

文章编号:1002-2082(2004)03-0015-02

# 关于折射率对散射光场分布影响的研究

王仁哲, 张荣曾, 徐志强, 胡业林

(中国矿业大学 化学与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 根据 Mie 散射理论, 采用理论计算和实验相结合的手法, 研究了光散射现象以及散射介质的折射率对散射光场分布的影响。通过对空气中不同折射率的散射介质形成的散射光场光强的实验比较, 论证了散射介质折射率的实部变化对散射光强的影响不大, 其主要影响是通过相位的变化来实现的, 也即散射介质折射率的虚部变化对光强的影响很大, 在实际应用中不可忽略。这一结论对以散射光场的分布为基础的各种研究具有一定的指导意义。

**关键词:** 光散射; Mie 散射理论; 折射率; 辐照强度分布

**中图分类号:** O436-34

**文献标识码:** A

## A Study on Effect of Refractive Index on Scattered Light Field Distribution

WANG Ren-zhe, ZHANG Rong-zeng, XU Zhi-qiang, HU Ye-lin

(School of Chemical and Environmental Engineering, CUMTB, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The phenomena of light scattering often occur in the natural environment. The Mie scattering theory, which is derived from the Maxwell equations, exactly represents the distribution of scattered light. The refractive index of mediums is directly related to the distribution of scattered light. And it is very important to carry out a qualitative analysis and a quantitative analysis. In this paper, by means of experimentations and numerical analyses, it is confirmed that the real part variation of the refractive index of mediums influences the distribution of irradiance intensity less than the imaginary. This result can be used for many studies which base on the distribution of scattered light.

**Keywords:** light scattering; Mie scattering theory; refractive index; distribution of the irradiance intensity

### 1 概述

当一束光线照射到单个颗粒上时, 会伴随着发生几种现象: 部分光线偏离原方向沿颗粒的边缘发生光的衍射现象; 还有一小部分光线会在颗粒的表面发生光的反射现象; 另外, 还有部分照射到颗粒上的光线会折射进入颗粒内部, 其中一部分被吸收而转化成其他形式的能(如热能), 其余的光线穿过颗粒后射出<sup>[1~3]</sup>。上述现象的发生就构成了光的散射, 如图 1 所示。

### 2 散射理论

以上的描述只是散射现象的表象描述, 要进一

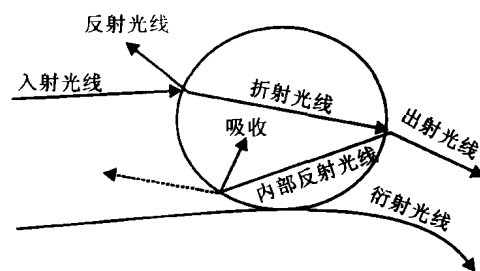


图 1 光与球形颗粒的相互作用

步了解光与颗粒相互作用后, 散射光的分布以及能量的变化, 最直接的方法就是利用麦克斯韦方程组求解散射光场的解, 这就是 Mie 光散射理论的核心。1908 年, Gustav Mie 在他的论文中给出了光与

收稿日期: 2003-09-16

作者简介: 王仁哲 (1967-), 男, 安徽淮北人, 副教授, 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院在读博士, 主要从事矿物加工过程模拟和控制方面的研究。

各向同性的均一球形颗粒相互作用后散射光场的分布。其中,光强的分布如下<sup>[3]</sup>:

$$I(\theta) = I_{\perp}(\theta) + I_{\parallel}(\theta) \tag{1}$$

式中,  $\theta$  为散射角,  $I_{\perp}(\theta)$  和  $I_{\parallel}(\theta)$  分别为

$$I_{\perp}(\theta) = \left| \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos\theta) + b_n \tau_n(\cos\theta)] \right|^2 \tag{2}$$

$$I_{\parallel}(\theta) = \left| \sum_n \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \tau_n(\cos\theta) + b_n \pi_n(\cos\theta)] \right|^2 \tag{3}$$

(2)和(3)式中的  $a_n$  和  $b_n$  分别由下式计算:

$$a_n = \frac{m \Psi_n(mx) \Psi'_n(x) - \Psi_n(x) \Psi'_n(mx)}{m \Psi_n(mx) \xi'_n(x) - \xi_n(x) \Psi'_n(mx)} \tag{4}$$

$$b_n = \frac{\Psi_n(mx) \Psi'_n(x) - m \Psi_n(x) \Psi'_n(mx)}{\Psi_n(mx) \xi'_n(x) - m \xi_n(x) \Psi'_n(mx)} \tag{5}$$

(4)和(5)式中,  $m = n_1/n$  为相对折射率( $n_1$  为颗粒的折射率,  $n$  为介质的折射率);  $x = kr = \frac{2\pi \cdot r}{\lambda}$

( $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  为光的波长,  $r$  为颗粒半径);  $\Psi_n(\rho) = \rho j_n(\rho)$ ,  $\xi_n(\rho) = \rho h_n^{(1)}(\rho)$  ( $h_n^{(1)}(\rho) = j_n(\rho) + iy_n(\rho)$ ,  $j_n(\rho)$  和  $y_n(\rho)$  分别为第一类和第二类球贝塞尔函数)。

$\pi_n, \tau_n$  为角函数, 定义为

$$\pi_n(\cos\theta) = \frac{1}{\sin\theta} P_n^{(1)}(\cos\theta) \tag{6}$$

$$\tau_n(\cos\theta) = \frac{d}{d\theta} P_n^{(1)}(\cos\theta) \tag{7}$$

式中,  $P_n^{(1)}(\cos\theta)$  为一次缔合勒让德多项式。

除Mie光散射理论外,描述光散射的理论还有Fraunhofer衍射理论、Rayleigh散射理论、Debye散射理论以及Van de Hulst理论<sup>[4]</sup>等。但它们都可以由Mie理论的结论,附加一定的边界条件而推导得来。因此,尽管它们在各自的应用范围内都有很好的应用和实践意义,Mie散射理论仍为描述光与球形颗粒相互作用的最严格的结论。

### 3 折射率

由Mie理论的光强计算公式可以看出,折射率是一个极其重要的量,它对光场的分布有着极大的影响,它反映了物质内部原子结构跟随外电磁场(光场)变化的光学常量<sup>[5]</sup>。这里折射率表示为如下形式:

$$n = n_r + in_i \tag{8}$$

式中,实部 $n_r$ 表示光在介质中传播时散射光的相位

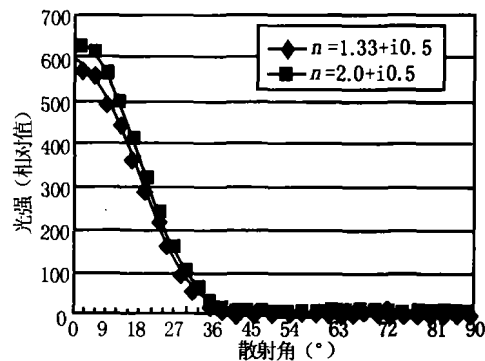
延迟。其值决定了介质中光波传播的速度 $v$ ,即 $v = c/n_r$ ,  $c$ 为真空中的光速。虚部 $n_i$ 表示光在介质中传播时光波的衰减量,它与介质的吸收系数 $a$ 之间的关系为 $a = n_i 4\pi/\lambda$ ( $\lambda$ 为光波波长)。

实际上,折射率并不是“常数”,它会随光波的频率变化而发生变化。在不同的波段,介质的吸光系数是不同的。在某些波段折射率的虚部会随频率发生很大变化,而对有些波段折射率的虚部却几乎不随频率发生变化。明白这一点,可以帮助我们理解为什么会有“美丽的晚霞”等许多自然现象。

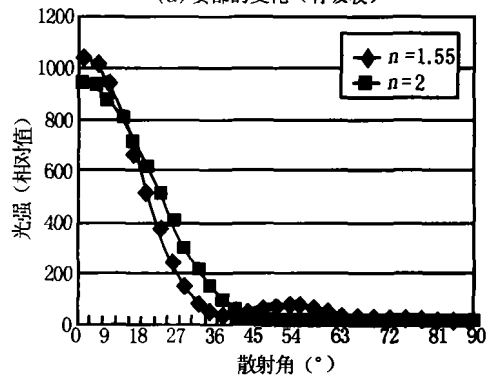
### 4 数据分析

以下几组图形是根据Mie散射理论计算出的结果。其中,波长为 $0.6328 \mu\text{m}$ ,颗粒等效粒径为 $0.525 \mu\text{m}$ ,介质为空气。

分析以下图形,可以清楚地看出,当颗粒的折射率不同时,实部和虚部的变化对光强分布的影响。图2(a)、(b)所示说明了折射率的实部变化对光强的影响不大,其主要影响是通过对相位的变化来实现的,包括对强度的影响。图2(c)、(d)所示说明了吸光物质的散射光强要比非吸光物质的散射光强弱得多,折射率的虚部变化对光强的影响很大。



(a) 实部的变化 (有吸收)



(b) 实部的变化 (无吸收)

(下转第36页)

工程,1997,5(3):83-89.

[5] 孙长库,叶声华. 激光测量技术[M]. 天津:天津大学出版社,2001.129-131.

[6] 来新民,等. 透镜形式对激光位移传感器精度影响的研究[J]. 天津大学学报,1999,32(1):81-84.

[7] Saito K, et al. Noncontact 3-D digitizing and machining system for free-form surfaces[J]. Annals of CIRP,1991,40:483-486.

[8] 韩玉杰,田中千秋,等. 木材表面缺陷的激光在线检测技术[J]. 木材工业,2002,16(3):28-29,32.

[9] 伏德贵. 激光非接触式表面粗糙度兼位移测量研究[J]. 计量与测试技术,2000,27(3):8-9.

[10] 王洵. 非接触测量中光学成像系统的设计[J]. 抚顺

石油学院学报,2000,20(2):76-78.

[11] 程继伟. 位置敏感探测器在转角测量中的应用[J]. 传感器技术,2002,21(10):40-42.

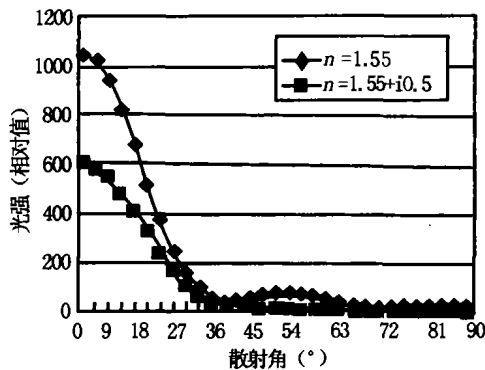
[12] 袁道成. 适于在线测量的激光位移传感器[J]. 计量技术,2002,(5):3-6.

[13] Pramod K Rastogi. Optical Measurement Techniques and Applications [M]. Artech House Publisher,1998,17-18.

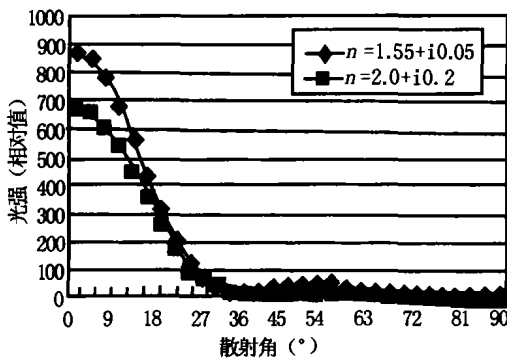
[14] 陶海燕,等. 激光线扫描测量原理及数据处理简介[J]. 机械设计与制造工程,2002,31(3):54-55,58.

[15] 张宝峰. 三维自由曲面的激光扫描测量[J]. 计量技术,2002,(5):12-14.

(上接第16页)



(c)有吸收和无吸收



(d)实部与虚部

图2 散射光强前向分布与颗粒折射率的变化关系  
 Fig. 2 The scattering intensity forward distribution versus the particle refractive indices

### 5 结束语

由于折射率对散射光场的影响很大,在实际应用中折射率这一光学常数就不能被忽略,而Fraunhofer衍射理论恰恰没有考虑到颗粒的这一光学特性。因此,Fraunhofer衍射理论只能近似地应用于非透光颗粒的散射光场,即假定落在颗粒上的光能全部被吸上而没有透射。

#### 参考文献:

[1] E I Dupont de Nmour. Powder sampling and particle size measurement [M]. Delaware (USA): Terence Allen Published, Fifth edition, 405-407.

[2] Erik Gommeren. Study of a closed circuit jet mill plant using on-line particle size measurements [M]. Netherlands: Delft University Press, 1997. 41-42.

[3] Craig F Bohren, Donald R Huffman. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: Wiley Science Paperback Series Published, 1998. 64-65, 110-115.

[4] Jurgen R, Meyer Arendt, M D. Introduction to classical and modern optics [M]. New Jersey: Prentice-Hall Inc, Englewood Cliffs, 1984. 116-117.

[5] James P M Syvitski. Principles, methods and application of particle size analysis [M]. London: Cambridge University Press, 1992. 144-145.