

## 晶粒尺度对延性金属材料层裂损伤的影响\*

张凤国<sup>†</sup> 周洪强

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2013年4月2日收到; 2013年5月17日收到修改稿)

微细观结构对材料动态损伤、破坏的影响是目前国内外力学领域的研究热点之一. 基于相关文献的实验结果, 通过理论分析, 给出了一个新的反映晶粒尺度效应的孔洞成核模型, 并将其耦合到延性金属材料层裂损伤模型中. 采用数值方法分析了晶粒尺度对高纯铜材料层裂损伤演化过程的影响. 计算结果显示: 随着材料平均晶粒尺度的增加, 自由面速度回跳点降低, 回跳后速度曲线的斜率增加; 损伤材料内部的孔洞数减少、平均孔洞尺寸增大. 计算结果与相关文献所报道的实验分析结果定性上符合较好. 该结果对于层裂损伤的深入研究具有一定的启发性.

**关键词:** 层裂, 晶粒尺度, 延性金属材料, 冲击

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.164601

## 1 引言

高压、高应变以及高应变率极端条件对材料的性能产生重要影响, 这涉及国防和工业等特殊环境. 因为近似一维、平面应变加载以及便于软回收样品的金相观测, 飞片加载实验常用于研究材料的动态损伤过程. 如果延性材料内部的拉伸应力足够高, 以孔洞形式的损伤将经历成核、增长和汇合, 并最终导致发生断裂, 产生层裂飞片. 鉴于层裂问题研究具有重要的应用背景和科学意义, 国内外学者采用理论、数值模拟和实验方法对此进行了系统、深入的研究, 获得了许多新的认识<sup>[1-7]</sup>, 这些工作推进了损伤理论研究的发展, 加深了人们对材料损伤机理的认识. 基于唯像的经验分析以及微细观的物理分析, 目前已有许多层裂模型用于描述或预测材料的损伤破坏情况<sup>[8-12]</sup>, 但不可否认, 现有的损伤模型的应用范围均有一定的局限性, 目前仍没有为大家所广泛接受的层裂损伤模型<sup>[13]</sup>. 近年来, 随着研究的不断深入以及实验技术的进步和计算机技术的快速发展, 大量研究工作已深入至材料微细观机理研究, 探讨微细观特性对材料动态损伤的

影响.

对于微结构对损伤的影响已有广泛的研究, 从早期的 Seaman 等<sup>[10]</sup>, Meyers 和 Amiore<sup>[14]</sup> 到近期的 Minich 等<sup>[15]</sup>. 不过, 大多数的工作都聚焦在材料发生断裂情况下微结构对速度回跳点的影响, 在这种情况下, 大多数参量和机理 (如冲击硬化、孔洞成核、增长与汇合) 都纠缠在一起, 这样就无法清晰地解析材料性质与加载情况的单独影响, 就可能得出一些相互矛盾的结论. 近些年国内外相关学者十分关注晶粒尺度对延性材料层裂损伤的影响, 特别是材料力学性质相近的情况下晶粒尺度的重要影响. Jacobi 等<sup>[16]</sup> 通过实验考察了不同纯度、不同晶粒尺寸铜材料层裂损伤状况的差别; Trivedi 等<sup>[17]</sup> 通过实验分析了冲击加载强度在 4—21 GPa 之间不同晶粒尺寸高纯铝材料的损伤情况, 并得到一些规律性的认识; Escobedo 等<sup>[18]</sup> 进一步比较全面地分析了材料力学性质相近的晶粒尺度为 30, 60, 100 和 200  $\mu\text{m}$  高纯铜样品的层裂损伤情况, 金相观测结果显示, 材料内部损伤及平均孔洞尺寸随晶粒尺度的增加而增加 (除 30  $\mu\text{m}$  样品外), 而成核孔洞数目减少, 在 30 和 200  $\mu\text{m}$  样品中存在孔洞汇合现象, 而 60, 100  $\mu\text{m}$  的样品中孔洞基本上是独立存在. 电

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 11202034) 和中国工程物理研究院科学技术发展基金 (批准号: 2013B0101013, 2011B0101028) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhang\_fengguo@iapcm.ac.cn

子观测显示, 孔洞的成核与增长优先发生于高角度取向的晶粒边界处. 在模型构建方面, 耦合晶粒影响及基体材料塑性变形的孔洞成核、增长和汇合的模型是近期才开始发展的<sup>[19]</sup>, 目前基本上是通过实验和数值模拟讨论晶粒尺度的影响, 而在现有损伤模型中很少包含晶粒尺度效应的影响因素.

对于晶粒尺度效应的讨论, Jacobi 等<sup>[16]</sup> 基于 NAG 模型<sup>[10]</sup> 通过调整孔洞的初始成核率参数间接地分析了晶粒尺度的影响, 其方法为我们提供了一个很好的研究思路. 本文假设晶粒尺度的影响反映在材料内部潜在的孔洞成核总数上, 并将晶粒尺寸直接引入到孔洞成核计算公式中, 从而建立新的损伤模型. 采用新的模型, 进一步讨论了晶粒尺度对材料内部孔洞大小、孔洞数密度分布以及自由面速度曲线变化的影响, 数值计算结果与相关实验结果在定性上具有较好的相似性.

## 2 层裂损伤演化的物理描述

基于作者前期的工作<sup>[20]</sup>, 我们仍采用物理统计方法描述延性材料层裂损伤的演化过程. 孔洞增长方程采用包含材料弹塑性效应以及初始孔洞尺寸影响的改进后的空心球壳模型, 这样也间接地考虑了孔洞之间的相互作用.

材料弹塑性变形阶段的孔洞增长方程为

$$\begin{aligned} \tau Q = & \alpha p - \frac{4}{3} G \left( \frac{Y_0}{2G} - \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha} \right) \\ & - \frac{2}{3} Y_0 \ln \left( \frac{2G}{Y_0} \cdot \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha - 1} \right) \\ & - \frac{2}{3} \eta \frac{\dot{\alpha}}{\alpha - \alpha_0} \left[ -\frac{Y_0}{2G} \left( 1 - \frac{Y_0}{2G} \right)^{-2/3} \right. \\ & \left. + \left( \frac{\alpha - \alpha_0}{\alpha - 1} \right) \left( \frac{\alpha_0 - 1}{\alpha - 1} \right)^{-2/3} \right], \quad (1) \end{aligned}$$

以及材料塑性变形阶段的孔洞增长方程为

$$\begin{aligned} \tau Q(\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}, \alpha) \\ = & \alpha p(t) - \frac{2}{3} Y_0 \ln \left( \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) - \frac{2}{3} \eta \dot{\alpha} \\ & \times \left[ (\alpha - 1)^{-1/3} (\alpha_0 - 1)^{-2/3} - \alpha^{-1/3} \alpha_0^{-2/3} \right], \quad (2) \end{aligned}$$

其中  $\tau = \rho \frac{a_0^2}{3(\alpha_0 - 1)^{2/3}}$ ,  $\rho$  为基体材料的密度,  $G$  为材料的剪切模量,  $Q(\ddot{\alpha}, \dot{\alpha}, \alpha) = \ddot{\alpha} [(\alpha - 1)^{-1/3} - \alpha^{-1/3}] - \frac{\dot{\alpha}^2}{6} [(\alpha - 1)^{-4/3} - \alpha^{-4/3}]$ ,  $Y_0$  为材料的初始屈服强度,  $\eta$  为材料的黏性系数.

同时, 假设成核孔洞大小相同, 并实时跟踪损伤演化过程中孔洞大小和孔洞数密度的变化情况. 在计算材料中每一点的孔洞数密度分布时, 由于计算虚拟单元内每一点的损伤度是相同的, 即不同大小的孔洞在计算虚拟单元内是平均分布的. 因此, 不同大小孔洞的数密度  $n$  为计算虚拟单元内的相应孔洞数  $N$  除以计算单元的增长倍数  $\alpha$ , 即  $n = N/\alpha$ .

## 3 晶粒尺度对孔洞成核影响的物理描述

假设晶粒尺度的影响主要反映在孔洞的成核方程中. 考察 Seaman 等<sup>[10]</sup> 给出的孔洞成核公式:

$$\dot{N}_t = \dot{N}_0 \cdot \exp \left( \frac{p - \sigma_0}{\sigma_1} \right), \quad (3)$$

其中  $\dot{N}_t$  为单位空间上的成核率,  $p$  为静水压力,  $\sigma_0$  为成核临界应力阈值,  $\dot{N}_0$  和  $\sigma_1$  为材料参数. 而初始的孔洞成核率  $\dot{N}_0$  应该反映潜在的孔洞成核数  $N$  和孔洞的成核速率  $\dot{N}$ , 即  $\dot{N}_0 = f(N, \dot{N})$ , 根据 Molinari 和 Wright<sup>[21]</sup> 的分析, 单位体积材料内部潜在的成核孔洞数与晶粒尺寸之间的关系为  $N \approx b^{-3}$ , 其中  $b$  反映材料的晶粒尺寸. 则孔洞成核率的表达式可以表示为

$$\dot{N}_t = \dot{N} \cdot b^{-3} \cdot \exp \left( \frac{p - \sigma_0}{\sigma_1} \right). \quad (4)$$

## 4 晶粒尺度影响的数值分析

Escobedo 等<sup>[18]</sup> 选取 30, 60, 100 和 200  $\mu\text{m}$  四种晶粒尺度高纯铜 (99.999%) 样品进行了系列层裂实验, 虽然晶粒尺度不同, 但四种晶粒尺度高纯铜样品的基本力学性质相近. 因而, 我们在数值计算过程中, 除晶粒尺度外, 其他参数相同. 层裂实验选用的飞片材料为石英 (Z-cut quartz), 厚度约为 2 mm, 飞片速度约为 131 m/s, 靶厚约为 4 mm. 首先, 对晶粒尺度为 200  $\mu\text{m}$  的实验结果进行模拟 (见图 1), 并据此确定孔洞的成核速率  $\dot{N} = 2.8 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ . 然后, 分别计算了晶粒尺度为 30, 60 和 100  $\mu\text{m}$  铜靶的自由面速度, 图 2 显示了四种晶粒尺度的计算结果.

对应图 2, 图 3 是文献 [18] 中给出的实验结果, 实验结果所显示的因晶粒尺度不同所引起自由面

速度的变化, 晶粒尺度最大 (200  $\mu\text{m}$ ) 的速度回跳点最低, 但其变化的规律性不明显, 这可能是由于实验中飞片速度的差别等因素所造成, 在这一点上还需要相关实验进行进一步的验证. 不过, Trivedi 等<sup>[17]</sup> 给出的晶粒尺度为 453, 238 以及 144  $\mu\text{m}$  高纯铝 (GS UP) 在高速撞击下层裂实验结果显示了较好的变化规律 (图 4), 这与我们的计算结果在定性上是一致的, 即: 1) 晶粒尺度对自由面速度回跳点的影响, 晶粒尺寸越小, 回跳点的位置越高; 2) 晶粒尺度对速度回跳之后变化斜率的影响, 随着晶粒尺度变小, 速度变化的斜率趋缓.

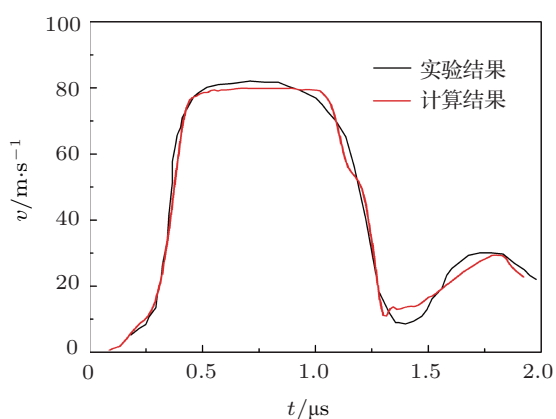


图 1 晶粒度为 200  $\mu\text{m}$  的自由面速度

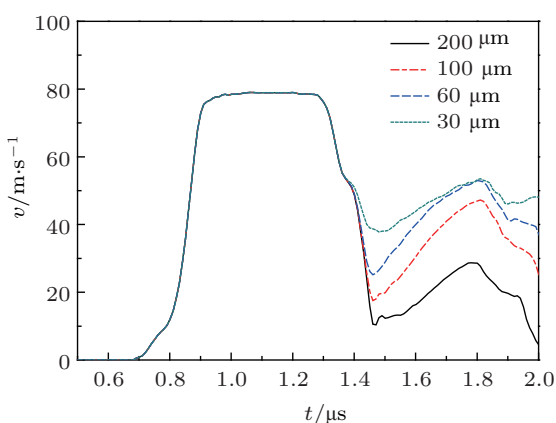


图 2 不同晶粒度自由面速度的计算结果

此外, Escobedo 等<sup>[18]</sup> 详细分析了晶粒尺度对损伤材料内部孔洞变化的影响, 实验后的损伤材料中, 30, 60, 100 和 200  $\mu\text{m}$  晶粒尺度材料内部的孔洞数分别为 236, 363, 267, 111, 平均孔洞尺寸为 38.1, 22.7, 33 和 55  $\mu\text{m}$ , 除了 30  $\mu\text{m}$  晶粒尺度材料外 (因孔洞汇合的影响), 随着材料晶粒尺度的增加, 材料

内部的孔洞数减少、平均孔洞尺寸增加.

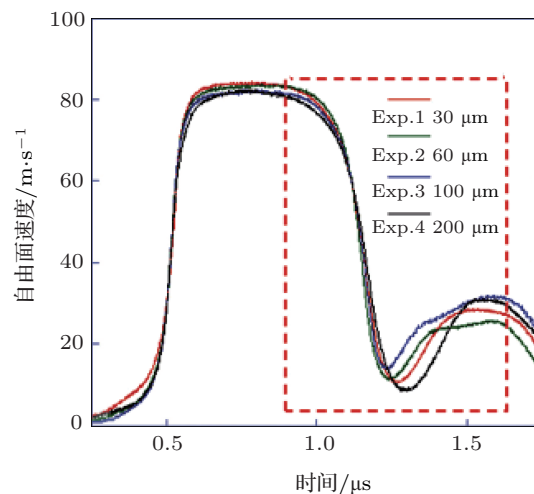


图 3 不同晶粒度自由面速度的实验结果 (高纯铜)<sup>[18]</sup>

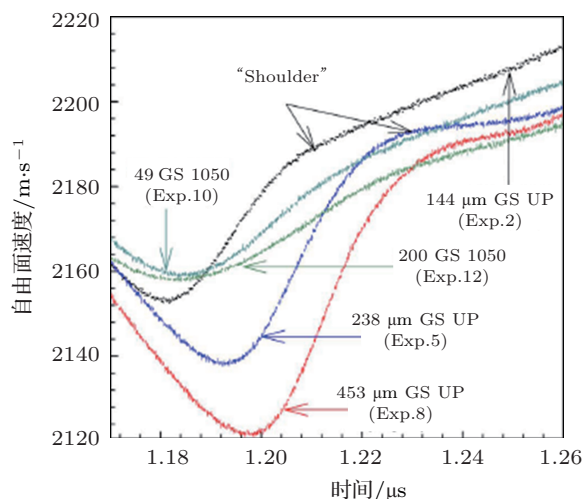


图 4 不同晶粒度自由面速度的实验结果 (高纯铝)<sup>[17]</sup>

图 5—7 给出了相应的数值计算结果. 图 5 显示了层裂面处最大孔洞随时间的增长过程, 虽然孔洞成核尺寸相同, 但孔洞的增长速度随晶粒尺度的增加而增加, 晶粒尺度越大, 最终形成的孔洞越大. 图 6 显示了靶板沿冲击加载方向单位体积内的孔洞数空间分布情况, 计算结果显示了材料晶粒尺度与损伤材料内部孔洞数密度之间的关联, 即晶粒尺度越小, 孔洞数越多; 此外, 层裂发生位置并非在靶板中间, 而是靠近自由面处, 这与实验结果也是一致的. 图 7 显示了层裂面处不同尺寸孔洞的数密度分布情况, 进一步说明了晶粒尺度对孔洞大小和孔洞数量的影响.

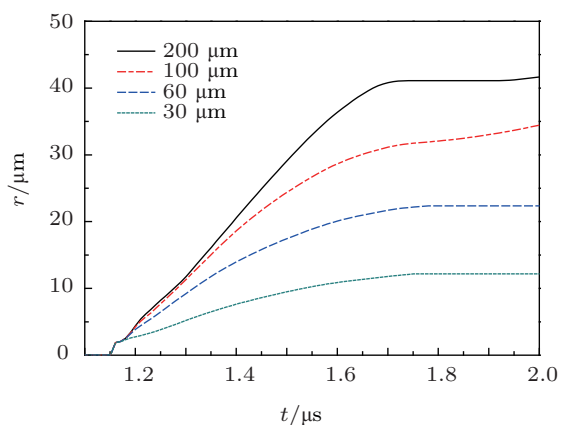


图5 孔洞半径随时间的演化过程

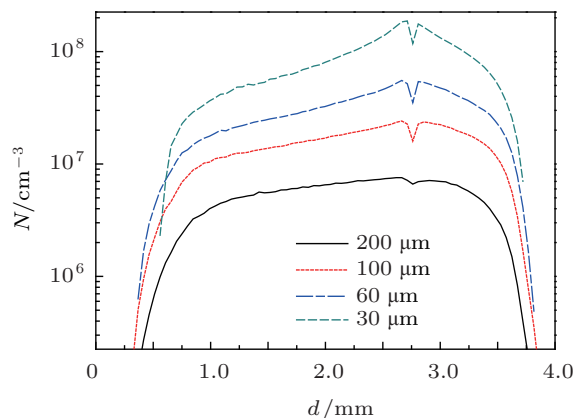


图6 孔洞数密度在靶板上的空间分布

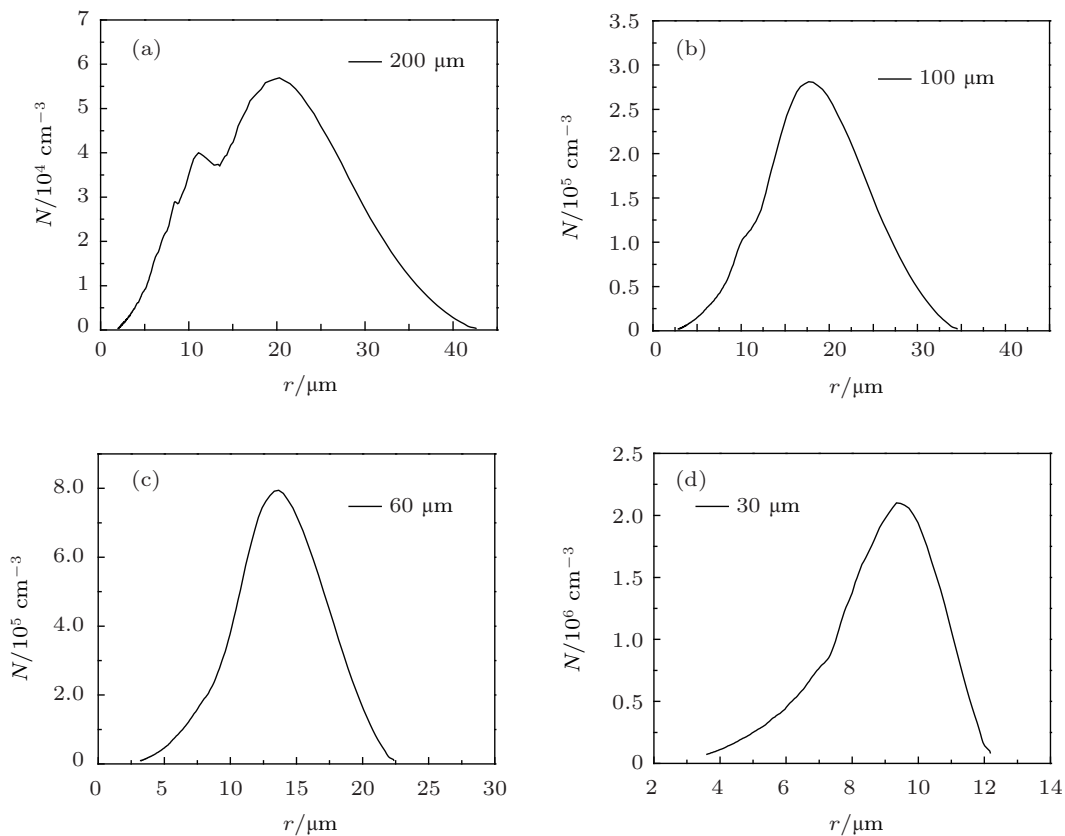


图7 层裂面处孔洞数密度与孔洞尺寸的关系

不过, 实验中  $30\ \mu\text{m}$  晶粒尺度的材料成核孔洞多, 在损伤发展的早期孔洞增长主要以孔洞汇合形式增长, 实验观测到的孔洞数较少、孔洞平均尺寸较大. 而在我们的模型中现在还没有考虑孔洞汇合的影响, 因而数值计算结果也只是展示了材料的晶粒尺度效应, 对于孔洞汇合的影响将在以后的工作中继续研究.

## 5 结语

晶粒尺度对材料层裂损伤的影响近些年逐渐成为国内外学者所关注的热点之一, 但目前还没有相应的损伤模型能够反映晶粒尺度的影响. 本文尝试将晶粒尺度引入到层裂损伤模型中, 计算结果与相关实验结果定性上符合较好, 即:

1) 随着材料平均晶粒尺度的增加, 自由面速度曲线回跳点降低、回跳后速度曲线的斜率增加;

2) 随着材料平均晶粒尺度的增加, 损伤材料内部的孔洞数减少、平均孔洞尺寸增大.

数值计算结果显示, 模型中考虑材料微细观结构的影响有助于我们精细描述损伤的演化过程. 本文的研究为材料损伤破坏问题的研究提供了一个较好的工作思路.

- 
- [1] Chen D N, Tan H, Yu Y, Wang H, Xie S, Liu G, Yin Z 2006 *Int. J. Impact Eng.* **32** 1752
- [2] Wang Y G, Chen D P, He H L, Wang L L, Jing F Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4202 (in Chinese) [王永刚, 陈登平, 贺红亮, 王礼立, 经福谦 2006 物理学报 **55** 4202]
- [3] Qi M L, He H L, Yan S L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 5965 (in Chinese) [祁美兰, 贺红亮, 晏石林 2007 物理学报 **56** 5965]
- [4] Deng X L, Zhu W J, Song Z F, He H L, Jing F Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4772 (in Chinese) [邓小良, 祝文军, 宋振飞, 贺红亮, 经福谦 2009 物理学报 **58** 4772]
- [5] 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]
- [6] Wang Y G, He H L, Michel B, Toshimori S 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 411 (in Chinese) [王永刚, 贺红亮, Boustie Michel, Sekine Toshimori 2008 物理学报 **57** 411]
- [7] Tekoglu C, Leblond J B, Pardoën T 2012 *J. Mech. Phys. Solids* **60** 136
- [8] Gurson A L 1977 *J. Eng. Mater. Technol.* **99** 2
- [9] Johnson J N 1981 *J. Appl. Phys.* **52** 2812
- [10] Seaman L, Curran D, Shockey D 1976 *J. Appl. Phys.* **47** 4814
- [11] Jacques N, Czarnota C, Mercier S, Molinari A 2010 *Int. J. Fract.* **162** 159
- [12] Bai Y L, Ke F J, Xia M F 1991 *Acta Mech. Sin.* **7** 59
- [13] Chen X, Asay J R, Dwivedi S K, Field D P 2006 *J. Appl. Phys.* **99** 023528
- [14] Meyers M A, Aimone C T 1983 *Prog. Mater. Sci.* **28** 1
- [15] Minich R W, Cazamias J U, Kumar M, Schwartz A J 2004 *Metall. Mater. Trans. A* **35A** 2663
- [16] Jacobi S, Zaretsky E, Shvart D 2000 *J. Phys. IV France* **10** Pr9-805
- [17] Trivedi P B, Asay J R, Gupta Y M 2007 *J. Appl. Phys.* **102** 083513
- [18] 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
- [19] Lebensohn R A, Idiart M I, Castaneda P, Vincent P G 2011 *Philos. Mag.* **91** 3038
- [20] Zhang F G, Zhou H Q, Hu J, Shao J L, Zhang G C, Hong T, He B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094601
- [21] Molinari A, Wright T W 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 1476

# Effects of grain size on the dynamic tensile damage of ductile polycrystalline metal\*

Zhang Feng-Guo<sup>†</sup> Zhou Hong-Qiang

(*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China*)

(Received 2 April 2013; revised manuscript received 17 May 2013)

## Abstract

In the paper, we propose a new nucleation rate function, which combines grain size, and models for nucleation and growth of voids in a ductile polycrystalline metal. The proposed model is used to analyse the effects of grain size on the dynamic tensile damage of high purity Cu samples with different grain sizes. Numerical results show that pull-back minima and void number decrease with grain size increasing, slope after pull-back and average void diameter increase with grain size increasing. The computed results are in qualitative agreement with experimental results.

**Keywords:** spallation, grain size, ductile metal, impact

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

**DOI:** 10.7498/aps.62.164601

---

\* Project supported by the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11202034) and the Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics (Grant Nos. 2013B0101013, 2011B0101028).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhang\_fengguo@iapcm.ac.cn