

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2019.02.017

车削氟金云母陶瓷脆性破碎机理及表面粗糙度模型

马廉洁, 蔡重延, 毕长波, 张 力
(东北大学秦皇岛分校 控制工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 基于脆性断裂力学和刀具-工件干涉原理,研究氟金云母陶瓷脆性破碎机理及表面成形机制,预测了脆性材料车削中的裂纹扩展角度与深度;建立氟金云母陶瓷车削表面粗糙度理论模型,用以评价精密车削陶瓷表面质量并提高加工效率.脆性材料车削表面粗糙度由几何干涉粗糙度和脆性崩碎粗糙度构成.刀具几何形状和进给量主要影响几何干涉粗糙度,工件力学性能、切削速度、切削深度和切削力主要影响脆性崩碎粗糙度.验证实验结果表明,氟金云母陶瓷车削表面粗糙度随切削速度的增大而减小,随进给量或切削深度的增大而增大.本模型的理论预测值与实验结果趋势一致,与传统的几何模型相比更接近实验值.

关 键 词: 表面粗糙度;理论模型;脆性破碎机理;氟金云母陶瓷;车削

中图分类号: TG 51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)02-0239-06

Brittle Fracture Mechanism and Surface Roughness Model in Turning Fluorophlogopite Ceramics

MA Lian-jie, CAI Chong-yan, BI Chang-bo, ZHANG Li
(School of Control Engineering, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China.
Corresponding author: MA Lian-jie, E-mail: mlj@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The brittle fracture mechanism and surface formation mechanism are studied based on brittle fracture mechanics and tool-work piece interference principle in turning fluorophlogopite ceramics. The crack propagation angle and depth are predicted. The theoretical model of turning surface roughness is established to evaluate the surface quality of precision turning fluorophlogopite ceramics and improve the machining efficiency. The surface roughness in turning brittle materials consists of kinematical-geometrical roughness and brittle fracture roughness. Kinematical-geometrical roughness is mainly affected by tool geometry and feed rate, while brittle fracture roughness is mainly affected by cutting speed, cutting depth, cutting force and mechanical properties of ceramics. Experiment results show that surface roughness increases with the increase of feed rate and cutting depth, while decreases with the increase of cutting speed. Compared with the traditional geometric roughness model, the theoretical values of brittle model are closer to the experimental results, and theoretical values and experimental trends are identical.

Key words: surface roughness; theoretical model; brittle fracture mechanism; fluorophlogopite ceramics; turning

表面粗糙度是衡量零件加工质量的重要属性之一^[1].陶瓷材料因具有优良的力学和化学性能而被广泛应用于航空航天、建筑和生物医学等领域^[2].然而陶瓷材料对缺陷与裂纹敏感,机械加工表面质量差^[3],研究其脆性破碎机理及表面粗糙度变化规律,建立粗糙度理论模型,对提高已加工表面质量具有重要意义.由于刀具的轴向进给,车削表面会残留反映进给量和刀尖圆弧半径的周期性沟槽.很多学者在此基础上又考虑刀具磨损^[4]、工件硬度^[5]、切削系统振动^[6]、材料弹性恢复^[7]等因素对粗糙度的影响,建立了粗糙度的修正模型.然而,以上粗糙度模型是针对金属材料或脆性材料韧性域去除时建立的,对于陶瓷材料脆性域去除模式下的表面粗糙度理论建模的研究鲜

有报道。

陶瓷材料的硬脆特性使其有别于金属材料的切削机理,因此,金属材料的粗糙度预测模型并不适用于陶瓷材料。本文研究了氟金云母陶瓷脆性破碎机理及其表面成形机制,结合刀具-工件干涉原理,建立了氟金云母陶瓷切削表面粗糙度运动学-脆性断裂力学的理论模型。通过氟金云母陶瓷车削实验,验证模型精度。

1 氟金云母陶瓷脆性破碎机理

1.1 裂纹扩展长度

切削速度方向上脆性材料切屑断裂过程如图 1 所示。

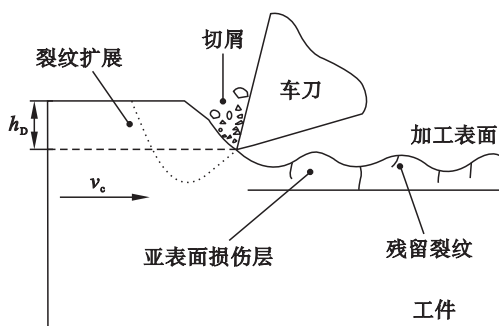


图 1 脆性材料切屑断裂过程

Fig. 1 Chip fracture process of brittle materials

材料切削层去除方式为断裂破碎,它是由裂纹萌生和裂纹扩展导致的。被切削陶瓷在刀具挤压作用下,工件与刀具接触区域开始产生微裂纹。这些微裂纹和工件材料的初生裂纹构成工件刃前区的微裂纹系统。随着刀具与工件的继续相互运动和挤压,裂纹尖端应力强度因子达到材料的断裂韧性,微裂纹汇聚成一条主裂纹并发生失稳扩展,主要向工件材料前下方扩展。当裂纹扩展一定深度时突然向前上方突进,直至扩展到自由表面,此时切屑断裂,并在刀具推挤作用下沿前刀面流出,已加工表面形成凹坑。

由于刀具存在一个半径为 r_b 的钝圆,车刀与陶瓷切削层的挤压可以用压痕断裂模型模拟,压痕断裂模型如图 2 所示,硬质球形压头承受载荷 P ,其加载诱发了脆性表面裂纹的萌生。裂纹长度为 c ,与自由表面夹角为 θ 。裂纹萌生后,刀具持续切削,此过程相当于钝压头在脆性表面刻划,划痕的效果不是使裂纹尺寸增大而是使裂纹密度增大,裂纹密度增大的过程就是切削系统裂纹桥接、崩碎切屑形成的过程。

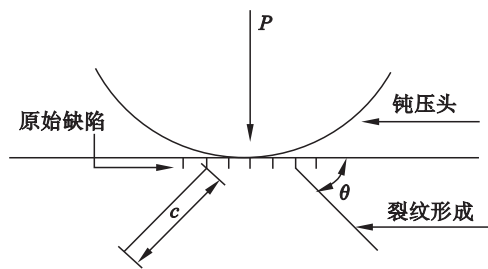


图 2 压痕断裂示意图

Fig. 2 Schematic diagram of indentation fracture

锥形裂纹的长度^[8]

$$c = \left(\frac{\chi P}{K_{IC}} \right)^{2/3} \quad (1)$$

式中: K_{IC} 是材料的断裂韧性; χ 是一个与材料泊松比 ν 有关的本征属性^[9]:

$$\chi(\nu) = \left\{ \frac{3}{4} [3(1-2\nu)^2(1-\nu^2)/32\pi]^3 \right\}^{1/2}; \quad (2)$$

载荷 P 为主切削力 F_c 与切深抗力 F_p 的合力:

$$P = \sqrt{F_p^2 + F_c^2} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),求得锥形裂纹长度:

$$c = \left(\frac{\chi \sqrt{F_p^2 + F_c^2}}{K_{IC}} \right)^{2/3} \quad (4)$$

1.2 裂纹扩展角

萌生的裂纹承受正应力和剪应力的作用,因此切屑的断裂模式为张开和滑开型,裂纹尖端的 I 型和 II 型应力强度因子分别为

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi c} \sin^2 \theta, \quad (5)$$

$$K_{II} = \sigma \sqrt{\pi c} \sin \theta \cos \theta. \quad (6)$$

式中: θ 为主裂纹与已加工表面的夹角; σ 为刀具对前刀面的正应力。

车削时切削层厚度 h_D 和进给量 f 的关系为

$$h_D = f \sin \kappa_r \quad (7)$$

式中 κ_r 为刀具主偏角。

切削深度 a_p 和切削层宽度 b_D 的关系为

$$b_D = \frac{a_p}{\sin \kappa_r} \quad (8)$$

因此有效切削接触面积为

$$S = h_D b_D = f a_p \quad (9)$$

由于刀具与工件实际接触面积很小,刀具圆弧处的正应力近似均匀分布。裂纹形成后刀具继续运动相当于空切,后刀面与已加工表面未接触。因此裂纹体受的外加应力为前刀面与切削层的接触应力

$$\sigma = F_c / S \quad (10)$$

根据脆性裂纹扩展的准则,当裂纹尖端的应

力强度因子达到材料的断裂韧性时,裂纹发生失稳扩展.在平面应力状态下,陶瓷材料 I 型断裂韧性近似等于 II 型断裂韧性,因此得到脆性裂纹扩展准则:

$$\frac{K_{\text{I}}^2}{K_{\text{IC}}^2} + \frac{K_{\text{II}}^2}{K_{\text{IC}}^2} = 1. \tag{11}$$

将式(5),(6),(10)代入式(11),得裂纹扩展角:

$$\theta = \arcsin \frac{K_{\text{IC}} f a_{\text{p}}}{F_{\text{c}} \sqrt{\pi c}}. \tag{12}$$

2 脆性材料车削表面粗糙度理论模型

2.1 几何干涉粗糙度

外圆车削理想表面面貌如图 3 所示,表面面貌是周期性的圆弧沟槽,几何干涉粗糙度为 $R_{\text{a,g}}$.在一定程度上,车削加工表面反映了刀具的几何形状,表征了刀具与工件车削过程中的干涉关系.理想表面残留轮廓是构成脆性材料车削表面粗糙度的基础.

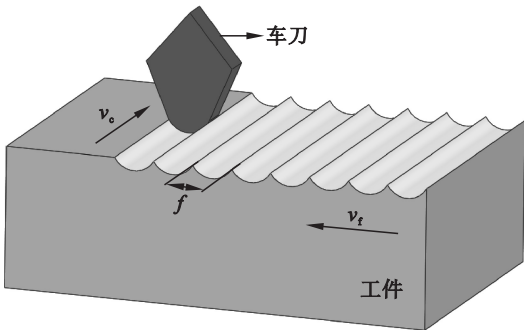


图 3 外圆车削理想表面面貌

Fig. 3 Ideal surface topography of external turning

在进给方向提取的轮廓曲线如图 4 所示.

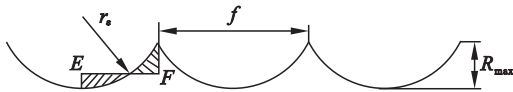


图 4 进给方向残留轮廓曲线

Fig. 4 Surface residual profile curve in feed direction

残留轮廓最大高度:

$$R_{\text{max}} = r_{\text{e}} - \sqrt{r_{\text{e}}^2 - f^2/4}. \tag{13}$$

式中: r_{e} 为刀具圆弧半径; f 为进给量.

中线高度:

$$h = \frac{r_{\text{e}} + R_{\text{max}}}{2} - \frac{\arcsin(f/2r_{\text{e}}) r_{\text{e}}^2}{f}. \tag{14}$$

中线上下两侧轮廓与中线围成的面积相等,在半周期 EF 内,该面积 S 为

$$S = \frac{1}{2} r_{\text{e}}^2 \arccos \left(1 - \frac{h}{r_{\text{e}}} \right) - \frac{1}{2} (r_{\text{e}} - h) \times \sqrt{r_{\text{e}}^2 - (r_{\text{e}} - h)^2}. \tag{15}$$

轮廓为周期性的圆弧,因此半个周期的粗糙度即理想轮廓粗糙度.粗糙度的定义式:

$$R_{\text{a}} = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x) - h| dx. \tag{16}$$

式中: l 为一个取样长度,取 l 为 $f/2$; $y(x)$ 为理想轮廓某个点的高度.

将式(15)代入式(16),求得理想残留轮廓几何干涉粗糙度:

$$R_{\text{a,g}} = \frac{2S}{l} = \frac{2}{f} \left[r_{\text{e}}^2 \arccos \left(1 - \frac{h}{r_{\text{e}}} \right) - (r_{\text{e}} - h) \times \sqrt{2r_{\text{e}}h - h^2} \right]. \tag{17}$$

2.2 脆性崩碎粗糙度

裂纹的持续扩展将导致崩碎切屑的周期性断裂,造成加工表面的凹凸不平.凹坑形状可以简化为三角形,其粗糙度为

$$R_{\text{a,b}} \approx \frac{1}{4} c \sin \theta. \tag{18}$$

将式(4),式(12)代入式(18),得到脆性崩碎粗糙度的理论值:

$$R_{\text{a,b}} = \frac{K_{\text{IC}}^2 \chi^{1/3} f a_{\text{p}} (\sqrt{F_{\text{p}}^2 + F_{\text{c}}^2})^{1/6}}{4 \sqrt{\pi} F_{\text{c}}}. \tag{19}$$

2.3 脆性材料车削表面粗糙度理论模型

陶瓷材料车削过程中,在原有理想表面产生的残留凹坑会增大粗糙度,从而降低表面质量.脆性崩碎粗糙度在几何干涉粗糙度上叠加,是构成脆性材料车削理论粗糙度的主要因素.为使问题简化,做出如下假设:车削过程中忽略刀具的磨损对粗糙度的影响,忽略加工误差如机床振动对粗糙度的影响;则脆性材料车削理论粗糙度为

$$R_{\text{a}} = R_{\text{a,g}} + R_{\text{a,b}}. \tag{20}$$

将式(17)和式(19)代入式(20),最终得到脆性材料车削粗糙度理论模型:

$$R_{\text{a}} = \frac{2}{f} \left[r_{\text{e}}^2 \arccos \left(1 - \frac{h}{r_{\text{e}}} \right) - (r_{\text{e}} - h) \sqrt{2r_{\text{e}}h - h^2} \right] + \frac{K_{\text{IC}}^2 \chi^{1/3} f a_{\text{p}} (\sqrt{F_{\text{p}}^2 + F_{\text{c}}^2})^{1/6}}{4 \sqrt{\pi} F_{\text{c}}}. \tag{21}$$

3 脆性材料车削表面粗糙度理论模型的验证

在 CAK5085 型数控车床上进行车削实验,工件材料是可加工氟金云母陶瓷棒料:密度

2.76 g/cm³, 热导率 2.5 W/(m·K), 弯曲强度 118 MPa, 维氏硬度 (830 ~ 920) HV, 断裂韧性 3.6 MPa·m^{1/2}, 泊松比 0.25. 使用 YW1 硬质合金数控车刀进行车削, 刀具主偏角 κ_r 和副偏角 κ_r' 均为 45°, 前角 γ_0 为 0°, 后角 α_0 为 11°, 刃倾角 λ_s 为 0°, 刀尖圆弧半径 r_e 为 0.5 mm. 分别以车削深度、车削速度和进给量为单因素变量开展实验, 实验条件见表 1. 采用 3D 共聚焦激光显微镜 (OLYMPUS) 观测已加工表面并测量粗糙度. 采用 Kistler 六分量切削力测试仪测量切削力.

表 1 实验工艺参数			
Table 1 Experiment parameters in turning glass-ceramics			
实验编号	$v_c/(m \cdot min^{-1})$	$f/(mm \cdot r^{-1})$	a_p/mm
1 ~ 6	28 ~ 75	0.08	0.1
7 ~ 11	56	0.05 ~ 0.15	0.1
12 ~ 16	56	0.08	0.05 ~ 0.2

4 结果与讨论

4.1 粗糙度模型的验证

在金属材料车削中一个常见的预测表面粗糙度的几何模型为

$$R_a = \frac{0.032f^2}{r_e} \quad (22)$$

将氟金云母陶瓷材料参数、YW1 刀具圆弧半径、车削工艺参数代入式 (21) 中, 将车削工艺参数代入式 (22) 中, 得到氟金云母陶瓷车削粗糙度各模型预测值.

图 5 所示为氟金云母陶瓷车削表面粗糙度和各模型预测值与切削速度的关系曲线. 当切削速度较小时, 粗糙度随切削速度的增大而显著减小; 当切削速度大于 47 m/min 时, 粗糙度虽然继续减小, 但其减小程度已经不显著. 几何模型未涉及切削速度, 因此采用该模型的粗糙度预测值不随切削速度的改变而变化. 脆性材料车削粗糙度模型理论预测值与实验结果的趋势一致, 与传统几何模型相比更接近实验值.

图 6 所示为粗糙度与进给量的关系曲线. 当进给量较小时, 表面粗糙度随进给量增大而略微减小, 随后粗糙度随进给量的增加而显著增大; 当进给量较大时, 脆性材料粗糙度模型与实验值较为接近. 进给量主要影响理想表面残留轮廓高度, 是决定表面粗糙度的主要原因.

图 7 所示为粗糙度与切削深度的关系曲线. 表面粗糙度随切削深度的增加而增大. 当切削深

度小于 0.09 mm 时, 表面粗糙度随切削深度的增加而缓慢增大; 当切削深度大于 0.09 mm 时, 粗糙度急剧增大. 脆性材料车削存在延性域去除和脆性域去除的临界切削深度^[10]. 当切削深度小于临界切削深度时, 材料去除方式为塑性剪切去除, 已加工表面较为平整, 表面可以看到未被破坏的刀痕, 凹坑与残留裂纹数量少, 表面粗糙度较小. 当切削深度大于临界切削深度时, 材料去除方式为断裂破碎. 崩碎切屑的形成经历了裂纹成核、裂

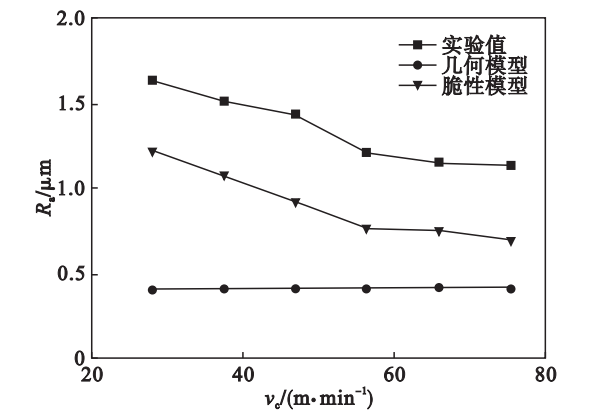


图 5 表面粗糙度随切削速度变化曲线
Fig. 5 Effect of cutting speed on surface roughness

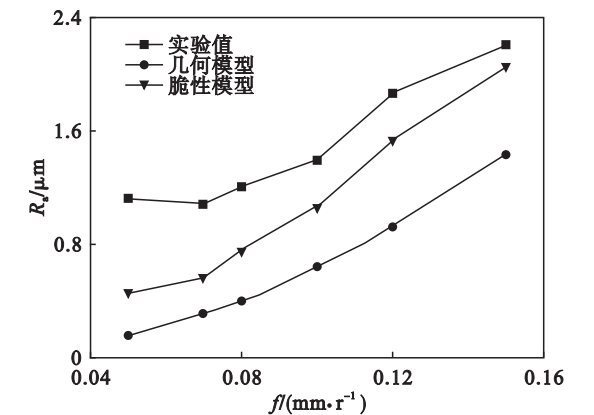


图 6 表面粗糙度随进给量变化曲线
Fig. 6 Effect of feed rate on surface roughness

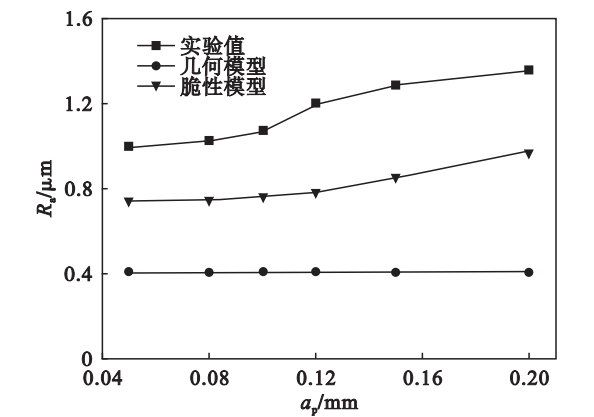


图 7 表面粗糙度随切削深度变化曲线
Fig. 7 Effect of cutting depth on surface roughness

纹扩展、裂纹延伸至自由表面三个阶段. 已加工表面存在大量凹坑与残留裂纹, 亚表面损伤严重, 表面质量恶化. 脆性材料粗糙度理论模型与实验趋势相同. 几何模型粗糙度随切削深度的增加而不发生变化, 因此几何模型不能反映脆性材料车削表面粗糙度与切削深度的关系.

4.2 讨论

式(21)的第一部分表示由于刀具与工件的干涉关系形成的表面粗糙度 $R_{a,g}$, 进给量越大, 刀尖圆弧半径越小, 表面粗糙度越大. 式(21)的第二部分表示陶瓷材料脆性崩碎粗糙度 $R_{a,b}$, 材料的断裂韧性越大, 切削力越大, 表面粗糙度越大. 但是理论模型的预测值与实际粗糙度仍然有一定的偏差, 预测值总是小于实际粗糙度, 这是因为实际加工中已加工表面的黏结物和残留裂纹会增大粗糙度, 恶化表面质量, 而这一部分粗糙度未在模型中体现.

图 8 所示为氟金云母陶瓷车削表面形貌激光检测照片. 图 8a,b,c 中虚线区域的局部放大图分别对应图 8d,e,f. 由图 8a,b,c 可以观察到近似周期性的白色线条. 相邻线条之间为反映刀具几何形状的圆弧状沟壑. 由于轴向进给量的影响, 刀刃

在经过每个主轴旋转周期后都会在表面留下沟壑, 沟槽在表面大致均匀分布, 实验测得每个沟槽的宽度为进给量 f . 周期性的沟槽构成几何干涉粗糙度. 由图 8a,b,c 还可以看到沟槽底部相间排列的凹坑, 凹坑的形成是材料脆性剥落的结果, 凹坑轮廓构成脆性崩碎粗糙度. 由图 8d,e 可以看到划痕及其底部的残留裂纹. 白色区域较光滑, 说明材料去除方式为塑性去除, 划痕是刀具在工件表面刻划的结果. 划痕底部的工件材料由于切削深度较大, 材料去除方式为脆性断裂, 因此划痕底部易出现残留裂纹和小凹坑. 图 8f 出现白色的粉末化区域, 这是由于陶瓷表面在刀具的反复冲击作用下, 网状微裂纹延伸形成大量微小碎屑, 形成粉末化区域. 在粉末化区域可观察到同方向的划痕形貌, 这是因为粉末化区域硬度衰减, 远小于陶瓷基体硬度, 在刀具刻划过程中出现类似金属塑性耕犁作用. 每张表面形貌检测照片都可以观察到大量黑色的麻点, 表示已加工表层区存在大量的残留裂纹与空穴, 加工过程中切削区的微裂纹延伸到工件内部造成亚表面损伤, 空穴的形成是裂纹扩展与桥接的结果. 已加工表面的各种缺陷都会恶化表面质量, 增大已加工表面粗糙度值.

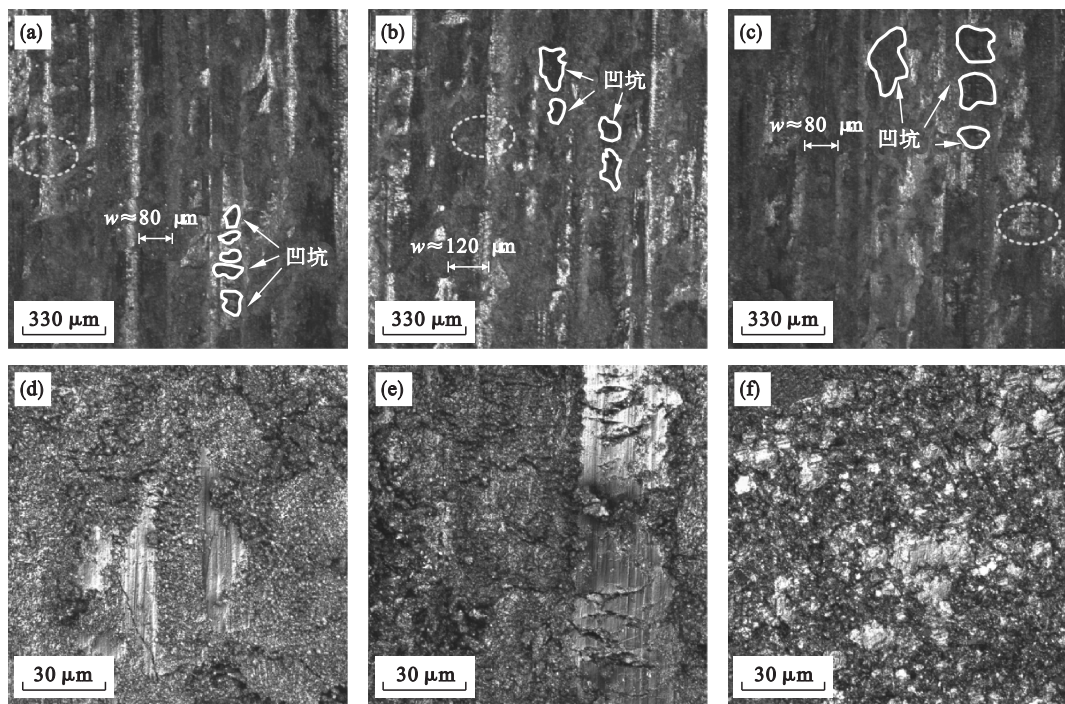


图 8 氟金云母陶瓷车削表面形貌

Fig. 8 Machined surface morphology of the fluorophlogopite ceramics

(a) (d)— $v_c = 47 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.1 \text{ mm}$; (b) (e)— $v_c = 56 \text{ m/min}$, $f = 0.10 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.10 \text{ mm}$;
(c) (f)— $v_c = 56 \text{ m/min}$, $f = 0.08 \text{ mm/r}$, $a_p = 0.12 \text{ mm}$.

(下转第 250 页)