

环境相对湿度对光学镜面散射特性的影响

陈 壮, 田博宇, 缪 麟, 孙年春, 张 彬

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064)

摘要: 在成像光学系统中, 环境相对湿度会影响光学镜面污染粒子的散射特性, 进而对成像光学系统性能造成影响。根据吸湿性, 将污染粒子分为亲水性粒子和疏水性粒子。利用镜面污染粒子的光散射模型, 分析了亲水性粒子散射效率因子随环境湿度的变化规律。在此基础上, 结合亲水性和疏水性污染粒子的统计模型, 分析了多粒子污染下, 不同种类粒子占比和镜面洁净度等参数对光学镜面散射特性的影响。结果表明, 污染粒子造成光学镜面的双向散射分布函数 (BRDF) 和全积分散射值 (TIS) 均随着环境相对湿度的增加而增大。并且, 亲水性粒子比例越高, 光学镜面散射损耗越强。随着光学镜面洁净度等级的减小, 环境相对湿度对镜面散射损耗的影响有所减小。

关键词: 散射特性; 光学镜面; 米氏理论; 相对湿度

中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210041

Effect of ambient humidity on scattering characteristics of optical mirror surface

Chen Zhuang, Tian Boyu, Miao Lin, Sun Nianchun, Zhang Bin

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In imaging optical system, the relative humidity of the environment will affect the scattering characteristics of the optical mirror surface covered with polluted particles and further affect the performance of the system. According to the hygroscopicity, the polluted particles were divided into hydrophilic particles and hydrophobic particles. By using the light scattering model of pollution particles, the variation of the scattering efficiency factor of a single hydrophilic polluted particle on the relative humidity of the environment was analyzed. On this basis, combined with the statistical models of hydrophilic and hydrophobic pollution particles, the effect of the proportion of hydrophilic particles and the cleanliness level of the mirror surface on the scattering characteristics of the optical mirror surface with multi-particles was analyzed. The results show that the bidirectional reflection distribution function (BRDF) and the total integrated scattering (TIS) caused by the polluted particles on the optical mirror surface increase with the increasing of the relative humidity of the environment. The higher the proportion of hydrophilic particles is, the stronger the scattering loss of the optical mirror surface is. As the cleanliness level of the optical mirror surface decreases, the influence of the ambient humidity on the scattering loss of the mirror surface decreases.

Key words: scattering characteristics; optical mirror surface; Mie theory; ambient humidity

收稿日期: 2021-01-22; 修订日期: 2021-03-22

基金项目: 四川省科技计划项目 (2018JY0553); 中国科学院自适应光学重点实验室基金 (LAOF1801)

作者简介: 陈壮, 男, 硕士生, 主要从事光学系统优化与杂光分析方面的研究。

导师简介: 张彬, 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事激光与光通信、光电子技术等方面研究。

0 引言

降尘作为大气气溶胶的主要组成成分,是指在空气动力作用下自然沉降到地面的大气悬浮颗粒物。大气降尘的两个主要来源是降尘粒径小于 10 μm 的细颗粒物源(大气环境粉尘污染的背景)和短距离悬移搬运的 10~50 μm 粗粒自然源^[1]。考虑到大口径封窗的制造难度以及封窗对红外波段的截止特性,大口径光学系统通常倾向于使用敞开式结构,导致大量元件表面暴露于复杂外界环境中。大气降尘粒子在重力作用下会沉降到光学表面而造成镜面污染,进而影响光学系统的性能^[2]。

在镜面散射特性研究中,常采用 Mie 理论。然而,现有 Mie 理论多针对干燥粒子进行分析^[2],而真实应用环境中的环境湿度会对其有所影响。以南京地区著名的紫金山天文望远镜为例,南京市全年相对湿度维持在一个较高水平,相对湿度范围在 40% 以上的时间占全年的 93.48%,夏季相对湿度最大而冬季相对湿度最小。受环境湿度的影响,降尘粒子的粒径和形状会发生改变^[3]。同时,吸附在降尘粒子外的水层也会改变降尘粒子的光学常数,从而影响降尘的散射特性^[3]。对于这类暴露在湿度较高环境中的大型光学系统,忽略环境湿度的影响将难以准确评估其光学系统性能。

光学元件表面散射特性的相关研究已有诸多报道。国内外学者基于理论和实验分析了不同镜面污染颗粒对镜面散射分布的影响^[4-5];也有学者对受湿度影响的单粒子散射特性进行了深入研究^[6-8]。目前,鲜有报道有关外界环境湿度变化对多污染粒子镜面散射特性造成的影响。文中在考虑相对湿度影响的情况下,给出了 Mie 理论的修正模型,并以湿度较大的南京地区为例,分析了环境湿度对光学镜面散射特性的影响。

1 理论模型

1.1 修正的 Mie 理论

空气中的各种悬浮颗粒附着在镜面上形成表面污染物,这些颗粒污染物可近似视作球形粒子,因而在分析镜面污染粒子光学特性时通常采用 Mie 理论^[2]。大多数镜面散射研究没有考虑环境湿度对污染

粒子散射特性的影响,但实际系统中,污染粒子不可避免地会遭受早晚湿度变化、季节降水变化的影响,致使其光学特性会发生变化。为更好地描述污染粒子随环境湿度的变化,笔者基于 Mie 理论和不同吸湿粒子模型,获得了环境相对湿度影响下的光学镜面散射特性分析模型。

环境相对湿度 (Relative Humidity, X_{RH}) 是指单位体积空气内实际所含的水气密度 (用 d_1 表示) 和同温度下饱和水气密度 (用 d_2 表示) 的百分比,而另一种计算方法则是实际的空气水气压强 (用 p_1 表示) 和同温度下饱和水气压强 (用 p_2 表示) 的百分比^[8]:

$$X_{RH}(\%) = \frac{d_1}{d_2} \times 100\% = \frac{p_1}{p_2} \times 100\% \quad (1)$$

随着环境相对湿度的增加,大气中的水蒸气会凝结在污染粒子上,在增加污染粒子粒径尺寸的同时,也逐渐改变其化学成分和复折射率,进而影响粒子的散射效应^[7]。

依照粒子吸湿性强弱,通常可分为亲水性和疏水性两类^[7]。无机降尘粒子(包括硫酸盐、硝酸盐、铵盐、海盐等)和部分吸湿性粒子属于亲水性污染粒子;而黑碳、沙尘及弱极性和非极性有机物不具有吸湿性,属于疏水性污染粒子^[9]。亲水性粒子具有较强的吸湿性,且在高湿度的条件下具有潮解特性,粒子发生潮解时的相对湿度被称为潮解相对湿度 (X_{DRH})。结合已有的实验结果,分两个阶段对亲水性粒子特性进行表征。当 $X_{RH} < X_{DRH}$ 时,粒子表面吸附水量表示为^[7]:

$$\frac{1}{X_{RH}} = 1 + k \frac{V_{dry}}{V_{water}} \quad (2)$$

当 $X_{RH} = X_{DRH}$, 粒子发生潮解形成液滴。当时 $X_{RH} > X_{DRH}$, 粒子继续吸收水分并被稀释,其粒径与湿度的关系可以表示为^[7]:

$$\frac{X_{RH}}{\exp\left[\frac{A}{D_{dry}G(X_{RH})}\right]} = \frac{G(X_{RH})^3 - 1}{G(X_{RH})^3 - (1-t)} \quad (3)$$

式中: $t=0.3$ 为吸湿性参数; D_{dry} 为干燥粒子的直径; A 为常量, $A=2.09 \times 10^{-3}$; $G(X_{RH})=D(X_{RH})/D_{dry}$ 为湿度增长因子; $D(X_{RH})$ 为随 X_{RH} 变化的湿粒子直径。

疏水性粒子的吸湿性较弱,随着环境相对湿度的增加,其表面会吸附一层水膜,疏水性粒子表面的水

膜厚度 L 与 X_{RH} 之间的函数关系为^[7]:

$$L = 4.34^{1/3} \left[\ln \left(\frac{1}{X_{RH}} \right) + \frac{1.08}{r_a} \right]^{-1/3} \times 0.4 \quad (4)$$

式中: r_a 为被吸附粒子的半径。

Hanel 通过大量的实验和理论研究得到等效均匀球形粒子的复折射率 m_e 的实部 m_{re} 、虚部 m_{ie} 、相对湿度 X_{RH} 和粒径比之间的关系为^[8]:

$$m_{re} = m_{rw} + (m_{ro} - m_{rw}) \cdot [r_h/r_o]^{-3} \quad (5)$$

$$\frac{m_{ie}}{m_{re}^2 + 2} = \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2} + \left(\frac{m_{io}}{m_{ro}^2 + 2} - \frac{m_{iw}}{m_{rw}^2} \right) \left[\frac{r_h}{r_o} \right]^{-3} \quad (6)$$

式中: 下标 r、i、e、o 和 w 分别表示实部、虚部、吸湿后气溶胶、干燥气溶胶粒子和水。在湿度影响下, 气溶胶的复折射率表示为:

$$m_e = m_{re} + m_{ie}i \quad (7)$$

Mie 理论的关键参数包括用于计算散射场振幅的 Mie 系数 a_n 和 b_n , 以及用于计算内部场振幅的 c_n 和 d_n ^[2]。通过这些系数的组合可以计算粒子的光学特性参数, 如散射效率因子、吸收效率因子、不对称因子等。基于公式 (8)~(11), 可得到考虑环境相对湿度影响下修正后的 Mie 系数 a_n 、 b_n 、 c_n 、 d_n 分别为:

$$a_n = \frac{m_e^2 j_n(m_e x) [x j_n^{(1)}(x)]' - j_n(x) [m_e x j_n(m_e x)]'}{m_e^2 j_n(m_e x) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [m_e x j_n(m_e x)]'} \quad (8)$$

$$b_n = \frac{j_n(mx) [x j_n(x)]' - j_n(x) [m_e x j_n(m_e x)]'}{j_n(m_e x) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [m_e x j_n(m_e x)]'} \quad (9)$$

$$c_n = \frac{j_n(x) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [x j_n(m_e x)]'}{j_n(m_e x) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [m_e x j_n(m_e x)]'} \quad (10)$$

$$d_n = \frac{m_e j_n(x) [x h_n^{(1)}(x)]' - m_e h_n^{(1)}(x) [x j_n(m_e x)]'}{m_e^2 j_n(m_e x) [x h_n^{(1)}(x)]' - h_n^{(1)}(x) [m_e x j_n(m_e x)]'} \quad (11)$$

式中: $x=ka/2$ 用于表征颗粒的尺寸, 为无量纲量, k 为波数, a 为随湿度变换的球形颗粒直径; m_e 为修正的球形污染粒子相对于周围环境的折射率; $z=x$ 或 $z=mx$; $j_n(x)$ 和 $h_n(x)$ 分别为 Bessel 函数和 Hankel 函数。

设单色光沿 Z 轴正向传播, 电场振动方向沿 X 轴, 磁场振动方向沿 Y 轴, 散射角 θ 定义为散射光矢量与 Z 轴正方向的夹角, 方位角 φ 定义为散射光在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角, 入射光的强度为 I_0 , 散射粒子的直径为 d , 且污染颗粒满足各向同性, r 表示球形粒子到任意观测点 P 处的直线距离, λ 表示波

长。于是, 自由空间中任意一点 P 的散射强度可以定义为^[2]:

$$I(r, \theta, \varphi) = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2 r^2} [i_1(\theta) \sin^2 \varphi + i_2(\theta) \cos^2 \varphi] \quad (12)$$

式中: $i_1(\theta)$ 、 $i_2(\theta)$ 分别为平行和垂直于散射面的强度分量, 称为散射强度函数, 它们是振幅函数 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 模的平方, 即

$$i_1(x, m, \theta) = |S_1|^2 = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \right]^2 \quad (13)$$

$$i_2(x, m, \theta) = |S_2|^2 = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \tau_n + b_n \pi_n) \right]^2 \quad (14)$$

式中: S_1 和 S_2 为散射振幅函数; π_n 和 τ_n 为散射角函数。

值得指出的是, 当相对湿度为 0 时, 该修正模型可退化为干燥条件下的 Mie 散射模型。利用该模型, 在参考文献 [2] 给出的相关参数条件下, 其复算结果与文献结果基本一致, 从而验证文中所用计算模型和方法的正确性。

1.2 镜面洁净度表征

在实际应用中, 通常使用表面洁净度来度量光学元件的污染程度。根据美国军用标准 MIL-STD-209D, 镜面的污染程度可用表面洁净度来表征。表面洁净度用一个数值描述, 记作 G_1 , 表示每平方英尺镜面上大于该数值的颗粒数目刚好为 1。根据该标准, 镜面上粒子直径与其数量分布近似满足^[2]:

$$\log N_a = C \cdot [(\log G_1)^2 - (\log G)^2] \quad (15)$$

式中: G 为颗粒直径 (微米量级且 G 大于等于 1); N_a 为元件表面每平方英尺上颗粒直径大于等于 G 的粒子数量; C 是归一化常量, 对于清洁表面, C 的值近似为 0.926。

进一步可推导出每平方毫米的表面上, 颗粒直径为 G 的粒子数目为:

$$F_{(G)} = \frac{1}{92\ 903.04} \left[10^{C(\log^2 G_1 - \log^2 G)} - 10^{C(\log^2 G_1 - \log^2 (G+1))} \right] \quad (16)$$

根据公式 (16), 图 1 给出了在不同表面洁净度等级下, 颗粒尺寸 $G(\mu\text{m})$ 与粒子数量 $F_{(G)}$ 之间的关系。

从图 1 可以看出, 在同一洁净度等级条件下, 镜面上半径越大的污染粒子数量越少。并且, 随着镜面洁净度等级的升高, 镜面上的污染粒子数增多。

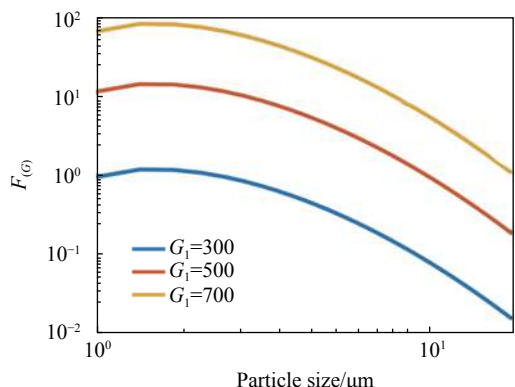


图 1 不同表面洁净度镜面上的粒子分布

Fig.1 Particle distribution with different surface cleanliness in the mirror surface

2 环境湿度对单污染粒子散射特性的影响

此节利用修正的 Mie 散射模型分析了湿度变化对单个污染粒子散射效率因子的影响。

散射效率因子是粒子散射截面与粒子几何截面之比^[7],用 Q_{sca} 表示。对于受湿度影响的包裹性球形粒子,单一污染粒子的散射效率因子为:

$$Q_{sca} = \frac{2}{x^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2) \quad (17)$$

散射吸湿增长因子 $f(X_{RH})$ 定义为某一相对湿度下的降尘粒子散射系数与干燥状态下的降尘粒子散射系数的比值^[9]:

$$f(X_{RH}) = \frac{Q_{sca}(X_{RH})}{Q_{sca}(X_{dry})} \quad (18)$$

当入射波长为 532 nm 时,利用修正的 Mie 模型计算了粒径为 0.2 μm 的 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 颗粒在不同的 X_{RH} 时的散射增长因子 $f(X_{RH})$,红点表示的数据参考文献 [10],其结果见图 2。由图 2 可知,该模型的计算结果与参考文献 [10] 结果相符合,说明文中建立的修正 Mie 散射模型的正确性和有效性。

仿真时选取湿度较大的南京为典型例,南京地区干燥降尘粒子的复折射率为 $m_c=1.368+0.014i$ ^[11],利用公式 (5) 和 (6) 可分别计算得到折射率实部与虚部随环境相对湿度的变化。由公式 (2)~(4) 可知污染粒子半径随相对湿度的增大而增大。其中,环境湿度变化对亲水性污染粒子的影响显著,而对疏水性污染粒子影响较小。由于疏水性污染粒子受湿度影响较小,而

亲水性污染粒子受环境湿度影响明显,因而笔者重点分析单一亲水性污染粒子散射特性随湿度的变化,此时取 $X_{DRH}=0.7$ 。图 3 给出了不同粒径下,亲水性粒子散射效率因子 Q_{sca} 随湿度的变化曲线。

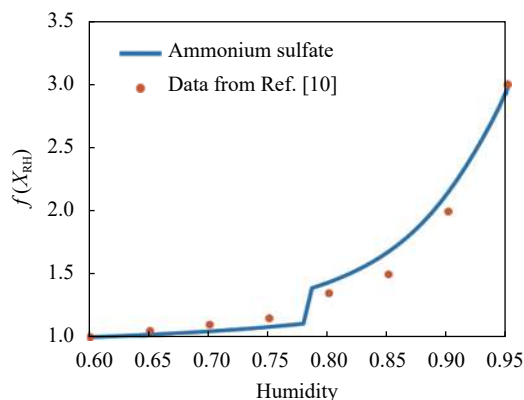


图 2 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 粒子散射增长因子随环境相对湿度变化的对比曲线
Fig.2 Comparison curve of $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ particle scattering growth factor with environmental relative humidity

从图 3 可以看出,对于粒径相同的污染粒子,散射效率因子随着相对湿度的增加而逐渐增大。在相同的湿度条件下,散射效率因子随着粒径的增大而减小。环境相对湿度在 60% 以下时,不同粒径条件下的散射系数均增长缓慢,此时,散射效率因子与干燥条件下的散射效率因子相差较小。然而,随着相对湿度的进一步增加,散射效率因子显著变大。导致这一现象的主要原因是亲水性粒子达到潮解相对湿度时发生了潮解所致。McMurry 使用前后差分迁移亲水分析仪 (Tandem Differential Mobility Analyzer, TDMA)

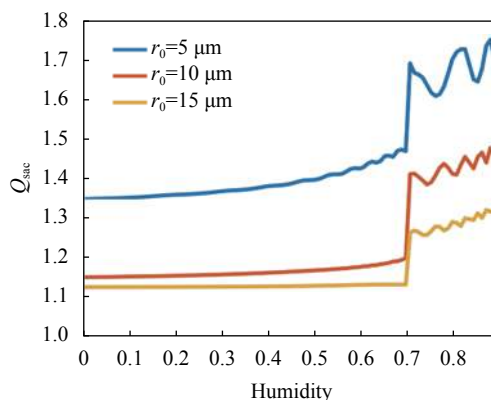


图 3 不同粒径污染粒子散射效率因子 Q_{sca} 随湿度变化
Fig.3 Scattering efficiency factor Q_{sca} of polluted particles of different particle size varies with humidity

对气溶胶粒子粒径随相对湿度的变化进行了大量研究发现,当环境相对湿度高于 60% 时,环境湿度的影响变得非常重要^[3]。亲水性降尘粒子在吸湿增长过程中会发生潮解,水汽的凝结作用以及固液表面的化学反应和非均向传质过程使得粒径突然增大,致使颗粒物的基本物理状态发生明显的改变。由此可知,相对湿度越大对单个污染粒子造成的散射影响越大,光学损耗加剧,且在相对湿度大于 60% 的高湿度条件下尤为明显。

3 环境湿度对光学镜面散射特性的影响

近海地区受海洋影响沉积区域上空大气颗粒物以海盐为主,受人类活动和大气环流影响,不同区域降尘粒子成分占比不同^[12]。根据近海气溶胶成分和各地降尘成分综合分析,在不同环境条件下,亲水性污染粒子占比大约在 30%~80% 之间。文中亲疏水粒子统计模型适用于受海洋影响较大的近海地区污染粒子分布。南京市地处中国东部近海地区,受到亚热带季风影响降水充沛。针对南京当地污染粒子成分进行分析^[1],文中计算分析了亲水性粒子占比为 30%~80% 条件下的光学镜面散射情况。

假设散射到前向方向上并由镜面反射的辐射不会受污染颗粒所影响,来自镜面污染粒子的散射函数(BRDF)可定义^[13]为:

$$BRDF = \frac{\lambda^2 D}{4\pi^2} i_1 \quad (19)$$

式中: D 为镜面上的颗粒密度(每平方米上的粒子数); i_1 为散射强度函数。

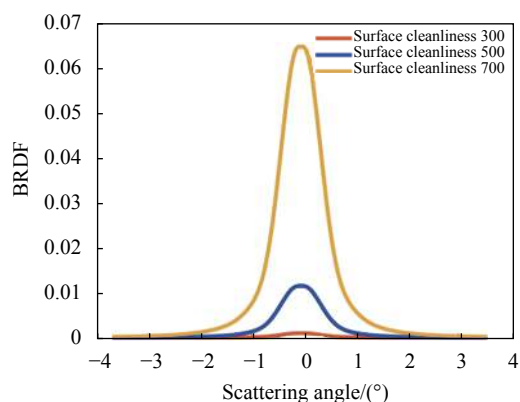
全积分散射 TIS (Total Integrated Scatter, TIS) 的物理含义是某一散射表面散射到半球空间的辐射通量与入射到该表面的辐射通量的比值,它是 BRDF 在半球空间的二重积分^[2]:

$$TIS = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} BSDF(\theta_i, \phi_i; \theta_s, \phi_s) \cos(\theta_s) \sin(\theta_s) d\theta_s d\phi_s \quad (20)$$

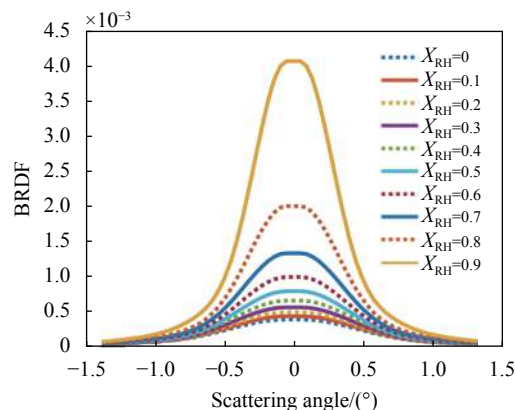
式中: θ_i 和 ϕ_i 为入射光的入射角和方位角; θ_s 和 ϕ_s 为散射光的散射角和方位角。

南京市受人类活动影响,市内风景区、郊区、居民区、道路、工业混合区和钢铁工业区的各类降尘粒子含量各不相同^[12]。结合南京当地环境条件,根据不同亲疏水污染粒子占比在镜面分布情况,笔者进一步

分析了多粒子分布的光学镜面散射特性随环境湿度的变化。对于不同类型的亲水性粒子和疏水性粒子,利用公式 (19) 和 (20) 可以分别计算单一粒径条件下的 BRDF 和 TIS。真实环境下,不同区域光学镜面上亲水性粒子和疏水性粒子比例可能各有不同^[9, 14],可以通过线性叠加亲水性粒子和疏水性粒子的 BRDF 和 TIS 求得整个镜面的 BRDF 和 TIS,如图 4 所示。为便于讨论,将亲水性粒子占比表示为 A , 剩余部分为疏水性粒子占比。为便于计算且不失一般性,做如下简化: (1) 所有污染粒子均匀分布; (2) 不考虑相干效应和凝结效应^[2]。



(a) 不同的洁净度条件
(a) Different cleanliness conditions



(b) 不同的湿度条件
(b) Different humidity conditions

图 4 不同条件下 BRDF 随入射角度的变化 ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$)

Fig.4 Variation of BRDF with incident angle under different conditions ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$)

表 1~表 3 分别计算了不同亲疏水粒子占比、不同光学镜面洁净度等级和不同入射角度条件下相对应的 TIS 值。

由图 4(a) 可知,不同的光学镜面洁净度对散射造

表 1 不同种类粒子占比时的 TIS ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$ $G_1=300$)

Tab.1 TIS for surfaces with different proportions of hydrophilic particles ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$ $G_1=300$)

Humidity	0	0.3	0.6	0.9
TIS(A:30%)	7.01×10^{-5}	7.14×10^{-5}	7.54×10^{-5}	1.85×10^{-4}
TIS(A:40%)	7.01×10^{-5}	7.18×10^{-5}	7.72×10^{-5}	2.23×10^{-4}
TIS(A:50%)	7.01×10^{-5}	7.23×10^{-5}	7.90×10^{-5}	2.61×10^{-4}
TIS(A:60%)	7.01×10^{-5}	7.27×10^{-5}	8.08×10^{-5}	2.99×10^{-4}
TIS(A:70%)	7.01×10^{-5}	7.32×10^{-5}	8.25×10^{-5}	3.37×10^{-4}
TIS(A:80%)	7.01×10^{-5}	7.37×10^{-5}	8.43×10^{-5}	3.76×10^{-4}

表 2 不同镜面洁净度等级时的 TIS ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$)

Tab.2 TIS for different mirror cleanliness levels ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$)

Mirror class	300	500	700
TIS($X_{RH}=0$)	7.01×10^{-5}	8.10×10^{-4}	4.56×10^{-3}
TIS($X_{RH}=0.3$)	7.27×10^{-5}	8.63×10^{-4}	4.73×10^{-3}
TIS($X_{RH}=0.6$)	8.08×10^{-5}	1.02×10^{-3}	5.26×10^{-3}
TIS($X_{RH}=0.9$)	2.99×10^{-4}	5.23×10^{-3}	1.95×10^{-2}

表 3 不同角度入射时的 TIS

Tab.3 TIS at different angles of incidence ($\lambda=0.55 \mu\text{m}$ $G_1=300$)

Humidity	0	0.3	0.6	0.9
TIS(0°)	7.02×10^{-5}	7.62×10^{-5}	8.97×10^{-5}	3.71×10^{-4}
TIS(5°)	7.02×10^{-5}	7.61×10^{-5}	8.97×10^{-5}	3.71×10^{-4}
TIS(10°)	7.02×10^{-5}	7.61×10^{-5}	8.96×10^{-5}	3.71×10^{-4}
TIS(15°)	7.01×10^{-5}	7.61×10^{-5}	8.96×10^{-5}	3.71×10^{-4}
TIS(30°)	6.99×10^{-5}	7.59×10^{-5}	8.93×10^{-5}	3.70×10^{-4}
TIS(50°)	6.95×10^{-5}	7.54×10^{-5}	8.89×10^{-5}	3.70×10^{-4}

成的影响不一样, 镜面洁净度越高其光学镜面散射损耗越大。由图 4(b) 可知, 不同湿度影响的镜面散射差异较大, 当相对湿度大于 60% 时造成散射损耗明显增大。

分析表 1~表 3 可知, 环境湿度越高导致相应的光学镜面 TIS 值越大。高湿度条件下的 TIS 相比于干燥环境下的 TIS 有数倍的增加, 从而会对光学系统的性能造成不良影响。由表 1 可知, 亲疏水性粒子占比不同致使光学镜面散射特性不同, 在相同的湿度条件下, 亲水性粒子占比越大, 光学镜面损耗越大。需要指出的是, 无论亲水性粒子占比如何, 在环境湿度达到潮解相对湿度时, 均会出现明显的散射增强效应, 且亲水性粒子占比越大, 散射增强越明显。分析表 2 可知, 镜面洁净度等级越高, 镜面散射越强烈。由表 3

可知, 在同一环境相对湿度条件下, 光学镜面的 TIS 值随着入射角度的增加而逐渐减小。其结果与参考文献 [15] 的结论相吻合, 说明该模型适应于不同角度入射情形下的镜面散射特性分析。

对南京市降尘粒子成分进行分析^[1], 南京市钢铁工业区降尘量远远高于其他地区, 主要是因为工业污染区的降尘主要是由于工业燃煤飞灰引起的。因此, 南京市钢铁工业区降尘成分中亲水性粒子占比大约为 30%, 疏水性粒子占比大约为 70%。结合对不同环境条件下镜面散射特性分析, 南京市钢铁工业区在环境相对湿度为 60% 时镜面散射的 TIS 值为 7.54×10^{-5} 。由于不同地区的污染粒子种类、分布、吸湿特性均有所差异, 进而会导致镜面的散射特性各不相同。为了更精确地分析不同地区不同的环境湿度对

镜面散射特性的影响,需要对不同地区污染粒子的相关数据进行实地测量。

4 结束语

文中在考虑环境湿度影响的情况下,对 Mie 理论进行了修正。以湿度较大的南京地区为例,分析了环境相对湿度对单个污染粒子以及多粒子条件下光学镜面散射特性的影响。结果表明,环境湿度的升高会导致污染粒子的粒径增加,进而使其折射率的实部与虚部均随着相对湿度的增加而减小。对于亲水性污染粒子而言,相对湿度的增加会导致其散射效率因子明显增大,散射损耗增强。在相同的湿度条件下,亲水性粒子占比越大,光学镜面散射越大。在不同的镜面洁净度等级条件下,散射损耗随着洁净度等级增大而明显增大。文中研究成果有助于对不同湿度环境中的光学系统性能进行分析与评估。

参考文献:

- [1] Zhang Bin. Characteristics and source apportionment of atmospheric dustfall in Nanjing city[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013. (in Chinese)
- [2] Huang Cong, You Xinghai, Zhang Bin. Influence of surface cleanliness of optical element on its surface scattering characteristics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(1): 0120002. (in Chinese)
- [3] Zhang Zhuo, Wang Weihe, Wang Houmao, et al. Effects of humidity on absorbing aerosol index [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(6): 1177-1185. (in Chinese)
- [4] Ma Jing, Zhou Funan, Zhou Yanping, et al. Optical surface pollution detection device for dual-use star and earth [J]. *Optical and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1878-1883. (in Chinese)
- [5] Spyak P R, Wolfe W L. Scatter from particulate-contaminated mirrors. part 2: theory and experiment for dust and $\lambda=0.6328 \mu\text{m}$ [J]. *Optical Engineering*, 1992, 31(8): 1757-1763.
- [6] Tang I N. Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light scattering coefficients [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, 101(D14): 19245-19250.
- [7] Zhao Jiajia, Gu Fang, Zhang Jiahong, et al. Hygroscopic growth model and scattering characteristics of single-particle aerosols [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(5): 0501001. (in Chinese)
- [8] Zhang Xuehai, Dai Congming, Zhang Xin, et al. Effect of relative humidity and particle shape on the scattering properties of sea salt aerosols [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0809002. (in Chinese)
- [9] Zhang Zhicha, Ni Changjian, Zhang Chengyu, et al. Relationship between particle size hygroscopic growth and scattering hygroscopic growth [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(12): 5198-5204. (in Chinese)
- [10] Mao Qianjun, Wang Li. Scattering hygroscopic growth characteristics of typical haze particles and clusters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(24): 2429001. (in Chinese)
- [11] Cui Fenping. Observational study on optical properties of aerosol in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [12] Ni Liujian. A dissertation submitted to Nanjing agricultural university for the degree of master of environmental engineering[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [13] Wang Jiacheng, Qiao Yanli, Yang Shizhi, et al. Study on the relation of ocean atmospheric aerosol optical model parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1101005. (in Chinese)
- [14] Ma Wangjiahui, Liu Yanlei, Chen Zhiying, et al. Near-infrared BRDF of material surfaces at varying temperatures [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1115-1123. (in Chinese)
- [15] Wang Ruixue. A study on the heat radiant characteristics influenced by the random surface roughness[D]. Beijing: Beijing Science & Technology University, 2009. (in Chinese)