

## 激光与光电子学进展

## 角锥单元倾斜角和拼接结构对逆反射效率的影响

杨光<sup>1\*</sup>, 段明辉<sup>1</sup>, 李真真<sup>2</sup>, 陈建华<sup>2</sup><sup>1</sup>集美大学海洋装备与机械工程学院, 福建 厦门 361021;<sup>2</sup>福建夜光达科技股份有限公司, 福建 泉州 362200

**摘要** 微棱镜型反光膜存在着有效入射角范围小(广角性)和不同方位角的逆反射效率相差大(方向各异性)的问题,解决上述问题较为简单的方法是改变角锥(CCR)单元倾斜角和采用拼接结构。基于几何光学原理,使用光线追踪软件计算了不同结构的 CCR 阵列。基于微棱镜反光膜的逆反射原理,分析了 CCR 单元的倾斜角度、入射光角度和拼接结构对逆反射效率的影响。结果表明,当使用倾斜 CCR 阵列时,方位角 0° 方向的逆反射效率提高了 20 个百分点以上。采用不同倾斜角拼接结构后,不同方向逆反射效率的最大偏差降低了 10% 以上。将 CCR 阵列倾斜角的仿真结果与反光膜的亮度测试结果进行对比,发现逆反射效率的变化趋势一致,证实了仿真模型的可靠性。以上研究结果可用于微棱镜反光膜的结构设计和优化。

**关键词** 几何光学; 角锥阵列; 逆反射效率; 倾斜角; 拼接结构

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1308002

## Influence of Inclination Angle and Splicing Structure of Cube-Corner Reflector Element on Retroreflection Efficiency

Yang Guang<sup>1\*</sup>, Duan Minghui<sup>1</sup>, Li Zhenzhen<sup>2</sup>, Chen Jianhua<sup>2</sup><sup>1</sup>College of Marine Equipment and Mechanical Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, Fujian, China;<sup>2</sup>Fujian Yegood Technology Co., Ltd., Quanzhou 362200, Fujian, China

**Abstract** Microprism reflector films are limited by various factors, such as a narrow range of effective incidence angles (wide angle) and large difference in retroreflection efficiency at different azimuth angles (different directions). These limitations can be resolved by changing the inclination angle of the cube-corner reflector (CCR) element and using the splicing structure. In this study, CCR arrays with different structures are calculated using the ray-tracing software based on the principle of geometrical optics. Herein, the influence of the inclination angle of the CCR element, angle of the incident light, and the splicing structure on the retroreflection efficiency is analyzed using the retroreflection principle of microprism reflective films. The results show that the retroreflective efficiency in the azimuth 0° direction increases by more than 20 percentage points when using a inclination angle CCR array. Furthermore, the maximum deviation of the retroreflective efficiency in different directions reduces by more than 10% after adopting a spliced structure with different inclination angles. The simulation results of the inclination angle of CCR arrays are compared with rightness test results of the reflective film, and the variation trend of the retroreflective efficiency is found to be consistent, confirming the reliability of the simulation model. These research results can be used in the structural design and optimization of microprism reflective films.

**Key words** geometrical optics; cube-corner reflector array; retroreflection efficiency; inclination angle; splicing structure

## 1 引言

微棱镜型反光膜凭借其优异的反光性能,在高等级公路上被广泛使用<sup>[1-2]</sup>。按照角锥的形状特征进行分类,角锥单元分为正角锥单元和非正角锥单元(倾斜角单元)两类。正角锥反光膜问世最早,应用范围最

广<sup>[3-4]</sup>。然而,正角锥反光膜存在着有效入射角低(反光膜法线与入射光线的夹角)和方向各异性(相同入射角下入射光线绕法线旋转会产生很大的亮度差异)的问题。微棱镜结构反光膜的逆反射效率受多个设计变量影响,它们之间的依赖关系比较复杂,涉及到角锥几何形状,也涉及到反光膜拼接方式。给予角锥单元一

收稿日期: 2021-08-09; 修回日期: 2021-08-23; 录用日期: 2021-08-29

基金项目: 福建省自然科学基金(2017J01700)、集美大学国家基金培育项目(ZP2021018)

通信作者: \*yangg@jmu.edu.cn

定的倾斜角,可以获得某些方向较高的逆反射效率或提高整体反射均匀性;拼接反光膜可以均匀化 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 两个方向的逆反射效果。反光膜的研发工艺包括:通过超精密切削制备母模→电铸制备子膜→热压印制备原膜样品→检测样品的逆反射效率→确定结构设计是否满足要求。其中,母模的超精密切削周期长,导致研发成本升高。反光膜设计人员和制造工艺师以及光学性能检测人员,迫切需要能够全面反映上述依赖关系的设计理论和计算工具。数值仿真可以预先评估角锥棱镜的反光性能<sup>[5-6]</sup>,对于缩短产品的研发周期、节省成本有重要意义。

对于角锥棱镜反光性能的研究,源于1968年发明的微角锥棱镜定向反射技术<sup>[7]</sup>。Eckhardt<sup>[8]</sup>提出了简单的角锥反射模型有效面积计算方法。袁景和等<sup>[9]</sup>提出了反演投影法计算角锥有效面积,并计算给定角度的能量反射率。皮钧等<sup>[10]</sup>通过tracepro建模分析了衬底厚度与逆反射效率的关系。Kim等<sup>[11-12]</sup>通过几何方法提出了立方角锥逆反射效率的通用计算公式。袁长迎等<sup>[13]</sup>设计了新型的程序计算了立方角锥阵列的逆反射效率的方向各异性。

综上所述,国内外对于正角锥结构光学性能的研究较多<sup>[14-19]</sup>,对倾斜角单元<sup>[20-21]</sup>的研究还较少。对于不同角锥阵列的拼接方式<sup>[22]</sup>更是缺乏研究。本文在对角锥结构光学性能的研究中发现:解决正角锥微棱镜型反光膜广角性差和方向各异性的问题,改变角锥单元倾斜角和采用拼接结构是简单易行的方法。本文基于几何光学的反射定律和菲涅耳方程,研究了单元倾斜角和拼接结构对反光膜广角性和方向各异性的改善效果,指出了合适的倾角变化区间和结构拼接方式,并通过倾斜角锥阵列反光膜的测试验证了仿真结果。

## 2 微棱镜反光膜逆反射效率计算原理

### 2.1 微棱镜反光膜基本结构

微棱镜反光膜基本结构包含一层阵列排布的角锥(CCR)单元,以及一层与CCR单元基材相同的入射层。CCR单元作为反光层,其材质一般采用聚碳酸酯(polycarbonate, PC)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)和聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)等高分子树脂构成。在CCR单元下方为空气层。通过反光层和空气层之间折射率的变化,光线通过在分界面可以发生全反射,全反射的临界角度 $\theta_c$ 由反光层的折射率决定:

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n} \quad (1)$$

为了具体描述入射光于反光膜的相对位置关系,建立如图1所述坐标系。 $\theta$ 为入射角, $\phi$ 为方位角。本文研究在反光层折射率给定的时候,不同结构的CCR阵列在不同入射方向的逆反射效率情况。

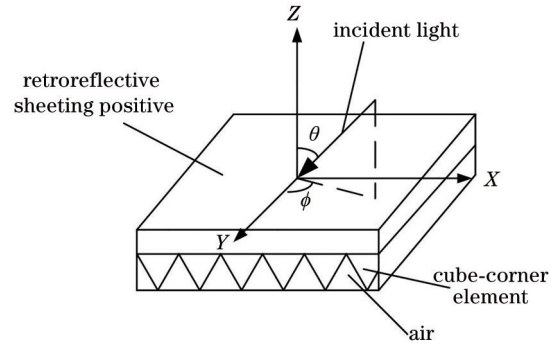


图1 入射光线空间位置分布图

Fig. 1 Spatial distribution of incident light

### 2.2 微棱镜反光膜逆反射实现原理

如图2(a)所示,实验中单个CCR单元是由3个相互垂直的锥面AOB、AOC、BOC构成。入射光线只有经过3个锥面的全反射才能形成逆反射光线。如图2(b)所示,入射光线 $L_1$ 经过折射进入3棱锥内部,依次通过 $Y'OZ'$ 面、 $X'OZ'$ 面、 $X'OY'$ 面,实际传播轨迹的交点为 $P_1-P'_2-P'_3$ ,其镜像传播路径的交点为 $P_1-P_2-P_3$ 。如图2(c)所示把3个面限定为I区域、II区域、III区域。可知只有 $P_1、P'_2、P'_3$ 位于3个锥面才能形成逆反射光路,即 $P_1、P_2、P_3$ 都落在3个区域内才能形成逆反射光。

所以光线形成逆反射光的方式有6种: I → II → III, I → III → II, II → I → III, II → III → I, III → I → II, III → II → I。

如图2(a)所示,入射平面ABC的平面方程为

$$\frac{x}{x_0} + \frac{y}{y_0} + \frac{z}{z_0} = 1 \quad (2)$$

如图3(a)所示,在 $X'Y'Z'$ 坐标系下 $OO'' \perp$ 平面ABC, $OO''$ 则为其法向量:

$$\vec{n} = \left( \frac{1}{x_0}, \frac{1}{y_0}, \frac{1}{z_0} \right) \quad (3)$$

为方便计算把法向量归一化:

$$\left( \frac{1}{x_0} \right)^2 + \left( \frac{1}{y_0} \right)^2 + \left( \frac{1}{z_0} \right)^2 = 1 \quad (4)$$

可以得出

$$\vec{n} = (\cos \phi' \sin \theta', \sin \phi' \sin \theta', \cos \theta') \quad (5)$$

如图3(b)所示,建立一个新坐标系 $X''Y''Z''$ 坐标系,从 $X'Y'Z'$ 坐标系的点 $(x, y, z)$ 到 $X''Y''Z''$ 坐标系的对应点 $(x'', y'', z'')$ 的转换方程为

$$\begin{bmatrix} x - \frac{1}{x_0} \\ y - \frac{1}{y_0} \\ z - \frac{1}{z_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \theta' & -\sin \phi' & \cos \phi' \sin \theta' \\ \sin \phi' \cos \theta' & \cos \phi' & \sin \phi' \sin \theta' \\ -\sin \theta' & 0 & \cos \theta' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} \quad (6)$$

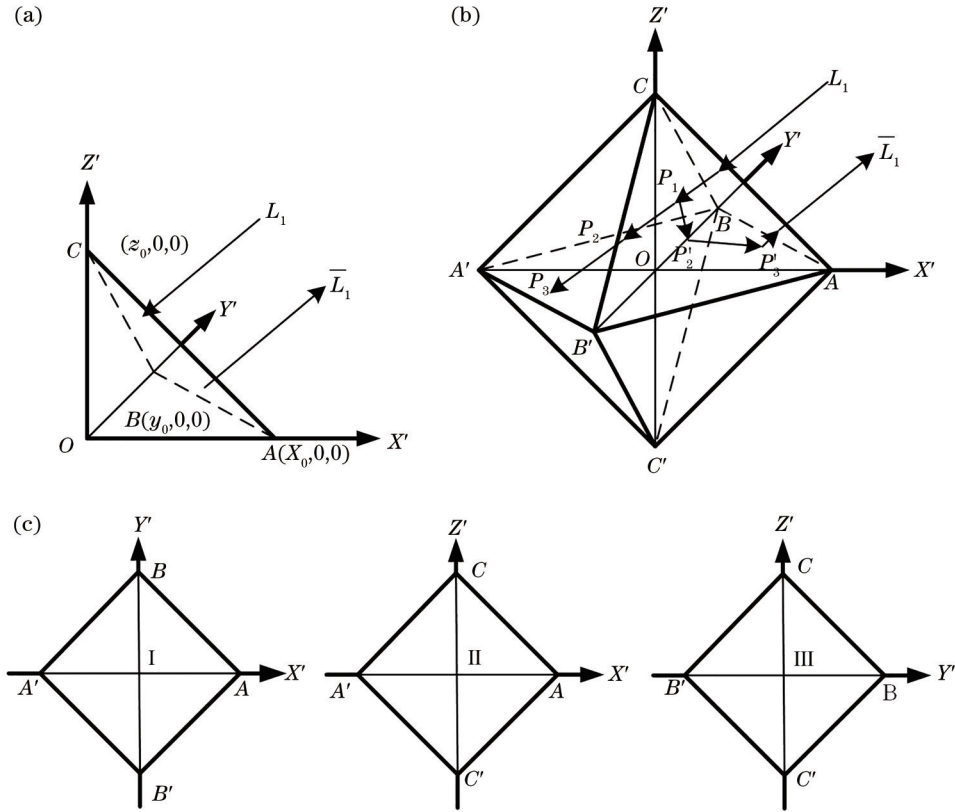


图 2 逆反射光线形成原理图。(a)单个 CCR 单元在 \$X'Y'Z'\$ 坐标系下的表示；(b)形成逆反射光的镜像路径；(c)逆反射光形成的必经区域

Fig. 2 Principle diagram of retroreflective ray formation. (a) Representation of single CCR element in \$X'Y'Z'\$ coordinate system; (b) mirror path of retroreflective ray formation; (c) required areas for retroreflective ray formation

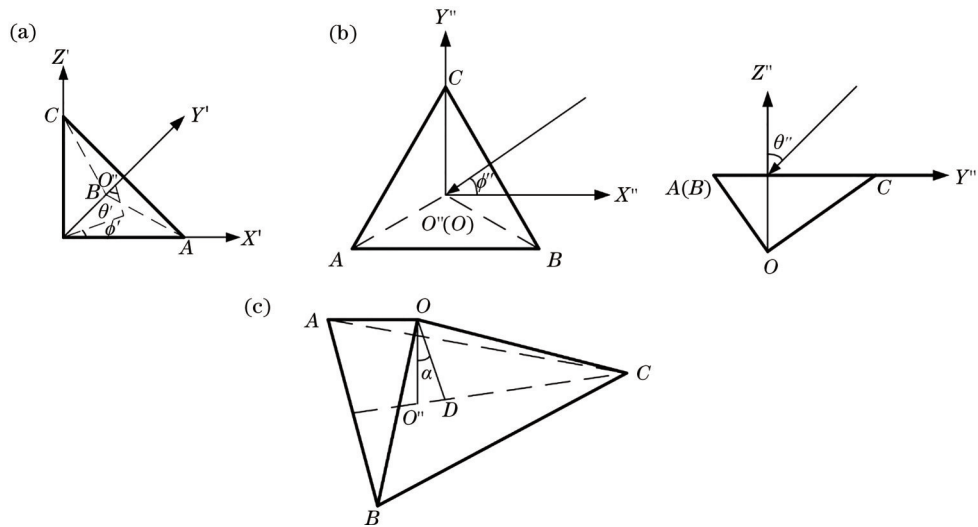


图 3 坐标系转换图。(a) \$X'Y'Z'\$ 坐标系下的 CCR 单元；(b) \$X''Y''Z''\$ 坐标系下的 CCR 单元；(c) CCR 单元的前倾角

Fig. 3 Coordinate system transformation diagram. (a) \$X'Y'Z'\$ coordinate system of CCR element; (b) \$X''Y''Z''\$ coordinate system of CCR element; (c) inclined angle of CCR element

即 \$X'Y'Z'\$ 坐标系下的向量 \$(k\_x, k\_y, k\_z)\$ 到 \$X''Y''Z''\$ 坐标系下的向量 \$(k\_{x''}, k\_{y''}, k\_{z''})\$ 的转换矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi' \cos \theta' & -\sin \phi' & \cos \phi' \sin \theta' \\ \sin \phi' \cos \theta' & \cos \phi' & \sin \phi' \sin \theta' \\ -\sin \theta' & 0 & \cos \theta' \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_{x''} \\ k_{y''} \\ k_{z''} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

入射向量为

$$(k_x'', k_y'', k_z'') = (\cos \phi'' \sin \theta'', \sin \phi'' \sin \theta'', -\cos \theta''), \quad (8)$$

通过折射率为  $n$  的材料则

$$(k_x''', k_y''', k_z''') = \frac{1}{n} (\cos \phi'' \sin \theta'', \sin \phi'' \sin \theta'', -\sqrt{n^2 - (\sin \theta'')^2}) = (\cos \phi''' \sin \theta''', \sin \phi''' \sin \theta''', -\cos \theta'''). \quad (9)$$

即折射光线的方向向量可以通过  $\theta'''$  和  $\phi'''$  来表示, 也即在  $X''Y''Z''$  坐标系中,  $\theta''$  为入射角,  $\theta'''$  为折射角。

如图 3(c) 所示,  $OO'' \perp$  底面  $ABC$ ,  $D$  为底面  $ABC$  的重心,  $OD$  为 CCR 单元的对称轴,  $OO''$  与  $OD$  之间的夹角为 CCR 单元的前倾角 ( $\alpha$ )。

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{x_0}{3}\right)^2 + \left(\frac{y_0}{3}\right)^2 + \left(\frac{z_0}{3}\right)^2}}, \quad (10)$$

则要形成逆反射光的条件即在锥面上的角度要大于临界角  $\theta_c$ , 当镀金属层时的临界角为 0 时:

$$\begin{cases} |k_x| \leq \cos \theta_c \\ |k_y| \leq \cos \theta_c \\ |k_z| \leq \cos \theta_c \end{cases} \quad (11)$$

设入射向量的入射点为  $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , 则可计算出与 3 个面的交点分别为

$$\begin{cases} (x_{xy}, y_{xy}, z_{xy}) = \left(-\frac{k_x \bar{z}}{k_z} + \bar{x}, -\frac{k_y \bar{z}}{k_z} + \bar{y}, 0\right) \\ (x_{xz}, y_{xz}, z_{xz}) = \left(-\frac{k_x \bar{y}}{k_y} + \bar{x}, 0, -\frac{k_z \bar{y}}{k_y} + \bar{z}\right) \\ (x_{yz}, y_{yz}, z_{yz}) = \left(0, -\frac{k_y \bar{x}}{k_x} + \bar{y}, -\frac{k_z \bar{x}}{k_x} + \bar{z}\right) \end{cases} \quad (12)$$

这 3 个交点分别位于 I、II、III 面内。满足这两个条件的点的集合面积为  $S(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ , 如图 4 所示, 在整体阵列设计中, 有 4 种具有不同角分布的 CCR 单元: 第 1 种类型不旋转; 第 2 种类型旋转  $180^\circ$ ; 第 3 种类型旋转  $90^\circ$ ; 第 4 种类型旋转  $270^\circ$ 。

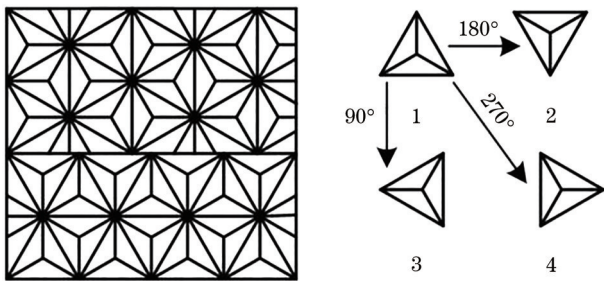


图 4 CCR 分类图

Fig. 4 CCR classification diagram

那么, 第 1 种类型的有效反射面积比为

$$r_1 = \frac{S_{(\phi)}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}{S_{ABC}}, \quad (13)$$

第 2 种类型的有效反射面积比为

$$r_2 = \frac{S_{(\phi+\pi)}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}{S_{ABC}}, \quad (14)$$

因此, 当采用阵列分布时:

$$r = \frac{r_1 + r_2}{2}. \quad (15)$$

当采用  $90^\circ$  拼接结构时, 第 3 和第 4 种布置类型的 CCR 单元的有效反射面积为

$$\begin{cases} r_3 = \frac{S_{(\phi+\frac{\pi}{2})}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}{S_{ABC}} \\ r_4 = \frac{S_{(\phi+\frac{3\pi}{2})}(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})}{S_{ABC}} \end{cases} \quad (16)$$

因此

$$r = \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_4}{4}. \quad (17)$$

### 3 仿真与讨论

建立如图 5 所示的仿真模型。视三棱锥表面为光滑的表面, 忽略光的漫反射和衍射, 忽略介质与空气之间的光吸收率。计算了不同前倾结构 CCR 阵列的反射率, 测量了  $\alpha=12.85^\circ$  CCR 阵列薄膜的逆反射系数, 并对仿真结果进行了比较。此外, 还讨论了折射率和倾斜角对垂直拼接的影响。

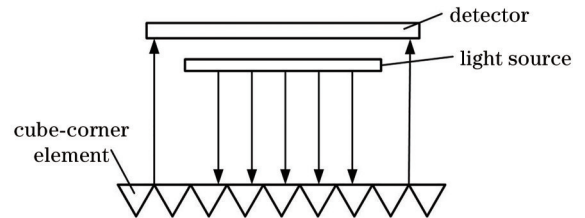


图 5 射线仿真示意图

Fig. 5 Schematic diagram of ray simulation

#### 3.1 前倾 CCR 阵列的逆反射效率计算

为研究前倾角  $\alpha$  对结构反光性能的影响, 如图 6 所示建立了  $\alpha=0^\circ, \alpha=5^\circ, \alpha=10^\circ, \alpha=15^\circ$  的仿真模型。

CCR 阵列是一种对称和周期性排列的结构。在仿真中, 将材料的折射率设置为 1.58, 每  $10^\circ$  计算一次方位角。结果显示, 当入射角为  $\theta > 20^\circ$  时, 不同方向的逆反射效率的差异显著增加。因此, 以  $\theta = 20^\circ$  为边界, 当入射角为  $\theta < 20^\circ$  时, 每  $10^\circ$  进行一组模拟, 当  $\theta > 20^\circ$  时, 每  $5^\circ$  进行一组模拟。仿真结果如图 7 所示。

如图 7(a) 所示, 当方位角  $\phi = 0^\circ$ , 入射角  $\theta = 0^\circ, \theta = 10^\circ, \theta = 20^\circ$  时, 逆反射效率超过 54%。当入射角  $\theta = 25^\circ$  和  $\theta = 30^\circ$  时, 逆反射效率降低到 25% 或更低。

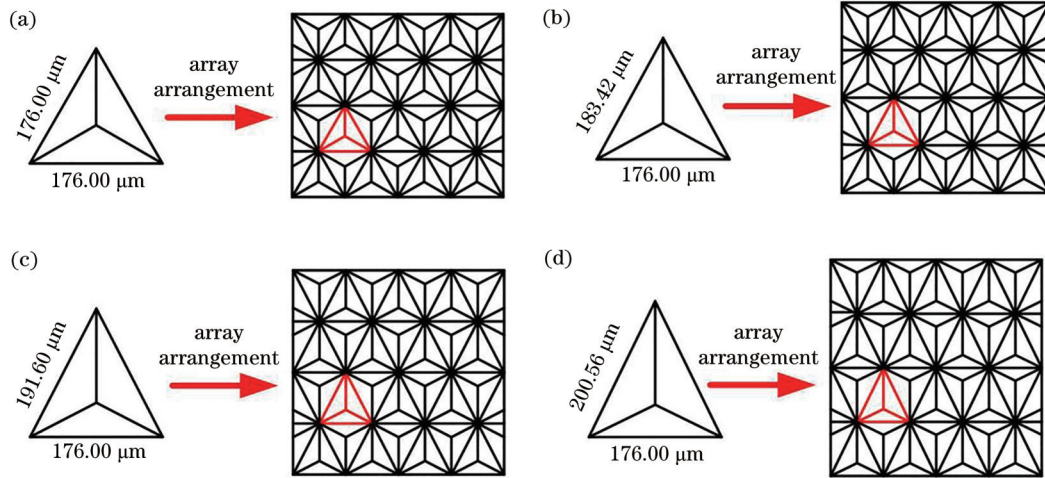


图 6 CCR 阵列建模图。(a)  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $\alpha=5^\circ$ ; (c)  $\alpha=10^\circ$ ; (d)  $\alpha=15^\circ$

Fig. 6 CCR array modeling diagram. (a)  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $\alpha=5^\circ$ ; (c)  $\alpha=10^\circ$ ; (d)  $\alpha=15^\circ$

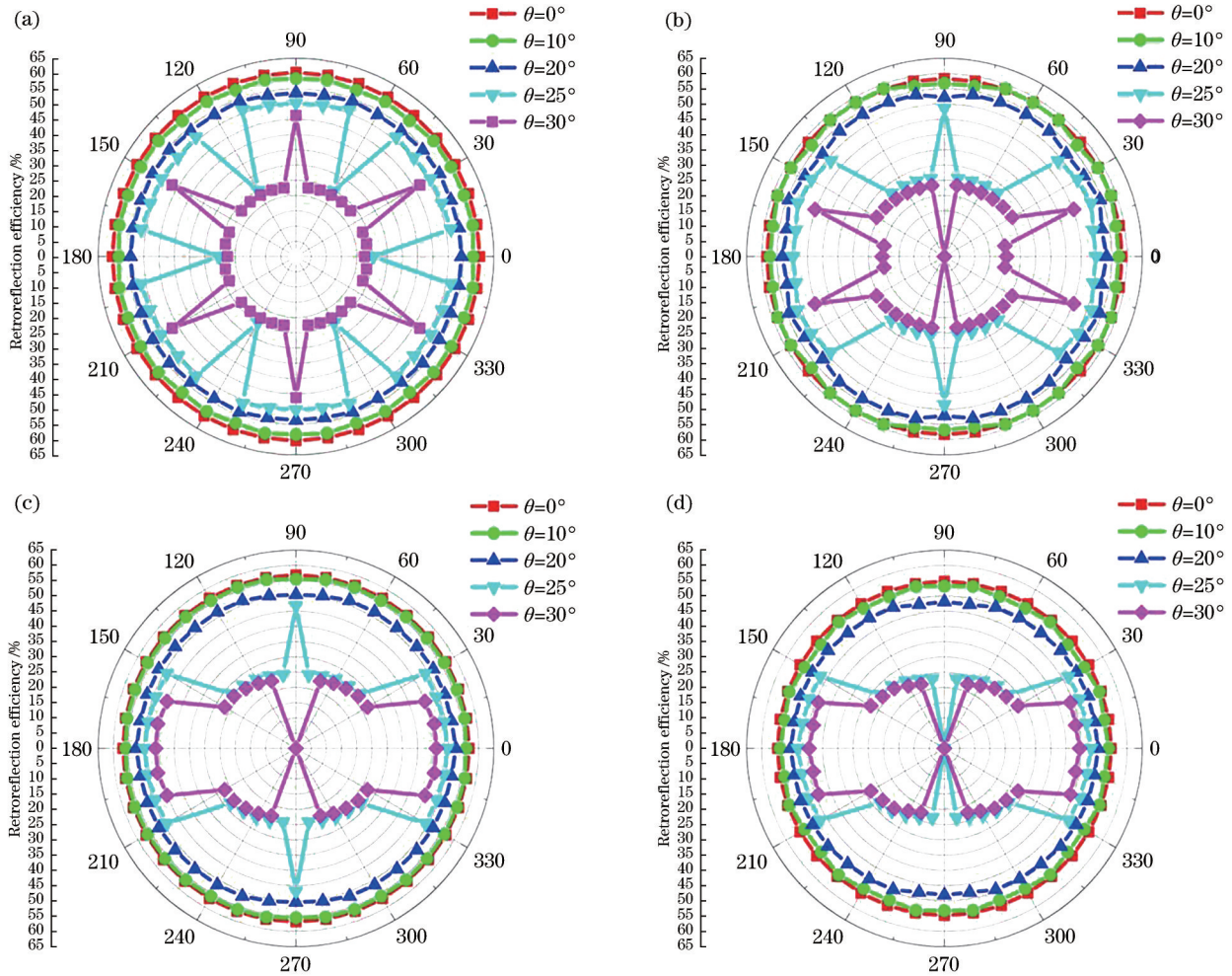


图 7 不同  $\alpha$  角 CCR 的逆反射效率仿真结果。(a)  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $\alpha=5^\circ$ ; (c)  $\alpha=10^\circ$ ; (d)  $\alpha=15^\circ$

Fig. 7 Simulation results of retroreflection efficiency of CCR arrays with different  $\alpha$ . (a)  $\alpha=0^\circ$ ; (b)  $\alpha=5^\circ$ ; (c)  $\alpha=10^\circ$ ; (d)  $\alpha=15^\circ$

图 7 表明,随着入射角的增加,4 种情况下的前倾角分别为  $\alpha=0^\circ$ 、 $\alpha=5^\circ$ 、 $\alpha=10^\circ$  和  $\alpha=15^\circ$ 。当入射角  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=10^\circ$  和  $\theta=20^\circ$  时,CCR 阵列的逆反射效率没有显著变化。然而,当入射角为  $\theta=25^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  时,CCR 阵列的逆反射效率发生了显著变化。

随着前倾角  $\alpha$  的增加,相应 CCR 结构的高逆反射区域的人射角范围将增大:如图 7(d) 所示,当入射角  $\theta=0^\circ$ 、 $\theta=10^\circ$ 、 $\theta=20^\circ$  时,逆反射效率在 50% 以上,当入射角  $\theta=25^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  时,逆反射效率提高到 44% 以上,增加范围的方位角分别扩展到  $(0^\circ\sim30^\circ)$  和  $(0^\circ\sim$

20°)。比较图 7(a)与 7(b),当入射角为 25°时,在方位角为 90°和 270°的高逆反射范围内,逆反射效率降低;当入射角为 30°时,方位角为 90°和 270°的逆反射效率突然降至零。比较图 7(c)和 7(d),逆反射效率为 0 的区域将在 90°和 270°的方位角附近增加。

图 8 表示前倾角对逆反射效率的影响。当方位角为 0°时,在入射角为 0°~20°的范围内,前倾角对逆反射效率的影响不大。当入射角达到 25°,前倾角超过 5°时,逆反射效率大大提高。此外,当入射角达到 30°,倾角超过 10°时,逆反射效率显著提高。

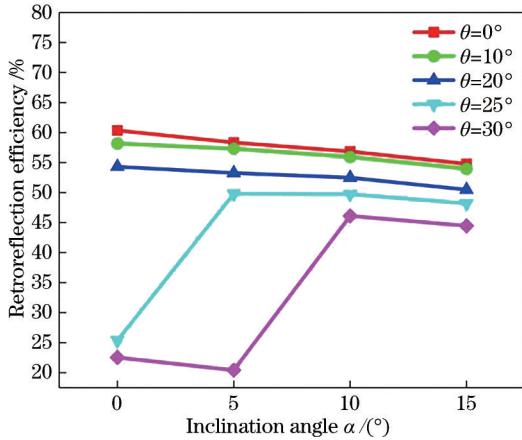


图 8 前倾角对逆反射效率的影响

Fig. 8 Influence of inclination angle on retroreflection efficiency

通过以上分析发现,当使用前倾 CCR 阵列时,方位角 0°和 180°两个方向的逆反射效率提高,其他方向的逆反射效率降低。此外,随着倾斜角的增加,方位角 0°和 180°的两个方向上的逆反射效率增强的范围减小,而其他方向上的逆反射效率降低的范围增大。与正 CCR 结构相比,斜 CCR 结构提高了入射角  $\theta$  (25°~30°) 在方位角 0°方向上的逆反射效率。

### 3.2 前倾 CCR 阵列薄膜的逆反射系数分析

为了说明上述分析的可靠性,反光膜如图 9 所示,对其进行逆反射系数的评估。CCR 的底边分别为

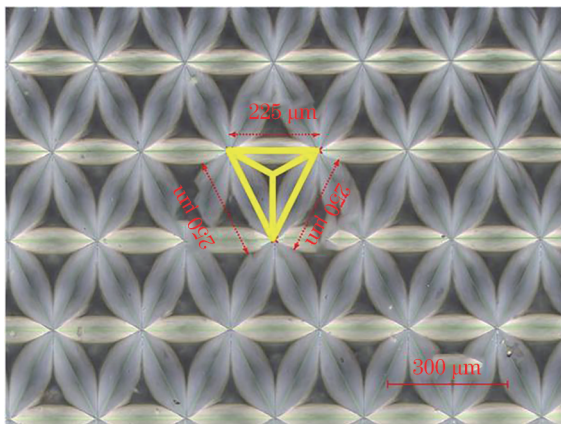


图 9 反光膜的微观形貌

Fig. 9 Micro morphology of reflective film

250、250、225  $\mu\text{m}$ ,属于具有  $\alpha=12.85^\circ$  的 CCR 阵列薄膜。

采用 vista933 型的逆反射测试仪测量反射膜样品的所有角度。如图 10 所示为逆反射系数的测量结果。在方位角为 0°的相对方向上,逆反射系数显著增强,并且在入射角为 30°时能保持 40°范围 900  $\text{cd}/\text{lx}/\text{m}^2$  的高逆反射系数。在  $\theta=10^\circ$  处,逆反射系数的图像接近圆形,符合计算规律。由于 20°~25°是方向差开始突然变化的区域,并且反射膜具有制造误差和光源与反射膜本身之间的角差,因此在  $\theta=20^\circ$  处的测试结果也是合理的。当  $\theta=25^\circ$  时,在方位角为 90°的方向上开始出现逆反射失效的情况,当  $\theta=30^\circ$  时其失效范围增大。在方位角 0°方向上,  $\theta=25^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  的逆反射效率一直保持着高逆反射效率区域,并随着入射角的增大而减小。其趋势符合仿真结果。

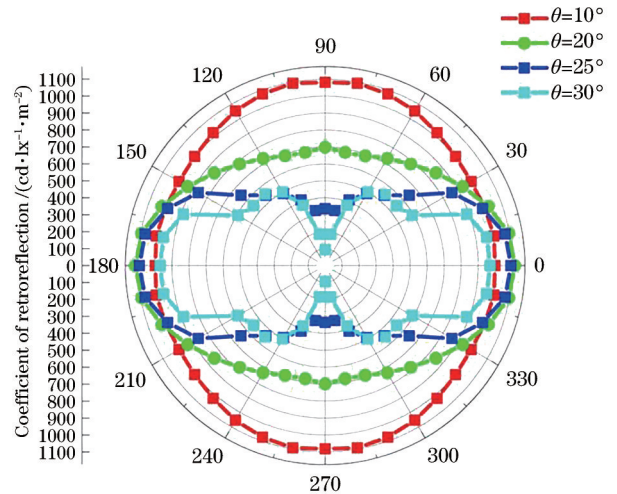


图 10 反光膜的逆反射系数测量结果

Fig. 10 Measurement results of retroreflection coefficient of reflective film

图 11 为比较入射角分别为  $\theta=25^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  时的测试和仿真结果。图 11(a)表明当入射角为  $\theta=25^\circ$  时,计算出的方位角为 90°时的逆反射效率为 0。实际逆反射系数为 330  $\text{cd}/\text{lx}/\text{m}^2$ 。这是逆反射失效区域过小导致的。如图 11(b)所示,当入射角为  $\theta=30^\circ$  时,仿真模型计算和实际结果变化趋势接近。在方位角为 90°时,发现失效区域范围为 20°,与仿真结果一致。测试结果验证了仿真结果的可靠性。

### 3.3 拼接结构的逆反射效率

CCR 结构解决了反光膜的光线逆反射问题,但是,由 CCR 阵列结构组成的反光膜还存在逆反射方位问题,即沿着不同方位射入的光线,存在大的逆反射偏差。这种逆反射偏差导致的方向各向异性限制了反光膜使用的方便性。拼接可以改善 CCR 阵列的逆反射方向各向异性<sup>[23]</sup>,一个典型的拼接方法是对反光膜进行 0°和 90°方向的垂直拼接,如图 12 所示,实际证明,垂直拼接方法可以有效提高逆反射效率的整体均匀性。

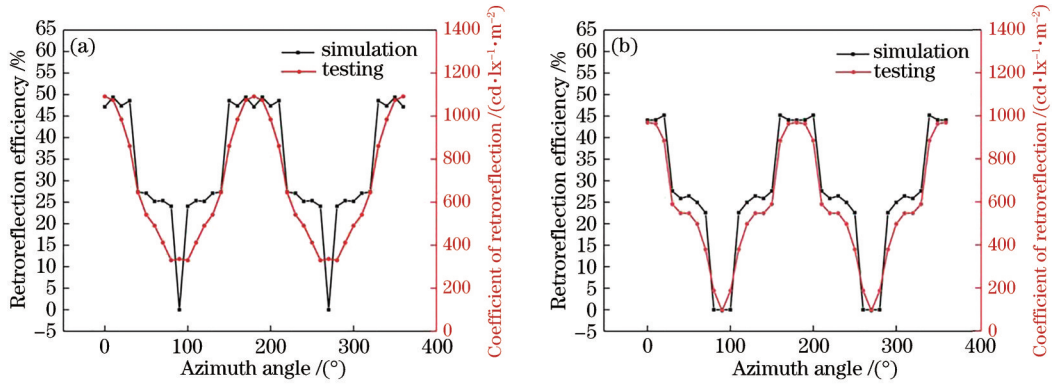


图 11 仿真与测试结果对照。(a)  $\theta = 25^\circ$ ; (b)  $\theta = 30^\circ$

Fig. 11 Results contrast of simulation and testing. (a)  $\theta = 25^\circ$ ; (b)  $\theta = 30^\circ$

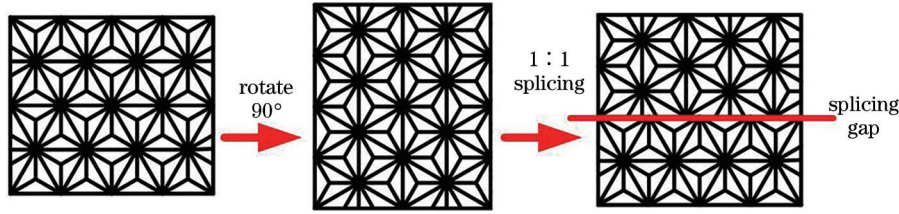


图 12  $\alpha = 0^\circ$  时 CCR 阵列拼接模型

Fig. 12 Splicing modeling of CCR array with  $\alpha = 0^\circ$

可以发现,材料的折射率对拼接效果影响较大。对于反光膜常用的 PMMA 和 PC 材料,折射率分别为 1.50 和 1.58,研究了垂直拼接对于二者逆反射效率的影响,结果如图 13 所示。可以看出,入射角  $\theta = 10^\circ$ 、 $\theta = 20^\circ$ 、 $\theta = 25^\circ$  和  $\theta = 30^\circ$  时,两种材料的方向各异性明显改善。但不同入射角下,不同材料的逆反射效率却发生较大变化,一个典型的入射角是  $20^\circ$ ,对比图 13(a) 和 13(b),可以发现,PMMA 的逆反射效率低于 PC 材料的折射效率,这是由于 PMMA 材料在入射角  $\theta = 20^\circ$  时,其全反射临界角较低导致射线损失的缘故。另外,

PMMA 材料的拼接结构有一个有趣的现象,如图 13(a),在  $20^\circ$  和  $30^\circ$  形成逆反射效率的互补,在其余角度也能降低同一入射角下逆反射效率的极差。

正 CCR 拼接结构改善方向各异性的同时,存在无效面积增加的问题。拼接结构是通过对光学模具的裁剪→旋转→焊接过程完成的,对于正 CCR 结构,如图 14 所示,垂直拼接不可避免地破坏了拼缝处的 CCR 结构,形成人为的逆反射无效区。然而,斜 CCR 结构的拼接,可以避免对 CCR 结构的损伤,避免了人为逆反射无效区的增加。

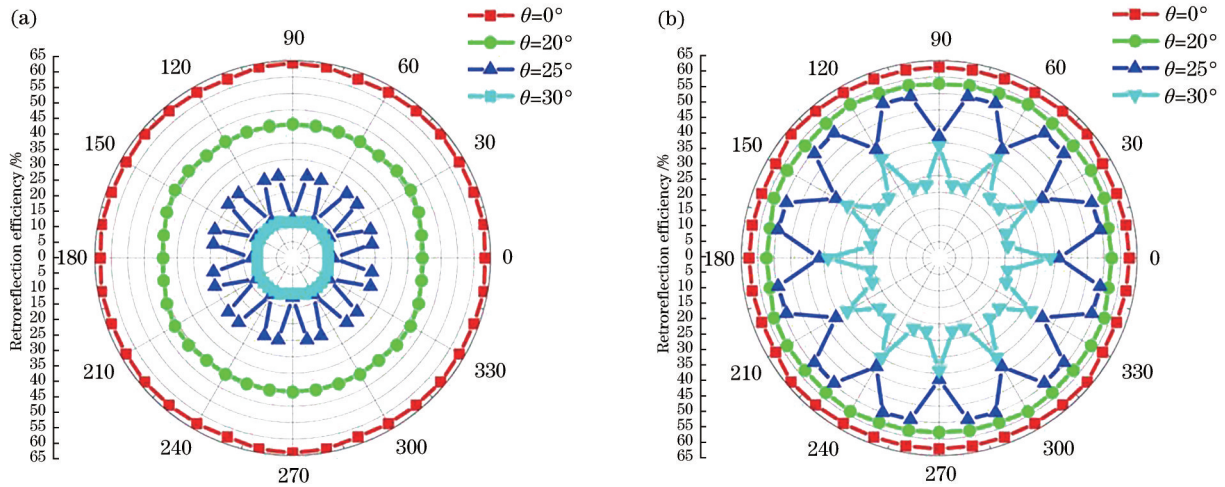


图 13 不同折射率 CCR 阵列拼接结构的逆反射效率。(a) 折射率为 1.50; (b) 折射率为 1.58

Fig. 13 Retroreflection efficiency of splicing structures of CCR arrays with different refractive indexes. (a) Refractive index is 1.50; (b) refractive index is 1.58

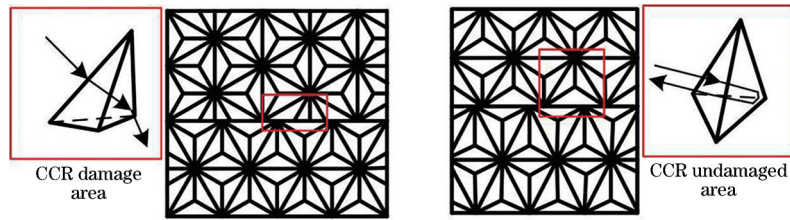


图 14 不同 CCR 阵列拼接模型对比

Fig. 14 Comparison of different CCR arrays splicing modeling

研究了不同倾斜角的 CCR 阵列的拼接效果,对折射率为 1.58 的 PC 材料进行分析,倾斜角  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  的 CCR 拼接结构模型如图 15 所示。

为了进行对比,图 16(a)给出了倾斜角  $\alpha = -4^\circ$  CCR 阵列的逆反射效率结果,可以看出,单一 CCR 阵列在方位角  $90^\circ$  方向的逆反射效率较高,方位角  $0^\circ$  方向的逆反射效率很低。图 16(b)给出了  $\alpha = 10^\circ$  的 CCR 阵列与  $\alpha = -4^\circ$  的 CCR 阵列拼接的逆反射效率结果。对比图 16(a)和 16(b)可以发现,  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  的阵列拼接普遍提高了不同入射角在方位角  $0^\circ$  方向的逆反射效率,并且明显改善了一单一 CCR 阵列在入射角  $25^\circ$  方向各向异性。另外,图 16(c)表示方位角为  $0^\circ$  时,不同前倾角阵列结构的逆反射效率随入射角的变化规律。图 16(d)表示方位角为  $90^\circ$  时,不同前倾角阵

列结构的逆反射效率随入射角的变化规律。图 16(e)表示入射角为  $25^\circ$  时,不同前倾角阵列结构的逆反射效率随方位角的变化规律。从图 16(c)可以看出,  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  阵列拼接在方位角  $0^\circ$  方向(入射角  $0^\circ \sim 30^\circ$ )上的逆反射效率比倾斜角  $\alpha = -4^\circ$  的单一 CCR 阵列提高 35 个百分点以上。从图 16(d)中可以看出,当方位角为  $90^\circ$  时,  $\alpha = 10^\circ$  的阵列在入射角  $30^\circ$  的逆反射效率为 0,而使用  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  的拼接阵列可以有效避免这种情况。

图 16(e)给出了拼接阵列当入射角为  $25^\circ$  时,在方位角  $0^\circ \sim 90^\circ$  的逆反射效率,计算结果显示,拼接结构比单一结构的逆反射效率提高了 35~40 个百分点。可见,采用拼接结构的方法,在提高逆反射效率均匀性的同时,反光膜的广角性也得到了了一定程度的改善。

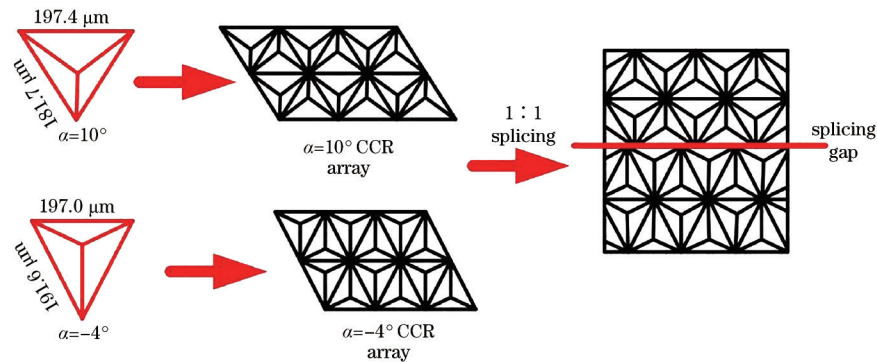
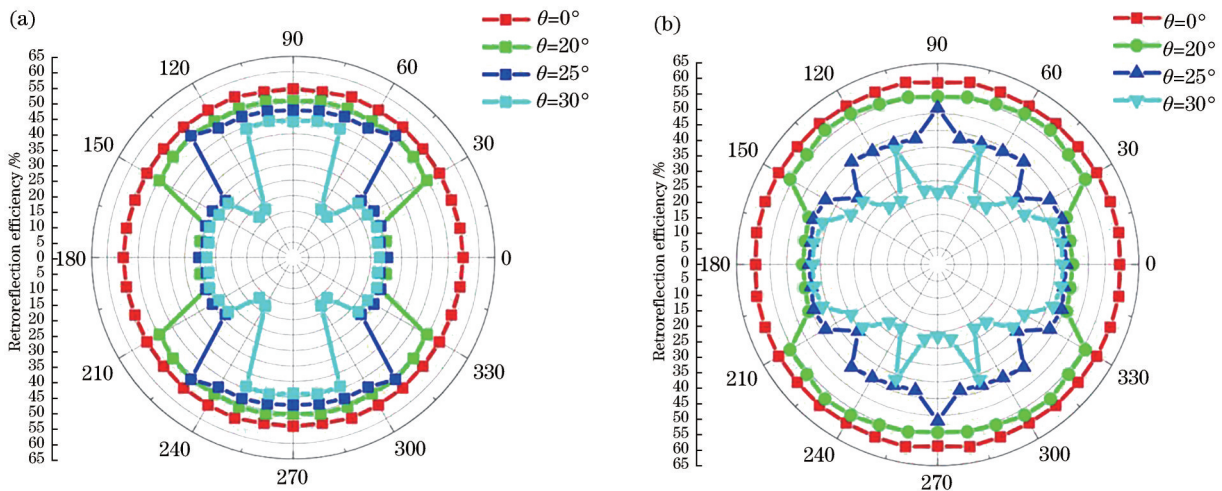


图 15  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  的 CCR 阵列拼接模型

Fig. 15 Splicing modeling of CCR arrays with  $\alpha = 10^\circ$  and  $\alpha = -4^\circ$





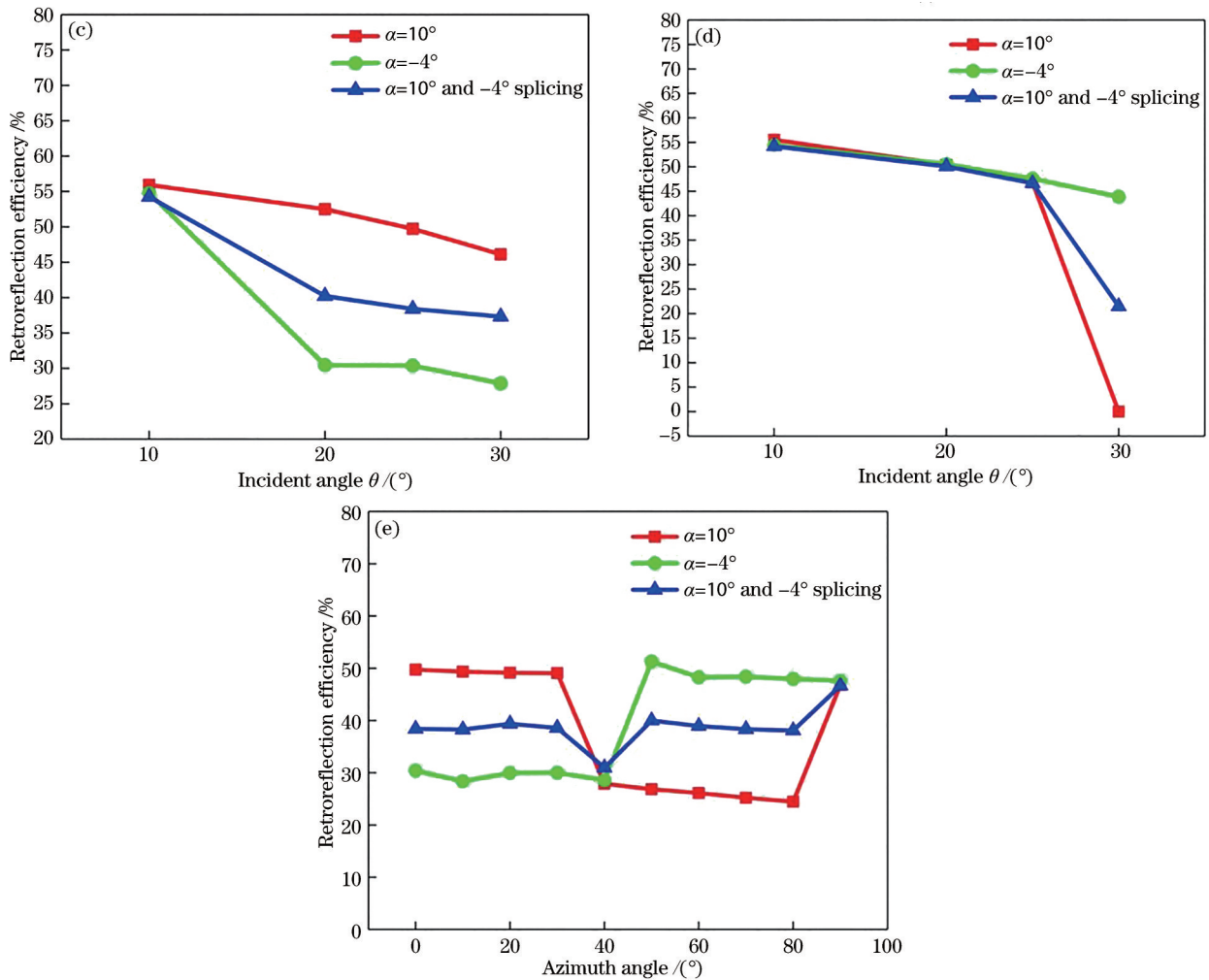


图 16 逆反射效率仿真结果。(a)  $\alpha = -4^\circ$  的 CCR 阵列; (b)  $\alpha = 10^\circ$  和  $\alpha = -4^\circ$  的拼接结构; (c)  $\phi = 0^\circ$  下不同的 CCR 阵列; (d)  $\phi = 90^\circ$  下不同的 CCR 阵列; (e)  $\theta = 25^\circ$  下不同的 CCR 阵列

Fig. 16 Simulation results of retroreflection efficiency. (a) CCR array with  $\alpha = -4^\circ$ ; (b) splicing by CCR arrays with  $\alpha = 10^\circ$  and  $\alpha = -4^\circ$ ; (c) different CCR arrays with  $\phi = 0^\circ$ ; (d) different CCR arrays with  $\phi = 90^\circ$ ; (e) different CCR arrays with  $\theta = 25^\circ$

## 4 结 论

运用几何光学原理及仿真软件对不同的 CCR 阵列进行了分析: 1) 不同倾斜程度的 CCR 阵列可以随着倾斜角的增大提高其高逆反射效率的入射角范围。当采用倾斜  $12.85^\circ$  CCR 结构, 方位角  $0^\circ$  入射角  $30^\circ$  的方向能保持  $40^\circ$  范围  $900 \text{ cd/lx/m}^2$  以上的高逆反射系数,  $90^\circ$  的相对方向则会出现逆反射失效的情况; 2) 采取垂直拼接的方法可以改善 CCR 阵列的方向各异性 (各方向的逆反射效率的极差降低  $10\%$  以上), 对于不同材料 (折射率为 1.5) 的 CCR 可以实现特定角度 (入射角  $20^\circ$ ) 的完全互补; 3) 在需要相对方向保持较高逆反射效率并要求一定方向均匀性的前提下, 反光膜的设计可以采用不同倾斜角结构拼接的方式进行设计, 实现特殊需求。

## 参 考 文 献

[1] 官阳. 英美应急车辆视认性和显著性涂装措施改善研究

概览[J]. 汽车与安全, 2020(8): 64-72.

Guan Y. Survey on improvement of visibility and significance painting measures for emergency vehicles in UK and USA[J]. Auto & Safety, 2020(8): 64-72.

[2] Hussein S, Hamilton B, Tutunea-Fatan O R, et al. Novel retroreflective micro-optical structure for automotive lighting applications[J]. SAE International Journal of Passenger Cars-Mechanical Systems, 2016, 9(2): 497-506.

[3] Le H T, Le L T, Chen M J, et al. ECE/SAE dual functional SuperPinplus curved reflex reflector by use of new structured corner cubes[J]. Applied Sciences, 2020, 10(2): 454-470.

[4] 季芸, 黄梅珍, 李夏, 等. 切削微角锥棱镜型超高定向反射膜的分析与测试[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 0226001.

Ji Y, Huang M Z, Li X, et al. Analysis and measurement of ultra-high reflectivity retro-reflection film of micro cutting cube corner prisms[J]. Acta Photonica Sinica, 2016, 45(2): 0226001.

[5] 付秀华, 马国俊, 吕景文, 等. 基于 TracePro 的开放型高反射回归器件的研究[J]. 光学学报, 2019, 39(11):

1131003.  
Fu X H, Ma G J, Lü J W, et al. Open-type retro-reflectors with high reflectivity using TracePro[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(11): 1131003.
- [6] 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): 0207002.  
Luo H, Yuan C Y. Structure optimization of retroreflective sheeting based on laminae combination technique[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0207002.
- [7] William P R. Method for providing precisely controlled edge on sheet material and apparatus therefor: US3543625 [P]. 1968-04-04.
- [8] Eckhardt H D. Simple model of corner reflector phenomena[J]. Applied Optics, 1971, 10(7): 1559-1566.
- [9] Yuan J H, Chang S J, Li S M, et al. Design and fabrication of micro-cube-corner array retro-reflectors[J]. Optics Communications, 2002, 209(1/2/3): 75-83.
- [10] 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): 0423003.  
Pi J, Shang K. Normal incident invalid light of micro prism reflective sheeting based on Tracepro[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(4): 0423003.
- [11] Kim H, Lee B. Optimal design of retroreflection corner-cube sheets by geometric optics analysis[J]. Optical Engineering, 2007, 46(9): 094002.
- [12] Kim H, Min S W, Lee B. Geometrical optics analysis of the structural imperfection of retroreflection corner cubes with a nonlinear conjugate gradient method[J]. Applied Optics, 2008, 47(34): 6453-6469.
- [13] Luo H, Yuan C Y. Research on cant characteristics of retroreflective film based on laminae combination technology [J]. Optik, 2015, 126(23): 4272-4277.
- [14] 罗青山, 郭唐永, 姚运生. 适用于立方体卫星的激光测距合作目标[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1705-1713.  
Luo Q S, Guo T Y, Yao Y S. Laser ranging cooperative target for CubeSat[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(7): 1705-1713.
- [15] 焦仲科, 岳永坚. 角锥棱镜的入射角及有效反射面积分析[J]. 半导体光电, 2014, 35(5): 811-816.  
Jiao Z K, Yue Y J. Analysis on the maximum incident angle and effective reflection area of cube corner retro-reflector[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(5): 811-816.
- [16] Crabtree K, Chipman R. Polarization conversion cube-corner retroreflector[J]. Applied Optics, 2010, 49(30): 5882-5890.
- [17] 饶瑞中. 月球激光测距中的关键物理与技术问题[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0112002.  
Rao R Z. Discussion on some key physical and technical problems about lunar laser ranging[J]. ActaOpticaSinica, 2021, 41(1): 0112002.
- [18] 王利国, 李亚清, 巩蕾, 等. 基于动态散斑时频特性的合作目标微动参数反演[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0228001.  
Wang L G, Li Y Q, Gong L, et al. Inversion algorithm for micro-motion parameters of a cooperative target based on time-frequency feature of dynamic speckle[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0228001.
- [19] 关博文, 安宁, 范存波, 等. 基于角反射器不均匀分布模型的卫星形状效应研究[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0728001.  
Guan B W, An N, Fan C B, et al. Satellite signature effects based on the retroreflector uneven distribution model[J]. ActaOpticaSinica, 2020, 40(7): 0728001.
- [20] Smith K L. Lamina comprising cube corner elements and retroreflective sheeting: US7556386[P]. 2009-07-07.
- [21] Mimura I, Hayashi C, Amemiya K. Triangular pyramid type cube corner retroreflection article, and its manufacturing method: US8459806[P]. 2013-06-11.
- [22] Heenan S A. Retroreflective articles having microcubes, and tools and methods for forming microcubes: USRE40700E[P]. 2019-04-17.
- [23] 王宏, 董云, 许德伟, 等. 具有微棱镜阵列结构的反光材料模具的制作方法: CN104148898A[P]. 2014-11-19.  
Wang H, Dong Y, Xu D W, et al. Method for manufacturing light reflecting material mold with microprism array structure: CN104148898A[P]. 2014-11-19.