

基于薄片组合技术的反光膜结构优化设计

罗 汉 袁长迎

西南科技大学国防科技学院, 四川 绵阳 621010

摘要 与传统玻璃微珠埋入型膜结构相比,立方角锥型膜结构具有更高的逆反射效率,它是设计制作钻石级反光膜的基础。然而立方角锥型反光膜的有效入射角范围较小,逆反射系数具有各向异性,这些问题会影响反光膜的使用效果。对于上述问题,探索了新的解决方法。基于光线追踪原理,应用基本的光学规律,建立仿真模型分析立方角锥反光膜的逆反射性能。针对薄片组合技术中的宽厚比和顶点偏移两个参数分别展开讨论。发现上述两个参数的改变对立方角锥型反光膜的逆反射性能都有较大影响,可以通过对立方角锥单元的宽厚比和顶点偏移两个参数进行合理设置,以达到增大反光膜有效入射角范围并且改善逆反射系数的各向异性的效果。上述结论对立方角锥反光膜的优化设计具有一定指导意义。

关键词 薄膜; 视觉光学; 反光膜设计; 计算机模拟; 薄片组合技术; 立方角锥

中图分类号 O435.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0207002

Structure Optimization of Retroreflective Sheeting Based on Laminae Combination Technique

Luo Han Yuan Changying

*National Defense Science and Technology College, Southwest University of Science and Technology,
Mianyang, Sichuan 621010, China*

Abstract Compared with the traditional glass beads embedded type membrane structure, cube corner type membrane structure has higher retroreflection coefficient. It is the foundation of designing and producing diamond grade retroreflective film. However, the entrance angle of cube corner type retroreflective sheeting is limited, and the retroreflection coefficient is anisotropic, these problems will affect the using effect of retroreflective sheeting. The new solution for the above problems has been studied. Based on ray tracing technology and the basic theory of optics, a simulation model is built to analyze the retroreflection performance of cube corner retroreflective film. For laminae combination technology, width/thickness ratio and apex decentration are studied. It is found that the retroreflection performance varies dramatically with these two parameters. Through setting appropriate width/thickness ratio as well as apex decentration distance of cube corner elements, the effective incident angle range is increased and the anisotropy of retroreflection coefficient is weakened. These conclusions have certain guiding significance for the optimization design of the cube corner retroreflective sheeting.

Key words thin films; visual optics; retroreflective sheeting design; computer simulation; laminae combination technique; cube corner

OCIS codes 230.4040; 260.6970; 350.3950; 230.5480; 230.4000

1 引 言

反光膜广泛地应用于交通标志和个人安全防护标志中。反光膜中的逆反射单元主要有玻璃微珠和立方角锥两种结构。其中立方角锥反光膜以逆反射效率高而著称,光线垂直入射时它的逆反射系数比玻璃微

收稿日期: 2014-07-21; 收到修改稿日期: 2014-09-29

基金项目: 极端条件下物质特性实验室开放基金(12zxjk09)、绵阳市科技攻关重点项目(13zd2106)

作者简介: 罗 汉(1990—),男,硕士研究生,主要从事反光膜材料设计方面的研究。E-mail: 735607133@qq.com

导师简介: 袁长迎(1965—),男,博士,教授,主要从事应用光学方面的研究。E-mail: yuanchangying@swust.edu.cn

珠型反光膜高出2至3倍^[1],因此它的开发与应用得到了人们更多的重视。然而立方角锥反光膜普遍具有较小的有效入射角(入射角即入射光与反光膜正面的法线之间的夹角)范围^[2]。为了使立方角锥型反光膜保持较高的逆反射效率,光线必须以接近于垂直反光膜正面的方向入射。随着入射角的增大,部分入射光线将无法到达立方角锥的第二个或第三个工作面,而是逸出立方角锥单元,逆反射效率随之降低。另外,立方角锥型反光膜本身具有一种独特的性质,以反光膜正面的法线为轴,使入射光线绕轴旋转,光线沿不同方向入射时,反光膜的逆反射系数不同,这种性质通常称为各向异性^[3]。因为观察者可能从各个方向观看,各向异性的存在会影响反光膜的使用效果。如何增大逆反射有效入射角范围与降低逆反射系数的各向异性是立方角锥反光膜的设计过程需要解决的两个关键问题。

对于立方角锥单元的逆反射性能的研究,已有许多尝试。王春海^[4]等采用琼斯矩阵分析了角锥棱镜的偏振效应;袁景和等^[5-6]分析了角锥阵列的有效反射面积及定向反射率;聂辉等^[7]探讨了角锥棱镜的远场衍射特性;O'Brien等^[8]结合理论与实验分析了立方角锥反光膜的反射功率及偏振特性;So等^[9]编写程序以分析立方角锥反光膜的逆反射性能。然而,他们的工作基本停留在标准的立方角锥几何模型的建立以及性能分析,如何将立方角锥结构的逆反射理论运用在解决反光膜应用中的实际问题,这方面仍存在许多欠缺。本文对于立方角锥结构进行解析几何分析,采用计算机建模仿真的方法,对于如何解决立方角锥反光膜的上述问题进行了新的探索。

2 薄片组合技术

制造立方角锥型反光膜的第一道工序是制造表面带有微几何结构的母模,然后利用这个母模通过合适的技术(如镍电铸技术)来制作用于生产的模压工具(即公模),最后利用公模来压制反光膜产品。

已知的生产母模的方法有针束捆绑技术、直接整体加工技术、薄片组合技术等^[10-11]。薄片组合技术首先在薄片的一端加工出立方角锥结构,然后将不同的薄片组合在一起,形成母模。相比于针束捆绑技术,薄片组合技术加工简单,更适用于加工微型立方角锥阵列。而且薄片组合技术克服了直接整体加工技术几何结构设计单一的缺点,从而使得反光膜的逆反射性能相对改善。因此,薄片组合技术在立方角锥反光膜的应用中具有更好的前景。以下所述研究工作均是基于薄片组合技术展开。

图1显示了单个薄片的结构。图2所示为薄片中的一个标准的立方角锥单元,它包含三个逆反射工作面,分别为面ACDF、面ABEF、面ACLMB,三个工作面之间保持两两相互垂直。立方角锥单元的对称轴AK垂直于底面GHIJ。

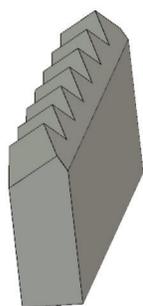


图1 单个薄片

Fig.1 A single lamina

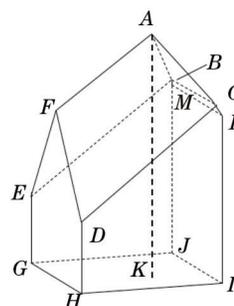


图2 标准立方角锥

Fig.2 A standard cube corner element

在薄片组合技术中,宽厚比指薄片单个立方角锥单元的宽度与厚度的比值,即图2所示GH长度与GJ长度的比值。为了说明顶点偏移的含义,绘制了标准立方角锥在底面的投影。整个立方角锥单元的投影为矩形。随着顶点偏移量的改变,面ACLMB的投影可能为三角形或五边形(如图3所示)。定义顶点的投影与ML棱边的投影之间的距离为 x ,以方便后面的论述。

对于底面为矩形的立方角锥单元,其光轴倾斜角度,顶点偏移,以及宽厚比为三个独立的设计参数^[12]。文献[3,13]已详细说明光轴倾斜的作用。顶点偏移以及宽厚比这两个参数的改变对逆反射性能也具有重要影响,而相关研究工作仍有很多不足之处。如Coman等^[12]列出了宽厚比为1:1和1:2这两种情况下的立方角

锥结构的逆反射有效反射面积随入射角改变而变化的曲线,并叙述了顶点偏移会造成逆反射有效面积的降低。然而,宽厚比设置与有效入射角范围的关系,与反光膜的各向异性的关系,顶点偏移对于逆反射性能的影响这些问题有待深入讨论。

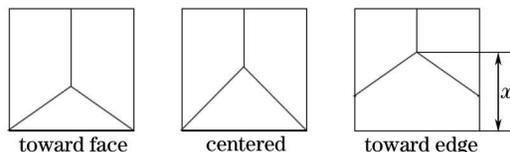


图3 顶点偏移示意图

Fig.3 Apex decentration schematic diagram

3 研究思路与方法

立方角锥反光膜的正面为薄的透明基质层,透明基质层的背面延伸出去的部分为立方角锥微几何结构。透明基质的常用材料有聚碳酸酯(PC)、聚甲基丙烯酸甲酯、聚氨酯、聚氟乙烯等。计算过程中选择聚碳酸酯作为透明基质层的材料。在反光膜背面不镀金属膜的情况下,立方角锥结构层紧接着空气层,主要依靠三个工作面上发生的全内反射来实现逆反射。全内反射的临界角由透明基质层的折射率和空气的折射率决定。

为了方便描述入射光相对于反光膜的空间位置关系,建立了如图4所示空间坐标系。入射光线沿方向 R 照射到反光膜正面。入射光方向矢量 R 对应一组球坐标值 (θ, φ) , 其中 θ 为入射角, φ 为反光膜正面方位角。逆反射率是实际完成逆反射的光线数量与入射光线总数的比值,它的空间分布规律反映反光膜逆反射系数的空间分布情况。当立方角锥结构参数以及材料种类给定时,逆反射率只与入射方向 R 有关,是关于 (θ, φ) 的函数,因此可以通过计算机编程计算逆反射率。薄片组合技术中的立方角锥阵列通常是周期性排列结构,因此,在分析过程中只需要计算一个周期内的反光单元。这里以一个角锥单元为例,叙述逆反射率的计算过程。

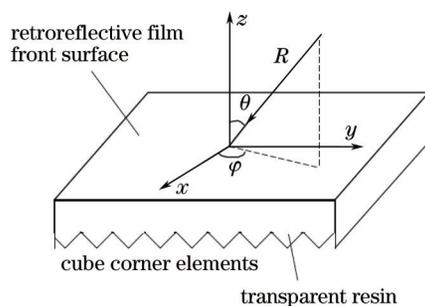


图4 入射光与反光膜空间位置关系图

Fig.4 Space relationship of incident light and the retroreflective sheeting

关于有效截面的确定方法参考自文献[14]。为方便解析几何分析,对于图2中的立方角锥单元,以立方角锥顶点 A 为坐标原点,以 AF 为 X 轴,以 AC 为 Y 轴,以 AB 为 Z 轴建立局部坐标系。将表示入射光线方向的单位矢量表示为 $r=r_x i+r_y j+r_z k$,将立方角锥单元的三个工作面整体投影到以 r 为法向的平面上。可以得到一个多边形 Σ 。将 Σ 的面积记为 S_1 ,它表示入射截面。然后将三个工作面关于原点的对称平面也投影到上述以 r 为法向的平面上,可以得到另一个多边形 Σ' 。这两个多边形的重叠区面积记为 S_2 。 S_2/S_1 即为有效投影截面。在已知立方角锥几何尺寸的基础上,利用解析几何的方法,根据各个顶点的坐标确定两个多边形 Σ 及 Σ' ,并进一步采用蒙特卡罗方法求解重叠区面积,最后得到立方角锥单元的有效投影截面。

光线从入射到完成逆反射要经过一连串的反射和折射过程,追踪光线传播的轨迹,并严格计算按照菲涅尔公式计算传播过程中的反射和折射损失。当光线入射到反光膜正面时,反射掉的部分造成了光能损失。而在三个逆反射工作面上发生反射时,如果在该表面上的入射角小于全反射临界角,那么在该表面上的全反射条件就被破坏。此时,光线的反射和折射将同时存在,折射掉的部分穿透立方角锥单元而造成光线损失。总入射光线中扣除反射以及折射所占比例得到反射强度因子。

有效投影截面与反射强度因子的乘积即为逆反射率。通过计算沿不同方向入射的光线的逆反射率,就

能得到逆反射率的空间分布图。在计算逆反射率的过程中,应用了下列假设:

- 1) 立方角锥单元的表面是光滑的,无漫反射现象;
- 2) 入射光为单色平行光,具有确定的折射率(折射率取为 1.59);
- 3) 忽略了光的衍射效应;
- 4) 忽略了光线在空气和介质中传输时发生的吸收和散射作用。

基于上述分析,采用 Mathcad 工程计算软件建立立方角锥结构仿真模型。然后,针对第二节所述标准立方角锥单元,采用控制变量法分别研究宽厚比和顶点偏移的改变对逆反射性能所造成的影响。以下为仿真结果。

4 结果与分析

4.1 宽厚比改变对逆反射系数的影响

使立方角锥顶点居于中心,并保持宽度不变,仅改变厚度,对一系列不同宽厚比的标准角锥单元的逆反射率进行分析。通常光线垂直入射时反光膜的逆反射率达到最大值,因此这时的逆反射率值最具有代表意义。通过对比发现不同宽厚比的立方角锥单元,在光线垂直入射时其逆反射率均能达到 0.9 左右。随着入射角的增大,逆反射率都呈现逐渐减小的趋势,当入射角达到 40°时,逆反射率接近于 0。但是不同宽厚比的立方角锥结构,其逆反射率随入射角增大而减小的速率不同。当立方角锥宽厚比为 1:1 时,立方角锥的逆反射率下降的速率最低。宽厚比在此基础上的增大或减小都会增加下降速率。(图 5 列出了宽厚比为 1.73:1、1:1 及 1:2 三种情况下的逆反射率随入射角变化的趋势。)

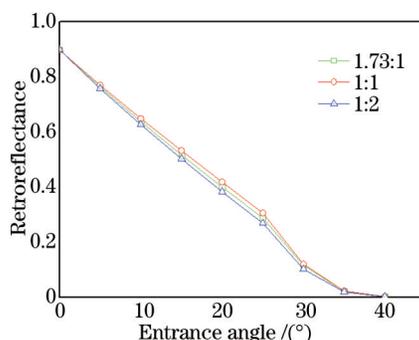


图 5 不同宽厚比的标准立方角锥单元逆反射率

Fig.5 Retroreflectance of different width thickness ratios of standard cube corner elements

分析上述现象产生的原因,当宽厚比为 1:1 时,三个工作面具有大致相等的面积。如 Mimura 等^[15]所述,当三个逆反射工作面的面积大致相等时,逆反射的效率最高。当宽厚比增大时,工作面太短,导致工作面上能发生逆反射的有效区域不足。而当宽厚比减小时,工作面太长,工作面 $ABEF$ 上靠近 EF 边的区域和工作面 $ACDF$ 上靠近 DF 边的区域中很大一部分面积不贡献逆反射,使逆反射效率降低。因此,将薄片立方角锥单元的宽厚比设置为 1:1 时,能有效控制反光膜逆反射率的下降速率,进而增大了反光膜的有效入射角范围。

4.2 宽厚比改变对各向异性的影响

图 6 为标准立方角锥单元的逆反射性能图,它们反映了逆反射率随着 θ 角和 φ 角改变的变化趋势。图中径向长度代表逆反射率的大小,分别画出了逆反射率为 0.2、0.4、0.6、0.8 对应的网格线,并用数字进行了标注,最外面的一圈数字对应的是方位角 φ 。右侧图例中数字 0、10、20、30、40 则对应于入射角 θ 。每条闭合的曲线反映了同一 θ 角下逆反射率随着 φ 角的变化情况。

对比分析一系列不同宽厚比的标准立方角锥结构的逆反射性能图,发现宽厚比为 1:1.155 时,逆反射率的各向均匀性达到最佳状态。如图 6(a)所示,当入射角为 10°时,闭合曲线的形状接近于圆形,随着方位角的变化,逆反射率趋向于同一个值。当入射角增大到 20°时,闭合曲线的形状基本不变。而当 θ 升高到 30°时逆反射率随 φ 角的变化可分为 3 个周期(范围分别是 0°~120°, 120°~240°, 240°~360°),各个周期内的逆反射率值分布规律相似。在每个周期的前 60°范围内,逆反射率接近于 0.2(比 0.2 略小),而在每个周期的后 60°范围内,逆反射率骤然降低,接近于 0。

在宽厚比为 1:1.155 的基础上,随着宽厚比的逐渐增大,逆反射率的两向异性逐渐增强。对应于同一入射角,逆反射率在水平方向(与图 2 中 GH 棱边平行的方向)上偏高,而在垂直方向(与图 2 中 GJ 棱边平行的方向)上偏低,如图 6(b)所示。与图 6(a)相比,逆反射率的整体分布图样呈现从垂直方向上“压扁”的形状。

在宽厚比为 1:1.155 的基础上,随着宽厚比的逐渐减小,逆反射率的两向异性也呈现逐渐增强的趋势。对应于同一入射角,逆反射率在垂直方向上偏高,而在水平方向上偏低,如图 6(c)所示。与图 6(a)相比,逆反射率的整体分布图样呈现从水平方向上“压扁”的形状。

综上所述,为了使立方角锥反光膜的两向异性减弱到最小,反光膜的宽厚比应设置在 1:1.155 附近。

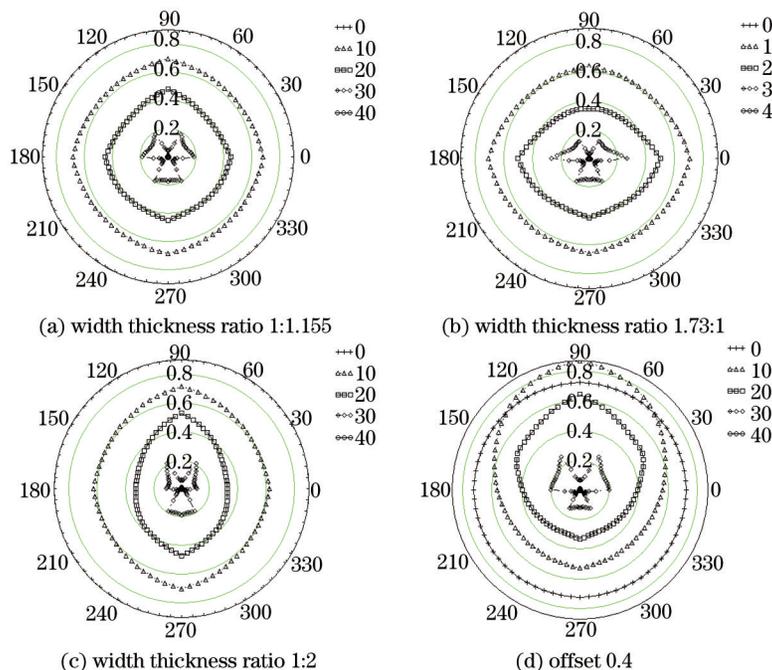


图 6 立方角锥逆反射性能图

Fig.6 Retroreflectance performance of cube corner

4.3 顶点偏移对逆反射性能的影响

设定标准立方角锥单元的宽度与厚度都为单位长度 1(即宽厚比为 1:1),仅改变顶点偏移量,观察逆反射性能的相应变化。将光线垂直入射时的逆反射率随 x 变化的规律绘制成图 7。由图 7 可知,当顶点居于中心(即 $x = 0.5$)时,立方角锥单元的逆反射率达到最大值 0.899。在 x 从 0.5 增大到 0.9 的过程中(此时顶点向棱边 AF 偏移),光线垂直入射时的逆反射率的变化趋势近似为线性下降。当 x 从 0.5 减小到 0.1 时(对应于顶点向工作面 $ACLMB$ 偏移),逆反射率也呈逐渐下降的趋势,不过 $x = 0.3$ 变化到 $x = 0.2$ 的过程中出现了跳变,当 $x \leq 0.2$ 时,光线垂直入射时的逆反射率为 0。这说明顶点向两个方向的偏移对垂直入射光线的逆反射率造成的影响不同。

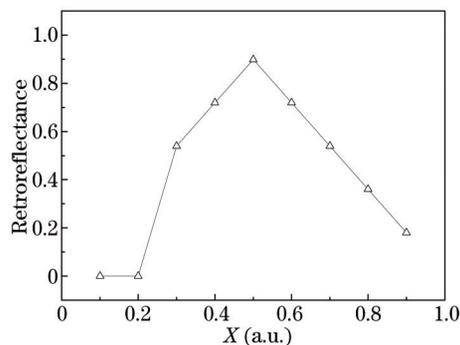


图 7 逆反射率随顶点偏移的变化情况

Fig.7 Retroreflectance varies with apex decentration

进一步分析发现顶点偏移对方角锥的逆反射率的各向异性也具有较大影响。并且随着偏移量的增加,逆反射率的各向异性将更加突出。相比于顶点位于中心的立方角锥结构的逆反射率分布情况,在顶点偏移的方向上逆反射率升高了,而在其他方向上的逆反射率降低了,与顶点偏移相反的方向上逆反射率降低幅度最大。

如图6(d)显示了 $x=0.4$ 时的逆反射率在空间中的分布。当 θ 角为 10° 时,在顶点偏移的方向上逆反射率达到 0.8 以上,而与顶点偏移相反的方向上逆反射率低于 0.4。而且,当 θ 角为 10° 时顶点偏移方向对应的逆反射率超过了光线垂直入射时的逆反射率。这说明当 $x=0.4$ 时,最优的观察方向并非垂直于反光膜正面,而是在顶点偏移所对应的方向上,与反光膜正面法线呈 10° 夹角的方向。立方角锥单元的顶点偏移所产生的这种性质可以设计应用于某些只需要单方向具有高逆反射系数的特定情形,比如人行横道线。

5 结 论

基于光线追踪原理,建立了仿真模型以探索立方角锥单元的逆反射率的空间分布规律。使用该模型针对薄片组合技术中的宽厚比和顶点偏移两个参数分别进行了分析,得到了如下结论:1) 为了增大钻石级反光膜的有效入射角范围,应该设置合适的立方角锥单元宽厚比,这个值以 1:1 为最佳。在此基础上增大或减小宽厚比都会使逆反射率降低;宽厚比为 1:1.155 时逆反射率的各向异性最小,在此基础上增大或减小宽厚比都会使反光膜的逆反射率在两个相对的方向上提高,而在其他方向上降低,从而增强了逆反射率的各向异性。因此,立方角锥单元的最佳宽厚比介于 1:1 到 1:1.155 之间。此时,能够保持角锥单元具有较强的逆反射能力,同时逆反射率的各向异性也较弱。2) 针对顶点偏移的一系列模拟结果显示,顶点偏移会造成在顶点偏移方向上的逆反射率增大,在其他方向上的逆反射率降低,这说明顶点偏移将使逆反射率的各向异性恶化;另一方面,随着顶点偏移量的逐渐增大,垂直入射时的逆反射率迅速下降,并导致反光膜整体逆反射效率降低,因此,在设计反光膜时顶点偏移量应取得较小。

参 考 文 献

- 1 Adachi K, Mimura I. Method of Making a Microprism Master Mold: U.S. 6,010,609[P]. 2000-1-4.
- 2 Gerald M Benson, Kenneth L Smith. Retroreflective Cube Corner Sheeting Mold and Sheeting Formed Therefrom: U.S. 5,189,032 [P]. 1999-11-9.
- 3 Smith K L. Lamina Comprising Cube Corner Elements and Retroreflective Sheeting: U.S. 7,556,386[P]. 2009-7-7.
- 4 Wang Chunhai, Ji Guijun, Hu Xiaotang, *et al.* Polarization effect of cube-corner reflectors[J]. Acta Optica Sinica, 1993, 13(6): 540-545. 王春海, 吉贵军, 胡小唐, 等. 角锥棱镜的偏振效应[J]. 光学学报, 1993, 13(6): 540-545.
- 5 Yuan Jinghe, Chen Bo, Zeng Hongjun *et al.* Retro-reflective properties of a micro-square-prism[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(7): 973-978. 袁景和, 陈 波, 曾红军, 等. 微正方形角锥棱镜定向反射特性[J]. 光学学报, 2000, 20(7): 973-978.
- 6 Yuan Jinghe, Chen Bo, Zeng Hongjun, *et al.* Properties study for the micro-prism array retro-reflector[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(11): 1023-1027. 袁景和, 陈 波, 曾红军, 等. 微棱镜阵列型定向反射器特性[J]. 光子学报, 1998, 27(11): 1023-1027.
- 7 Nie Hui, Weng Xingtao, Li Song, *et al.* The far-field 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.
- 8 O'Brien D C, Faulkner G E, Edwards D J. Optical properties of a retroreflecting sheet[J]. Appl Opt, 1999, 38(19): 4137-4144.
- 9 So B S, Jung Y H, Lee D W. Shape design of efficient retroreflective articles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 130: 632-640.
- 10 Benson G M, Smith K L. Retroreflective Cube Corner Sheeting Mold and Method for Making the Same: U.S. 6,253,442[P]. 2001-7-3.
- 11 Luttrell D E, Erwin R L, Smith K L, *et al.* Cube Corner Sheeting Mold and Method of Making the Same: U.S. 6,318,987[P]. 2001-11-20.
- 12 Coman L A, Couzin D I, Heenan S A. Retroreflective Articles Having Microcubes, and Tools and Methods for Forming Microcubes: U.S. RE40,700[P]. 2009-4-14.
- 13 Sidney A. Heenan, Montalbano A J, Coman L A, *et al.* Retroreflective Articles Having Microcubes, and Tools and Methods for Forming Microcubes: U.S. 6,767,102[P]. 2004-7-27.
- 14 Eckhardt H D. Simple model of corner reflector phenomena[J]. Appl Opt, 1971, 10(7): 1559-1566.
- 15 Mimura Ikuro, Hayashi Chihiro, Amemiya Keiji. Cube-Corner Retroreflective Article: U.S. 8, 388, 154 B2[P]. 2013-3-5.

栏目编辑: 韩 峰