

## 晶粒尺寸对 1 MeV 电子在金属 Ni 中能量沉积的影响\*

马国亮 李兴冀<sup>†</sup> 刘海 刘超铭 杨剑群 何世禹

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

(2012 年 12 月 6 日收到; 2013 年 1 月 5 日收到修改稿)

采用脉冲电沉积方法制备出高致密、高质量的纳米晶 Ni, 并对其密度、组织成分和微观结构进行了表征. 利用高能粒子加速器产生的 1 MeV 高能电子为辐照源, 研究高能电子在纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 中的能量损失. 通过辐照过程中放置的吸收剂量片来准确表征其电子的能量沉积. 结果表明, 晶粒尺寸对高能电子在材料中的能量沉积有明显的影响, 1 MeV 电子在穿过一定厚度的金属 Ni 后, 在晶粒尺寸细小的纳米晶 Ni 中测得总的吸收剂量较大, 证明了高能电子在纳米材料中的总能量沉积较小, 从而表现出纳米材料抗辐照的优异性能.

关键词: 高能电子, 纳米金属, 辐射损伤

PACS: 14.60.Cd, 61.46.-w, 61.80.-x

DOI: 10.7498/aps.62.091401

## 1 引言

纳米科学技术 (Nano-ST) 是 20 世纪 80 年代诞生并逐渐崛起的一门新兴交叉科学, 是研究在纳米尺寸 (0.1—100 nm) 范围内的物质组成体系运动规律和相互作用以及制备具有特定功能新的物质材料的科学技术. 自 1984 年 Gleiter 采用惰性气体冷凝原位加压法 (IGC) 制得纯物质的块状纳米材料后<sup>[1]</sup>, 块状纳米材料的研究引起了世界各国科学家的极大关注, 人们研究发现, 块状纳米材料与普通多晶材料相比, 有着非常优异的光、热、电、磁、力学性能等, 正广泛用于航空航天飞行器中, 如机身及其辅助装置、机翼、发动机及其部件、螺旋桨、火箭喷嘴和点火器等<sup>[2,3]</sup>.

为使纳米块体材料优异性能在空间航空航天材料中得到较好的应用, 研究高能粒子在纳米材料中的能量沉积和交互作用是必要和十分迫切的<sup>[4-8]</sup>. 对于纳米材料来说, 晶粒尺寸减少到纳米尺度后从而导致大量晶界的存在, 这种材料微观结构的改变对高能粒子与材料的交互作用将会导致一定的影响. Archubi 等<sup>[9]</sup>在研究质子和氦离子在铝合金的辐照过程中, 发现不同的入射角度会对

入射粒子能量损失产生影响, 从而表明晶体结构对粒子在材料中的能量损失是不容忽视的. Chimi<sup>[10]</sup>在研究纳米金离子辐照过程中的缺陷产生和恢复中, 同样认为纳米材料大量晶界的存在对其辐照缺陷有着明显的影响, 纳米金中的辐照缺陷是不稳定的, 晶界处缺陷产生所需的能量较低. Zhang<sup>[11]</sup>和 Shen<sup>[12]</sup>通过试验分别研究了纳米烧绿石  $Gd_2(Ti_{0.65}Zr_{0.35})_2O_7$  和纳米  $MgGa_2O_4$  的辐照缺陷行为, 认为通过改变材料的晶粒尺寸和结构有序程度可以提高材料的抗辐照性能, 验证了通过改变材料微观结构从而提高材料抗辐照性能的可行性. 高能粒子与材料相互作用本质上也是高能粒子在材料中的能量沉积行为, 但关于高能粒子在纳米块体材料中的能量沉积问题研究很少<sup>[13]</sup>. 高能电子是空间辐照环境最重要的高能带电粒子之一, 本文利用自制的电沉积纳米晶 Ni 与常规粗晶 Ni 进行对比分析, 对高能电子在两种不同晶粒尺寸金属 Ni 中能量沉积行为进行了研究, 并对测试结果做了讨论分析.

## 2 电子在材料中的能量损失

空间高能带电粒子源主要包括地球辐射带、

\* 国家自然科学基金 (批准号: 11205038) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2012M510951) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn

银河宇宙线及太阳宇宙线三类<sup>[14]</sup>. 高能带电粒子穿过物质时, 所损失的能量可以分为两部分: 电离能量损失与位移能量损失. 电离能量损失是由于入射粒子与靶材原子中电子的相互作用引起的, 而位移能量损失是由于粒子与介质原子中核子的相互作用引起的. 当入射质子或重离子能量较高时, 偶尔也会发生核与核直接相互作用(强碰撞)发生核反应, 产生核裂变, 但是这类事件发生的概率相对不大, 因此, 这种作用应该单独考虑.

电子质量较轻, 在与靶材碰撞过程很少与原子核发生相互作用, 通过物质时会发生多次散射, 因而其路径不能用直线近似. 电子在物质中的能量沉积由电离能量损失和韧致辐射能量损失两部分构成. 韧致能量损失是由于电子受到原子核库仑场作用而使其动量改变并发出电磁辐射, 发出的电磁辐射称为韧致辐射, 具有从零到入射电子能量的连续谱. 电子的韧致辐射方向主要是朝前的, 平均发射角一般很小.

对于电子在材料中的电离能量损失计算一般利用贝特(Bethe)公式<sup>[15]</sup>

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = \frac{2\pi N_0 z^2 e^4 Z}{m_e c^2 \beta^2 A} \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 E_e}{2I^2 (1-\beta^2)} - \ln 2 \left( 2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2 \right) + (1-\beta^2) + \frac{1}{8} \left( 1 - \sqrt{1-\beta^2} \right) \right], \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为材料密度,  $E_e$  为入射电子的动能, 以  $m_e c^2$  为单位;  $m_e$  和  $e$  分别为电子的静止质量和电荷;  $\beta$  为电子速度  $v$  与光速  $c$  之比,  $v/c$ ;  $Z$  为材料的原子序数;  $z$  为带电粒子的电荷数;  $A$  为材料的原子量;  $N_0$  为阿伏伽德罗常数;  $I$  为材料原子的平均电离电势.

韧致辐射能量损失率公式<sup>[15]</sup>

$$\left( -\frac{dE}{dx} \right)_{\text{韧致}} = \frac{4Z(Z+1)NE_e}{137} \times r_e^2 \left[ \ln \left( 183Z^{-1/3} \right) + \frac{1}{18} \right], \quad (2)$$

式中,  $r_e$ -经典电子半径,  $r_e = 2.818 \times 10^{-13}$  cm,  $N$  为固体介质中的原子密度.

电子在物质中的韧致辐射能量损失率与电离能量损失率之比近似为

$$\frac{(-dE/dx)_{\text{韧致}}}{(dE/dx)_{\text{电离}}} \approx \frac{(E_e + m_e c^2) Z}{1600 m_e c^2}. \quad (3)$$

那么电子的能量损失率公式为<sup>[15]</sup>

$$\left( -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \right)_{\text{总}} = \frac{4Z(Z+1)NE_e}{137} r_e^2 \left[ \ln \left( 183Z^{-1/3} \right) + \frac{1}{18} \right] \times \left[ 1 + \frac{1600 m_e c^2}{(E_e + m_e c^2)} \right]. \quad (4)$$

由上式可见, 随着入射电子的能量  $E_e$  和靶材原子序数  $Z$  的增加, 韧致辐射能量损失所占的比例逐渐增高.

上述推导基于理想粗晶材料, 对于纳米材料由于特殊的微观结构, 表现出特殊的纳米效应, 而这些对高能电子在纳米材料中的能量损失影响没有见报道, 也没有相应的理论来进行补充. 德国 Dresden 大学科学家正在进行高能质子与纳米材料的作用截面的研究, 可见, 关于纳米材料与高能粒子相互作用的研究已引起了科学家们的广泛重视.

电子在材料中的能量衰减是个连续谱, 这与质子在材料中的能量损失不同, 质子在材料中的能量损失与入射深度相关的函数, 当入射深度固定时, 其能量损失为确定的值, 即所有质子能量为单一确定的, 而电子在某一入射深度为从零到初始能量的连续谱, 国际上一般用吸收剂量来表征电子的能量沉积. 吸收剂量是单位质量靶材中所吸收的平均辐射能量. 其定义为<sup>[16]</sup>

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m}, \quad (5)$$

式中,  $\Delta E$  是电离辐射以电离、激发等方式授与一体积元中质量为  $\Delta m$  的物质的平均能量. 吸收剂量的单位是  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 专用单位是 Gy (戈瑞) 或 rad (拉德).

### 3 实验材料与方法

#### 3.1 试验材料的制备与表征

采用电化学沉积<sup>[17]</sup>制备块体纳米晶体 Ni 金属, 制备的方式选用脉冲电沉积, 通断比为 3:2, 阳极板采用纯度为 99.9% 的镍板; 阴极板采用不锈钢板; 采用低应力镀 Ni 溶液, 电解液所需化学试剂: 溶液主盐(氨基硫酸镍, 氯化镍), 表面活性剂(如十二烷基苯硫酸钠, 糖精等), pH 值调节剂(硼酸)组成, 所有的化学试剂均采用分析纯. 根据正交实验的结果, 电流密度为  $2 \text{ A/dm}^2$ , pH 值为 3, 温度为  $50^\circ\text{C}$ ,  $\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$  含量为  $1 \text{ g/L}$  作为电沉积的最佳工艺参数, 各种试剂的用量配比情况如表 1 所示.

材料的密度对于高能粒子在材料中能量损失影响至关重要 ((1) 式), 因此要研究高能电子在纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 中的吸收剂量变化, 必须准确表征其密度. 由于样品体积比较小而且为薄片, 为了能够准确测量的材料密度, 这里采用的真密度测量方法. 通过阿基米德-气体膨胀置换法, 利用小分子直径的惰性气体在一定条件下的波尔定律 ( $PV = nRT$ ), 通过测定由于样品测试腔放入样品所引起的测试腔气体容量的减少来精确测定样品的真实体积, 从而得到真密度, 真密度 = 质量/真实体积. 测试实验在北京贝士德公司完成, 产品型号为 3H-2000TD1 完全自动化的真密度分析仪, 精确度优于  $\pm 0.04\%$ , 重复性优于  $\pm 0.02\%$ , 分辨率为  $0.0001 \text{ g/cm}^3$ . 电沉积纳米晶 Ni 密度被确定为  $8.8353 \text{ g/cm}^3$ , 常规粗晶 Ni 为  $8.8272 \text{ g/cm}^3$ .

表 1 电沉积纳米 Ni 所采用的试剂用量配比

电沉积液成分	化学式	含量/(g/L)
氨基硫酸镍	$\text{Ni}(\text{SO}_3\text{NH}_2)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	300
氯化镍	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	15
硼酸	$\text{HBO}_3$	30
糖精	$\text{C}_7\text{H}_5\text{NO}_3\text{S}$	1
蒸馏水	$\text{H}_2\text{O}$	~ 600

纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 的 XRD 测试结果, 如图 1 所示, 可以看出, 二者均为高纯的单质 Ni, 与传统的常规粗晶 Ni 相比, 纳米晶 Ni 的衍射峰明显宽化, 表现出纳米晶材料晶粒细小的特征.

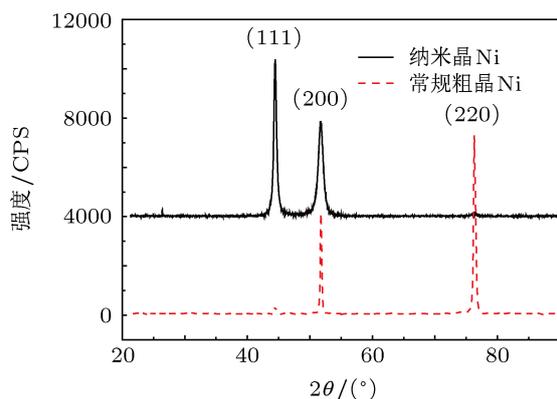


图 1 纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 的 XRD 表征

采用透射电子显微镜 (TEM, H-800, Japan) 观察纳米晶镀层的微观组织, 并对试样进行选区电子衍射 (SAD) 分析. 与常规粗晶 Ni 对比如图 2 所示. 结果表明, 纳米晶 Ni 的晶粒尺寸范围在 10—50 nm

之间, 平均晶粒尺寸为 22 nm, 常规粗晶 Ni 的晶粒尺寸范围波动很大, 尺寸范围在 1—10  $\mu\text{m}$  左右.

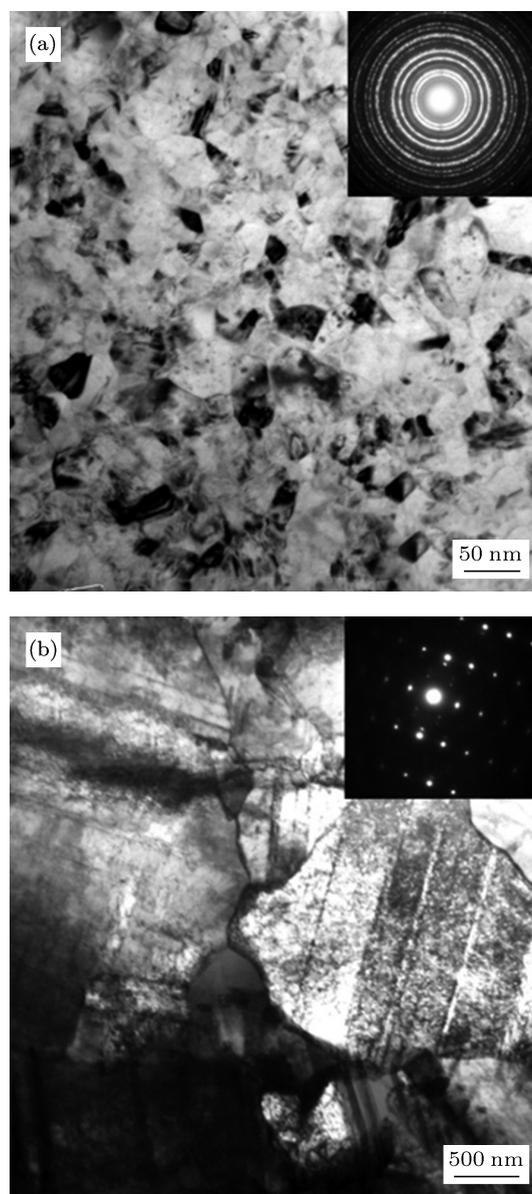


图 2 纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 的 TEM 表征 (a) 纳米晶 Ni; (b) 常规粗晶 Ni

### 3.2 实验与测试方法

首先利用 Casino 软件模拟 1 MeV 电子在材料中的运行轨迹和能量损失, 根据模拟结果设计高能电子辐照过程中所选择的样品厚度. 高能电子辐照试验在黑龙江省技术物理研究所进行, 辐照源为 1 MeV 高能电子. 电子在金属 Ni 中的吸收剂量值通过吸收剂量片来进行表征. 使用分光光度计测试量片的光学性能与金属 Ni 的吸收剂量值进行转换, 所计算出的吸收剂量值即为该深度下金属 Ni 的吸

收剂量值. 吸收剂量片使用前后必须遮光保存, 辐照后立即进行标定相应的吸收剂量值. 每组材料辐照测试进行三次, 以保证测试结果的可靠性.

#### 4 Casino 软件模拟结果

首先针对 1 MeV 高能电子在金属 Ni 中的垂直辐照情况进行计算机模拟, 利用 Casino 软件模拟 1 MeV 电子在金属 Ni 的电子运动轨迹和吸收剂量随入射深度的变化关系. 从图 3 可以看出, 高能电子在金属 Ni 中吸收剂量的变化是先升高再降低, 在大约 77  $\mu\text{m}$  处出现吸收剂量最大值. 在入射深度 450  $\mu\text{m}$  时, 电子在材料中产生的吸收剂量基本消失. 电子在材料的轨迹也是很发散的, 并且散射角度很大, 如图 4 所示. 其线性能量损失分布如图 5

所示, 与吸收剂量变化相对应, 在入射深度 77  $\mu\text{m}$  左右是线性能量损失的最大值.

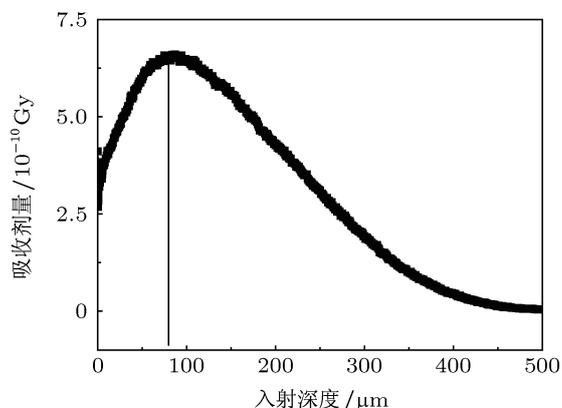


图 3 Casino 软件模拟 1 MeV 电子在金属 Ni 中的吸收剂量与入射深度关系

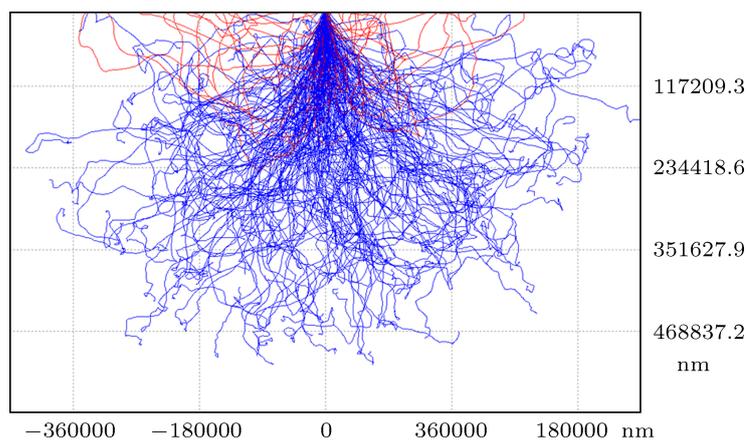


图 4 Casino 软件模拟 1 MeV 电子在金属 Ni 中的运动轨迹

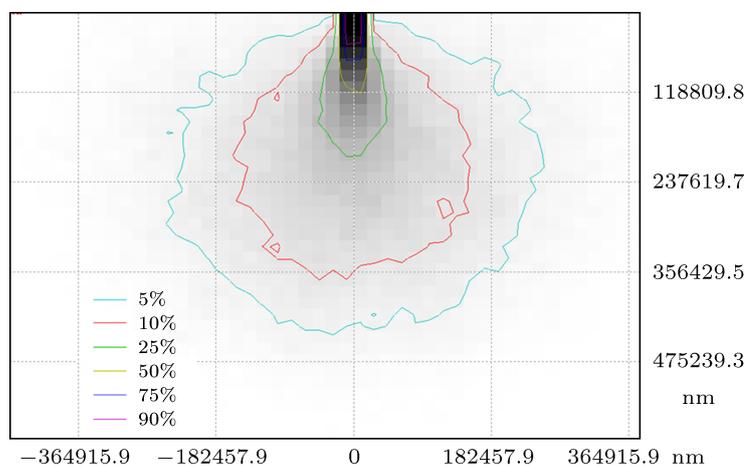


图 5 Casino 软件模拟 1 MeV 电子在金属 Ni 中的线性能量损失分布

## 5 高能电子辐照实验结果

高能电子辐照试验在黑龙江省技术物理研究所完成, 实验源为 1 MeV 高能电子. 样品为总厚度为 258  $\mu\text{m}$  的金属 Ni, 单层厚度 43  $\mu\text{m}$ , 共 6 层金属片. 在金属片前后放置吸收剂量片 (共 7 片), 辐

照后立即遮光测试. 高能电子的总注量为  $3.4 \times 10^{14} \text{ e/cm}^2$ , 根据 Casino 软件模拟的结果计算, 总电离剂量约为 170 kGy. 每次辐照样品位置固定, 样品前放置控制辐照面积的圆筒卡具, 卡具材料为环氧树脂, 保证每次受照面积恒定, 每组样品测试 3 次, 测试结果如表 2 所示.

表 2 1 MeV 电子辐照过程中吸收剂量与入射深度的关系

材料	样品序号	入射深度/ $\mu\text{m}$						
		0	43	86	129	172	215	258
		吸收剂量/kGy						
纳米晶 Ni	1	55.0	70.6	80.1	76.2	61.7	45.7	31.5
	2	50.9	69.3	79.0	75.6	61.7	46.4	32.5
	3	53.6	68.3	78.4	74.5	60.6	46.7	33.6
常规粗晶 Ni	1	52.9	75.4	74.0	64.0	52.6	37.7	20.9
	2	53.6	76.9	79.3	65.1	53.1	36.9	21.2
	3	53.1	76.4	79.6	64.9	52.7	37.1	21.6

为了更好地比较 1 MeV 电子在不同晶粒尺寸金属 Ni 中的吸收剂量与入射深度的关系, 将测试结果对比分析, 三次测量的平均值对比如图 6 所示. 从测试结果可以看出, 随着 1 MeV 电子入射深度的增加, 吸收剂量先增加后降低, 两种材料的吸收剂量曲线在入射深度 85  $\mu\text{m}$  左右相交. 当样品厚度小于 85  $\mu\text{m}$  时, 1 MeV 电子在粗晶 Ni 材料中所沉积的能量较纳米 Ni 材料中多; 当样品厚度大于 85  $\mu\text{m}$  时, 1 MeV 电子在纳米 Ni 材料中所沉积的能量较粗晶 Ni 材料中多. 并且, 对于常规粗晶 Ni 来说, 在大约 73  $\mu\text{m}$  处出现吸收剂量最大值, 而对于纳米晶 Ni 材料来说, 在大约 100  $\mu\text{m}$  处出现吸收剂量最大值. 通过对比实验结果 (常规粗晶 Ni) 与 Casino 软件的模拟结果 (图 3), 可以看出常规粗晶 Ni 材料的结果与模拟结果相近. 由图 6 可见, 纳米晶 Ni 的测试结果与常规粗晶 Ni 测试结果相比明显右移, 这表明: 1) 1 MeV 电子在纳米 Ni 中的射程要大于在常规 Ni 中的射程; 2) 靶材厚度固定 (小于 85  $\mu\text{m}$ ) 时, 1 MeV 电子在常规 Ni 中的能量沉积要大于在纳米 Ni 中的能量沉积.

从高能电子在材料中的能量损失公式可以看出, 能量沉积的影响因素主要是被辐照材料的原子序数和密度, 纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 为同一物质, 原子序数相同, 密度相差极小, 所以, 原子序数和密度并不是影响高能电子在纳米晶 Ni 和常规粗晶 Ni 能量沉积差异的原因. 考虑晶粒尺寸的对材料影响

主要体现在晶界的体积分数差异, 关于晶界对高能电子能量损失的影响将在讨论中进一步阐述. 综上所述, 材料内部的吸收剂量值反映了靶材材料中吸收的能量, 在一定厚度情况下, 纳米晶 Ni 吸收的辐射总剂量较常规材料要小, 表现出一定的抗辐照优势. 这个发现对于纳米金属材料在航天器上的应用选材具有很重要的意义.

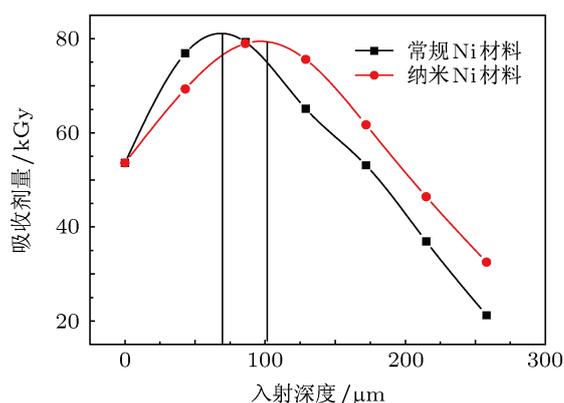


图 6 1 MeV 电子辐照过程中吸收剂量与入射深度的关系

## 6 讨论

高能电子在纳米 Ni 中的能量损失较少这里从纳米材料的结构特征进行了理论阐述. 对于传统粗晶材料, 晶界仅仅作为一种缺陷, 所占空间体积分数是很小的. 然而在纳米晶材料中, 由于纳米粒

子的尺寸小,晶界所占的体积百分数几乎可与纳米晶内所占的体积百分比数相当.若将晶粒看成球状或者立方体,则晶界所占体积分数可近似的表示为<sup>[18]</sup>

$$V_f = 3\delta/(d + \delta), \quad (6)$$

式中 $\delta$ 为平均晶界厚度, $d$ 为平均晶粒尺寸.当晶粒 $d = 5 \text{ nm}$ 时,晶界体积为50%.因此纳米材料的晶界不能简单的看出一种缺陷,它已经成为纳米结构材料基本构成之一,对纳米材料的性能的影响起着举足轻重的作用.晶粒间界面是材料物理和化学性质发生突变的二维空间区域,材料许多重要的物理和化学反应过程都发生在界面,由于界面原子数比例增多,存在着许多缺陷,无序度增加,同时晶体的对称性变差,其部分能带被破坏,因而出现了界面效应,原子配位不足,界面原子的配位不饱和性导致大量的悬空键和不饱和键,表面能高,因而这些原子具有高的活性<sup>[2,19]</sup>.界面的这些现象可以归结为界面原子与内部原子的能量不同所产生,即原子的电子能量状态不同,由于与界面原子的交互作用与内部原子不同,当一个高能粒子与晶界原子发生相互作用时,由于其界面原子能量与内部原子能量的不同,过剩的Gibbs自由能或者界面能比较容易使其电子能量状态发生改变,而晶粒内部原子电子能量状态相对来说处于稳态,与高能粒子发生相互作用时需要比较高的能量,对其的阻碍作用相对来说也要强烈.这种行为与纳米材料中的扩散行为

很接近,在描述粒子在材料中输运行为或扩散行为中,纳米材料的晶内扩散系数比理想点阵的扩散系数大了两个数量级,但还是要比晶界扩散系数小一个量级,在纳米晶体中晶界扩散占绝对优势<sup>[19]</sup>.本试验所测得晶粒平均尺寸 $d = 22 \text{ nm}$ ,平均晶界厚度 $1.5 \text{ nm}$ ,利用(6)式可以计算出晶界所占体积分数为19.15%.而对于普通粗晶Ni晶界所占体积分数要远远小于1%,因此,在一定厚度下纳米晶体中大量晶界的存在为高能粒子在材料中运动提供了较容易的通道,这样就会使 $1 \text{ MeV}$ 电子在纳米晶Ni中的能量沉积减少,从而经过两种不同晶粒尺寸金属Ni层后纳米晶Ni的总吸收剂量要大于常规粗晶Ni.

## 7 结论

利用脉冲电沉积方法成功制备出高致密、高质量的块体纳米晶Ni,其真密度与常规粗晶Ni的真密度基本一致.本文采用 $1 \text{ MeV}$ 高能电子辐照纳米晶Ni和常规粗晶Ni,对于常规粗晶Ni来说,在大约 $73 \mu\text{m}$ 处出现吸收剂量最大值,而对于纳米晶Ni材料来说,在大约 $100 \mu\text{m}$ 处出现吸收剂量最大值.实验结果表明晶粒尺寸对高能电子在材料中能量沉积有明显的影响.纳米晶Ni的吸收剂量结果与常规粗晶Ni测试结果相比明显右移,这表明,纳米Ni中的能量沉积较少,从而使纳米材料的优异性能得到更加广泛的应用.

- [1] Gleiter H 1989 *Prog. Mater. Sci.* **33** 223
- [2] Gleiter H 1995 *Nanostruct. Mater.* **6** 3
- [3] Gleiter H 2000 *Acta. Mater.* **48** 1
- [4] Lee K Y, Lim J R, Rho H 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 201901
- [5] He C H, Yang H L, Chen X H, Wang Y P, Li G Z 2003 *Chin. Phys. Soc.* **52** 180
- [6] Di M W, He S Y, Li R Q, Yang D Z 2006 *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B* **252** 212
- [7] Wang Z X, Li X P, Yu L P, Ma Y G, He G W, Hu G, Chen Y, Duan X F 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 620 (in Chinese) [王震遐, 李学鹏, 余礼平, 马余刚, 何国伟, 胡岗, 陈一, 段晓峰 2002 物理学报 **51** 620]
- [8] Wang K Y, Li Z H, Gao K, Zhu Y M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 097803 (in Chinese) [王凯悦, 李志宏, 高凯, 朱玉梅 2012 物理学报 **61** 097803]
- [9] Archubi C D, Eckardt J C, Lantschner G H, Arista N R 2006 *Phys. Rev. A* **73** 042901
- [10] Chimi Y, Iwase A, Ishikawa N, Kobiyama M, Inami T, Okuda S 2001 *J. Nucl. Mater.* **297** 355
- [11] Zhang J M, Lian J, Fuentes A F, Zhang F X, Lang M, Lu F Y, Ewing R C 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 243110
- [12] Shen T D, Feng S H, Tang M, Valdez J A, Wang Y Q, Sickafus K E 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 263115
- [13] Tripathy S P, Mishra R, Kulshreshtha A, Dwivedi K K, Khathing D T, Srivastava A, Ghosh S, Fink D 2001 *Radiation Measurements*. **33** 171
- [14] Feng Y J, Ha G X, Liu S F 2007 *Journal of Astronautics*. **28** 1071 (in Chinese) [冯彦君, 华更新, 刘淑芬 2007 宇航学报 **28** 1071]
- [15] Yu J N 2007 *Material Radiation Effects* (Beijing: Chemical Industry Press) p7 (in Chinese) [郁金南 2007 材料辐照效应 (北京: 化学工业出版社) 第7页]
- [16] Wang C S, Luo W Y, Xu M J, Zhou S X, Feng Y X, Zhang L M, Gu J Q 1994 *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*. **12** 209 (in Chinese) [王传珊, 罗文芸, 许梦杰, 周树鑫, 冯永祥, 张利民, 顾继青 1994 辐射研究与辐射工艺学报 **12** 209]
- [17] Erb U 1995 *Nanostruct. Mater.* **6** 533
- [18] Wang G H, Han M 1998 *Progress in Physics*. **10** 248 (in Chinese) [王广厚, 韩民 1990 物理学进展 **10** 248]
- [19] Eberhart M E, Vedensky D D 1987 *Phys. Rev. Lett.* **58** 61

# Effect of grain size on energy deposition process in Ni metal during 1 MeV electron irradiation\*

Ma Guo-Liang Li Xing-Ji<sup>†</sup> Liu Hai Liu Chao-Ming Yang Jian-Qun He Shi-Yu

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 6 December 2012; revised manuscript received 5 January 2013)

## Abstract

The high performance nano-crystal Ni material was prepared by the pulse electrodeposition process; the intensity, composition and the microscopic structure of the nano-crystal Ni material were investigated by various measurements. In this paper, the 1 MeV electron was chosen as the irradiation source to investigate the energy loss of high energy electron in the nano-crystal Ni material and conventional bulk Ni material, and the energy deposition process during the electron irradiation was measured by the absorbed dose tablets. The results show that the grain size affects the energy loss process during the 1MeV electron irradiation seriously. The absorbed dose of 1 MeV electron in the nano-crystal Ni material is lower than that in the common Ni material with the same thickness, which indicates that the energy deposition of high energy electron in nano-crystal metal is lower than that in the conventional bulk metal, and the nano-crystal metal has an advantage of radiation resistance.

**Keywords:** high energy electron, nano-material, radiation damage

**PACS:** 14.60.Cd, 61.46.-w, 61.80.-x

**DOI:** 10.7498/aps.62.091401

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11205038), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2012M510951).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lxj0218@hit.edu.cn