

文章编号: 1000-8241(2014)01-0050-06

管道入口段雾化加注天然气减阻剂的数值模拟

赵珂珂 李传宪 杨飞 张钦

中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266555

摘要: 采用数值模拟的方法研究天然气管道减阻剂的雾化加注过程, 首先对气体管道入口段的稳态流场进行模拟, 得到收敛的气流场, 再将减阻剂作为一系列离散相雾滴从入口喷嘴注入后进行耦合计算, 分析各雾化条件对雾滴索泰尔平均直径(SMD)及其在入口段管壁上吸附特性的影响。模拟结果表明: 喷雾压差、喷雾流量、喷嘴直径和喷射角度是影响天然气管道减阻剂减阻效果和减阻距离的关键因素。喷雾压差越大, 喷雾流量越小, 雾滴的SMD越小, 越容易吸附在入口段的管壁上; 喷嘴直径和喷射角度对雾滴的SMD影响不大, 但喷射角度较小时, 雾滴能被气流携带更长距离。研究成果可为天然气减阻剂的工程应用提供一定的理论指导。(图6, 表5, 参17)。

关键词: 天然气减阻剂; 管道紊流入口段; 数值模拟; 离散相模型; 压力旋流雾化

中图分类号: TE832

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2014.01.010

Numerical simulation of atomized DRA at gas pipeline inlet

ZHAO Keke, LI Chuanxian, YANG Fei, ZHANG Qin

College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266555

Abstract: In order to investigate the effect of different factors in injecting atomized DRA on pipe wall adsorption at the pipeline inlet, the atomized adding process of gas DRA is numerically simulated. The simulation includes simulating the steady state flow field at pipeline inlet to obtain a convergent gas flow field, then calculating the DRA as a series of dispersed phase droplets which are injected into inlet nozzle, and finally analyzing the effects of atomization conditions on droplets' Sauter Mean Diameter (SMD) and the performance of adsorption on the inlet pipe wall. Results show that atomizing differential pressure, atomizing flowrate, nozzle diameter and nozzle angle play a crucial role in reduction effect and drag distance of gas pipeline DRA. The bigger the atomizing differential pressure is, the smaller atomizing flowrate and smaller SMD of droplets are, and the easier for the DRA to adsorb on pipe wall is. Nozzle diameter and nozzle angle have little impact on SMD of droplets. However, when the nozzle angle gets smaller, the distance the droplets can be carried by gas flow will be longer. The research results are able to provide the theoretical basis to the engineering application of the gas DRA. (6 Figures, 5 Tables, 17 References)

Key words: gas DRA, turbulent flow pipeline inlet, numerical simulation, dispersed phase model, pressure-swirl atomization

管道输送是天然气的主要运输方式, 由于天然黏度小, 速度相对较大, 所以输气管内天然气的雷诺数往往高达 $10^6 \sim 10^7$, 气体流动通常处于紊流状态, 能量损失非常大^[1]。世界各国对能源的迫切需求促使天然气管道减阻技术得到越来越广泛的关注^[2]。针对内涂层减阻技术存在的缺陷, 20世纪90年代, 美国率先提出了天然气减阻剂减阻技术的概念: 将具有表面活性剂性质的化学品(天然气减阻剂)定期注入天然气管道中, 通过极性端对钢铁表面的吸附, 形成弹性分子

薄膜, 达到降低管壁粗糙度, 实现减阻增输的目的^[3-4]。目前, 国内外对天然气减阻剂减阻技术的研究多侧重于减阻机理分析和减阻剂分子结构的设计筛选及其评价^[5-7], 缺乏加注技术的理论指导。以下基于计算流体力学(CFD)技术, 借助Fluent软件对天然气减阻剂加注过程进行数值模拟, 追踪减阻剂雾滴的运动轨迹, 着重探讨喷雾压差、喷雾流量、喷嘴直径和喷射角度对减阻剂在入口段管壁吸附情况的影响, 以期减阻剂的雾化加注工艺提供参考。

1 模型建立

1.1 物理模型及网格划分

研究内径 $d=0.5$ m 的输气管道,取其入口段长度 $l=15$ m。雾化喷嘴设置在入口处的管道轴线上,截取雾化加注点后 15 m 长的管段进行模拟(表 1)。为得到简化物理模型,做如下基本假设:①忽略输气管道中的温度变化,不考虑雾滴与气体的传热问题;②不考虑气体和雾滴的重力作用,模型关于管道轴线对称;③连续分布的雾滴直径可以用有限个名义滴径表示;④将喷雾作为稀薄喷雾处理,忽略雾滴彼此之间的相互作用。

表 1 介质物性参数^[9]

介质	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏度/(10^{-5} Pa·s)	表面张力/($\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$)
天然气	0.75	1.09	—
减阻剂	809	2.757	26.8

建立二维轴对称管段模型,采用结构化四边形网格进行单元划分,因管输流体在靠近管道壁面处会形成边界层效应,且喷嘴为减阻剂雾化注入的集中区域,故需对壁面和喷嘴附近的网格作加密处理,同时采取基于单元格的网络自适应技术进行优化调整,从而大大降低计算结果对网格的依赖性。

1.2 数学模型

减阻剂雾滴体积分数低于 10% 时,雾滴之间的相互作用以及雾滴相体积对连续相的影响均很小,因此,选取 DPM 离散相模型。连续相是天然气,采用欧拉法求解时均 N-S 方程得到紊动气流场,离散相是减阻剂雾滴,采用拉格朗日法积分质点运动方程得到其运动轨道^[8-10]。

1.2.1 连续相控制方程

计算过程不考虑雾滴与气体的热交换,因而不需要计算能量方程,且气体的压力和温度在所取管段中变化较小,密度可视为常数。采用二维轴对称等温不可压缩黏性湍流稳态雷诺时均 N-S 方程^[11]。

连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \quad (1)$$

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i}+\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right)\right] \quad (2)$$

湍流方程(采用标准 κ - ε 模型)为:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\varepsilon \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right] \\ &+ C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: ρ 为气相密度, kg/m^3 ; x_i 为 x 、 y 方向上的坐标, m ; u_i 为气体在 x 、 y 方向上的速度, m/s ; μ 为气相黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; $\mu_t=C_\mu\rho\frac{k^2}{\varepsilon}$ 为湍动黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; k 为湍动能, m^2/s^2 ; ε 为湍动耗散率, m^2/s^3 ; $G_k=\mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ 为剪切力变化产生的湍动能变化率; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 μ_t 、 μ_k 、 σ_ε 为常数,分别取 1.44、1.92、0.09、1.0、1.3。

1.2.2 离散相控制方程

雾滴颗粒的运动方程(直角坐标系内 x 方向)为:

$$\frac{du_p}{dt}=f_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}+f_x \quad (5)$$

式中: u 为气相速度, m/s ; u_p 为雾滴速度, m/s ; ρ_p 为雾滴密度, kg/m^3 ; f_x 为其他作用力; $\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p}$ 是雾滴单位质量重力与浮力的合力; $f_D(u-u_p)$ 是雾滴的单位质量曳力,其表达式为:

$$f_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\frac{C_D Re}{24} \quad (6)$$

式中: d_p 为颗粒直径, m ; $Re=\frac{\rho d_p |u-u_p|}{\mu}$ 为相对雷诺数; $C_D=a_1+\frac{a_2}{Re}+\frac{a_3}{Re^2}$ 为曳力因数; a_1 、 a_2 、 a_3 对于球形颗粒在一定的 Re 范围内为常数。

雾滴的轨道方程为:

$$\frac{dx}{dt}=u_p \quad (7)$$

2 数值模拟

2.1 求解方法及边界条件^[12-13]

基于有限体积法离散各控制方程,通过 SIMPLE 算法进行压力和速度的耦合,利用压力基求解器和 QUICK 差分格式求解控制方程。首先对气相进行稳

态模拟,待其收敛后,加入离散相雾滴,每迭代一步离散相,气相场迭代100步。气相采用标准 κ - ϵ 湍流模型,并用标准壁面函数法作近壁处理;离散相被视为惯性颗粒,通过随机轨道模型计算其轨迹。

气相采用速度入口边界条件, $v=10$ m/s,湍流强度 $I=5\%$,水力直径 $D=0.5$ m,出口为充分发展的紊流。壁面为无滑移边界条件,离散相采用压力旋流雾化模型,与壁面的碰撞为捕捉类型,出口边界条件为逃逸类型。

2.2 模拟条件

模拟喷雾压差为0.5 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa和5 MPa,喷雾流量为0.001 kg/s、0.002 kg/s、0.003 kg/s、0.004 kg/s和0.005 kg/s,喷嘴出口直径为0.5 mm、0.8 mm、1 mm、2 mm和3 mm,喷射角度为 20° 、 45° 、 60° 、 70° 、 80° 时,喷射雾滴的直径大小及其在入口管段内的吸附特性^[14-15]。

2.3 雾滴直径的统计方法

由于喷嘴喷出的雾滴颗粒尺寸不同,因此要用平均直径对雾滴直径进行衡量。采用最常用的索泰尔平均统计法,将所有的雾滴近似为具有相同表面积和体积的均一直径的圆球,所求的圆球直径即为索泰尔平均直径(SMD)。

2.4 雾滴吸附特性的评价方法

假定雾滴被壁面捕捉后即被吸附,定义吸附比例为被捕捉颗粒数与释放总颗粒数之比,于是可用吸附比例的大小作为评价雾滴吸附特性的指标。

3 模拟结果分析

3.1 雾滴在管内的分布

根据管道轴线上的流速分布曲线(图1),入口段速度变化较大,从进口处的10 m/s快速增加到11.6 m/s,之后基本维持稳定,说明此时管内紊流已得到充分发展,所取入口段长度大小合适。对比减阻剂雾滴加入前后的速度曲线,发现离散相雾滴只对喷嘴附近(小于2 m)的流场有影响,整个管道的流场仍然符合紊流圆管进口段的速度分布,验证了所采用DPM模型的合理性。当喷雾压差为2 MPa,喷雾流量为0.001 kg/s,喷嘴出口直径为0.8 mm,喷射角度为 20° 时,得到管内减阻剂浓度分布(图2),即在喷嘴附近浓度较高,沿轴向和径向均不断减小,符合浓度扩散理论。

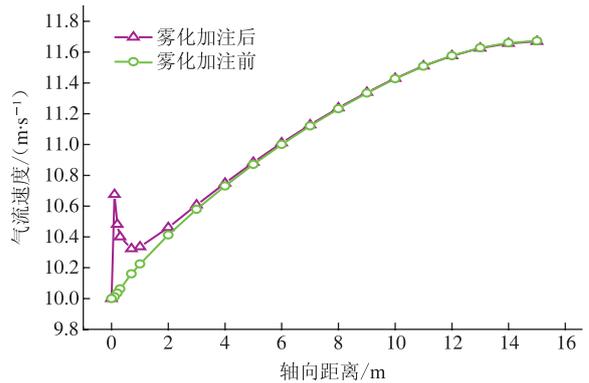
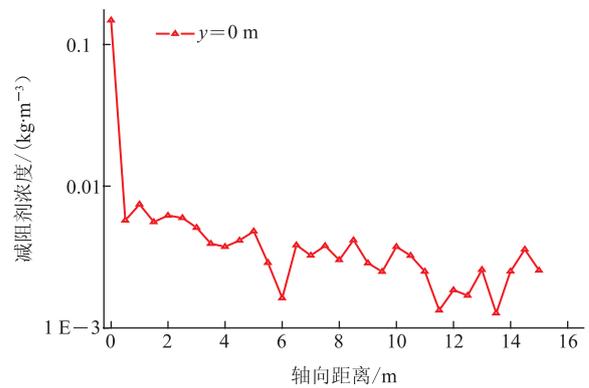
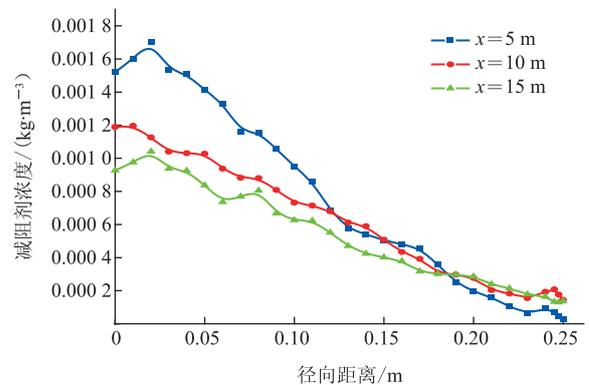


图1 管内介质轴线流速分布曲线



(a) 轴向分布



(b) 径向分布

图2 管内减阻剂浓度分布曲线

3.2 喷射条件对雾滴分布的影响

3.2.1 喷雾压差的影响

喷嘴出口直径为0.8 mm,喷雾流量为0.001 kg/s,喷射角度为 20° ,喷雾压差分别为0.5 MPa、1 MPa、2 MPa、3 MPa、4 MPa和5 MPa时,得到雾滴的SMD随喷雾压差的变化趋势(图3a)。随着喷雾压力的升高,雾滴的平均直径降低,当压差超过3 MPa后,随着压力的增大,SMD减小的速度趋于平缓。这是因为压差越大,液体在喷嘴内旋流速度越大,喷出时液膜的扰动越剧烈,被撕裂成更小的雾滴;但是到某一临界值时再增大压力,喷嘴内液体速度增加缓慢,液膜扰动程

度降低, SMD 减小的速度也趋于平缓^[16]。因此,增大压差可以在一定程度上细化雾滴粒径。根据不同雾化压差下液滴的粒径分布范围及其比例(图 3b),压差越大,雾滴粒径分布越集中,雾化均匀度越好。

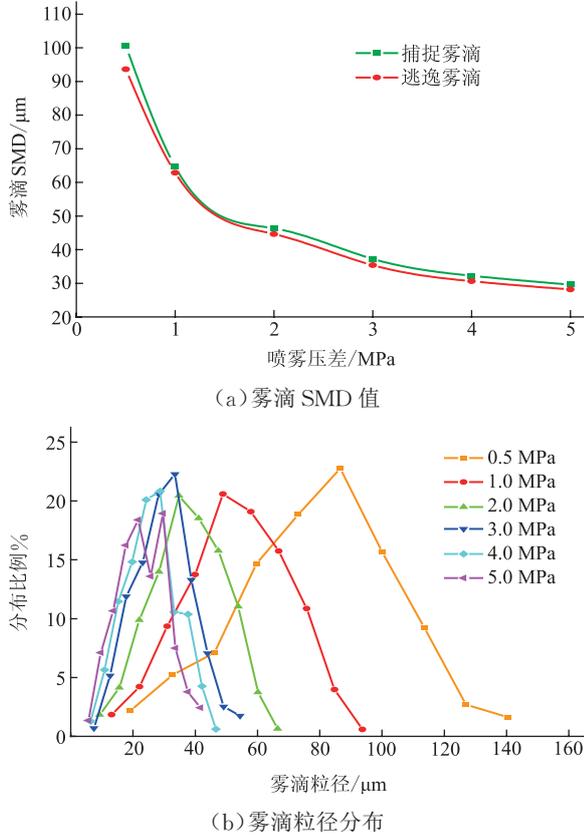


图 3 不同喷雾压差下雾滴 SMD 值及其粒径分布曲线

根据不同喷雾压差下雾滴在模拟管段上的吸附情况(表 2),随着压差的增大,雾滴的吸附比例不断减小。因为粒径小的雾滴随动性好,容易被气流携带到更远的距离,而粒径较大的雾滴则易于吸附在管壁上。当压差增大到一定程度时,由于粒径变化不再明显,吸附比例变化也逐渐平缓。

表 2 不同喷雾压差下雾滴的吸附情况

喷雾压差/MPa	跟踪数量	捕捉数量	逃逸数量	吸附比例%
0.5	3 000	662	2 338	22.1
1.0	3 000	604	2 396	20.1
2.0	3 000	490	2 510	16.3
3.0	3 000	420	2 580	14.0
4.0	3 000	418	2 582	13.9
5.0	3 000	412	2 588	13.7

3.2.2 喷雾流量的影响

喷嘴出口直径为 0.8 mm,喷雾压差为 2 MPa,喷射角度为 20°,喷雾流量分别为 0.001 kg/s、0.002 kg/s、0.003 kg/s、0.004 kg/s 和 0.005 kg/s 时,雾滴 SMD 随喷

雾流量的增加而增大,喷雾流量小于 0.004 kg/s 时,雾滴平均直径小于 80 μm (图 4a),与喷射浓度线性正相关,且被捕捉的雾滴与逃逸雾滴粒径大小一致,随后再增加喷雾流量,雾滴 SMD 急剧增加,且捕捉的雾滴粒径远远大于逃逸雾滴粒径。这是因为喷雾流量越大,雾滴粒径越分散(图 4b),雾化均匀度越差,随着气流的运动,粒径大的雾滴逐渐被吸附,粒径小的雾滴则被携带到更远的距离。

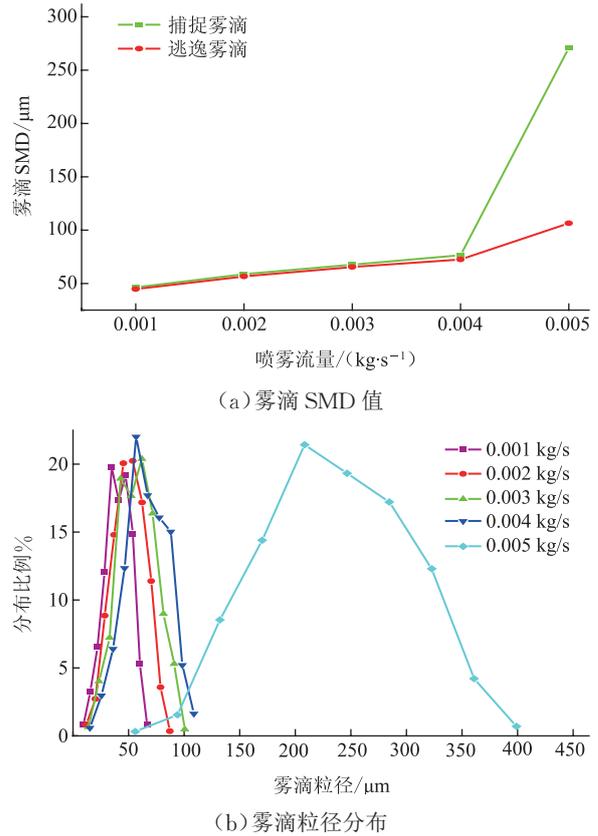


图 4 不同喷雾流量下雾滴 SMD 值及其粒径分布曲线

随着喷雾流量的增加,被模拟管段内管壁吸附的雾滴数量越来越多,但当喷雾流量达到某一值后,再继续增加,吸附比例从 22.4% 突增到 94.9%,此时大部分雾滴被喷嘴附近管壁吸附,无法保证减阻剂的成膜距离(表 3)。因此,选取合适的喷雾流量是减阻剂成膜的关键,既要保证吸附数量,又要考虑成膜距离。

表 3 不同喷雾流量下雾滴的吸附情况

喷雾流量/($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	跟踪数量	捕捉数量	逃逸数量	吸附比例%
0.001	3 000	490	2 510	16.3
0.002	3 000	588	2 412	19.6
0.003	3 000	623	2 377	20.8
0.004	3 000	672	2 328	22.4
0.005	3 000	2 846	2 154	94.9

3.2.3 喷嘴直径的影响

喷雾压差为 2 MPa, 喷雾流量为 0.001 kg/s, 喷射角度为 20°, 喷嘴出口直径分别为 0.5 mm、0.8 mm、1.0 mm、2.0 mm 和 3.0 mm 时, 雾滴的 SMD 随喷嘴口径的增大而减小, 但变化幅度较为缓慢。喷嘴直径从 0.5 mm 增大到 3.0 mm, 对应的雾滴粒径从 47 μm 减小到 37 μm, 仅减小 10 μm (图 5a)。雾滴粒径分布受喷嘴直径影响较小 (图 5b)。由于所采用的喷嘴模型是 Fluent 的空心锥压力旋流喷嘴模型^[17], 喷嘴直径越大, 气体流量也越大, 导致锥形液膜与气体的扰动加剧, 故雾滴的 SMD 略微减小。

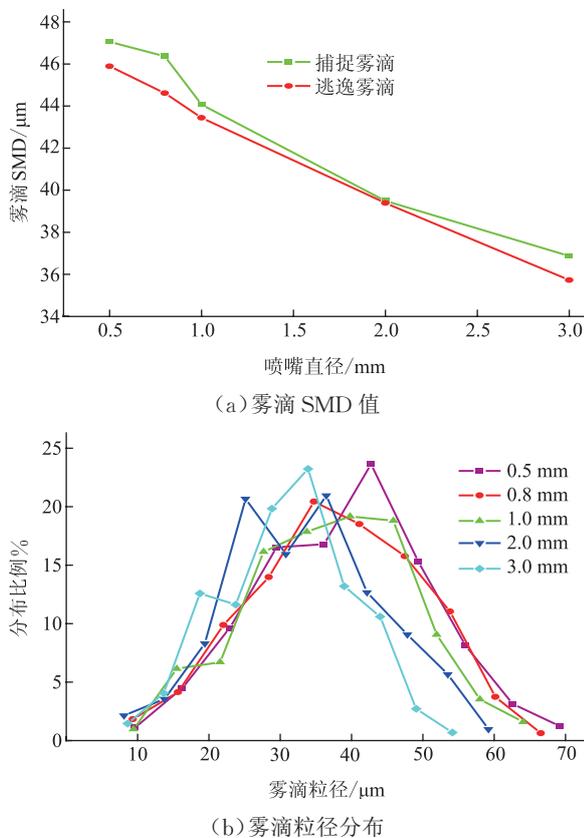


图 5 不同喷嘴直径下雾滴 SMD 值及其粒径分布曲线

根据雾滴被模拟管段的吸附情况 (表 4), 随着喷嘴直径的增大, 吸附比例呈小幅度变化, 总体上, 喷嘴直径对雾滴在管壁上的吸附影响不大。

表 4 不同喷嘴直径下雾滴的吸附情况

喷嘴直径/mm	跟踪数量	捕捉数量	逃逸数量	吸附比例/%
0.5	3 000	576	2 424	19.2
0.8	3 000	490	2 510	16.3
1.0	3 000	559	2 401	18.6
2.0	3 000	530	2 470	17.7
3.0	3 000	530	2 470	17.7

3.2.4 喷射角度的影响

在喷嘴出口直径 0.8 mm, 喷雾压差 2 MPa, 喷雾流量 0.001 kg/s, 喷射角度分别为 20°、45°、60°、70°、80° 的条件下, 模拟得到雾滴的 SMD 值 (图 6a)。在很大范围内, SMD 值基本恒定, 当喷射角度由 70° 增大到 80° 时, SMD 值明显增加, 尤其是被壁面捕捉的雾滴粒径远远大于逃逸雾滴粒径。喷射角度处于 20°~70° 时, 对雾滴粒径分布没有太大影响, 当喷射角度达到 80° 时, 粒径分布较为分散, 雾化均匀度变差 (图 6b)。

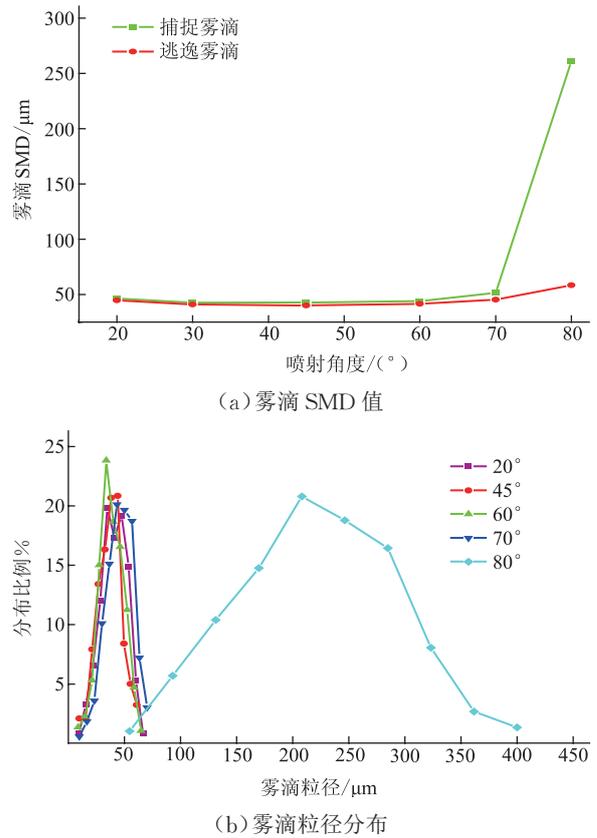


图 6 不同喷射角度下雾滴 SMD 值及其粒径分布曲线

雾滴被管段的吸附比例随喷射角度的增大而增大 (表 5), 这是因为喷射角度越大, 雾滴径向分速度越大, 轴向分速度越小, 当管道长度一定时, 被吸附的雾滴数量越多, 相应的被气流携带的雾滴数量越少, 同样不能保证足够的保护距离, 故喷射角度应合理选取。

表 5 不同喷射角度下雾滴的吸附情况

喷雾角度/(°)	跟踪数量	捕捉数量	逃逸数量	吸附比例/%
20	3 000	490	2 510	16.3
45	3 000	619	2 381	20.6
60	3 000	659	2 341	22.0
70	3 000	860	2 140	28.7
80	3 000	2981	19	99.4

4 结论

(1)应用 CFD 软件对天然气管道减阻剂雾化加注过程的模拟是可行的。定性分析了减阻剂雾化加注条件对其在入口段管壁上吸附成膜的影响,所得结果对现场减阻工艺条件的确定有一定参考价值。

(2)喷雾压差越大,喷雾液滴的 SMD 越小,越易被气流携带到更远的距离,但当压差增大到一定程度后,该变化不再明显;喷雾流量越大,喷雾液滴的 SMD 越大,越易被入口段管壁吸附,但当流量超过某一值后,雾滴基本被喷嘴附近管壁吸附;喷嘴直径对喷雾液滴的 SMD 影响不大;一般情况下,喷射角度对喷雾液滴的 SMD 没有影响,但是喷射角度越大,雾滴越易吸附在入口段管壁上。

(3)合理选择喷雾压差、喷雾流量、喷嘴直径和喷射角度是保证天然气管道减阻剂减阻效果和减阻距离的关键因素。

(4)建议继续对管道入口段后减阻剂雾滴的吸附特性进行模拟研究,以期建立更准确的数学模型并选择更高效的计算方法。

参考文献:

- [1] 李玉星,姚光镇. 输气管道设计与管理[M]. 东营: 中国石油大学出版社,2009.
- [2] 关中原. 我国油气储运相关技术研究新进展[J]. 油气储运, 2012, 31(1): 1-7.
- [3] LOWTHER F E. Drag reduction method for gas pipelines: US, 4958653[P]. 1990-07-26.
- [4] LI Y H. Drag reduction method for gas pipelines: US, 5020561[P]. 1991-06-04.
- [5] 李国平,刘兵,鲍旭晨,等. 天然气管道的减阻与天然气减阻剂[J]. 油气储运,2008, 27(3): 15-21.
- [6] 李峰,邢文国,张金岭,等. 基于巯基三唑化合物的复配天然气减阻剂性能研究[J]. 天然气工业,2010, 30(11): 87-91.
- [7] 常维纯,王雯娟,鲍旭晨,等. 天然气减阻剂性能测试环道[J]. 油气储运,2010, 29(2): 121-123.
- [8] 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社,2004.
- [9] MOSTAFA A A, MONGIA H C. On the modeling of turbulent

evaporating sprays[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30: 2583-2593.

- [10] GOSMAN A D, BESHAY K R, WATKINS A P. Assessment of multidimensional diesel spray predictions[C]. Society of Automotive Engineers International Fuels and Lubricants Meeting and Technical Display, Philadelphia, PA, USA, October 6, 1986.
- [11] 郑永刚,安贵林,彭荣,等. 天然气管道中缓蚀剂浓度和保护距离计算公式及现场检验[J]. 天然气工业, 1999, 19(1): 89-93.
- [12] 宋健斐,魏耀东,时铭显. 旋风分离器内颗粒浓度场的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008, 32(1): 90-94, 104.
- [13] 金向红,金有海,王建军. 气液旋流器内液滴破碎和碰撞的数值模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010, 34(5): 114-120, 125.
- [14] 李国平,李春漫,张志恒,等. 油气管道化学添加剂[M]. 北京: 石油工业出版社,2010.
- [15] 郑永刚,安贵林,彭荣,等. 输气管道中缓蚀剂雾化浓度分布及加注量计算[J]. 油气储运, 1997, 16(7): 17-20.
- [16] 高继慧,陈国庆,高建民,等. 半干法压力旋流式喷嘴雾化性能数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报,2010, 42(3): 437-441.
- [17] 张少峰,宋立丽,刘燕. 喷动床脱硫压力旋流喷嘴的雾化性能[J]. 化学工程,2010, 38(5): 34-37.

(收稿日期:2013-02-25; 修回日期:2013-10-15; 编辑:潘红丽)



基金项目: 国家自然科学基金项目“球状纳米 SiO₂ 对聚丙烯酸酯类含蜡原油降凝剂性能调控机理研究”,51204202; 中国石油大学(华东)研究生创新项目“天然气管道减阻剂加注工艺研究”,S12-38.

作者简介: 赵珂珂,在读硕士生,1987 年生,2011 年毕业于中国石油大学(华东)

油气储运工程专业,现主要从事油气长距离管输相关技术研究。

ZHAO Keke, reading master, born in 1987, graduated from China University of Petroleum (Huadong), oil & gas storage and transportation engineering, in 2011, engaged in the research of long-distance oil & gas pipeline transportation technology.

Tel: 15165291709; Email: zhaokeke413@163.com