

# 基于X射线衍射线形分析的铝合金 切削表层晶体特征研究

安增辉<sup>1</sup> 李舜酩<sup>1</sup> 付秀丽<sup>2</sup>

1.南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016

2.济南大学机械工程学院,济南,250022

**摘要:**为深入研究高速高效加工条件下材料表层晶体特征形成机理,提高铝合金构件服役性能,同时解决传统观察法较难得出晶粒尺寸与位错密度统计学规律的问题,立足微观,以铝合金7050-T7451为研究对象,将材料学与物理学中基于X射线衍射线形分析的Modified Warren-Averbach和Modified Williamson-Hall方法引入切削加工表层微观组织分析中,实现了不同切削速度下切削表层微观组织结构的定量研究。研究表明,高速切削条件下已加工表面以刃位错为主,得出了位错密度值(高达 $10^{15} \text{ m}^{-2}$ 以上)与位错密度变化规律,并从塑性变形及能量角度解释了其形成机理;拟合出了晶粒尺寸分布曲线,并通过分布函数分析了已加工表面晶粒分布均匀性;当切削速度高于4500 m/min时可以得到位错密度相对较低、晶体尺寸较均匀的已加工表面。

**关键词:**位错密度;晶粒尺寸;高速切削;X射线衍射线形分析;表面质量

中图分类号: TG506.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2017.21.020

## Study on Crystal Characteristics of Aluminum Alloy Cutting Surface by X-ray Diffraction Profile Analysis

AN Zenghui<sup>1</sup> LI Shunming<sup>1</sup> FU Xiuli<sup>2</sup>

1.College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016

2.School of Mechanical Engineering, University of Jinan, Jinan, 250022

**Abstract:** In order to obtain a better understanding of the mechanism of cutting surface microstructure in the high-speed cutting processes and meet the strict requirements of various components on the service performance, based on micro view, the 7050-T7451 aluminum alloy was studied. For solving the problems that traditional observation method was difficult to obtain the statistical rule of grain sizes and dislocation densities, based on X-ray diffraction profile analyses such as Modified Warren-Averbach and Modified Williamson-Hall the methods were introduced into analyzing the microstructure of cutting surfaces from materials science and physics. Quantitative studies on microstructure of cutting surfaces under different cutting speeds were achieved. The results show that the machined surface is dominated by edge dislocations under high speed cutting conditions. The dislocation density values and rules are obtained. The formation mechanism is explained from plastic deformation and energy. The grain size distribution curve is fitted. The uniformities of the grains on the cutting surface are analyzed by the distribution function. When the cutting speed is higher than 4500 m/min, the cutted surfaces with relatively low dislocation density and uniform grain size may be obtained.

**Key words:** dislocation density; grain size; high-speed cutting; X-ray diffraction profile analysis; surface quality

## 0 引言

铝合金7050-T7451因其具有较高的结构强度、断裂韧性和抗应力-腐蚀断裂等良好的综合性能而成为目前航空制造业广泛应用的一种轻型结构材料<sup>[1]</sup>。航空构件设计时考虑到构件结构强度大多采用整体结构化设计,加工余量高达90%以

上,为提高其加工效率一般采用高速切削加工<sup>[2]</sup>。高速切削时,已加工表层形成过程是强热力耦合作用过程,材料塑性变形极大,表层金属在微观上往往形成较多较复杂的组织结构特征及缺陷,其中位错、晶粒尺寸对金属材料性能有着至关重要的作用,直接影响到材料的力学性能<sup>[3]</sup>。这些晶体结构特征的存在正是表面宏观特征较好但却不能有效提高其服役性能的根本原因。

合金表层的微观晶体结构,如位错密度、位错类型、晶粒尺寸、显微畸变等会造成X射线衍射

收稿日期:2016-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51675230);装备预研领域基金资助项目(6140210020116HK02001);国家重点研究和发展计划资助项目(2016YDF0700800)

(X-ray diffraction, XRD) 峰线形展宽<sup>[4]</sup>, 根据这一现象发展出了利用 XRD 线形来分析材料微观晶体结构的方法。相较于透射电镜(transmission electron microscope, TEM)观察法, XRD 线形分析法不仅对试样制备要求低、实验简单, 避免了 TEM 由于局部观察所导致的不可避免的误差, 以及其不可见性特性, 而且实现了位错密度、晶粒尺寸等的统计性定量分析, 因此 XRD 线形分析法在材料分析中得到了一定的关注。

1950 年, WARREN 等<sup>[5]</sup>利用 XRD 线形的傅里叶变换分析了黄铜冷加工下平均晶粒尺寸和应变场分布, 并提出了著名的 Warren-Averbach 方法。WILLIAMSON 等<sup>[6]</sup>后来指出, 不通过衍射线形的傅氏变换, 直接利用 XRD 线形积分宽度或者半峰宽也可以进行分析, 由此发展出了 Williamson-Hall 方法。KRIVOGLAZ<sup>[7]</sup>、WILKENS<sup>[8]</sup>、UNGÁR 等<sup>[9]</sup>通过分析缺陷类型, 给出了两种方法中均方应变相关变量的具体形式, 使得 XRD 线形与位错密度建立了联系。同时 UNGÁR 考虑了由位错引起的应变的各向异性, 引入了与晶面指数相关的位错对比因子, 提出了 Modified Warren-Averbach 法和 Modified Williamson-Hall 法。WOO 等<sup>[10]</sup>基于前人的方法研究了超细晶粒铝的位错密度。樊志剑等<sup>[11]</sup>用同样的方法确定了超细晶粒 LY12 合金在不同温度动态压缩的位错密度。詹科<sup>[12]</sup>基于 XRD 线形分析研究了 S30432 不锈钢喷丸强化后表层的组织结构。

本文为提高铝合金构件加工表面质量, 以铝合金 7050-T7451 为研究对象, 将材料学与物理学中基于 XRD 线形分析的 Modified Warren-Averbach 和 Modified Williamson-Hall 方法引入机械加工表面质量分析中, 实现了不同切削速度下切削表层微观晶体结构的定量研究。并通过其变化规律研究了位错堆积湮灭与晶体尺寸分布的机理。

## 1 X 射线衍射分析理论

材料的微观晶体结构如晶粒尺寸、微观应变、晶体缺陷和仪器线形均会引起 XRD 峰的展宽。在扣除仪器自身对谱线的贡献后, 物理线形可以表示为晶粒尺寸线形与微观应变线形的卷积, 对其进行 Fourier 变换, 有

$$A_L = A_L^S A_L^D \quad (1)$$

其中,  $A_L$ 、 $A_L^S$ 、 $A_L^D$  为 Fourier 系数;  $L$  为 Fourier 长度, 定义为  $L = ia_3 (i=0, 1, \dots)$ ;  $a_3$  为衍射方向

上的 Fourier 长度单位, 定义为

$$a_3 = \frac{\lambda}{2(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)} \quad (2)$$

式中,  $\theta_1 \sim \theta_2$  为衍射线角范围;  $\lambda$  为 X 射线波长。

Warren-Averbach 方法认为,  $A_L^D$  与衍射级数有关, 且<sup>[5]</sup>

$$A_L^D = \exp(-2\pi^2 L^2 g^2 \langle \epsilon_g^2 \rangle) \quad (3)$$

其中,  $g$  为衍射矢量模,  $\langle \epsilon_g^2 \rangle$  为均方应变。Wilkins 给出了其具体形式<sup>[8]</sup>:

$$\langle \epsilon_g^2 \rangle = \frac{\rho C b^2}{4\pi} \ln \frac{R_e}{L} \quad (4)$$

式中,  $b$  为 Burgers 矢量模;  $\rho$  为位错密度;  $C$  为位错对比因子;  $R_e$  为位错有效外切半径。

因此对式(1)取对数可得 Warren-Averbach 方法的修正式<sup>[5]</sup>:

$$\ln A_L = \ln A_L^S - \frac{\pi \rho b^2}{2} L^2 \ln \frac{R_e}{L} (K^2 C) + o(K^4 C^2) \quad (5)$$

$$K = 2 \sin \theta / \lambda$$

式中,  $o(\cdot)$  为高阶无穷小量;  $\theta$  为衍射角。

而由 WANG 等<sup>[13]</sup>的研究得出:

$$A_L^S = h - \frac{L}{D_s} \quad (6)$$

式中,  $h$  为 hook 效应参数;  $D_s$  为面积加权平均对应的晶粒尺寸。

Modified Williamson-Hall 方法有一次和二次两种形式。研究表明, 由晶粒细化和显微畸变造成的衍射线形分别具有 Lorentzian(Cauchy)和 Gaussian 线形特征。当假设所有衍射线形为 Lorentzian (Cauchy)线形时, 其表达式为<sup>[6]</sup>

$$\Delta K = \frac{0.9}{D_V} + \sqrt{\frac{\pi M^2 b^2 \rho}{2}} (K C^{1/2}) + o(K^2 C) \quad (7)$$

$$\Delta K = 2 \cos \theta (\Delta \theta) / \lambda$$

式中,  $D_V$  为晶粒体积加权平均尺寸;  $M$  为与位错有效外切半径  $R_e$  相关的常数;  $\Delta \theta$  为 X 射线衍射峰的半峰宽。

当假设所有衍射线形为 Gaussian 线形时, 其表达式为

$$\Delta K^2 = \left(\frac{0.9}{D_V}\right)^2 + \frac{\pi M^2 b^2 \rho}{2} K^2 C + o(K^4 C^2) \quad (8)$$

Modified Warren-Averbach 法和 Modified Williamson-Hall 由于计算方法不同, 本身存在着差异, 但研究表明, 二者计算出的晶粒尺寸分别接近 TEM 观察法所得结果的上下限。

## 2 试验研究

本文研究材料为高强度铝合金 7050-T7451, 其物理力学性能如表 1<sup>[14]</sup>所示。

对工件进行高速铣削加工, 加工方式为顺铣, 干切削, 切削具体参数如表 2 所示。加工后工件经线切割试样结束后, 对已加工表面的试样进行

表 1 铝合金 7050-T7451 物理力学性能

Tab.1 Physical and mechanical properties of aluminum alloy 7050-T7451

热导率 (W/(m·K))	质量热容 (J/(kg·K))	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	泊松比	弹性模量 (GPa)
180	860	2830	0.33	71.7

X 射线衍射试验并通过切片、研磨、电化学减薄进行 TEM 观察,同时通过镶嵌、研磨、抛光、腐蚀制作相应试件进行超景深显微镜观察。XED 试验中  $2\theta$  范围为  $10^\circ \sim 80^\circ$ ,扫描步长为  $0.033^\circ$ ,扫描速度为  $0.4^\circ/\text{s}$ ,采用退火 Si 粉标样标定仪器展宽。

表 2 高速切削加工试验参数

Tab.2 Parameters of high speed cutting test

铣刀直径(mm)	100
刀具前角( $^\circ$ )	$10^\circ$
刀具后角( $^\circ$ )	$6^\circ$
切削速度 $v$ (m/min)	2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000
每齿进给量(mm)	0.1
径向切宽(mm)	20
轴向切深(mm)	0.5

### 3 试验结果及分析

#### 3.1 XRD 线形分析

图 1 为铝合金不同切削速度下已加工表面的 XRD 线形。对衍射峰(1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1)单独进行拟合,经标样 Si 粉标定仪器展宽半高宽约为  $0.07^\circ$ ,需对各衍射峰扣除仪器展宽后进行分析。从图 1 中可以看出,试样中各衍射峰半高宽分布趋势类似。

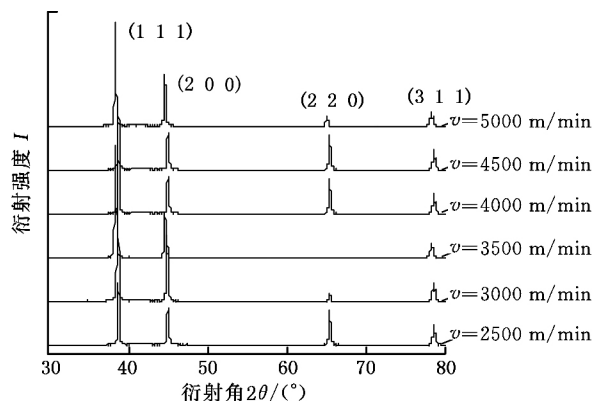


图 1 不同切削速度下铝合金已加工表面 XRD 线形

Fig.1 X-ray diffraction profile of aluminum alloy surface under different cutting speed

试件的宽化是由材料晶格的微应变引起的,晶格缺陷中位错和层错均可导致衍射峰各向异性展宽,由于铝合金层错能较高,因此认为位错是其主要缺陷。Modified Williamson-Hall 公式中,晶面系数( $h k l$ )峰位错对比因子  $C$  可由下式确定:

$$C = C_{h00}(1 - qH^2) \quad (9)$$

$$C_{h00} = a_c(1 - \exp(-\frac{A_i}{b_c})) + c_c A_i + d_c \quad (10)$$

$$q = a_q(1 - \exp(-\frac{A_i}{b_q})) + c_q A_i + d_q \quad (11)$$

$$H^2 = \frac{h^2 k^2 + h^2 l^2 + k^2 l^2}{(h^2 + k^2 + l^2)^2} \quad (12)$$

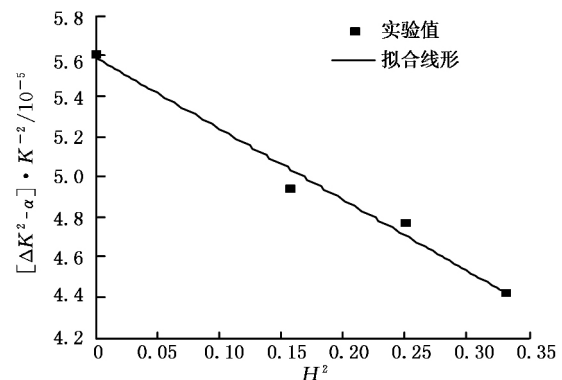
其中,对于面心立方晶体材料, $A_i$  由广义胡克定律中  $c_{11}$ 、 $c_{12}$  和  $c_{44}$  构成,即  $A_i = 2c_{44}/(c_{11} - c_{12})$ 。当位错类型为螺位错和刃位错时,UNGÁR 等<sup>[9]</sup>给出了不同参数计算  $a_c$ 、 $b_c$ 、 $c_c$ 、 $d_c$ 、 $a_q$ 、 $b_q$ 、 $c_q$ 、 $d_q$ 。铝合金的弹性常数  $c_{11} = 108.2 \text{ GPa}$ ,  $c_{12} = 61.3 \text{ GPa}$ ,  $c_{44} = 28.5 \text{ GPa}$ 。

将 Modified Williamson-Hall 方法的二次型代入位错对比因子表达式可以改写为以下形式:

$$[\Delta K^2 - \alpha]/K^2 = \beta C_{h00}(1 - qH^2) \quad (13)$$

$$\alpha = (0.9/D_V)^2 \quad \beta = \pi M^2 b^2 \rho / 2$$

可以看出  $[\Delta K^2 - \alpha]/K^2$  与  $H^2$  成一阶线性关系,利用相关系数法可以求解  $\alpha$  的回归值,进而得出晶粒体积加权平均表观尺寸。将切削速度为 2500 m/min 所得的拟合值  $\alpha$  代入并作出  $[\Delta K^2 - \alpha]/K^2$  与  $H^2$  关系曲线,如图 2 所示。

图 2  $[\Delta K^2 - \alpha]/K^2$  与  $H^2$  关系曲线( $v=2500 \text{ m/min}$ )Fig.2 Relationship between  $[\Delta K^2 - \alpha]/K^2$  and  $H^2$  ( $v=2500 \text{ m/min}$ )

由拟合曲线横坐标截距可以求出  $q$  值,根据刃位错与螺位错不同的  $q$  与  $C_{h00}$  值可以判断试样位错类型。由结果可知,高速切削已加工表面位错类型以刃位错为主。

假定位错均匀分布在所有可能的滑移体系中,设  $x$  为刃位错分数,  $C_e$  和  $C_s$  分别为刃型和螺型位错的对比因子,则位错对比因子为  $C = xC_e + (1-x)C_s$ 。基于 Williamson-Hall 基本公式,以  $KC^{1/2}$  为变量对积分宽度进行拟合,切削速度为 2500 m/min 时不同刃位错分数下拟合标准差如图 3 所示。

由图 3 也可以看出,当刃位错分数为 1 时,拟合标准差最小,拟合效果最好,所以认为高速切削过程中,已加工表面的位错类型主要为刃位错。

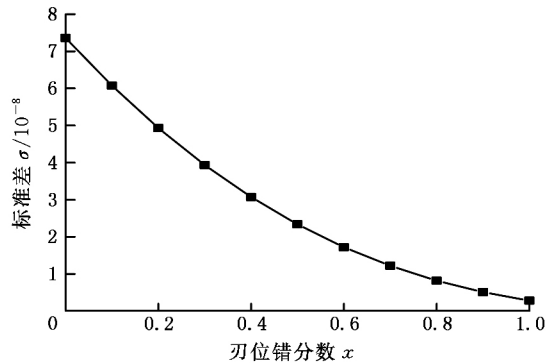


图 3 不同刃位错分数时 XRD 积分宽度与  $KC^{1/2}$  的拟合标准差  
( $v=2500$  m/min)

Fig.3 Residual sum of squares of integral breadth and  $KC^{1/2}$  fitting for different edge dislocation fractions  
( $v=2500$  m/min)

基于各个切削速度下拟合曲线斜率与截距, 代入  $\alpha$  相关公式, 求出的晶粒体积加权平均表观尺寸  $D_V$  如表 3 所示。

表 3 不同切削速度下晶粒体积加权平均表观尺寸

Tab.3 Grain size  $D_V$  under different cutting speed

$v$ (m/min)	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$D_V$ (nm)	68	71	77	77	66	81

分别对 7050-T7451 铝合金 XRD 线形中(1 1 1), (2 0 0), (2 2 0), (3 1 1)衍射峰进行傅里叶分析, 得出各级傅里叶长度为  $L$  时的傅里叶实部系数  $A_L$ , 当切削速度为 3500 m/min 时其结果如表 4 所示。

表 4 衍射峰各级傅里叶长度  $F$  的傅里叶实部系数

Tab.4  $A_L$  vs  $L$  obtained by stokes deconvolution

	$L$ (nm)							
	2	4	6	8	10	12	14	16
(1 1 1)	0.84	0.65	0.51	0.38	0.28	0.19	0.14	0.08
(2 0 0)	0.79	0.57	0.41	0.28	0.19	0.12	0.08	0.04
(2 2 0)	0.72	0.44	0.27	0.16	0.09	0.05	0.02	0.01
(3 1 1)	0.65	0.35	0.20	0.11	0.06	0.03	0.02	0.01

由 Modified Warren-Averbach 基本公式, 根据傅里叶系数以及 Modified Williamson-Hall 法求出的最优位错对比因子  $C$  作出不同  $L$  值下的  $\ln A_L - K^2 C$  关系图, 如图 4 所示。

设 Modified Warren-Averbach 基本公式右边第二项系数为  $Y$ , 移相整理后得出如下公式:

$$\frac{Y}{L^2} = \frac{\pi \rho b^2}{2} \ln R_e - \frac{\pi \rho b^2}{2} \ln L \quad (14)$$

因此根据图 4 中不同  $L$  下拟合曲线的斜率  $Y$  及截距  $\ln A_L$ , 可以拟合出位错密度、晶粒尺寸以及位错有效外切半径  $R_e$ 。由式 (14) 所得的拟合曲线如图 5 所示。由此得出的位错密度与面积加权平均对应的晶粒尺寸以及位错有效外切半径  $R_e$  如表 5 所示。

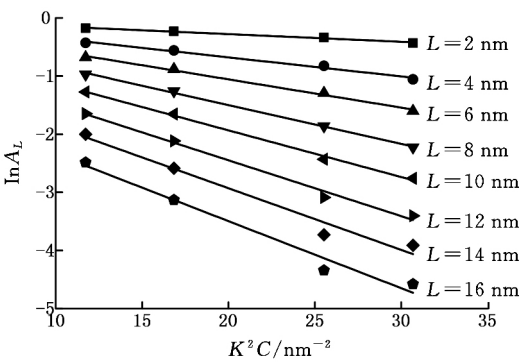


图 4 不同傅里叶长度下的  $\ln A_L - K^2 C$  关系图  
( $v=3500$  m/min)

Fig.4  $\ln A_L$  vs.  $K^2 C$  plot in different Fourier length  
( $v=3500$  m/min)

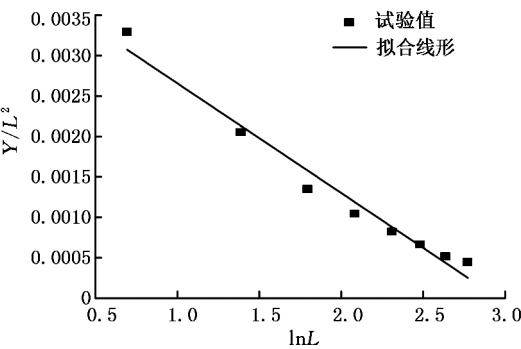


图 5 由式(14)得出的  $Y/L^2$  与  $L$  值对数的关系图  
( $v=3500$  m/min)

Fig.5  $Y/L^2$  vs.  $L$  plot according to Eq.14  
( $v=3500$  m/min)

表 5 不同切削速度下 Modified Warren-Averbach 拟合结果

Tab.5 The results of Modified Warren-Averbach under different cutting speed

$v$ (m/min)	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$\rho(10^{15} \text{m}^{-2})$	2.48	3.26	10.52	5.08	3.52	4.71
$D_s$	23.48	28.15	19.65	37.23	23.26	40.75
$R_e$	21.01	21.12	19.28	21.84	20.97	21.79

根据 WILKENS<sup>[8]</sup> 的研究, Modified Williamson-Hall 公式中的  $M$  值与位错有效外切半径  $R_e$  和位错密度  $\rho$  有关, 可由以下公式确定:

$$M = R_e \sqrt{\rho} \quad (15)$$

因此 Modified Williamson-Hall 公式中的位错密度也可求出, 结果如表 6 所示。

表 6 不同切削速度下由 Modified Williamson-Hall 得出的位错密度

Tab.6 Dislocation density of Modified Williamson-Hall under different cutting speed

$v$ (m/min)	2500	3000	3500	4000	4500	5000
$\rho(10^{15} \text{m}^{-2})$	3.56	5.49	11.35	8.47	8.84	6.25

### 3.2 表层微观形成特征分析

UNGÁR 等<sup>[15]</sup> 在对等通道挤压铜试样和大

变形冷压铜试样进行 XRD 分析时发现,刃位错所占比例高达 90% 以上。樊志剑等<sup>[11]</sup>在研究喷丸强化 LY12 铝合金时也发现类似结论。可见,具有面心立方结构的金属,在大变形、高应变率条件下更容易产生刃位错。铝合金 7050 在高速切削条件下刃位错所占比例更是接近 100%。

利用传统透射电镜对切削速度 5000 m/min 时的已加工表层(图 6)进行观察可以看出,已加工表层金属存在大量的刃位错,这与 XRD 分析结果一致。并且位错运动剧烈,表现出堆积与滑移现象。TEM 所得晶体尺寸与 XRD 所得晶体尺寸有较好的一致性,均在 100 nm 以下。图 7 所示为在超景深显微镜下进行观察所得的表层晶体结构。图中晶粒尺寸与 TEM 观察所得结果相同,再次验证了经过 XRD 线形计算所得结果的准确性。从图 7 中还可以看出,已加工表面存在厚度为 40~50  $\mu\text{m}$  的细晶结构层,这将直接影响材料的服役性能。

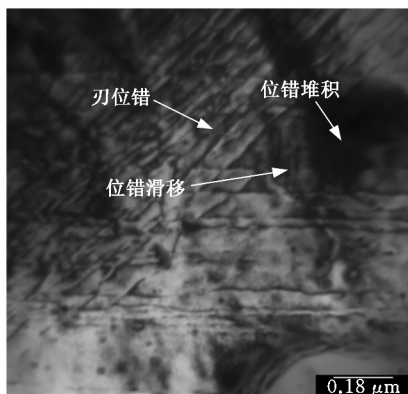


图 6 TEM 所得已加工表层微观特征( $v=5000$  m/min)

Fig.6 Microscopic of cutting surface from TEM  
( $v=5000$  m/min)

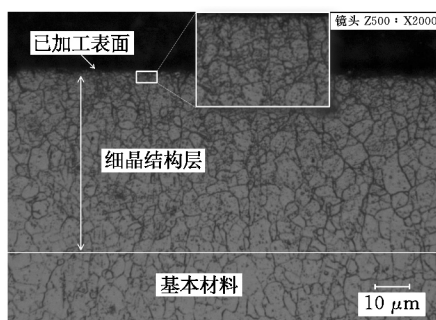


图 7 超景深显微镜所得已加工表层晶体特征  
( $v=5000$  m/min)

Fig.7 Crystal characteristics from digital microscope  
( $v=5000$  m/min)

但是,TEM 所得位错密度值偏小,其原因主要是隐藏在晶界内部的位错不易观察但足以破坏 XRD 峰之间的相干性。这与文献<sup>[11]</sup>所遇情况

类似。因此 XRD 所得位错密度是尺度最小的亚结构所形成的晶体特征,其结果更具分析价值。

研究发现<sup>[16]</sup>,切削过程中靠近刀尖的材料部分会产生压缩位错变形区,如图 8 所示。工件表面层以  $N_A$  为中心轴,其前是径向压应力,其后是径向拉应力。在发生剪切之前,工件受到根部压应力的作用,使得原子面被压入原本规则排列的晶面,形成刃位错。同时,由于切削刀具存在刃圆半径,使得在压缩位错变形区中产生的刃位错在后续刀尖碾过后再一次压缩,产生大量的滑移晶面,形成刃位错的交叉与网状位错结构。

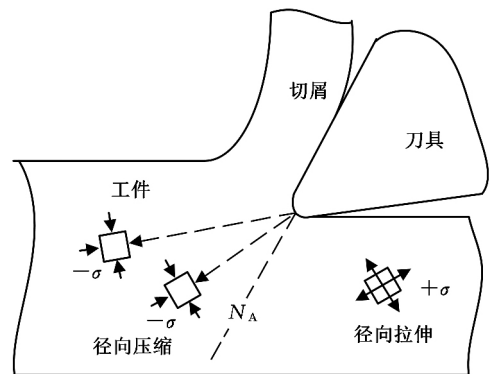


图 8 切削过程的位错压缩形成过程

Fig.8 Dislocation compression formation process

由两种方法所得位错密度可以看出,高速切削加工位错密度非常高,达到  $10^{15} \sim 10^{16} \text{ m}^{-2}$ ,位错密度随切削速度的变化规律如图 9 所示。位错密度大体上先与切削速度成正相关关系,当切削速度在 3500 m/min 左右时,转变为负相关关系。

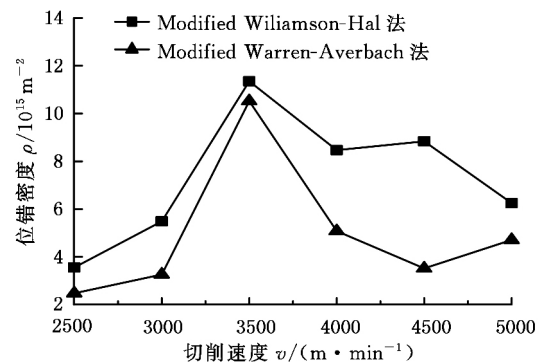


图 9 不同切削速度下两种方法所得位错密度

Fig.9 Dislocation density of two method at different cutting speed

从能量的角度看,晶体变形自由能是由位错能与畸变能组成的。当切削速度较小时,体系自由能相应也较低,此时处在位错沿晶界的攀移阶段,形成位错的堆积现象。当切削速度持续增大,晶界位错积累了足够的能量后,就会在晶界上发生分解,由此发射出来的位错滑移到晶粒内部,与 Burgers 矢量相反的位错相遇湮灭,最终造成了

位错密度的减小。

研究表明, Modified Warren-Averbach 法和 Modified Williamson-Hall 法计算出的晶粒尺寸分别接近 TEM 结果的上下限。对于经塑性变形后的金属材料, 晶粒尺寸的分布符合对数正态分布, 其密度函数  $f(x)$  为<sup>[17]</sup>

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \frac{1}{x} \exp\left(-\frac{[\ln(x/m)]^2}{2\sigma^2}\right) \quad (16)$$

式中,  $x$  为晶粒尺寸;  $\sigma$  为晶粒尺寸分布标准差;  $m$  为晶粒尺寸分布中值。

由 UNGÁR 等<sup>[9]</sup>提供的方法, 通过假设晶粒为圆柱形并且具有对数正态分布, 推导后可得出如下关系:

$$D_a^f = \frac{2m}{3} \exp\left(\frac{5\sigma^2}{2}\right) \quad (17)$$

$$D_v^f = \frac{3m}{4} \exp\left(\frac{7\sigma^2}{2}\right) \quad (18)$$

经此方法得出的  $D_a^f$ 、 $D_v^f$  与  $D_a$ 、 $D_v$  理论上是相等的, 因此可求出  $(D_a^f - D_a)^2 + (D_v^f - D_v)^2$  的最小值, 以求解  $m$ 、 $\sigma$  值。

切削速度为 3500 m/min、5000 m/min 时晶粒尺寸分布函数如图 10 所示, 不同切削速度下标准差如图 11 所示。

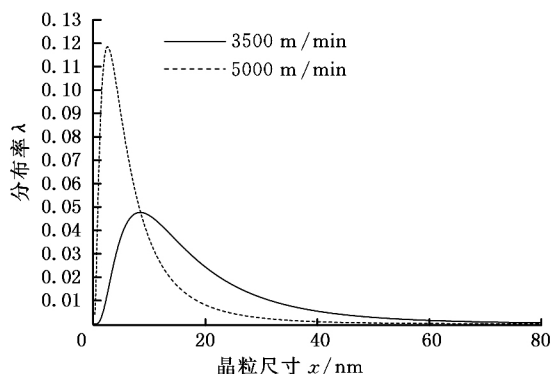


图 10 3500 m/min、5000 m/min 时晶粒尺寸分布曲线

Fig.10 Grain size distribution curve at the cutting speed of 3500 m/min and 5000 m/min

分布函数标准差反应晶粒尺寸集中程度, 标准差越小表明晶粒尺寸越集中, 晶粒分布越均匀, 反之越分散。其标准差规律说明切削速度在 5000 m/min 时晶粒尺寸最集中, 晶体结构最均匀。而切削速度在 3500 m/min 时晶体尺寸分布最分散, 与位错密度变化规律相比更能说明位错能理论的正确性。当切削速度在 3500 m/min 时, 已加工表层自由能饱和, 此时的晶体运动状态紊乱, 出现位错湮灭, 导致晶粒尺寸分布不均匀。同时说明此时已经越过了自由能饱和点, 处在位错湮灭阶段, 临界点应该位于 3000~3500 m/min 之间。

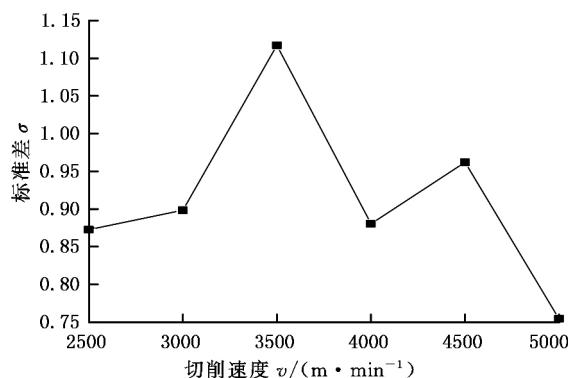


图 11 不同切削速度下晶粒分布标准差

Fig.11 Residual sum of squares of grain distribution at different cutting speeds

由上述分析可知, 要想实现微观晶体结构稳定的同时尽量提高加工效率, 切削速度应控制在 4500 m/min 以上。

## 4 结论

(1) 运用 Modified Williamson-Hall 法分析出高速切削条件下已加工表面以刃位错为主, 这与 TEM 观察法有较好的一致性。基于刃前压缩变形现象说明了刃型位错的形成主要是由于压应力作用。

(2) 高速切削过程中, 已加工表面的位错密度均达到了  $10^{15} \text{ m}^{-2}$  以上, 呈现先与切削速度成正相关关系, 当切削速度在 3500 m/min 左右时, 转变为负相关关系的规律。这主要是由于位错自由能在 3500 m/min 之前达到饱和的缘故。

(3) 基于 Modified Warren-Averbach 法和 Modified Williamson-Hall 法得出的晶粒尺寸, 拟合出了晶粒尺寸分布曲线, 分析出 3500 m/min 时晶体结构最紊乱, 这是由于此时已超过自由能临界点, 进入位错湮灭阶段。

(4) 较稳定的微观晶体结构同时尽量提高加工效率, 切削速度应控制在 4500 m/min 以上, 这对微观角度上参数优化有重要意义。

## 参考文献:

- [1] AHMADZADEH G R, VARVANI-FARAHANI A. Fatigue Damage and Life Evaluation of SS304 and Al 7050-T7541 Alloys under Various Multiaxial Strain Paths by Means of Energy-based Fatigue Damage Models[J]. Mechanics of Materials, 2016, 98:59-70.
- [2] 刘良宝, 孙剑飞, 陈五一, 等. 7050T651 铝合金板材内部初始残余应力分布研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(4):537-543.

LIU Liangbao, SUN Jianfei, CHEN Wuyi, et al.

- Study on Distribution of Initial Residual Stress in 7075T651 Aluminium Alloy Plate[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(4): 537-543.
- [3] WANG Bing, LIU Zhanqiang. Investigations on Deformation and Fracture Behavior of Workpiece Material during High Speed Machining of 7050-T7451 Aluminum Alloy[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2016(14): 43-54.
- [4] ALVAREZ M A V, SANTISTEBAN J R, VIZCAÍNO P, et al. Quantification of Dislocations Densities in Zirconium Hydride by X-ray Line Profile Analysis[J]. Acta Materialia, 2016, 117: 1-12.
- [5] WARREN B E, AVERBACH B L. The Effect of Cold-work Distortion on X-ray Patterns[J]. J. Appl. Phys., 1950, 21: 595-599.
- [6] WILLIAMSON G K, HALL W H. X-Ray Line Broadening from Filed Alumimim and Wolfram[J]. Acta Metal., 1953, 1: 22-31.
- [7] KRIVOGLAZ M A. Theory of X-ray and Thermal Neutron Scattering by Real Crystals [M]. New York: Plenum Press, 1969.
- [8] WILKENS M. The Determination of Density and Distribution of Dislocations in Deformed Single Crystals from Broadened X-ray Diffraction Profiles [J]. Phys. Stat. Sol., 1970, 2: 359-370.
- [9] UNGÁR T, TICHY G. The Effect of Dislocation Contrast on X-ray Line Profiles in Untextured Polycrystals[J]. Phys. Stat. Sol., 1999, 171: 425-434.
- [10] WOO W, UNGÁR T, FENG Z, et al. X-ray and Neutron Diffraction Measurements of Dislocation Density and Subgrain Size in a Friction-stir-welded Aluminum Alloy [J]. Metal Mater. Trans. A, 2010, 41(5): 1210-1216.
- [11] 樊志剑, 宋振飞, 肖大武, 等. 动态压缩 LY12 铝合金微结构的 XRD 线形分析[J]. 金属学报, 2011, 47(5): 559-565.  
FAN Zhijian, SONG Zhenfei, XIAO Dawu, et al. XRD Line Profile Analysis of LY12 Aluminum Alloy under Dynamic Compressive Experiment[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2011, 47(5): 559-565.
- [12] 詹科. S30432 奥氏体不锈钢喷丸强化及其表征研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.  
ZHAN Ke. Investigation of Shot Peening Treatment on S30432 Austenitic Stainless Steel and Its Characterization [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [13] WANG Y M, LEE S S, LEE Y C. X-ray Line Profile Analysis of Deformed Al[J]. Appl. Crystallogr., 1982, 15: 35-38.
- [14] 武恭. 铝及铝合金材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- WU Gong. Handbook of Aluminum and Aluminum Alloy Materials[M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [15] UNGÁR T, GUBICZA J, HANÁK P, et al. Densities and Character of Dislocations and Size-distribution of Subgrains in Deformed Metals by X-ray Diffraction Profile Analysis[J]. Materials Science and Engineering, 2001, A319/321: 274-278.
- [16] 付秀丽. 高速切削航空铝合金变形理论及加工表面形成特征研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.  
FU Xiuli. Research on Deformation Theory and Characteristics of Machined Surface for High-speed Milling Aviation Aluminum Alloy [D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [17] LANGFORD J I, LOUËR D, SCARDI P. Effect of a Crystallite Size Distribution on X-ray Diffraction Line Profiles and Whole-powder-pattern Fitting[J]. J. Appl. Crystallogr., 2000, 33: 964-974.
- (编辑 王艳丽)
- 
- 作者简介: 安增辉, 男, 1991 年生。南京航空航天大学能源与动力学院博士研究生。主要研究方向为先进制造技术与装备、机械振动。发表论文 10 余篇。E-mail: me\_anzh@163.com。李舜骐, 男, 1962 年生。南京航空航天大学能源与动力学院教授、博士研究生导师。付秀丽, 女, 1978 年生。济南大学机械工程学院副教授、博士。
- ~~~~~
- (上接第 2631 页)
- [13] 马逢时, 刘传冰. 六西格玛管理统计指南——MINITAB 使用指南[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2007: 400-488.  
MA Fengshi, LIU Chuanbing. Six Sigma Management Guideline—Guide to Using the MINITAB [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2007: 400-488.
- [14] SUBRAMANIAN M, SAKTHIVEL M, SOORY-APRAKASH K, et al. Optimization of Cutting Parameters for Cutting Force in Shoulder Milling of Al 7075-T6 Using Response Surface Methodology and Genetic Algorithm[J]. Procedia Engineering, 2013, 64(12): 690-700.
- [15] 汪振华. 防锈铝合金弱刚度复杂构件高速铣削工艺研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.  
WANG Zhenhua. Study on the High-speed Milling Process For the Weak Rigidity Workpieces of Anti-rust Aluminum Alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- (编辑 陈勇)
- 
- 作者简介: 王敏, 男, 1978 年生。北京化工大学机电学院高级工程师。研究方向为装备再制造技术以及难加工材料加工技术。E-mail: wangmin@mail.buct.edu.cn.