

CaF₂ 衍射光学元件的金刚石车削工艺优化

高翔¹, 李闯¹, 坎金艳², 薛常喜^{1*}

¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;

² 上海航天控制技术研究所, 上海 201109

摘要 为了提高单点金刚石车削 CaF₂ 衍射光学元件(DOE)的表面质量和衍射效率,首先基于 Beckman 标量散射理论和有效面积法,建立了表面粗糙度误差和表面轮廓误差对衍射效率影响的数学模型。然后,结合 CaF₂ 的车削特性和 DOE 的结构特点,优化了 CaF₂ DOE 的车削模型。同时,给出了不同工艺条件下半圆金刚石刀具的最佳车削位置和最优刀具半径,实现了对 CaF₂ DOE 表面粗糙度的控制。最后,在该优化模型的指导下,获得了表面粗糙度为 3.4 nm、阴影区域宽度为 28.7 μm 的高表面质量的 CaF₂ DOE,验证了所提优化车削模型的可靠性。所提车削模型对提高包含 CaF₂ DOE 折-衍混合光学系统的成像质量具有重要意义。

关键词 衍射; CaF₂ 衍射光学元件; 表面粗糙度误差; 表面轮廓误差; 衍射效率

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2205001

Optimization of Diamond Turning Process for CaF₂ Diffractive Optical Elements

Gao Xiang¹, Li Chuang¹, Kan Jinyan², Xue Changxi^{1*}

¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

² Shanghai Aerospace Control Technology Institute, Shanghai 201109, China

Abstract In order to improve the surface quality and diffraction efficiency of CaF₂ diffractive optical element (DOE) processed by single point diamond turning, a mathematical model is proposed to reveal the effect of surface roughness error and surface profile error on diffraction efficiency based on Beckman scalar scattering theory and effective area method first. Then, the turning model of CaF₂ DOE is optimized combining with the turning characteristics of CaF₂ and the structural characteristics of DOE. At the same time, the optimal turning positions and tool radii of half-round tool under different process conditions are given, which realizes the control of the surface roughness of CaF₂ DOE. Finally, the high surface quality CaF₂ DOE with a surface roughness of 3.4 nm and a shadow region width of 28.7 μm is obtained with the guidance of the optimized model, which verifies the reliability of the proposed optimized turning model. The proposed optimized turning model has great significance for improving the imaging quality of the refraction-diffraction hybrid optical system containing CaF₂ DOE.

Key words diffraction; CaF₂ diffractive optical element; surface roughness error; surface profile error; diffraction efficiency

OCIS codes 050.1970; 130.3060; 160.4670

收稿日期: 2021-04-22; 修回日期: 2021-05-14; 录用日期: 2021-06-03

基金项目: 吉林省重点科技研发项目(20180201030GX)

通信作者: *xcx272479@sina.com

1 引言

在成像光学系统中,衍射光学元件(DOE)具有特殊的色散特性、热特性和结构特点。因此,DOE在借助消色散和无热化设计提高成像系统质量的同时,能够减少光学系统的重量并减小光学系统的体积,满足了现代光学系统中轻量化和紧凑型的设计理念^[1-3],这增加了光学设计的自由度和材料的可选性。 CaF_2 作为DOE的基底材料,具有良好的光学性能、力学性能和化学稳定性,被广泛应用于紫外光刻、半导体激光器和探测离子辐射等领域中^[4-7]。此外, CaF_2 晶体具有特殊的折射指数与相对色散值,可以较好地发挥DOE在成像光学系统中的优势。然而, CaF_2 属于典型的软脆性难加工材料,其对超精密加工方式提出了严格的要求。同时,鉴于 CaF_2 DOE多应用于高精尖领域,其面形加工误差的要求通常为表面粗糙度低于5 nm、阴影区域宽度小于30 μm 。因此,选择合适的超精密加工方式并优化相应的工艺体系对加工出高表面质量的 CaF_2 DOE具有重要意义。

目前,单点金刚石车削技术(SPDT)被普遍应用于加工高精度的光学元件,是一种低成本、高效率获取亚微米级微结构精度和纳米级表面粗糙度的加工方式^[8-9]。Yan等^[10]研究了车削过程中进给量对 CaF_2 晶体表面质量的影响,发现过小或过大的进给量均会导致 CaF_2 元件表面出现大量的脆性裂痕,严重破坏了元件表面的质量。同时,通过对进给量的单因素实验分析,明确了 CaF_2 元件对进给量的可接受范围。姜文彬^[11]对 CaF_2 的单点金刚石车削过程进行了有限元仿真,确定了最佳的前刀角为 -20° 。杨亮亮等^[12]建立了用于测量衍射光学元件衍射效率的双光路装置。Bittner^[13]分析了DOE的相关误差并给出了车削衍射光学元件时产生的几种面形模型。Zhou等^[14]研究了利用SPDT加工谐衍射光学元件过程中,金刚石刀具对衍射效率的影响,并给出了最优刀具半径的预测模型。利用SPDT加工 CaF_2 DOE时产生的制造误差主要包括表面粗糙度误差和表面轮廓误差,分别导致了元件散射效应和阴影效应的产生^[15-16],这两种效应是 CaF_2 DOE衍射效率降低的主要原因。对于包含DOE的折-衍射混合光学系统来说,评估元件的衍射效率是至关重要的。然而,到目前为止,对利用SPDT制备高衍射效率的 CaF_2 DOE的具体工艺体系的研究鲜有报道。

本文基于Beckman标量散射理论和有效面积法^[17],建立了SPDT加工过程中产生的制造误差对 CaF_2 DOE衍射效率影响的数学模型,并分析了 CaF_2 在车削过程中体现的特性和DOE的结构特点,优化了半圆刀的车削模型。不仅保持了半圆刀在克服阴影效应上的优势,还使得半圆金刚石刀具在表面粗糙度方面达到了圆刀的车削效果,平衡了阴影效应和散射效应对衍射效率的影响,进而提升了 CaF_2 DOE的衍射效率。同时,分析了当进给量范围为2~6 $\mu\text{m}/\text{r}$ 和中心波长范围为2~4 μm 时最优刀具半径的变化情况,并给出了最优刀具半径和最佳刀具位置的选取原则,为利用SPDT加工高精度面形和高衍射效率的 CaF_2 DOE提供了理论指导和依据。

2 工艺分析

2.1 CaF_2 衍射光学元件

表1给出了 CaF_2 与Ge晶体的性能对比,包括光谱透射率、折射率、努氏硬度、热光系数和莫氏硬度。由于与Ge晶体相比, CaF_2 晶体在红外波段具有更高的透射率和更低的热光系数,故 CaF_2 DOE可以应用于多种复杂环境及领域中。然而, CaF_2 晶体属于典型的软脆性材料,对金刚石车削的工艺参数,特别是进给量的选取有着严格的要求,加工难度较大。因此,需要结合DOE的结构和 CaF_2 晶体的加工特性,对 CaF_2 DOE的单点金刚石车削模型进行优化,以降低制造误差对衍射效率的影响,进而提高包含 CaF_2 DOE的光学系统的成像质量。

表1 光学晶体性能参数

Parameter	Ge	CaF_2
Transmittance at 4 μm /%	47	94
Refractive index	4.03	1.42
Knoop hardness /($\text{kg} \cdot \text{mm}^{-2}$)	780	158
Thermo-optic coefficient /($10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)	277.0	-10.6
Mohs hardness	6	4

图1为DOE的结构示意图,其中 T_n 代表第 n 个环带的周期宽度, H 代表微结构高度, λ_0 代表中心波长, n_1 代表基底材料的折射率。

从图1中可以看出,DOE的相位函数 $h(r)$ 是将非球面的相位函数 $Z(r)$ 经过模除压缩处理后得到的,其表达式为

$$h(r) = \varphi(r) - \text{int} \left[\frac{\varphi(r)}{2\pi} \right] \cdot 2\pi, \quad (1)$$

式中: r 为垂轴坐标; $\text{int}(\cdot)$ 为取整函数; $\varphi(r)$ 为连

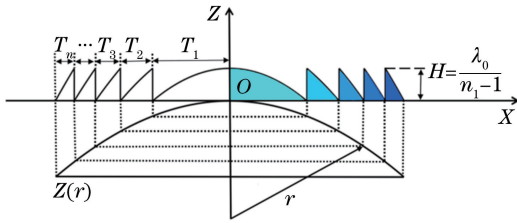


图 1 DOE 的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DOE

续相位函数,其表达式为

$$\varphi(r) = 2\pi \sum_{i=1}^n a_i r^{2i} = 2\pi(a_1 r^2 + a_2 r^4 + \dots + a_n r^{2n}), \quad (2)$$

式中: a_n 为像差系数。

2.2 制造误差对衍射效率的影响

SPDT 是利用现代化计算机操控高精度车床,并将天然金刚石作为刀具的超精密光学加工方式,可对光学晶体的微结构面形进行纳米级表面粗糙度加工。选用美国 ATM 公司生产的 Nanoform 700 Ultra 单点金刚石车床对 CaF_2 DOE 进行工艺研究。

利用 SPDT 加工 DOE 时产生的制造误差主要包括表面粗糙度误差和表面轮廓误差,如图 2 所示。这两种制造误差分别导致 CaF_2 DOE 产生了散射效应和阴影效应,造成了衍射效率的降低。本节基于 Beckman 标量散射理论和有效面积法,建立了制造误差对衍射效率影响的数学模型。

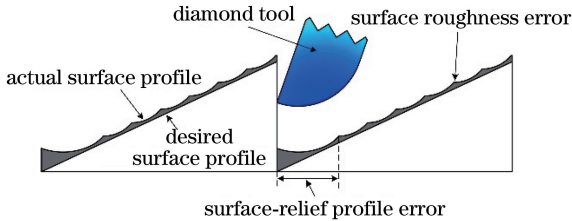


图 2 DOE 的制造误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of manufacturing error of DOE

在理想情况下,金刚石刀具会在闪耀面上留下周期性的残留刀痕,是表面粗糙度的主要来源。表面粗糙度会引起光的散射,使衍射光偏离设计级次的方向,降低衍射效率,如图 3 所示。其中, f 为进给量, α 为衍射环带的闪耀角, n_2 为空气的折射率, θ_1 和 θ_2 分别为入射角和透射角, P 为任意点。残留刀痕产生的表面粗糙度可以用一个周期内的均方根(RMS)粗糙度表示。基于 Beckman 标量散射理论,可以得到闪耀面表面粗糙度对衍射效率的影响,表达式为

$$\Gamma = \cos^2(\epsilon\mu) \cdot \exp[-(\epsilon\sigma)^2], \quad (3)$$

式中: Γ 为衍射效率的影响因子; ϵ 为散射因子,其表达式为 $\epsilon = \frac{2\pi(n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2)}{\lambda_0}$; μ 和 σ 为一个周期内刀痕函数的算术平均值和 RMS,二者数值大小取决于刀具类型和工艺参数。

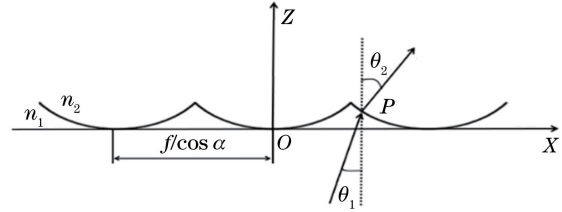


图 3 表面粗糙度引发的光的散射

Fig. 3 Light scattering caused by surface roughness

由于刀具的尖端具有一定的弧度,故在环带转变点不能完美切削进而产生了阴影区域。该阴影区域会造成衍射光的相位延迟,从而降低衍射效率,如图 4 所示。因此,通常选用半圆金刚石刀具来加工 DOE,这样可以有效减少阴影区域,并且几乎不产生侧面倾斜误差。

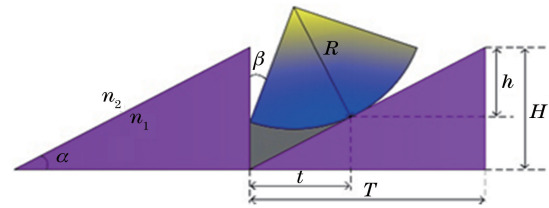


图 4 半圆刀产生的阴影区域

Fig. 4 Shadow area caused by half-round tool

在图 4 中, R 是圆弧半径, T 是环带周期宽度, h 是有效微结构高度, β 是半圆刀具与 DOE 侧壁的夹角。通常来说,在利用 SPDT 加工 DOE 时, $\beta = 0^\circ$ 。然而,本文为降低元件的表面粗糙度,依据 DOE 的结构特点和工艺参数,给出了最优刀具摆角,将在 2.3 节中重点讨论。根据图 4 中所示的几何关系可以得到阴影区域宽度 t 的表达式为

$$t = R \cdot (\sin \alpha + \sin \beta). \quad (4)$$

基于有效微结构高度和中心波长 λ_0 ,可得到有效相位延迟的表达式为

$$\phi = \frac{2\pi \cdot (T - t) \cdot (n_1 - 1) \cdot \tan \alpha}{\lambda_0}. \quad (5)$$

由有效面积法可知,衍射效率是有效位相延迟和有效周期宽度的函数,其表达式为

$$\eta_0 = \text{sinc}^2\left(m - \frac{\phi}{2\pi}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{t}{T}\right), \quad (6)$$

式中: m 为衍射级次。

整理(3)式与(6)式,可得到利用 SPDT 加工

DOE 时产生的制造误差对 DOE 衍射效率的影响

$$\eta_{\max} = \eta_0 \Gamma = \text{sinc}^2\left(m - \frac{\varphi}{2\pi}\right) \cdot \text{sinc}^2\left(\frac{t}{T}\right) \cdot \cos^2(\epsilon\mu) \cdot \exp[-(\epsilon\sigma)^2]. \quad (7)$$

至此,得到了 CaF₂ DOE 的制造误差与衍射效率间的关系,这为选取合理的 SPDT 工艺参数提供了理论基础。

2.3 最优刀具位置选取原则

从 2.2 节对 SPDT 加工 CaF₂ DOE 的工艺分析可以发现,制造高衍射效率的 CaF₂ DOE 的关键在于金刚石刀具模型的选取。较小圆弧半径的半圆刀具可以减少阴影效应,而较大圆弧半径的圆形刀具可以减少散射效应。因此,为平衡这两种制造误差

对衍射效率的影响,本节对半圆形金刚石刀具的车削位置进行了优化。在保证半圆形刀具在表面轮廓误差方面的优势的前提下,使得其在表面粗糙度方面达到了圆形刀具的车削效果。同时,还给出了半圆形金刚石刀具在不同工艺条件下的最佳车削位置的选取原则。

在理想情况下,DOE 闪耀面上的残留刀痕是周期性函数,故只需要计算一个周期内($f/\cos \alpha$)的残留刀痕方程,便可求得 CaF₂ DOE 闪耀面上的表面粗糙度。图 5 给出了原车削模型与优化车削模型的残留刀痕示意图。可以看出,优化模型最重要的特点是引入了半圆刀具的加工位置,使其在表面粗糙度误差方面达到了圆形刀具的车削加工效果。

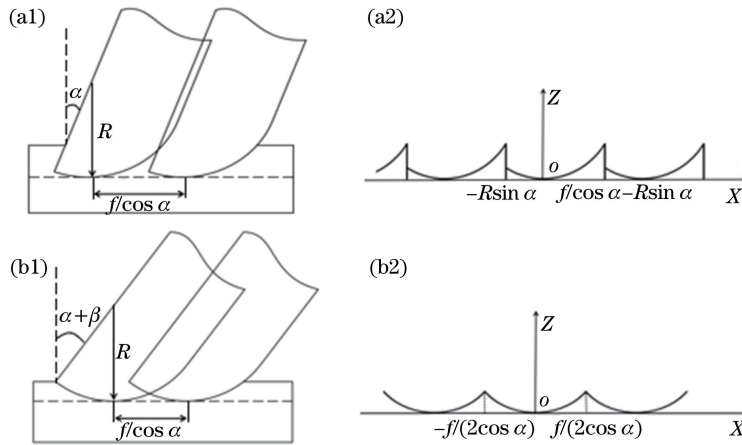


图 5 残留刀痕示意图。(a1)(a2)原车削模型;(b1)(b2)优化车削模型

Fig. 5 Schematic diagram of residual tool mark. (a1)(a2) Original turning model; (b1)(b2) optimized turning model

根据 SPDT 的加工特点和图 5 中的几何关系,可求得残留刀痕方程为

$$Z_1(x) = R - \sqrt{R^2 - x^2}, \quad a < x < b, \quad (8)$$

式中: x 是残留刀痕在一个周期内的横坐标。残留刀痕的算数平均值为

$$\mu = \frac{\cos \alpha}{f} \int_a^b (R - \sqrt{R^2 - x^2}) dx. \quad (9)$$

残留刀痕的 RMS 为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\cos \alpha}{f} \int_a^b [Z_1(x) - \mu]^2 dx}. \quad (10)$$

在(8)~(10)式中, a 为一个刀痕轮廓周期内的下积分限, b 为一个刀痕轮廓周期内的上积分限。在图 5(a2)中, $a = -R \sin \alpha$, $b = f/\cos \alpha - R \sin \alpha$ 。在图 5(b2)中, $a = -f/(2\cos \alpha)$, $b = f/(2\cos \alpha)$ 。可以看出,在相同 SPDT 加工工艺条件下,优化后的车削模型的表面粗糙度要小于原车削模型的表面粗糙度。同时,根据(9)、(10)式可以发现,这种现

象随着进给量的增大而愈明显。因此,该优化车削模型十分适用于加工 CaF₂ 等软脆性晶体。

通过上述分析可以发现,引入半圆刀摆角可以有效降低表面粗糙度误差。然而,根据(7)式可以发现,当 β 增加时,相应的阴影效应对衍射效率的影响也在增强。为获取最高衍射效率的 CaF₂ DOE,需要依据 CaF₂ DOE 的结构和工艺参数设置,确定出最优半圆刀具摆角 β_{\min} 。图 6 中分别介绍了两种半圆刀具的位置,均实现了圆刀车削的效果。其中, α_1 为第一个环带的闪耀角, a_p 为切削深度。

在图 6(a)中,当 $R - a_p \leq \sqrt{R^2 - f^2/(4 \cos^2 \alpha)}$ 时,角度 β 需要满足

$$R \cdot \sin(\alpha_1 + \beta) \geq \frac{f}{2 \cos \alpha}. \quad (11)$$

在图 6(b)中,当 $R - a_p \geq \sqrt{R^2 - f^2/(4 \cos^2 \alpha)}$ 时,角度 β 需要满足

$$R \cdot [1 - \cos(\alpha_1 + \beta)] \geq a_p. \quad (12)$$

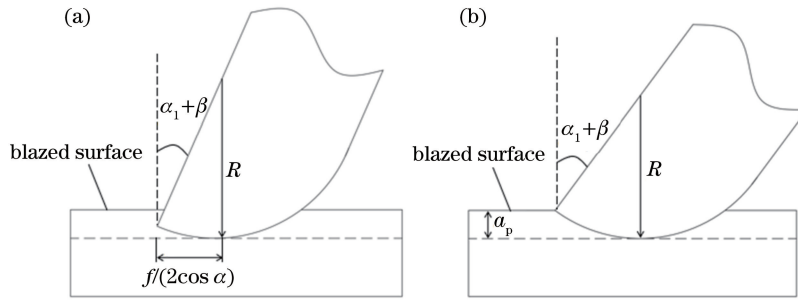


图 6 半圆刀最佳车削位置示意图。(a) 刀尖低于工件表面；(b) 刀尖高于工件表面

Fig. 6 Schematic diagram of optimal turning position of half-round tool. (a) Tool tip is lower than workpiece surface; (b) tool tip is higher than workpiece surface

可以发现,这两种情况都可以使半圆刀在表面粗糙度方面实现圆刀的车削效果。为平衡阴影效应对衍射效率的影响,在保证半圆刀在表面粗糙度方面可实现圆刀的车削效果的情况下,需要选择较小的 β 。因此,综合考虑刀具半径、进给量和切削深度后,可确定最优刀具摆角 β_{\min} 为

$$\beta_{\min} = \min \left[\arccos \left(\frac{R - a_p}{R} \right) - \alpha_1, \arcsin \left(\frac{f}{2R \cos \alpha_1} \right) - \alpha_1 \right] \quad (13)$$

3 仿真分析与车削实验

3.1 仿真结果对比

为验证针对 CaF_2 DOE 所建立的优化模型的有效性,

图 7 详细介绍了在相同工艺参数下,两种车削模型的刀具半径和衍射效率间的关系。图 7(a)、(b) 分别介绍了阴影效应和散射效应对衍射效率影响的情况。可以发现,随着刀具半径的增加,阴影效应对衍射效率的影响在增强,散射效应对衍射效率的影响在减弱。虽然优化模型中引入的 β 角使阴影效应在一定程度上比原模型中阴影效应对衍射效率的影响要大一些,但是在散射效应方面,很大程度上减小了衍射效率的损失,进而平衡了两种制造误差对衍射效率的影响。图 7(c) 描述了综合考虑两种制造误差下, CaF_2 DOE 衍射效率与刀具半径间的关系。经过分析对比后可以看出, CaF_2 DOE 的车削模型经过优化后,最大衍射效率得以提升,从 84.2% 提升至 94.5%,证明了优化车削模型的有效性和可靠性。

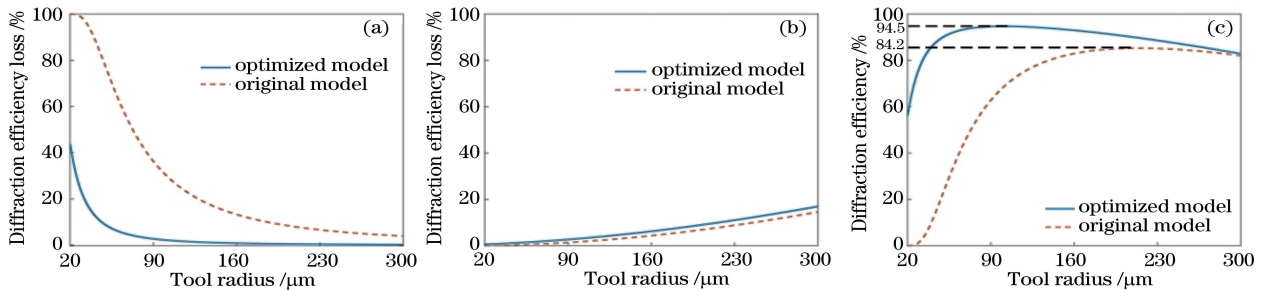


图 7 衍射效率与刀具半径间的关系。(a) 散射效应对衍射效率的影响；(b) 阴影效应对衍射效率的影响；(c) 制造误差对衍射效率的综合影响

Fig. 7 Relationship between diffraction efficiency and tool radius. (a) Influence of scattering effect on diffraction efficiency; (b) influence of shadow effect on diffraction efficiency; (c) comprehensive influence of manufacturing errors on diffraction efficiency

3.2 最优工艺参数

为进一步探求 CaF_2 DOE 在近红外和中红外波段下最优的工艺参数,由(5)式可知,当中心波长 λ_0 分别为 2, 3, 4 μm , 进给量变化范围在 2~6 μm 时,衍射效率与刀具半径的关系如图 8 所示。可以发

现, CaF_2 DOE 的最大衍射效率随着进给量的增大而减小。此外,曲线密集程度随着中心波长的增大而增加,出现该现象的原因是:中心工作波长越大,表面粗糙度引起的散射效应越弱,进给量的变化对衍射效率的影响越小。

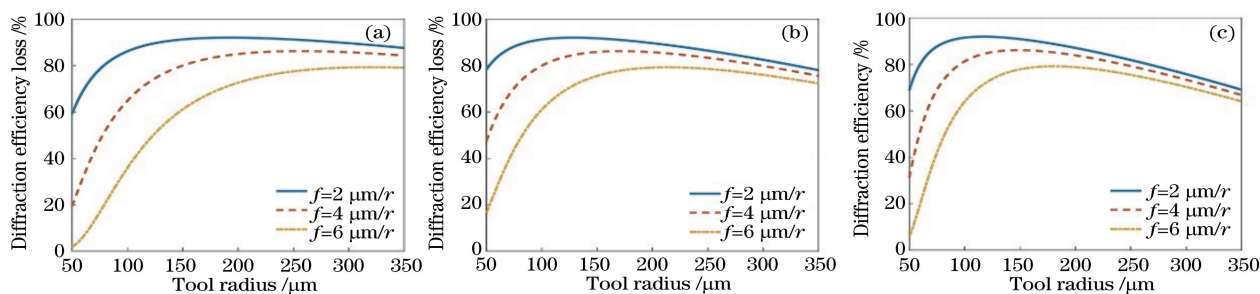


图 8 不同中心波长下,衍射效率与刀具半径间的关系。(a) $\lambda_0=2 \mu\text{m}$; (b) $\lambda_0=3 \mu\text{m}$; (c) $\lambda_0=4 \mu\text{m}$

Fig. 8 Relationship between diffraction efficiency and tool radius under different central wavelengths.

(a) $\lambda_0=2 \mu\text{m}$; (b) $\lambda_0=3 \mu\text{m}$; (c) $\lambda_0=4 \mu\text{m}$

CaF₂ DOE 在不同进给量 f 和不同中心波长 λ_0 下对应的最佳刀具半径 R_T 和最大衍射效率 η_{\max} , 如表 2 所示。此时,最优刀具半径与进给量和中心

波长在数值上存在着明显的线性关系,拟合结果如图 9 所示。

表 2 不同中心波长和进给量下的最优刀具半径和最大衍射效率

Table 2 Optimal tool radius and maximum diffraction efficiency under different central wavelengths and feed rates

$f / (\mu\text{m} \cdot \text{r}^{-1})$	$\lambda_0=2 \mu\text{m}$		$\lambda_0=3 \mu\text{m}$		$\lambda_0=4 \mu\text{m}$	
	$R_T / \mu\text{m}$	$\eta_{\max} / \%$	$R_T / \mu\text{m}$	$\eta_{\max} / \%$	$R_T / \mu\text{m}$	$\eta_{\max} / \%$
2	181	91.9	130	92.2	91	92.8
3	212	87.8	149	88.2	102	89.5
4	247	85.1	172	85.9	126	86.2
5	275	80.9	191	81.8	139	82.8
6	312	78.8	214	79.0	162	79.2

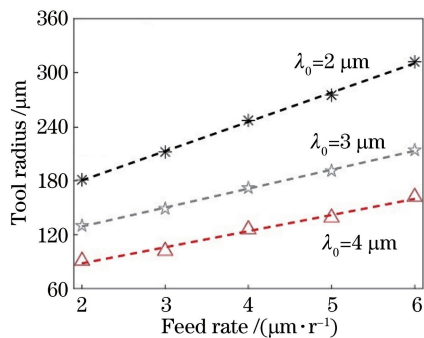


图 9 不同中心波长下,最优刀具半径与进给量的关系(点为实验数据,虚线为拟合曲线)

Fig. 9 Relationship between optimal tool radius and feed rate under different center wavelengths (point is experimental data, and dotted line is fitted curve)

图 9 中不同中心波长对应的曲线的斜率和截距各不相同,根据 MATLAB 给出的拟合系数,可以归纳出最优刀具半径与进给量和中心波长间的关系为

$$R_T = \frac{350}{5\lambda_0 + 1} \cdot f - 32\lambda_0 + 180, \quad (14)$$

式中: λ_0 的范围为 $2 \sim 4 \mu\text{m}$ 。结合(14)式,可以根据 DOE 要求的中心波长和金刚石精密车削过程中的进给量来确定出最优刀具半径。例如, $\lambda_{01} = 2 \mu\text{m}$ 、 $f_1 = 3 \mu\text{m}/\text{r}$ 、 $\lambda_{02} = 3 \mu\text{m}$ 、 $f_2 = 4 \mu\text{m}/\text{r}$ 和 $\lambda_{03} =$

$4 \mu\text{m}$ 、 $f_3 = 5 \mu\text{m}/\text{r}$ 对应的最优刀具半径分别为 $211 \mu\text{m}$ 、 $171 \mu\text{m}$ 和 $136 \mu\text{m}$ 。所得计算结果几乎与表 2 中的数据一致(误差在 2% 以内),表明(14)式具有很高的拟合精度,可以指导车削实验筛选出最优刀具半径。

3.3 CaF₂ DOE 车削实验

图 10 展示了 CaF₂ DOE 车削实验设备。选用口径为 24 mm 、中心厚度为 8 mm 的单晶 CaF₂, 利用弹性夹具固定元件,同时弹性夹具吸附在真空吸盘上。在美国 ATM 公司生产的 Nanoform 700 Ultra 单点金刚石车床车床上进行加工实验。工艺参数设定为切削深度 $a_p = 2 \mu\text{m}$,进给量 $f = 3 \mu\text{m}/\text{r}$,中心波长 $\lambda_0 = 4 \mu\text{m}$ 。利用(13)、(14)式可得到最优刀具位置和最优刀具半径,此时 $\beta_{\min} = 0.8^\circ$, $R_T = 100 \mu\text{m}$ 。

对 CaF₂ DOE 的表面质量检测进行检测时,分别利用白光干涉仪和台阶仪对 CaF₂ DOE 的制造误差进行检测。

最终,利用 SPDT 加工出高表面质量的 CaF₂ DOE 如图 11(a)所示。图 11(b)、(c)分别为表面轮廓误差和表面粗糙度的检测结果。可以看出,在优化模型指导下,获得了表面粗糙度 R_a 为

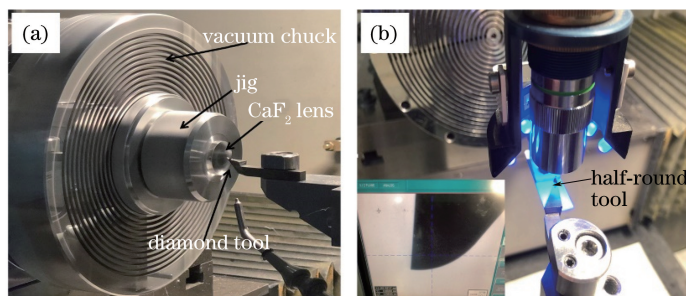


图 10 实验设备。(a)车削车床;(b)半圆刀具

Fig. 10 Experimental equipments. (a) Turning lathe; (b) half-round tool

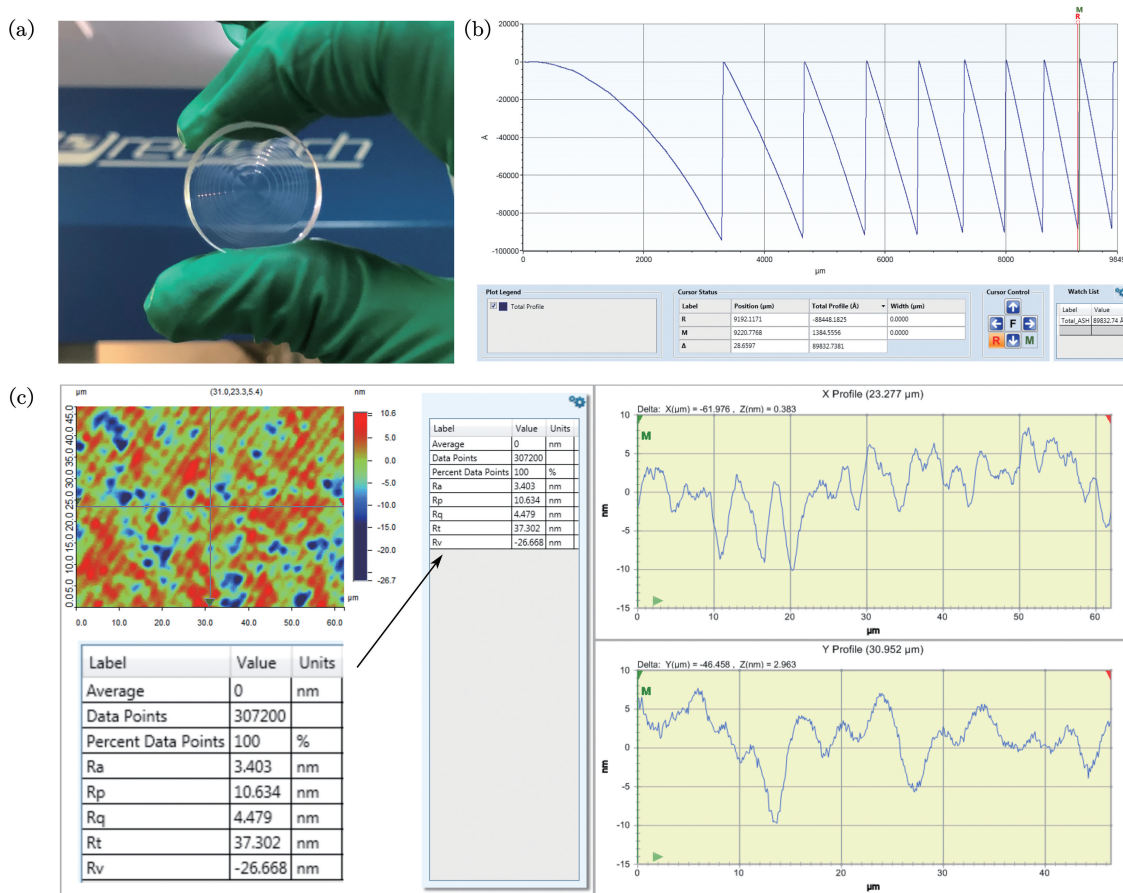


图 11 实验结果。(a) CaF₂ DOE 实物图;(b)表面轮廓误差检测结果;(c)表面粗糙度检测结果

Fig. 11 Experimental results. (a) Physical drawing of CaF₂ DOE ; (b) test result of surface profile error; (c) test result of surface roughness error

3.4 nm、阴影区域宽度 t 为 $28.7 \mu\text{m}$ 的高衍射效率的 CaF₂ DOE。从实际工艺角度进一步验证了针对 CaF₂ DOE 所建立的优化车削模型的可靠性和实用性。

4 结 论

结合 CaF₂ 的车削特性和 DOE 的结构特点,分析了表面粗糙度误差和表面轮廓误差对衍射效率的影响,优化了半圆刀的车削模型。同时,给出了在不

同工艺条件和设计参数下,半圆刀最佳车削位置的选取原则,使其在表面粗糙度误差方面达到了圆刀的效果。解决了半圆刀加工 CaF₂ 时散射效应严重的问题,平衡了阴影效应和散射效应对衍射效率的影响,提高了衍射效率。在近红外和中红外波段范围内,针对不同中心波长的 CaF₂ DOE 进行仿真分析。仿真结果表明,在相同工艺条件和设计参数下, CaF₂ DOE 在原车削模型下的最大衍射效率为 84.2%,而在优化车削模型的指导下, CaF₂ DOE 的

最大衍射效率为 94.5%，验证了所提出优化车削模型的有效性和可靠性。此外，研究发现最优刀具半径与进给量和中心波长间存在着明显的线性关系，并拟合得到了最优刀具半径的公式。最终，利用该优化模型指导完成了 CaF₂ DOE 的车削实验，获得了表面粗糙度为 3.4 nm、阴影区域宽度为 28.7 μm 的高精度面形质量的 CaF₂ DOE，说明该优化车削模型对金刚石车削加工出高衍射效率的 CaF₂ DOE 具有重要指导意义，拓宽了 CaF₂ DOE 在红外领域中的应用。

参 考 文 献

- [1] Gandhi V, Orava J, Tuovinen H, et al. Diffractive optical elements for optical identification[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(7): 1606-1611.
- [2] Mao W F, Zhang X, Qu H M, et al. Broad dual-band kinoform infrared double-layer diffractive optical system design [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1022002.
毛文峰, 张新, 曲贺盟, 等. 红外双色宽波段高衍射效率衍射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1022002.
- [3] Qu H M, Zhang X, Zhang J Z, et al. Design of compact athermalizing uncooled infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(5): 0522003.
曲贺盟, 张新, 张继真, 等. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(5): 0522003.
- [4] Zong H W, Zhao J S, Song X L, et al. Development of research on damage characteristics of calcium fluoride crystal under deep ultraviolet laser irradiation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190002.
宗慧雯, 赵江山, 宋兴亮, 等. 氟化钙晶体深紫外激光辐照损伤特性研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190002.
- [5] Ge W Q, Chai L, Yan J, et al. Laser diode-pumped continuous-wave mode-locked Yb, Na:CaF₂ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(11): 2803-2806.
葛文琦, 柴路, 闫杰, 等. 半导体激光器抽运的连续锁模铽钠共掺氟化钙激光器[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2803-2806.
- [6] Gao X D, Cui Q F, Zheng H Q, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with wide temperature range[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722001.
高旭东, 崔庆丰, 郑汉青, 等. 宽温度范围的深紫外光学系统无热化设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(17): 1722001.
- [7] Li K D, Xiao H Y, Wang L M. Computer simulation study of defect formation and migration energy in calcium fluoride [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2008, 266(12/13): 2698-2701.
- [8] Zong W J, Huang Y H, Zhang Y L, et al. Conservation law of surface roughness in single point diamond turning[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2014, 84: 58-63.
- [9] Li L, Yi A Y, Huang C N, et al. Fabrication of diffractive optics by use of slow tool servo diamond turning process [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45(11): 113401.
- [10] Yan J W, Tamaki J, Syoji K, et al. Single-point diamond turning of CaF₂ for nanometric surface[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 24(9/10): 640-646.
- [11] Jiang W B. Analysis on mechanical property of anisotropy of crystal CaF₂ and simulation of cutting process in the ductile mode [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
姜文彬. CaF₂ 晶体各向异性特性分析及切削仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [12] Yang L L, Cui Q F, Liu T, et al. Measurement of diffraction efficiency for diffractive optical elements [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0412007.
杨亮亮, 崔庆丰, 刘涛, 等. 衍射光学元件衍射效率的测量[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0412007.
- [13] Bittner R. Tolerancing of single point diamond turned diffractive optical elements and optical surfaces [J]. *Journal of the European Optical Society: Rapid Publications*, 2007, 2: 07028.
- [14] Zhou P, Xue C, Yang C, et al. Diffraction efficiency evaluation for diamond turning of harmonic diffractive optical elements [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(6): 1537-1544.
- [15] Lalanne P, Astilean S, Chavel P, et al. Design and fabrication of blazed binary diffractive elements with sampling periods smaller than the structural cutoff [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1999, 16(5): 1143-1156.
- [16] Harvey J E, Choi N, Schroeder S, et al. Total integrated scatter from surfaces with arbitrary roughness, correlation widths, and incident angles [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 013402.
- [17] Yang H F, Xue C X, Li C, et al. Optimal design of multilayer diffractive optical elements with effective area method [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(7): 1675-1682.