

天然气管输减阻剂减阻技术的研究与应用

黄志强, 胡文刚, 李琴, 陈振, 王楠

西南石油大学机电工程学院, 成都 610500

摘要 通过电镜微观试验研究, 揭示了天然气减阻剂的减阻机制。通过对减阻剂加剂装置关键结构仿真优化表明: 旋流雾化喷嘴的旋流室内锥角为 100° 时雾化效果最佳; 喷嘴直径的变化可改变减阻剂喷射的轴向速度, 有利于增大喷射距离, 但雾化角减小, 喷嘴直径为 1.4 mm 时, 喷嘴的雾化效果最佳; 旋流室切向孔角度对旋流室内速度流场的影响较大, 切向角为 14° 时喷嘴雾化效果最佳; 通过实验室及现场试验, 得出了合理剂量的计算公式。本研究对天然气管输减阻剂减阻技术的推广与应用具有指导意义。

关键词 天然气管输减阻剂减阻机制; 加剂装置; 喷嘴结构优化

中图分类号 TE832

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.004

Research and Application of the Drag Reduction Technique of the DRA in the Natural Gas Pipelines

HUANG Zhiqiang, HU Wengang, LI Qin, CHEN Zhen, WANG Nan

School of Mechatronic Engineering in Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract With the "gasification" process guided by China's energy strategy, during the 12th Five-Year Plan, the gas pipeline mileage will have a significant growth, and expect to reach 100,000 kilometers by 2015. This paper analyzes the mechanisms of the film forming and the drag reduction of the DRA through the electron microscope micro tests. In the optimization of the key structure in the injection device, it is shown that the change of the cone angle of the swirl chamber has a great impact on the spray angle of the swirl atomizer, the atomizing results are best when the cone angle of the swirl chamber is 100° . The change of the nozzle outlet diameter may change the axial velocity of the drag reducing agent injection, it would lead to the increase of the spray distance, which, however, would decrease the spray angle. When the diameter of the nozzle outlet is 1.4mm, the tangential angle of the spin chamber is 14° , the atomizing results are the best. A computation formula of the reasonable dose is obtained through a method of combining the laboratory and field testings. Finally, the field experiment is developed in the pipeline of LAN-YIN. The findings provide a guidance for the extension and application of the technology of natural gas DRA.

Keywords reduction mechanism of DRA; injection device; structure optimization of nozzle

1956年美国石油协会研究发现, 往输送气体的粗糙管道内加入少量的液体有机物可提高管道的输送能力^[1]。20世纪末, Chen等^[2]在墨西哥一条天然气输送管道上, 通过自行设计的管道环路装置进行了减阻剂现场试验, 该试验为天然气管道减阻技术的深入研究提供了手段, 通过试验可看出天然气减阻剂适合分批注入的方式, 减阻剂的减阻效果最少可以持续 400 h。李国平等^[3]研究发现, 天然气管输送过程中产生阻力的根本原因是管道内壁表面粗糙度过大, 这也是影响天然气输送过程中输送压降的关键原因; 张其滨等^[4,5]通过对减阻

剂减阻机制及分子结构特征的探索, 建立了一套检测评价方法, 以检测减阻剂减阻效果, 试验结果表明管道水力摩擦系数降低约 13%, 在等压降的情况下输气量增加约 7.3%。曹云等^[6]对 PPEM 类型的天然气减阻剂进行了室内环道评价试验, 配制了不同浓度的 PPEM 天然气管输减阻剂溶液, 开展了减阻剂效果评价试验, 由试验结果可知, 减阻剂的最佳合理浓度为 8×10^{-6} 最佳。Huang等^[7]对减阻剂减阻机理进行了研究, 通过摩擦磨损试验和数值仿真技术, 进一步揭示了减阻剂的减阻机制。

收稿日期: 2013-03-28; 修回日期: 2013-05-30

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2011D-5006-0607); 中石油管道公司科技研究中心项目(GDGS-KJZX-2012-JS-173)

作者简介: 黄志强, 教授, 研究方向为石油装备的现代设计理论及方法, 电子信箱: huangzq@swpu.edu.cn

引用格式: 黄志强, 胡文刚, 李琴, 等. 天然气管输减阻剂减阻技术的研究与应用[J]. 科技导报, 2014, 32(1): 34-39.

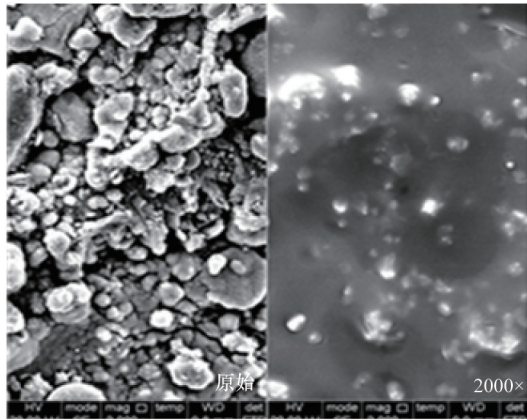
纵观国内外对天然气减阻剂减阻技术研究现状可知,目前对减阻剂减阻技术以产品开发和试验研究为主,而对减阻机制研究较少,目前还未见对减阻剂加剂装置关键结构的仿真优化报道,这恰是推广和应用天然气管输减阻剂减阻技术的关键。本文通过对减阻机制的微观试验研究,揭示天然气减阻剂的减阻机制,对减阻剂加剂装置关键结构仿真优化。

1 电镜微观试验减阻机制

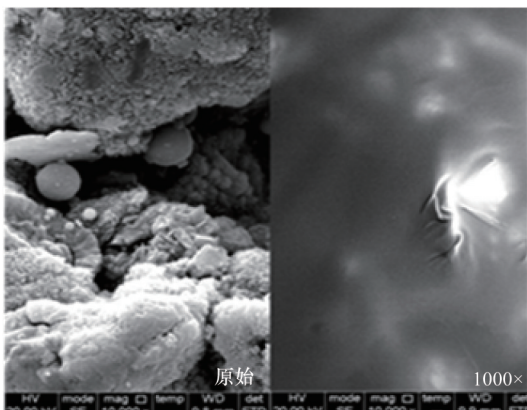
制备原始管道试件及加剂后管道试件,运用FEI Quanta 450型环境扫描电子显微镜进行不同倍数下管道内壁表面微观形貌分析研究^[7],以掌握减阻剂对管道内壁表面粗糙度的影响规律和在管道内壁表面的减阻机制。

1.1 加剂前后管道内壁正面微观形貌

试验分别对原始管道及加剂后管道试件正面进行电镜扫描观察,对比观察原始管道和加减阻剂后管道的内壁表面微观形貌(图1)。



(a) 原始管道



(b) 加剂后管道

图1 原始管道及加剂后管道正面形貌对比
Fig. 1 Comparison of the pipeline front shapes with and without adding agent

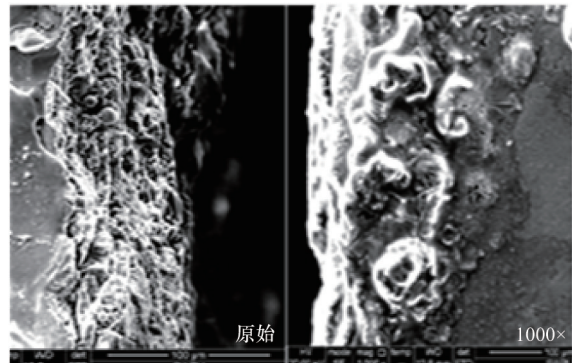
由图1可见:原始管道内壁正面凹凸不平,坑洞孔隙清晰可见,微凸体突出,粗糙程度大;加剂后在管道内壁表面形成

了一层致密的减阻膜,凹坑、坑洞、孔隙等被填充,部分微凸体被覆盖。

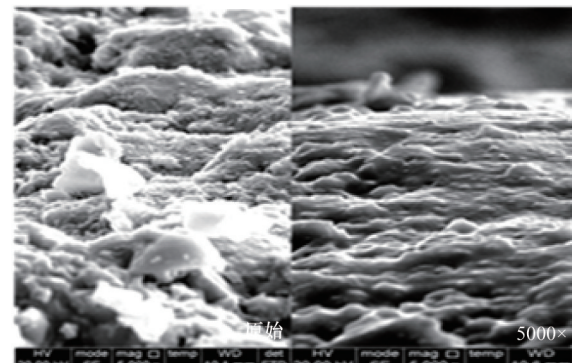
分析可知,减阻剂对管道内壁表面凹坑、坑洞、孔隙等具有填充作用;对微凸体具有覆盖成膜作用,使管道内壁表面变得光滑平整;从而降低了管道内壁表面粗糙度,减小了摩擦阻力,实现减阻剂的减阻增输作用。

1.2 加剂前后管道内壁侧面微观形貌

为了进一步观察减阻剂吸附膜对管道表面粗糙度的影响情况,试验分别对原始管道及加剂后管道试件侧面进行电镜扫描观察,电镜扫描微观形貌如图2所示。



(a) 原始管道



(b) 加剂后管道

图2 原始管道及加剂后管道侧面形貌对比
Fig. 2 Comparison of the pipeline side shapes with and without adding agent

由图2可见:原始管道内壁侧面微观形貌特征清晰,凹凸不平,表面粗糙突出;加剂后管道内壁表面形成了较为连续的减阻膜,没有出现裂纹、孔隙等缺陷。同时,凹坑被填充,微凸体被覆盖,表面粗糙度得到改善。

分析可知,减阻剂的填充和覆盖成膜作用降低了管道内壁表面的粗糙度,吸附在管道内壁表面的减阻膜连续致密。

2 工艺设计及仿真优化

2.1 减阻剂加剂工艺设计

试验中采用雾化泵注加剂工艺将减阻剂喷注到气体管

道内,依靠减阻剂本身的吸附力以及气体的紊动扩散作用在管道内壁形成一层均匀的减阻剂膜^[8]。

减阻剂从搅拌包装桶流出,经过过滤增压环节和压力控制环节,通过环腔式雾化器将减阻剂注入到天然气管道当中。压力控制环节采用双管线控制,这样既保证加剂作业能够高效连续进行,又提高了操作的安全性和可靠性,工艺流程如图3所示。

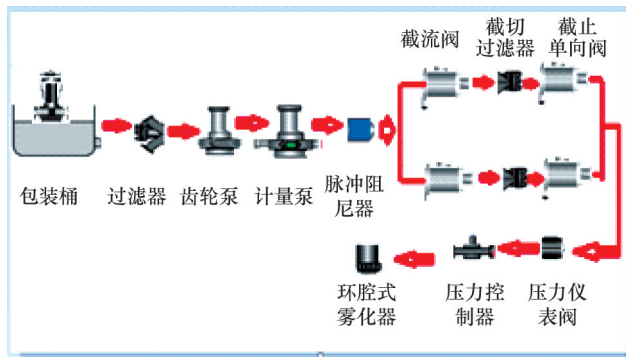


图3 减阻剂雾化泵注工艺流程

Fig. 3 Technological flow chart of pulverization and micro-pump infusion for the DRA

2.2 雾化喷嘴结构的仿真优化分析

旋流雾化喷嘴(图4)是雾化加剂装置的关键部件,流体经过两个对称切向孔流道进入到旋流体内,产生高速旋流,经喷孔喷出形成旋流雾化膜,然后破碎成雾化颗粒^[9]。

通过改变旋流喷嘴结构参数,如旋流体内锥角 α 、喷孔直径 d 、切向孔角度 β 等,采用数值仿真技术,以喷嘴出口轴向速度和旋流雾化角作为雾化效果的评价标准,对雾化喷嘴的结构参数进行优化^[10,11]。

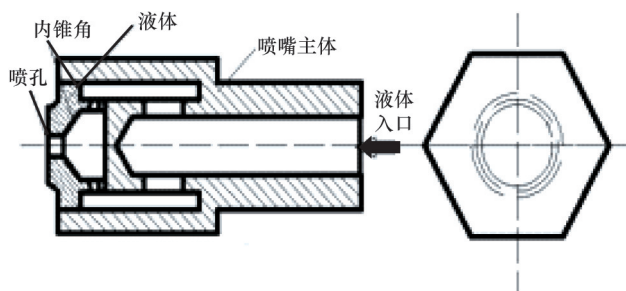


图4 旋流喷嘴结构示意图

Fig. 4 Structure of swirl nozzle

2.2.1 旋流室内锥角 α 对喷嘴雾化特性的影响

保持其他参数值不变,改变旋流室内锥角,分别取旋流室内锥角 α 为 90° , 100° , 110° , 120° , 130° ,通过数值仿真技术,分析得到喷嘴的出口轴向速度和雾化角的变化规律,如图5和图6所示。

由图5可知,旋流室内锥角对喷嘴出口轴向速度影响不大, α 为 100° 和 120° 时,出口中心轴向速度明显高于其他内

锥角时的喷嘴。由图6可知,旋流室内锥角对喷嘴雾化角度影响较大, α 为 100° 时所对应的雾化角度最大。因此,旋流雾化喷嘴的旋流室内锥角取 100° 较为适合。

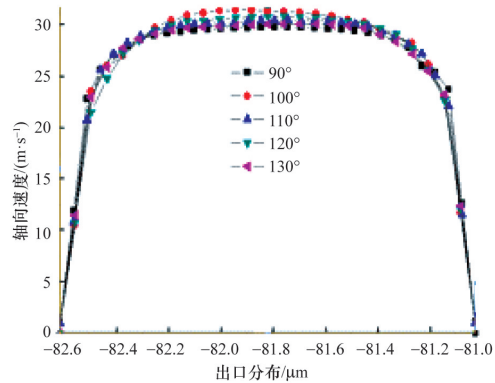


图5 旋流室内锥角对喷嘴出口轴向速度影响

Fig. 5 Effect of the inside cone angle on the Axial Velocity at the jet exit

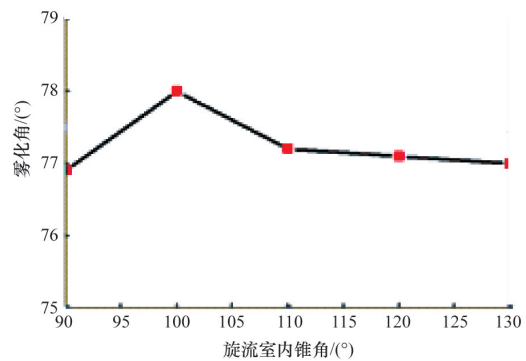


图6 旋流室内锥角对喷嘴雾化角的影响

Fig. 6 Effect of the inside cone angle on the spray angle

2.2.2 喷嘴出口直径对雾化特性的影响

喷嘴出口直径 d ,分别取1.2,1.4,1.6,1.8,2.0和2.4 mm。通过fluent数值模拟仿真,计算分析不同喷嘴出口直径旋流喷嘴出口轴向速度和雾化的角变化规律,如图7和图8所示。

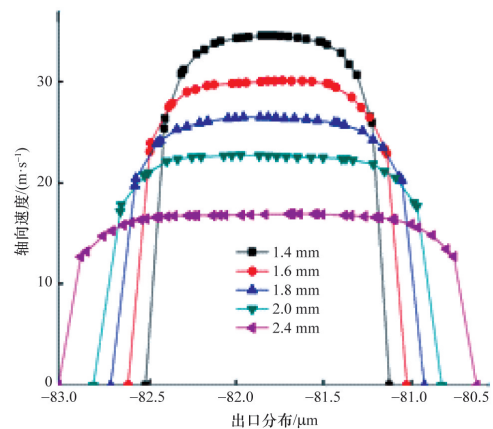


图7 不同喷嘴出口直径轴向出口速度

Fig. 7 Axial velocity at the jet exit with different outlet diameters

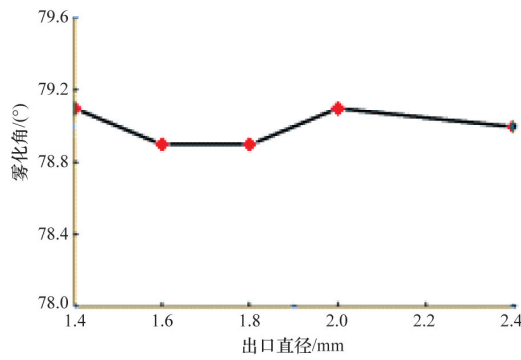


图8 喷嘴出口直径对雾化角的影响

Fig. 8 Effect of the outlet diameter on the spray angle

由图7可知,出口直径对喷嘴出口轴向速度有较大的影响,随着出口直径的减小,喷嘴出口轴向速度逐渐增大。结合图8可知,改变喷嘴的雾化角,随着喷嘴出口直径的增大,喷嘴雾化角呈现先减小后增大的趋势,最后保持不变。综合分析可知,对于旋流喷嘴出口直径,取1.4 mm较为合适。

2.2.3 旋流室切向入口角度对雾化特性影响

保持其他参数值不变,改变喷嘴旋流室切向入口角度为 β ,分别取旋流室切向角为 $8^\circ, 10^\circ, 12^\circ, 14^\circ$ 和 18° ,通过数值仿真技术,分析得到不同喷嘴旋流室切向入口角,喷嘴的出口轴向速度和雾化角的变化规律,如图9和图10所示。

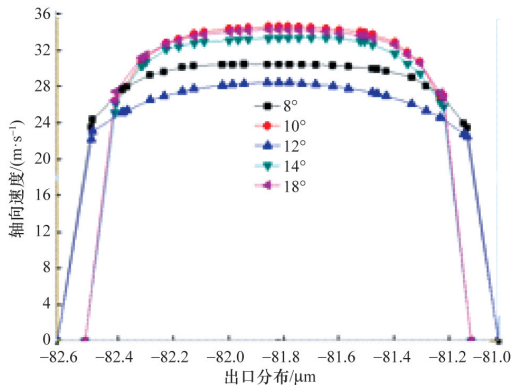


图9 不同喷嘴旋流室切向角轴向出口速度

Fig. 9 Axial velocity at the jet exit with different tangential angles

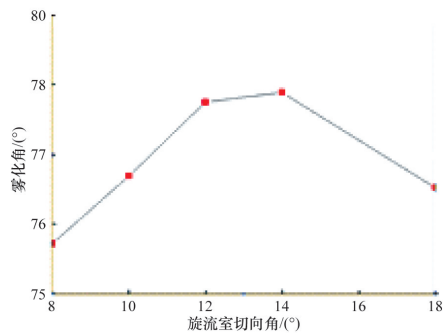


图10 旋流室切向角对喷嘴雾化角的影响

Fig. 10 Effect of the tangential angle on the spray angle

由图9可知,随着喷嘴旋流室切向入口角的增大,喷嘴出口轴向速度呈凸型趋势变化,在切向角为 14° 和 18° 时开始趋于平稳,基本维持在 32 m/s 附近;由图10可知,当切向角为 12° 和 14° 时喷嘴的雾化角最大,综合分析可知,对于喷嘴旋流室切向入口角,取 14° 较为合适。

3 合理剂量的确定

目前,国内外对天然气减阻剂剂量的确定主要依赖以往加剂经验完成,存在一定的不确定性和盲目性,尚未对合理加剂确定方法开展系统研究,这限制了天然气减阻剂的推广使用与发展。通常采用系数修定法确定输气管道的现场应用合理加剂量,计算表达式为

$$Q_1 = KQ_2A \quad (1)$$

式中, K 为修正系数, Q_2 为单位面积合理加剂量, A 为作业管壁表面积。

3.1 单位面积合理加剂量确定

通过实验室摩擦系数测试试验可确定管道单位面积合理加剂量。由加剂量对管道内壁表面摩擦系数影响曲线可知(图11),当减阻剂达到一定量时,管壁表面摩擦系数降至最低后不再减小,减阻效果不再提高,此时存在理论合理加剂量值为 0.001 mL ,因此,通过计算确定该减阻剂单位面积合理加剂量 Q_2 为 0.014 L/m^2 。

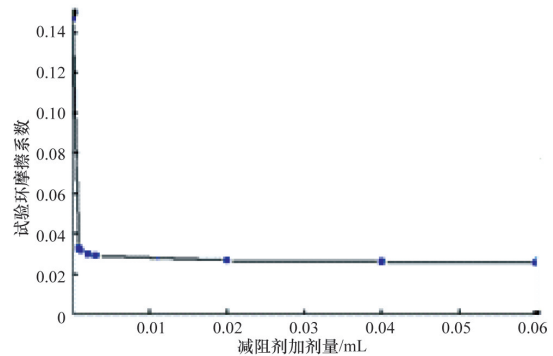


图11 加剂量对管道内壁表面摩擦系数影响曲线

Fig. 11 Effects of dose on the friction factor of the inside wall surface in the the natural gas pipelines

3.2 现场试验确定修正系数

在长庆油田采气一厂选取了3段试验管道进行现场试验,试验采用滴注雾化的注入方式,并对现场试验数据进行了测试、收集及结果分析,如表1所示。

表1 现场试验数据采集

Table 1 Data of the field tests

管段名称	管道内径/mm	管段长/km	管壁面积/ 10^4 m^2	减阻剂注入量/L	单位面积加剂量/ $(\text{L} \cdot \text{m}^{-2})$
首1#段	610	16.5	3.16	500	0.0158
1#-2#段	610	16.8	3.22	500	0.0155
2#-3#段	610	30.8	5.92	1000	0.0169

将室内摩擦磨损试验得到的理论合理加剂量和现场加剂量进行比对修正,通过计算分析得到修正系数 K ,以该系数作为减阻剂实际加剂量和室内试验理论加剂量的比值系数。3段管道的修正系数分别为: $K_1=1.129, K_2=1.107, K_3=1.207$,初步确定该减阻剂加剂量修正系数 K 在1.10~1.30之间,得到合理加剂量的初步经验计算式为

$$Q_1=(1.10 \sim 1.13)Q_2A \quad (2)$$

4 现场试验

4.1 试验过程

4.1.1 清管

为使减阻剂均匀牢固地吸附在管壁上,在加剂之前进行了清管作业,清除出管内约50 kg粉尘(管内不存在水和其他醇类液体)。清管器走完全程时间为100 min,速度为4.28 m/s。

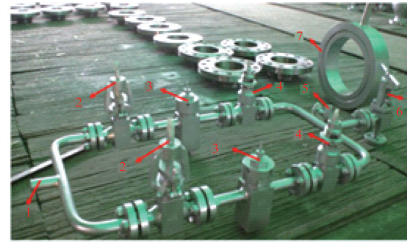
4.1.2 注入减阻剂

根据现场实际情况,将注入点选择在球空管线上的球阀处(图12),采用自主研发的加剂装置(图13),注入泵选择美国Milton Roy防爆计量泵,根据加剂量经验计算公式,取修正系数为1.12,减阻剂加剂总量为1930 L,70 L/h。注入过程中,站内管道运行调整为清管流程,走清管流程的为南19站收集的天然气。



图12 减阻剂注入点位置

Fig. 12 Location of injecting the DRA



1—输入端 2—截流调节阀 3—精细过滤器 4—截止单向阀
5—压力仪表阀 6—流量调节阀 7—环形旋流雾化器

图13 压力控制与雾化注入环节实物

Fig. 13 Pressure control loop and pulverization

4.1.3 注剂后数据采集

本次试验选取河口站—甘塘联络站之间的管线,收集了阀室和站场的高程、里程、间距和位置见表2。

表2 阀站间距、高程及阀室位置

Table 2 Information of valve chamber and height

序号	阀室和站场名称	高程/m	里程/km	阀站间距/km	所在位置	备注
1	河口分输站	1683.0	0	0	兰州西固区河口张家台	增压
2	#1 阀室	1650.0	16.5	16.5	甘肃永登县五里佟王家庄	
3	#2 阀室	1780.0	33.3	16.8	甘肃永登县红城子华家山	
4	#3 阀室	2019.0	64.1	30.8	甘肃永登县五道岷长涝池	
5	#4 阀室	2256.0	91.8	27.7	甘肃景泰县正路堡解放村	分输
6	#5 阀室	2100.0	121.6	29.8	甘肃景泰县大安村	
7	#6 阀室	1580.0	151.9	30.3	甘肃景泰县条山农场	分输
8	#7 阀室	1576.0	173.3	21.4	甘肃景泰县红墩大队	
9	甘塘联络站	1647.0	204.4	31.1	宁县中卫县甘塘小红山	

4.2 结果分析

图14为输送效率随时间的变化曲线。现场试验表明:

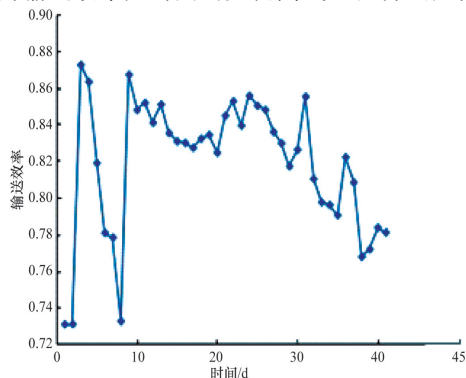


图14 输送效率随时间的变化曲线

Fig. 14 Volumetric efficiency of the inside wall surface vs. time

- 1) 在现场加剂过程中,自主设计的雾化加剂系统高效可靠运行,实现减阻剂的雾化加注,提高输送效率8%~12%;
- 2) 加剂后,随着时间的延长,输送效率缓慢降低,30 d后,输送效率基本降低到加剂前水平。

5 结论

1) 通过减阻剂微观电镜试验研究发现:减阻剂减阻的主要机制是通过管道内壁表面凹坑、坑洞、孔隙和微凸体进行填充和覆盖,使管道内壁表面变得光滑平整,以阻止流体湍流的产生,同时降低已有湍流的强度,降低压力损失,提高了天然气管道的输气能力;

2) 采用fluent数值仿真技术,对雾化喷嘴的结构进行了优化,旋流雾化喷嘴的旋流室内锥角会对喷嘴雾化角产生较

大的影响,旋流室内锥角取 100° ,喷孔直径取 1.4 mm ,旋流室切向入口角取 14° ,该旋流雾化喷嘴的雾化效果最佳;

3) 喷嘴出口直径的变化可改变减阻剂喷射的轴向速度,有利于增大喷射距离,减小雾化角,喷嘴旋流室切向入口角对喷嘴雾化角的影响明显,直接影响旋流室内的动能大小;

4) 运用实验室摩擦系数测试技术与现场加剂试验相结合的方法确定减阻剂的合理加剂量的初步经验公式,降低了使用成本,对天然气管输减阻剂减阻技术的推广与应用具有指导意义;

5) 现场试验表明,在现场加剂过程中,自主设计的雾化加剂系统高效可靠运行,实现减阻剂的雾化加注,提高输送效率 $8\% \sim 12\%$ 。

参考文献(References)

- [1] 吴长春, 张孔明. 天然气的运输方式及其特点[J]. 油气储运, 2003, 22(9): 39-43.
Wu Changchun, Zhang Kongming. Transportation of natural gas and its characteristics[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2003, 22(9): 39-43.
- [2] Chen H J, Kouba G E, Fouchi M S, et al. DRA for gas pipelining successful in gulf of mexico trial [J]. Oil & Gas Journal, 2000, 98 (23): 54-58.
- [3] 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.
Li Guoping, Liu Bing, Bao Xuchen, et al. Natural gas pipeline drag reduction and anti-drag agent[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(3): 15-21.
- [4] 张其滨, 范云鹏, 林竹, 等. 天然气输送管道用减阻剂及制造方法: 中国, 101074344A[P]. 2007-11-21.
Zhang Qibin, Fan Yunpeng, Lin Zhu, et al. Natural gas transmission pipeline drag reduction agent and method of manufacture: CN, 101074344A[P]. 2007-11-21.
- [5] 张其滨, 范云鹏, 林竹, 等. 天然气管道输送减阻剂研究[J]. 天然气技术, 2008, 2(1): 48-50.
Zhang Qibin, Fan Yunpeng, Lin Zhu, et al. Study of natural gas pipeline transportation for drag reduction agent[J]. Gas Technology, 2008, 2(1): 48-50.
- [6] 曹云. 天然气减阻剂室内性能评价及现场应用试验[D]. 北京: 中国石油大学, 2011.
Cao Yun. Indoor property evaluation and field application test of natural gas drag reduction agent[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2011.
- [7] Huang Z Q, Zhu R G. Experimental research on the drag reduction technology of nature gas pipeline transportation[J]. Advanced Material Research, 2012, 361-363: 982-989.
- [8] Frings B. Heterogeneous drag reduction in turbulent pipe flows using various injection techniques [J]. Rheologica Acta, 1988, 27: 92-110.
- [9] 姚增权, 马进. 筒式旋流喷嘴的设计[J]. 电力环境保护2002, 18(3): 1-7.
Yao Zengquan, Ma Jin. Design of simplex swirl jet[J]. Electric Power Environmental Protection, 2002, 18(3): 1-7.
- [10] Henry A B, Charles W W, John R T, et al. Pipeline injector apparatus and method for using same: US, 4688589[P]. 1987-08-25.
- [11] Pomeroy J M, Jackson N J. Dissolution performance by injection through a die-type nozzle: US: 4771800[P]. 1988-09-20.

(责任编辑 赵业玲)

·学术动态·



中国科协第265次青年科学家论坛研讨 “面向云计算的密码新技术”

2013年11月23—24日,由中国科协主办、中国密码学会承办,主题为“面向云计算的密码新技术”的中国科协第265次青年科学家论坛在北京举行。

本次论坛执行主席由中国科学院软件研究所研究员张振峰、中山大学教授张方国、西安电子科技大学教授陈晓峰、福建师范大学教授黄欣担任,来自中国科学院软件研究所、中山大学等32家单位的41位青年学者与会研讨,24名青年专家学者作主题报告,内容涉及云数据远程持有证明和完整性证明、可搜索加密与密文检索、属性加密与云数据访问控制、代理重加密与云数据分享、密码方案的安全外包计算、可验证计算、全同态加密与函数加密、云计算密钥管理等。与会学者围绕主题报告及云计算对密码学提出的技术挑战、密码新技术在云计算安全中的解决方案、当前云计算中的密码应用实践、密码新技术在云计算安全中的应用前景等开展讨论,并提出了面向云计算的密码新技术研发的科技建议。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35548/n38620/15260634.html>。