

用 Mie 氏散射理论测量聚苯乙烯微球的折射率*

贾光明 张 喆 张贵忠 向望华

(天津大学精仪学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘 要 采用全 Mie 氏散射理论, 计算单色平行光被该球粒散射后的光强图案分布. 在实验上, 把聚苯乙烯小球分散在纯净水中, 使其浓度满足光的透过率为 70% 左右的条件, 然后测量单色平行光通过该样品比色皿后的远场衍射图样的第一暗环角半径的数值大小. 将该测得的角半径大小同上述采用全 Mie 氏散射理论计算的不同折射率下的散射光强角分布曲线图相比较, 选出与测得的第一暗环角半径大小符合最好者, 从而得到国家标准物质聚苯乙烯小球相对于分散剂纯净水的折射率大小, 最后得到聚苯乙烯小球的折射率为 1.6. 本研究为该标准样品提供了一个重要光学参数.

关键词 Mie 氏散射; 折射率; 国家标准物质中心; 聚苯乙烯小球

中图分类号 TN2 **文献标识码** A

0 引言

目前在激光粒度仪的校准及其他研究领域中, 往往需要用到国家标准物质中心所提供的聚苯乙烯球状微粒, 但是该标准样品的折射率大小未知, 而该参数在大多数研究中是必不可少的. 本文给出了该物质的折射率的测量方法和测量数值.

本文用该小球在水溶液中的散射图样进行测量. 根据经典光学理论, 当粒子直径不满足远大于波长条件时, 利用夫朗和费衍射测定粒径的方法将不再适用, 而 Mie 氏散射理论则具有普遍适用性. 采用 Mie 氏散射法, 本实验对单一直径体系模拟计算了微粒折射率取不同数值时的衍射图样分布, 在实验上则通过测量衍射图样第一暗环角半径数值可以确定微粒体系相对于分散剂水的相对折射率. 由水的折射率数值 1.333 就可以求出微粒的折射率数值. 所测结果可被广泛应用于激光粒度仪的校准及其它应用场合^[1~4].

1 测量原理及测量方法

1908 年德国人 Gustav Mie 提出了 Mie 氏散射理论, 该理论描述球形介质微粒在单色平面波照射下对该平面波产生散射的过程^[5].

设入射单色波长为 λ , 球粒直径为 d , 则远场散射光强为

$$I_q = |S|^2 \quad (1)$$

式中

$$S = \sum_{n=1}^{2n+1} \frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n + b_n \tau_n) \quad (2)$$

$$\pi_n = \frac{2n-1}{n-1} \cos(\theta) \pi_{n-1} - \frac{n}{n-1} \pi_{n-2}$$
$$\tau_n = n \cos(\theta) \pi_n - (n+1) \pi_{n-1} \quad (3)$$

$\pi_0 = 0, \pi_1 = 1, q$ 代表垂直偏振光, θ 为散射角. a_n, b_n 为 Mie 氏散射系数, 表达式较复杂, 其中一个重要参数为散射体相对于分散剂的折射率大小 m , 见文献^[5].

由式(1)可以数值模拟散射光强 I_q 相对于散射角 θ 的变化关系. 对不同的 m 值进行了大量的数值模拟计算, 发现 m 值对散射光强有较大影响, 尤其是第一暗环角半径的大小. 在实验中, 先测得第一暗环角半径数值, 然后按 Mie 氏散射理论计算求出与该暗环角半径相对应的相对折射率数值, 而参考折射率为水的折射率 1.333, 从而获得该标准物质小球的绝对折射率大小.

实验装置如图 1. 全固体内腔倍频 Nd: YAG 激光器输出 532 nm 绿光功率约 200 mW, 经偏振衰减后由显微物镜、针孔、准直透镜、光阑进行扩束整形为直径约 7 mm 的平行光束, 该光束被石英比色皿内的球形颗粒体系散射, 在远场形成散射环分布. 测量出衍射环的第一极小角半径与理论模拟结果比较, 即可得到相对折射率 m 的大小.

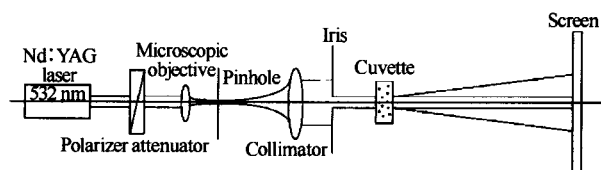


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental layout for measuring scattering pattern by small beads

先将国家标准物质中心提供的聚苯乙烯小球颗粒 GBW120003 取几滴放入盛纯净水的比色皿中, 然后充分摇匀放入光路中. 在远场处的白色屏幕上

*天津市科委基金(2004) 批准号: 013601011
Tel: 022-27402464 Email: Jiagm2004@yahoo.com.cn
收稿日期: 2004-08-30

可以看到清晰的衍射环,测得第一暗环的半径大小,即可计算出角半径数值.

2 实验结果及讨论

如图2,在实验中测出白色屏幕上第一暗环半径为50.0 mm,测出比色皿的中心到白色屏幕的距离为420.0 mm,由此算得第一暗环的角半径为 6.8° .与该角半径对应的相对折射率为1.2.图3给出粒径 $d=4.91\ \mu\text{m}$, $m=1.212$ 时,散射光强相对于散射角的散射曲线.其中散射光强曲线已相对于 0° 时散射光强进行归一化.取水的折射率为1.333,可算得聚苯乙烯小球的绝对折射率为1.6.

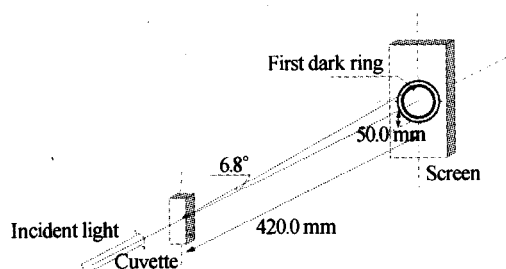


图2 白屏幕上第一暗环角半径测量
Fig. 2 Diagram showing the measuring principle of diameter of the first dark ring

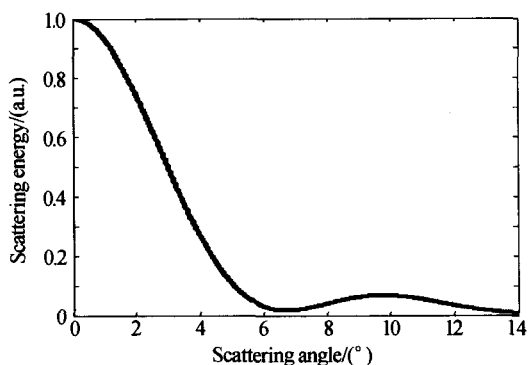


图3 球形聚苯乙烯颗粒对532 nm光束的典型衍射图样.
球粒直径为 $4.91\ \mu\text{m}$,相对折射率 $m=1.615/1.333$
Fig. 3 Typical scattering curve by spherical polystyrene beads for 532 nm light. Bead diameter= $4.91\ \mu\text{m}$ and relative refractive index $m=1.615/1.333$

GBW120003的标称直径为 $4.91\ \mu\text{m}$,为国家标准物质中心所提供,标称误差为2.7%.比色皿的厚度为9 mm,光束直径约7 mm,该圆柱体内所有小球均对白屏幕上的散射环有贡献.而该散射体积显然不是一个点光源,则势必对衍射环大小的测量造成误差.衍射环本身有一定的宽度,在实验上较难准确测定该环的半径大小,所有这些都带来了角半

径测量的误差.因此所获得的聚苯乙烯小球的折射率是一大致数值,精确度为两位有效数字.

国外有报道塑料微粒的折射率为 $1.492^{[6]}$,国内也有人在计算中取聚苯乙烯小球的折射率为 $1.59^{[7,8]}$.但是由于标准物质不同的生产工艺和生产过程,会导致不同的折射率数值.

3 结论

本实验采用全Mie氏散射理论,通过测量聚苯乙烯小球水溶液的第一衍射暗环的角半径,在已知球粒直径的条件下,测得其折射率为1.6.该数值为激光粒度仪的校准及其它应用提供了一个较重要的参数.

参考文献

- Xu M, Alfano R R. More on patterns in Mie scattering. *Optics Communications*, 2003, **226**(1-6): 1~5
- 蔡小舒,王乃宁. 光全散射法测量微粒尺寸分布的研究. *光学学报*, 1991, **11**(11): 1050~1054
Cai X S, Wang N N. *Acta Optica Sinica*, 1991, **11**(11): 1050~1054
- 程光华,刘青,王屹山,等. 飞秒激光脉冲作用下光学玻璃的色心和折射率变化. *光子学报*, 2004, **33**(4): 412~415
Cheng G H, Liu Q, Wang Y S, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 412~415
- 米凤文. 激光衍射粒度分析仪粒度分布求解方法的研究. *光子学报*, 1999, **28**(2): 151~154
Mi F W. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(2): 151~154
- Craig F B, Donald R H. Absorption and scattering of light by small particles. USA: John Wiley & Sons, Inc, 1998
- Hans Saveyn, Dries Mermuys, Olivier Thas, et al. Determination of the refractive index of water-dispersible granules for use in laser diffraction experiments. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2002, **19**(6): 426~432
- 章献民,陈抗生,戴新华,等. 聚焦法测量塑料光纤折射率分布的可行性研究. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1205~1208
Zhang X M, Chen K S, Dai X H. et al. *Acta Physica Sinica*, 2005, **34**(8): 1205~1208
- 黄富泉,卢山鹰,王绍民. 高折射率玻璃微珠折射率的测量. *光子学报*, 2001, **30**(6): 753~756
Huang F Q, Lu S Y, Wang S M. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(6): 753~756

Measurement of Refractive Index of Polystyrene Beads by Using Mie Scattering Theory

Jia Guangming, Zhang Zhe, Zhang Guizhong, Xiang Wanghua

College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Lab., Tianjin University, Tianjin 300072

Received date: 2004-08-30

Abstract The present paper exploits a full Mie theory, in theory, to study the scattered pattern of parallel monochromatic light passing through the bead-water-aerosol cuvette. In experiment, the bead concentration was adjusted to make the transmission of the light through the cuvette to be about 70%, and the scattering pattern in far field was measured for the angular radius of its first dark ring. The measured angular radius value was compared with those computed theoretically for varying indices of refraction. The best comparison gave the value of the relative index of refraction with respect to that of the pure water. From the refractive index of water, a value of $n = 1.6$ of the refractive index for these plastic particles were inferred, thereby providing a key optical parameter for these Standard-Matter beads.

Keywords Mie scattering; Refractive index; State center for standard matter; Polystyrene beads



Jia Guangming born in 1975, won his Bachelor's Degree and Master's Degree in physico-electronics from Tianjin University in 1998 and 2002, respectively. Now he is enrolled as a Ph. D. candidate at Tianjin University and focusing on optical communications and the theory and application of laser.