

文章编号: 1004-132X (2000)08-0845-04

# 超精密加工的三维表面形貌预测

李荣彬 张志辉 李建广



李荣彬 教授

**摘要:** 描述并建立了仿真超精密加工的三维表面形貌模型。三维表面形貌模型由切削参数、刀具几何形状及刀具与工件的相对运动来表征, 通过将预测的表面粗糙度轮廓线性映射到网格面元上来生成已加工表面的形貌。实际的加工和测量实验表明, 仿真的三维表面形貌和由激光干涉形貌仪测量得到的三维形貌具有很好的相似性。该模型可用来确定如刀具切削运动的迹线、表面波度等表面特征。

**关键词:** 建模; 仿真; 表面形貌; 超精密加工

**中图分类号:** TH161.1 **文献标识码:** A

随着机床、先进控制系统和激光测量等技术的快速发展, 超精密车削加工的效率得到了极大的提高。然而, 超精密加工是一个复杂材料去除过程。当采用新超精密机床或加工新材料工件时, 一方面依赖于机床操作人员的经验、技术, 另一方面还得通过反复加工才能加工出具有超镜面光洁度的工件。因为工件的表面质量是影响其性能的最主要因素, 所以加工表面的成形过程引起了有关研究者的极大兴趣<sup>[1]</sup>。

已加工表面成形的三维分析已经进行了一些尝试性的研究<sup>[2,3]</sup>, 但其研究重点放在由干涉测量法获得的测量数据的表面形貌合成上, 而很少放在基于机床运动学和切削理论分析的三维表面形貌的产生上<sup>[4]</sup>, 因此, 笔者提出了一种创新性的建模和仿真方法, 对超精密车削表面的微观表面形貌进行建模和仿真。

## 1 三维表面形貌模型

影响已加工表面形貌的主要因素包括刀具的几何形状、进给速度及刀具—工件间的相对振动<sup>[5,6]</sup>。Takasu等<sup>[7]</sup>的研究表明, 表面粗糙度在切削进给方向上比在主切削方向上表现要显著, 因为表面粗糙度在进给方向上比在主切削方向上具有更短的波长和更大的峰谷值。

在本研究中, 假定切削过程是正切削, 工件材料的均质的和各向同性的, 刀具—工件间的相对振动是一个稳定的小振幅、低频率的简谐运动; 只考虑进给方向上的相对振动, 因为其对表面粗糙

度的产生起显著作用; 当切削深度很小时, 自激振动和刀具磨损可忽略不计; 虽然由切屑厚度变化而导致的切削力的波动可影响表面粗糙度, 但在超精密加工中, 振幅对切削深度的比率通常是很小的, 例如, 在本研究中最大比率为 0.015 (峰谷值 30 nm / 切削深度 2000 nm), 为了分析的方便, 其影响也忽略不计。

在三维表面形貌模型中, 粗糙度数据是由工件表面经等距径向分割的有限个数据点的表面粗糙度轮廓来确定的 (见图 1)。表面粗糙度轮廓可

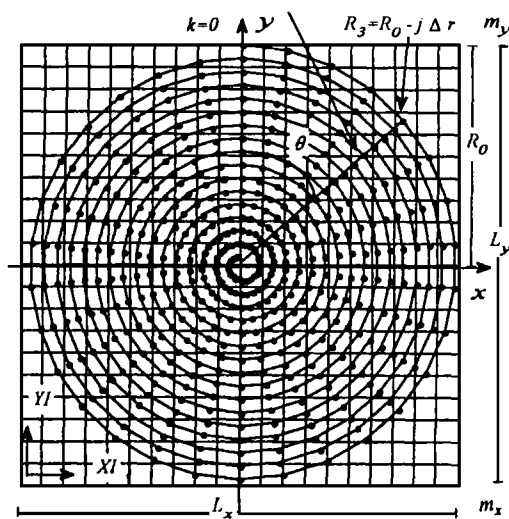


图 1 刀具轨迹和表面数据在网格上的线性映射

以看作是刀具轮廓以进给间隔作连续运动扫掠而形成的, 表面粗糙度取决于去除由前切削刃形成的表面轮廓切屑的后继切削刃的位置。然而在实际加工中, 刀具相对于工件的位置因诸多影响因

收稿日期: 2000-05-30

基金项目: 香港理工大学策略发展领域管理委员会资助项目

素而发生改变,如主轴的轴向跳动,不可避免的机床小振幅、低频率振动<sup>[7]</sup>等,从而导致了表面波度的形成和表面粗糙度轮廓的改变。

刀具—工件间的相对振动的频率  $f_z$  对主轴转速  $n$  的比率为

$$\frac{60f_z}{n} = \Delta + X \quad (1)$$

式中,  $\Delta$  为非负整数;  $X$  为小数,且  $-0.5 \leq X \leq 0.5$

则并发波动间的相位偏移  $h$  可定义为

$$h = \alpha X \quad (2)$$

径向分割的数目

$$N_p = \lceil \alpha \Delta \theta \rceil \quad (3)$$

式中,  $\Delta \theta$  为角度分割间隔;符号  $\lceil \cdot \rceil$  表示求大于被操作数的最小整数。

表面形貌的建模首先是要确定刀具相对于工件的三维轨迹。在时间域中,刀具对工件的相对偏移  $Z_c(t)$  在主切削方向上是一个稳定的简谐运动,可表示为

$$Z_c(t) = A \sin(\alpha f_z t - h) \quad (4)$$

式中,  $A$  为刀具—工件间相对振动的振幅,  $\mu\text{m}$ ;  $t$  为加工时间,  $s$

由于主轴的转速和进给速度是恒定的,亦即角速度  $k$  ( $k = \Delta \theta / \Delta t$ ,  $\Delta t$  为时间增量)和主轴转数  $N$  ( $N = R_0 / s$ ,  $s$  为进给速度)也是恒定的,则刀具轨迹点的数目

$$N_t = \frac{\alpha N}{k \Delta t} \quad (5)$$

刀具相对于工件偏移的离散表示形式可由式(4)和式(5)导出:

$$Z_c(j) = A \sin\left(\frac{\alpha f_z j \Delta \theta}{k} - h\right) \quad j = 0, 1, 2, \dots, N_t \quad (6)$$

在超精密端面车削加工中(见图 1),刀具以螺旋轨迹向工件的轴线方向运动,同时相对于工件作由刀具—工件间的相对振动而引起的简谐运动。在  $x - y$  平面上的刀具螺旋轨迹以极坐标形式可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_j &= R_0 - j \Delta r \\ \theta_j &= j \Delta \theta \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其在  $x - y$  平面上对应的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_c(j) &= (R_0 - j \Delta r) \sin(j \Delta \theta) \\ y_c(j) &= (R_0 - j \Delta r) \cos(j \Delta \theta) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)和式(8)描述了切削过程中的三维刀具轨迹,因此第  $k$  个径向截面的刀具轨迹可作为刀位点从  $xyz$  坐标系到  $R_k - Z_k$  极平面的变换来处理,  $R_k$  轴是第  $k$  个径向截面的极径,  $k = 0, 1, 2, \dots, N_p$

在第  $k$  个径向截面上,刀具轨迹在  $R_k - Z_k$  极平面上的坐标可由式(6)和式(7)导出,表示如

下:

$$\theta_i(i, k) = k \Delta \theta + \alpha(i - 1) \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

$$r_i(i, k) = R_0 - [k + (i - 1)N_p] \Delta R \quad (10)$$

$$Z_i(i, k) = A \sin\{C_p [k + (i - 1)N_p] - h\} \quad (11)$$

式中,  $C_p = \alpha f_z \Delta \theta / k$

第  $i$  个和第  $i + 1$  个刀具轮廓的切削边是从第  $k$  个径向截面的第 1 个刀具轮廓开始计起,其推导如下:

$$Z_{k,i}(r_{k,i}) = Z_i(i, k) + \frac{[r_{k,i} - (i - 1)s]^2}{2R} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, N - 1$$

$$Z_{k,i+1}(r_{k,i+1}) = Z_i(i + 1, k) + \frac{(r_{k,i+1} - is)^2}{2R} \quad (13)$$

式中,  $(r_{k,i}, Z_{k,i})$  为第  $i$  个刀具轮廓在第  $k$  个径向截面上的坐标;  $R$  为刀具尖圆弧半径。

在第  $i$  个和第  $i + 1$  个刀具轮廓在第  $k$  个径向截面上的交点  $T_{k,i,i+1}(r_{k,i,i+1}, H_{k,i,i+1})$  处有  $Z_{k,i} = Z_{k,i+1}$ ,  $r_{k,i} = r_{k,i+1}$ , 即

$$r_{k,i,i+1} = \frac{R[Z_i(i + 1, k) - Z_i(i, k)] + (i - \frac{1}{2})s^2}{s} \quad (14)$$

第  $i$  个和第  $i + 1$  个刀具轮廓在第  $k$  个径向截面上的交点高度可由式(13)和式(14)确定:

$$H_{k,i,i+1} = Z_i(i + 1, k) + \frac{(r_{k,i,i+1} - is)^2}{2R} =$$

$$Z_i(i + 1, k) + \frac{\{2R[Z_i(i + 1, k) - Z_i(i, k)] - s^2\}^2}{8Rs^2} \quad (15)$$

由于表面粗糙度是由低于每个刀具轮廓交点的最小边轮廓构成的,所以工件在第  $k$  个径向截面的表面粗糙度轮廓可通过裁剪掉高于交点的线段构造而成。对所有的径向截面,即  $k = 0, 1, 2, \dots, N_p$ , 根据式(9)~式(15),就可以在以极坐标  $\{r_k, Z_k, k \Delta \theta\}$  表示的  $R_k - Z_k$  极平面上确定表面形貌数据,然后再将这些数据映射到由下式定义的网格面元上(见图 1):

$$XI = \left[ \frac{[\frac{L_x}{2} + r_k \sin(k \Delta \theta)]}{L_x} m_x \right] \quad (16)$$

$$YI = \left[ \frac{[\frac{L_y}{2} + r_k \cos(k \Delta \theta)]}{L_y} m_y \right] \quad (17)$$

$$ZI = Z_k \quad (18)$$

式中,  $m_x, m_y$  分别为  $x, y$  方向的面元数;  $L_x, L_y$  分别为仿真区域的长度、宽度。

如图 2 所示,网格上的每个节点有 4 个最近的友邻相连,这些网格节点就构成了一个个四边形面元。每个内部节点  $(XIA, YIA, ZIA)$  有 4 个友邻相连,边上的节点  $(XIB, YIB, ZIB)$  有 3 个友邻与之相连,而网格角节点  $(XIC, YIC, ZIC)$

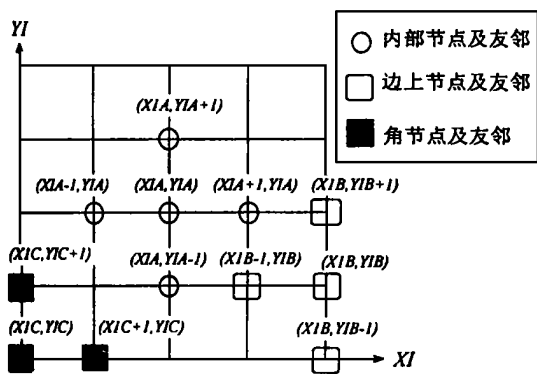


图2 网格面元的最近友邻定义

只有 2 个友邻与之相连。面元用来建立网格和拟合表面形貌数据的参数化表面,参数化表面的轮廓线高度级正比于表面的高度

在超精密车削加工中,工件的表面质量通常用表面形貌的最大峰谷高度  $R_t$  来评估,所以在本研究中工件的表面粗糙度也用最大峰谷高度来表征。假设集合  $\{Z_s\}$  包含由三维形貌仿真模型预测的  $N_s$  表面粗糙度高度值  $Z_s$ ,则预测的最大峰谷高度

$$\hat{R}_t = \max\{Z_s\} - \min\{Z_s\}, \forall Z_s \in \{Z_s\} \quad (19)$$

$$\bar{Z}_s = \left( \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} Z_{s,i} \right) \quad (20)$$

式中,  $Z_{s,i}$  为网格上第  $i$  个预测的表面粗糙度高度

## 2 实验验证

笔者在两轴 CNC 超精密车床 (Taylor Hobson Pneumo 公司的 Nanoform 300) 进行端面车削实验,对仿真模型进行评估,工件直径为 12.7 mm,材料为铜合金,其它化学成分与铜的百分含量比为: Bal., Al 0.24, Fe 0.20, Zn 0.4, Pb 0.12 用 WYKO TOPO-3D 非接触微表面测量系统测量已加工表面的三维形貌和粗糙度参数。为了保证仿真结果和测量结果的相容性和一致性,所有的仿真和测量都是在工件的轴心线附近进行的。此外,所有的仿真条件也都是同样的:  $N_p = 360, \Delta\theta = 0.0175 \text{ rad}, L_x = L_y = 0.25 \text{ mm}, m_x = m_y = s/5$ , 切削实验条件见表 1

表 1 切削条件

主轴速度 (r/min)	进给速度 (mm/min)	切削深度 ( $\mu\text{m}$ )	刀具前角 ( $^\circ$ )	刀具圆弧半径 (mm)
500	15	2	0	1.554

刀具—工件间的相对振动用具有纳米分辨

率的电容位移传感器在主轴轴线上进行测量,结果发现刀具和工件之间相对振动的平均振幅为  $0.015 \mu\text{m}$ , 频率为 45.0 Hz

## 3 结果和讨论

图 3 所示的是存在刀具—工件间相对振动的刀具轨迹,由式 (8)~式 (10) 可知,刀具在  $x-y$  平面上以螺旋线轨迹向工件的轴心线方向运动,同时在进给方向(即  $z$  轴方向)上作简谐振动,从而在已加工表面上产生了图 4 所示的波度

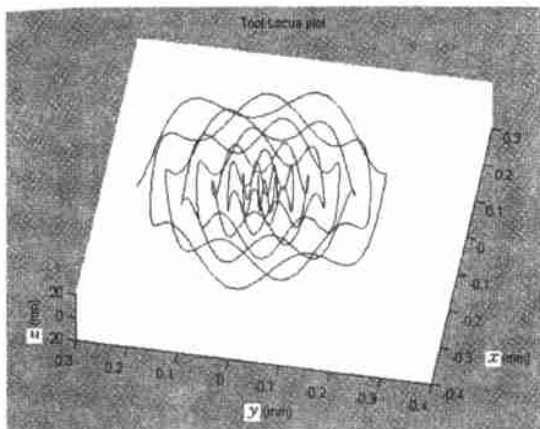


图 3 三维刀具轨迹

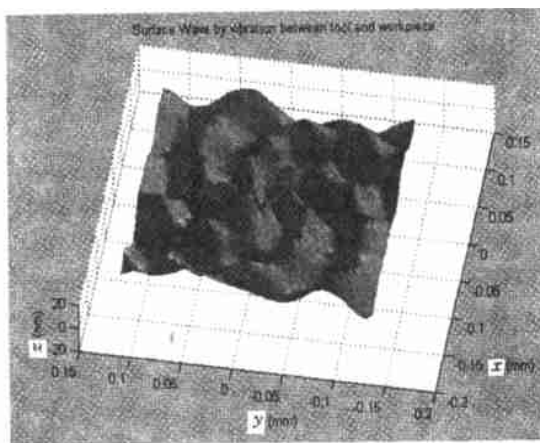


图 4 虚拟表面波度

根据式 (11)~式 (15),当模型考虑刀具的几何形状时,就可构造出超精密车削表面的三维表面形貌(见图 5),而与之相对应的测量表面形貌见图 6 相比较可以看出,预测表面形貌和由干涉显微镜测量所得到的表面形貌非常相似。测量表面形貌的很多表面特征,如刀具运动迹线、加工纹理等都在由模型生成的仿真形貌上得到了反映。由仿真模型预测出的表面粗糙度  $R_t$  预测值为  $92.6 \text{ nm}$ ,其测量值为  $94.4 \text{ nm}$ ,非常接近。这进一步证明了所建模型仿真超精密车削表面形貌的正

确性,图 7 所示为超精密加工工件的虚拟表面形貌。

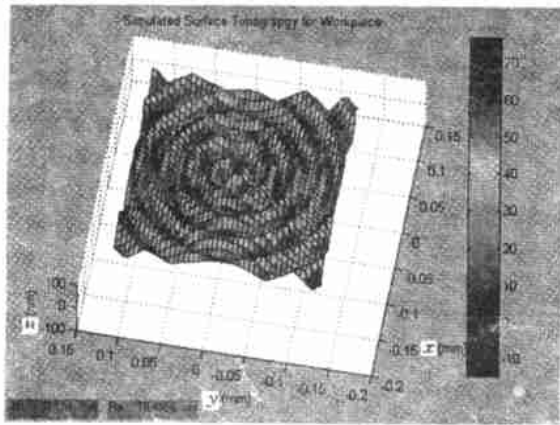


图 5 仿真的三维表面形貌

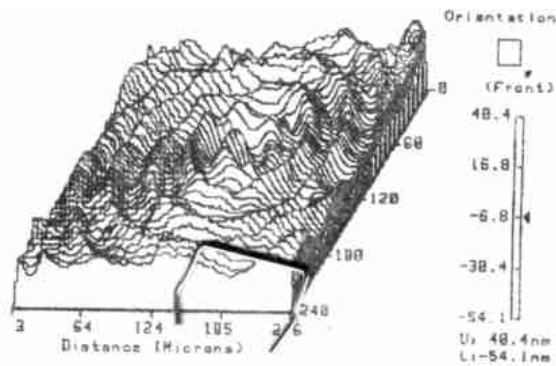


图 6 测量的三维表面形貌

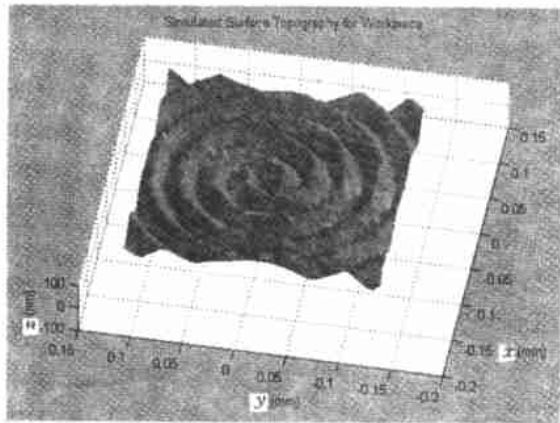


图 7 超精密车削加工工件的虚拟表面形貌

#### 4 结论

本文提出并建立了超精密车削加工三维表面形貌的仿真模型,该模型考虑了刀具几何形状、加工条件、刀具—工件间的相对振动等影响因素,并通过端面车削加工实验对模型进行了验证。结果表明,该模型可以准确地预测表面形貌粗糙度和三维表面形貌。虚拟表面表示可以用来直观地

检查表面形貌的各个特征

参考文献:

- [1] Tai T P, Yang Y C, Hwong Y C *et al.* A New Concept of Cutting Marks Formation in Metal Cutting Vibration. Proceedings of 20th MTDR, 1980: 449~456
- [2] Sato H, O-hori M. Characteristics of Two Dimensional Surface Roughness - Taking Self-Excited Chatter Marks as Objective. Annals of the CIRP, 1981, 30(1): 481~486
- [3] Bispink T. Performance Analysis of Feed- Drive Systems in Diamond Turning by Mchining Specified Test Samples. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 601~604
- [4] Byne G. New Approach to the Theoretical Analysis of Surface Generation Mechanisms in Machining. Annals of the CIRP, 1992, 41(1): 67~70
- [5] Sata T, Li M, Takata S *et al.* Analysis of Surface Roughness Generation in Turning Operation and its Applications. Annals of the CIRP, 1985, 34(1): 473~476
- [6] Cheung C F, Lee W B. A Theoretical and Experimental Investigation of Surface Roughness Formation in Ultra-precision Diamond Turning. Int. J. Mach. Tools and Manuf., 2000, 40(7): 979~1002
- [7] Takasu S, Masuda M, Nishiguchi T. Influence of Study Vibration with Small Amplitude Upon Surface Roughness in Diamond Machining. Annals of the CIRP, 1985, 34(1): 463~467

(编辑 卢湘帆)

作者简介:李荣彬,男,1951年生。香港理工大学制造工程系首席教授、系主任。主要研究方向为超精密加工、虚拟制造、分布生产系统和制造策略。出版专著 4 部,发表论文 150 余篇。张志辉,香港理工大学制造工程系博士。李建广,香港理工大学制造工程系副研究员。

中国机械工程学会推荐张曙、张武城为“全国优秀科技工作者”候选人。根据中国科协科协发组字 [2000]101 号《关于开展评选、表彰 2000 年“全国优秀科技工作者”工作的通知》要求,我会组织本会常务理事和各专业分会,按照“全国优秀科技工作者”的评选条件进行提名,并成立了以何光远理事长为组长的评审组。经过评审组认真评议,以无记名投票方式,确定张曙、张武城 2 位同志作为我会向中国科协推荐的“全国优秀科技工作者”候选人人选。

(工作总部)

ISSN 1004- 132X

CHINA MECHANICAL ENGINEERING

(Transactions of CMES)

Vol. 11, No. 8, Aug., 2000

Monthly( Serial No. 80)

Edited and Published by: CHINA MECHANICAL  
ENGINEERING Magazine Office

Add No. 14 Shipailing Wuchang Wuhan China

Distributor: China International Book Trading  
Corporation ( P. O. box 399, Beijing)

Code 4163- M O

## MAIN TOPICS, ABSTRACTS &amp; KEY WORDS

**Development of Ultra- Precision Machining Technology and Our Strategy**

LI Shengyi(National University of Defense Technology, Changsha, China) DAI Yifan p 841-844

**Abstract** This paper describes ultra- precision machining technology, its application background and its recent development. The trend of modularization and cheapenation is described in detail from the point of view of widespread application of this technology. Some new ideas about modular component, actuating system, measurement technology, and environment control are pointed out in order to promote the technology.

**Key words** ultra- precision machining machine tools ultra- precision numerical control error measurement

**Prediction of 3-D Surface Topography in Ultra- precision Machining**

W. B. Lee ( The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China) C. F. Chueng J. G. Li p 845-848

**Abstract** This paper describes a model for the simulation of 3-D surface topography in ultra- precision diamond turning. In the model, the kinematics of the diamond turning process is characterized by machining parameters, the tool geometry as well as the relative motion between the tool and the workpiece. The topography of the machined surface is generated by a linear mapping of the predicted surface roughness profiles on the surface elements of a cross lattice. Cutting experiments were carried out and good correlation is found between the simulated topography and the three- dimensional topography obtained from the optical interferometer. The model can also help to identify surface features like traces of tool motion and surface waviness.

**Key words** modelling simulation surface topography ultra- precision diamond turning

**Development of Ultra- precision Optical Aspheric Grinding System**

CHEN Mingjun( Harbin Institute of Technology, Harbin, China ) DONG Shen ZHANG Feihu p 849-851

**Abstract** For grinding an aspheric part with high precision and high quality, in the paper, firstly the influ-

ence factors on surface roughness and profiles accuracy of machined surfaces was analyzed theoretically. Afterwards, authors designed and built the ultra- precision aspheric grinding system. The workpiece spindle, traverse guide, longitudinal guide and spindle of the grinding wheel were of gaseous form. Rotating error of the workpiece spindle was in  $0.05\mu\text{m}$ , the highest speed of the grinder was of 80 000 r/min and the rotating error was in  $0.1\mu\text{m}$ , the resolution of linear displacement of the traverse and longitudinal guide was 4.9nm. Micro- adjustive error of the micro- adjustive mechanism was in  $0.1\mu\text{m}$ . At last, the grinding system was used in ultra- grinding aspheric part. Grinding result was shown that profiles error was in  $0.4\mu\text{m}$  and the surface roughness value was less than  $0.01\mu\text{m}$ .

**Key words** ultra- precision grinding optical aspheric surface center high micro- adjustive mechanism

**Robot Precision Machining System with Ultrasonic Polishing for Free- form Surfaces**

ZHAN Jianming( Jilin University, Changchun, China) ZHAO Ji ZHU Peixing p 852-854

**Abstract** This paper presents the rationality that the robot is used in free- form surface precision machining, introduces the structure and the operating principle of the robot elastic ultrasonic polishing system and establishes the control model for robot in free- form surface machining. Furthermore, the feasibility of this system is verified by the experiments.

**Key words** free- form surface robot ultrasonic machining elastic polishing

**The Research of Effects of Brittle Single Crystal Material's Anisotropy on the Diamond Turned Surface Quality**

ZHAO Qingliang( Harbin Institute of Technology, Harbin, China) DONG Shen ZHAO Yi p 855-860

**Abstract** Based on the anisotropy of granular structure, the reasonable criterion was given to understand the generation of the prior cleavage or slip for each cleavage system or slip system. The phenomenon that the roughness of the diamond turned single crystal material's surface distributes in scallops is explained, and a turning method is presented to eliminate the scallops distribution.