

# 基于位错密度演化的高频振动时效微观机理

顾邦平<sup>1,2</sup>, 胡 雄<sup>1</sup>, 徐冠华<sup>2,3,4</sup>, 赖金涛<sup>5</sup>, 潘 龙<sup>2</sup>

(1. 上海海事大学, 上海 201306)

(2. 浙江大学 浙江省先进制造技术重点实验室, 浙江 杭州 310027)

(3. 浙江大学 昆山创新中心, 江苏 昆山 215347)

(4. 昆山市工业技术研究院有限责任公司, 江苏 昆山 215347)

(5. 绍兴文理学院, 浙江 绍兴 312000)

**摘 要:** 为了揭示高频振动时效消除残余应力的微观机理, 探讨了高频振动载荷作用下的位错密度演化特性对残余应力松弛的影响规律。分别采用 Williamson-Hall (WH) 法和小孔法分析高频振动前后 Cr12MoV 钢淬火试样的位错密度和残余应力。在实验研究的基础上, 采用微观动力学理论, 建立晶粒多自由度系统, 分析高频振动激活位错运动的机制, 进一步采用晶体塑性理论, 建立高频振动作用下的位错密度演化控制方程, 分析高频振动时效消除残余应力的微观机理。结果表明: 材料内的位错在高频振动的作用下激活运动, 产生位错累积和位错湮灭 2 个演化过程, 其中材料内的位错湮灭过程占据主导地位, 从而降低了材料内的位错密度; 位错密度的降低减小了材料内的晶格畸变程度, 从而松弛了材料内的残余应力。

**关键词:** 高频振动时效; 位错密度; 残余应力; 位错湮灭

中图分类号: TG115

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)08-2477-06

振动时效技术因为具有处理时间短、节能环保、处理效果好等特点已经成为备受关注的残余应力消除技术。国内外专家学者已经对传统振动时效技术开展了深入的研究<sup>[1-6]</sup>, 并取得了丰富的理论成果和应用案例。然而传统振动时效技术在实际应用中主要存在如下的不足: ① 传统振动时效的激振频率通常小于 200 Hz, 这表明传统振动时效的可选振型非常有限, 因此传统振动时效技术在消除工件局部残余应力或者大型复杂工件残余应力时效果非常有限; ② 传统振动时效采用可调速电机作为激振器, 较难装夹小尺寸工件, 因此传统振动时效技术在消除小尺寸工件残余应力时效果也非常有限。

针对传统振动时效存在的不足, 何闻等学者提出了高频振动时效的设想<sup>[7-9]</sup>, 即采用电磁振动台作为激振器, 其振动频率可以达到 10 kHz, 小尺寸工件可以很方便的安装在电磁振动台的激振台面上进行高频振动处理, 同时也可以对工件的局部区域进行高频振动处理。何闻等学者在研究高频振动时效的理论时, 提出了材料颗粒微观动力学模型<sup>[7,8]</sup>, 认为材料颗粒在高频振动作用下剧烈振动, 从而摆脱周围材料颗粒的束缚, 回到原来稳定低能的平衡位置上, 对于材料而言其内部残余应力

和位错密度均得以降低。然而在何闻等学者提出的模型中<sup>[7,8]</sup>, 并未能够揭示高频振动激活位错运动的机制以及在高频振动作用下材料内的位错密度演化规律。

本研究首先分别采用 WH 法和小孔法分析高频振动前后 Cr12MoV 钢淬火试样的位错密度和残余应力, 然后在实验研究的基础上, 采用微观动力学理论和晶体塑性理论, 研究高频振动时效消除残余应力的微观机理。

## 1 实 验

Cr12MoV 钢以其高的淬透性、高的淬火硬度而被广泛用来制造各种冷冲模具、工具等零部件。采用淬火工艺在试样表层引入初始残余应力, 具体的工艺参数为: 淬火温度 950 °C (油淬), 保温时间 3 min。

试样的尺寸为 60 mm×20 mm×6 mm, 如图 1a 所示。采用小孔法<sup>[10]</sup>测试试样高频振动前后的残余应力, 其残余应力测点以及应变花粘贴方向如图 1b 所示。测点 1 用于评估高频振动时效处理前试样的残余应力, 测点 2 用于评估高频振动时效处理后试样的残余应力。

采用 X'pert PRO 型多晶 X 射线衍射仪来测试试样的位错密度, 具体的性能参数为: 靶材为 Cu, X 射线

收稿日期: 2017-08-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) (2013A2041106); 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20150397); 中国博士后科学基金面上资助项目 (2016M591799); 国家自然科学基金青年基金 (51605303)

作者简介: 顾邦平, 男, 1987 年生, 博士, 讲师, 上海海事大学物流工程学院, 上海 201306, 电话: 021-38283355, E-mail: 11025033@zju.edu.cn

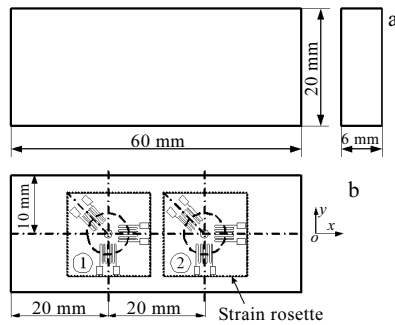


图 1 Cr12MoV 钢试样及残余应力测点及应变花粘贴示意图

Fig.1 Diagram of the size (a) and the residual stress testing points and the attached strain rosette (b) of Cr12MoV steel specimen

为 Cu K $\alpha$ , X 射线管的激发电压为 40 kV, 电流为 40 mA, X 射线的波长为 0.154 nm, 扫描步长为 0.015°, 扫描角度 2 $\theta$  为 35°~145°, 可以覆盖(110)、(200)、(211)、(220)、(310)、(222) 6 个晶面的衍射峰。

为了提高实验结果的可靠性, 随机选取 3 个试样进行实验研究。实验过程为: ① 高频振动时效处理前对随机选取的 3 个试样进行残余应力和位错密度的测试; ② 采用文献[9]的高频振动时效实验系统对随机选取的 3 个试样进行高频振动时效处理; ③ 高频振动时效处理后对随机选取的 3 个试样进行残余应力和位错密度的测试。

## 2 实验结果

### 2.1 位错密度

采用 WH 法<sup>[11-15]</sup>计算高频振动时效前后试样内的位错密度。WH 法是基于 X 射线衍射峰宽化效应来推导位错密度的控制方程。X 射线衍射峰宽的变化主要由材料中的晶格畸变和晶粒细化引起的, 分别表示为

$$\begin{cases} \delta_s = 2\varepsilon \tan \theta \\ \delta_d = \lambda/d \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\delta_s$  为晶格畸变引起的衍射峰宽的变化,  $\delta_d$  为晶粒细化引起的衍射峰宽的变化,  $\varepsilon$  为应变,  $\theta$  为衍射角,  $d$  为平均的晶粒尺寸,  $\lambda$  为 X 射线的波长。由方程(1)可知, 当材料内同时存在晶格畸变和晶粒细化时, 衍射峰宽的变化可以表示为

$$\delta = \delta_s + \delta_d = 2\varepsilon \tan \theta + \lambda/d \cos \theta \quad (2)$$

对方程(2)进一步处理, 可以得到衍射峰宽与应变之间的关系, 即 WH 方程<sup>[12]</sup>

$$\delta \cos \theta / \lambda = 2\varepsilon \sin \theta / \lambda + \alpha / d \quad (3)$$

式中:  $\alpha$  为数值常量。文中对 X 射线衍射图谱进行分析时, 取衍射峰宽  $\delta$  为半高宽, 即  $\alpha$  取值为 0.9<sup>[13]</sup>。

定义如下的变量  $K$  和  $\Delta K$ <sup>[13-15]</sup>

$$\begin{cases} K = 2 \sin \theta / \lambda \\ \Delta K = \Delta 2 \theta (\cos \theta / \lambda) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\Delta 2 \theta$  为衍射峰宽, 可以取积分宽度或半高宽, 衍射角  $\theta$  的单位为弧度, 因此变量  $K$  和  $\Delta K$  的取值可以通过分析 X 射线衍射图谱来获得。将方程(4)代入方程(3), 可以得到求解应变  $\varepsilon$  的控制方程

$$\Delta K = \alpha / d + \varepsilon K \quad (5)$$

将求解出的应变  $\varepsilon$  代入如下的位错密度控制方程, 即可以求解出材料内部的位错密度<sup>[15]</sup>

$$\rho = 14.4 \varepsilon^2 / b^2 \quad (6)$$

式中:  $b$  为伯格斯矢量。通过分析材料的 X 射线衍射图谱, 可以得到方程(4)定义的变量  $K$  和  $\Delta K$ , 通过曲线拟合的方式可以得到方程(5)中的应变  $\varepsilon$ , 最后将求解出的应变  $\varepsilon$  代入方程(6)可以得到材料的位错密度。

1#试样的 X 射线衍射图谱如图 2 所示。首先采用 Jade 软件, 对衍射图谱进行物相分析, 主要为  $\alpha$ -Fe; 其次扣除衍射图谱的背底, 采用 Vogit 函数法对峰形进行拟合, 得到不同衍射面的衍射峰的位置和半高宽, 并求解出变量  $K$  和  $\Delta K$ ; 然后作出试样高频振动前后的  $K$ - $\Delta K$  图, 见图 3, 并采用 Origin 软件对变量  $K$ - $\Delta K$  进行拟合, 得到方程(5)中的应变  $\varepsilon$ ; 最后将  $\alpha$ -Fe 的  $b=0.2841 \text{ nm}$ <sup>[16]</sup>, 以及应变代入方程(6), 求解出 1#试样的位错密度, 结果见图 4。按照 1#试样的求解过程, 可以得到 2#和 3#试样的位错密度, 结果见图 4。高频振动时效前后试样的位错密度均值下降了  $0.83 \times 10^{16} \text{ m}^{-2}$ , 位错密度降低率为 27.21%, 表明高频振动时效能够降低材料的位错密度, 减小材料的晶格畸变程度。文献[16]中采用 X 射线衍射法分析了 45 钢淬火试样的位错密度, 其范围为  $1.14 \times 10^{15} \sim 1.33 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。文献[17]中采用透射电镜技术分析了淬火后的碳钢(碳的含量为 0%到 0.78%, 质量分数)位错密度, 其范围为  $0.65 \times 10^{15} \sim$

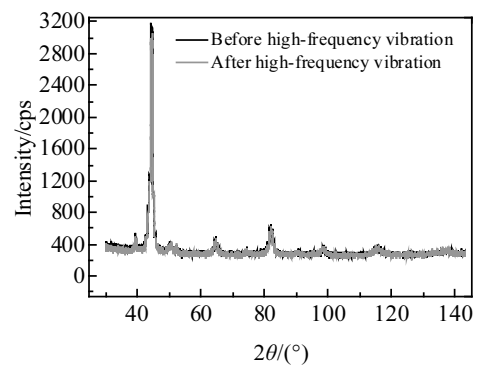


图 2 1#试样高频振动时效处理前后的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of 1# specimen before and after the high-frequency vibratory stress relief

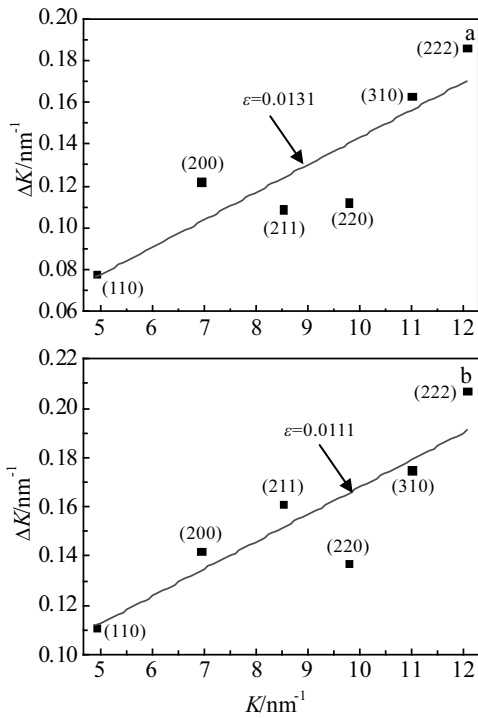


图 3 高频振动前后 K-ΔK 图

Fig.3 K-ΔK maps before (a) and after (b) high-frequency vibration

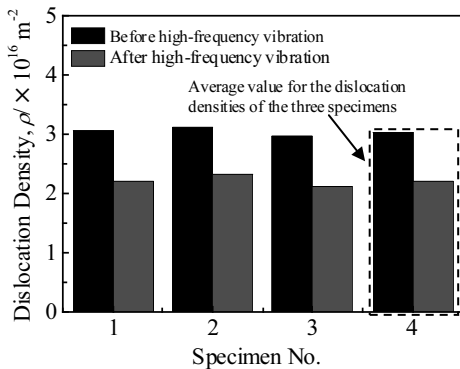


图 4 位错密度测试结果

Fig.4 Dislocation density testing results

$3.21 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ 。综合文献[16]和文献[17]的结果表明，X 射线衍射法能够获得较为可靠的位错密度结果。

### 2.2 残余应力

图 5 为高频振动时效前后 1#、2#和 3#试样的残余应力测试结果。高频振动时效前后试样 x 轴向和 y 轴向的残余应力均值的释放量分别为 185.0 和 142.3 MPa，表明高频振动时效具有较好的残余应力消除效果。

## 3 分析与讨论

### 3.1 位错激活运动机制

李春国等学者研究发现晶粒尺寸是影响振动时效效果的主要因素<sup>[18]</sup>；Ahmadi 等学者研究发现晶粒尺寸是影响材料吸收超声振动能量的主要因素<sup>[19]</sup>，通过这些学者的研究可以发现，材料对外界作用的响应取决于外部作用的特征尺度与材料微观组织的特征尺度之间的关系，当这两者相比接近时材料内部微观组织容易吸收外界作用注入材料内部的能量<sup>[20]</sup>。基于上述成果，建立图 6 所示的晶粒多自由度系统研究金属晶粒吸收外界注入的高频振动能量的机理，从而揭示位错激活运动的机制。

晶粒等效为集中质量元件  $m_i (i=1, 2, \dots, N)$ ，其中  $N$  为系统的自由度数，晶粒之间的相互作用可以视为刚度系数为  $k_i$  的弹性元件和阻尼系数为  $c_i$  的阻尼元件。当对质量元件  $m_p (p=1, 2, \dots, N)$  施加激励时，任意质量元件  $m_l (l=1, 2, \dots, N)$  的位移导纳可以表示为

$$H_{lp}(f) = \sum_{r=1}^N \frac{1}{K_{er} [1 - \bar{f}_r^2 + j2\zeta_r \bar{f}_r]} \quad (7)$$

式中： $\bar{f}_r = f/f_r$  为第  $r$  阶模态的频率比， $f$  为激励频率， $f_r$  为第  $r$  阶模态频率， $\zeta_r$  为第  $r$  阶模态阻尼比， $K_{er}$  为第  $r$  阶模态的等效刚度。根据方程(7)可以得出以下结论：系统的第  $r$  阶共振频率为  $f_{nr} = \sqrt{1-2\zeta_r^2} f_r$ ，当外部激励的频率等于系统的某一阶共振频率时，晶粒的振动幅值将会达到最大值，即系统内的晶粒将会发生剧烈的振动，有利于激活晶粒内的位错产生滑移运动。

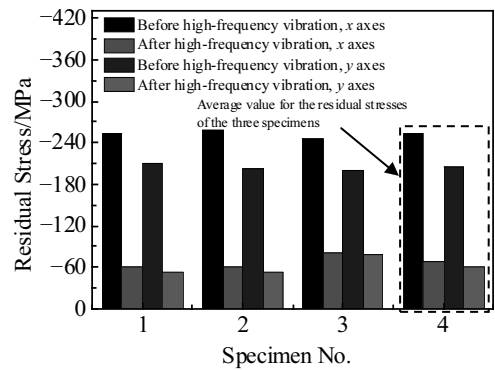


图 5 残余应力测试结果

Fig.5 Residual stress testing results

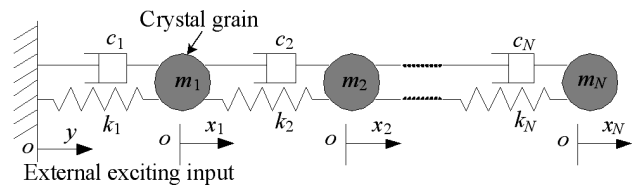


图 6 晶粒多自由度系统

Fig.6 Multi-freedom system of the crystal grain

晶粒多自由度系统的低阶振型和高阶振型如图 7 所示。如图 7a 所示，外部激励频率等于系统的低阶共振频率时，系统内只分布较少的振动峰值，表明此时只有较少的晶粒能够获得较大的振动幅值，而大部分晶粒的振动幅值都较小；如图 7b 所示，外部激励频率等于系统的高阶共振频率时，系统内分布较多的振动峰值，表明此时具有较多的晶粒能够获得较大的振动幅值。从图 7 中还可以发现，高阶振型上分布有较多的振动节点，在振动节点两侧的晶粒具有相反的位移，表明晶粒之间的相对运动更加剧烈，即外部注入系统的高频振动能量更容易被晶粒所吸收。综上所述，我们可以得到如下的结论：① 对系统在较高的频率下进行激励，更多的晶粒可以获得较大的振动能量，有利于激活晶粒内的位错运动；② 外部注入系统的高频振动能量更容易被晶粒所吸收，即外部注入的高频振动能量更容易被晶粒内的位错吸收，从而激活晶粒内的位错运动。

芦亚萍等学者对低频振动时效处理后的 Q235 钢试样进行透射电镜实验，发现材料经过低频振动处理后其内部位错密度增加<sup>[21]</sup>；何闻等学者对高频振动时效处理后的金属材料进行透射电镜实验，发现材料经过高频振动处理后其内部位错密度降低<sup>[7]</sup>。综合上述学者的研究可以发现，金属晶粒更容易吸收高频振动能量，从而对材料内部位错密度演化过程产生影响。Shalvandi 等学者对超声振动前后的 316 不锈钢进行金相实验，发现超声振动不会改变微观组织的晶粒尺寸<sup>[22]</sup>。结合何闻等学者的透射电镜实验<sup>[7]</sup>和文中 XRD 结果可以发现，高频振动时效主要是通过位错运动的方式来松弛残余应力。

位错沿着滑移面运动需要克服一定的势能垒，当且仅当位错的激活能足够克服势能垒时，位错的滑移运动才能够实现<sup>[23-25]</sup>。假设一位错在剪切应力作用下沿着滑移面运动，位错运动遇到障碍物时对其作用的

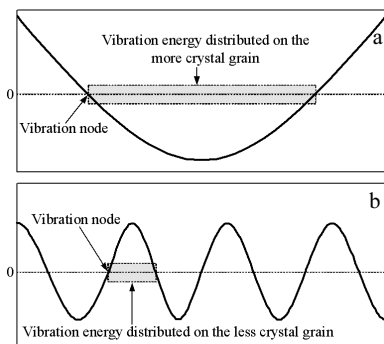


图 7 晶粒多自由度系统的振型

Fig.7 Vibration modes of the multi-freedom system of the crystal grain: (a) low order vibration mode and (b) high order vibration mode

剪切阻力为  $\tau$ ，晶体内发生局部塑性变形的单元体积为  $V$ (激活体积)。如图 8 所示，位错从位置 1 处运动到位置 2 处时，所需要的能量<sup>[23]</sup>为

$$\Delta F^* = V \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \tau d\gamma \quad (8)$$

式中： $\Delta F^*$  为赫姆霍兹(Helmholtz)自由能。这一能量主要由机械功  $\Delta W^*$  和热激活能  $\Delta G^*$  提供<sup>[23]</sup>，即

$$\Delta F^* = \Delta W^* + \Delta G^* \quad (9)$$

其中机械功  $\Delta W^*$ <sup>[23]</sup>可以表示为

$$\Delta W^* = V \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \tau_f d\gamma = V \tau_f (\gamma_2 - \gamma_1) \quad (10)$$

热激活能  $\Delta G^*$  又称为吉布斯自由能<sup>[23-25]</sup>，可以表示为

$$\Delta G^* = \Delta F^* \left[ 1 - \left( \frac{\tau_f}{\hat{\tau}} \right)^p \right]^q \quad (11)$$

式中： $p$  和  $q$  为障碍物分布参数，其范围分别为  $0 < p \leq 1$  和  $1 \leq q \leq 2$ ； $\hat{\tau}$  为材料的流变应力，即晶体中位错运动所需的最小应力<sup>[24]</sup>； $\tau_f$  为作用在位错上的剪切应力。

方程(11)表明，当作用在位错上的剪切应力等于材料的流变应力时，热激活能  $\Delta G^* = 0$ ，此时位错运动所需要的赫姆霍兹自由能中并没有热激活能的贡献，而是全部由机械功提供。对试样进行高频振动时效处理时，并未有明显的温度变化，因此可以忽略热激活能对于位错滑移运动的贡献。综上所述，从激活位错运动的能量角度来看，位错沿着滑移面发生滑移运动的必要条件为

$$\Delta W > \Delta F \quad (12)$$

称为位错激活运动的能量条件，表明采用高频振动时效消除材料的残余应力，必须对位错作用足够大的高频振动能量，使之对位错产生足够大的作用应力，以克服材料内部各种位错运动的微观阻力，进而开通位错塞积群使其沿着滑移面运动。也就是说，高频振动产生的剪切应力必须大于位错运动的流变应力，即

$$\tau_f > \hat{\tau} \quad (13)$$

称为位错激活运动的动应力条件。只有当能量条件或动应力条件得以满足时，晶粒内的位错才能够被激活运动。

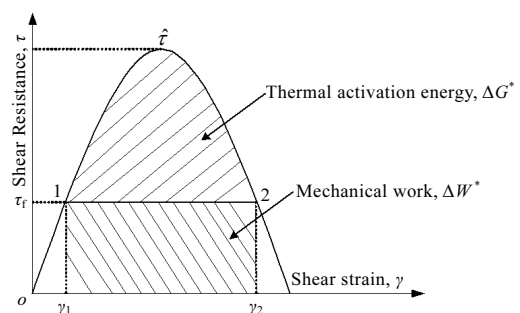


图 8 剪切阻力与剪切应变之间的关系

Fig.8 Relationship between shear resistance  $\tau$  and shear strain  $\gamma$

### 3.2 位错密度演化控制方程

假设激活体积  $V$  为立方体，其长、宽、高的长度分别为  $a$ 、 $b$  以及  $c$ ，如图 9 所示。位错沿着滑移面运动时，遇到林位错这样的障碍物时，会形成 Orowan 环<sup>[26]</sup>，引起位错密度的增加<sup>[27]</sup>

$$\frac{d\rho^+}{d\gamma^p} = k_1\rho^{1/2} \quad (14)$$

当正刃型位错沿着滑移面运动时，遇到负刃型位错时，会产生位错的湮灭，引起位错密度的减少<sup>[27]</sup>

$$\frac{d\rho^-}{d\gamma^p} = k_2\rho \quad (15)$$

式中：位错存储系数  $k_1$  被认为是数值的常量；动态恢复系数  $k_2$  与塑性应变率和温度有关，但在高频振动时效过程中温度并未发生变化，表明位错湮灭过程与塑性变形过程密切相关，因此有必要研究高频振动塑性变形过程中位错湮灭的规律。联合方程(14)和(15)，可以得到位错密度的演化方程为

$$\frac{d\rho}{d\gamma^p} = k_1\rho^{1/2} - k_2\rho \quad (16)$$

由位错密度测试结果可知，材料内部残余应力的释放与位错密度的变化密切相关。位错累积过程和湮灭过程会受到高频振动载荷的影响，即位错存储系数  $k_1$  和动态恢复系数  $k_2$  会因为高频振动载荷的作用而发生改变，从而导致高频振动时效能够获得较为理想的残余应力释放效果。因此，在高频振动时效过程中，位错密度的演化控制方程可以表示为

$$\frac{d\rho}{d\gamma^p} = k_1(1 + \lambda_{k_1})\rho^{1/2} - k_2(1 + \lambda_{k_2})\rho \quad (17)$$

式中：参数  $\lambda_{k_1}$  和  $\lambda_{k_2}$  是位错存储系数  $k_1$  和动态恢复系数  $k_2$  因为高频振动载荷作用而改变的比例。 $\lambda_{k_1}$  和  $\lambda_{k_2}$  表明因为高频振动载荷的作用而产生的附加的位错累积和湮灭过程。由位错密度测试结果可知，高频振动载荷能够降低材料内的位错密度，表明材料受到高频振动载荷作用时，材料内的位错湮灭过程占据主导地位，从而降低了材料内的位错密度。综上所述，可以

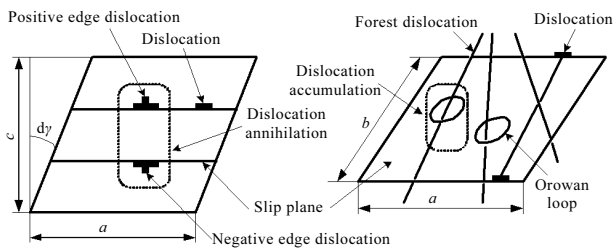


图 9 位错密度演化过程示意图

Fig.9 Diagram of the dislocation density evolution process

得出以下结论：① 材料内位错因为吸收了高频振动能量而被激活运动，产生位错累积和位错湮灭 2 个过程，其中位错湮灭过程因为高频振动载荷的作用而占据主导地位，从而降低了材料内的位错密度；② 位错密度的降低减小了材料内的晶格畸变程度，从而松弛了材料内的残余应力。

## 4 结 论

1) 高频振动时效处理前后试样的位错密度降低率为 27.21%，表明高频振动时效能够降低材料内的位错密度。同时高频振动时效处理前后试样  $x$  轴向和  $y$  轴向的残余应力均值的释放量分别为 185.0 和 142.3 MPa，表明高频振动时效具有较好的残余应力消除效果。

2) 对晶粒多自由度系统在较高的频率下进行激励，更多的晶粒可以获得较大的振动能量，有利于激活晶粒内的位错运动；外部注入晶粒多自由度系统的高频振动能量更容易被晶粒所吸收，从而激活晶粒内的位错运动。

3) 高频振动时效过程中位错密度演化过程包括位错累积和位错湮灭 2 个过程，其中材料内的位错湮灭过程占据主导地位，从而降低了材料内的位错密度。位错密度的降低减小了材料内的晶格畸变程度，从而松弛了材料内的残余应力。

### 参考文献 References

[1] Munsif A S M Y, Waddell A J, Walker C A. *Strain*[J], 2001, 37(4): 141

[2] Buchanan D J, John R. *Materials Science and Engineering A*[J], 2014, 615: 70

[3] Wang J S, Hsieh C C, Lai H H *et al. Materials Characterization*[J], 2015, 99: 248

[4] Liu Xiaodan(刘晓丹), Tao Xinghua(陶兴华), Han Zhenqiang(韩振强). *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2015, 33(4): 171

[5] Shen Hualong(沈华龙), Wu Yunxin(吴运新), Guo Junkang(郭俊康). *Journal of Vibration and Shock*(振动与冲击)[J], 2009, 28(8): 191

[6] Hu Min(胡敏), Yu Changwu(余常武), Zhang Jun(张俊) *et al. Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 2014, 48(6): 65

[7] Wang Jianwu(王剑武), He Wen(何闻). *Machine Tool & Hydraulics*(机械与液压)[J], 2005(9): 9

[8] Jiang Gang(蒋刚), He Wen(何闻), Zheng Jianyi(郑建毅). *Journal of Zhejiang University*(浙江大学学报)[J], 2009, 43(7): 1269

[9] He W, Gu B P, Zheng J Y *et al. Applied Mechanics and*

- Materials*[J], 2012, 157-158: 1157
- [10] ASTM E 837-08[S]. *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method*. Pennsylvania: ASTM International, 2008
- [11] Gay P, Hirsch P B, Kelly A. *Acta Metallurgica*[J], 1953, 1(3): 315
- [12] Takebayashi S, Kunieda T, Yoshinaga N *et al.* *ISIJ International*[J], 2010, 50: 875
- [13] Ungár T. *Materials Science and Engineering A*[J], 2001, 309-310: 14
- [14] Shintani T, Murata Y. *Acta Materialia*[J], 2011, 59(11): 4314
- [15] Williamson G K, Smallman R E. *Philosophical Magazine*[J], 1956, 1(1): 34
- [16] Pan Long(潘 龙), He Wen(何 闻), Gu Bangping(顾邦平). *Transactions of Materials and Heat Treatment(材料热处理学报)*[J], 2015, 36(S1): 134
- [17] Morito S, Nishikawa J, Maki T. *ISIJ International*[J], 2003, 43(9): 1475
- [18] Li Chunguo(李春国), Huang Jiangzhong(黄江中), Yang Shangyu(杨尚玉) *et al.* *Electric Welding Machine(电焊机)*[J], 2014, 44(5): 161
- [19] Ahmadi F, Farzin M, Mandegari M. *Ultrasonics*[J], 2015, 63: 111
- [20] Zheng Jinxin(郑金鑫), Wan Zhimin(万志敏), Du Xingwen(杜星文) *et al.* *Journal of Experimental Mechanics(实验力学)*[J], 1998, 13(4): 492
- [21] Lu Yaping(芦亚萍), He Wen(何 闻). *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery(农业机械学报)*[J], 2006, 37(12): 197
- [22] Shalvandi M, Hojjat Y, Abdullah A *et al.* *Materials and Design*[J], 2013, 46: 713
- [23] Argon A S. *Strengthening Mechanisms in Crystal Plasticity* [M]. New York: Oxford University Press, 2008: 47
- [24] Kocks U F, Argon A S, Ashby M F. *Thermodynamics and Kinetics of Slip*[M]. Oxford: Pergamon Press, 1975: 18
- [25] Patra A, Zhu T, McDowell D L. *International Journal of Plasticity*[J], 2014, 59: 1
- [26] Aoyagi Y, Tsuru T, Shimokawa T. *International Journal of Plasticity*[J], 2014, 55: 43
- [27] Fang X F, Dahl W. *Materials Science and Engineering A*[J], 1995, 203(1-2): 14

## Microcosmic Mechanism of High-Frequency Vibratory Stress Relief Based on Dislocation Density Evolution

Gu Bangping<sup>1,2</sup>, Hu Xiong<sup>1</sup>, Xu Guanhua<sup>2,3,4</sup>, Lai Jintao<sup>5</sup>, Pan Long<sup>2</sup>

(1. Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

(2. Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(3. Zhejiang University Kunshan Innovation Institute, Kunshan 215347, China)

(4. Kunshan Industrial Technology Research Institute Co. Ltd, Kunshan 215347, China)

(5. Shaoxing University, Shaoxing 312000, China)

**Abstract:** In order to reveal the mechanism of the high-frequency vibratory stress relief, the effect of the evolution of the dislocation density with the help of high-frequency vibration on the residual stress relaxation was studied. The Williamson-Hall (WH) method and the hole-drilling method were used to evaluate the dislocation densities and the residual stresses in the Cr12MoV steel quenched specimens before and after high-frequency vibration. Based on the experimental results, the multi-freedom system of the crystal grain was developed based on the microscopic dynamics theory in order to analyze the mechanism of high-frequency vibration activated dislocation motion. In addition, the governing equation of the dislocation density evolution with the aid of high-frequency vibration was proposed in order to reveal the microcosmic mechanism of the high-frequency vibratory stress relief. The results show that the dislocations inside the materials are activated with the help of high-frequency vibration. The dislocation density evolution process mainly consists of the dislocation accumulation process and the dislocation annihilation process. And the dislocation annihilation is dominant with the help of high-frequency vibration, and thus the dislocation density inside the materials can be reduced. The degree of the lattice distortion can be reduced due to the decrease of the dislocation density. As a result, the residual stress inside the materials can be relieved by the high-frequency vibratory stress relief.

**Key words:** high-frequency vibratory stress relief; dislocation density; residual stress; dislocation annihilation

Corresponding author: Gu Bangping, Ph. D., Lecturer, College of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, P. R. China, Tel: 0086-21-38283355, E-mail: 11025033@zju.edu.cn