

文章编号: 1007-4627(2000)03-0152-07

金属材料中高能重离子辐照效应的理论描述*

王志光, 金运范

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 简要介绍了高能重离子在金属材料中引起辐照效应的主要理论, 特别是与电子能损引起的缺陷产生与演化、离子潜径迹形成、辐照相变以及各向异性塑性形变等效应相应的理论描述。

关键词: 金属材料; 高能重离子; 辐照效应理论; 电子能损效应

中图分类号: O571.33 文献标识码: A

1 引言

荷能离子穿过凝聚态物质时, 主要通过核阻止和电子阻止两种几乎独立的过程损失所携带的能量. 核阻止过程中的能量损失为核能损 $(dE/dX)_n$, 主要引起靶原子移位; 电子阻止过程中的能量损失为电子能损 $(dE/dX)_e$, 主要引起靶原子电子的电离和激发. 能量高于 0.1 MeV/u 的离子在物质中主要通过电子阻止损失能量. 此时, 电子能损在辐照效应的产生中起重要作用.

自 50 年代末在绝缘体材料中发现高能重离子引起的损伤^[1]以来, 人们对凝聚态物质中的重离子辐照效应作了大量的实验研究(见文献[2]及其引文). 特别是进入 80 年代以后, 人们利用 GeV 级的高能重离子束(在材料中的电子能损值可达几十 keV/nm)进行辐照, 在金属材料中观测到了一系列主要由电子能损引起的新现象, 如塑性形变、金属中缺陷的辐照退火与产生、潜径迹形成、相变等比较系统的实验结果(见文献[3]及其引文). 与此同时, 对高能重离子辐照效应(特别是电子能损效应)产生的机理也进行了深入的探讨^[4-27].

到目前为止, 基于库仑爆炸相互作用和热峰过程机制, 已提出了许多模型来解释金属材料中高能重离子辐照效应. 下面简要介绍高能重离子在金属材料中引起的辐照效应的主要理论, 特别是与电子能损效应相关的理论描述.

2 缺陷的产生

2.1 弹性碰撞产生的缺陷

荷能离子辐照产生缺陷的第一步是产生初级反冲原子或初级击出原子(PKA, Primary knock-on atom). 由于单个电子激发能小, 在碰撞中带走能量小, 在 PKA 产生的碰撞动力学过程中可以忽略不计. 也就是说, PKA 的产生主要是入射离子与靶原子之间弹性碰撞的结果. 在弹性碰撞过程中, 如果靶原子获得的能量 E 高于一个位移阈能量 E_d , 这个靶原子将会离开其正常点阵位置, 发生位移变成 PKA, 且在原位留下一个空位, 这个 PKA 最终停止于靶中的间隙位置, 变为间隙子. 这一对空位-间隙子缺陷被称为 Frenkel 对缺陷. 如果靶原子获得的能量 E 低于 E_d , 原子在其平衡位置附近振动, 随着热振动散失能量, 原子最终又回到原来位置. 如果转移给原子的能量 E 很大, 新产生的 PKA 又可击出其它原子, 形成位移级联, 直至 $E \leq E_d$.

考虑初始能量为 E 的 PKA 穿过各向同性介质, 通过完全弹性碰撞过程慢化, 并忽略电子激发和介质结构的影响, 则由该 PKA 产生的动能从 E' 到 $E' + dE'$ 的反冲原子的密度 $n(E, E')$ 可以表示为

$$\lim_{E'/E \rightarrow 0} n(E, E') = \alpha \frac{E}{E'^2},$$

α 为依赖于所选定散射规律的常数. 设 E_b 为原子结合能, E_c 为可被点阵空位俘获的慢离子的最大能

* 收稿日期: 2000-03-23

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(19875069); 中国科学院“九五”基础性研究重点项目(KJ952-S1-423)

作者简介: 王志光(1963-), 男(汉族), 山东青州人, 博士, 副研究员, 从事重离子与凝聚态物质相互作用研究.

量, 则级联倍增能量阈值 L 为 $L = E_d + E_c + E_b$. 对于 $E \geq L$, 一次碰撞出现两个粒子; 而当 $E < L$ 时, 只出现一个粒子. 因此, 从反冲密度可以直接估计位移原子的总数目为

$$N_d(E) = 1 + \int_L^n n(E, E') dE', \quad E \geq L$$

其中, 1 代表 PKA, 而积分表示级联倍增. 由于将 $n(E, E')$ 代入上式积分所预言的损伤太多, 上面的处理只为经典损伤函数的讨论提供了一条途径.

Kinchin 等^[4]提出了替位的概念, 并利用两体硬球散射, 得到 $\alpha = 1$. 他们选择 $E_c = E_d$ 和 $E_b = 0$, 使 $L = 2E_d$, 提出了所谓的 Kinchin-Pease 模型. Robinson^[5,6]的研究则表明公式中的 α 应被“位移效率 $\kappa < 1$ ”来代替. Sigmund^[7]进一步研究得到 $\kappa \approx 0.8$, 且这个值与 E 无关. 基于以上结果, Norgett 等^[8]取 $L = 2E_d/\kappa$, 给出了应用比较普遍的修正后的 Kinchin-Pease 模型(也称之为 NRT 模型). 在这个模型中, 损伤能 $E_D(E)$ 可近似表达为

$$E_D(E) = \frac{E}{1 + Kg(\epsilon_p)}, \quad (1)$$

其中, $K = 0.1337Z_2^{1/6}(Z_1/M_1)^{0.5}$,

$$g(\epsilon_p) = 3.4008\epsilon_p^{1/6} + 0.40244\epsilon_p^{3/4} + \epsilon_p,$$

$$\epsilon_p = \frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{a_{PTF}}{Z_1 Z_2 e^2} E,$$

$$a_{PTF} = 0.88534(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{-0.5} a_0,$$

这里, Z_1, M_1 和 Z_2, M_2 分别为初级击出原子和靶原子的原子序数、原子质量, a_0 为玻耳半径, E 为入射离子和靶原子的原子序数、原子质量以及两者之间散射角的函数. NRT 模型中, PKA 引起的位移原子数目的解析表达式为

$$N_d(E) = \begin{cases} 0, & E < E_d \\ 1, & E_d \leq E < 2.5E_d \\ 0.4E_D(E)/E_d, & E \geq 2.5E_d \end{cases} \quad (2)$$

每个 PKA 产生的平均位移原子数目为

$$\bar{N}_d = \frac{\int_{E_d}^{\max} N_d(E) d\sigma(E_1, E)}{\int_{E_d}^{\max} d\sigma(E_1, E)} = \frac{\sigma_d(E_1)}{\sigma_c(E_1)}, \quad (3)$$

其中, E_1 为入射粒子能量, E_{\max} 为 PKA 最大能量, σ_d 为位移损伤截面, σ_c 为库仑散射截面.

实验结果^[28]表明, 由于级联中心区高密度缺陷的复合, 具有较高平均能量的 PKA 产生的缺陷数量低于计算值, 计算值是实验值的 5-10 倍.

2.2 非弹性碰撞产生的缺陷

弹性碰撞产生缺陷的机制直接而简单, 可以相对准确地估计所产生缺陷的数目. 但是, 对于非弹性碰撞, 由于损失的能量通过间接的复杂过程转化为缺陷的产生, 因此很难定量估计相应的位移原子数目. 这时, 一般不再使用位移的概念, 而是直接参照产生缺陷的浓度, 这种浓度依赖于靶原子通过电子激发和原子电离过程所吸收的能量. 两种基本模型, 库仑爆炸模型^[9-12]和热峰模型^[13-19], 已用于研究非弹性碰撞引起缺陷产生的过程.

(1) 库仑爆炸模型 与金属相比, 绝缘体对电子激发更为灵敏. 为了解释这一现象, Fleisher 等^[9]发展了库仑爆炸模型(如图 1 所示): 入射离子沿其路径产生一个电离原子的柱体, 这个柱体非常不稳定. 由于荷正电离子间的直接库仑相互作用,

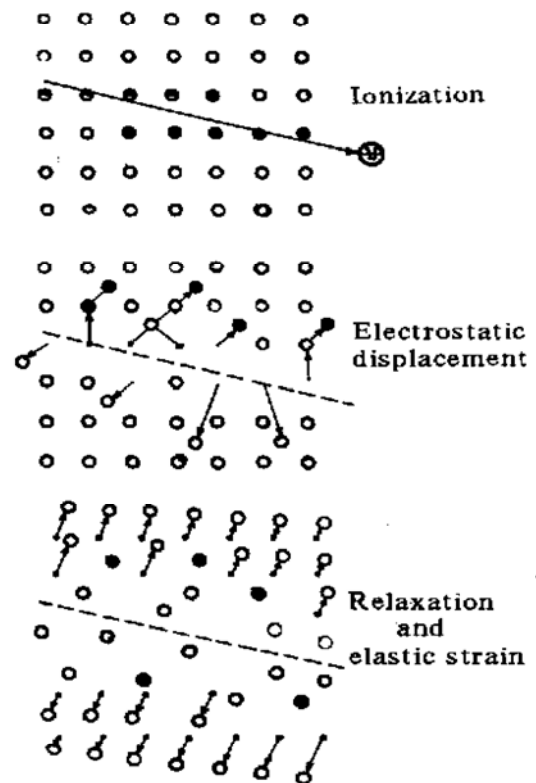


图 1 库仑爆炸模型示意图^[9]

在电子返回该柱体并达到电荷平衡过程中, 每个离子通过库仑排斥获得反冲能量 E_r , 这一能量依赖于荷正电区的寿命. 如果 E_r 足够大, 则离子会发生位

移,并占据点阵间隙位置,在荷正电柱体内留下空位痕迹.当重新达到电荷平衡后,新的系统建立起来并保留了新产生的缺陷,即沿离子路径形成潜径迹.在绝缘体中, E_r 反冲能为 10 eV 量级^[20],足以产生缺陷.而在金属中,荷正电区寿命由扰动电子系统的响应时间 τ_e 所限制, τ_e (约 10^{-16} s)比声子振动周期(约 10^{-13} s)短得多,原子受瞬间径向排斥所获得的能量 E_r 为 0.1 eV 量级^[21].在原子集体运动过程中,材料结构变化所需的能量与引起位移所需的单次碰撞转移能量相比是非常小的^[11,12],所以 E_r 仍可引起缺陷的产生.由于绝缘体中的 E_r 比金属中的 E_r 大得多,故绝缘体对电子激发比金属灵敏.

(2) 热峰模型 热峰模型是目前应用比较广泛的模型之一.该模型认为入射离子穿过凝聚态物质时,引起靶原子电离和激发,并将能量沉积于靶电子系统,这些能量通过电子-电子相互作用使大量电子热化而成为热电子气,进一步由电子-声子相互作用把能量传递给点阵原子.随着电子与原子间能量的转移,靶原子点阵温度 T_a 可达到材料的熔化温度.随后通过能量散失而快速冷却(约 $10^{13}\text{--}10^{15}\text{ K/s}$),从而产生永久性损伤,如产生缺陷、引起非晶化等.对于金属,Seitz等^[13]利用电子扩散系数(约 $1\text{ cm}^2/\text{s}$)和电子-声子耦合特征时间(约 10^{-12} s)从理论上估算出,当电子温度 T_e 为 5 000 K 时,贵金属的原子点阵温度 T_a 可从室温升至 500 K .Kaganov等^[29]对处于非平衡状态的相互关联的电子和原子系统作了分析,指出电子-原子间的能量转移使局部靶原子温度升高,且电子-声子耦合相互作用可取为 $g(T_e - T_a)$ 的形式, g 为耦合常数.Lifshits等^[30]利用Kaganov等人的分析给出结论,贵金属具有小的电子-声子耦合常数($g \approx 10^{10}\text{ W/cm}^3 \cdot \text{K}$),其温度升高在 $10\text{--}100\text{ K}$ 的量级,即热峰过程不足以导致缺陷的产生.Toulemonde等^[15,16]进一步分析和发展了热峰模型,他们的研究表明,对于具有多个d和f层电子的金属,电子-声子耦合作用强.在强电子激发的情况下,靶局部原子温度可以升得很高,足以产生热缺陷或引起沿离子路径的局域熔化而形成潜径迹等^[16-19].

2.3 产生缺陷的浓度

在缺陷不能自由运动的温度下用荷能电子辐照金属时,人们发现其中的缺陷浓度在辐照开始阶段

随辐照剂量的增加而线性增加,但在高辐照剂量下饱和,饱和Frenkel对缺陷的浓度 c 为1%原子浓度的量级.这可归因于缺陷周围存在一个绝热或瞬间复合体积.实际上,在一般金属中,这个体积包含有大约100个原子,覆盖间隙子(空位)周围2至3个原子间距的空间.绝热复合体积的概念直接对应于位移阈能的概念,位移阈能是一个原子逃逸出这个复合体积所需的能量.绝热复合体积与晶体结构对应,呈现各向异性,且沿密排方向变大.

沉积于电子系统的能量,通过电子-声子耦合相互作用传给点阵原子,可以导致缺陷的复合与产生^[12,22].另外,亚阈原子碰撞,即转移能量小于位移阈能的碰撞,所转移的能量虽然不足以在完美点阵中产生稳定的Frenkel对,但也可引起缺陷的移位和绝热复合,从而导致损伤产生率的变化^[31].考虑这些因素后,可将辐照产生缺陷的速率表示为

$$\frac{dc}{d\Phi} = \sigma_a(E_i)(1 - 2v_0c) - \sigma_r(E_i)c, \quad (4)$$

其中, Φ 为入射离子数目, v_0 为绝热复合体积. $\sigma_a(E_i)$ 和 $\sigma_r(E_i)$ 分别为考虑了电子能损效应和亚阈碰撞效应后的缺陷产生与复合截面.荷能离子辐照量达到 Φ 时,样品中缺陷浓度 c 为

$$c = \frac{\sigma_a}{2v_0\sigma_a + \sigma_r} \{1 - \exp[-(2v_0\sigma_a + \sigma_r)\Phi]\}. \quad (5)$$

3 单个离子引起的缺陷的产生与演化

对于许多金属材料,人们已对其中荷能粒子辐照引起的缺陷产生率及其相应的缺陷特征(缺陷组态、热稳定性和电阻率等)作了大量的研究,对辐照缺陷的演化也有了相当的了解.但是,存留于金属中相对稳定且可被检测的辐照缺陷与最初由入射离子所产生的缺陷的差异何在?快重离子辐照情况下,电子能损引起缺陷产生与演化的动力学过程如何?这都是悬而未决的问题.

3.1 随机原子热跃迁过程模型

为了解释辐照缺陷的产生与演化,针对高能重离子辐照纯金属情况,王志光等^[17-19]从热峰模型出发,提出了一个关于电子能损引起缺陷产生与演化的唯象模型——随机原子热跃迁过程模型.这个

模型的核心内容是:

(1) 荷能离子通过两个几乎独立的过程把自身部分能量传递给靶核系统和靶电子系统. 辐照所产生的缺陷均为简单缺陷, 如点缺陷或 Frenkel 对缺陷, 每一个缺陷相应于一个点阵位置.

(2) 基体中的点阵原子和存在于基体中的缺陷(间隙子和空位)均为相互作用实体. 处于非热稳定状态的点阵原子、间隙子和空位, 受热激发后, 它们在某一时刻可以通过单独的、互不相关的和随机的跃迁离开其平衡位置而迁移到近邻位置的方式进行运动或发生相互作用.

(3) 随着基体温度的升高, 间隙子和空位以不同的速度迁移, 迁移速度的快慢取决于金属和缺陷的特性. 当间隙子和空位靠近到某一距离(相应于绝热复合体积)时, 二者发生复合湮灭而导致辐照缺陷的退火. 如果基体温度足够高, 点阵原子受激发而迁移至远离其平衡位置处, 在原位留下空位, 从而形成由热激发所产生的 Frenkel 对缺陷. 这种由热引起的缺陷退火与产生是随机的, 可以用相应缺陷的跃迁激活能、跃迁几率和扩散系数来表征.

(4) 引起热缺陷产生与演化的热能来自于电子能损引起的热峰过程.

考虑到沿入射离子路径产生的缺陷的空间分布和电子能损引起的热峰具有轴对称性(对称轴为材料中入射离子穿过时的路径核心), 单个离子辐照产生的缺陷浓度的变化速率方程可以在柱体几何中表示为

$$\frac{\partial n_{i,v}}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left| r D_{i,v} \frac{\partial n_{i,v}}{\partial r} \right| - R + G, \quad (6)$$

其中下标 i 和 v 代表间隙子和空位, D 为扩散系数, n 为单位体积内缺陷的数目, G 和 R 分别代表电子能损引起的单位体积内有效点缺陷的产生率和复合率, r 为空间点到入射离子路径的距离, t 为时间. 在公式(6)中, D 是点阵温度的函数, n 为 r 和 t 的函数, R 与样品中缺陷浓度、缺陷复合体积和点阵温度密切相关, G 只与点阵位上剩余点阵原子浓度和点阵温度有关.

根据上面提出的唯象模型和相应的数学分析^[17-19], 结合电子能损引起的热峰过程^[15,16], 利用数值计算的方法, 模拟计算了给定离子辐照情况下电子能损在金属材料中引起的缺陷产生与演化过

程, 并定量地给出了与实验结果符合较好的电子能损引起的缺陷产生与退火量以及损伤效率值等^[17-19]. 图 2 给出了模拟计算得到的高能离子辐照 Fe 引起的理论缺陷退火截面 σ_{re}^{th} 与实验结果 σ_{re}^{exp} 的比较, 其中计算所用的初始条件如离子种类、能量和基体温度等与实验所采用的条件完全相同.

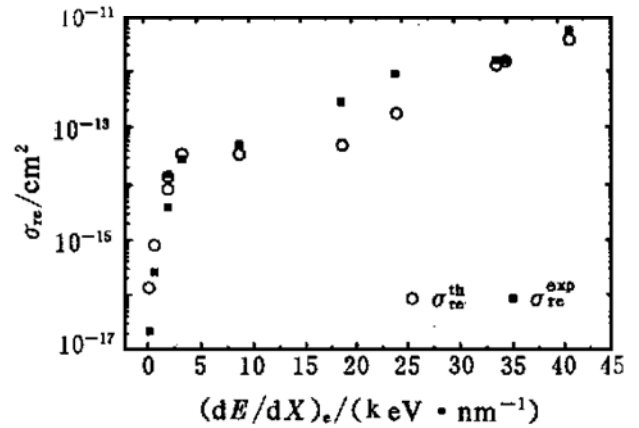


图 2 在纯金属 Fe 样品中电子能损引起缺陷退火的理论截面 σ_{re}^{th} 与实验结果 σ_{re}^{exp} 的比较^[18]

3.2 软声子模模型

Lesueur 和 Dunlop 等^[11,12,23,24] 根据库仑爆炸模型, 通过分析离子穿过凝聚态物质后离子路径周围空间电荷的时间演化以及原子受力运动, 提出了一个解释高能重离子引起金属材料中缺陷产生的软声子模模型. 该模型的核心内容为: 入射离子在靶物质中局域高电子能量沉积产生一个带正电的不稳定柱体, 在空间电荷寿命 τ_e 时间内, 柱体内带正电靶原子相互库仑静电排斥, 经过 ω^{-1} 量级的时间 (ω 为 Debye 频率, 约 10^{13} s^{-1}) 后靶原子开始运动. 当空间电荷完全被金属材料中传导电子屏蔽时, 库仑斥力消失, 原子间作用势达到平衡值. 在一维线性谐振子近似下, 原子运动方程可写为

$$M_2 \ddot{u}_j = \sum_p K_p (u_{j+p} + u_{j-p} - 2u_j) + f_j(t), \quad (7)$$

其中 u_j 为距离离子径迹核心第 j 个原子点阵常数 a 处原子的位移, M_2 为靶原子质量, K_p 为一个原子与其第 p 个近邻原子的耦合常数, $f_j(t)$ 为 t 时刻作用于原子 j 上的力. 求解运动方程(7)得到原子间距的相对变化为

$$\frac{u_{j+1}(t) - u_j(t)}{a} = - \frac{2i}{a} \sum_q \frac{\sin[\Omega(q)t]}{M_2 \Omega(q)}.$$

$$\sin \left| \frac{qa}{2} \right| F(q) e^{-iq(j-0.5)a} \quad (8)$$

$F(q)$ 为 $f_j(t)$ 的付立叶变换函数, $\Omega(q)$ 为声子谱, q 为声子波矢. 当 $\Omega(q)$ 小时, 原子位移和原子间距相对变化的值变大, 即原子位移和点阵膨胀强烈地依赖于声子谱: (1) q 趋于 0 时, 对应于长波长激发, 即声学振动或弹性波传播; (2) 在声子谱中出现软声子模, 此时大波矢 q 处于布里渊区极限附近, 相应于近邻原子位移处于远离相态的振动模式之中, 可产生对应于能量极小的重要相变. 这种动力学无序, 定性地解释了高能重离子辐照时, 电子能损在金属中引起的缺陷的产生^[12, 23, 24].

4 相变与潜径迹形成

到目前为止, 已提出多种模型来解释非金属材料中的辐照相变和潜径迹形成, 如库仑爆炸模型^[9]、径迹核心等离子体模型^[10]和热峰模型^[14, 32]等. 但是, 用于描述金属材料中辐照相变和潜径迹形成的模型尚不多. 为了解释金属材料中辐照相变和潜径迹形成的机制, Lesueur 和 Dunlop 等^[11, 23, 24]在库仑爆炸模型的基础上提出了弹性波模型, Toulemonde 和王志光等^[15, 16, 19, 33]则在原热峰模型的基础上提出了改进的热峰模型.

4.1 弹性波模型^[11, 23, 24]

离子在靶物质中产生的带正电柱体内的原子受库仑力作用而发生位移, 从而形成弹性波. 在柱坐标系中, 弹性波在各向同性介质中的传播方程为

$$\frac{\partial}{\partial r} \left| \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} [r, u(r, t)] \right| = \frac{1}{V_s^2} \left[\frac{\partial^2}{\partial t^2} u(r, t) \right], \quad (9)$$

其中 V_s 为靶物质中声速, $u(r, t)$ 为离子穿过 t 时间后处于位置 r 的靶原子的位移. 方程(9)的解为

$$u(r, t) = \int J_1(qr) \sin(qV_s t) dq \cdot \int_{V_s^{-1}u_0(r')} J_1(qr') r' dr' \quad (10)$$

局域体形变系数为

$$\alpha(r, t) = \int q J_0(qr) \sin(qV_s t) dq \cdot \int_{V_s^{-1}u_0(r')} J_1(qr') r' dr' \quad (11)$$

在方程(10)和(11)中, $J_1(qr)$ 和 $J_0(qr)$ 为第一类贝塞尔函数. 对(11)式积分并取近似, 得到: 在离子径迹核心处($V_s t/r < 1$)存在压缩波, 而在径迹外围($V_s t/r > 1$)存在膨胀波. 如果材料不同相态之间存在体积差异, 且弹性波引起的体积变化达到或超过这个差异, 则相变发生. 如果径迹核心区出现由弹性波引起的不可恢复的点阵损伤或缺陷产生, 则形成了离子径迹. 这个模型与冲击波模型类似, 可用来描述强级联情况下的原子集体运动现象^[34], 由此可定性解释辐照引起的相变和离子潜径迹的形成.

4.2 改进的热峰模型^[15, 16, 19, 33]

在电子能损引起的热峰过程中, 离子路径附近点阵原子可升温至材料的熔点以上, 而处于无序态, 经过快淬, 这种状态被保存下来. 可以认为熔化区的尺寸即为潜径迹的尺寸.

考虑金属的热力学参数、电子-声子耦合系数以及由入射离子提供给电子系统的单位时间能量密度等, 对电子能损引起的热传导方程进行数值求解, 得到电子能损引起的热峰过程中点阵温度随时间和空间的变化, 从而定量地给出潜径迹的尺寸.

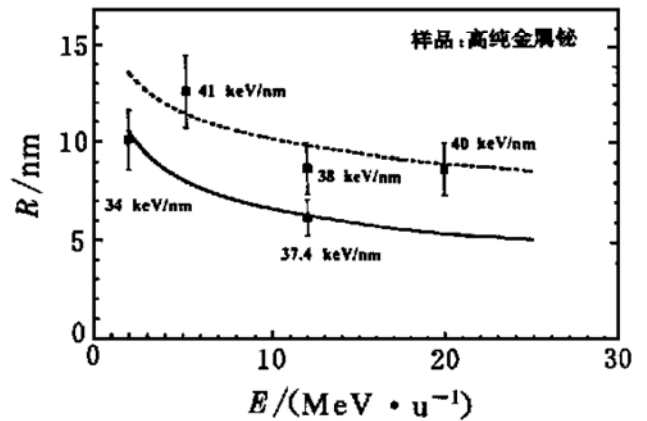


图 3 利用改进热峰模型计算得到的潜径迹尺寸随入射离子单核能的变化(电子能损值分别为 35 keV/nm (—) 和 40 keV/nm (---))及其与实验结果(□)的比较^[19]

研究表明, 对于给定的金属, 潜径迹的尺寸不仅与电子能损值的大小有关, 还与入射离子速度、辐照温度有关^[19]. 图 3 给出了利用改进的热峰模型计算得到的潜径迹尺寸随入射离子单核能(单核能正比于离子速度的平方)的变化.

5 塑性形变

为了解释实验观测到的非晶态金属合金材料中

高能重离子辐照引起的塑性形变现象, Klaumunzer 和侯明东等^[21,25]根据库仑爆炸机制提出了切变点模型; Audouard 等^[26]提出了唯象模型——两次撞击模型; Trinkaus 等^[27]提出了有效流动温度近似模型. 这些模型定性或部分定量地解释了实验结果. 对这些模型较详细的评论见文献[35].

6 结论

综上所述, 许多模型已用于解释高能重离子在金属材料中引起的辐照效应. 考虑到亚阈原子碰撞效应的影响, 产生辐照效应的过程可以用图 4 表示^[19]. 应该指出的是, 现有的模型虽然从各自不同的角度部分地解释了已有的实验结果和现象, 但高能重离子在金属材料中引起的辐照效应的机理尚未完全明确, 还有待于进一步的深入研究.

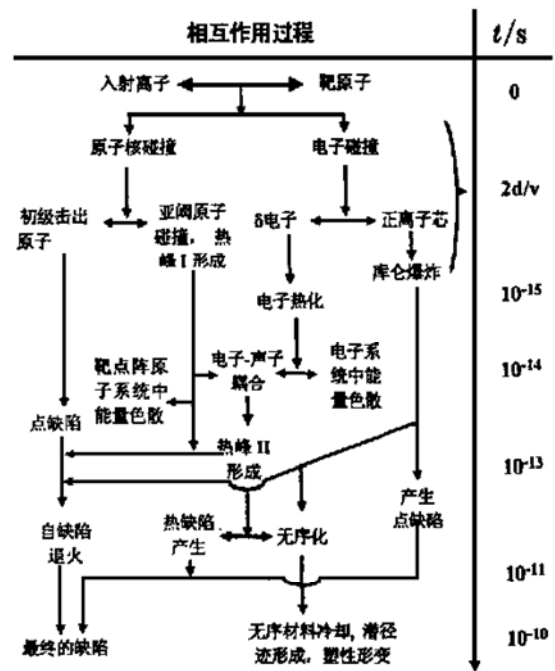


图 4 高能离子在固体中引起辐照效应的时间演化示意图

参 考 文 献:

[1] Silk E C H, Barnes R S. Examination of Fission Fragment Tracks with an Electron Microscope [J]. Phil Mag, 1959, 4: 970- 972.

[2] 金运范, 王志光. 快重离子在凝聚态物质中引起的效应——电子能损效应 [J]. 原子核物理评论, 1998, 15(2): 88- 96.

[3] 王志光, 金运范, 侯明东. 纯金属中电子能损效应的实验研究 [J]. 原子核物理评论, 2000, 17(2): 100- 105.

[4] Kinchin G H, Pease R S. The Displacement of Atoms in Solids by Radiation [J]. Rep Prog Phys, 1955, 18: 1- 51.

[5] Robinson M T. The Influence of the Scattering Law on the Radiation Damage Displacement Cascade [J]. Phil Mag, 1965, 12: 741- 765.

[6] Robinson M T. Basic Physics of Radiation Damage Production [J]. J Nucl Mater, 1994, 216: 1- 28.

[7] Sigmund P. On the Number of Atoms Displaced by Implanted Ions or Energetic Recoil Atoms [J]. Appl Phys Lett, 1969, 14: 114- 116.

[8] Norgett M J, Robinson M T, Torrens I M. A Proposed Method of Calculating Displacement Dose Rates [J]. Nucl Eng Des, 1975, 33: 50- 54.

[9] Fleisher R L, Price P B, Walker R M. Nuclear Tracks in Solids—principles and Applications [M]. California: University of California Press, 1975, 23- 41.

[10] Ritchie R H, Claussen C. A Core Plasma Model of Charged Particle Track Formation in Insulators [J]. Nucl Instr and Meth, 1982, 198: 133- 138.

[11] Lesueur D, Dunlop A. Damage Creation via Electronic Excitations in Metallic Targets, Part II: A theoretical model [J]. Rad Eff Def in Sol, 1993, 126: 163- 172.

[12] Dunlop A, Lesueur D, Legrand P *et al.* Effects Induced by High Electronic Excitations in Pure Metals: A detailed study in iron [J]. Nucl Instr and Meth, 1994, B90: 330- 338.

[13] Seitz F, Koehler J S. Displacement of Atoms during Irradiation [J]. Sol State Phys, 1956, 2: 305- 448.

[14] Merkle K L. Fission-fragment Tracks in Metal and Oxide Films [J]. Phys Rev Lett, 1962, 9: 150- 153.

[15] Toulemonde M, Dufour C, Paumier E. Transient Thermal Process after a High-energy Heavy-ion Irradiation of Amorphous Metals and Semiconductors [J]. Phys Rev, 1992, 46: 14 362- 14 369.

[16] Wang Z G, Dufour C, Paumier E *et al.* The S_e Sensitivity of Metals under Swift-heavy-ion Irradiation: A transient thermal process [J]. J Phys: Condens Matter, 1994, 6: 6 733 - 6 750.

[17] Wang Z G, Dufour C, Hou M D *et al.* Defect Production and Annealing Induced by Electronic Energy Loss in Pure Metal [J]. Nucl Instr and Meth, 1998, B135: 265- 269.

[18] Wang Z G, Dufour C, Jin Y F *et al.* Modification of Defects Induced by Nuclear Collisions in Fe and Ni in Electronic Stopping Power Regime [J]. Nucl Instr and Meth, 1998, B146: 290- 295.

[19] 王志光. 纯金属中快重离子辐照效应的实验与理论研究 [D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1999 年.

[20] Seiberling L E, Griffith J E, Tombrello T A. A Thermalized

- Ion Explosion Model for High Energy Sputtering and Track Registration [J]. *Rad Eff*, 1980, 52: 201– 210.
- [21] Klaumunzer S, Hou Mingdong, Schumacher G. Coulomb Explosion in a Metallic Glass due to the Passage of Fast Heavy ions? [J]. *Phys Rev Lett*, 1986, 57: 850– 853.
- [22] Dufour C. Modelisation de la Formation de Traces dues au Ralentissement Electronique des Ions Lourds Rapides dans les Materiaux Metalliques et Etudes Experimentales dans le Bismuth [Z]. C E Saclay: CEA, 1993, Rapport CEA-R-5 638.
- [23] Dunlop A, Legrand P, Lesueur D *et al.* Phonon Soft Modes and Damage Production by High Electronic Excitations in Pure Metals [J]. *Europhys Lett*, 1991, 15: 765– 770.
- [24] Dammak H. Changement de Phase Crystalline Induit par Irradiation aux Ions Lourds Rapides dans un Metal Pur [Z]. C E Saclay: CEA, 1994, Rapport CEA-R-5 668.
- [25] Hou Ming-dong, Klaumunzer S, Schumacher G. Dimensional Changes of Metallic Glasses during Bombardment with Fast Heavy Ions [J]. *Phys Rev*, 1990, B41: 1 144– 1 157.
- [26] Audouard A, Balanzat E, Jousset J C *et al.* Atomic Displacements and Atomic Motion Induced by Electronic Excitation in Heavy-ion-irradiated Amorphous Metallic Alloys [J]. *J Phys: Condens Matter*, 1993, 5: 995– 1 018.
- [27] Trinkaus H, Ryazanov A I. Viscoelastic Model for the Plastic Flow of Amorphous Solids under Energetic Ion Bombardment [J]. *Phys Rev Lett*, 1995, 74: 5 720– 5 075.
- [28] Averback R S, Merkle K L. Radiation-annealing Effects in Energetic Displacement Cascades [J]. *Phys Rev*, 1977, B16: 3 860– 3 869.
- [29] Kaganov M I, Lifshitz I M, Tanatarov L V. Relaxation between Electrons and Crystalline Lattice [J]. *Sov Phys-JETP*, 1957, 4: 173– 178.
- [30] Lifshitz I M, Kaganov M I, Tanatarov L V. On the Theory of Radiation-induced Changes in Metals [J]. *J Nucl Energy*, 1960, A12: 69– 78.
- [31] Dural J, Ardouneau J, Jousset J C. Endommagement du Fer par Irradiation aux Electrons à 20 K [J], *Le Journal de Physique*, 1977, 38: 1 007– 1 011.
- [32] Izui K. Fission Fragment Damage in Semiconductor and Ionic Crystals [J]. *J Phys Soc Jpn*, 1965, 20: 915– 932.
- [33] 王志光, Toulemonde M. 高能重离子在金属中引起的辐照效应是热峰效应? [J]. *青岛大学学报*, 1997, 自然科学版增刊: 384– 388.
- [34] Wolff P A. Theory of Plasma Waves in Metals [J]. *Phys Rev*, 1953, 92: 18– 23.
- [35] 侯明东. 快重离子引起的塑性形变现象 [J]. *原子核物理评论*, 2000, 17(3): 146– 151.

Theoretical Expressions of High-energy Heavy-ion Irradiation Induced Effects in Metallic Materials^{*}

WANG Zhi-guang, JIN Yun-fan

(*Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Experimental results showed that, for high-energy heavy-ion irradiations, electronic energy loss could play a dominant role in damage process in solid materials. In order to explain the experimental phenomena and results, a series of theoretical models based on Coulomb explosion or thermal spike mechanisms have been proposed. In the present paper, more attention was paid to theoretical expressions of high-energy heavy-ion irradiation induced effects in metallic materials, and main theoretical models of nuclear collision induced defect production, electronic energy loss induced defect production and evolution, ion latent track formation, phase transformation as well as anisotropic plastic deformation, were briefly introduced.

Key words: metallic material; theoretical expression irradiation induced effect; electronic energy loss effect

* **Foundation item:** NSFC (19875069); Scientific Foundation of “9.5” Fundamental Research from the Chinese Academy of Sciences (KJ952-S1-423)