. 本文实验结果与Kanel多晶铜实验结果具有较高的符合性, 从而排除了本文实验条件和实验状态对拟合参数的影响. 在对数坐标下多晶铜的层裂强度随着应变率的变化呈现出线性规律. 虽然单晶铜也存在相似的规律, 但是在相同应变率下, 单晶铜的层裂强度远大于多晶铜. 即层裂强度受到材料初始微观结构的影响. 即使是同一种材料, 其微观结构不同,

表现出来的力学响应也是不同的. 因此对材料的力学响应分析需要综合考虑材料的微细观结构和加载条件. 不难推断, OFHC的层裂强度也是受到初始微结构、加载应力, 加载脉冲和应变率的综合影响.

3.2 回跳斜率分析

将自由面速度第一个极小值点作为原点, 层裂峰值速度所对应的点为终点, 即图 2 所示 Δt_2 范围内的自由面速度剖面进行对比, 如图 6 所示. 可以看出层裂峰值速度没有明确的变化趋势, 但是随着样品和飞片厚度的增加, 即加载应变率的减小, 曲线放缓, 斜率逐渐减小.

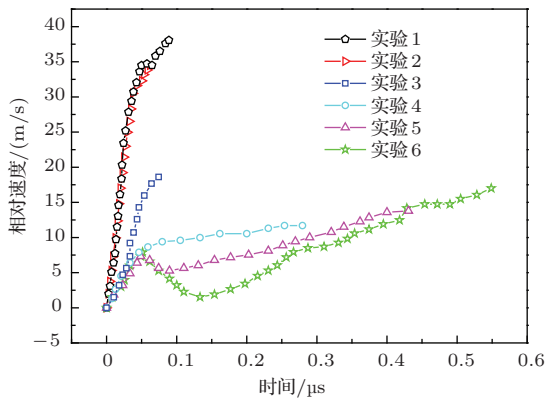


图 6 (网刊彩色) 极小值之后的自由面速度剖面

图 7 给出了高纯无氧铜的自由面速度的回跳斜率与拉伸应变率的关系. 其中回跳斜率利用 (3) 计算得到, 计算结果列于表 1. 从图中看出, 随着应变率的增加回跳斜率是发展变化的. 低应变率下, 回跳斜率随应变率增长较为缓慢, 近似为线性增加, 如图中虚线所示, 其增长近似满足

$$\dot{\epsilon}_b = 2960 + 0.0479 \times \dot{\epsilon}. \quad (7)$$

在高应变率时, 回跳斜率随着应变率的增加, 迅速增加, 采用幂指数形式拟合实验结果, 得到

$$\dot{\epsilon}_b = 907 \times (\dot{\epsilon} - 59820)^{0.357}. \quad (8)$$

两种不同演化规律的过渡点, 即回跳的临界点. 本文拟合的临界点的回跳斜率约为 60000 s^{-1} , 对应的应变率约为 5800 s^{-1} .

Kanel [26] 对铝和镁的层裂特性分析, 建立了自由面速度回跳斜率与损伤演化成正比的线性定性关系:

$$\dot{D} \propto \dot{\epsilon}_b, \quad (9)$$

其中 \dot{D} 为样品中孔隙率的增长率. 结合本文实验结果, 我们可以推断出, 存在一个临界的拉伸应变率, 当拉伸应变率低于临界值时, 铜的损伤演化速率随应变率的增加而缓慢增加, 当拉伸应变率大于临界值时, 铜的损伤演化速率随着应变率的增加而迅速增加, 并且呈现出幂指数关系.

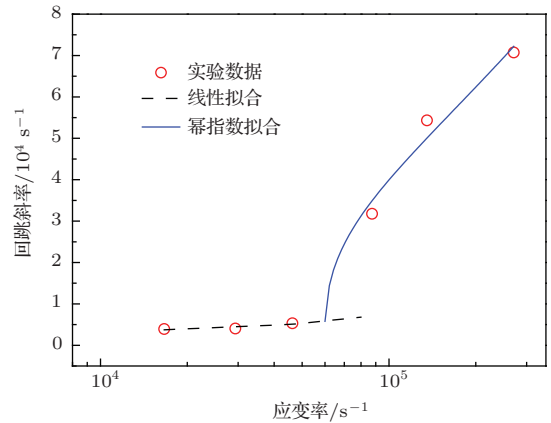


图 7 (网刊彩色) 应变率对铜样品回跳速率的影响

3.3 回跳振荡特征分析

从图 6 中极小值之后的自由面速度剖面可以看出, 对于低应变率的实验 5 和实验 6 在回跳时, 自由面速度经历了先增加, 后减小, 最后在增加的一个振荡过程, 应变率较高的实验 4 虽然没有明显的振荡过程, 但是其回跳斜率呈现了明显的拐折, 先是快速回跳, 然后缓慢回跳, 这与 Escobedo 等 [27] 实验结果相符合. 然而高应变率的实验 1, 实验 2 和实验 3 在回跳过程中既没有明显的震荡也没有拐折. 也就是说随着拉伸应变率的增加, 自由面速度回跳过程中的振荡特征逐渐消失.

如图 8 所示, 当飞片撞击到样品靶上时, 从撞击面分别向飞片和样品中产生一个冲击波 C, 冲击波到达飞片自由面将反射一个右行稀疏波, 当冲击波到达样品自由面时将反射一个左行稀疏波, 同时自由面速度在此时刻 (t_0) 跳跃到最大值. 在 t_0 到 t_1 这个时间段内, 由于没有波作用于样品自由面, 因此自由面速度保持不变. 在 t_1 时刻右行的第一道稀疏波到达自由面, 粒子速度开始下降. 在 t_2 时刻由左行稀疏波在碰撞界面上反射的右行压缩波到达自由面, 自由面速度开始上升, 直到最后一道右行压缩波作用于自由面时 (t_3) 截止.

然而对于真实的材料而言, 材料内部的损伤的发展将影响到自由面粒子速度的一些特征. 首先,

对于较低的拉伸应变率来说, 在冲击加载下材料内部出现损伤的发展和演化, 在此过程中伴随着应力松弛, 应力松弛将会向周围发出一个压缩波 c_1 , 当 c_1 到达自由面时 (t_{C1}), 自由面速度会增加, 但是随着后续稀疏波的到达, 自由面粒子速度将会再次下降, 直到碰撞界面反射的右行压缩波到达. 从自由面粒子速度上来看, 这个波系相互作用表现为粒子速度在回跳时的一个振荡, 这个与本文实验 5 和实验 6 的结果相符合.

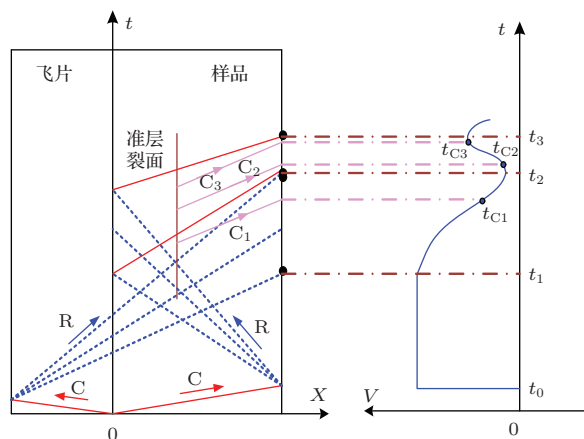


图 8 (网刊彩色) 冲击加载下同样品内部波系相互作用

随着拉伸应变率的增加, 样品内部开始损伤演化的临界条件将更为苛刻, 即需要增加拉伸应力强度和拉伸脉冲持续时间. 实验 4 与实验 5 相比具有相当的冲击加载速度, 更高的拉伸应变率. 因此其发生损伤演化的时刻要晚于实验 5, 其应力松弛作用产生的压缩波 c_2 , c_2 到达样品自由面的时刻为 t_{C2} , 为 t_2 与 t_3 之间靠前时刻, 在 t_{C2} 到达自由面之前, 已经有右行压缩波开始作用于自由面, 因此, 应力松弛产生的压缩波将使得自由面速度回跳斜率增加, 当应力松弛的压缩波作用结束以后, 自由面粒子速度的回跳斜率将减小. 即自由面粒子速度的回跳表现为先快后慢, 如图 6 中实验 4 所示, 这也与 Chen^[16] 和 Escobedo 等^[27] 的实验结果符合.

拉伸应变率的进一步增加, 由应力松弛作用形成的压缩波 (c_3) 越晚, 到达样品自由面的时刻 t_{C3} 为 t_2 与 t_3 之间靠后的时刻, 其对自由面粒子速度的影响表现为增加回跳后半部分的斜率, 即自由面回跳表现为先慢后快的特征. 然而, 此时应变率足够高, 平面冲击加载的实验条件对材料内部难以产生较大损伤, 因此应力松弛的产生的压缩波对自由面速度影响较弱, 本文实验 1, 实验 2 和实

验 3 就是这种情况. 但是自由面速度回跳先慢后快的特征分别在 Cuq-Lelandais^[28,29] 和 Jarmakani 等^[30] 的激光加载样品层裂实验中观测到.

基于以上分析可知, 自由面粒子速度回跳的振荡特征随着拉伸应变率的增加逐渐消失的特质, 是在不同拉伸应变率作用下, 铜样品内部损伤开始发展演化时刻的不一致, 导致应力松弛作用产生的压缩波到达自由面时刻的差异而形成的.

4 结 论

本文以高纯无氧铜为研究对象, 通过不同的飞片和样品的厚度来改变冲击加载下的拉伸应变率. 基于 DPS 系统测试的样品自由面粒子速度, 开展了冲击加载下铜样品的率相关特性分析, 结果表明: 铜的层裂强度随着拉伸应变率的增加而呈指数型增加, 通过对比发现材料的微细观结构特性是影响本文拟合的参数与文献中参数差异的主要原因. 通过观察发现, 自由面速度回跳斜率与拉伸应变率之间存在正相关关系, 相应的量化分析表明, 在低应变率下, 自由面速度回跳斜率随拉伸应变率增加而近似为线性增加, 高应变率时, 增加速率加大, 呈现为幂指数形式增加. 利用冲击波在样品内的相互作用关系, 分析得出: 铜样品内部损伤开始发展演化时刻的不一致, 导致应力松弛作用产生的压缩波到达自由面时刻的差异, 是自由面速度回跳过程中小振荡特征随着拉伸应变率增加而逐渐消失的原因.

参考文献

- [1] Chen M W, McCauley J W, Dandekar D P, Bourne N K 2006 *Nat. Mater.* **5** 614
- [2] Lu K 2010 *Science* **328** 319
- [3] Antoun T, Seaman L, Curran D R, Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 2003 *Spall fracture* (New York: Springer) pp1-20
- [4] Chen Q Y, Liu K X 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 064602
- [5] Curran D R, Seaman L, Shockey D A 1987 *Phys. Rep.* **147** 253
- [6] Meyers M A, Aimone C T 1983 *Prog. Mater. Sci.* **28** 1
- [7] Qi M L, Zhong S, He H L, Fan D, Zhao L 2013 *Chin. Phys. B* **22** 046203
- [8] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601
- [9] Divakov A K, Mescheryakov Y I, Zhigacheva N I, Barakhtin B K, Gooch W A 2010 *Phys. Mesomech.* **13** 113

- [10] Kanel G I, Baumung K, Singer J, Razorenov S V 2000 *Appl. Phys. Lett.* **76** 3230
- [11] Wang Y, He H, Boustie M, Sekine T 2007 *J. Appl. Phys.* **101** 103528
- [12] Wang Y G, He H L, Wang L L 2013 *Mech. Mater.* **56** 131
- [13] Boyce B L, Clark B G, Lu P, Carroll J D, Weinberger C R 2013 *Metall. Mater. Trans. A* **44** 4567
- [14] 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]
- [15] Wayne L, Krishnan K, DiGiacomo S, Kovvali N, Peralta P, Luo S N, Greenfield S, Byler D, Paisley D, McClellan K J, Koskelo A, Dickerson R 2010 *Scr. Mater.* **63** 1065
- [16] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K, Field D P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023528
- [17] Qi M L, Luo C, He H L, Wang Y G, Fan D, Yan S L 2012 *J. Appl. Phys.* **111** 043506
- [18] Dalton D A, Brewer J L, Bernstein A C, Grigsby W, Milathianaki D, Jackson E D, Adams R G, Rambo P, Schwarz J, Edens A, Geissel M, Smith I, Taleff E M, Ditmire T 2008 *J. Appl. Phys.* **104** 013526
- [19] Johnson J N, Gray III G T, Bourne N K 1999 *J. Appl. Phys.* **86** 4289
- [20] Luo S N, An Q, Germann T C, Han L B 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 013502
- [21] Kanel G I, Razorenov S V, Baumung K, Singer J 2001 *J. Appl. Phys.* **90** 136
- [22] Armstrong R W, Walley S M 2008 *Int. Mater. Rev.* **53** 105
- [23] Remington B A, Bazan G, Belak J, Branga E, Caturla M, Colvin J D 2004 *Metall. Mater. Trans. A* **35A** 2587
- [24] Kanel G I, Razorenov S V, Utkin A V 1993 *Dynamic Fracture and Fragmentation, High-Pressure Shock Compression of Solids II*, edited by Davison L, Grady D E, and Shahinpoor M (New York: Springer)
- [25] Minich R W, Cazamias J U, Kumar M, Schwartz A J 2004 *Metall. Mater. Trans. A* **35A** 2663
- [26] Kanel G I, Razorenov S V, Bogatch A, Utkin A V, Gray D E 1997 *Int. J. Impact Eng.* **20** 467
- [27] Escobedo J P, Dennis-Koller D, Cerreta E K, Patterson B M, Bronkhorst C A, Hansen B L, Tonks D, Lebensohn R A 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 033513
- [28] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Berthe L, de Ressaiguier T, Combis P, Colombier J P, Nivard M, Claverie A 2009 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **42** 065402
- [29] Cuq-Lelandais J P, Boustie M, Soulard L, Berthe L, De Ressaiguier T, Combis P, Bontaz-Carion J, Lescoute E 2011 *EPJ Web of Conferences* **10** 00014
- [30] Jarmakani H, Maddox B, Wei C T, Kalantar D, Meyers M A 2010 *Acta Mater.* **58** 4604

Rate-dependent characteristics of copper under plate impact*

Peng Hui¹⁾²⁾ Li Ping¹⁾²⁾† Pei Xiao-Yang²⁾ He Hong-Liang²⁾
Cheng He-Ping²⁾ Qi Mei-Lan³⁾

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

2) (National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

3) (School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

(Received 21 April 2014; revised manuscript received 2 July 2014)

Abstract

In this paper, the rate-dependent characteristics of oxygen-free high-purity copper (OFHC) under plate-impact loading is investigated experimentally. The velocity of flyers is measured by magnetic measurement system, and the free surface velocity of targets is measured by Doppler pins system (DPS). Characteristic parameters of free surface velocity are calculated using the measured data. Results show that the spall strength of OFHC is enhanced with the increase in strain rate. It is indicated that the rate from the minima to the spall peak grows slowly at low strain rate, but steeply at high strain rate. The slope as it appears, from the minima to the spall peak is very different as the strain rate increases. The interaction of shock waves in the copper samples is systematically analysed to access the slope characteristics.

Keywords: oxygen-free high-purity copper, spall, free surface velocity, rate-dependent characteristics

PACS: 62.20.mm, 62.20.fk, 62.20.M-, 62.50.Ef

DOI: [10.7498/aps.63.196202](https://doi.org/10.7498/aps.63.196202)

* Project supported by the Science Foundation of China Academy of Engineering Physics(Grant No.2011A0201002), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11202196, 11172221).

† Corresponding author. E-mail: lp0703@263.net