

微圆弧金刚石刀具车削锗单晶衍射元件

李军琪¹, 张云龙¹, 苏 军¹, 汪志斌¹, 郭小岗¹, 宗文俊², 张 磊²

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 哈尔滨工业大学 精密工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150006)

摘 要: 锗单晶衍射光学元件具有特有的色散和温度特性, 在红外光学领域, 具有广阔的应用前景。衍射元件必须同时满足光学镜面及相位转变点的要求, 采用微圆弧金刚石单点车削是解决这一途径的主要方法之一, 但采用微圆弧刀具加工时, 要求同时满足粗糙度和相位突变点是加工衍射元件的难点, 因此, 研究微圆弧金刚石刀具车削锗单晶衍射元件具有重大意义。基于 DEFORM 3D 切削仿真软件, 对金刚石刀具车削锗单晶材料进行了仿真分析, 分析了切削参数、刀具参数对锗单晶材料粗糙度的影响, 并依据仿真试验结果优选切削参数以及刀具参数进行试验, R0.1mm 微圆弧刀具车削单晶材料粗糙度达到 4 nm。

关键词: 单点金刚石车削; 切削仿真; 衍射光学元件; 表面粗糙度

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3053-06

Turning of DOE Ge single crystal with micro-circle diamond tool

Li Junqi¹, Zhang Yunlong¹, Su Jun¹, Wang Zhibin¹, Guo Xiaogang¹, Zong Wenjun², Zhang Lei²

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China;

2. Center for Precision Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China)

Abstract: Single crystal germanium material diffractive optical element (DOE), which possesses unique negative chromatic dispersion and thermal expansion coefficient, has been widely used in the IR optical field. DOE requires optical surface and transition of phase profile well. Micro-circle single point diamond turning is one of the ways to solve it. Actually it's difficult to have the proper cutting tool parameters to fit the surface roughness and the transition of phase profile. So there is great sense to study the micro-circle single point diamond turning of DOE. This paper studied the roughness of single crystal Germanium materials affections on the turning parameters and the tool parameters by using the DEFORM 3D software. Then the test was done according to the optimization results of the simulation. The results show that the surface roughness is 4 nm when the micro-circle radius of single point diamond turning is 0.1 mm.

Key words: single point diamond turning (SPDT); cutting simulation; diffractive optical elements (DOE); surface roughness

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-28

基金项目: 国防基础科研计划 (A0920110019)

作者简介: 李军琪 (1971-), 男, 高级工程师, 主要从事金刚石工艺及加工研究工作。Email: lijunqi90@163.com

0 引言

高纯锗单晶具有高的折射系数, 具有优良的红外特性, 主要用于色差校正和无热化元件, 在红外光学、半导体等方面有着广泛的用途。目前锗单晶、硅、硒化锌及硫化锌等材料制造的红外光学元件大多采用单点金刚石车削加工而成^[1-2]。衍射光学元件具有独特的色散特性和环境温度特性, 给光学设计带来了更多的设计自由度和宽广的材料可选性, 从而实现特殊的光学功能。在锗材料衍射元件加工时, 采用微圆弧半径金刚石刀具可有效降低刀具半径造成拦光效应^[3-6], 能有效提高衍射光学元件的衍射效率和对比度。但是实际加工过程中, 由于微圆弧半径金刚石刀具易磨损, 同时根据粗糙度理论, 刀具圆弧半径越小粗糙度反而增大, 衍射表面粗糙度增大, 会增大散射, 降低有效透过率, 这对采用圆弧金刚石刀具加工锗单晶材料衍射光学元件构成巨大障碍。因此, 研究微圆弧加工锗单晶衍射光学元件具有重大意义。

由于加工影响衍射光学元件性能的因素很多, 在多参数影响条件下通过传统的试验方法以获得优化工艺参数试验量大, 成本增加, 因此, 文中采用切削仿真与试验相结合的方法对微圆弧金刚石刀具车削锗单晶衍射元件加工工艺进行研究。采用 DEFORM 3D 软件仿真^[7], 计算分析金刚石刀具参数、车削工艺参数变化等对锗材料工件表面粗糙度的影响; 从而优选微圆弧金刚石刀具车削锗材料的刀具与切削参数, 进行车削试验。

1 表面粗糙度仿真试验

1.1 材料属性及模型建立

利用纳米压痕仪 Nano-Indenter XP 进行了锗单晶材料的金刚石 Berkovich 压头纳米压痕实验。

纳米压痕仪的载荷—位移曲线中的加载曲线部分的拟合方法主要有 Meyer 指数模型、Kick 模型、Bernhardt 公式等^[8]。而针对 Berkovich 压头的加载曲线的拟合一般采用 Kick's law 来描述, 对于卸载曲线部分近似描述, 常采用 Oliver-Pharr^[8-9]提出的幂函数规律进行拟合, 由图 1 可以得到材料加载曲线和卸载曲线的拟合公式。

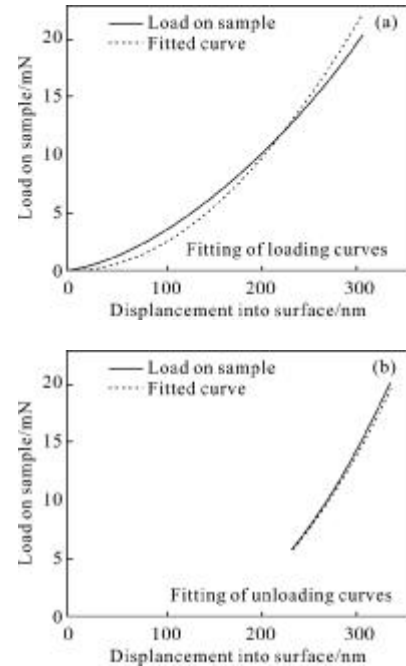


图 1 加载曲线与卸载曲线的拟合

Fig.1 Fitting of loading and unloading curves

加载曲线:

$$P = 2.4029 \times 10^{-4} h^2 \quad (1)$$

卸载曲线:

$$P_u = 0.00132(h - 118.51862)^{1.8381} \quad (2)$$

式中: h 为压痕深度; P 为加载载荷; P_u 为卸载载荷。采用量纲分析法^[8,10]可将载荷—位移曲线转换为应力—应变曲线。该试验采用幂强化模型来近似表示, 通过以上的实验数据以及拟合的结果即可计算得到材料的应力—应变关系式:

$$\sigma = \begin{cases} 160.402 \varepsilon & (\sigma \leq 247.908 \text{ MPa}) \\ 23.5653 \varepsilon^{0.71867826} & (\sigma \geq 247.908 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (3)$$

采用数据拟合^[11-12]获得材料的弹性模量 E 为 160.402 GPa、微硬度 H 为 11.316 GPa。

锗单晶三维仿真切削加工模型主要包括刀具与工件模型, 如图 2 所示, 假定刀具为导热刚体, 刀具具体参数从 DEFORM 材料库中导入。由于仿真切削的尺度较小, 切削宽度仅为十几微米, 因此, 在仿真建模时仅选取刀具参数与切削的部分圆弧进行刀具的建模并进行仿真, 这样可以使得刀具参数与切削仿真时的计算量降低。

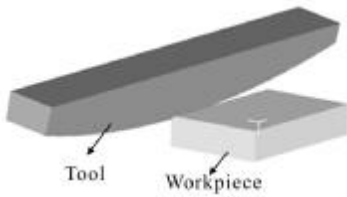


图 2 锗单晶三维切削模型

Fig.2 3D cutting model of Ge single crystal

1.2 切削仿真结果分析

文中在仿真分析过程中采用的切削加工参数为: $V=2\text{ m/s}$, $f=15\text{ }\mu\text{m/r}$, $a_p=3\text{ }\mu\text{m}$ 。如文中未改动提示则认为加工参数恒定,改变金刚石刀具前角、后角、切削刃钝圆半径、刀尖圆弧大小及进给量进行仿真,并对仿真结果进行分析,得出刀具参数和加工工艺参数对锗单晶加工的影响,从而对金刚石刀具及车削参数进行优选。

加工后的表面实际上是对刀具形状的不断复印而形成的^[13-14],因此完整的刀具形状以及合理的刀具参数对于加工后的表面质量极为重要。仿真加工后需要进行表面加工质量的对比分析,此处考察切削仿真后的表面质量时采用 R_q ,即轮廓的均方根偏差(RMS)的评价方式进行描述, R_q 的近似表达式如公式(4)所示:

$$R_q = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i^2 \right]^{1/2} \quad (4)$$

式中: i 为取样长度; N 为取样长度内的采样点数。通过采集仿真后工件表面的节点坐标,按照公式(4)即可求出不同刀具参数下加工表面的粗糙度值并进行对比。

1.2.1 刀具前角对切削表面粗糙度的影响

锗单晶属于各向异性的脆性材料,在切削加工过程中为了得到较好的加工质量,应采用具有大的负前角的天然金刚石刀具。实际加工证实:大的负前角刀具切削时能有效抑制脆性材料的加工破损并且利于实现材料的塑性域切削,容易得到较好的加工质量^[3]。因此,前角在仿真过程中仅在负角范围内变化。

仿真过程中采用的部分固定的刀具参数为:后角为 10° ,刀尖圆弧半径为 1 mm ,刀刃绝对锋利,并且不存在刃口微缺陷。

锗单晶加工后表面粗糙度随前角的变化如图 3(a)所示。从图中可以看出:随着刀具前角的不断减小,工件的表面质量变好,并且在前角为 -20° 左右时有最小表面粗糙度值,当刀具前角继续减小时,工件表面粗糙度值有所增大,但增大的幅度较小。分析认为随着刀具前角的不断减小,切屑与刀具之间的接触面积与剪切区面积不断的增大,主切削力增大同时造成法向切削力增大(见图 3(b)),但是在刀具前角 -20° 之前主切削力一直占据主导,材料表面处于滑移破坏形式,随着主切削力和法向力的作用工件的表面粗糙度值下降。但是随着切削前角的进一步减小法向切削力开始占据主导(-20° 后法向切削力明显增加),而法向切削力过大时对锗的挤压效果越明显容易导致锗的解理断裂,造成表面质量下降粗糙度上升^[15]。

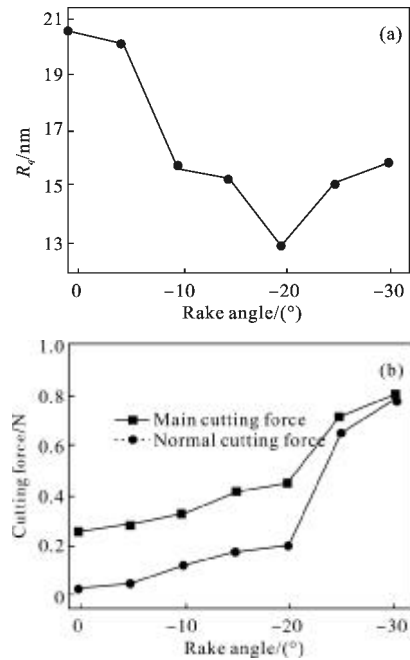


图 3 粗糙度、切削力随前角的变化

Fig.3 Surface roughness and cutting force vs rake angle

1.2.2 刀具后角对切削表面粗糙度的影响

加工过程中刀具的后刀面与工件已加工表面直接接触,因此后角对于已加工表面质量有着重要的影响。当刀具后角过小时,直接导致后刀面与已加工表面之间的接触面积增大,从而引起加工过程中的摩擦增大,导致大量摩擦热的产生,并且还会加剧刀

具后刀面的磨损。前角一定时,过大的后角则会导致刀具楔角的减小,不利于散热。仿真过程中采用的部分固定的刀具参数为:前角为 -10° ,刀尖圆弧半径为 1 mm ,刀刃绝对锋利,并且不存在刃口微缺陷。

仿真加工后锗单晶表面粗糙度随刀具后角的变化如图 4 所示。从图中可以看出,随着刀具后角的不断增大,加工表面粗糙度逐渐降低,当刀具后角在 10° 左右时,加工表面粗糙度最小。当刀具后角继续增大时,表面粗糙度值升高。因此为了获得较高的加工质量,减小后刀面摩擦带来的粗糙度下降,应当尽量提高后刀面的刃磨质量,在相同的后刀面刃磨质量的前提下,适当较大的后角可以提高工件的加工质量^[16]。

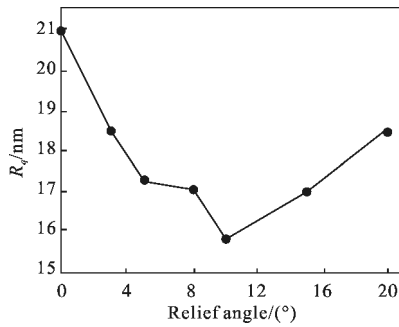


图 4 表面粗糙度随后角的变化
Fig.4 Surface roughness vs relief angle

1.2.3 刀尖圆弧半径对切削加工表面粗糙度的影响

超精密加工过程中,采用圆弧刃金刚石刀具加工会使得刀具形状复映在工件表面,从而加工后的工件表面存在残余加工高度,刀具圆弧半径对加工表面粗糙度影响很大,根据几何关系可以求得残留的加工高度,如图 5(a)所示。

$$h = \frac{f^2}{8R} \quad (5)$$

式中: R 为金刚石刀具的圆弧半径; f 为金刚石刀具的进给量。

因此,理论上采用大圆弧金刚石刀具与较小的进给量可以获得较好的加工表面质量。仿真过程中采用的部分固定的刀具参数为前角为 -10° 、后角为 10° ,刀刃绝对锋利,并且不存在刃口微缺陷。

仿真加工后锗单晶的表面粗糙度随刀尖圆弧半径的变化如图 5(b)所示。从中可以明显看出:随着刀

尖圆弧半径的不断变大,加工后的表面粗糙度整体上不断减小,这与理论分析相符。

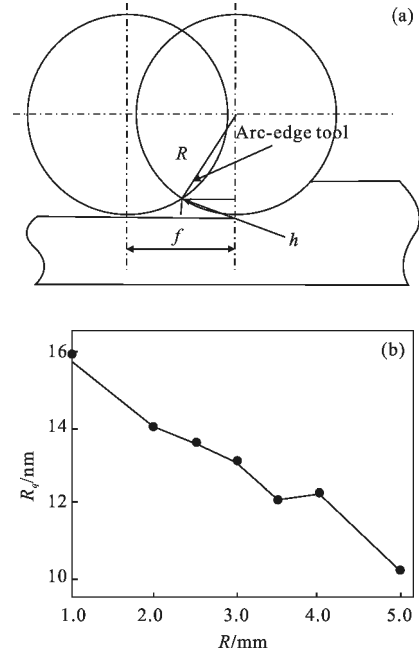


图 5 刀具圆弧半径对表面粗糙度的影响

Fig.5 Affection between tool arc radius and surface roughness

1.2.4 切削刃钝圆半径对切削加工表面粗糙度的影响

锗单晶切削加工过程中,切削刃钝圆半径对加工表面质量的影响主要表现在金刚石刀具切削刃的锋利度对加工表面粗糙度、组织位错以及加工表面残余应力的影响。在此只是就粗糙度进行了分析。

由于最小模型尺寸精度以及有限元网格划分的限制,此处仅进行切削刃钝圆半径为 0 nm (绝对锋利)、 90 nm 和 150 nm 时的切削模型仿真。仿真过程采用的刀具参数为前角 $\gamma=-10^\circ$,后角 $\alpha=10^\circ$,刀尖圆弧半径为 1 mm ,不存在刃口微缺陷。

仿真切削加工后的表面粗糙度随切削刃钝圆半径的变化如表 1 所示。从表 1 中可以看出,表面粗糙度随着切削刃钝圆半径的增大而有所增大,但增大

表 1 表面粗糙度随切削刃钝圆半径的变化

Tab.1 Surface roughness vs blunt radius

Cutting edge blunt radius/nm	Surface roughness RMS/nm
0(Absolute sharpness)	15.826 6
90	17.349 83
150	18.843 6

的幅度不大。通常钝圆半径越大对工件的挤压效果越明显,表面粗糙度升高,因此,在锗单晶切削加工过程中应尽量采用切削刃钝圆半径较小的金刚石刀具,即刀刃越锋利越好^[17]。

1.2.5 进给量对切削加工表面粗糙度的影响

刀具进给量对加工质量有重要的影响。根据传统切削加工的表面粗糙度理论,如公式(5)所示,随着刀具进给量的逐步减小,表面粗糙度亦会逐渐减小。为了验证刀具进给量对锗单晶加工表面质量的影响,进行了刀具进给量变化的切削仿真。仿真过程中采用的部分固定刀具参数为:前角 -25° ,后角 10° ,刀尖圆弧半径 0.1 mm ,切削刃绝对锋利,切削速度 $V=2\text{ m/s}$,切削深度 $a_p=3\text{ }\mu\text{m}$ 。锗单晶表面粗糙度 RMS 随刀具进给量减小的变化趋势如图 6 所示。和公式(5)的理论预测趋势一致,表面粗糙度仿真结果也是随着刀具进给量的逐渐减小而减小。

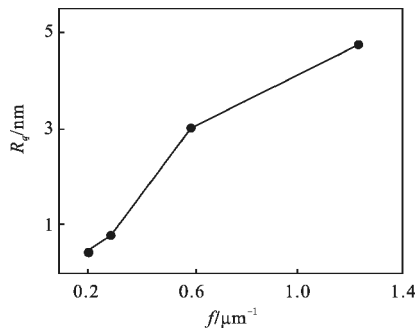


图 6 表面粗糙度随进给量的变化

Fig.6 Surface roughness vs feeding rate

2 实验验证

在上述切削软件分析基础之上,优选出相应的刀具参数及加工工艺参数,开展验证试验,对加工表面的粗糙度进行了测量,验证仿真试验理论性指导。

该实验所采用的加工设备为英国 Taylor Hobson 公司的 NANO250 金刚石车床。粗糙度检测设备为 ZYGO NEWVIEW 7 200 表面三维测量仪。为满足金刚石超精密加工的要求,试验前对工装夹具进行动平衡测试与调整,在工作状态下主轴转速分别在 $S=2\ 000$ 、 $3\ 000\text{ rpm}$ 状态下,实验环境温度为 $24\text{ }^\circ\text{C}$,实验材料为 $\Phi 80\text{ mm}$ 。

根据车削仿真试验及理论分析,最终车削用刀具前角为 -25° ,后角为 10° ,钝圆半径为 50 nm ,刀

具圆弧半径选择为 $R0.1\text{ mm}$ 、 $R1.3\text{ mm}$ 刀具进行车削试验。

通过表 2 发现粗糙度随着刀具圆弧半径的降低而总体升高,随着进给量的降低工件表面粗糙度也得到降低,这与仿真结果及理论分析均一致,说明仿真试验结果具有指导意义。

表 2 验证试验参数及粗糙度数据表
Tab.2 Cutting parameters and roughness of test processing

R/mm	T/ $^\circ\text{C}$	f/ $\mu\text{m}\cdot\text{r}^{-1}$	S/rpm	a_p/mm	$R_a/\mu\text{m}$
1.3	24	1.85	2 000	0.003	0.006
	24	0.83	3 000	0.003	0.002 9
0.1	24	0.33	3 000	0.003	0.007
	24	0.125	3 000	0.003	0.004

经检测,采用 $R0.1\text{ mm}$ 刀具车削锗材料达到粗糙度 $Ra\ 4\text{ nm}$ 的测试结果见图 7 所示。从图中可以看出:所加工出的粗糙度要求满足光学镜面的要求,采用微圆弧 $R0.1$ 车削能够达到衍射光学元件粗糙度设计要求。综合仿真理论分析和验证试验结果,说明采用微圆弧金刚石刀具能够加工出符合衍射条件的锗单晶光学元件。

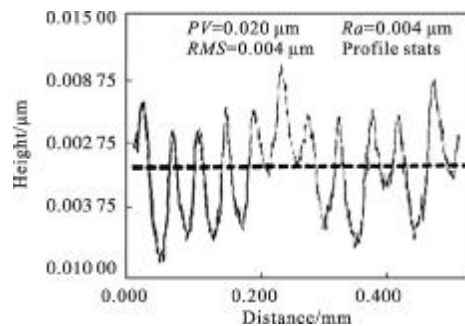


图 7 $R0.1\text{ mm}$ 刀具车削 Ge 材料粗糙度测试结果

Fig.7 Test surface roughness result of workpiece processed by $R0.1\text{mm}$ tool

3 结束语

衍射光学元件的特殊性要求必须采用微圆弧刀具加工,目前针对微圆弧车削研究较少见于报道,然而采用传统试验存在耗时长,成本大等问题,因此文中采用仿真与试验相结合的方法验证了微圆弧刀具加工衍射光学元件的可行性。文中采用纳米压痕仪

测量了锗单晶应力—应变曲线特征,运用 DEFORM 3D 有限元仿真软件,模拟了不同的刀具参数及加工工艺参数对金刚石车削锗单晶材料表面粗糙度的影响,分析以上过程的主要影响因素并结合理论分析仿真结果的合理性,最后通过验证试验验证了仿真结果,结果表明采用 R0.1 mm 刀具车削锗材料达到粗糙度 Ra4 nm,满足衍射光学元件的要求,说明仿真与试验相结合的方法能有效避免重复试验,具有良好的指导意义。

参考文献:

- [1] Nakasuji T, Kodera S. Diamond turning of brittle materials for optical components [J]. *Annals of the CIRP*, 1990: 39 (1): 89-92.
- [2] Li Junqi, Zhang Jinliang, Jiao Mingyin, et al. Technology of diamond lathe turning for IR diffractive optical elements [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(S): 140-144. (in Chinese).
李军琪, 张锦亮, 焦明印, 等. 红外衍射光学元件的金刚石车削加工技术研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(S): 140-144.
- [3] Riedl Max J. Diamond -turned diffractive optical elements for the infrared[C]//SPIE, 1995, 2540: 256-269.
- [4] Riedl M J. Pre-design of diamond turned refractive/diffractive elements for IR objectives[C]//Conf on Binary Optics, 1993: 369-384.
- [5] Buralli Dale A, Michael Morris G. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, 31(22): 4389-4396.
- [6] Sun Ting, Jiao Mingyin. Development of multi-layer diffractive optical element [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(S): 13-18. (in Chinese).
孙婷, 焦明印. 多层衍射光学元件的研究进展[J]. *应用光学*, 2008, 29(S): 13-18.
- [7] Zhang Zhenxiang, Zhang Jinming, Wang Laiqian. FEA of cutting force of stainless steel based on DEFORM-3D [J]. *Light Industry Machinery*, 2001, 29 (4): 40-42. (in Chinese)
章振翔, 张金明, 王来钱. 基于 DEFORM-3D 的不锈钢切削力有限元仿真[J]. *轻工机械*, 2001, 29(4): 40-42.
- [8] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. *Journal of Materials Research*, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [9] Pharr G M, Oliver W C. On the generality of the relationship among stiffness, contact area, and elastic modulus during indentation[J]. *J Mater Res*, 1992, 7(3): 613-617.
- [10] Jiang Limei, Zhou Yichun, Huang Yongli. Elastic-plastic properties of thin film on elastic-plastic substrates characterized by nanoindentation test [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2010, 20: 2345-2349.
- [11] Dao M. Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49: 3899-3918.
- [12] Tan Mengxi. Extracting hardness-displacement relations and elastic modulus using nano-indentation loading curves [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2005, 41(10): 1020-1024. (in Chinese)
谭孟曦. 利用纳米压痕加载曲线计算硬度—压入深度关系及弹性模量[J]. *金属学报*, 2005, 41(10): 1020-1024.
- [13] Zhao Xiaoming, Hu Dejin, Zhao Guowei. Simulation of workpiece surface texture in 5-axis control machining [J]. *Journal of Shanghai JiaoTong University*, 2003, 37 (5): 690-694. (in Chinese)
赵晓明, 胡德金, 赵国伟. 5 坐标数控加工中工件表面形貌的计算机仿真 [J]. *上海交通大学学报*, 2003, 37(5): 690-694.
- [14] Zhou X, Xi F. Modeling and predicting surface roughness of the grinding process [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2002, 42: 969-977.
- [15] Shi Guoquan. Diamond turning of single crystal germanium and silicon [J]. *Journal of Changchun Inst. Opt & Fine Mech*, 1996, 19(1): 6-10. (in Chinese).
史国权. 金刚石车削单晶锗和硅[J]. *长春光学精密机械学院学报*, 1996, 19(1): 6-10.
- [16] Zong Wenjun. Mechanical lapping techniques and cutting performance optimization of high-accuracy diamond cutting tools[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008: 112-113. (in Chinese)
宗文俊. 高精度金刚石刀具的机械刃磨技术及其切削性能优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008: 112-113.
- [17] Yuan Z J, Zhou M, Dong S. Effect of diamond tool sharpness on minimum cutting thickness and cutting surface integrity in ultraprecision machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 62: 327-330.