

基于衍射理论的大深径比微小锥孔特征测量方法*

黄 腾 廖 路 张勇斌

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所 绵阳 621900)

摘要:针对大深径比微小锥孔特征的测量需求,开展了关于锥孔零件衍射测量技术的研究。结合几何光学与物理光学中光波传递与衍射基本原理,探究了大深径比微小锥孔光斑成形机理,通过构建大深径比微小锥孔激光衍射数学模型,分析了光斑图像特征与微小锥孔特征间关系,建立了微小锥孔的锥度、直径的求解公式。研究过程中首先通过仿真计算的锥度及直径与仿真设定参数值的对比结果论证了建立数学模型的合理性,并利用搭建的实验平台开展激光透射微孔测试实验,利用拍摄获得的光斑图像提取光强分布曲线,并根据微小锥孔锥度及直径的求解公式计算获得了锥度值和直径值。实验结果表明,基于光斑衍射数学模型计算的光强曲线和实际光强曲线变化趋势基本一致,深径比为 66.67 的微小锥孔锥度及直径的测量误差分别为 1.35% 和 2.78%,测量结果具备较好的精度,验证了提出测量方法的可行性。

关键词:大深径比;微小锥孔;衍射

中图分类号: TH744.5 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4035

Method for measuring the characteristics of small cone-hole with large aspect ratio based on diffraction theory

Huang Teng Liao Lu Zhang Yongbin

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to measure the small cone-hole with a large aspect ratio, the diffraction measurement technology of cone-hole is studied. Based on the basic principles of light wave transmission and diffraction in geometric optics and physical optics, this paper explores the forming mechanism of light spot with small cone hole with large aspect ratio. By constructing the mathematical model of laser diffraction with small cone hole with aspect ratio, the relationship between the image features of spot and the characteristics of small cone hole is analyzed, and the formula for solving the taper and diameter of small cone hole is established. In the research process, the rationality of establishing the mathematical model was demonstrated by comparing the taper and diameter calculated with the parameters set by the model, and the experimental platform was built to carry out the laser transmission micro-hole test experiment. The light intensity distribution curve was extracted by using the spot image obtained by the shooting, and the taper and diameter values were calculated according to the solution formula of the micro-taper and diameter. The results show that the variation trend of the light intensity curve calculated based on the mathematical model of spot diffraction is basically the same as that of the actual light intensity curve. The measurement errors of the taper and diameter of the tiny cone hole with an aspect ratio of 66.67 are 1.35% and 2.78%, respectively. The measurement results have good accuracy, which verifies the feasibility of the measurement method proposed in the paper.

Keywords: large aspect ratio; small cone hole; diffraction

0 引言

随着超精密加工技术的飞速发展,大深径比微小深

孔的加工技术越来越成熟,而大深径比微小锥孔作为一种典型的深孔特征,对其也存在着测量需求,在航空航天、生物医疗和光电工程等领域中有着广泛应用^[1-3]。

微孔特征尺寸的测量属于内尺寸测量,相较于外尺

寸测量一直属于国际性难题。特别是孔径小于 1 mm, 深径比大于 10, 锥度小于 1°的大深径比微小锥孔的特征尺寸更为困难。目前, 微孔特征尺寸测量分为接触式测量以及非接触式测量, 接触式测量包括三坐标测量^[4-5]、振动扫描测量^[6-7]以及光纤测量^[8-10]等。三坐标测量法需要依靠接触式测头, 通过检测测头压阻、电感、电容、应变等的变化, 间接获取微孔坐标值进而计算出微孔的特征尺寸; 振动扫描测量也需借助探针, 通过探针接触待测件实现探测电路闭合, 依据输出电压信号与探针位置关系计算微孔孔径; 光纤测量法利用光纤微球触碰孔壁时, CCD 相机采集光斑位置, 利用光斑位置变化计算孔壁位置进而拟合获得微孔孔径值。接触式测量虽然具备可靠性高、精度高等优势, 但是由于测量过程中要求测头与被测件直接接触, 由此产生的测量力可能会导致测头及待测件变形, 增大测量误差; 同时受限于测头材料刚度, 测头的大小及长度有限, 无法对大深径比微孔进行测量。非接触式测量方法主要有光学测量法^[11-14]、工业 CT 法^[15]以及非接触式探头三坐标测量法^[16-18]等, 测量过程中不受测量力的影响, 不会对待测件产生影响, 可以实现无损检测。工业 CT 法需使用放射源, 由于放射源具有辐射风险, 对测试环境有特定要求, 使用成本较高; 使用非接触式探头的三坐标测量方法同样受到测头尺寸的限制, 无法测量孔径更小、深径比更大的微孔; 基于光学衍射的光学测量法目前虽然用于微孔直径测量, 比如杨萍等^[19]利用夫琅禾费衍射对拉丝模具孔径测量展开了研究。但是, 目前光学衍射法测量微孔孔径主要应用于深径比较小的微孔零件测量, 并且对于小锥度的微孔零件的锥度测量未进行深入研究。

光学衍射法属于非接触测量, 可以实现无损检测, 同时对测量设备要求不高。基于上述优点, 本文展开大深径比小锥度微孔光学衍射法测量研究, 通过建立大深径比小锥度微孔衍射模型, 分析了衍射光斑光强分布与微孔特征之间的关系, 搭建了衍射测量平台, 实验验证了光学衍射法测量微孔直径及锥度的可行性。

1 建模与仿真

1.1 原理分析及模型建立

依据 Huygens-Fresnel 原理, 将光波波前的每一点看成新的次波波源, 发出子波, 下一时刻的波前为所有子波的共同包络面, 光波传播方向就是包络面的法线方向, 空间中任一点的光强等于所有子波的光强叠加。光线通过微孔后衍射光在像屏上的光强分布, 实际上是光波在像屏所在波面相干叠加的结果。对于没有锥度的微孔, 平行光入射的情况, 可以将其等效为无厚度微孔, 利用数值积分的方法即可快速计算出像屏上光强分布^[20-21]; 但对

于如图 1 所示的锥孔, 平行光入射后光线被分为直射光线及反射光线两部分, 此时就不能通过简单的积分公式计算光强的分布, 因为光线经过锥孔孔壁反射后, 其传播方向呈锥形分布, 此时利用数值积分方法难以进行计算。

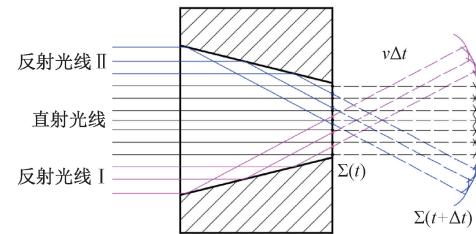


图 1 光线经锥孔传播波面分布

Fig. 1 Wave surface distribution of light propagating through a cone hole

为计算小锥度微孔的衍射光分布, 结合几何光学与 Huygens-Fresnel 原理, 单色平行光从锥孔段大孔端入射, 小孔端出射这一过程按照几何光学方式进行传播, 在微孔出口至像屏时, 将光线按照像屏采样点进行光波叠加。如图 2 所示, 光线传输至微孔出口时发生衍射, 将每一条光线看作点光源, 其发出的光线传播至光屏, 光屏划分出 $m \times m$ 个采样点并对光波进行光强叠加处理, 进而获得光屏的光强分布。虽然光线在锥孔内壁的反射会产生杂散反射光, 但光波能量主要集中在反射的光线上, 因此建立光线传输模型时不考虑杂散反射光。模型的仿真计算流程图如图 3 所示。

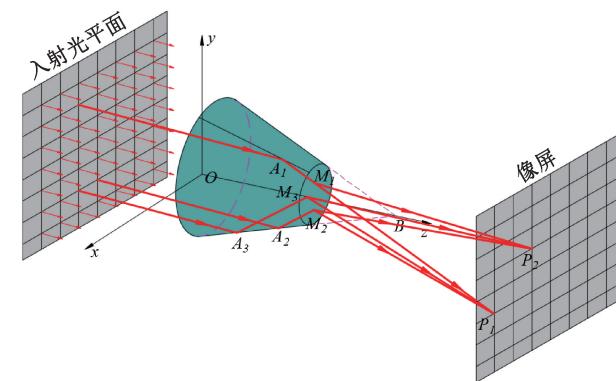


图 2 锥孔光波叠加示意图

Fig. 2 Diagram of cone-hole light wave superposition

光强的叠加可通过式(1)进行计算。

$$I_p = \sum_{i=1}^m I(i) + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq m} \sqrt{I(i)I(j)} \cos(\varphi_i - \varphi_j) \quad (1)$$

式中: 相位差 $\Delta\varphi$ 可由光程差计算获得。

为计算光程差, 如图 2 所示, 以光线入射端锥孔孔口中心为原点, 沿锥孔轴线方向为 Z 方向, 建立三维坐标系, 此时孔壁锥面方程可表示为:

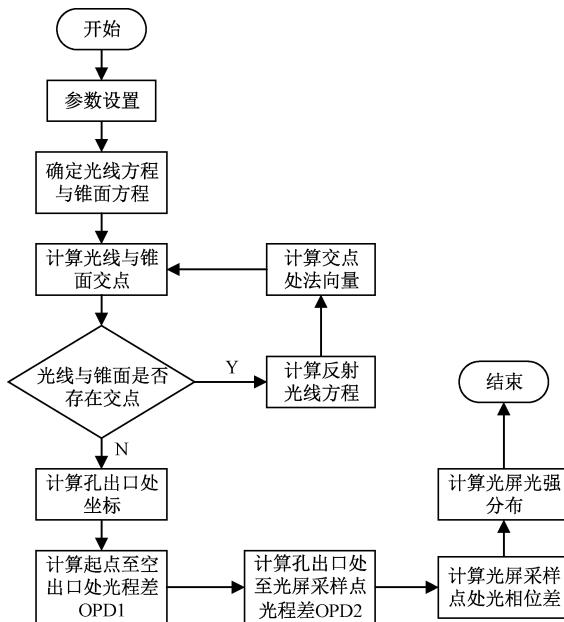


图3 光强分布仿真计算流程

Fig. 3 Flow chart of light intensity distribution simulation calculation

$$\begin{cases} \cot^2 \theta_1 (x^2 + y^2) = (z - r \cot \theta_1)^2 \\ 0 \leq z \leq H \end{cases} \quad (2)$$

入射光线为平行光,其沿Z轴正方向入射。反射光线与锥面的交点可表示为:

$$(x_A, y_A, z_A) = (x_0, y_0, r \cot \theta_1 - \cot \theta_1 \sqrt{x_0^2 + y_0^2}) \quad (3)$$

根据锥面反射点处锥面方程的偏导数可获得反射点的面内法向量:

$$\begin{cases} i = -2 \cot^2(\theta_1) x_A / m \\ j = -2 \cot^2(\theta_1) y_A / m \\ k = 2(z_A - r \cot^2(\theta_1)) / m \\ m = \sqrt{x_A^2 + y_A^2 + z_A^2} \end{cases} \quad (4)$$

获得了反射点坐标及该点处法向量后,可进一步获得反射光方程,进一步计算获得光线在锥孔出光口所在平面的坐标:

$$\begin{cases} x_M = x_A + 2pik \\ y_M = y_A + 2 \times pjk \\ z_M = H \\ p = (H - z_A) / (2k^2 - 1) \end{cases} \quad (5)$$

因此,光线从锥孔孔口入射至光屏上点P的总光程OPD可表示为:

$$OPD = X_1 + \sqrt{(x_P - x_M)^2 + (y_P - y_M)^2 + L^2} \quad (6)$$

X_1 表示锥孔出口前光线的光程,其中直射部分为 $X_1 = L$,反射部分为:

$$X_1 = z_A + \sqrt{(x_M - x_A)^2 + (y_M - y_A)^2 + (z_M - z_A)^2} \quad (7)$$

最后,依据光程与相位的关系计算获得相位差:

$$\Delta\varphi = \varphi_i - \varphi_j = \frac{2\pi}{\lambda} (OPD_i - OPD_j) \quad (8)$$

式中: r 为光线入口锥孔半径; H 为锥孔零件厚度; L 为像距; (x_0, y_0) 为光线入口所在平面坐标, $\theta_1 = \theta/2$ 为半锥角; λ 为光波长。

1.2 锥孔特征参数计算

如图4所示,将到达微孔出口的光线分为直接出射和沿锥孔表面反射的两类光线,如果将这两束光线的衍射情况分开考虑,直射光线将发生经典的圆孔衍射,而反射光线将呈现出锥形光束的衍射情况。在光线分布密度、光屏采样点、微孔参数等仿真参数一致的情况下,两者中心X截面的衍射光强分布曲线如图5所示。根据圆孔衍射艾里斑半径计算微孔出口直径,反射光线衍射光光强最大值点距离中心偏移量计算出锥角^[19]。

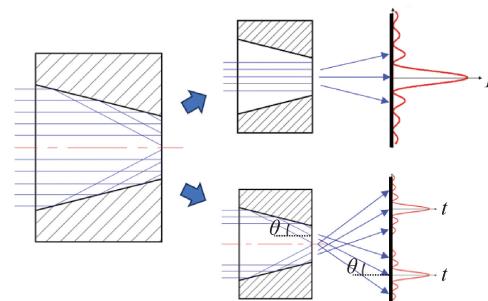
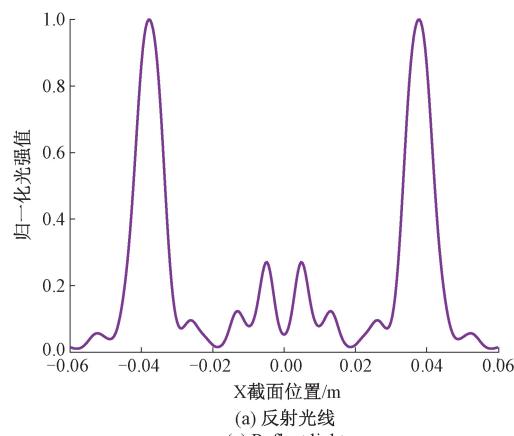


图4 直射光束与反射光束分布示意图

Fig. 4 Diagram of direct beam and reflected beam

如图6(b)所示,通过衍射光光强分布曲线上A、B、C、D 4个关键点坐标计算艾里斑半径和光强曲线主峰及次峰间的距离,进而计算锥孔的孔径及锥角。如图6(a)所示,部分光线经锥孔内壁反射后在锥孔出口处发生反射,其衍射角 $\theta_3 = \pi - \theta_2 = 2\theta_1 = \theta$, x_1 为沿锥孔内壁反射



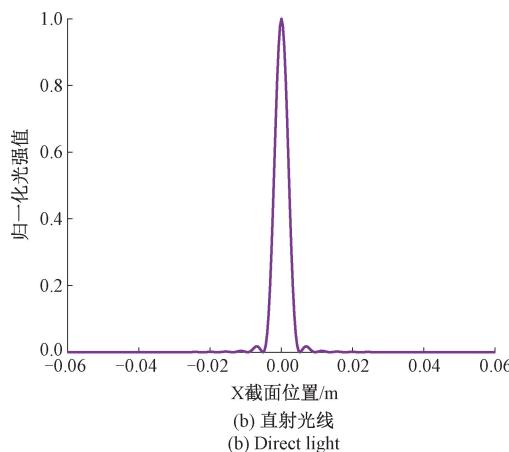


图 5 两类光束中心 X 截面衍射光光强分布曲线

Fig. 5 The intensity distribution curve of the diffracted light in the X-section of the center of two kinds of beam

光线在孔出口衍射的光束中心点到中心轴线的距离, x_2 为光强曲线旁峰到曲线中心的距离, L 为像距, 根据几何关系可得:

$$\theta = \theta_3 = \arctan\left(\frac{x_1 + x_2}{L}\right) \quad (9)$$

$$x_1 = \frac{R + r}{2} - \frac{H}{2} \tan\theta \quad (10)$$

式中: $R = r + H \tan(\theta/2)$; H 为锥孔零件的长度。

实际上, x_1 相对于 x_2 很小, 在实际计算时可忽略。故而锥角的计算公式可简化为:

$$\theta = \theta_3 = \arctan\left(\frac{x_2}{L}\right) \quad (11)$$

根据夫琅禾费衍射艾里斑半径公式可知:

$$r_0 = 1.22L\lambda/d \quad (12)$$

因此, 可求得光线出口端微孔直径:

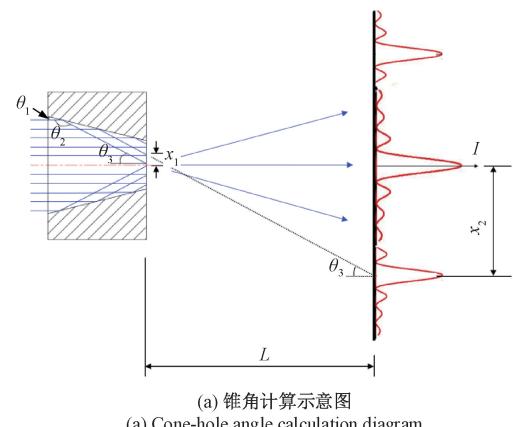
$$d = 1.22L\lambda/r_0 \quad (13)$$

其中, x_2 与 r_0 的值可由 A 、 B 、 C 、 D 4 点的横坐标获得:

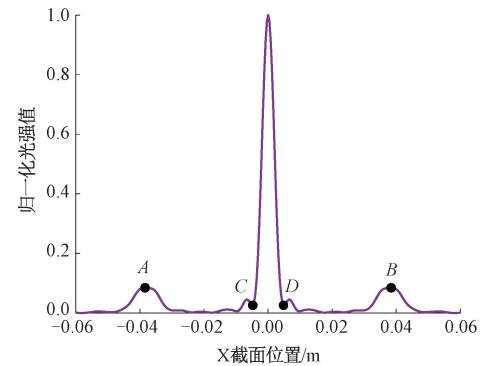
$$\begin{cases} x_2 = \frac{x_B - x_A}{2} \\ r_0 = \frac{x_D - x_C}{2} \end{cases} \quad (14)$$

1.3 仿真模型验证

通过光线追迹方式计算光程差进而求解光屏上光强的分布是一种近似求解方法, 保证足够的光线数量是求解准确的前提, 并且直射光线数量与反射光线数量应该等于 XOY 平面上直射空间投影面积与反射壁面投影面积之比 K , K 可用式(15)进行计算, 如图 7 所示。当锥孔锥角为 0.74° , 厚度为 30 mm, 像距为 3 m, $r = 0.225$ mm, 计算可得 $K = 2.4635$ 。通过开展不同光线数量下的光强



(a) 锥角计算示意图
(a) Cone-hole angle calculation diagram



(b) 锥孔衍射光光强分布曲线
(b) Intensity distribution curve of cone-hole diffraction light

图 6 锥孔锥度及孔径计算示意图

Fig. 6 Diagram for calculating taper and aperture of cone hole

分布仿真计算, 统计的反射光线与直射光线数量如表 1 所示。

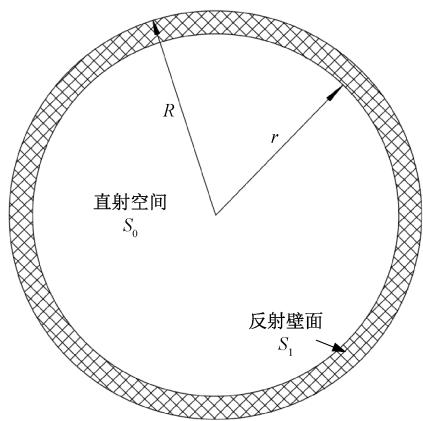
$$K = \frac{S_1}{S_0} = \frac{R^2 - r^2}{r^2} \quad (15)$$

表 1 反射光线与直射光线数量

Table 1 The number of reflected and direct rays

光线数量	直射光数量	反射光数量	统计比值 K'	相对误差/%
401	89	228	2.5618	3.99
901	197	512	2.5990	5.50
1 601	357	900	2.5210	2.34
2 501	569	1 392	2.4464	-0.69
3 601	805	2 016	2.5043	1.66
4 901	1 109	2 744	2.4743	0.44
6 401	1 457	3 568	2.4489	-0.59
8 101	1 837	4 524	2.4627	-0.03
10 001	2 249	5 596	2.4882	1.00

从表 1 可以看出, 在光线总数量设置较少时, 反射光数量与直射光数量的比值 K' 与面积之比 K 的相对误差较大。在光屏采样点为 300×300 时, 光线数量为 401 及 8 101 的光强分布曲线如图 8 所示。从图 8(a)可以看出光线数量为 401 时的光强分布曲线明显是不正确的, 因

图 7 锥孔 XOY 平面投影视图Fig. 7 Cone-hole projection view in XOY plane

为在该种情况下反射光线的数量明显占比过大,导致光屏上叠加光强反射光贡献部分过多,使得旁峰强度大于了中央主峰强度。

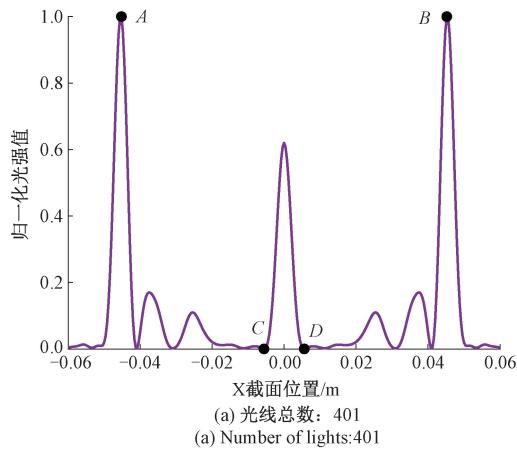
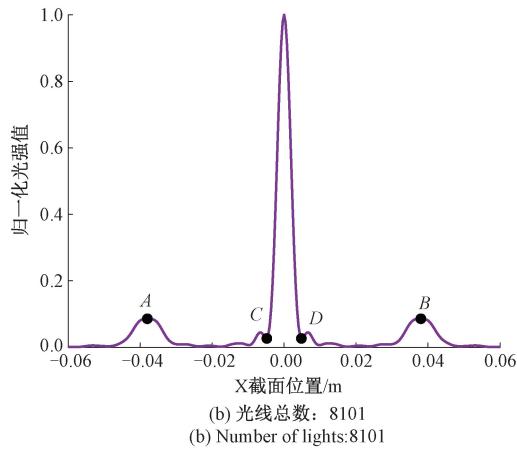
(a) 光线总数: 401
(a) Number of lights: 401(b) 光线总数: 8101
(b) Number of lights: 8101

图 8 不同光线数量下光强分布

Fig. 8 Light intensity distribution in different lights number

为保证光强分布结果更加准确,光屏上的采样点也必须保证一定的数量。这样才能准确获取 A 、 B 、 C 、 D 4

个点的坐标值,减少计算锥度及孔径的误差。如图 9 所示的采样点为 50×50 及 300×300 的光强分布曲线,从图中可以看出,采样点数量为 300×300 时曲线比采样点为 50×50 时更加平滑。获取的点 C 、 D 横坐标如表 2 所示,从结果可以看出,采样点数量不一致时计算得到的艾里斑半径也不一样,采样点数量越少,获得的艾里斑半径值精度越低,因为采样点上的光强谷值点可能并不是真实的光强谷值点,采样点越多,仿真得到的光强谷值点坐标与真实光强谷值点间的坐标差值就越小。

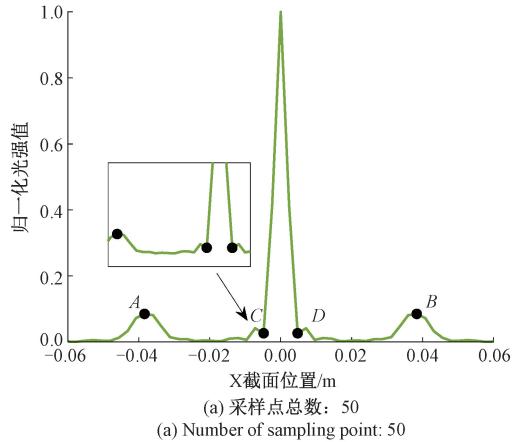
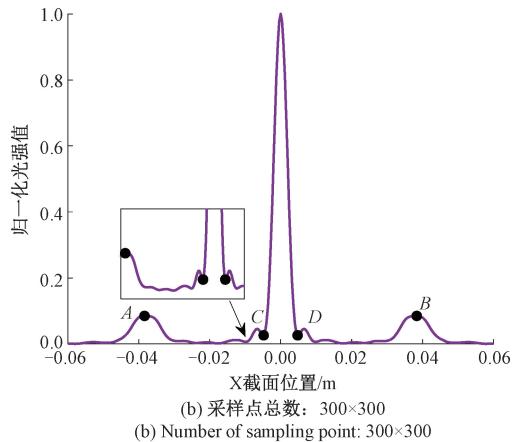
(a) 采样点总数: 50
(a) Number of sampling point: 50(b) 采样点总数: 300×300
(b) Number of sampling point: 300×300

图 9 不同采样点数量下光强分布

Fig. 9 Light intensity distribution in different sampling point

表 2 不同采样点的坐标

Table 2 Coordinates of in different sampling points

采样点数量	点 C 坐标 x_C / m	点 D 坐标 x_D / m	r_0 / m
50×50	-0.003 529	0.005 882	0.004 706
300×300	-0.005 185	0.005 083	0.005 134
	差值绝对值		
	0.000 428		

综上所述,为保证仿真结果的正确性,理论上光线数量及采样点越多越好,但是光线数量及采样点设置过多会增加计算量,使得仿真难度增大。因此,合理设置光线数量及采样点数量既可以保证精度,也能够降低仿真难

度,后续仿真中设定光线数量为 8 101 条,采样点数量为 300×300 。

为进一步验证模型的正确性,利用建立的仿真模型计算了同一锥度下不同孔径的锥孔以及同一孔径下不同锥度的锥孔衍射后的光强分布,通过提取 X 截面的光强分布曲线,按式(3)及(5)计算锥孔孔径及锥度,两种情况下的仿真计算结果如表 3 和 4 所示。由表 3 可以看

出,光线出射端锥孔孔径保持一致时,不同锥度下获得的艾里斑直径是一致的,计算得到的孔径值也一致,仿真计算获得的孔径值与模型设定值的误差约为 1.08%。由表 4 可以看出,锥孔锥度为 0.6° 时,在孔径为 0.3、0.4、0.5 及 0.6 mm 时计算得到的孔径值与设定值误差分别为 1.58%、0.09%、1.52% 及 0.25%。

表 3 不同锥角下微孔出口孔径仿真计算结果

Table 3 The results of simulation calculation of microhole outlet aperture under different cone angles

孔径设定值/mm	锥角设定值/(°)	点 C 坐标 x_C/m	点 D 坐标 x_D/m	$ x_C - x_D /m$	孔径仿真计算值/mm
0.5	0.60	-0.004 583	0.004 585	0.009 168	0.505 406
	0.70	-0.004 583	0.004 585	0.009 168	0.505 406
	0.80	-0.004 583	0.004 585	0.009 168	0.505 406
	0.90	-0.004 583	0.004 585	0.009 168	0.505 406

表 4 不同出口孔径下微孔锥角仿真计算结果

Table 4 The result of simulation calculation of microhole cone angle under different outlet aperture

锥角设定值/(°)	孔径设定值/mm	点 A 坐标 x_A/m	点 B 坐标 x_B/m	$ x_A - x_B /m$	锥角仿真计算值/(°)
0.60	0.30	-0.031 290	0.030 189	0.031 915	0.609 499
	0.40	-0.032 100	0.033 093	0.031 448	0.600 586
	0.50	-0.031 694	0.032 093	0.031 894	0.609 098
	0.60	-0.032 890	0.033 289	0.031 495	0.601 488

2 实验验证

为验证锥孔特征参数计算模型在实际应用中的正确性,搭建了如图 10 所示的测试平台,实验装置实物图如图 11 所示。激光器的波长为 633.28 nm,像距为 3 m,待测锥孔零件的特征参数为小孔端孔径 0.45 mm,零件长度为 30 mm。为保证成像质量,实验过程中需保证激光器光源和锥孔零件中心位于同一基准线,最终获得了如图 12(a)所示的光斑图像,对比同样参数设置下的模拟光斑图(图 12(b)),可以看出两者在形状上保持高度一致。通过提取光斑图像 X 截面的光强分布,得到如图 13 所示的光强分布曲线,可以看出,主峰与旁峰间模拟光强曲线与真实光强曲线均有 5 个谷值点,完美地对应了光斑图像中中央亮斑及反射亮斑间的亮环数量,进一步证实了仿真模型的正确性。

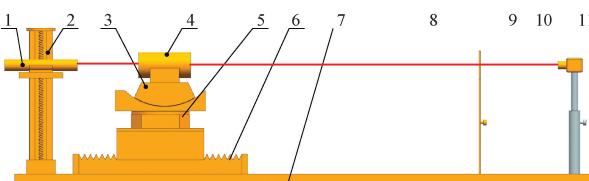


图 10 测试平台组成

Fig. 10 Test platform composition



图 11 测试实验装置

Fig. 11 Test and experiment equipment

如图 14 所示,为计算获得锥孔的锥度及孔径值,分别对模拟光斑及真实光斑的光强分布曲线进行了处理,获得了关键点坐标值并计算了锥孔的锥度及孔径,如表 5 所示。从计算结果可以看出仿真获得的孔径及锥度结果相对误差分别为 0.28% 和 0.19%,而实验测得的结果相对误差分别为 2.78% 和 1.35%。从真实光斑计算得到的孔径及锥度误差均大于仿真计算结果,经过分析,可能的原因是实验采用的激光器发出的光并不是严格的平行光,存在一个极小的发散角;同时由于激光器发出的光为

表 5 锥孔孔径及锥度的仿真与实验计算结果

Table 5 The results of simulation and experimental calculation of the diameter and taper of a cone hole

	x_2/m	r_0/m	计算孔径值/mm	孔径值相对误差/%	计算锥度值/(°)	锥度值相对误差/%
仿真	0.038 82	0.005 134	0.451 3	0.28	0.741 4	0.19
实验	0.038 225	0.005 295	0.437 5	2.78	0.730 0	1.35

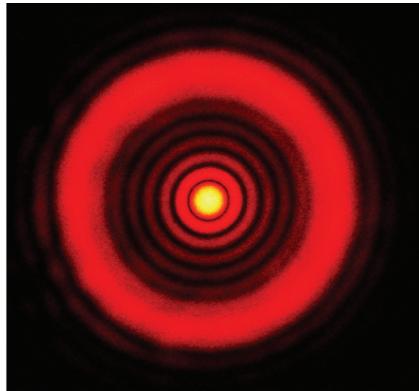
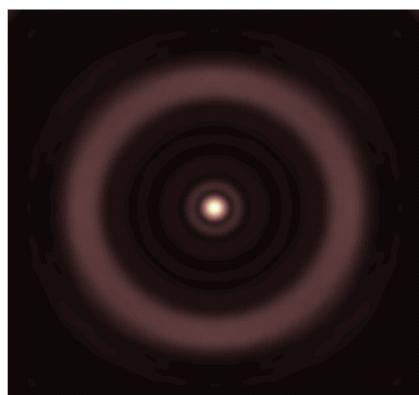
(a) 实验结果
(a) Experimental result(b) 仿真结果
(b) Simulation result

图 12 衍射光斑图像

Fig. 12 Diffraction spot image

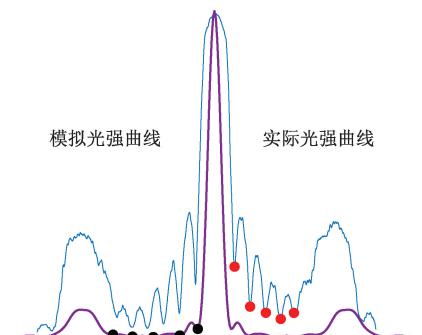


图 13 光强曲线谷值点分布

Fig. 13 Valley point distribution of light intensity curve

高斯型激光,沿径向方向的光强值并不相等,导致实际光斑的谷值光强比模拟光斑大,并从中心至边缘逐渐减小,

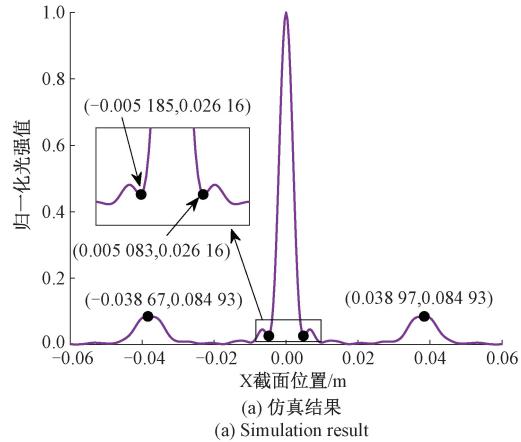
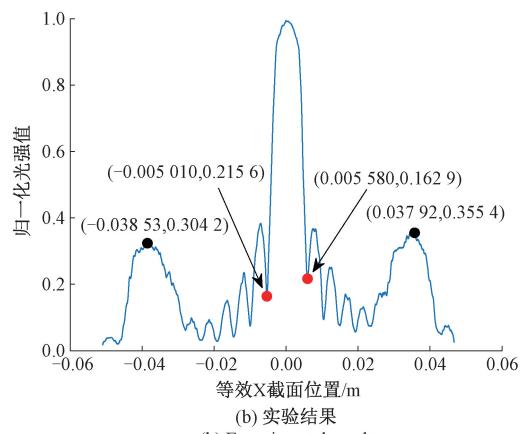
(a) 仿真结果
(a) Simulation result

图 14 光斑中心 X 截面光强曲线

Fig. 14 X-section light intensity curve at the center of the spot

这很好地符合了高斯光光强的变化趋势。

3 结 论

针对大深径比微小锥孔特征的测量需求,本文探究了大深径比微小锥孔光斑成形机理,通过构建大深径比微小锥孔激光衍射数学模型及大深径比微小孔锥度与直径测试实验,可得到结论如下。建立的数学模型可模拟获得大深径比微小锥孔的衍射现象,通过模拟衍射光斑计算得到的锥孔锥度及孔径值与理论设定值基本一致。模型计算的准确性受设置的光线数量及采样点数量影响,光线数量及采样点数量越多,获得的结果越准确。通过对实际衍射光斑图像的处理,利用建立的孔径及锥度计算公式,获得了标准锥孔零件的孔径及锥度,相对误差

分别为2.78%和1.35%，具备较好的测量精度。本文通过探究激光透射锥孔零件的光斑图像和锥孔特征参数的关系，可为后续进一步探究其他形状小孔零件光斑图像和特征参数的关系奠定坚实地基础。

参考文献

- [1] 黄茜. 微锥孔加工对压电雾化装置性能的影响研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
- HUANG Q. Study on the influence of micro-cone hole machining on the performance of piezoelectric atomizer[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.
- [2] 王秀梅, 郭智勇, 饶家凯. 生物质挤压成型数值模拟及模孔参数优化[J]. 机械设计与制造, 2024(7): 260-264.
- WANG X M, GUO ZH Y, RAO J K. Numerical simulation of biomass extrusion and optimization of the hole parameters [J]. Machinery Design and Manufacture, 2024 (7):260-264.
- [3] 由儒全, 权胜, 陈文彬, 等. 气膜孔孔径变化对涡轮叶片全表面冷却特性影响研究[J/OL]. 航空动力学报, 1-10 [2025-3-10]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240533>.
- YOU R Q, QUAN SH, CHEN W B, et al. Effects of film hole diameter variations on the overall cooling performance of a rotating turbine blade [J]. Journal of Aerospace Power, 1-10 [2025-3-10]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20240533>.
- [4] 黄风山, 刘恩福, 方忆湘, 等. 基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别[J]. 光学精密工程, 2013, 21(5):1326-1332.
- HUANG F SH, LIU E F, FANG Y X, et al. Single camera stereo vision recognition for parts' pose based on intelligent three coordinate measuring machine [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21 (5): 1326-1332.
- [5] FANG F Z, ZHANG X D, WECKENMANN A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics [J]. CIRP Annals, 2013, 62(2):823-846.
- [6] EIFURJANI S, BAYESTEH A, PARK S, et al. Dimensional measurement based on rotating wire probe and acoustic emission [J]. Measurement, 2015, 59: 329-336.
- [7] 李志渤, 黄强先, 史科迪, 等. 基于PVDF的三维纳米谐振触发测头及定位系统[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6):1-6.
- LI ZH B, HUANG Q X, SHI K D, et al. Three-dimensional nano resonant trigger probe and positioning system based on PVDF film [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6):1-6.
- [8] MURAKAMI H, KATSUKI A, SAJIMA T. Development of touch probing system using a fiber stylus [J]. Fibers, 2016, 4(3):24.
- [9] CUI J W, FENG K P, LI J Y, et al. Development of a double fiber probe with a single fiber Bragg grating for dimensional measurement of microholes with high aspect ratios [J]. Optics Letters, 2014, 39(10):2868-71.
- [10] 刘强. 基于光纤探针的接触式微孔测量研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- LIU Q. Research on contact measurement for micro-hole based on fiber probe [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [11] 简晓娇. 精密模具大深径比微孔尺寸测量方案设计[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- JIAN X J. Design of measuring scheme of micro-hole with largr depth-diameter ratio for precision mold [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [12] 刘汉戈, 闫钰锋, 唐卫, 等. 基于色散共焦原理的内径测量技术研究 [J]. 计测技术, 2023, 43 (1): 128-136.
- LIU H G, YAN Y F, TANG W, et al. Inner diameter measurement based on dispersive confocal principle [J]. Metrology and Measurement Technology, 2023, 43 (1): 128-136.
- [13] 李佳, 张恺. 喷油杆微孔的精密检测技术研究: 第五届空天动力联合会议暨中国航天第三专业信息网第41届技术交流会[C]. 2020.
- LI J, ZHANG K. Research on precision detection technology of injection rod microhole: The 5th Joint Conference on Aerospace Power and the 41st Technical Exchange Meeting of China Aerospace Third Professional Information Network [C]. 2020.
- [14] 罗哉, 赵洪楠, 江文松, 等. 基于线激光扫描的基准孔检测与定位方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(12):184-190.
- LUO Z, ZHAO H N, JIANG W S, et al. A detection and positioning method for the base hole based on line laser scanning [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12):18-25.
- [15] 章法强, 赵学水, 张建华, 等. 小张角双锥厚针孔关键参数的测量方法 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(9):1700-1704.
- ZHANG F Q, ZHANG X SH, ZHANG J H, et al. Measurement method of key parameter of thick pinhole

- with little-angle and double cones [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(9) : 1700-1704.
- [16] 章文, 黄强先, 李振阳, 等. 基于石英音叉谐振测头的喷油嘴微锥孔测量 [J]. 工具技术, 2020, 54(10) : 107-110.
- ZHANG W, HUANG Q X, LI ZH Y. Micro tapered hole measurement of injector nozzle based on resonant trigger probe using quartz tuning fork [J]. Tool Engineering, 2020, 54(10) : 107-110.
- [17] 程琳, 李丹东, 周斌, 等. 基于蓝光 DVD 光学读取头的非接触式探头 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(5) : 606-609.
- CHENG L, LI D D, ZHOU B, et al. Non-contact probe based on Blu-ray DVD pickup head [J]. Journal of Hefei University of Technology, 2017, 40(5) : 606-609.
- [18] 牛国钰, 潘巧生, 万澳德, 等. 一种利用电涡流效应的微孔直径和深度测量方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(10) : 123-133.
- NIU G Y, PAN Q SH, WAN AO D, et al. Micro-hole diameter and depth measurement method utilizing eddy current effect [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(10) : 123-133.
- [19] 杨萍, 张玉杰. 激光衍射在拉丝模孔型测量中的研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(2) : 150-153.
- YANG P, ZHANG Y J. Design of aperture measurement system for wire drawing die based on laser diffraction [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 47(2) : 150-153.
- [20] 麻欢, 付柯, 隋林泓, 等. 高斯光束圆孔衍射光强分布的解析解 [J]. 大学物理, 2024, 43(1) : 64-69.
- MA H, FU K, SUI L H, et al. Analytical solution of the intensity distribution of Gaussian beam diffracted by a circular aperture [J]. College Physics, 2024, 43(1) : 64-69.
- [21] 张通, 高芬, 李兵, 等. 非对准高斯光束入射下的小孔衍射光强分布 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19) : 126-133.
- ZHANG T, GAO F, LI B, et al. Diffraction intensity distribution of pinhole for misaligned gaussian beam incidence [J]. Laser&Optoelectronics Progress, 2021, 58(19) : 126-133.

作者简介



黄腾, 2022 年于华中科技大学获得学士学位, 现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所硕士研究生, 主要研究方向为特种加工与检测。

E-mail: huangteng22@gscaep.ac.cn

Huang Teng received his B. Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate at the Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research interests include special machining and testing.



廖路, 2016 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 2019 年于中国工程物理研究院获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院博士研究生, 主要研究方向为特种加工与光学检测。

E-mail: liaolu21@gscaep.ac.cn

Liao Lu received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2016, M. Sc. degree from China Academy of Engineering Physics in 2019. Now he is a Ph. D. candidate in China Academy of Engineering Physics. His main research interests include Special processing and optical inspection.



张勇斌(通信作者), 1999 年于合肥工业大学获得学士学位, 2004 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为中国工程物理研究院机械制造工艺研究所正高级工程师, 主要研究方向为微纳放电加工关键技术与装备、超精密金刚石车削加工技术与装备、特种脉冲电源调控技术、超短脉冲光学加工技术与装备等。

E-mail: zcaep6@163.com

Zhang Yongbin (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 1999, Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2004, respectively. Now he is a senior engineer in the Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics. His main research interests include key technologies and equipment of micro-nano discharge machining, ultra-precision diamond turning processing technology and equipment, special pulse power control technology, ultra-short pulse optical processing technology and equipment, etc.