

引用格式: PI Jun, LU Hui, JIANG Tao, et al. Influence of Geometry Structure of Microstructure on Reflective Characteristics of the Micro-prism Film in the Nonplanar State[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0308001

皮钧, 卢辉, 姜涛, 等. 微棱镜反光膜非平面状态下微结构几何结构改变对反光特性的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(3):0308001

微棱镜反光膜非平面状态下微结构几何结构 改变对反光特性的影响

皮钧, 卢辉, 姜涛, 张玉周, 杨光, 沈志煌

(集美大学 机械与能源工程学院, 福建 厦门 361021)

摘 要:为研究反光膜弯曲状态下的反光特性变化规律, 基于体积不变原理建立弯曲角锥棱镜反射面二面角与弯曲角度之间的映射关系; 利用光反射理论分析单个弯曲角锥棱镜与弯曲反光膜的反光特性, 得出单个弯曲角锥棱镜出射光线轴对称分布规律和弯曲反光膜最大理论有效弯曲角为 70.52° ; 最后采用光线追踪软件对单个弯曲角锥棱镜和弯曲反光膜仿真。结果表明: 光线正入射单个弯曲角锥棱镜及弯曲反光膜的衍射图样为轴对称分布; 弯曲反光膜的最大有效弯曲角随着弯曲角度的增加而减小, 降幅 0.7% , 其值与理论值偏差较小; 弯曲角度大于 20° 时, 凸状反光膜的反射率较凹状反光膜增大 20% 。同时, 实验测量结果证明了理论分析的正确性。

关键词:微棱镜反光膜; 非平面; 弯曲状态; 角锥棱镜; 反光特性

中图分类号: O435

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215003.0308001

Influence of Geometry Structure of Microstructure on Reflective Characteristics of the Micro-prism Film in the Nonplanar State

PI Jun, LU Hui, JIANG Tao, ZHANG Yuzhou, YANG Guang, SHEN Zhihuang
(College of Mechanical and Energy Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract: In order to study the changing rules of the reflective characteristics of the reflective film in a curved state, the mapping relationship between the dihedral angle of the reflective surface of the curved Cube Corner Reflector (CCR) and the bending angle is established based on the principle of volume invariance. The reflection theory analyzes the reflection characteristics of a single curved CCR and a curved reflective film, and obtains the axis-symmetric distribution of the light rays emitted by the single curved CCR and the maximum theoretical effective bending angle of the curved reflective film is 70.52° . Finally, using ray tracing software to simulate a single curved CCR and curved reflective film, the results show that the diffraction pattern of a single curved CCR and curved reflective film is axisymmetrically distributed when light is normally incident; the diffraction pattern of a single curved CCR and curved reflective film is axisymmetrically distributed; the maximum effective bending angle of the curved reflective film decreases with the increase of the bending angle, a decrease of 0.7% , and the deviation between the value and the theoretical value is small; when the bending angle is greater than 20° , the reflectivity of the convex reflective film is increased by 20% compared with the concave reflective film. At the same time, the experimental measurement results prove the correctness of the theoretical analysis.

Key words: Micro-prism reflective film; Non-planar; Curved state; Cube corner reflector; Reflective

基金项目: 国家自然科学基金(No.51805458), 集美大学国家基金培育计划项目(No.ZP2020048)

第一作者: 皮钧(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微细结构设计及加工。Email: pi_jun@163.com

收稿日期: 2020-10-20; 录用日期: 2020-12-04

<http://www.photon.ac.cn>

characteristic

OCIS Codes: 080.2730; 310.6860; 310.6805; 080.2720

0 引言

微棱镜反光膜利用了单元角锥棱镜回反射特性和高反射率特点而被广泛应用于交通、广告、服装等领域^[1-4],其应用与开发越来越得到人们的重视。反光膜需以基体为载体才能发挥其作用,基体形状分为平面与曲面。平面基体上的反光膜反光特性与设计一致;对于曲面基体上的反光膜,曲面基体导致反光膜产生两种变化,一种是反光膜整体形状变化;另一种是单元角锥棱镜结构变化,从而影响其反光特性。对于反光膜附着于平面基体上,国内外已有很多学者对其单元角锥棱镜与阵列的反光特性进行了研究。李真等^[5]从制造使用角度考虑,利用反光参数评价角锥棱镜阵列反光性能;皮钧等^[6]对单个角锥棱镜及角锥棱镜阵列中的无效光进行分析,发现底厚的变化会使无效光逆反射;罗汉等^[7]通过仿真获得角锥棱镜单元的最佳宽厚比和顶点偏移两个参数,增大了反光膜有效入射角范围并且改善逆反射系数各向异性的效果;LOU Y等^[8]设计了一种结构深度相对较低的改进型角锥棱镜阵列(Corner Cube Array, CCA)结构,通过射线追踪证明在特定入射角下具有更高的反射率。然而实际加工不可避免的误差导致角锥棱镜产生误差。一些学者对此进行了研究,SWANK A J等^[9]建立了一个用于判断角锥棱镜反射光束偏差与二面角误差稳定性的函数数学表达式;叶一东等^[10]建立了含二面角误差的角锥棱镜反射数学模型,并对其和理想角锥棱镜的反射光束进行数值模拟研究分析;周晓凤与戚祖敏等^[11-12]通过改变含二面角误差的角锥棱镜排列方式或与光学元件组合使其反射光束成均匀分布;NILSEN R B^[13]公开了一种通过在棱镜的底面上形成凹曲率而更均匀地反射光的微棱镜阵列;OHTERA R 与 UCHIDA T 等^[14-15]改变角锥棱镜反射面形状使电子幕布反光效果视角更佳;黄健等^[16]使用光线追踪法,分析了角锥棱镜误差引起的反射光束相位变化;ZHOU H 等^[17]在黄健等的基础上更全面地分析了角锥棱镜误差引起反射光束相位变化。

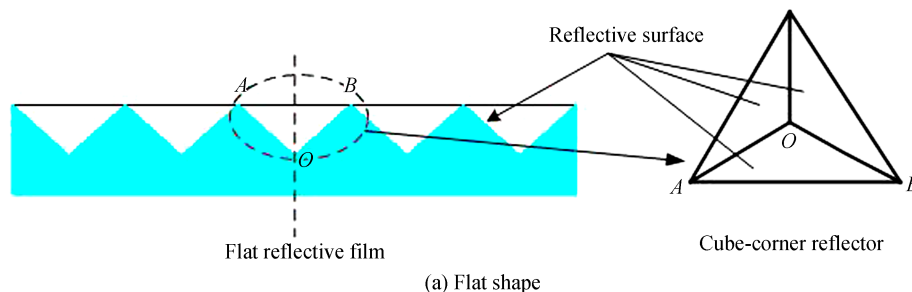
弯曲状态的反光膜在工程测量、汽车车灯制造、交通标志牌等方面应用广泛,研究其反光特性有极其重要的工程意义。但有关反光膜附着于曲面上时其反光特性变化规律的相关文献未见报导,虽然 WANG T 等^[18]研究了曲面上非连续角锥棱镜的反光特性,建立曲面角锥棱镜反射的衍射公式,但未考虑角锥棱镜结构变形。

综上所述,本文基于体积不变原理建立了单个弯曲角锥棱镜二面角与弯曲角度之间映射关系,以光反射理论为基础分析单个弯曲角锥棱镜及弯曲反光膜的反光特性,同时对单个弯曲角锥棱镜及弯曲反光膜进行光线追踪仿真,仿真结果与理论分析相统一。另外,对角锥棱镜弯曲后的结构参数进行测量,而且还测量了不同弯曲角度反光膜的反光效果,测量结果证明了理论分析的正确性。

1 弯曲反光膜及其单元几何结构变化与反光特性分析

1.1 外凸角锥棱镜几何结构变化分析

平面状态下,反光膜微棱镜形状如图 1(a)所示。相对图 1(a)平面反光膜形状,图 1(b)和 1(c)的二维弯曲反光膜形状(含有角锥棱镜的一侧)呈凸或凹状,反光膜上单元角锥棱镜结构发生变形,反射面向角锥棱镜外凸或内凹。



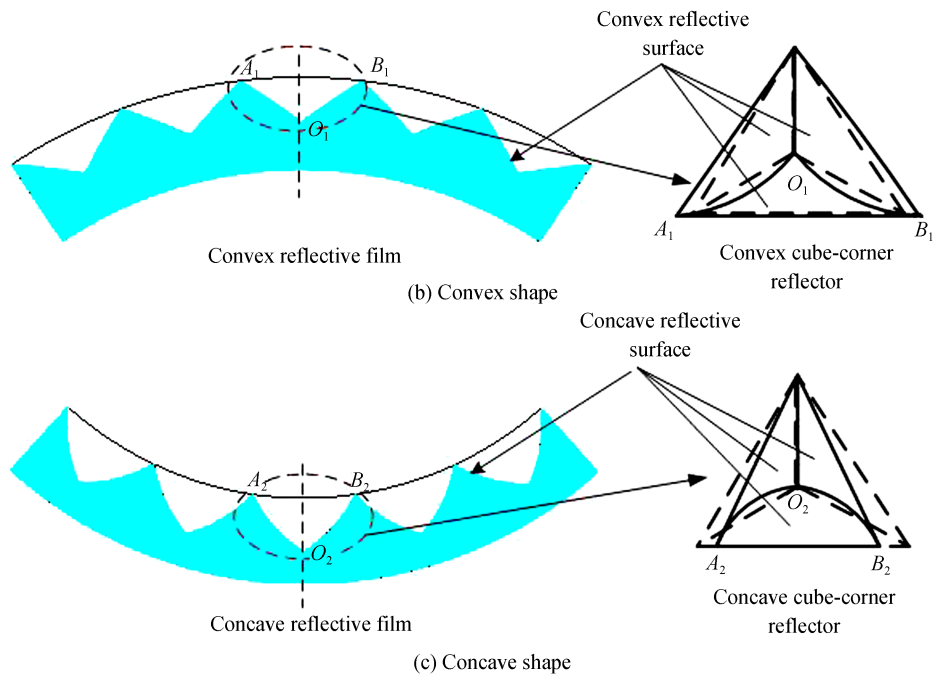


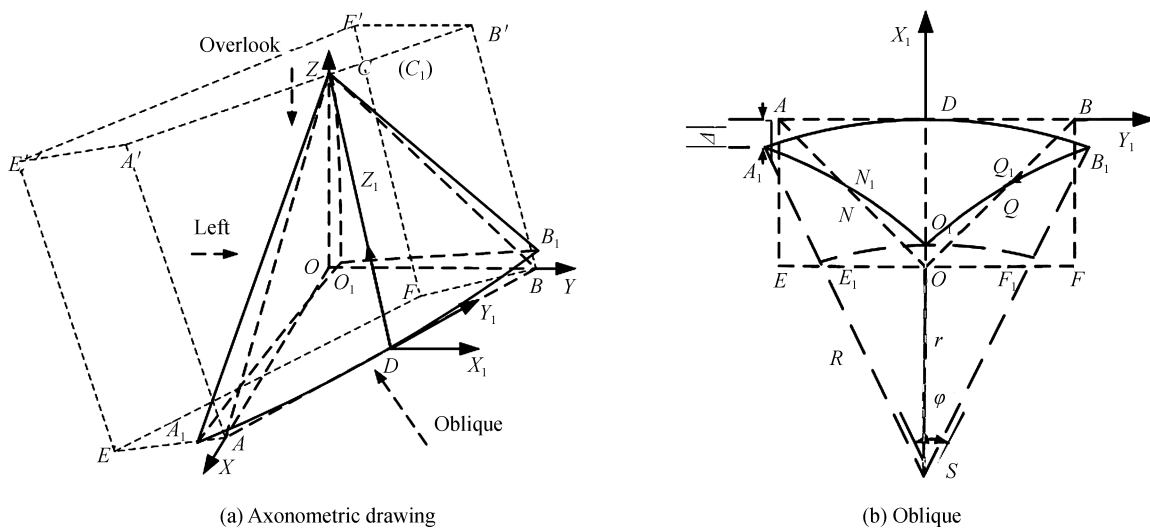
图1 不同形状的微棱镜反光膜及其单元角锥棱镜
Fig.1 Micro-prism reflective film with different shapes and its CCR

外凸反光膜与内凹反光膜的单元角锥棱镜结构对称,本文分析的是反光膜外凸时的情况。为描述弯曲后单元角锥棱镜结构变化,建立如图2(a)所示几何模型。图2(a)中,长方体 $ABEF-A'B'E'F'$ 中空标准角锥棱镜 $O-ABC$ 以底面中线 CD 为轴线弯曲,得到弯曲的角锥棱镜 $O_1-A_1B_1C_1$ 。同时,建立新的坐标系 $D-X_1Y_1Z_1$,其中 D 为 AB 的中点; X_1 轴为底面 ABC 的外法线方向; Y_1 轴为 DB 方向; Z_1 轴为 DC 方向。

如图2(b)所示,当单个角锥棱镜向外凸出时(曲率半径中心 S 与角锥棱镜顶点 O 位于同一侧),弯曲角度为 φ ;曲率外径 $SD=R$;内径 $SF_1=r$;点 N 、 Q 分别为直线 OA 、 OB 的中点。

在图2(a)中,旧坐标系 $O-XYZ$ 与新坐标系 $D-X_1Y_1Z_1$ 之间的关系为

$$(x, y, z)^T = P \cdot (x_1, y_1, z_1)^T + P_c \quad (1)$$



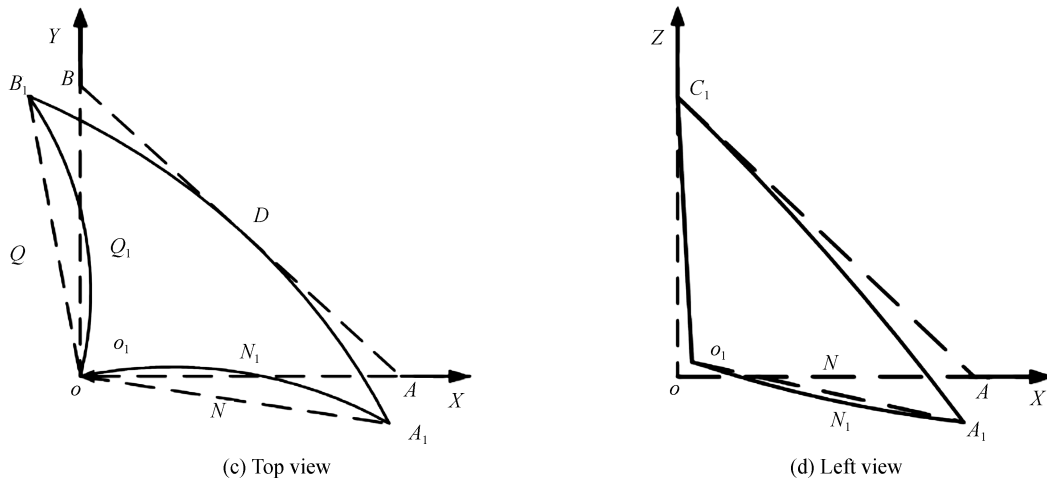


图2 弯曲角锥棱镜结构变化
Fig. 2 Structural changes of curved corner prism

式中, P 是坐标转换矩阵, l 是三条棱边的长, 即 $OA=OB=OC=l$ 。其中

$$P = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{6}}{6} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & 0 & \frac{\sqrt{6}}{3} \end{pmatrix} \quad P_c = \begin{pmatrix} \frac{l}{2} \\ \frac{l}{2} \\ 0 \end{pmatrix}$$

在图 2(b) X_1DY_1 坐标中, 弯曲最大变量

$$\Delta = A_1D \sin \angle ADA_1 = 2R \sin^2 \frac{\varphi}{4} \quad (2)$$

根据体积不变原则, 弯曲前后的物体体积相等, 而弯曲前后 Z_1 轴方向的长度不发生改变, 故

$$S_{ABEF} = S_{A_1B_1E_1F_1} \quad (3)$$

由式(1)~(3)可得点 $A_1, B_1, C_1, O_1, N_1, Q_1$ 在坐标系 $O-XYZ$ 的坐标值。

如图 2(c) 所示, 在坐标系 XOY 中, 假设曲线 $O_1Q_1B_1$ 与 $O_1N_1A_1$ 的方程为

$$y = ax^2 + bx + c \quad (4)$$

对式(4)求导得曲线的切线斜率

$$y' = 2ax + b \quad (5)$$

通过三点坐标可求曲线 $O_1N_1A_1$ 的切线斜率

$$y'_1 = 2a_1x + b_1 \quad (6)$$

式中,

$$\begin{cases} a_1 = \frac{2l(C-D) + 4F(D-C) - \sqrt{2}E(2C-l)}{(C-D)(2Cl + 2Dl - l^2 - 4CD)} \\ b_1 = \frac{(C-D)(2l^2 + 8DC - 8FD - 8FC) - \sqrt{2}E(4C^2 - l)}{2(C-D)(l^2 - 2Cl - 2Dl + 4CD)} \end{cases}$$

同理, 曲线 $O_1Q_1B_1$ 的切线斜率

$$y'_2 = 2a_2x + b_2 \quad (7)$$

式中,

$$\begin{cases} a_2 = \frac{2(2F-l)(C-D) + \sqrt{2}E(2C-l)}{4(D-C)(DC-FD-FC+F^2) - 2E(C-F)(2\sqrt{2}D-E-\sqrt{2}C-\sqrt{2}D)} \\ b_2 = \frac{2(2DC+2F^2-CI-DI)(C-D) + 2\sqrt{2}DE(2C-l) - E^2(2C-l)}{4(C-D)(DC-FD-FC+F^2) - 2E(C-F)(-2\sqrt{2}D+E+\sqrt{2}C+\sqrt{2}D)} \end{cases}$$

同理,在图 2(d)坐标系 XOZ 中,曲线 O_1N_1A 的切线斜率为

$$y'_2 = 2a_2x + b_2 \quad (8)$$

式中,

$$\begin{cases} a_3 = \frac{24C(2D-l) + 4\sqrt{6}l(D-C) + \sqrt{3}E\varphi(2C-l)}{12(C-D)(4CD-2lD-2lC+l^2)} \\ b_3 = \frac{24C(4D^2-l^2) + 8\sqrt{6}l(D^2-C^2) + \sqrt{3}E\varphi(4C^2-l^2)}{24(D-C)(4CD-2lD-2lC+l^2)} \end{cases}$$

直线 O_1C_1 的切线斜率

$$k = -\frac{l-z_{O1}}{x_{O1}} \quad (9)$$

式中, z_{O1}, x_{O1} 是 O_1 在坐标系 XOZ 的坐标值。系数表达为

$$C = -\frac{2l^2}{3(R+r)\varphi} + \frac{l}{3}, D = -\frac{\sqrt{3}}{24}E\varphi + \frac{\sqrt{2}}{4}E + \frac{l}{2}, E = R\varphi, F = -\frac{\sqrt{6}}{6}l + \frac{l}{2}$$

设两条曲线的切线夹角 θ 是反射面间的二面角,即二面角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{k_2 - k_1}{1 + k_1k_2}\right) \quad (10)$$

式中, k_1, k_2 为切线的斜率。

设 θ_{12} 为反射面 A_1O_1C 和反射面 B_1O_1C 的二面角, $\theta_{13}(\theta_{23})$ 为反射面 A_1O_1B 和反射面 $B_1O_1C(A_1O_1C)$ 的二面角。因为弯曲轴线是 CD , 所以反射面 $O_1A_1C_1$ 和反射面 $O_1B_1C_1$ 形状相同, 故 $\theta_{13} = \theta_{23}$ 。根据式 (6)~(10) 可得, 反射面间的二面角

$$\theta_{12} = \arctan\left(\frac{y'_2 - y'_1}{1 + y'_1y'_2}\right) \quad (11)$$

$$\theta_{13} = \theta_{23} = \arctan\left(\frac{z'_1 - k}{1 + z'_1k}\right) \quad (12)$$

弯曲角锥棱镜反射面的二面角是一个变量。将输入参数 $\varphi = 1^\circ$ (为了更直观趋势变化, 将 φ 取 1°), $R = 8.14 \text{ mm}$, $l = 0.1 \text{ mm}$, $A_1, B_1, C_1, O_1, N_1, Q_1$ 的坐标, 获得不同位置点二面角数值, 如图 3 所示。从图中可知二

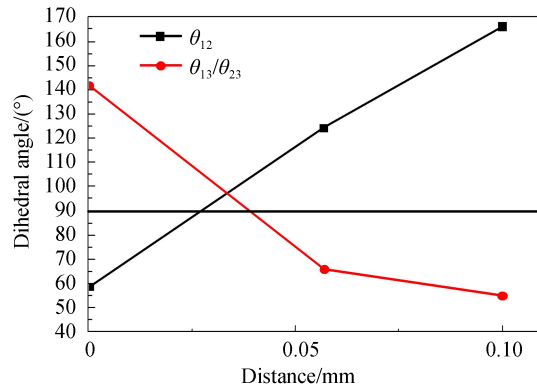


图 3 反射面二面角在不同位置点的数值

Fig. 3 The value of the dihedral angle of the reflecting surface at different points

面角 θ_{12} 逐渐增大,二面角误差由负偏差变为正偏差, θ_{13} 、 θ_{23} 逐渐变小,二面角误差由正偏差变为负偏差。

1.2 外凸状态下微棱镜反光膜反光特性分析

通过 1.1 节分析可知:弯曲的微棱镜反光膜,不仅整体形状改变,其组成单元角锥棱镜结构也因弯曲而发生变形;导致角锥棱镜反射面与反射面间二面角改变。二面角误差、反射面形误差及反光膜形状都会影响出射光线的传播特性。

1.2.1 外凸状态下角锥棱镜二面角误差对反光特性的影响

理想角锥棱镜是由三个相互垂直的反射面(标记为 1、2、3,如图 4)组成,光线正入射角锥棱镜底面 ABC 后,在三个反射面 1、2、3 依次反射,反射面上的反射点分别是 P_2, P_3, P_4 ,最后离开角锥棱镜底面 ABC ,出射位置 P_5 与入射位置 P_1 有一定距离,出射光线与入射光线的方向相反^[19-20]。

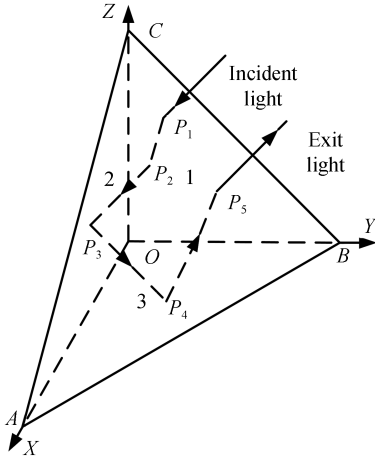


图 4 光线在角锥棱镜中的传播途径
Fig. 4 Trace of light passing through CCR

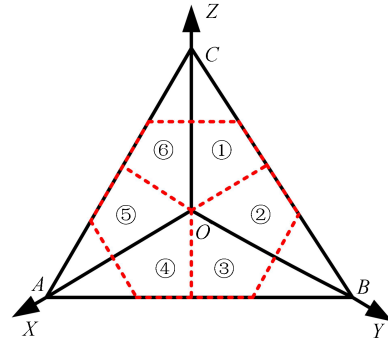


图 5 角锥棱镜反射面区域划分
Fig. 5 Division of reflective surface area of CCR

取图 4 所示空间坐标系,将角锥棱镜三个反射面分为六个部分,如图 5 所示,那么入射光先后经过三个反射面反射,光线路径有 6 种,分别为^[6]

- 路径 1: ①→⑤+⑥→④ 路径 2: ②→③+④→⑤ 路径 3: ③→①+②→⑥
 路径 4: ④→⑤+⑥→① 路径 5: ⑤→③+④→② 路径 6: ⑥→①+②→③

当角锥棱镜存在二面角误差时,假设入射光线的方向余弦为 $A_0=(\alpha, \beta, \gamma)$,三个反射面的二面 $90^\circ+\delta_{12}$ 、 $90^\circ+\delta_{13}$ 、 $90^\circ+\delta_{23}$,其中 δ_{12} 、 δ_{13} 、 δ_{23} 分别是三个反射面的二面角误差。根据角锥棱镜的几何特性,各路径出射光线的矢量^[21]为

$$\begin{cases} A_1 = [(-1 - 2\delta_{12} - 2\delta_{13})\alpha + (2\delta_{12} - 1 - 2\delta_{23})\beta + (2\delta_{23} + 2\delta_{13} - 1)\gamma] \\ A_2 = [(-1 - 2\delta_{12} - 2\delta_{13})\alpha + (2\delta_{12} - 1 + 2\delta_{23})\beta + (-2\delta_{23} + 2\delta_{13} - 1)\gamma] \\ A_3 = [(-1 - 2\delta_{12} + 2\delta_{13})\alpha + (2\delta_{12} - 1 + 2\delta_{23})\beta + (-2\delta_{23} - 2\delta_{13} - 1)\gamma] \\ A_4 = [(-1 + 2\delta_{12} + 2\delta_{13})\alpha + (-2\delta_{12} - 1 + 2\delta_{23})\beta + (-2\delta_{23} - 2\delta_{13} - 1)\gamma] \\ A_5 = [(-1 + 2\delta_{12} + 2\delta_{13})\alpha + (-2\delta_{12} - 1 - 2\delta_{23})\beta + (2\delta_{23} - 2\delta_{13} - 1)\gamma] \\ A_6 = [(-1 + 2\delta_{12} - 2\delta_{13})\alpha + (-2\delta_{12} - 1 + 2\delta_{23})\beta + (2\delta_{23} + 2\delta_{13} - 1)\gamma] \end{cases} \quad (13)$$

由式(13)可知,含有二面角误差的角锥棱镜出射光线会分为六束光线,其方向与入射光线方向存在夹角,设出射光线矢量与入射光线矢量的夹角,即发散角 ϕ 为

$$\phi_j \approx \sin(A_0, A_j) = \frac{|A_0 \times A_j|}{|A_0| \cdot |A_j|} \quad (14)$$

式中, $j=1, 2, 3, 4, 5, 6$, 那么出射光线矢量与入射光线矢量夹角分别为

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_1 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{12} + \delta_{23})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{13} - \delta_{12})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23})^2}}{3} \\ \phi_2 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{12} - \delta_{23})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{12} - \delta_{13})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23})^2}}{3} \\ \phi_3 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{23} - \delta_{12})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{12} + \delta_{13})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{23} - \delta_{13})^2}}{3} \\ \phi_4 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{12} + \delta_{23})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{13} - \delta_{12})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{13} - \delta_{23})^2}}{3} \\ \phi_5 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{12} - \delta_{23})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{12} - \delta_{13})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{13} + \delta_{23})^2}}{3} \\ \phi_6 = \frac{2\sqrt{(2\delta_{13} + \delta_{23} - \delta_{12})^2 + (2\delta_{23} + \delta_{12} + \delta_{13})^2 + (2\delta_{12} + \delta_{23} - \delta_{13})^2}}{3} \end{array} \right. \quad (15)$$

若 $\delta_{12} = \delta_{13} = \delta_{23}$, 则 $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4 = \phi_5 = \phi_6$; 若 $\delta_{12} \neq \delta_{13} = \delta_{23}$, 则 $\phi_1 = \phi_3 = \phi_4 = \phi_6, \phi_2 = \phi_5$; 若 $\delta_{12} \neq \delta_{13} \neq \delta_{23}$, 则 $\phi_1 = \phi_4, \phi_2 = \phi_5, \phi_3 = \phi_6$ 。

通过上述讨论可知,二面角误差大小不同,出射光线发散角也不相同。由1.1节分析可知,外凸角锥棱镜产生的二面角误差属于上述第二种情况,出射光线分布同时具有轴对称与中心对称特性。二面角误差与发散角关系(第二种情况)如图6所示,通过图6可知,随着二面角误差的增大,发散角呈线性增大,出射光线发散程度增加,同时发散角 ϕ_1 与 ϕ_2 之间的偏差增大,由初始偏差0.5"到最终偏差4",偏差值增大8倍。

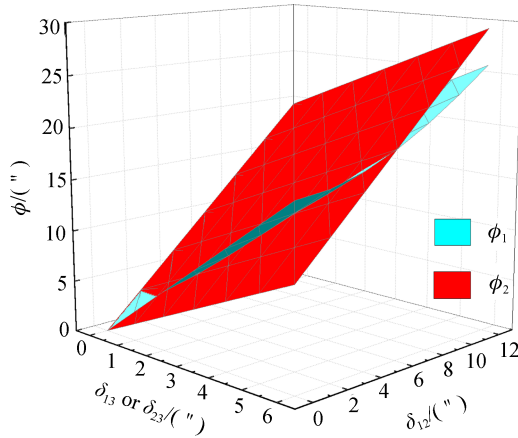


图6 二面角误差 δ 与发散角 ϕ 的关系

Fig. 6 Relationship between dihedral angle error δ and divergence angle ϕ

1.2.2 外凸状态下角锥棱镜反射面面形误差对反光特性的影响

外凸状态时角锥棱镜的反射面由平面变为曲面,以①、②区域为例,光线照射到曲面反射面时反射光线轨迹如图7所示。

已知反射面的法线矢量与光线的入射矢量,可以根据矢量形式的反射定律求得反射光线矢量

$$A' = A - 2N(A \cdot N) \quad (16)$$

式中, A' 为反射光线矢量, A 为入射光线矢量, N 为反射面法线矢量。

设入射光线与反射光线的夹角 κ

$$\kappa_n \approx \sin(A_n, A'_n) = \frac{|A_n \times A'_n|}{|A_n| \cdot |A'_n|} \quad (17)$$

式中,下标 n 为第 n 条光线。

通过图7与式(17)可知, n 值越大,曲面反射面的反射光线与入射光线的夹角越大,导致部分反射光线经

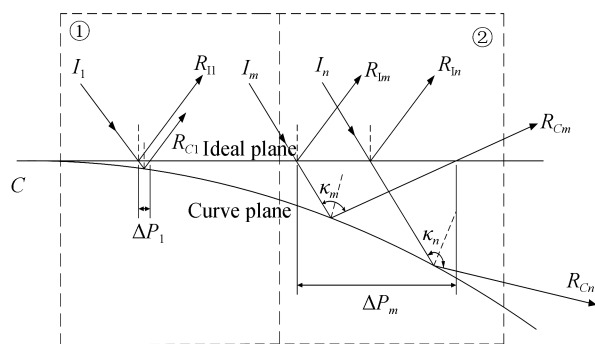


图7 曲面反射面反射光线传播轨迹
Fig. 7 Ray trace of curved reflecting surface

过第一次反射或者第二次反射后反射光线超出角锥棱镜反射面所定界面的范围,不能进行下一次反射,从而无法完成三次反射返回入射面。光线照射在②区域的反射点位置偏移量 ΔP_m 比①区域 ΔP_1 值大,会造成光线在②→③+④→⑤、⑤→③+④→②路径上完成三次反射的光线最少,反射光线偏移量及其与入射光线夹角较其他4路路径相比最大。由于弯曲角锥棱镜结构具有对称性质,路径1与路径6、路径2与路径5、路径3与路径4的光路轨迹相同,所以弯曲角锥棱镜的出射光线位置成轴对称分布,其对称轴与弯曲轴重合。

1.2.3 外凸状态下微棱镜反光膜形状对反光特性的影响

当微棱镜反光膜的弯曲角度为 ψ 时,平行光束水平照射于弯曲反光膜上,入射光线与不同位置单元角锥棱镜底面形成的入射角不同,如图8所示。若入射光线正入射角锥棱镜时,入射光线与角锥棱镜底面法线的夹角为入射角 i ,角锥棱镜有效面积随入射角 i 的变化,具体为^[22-23]

当 $0 \leq i \leq 19.49^\circ$ 时,角锥棱镜的有效反射面积为

$$S = \frac{(3\cos^2 i - 2)^2}{3\cos^2 i} \quad (18)$$

当 $19.49 \leq i \leq 35.26^\circ$ 时,角锥棱镜的有效反射面积为

$$S = \frac{4\cos^2 i}{27} (\sqrt{2} - \tan i)^4 \quad (19)$$

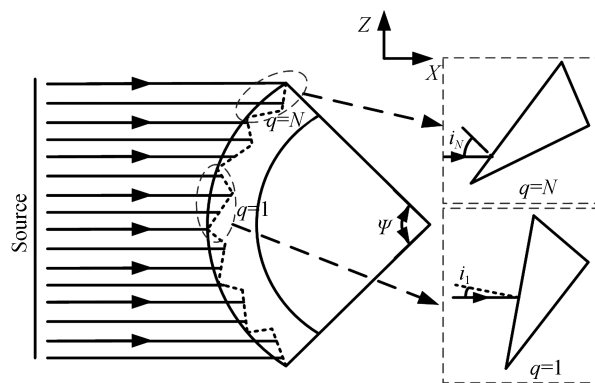


图8 弯曲反光膜上不同位置角锥棱镜的入射角
Fig. 8 Incident angles of CCR at different positions on curved reflective film

由式(18)、(19)得,随着入射角 i 增大,有效面积减少,当入射角 i 值超过 35.26° 时,角锥棱镜的有效面积为0,其回反射特性失效,即理想角锥棱镜允许的入射角最大为 35.26° 。当弯曲反光膜(假设组成单元均为理想角锥棱镜)的弯曲角度为 70.52° 时,膜上角锥棱镜都能有效反射光线,这个角度定义为最大理论有效弯曲角。假设入射光线与反光膜弯曲中心的角锥棱镜单元底面垂直,那么中心第一个角锥棱镜光线入射角 i_1 与第 q 个角锥棱镜入射角 i_q 的关系为

$$i_q \approx i_1 + \frac{(q-1)\psi}{2(N-1)} \quad (20)$$

式中, N 是中线到反光膜边界的角锥棱镜数目; q 表示中线到反光膜边界的第 q 个角锥棱镜。

由式(18)~(20)可知,弯曲反光膜上角锥棱镜的入射角由中心向两侧增大,两侧边界的角锥棱镜回反射特性降低甚至失效。当光束正入射弯曲反光膜(凸状)时,反光膜弯曲角度越大,二面角误差与面形误差变大,且两侧角锥棱镜的入射角变大,导致出射光线发散严重,反射率降低。

2 仿真与分析

通过光学仿真软件 TracePro 对弯曲的单个角锥棱镜及弯曲的角锥棱镜阵列进行光线追踪仿真。仿真设置:1)将角锥棱镜反射表面设为镜面,不会产生漫反射;2)入射光线为平行光束,反光膜模型材料为聚碳酸树脂(折射率为 1.59);3)忽略光线在空气和介质中传播时的损耗。

2.1 外凸角锥棱镜光线仿真

建立单个理想角锥棱镜模型,角锥棱镜棱边长为 $120 \mu\text{m}$,通过三维软件弯曲处理获得不同弯曲角度的角锥棱镜,导入仿真软件 TracePro。通过光线追踪仿真获得正入射不同弯曲角度下单个角锥棱镜出射光线的衍射光斑,如图 9 所示。结果表明:随着弯曲角度的增大,角锥棱镜出射光线衍射光斑发散程度增大,衍射范围增大,中心光斑缩小,且衍射形状慢慢向左右方向扩大,由正六边形变为两个对称的五边形;整体衍射光斑强度降低,其中,中心光斑强度最大,1、6 区域与 3、4 区域次之,2、5 区域强度衰减最快。虽然弯曲角锥棱镜反光范围增大,但反射光强度分布不均匀,长远距离反光效果较差。

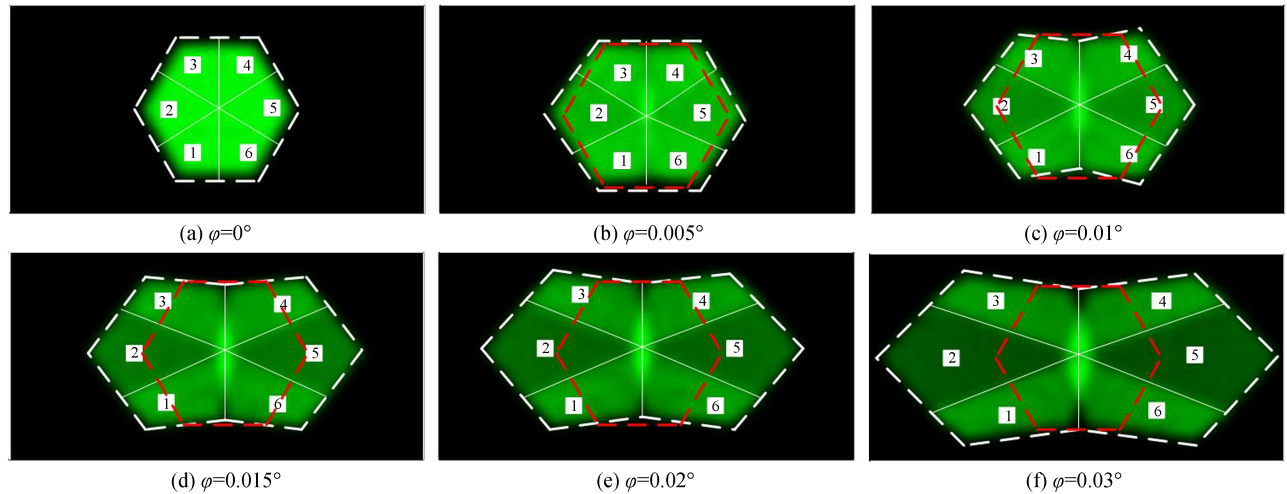


图 9 不同弯曲角度下单个角锥棱镜衍射光斑
Fig. 9 Diffraction pattern of single CCR at different bending angles

2.2 弯曲反光膜光线仿真

采用三维软件建立 $20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 角锥棱镜阵列模型,并对模型进行弯曲变形获得不同弯曲角度的角锥棱镜阵列,随后将弯曲的角锥棱镜阵列模型导入仿真软件中,在距离角锥棱镜阵列较远的地方设置矩形光源,光源是平行光线,在光源后方建立一个检测器来接收出射光线, η 为光源入射角,如图 10 所示。

将 $6 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 平行光源照射在不同弯曲角度的反光膜模型上(弯曲角度 ψ 数值为正值为外凸,负值为内凹),光束传输距离为 300 mm 的光斑光强分布如图 11 所示。每幅图由两部分组成,左侧部分为光斑在横截面上的光强分布,右侧部分为光斑光强沿 x 轴的分布。在仿真软件中,因入射光线数量有限,入射光线光强分布不均匀,因此,将光强值降低为一半时的位置定义为光斑的边缘,由此获得不同弯曲角度反光膜反射光斑的范围为 6 mm 、 6.8 mm 、 6.7 mm 、 15.2 mm 、 15.2 mm ,相同条件下,凹状反光膜与凸状反光膜的反射光发散程度一致。从图 11 可知,弯曲角度由 0° 到 40° ,反光横向距离由 6 mm 增大至 15.2 mm ,反光横向范围增

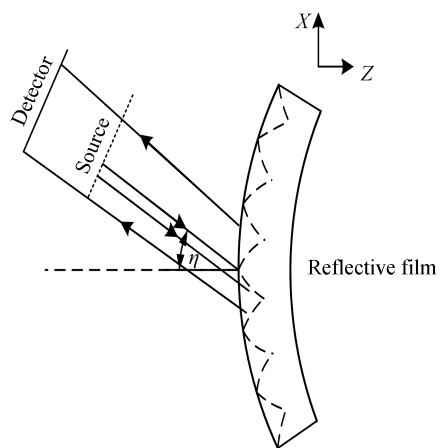
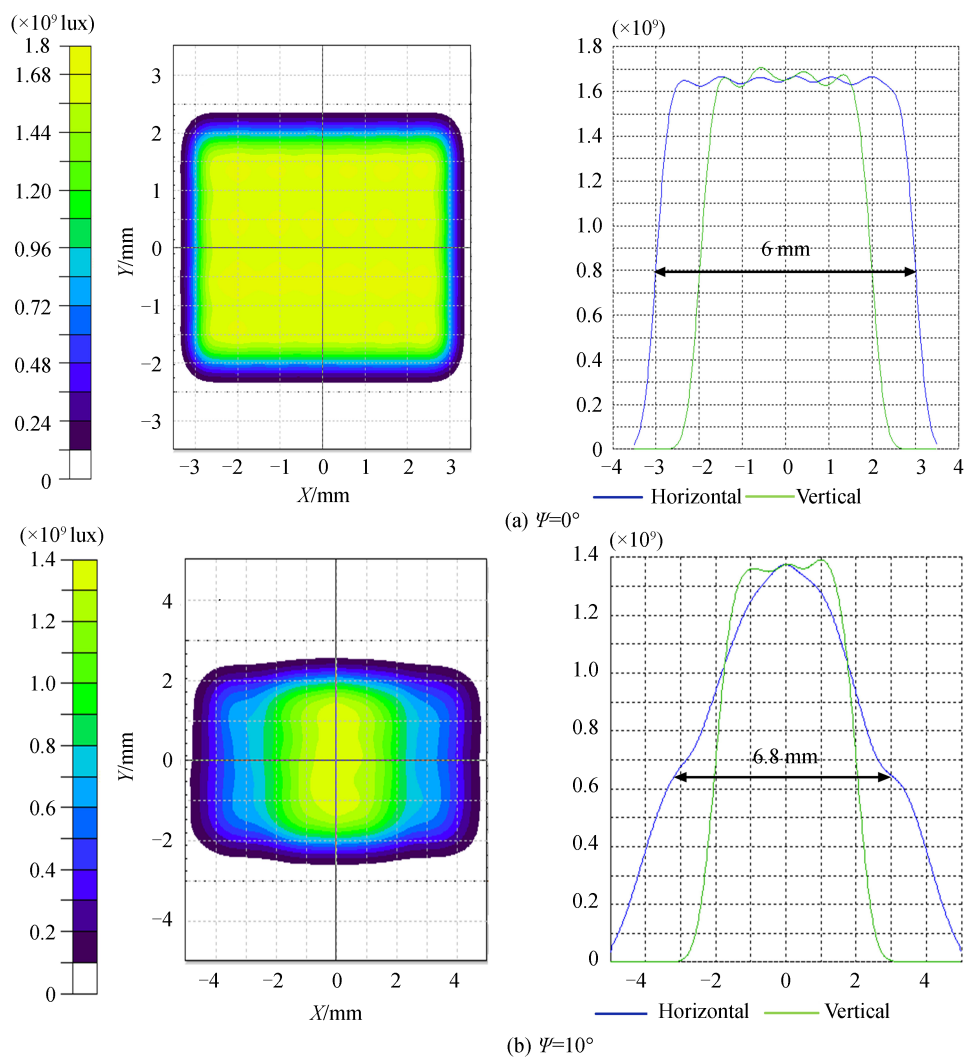


图 10 弯曲反光膜光线模拟模型
Fig. 10 Light simulation model of curved reflective film



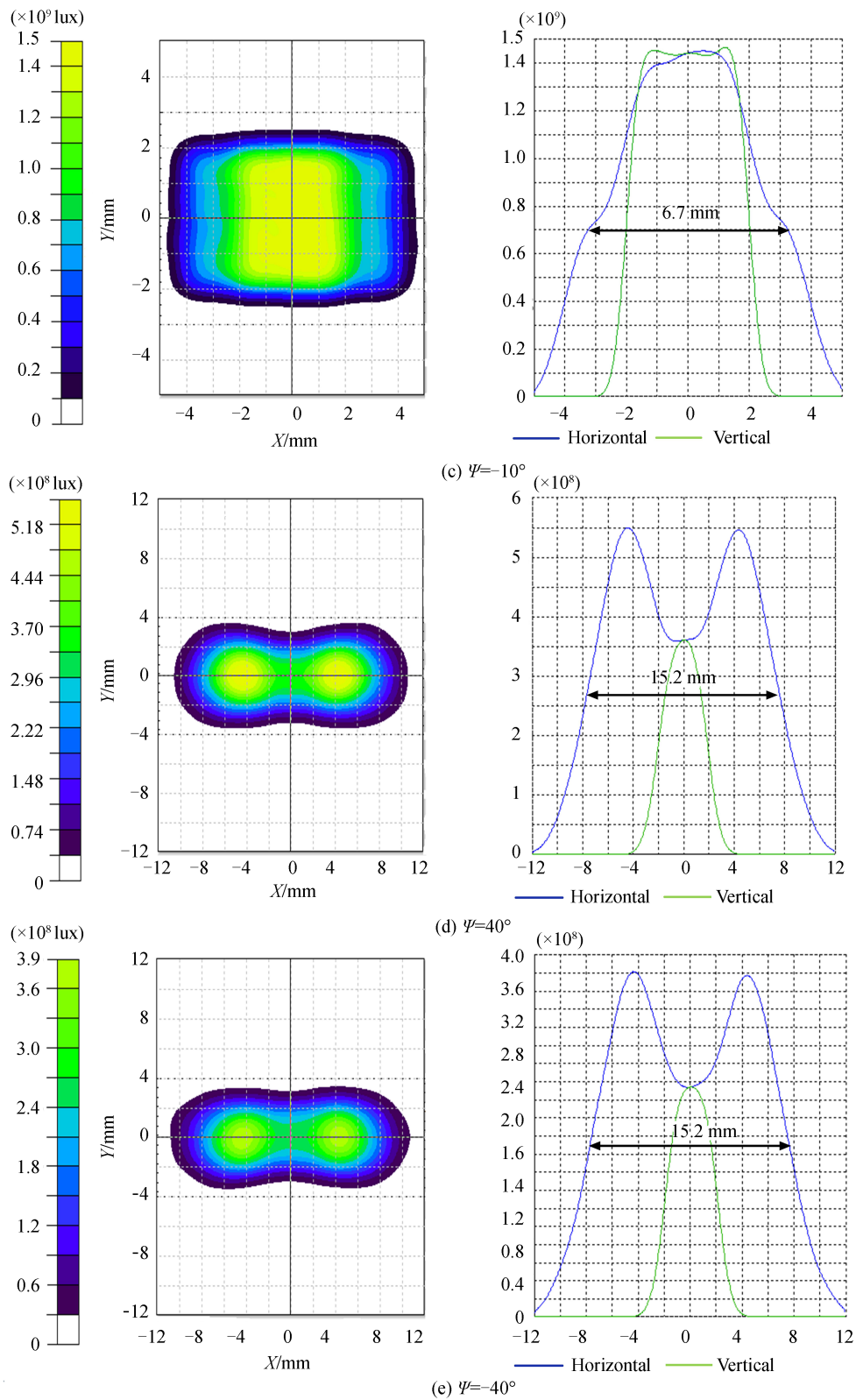


图 11 不同弯曲角度的反光膜出射光线光照度分析图

Fig. 11 Illumination analysis of reflected light from the reflective film with different bending angles

大 1.5 倍。另外,随着弯曲角度的增大,反射光斑向两侧膨胀,中心光强减弱,光强沿 x 轴的分布为驼峰状,关于中心轴对称。

不同状态反光膜弯曲角度与反射率变化如图 12 所示,从图中可知,在弯曲角度大于 20° 时,随着弯曲角

度的增大,弯曲反光膜的反射率降低,其中凸状反光膜的反射率比凹状增加20%,这是因为凹状反光膜单元角锥棱镜出射光线会偏离入射到其他位置的角锥棱镜,影响出射光线的传播,导致反射率下降。

图13为不同弯曲角度的反光膜入射角与反射率的关系变化,随着光线入射角的增大,平面反光膜的反射率急剧下降,但入射角在40°时反射率会发生突变。这是因为角锥棱镜一个反射面与入射光线垂直引起一次反射,反射光线与入射光线接近重合,造成检测器上的光线增多。另外反光膜的弯曲角度越大,反射率随光线入射角变化趋势越平缓;在入射角为30°时,弯曲反光膜的反射率优于平面反光膜。当光束入射角50°时,平面反光膜的反射率为0,而弯曲的反光膜仍能有效反射光线。

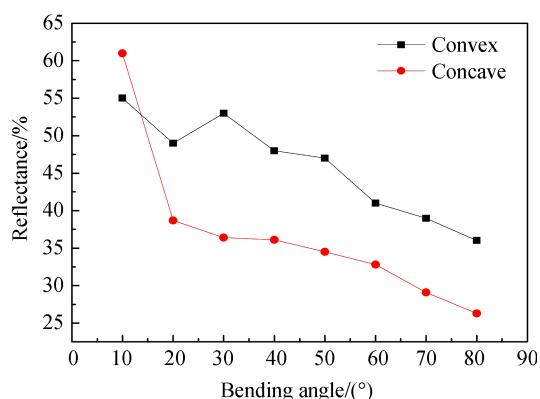


图12 不同状态反光膜不同弯曲角度的反射率
Fig. 12 Reflectance of the reflective film with different bending angles

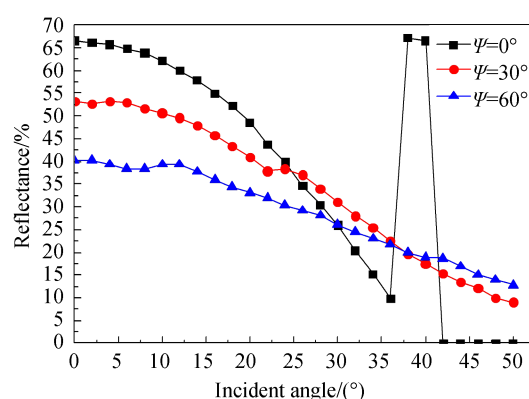


图13 不同弯曲角度下,反射率与光束入射角关系
Fig. 13 Relationship between reflectivity and beam incident angle at different bending angles

将不同横截长度分布均匀的平行光源照射于凸状反光膜上,光源在弯曲反光膜投影形成的弯曲角不同,如图14(a)所示。图14(b)弯曲角度分别为80°、90°与100°反光膜在光源投影形成不同弯曲角度反射率变化,随着弯曲角度的增大,反射率降低,在70°附近时反射率达到最低,随后又在80°时达到一个极值,最后又下降,这是因为入射光线与一个反射面直接反射导致反射率增加。从图14(b)可知,弯曲反光膜弯曲角度为80°、90°、100°能有效反射光线极限角分别为70°、70°、69.5°,与最大理论弯曲角70.52°相比,偏差不大。随着反光膜弯曲角度的增大,有效弯曲角度在减小,降幅0.7%。

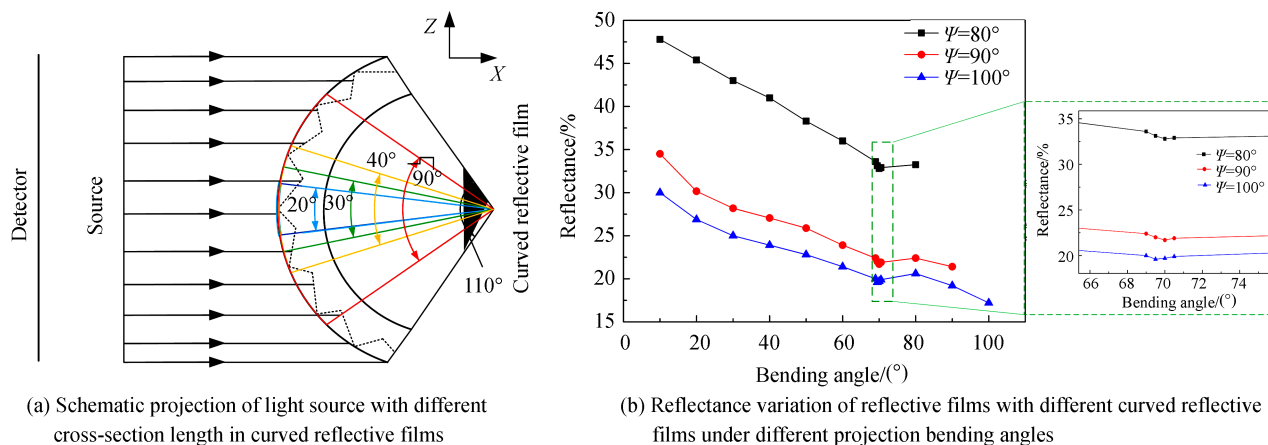


图14 不同弯曲反光膜在不同光源下反射率变化
Fig. 14 The reflectivity changes of different curved reflective films under different light sources

3 实验测量与结果

3.1 不同状态反光膜单元角锥棱镜结构测量

为进一步验证弯曲反光膜角锥棱镜的变化,对反光膜弯曲前后角锥棱镜的结构进行测量,反光膜样品参数如表1所示。首先将反光膜样品分别贴附于平面基体和圆柱基体上,获得平面状态的反光膜和弯曲状

态的反光膜;因为反光膜样品正面具有良好的反光效果,光学仪器测量角锥棱镜难度高,且反射面间的二面角无法测量,因此测量反光膜背面凸角锥棱镜,通过凸角锥棱镜间二面角变化说明角锥棱镜反射面变化。通过扫描电镜获得相应状态下反光膜背面单元角锥棱镜的结构;利用激光共聚焦显微镜获得上述样品的三维结构图,并测量角锥棱镜间二面角与高度大小。如图15所示为不同状态下反光膜微棱镜几何结构测量结果,从图中可知弯曲后单元角锥棱镜底面交汇点分离,底边由共线关系变为不共线,其高度值由 $64\ \mu\text{m}$ 增大为 $69\ \mu\text{m}$;图15(a)相邻角锥棱镜 OO_1 、 OO_2 间二面角值基本为 70.5° ,而图15(b)相邻角锥棱镜 OO_1 间二面角值也为 70.5° ,这是因为图2中反射面 AOB 的中心线不发生变化, OO_1 间二面角不发生变化,但 OO_2 间二面角值发生变化,由 65° 增加至 73° ,因为 OO_2 间的两个反射面凸起,即图2中反射面 AOC 与反射面 BOC 变形引起二面角变化。实际观察反射面变化趋势与1.1节分析一致。

表1 反光膜样品参数
Table 1 Parameters of reflective film sample

Type of reflective film	Material	CCR side length	CCR height	Thickness
Micro-prism reflective film	PC	$167\ \mu\text{m}$	$65\ \mu\text{m}$	$0.4\ \text{mm}$

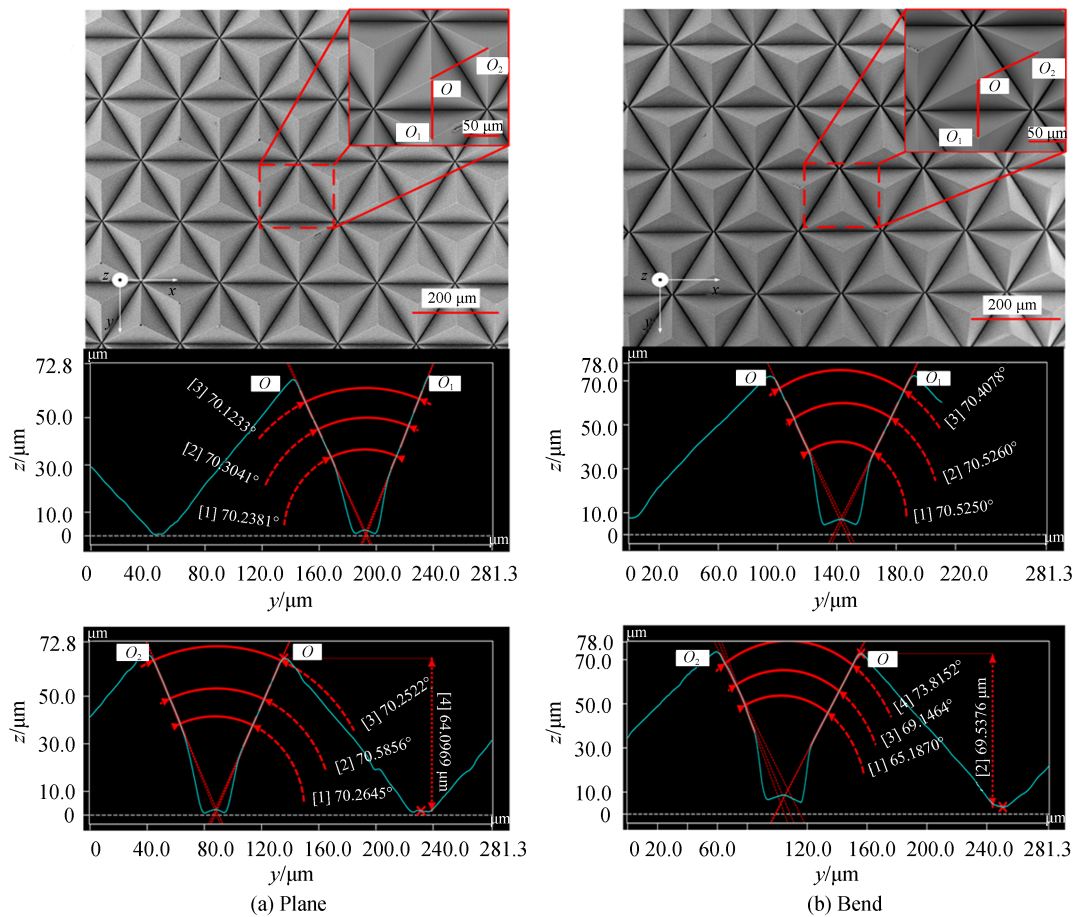


图15 反光膜单元角锥棱镜结构
Fig. 15 Reflective film unit structure CCR

3.2 不同状态反光膜反光效果测量

反光膜效果采用逆反射系数进行评价,通过逆反射系数测量仪测量不同状态反光膜的逆反射系数。测量系统如图16所示,实验仪器为STT-101型逆反射标志测量仪,样品为 $70\ \text{mm} \times 50\ \text{mm}$ 的反光膜,将5个样品分别贴于平面基体、半径大小为 $23.6\ \text{mm}$ 、 $19\ \text{mm}$ 、 $15.7\ \text{mm}$ 、 $10\ \text{mm}$ 的圆柱形状基体上,形成弯曲角度为 0° 、 170° 、 210° 、 255° 、 360° 的反光膜,固定测量仪,并通过旋转载物圆盘,获得不同弯曲角度反光膜在不同入射角下的逆反射系数,每个位置测量10次取平均值。测量的逆反射系数变化曲线如图17所示,从图中可知弯曲

角度为 0° ,随着入射角增大,逆反射系数降低;另外弯曲反光膜弯曲角度增大,逆反射系数降低,但入射角的变化基本不会影响逆反射系数数值。

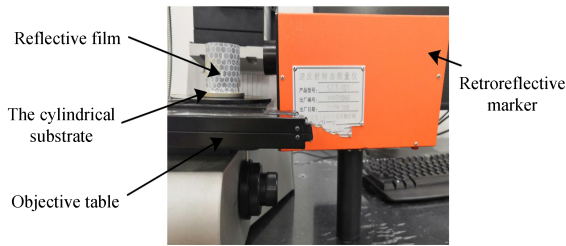


图 16 测量系统
Fig. 16 Measuring system

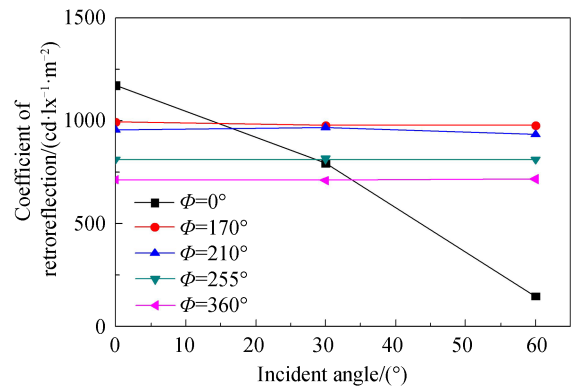


图 17 不同入射角下不同弯曲角度反光膜的逆反射系数
Fig. 17 Retroreflectivity of reflective film at different angles of incidence at different bending angles

4 结论

分析了反光膜二维外凸状态下单元角锥棱镜结构变化,建立了单个弯曲角锥棱镜弯曲角度与反射面二面角之间映射关系。利用几何光学及光学仿真软件对单个弯曲角锥棱镜及弯曲反光膜反光特性进行分析与仿真,仿真结果表明:1)光线正入射单个弯曲角锥棱镜及弯曲反光膜的出射光线呈轴对称分布,光照范围向两侧膨胀发散,中心光强降低,但反射光强度分布不均匀,远距离反光效果较差;2)当弯曲角度大于 20° ,凸状反光膜的反射率比凹状平均增加 20% ,凸状反光效果强于凹状,对于大曲率的曲面采用凸状形式反光效果更好;3)凸状反光膜有效反射弯曲角会随着弯曲角度的增大而减小,降幅为 0.7% ,但其值与最大理论有效反射角 70.52° 相差不大;4)与平面反光膜相比,弯曲反光膜对光线入射角的要求低,弯曲角度越大,能反射更大入射角度的光线,其反光范围也随弯曲角度的增大而扩大。最后,实验测量结果也验证了理论分析的正确性。

参考文献

- [1] GUAN Yang. Past and present life of traffic sign lighting [J]. *Auto & Safety*, 2018(8): 70-75.
官阳. 交通标志照明技术的前世今生[J]. *汽车与安全*, 2018(8): 70-75.
- [2] WOOD J M, MARSZALEK R, LACHEREZ P, et al. Configuring retroreflective markings to enhance the night-time conspicuity of road workers [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2014, 70: 209-214.
- [3] WOOD J M, TYRRELL R A, MARSZALEK R, et al. Using reflective clothing to enhance the conspicuity of bicyclists at night [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2012, 45: 726-730.
- [4] CAI Yanmin, CHEN Gang, CHEN Gaoting, et al. On the effective reflection area of a cubic corner reflector[J]. *Optical Technique*, 2000, 26(3): 253-254+257.
蔡艳民, 陈刚, 陈高庭, 等. 立方角锥棱镜的有效反射区[J]. *光学技术*, 2000, 26(3): 253-254+257.
- [5] LI Zhen, ZHENG Jun, WEI Shangchen, et al. Evaluation of reflective performance of cube corner array retro-reflector[J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1995, 16(2): 109-115.
李真, 郑筠, 魏尚辰, 等. 角锥棱镜阵列式反光膜性能及其评价的研究[J]. *计量学报*, 1995, 16(2): 109-115.
- [6] PI Jun, SHANG Kai. Normal incident invalid light of micro prism reflective film based on tracepro [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(4): 57-62.
皮钧, 商开. 基于Tracepro的微棱镜反光膜正入射无效光分析[J]. *光子学报*, 2014, 43(4): 57-62.
- [7] LUO Han, YUAN Changyang. Structure optimization of retroreflective film based on laminae combination technique [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(2): 224-229.
罗汉, 袁长迎. 基于薄片组合技术的反光膜结构优化设计[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 224-229.
- [8] LOU Y, WANG H, LIU Q, et al. Analysis and fabrication of corner cube array based on laser direct writing technology [J]. *Applied optics*, 2010, 49(29): 5567-5574.
- [9] SWANK A J, ARETSKIN-HARITON E D. The influence of dihedral angle error stability on beam deviation for hollow retro-reflectors[DB/OL]. (2018-07-01)[2020-10-20]. <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180005166>.

- [10] YE Yidong, PENG Yong, CHEN Tianjiang, et al. Numerical simulating of cube corner retroreflector[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 485-489.
叶一东, 彭勇, 陈天江, 等. 角锥棱镜后向反射器的数值模拟研究[J]. *光学学报*, 2003, 23(4): 485-489.
- [11] ZHOU Xiaofeng, QI Zhumin, LUO Xiangqian, et al. A method to diverge reflected beam uniformly using cube-corner retroreflector array with dihedral angle tolerances[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(8): 1-7.
周晓凤, 戚祖敏, 罗向前, 等. 利用含二面角误差的角锥棱镜阵列实现反射光束均匀发散[J]. *物理学报*, 2017, 66(8): 1-7.
- [12] QI Zhumin, ZHOU Xiaofeng, ZHU Jianguo, et al. Method to diverge reflected beam using planoconcave len and normal cube-corner prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 277-283.
戚祖敏, 周晓凤, 朱建国, 等. 利用平凹透镜和标准角锥棱镜实现反射光束发散[J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 277-283.
- [13] NILSEN R B. Retroreflective microprismatic material with top face curvature and method of making same: U.S. Patent 5, 780,140[P]. 1998-7-14.
- [14] OHTERA R, WAKO K, ISHITAKA Y, et al. Novel directional projection screen using divergent corner cube retroreflector with a three-sided curved surface (D-CCR) [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2018, 26(4): 246-254.
- [15] UCHIDA T, OHTERA R, WAKO K, et al. Diverted corner cube retroreflector (D-CCR) for functional projection screen [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(11): 700-707.
- [16] HUANG Jian, XIAN Hao, JIANG Wenhan, et al. The reflected beam's phase aberration induced by fabrication errors of corner cube retroreflector [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1951-1955.
黄健, 鲜浩, 姜文汉, 等. 角锥棱镜误差引起的反射光束相位误差分析[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1951-1955.
- [17] ZHOU H, LI S, ZHENG G. The phase mode of reflected beam from laser retroreflector with dihedral angle and flatness error [J]. *Optical Review*, 2011, 18(1): 1-6.
- [18] WANG T, WANG W, GENG D, et al. Calculation of the light intensity distribution reflected by a spherical cube corner retroreflector array[J]. *Optics and Spectroscopy*, 2014, 117(1): 158-165.
- [19] BIEG B. Polarization properties of a metal corner-cube retroreflector [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 96: 729-732.
- [20] WANG T, WANG W, DU P, et al. Calculation of the light intensity distribution reflected by a planar corner-cube retroreflector array with the size of centimeter and above[J]. *Optik*, 2013, 124(22): 5307-5312.
- [21] NIE Hui, WENG Xing-tao, LI Song, et al. The far-filed diffractive characteristics of cube-corner prism [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(12): 1470-1474.
聂辉, 翁兴涛, 李松, 等. 角锥棱镜的远场衍射特性[J]. *光学学报*, 2003, 23(12): 1470-1474.
- [22] ZHOU Bin, LIU Bingqi, ZANG Yu. Analysis of optical characteristics of cube corner retro-reflector with oblique incident angle[J]. *Laser&Infrared*, 2011, 41(11): 1231-1234.
周斌, 刘秉琦, 张瑜. 斜入射条件下角锥棱镜光学特性分析[J]. *激光与红外*, 2011, 41(11): 1231-1234.
- [23] LIU Wangli, OUYANG Jianfei, QU Xinghua. Effect of incident laser beam angle varying on cube coner retro-reflector measurement accuracty[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(2): 286-291.
刘万里, 欧阳健飞, 曲兴华. 激光光束入射角度变化对角锥棱镜测量精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 286-291.