

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2019.06.017

逆反射材料中玻璃微珠的协同效应

袁长迎¹, 张修路¹, 罗 霁¹, 阳 建¹, 夏云峰¹, 余 月¹, 李 萍²

(1. 西南科技大学国防科技学院, 绵阳 621010; 2. 四川大学原子与分子物理研究所, 成都 610065)

摘 要: 半球镀膜玻璃微珠是逆反射材料的基本反光单元, 目前的研究主要局限于单个微珠的属性, 很少涉及到逆反射过程中相邻微珠间的协同作用. 实际上协同作用的存在使整个膜的反光属性不同于单个微珠的情况. 本文全面分析了逆反射光线传输过程, 并结合逆反射材料的结构特点设计开发了玻璃微珠阵列结构逆反射材料的数值计算程序, 计算了逆反射效率随微珠排布密度、材料折射率、光线入射角等参数的变化. 结果表明, 微珠阵列的协同作用表现为倾斜效应和遮挡效应. 前者严格遵循倾斜因子 $\epsilon = 1/\cos\theta$ 的定量规律, 而後者的作用可通过遮挡因子来定量表示. 入射角较小时主要体现为倾斜效应, 而入射角较大时倾斜效应和遮挡效应两者共同发挥作用.

关键词: 逆反射; 玻璃微珠; 倾斜因子; 遮挡因子

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2019)06-1097-08

Synergistic effect of glass beads in retroreflective materials

YUAN Chang-Ying¹, ZHANG Xiu-Lu¹, LUO Fen¹, YANG Jian¹,
XIA Yun-Feng¹, YU Yue¹, LI Ping²

(1. School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Institute of Atomic and Molecular Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Hemispherical coated glass beads are the basic reflective units of retroreflective materials. But, so far, the studies are only limited to the properties of individual glass bead, and have not yet involved synergy between adjacent beads during the retroreflective process. In fact, the presence of synergism makes the reflective properties of the entire film different from that of individual beads. In this paper, the retroreflective ray transmission process was comprehensively analyzed, and a numerical calculation program for glass bead array retroreflective materials was developed taking into account the structural characteristics of retroreflective materials. The variation of retroreflective efficiency with the density of micro beads, the refractive index of the material, and the incident angle of the light were calculated. The results show that the synergistic effect of the bead arrays manifests as inclination effect and shading effect. The former strictly follows this quantitative rule of "the incline factor $\epsilon = 1/\cos\theta$ ", whereas the role of the latter can be quantitatively represented by the shading factor. The inclination effect lonely works at small incident angle, while both inclination effect and shading effect work together when the incident angle is relatively large.

Keywords: Retroreflection; Glass beads; Incline factor; Shading factor

收稿日期: 2018-06-02

基金项目: 国家自然科学基金(41574076); 西南科技大学龙山人才计划(17LZXJ08)

作者简介: 袁长迎(1965-), 男, 湖北麻城人, 博士, 教授, 主要研究逆反射理论与材料设计. E-mail: yuanchangying@swust.edu.cn

1 引言

逆反射膜是一种新型光学复合材料,具有独特的光学性能:在受到光照后,它可将入射光能量的大部分反射到与入射光平行相反的方向上. 观察者能更好地从光源附近观察到贴有反光膜的物体,使目标更加醒目. 逆反射效应被广泛应用于交通安全、光通讯、建筑保温、航空航天、广告服装及各种实验设备^[1-7].

逆反射膜的主体光学结构是一层均匀镶嵌在薄膜表面的玻璃微珠. 当单色平行光照射膜面时,在每个玻璃微珠的表面及内部发生多次折射和反射,最终大部分光能量沿与入射方向大致平行相反的方向传出,形成所谓的逆反射光.

对玻璃微珠型逆反射膜的研究分为实验研究和理论研究,前者主要侧重于膜的加工制作工艺研究^[8-11]、光学性能测试^[12-13]、应用效果^[14-16]等,后者主要从理论方法上探讨逆反射机理^[17-19]、逆反射性能的分析计算^[20-23]、逆反射性能优化设计^[24]等问题. 迄今为止绝大部分的研究都局限于单个玻璃微珠的分析计算,很少考虑相邻微珠之间的协同作用. 当玻璃微珠之间的平均间距较大、分布密度较低时,每个微珠的反射作用互不影响,此时整个膜的反光作用与单个微珠的相同,因此分析单个玻璃微珠的反光作用即可推知整个膜的效果;但当微珠分布密度较大时,相邻微珠对入射光有一定的遮挡作用,使得整个膜的反光作用不同于单个玻璃微珠的作用,在此情况下用单个玻璃微珠代替整张膜的反光作用将产生较大的偏差. 人们发现,开始时单位面积膜中加入微珠的量越大,则逆反射效率越高,二者几乎成线性地变化^[25];但是当微珠的用量很大时,进一步增加微珠的用量给逆反射效率带来的增强效果并不明显,甚至出现负面影响. 由于存在杂散光干扰、样品一致性、当前测试技术的局限性等实际困难,通过大量制样、分析测试的方法来归纳总结逆反射饱和属性的方法是不切实际的,而建立在光传输基本原理上的理论分析结合数值计算的方法可能是解决该问题的一种有效方法. Kiesewetter^[21]早在 2004 年就注意到相邻微珠之间的遮挡作用会使单个微珠的有效光照投影截面减小,从而引起逆反射效率降低,但该问题的定量研究一直未能取得实质性进展. 本文基于光传输基本原理建立平行光在玻璃微珠阵列中传输的理论体系,采用数值计算方法定量分析相邻微珠在逆

反射中的遮挡作用,研究逆反射效率随微珠排布密度的饱和规律,为逆反射材料开发中玻璃微珠用量的合理设计提供理论支持.

2 理论原理

2.1 基本假设

实际反光材料中玻璃微珠随机分布在逆反射膜上,如图 1a 所示. 微珠的分布具有以下特点:(1)绝大部分微珠近似为球形,但有少量微珠偏离球形;(2)微珠的粒径不完全一致,存在一个平均值;(3)宏观地看,表面各处微珠的分布密度大致均匀一致;微观地看,每个微珠周围环境(近邻数、微珠相对方位)都不相同,呈随机分布.

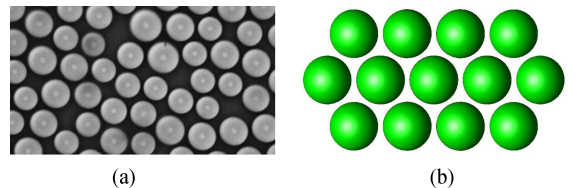


图 1 玻璃微珠阵列结构的简化近似:(a)玻璃微珠阵列的实物显微照片;(b)微珠阵列的等价排布
Fig. 1 Simplified approximation of glass beads array: (a) micrographs of glass beads array; (b) equivalent arrangement for glass beads array

为便于理论分析,对微珠的分布特点作如下简化假设:(1)所有微珠均为标准的球形;(2)所有微珠具有同一粒径,其大小取实际微珠粒径的平均值;(3)所有微珠等间距分布,并遵循正六边形排布,如图 1b 所示. 排布间距的选取原则是:等价排布密度(单位面积上微珠的个数)与实际反光膜中玻璃微珠的排布密度相等. 采用等价的正六边形分布后,每个微珠在阵列中具有固定的近邻关系,即固定的空间方位,这与实际情况不符. 实际的反光膜上虽然每个微珠具有确定的近邻关系,但是不同微珠的近邻关系均不相同,满足随机分布的特点. 因此大量微珠的统计结果必然没有确定的近邻关系,反应在材料的逆反射属性上就是逆反射率与空间方位无关. 上述分歧将在 3.2 小节给出具体解决方案.

2.2 单个玻璃微珠的有效光照面积

分析计算膜的逆反射效率时,可认为光只照射到其中某一个微珠上,在保持相邻微珠遮挡作用的前提下计算反射光通量,再与入射光通量比较即为逆反射效率. 为此必须首先明确平行光整体照射

反光膜时分摊在其中一个微珠上的有效照射面积. 如图 2 所示, r_0 为玻璃微珠的半径, $2r_1$ 为相邻微珠的中心间距($r_1 \geq r_0$), 在边长为 $2r_1$ 的正六边形光照区域中, 受照射的微珠数为 $3(1+6 \times \frac{1}{3})=3$. 因此平均每个微珠受光照的面积为正六边形面积的三分之一:

$$S_0 = 2\sqrt{3}r_1^2 \quad (1)$$

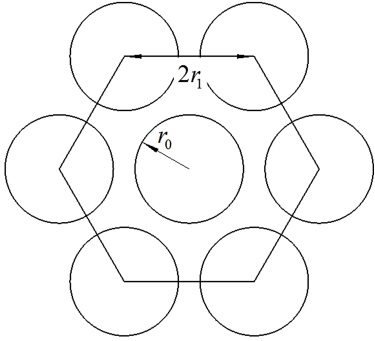


图 2 单个玻璃微珠的有效光照面积
Fig. 2 The effective light area of a single glass bead

2.3 坐标变换

如图 3a 所示, 取六边形阵列的一个单元进行分析. 建立 $oxyz$ 坐标系, 其中 xoy 面与微珠阵列重合, oz 轴沿着膜的法向. 给每个微珠分别编号为 0、1、2、...、5、6, 它们的球心坐标可分别表示出来: $0(0,0)$ 、 $1(2r_1 \cos 60^\circ, 2r_1 \sin 60^\circ)$ 、 $2(2r_1 \cos 120^\circ, 2r_1 \sin 120^\circ)$ 、... . 图 3a 中 AO 为平行光的照射方向, 采用球坐标 (θ, φ) 来表征, 其中 θ 为入射光与 z 轴之间的夹角, 亦即光线相对于膜的入射角; φ 为方位角, 是 AO 在 xoy 面内的投影与 x 轴之间的夹角. 将 $oxyz$ 坐标系称为全局坐标系. 全局坐标系可方便地描述反光膜上玻璃微珠的位置关系, 但是不便于描述光线投影时微珠之间的遮挡关系. 为此需要建立第二套坐标系, 具体方法是: 先绕 oz 轴旋转 φ 角, 得到 $ox'y'z'$ 坐标系, 再绕 oy' 轴旋转 θ 角, 得到 $ox''y''z''$ 坐标系. 从 $oxyz$ 到 $ox''y''z''$ 的坐标变换关系为:

$$T = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi & -\sin\theta \\ -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ \sin\theta\cos\varphi & \sin\theta\sin\varphi & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (2)$$

变换以后的坐标轴 oz'' 正好位于光线的入射方向 AO 上, 如图 3b 所示, 因此将 $ox''y''z''$ 称为光线坐标系. 沿 $x''oy''$ 坐标平面看到的玻璃微珠之间的重叠关系就是平行光照射时微珠之间的遮挡关系.

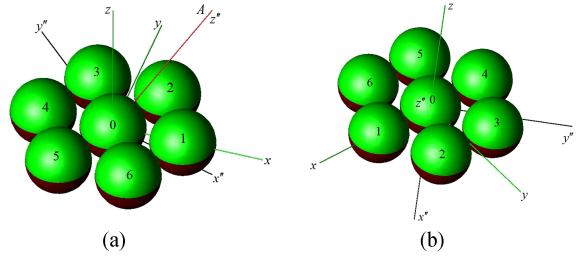


图 3 两套坐标系: (a)全局坐标系; (b)光线坐标系
Fig. 3 Two coordinate systems: (a) global coordinate system; (b) light coordinate system

2.4 逆反射光通量

由于玻璃微珠为周期性排布, 选取最小结构单元参与计算可以减小计算量. 又因玻璃微珠为六边形对称排布, 具有绕 oz 的六次旋转对称轴, 故其逆反射光通量也必然相应的对称性, 即逆反射光通量随方位角 φ 每 60° 周期性变化. 因此只需计算 $\varphi \in [0^\circ, 60^\circ)$ 区间, 再通过周期性延拓即可得到全范围的逆反射光通量. 仅分析 $\varphi \in [0^\circ, 60^\circ)$ 区间时, 编号为 3、4、5、6 的微珠对 0 号微珠没有遮挡作用(图 3b), 只需要关注 1、2 号微珠的作用.

计算逆反射光通量的基本思路是: 考虑光只照射图 3b 中的 0 号微珠, 1、2 号珠仅起遮挡作用. 由于不同位置的光线进入 0 号微珠的表面位置不同, 瞄准距离(光线与 oz'' 轴之间的距离)不同, 局部的人射角也不同, 在微珠内部的传播路径也不同, 最后的出射方向和光强也不同, 因此必须分开计算. 分别计算每个微分投影截面的逆反射光通量, 最后对整个微珠积分:

$$P = \iint_{c,a}^{d,b} I dx'' dy'' \quad (3)$$

下面分别对上式中的被积函数、积分限进行分析:

(1) 被积函数 I

这里被积函数 I 指 $x''oy''$ 平面(图 3b)上、微珠 0 的投影截面内、位于 (x'', y'') 点的面积元 $dx'' dy''$ 的入射光(光强为 I_0) 在无遮挡的前提下进入微珠内部, 在经过微珠的折射/反射作用后形成的逆反射光的光强. 关于光在单个玻璃微珠内的传输过程分析及逆反射的定量描述多篇文献^[17, 19-20, 22, 26] 均有述及, 这里不再赘述, 仅将相关结果归纳如下: (x'', y'') 点的面积元 $dx'' dy''$ 的入射光进入微珠的入射角为:

$$i = \arcsin\left(\frac{\sqrt{x''^2 + y''^2}}{r_0}\right) \quad (4)$$

折射角为:

$$\gamma = \arcsin\left(\frac{\sqrt{x''^2 + y''^2}}{nr_0}\right) \quad (5)$$

这里 n 为玻璃微珠相对于周边环境的折射率. 逆反射光相对于入射光的偏角为:

$$\beta = 4\gamma - 2i \quad (6)$$

玻璃微珠的散射光光强为:

$$I = \begin{cases} \left\{1 - \left[\frac{1}{2} \frac{\sin^2(i-\gamma)}{\sin^2(i+\gamma)} + \frac{1}{2} \frac{\tan^2(i-\gamma)}{\tan^2(i+\gamma)}\right]\right\} I_0, & (\beta \leq 1^\circ) \\ 0, & (\beta > 1^\circ) \end{cases} \quad (8)$$

(2) 积分限 c, d

这里 c, d 是图 3b 中 0 号微珠投影截面在 y'' 轴的积分限. 0 号微珠的投影截面是圆, 其半径仍为

$$r_0, \text{ 因此积分限: } \begin{cases} c = -r_0 \\ d = r_0 \end{cases}.$$

(3) 积分限 a, b

这里 a, b 是图 3b 中 0 号微珠投影截面在 x'' 轴的积分限. 0 号微珠的投影截面是圆, 其方程为 $x'' + y''^2 = r_0^2$, 若不考虑下半球的镀膜及相邻微珠的

遮挡作用, 则积分限为: $\begin{cases} a = -\sqrt{r_0^2 - y''^2} \\ b = \sqrt{r_0^2 - y''^2} \end{cases}$. 半球镀

膜及相邻微珠的遮挡作用会对积分上限 b 产生影响.

首先分析半球镀膜的影响. 由于微珠的下半球镀有金属反光层, 会对外部光线产生阻挡作用. 镀膜边界是位于 xoy 平面内的圆: $x^2 + y^2 = r_0^2$, 换

$$I = \left\{1 - \left[\frac{1}{2} \frac{\sin^2(i-\gamma)}{\sin^2(i+\gamma)} + \frac{1}{2} \frac{\tan^2(i-\gamma)}{\tan^2(i+\gamma)}\right]\right\} I_0 \quad (7)$$

还需注意, 并不是任何散射光都能计入到逆反射中. 国标 GB/T18833 规定^[27]逆反射光与入射光的偏角不能超过 1° , 换句话说, 偏角不大于 1° 的那部分散射光才能计入到逆反射中. 因此(7)还需作如下改变:

算到 $x''oy''$ 平面内则为椭圆: $\left(\frac{x}{r_0 \cos\theta}\right)^2 + \left(\frac{y}{r_0}\right)^2 = 1$, 金属镀层只会改变积分上限 b :

$$b = \sqrt{r_0^2 - y''^2} \cdot \cos\theta \quad (9)$$

再来分析相邻微珠的遮挡作用. 前面已述及, 在 $\varphi \in [0^\circ, 60^\circ]$ 区间内, 仅需要考虑 1、2 号微珠的遮挡作用. 由图 3b 可以看出, 若点 $(\sqrt{r_0^2 - y''^2} \cdot \cos\theta, y'')$ 位于 1 号或 2 号微珠在 $x''oy''$ 面内的投影截面内, 则相邻微珠存在遮挡作用, 积分上限 b 应进一步减小; 反之, 若点 $(\sqrt{r_0^2 - y''^2} \cdot \cos\theta, y'')$ 位于 1 号或 2 号微珠在 $x''oy''$ 内的投影截面外, 则相邻微珠无遮挡作用, 积分上限 b 不受影响. 上述结果可统一表达为:

$$b = \min(\sqrt{r_0^2 - y''^2} \cdot \cos\theta, h, k) \quad (10)$$

其中:

$$h = \begin{cases} -\sqrt{r_0^2 - (y'' + 2r_1 \sin\varphi)^2} + 2r_1 \cos\theta \cos\varphi, & \text{if } \operatorname{Im} \sqrt{r_0^2 - (y'' + 2r_1 \sin\varphi)^2} = 0 \\ \sqrt{r_0^2 - y''^2} \cos\theta, & \text{if } \operatorname{Im} \sqrt{r_0^2 - (y'' + 2r_1 \sin\varphi)^2} \neq 0 \end{cases}$$

$$k = \begin{cases} -\sqrt{r_0^2 - (y'' + r_1 \sin\varphi - \sqrt{3} r_1 \cos\varphi)^2} + r_1 \cos\theta \cos\varphi + \sqrt{3} r_1 \cos\theta \sin\varphi, & \text{if } \operatorname{Im} \sqrt{r_0^2 - (y'' + r_1 \sin\varphi - \sqrt{3} r_1 \cos\varphi)^2} = 0 \\ \sqrt{r_0^2 - y''^2} \cos\theta, & \text{if } \operatorname{Im} \sqrt{r_0^2 - (y'' + r_1 \sin\varphi - \sqrt{3} r_1 \cos\varphi)^2} \neq 0 \end{cases}$$

2.5 逆反射效率

一个微珠的入射光通量为: $I_0 \cdot S_0 \cdot \cos\theta = I_0 \cdot 2\sqrt{3} r_1^2 \cdot \cos\theta$, 而逆反射光通量由上述(3)计算, 因此逆反射效率:

$$\eta(r_1/r_0, n, \theta, \varphi) = \frac{P}{I_0 \cdot S \cdot \cos\theta} \quad (11)$$

逆反射效率 η 与玻璃微珠排布密度(由 r_1/r_0 决定)、折射率 n 、入射角 θ 、方位角 φ 有关, 是关于它们的多元函数.

3 数值计算结果与分析

前面建立的玻璃微珠阵列的逆反射效率 η 与有关因素的函数关系, 无法通过一个显式形象直观地反映它们之间的制约关系. 为此本文通过数值计算来揭示逆反射效率 η 受有关因素影响的定量趋势.

3.1 数值计算流程

我们编写了给定玻璃微珠排布密度(由 r_1/r_0

决定)、折射率 n 、入射角 θ 、方位角 φ 的条件下求逆反射效率的数值计算程序, 其流程如图 4 所示.

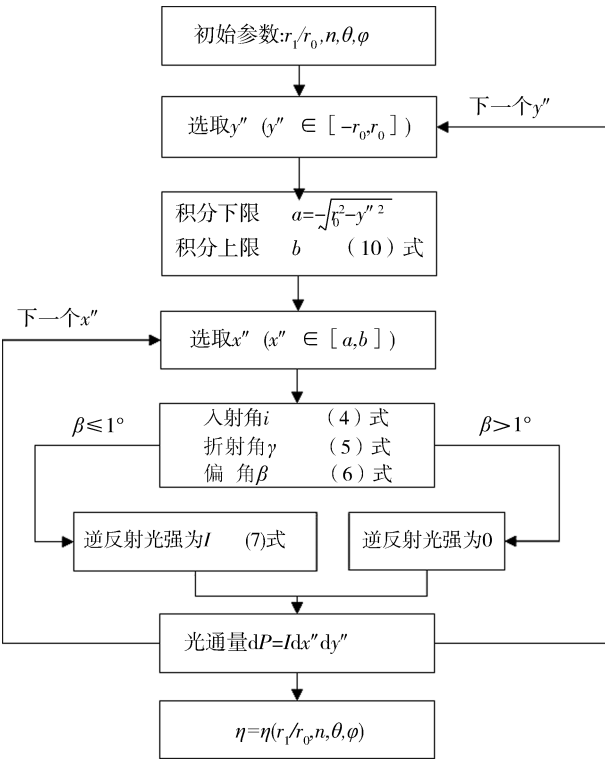


图 4 逆反射效率的数值计算流程

Fig. 4 The numerical calculation flow chart for retroreflective efficiency

3.2 各向异性的消除

上述计算程序得到了代表正六边形排布的玻璃微珠阵列的逆反射效率, 它与入射光的空间方位角 φ 有关, 这不符合实际逆反射材料中大量玻璃微珠随机排布、逆反射属性与空间方位无关的事实. 由于实际逆反射材料的各向同性也仅是对大量微珠的宏观统计平均效果, 因此可设想存在大量完全相同的样本—六边形微珠单元, 这些样本中玻璃微珠的排布密度、折射率 n 、光线入射角 θ 都相同, 只是每个样本中入射光的方位角 φ 随机分布. 这些样本的平均效果就无限接近于实际逆反射材料的情形.

实际处理方法是: 在保持微珠排布密度、折射率 n 、光线入射角 θ 不变的前提下, 方位角 φ 等间隔取值, 如 φ 分别取 $0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, \dots, 359^\circ$, 分别计算逆反射率, 然后再求平均. 计算结果表明, 当 φ 取值间隔为 5° 时, 可确保结果的平均值偏差不超过千分之一. 当对方位角 φ 求平均以后, η 与 φ 无关, 仅是微珠排布密度、折射率 n 、光线入射角 θ 的函数:

$$\eta = \eta(r_1/r_0, n, \theta) = \frac{\sum_{i=0}^{11} \eta(r_1/r_0, n, \theta, i \cdot 5^\circ)}{12} \quad (12)$$

3.3 最佳折射率

玻璃微珠的折射率对逆反射效果有着重要影响, 折射率偏小或偏大都会增大散射光的发散性, 降低逆反射效率. 因此, 存在一个最佳的折射率 n 使得逆反射效率达到最大.

固定玻璃微珠的排布密度和入射角 θ , 折射率在 $[1.50, 2.00]$ 区间接 0.05 步长等间隔取值, 作参数化数值计算, 得到的逆反射效率随折射率的变化如图 5a 所示. 可以看到 η 在 $n \in (1.90, 2.00)$ 区间明显存在一个峰值. 详细搜索计算发现当折射率 $n = 1.923$ 时逆反射效率最高, 如图 5b 所示. 这一结果与文献数据^[20,22,26]基本一致.

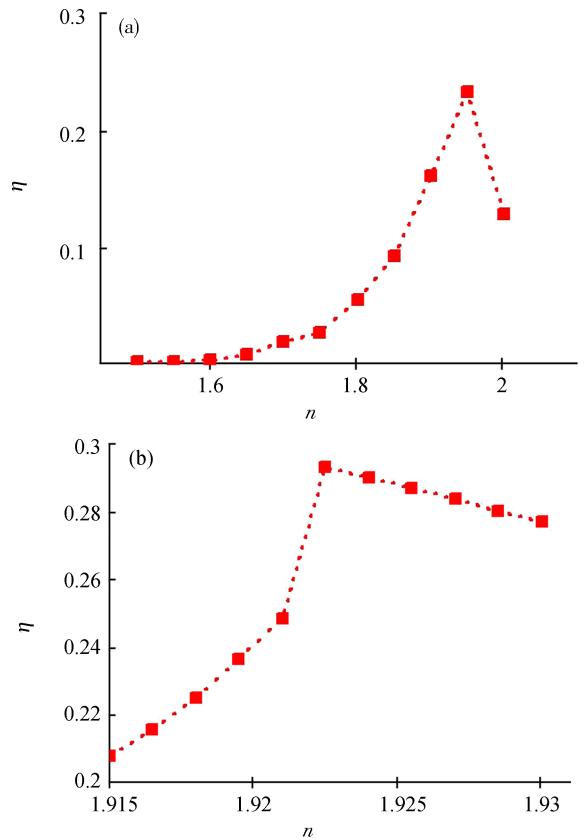


图 5 不同折射率下的逆反射效率

Fig. 5 Retroreflective efficiencies at different refractive indices

$n = 1.923$ 的结果虽然是在特定的微珠排布密度和入射角下得到的, 但是在所有其他微珠排布密度和入射角下的峰值折射率仍然是 $n = 1.923$. 因此该结果具有普适性, 称之为最佳折射率, 它是指

导逆反射材料设计开发的重要理论基础之一。 $n = 1.923$ 的最佳折射率也与逆反射材料的国标要求相对应。一旦国标要求发生变化,则最佳折射率的值也将发生微小变化。

3.4 各种微珠排布密度和入射角下的逆反射效率

固定玻璃微珠的折射率为 $n = 1.923$, 则逆反射效率是微珠排布密度和光线入射角的函数(见(12)式)。固定两个自变量之一而改变另一个自变量作参数化数值计算,即可得到逆反射效率随该参数的变化趋势。具体做法是:分别选取玻璃微珠的排布密度为 $1.0, 0.9, 0.8, \dots, 0.1$, 改变光线入射角 θ, θ 从 $0^\circ \sim 85^\circ$ 按 5° 步长等间隔取值, 分别计算逆反射系数, 得到的结果以 θ 为自变量, 以 η 为因变量绘图, 如图 6 所示。玻璃微珠排布密度的基准这样选取: 以六角密排($r_1 = r_0$)时的排布密度为基准, 规定为 1.0 , 其他情况下($r_1 > r_0$)的排布密度通过与之进行比较而得。

可以看出, 入射角不太大时, 随着微珠排布密度的增加逆反射效率变大; 但当入射角很大时, 过分增大微珠排布密度反而会使逆反射效率降低。

3.5 倾斜因子

由图 6 不难看出, 在任何一种排布密度下, 逆反射系数 η 随入射角 θ 的变化趋势存在共性: θ 较小时, η 随 θ 的增大而单调增大; θ 较大时, η 随 θ 的增大而增大的速度变缓, 甚至调头下降。这是因为当其他参数保持不变而仅入射角 θ 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 单调增大时, 有两个因素在起作用, 它们共同引起逆反射系数的改变, 其中第一个因素就是倾斜效应。

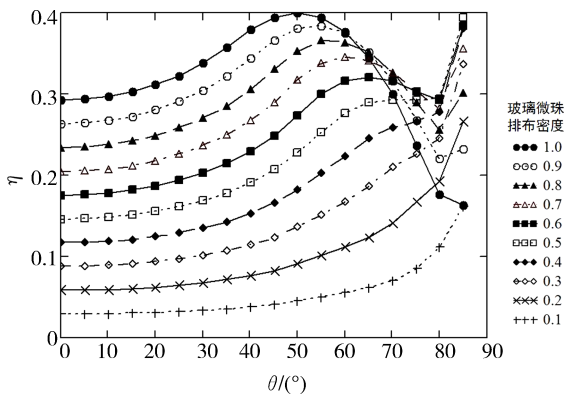


图 6 不同微珠排布密度、入射角下逆反射效率的数值计算结果

Fig. 6 Numerical results of retroreflective efficiencies at different distribution densities of glass beads and different incident angles

光膜的倾角在变大, 由图 3 以及玻璃微珠的形状(理想的球形)不难想象, 每个微珠的逆反射通量几乎不受入射角的影响, 但六边形单元的投影截面随 θ 的增大而单调减小: $S(\theta) = S(0^\circ) \cos\theta$. 因此逆反射光强 $I(\theta) = I(0^\circ) \frac{1}{\cos\theta}$, 进而 $\eta(\theta) = \frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta}$, 即倾斜效应的存在使得 $\eta(\theta)$ 随入射角按 $1/\cos\theta$ 的规律增大. $\epsilon = 1/\cos\theta$ 称为倾斜因子。

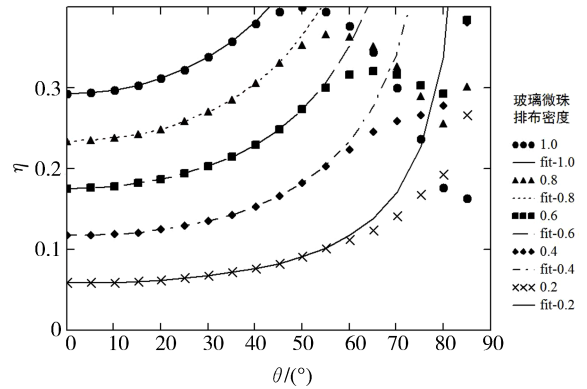


图 7 逆反射效率的数值计算结果与相应的 $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ 关系曲线

1.0: 该排布密度下的数值计算结果; fit-1.0: 该排布密度下的 $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ 关系曲线; 下同。

Fig. 7 Numerical results of retroreflective efficiency and the corresponding $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ curve

1.0: retroreflective efficiency at this distribution density of glass beads; fit-1.0: the corresponding $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ curve at this distribution density of glass beads; similarly hereinafter.

为验证倾斜因子, 将数值计算结果与 $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ 关系曲线绘制在同一个坐标系中, 如图 7 所示。为清晰起见, 仅绘制了微珠排布密度为 $1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2$ 的几条曲线。由图 7 可见, 在较低入射角范围内, 数值计算结果与 $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ 关系曲线严格相符, 在此范围内倾斜因子 $\epsilon = 1/\cos\theta$ 是准确可靠的, 说明在较低入射角范围内引起逆反射系数变化的机理是倾斜效应。

3.6 遮挡因子

由图 7 可以看出, θ 较大时, 逆反射效率数值计算结果与 $\frac{\eta(0^\circ)}{\cos\theta} \sim \theta$ 关系曲线出现偏离, 说明此时引起逆反射效率变化的因素不只是倾斜因子, 还有第二个因素在起作用, 这个因素就是相邻微珠之

θ 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 单调增大意味着入射光相对于反

间的遮挡效应。

当 θ 单调增大到一定程度,尤其是微珠排布密度本来就比较大时,由图3不难看出,光线传输路径上前方的玻璃微珠会遮挡本该照射到后方微珠的光通量,使得后方微珠的逆反射光通量及逆反射效率降低。 θ 越大,遮挡效应越严重,逆反射系数降低越多。

为了定量评价微珠之间遮挡效应的大小,引入“遮挡因子”:由遮挡效应单独引起的逆反射系数的变化率,用 δ 表示。根据该定义,并考虑到倾斜效应和遮挡效应共同导致逆反射系数的改变,则有:

$$\epsilon \cdot \delta = \frac{\eta(\theta)}{\eta(0^\circ)}$$

遮挡因子:

$$\delta(\theta) = \frac{\eta(\theta)}{\eta(0^\circ)} \frac{1}{\epsilon} = \frac{\eta(\theta)}{\eta(0^\circ)} \cos\theta \quad (13)$$

将数值计算结果按(13)进行处理,便可得到各种微珠排布密度下遮挡因子 δ 随入射角 θ 变化的定量曲线,如图8所示。由图8可以看出遮挡因子具有以下特征:(1)在入射角 θ 较小的某个范围内,遮挡因子 δ 均为1,说明入射光近似垂直照射反光膜时,微珠之间无遮挡效应发生;(2)随入射角 θ 增大, δ 变小,微珠之间的遮挡效应变强;(3)同一入射角 θ 下,微珠排布密度越大,则遮挡效应越强, δ 越小;(4)微珠排布密度越大,则遮挡效应起效的起始入射角 θ 越小。

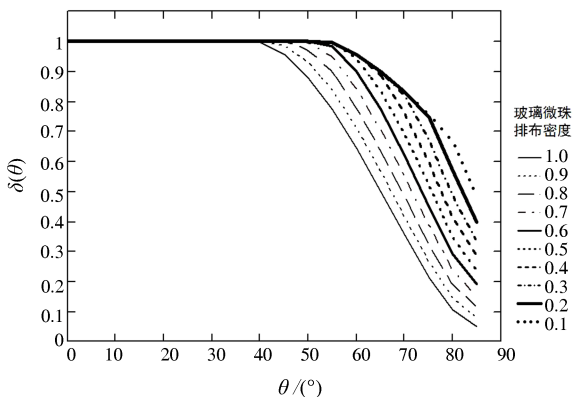


图8 不同微珠排布密度、入射角下的遮挡因子
Fig. 8 Shading factors at different distribution densities of glass beads and different incident angles

4 结论

通过研究取得了以下新认识:(1)玻璃微珠阵列的协同作用表现为倾斜效应和遮挡效应。入射

角较小时主要表现为倾斜效应,入射角较大时两者共同起作用。(2)对于玻璃微珠阵列结构的逆反射材料,倾斜因子 $\epsilon=1/\cos\theta$ 。(3)相邻微珠间的遮挡效应可通过遮挡因子定量表示。

本文首次定量计算得到不同微珠排布密度、不同入射角下的遮挡因子。

参考文献:

- [1] Aldemir B B, Konstantina G, Omar S. Pavement marking retroreflectivity and crash frequency: segmentation, line type, and imputation effects [J]. *J Transp Eng*, 2016, 142: 04016030.
- [2] Wang C, Wang Z H, Tsai Y C. Piecewise multiple linear models for pavement marking retroreflectivity prediction under effect of winter weather events [J]. *Transp Res Rec*, 2016, 2551: 52.
- [3] Quintana C, Wang Q, Jakonis D, *et al.* High speed electro-absorption modulator for long range retroreflective free space optics [J]. *IEEE Photonic Tech L*, 2017, 29: 707.
- [4] Martini M, Dell'agnello S, Currie D, *et al.* MoonLIGHT: a USA-Italy lunar laser ranging retroreflector array for the 21st century [J]. *Planet Space Sci*, 2012, 74: 276.
- [5] Hideki S, Hiroyuki I. Development of two new types of retroreflective materials as countermeasures to Urban Heat Islands [J]. *Int J Thermophys*, 2017, 38: 131.
- [6] Han Y L, Taylor J E, Pisello A L. Toward mitigating urban heat island effects: investigating the thermal-energy impact of bio-inspired retro-reflective building envelopes in dense urban settings [J]. *Energ Buildings*, 2015, 102: 380.
- [7] Zhang J, Liu J, Wang L M, *et al.* Retroreflective-type Janus microspheres as a novel contrast agent for enhanced optical coherence tomography [J]. *J Biophotonics*, 2017, 10: 878.
- [8] Tian S Q, Zhang P K, Fan H J, *et al.* Fabrication of retro-reflective polyurethane via covalently embedding with amino-functionalized glass microspheres [J]. *Prog Org Coat*, 2018, 115: 115.
- [9] Kostromitin K I. Technological aspects of the retro-reflective sheeting production [C]. [S.l.]; 2nd International Conference on Industrial Engineering, 2016: 1046.
- [10] Wang S M, Zhao D M, Huang F Q. New type of retroreflective film formed by laser-generating glass

- beads [J]. *Opt Eng*, 2002, 41: 1396.
- [11] Sandhu N K, Axe L, Ndiba P K, *et al.* Metal and metalloid concentrations in domestic and imported glass beads used for highway marking [J]. *Environ Eng Sci*, 2013, 30: 387.
- [12] Smadi O, Hawkins N, Aldemir-Bektas B, *et al.* Recommended laboratory test for predicting the initial retroreflectivity of pavement markings from glass bead quality [J]. *Transp Res Rec*, 2014, 2440: 94.
- [13] Ivanov L A, Kiesewetter D V, Kiselev N N, *et al.* Measurement of retroreflection by glass beads for road marking [C]. [S. l.]; SPIE Proceedings, 2006.
- [14] Bowman B L, Kowshik R R. Comparative study of glass bead usage in pavement marking reflectorization [J]. *Transp Res Rec*, 1994, 1442: 57.
- [15] Meydan A. Effect of glass beads' size on their wet weather retroreflectivity [J]. *Road Safety*, 1994, 17: 201.
- [16] Bible R C, Johnson N. Retroreflective material specifications and on-road sign performance [J]. *Transp Res Rec*, 2002, 1801: 61.
- [17] Stoudt M D, Vedam K. Retroreflection from spherical glass beads in highway pavement markings. 1: Specular reflection [J]. *Appl Opt*, 1978, 17: 1855.
- [18] Vedam K, Stoudt M D. Retroreflection from spherical glass beads in highway pavement markings. 2: Diffuse reflection (a first approximation calculation) [J]. *Appl Opt*, 1978, 17: 1859.
- [19] 王柏庐. 微玻璃球回归反射条件的理论分析[J]. *光学学报*, 1998, 18: 693.
- [20] Héricz D, Sarkadi T, Erdei G, *et al.* Simulation of small- and wide-angle scattering properties of glass-bead retroreflectors [J]. *Appl Opt*, 2017, 56: 3969.
- [21] Kiesewetter D. Numerical simulation of the retroreflection by glass beads [C]. [S. l.]; SPIE Proceedings, 2004.
- [22] 刘晓艳, 王雅苑. 反光织物上玻璃微珠逆反射性能的光学分析[J]. *材料导报*, 2015, 29: 174.
- [23] Galimov E R, Pryakhin Y A, Tukbaev E E, *et al.* Formation of scattering indicatrix of retroreflective coatings with microspheres [C]. [S. l.]; IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017: 240.
- [24] Luo H, Yuan C Y. Research on cant characteristics of retroreflective film based on laminae combination technology [J]. *Optik*, 2015, 126: 4272.
- [25] Zhang G H, Hummer J E, Rasdorf W. Impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity [J]. *J Transp Eng*, 2010, 136: 773.
- [26] 卢山鹰, 黄富泉, 王绍民. 玻璃微珠逆反射阵列膜的光路分析[J]. *浙江师大学报: 自然科学版*, 2000, 23: 335.
- [27] 交通运输部公路科学研究院, 国家交通安全设施质量监督检验中心. 公路交通标志反光膜: GB/T 18833-2012 [S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会, 2012.

引用本文格式:

中文: 袁长迎, 张修路, 罗雾, 等. 逆反射材料中玻璃微珠的协同效应[J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2019, 56: 1097.

英文: Yuan C Y, Zhang X L, Luo F, *et al.* Synergistic effect of glass beads in retroreflective materials [J]. *J Sichuan Univ: Nat Sci Ed*, 2019, 56: 1097.