

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0486

含氦泡辐照老化材料层裂损伤计算方法分析*

张凤国, 刘 军, 王言金, 王 裴, 郑 晖
(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094)

摘要: 辐照条件下, 一些材料内部产生大量的氦泡等微缺陷, 氦泡的大小和数密度随着辐照年限的增长而增长。氦泡分布特征的变化不仅影响材料本身的物理、力学性质, 而且直接影响材料层裂损伤演化后期材料破坏颗粒度的分布特征。延性材料的层裂损伤演化过程一般包括孔洞的成核、增长和汇合, 但因已有孔洞对新成核孔洞存在抑制作用, 当初始孔洞数密度达到一定临界值时, 材料内部没有新的孔洞成核, 因此, 层裂损伤的计算可以不考虑新孔洞成核的影响。本文中基于损伤早期演化的特征, 给出了这一临界值的计算方法, 并进一步探讨了含氦泡辐照老化钚材料层裂损伤的计算方法。同时, 在完善孔洞增长 (void growth, VG) 层裂损伤模型中参数的确定方法的基础上, 借助含氦泡常规铝材料的层裂实验结果, 对此问题进行了定性的分析: 在氦泡尺寸变化不大的情况下, 当氦泡浓度低于临界氦泡浓度时, 需要考虑初始氦泡以及新增孔洞的综合影响; 反之, 可以采用简单的层裂损伤模型, 不需要计算孔洞成核, 但由于增长孔洞之间的相互影响, 损伤模型的初始损伤参数需要重新确定。

关键词: 氦泡; 层裂损伤; 辐照老化; 临界氦泡浓度

中图分类号: O346.1

国标学科代码: 13015

文献标志码: A

Simulation method of spall damage for self-radiation damage aging materials with helium bubbles

ZHANG Fengguo, LIU Jun, WANG Yanjin, WANG Pei, ZHENG Hui

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

Abstract: Under irradiation conditions, a large number of micro-defects such as helium bubbles are produced in some materials, and the size and number density of helium bubbles increase with the increase of irradiation years. The variation of helium bubble distribution not only affects the physical and mechanical properties of the material itself, but also directly affects the distribution characteristics of fracture particle size in the later stage of spallation damage evolution. The evolution process of spallation damage in ductile materials generally includes nucleation, growth and confluence of pores. However, due to the inhibition of existing pores on new nucleation pores, when the initial number density of pores reaches a certain critical value, the calculation of spallation damage may not consider the influence of new nucleation. Based on the characteristics of early damage evolution, a formula for calculating this critical value is given, and based on this formula, the calculation method of spallation damage of plutonium materials irradiated by helium bubbles is further discussed. Then, in view of the difference between the initial damage parameters of the damage model and the real initial damage of the material, we propose a method to determine the damage parameters in the void growth (VG) model. Finally, this problem is analyzed qualitatively by using the experimental results of spallation of conventional aluminum materials containing helium bubbles. The analysis results show that for the calculation of spallation damage of irradiated materials containing helium bubbles, only when the helium bubble size changes little and the helium bubble concentration is lower than the critical helium bubble concentration given in this paper, it is necessary to consider the comprehensive influence of initial helium bubbles and new holes. otherwise, a simple

* 收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2023-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12271054, 12172063); 科学挑战专题 (TZ2018001)

第一作者: 张凤国 (1969—), 男, 硕士, 研究员, zhang_fengguo@iapcm.ac.cn

spallation damage model can be adopted, and the nucleation of holes does not need to be calculated.

Keywords: helium bubbles; spall damage; self-radiation damage aging; critical concentration of helium bubbles

目前核能材料已经广泛应用于核电、核武器以及核动力舰船、潜艇等军事和民用等领域,当核能材料库存时间达到一定年限后,相关的部件和材料不可避免会发生不同程度的化学腐蚀和自辐照老化,其中钷材料的老化尤其让人关注。当今钷领域研究的焦点集中在如何理解和预测钷长期贮存的安全性和有效性^[1]。Martz 等^[2]和 Schwartz 等^[3]采用透射电子显微镜观测了 0~42 a 材龄钷铍合金的微观组织结构,表明材料中存在纳米尺寸的氦泡,并测量了 8 个不同材龄钷铍合金中的平均氦泡密度和尺寸。学者们^[4-9]采用分子动力学、动力学蒙特卡洛方法以及相场方法等微细观模拟探讨了老化材料中氦泡的产生、增长机理。在老化材料宏观动态力学行为分析方面,由于钷具有放射性、毒性和较强的化学活性,目前一般采用含氦泡的铝、铜等常规替代材料来研究,通过实验、数值模拟等方法来分析氦泡大小、浓度等因素对钷材料变形和破坏的影响^[10-15]。

强冲击作用下材料的层裂/微层裂损伤破坏问题也是内爆动力学研究所关注的主要研究内容之一,特别是材料冲击熔融状态下的损伤破碎问题。一般而言,延性层裂损伤经历孔洞的成核、增长、汇合及断裂/破碎演化过程,而材料内部的孔洞分布特征变化直接影响材料最终破碎颗粒度的分布形式^[16-17]。对于老化材料而言,材料内部已经存在大量的微孔洞(氦泡),且氦泡的大小和数密度随着材料老化时间的增长而增长^[2-3],因已有孔洞对新孔洞的成核存在一定的抑制作用^[18],这就需要明确氦泡大小/数密度的临界状态:临界状态之前的损伤计算需要考虑孔洞的成核以及初始氦泡的影响;而临界状态之后的损伤计算只需考虑氦泡的影响。本文基于层裂损伤早期的演化特征,给出了这一临界状态的理论分析方法,并进一步借助含氦泡常规铝材料的层裂实验结果,对此问题进行定性的分析。

1 辐照老化材料氦泡临界状态的确定

在不考虑材料初始微结构以及温度影响情况下,对于均匀介质的层裂损伤而言,影响延性材料内部孔洞成核的主要因素包括加载压力以及已有孔洞的抑制作用。体胞模型的解析分析^[19-20]认为孔洞的成核临界应力 σ_{cr} 、材料的剪切模量 G 和屈服强度 Y_0 具有如下关系:

$$\sigma_{cr} = \frac{2}{3} Y_0 \left[1 + \ln \left(\frac{2G}{Y_0} \right) \right] \quad (1)$$

而材料内部的孔洞增长过程中,对孔洞周围材料内部潜在的新孔洞的成核有抑制作用,其抑制范围即为孔洞周围材料的塑性变形区^[18],也就是说,如果当材料内部拉伸应力达到孔洞成核临界应力之前,层裂面处材料已经处于塑性变形状态,则材料内部不会再有新成核的孔洞出现。采用体胞模型分析损伤早期增长时,基体材料达到完全塑性变形的临界孔隙度 α_{cr} 与初始孔隙度 α_0 之间有:

$$\alpha_{cr} = \alpha_0 \frac{2G}{2G - Y_0} \quad (2)$$

将孔隙度 α 定义为:

$$\alpha = \frac{1}{1 - D} \quad (3)$$

式中:损伤度 D 为单位体积内孔洞总体积的份额。则此临界状态孔隙度 α_{cr} 、孔洞半径 a_{cr} 与对应的初始孔隙度 α_0 、初始孔洞半径 a_0 之间具有如下关系:

$$\frac{\alpha_{cr} - 1}{\alpha_0 - 1} = \frac{a_{cr}^3}{a_0^3} \quad (4)$$

而损伤增长的临界应力 σ_c 与屈服强度 Y_0 和初始孔隙度 α_0 具有如下关系:

$$\sigma_c = \frac{2}{3} Y_0 \ln \left(\frac{\alpha_0}{\alpha_0 - 1} \right) \quad (5)$$

此外, 在损伤增长的早期, 应力 σ 近似线性增长^[21], 可表示为:

$$\sigma = \dot{\sigma}(t - t_0) \tag{6}$$

式中: $\dot{\sigma}$ 为应力对时间的导数。这个时期孔洞间的相互作用可以忽略, 孔洞基本保持孤立形式增长, 则孔洞增长方程可以表示为^[21]:

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{\sigma - \sigma_{cr}}{4\eta} \tag{7}$$

式中: η 为与黏性相关的材料常数。在孔洞开始增长到材料达到完全塑性变形这一时间段内积分式 (7) 有:

$$\ln \frac{a_{cr}}{a_0} = \frac{(\sigma_{cr} - \sigma_c)^2}{8\eta\dot{\sigma}} \tag{8}$$

将孔洞与孔隙度之间的关系式 (4) 代入式 (8), 同时考虑氦泡内压 p_i , 则可以得到材料达到完全塑性变形临界状态下孔隙度与应力之间的关系:

$$\left(\frac{\alpha_{cr} - 1}{\alpha_0 - 1}\right)^{1/3} = \exp\left[\frac{(\sigma_{cr} - \sigma_c + \sigma_i)^2}{8\eta\dot{\sigma}}\right] \tag{9}$$

同时, 对于所讨论的问题, 材料内部的初始损伤度很小 ($\alpha_0 \approx 1$, $D_0 \approx 0$), 则有:

$$\frac{\alpha_{cr} - 1}{\alpha_0 - 1} = \frac{2G}{2G - Y_0} \alpha_0 - 1 \approx \frac{Y_0}{2G - Y_0} \approx \frac{Y_0}{D_0(2G - Y_0)} \tag{10}$$

层裂损伤问题的加载应力与应变率之间有:

$$\dot{\sigma} = \dot{\epsilon}\rho_0 c_0^2 \tag{11}$$

式中: ρ_0 、 c_0 分别为材料的密度和体积声速。这样, 对于含氦泡辐照老化材料的层裂损伤计算, 存在一个初始临界损伤度 D_{r0} , 当 $D_0 < D_{r0}$ 时需要考虑氦泡和新孔洞成核的影响; 而当 $D_0 \geq D_{r0}$ 时, 只需考虑初始氦泡的影响。将式 (1)、(5)、(10) 和 (11) 代入式 (9), 便得到初始临界损伤度 D_{r0} :

$$D_{r0} \exp\left\{\frac{2}{3} Y_0 \left[1 + \ln\left(\frac{2GD_{r0}}{Y_0}\right)\right] + p_i\right\}^6 = \frac{Y_0}{(8\eta\dot{\epsilon}\rho_0 c_0^2)^3} = \frac{Y_0}{2G - Y_0} \tag{12}$$

考虑到初始损伤度为:

$$D_0 = \frac{4}{3} \pi a_0^3 n_0 \tag{13}$$

式中: n_0 为氦泡浓度, 为单位体积内氦泡的数量。在已知加载的应变率为 $\dot{\epsilon}$ 、氦泡半径 a_0 、氦泡内压 p_i 后, 根据式 (12) 可计算得到 D_{r0} , 再由式 (13) 可计算氦泡临界浓度 n_{r0} 。

至此, 给出了所关心的临界损伤度 D_{r0} 和氦泡临界浓度 n_{r0} 的计算方法。考虑钚材料自辐照老化过程中, 材料内部的氦泡大小以及氦泡浓度随着老化年限的增长而增长 (图 1)^[3]; 当老化年限超过 10 a 以后, 氦泡直径 $2a_0$ 基本保持在 1.4 nm, 而氦泡浓度 n_0 随年限增长而增长。假设加载的应变率为 $\dot{\epsilon} = 10^4 \text{ s}^{-1}$, 取氦泡半径 $a_0 = 0.7 \text{ nm}$, 此时氦泡内压 p_i 约为基体材料屈服强度的 3 倍^[23], 则根据式 (12) 计算得到 D_{r0} 后, 由式 (13) 可以得

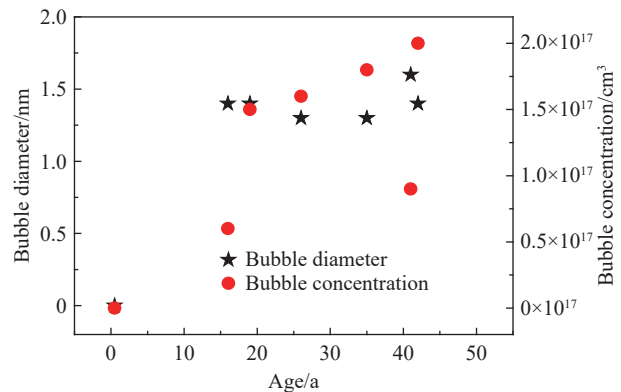


图 1 不同辐照老化年限钚材料中氦泡浓度和大小变化的实验统计结果^[3]

Fig. 1 Diameter and concentration of helium bubbles in self-irradiated plutonium during aging process^[3]

到氦泡临界浓度 $n_0 = 1.065 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。结合图 1 的实验统计结果, 在计算模拟钚材料的层裂损伤时, 对于老化年限约 20 a 以上的钚材料, 只需考虑材料内部氦泡的影响; 其他情况则既需要考虑氦泡影响, 也需要考虑新孔洞成核的影响。

因钚材料具有放射性, 相关的层裂实验数据非常稀少, 研究中一般采用含氦泡的铜、铝材料替代, 即便如此, 相应的、较为系统的实验数据也相对匮乏。下面将结合已有相关常规材料的实验结果对此进行定性的分析。

2 含氦泡辐照老化材料层裂损伤的计算

在实验方面, 目前通常在金属材料中掺入硼元素, 通过高能中子轰击, 使中子与硼元素发生核嬗变反应生成氦, 再经过一定的工艺热处理调整氦泡大小, 实现含氦泡材料制备, 近年来, 许多学者利用辐照掺硼铝研究氦泡成核、长大以及最终导致材料断裂性能的变化。尽管如此, 这些实验所制备的材料氦泡浓度较高, 很少涉及氦泡临界浓度 (即分析氦泡对孔洞成核影响的实验), 同时, 辐照后材料性能发生一定改变, 且采用层裂损伤模型模拟计算分析相关实验结果时, 因模型参数选取的人为性, 进而可能限制了分析结果的可信度。鉴于此, 本文中基于纯铝和含氦泡铝 2 种实验结果, 定性分析临界氦泡浓度以及氦泡对材料层裂损伤的影响。

2.1 VG 层裂损伤模型参数确定方法的改进

目前的孔洞成核模型均是基于实验或连续介质理论给出的, 考虑已有孔洞影响的孔洞成核模型还不是十分完备, 因此, 本文中层裂损伤计算采用 Johnson^[19] 基于空心球壳增长理论给出的孔隙度变量 α (空心球壳总体积与基体体积之比) 的增长率随静水压 p 变化的 VG 层裂损伤模型:

$$\dot{\alpha} = \frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3} (\alpha - 1)^{1/3}}{\eta_s} \left(\alpha p - \alpha_s \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) \quad (14)$$

其中模型包含的 3 个基本参数: 参考初始孔隙度 α_0 , 包含了材料初始损伤、孔洞成核以及损伤早期增长的信息^[24]; 剪切黏性系数 η_s 、材料硬化系数 α_s 在实际应用时作为计算参数, 并根据实验数据进行调整。该模型模拟计算效果较好, 且参数少、使用方便, 是目前应用较为广泛的层裂损伤模型^[25]。

前期曾经给出了 VG 层裂损伤模型参数的确定方法^[24], 并较好地应用于不同材料的层裂损伤实验结果的模拟计算。在该方法的推导过程中假设变量 $(\alpha_0 - 1)^{2/3} Y_0 / \eta_s$ 本身为只与时间相关、与材料无关的常数。但是, 最近的应用发现这一假设条件的限制性较强。本文中基于对材料层裂强度概念的解读以及对层裂实验自由面速度回跳点所包含物理涵义的分析^[24,26], 即自由面速度回跳时刻对应层裂面处有: $\dot{p} = \ddot{\alpha} = 0$, 对式 (14) 时间求导, 并考虑到此时 $\alpha_{cr} \approx 1$, 则可以得到新的方程代替原假设条件得到的方程, 综合原有的另外 2 个方程, 从而进一步将参数确定方法改写为:

$$\begin{cases} \alpha_s \ln(\alpha_0 - 1) = \frac{Y_0(\rho_0 c_0^2 - \Gamma_0 p_{spall})}{2G - Y_0} - p_{spall} \\ \frac{3}{4} \rho_0 c_0^2 (\alpha_{cr} - 1) = p_{spall} + \alpha_s [\ln(\alpha_{cr} - 1) - 3] \\ \frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3} (\alpha_{cr} - 1)^{1/3}}{\eta_s} \left(\alpha_{cr} p_{spall} - \alpha_s \ln \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} - 1} \right) = -2\dot{u}_1 / c_0 \\ \alpha_{cr} = \alpha_0 \frac{2G}{2G - Y_0} \end{cases} \quad (15)$$

上式中层裂强度 p_{spall} 的计算采用 Romanchenko 等^[27] 给出的公式:

$$p_{spall} = \rho_0 c_L \Delta u \frac{1}{1 + c_L / c_0} + \frac{1}{4} \rho_0 c_0 h \dot{u}_1 \left(\frac{1}{c_0} - \frac{1}{c_L} \right) \quad (16)$$

式中: ρ_0 为初始基体材料密度, c_L 为基体材料的纵波声速, c_0 为体积声速, h 为层裂片厚度, Γ_0 为材料的 Grüneisen 系数。

2.2 含氦泡辐照老化材料层裂实验的模拟及分析

为了探讨氦泡对材料层裂损伤的影响, 李英华等^[13]开展了纯铝、氦泡浓度分别为 $3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 和 $6 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 的含氦泡铝对比层裂实验。对于纯铝材料, 结合实验^[13]给出的自由面速度以及式 (16), 可以得到其层裂强度为 1.45 GPa, 再根据式 (15), 得到 VG 层裂损伤模型的 3 个参数分别为: $\alpha_0 = 1.000 41$, $\alpha_s = 0.137 \text{ GPa}$, $\eta_s = 1.955 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

本文中所以采用的基本层裂损伤模型和计算程序已经多次应用于不同工况下的层裂实验的数值模拟, 涉及了铜、铝、钼等多种延性金属, 模拟结果与实验结果符合较好^[14,17,24,26], 从而验证了理论模型和计算程序的适用性。针对含氦泡铝的层裂损伤计算, 仍采用现有的程序和相关的材料参数^[13-14], 图 2 给出了纯铝层裂实验自由面速度曲线和数值模拟结果的对比, 二者符合得较好, 特别是反映层裂强度的自由面速度曲线的回跳点以及反映层裂片厚度的曲线震荡周期。而计算得到的纯铝材料的参考初始孔隙度 $\alpha_0 = 1.000 41$ 非常小, 显然其只是反映了新孔洞成核的影响。

对于含氦泡铝实验, 这里只选用氦泡浓度为 $3 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ 的实验结果进行模拟分析。实验中辐照铝材料内部的氦泡直径平均尺寸约为 1~2 nm, 加载应变率为: $\dot{\epsilon} = 7.8 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, 不妨取氦泡半径 $a_0 = 0.75 \text{ nm}$, 则根据式 (12)~(13) 可以得到不需要考虑孔洞成核影响的最小临界氦泡浓度为 $n_{00} = 1.51 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$, 显然, 该临界浓度值远远小于实验中含氦泡铝靶板材料内部的氦泡浓度, 因此, 模拟计算含氦泡铝靶板层裂实验时, 只需要考虑靶板的初始损伤即可。不过, 因辐照后铝靶板材料的力学性能与纯铝材料存在一定的差别, 且相关文献中并没有给出辐照铝材料的基本力学参数, 只好假设二者差别不大, 且损伤模型中的参数 α_s 、 η_s 也相同。同样, 结合实验给出的自由面速度以及式 (16), 可以得到含氦泡铝的层裂强度为 0.858 GPa, 并根据式 (15) 中的第 1 个方程式, 得到含氦泡铝损伤模型参数——参考初始孔隙度为 $\alpha_0 = 1.032 3$, 图 3 给出了实验和数值模拟计算的自由面速度曲线对比, 二者符合也较好。

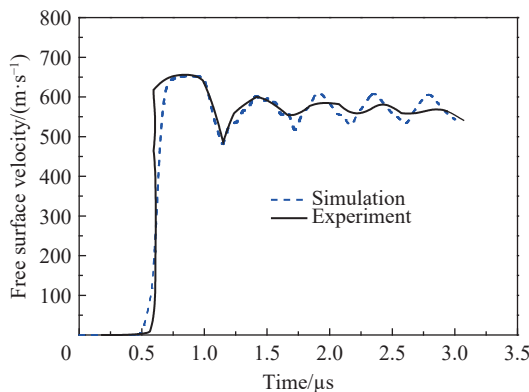


图 2 纯铝材料自由面速度曲线的实验^[13]和数值模拟结果
Fig. 2 Free surface velocities of experimental data^[13] and simulation ones for pure aluminum

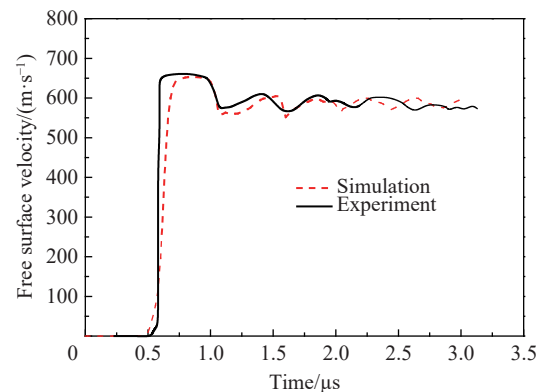


图 3 含氦泡铝材料自由面速度曲线的实验^[13]和数值模拟结果
Fig. 3 Free surface velocities of experimental data^[13] and simulation ones for pure aluminum with helium bubbles

此外, 虽然参数 $\alpha_0 = 1.032 3$ 远大于纯铝的对应参数值, 但仍小于含氦泡铝靶板的真实初始孔隙度 1.056, 显然其只是包含了原有初始孔洞(氦泡)的影响, 同时也间接说明: 模拟计算该层裂损伤实验时, 不仅不需要考虑新孔洞成核的影响, 且因氦泡浓度较高, 由于孔洞间的相互影响, 在损伤增长过程中, 部分氦泡的增长也受到了相邻氦泡增长的抑制作用^[28]。

3 结 论

延性材料的初始微细观结构特征(初始孔洞、晶粒尺寸等)是影响其层裂损伤演化过程的关键因素之一, 部分辐照老化材料内部包含大量的氦泡, 且氦泡的浓度和尺寸随着老化年限的增加而增长。针对含氦泡辐照老化材料层裂损伤演化过程中初始氦泡和新成核孔洞哪一种因素占主导影响的问题, 本文

中基于损伤早期演化特征,给出了辐照老化材料含氦泡初始临界损伤度(单位体积内初始氦泡总体积的份额)的计算公式,当氦泡尺寸增长趋于缓慢时,并进一步给出了临界氦泡浓度的计算公式:对于含氦泡辐照老化材料的层裂损伤计算,当氦泡浓度低于临界氦泡浓度时,需要考虑初始氦泡以及新增孔洞的综合影响;反之,可以采用简单的层裂损伤模型,且不需要计算孔洞成核。同时,借助于含氦泡常规铝层裂实验结果和相应的数值模拟结果对比分析指出:因增长孔洞之间的相互影响,损伤模型的初始损伤参数并非反映材料的真实初始损伤,可以根据本文中给出的改进后的参数确定方法进行标定。分析结果对于含氦泡辐照老化材料层裂损伤的物理分析具有较好的参考意义。

参考文献:

- [1] 肖瑶,黄理,邱睿智,等. 钚中氦行为研究进展[J]. *材料导报 A*, 2020, 34(6): 11137–11144. DOI: 10.11896/cldb.19050148. XIAO Y, HUANG L, QIU R Z, et al. Progress in the behavior of helium in plutonium [J]. *Materials Reports A*, 2020, 34(6): 11137–11144. DOI: 10.11896/cldb.19050148.
- [2] MARTZ J C, SCHWARTZ A J. Plutonium: aging mechanisms and weapon pit lifetime assessment [J]. *JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2003, 55: 19–23. DOI: 10.1007/s11837-003-0023-0.
- [3] SCHWARTZ A J, WALL M A, ZOCCO T G, et al. Characterization and modeling of helium bubbles in self-irradiated plutonium alloys [J]. *Philosophical Magazine*, 2005, 85: 479–488. DOI: 10.1080/02678370412331320026.
- [4] 敖冰云,汪小琳,陈丕恒,等. 钚自辐照老化过程中氦效应理论研究进展[J]. *原子能科学技术*, 2009, 43(12): 37–42. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0037. AO B Y, WANG X L, CHEN P H, et al. Advances in theoretical research of helium effects in plutonium during aging process of self-radiation damage [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2009, 43(12): 37–42. DOI: 10.7538/yzk.2009.43.suppl.0037.
- [5] 余鑫祥,邓爱红,程祥,等. 钚中空位对氦泡生长影响的动力学 Monte Carlo 研究[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2010, 47(1): 133–136. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2010.01.026. YU X X, DENG A H, CHEN X, et al. A kinetic Monte Carlo study of the vacancies' effects on helium bubble growth in plutonium [J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2010, 47(1): 133–136. DOI: 10.3969/j.issn.0490-6756.2010.01.026.
- [6] VALONE S M, BASKES M I. Self-irradiation cascade simulations in plutonium metal: model behavior at high energy [J]. *Journal of Computer-Aided Materials Design*, 2007, 14: 357–365. DOI: 10.1007/s10820-007-9049-x.
- [7] SHAO J L, WANG P, HE A M, et al. Influence of voids or He bubbles on the spall damage in single crystal Al [J]. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 2014, 22(2): 025012. DOI: 10.1088/0965-0393/22/2/025012.
- [8] ZHOU T T, HE A M, WANG P. Dynamic evolution of He bubble and its effects on void nucleation-growth and thermomechanical properties in the spallation of aluminum [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2020, 542: 152496. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2020.152496.
- [9] 万曦,姚松林,裴晓阳. 冲击加载下金属铝中氦泡演化行为的相场模拟[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(1): 014203. DOI: 10.11858/gywlxb.20210791. WAN X, YAO S L, PEI X Y. Phase field modeling of the evolution of helium bubbles in shock loaded aluminum [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1): 014203. DOI: 10.11858/gywlxb.20210791.
- [10] 王海燕,祝文军,邓小良,等. 冲击加载下铝中氦泡和孔洞的塑性变形特征研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(2): 1154–1159. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.02.075. WANG H Y, ZHU W J, DENG X L, et al. Plastic deformation of cc and void in aluminum under shock loading [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(2): 1154–1159. DOI: 10.3321/j.issn:1000-3290.2009.02.075.
- [11] 程扬名,陈浩,沈琴,等. 纯铝中氦泡分布特点的研究[J]. *原子能科学技术*, 2018, 52(3): 385–389. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0312. CHENG Y M, CHEN H, SHEN Q, et al. Study on distribution characteristics of helium bubble in aluminum [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2018, 52(3): 385–389. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0312.
- [12] 祁美兰,贺红亮,王永刚,等. 高应变率拉伸下纯铝中氦泡长大的动力学研究[J]. *高压物理学报*, 2007, 21(2): 145–150.

- DOI: 10.11858/gywlb.2007.02.005.
- QI M L, HE H L, WANG Y G, et al. Dynamic analysis of helium bubble growth in the pure Al under high strain-rate loading [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(2): 145–150. DOI: 10.11858/gywlb.2007.02.005.
- [13] 李英华, 常敬臻, 张林, 等. 氦泡铝的层裂特性实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2021, 35(5): 054101. DOI: 10.11858/gywlb.20210770.
- LI Y H, CHANG J Z, ZHANG L, et al. Experimental investigation of spall damage in pure aluminum with helium bubbles [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2021, 35(5): 054101. DOI: 10.11858/gywlb.20210770.
- [14] 张凤国, 胡晓棉, 王裴, 等. 含氦泡金属铝层裂响应的数值分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(4): 699–704. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0699-06.
- ZHANG F G, HU X M, WANG P, et al. Numerical analysis of spall response in aluminum with helium bubble [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(4): 699–704. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0699-06.
- [15] GLAM B, STRAUSS M, ELIEZER S, et al. Shock compression and spall formation in aluminum containing helium bubbles at room temperature and near the melting temperature: experiments and simulations [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 1–12. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.10.010.
- [16] DURAND O, SOULARD L. Power law and exponential ejecta size distributions from the dynamic fragmentation of shock-loaded Cu and Sn metals under melt conditions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114: 194902. DOI: 10.1063/1.4832758.
- [17] 张凤国, 刘军, 何安民, 等. 强冲击加载下延性金属卸载熔化损伤/破碎问题的物理建模及其应用 [J]. *物理学报*, 2022, 71(24): 244601. DOI: 10.7498/aps.71.20221340.
- ZHANG F G, LIU J, HE A M, et al. Modelling of spall damage evolution and fragment distributing for melted metals under shock release [J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(24): 244601. DOI: 10.7498/aps.71.20221340.
- [18] TRUMEL H, HILD F, ROY G, et al. On probabilistic aspects in the dynamic degradation of ductile materials [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57: 1980–1998. DOI: 10.1016/j.jmps.2009.07.001.
- [19] JOHNSON J N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(4): 2812–2825. DOI: 10.1063/1.329011.
- [20] CARROLL M M, HOLT A C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials [J]. *Journal of Applied Physics*, 1972, 43: 1626–1636. DOI: 10.1063/1.1661372.
- [21] WU X Y, RAMESH K T, WRIGHT T W. The dynamic growth of a single void in a viscoplastic material under transient hydrostatic loading [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2003, 51: 1–26. DOI: 10.1016/S0022-5096(02)00079-0.
- [22] SEAMAN L, CURRAN D R, SHOCKEY D A. Computational models for ductile and brittle fracture [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47: 4814–4826. DOI: 10.1063/1.322523.
- [23] GLAM B, ELIEZER S, MORENO D, et al. Dynamic fracture and spall in aluminum with helium bubbles [J]. *International Journal of Fracture*, 2010, 163: 217–224. DOI: 10.1007/s10704-009-9437-1.
- [24] 张凤国, 刘军, 王昆, 等. 孔洞增长层裂损伤模型初始参数的确定方法及其应用 [J]. *物理学报*, 2020, 69(20): 204601. DOI: 10.7498/aps.69.20200527.
- ZHANG F G, LIU J, WANG K, et al. Determination method of parameters of void growth damage model and its application to simulation of spall test [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(20): 204601. DOI: 10.7498/aps.69.20200527.
- [25] IKKURTHI V R, CHATURVWDI S. Use of different damage models for simulating impact-driven spallation in metal plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2004, 30 : 275–301. DOI: 10.1016/S0734-743X(03)00070-8.
- [26] 张凤国, 王裴, 王昆, 等. 关于延性金属材料层裂强度概念的解读 [J]. *防护工程*, 2020, 42(5): 33–36
- ZHANG F G, WANG P, WANG K, et al. Interpretation of the concept of spalling strength of ductile metals materials [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(5): 33–36.
- [27] ROMANCHENKO V I, STEPANOV G V. Dependence of the critical stresses on the loading time parameters during spall in copper, aluminum, and steel [J]. *Journal of Applied Mechanics Technical Physics*, 1980, 21: 555–561 DOI: 10.1007/BF00916495.
- [28] MAYER A E, MAYWER P N. Strain rate dependence of spall strength for solid and molten lead and tin [J]. *International Journal of Fracture*, 2020, 222: 171–195 DOI: 10.1007/s10704-020-00440-8.

(责任编辑 王易难)