

文章编号 1004-924X(2013)01-0101-07

超精密车削表面微观形貌对光学特性的影响

黄昆涛, 房丰洲*, 官 虎

(天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:研究了超精密车削表面微观拓扑形貌与光散射特性之间的关系,用于评价车削加工表面的光学性能并优化加工过程。采用阈值分析和粗糙表面散射理论分析两种方法研究了仅有理想刀痕的表面所产生的重影现象。阈值分析是指先计算单段圆弧刀痕的散射特性,再根据周期性结构对光的调制性来求得被加工表面为镜面对刀尖圆弧半径和进给率(主轴每转的进给距离)选择的大约临界值要求。在入射光波长 500 nm 的情况下,当刀尖圆弧半径选择 500 μm 时,可以计算得出阈值进给率为 19 μm 。粗糙度散射理论分析则是通过电场积分公式——Stratton-Chu 公式进行更精确的计算。实验表明,对于超精密车削加工得到的表面,当从入射光的非镜面方向,尤其是一极大散射方向观察不到光强时,即可以认为加工出了镜面效果。

关键词:超精密车削, 散射特性, Stratton-Chu 积分, 微观形貌

中图分类号: TG51; TH162 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132101.0101

Effect of surface microscopic topology generated by ultra-precision turning on optical characteristics

HUANG Kun-tao, FANG Feng-zhou*, GONG Hu

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology & Instruments, College of Precision Instrument & Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: fzfang@gmail.com

Abstract: The relationship between the microscopic topology and the optical performance of Single Point Diamond Turning (SPDT) surfaces was discussed to optimize SPDT machining parameters and to evaluate the optical characteristics of diamond turned surfaces. For surface microscopic topology generated by an ideal tool, the phenomena of multiple image reflection was analyzed by both threshold analysis and surface scattering theory analysis. With the threshold analysis, the scattering of single arc tool mark was calculated firstly, and then the modulation characteristics of periodic tool mark structure to the light was used to calculate the approximate thresholds of tool nose radius and feedrate (feeding distance per spindle rotation). In the situation of wavelength of incident light at 500 nm, the threshold feedrate is calculated to be 19 μm when the tool nose radius is 500 μm . With the roughness scattering theory analysis, the calculation could be more precise by using electric integral——Stratton-

收稿日期: 2012-08-12; 修订日期: 2012-09-29.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 90923038); 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB706700)

Chu Integral. Obtained results show that for a fine machined surface, when the light can not be seen in observing the turned surface with non-mirror direction, especially 1-order maximum direction, the surface can be recognized as a mirror effect.

Key words: ultra-precision single point diamond turning; scattering characteristic; Stratton-Chu integral; microscopic topology

1 引言

超精密单点金刚石切削加工由于加工效率高,加工误差容易控制,已被广泛应用于加工光学曲面中^[1-3]。不过由于加工过程中加工参数选择、刀具磨损、机床振动、材料等原因,加工得到的表面微观形貌难以确定,因此,超精车表面评价是一项重要的工作。

目前,业界对超精车表面评价多以单一评价指标为主^[4],如 R_a (算术平均粗糙度)、 R_q (均方根粗糙度)、 R_z (表面微观不平度十点高度)和 R_t (表面峰谷值)等。但是常用的表面评价指标所提供的信息过少,难以反应表面的实际形貌。近年来对表面形貌的研究主要采用以下方法:PSD(功率谱密度)分析^[5-6]、小波分析^[7-8]和分形分析^[9]等,但这些分析方法很难与被加工表面的光学性能建立起联系。本文加工的材料是金属铝,反射率高且没有透射光成分,所以只需分析其反射性能。为了区分反射和散射,文中定义反射是严格沿着反射方向上光的传播现象,而散射则是与入射光在同样区域的各个方向光的传播现象,文中使用散射特性来表征材料表面的光学性能。粗糙面散射理论^[10]指出,表面的散射现象与表面微观形貌特性具有密切的联系,故作者以超精密车削加工中观察到的一些表面光学现象着手,分析了表面光学特性与超精密车削加工参数和表面微观形貌之间的关系,得到的结果可为实际制造过程中工作表面光学性能评价提供了参考并指导加工过程的优化。

2 重影现象问题

图 1 为超精密切削加工示意图,以下内容均以此为背景展开研究。

图 2 所示为工作表面在灯光下观察的效果。

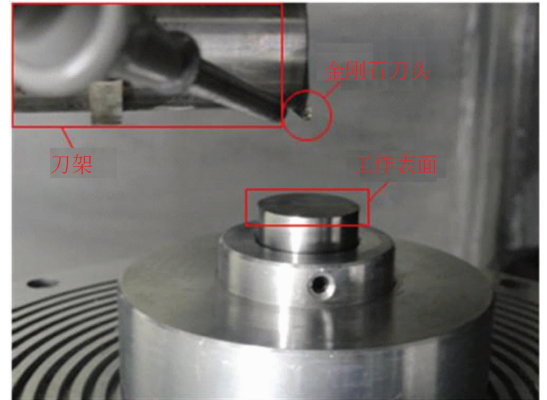


图 1 超精密单点金刚石车削示意图
Fig.1 Single point diamond turning

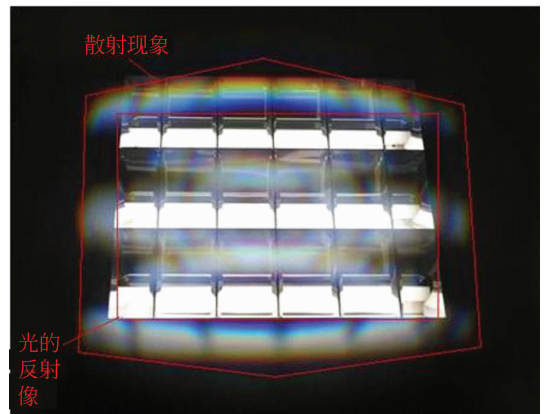


图 2 用表 1 切削参数切得的表面在灯光下观察的效果
Fig.2 Observation of surface machined by parameters in Table 1

灯光如图 3 所示,所用刀具如图 4 所示。实验发现反射的灯光像周围还有一个比较暗的灯光像,称为重影现象。该工件的加工参数如表 1 所示。在制造过程中,为了快速判断工件表面质量,通常在普通的灯光下观察,白色的灯光是可见光范围内的连续波长光谱。

表 1 图 2 中工件的切削参数

Tab. 1 Machining parameters

参数	数值
主轴转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1 500
进给率/ $\mu\text{m} \cdot r^{-1}$	29.6
背吃刀量/ μm	3
刀尖圆弧半径/ μm	500
刀具材料	单晶金刚石
工件材料	Al 6061

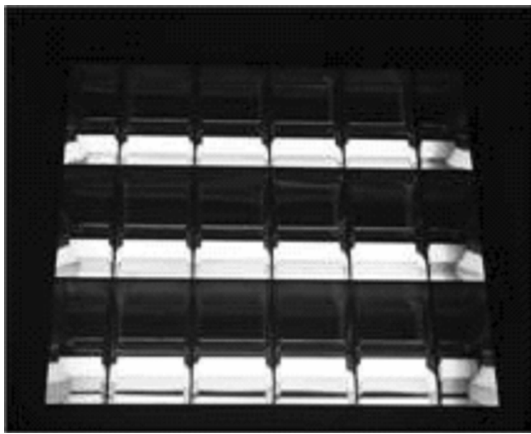


图 3 观察图 2 工件所用的灯光

Fig. 3 Light source to surface in Fig. 2

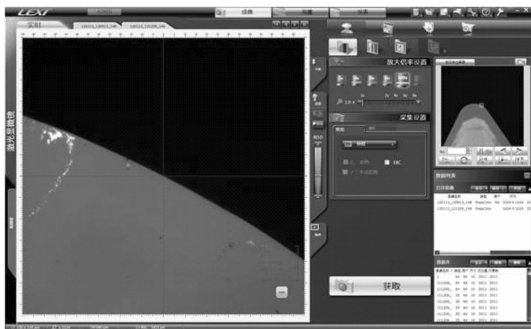


图 4 切削上面表面所用刀具

Fig. 4 Diamond tool set up

图 5 所示为白光干涉仪测得的表面微观结构,从图中可看出,表面微观形貌基本为周期的刀痕结构。因此认为进给率低是形成镜面效果的一个必要条件。由于表面除了刀痕之外,刀痕间的粗糙度很小,假定刀痕间粗糙度可忽略,则表面为理想车削加工表面。三维的表面模型如图 6(a),

由于三维表面为轴对称模型,为了进一步简化分析,选择轴对称面进行二维表面光学性能分析,选择轴对称面进行二维表面光学性能分析。如图 6(b),二维结构为凹圆弧的周期沿拓结构。 R 为刀尖圆弧半径; f 为进给率; h 为残留高度。

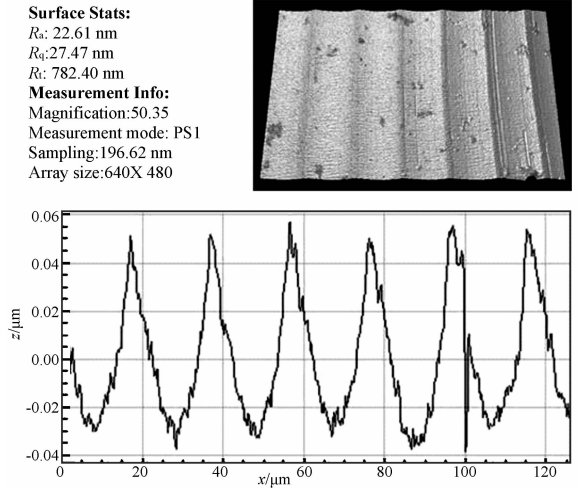


图 5 白光干涉仪测得的表面微观结构图

Fig. 5 Surface microscopic topology in Fig. 1 measured by Veeco 9300 interferometer

为了分析这种二维结构的散射特性,假设这种表面为理想导体,可以反射所有入射光,而实际的加工材料如铝、钢都具有很高的反射率,满足这种假设。另外,由于灯光是连续光谱,在灯光下观察工件有一定的色散现象。为了简化,针对单一波长的情形进行系统分析。

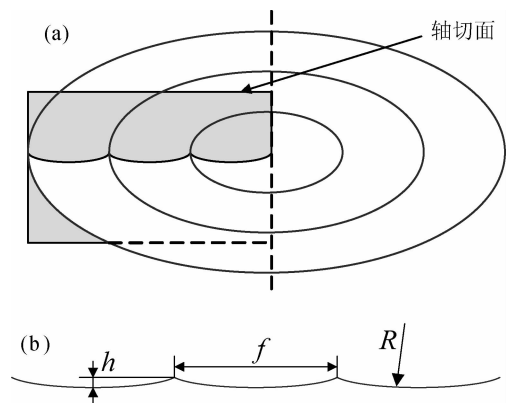


图 6 超精密车切削的理想三维(a)、二维(b)表面
Fig. 6 Ideal 3D(a) & 2D(b) surface models of single point diamond turning

3 阈值分析

3.1 一段圆弧的散射特性

由于表面周期性对反射光具有调制作用^[11],因此可以分析单段圆弧的反射特性,再结合调制公式得到圆弧周期沿拓结构的散射特性。图 7 所示为单段凹圆弧散射特性模型图。

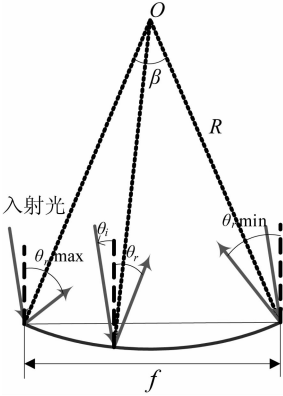


图 7 凹圆弧的散射特性分析建模(基于几何光学)

Fig. 7 Model of scattering of concave arc based on geometry optics

由图 7 可以得出,对于固定角度的入射光,单段圆弧的散射光线角度范围,即观察范围:

$$\theta_r \in [\theta_i - 2\arcsin \frac{f}{2R}, \theta_i + 2\arcsin \frac{f}{2R}], \quad (1)$$

归一化的反射(散射)分布函数为:

$$F(\theta_r) = \begin{cases} 1 & \begin{cases} \theta_r > \theta_i - 2\arcsin \frac{f}{2R} \\ \theta_r < \theta_i + 2\arcsin \frac{f}{2R} \end{cases} \text{ and} \\ 0 & \begin{cases} \theta_r < \theta_i - 2\arcsin \frac{f}{2R} \\ \theta_r > \theta_i + 2\arcsin \frac{f}{2R} \end{cases} \text{ or} \end{cases} \quad (2)$$

3.2 周期性结构的调制作用

周期性结构调制因子为:

$$I_p(\theta_r) = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(Nkf(\sin \theta_r - \sin \theta_i)/2)}{\sin(kf(\sin \theta_r - \sin \theta_i)/2)} \right|, \quad (3)$$

其中: N 为周期数, f 为圆弧的弦长即进给率, k = $\frac{2\pi}{\lambda}$, 为波数。

图 8 所示为调制因子的函数,由图可知,由于该调制因子离散极大值的调制作用,当表面为周

期性结构时,由于非主极大值的强度极低,可以忽略,因此只有在主极大方向才能看到入射光。

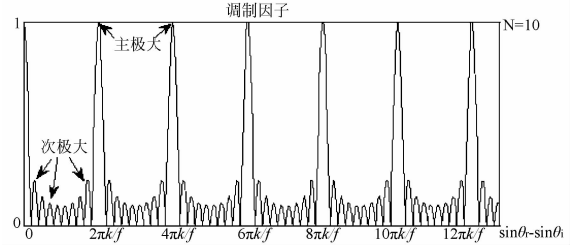


图 8 调制因子的函数

Fig. 8 Graph of modulation factor

3.3 进给率的阈值分析

由式(2)和(3)可知,观察函数受到调制因子的调制,观察范围是受调制的,只能在离散的某些观察角度上可以看到入射光的像。反射方向称为零主极大,向右依次为第一主极大、第二主极大……向左的依次为负一主极大、负二主极大……,当观察范围包含除了零极大以外的极大值方向时,说明除了反射方向外其他方向也可看到入射光像,亦即看到重影现象,反之则是出现镜面效果。由式(3),一极大观察方向满足:

$$|\sin \theta_r - \sin \theta_i| = \frac{2\pi}{kf}. \quad (4)$$

要实现镜面效果,进给率 f 要使满足式(4)的 θ_r 在式(1)范围以外,因此 f 满足:

$$f \leq \sqrt{\frac{\pi R}{k \left| \cos\left(\frac{\theta_i + \theta_r}{2}\right) \right|}}, \quad (5)$$

其中: θ_r 满足 $\frac{kR}{2\pi} \sin^2 \frac{\theta_r - \theta_i}{2} \cos \frac{\theta_r + \theta_i}{2} = 1$ 。

由式(5)可知,要得到镜面效果,需要较慢的进给率和较大的刀具刀尖圆弧半径,如果光的波长较大,对这两者的要求会降低。

4 Stratton-Chu 公式表面计算

上述分析可以较为方便地确定加工参数,但是由于忽略了衍射效应,虽然尺度足够大($\lambda/D < 0.1$, D 为物体的结构尺寸^[11]),仍存在误差。因此需要寻找更为精确的计算方法——粗糙面散射理论来计算表面散射^[10]。对于在超精密车削加工形成的表面,使用基于基尔霍夫近似,假设表面上每个点都具有其切平面或切线的积分

方程方法求解表面散射。则 3D 空间的积分方程为^[12,P298]:

$$\mathbf{E}_p(\hat{r}_s) = \frac{-jk e^{-jkR_0}}{4\pi R_0} \hat{r}_s \times \iint \left[\hat{n} \times \mathbf{E} - \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \hat{r}_s \times (\hat{n} \times \mathbf{H}) \right] e^{jkr \cdot \hat{r}_s} dS. \quad (6)$$

该公式称为 Stratton-Chu 积分公式, R_0 为原点到观察点的距离。分析远场区域 R_0 趋于无穷, 因此忽略因子 e^{-jkR_0}/R_0 。积分公式变成式(7)。在二维线空间, 积分公式变成式(8)。

$$\mathbf{E}_p(\hat{r}_s) = \frac{-jk \hat{r}_s}{4\pi} \times \iint \left[\hat{n} \times \mathbf{E} - \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \hat{r}_s \times (\hat{n} \times \mathbf{H}) \right] e^{jkr \cdot \hat{r}_s} dS, \quad (7)$$

$$\mathbf{E}_p(\hat{r}_s) = \frac{-\sqrt{\lambda} jk \hat{r}_s}{4\pi} \times \int \left[\hat{n} \times \mathbf{E} - \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \hat{r}_s \times (\hat{n} \times \mathbf{H}) \right] e^{jkr \cdot \hat{r}_s} dl. \quad (8)$$

使用式(8)计算散射特性时, 需要先确定 \mathbf{E} 和 \mathbf{H} , 如图 9, 用 $\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i, \mathbf{k}_i$ 描述入射光波, $\mathbf{E}_r, \mathbf{H}_r, \mathbf{k}_r$ 描述反射光波, 假设表面是理想导体, 所有入射光波均被反射, 没有透射分量和吸收分量, 可确定 $\mathbf{E}^{[13]}$:

$$\mathbf{E}_i = -\mathbf{E}_r, \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_r. \quad (10)$$

求出 \mathbf{E} 之后, 根据式(11)以及 $\mathbf{E}, \mathbf{H}, \mathbf{k}$ 之间形成右手坐标系的方向关系, 可以确定 \mathbf{H} :

$$|\mathbf{H}| = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} |\mathbf{E}|, \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_r. \quad (12)$$

计算实际散射场时, 先确定入射光的偏振方向, 即 \mathbf{E} 的方向, \mathbf{E} 振动垂直于纸面称为 s 偏振, 平行于纸面振动为 p 偏振。由于是自然光入射, 为了简化计算, 只取 s 偏振和 p 偏振的入射光进行散射电场的计算, 并将两个散射电场相加作为最终计算结果。

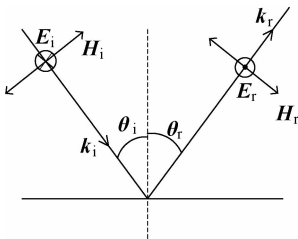


图 9 表面反射模型

Fig. 9 Reflection of perfect conductor surface

二维线表面轮廓的建模: 采用 10 段圆弧的周期结构作为积分表面。其中圆弧半径 R 为 $500 \mu\text{m}$, 波长 λ 为 $0.5 \mu\text{m}$, 入射角 θ_i 为 $\pi/4$ 。进给率 f 根据式(5)确定, 由于用上述参数算出的 f 应小于 $19 \mu\text{m}$, 取 f 为 $17 \sim 22 \mu\text{m}$, 采用 C++ 语言编程计算式(8), 得到的计算结果如图 10 所示。

由于衍射效应, 在第一主极大和负一主极大的

强度值随着 f 的变化比较平缓, 并没有产生突变。由于加工完成的表面一般先是人眼直接观察, 判断其合不合格, 当该表面应用于某场合时, 再采用检具进行检验。当第一主极大或负一主极大的强度低到检测不出时, 可以认为该表面为镜面。

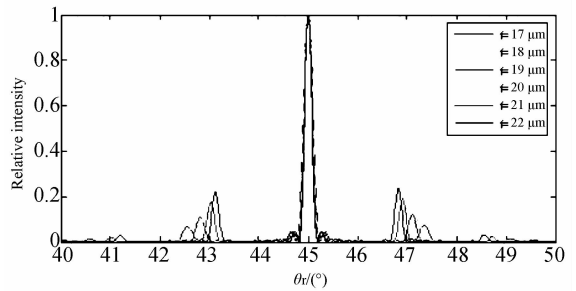


图 10 使用积分公式在不同 f 下算得的散射特性结果
Fig. 10 Diffraction at various f values

5 实验

通过金刚石刀具对铝表面工件的切削实验验证以上分析的结论:

切削参数如表 2 和表 3:

表 2 实验工件相同的切削参数

Tab. 2 Machining parameters

参数	数值
主轴转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	1 500
背吃刀量/ μm	3
刀尖圆弧半径/ μm	500
刀具材料	单晶金刚石
工件材料	Al 6061

表 3 实验工件不同的切削参数

Tab. 3 Machining parameters of different workpieces

 $(\mu\text{m} \cdot \text{r}^{-1})$

不同工件编号	进给参数
# 1	5.46
# 2	21.315
# 3	29.61

Surface Stats:

 R_a : 3.50 nm R_q : 5.22 nm R_z : 260.83 nm

Measurement Info:

Magnification: 50.35

Measurement mode: PSI

Sampling: 196.62 nm

Array size: 640X 480

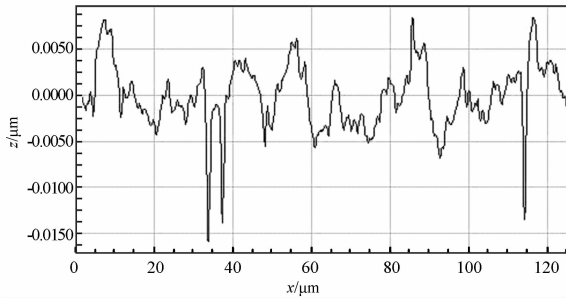
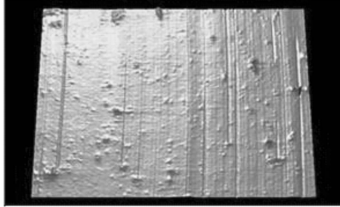


图 11 工件 # 1 的表面微观结构图

Fig. 11 Surface microscopic topology of workpiece 1

Surface Stats:

 R_a : 9.73 nm R_q : 11.49 nm R_z : 644.89 nm

Measurement Info:

Magnification: 50.35

Measurement mode: PSI

Sampling: 196.62 nm

Array size: 640X 480

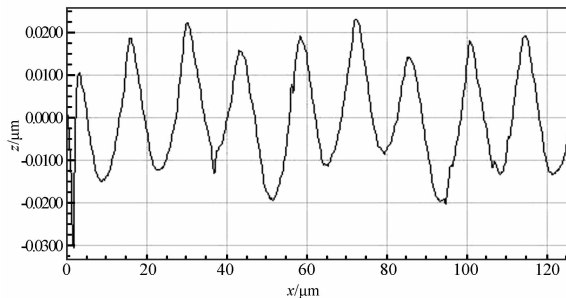
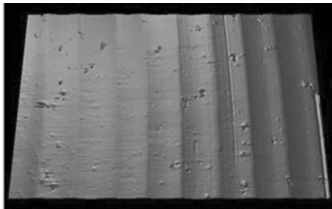


图 12 工件 # 2 的表面微观结构图

Fig. 12 Surface microscopic topology of workpiece 2

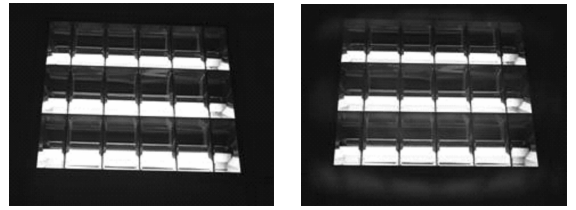


图 13 工件 # 1 和 # 2 在灯光下观察的效果图

Fig. 13 Observation of workpieces 1 and 2 in lighting

其中, # 3 工件即为第 2 节阐述重影现象时所使用的工件。# 1 和 # 2 工件的微观形貌图和灯光观察图如图 11~13 所示。

对比 3 个工件的微观形貌图可发现, 随着进给增大, 刀痕间距增大, 粗糙度也增大, 而进给足够小时, 刀痕并不明显, 如工件 # 1。

对于灯光下的观察效果, 工件 1 基本将光源完全反射而没有散射光; 工件 2 可以看到微弱的重影现象, 工件 3 的重影现象很明显, 这两个重影是灯光散射像的一极大像, 这和理论计算结果一致。更仔细的观察可看到, 工件 3 重影的像离反射像更近, 因为进给更快, 圆弧段更长, 这也验证了工件进给率越高, 一极大离反射像越近(观察到的是位置的, 而计算结果是角度上的, 这两者是一致的)的结论。

6 结 论

对超精密车削加工表面微观拓扑形貌与散射特性之间的关系进行了研究。对于以理想刀痕为主的表面产生的重影现象, 采用几何光学和调制原理结合的分析方法确定了加工表面质量与进给率和刀具的刀尖圆弧半径相关, 采用基于物理光学的 Stratton-Chu 积分公式计算得出镜面加工的条件: 当第一主极大的强度低到人眼或者仪器无法分辨时, 则可认为是镜面。本研究可为超精密车削加工的表面光学性能评价提供有价值的参考, 并可用于指导实际加工过程的优化。

参考文献:

- [1] FANG F ZH, ZHANG X D, HU X T. Cylindrical coordinate machining of optical freeform surfaces [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7323-7329.
- [2] GONG H, FANG F ZH, HU X T. Accurate spiral

tool path generation of ultraprecision three-axis turning for non-zero rake angle using symbolic computation[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 58, 841-847.

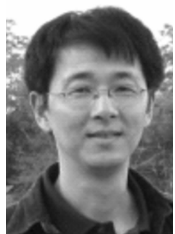
- [3] 赵清亮, 郭兵, 杨辉, 等. 金刚石飞切加工微结构

- 表面的工艺参数优化[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(10), 2512-2519.
- ZHAO Q L, GUO B, YANG H, *et al.*. Technological parameter optimization of micro-structured surfaces by diamond fly-cutting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10), 2512-2519. (in Chinese)
- [4] Surface texture (surface roughness, waviness, and lay), An American National Standard [S]. ASME B46.1-1 UN5, 1995.
- [5] LIN S C, CHANG M F. A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacturing*, 1998, 38: 763-782.
- [6] CHEUNG C F, LEE W B. A multi-spectrum analysis of surface roughness formation in ultra-precision machining [J]. *Precision Engineering*, 2000, 24: 77-87.
- [7] 张浩, 袁怡宝, 张峰. 巴特沃思小波在表面形貌信号分离中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7), 1661-1667.
- ZHANG H, YUAN Y B, ZHANG F. Application of Butterworth wavelet to surface topographic signal separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7), 1661-1667. (in Chinese)
- [8] 崔长彩, 张耕培, 张彬, 等. 小波滤波及奇异性分析在表面形貌评定中的应用[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(9), 2255-2261.
- CUI CH C, ZHANG G P, ZHANG B, *et al.*. Application of wavelet filtering and singularity analysis evaluation of surface roughness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(9), 2255-2261. (in Chinese)
- [9] STACHOWIAK G W, PODSIADLO P. Classification of tribological surfaces [J]. *Tribology International*, 2004, 37: 211-221
- [10] 郭立新, 王蕊, 吴振森. 随机粗糙面散射的基本理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- GUO L X, WANG R, WU ZH S. *Basic Theory and Method of Random Rough Surface Scattering* [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese)
- [11] 郝道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- YU D Y, TAN H Y. *Optics Engineering* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006. (in Chinese)
- [12] [美]F. T. 乌拉比, R. K. 穆尔, 冯建超 著, 黄培康, 汪一飞 译. 微波遥感 第二卷 雷达遥感和面目标的散射、辐射理论[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- ULABY F, MOORE R, FUNG A. *Microwave remote sensing active and passive Volume 2: radar remote sensing and surface scattering and emission theory* [M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
- [13] 郭硕鸿. 电动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
- GUO SH H. *Electrodynamics* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1997. (in Chinese)

作者简介:



黄昆涛(1987—),男,广东汕头人,博士研究生,主要从事超精密光学自由曲面加工及表面评价方面的研究。E-mail: yellowkunt@tju.edu.cn



宫虎(1974—),男,安徽淮南人,副研究员,2005年于大连理工大学获博士学位,主要从事精密制造、计算制造和超声加工方面的研究工作。E-mail: gonghu_2005@yahoo.com

导师简介:



房丰洲(1963—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,1994年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事精密加工、光学自由曲面加工、微纳加工与检测的研究工作。E-mail: fzfang@gmail.com