

## 外应力作用下小角晶界的斜排位错运动研究\*

# Inclined Dislocation Motion of Low Angle Grain Boundaries under Shear Force Exerting

秦河林,陈建灵,黄世叶,邓芊芊,高英俊\*\*

QIN He-lin, CHEN Jian-ling, HUANG Shi-ye, DENG Qian-qian, GAO Ying-jun

(广西大学物理科学与工程技术学院,广西南宁 530004)

(College of Physical Science and Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China)

**摘要:**【目的】探讨纳米晶材料中小角度晶界位错在应力作用下的演化机理。【方法】通过分析位错受力,建立动力学方程,分析晶界斜排位错在受到外应力作用下的运动规律。【结果】晶界位错的3个部分结果不同,处在中心位错以上的位错(第1部分)在剪切应力不断增大的过程中,会经过滑移,波动,最后沿柏氏矢量方向滑移过程;中心位错(第2部分)会经过滑移,波动,再滑移过程;中心位错以下的位错(第3部分)会先逆柏氏矢量方向滑移,然后改变运动方向进行攀移,最后回到第5个位错的初始位置后沿柏氏矢量滑移。【结论】当晶界位错受到外应力作用时,晶界会马上瓦解,外应力是导致晶界瓦解的主要因素。对比水平位错的晶界,斜排位错组成的晶界瓦解不具有对称性,每个位错的运动规律都各有特点。

**关键词:**斜排位错 晶界瓦解 位错运动 建模

**中图分类号:**TG111 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-9164(2015)05-0506-05

**Abstract:**【Objective】An evolution process of the annihilation of small angle grain boundaries dislocation was researched in nanocrystalline materials in this paper.【Methods】Through the analysis of dislocation stress and the establishment of dynamics equations, the law of motion of grain boundary dislocations was studied under the external stress.【Results】For all of the inclined dislocations, grain boundary dislocations can be divided into three parts. In the first part, the dislocation above middle dislocation slips, swings, and finally slips along with the vector direction in the process of shear stress increasing. In the second part, the middle dislocation slips, swings, and slides again. In the last part, the dislocation below middle dislocation slips firstly along inverse direction of the vector, then changes direction for climbing, and finally returns back to the position of the fifth dislocation and slips along with the vector.【Conclusion】The results show that grain boundary soon collapses when affected by external stress, which is the main factor that leads to grain boundary collapse. In comparison with horizontal dislocation of grain boundary, inclined dislocation of grain boundary collapse is not symmetry, and each of the dislocation motion has its characteristics.

**Key words:** inclined dislocations, grain boundary collapse, dislocation motion, modeling

收稿日期:2015-08-10

作者简介:秦河林(1991-),男,硕士研究生,主要从事纳米材料性能与计算模拟实验方面的研究。

\* 国家自然科学基金项目(51161003,50661001)和广西研究生教育创新计划基金项目(YCSZ2014039, YCSZ2015029)资助。

\*\* 通讯作者:高英俊(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事纳米结构材料设计与计算模拟实验方面的研究, E-mail: gaoyj@gxu.edu.cn.

## 0 引言

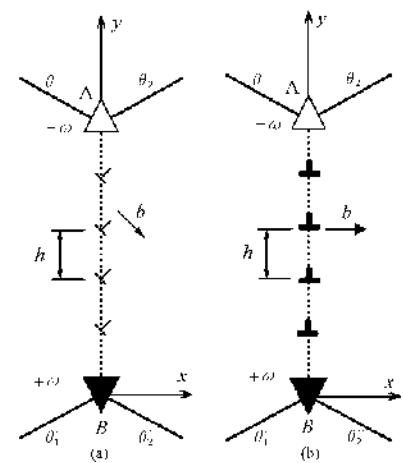
【研究意义】纳米晶体材料是近年的研究热点<sup>[1~15]</sup>,它能展现出良好的形变特性,故其形变的主要机理值得研究。一般的材料不会既具硬度又具韧

性,但对于一些类似于陶瓷和合金的纳米晶体材料,其在保证硬度的同时还具有很好的塑性。所以这类材料晶界位错在应力作用下的演化机理更加具备研究价值。【前人研究进展】一系列研究表明,纳米晶材料所具有的塑性或者超塑性形变,其主要机理是由于晶格位错滑移<sup>[1,2]</sup>、晶界扩散蠕变<sup>[3~5]</sup>、三叉晶界连接扩散蠕变<sup>[6]</sup>、旋转变形<sup>[7~10]</sup>、晶界位错滑移<sup>[10~14]</sup>、孪晶化<sup>[15]</sup>等之间的相互竞争决定的。同时,Gutkin等<sup>[16,17]</sup>在此基础上研究了纳米晶材料在塑性变形中晶界的转变,其中包括小角度晶界的湮灭<sup>[16]</sup>、大角度晶界的弯曲和变形塑性纳米晶体材料中不全位错的发射<sup>[17]</sup>。【本研究切入点】对于直径大于30 nm的晶粒,晶格位错的滑移占主导地位。而对于这种尺度晶界的研究,传统的位错研究方法<sup>[18]</sup>已不太适用。由于纳米晶体材料中有很多的晶界面,可以通过研究晶界处位错的流动来研究材料的可塑性。而且纳米晶体材料中包含了很多由晶格位错组成的小角度晶界,所以有必要研究小角度晶界位错在外应力作用下的运动规律。文献<sup>[16,17,19~24]</sup>已经研究了小角度晶界中水平位错在外应力作用下的运动规律,而针对斜排位错的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】通过建立动力学方程,研究纳米晶材料中小角度晶界处斜排位错在外应力作用下的运动规律。

## 1 模型与方法

考虑纳米晶材料样品中的小角度晶界模型,如图1a所示。当不受到外应力作用时,位错在晶界处竖直成直线排列,形成一排位错墙,位错的柏氏矢量与晶界成一个夹角 $\alpha$ 。为研究方便,设 $\alpha = 45^\circ$ ,其间距为 $h$ ,晶界的长度为 $d$ ,位错的柏氏矢量为 $\vec{b}$ 。类比于图1b模型,假设斜排位错晶界的倾侧取向角 $\theta$ 满足补偿关系: $\theta + \theta_1 + \theta_2 = 0$ 和 $-\theta + \theta_1' + \theta_2' = 0$ , $(\theta_1, \theta_2)$ 和 $(\theta_1', \theta_2')$ 为三叉晶界的取向参数,分别对应于晶界上三叉点A和下三叉点B。

对于晶界斜排位错墙,在分析其位错运动规律之前,需要对其进行受力分析。当施加外应力作用后,这组位错共受到3个力的作用:1)外部施加的切应力,2)位错之间的相互作用力,3)位错墙形成的向错偶极子的作用力。由于所讨论的位错是斜排位错,所以柏氏矢量方向与晶界的夹角 $\alpha$ 设为 $45^\circ$ ,那么这时位错的柏氏矢量表示为 $(\frac{\sqrt{2}}{2}b, -\frac{\sqrt{2}}{2}b, 0)$ 。



(a)斜排位错,(b)水平位错

(a) Inclined dislocation, (b) Horizontal dislocation

图1 三叉晶界连接处的小角晶界位错排列示意图

Fig. 1 Schematic diagram about small-angle grain boundary dislocations arrangement at the junction of grain boundary

由位错理论<sup>[25]</sup>可以对如下几种情况的受力进行推导:

a)外部施加的切应力

$$F_{\text{剪}} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2}b & -\frac{\sqrt{2}}{2}b & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix} \times k =$$

$$\frac{\sqrt{2}}{2} b \tau_{yx} \vec{j} + \frac{\sqrt{2}}{2} b \tau_{xy} \vec{i}, \quad (1)$$

其中 $\tau_{xy} = -\tau_{yx} = \tau$ 。

b)位错之间的相互作用力

如图1a中所示的柏氏矢量与水平方向斜 $45^\circ$ 的位错可以分解为一个柏氏矢量沿 $x$ 轴正方向的水平位错和一个柏氏矢量沿 $y$ 轴负方向的垂直位错。所以可以通过求解水平位错间的相互作用力和垂直位错间的相互作用力的受力,通过力的合成得到与水平方向斜 $45^\circ$ 的位错间的相互作用力。具体表达式为

$$F_x = \frac{\sqrt{2}}{2} Db^2 \frac{(x+y)(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2}, \quad (2)$$

$$F_y = \frac{\sqrt{2}}{2} Db^2 \frac{y(3x^2+y^2) + x(3y^2+x^2)}{(x^2+y^2)^2}, \quad (3)$$

其中 $D = \frac{G}{2\pi(1-\nu)}$ 。

c)考虑到柏氏矢量斜 $45^\circ$ 的位错可以分解为一个柏氏矢量沿 $x$ 轴正方向水平的位错和一个柏氏矢量沿 $y$ 轴负方向的垂直位错,仅柏氏矢量沿 $x$ 轴正方向水平的位错受到向错作用力,则位错墙形成的向错偶极子的作用力(向错强度用 $\omega$ 表示):

$$F_x = \frac{\sqrt{2}}{2} bD\omega \left( \frac{(y-d)x}{x^2 + (y-d)^2} - \frac{yx}{x^2 + y^2} \right), \quad (4)$$

$$F_y = \frac{\sqrt{2}}{4} bD\omega \ln \frac{x^2 + (y-d)^2}{x^2 + y^2} + \frac{\sqrt{2}}{2} bD\omega \left( \frac{(y-d)^2}{x^2 + (y-d)^2} - \frac{y^2}{x^2 + y^2} \right). \quad (5)$$

通过公式(1)~(5)的推导,就可以得到位错墙中第  $i$  个位错的受力。结合公式(1),(2),(4)可得位错在  $x$  轴方向上的受力:

$$F_{x_i} = \frac{\sqrt{2}}{2} b\tau + Db^2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \{ [((x_i - x_k) + (y_i - y_k))((x_i - x_k)^2 - (y_i - y_k)^2)] / [((x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2)^2] \} + \frac{\sqrt{2}}{2} bD\omega \left( \frac{(y_i - d)x_i}{x_i^2 + (y_i - d)^2} - \frac{y_i x_i}{x_i^2 + y_i^2} \right), \quad (6)$$

结合公式(1),(3),(5)可得到位错在  $y$  轴方向上的受力:

$$F_{y_i} = \frac{\sqrt{2}}{2} b\tau + Db^2 \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N \{ [(y_i - y_k)(3(x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2) + (x_i - x_k)(3(y_i - y_k)^2 + (x_i - x_k)^2)] / [((x_i - x_k)^2 + (y_i - y_k)^2)^2] \} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2}}{2} bD\omega \ln \frac{x_i^2 + (y_i - d)^2}{x_i^2 + y_i^2} + \frac{\sqrt{2}}{2} bD\omega \left( \frac{(y_i - d)^2}{x_i^2 + (y_i - d)^2} - \frac{y_i^2}{x_i^2 + y_i^2} \right). \quad (7)$$

设第  $i$  个位错的坐标为  $(x_i, y_i)$ , 这时小角晶界的第  $i$  个位错的运动方程为

$$m \frac{d^2 x_i}{dt^2} + \beta \frac{dx_i}{dt} = F_{x_i}, i = 1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

$$m \frac{d^2 y_i}{dt^2} + \beta \frac{dy_i}{dt} = F_{y_i}, i = 1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

本文假设晶界位错  $N = 11$ , 初始条件:  $x_i = 0, \dot{x}_i = 0, y_i = ih, \dot{y}_i = 0$ 。位错质量取  $m = \frac{\rho b^2}{2} \approx 2.4 \times 10^{-16}$  kg/m,  $\beta$  为阻尼系数, 设  $\beta \approx 5 \times 10^{-5}$  Pas。运用 MATHEMATICA 8.0 计算软件求方程的数值解。计算中所用的各参数值为  $G = 82 \times 10^9$  Pa,  $\nu = 0.29$ ,  $a = 2.87 \times 10^{-10}$  m,  $b = \frac{1}{2} a \{111\} = 2.5 \times 10^{-10}$  m,  $N = 11, \theta = 0.1 (\approx 5.7^\circ), \omega = \theta = 0.1, h = 10b$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 同一切应力对不同位错运动的作用

为了便于分析,选择晶界处位错组中几个具有代表性的位错来分析。对照模型,晶界处 11 个位错依次从下往上,仅选取位置排列在第 1, 3, 6, 9, 11 这 5

个位置的位错考察其运动情况,其中将处在晶界中间位置的第 6 个位错的初始位置定义为中心位错的位置。

当施加很小的剪切应力,如图 2 a,  $\tau = 0.2$  GPa 时,位错组由于受到剪切应力作用将会沿柏氏矢量方向滑移,则中心位错以上的位错会在合力的作用下向柏氏矢量方向滑移,但由于剪切应力比较小,滑移到一定距离后,会在一个固定的地方波动,如图 2 a 中的绿线和紫线。而中心位错以下的位错,在应力作用下起初会逆着柏氏矢量方向滑移到一定位置,然后改变运动方向滑移,在合力的作用下,位错会出现攀移现象,如图 2 a 中的蓝线和橙线。中心位错本身受力平衡,一直处在中间位错不动,当受到剪切应力后,平衡被破坏,也会在柏氏矢量方向有一点波动。由于施加的切应力比较小,波动不是很明显(如图 2 a 中的红线)。通过观察整个位错组,发现越靠近中心位错,位错受到的合外力越小,位移距离也越小,越远离中心位错的位错,所受到的合外力越大,位移距离也越大。

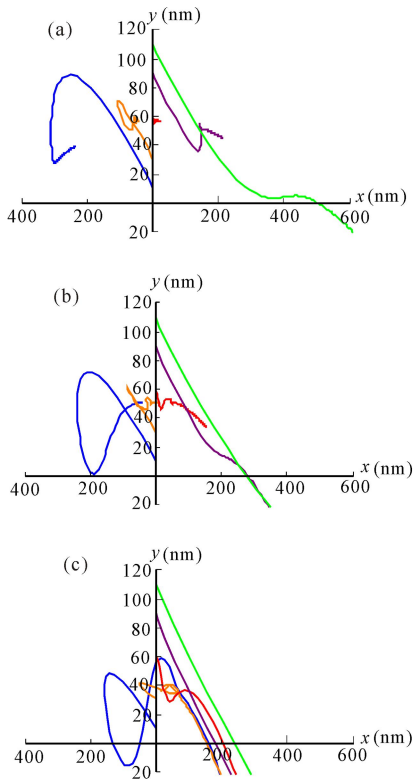
当增加剪切应力大小后,如图 2 b,  $\tau = 0.6$  GPa 时,中心位错及中心位错以上的位错会滑移更远的距离,如图 2 b 中红线,紫线和绿线,而中心位错以下的位错会攀移到第 5 个位错的初始位置,然后再开始沿柏氏矢量方向滑移,如图 2 b 中蓝线和橙线。

当施加比较大的剪切应力,如图 2 c,  $\tau = 1.5$  GPa 时,由于在这 3 个作用力中,剪切应力最大,所以位错在 3 个力的作用下,最终都会沿着柏氏矢量方向滑移。

### 2.2 同一位错在不同剪切应力作用下的运动情况

由 2.1 节的分析知,斜排位错组在同时受到剪切应力、位错间相互作用力和向错作用力的时候,力的分布不具有对称性。每个位错都具有独特的运动特征。但这些位错也具有一些共性。依据这些共性,选择 3 个具有代表性的位错进行分析,探索它们在不同剪切应力作用下的运动规律(图 3 中的 a, b, c)。

1) 以第 6 个位错为中心位错,低于中心位错的都具有类似的位移特征。以第 1 个位错的位移为例,当剪切应力比较小的时候,如图 3 a1,  $\tau = 0.2$  GPa,位错在开始运动的时候,受到位错间相互作用力和向错作用力比较大,位错会逆着柏氏矢量方向运动,当运动到一定距离后,由于位错间距的改变,位错间相互作用力逐渐减弱,位错受力的作用逐渐平衡。当增加剪切应力后,如图 3 a2,  $\tau = 0.6$  GPa,位错又在以向错作用力为主导力的作用下攀移到中心位错位置。当继续增大剪切应力,如图 3 a3,  $\tau = 1.0$  GPa,位错

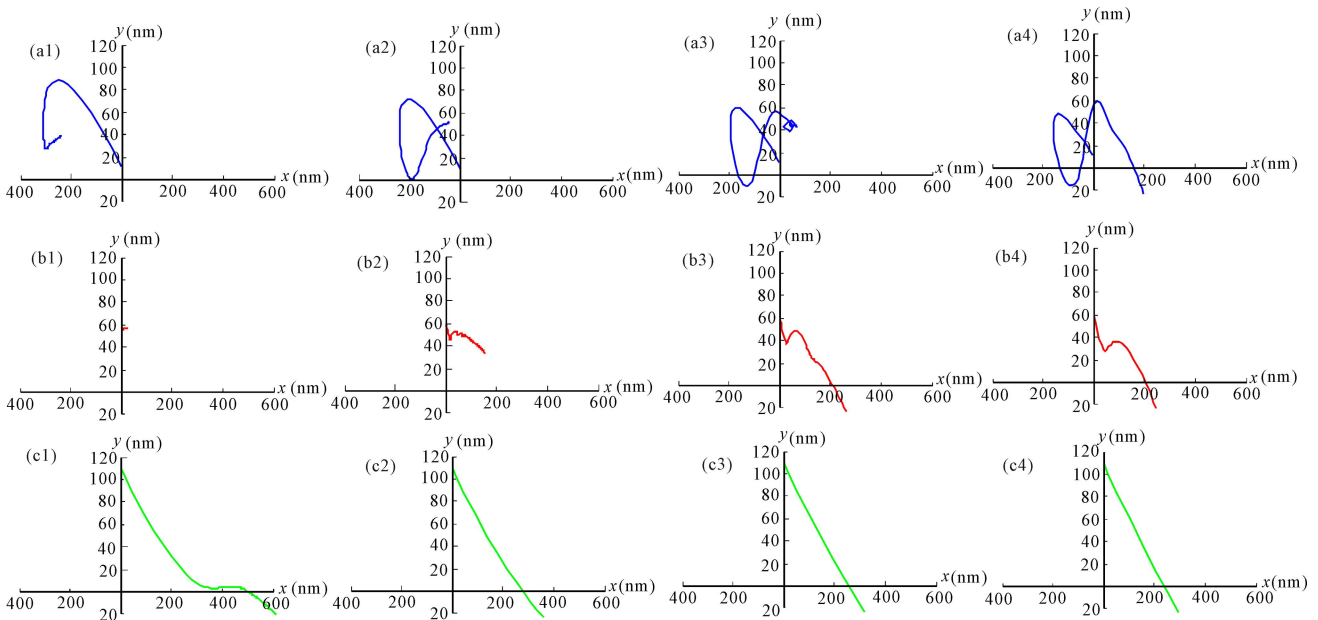


(a)  $\tau = 0.2$  GPa, (b)  $\tau = 0.6$  GPa, (c)  $\tau = 1.5$  GPa; (a)(b)(c)中第 1, 3, 6, 9, 11 这 5 个位错的位移分别由蓝色、橙色、红色、紫色、绿色线段表示。

The five dislocations in(a)(b)(c) numbered as 1, 3, 6, 9, 11 are represented by blue, orange, red, purple, green, respectively.

图 2 5 个位错的位移图

Fig. 2 The displacement map of five dislocation



(a) 第 1 个位错, (b) 第 6 个位错, (c) 第 11 个位错

(a) The 1st dislocation, (b) The 6th dislocation, (c) The 11th dislocation

(a1)  $\tau = 0.2$  GPa, (a2)  $\tau = 0.6$  GPa, (a3)  $\tau = 1.0$  GPa, (a4)  $\tau = 1.5$  GPa, (b1)  $\tau = 0.2$  GPa, (b2)  $\tau = 0.6$  GPa, (b3)  $\tau = 1.0$  GPa, (b4)  $\tau = 1.5$  GPa, (c1)  $\tau = 0.2$  GPa, (c2)  $\tau = 0.6$  GPa, (c3)  $\tau = 1.0$  GPa, (c4)  $\tau = 1.5$  GPa

图 3 不同剪切应力作用下的位错位移

Fig. 3 The displacement of the dislocation under shear stress

回到初始中心位错位置后,在剪切应力的作用下,沿柏氏矢量方向波动。最终当剪切应力达到一定大小后,如图 3 a4,  $\tau = 1.5$  GPa,位错最终会沿着柏氏矢量方向滑移到无穷远处。

2)对于第 6 个位错,其在不同应力作用下的运动情况如图 3 b 所示。位错在不受到剪切力作用的时候保持受力平衡状态,当受到很小的剪切应力作用时,如图 3 b1,  $\tau = 0.2$  GPa,位错有向柏氏矢量方向滑移的趋势,当逐渐增大剪切应力后,位错在一段距离内会波动滑移,还会有攀移现象,最终会平稳地沿着柏氏矢量方向滑移,如图 3 b2, b3, b4。

3)中心位错以上的位错也具有类似的位移特征。以第 11 个位错的位移为例,当施加的剪切应力比较小,如图 3 c1,  $\tau = 0.2$  GPa,位移开始运动就沿着柏氏矢量方向滑移,但由于剪切应力比较小,运动到一定距离后,位错会在向错力作用下向  $y$  方向中心聚集,在  $y$  方向稳定一段时间之后,再继续沿初始柏氏矢量方向滑移。当继续增大剪切应力,剪切应力足以抵消向错作用力的聚集作用,位错就会一直沿着柏氏矢量方向滑移,如图 3 c2, c3, c4。

### 3 结论

本文通过建立动力学方程,分析晶界位错在受到外应力作用下的运动规律,针对斜排位错得到如下结论:

1)斜排位错列在受到很小的剪切应力作用时,中心位错以上的位错会沿柏氏矢量方向滑移;中心位错以下的位错会逆着柏氏矢量方向滑移运动,而中心位错基本稳定在初始位置。位错攀移到中心位错处,且所有位错,距离中心位错越近,运动的距离越短,距离中心轴线越远,运动的距离越长。

2)在剪切应力不断增大的过程中,中心位错以上位错会继续沿着柏氏矢量方向滑移,一段距离后在  $y$  方向上停顿,最终仍沿着柏氏矢量方向滑移;中心位错以下的位错会经历反向柏氏矢量方向滑移,然后攀移到第 5 个位错的初始位置,最后沿着柏氏矢量方向滑移。

#### 参考文献:

[1] Pande C S, Masumura R A, Armstrong R W. Pile-up based Hall-Petch relation for nanoscale materials[J]. *Nanostructured Materials*, 1993, 2(3): 323-331.

[2] Malygin G A. Breakdown of the Hall-Petch law in micro-and nanocrystalline materials[J]. *Physics of the Solid State*, 1995, 37: 1248-1253.

[3] Masumura R A, Hazzledine P M, Pande C S. Yield stress of fine grained materials[J]. *Acta Materialia*, 1998, 46(13): 4527-4534.

[4] Kim H S, Estrin Y, Bush M B. Plastic deformation behaviour of fine-grained materials[J]. *Acta Mater*, 2000, 48: 493-504.

[5] Yamakov V, Wolf D, Phillpot S R, et al. Deformation twinning in nanocrystalline Al by molecular-dynamics simulation[J]. *Acta Materialia*, 2002, 50(20): 5005-5020.

[6] Fedorov A A, Gutkin M Y, Ovid'ko I A. Triple junction diffusion and plastic flow in fine-grained materials[J]. *Scripta Materialia*, 2002, 47(1): 51-55.

[7] Murayama M, Howe J M, Hidaka H, et al. Atomic-level observation of disclination dipoles in mechanically milled, nanocrystalline Fe[J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2433-2435.

[8] Ovid'ko I A. Deformation of nanostructures[J]. *Science*, 2002, 295(5564): 2386.

[9] Gutkin M Y, Kolesnikova A L, Ovid'ko I A, et al. Disclinations and rotational deformation in fine-grained materials[J]. *Philosophical Magazine Letters*, 2002, 82(12): 651-657.

[10] Gutkin M Y, Ovid'ko I A, Skiba N V. Crossover from grain boundary sliding to rotational deformation in nanocrystalline materials[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(14): 4059-4071.

[11] Hahn H, Mondal P, Padmanabhan K A. Plastic deformation of nanocrystalline materials[J]. *Nanostructured Materials*, 1997, 9(1): 603-606.

[12] Hahn H, Padmanabhan K A. A model for the deformation of nanocrystalline materials [J]. *Philosophical Magazine B*, 1997, 76(4): 559-571.

[13] Konstantinidis D A, Aifantis E C. On the "anomalous" hardness of nanocrystalline materials[J]. *Nanostructured Materials*, 1998, 10(7): 1111-1118.

[14] Fedorov A A, Gutkin M Y, Ovid'ko I A. Transformations of grain boundary dislocation pile-ups in nano- and polycrystalline materials [J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(4): 887-898.

[15] Chen M, Ma E, Hemker K J, et al. Deformation twinning in nanocrystalline aluminum[J]. *Science*, 2003, 300(5623): 1275-1277.

[16] Bobylev S V, Gutkin M Yu, Ovid'ko I A. Decay of low-angle tilt boundaries in deformed nanocrystalline materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004(37): 269-272.

[17] Bobylev S V, Gutkin M Yu, Ovid'ko I A. Transformations of grain boundaries in deformed nanocrystalline materials[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52: 3793-3805.

[18] Mohamed F A, Li Y. Creep and superplasticity in nanocrystalline materials: Current understanding and future prospects[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 298(1): 1-15.

[19] 高英俊, 卢成健, 黄礼琳, 等. 晶界位错运动与位错反应过程的晶体相场模拟[J]. *金属学报*, 2013, 50(1): 110-120.

Gao Y J, Lu C J, Huang L L, et al. Phase field crystal simulation of dislocation movement in grain boundary and dislocation reaction[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 50(1): 110-120.

[20] 高英俊, 王江帆, 罗志荣, 等. 晶体相场方法模拟纳米孪晶结构[J]. *计算物理*, 2013, 30(4): 577-581.

Gao Y J, Wang J F, Luo Z R, et al. Phase field crystal simulation of nano twin crystal structure[J]. *Computational Physics*, 2013, 30(4): 577-581.

[21] Gao Y J, Deng Q Q, Quan S L, et al. Phase field crystal simulation of grain boundary movement and dislocation reaction[J]. *Frontiers of Materials Science*, 2014, 8(2): 176-184.

(下转第 516 页 Continue on page 516)

hardness of nanocrystalline materials[J]. *Nanostructured Materials*, 1998, 10(7):1111-1118.

- [14] Fedorov A A, Gutkin M Y, Ovid'ko I A. Transformations of grain boundary dislocation pile-ups in nano-and polycrystalline materials[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(4):887-898.
- [15] Chen M, Ma E, Hemker K J, et al. Deformation twinning in nanocrystalline aluminum[J]. *Science*, 2003, 300(5623):1275-1277.
- [16] 高英俊, 卢成健, 黄礼琳, 等. 晶界位错运动与位错反应过程的晶体相场模拟[J]. *金属学报*, 2013, 50(1):110-120.  
Gao Y J, Lu C J, Huang L L, et al. Phase field crystal simulation of dislocation movement in grain boundary and dislocation reaction[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2013, 50(1):110-120.
- [17] Bobylev S V, Gutkin M Y, Ovid'ko I A. Decay of low-angle tilt boundaries in deformed nanocrystalline materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(2):269-273.
- [18] 高英俊, 王江帆, 罗志荣, 等. 晶体相场方法模拟纳米孪晶结构[J]. *计算物理*, 2013, 30(4):577-581.  
Gao Y J, Wang J F, Luo Z R, et al. Phase field crystal

simulation of nano twin crystal structure[J]. *Computational Physics*, 2013, 30(4):577-581.

- [19] Gao Y J, Deng Q Q, Quan S L, et al. Phase field crystal simulation of grain boundary movement and dislocation reaction[J]. *Frontiers of Materials Science*, 2014, 8(2):176-184.
- [20] 高英俊, 周文权, 邓芊芊, 等. 晶体相场方法模拟高温应变作用的预熔化晶界的位错运动[J]. *金属学报*, 2014, 50(7):886-896.  
Gao Y J, Zhou W Q, Deng Q Q, et al. Phase field crystal simulation of dislocations movement in pre-melting grain boundary under high temperature strain[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(7):886-896.
- [21] 高英俊, 袁龙乐, 刘瑶, 等. 不同温度晶界位错湮没过程的晶体相场模拟[J]. *广西科学*, 2014(3):203-208.  
Gao Y J, Yuan L L, Liu Y, et al. Phase field crystal simulation of process of dislocation annihilation in grain boundary under various temperature[J]. *Guangxi Sciences*, 2014(3):203-208.

(责任编辑:尹 闯)

---

(上接第 510 页 Continue from page 510)

- [22] 高英俊, 周文权, 邓芊芊, 等. 晶体相场方法模拟高温应变作用的预熔化晶界的位错运动[J]. *金属学报*, 2014, 50(7):886-896.  
Gao Y J, Zhou W Q, Deng Q Q, et al. Phase field crystal simulation of dislocations movement in pre-melting grain boundary under high temperature strain[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2014, 50(7):886-896.
- [23] 高英俊, 袁龙乐, 刘瑶, 等. 不同温度晶界位错湮没过程的晶体相场模拟[J]. *广西科学*, 2014(3):203-208.  
Gao Y J, Yuan L L, Liu Y, et al. Phase field crystal simulation of process of dislocation annihilation in grain boundary under various temperature[J]. *Guangxi Sciences*, 2014(3):203-208.

- [24] Bobylev S V, Gutkin M Y, Ovid'ko I A. Decay of low-angle tilt boundaries in deformed nanocrystalline materials[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37(2):269-273.
- [25] 王亚男, 陈树江, 董希淳. 位错理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007.  
Wang Y N, Chen S J, Dong X C. *Dislocation Theory and Its Application* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.

(责任编辑:尹 闯)