

DOI: 10.11918/202111103

理论分析光偏振对导光管光传输效率的影响

欧阳金龙¹, 周幸¹, 左浩毅², 王春苑¹, 高庆龙¹

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 成都 610065; 2. 四川大学 物理学院, 成都 610065)

摘要: 光传输效率(LTE)是衡量导光管采光性能的最重要参数。在导光管LTE计算中,常常忽略了光线在管中若干次镜面反射引起的光偏振的累积效应。因此,为厘清连续镜面反射引起光偏振的累积效应,通过光学理论分析与公式推导,在确定光偏振对镜面反射材质反射率的影响之后,首次揭示了导光管内壁反射率随反射次数的变化规律,以及反射率的变化对导光管LTE的影响。结果表明:单束自然光线每投射到管内壁一次,就会产生一次光偏振,并在两个正交分量上产生不同的反射率,即 ρ_{\perp} 和 ρ_{\parallel} ,且 $\rho_{\perp} \geq \rho_{\parallel}$;历次反射中 ρ_{\perp} 和 ρ_{\parallel} 数值保持不变,但整体反射率会随反射次数增多而逐渐变大,故导光管内光损失率会不断减缓;由此提出了导光管中单束光线的LTE表达式,为建立复杂光源下LTE数学计算模型,奠定了理论基础。

关键词: 累积效应; 镜面反射; 整体反射率; 反射次数; 光损失率

中图分类号: TU113

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)04-0145-06

Theoretical study on the influence of light polarization on light transmission efficiency of light pipes

OUYANG Jinlong¹, ZHOU Xing¹, ZUO Haoyi², WANG Chunyuan¹, GAO Qinglong¹

(1. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, 610065, China;

2. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Light transmission efficiency (LTE) is the most important parameter to evaluate the daylighting performance of light pipes. In the calculations of LTEs of light pipes, the cumulative effect of light polarization caused by several specular reflections in pipes is often neglected. Therefore, in order to make clear the cumulative effect of light polarization generated by continuous specular reflection, through optical theoretical analysis and formula derivations, after determining the influence of light polarization on the reflectivity of specular reflection materials, this article for the first time clarified the change rule of the reflectivity of interior surface of a light pipe with the number of reflections and the influence of the variation of reflectivity on the LTE of the light pipes. The results indicated that each time a light beam projects on the pipe's inner surface, there will be a light polarization that produces different reflectivity on the two orthogonal components, i. e. ρ_{\perp} and ρ_{\parallel} and $\rho_{\perp} \geq \rho_{\parallel}$; In every reflection, the values of ρ_{\perp} and ρ_{\parallel} remains fixed, but the overall reflectivity will gradually rise with the increase of reflection times, so the light loss rate will continue to slow down. Finally, the LTE expression of a single beam in a light pipe is derived, which lays a theoretical foundation for the establishment of the LTE mathematical calculation models under complex light sources.

Keywords: cumulative effect; specular reflection; overall reflectivity; number of reflections; light loss rate

导光管采光系统是一种新型的绿色采光装置,通过具有良好光传输性能的圆筒式通道,可将室外天然光引入建筑深处或者无窗空间。实际使用中,常采用圆筒式镜面导光管与集光器、漫射器组成采光系统^[1]。在技术与经济许可的情况下,导光管内壁应选用高反射率的镜面反射材料,以提高其光传输效率(Light transmission efficiency, LTE)。光纤利用“全反射”原理,可见光以大于全反射临界角

($\arcsin(n_1/n_2)$)的入射角,从光密介质射向光疏介质时,即两者折射率分别为 n_2 和 n_1 ,且 $n_2 > n_1$,可以实现100%传输光能,比如从玻璃或水中射向空气中;而导光管需要依靠内壁对可见光的镜面反射能力,实现一定距离传输光能的功能,因此导光管内壁反射率是决定其光传输性能的最重要指标。但是,除了内壁反射率,管道形状、尺寸、弯头方式、光源等众多因素,共同影响着LTE数值,因此建立较为精

收稿日期: 2022-11-22; 录用日期: 2022-06-14; 网络首发日期: 2023-03-02

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20230301.1659.003.html>

基金项目: 国家重点研发计划项目:“西南民族村寨防灾技术综合示范”(2020YFD11007)

作者简介: 欧阳金龙(1976—),男,博士,教授;左浩毅(1978—),男,教授,博士生导师

通信作者: 高庆龙, gao3066@163.com

确的导光管 LTE 预测模型,近 30 多年来一直是该领域的一个研究热点。

基于各种方法(理论分析、采光实验、光学模拟、数学解析等)获取的大量数据,众多学者建立了导光管 LTE 的计算模型。Zastrow 等^[2]提出了最早的导光管 LTE 计算式,即式(1),仅适用于低等效长度 M (即管长 L 与管径 D 之比)、低入射角 θ (即入射光线与管轴之间的夹角)和高反射率 ρ 的导光管。Swift 等^[3]采用光线追迹法,使用如图 1 所示的圆筒式导光管的几何结构,并建立了导光管 LTE 的表达式,即式(2)。Edmonds 等^[4]开发了一种镜面导光管 LTE 的预测模型,即式(3),该式适用于 $M < 6$ 的直导光管,其中 x 指光线进入管口的点与管轴心之间的距离。Jenkins 等^[5]针对内壁面反射率为 0.95 的直导光管,建立了导光管 LTE 与等效长度 M 之间的简单关系式,即式(4)。2006 年国际照明委员会(International commission on illumination, CIE)提出了导光管 LTE 的计算式,即式(5)^[6]。2019 年 Petřala^[7]提出了全阴天环境下导光管 LTE 的简单解析公式,即式(6)。

$$LTE = \rho^{4 \times L \times \tan \theta / (\pi \times D)} \quad (1)$$

$$LTE = \frac{4}{\pi} \int_{D=0}^1 \frac{D^2}{\sqrt{1-D^2}} \rho^{\text{int}(\frac{L \tan \theta}{D^2})} \times \left\{ 1 - (1-\rho) \left[\frac{L \tan \theta}{D^2} - \text{int} \left(\frac{L \tan \theta}{D^2} \right) \right] \right\} dD \quad (2)$$

$$LTE = 4 \int_0^{D/2} \frac{((D/2)^2 - x^2)^{1/2}}{D/2} \rho^N dx / \pi (D/2)^2 \quad (3)$$

$$LTE = 0.82 e^{-\frac{0.11L}{D}} \quad (4)$$

$$LTE = \frac{e^{(L/D) \times \ln \rho \times \tan 30^\circ}}{[(1 - (L/D) \times \ln \rho \times \tan 30^\circ)]^{1/2}} \quad (5)$$

$$LTE \approx \frac{4.603 \rho^{1/2}}{1.16424 [1.988 - (L/D) \times \ln \rho]^2} \times \left\{ 1 + \frac{0.498292 \times (L/D) \times \ln \rho}{1.988 - (L/D) \times \ln \rho} + \frac{0.612324 \times [(L/D) \times \ln \rho]^2}{[1.988 - (L/D) \times \ln \rho]^2} \right\} \quad (6)$$

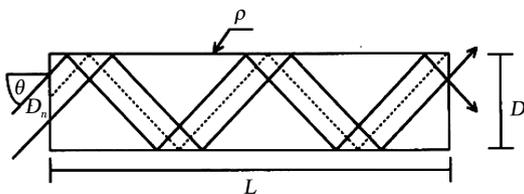


图 1 平行光入射直导光管

Fig. 1 Parallel rays entering a straight light pipe

从上述导光管 LTE 计算式,可知以往的研究均假定:导光管内壁反射率 ρ 是恒定不变的数值。对比实验数据发现,这些计算式只适合漫射光源下反射比较高、等效长度较小,或直射光源下太阳高度角较高(即直射光线入射角较小)的导光管 LTE 预测^[2,7-8]。这些情况下,光线在导光管内的反射次数少,故基于这些计算式的 LTE 预测结果精度较高,而随着反射率减小、等效长度增长或太阳高度角较低时,光线在管内传输过程中的反射次数增多,实验与预测结果之间差距开始增大。

另外,也有一些学者开发利用了导光管采光性能模拟软件,如 HOLIGILM^[9-11]、SkyVision^[12-13]等,或光学模拟软件 TracePro^[14-15]等,模拟计算不同规格的导光管 LTE。这些文献和模拟计算软件在设置管内壁反射率时,也均将其设定为恒定不变的数值。

2008 年 Swift 等^[16]曾提出导光管内壁反射率会因光偏振而随反射次数而变化,并给出了单束 i 光线在管内 LTE 与反射次数和反射率的概念性关系式,即式(7),该式中 $\rho_{n(i)}$ 为 i 光线第 n 次的内壁反射率。然而,并没有给出令人信服的相关理论,也无法深入分析非恒定的管内壁反射率对导光管 LTE 的影响。

$$LTE_i = \frac{\Phi_{\text{out}(i)}}{\Phi_{\text{in}(i)}} = \frac{\Phi_{\text{in}(i)}}{\prod_{n=1}^{n(i)} \rho_{n(i)} / \Phi_{\text{in}(i)}} = \prod_{n=1}^{n(i)} \rho_{n(i)} \quad (7)$$

倘若光线在导光管内的传输过程中,光偏振的确会使内壁反射率随反射次数而不断变化。那么,上述基于恒定反射率的导光管 LTE 计算式(1)~(6)和相关模拟结果,必然是错误的,有很强的局限性。因此,本文根据光学理论,先确认光偏振对镜面反射材质反射率的影响,再进一步厘清导光管内壁反射率随反射次数的变化规律,最后分析内壁反射率的变化对导光管 LTE 的影响。

1 光偏振对金属表面反射率的影响

光是横波,说明光波的电场矢量方向处于与光的传播方向垂直的平面。在这个平面上电场矢量的振动有多重状态,称为光波的偏振态^[17]。偏振光最常见的来源之一,是从介电媒质反射这个无所不在的过程,如自然光照射到窗玻璃、纸张、光滑金属等上的反光,一般都是部分偏振光^[18]。

金属电导率不为零,是有损耗电介质,其折射率为复数。当光照射光滑金属表面时,其反射仍遵循折射定律和菲涅尔反射定律。光线照射到金属表面的反射如图 2 所示。那么,设 n_1, θ_1 为入射介质的折射率和入射角; $\hat{n}_2 = n_2 - in_2k$ 为金属材料的复折

射率, 其中 n_2 为金属的主折射率, i 为虚数单位, $n_2 k$ 为金属的主损耗率, 于是 k 为金属主损耗率与金属主折射率的比值。并定义了中间变量 a 、 b , 见式(8)、(9), 则垂直于入射面的 S 分量的反射率 ρ_{\perp}

$$a = \sqrt{\frac{1}{2} [n_2^2 - n_2^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i + \sqrt{(n_2^2 - n_2^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n_2^4 k^2}]} \quad (8)$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{2} [-(n_2^2 - n_2^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i) + \sqrt{(n_2^2 - n_2^2 k^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_i)^2 + 4n_2^4 k^2}]} \quad (9)$$

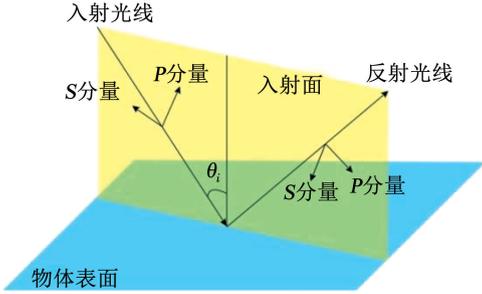


图2 光滑金属表面的光线反射

Fig. 2 Light reflection on smooth metal surface

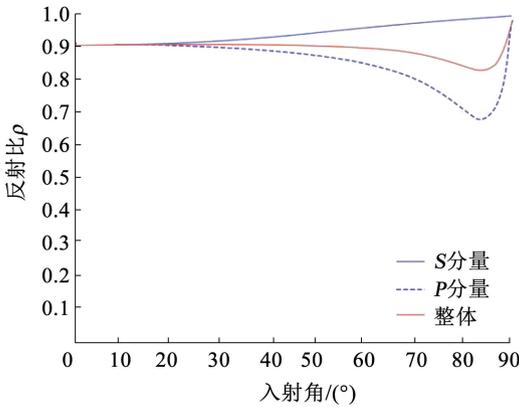


图3 光滑铝表面的 S 、 P 分量和整体的反射率曲线

Fig. 3 S - and P -components and overall reflectivity curve of smooth aluminum surface

$$\rho_{\perp} = \sqrt{\frac{(n_1 \cos \theta_i - a)^2 + b^2}{(n_1 \cos \theta_i + a)^2 + b^2}} \quad (10)$$

$$\rho_{\parallel} = \sqrt{\frac{[n_2^2(1-k^2)\cos\theta_i - n_1 a]^2 + (2n_2^2 k \cos\theta_i - n_1 b)^2}{[n_2^2(1-k^2)\cos\theta_i + n_1 a]^2 + (2n_2^2 k \cos\theta_i + n_1 b)^2}} \quad (11)$$

通常, 导光管内壁面是表面非常光滑的金属镀膜, 故当一束自然光线以某一角度投射到金属内壁面时, 必然会发生一次镜面反射, 并产生光偏振现象, 且会在 S 、 P 分量产生如图 3 所示的不同反射率, 分别为 ρ_{\perp} 和 ρ_{\parallel} , 且 ρ_{\perp} 总是大于 ρ_{\parallel} ^[21], 而整体反射率为两者的平均值, 即式(12)^[18]。除了与管轴平行的光线, 绝大多数进入足够长的圆筒式导光管内的光线, 必然会发生多次镜面反射, 那么导光管内壁面的整体反射率会出现什么样的变化? 由于每一次反射的整体反射率会影响导光管内 LTE, 故需要

可用式(10)表示, 而平行于入射面的 P 分量的反射率 ρ_{\parallel} 可用式(11)表示^[19]。杨雨迎等^[20]对 4 种典型金属(铝、钢、铁、铜)表面反射率进行了仿真计算, 其中金属铝的反射特性曲线如图 3 所示。

厘清整体反射率随反射次数的变化规律。

$$\rho = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \quad (12)$$

2 导光管中光反射率的变化规律

如图 4 所示, 以单束 i 自然光线为例, 光线光通量设为 Φ_{in} , 以某一角度入射到一段导光管内壁面上, 将遵循镜面反射定律, 持续多次镜面反射; 也将遵循菲涅尔反射定律, 持续多次地发生光偏振现象。如图 5 所示, 自然光线在经过多层玻璃组成的玻璃堆后, 透射光就成为几乎只有 P 分量的线偏振光^[17,22]。

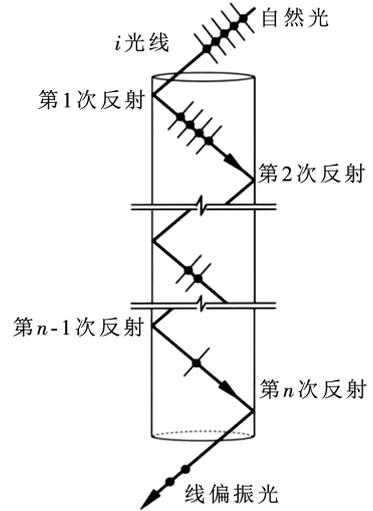


图4 圆筒式镜面导光管内 i 光线多次反射光路图

Fig. 4 Multiple reflections of i ray in a cylindrical mirror light pipe

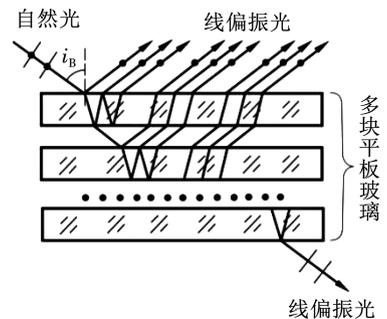


图5 非偏振光透过多层玻璃堆后成为偏振光

Fig. 5 Generation of polarized lights of non-polarized light passing through multiple glasses

与图 5 类似,则可认为在导光管内的多次镜面反射过程中, i 光线分解为相当于两条“孪生”线偏振光,即 S 分量和 P 分量。这两条光线在导光管内的光路完全相同、初始入射到壁面的光通量相同(均分为 $\Phi_{in}/2$),却会引起不同的反射率^[17]。由于入射到壁面的角度相同,则 S 、 P 分量的每次反射率

保持不变,即式(13)、(14),并从图 3 中可以确定, $\rho_{\parallel} \leq \rho_{\perp}$ 。那么,根据不断反射后的 S 、 P 分量光通量变化,就可计算出每一次反射的整体反射率,具体计算过程与结果详见表 1,并由表 1 可推知,第 n 次反射的整体反射率 ρ_n 可采用式(15)表示。

表 1 导光管内 i 光线若干次反射中整体反射率 ρ_n 的计算

Tab. 1 Calculation of overall reflectivity ρ_n of i ray's multiple reflections in a cylindrical mirror light pipe

第 n 次反射次数	S 分量光通量 $\Phi_{(n)\perp}$	P 分量光通量 $\Phi_{(n)\parallel}$	整体光通量 Φ_n	整体反射率 ρ_n
1	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times \rho_{\perp}$	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times \rho_{\parallel}$	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times (\rho_{\parallel} + \rho_{\perp})$	$\rho_1 = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2}$
2	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\perp})}{2} \times \rho_{\perp}$	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\parallel})}{2} \times \rho_{\parallel}$	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times (\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2)$	$\rho_2 = \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}$
3	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\perp}^2)}{2} \times \rho_{\perp}$	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\parallel}^2)}{2} \times \rho_{\parallel}$	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times (\rho_{\parallel}^3 + \rho_{\perp}^3)$	$\rho_3 = \frac{\rho_{\parallel}^3 + \rho_{\perp}^3}{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}$
...
n	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\perp}^{n-1})}{2} \times \rho_{\perp}$	$\frac{(\Phi_{in} \times \rho_{\parallel}^{n-1})}{2} \times \rho_{\parallel}$	$\frac{\Phi_{in}}{2} \times (\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n)$	$\rho_n = \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}}$

由表 1 和式(15)可推知,以往的研究文献中将第 1 次整体反射率 ρ_1 作为后续若干次反射中恒定不变的反射率,忽视了光偏振引起整体反射率逐渐增大的事实,故导光管 LTE 计算式(1)~(6)存在明显的缺陷。

$$\rho_{(1)\perp} = \rho_{(2)\perp} = \dots = \rho_{(n)\perp} = \rho_{\perp} \quad (13)$$

$$\rho_{(1)\parallel} = \rho_{(2)\parallel} = \dots = \rho_{(n)\parallel} = \rho_{\parallel} \quad (14)$$

$$\rho_n = \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} \quad (15)$$

由图 3 可知, $1 \geq \rho_{\perp} \geq \rho_{\parallel} \geq 0$, 故与 S 分量相比, P 分量光损速率相对较大,则若干次反射后, P 分量光通量占比不断减小,直至先降至几乎为零,而 S 分量方向光通量占比不断增大,直至几乎全部是 S 分量的偏振光。

$$\rho_2 = \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \geq \rho_1 = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \Rightarrow 2\rho_{\perp}^2 + 2\rho_{\parallel}^2 \geq \rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2 + 2\rho_{\perp} \times \rho_{\parallel} \Rightarrow \rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2 \geq 2\rho_{\perp} \times \rho_{\parallel} \Rightarrow (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})^2 \geq 0 \quad (16)$$

$$\rho_3 = \frac{\rho_{\parallel}^3 + \rho_{\perp}^3}{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2} \geq \rho_2 = \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \Rightarrow \frac{\rho_{\parallel}^2 \times \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^2 \times \rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2} \geq \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \Rightarrow (\rho_{\parallel}^2 \times \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^2 \times \rho_{\perp}) (\rho_{\parallel}^2 \div \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^2 \div \rho_{\perp}) \geq (\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2)^2 \Rightarrow \rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2 \times \rho_{\parallel}^2 \times \frac{\rho_{\parallel}}{\rho_{\perp}} + \rho_{\perp}^2 \times \rho_{\parallel}^2 \times \frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}} + \rho_{\perp}^{2(2)} \geq \rho_{\parallel}^{2(2)} + 2\rho_{\parallel}^2 \times \rho_{\perp}^2 + \rho_{\perp}^{2(2)} \Rightarrow \frac{\rho_{\parallel}}{\rho_{\perp}} + \frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}} \geq 2 \Rightarrow \rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2 \geq 2\rho_{\perp} \times \rho_{\parallel} \Rightarrow (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})^2 \geq 0 \quad (17)$$

$$\rho_n = \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} \geq \rho_{n-1} = \frac{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}}{\rho_{\parallel}^{n-2} + \rho_{\perp}^{n-2}} \Rightarrow \frac{\rho_{\parallel}^{n-1} \times \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^{n-1} \times \rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} \geq \frac{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}}{(\rho_{\parallel}^{n-1} \div \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^{n-1} \div \rho_{\perp})} \Rightarrow (\rho_{\parallel}^{n-1} \times \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^{n-1} \times \rho_{\perp}) (\rho_{\parallel}^{n-1} \div \rho_{\parallel} + \rho_{\perp}^{n-1} \div \rho_{\perp}) \geq (\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1})^2 \Rightarrow \rho_{\parallel}^{2(n-1)} + \rho_{\perp}^{2(n-1)} + 2\rho_{\parallel}^{n-1} \times \rho_{\perp}^{n-1} \geq \rho_{\parallel}^{2(n-1)} + \rho_{\perp}^{2(n-1)} + 2\rho_{\parallel}^{n-1} \times \rho_{\perp}^{n-1} \Rightarrow \frac{\rho_{\parallel}}{\rho_{\perp}} + \frac{\rho_{\perp}}{\rho_{\parallel}} \geq 2 \Rightarrow \rho_{\perp}^2 + \rho_{\parallel}^2 \geq 2\rho_{\perp} \times \rho_{\parallel} \Rightarrow (\rho_{\perp} - \rho_{\parallel})^2 \geq 0 \quad (18)$$

由于 $\rho_{\perp} \neq \rho_{\parallel}$, 则可证明式(16)~(18)成立,进而可证明整体反射率将随反射次数而逐渐增大,揭示了导光管内光偏振引起的整体反射率变化规律,并解释了导光管光损失速率减缓的现象。

3 光反射率的变化对导光管光传输效率影响的计算式

理论上,圆筒状导光管 LTE 就是指管出口光通量与管入口光通量的比值,可用式(19)表示。

$$\text{LTE} = \text{管出口光通量} / \text{管入口光通量} = \Phi_{out} / \Phi_{in} \quad (19)$$

由图 6 可知,无论是漫射光源或直射光源,射入管内的光可分解为无数条光线。假定图 4 中 i 光线为图 6 中漫射光源中的一条光线。在 i 光线的光程中,每投射到管内壁一次,就会因光能被吸收而产生一次光损失,此次光能损失量由当次整体反射率决

定。因此,在 i 光线贯穿某一导光管后,累积的光损失(或 LTE),实质上只决定于反射次数与每次的整体反射率。故 Swift 等^[16]提出的计算式(7),准确表达了单束光线在导光管内 LTE 变化的概念性规律。因此,考虑到光偏振引起的管内壁面整体反射率的变化,根据式(15)可进一步推导出 i 光线在管内的 LTE_i ,即式(20),这将有利于建立科学的复杂光源下导光管 LTE 数学计算模型。若忽视整体反射率随反射次数而不断增大的变化规律,则 i 光线的 LTE_i' 可用式(21)表示。

根据式(16)~(18),可证明式(22)成立,则说明 $LTE_i \geq LTE_i'$ 。因此,这可在一定程度上解释以往研究文献中以恒定不变的反射率预测导光管 LTE,会呈现随着反射次数增多而误差增大的趋势。

且由式(16)~(18)可知, ρ_{\perp} 与 ρ_{\parallel} 之间的差异越大, LTE_i 与 LTE_i' 之间的差异也会随之变大。当前,导光管采用高反射率的金属镜面反射材料制作,多在 0.90 以上,甚至 0.99,接近 1.00。如果整体反射率保持较高,则 ρ_{\perp} 与 ρ_{\parallel} 之间的差异程度、两者偏离整体反射率的程度也必然很微小,那么 LTE_i 与 LTE_i' 之间的差异就会很微小。这可以解释式(1)~(6)的导光管 LTE 计算结果的误差会随整体反射率的提高而减小。

$$\frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} = \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{2} \quad (20)$$

$$LTE_i' = \Phi'_{out(i)} / \Phi_{in(i)} = \Phi_{in(i)} \times \left(\frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \right)^n / \Phi_{in(i)} = \left(\frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \right)^n \quad (21)$$

$$LTE_i = \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{2} = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \times \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \times \frac{\rho_{\parallel}^3 + \rho_{\perp}^3}{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2} \times \dots \times \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} \geq \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \times \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \times \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \times \dots \times \frac{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}}{\rho_{\parallel}^{n-2} + \rho_{\perp}^{n-2}} \geq \dots \geq \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \times \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \dots \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} = \left(\frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \right)^n = LTE_i' \quad (22)$$

倘若 i 光线的入射角约为 60° ,如图 3 所示 ρ_{\perp} 和 ρ_{\parallel} 分别设为 0.95 和 0.85,当只有 1 次反射时, $LTE_i = LTE_i'$;但当反射次数增多,就会出现一定的差距,比如当达到 10 次反射时,则由式(20)、(21)可计算出 LTE_i 和 LTE_i' 分别约为 0.40 和 0.35,误差达到 12.35%。因此,在预测导光管 LTE 时,应考虑光偏振的累积效应对管壁反射率的影响。

4 讨论

由图 3 可知,镜面反射材料的反射率还与光线入射角度有关,且 ρ_{\perp} 与 ρ_{\parallel} 之间的差异也会不同,那么漫射光源中不同入射角度的光线产生的整体反射率变化就会更加复杂,增加准确预测导光管 LTE 的难度。而且,由图 7 可知,以同一角度入射同一镜面反射材料时,不同波长可见光会呈现不同的反射率,即光谱反射率^[23],这也可能会影响导光管的采光性能。因此,文中以上主要研究结果并未考虑以上两个因素的影响,只是通过数学公式推导,理论分析了光偏振对导光管内壁反射率及其 LTE 的影响,所以,本研究结果尚有一定的局限性。

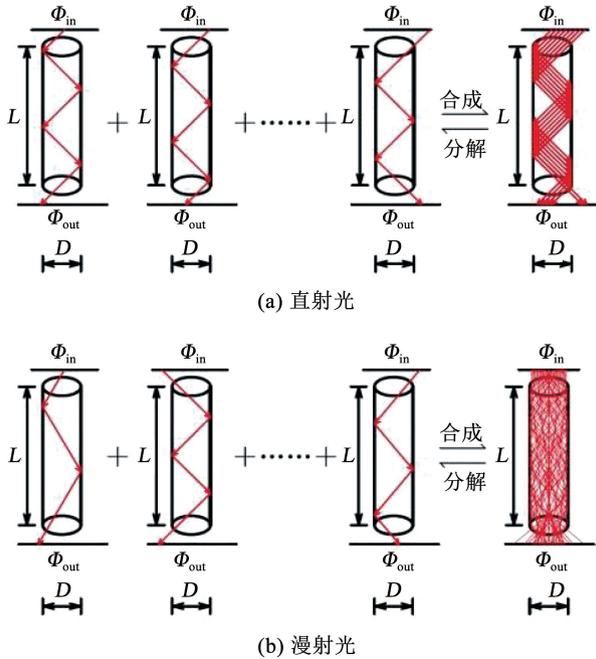


图 6 直射光源与漫射光源的光线分解、组合图

Fig. 6 Decomposition and combination of countless rays in direct and diffuse light sources

$$LTE_i = \prod_{n=1}^{N(i)} \rho_{n(i)} = \prod_{n=1}^{N(i)} \frac{\rho_{\parallel}^n + \rho_{\perp}^n}{\rho_{\parallel}^{n-1} + \rho_{\perp}^{n-1}} = \frac{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}}{2} \times \frac{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2}{\rho_{\parallel} + \rho_{\perp}} \times \frac{\rho_{\parallel}^3 + \rho_{\perp}^3}{\rho_{\parallel}^2 + \rho_{\perp}^2} \times \dots$$

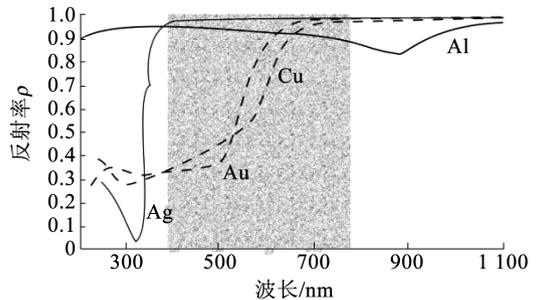


图 7 银、金、铜和铝的光谱反射率

Fig. 7 Spectral reflectance of silver, gold, copper and aluminum

为了准确评价导光管的采光性能,有必要从以下方面进一步展开深入研究:1)采用光学实验方法,验证了以相同入射角度的若干次镜面反射后,光

偏振是否导致反射光几乎只有 S 分量的线偏振光。
2) 依次探讨光线的入射角度、光谱反射率、光偏振等因素的影响后, 还需要探讨这些因素对导光管内壁整体反射率及导光管 LTE 的耦合影响, 并厘清这些因素的耦合关系, 最终建立更科学的导光管 LTE 数学计算模型。3) 由于导光管的前、后分别设置透光率很高的集光器和漫射器, 那么光线透过这些透光材料, 经折射也会产生光偏振^[18]。同样, 需要研究光偏振对整个导光管采光系统采光性能的影响。

5 结 论

1) 分析光偏振的原理, 可以确定光线投射到圆筒式镜面导光管的内壁面上, 必然会发生光偏振现象, 从而会在 S 、 P 分量产生不同反射率。

2) 分析光偏振的累积效应, 揭示了导光管内壁整体反射率的变化规律。由于光线在导光管内不断地镜面反射, 因持续的光偏振, 尽管 S 、 P 分量的反射率保持不变, 却引起整体反射率会随反射次数而逐渐增大, 进而使光能损失或导光管光传输效率衰减的速率不断减缓。

3) 根据光偏振的累积效应, 进一步推导了单束光线在导光管中光传输效率表达式。这为建立科学的复杂光源下导光管光传输效率数学计算模型, 奠定了理论基础。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 导光管采光系统技术规程: JGJ/T 374-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for tubular daylighting system: JGJ/T 374-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015

[2] ZASTROW A, WITTEW V. Daylighting with mirror light pipes and with fluorescent planar concentrators[J]. Proceeding of SPIE, 1986, 692: 227. DOI: 10.1117/12.936710

[3] SWIFT P D, SMITH G B. Cylindrical mirror lightpipes[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1995, 36(2): 159. DOI: 10.1016/0927-0248(94)00172-3

[4] EDMONDS I R, MOORE G I, SMITH G B, et al. Daylighting enhancement with light pipes coupled to laser-cut light-deflecting panels[J]. Lighting Research & Technology, 1995, 27(1): 27. DOI: 10.1177/14771535950270010101

[5] JENKINS D, MUNEER T, KUBIE J. A design tool for predicting the performances of lightpipes [J]. Energy and Buildings, 2005, 37(5): 485. DOI:10.1016/j.enbuild.2004.09.014

[6] Tubular Daylight Guidance Systems Commission Internationale de L'Eclairage. Tubular Daylight Guidance Systems, Technical Report; CIE 173-2006[S]. Vienna: CIE Central Bureau, 2006

[7] PETRŽALA J. Simple analytic formula for the light-tube optical efficiency under overcast skyconditions [J]. Solar Energy, 2019, 194: 47. DOI:10.1016/j.solener.2019.10.032

[8] DUTTON S, SHAO Li. Raytracing simulation for predicting light pipe transmittance [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2007, 2(4): 339. DOI: 10.1093/ijlct/2.4.339

[9] KOCIFAJ M, DARLA S, KITTLER R. HOLIGILM: Hollow light guide interior illumination method-An analytic calculation approach

for cylindrical light-tubes [J]. Solar Energy, 2008, 82(3): 247. DOI: 10.1016/j.solener.2007.07.003

[10] 高民东, 徐广强, 曹冠英, 等. 辽宁大连地区标准阴天条件下光导管效率与照度分布的模拟分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(8): 2303
GAO Mingdong, XU Guangqiang, CAO Guanying, et al. Simulation analysis of efficiency and illumination distribution of light guide under CIE overcast sky condition in dalian area, liaoning[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2017, 38(8): 2303. DOI: 10.19912/j.0254-0096.2017.08.038

[11] 盛夏, 曹冠英, 宣昂, 等. 不同天气模式下光导照明系统的效率分析[J]. 照明工程学报, 2017, 28(3): 66
SHENG Xia, CAO Guanying, XUAN Ang, et al. The efficiency analysis of hollow light guide system under different weather patterns [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2017, 28(3), 66. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2017.03.013

[12] LO VERSO V R M, PELLEGRINO A, SERRA V. Light transmission efficiency of daylight guidance systems: An assessment approach based on simulations and measurement in a sun/sky simulator[J]. Solar Energy, 2011, 85(11): 2789. DOI:10.1016/j.solener.2011.08.017

[13] 李文忠, 冯永忠, 罗涛, 等. 天然光导光管系统的设计与模拟计算[J]. 照明工程学报, 2008, 19(4): 52
LI Wenzhong, FENG Yongzhong, LUO Tao, et al. Design and simulation of daylight light-pipe system [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008, 19(4): 52. DOI:10.3969/j.issn.1004-440X.2008.04.009

[14] 王书晓, 利岚, 张滨. 基于日光系数法的导光管效率计算方法研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(8): 12
WANG Shuxiao, LI Lan, ZHANG Bin. Daylight coefficient computational method-based study on calculation method of tubular daylight device efficiency [J]. Building Science, 2013, 29(8): 12. DOI:10.3969/j.issn.1002-8528.2013.08.004

[15] 吴新汶, 王春苑, 欧阳金龙. 利用 TracePro 模拟分析导光管的传输效率[J]. 照明工程学报, 2020, 31(2): 145
WU Xinwen, WANG Chunyuan, OUYANG Jinlong. Analysis of transmission tube efficiency of light pipe based on TracePro [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2020, 31(2): 145. DOI: 10.3969/j.issn.1004-440X.2020.02.028

[16] SWIFT P D, LAWLOR R, SMITH G B, et al. Rectangular-section mirror lightpipes [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92(8): 969. DOI:10.1016/j.solmat.2008.02.029

[17] 郑植仁, 吴文智, 李艾华. 光学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015
ZHENG Zhiren, WU Wenzhi, LI Aihua. Optics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015

[18] HECHT E. Optics [M]. 4th ed. Edinburgh: McGraw-Hill Education, 2002

[19] 鲜于子安, 侯立周. 金属镜面双反射消偏研究[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(5): 67
XIANYU Zi'an, HOU Lizhou. Research on eliminating polarizations characteristic of metal reflectors of Double reflection [J]. Spacecraft Recover & Remote Sensing, 2015, 36(5): 67. DOI:10.3969/j.issn.1009-8518.2015.05.009

[20] 杨雨迎, 崔占忠, 王玲, 等. 金属目标表面的反射激光偏振特性[J]. 科技导报, 2013, 31(11): 28
YANG Yuying, CUI Zhazhong, WANG Ling, et al. Reflective laser polarizations characteristics of metal target surface in the short-range detection [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(11): 28. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.11.002

[21] 赵建林. 高等光学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001
ZHAO Jianlin. Advanced optics [M]. Beijing: National Defense Industry Press of China, 2001

[22] GHATAKA. Optics [M]. 4th ed. New Delhi: McGraw-Hill Education, 2009

[23] NILSSON A M, JONSSON J C, ROOS A. Spectrophotometric measurements and ray tracing simulations of mirror light pipes to evaluate the color of the transmitted light [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 124: 172. DOI: 10.1016/j.solmat.2014.01.049