

# 高压天然气过滤分离设备实际性能在线检测技术研究\*

刘震 林光耀 胡飞 姬忠礼\*

中国石油大学（北京）机械与储运工程学院过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室，北京，102249

**摘要：**准确测量过滤分离设备进出口管道内的颗粒浓度与粒径分布，是评价其分离性能的重要前提。基于几何光学近似法（GOA）建立了高压气体环境中液滴的角散射模型，设计并建造了高压天然气中液滴含量在线检测装置，实现对高压天然气环境下液滴浓度和粒径分布的实时测量。该装置应用于天然气净化厂内的三甘醇液体夹带问题分析，定量对比了三种过滤分离设备的气液分离性能，为制定夹带液滴的分离回收方案提供了参考。

**关键词：**天然气；几何光学近似法；在线检测；过滤与分离；实际性能

**Abstract:** Accurate measurement of particle concentration and particle size distribution in inlet and outlet pipes of filtration separation equipment is an important prerequisite for evaluating its separation performance. The angular scattering model of droplet in high-pressure gas environment is established based on geometric optical approximation (GOA). Then, an on-line measuring device for droplet content in high-pressure natural gas environment is designed and constructed to achieve real-time measurement of droplet concentration and particle size distribution under high-pressure natural gas environment. This device is used to analyze the entrainment of triethylene glycol in a natural gas purification plant. The gas-liquid separation performance of three kinds of separation equipment is compared, and the industrial field data is provided for making the separation and recovery plan of entrainment droplets.

**Key words:** Natural gas; GOA; Online detection; Filtration and separation; Actual performance

---

\* 基金项目：国家自然科学基金项目（51904315）；国家重点研发计划（2021YFB3801304）

第一作者：刘震，男，副教授，从事多相流分离及测试技术研究。手机：15652907629。E-mail: [zhenliu@cup.edu.cn](mailto:zhenliu@cup.edu.cn).

通讯作者：姬忠礼，男，教授，从事多相流理论与技术研究，E-mail: [jizhongli63@vip.sina.com](mailto:jizhongli63@vip.sina.com).

# 引言

天然气从井口开采后一般通过集输管线到达处理厂，在净化厂内经过脱硫和脱水等工艺形成产品气，再进入长输管道。在天然气集输、处理和长距离输送过程中，会夹带含有一定量的固体颗粒和液滴。液滴易造成管道与设备内腐蚀、流量计量误差、输气效率降低<sup>[1]</sup>。为此，通常设置合适的过滤分离设备来脱除管道内的液滴。通过在线检测管道内的液滴浓度和粒径分布，有助于实现分离设备实际性能的实时评价，避免重大生产事故发生。非侵入式光学测量方法在液滴浓度和粒径分布测量中应用普遍。目前已经开发出多种测量原理的离线或在线非侵入式光学测量仪器，均存在一定的适用范围和局限性。离线方法通常有筛分法<sup>[2]</sup>、显微法<sup>[3]</sup>和沉降法<sup>[4]</sup>，用于取到颗粒样品后的实验室分析。在线测量通常更适应工业需求，如电化学法<sup>[5]</sup>、超声法<sup>[6]</sup>和光散射法<sup>[7]</sup>。其中，基于光散射法原理的光学粒子计数器（OPC）具有实时性强、测量精度高的优点，广泛应用于多相流测量、燃烧和发动机诊断等领域<sup>[8-9]</sup>。

天然气净化厂内气体压力通常达3~10 MPa，常规商用OPC仅能在常压至1 MPa条件下使用。为了测量高压下颗粒浓度，一种方式是将天然气压力通过分级减压到接近大气压，再对其检测<sup>[10]</sup>。这种方法在取样和减压过程中导致颗粒损失严重，测试结果偏差较大。另一种方式利用光学视窗隔绝压力实现为高压下在线检测。学者们基于几何光学理论和数学关系建立了压力影响OPC测量结果的动态理论模型，设计和优化了适用于高压环境的OPC<sup>[11-14]</sup>。然而，净化厂内待测颗粒均为微纳米级别球形液滴，液滴的光散射模型与固体颗粒存在区别。研究人员采用几何光学研究了水滴在平行光照射下的散射光（包括衍射光、反射光和透射光）计算模型，结果表明在大角度区域几何光学近似结果与Mie散射理论结果吻合，在80°~100°的小角度后向散射区域内差异明显，Mie散射理论无法直观解释光与液滴的相互作用的内在机制，光线可以在球形液滴内部发生多次反射并再次折射到液滴外<sup>[15-17]</sup>，在高压工况下使用高精度OPC对液滴进行在线检测仍然是一个挑战。为此，本文建立在高压天然气条件下液滴的散射模型，基于此模型设计并制造高压天然气管道内液滴检测装置，对天然气脱水装置夹带液滴出口的三种过滤分离设备进行了在线检测，以为天然气脱水装置设计提供参考。

## 1 理论模型

高压天然气介质内的液滴通常为微纳米级球形颗粒<sup>[18]</sup>，经典Mie散射理论和非平面波散射理论（广义Mie散射理论）虽然给出了光散射物理量的严格解，但无法直观解释光与颗粒相互作用的内在机制。针对于球形液滴，入射光照射到液滴表面后，一部分光波在表面发生发射，一部分光波入射到颗粒内部经过多次内表面反射后折射出颗粒。液滴散射是反射和折射两部分的相干叠加的结果，采用几何光学近似法（GOA）建立液滴的角散射模型<sup>[19]</sup>。

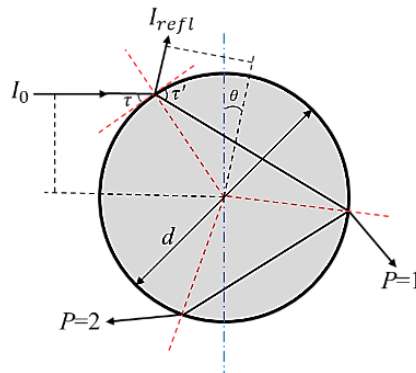


图1 光束在液滴表面和内部的传播轨迹

一束波长 $\lambda$ 的极化平面偏振光，入射到直径 $d$ ，折射率 $m = m_r - im_i$ 的单个液滴，入射光在颗粒内外表面发生反射和折射。如图1所示，空间内任意一点的颗粒散射光强度 $i_{sca}$ 为：

$$i_{sca}(d, \theta, m, \lambda) = i_{refl}(m, \theta, \lambda) + i_{refr}(m, \theta, \lambda) \quad (1)$$

其中， $i_{refl}$ 、 $i_{refr}$ 分别为反射强度和折射强度。在垂直于散射面和平行于散射面情况下的反射光强度 $i_{refl}$ 为：

$$i_1(\theta) = r_1 D \quad (2)$$

$$i_2(\theta) = r_2 D \quad (3)$$

$$r_1 = \frac{\sin \tau - m_r \sin \tau'}{\sin \tau + m_r \sin \tau'} \quad (4)$$

$$r_2 = \frac{m_r \sin \tau - \sin \tau'}{m_r \sin \tau + \sin \tau'} \quad (5)$$

$$D = \frac{\sin \tau \cos \tau}{2 \sin \theta} \quad (6)$$

$r_1, r_2$ 为Fresnel反射系数。 $i_1(\theta)$ 和 $i_2(\theta)$ 相互垂直不相干，相互叠加得到单个液滴的反射光强度 $i_{refl}$ ：

$$i_{refl} = \sqrt{i_1^2 + i_2^2} = \frac{\sin \tau \cos \tau}{2 \sin \theta} \sqrt{r_1^2 + r_2^2} \quad (7)$$

计算可见光(波长范围:400nm-800nm)下不同粒径单个液滴(设定折射率 $m = 1.4578$ )的反射强度 $i_{refl}$ 。如图2所示。液滴的反射强度随着液滴直径 $d$ 增大出现明显升高，大液滴反射光强度高于小液滴反射强度几个数量级以上。同时，在前向散射 $[0^\circ-60^\circ]$ 范围内，反射光强呈现急速下降趋势，随后逐渐趋于稳定。

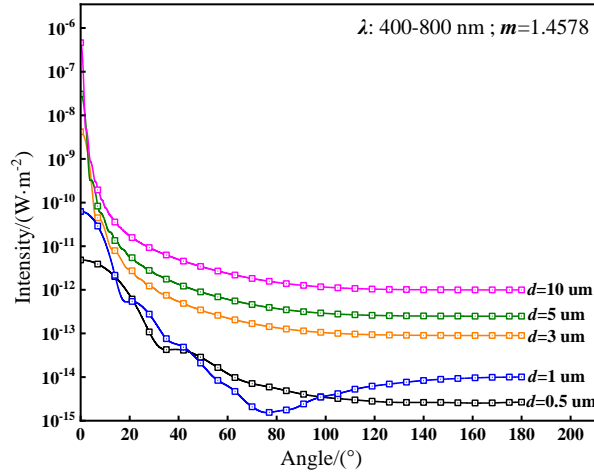


图2 单个液滴的反射强度 $i_{refl}$

液滴的折射光包括在内部经过一次或多次反射后的出射光线，在Mie散射的德拜级数展开（DSE）理论中，称为P阶Debye分波，p表示为经过p次反射后的出射光线。对于微纳米尺度下的液滴来说，折射光强度 $i_{refr}$ 主要由 $p \leq 2$ 的光线引起，同时引入吸收因子 $\gamma = 4\pi m_i / \lambda$ 表征光线在液滴中传播时发生的衰减。

$$i_1(p, \theta) = (1 - r_1^2)(-r_1^2)^{p-1} - \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta (2 - 2p \frac{\tan \tau}{\tan \tau'})} e^{-p\gamma d \sin \tau'} \quad (8)$$

$$i_2(p, \theta) = (1 - r_2^2)(-r_2^2)^{p-1} - \frac{\sin \tau \cos \tau}{\sin \theta (2 - 2p \frac{\tan \tau}{\tan \tau'})} e^{-p\gamma d \sin \tau'} \quad (9)$$

图3所示单个液滴的一阶( $p=1$ )和二阶( $p=2$ )折射光强度 $i_{refr}$ 。可以看出的是,相同直径下的液滴一阶折射光强度远大于自身二阶折射光,不同阶数下折射光随着角度变化呈现不同的趋势。值得注意的是,在 $\theta = 130^\circ$ 附近时,折射率确定的单个液滴的一阶和二阶折射光强度大致相等,且不随液滴直径发生变化。

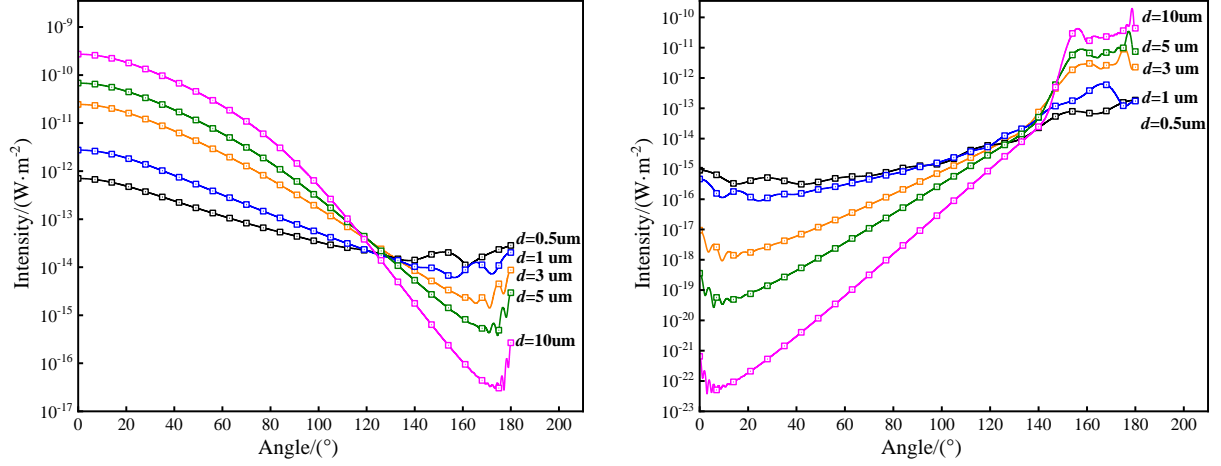


图 3 单个液滴的折射光强度 $i_{refr}$

将反射光强度 $i_{refl}$ 和折射光强度 $i_{refr}$  (包括一阶和二阶折射光) 叠加可以计算出单个液滴的散射光强度 $i_{sca}$ , 当三部分光线在空间内传输并被光电探测器接收时, 光线之间存在干涉效应<sup>[20]</sup>。因此, 散射光强度 $i_{sca}$  计算必须考虑干涉项 $i_{interfere}$ 。

$$i_{interfere,1} = \frac{\alpha^2}{4} \times \left( \frac{\sin \frac{\theta}{2} - \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}{\sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}} \right)^2 - \left[ 1 - \left( \frac{1 + m_r^2 - 2m_r \cos \frac{\theta}{2}}{1 - m_r^2} \right)^2 \right] \times \sqrt{\frac{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} (m_r \cos \frac{\theta}{2} - 1) (m_r - \cos \frac{\theta}{2})}{2 \sin \theta (1 + m_r^2 - 2m_r \cos \frac{\theta}{2})^2}} \times \frac{\sin \frac{\theta}{2} - \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}{\sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}} \times \cos \left( \frac{3\pi}{2} - 2\alpha \sqrt{1 + m_r^2 - 2m_r \cos \frac{\theta}{2}} \right) \times e^{-\gamma d \sin \tau'} \quad (10)$$

$$i_{interfere,2} = \frac{\alpha^2}{4} \times \left( \frac{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} - \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}} \right)^2 - \left[ 1 - \left( \frac{(1 - m_r^2) \cos \frac{\theta}{2} - 2m_r}{(m_r^2 - 1) \cos \frac{\theta}{2}} \right)^2 \right] \times \sqrt{\frac{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} (m_r \cos \frac{\theta}{2} - 1) (m_r - \cos \frac{\theta}{2})}{2 \sin \theta (1 + m_r^2 - 2m_r \cos \frac{\theta}{2})^2}} \times \frac{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} - \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}}{m_r^2 \sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{m_r^2 - \cos^2 \frac{\theta}{2}}} \times \cos \left[ 2\alpha \left( \sin \frac{\theta}{2} + \sqrt{1 + m_r^2 - 2m_r \cos \frac{\theta}{2}} \right) \right] \times e^{-\gamma d \sin \tau'} \quad (11)$$

图 4 为单个液滴考虑干涉项后叠加的散射光强度 $i_{sca}$  和采用经典 Mie 散射理论计算的散射光强度 $i_{sca,Mie}$ 。数值计算结果表明,几何光学近似法在前向大角度范围内可以得到与 Mie 散射理论一致的散射光强度曲线,且液滴越大,吻合越好。当后向散射角度 $\theta \geq 130^\circ$ 时,散射光强度开始出现震荡,且震荡强度随液滴直径增大而加剧。值得一提的是,经典 Mie 理论是对处于均匀介质中的各向同性的单个球形颗粒在单色平行光照下的麦克斯韦方程边界条件的严格数学界,无法揭示入射光与颗粒之间相互作用的内在机制。相较于固体颗粒,大部分液滴具有一定透光性,光线与液滴内外表面相互作用,几何光学近似法在计算液滴散射模型时,计算量大幅减少,更有助于揭示液滴在介质空间中散射。

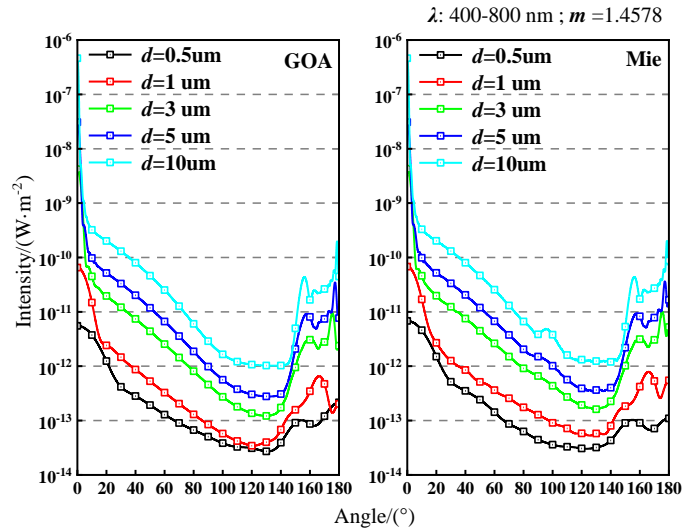


图4 单个液滴的散射光强度

几何光学近似法结果与严格 Mie 散射理论结果的相对误差如图 5 所示。在 0-180° 散射角范围内，不同粒径的液滴相对误差  $\delta$  存在差异的。在 0-80° 内，小粒径液滴的相对误差  $\delta$  震荡剧烈，随着粒径增大 GOA 与 Mie 散射两者差异逐渐减小的并吻合。在 80-110° 和 180° 附近，两者相对误差  $\delta$  到达极大值，这种差异伴随粒径增大逐渐减小的，差异的分析见文献<sup>[21]</sup>，当采用角散射式 OPC 对液滴散射光进行测量时，为了减少杂散光信号干扰，通常探测 90° 角液滴散射信号，采用 GOA 有助于明确该角度下真实散射光。

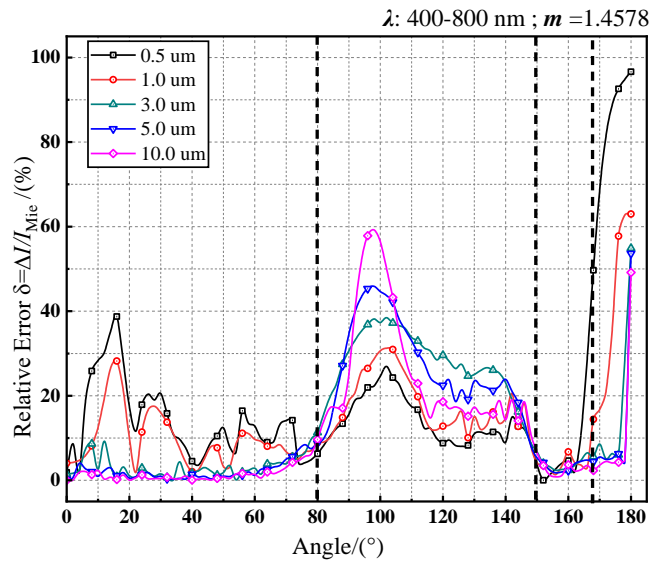


图5 几何光学近似法结果与严格Mie散射理论结果的相对误差 $\delta$

## 2 实验装置和测量

### 2.1 实验装置

所用实验装置为高压天然气管道内液滴检测装置，对测量点处液滴的粒径分布和浓度在线检测。实验装置由六部分组成，依次为采样输送部分，流量分配部分，在线检测部分，离线计量部分，流量控制部分和信号处理部分。装置流程图如图 6 所示。

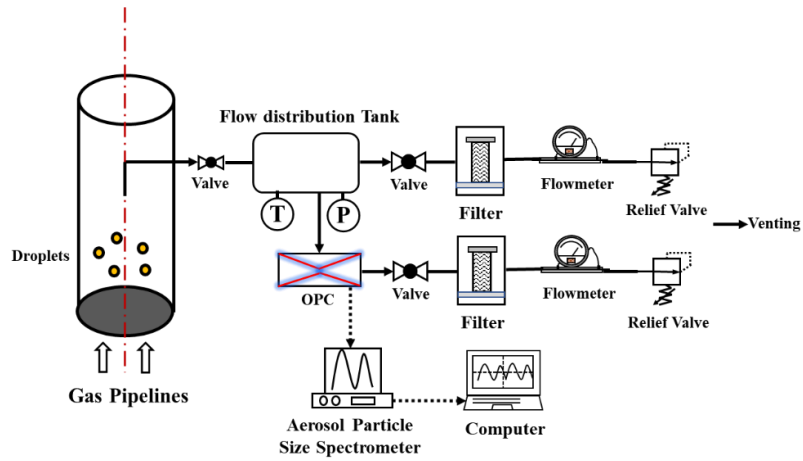


图 6 高压天然气管道内液滴检测装置原理图

采样部分通过管道上压力表口将管道内携带液滴的高压天然气安全抽出，且抽出的夹带液滴高压天然气样品具有代表性，颗粒物损失较小<sup>[22]</sup>。流量分配部分通过流量分配室以满足不同管道流速下的等动采样<sup>[23]</sup>；液滴计数检测部分采用以角散射为原理的高压型光学颗粒计数器（OPC），通过接收 90° 散射光信号来对高压天然气夹带的液滴进行计数和粒径检测<sup>[24]</sup>；液滴捕集部分使用滤膜过滤器对 OPC 出口天然气内的液滴进行捕获收集，同时起到保护出口流量计的作用；减压防空装置对装置内天然气安全放空，确保了对高压天然气内液滴的实时在线检测；信号处理计算部分采用中国石油大学（北京）自研 Prostar 型高压气溶胶粒径谱仪测得的液滴粒径分布和浓度，实时显示处理结果。

常规的光学粒子计数器无法对天然气管道内液滴进行检测的原因：一是无法承受管道内较高的气体压力（ $\geq 1.0 \text{ MPa}$ ）；二是在高压工况下光学粒子计数器的检测性能下降<sup>[12]</sup>。天然气随着气体压力的增大，分子间极化率升高，引起气体折射率增大，这将导致光学粒子计数器内入射光路和散射光路交汇形成的光学测量体（OMV）的增大和变形，使得检测粒径分布严重偏移实际粒径分布。为了确保在当前高压工况压力下的准确测试结果，采用同心球面视窗<sup>[17]</sup>以削弱压力对光学测量体形状与体积的影响。

为验证该高压天然气管道内液滴检测装置数据结果的准确性，在线检测的同时采用离线称重法称取管道内液滴离线浓度。经检测在线检测和离线检测的相对误差在 10% 以内，准确性较好。因难以在高压工况下对 OPC 进行标定检验，采用聚苯乙烯标准颗粒（PSI 一级颗粒）在常压下对 OPC 进行校准标准，结果如表 1 所示。

表 1 高压天然气管道内液滴检测装置参数

检测原理	基于Mie散射原理的光学粒子计数器 (OPC)			
粒径范围	0.1~20 $\mu\text{m}$	检测压力	0.1~12 MPa	
浓度范围	$\leq 10^6$ P/cm <sup>3</sup>	检测温度	0~200 $^{\circ}\text{C}$	
通道数	1024	检测流量	$\leq 40$ L/min(状态下)	
粒径校准结果				
序号	标准粒径值	被测仪器粒径值	不确定度 $U_{\text{rel}} (k=2)$	
1	0.289 $\mu\text{m}$	0.300 $\mu\text{m}$	3.2%	
2	0.503 $\mu\text{m}$	0.520 $\mu\text{m}$		
计数效率校准结果				
发生颗粒粒径	标准值	仪器示值	计数效率	不确定度 $U_{\text{rel}} (k=2)$
300 nm	146 P/cm <sup>3</sup>	132 P/cm <sup>3</sup>	90.3%	3.2%
300 nm	400 P/cm <sup>3</sup>	354 P/cm <sup>3</sup>	88.5%	
500 nm	154 P/cm <sup>3</sup>	150 P/cm <sup>3</sup>	97.6%	
500 nm	475 P/cm <sup>3</sup>	460 P/cm <sup>3</sup>	96.9%	

## 2.2 光路模型

采用 90°度的异轴采光方式的角散射 OPC 对高压天然气中的液滴进行在线检测。为了消除测量中 Mie 谐振区影响,入射光源选用 LED 复合白光。入射光经过透镜聚集形成细小明亮束腰 (Beam Waist) 作为光学测量体 (OMV),当液滴进入测量体,颗粒散发的散射光通过接收光路采集,经过光电系统转换成电信号被计算机处理分析,实时显示液滴粒径和浓度信息,实现在线检测。高压 OPC 光路示意图如图 7 所示。

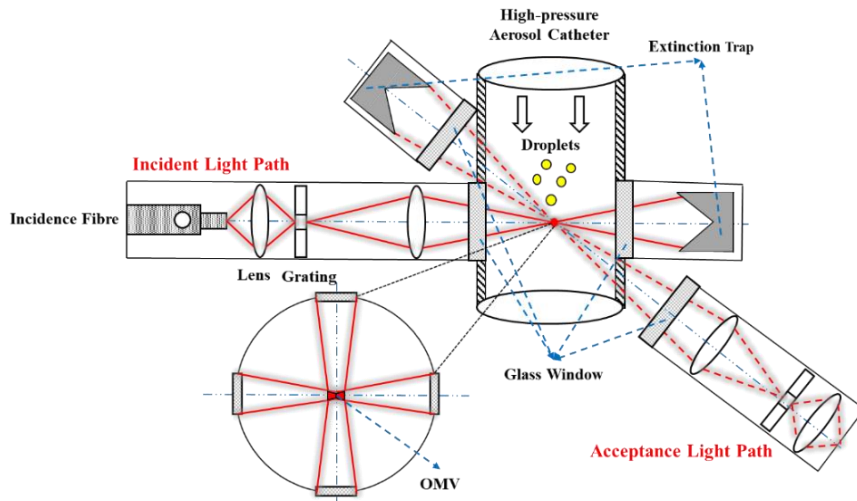


图 7 高压天然气 OPC 光路

OMV 位于检测管路中心处,通常等效成一个截面光强度呈现高斯分布的立方体,气体介质压力的变化

对光路模型的成像效果产生影响，即压力影响 OMV,光学系统的成像效果与气体介质的光学特性密切相关，即气体折射率<sup>[25]</sup>。根据 Lorentz-Lorenz 公式和玻意耳定律，气体折射率 $n$ :

$$n = \sqrt{\frac{3\rho A}{M_r} - 1} \quad (12)$$

$$A = \frac{4\pi}{3} N_A \sigma \quad (13)$$

式中， $\rho$ 是气体密度， $\text{kg/m}^3$ ， $M_r$ 是分子质量， $\text{g/mol}$ ， $A$ 为分子折射度，表示 1 摩尔物质总的极化率， $N_A$ 为阿伏伽德罗常数，数值为  $6.02 \times 10^{23}$ ， $\sigma$ 是分子平均极化率。气体折射率随气体密度 $\rho$ 和分子平均极化率 $\sigma$ 增大而增大，气体压力通过改变气体密度及其分子极化变形来影响气体折射率的大小。图 8 展示了气体介质压力对 OPC 影响。

采用了  $150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  大小的 OMV 进行测试，OMV 尺寸与被测液滴的浓度适配，通过 Reasch 公式  $V = 0.1/N_{max}$  设计<sup>[26]</sup>， $N_{max}$ 是介质中最大颗粒数浓度（单位： $1/\text{cm}^3$ ）。随着气体介质压力的增大，入射光路的发散角 $\alpha$ 增大，引起 OMV 尺寸改变。采用光束质量分析仪(CinCam, Thorlabs)在天然气介质压力  $P=0.1 ; 3.0; 5.0 \text{ MPa}$  下测量了这种变化。OMV 尺寸由  $0.1 \text{ MPa}$  下  $150 \mu\text{m}$  增大到  $5.0 \text{ MPa}$  下  $165 \mu\text{m}$ ，变化率 10%。当入射光功率不变，光强度随 OMV 体积增大而减小，同一确定粒径的颗粒的散射光强度减小，导致高压下 OPC 测量结果的粒径发生偏移，引起误差。

值得注意的是，除了入射光路，压力同样影响探测光路的散射光接收。单个液滴颗粒的散射光以一定锥角被收集探测，压力对入射光路成像效果的影响同样适用探测光路，这将导致接收散射光锥角增大。同时，由压力引起的 OMV 尺寸增大也会影响散射光接收锥角。常压工况下，探测光路接收 $\theta_1 \sim \theta_2$ 角度内的散射光，当然，位于 OMV 不同位置下的液滴散射光接收角是有差异的。计算位于 OMV 边界处接收角，常压下接收角为  $72.27^\circ \sim 123.41^\circ$ ，OMV 尺寸增大导致接收角变为  $72.13^\circ \sim 123.55^\circ$ ，变化率为 0.55%，可以忽略不计。

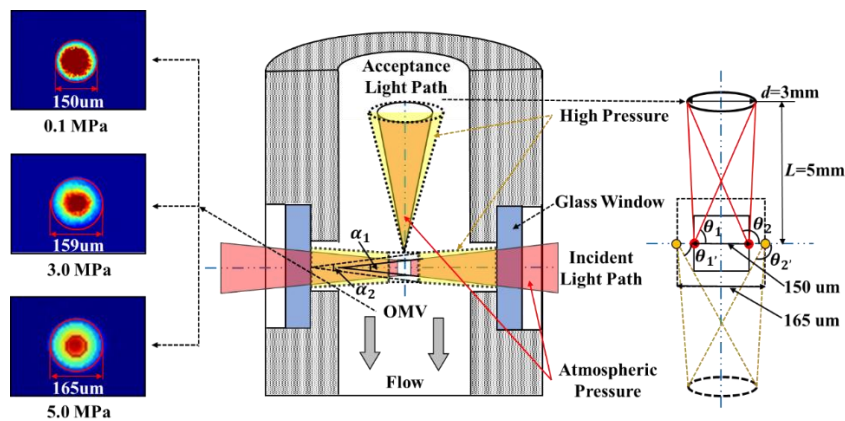


图 8 压力对 OPC 光路的影响

## 2.3 在线采样

在工业实际中,对高压天然气管道内液滴在线检测通常采用在水平管道压力表口的小孔壁面取样。不同于常压下 90° 薄壁采样嘴或全流量取样方式,部分颗粒越过壁面采样嘴撞击在管壁上,反弹后在压力梯度和气流的驱动下又进入了壁面采样嘴,这变相的增加了壁面采样嘴的直径,因而削弱了采样效率减小的程度,因此等动采样规律不再适用于壁面采样嘴。水平压力表口采样效率 $E$ 的经验公式为:

$$E = 1 - 2.4R \cdot Stk^{(2.4R)^{-0.3}} \quad (14)$$

$R$  为采样气速与采样点管道内介质气速之比,  $R = v_{sample}/v_{pipe}$ ;  $Stk$  为待测液滴在管道内的斯托克斯数。在  $0.002 < Stk < 0.1$ ,  $0.33 < R < 1$  范围内,该经验公式误差在 10%以内,因此实际采样时  $R=0.5\sim 0.8$ ,增大采样气速将有效提高采样效率 $E$ 。

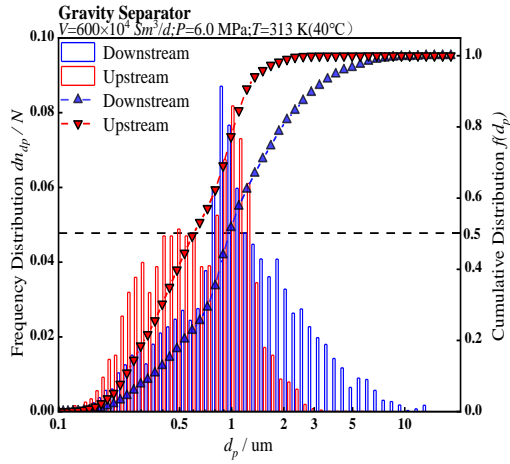
## 3 结果与讨论

天然气净化厂内脱水装置吸收塔出口设置过滤分离设备可以有效的分离吸收塔出口夹带的三甘醇(TEG)液滴,实现对 TEG 的回收处理,降低因为 TEG 损耗导致的运行费用。在吸收塔出口分别安装了实验性的三种不同设备:重力分离器、卧式过滤器和聚结过滤器,验证不同分离方式下 TEG 回收效率。对三种分离器上下游进行了浓度和粒径分布在线检测,得到了分离总效率和分离效率,如图 9 所示。实验在设备稳定运行条件下的工业现场进行。测试结果发现,吸收塔出口夹带液滴由直径  $0.1\sim 20\ \mu\text{m}$  的多分散球形颗粒组成,呈现单峰分布,而不同分离设备对于 TEG 液滴的分离效果差异明显。

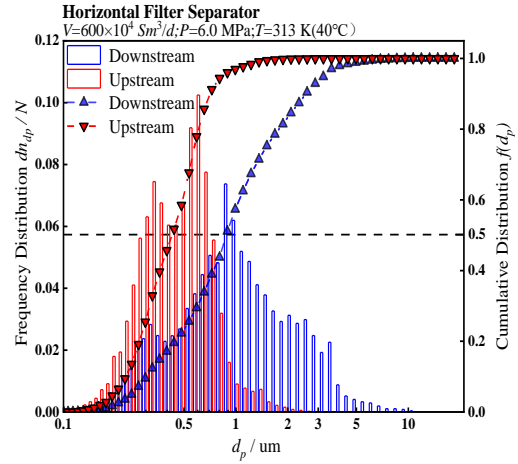
重力分离器利用液滴的惯性作用通过折流板结构实现对液滴的分离,直径较大的液滴具有更强的惯性作用相比于小液滴分离效果更好。其分级效率曲线表明,对于直径  $3\ \mu\text{m}$  以上的液滴具有 99%以上的分离效率,粒径分布图中看出大直径液滴比例显著减少,小液滴的数量基本不发生变化,这导致了粒径分布向左偏移。对于吸收塔出口夹带的 TEG 液滴来说,高压下重力分离器分离效率维持在 60-70%,这是因为夹带液滴大部分是直径  $\leq 1\ \mu\text{m}$  的小液滴,重力分离器在脱水装置吸收塔出口下的表现欠佳的。

卧式过滤器作为天然气净化厂中的关键设备,通常采用过滤分离元件和丝网除雾器两级分离结构,过滤分离元件气液分离元件采用玻璃纤维粘结组成。对于大液滴的分离效果,卧式过滤器对直径  $1\ \mu\text{m}$  以上的液滴具有 99%以上的分离效率,值得注意的是,对于细小液滴的分离,高压下卧式过滤器面临着性能下降问题,其总分离效率维持在 80%左右,对于  $0.5\ \mu\text{m}$  以下的小液滴分级效率  $\leq 20\%$ 。

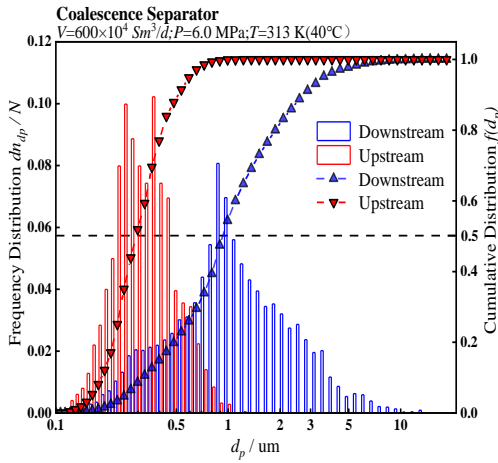
气液聚结过滤是一种将小液滴从气体中分离回收的有效方法<sup>[27]</sup>。粒径分布结果表明,过滤分离器显著改变了出口液滴的粒径分布,峰值粒径向小粒径方向偏移明显。相比于重力分离器和卧式过滤器,气液聚结过滤器有效提升了粒径  $\leq 0.5\ \mu\text{m}$  的液滴分级效率,总效率达到 90%以上。实际工业应用中,三种分离方式组合使用将获得更佳的 TEG 回收效果。



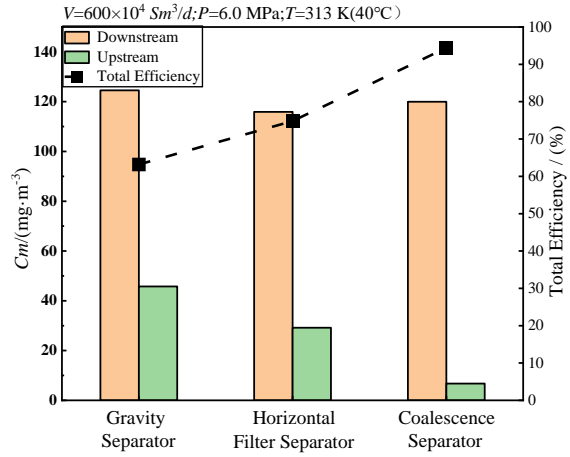
a 重力分离器上游和下游液滴粒径分布



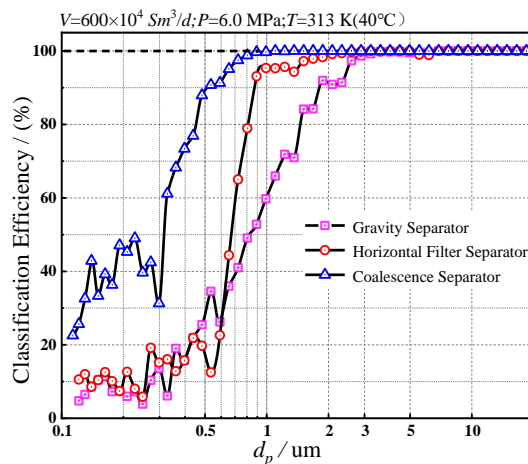
b 卧式过滤器上游和下游液滴粒径分布



c 聚结过滤器上游和下游液滴粒径分布



d 三种过滤分离设备的上游和下游液滴浓度



e 三种过滤分离设备的液滴分级效率

图9 吸收塔出口夹带在不同过滤分离形式下的分离效果

## 4 结论

针对高压天然气管道内微纳尺度雾状液滴的浓度和粒径分布测量需求，基于几何光学近似法（GOA）建立了高压气体环境中液滴的角散射模型，设计并建造了高压天然气中液滴含量在线检测装置，实现对高压天然气环境下液滴浓度和粒径分布的实时测量。该装置应用于天然气净化厂，在线取样测量分析三甘醇液体夹带问题，对比分析出重力分离器、卧式过滤器和气液聚结过滤器的实际性能差异，结果有助于制定天然气所夹带液滴的分离回收方案。

## 参考文献

- [1] Liang, F. Y, Ryvak, M, Sayeed, S, and Zhao, N. 2012. The role of natural gas as a primary fuel in the near future, including comparisons of acquisition, transmission and waste handling costs of as with competitive alternatives. *Chemistry Central Journal*. 23(6): S4.
- [2] Sutie. Xu, Maria. L, Silveira, Lucy. W. Ngatia, Anna. E. Normand, Lynn. E. Sollenberger, and K. Ramesh. Reddy. 2017. Carbon and nitrogen pools in aggregate size fractions as affected by sieving method and land use intensification. *Geoderma B*. 305:70-79.
- [3] Manoel.Y. Manuputty, Casper. S. Lindberg, Maria. L. Botero, Jethro. Akroyd, and Markus Kraft. 2019. Detailed characterization of TiO<sub>2</sub> Nano-aggregate morphology using TEM image analysis. *Journal of Aerosol Science*. 133:96-112.
- [4] Sugasawa. H, and Yoshida. H. 2017. Estimation of particle size distribution using the sedimentation method enhanced by electrical-potential. *Sep. Purif. Technol*. 187:193-198.
- [5] Bi. H, Liu. X. M, Zhu. L. L, Sun. J. L, Yu. S. L, Yu. H. M, and Pei. L. 2017. Effect of MgO addition and grain size on the electrical properties of Ce<sub>0.9</sub>Gd<sub>0.1</sub>O<sub>1.95</sub> electrolyte for IT-SOFCs. *Int. J. Hydrog. Energy*. 42(16):11735-11744.
- [6] Wang. M, Zheng. D. D, Dong. J, and Xu. Y. 2021. Comparison of ultrasonic attenuation models for small droplets measurement based on numerical simulation and experiment. *Applied Acoustics*. 183:108334.
- [7] Wolinski. S, Ulbricht. M, and Schultz. H. J. 2019. Schultz Optical measurement method of particle suspension in stirred vessels. *Chem. Ing. Tech*. 91(9):1326-1332.
- [8] Kevin. A. Thomson, Ömer. L. Gülder, Elizabeth. J. Weckman, Roydon. A. Fraser, and Greg. J. 2005. Soot concentration and temperature measurements in co-annular nonpremixed CH<sub>4</sub>/Air laminar flames at pressures up to 4 MPa. *Combustion and Flame*. 140(3):222-232.

- [9] Claudya. P. Arana, Mariusz. Pontoni, Swarnendu. Sen, and Ishwar. K. Puri. 2004. Field measurements of soot volume fractions in laminar partially premixed coflow ethylene/air flames. *Combustion and Flame*. 138(4):362-372.
- [10] 张星,姬忠礼,陈鸿海,等.2010.高压天然气管道内粉尘在线检测方法.化工学报, 61(9):2334-2339.
- [11] Umhauer. H, Meyer. J, and Schiel. A. 2008. A Novel Device for Single Particle Light Scattering Size Analysis and Concentration Measurement at High Pressures and Temperatures. *Particle & Particle Systems Characterization*. 25.
- [12] Lu. L. F, Li. Y. B, Wang. Y. X, Wu. X, Xiong. L. L, Liu. L. L, and Wei. L. J. 2024. Degradation mechanism of measuring performance of optical particle counter under temperature-pressure coupling effect. *Measurement Science and Technology*. 35.
- [13] Wang. D. Y, Ji. Z. L, Liu. Z, and Lin. G. Y. 2023. Gaussian optics optimization of an optical particle counter for measurement in high-pressure gas. *Applied optics*. 62(17):4624-4634.
- [14] Song. X, Wu. X. L, Ji. Z. L, Wang. D. Y, and Liu. Z. 2020. Optimization of the optical particle counter for online particle measurement in pressure-changing natural gas. *Applied optics*. 59(30): 9581-9590.
- [15] Glantschnig. W. J, and Chen. S. H. 1981. Light scattering from water droplets in the geometrical optics approximation. *Appl Opt*. 20(14):2499-509.
- [16] Kusters. K. A, Wijers. J. G, and Thoenes. D. 1991. Particle sizing by laser diffraction spectrometry in the anomalous regime. *Appl Opt*. 30(33):4839-4847.
- [17] Ungut. A, Grehan. G, and Gouesbet. G. 1981. Comparisons between geometrical optics and Lorenz-Mie theory. *Appl Opt*. 20(17):2911-8.
- [18] Umhauer. H, Berbner. S, and Hemmer. G. 2000. Optical In Situ Size and Concentration Measurement of Particles Dispersed in Gases at Temperatures up to 1000°C. *Particle & Particle Systems Characterization*. 17:03-15.
- [19] Umhauer. H, Sachweh. B, and Ebert. F. 1995. Extended operational conditions for a redesigned optical particle counter with respect to lower detection limit and number concentration. *Journal of Aerosol Science*. 26.
- [20] Paton. J. 1958. The Scattering of Light by Small Particles. *Nature* 182:1470–1471.
- [21] Tzarouchis, Dimitrios. C, and Ari. Henrik. Sihvola. 2018. Light Scattering by a Dielectric Sphere: Perspectives on the Mie Resonances. *Applied Sciences*. 8:184.
- [22] 宋暄. 2021. 高压天然气管道内颗粒物在线检测技术研究[D]. 中国石油大学（北京）.
- [23] 郑思佳, 罗敏, 韩华明, 等. 2020. 基于颗粒在线检测的天然气管过滤器运行特性分析[J] *天然气工*

业,40(5):109-116.

- [24] 林光耀,胡飞,姬忠礼,等. 2024. 基于光闪烁法的油雾浓度在线检测方法研究.光子学报, 53(1):110-124.
- [25] Michael. Heim, Benjamin. J. Mullins, Heinz. Umhauer, and Gerhard Kasper. 2008. Performance evaluation of three optical particle counters with an efficient “multimodal” calibration method. *Journal of Aerosol Science*. 39(12):1019-1031.
- [26] Raasch. J, and Umhauer. H. 1977. Fundamental considerations in measurement of particle-size and particle velocity of dispersed phases in flow systems. *Chemie Ingenieur Technik*. 49(12):931-941.
- [27] Kampa. S. D, Wurster. J. Buzengeiger, J, and Meyer. G. Kasper. 2014. Pressure drop and liquid transport through coalescence filter media used for oil mist filtration. *International Journal of Multiphase Flow*. 58:313-324.