

气体管道中液珠分散特性及稳定性研究

许海银（国家管网集团甘肃省公司，甘肃 兰州 730070）

摘要：天然气含水和液烃是困扰长距离输气管道的工程难题。本研究在验证聚焦反射激光粒度仪（FBRM）测量技术的基础上，在线开展了气体管道中水珠分散特性的测量和研究，从液珠尺寸分布、平均粒径、液珠总数等多个角度表征了气体管道中雾状流的分散特性。研究发现，气体管道中液珠尺寸分布范围较广，而小粒径的液珠个数远大于大粒径的液珠个数，表面活性剂的存在能够进一步促进液珠的分散并使得液珠平均粒径减小，从而增加体系的稳定性。

关键词：输气管道；分散特性；表面活性剂；稳定性

0 引言

输气管道在运输过程中常常会受到液相沉积的影响，给管道的安全运行带来巨大的风险和挑战。积液主要为水和轻烃，其主要来源于两种途径^[1]：其一是天然气从地层采出后自身含有轻烃组分和水；其二是管道在投产干燥时处理不彻底，导致局部仍然有积液。

输气管道凝液沉积首先会减小气体流通面积，增加管道内部的摩擦阻力，使输气效率降低，增加输气成本^[2]。同时，由于水中往往含有盐类、硫化物等，这些溶解物质会残留在管道内部，形成结垢^[3]，堵塞管道，影响气体的流动，增加气体流动阻力。此外，当液态水存在于管道内部时，会加速管道金属表面的氧化反应，导致管道腐蚀^[4]，从而增加管道破裂的风险，甚至可能引发泄漏事故，对周围环境和人员造成严重危害。

尤其需要注意的是，天然气管道中液态水的形成会加剧水合物的形成^[5]。天然气水合物在管段的沉积会严重影响输气效率，严重的会导致冻堵，引发生产事故。

因此，输气管道含水问题的研究具有重要的现实意义，本文将通过聚焦反射激光粒度仪测量法对模拟气体管道中液相的分散特性进行研究，并借助于实验数据分析，对气液分散体系的稳定性进行探讨，为气体管道液相沉积分析提供参考。

1 实验部分

1.1 实验试剂与仪器

实验中，为了消除杂质的影响，水相采用的是去离子水，为确保实验安全，气相采用空气代替天然气。为研究界面性质对于水珠分散特性和稳定性的影响，在水相中添加了水溶性表面活性剂十二烷基硫酸钠，简称为 SDS，实验温度选择为 20℃。为了研究不同含

水率下气体管道中的液珠分布特性，实验中采用了三种含水量，在测量之前将水相充分分散，与气体相混合，在气液两相分布平稳段测量液珠分布情况。

液珠尺寸分布的测量设备为聚焦反射激光粒度仪（Focused Beam Reflectance Measurement，简称 FBRM），直径的测量范围为 0.5~1000 μm 。

相较于其他测量方法，FBRM 粒度仪能够直接安装到实际流动的管道中，得到现场的粒径分布，其测量范围大、操作灵活、可以实时测量。

1.2 仪器的校准

本实验中，选用硅粉悬浮液来对粒度仪进行校准。由于硅粉颗粒的大小均一、形状均匀（均为球形颗粒）、直径已知（ $10 \pm 1 \mu\text{m}$ ），因此可以通过利用 FBRM 粒度仪来测量硅粉悬浮液的粒径分布并对比其测量结果来对该仪器的准确度进行分析和校准。

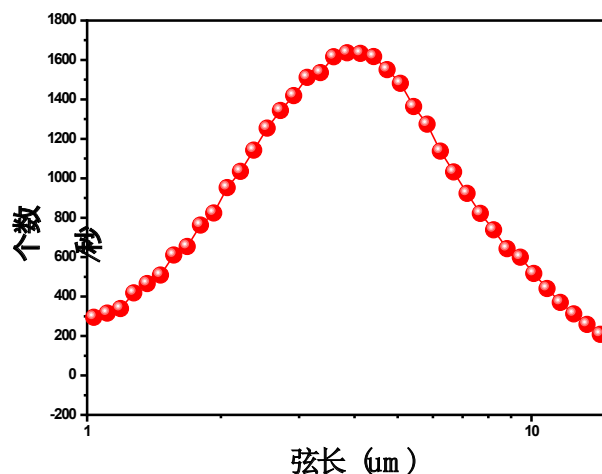


图1 硅粉悬浮液的弦长分布（CLD）

图1为利用硅粉悬浮液来校准 FBRM 粒度仪的实验结果。不同颜色的曲线代表不同时间点所得到的弦

长分布,共给出了13个时间点的弦长分布曲线。其中1曲线为测量开始时的弦长分布曲线。从图中可以看出,随着时间的增加,测量的个数逐渐增大并最终趋于稳定,之后个数不再随时间而增加。同时可以看到的是,实验中FBRM所测量的弦长分布为 $1\sim 20\mu\text{m}$ (小于 $1\mu\text{m}$ 的弦长超出了仪器的测量范围),而且其个数分布基本服从对数正态分布,峰值在约 $6\mu\text{m}$ 的位置。

实验证明,FBRM粒度仪的测量结果是可信的,可以用来测量气液分散体系的液珠分散特性。

2 结果与讨论

2.1 气体管道中液珠的分散特性

实验中首先测试了含水1%时管道中液珠分布特性,其结果如图2所示。图中选取测量达到稳定后2600秒内的数据。其中蓝色数据点和坐标为粒径 $<10\mu\text{m}$ 以及 $10\sim 50\mu\text{m}$ 范围的液珠个数,绿色数据点和坐标为 $50\sim 150\mu\text{m}$ 范围的液珠个数,橙色数据点和坐标为 $150\sim 300\mu\text{m}$ 和 $300\sim 1000\mu\text{m}$ 范围的液珠个数,红色数据点和坐标对应于粒径平均值和中位数。从图中可以看出:小粒径的液珠个数远大于大粒径的液珠个数,且粒径越小个数越多。

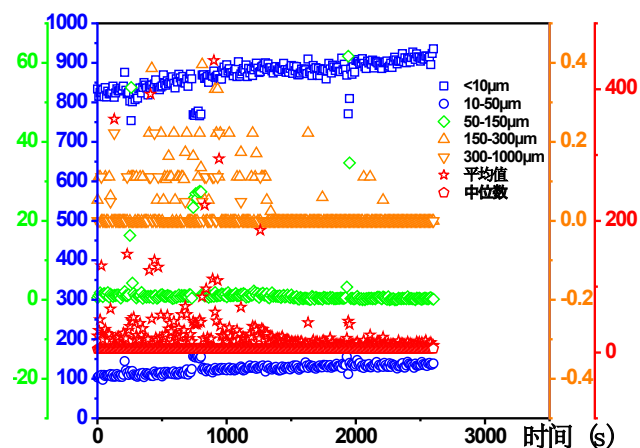


图2 不同弦长范围的液珠个数分布

为了进一步分析含水率对液珠分散特性的影响,研究中分别将含水率从1%增加到2.5%和5%,测量不同含水率下的液珠分布,结果如图3所示。从测量结果来看,含水率的增加不影响液珠尺寸的分布,各个尺度范围都有一定的液珠个数,且不同含水率下液珠个数多的尺度均较为集中。同时也可以明显看出,随着含水率的增加,各个液珠尺寸范围的液滴数均增加。

整体而言,液珠个数分布服从钟形分布,实验结

果略有偏差的原因是含水率较低,液珠分布的随机性影响较大。

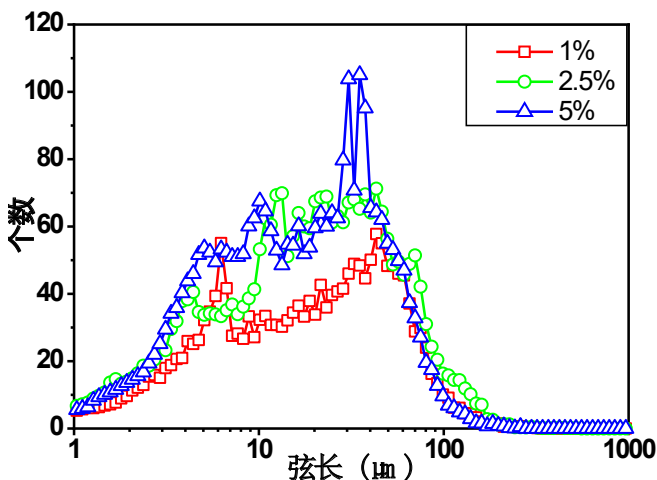


图3 不同含水率下的液珠弦长分布

液珠总数提供了另一种表征体系分散特性的角度。在同样的分散相体积含量下,体系的液珠总数越大,也说明其越被分散得小,也越均匀。比较了对应含水率下的液珠总数,和图3中的规律类似,从中可以发现两点规律:

首先,随着含水率的增加,体系的液珠总数也呈现增加的趋势;

其次,通过对比不同含水率体系液珠总数随时间的变化可以发现,液珠总数具有一定的随机性,随着时间一直在波动,但整体上还是较为平稳。

相比较而言,1%含水率和2.5%含水率的体现液珠总数更为稳定,而5%含水率的体系液珠总数开始的时候较大,但随着时间逐渐下降,最后与2.5%含水率的液珠总数相近。这是由于,在较高含水率下,液珠个数较大,单位空间液珠的数量密度较大,增加了液珠碰撞和聚并的概率,因此液珠总数会发生下降并趋于动态平衡。

2.2 含表面活性剂的液珠分散特性

在生产实际中,从地层进入井筒并随气体在管道内流动的液相并非纯组分,里面往往还有其他杂质,同时气体里面也含有其他杂质,这些杂质会聚集或吸附在液珠表面,改变表面的性质,起到了表面活性物质的作用。为了模拟这类表面活性物质的影响,研究中在水相加入一定浓度的表面活性剂,通过改变表面活性剂浓度来调控液珠的表面特性,从而研究体系的液珠分散特性。实验中选取了较为常见的SDS作为表面活性剂。选取了7种不同的表面活性剂浓度,分布

呈现量级性递增规律,与不加剂的体系形成对比。

首先测量得到了不同表面活性剂浓度下的液珠尺寸分布,其结果如图4所示。和前述实验类似,图中选取了体系分布达到稳定后400秒内的数据点。从图中可以看出,不同表面活性剂浓度下液珠尺寸分布类似,整体呈现钟形分布的规律。而随着表面活性剂浓度的增加,体系中小液珠的个数逐渐增多,大液珠的个数逐渐减少。这说明,随着表面活性剂浓度的增加,液珠越倾向于以较小的尺寸分布。随着表面活性剂浓度的增加,液珠的表面张力(表面自由能)进一步降低,因此在同样的条件下液珠能被分散得更小,液珠总数增加。

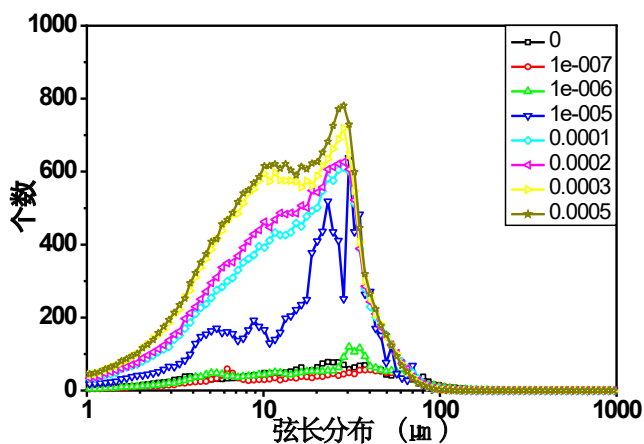


图4 不同表面活性剂浓度下的液珠尺寸分布

为了从另一个角度分析表面活性剂浓度变化对液珠分布的影响,研究中统计了上述情况下对应的液珠平均粒径,从结果可以看出,在较低的表面活性剂浓度下,随着浓度的增加,液珠的平均粒径快速下降。而当浓度增加到一定程度后,平均粒径的增加趋于平缓,最高的两组表面活性剂浓度下液珠的平均粒径相当。这与图4中液珠尺寸分布规律相对应,进一步说明了表面活性物质对于液珠平均尺寸和分散特性的影响。

比较了8种浓度下的液珠总数。虽然在固定含水率下液珠总数和液珠平均粒径之间具有内在的联系,变化规律也一致。但从液珠总数的变化中还可以分析体系的稳定性。在较低的表面活性剂浓度下,液珠总数虽然整体上变化不大,但依然呈现出一定的波动。中等表面活性剂浓度下,液珠总数随时间呈现上升的规律,这是由于气流剪切扰动导致了大液珠进一步破裂。而在高浓度下,液珠总数随时间基本保持不变,趋于稳定,液珠总数也不随表面活性剂浓度增加

而增大。

从以上的实验分析和对比可以发现,对于含有表面活性剂的气液分散体系,其液珠粒径更小,分布更加均匀且较为稳定,这显然时受到了体系表面自由能以及液珠表面特性的影响所导致的。由此可见,体系中表面活性物质的存在会促进液珠的分散而有利于气相中液相的脱除,因此在生产中应尽量避免气相或者液相中杂质的存在,尤其是要脱除能够大大降低表面张力的表面活性的物质。

3 结论

针对含水气体管道中的液珠分布特性开展了研究,测量得到了不同条件下的液珠分布数据。研究发现气体中液珠尺寸分布范围较广,不同尺寸的液珠个数整体呈现钟形分布规律。对比不同含水率下的液珠尺寸分布形态发现,液珠分布范围不随含水率变化而变化,但各个液珠尺寸范围的液滴数均增加。不同含水率下液珠总数随时间具有一定的波动,但整体上还是较为平稳。较高含水率的体系液珠总数则随时间呈现逐渐下降的趋势,主要是由于液珠碰撞和聚并造成的。

实验中还对不同浓度表面活性剂体系的液珠分散特性进行了测量,发现随着表面活性剂浓度的增加,体系中小粒径液珠的个数也随着增加,而大粒径液珠的个数随之减小。整体上,随着表面活性剂浓度的增加,体系的平均粒径随之下降并最终趋于平缓,而液珠总数则随之增加并趋于平缓。随着表面活性剂浓度的增加,体系的液珠尺寸不断减小,分布更加均匀,体系的稳定性也更高。这说明,含表面活性剂的体系其液珠分散更为稳定,液相析出更为困难。

参考文献:

- [1] 叶飞. 浅谈天然气管道运输中的水份对分输的影响[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 33(10): 258.
- [2] 刘建武, 何利民. 湿天然气输送管道积液发展过程影响因素分析[J]. 油气田地面工程, 2020, 39(01): 51-55.
- [3] 王博, 李长俊, 杜强, 贾文龙. 天然气管道直管段结垢速率数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(02): 94-100.
- [4] 桂瞬丰, 幸福堂, 李群燕. 基于CFD的含水天然气管道冲蚀研究[J]. 科技通报, 2017, 33(01): 89-92.
- [5] 史静怡, 樊建春, 武胜男, 李磊. 深水井筒天然气水合物形成预测及风险评价[J]. 油气储运, 2020, 39(09): 988-996.