

孪晶对 Be 材料冲击加-卸载动力学影响的数值模拟研究

潘昊 王升涛 吴子辉 胡晓棉

Effect of twining on dynamic behaviors of beryllium materials under impact loading and unloading

Pan Hao Wang Sheng-Tao Wu Zi-Hui Hu Xiao-Mian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 164601 (2018) DOI: 10.7498/aps.67.20180451

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.67.20180451>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I16>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于数字图像相关法的 Mg 含量对 Al 合金 Portevin-Le Chatelier 效应影响的实验研究

Experimental investigation on the influence of Mg content on Portevin-Le Chatelier effect in Al-based alloys by using digital image correlation

物理学报.2017, 66(8): 086201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.086201>

带嵌件型腔内熔接过程的数值模拟研究

Numerical simulation on weld line development of injection molding in mold cavity with inserts

物理学报.2016, 65(6): 064601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.064601>

复杂型腔充模过程中分子构型演化的数值模拟

Numerical simulation of molecular conformation evolution during mold filling process in a complex cavity

物理学报.2016, 65(24): 244601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.244601>

加载应力幅值对高纯铜动态损伤演化特性研究

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

物理学报.2015, 64(5): 054601 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054601>

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>

数字剪切散斑干涉法研究铝合金中 Portevin-Le Chatelier 带的离面变形行为

Digital shearography investigation on the out-plane deformation of the Portevin-Le Chatelier bands

物理学报.2014, 63(6): 066201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.066201>

多晶银纳米线拉伸变形的分子动力学模拟研究

Molecular dynamics simulation of polycrystal silver nanowires under tensile deformation

物理学报.2014, 63(1): 016201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.016201>

# 孪晶对Be材料冲击加-卸载动力学影响的数值模拟研究\*

潘昊 王升涛 吴子辉 胡晓棉†

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

(2018年3月15日收到; 2018年5月22日收到修改稿)

在高压、高应变率加载条件下, 孪晶变形对材料的塑性变形具有重要的贡献, 而目前孪晶对金属材料的动态屈服强度、冲击响应等的影响还没有被充分揭示. 为此, 本文考虑孪晶变形和晶粒碎化, 针对铍(Be)材料在高应变率加载下的动态力学响应发展了含孪晶的热弹-黏塑性晶体塑性模型. 经过和实验结果的对比, 发现该模型可以更准确地预测Be材料在动态加载下, 尤其是高压动态加载下的屈服强度. 进一步, 基于该塑性模型研究了Be材料在冲击加载下的准弹性卸载行为, 结果表明剪切波速随着压力和剪应变的变化而发生变化是材料产生准弹性卸载现象的主要原因. 此外, 研究了冲击波卸载过程中Be材料孪晶的演化过程, 发现Be材料卸载过程中也伴随着孪晶的产生.

**关键词:** 孪晶, 晶粒碎化, 晶体塑性模型, 冲击加载

**PACS:** 46.35.+z, 62.20.F-, 83.60.La, 65.40.-b

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180451

## 1 引言

铍(Be)属于轻稀有金属, 被广泛用于各种核反应堆的反射体材料、减速材料和中子源材料. 同时, Be又具有低密度、高强度和高熔点的特点, Be及其合金材料也被越来越多地应用于航空、航天领域. 在异常工况下(爆炸、撞击), Be受到冲击载荷的作用<sup>[1]</sup>, 处于高压及高应变率状态下, 其力学特性与静态加载下的力学特性存在显著差别<sup>[2,3]</sup>. 因此, 对Be材料在冲击载荷作用下的动力学性能研究对结构防护等设计具有重要的应用背景.

Be是典型的密排六方晶系(HCP)材料, 晶体对称性和Al, Cu等面心立方晶系(FCC)材料相比较差. 因此, Be材料的力学性能相比Al, Cu等存在明显差异, 变形机理也更为复杂, 主要表现在: 1) Be材料的力学性能与其自身织构(晶体取向分布)密切相关, 存在明显的各向异性特性; 2) Be晶

体的密排独立滑移系的数量不满足 von Mises 准则(即要求具有5个独立滑移系), 在塑性变形过程中, Be材料通常会发生孪晶变形以弥补滑移系数量的不足; Be材料静态加载的原位中子衍射实验<sup>[4]</sup>已经发现, 当变形超过一定值时, Be材料就会发生孪晶变形; 3) Be材料在静态加载下, 承受塑性变形的能力较差, 而在动态加载下, Be材料能够发生较大塑性应变, 这表明材料的塑性变形机理发生了改变.

针对Be材料在冲击加载下的动态力学性能, 已开展了广泛的研究工作. 比如: Chapman等<sup>[5]</sup>通过冲击加载-卸载实验获得了Be材料冲击加载下( $< 30$  GPa)的强度. Steinberg等<sup>[6]</sup>发现动态加载下Be材料存在较强的加工硬化行为. Brown等<sup>[7]</sup>基于磁流体动力加载技术获得了Be材料在20—110 GPa加载压力下的屈服强度, 发现Be材料在高压下的屈服强度比SG模型的预测值高约20%, 这表明Be材料的动态力学响应具有相当的

\* 科学挑战专题(批准号: TZ2018001)和国家自然科学基金(批准号: 11702031)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [Hu\\_xiaomian@iapcm.ac.cn](mailto:Hu_xiaomian@iapcm.ac.cn)

复杂性,超出了传统模型的预测能力. Frahan等<sup>[8]</sup>采用爆轰、激光加载等方式对Be材料进行了扰动增长实验(加载压力60 GPa,应变率约 $10^6 \text{ s}^{-1}$ ),并用实验结果检验了常用的SG, PTW等强度模型,结果表明这些模型无法准确地模拟Be材料扰动增长过程.

由于Be材料微观变形机理的复杂性,以往经典的宏观本构模型难以准确描述其动态力学性能.近年来,研究者基于晶体塑性理论,从材料塑性变形的微观机理出发,特别是重点考虑孪晶过程,建立了更适于描述Be材料力学性能模型.晶体塑性理论是一种介于宏观与微观尺度的描述材料塑性变形的研究方法,能够描述金属材料静态和中低应变率下的由位错滑移主导的塑性变形过程.在晶体塑性的基础上,研究者发展了多种孪晶变形近似描述方法,对低层错能金属Cu, Ti和Be材料在静态加载下的孪晶演化及应力-应变关系进行了模拟,取得了较好的效果<sup>[9-12]</sup>.在动态力学响应方面,研究者通过改进晶体塑性理论中的位错演化方程和弹性变形方程,已经能够描述Al材料在冲击加载下的动力学行为<sup>[12]</sup>,但只有少数研究关注了包含孪晶变形的材料的冲击响应. Winey和Gupta<sup>[13]</sup>考虑了滑移、孪晶和剪切破裂,对不同晶向的单晶Be材料低压冲击加载过程进行了模拟.但他们对Be晶体弹性变形考虑得不够充分,模拟的加载压力小于7 GPa,并且没有对冲击后Be材料的卸载行为进行研究.

为了研究更高冲击压力下Be材料的孪晶变形和动力学响应过程,本文在热弹-黏塑性晶体塑性模型的基础上,考虑孪晶对塑性变形的贡献,并合理考量孪晶增长过程,建立了适于描述HCP材料动态力学行为的理论模型.在该模型的基础上,对Be材料在100 GPa以内冲击加载下的强度变化情况及其与孪晶变形的关系进行了模拟与分析.另外,模拟了Be材料在冲击-卸载过程中孪晶的演化过程.

## 2 含孪晶的热弹-黏塑性晶体塑性模型

晶体塑性理论已经有了多种研究框架,潘昊<sup>[14]</sup>在Kalidindi的晶体塑性模型<sup>[12]</sup>的基础上,针对高压、高应变率的加载条件,对位错运动、应变硬化和晶体弹性变形方程进行了修正,发展了热

弹-黏塑性晶体塑性模型.在此基础上,本文考虑孪晶对塑性变形的贡献,发展考虑孪晶变形的热弹-黏塑性晶体塑性模型.

根据晶体塑性理论,晶体的变形梯度张量可以分解为弹性和塑性变形两部分,即

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_e \mathbf{F}_p, \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{F}_e$  和  $\mathbf{F}_p$  分别表示弹性和塑性部分的变形梯度张量. 塑性变形梯度的演化可以表示为

$$\dot{\mathbf{F}}_p = \mathbf{L}_p \mathbf{F}_p, \quad (2)$$

其中,  $\mathbf{L}_p$  为塑性速度梯度张量. 动态加载下材料的回收实验<sup>[15,16]</sup>表明FCC, BCC材料即使发生孪晶,其孪晶的体积份额也较少,并且孪晶带多呈现窄带状,其内部的滑移较为困难.但对于HCP材料,当孪晶体积较大时,内部的滑移不能忽略.根据实验研究结果<sup>[17]</sup>,当孪晶体积份额较小时,可忽略孪晶内部的滑移过程;而当孪晶体积份额较大时,可采用晶粒碎化法,计算孪晶内的滑移变形过程.对于含孪晶变形的材料,塑性变形取决于位错运动和孪晶,其速度梯度张量可以写为

$$\mathbf{L}_p = \left( 1 - \sum_{\beta}^{N_{tw}} f^{\beta} \right) \sum_{\alpha}^{N_s} \dot{\gamma}^{\alpha} \mathbf{S}_{0-sl}^{\alpha} + \sum_{\beta}^{N_{tw}} \dot{f}^{\beta} \gamma_{tw}^{\beta} \mathbf{S}_{0-tw}^{\beta}, \quad (3)$$

其中 $\dot{\gamma}^{\alpha}$ 表示 $\alpha$ -滑移系的剪切应变率;  $\mathbf{S}_{0-sl}^{\alpha} = m_{0-sl}^{\alpha} \otimes n_{0-sl}^{\alpha}$ ,  $m_{0-sl}^{\alpha}$ 和 $n_{0-sl}^{\alpha}$ 表示 $\alpha$ -滑移系的滑移方向和滑移面法向;  $N_s$ 表示滑移系数;  $f^{\beta}$ 表示 $\beta$ -孪晶系的体积分数,  $1 - \sum_{\beta}^{N_{tw}} f^{\beta}$ 表示材料内部未发生孪晶变形区域的体积分数,在这部分区域内,塑性变形主要由位错运动贡献. (3)式右端的第一部分是位错运动引起的塑性变形,潘昊<sup>[14]</sup>针对不含孪晶变形的金属材料在高压、高应变率加载条件下的变形建立了考虑位错运动、硬化的晶体塑性模型,本文在此基础上重点考虑孪晶对塑性变形的影响,对位错部分的模型不再赘述. (3)式右端的第二部分是孪晶变形对材料塑性变形的贡献,其中 $\dot{\gamma}_{tw}^{\beta}$ 表示 $\beta$ -孪晶系导致的剪切应变,  $\mathbf{S}_{0-tw}^{\beta} = m_{0-tw}^{\beta} \otimes n_{0-tw}^{\beta}$ ,  $m_{0-tw}^{\beta}$ 和 $n_{0-tw}^{\beta}$ 表示 $\beta$ -孪晶系的孪生方向和孪生面法向,  $N_{tw}$ 表示孪晶系数. 当总的孪晶份额大于临界孪晶份额 $f_c$ , 即 $\sum_{\beta}^{N_{tw}} f^{\beta} > f_c$ 时,晶粒碎化成父晶和 $n$ 个子晶.子晶继承父晶的位错密度、温度、密度等信息.子晶

的晶体取向需要绕孪晶面法线旋转  $180^\circ$ , 其旋转张量为

$$Q_{ij} = 2n_i n_j - \delta_{ij}, \quad (4)$$

其中  $\mathbf{n}$  表示孪生面法向. 孪晶的弹性常数、Grüneisen 系数等也需要根据新的旋转矩阵进行变换. 临界孪晶份额  $f_c$  来自于实验观测结果, 与材料相关, 对于 Be 材料, 尚未见临界孪晶份额  $f_c$  的相关结果, 本文取同为 HCP 材料 Ti 的结果, 即  $f_c = 0.4$  [17,18]. 设孪晶个数  $n \leq 4$ , 当启动的孪晶系超过 4 个时, 只考虑孪晶体积份额  $f^\beta$  前 4 的孪晶系, 剩余体积份额较小的孪晶系都合并至最大体积份额的孪晶系.

方程 (3) 的重点在于孪晶演化过程  $\dot{f}^\beta$  的描述. 与位错演化一样,  $\dot{f}^\beta$  也会经历多个过程, 目前已经有分子动力学等方法对其成核、增殖和退化过程进行了模拟 [19,20]. 一般认为, 孪晶的增值过程主要由分切应力控制, 简化起见, 我们只考虑分切应力  $\tau^\beta$  对孪晶增长过程的影响. Kalidindi [21] 给出了孪晶增长方程为

$$\dot{f}^\beta = \dot{f} \left( \frac{\tau^\beta}{\tau_{tw}^\beta} \right)^n, \quad (5)$$

其中  $\tau_{tw}$  为孪晶的临界分切应力,  $n$  是常数. 根据实验观测 [22] 给出的信息, 假设孪晶的形状为圆片状, 则孪晶体积可以表示为

$$f = N\pi h_{tw} r_{tw}^2, \quad (6)$$

其中  $N$  表示孪晶的数目;  $h_{tw}$ ,  $r_{tw}$  分别表示孪晶的厚度及半径. 这里认为孪晶总数为常数, 孪晶的增长存在三种模式, 即  $m = 1$  表示厚度增长,  $m = 2$  表示半径增长,  $m = 3$  表示两者都增长. 则可以推导得到孪晶厚度与体积的关系 [22] 为

$$h_{tw} = h_0 (f/f_0)^{1/m}, \quad (7)$$

其中  $h_0$ ,  $f_0$  分别表示初始孪晶厚度和体积. 我们设孪晶厚度增长与剪应力成线性关系, 则可以推导出不同的增长模式下, 孪晶体积变化与分切应力的关系为

$$\dot{f}^\beta = m \left( \frac{\tau^\beta}{\tau_{tw}^\beta} - 1 \right) \frac{(f^\beta)^{\frac{m-1}{m}}}{t_c}, \quad (8)$$

其中  $\tau_{tw}$  为孪晶的临界分切应力,  $t_c$  为特征时间. 平均孪晶宽度  $\Delta$  与孪晶体积、厚度的关系为

$$\Delta^{-1} = \sum_{\beta} \frac{f^\beta}{(1-f^\beta) h_{tw}^\beta}. \quad (9)$$

由 (8) 式可得不同的增长模式下, 平均孪晶宽度与体积的关系为

$$\Delta^{-1} = \Delta_0^{-1} \sum_{\beta} \frac{(f^\beta)^{\frac{m-1}{m}}}{(1-f^\beta)}, \quad (10)$$

其中  $\Delta_0$  为初始平均孪晶宽度. 需要指出的是, 在孪晶变形中也有可能出现退孪晶现象, 并且已有大量研究工作 [23,24] 关注退孪晶对材料织构演化、塑性变形行为的影响. 本文主要关注孪晶变形存在条件下 Be 材料的冲击动力学响应问题, 因此暂时不考虑退孪晶的影响.

一般情况下, 大多数晶体材料的屈服强度由晶格临界位错滑动时的应力势垒决定, 孪晶晶界能抑制位错运动, 因此具有强化作用 [25]. 除此之外, 不可动位错和晶界也都能阻碍可动位错的滑移, 引起的强化作用分别用 Taylor 关系和 Hall-Petch 关系描述. 因此, 在考虑孪晶变形的条件下, Be 材料的硬化公式可以表述为 [25]

$$\hat{\tau} = \tau_\alpha + \alpha G b \sqrt{\rho_I} + k_{HP} / \sqrt{d} + k_{tw} / \sqrt{\Delta},$$

$$\rho_I = \sum_{\alpha} \rho_I^\alpha, \quad (11)$$

其中  $\tau_\alpha$  是  $\alpha$ -滑移系上的分切应力,  $G$  是材料剪切模量,  $\rho_I$  是非可动位错密度,  $k_{HP}$  是 Hall-Petch 常数,  $d$  表示材料的平均晶粒尺寸,  $k_{tw}$  则表示孪晶对材料硬化的影响. 该硬化公式考虑了不可动位错强化、晶粒尺寸对强度的影响以及孪晶的强化作用, 前人的研究工作 [25] 表明该硬化公式能够比较准确地描述存在孪晶变形条件下材料的硬化规律.

### 3 多晶 Be 材料的强度及织构演化

研究表明, Be 材料在加载和卸载过程中都会产生孪晶变形. 本文考虑孪晶变形, 分别针对 Be 材料在加载和卸载过程中的屈服强度、织构演化等力学特性进行了研究.

#### 3.1 Be 材料动态加载下的强度随压力的变化

在动态加载下 Be 材料屈服强度和压力的关系如图 1 所示, 图中给出了本文模型的计算结果、SG 模型计算结果和实验结果. 图 1 表明, 相比于不考虑孪晶和只考虑孪晶而不考虑晶粒碎化的模型, 同时考虑孪晶和晶粒碎化的晶体塑性模型的计算结

果和实验结果 [26,27] 符合得更好; 另外, 当压力大于 42 GPa, 本文模型对 Be 材料屈服强度的预测结果明显好于 SG 模型. HCP 材料对称性差, 滑移系少, 对于 Be 材料而言, 其晶格结构  $c/a$  值较小, 这些特点导致 Be 材料的位错运动能力较弱, 孪晶变形在其塑性变形中起着重要的作用. 特别是在高压、高应变率下, 材料内部会产生大量的孪晶变形, 导致材料的塑性变形能力明显增强. 因此, 本文发展的同时考虑孪晶变形和晶粒碎化的晶体塑性模型能比较准确地预测 Be 材料在动态载荷作用下的屈服强度.

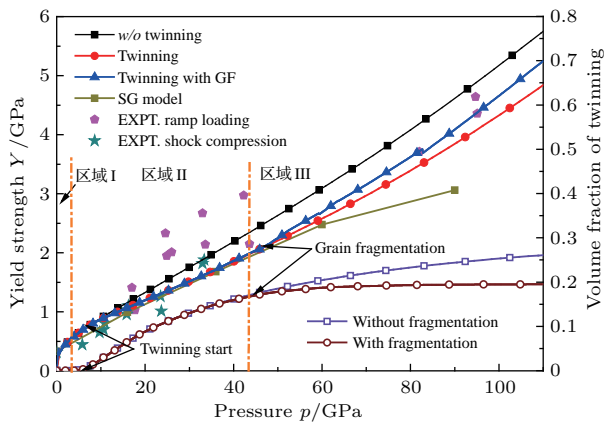


图1 动态加载下 Be 材料屈服强度和压力的关系  
Fig. 1. The relationship between yield strength of Be materials and the pressure under dynamic loading.

根据实验结果, Be 材料孪晶的起始剪应力为 0.68 GPa [19,20], 在此剪应力之前, 材料内部不产生孪晶变形, Be 材料的塑性变形以位错运动为主, 屈服强度随着压力的增大迅速增大, 体现出显著的压力硬化特点. 根据本文模型的计算结果, Be 材料强度随压力的变化可以分为三个阶段. 第一阶段, 材料内部没有发生孪晶变形, 对于 Be 而言, 此时的压力范围较窄, 小于 3 GPa, 如图 1 中区域 I 所示. 第二阶段, 材料内部发生孪晶变形, 由于发生孪晶变形, 材料强度随压力的上升斜率明显变缓, 如图 1 中区域 II 所示. Be 材料的强度对孪晶变形较为敏感, 当孪晶体积大于 5%, 强度上升斜率明显变缓, 这表明孪晶对 HCP 材料塑性变形过程有显著的影响, 明显减弱了材料的压力硬化速率. 第三阶段, 晶粒碎化, 当孪晶体积大于阈值(本文根据对 Ti 的研究结果 [17,18], 设为 0.4), 晶粒发生碎化, 孪晶内部产生滑移, 此时强度上升的斜率与不发生孪晶的情况一致, 如图 1 中区域 III 所示.

### 3.2 Be材料在冲击载荷下的准弹性卸载行为

金属材料在冲击-卸载过程中往往会发生准弹性卸载现象, 即弹性卸载段是光滑下降的, 而通常的宏观模型, 包括弹性-理想、SG 等均难以准确描述这一过程. 采用本文发展的含孪晶的热弹-黏塑性晶体塑性模型, 我们对 Be 材料的准弹性卸载行为进行了模拟, 模拟结果和实验结果 [5] 的对比如图 2 所示. 图 2 表明本文发展的晶体塑性模型计算得到的速度剖面结果都与实验较为接近. 本文模拟得到的速度平台值、体波卸载速度剖面均与实验基本相符, 表明本文发展的晶体塑性模型能比较准确地描述材料冲击加载基本过程, 包括材料的 Hugoniot 关系及压缩特性. 另外, 本文的模拟得到的弹性卸载段速度剖面都是光滑下降的, 也十分接近实验结果.

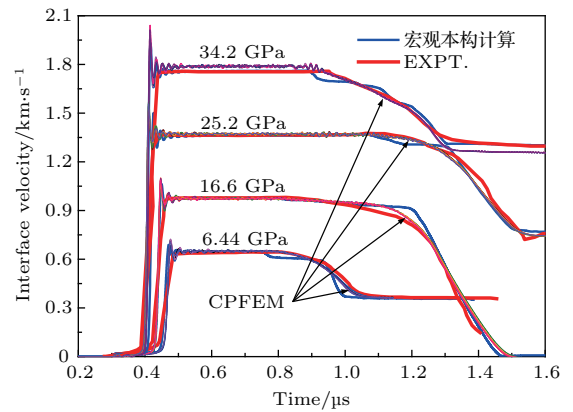


图2 Be 材料界面速度剖面的计算结果与实验结果  
Fig. 2. Computational results and experiment results for the speed profile of the interface of Be materials.

另外, 图 2 中的速度剖面曲线表明本文模型可以很好地预测材料的准弹性卸载行为. 本文所用模型由于考虑了晶体的非线性弹性变形过程, 获得的卸载中的剪切模量并不是恒定值, 而是随着剪应力的降低而下降, 如图 3 所示, 其中材料的有效剪切模量定义为

$$G_{\text{eff}} = \frac{d\tau}{d\varepsilon} = -\frac{1}{2} \frac{d(\sigma_x - \sigma_y)}{d\varepsilon_x}. \quad (12)$$

Steinberg 等 [28] 认为加载和卸载中剪切模量有差别 (Bauschinger 效应) 导致了准弹性卸载过程, 进一步, 本文的模拟结果表明材料的非弹性变形过程是材料准弹性卸载行为的主要原因. 另外, 这也说明以往在宏观流体建模中, 对于准弹性卸载过程常

采用的令剪切模量随剪应力变化的人为处理具有一定的合理性.

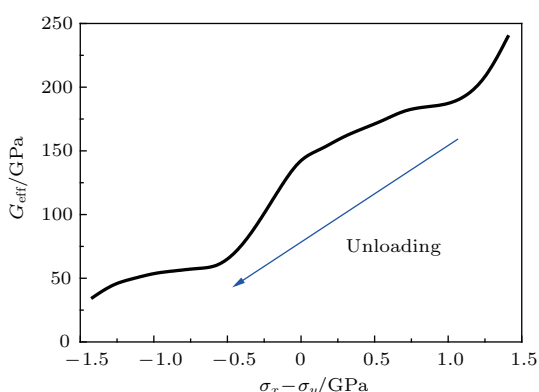


图3 Be材料卸载过程中剪切模量变化结果  
Fig. 3. Variation of the shear modulus of Be materials in the unloading.

### 3.3 Be材料卸载下的孪晶演化

计算结果表明塑性变形在卸载过程中依然不断累积, 使得Be材料的孪晶继续发展. 图4给出了Be材料(初始随机织构)在冲击加载36 GPa和卸载过程的孪晶体积分布情况. 可见, 在冲击加载的平台区域, 孪晶的体积分数相对较小, 约10%, 且成零散分布的状况; 而当卸载完成时, Be材料内部会形成了大量的整块的孪晶, 孪晶的体积分数普遍在25%以上, 个别的晶粒中孪晶体积超过临界值0.4, 发生晶粒碎化.

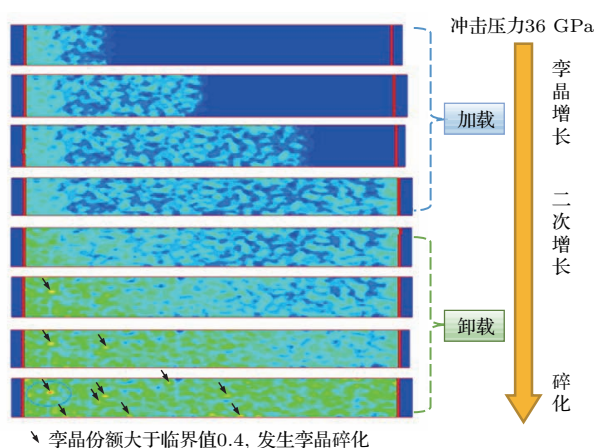


图4 Be材料冲击加-卸载下的孪晶体积份额分布  
Fig. 4. Fraction of twinning in Be materials in the impact loading and unloading.

## 4 结 论

本文在热弹-黏塑性晶体塑性模型的基础上, 考虑孪晶增长与晶粒碎化过程, 针对 Be材料建立

了含孪晶的热弹-黏塑性晶体塑性模型. 进一步, 采用该理论模型模拟了Be材料在动态加载下的强度随压力的变化情况, 结果表明本模型能准确预测Be材料在高压加载下的屈服强度. 本文发展的模型能准确预测材料的准弹性卸载行为, 分析表明非线性弹性变形过程是导致材料准弹性卸载的主要原因. 最后, 研究了Be材料冲击加载和卸载过程中孪晶份额的变化, 发现卸载过程也能导致孪晶份额的增长.

### 参考文献

- [1] Zhang Y S, Qin Y J, Wu D Z, Xie Z Q 2001 *Trans. China Welding Inst.* **22** 92 (in Chinese) [张友寿, 秦有钧, 吴东周, 谢志强 2001 焊接学报 **22** 92]
- [2] Johnson W, Rice S L 1972 *Impact Strength of Materials* (London: Edward Arnold)
- [3] Meyers M A 1994 *Dynamic Behavior of Materials* (New York: John Wiley & Sons)
- [4] Brown D W, Clausen B, Sisneros T A, Balogh I, Beyerlein I J 2013 *Mater. Mater. Trans. A* **44** 5665
- [5] Champman C L, Wise J L, Asay J R 1982 *AIP Conference Proceedings* **78** 422
- [6] Steinberg D, Breithaupt D, Honodel C 1986 *Physica B+C* **139** 762
- [7] Brown J L, Knudson M D, Alexander C S, Asay J R 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 033502
- [8] Frahan M T H, Belof J L, Cavallo R M, Raevsky V A, Ignatova O N, Lebedev A, Ancheta D S, El-dasher B S, Florando J N, Gallegos G F, Johnsen E, LeBlanc M M 2015 *J. Appl. Phys.* **117** 225901
- [9] van Houtte P 1978 *Acta Mater.* **26** 591
- [10] Tomé C N, Lebensohn R A, Kocks U F 1991 *Acta Mater.* **39** 2667
- [11] Lebensohn R A, Tomé C N 1993 *Acta Mater.* **41** 2611
- [12] Kalidindi S R, Bronkhorst C A, Anand L 1992 *J. Mech. Phys. Solids* **40** 537
- [13] Winey J M, Gupta Y M 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 033505
- [14] Pan H 2017 *Ph. D. Dissertation* (Mianyang: China Academy of Engineering Physics) (in Chinese) [潘昊 2017 博士学位论文 (绵阳: 中国工程物理研究院)]
- [15] Salem A A, Kalidindi S R, Doherty R D 2002 *Scripta Mater.* **46** 419
- [16] Wang J, Beyerlein I J, Tomé C N 2010 *Scripta Mater.* **63** 741
- [17] Wu X, Kalidindi S R, Necker C, Salem A A 2007 *Acta Mater.* **55** 423
- [18] Salem A A, Kalidindi S R, Doherty R D 2003 *Acta Mater.* **51** 4225
- [19] Brown D W, Beyerlein I J, Sisneros T A, Clausen B, Tomé C N 2012 *Int. J. Plast.* **29** 120
- [20] Knezevic M, Beyerlein I J, Brown D W, Sisneros T A, Tomé C N 2013 *Int. J. Plast.* **49** 185
- [21] Kalidindi S R 1998 *J. Mech. Phys. Solids* **46** 267273

- [22] Johnson J N, Rohde R W 1971 *J. Appl. Phys.* **42** 4171  
 [23] Wang H, Wu P D, Wang J, Tomé C N 2013 *Int. J. Plast.* **49** 36  
 [24] Proust G, Tomé C N, Jain A, Agnew S R 2009 *Int. J. Plast.* **25** 861  
 [25] Borodin E N, Mayer A E 2015 *Int. J. Plast.* **74** 141  
 [26] Chhabildas L C, Wise J L, Asay J R 1982 *AIP Confer. Proceed.* **78** 422  
 [27] Igonin V V 2014 Report on Task 3 Agreement# B590737 LLNL Livermore, CA  
 [28] Steinberg D J, Cochran S G, Guinan M W 1980 *J. Appl. Phys.* **51** 1498

## Effect of twinning on dynamic behaviors of beryllium materials under impact loading and unloading\*

Pan Hao Wang Sheng-Tao Wu Zi-Hui Hu Xiao-Mian<sup>†</sup>

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

( Received 15 March 2018; revised manuscript received 22 May 2018 )

### Abstract

As a rare metal material with low density, high strength and high melting point, beryllium (Be) is widely utilized in many fields including aerospace and vehicles. Dynamic loadings such as impact and high-rate compression often happen in the applications of Be materials in these fields. However, the dynamic behaviors of Be materials under high pressure and high-rate loading have not been fully investigated, although they are valuable for better applications of Be materials. Particularly, the effect of twinning on dynamic behaviors of Be material is very important for better understanding the plasticity deformation mechanism of Be material. In this paper, a thermoelastic-viscoplastic crystal plasticity model is developed for dynamic behaviors of Be material under high pressure and high strain-rate loading based on the physical mechanism of plasticity deformation. Besides, the dislocation motion and work hardening are considered within the constitutive framework by the Orowan relation and the Taylor equation respectively, and the contribution of twinning to the plasticity deformation is also considered via twinning fraction evolution and fragmentation of crystal due to twinning deformation. With the model, dynamic behaviors of Be material are investigated, including effect of pressure on the dynamic yield strength, the quasi-elastic unloading behavior, and evolution of twinning in shock loading and unloading. Compared with the classical SG model, the model developed in this paper accords better with the experimental results in predicting yield strength of Be material under impact loading, especially with high pressure. Moreover, it is revealed that the condition of yield strength of the Be material is divided into three cases, namely the non-twinning under low pressure, the twinning deformation under moderate pressure, and the twinning fragmentation under high pressure. The unloading behavior of Be material under impact loading is also studied with the model, and the quasi-elastic unloading behavior observed in experiments many times, is faithfully predicted. It is found that the quasi-elastic unloading phenomenon of the material is closely related to the variation of the shear velocity of shock wave with the shear strain, which suggests that the non-linear elastic property of the material is an important reason for this phenomenon. Finally, the evolution of twinning of Be material in the shock loading is studied, showing that the increasing of twinning fraction happens not only in the loading process but also in the unloading process of the shock waves. Some crystals break up into sub-crystals due to the fact that the volume fraction of twinning exceeds the critical fraction in the evolution of twinning.

**Keywords:** twinning, crystal fragmentation, crystal plasticity model, impact loading

**PACS:** 46.35.+z, 62.20.F-, 83.60.La, 65.40.-b

**DOI:** 10.7498/aps.67.20180451

\* Project supported by Science Challenge Project, China (Grant No. TZ2018001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11702031).

† Corresponding author. E-mail: [Hu\\_xiaomian@iapcm.ac.cn](mailto:Hu_xiaomian@iapcm.ac.cn)