

油田集输管道泄漏流场分布规律模拟分析*

钱 程^{1,2} 孙秉才¹ 曹航博³ 高 磊⁴

(1. 中国石油天然气股份有限公司安全环保技术研究院; 2. 中国石油大学(北京);

3. 中国石油长庆油田公司; 4. 中国石油长庆油田公司第四采油厂)

摘 要 利用计算流体力学软件 Fluent, 对油田集输管道在不同管径、不同压力和不同泄漏孔径下的泄漏点流场进行了研究。结果表明: 泄漏点处压力变化小, 泄漏速率变化大。泄漏速率受泄漏孔径、压力影响大, 受管径变化影响小, 泄漏孔径、压力变化越大, 泄漏速率变化越大, 可为集输管道的泄漏监测提供理论指导。

关键词 集输管道; 泄漏孔径; 压力; 管径; 泄漏速率; Fluent 软件

DOI:10.3969/j.issn.1005-3158.2018.06.005

文章编号: 1005-3158(2018)06-0019-04

0 引 言

集输管道站点多、里程长、分布区域广, 途径区域存在环境敏感区和高后果区, 受管输介质腐蚀性、第三方破坏等因素影响, 近年来集输管道泄漏事故时有发生, 例如 2015 年的“3·26”泄漏事故, 泄漏油水混合物约 10 m^3 ^[1], 对生态环境脆弱的黄土地造成污染; 2015 年的“5·8”泄漏事故, 泄漏油水混合物约 2.4 m^3 ^[2], 泄漏点位于河流上游, 对饮用水造成严重威胁。油水混合物泄漏后, 渗入土壤造成植物死亡、耕地破坏, 还可能污染河流, 不但造成经济损失和环境危害^[3-4], 还给企业带来了一定的负面社会影响。

随着《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国安全生产法》的实施, 国家对环境问题、生产安全问题越来越重视, 因此集输管道泄漏引起的环境污染也日益受到关注^[5]。为了及时发现集输管道泄漏, 需要采取有效的泄漏监测技术。集输管道泄漏监测技术主要有负压波法、音波法、质量流量平衡法等, 监测效果与泄漏点处的流场有一定关系^[6]。目前相关研究主要集中在天然气管道泄漏流场的模拟^[7-8]和输油管道泄漏后果的模拟^[9], 但关于油田集输管道内泄漏点处流场的模拟研究较少。本文利用计算流体力学软件 Fluent, 对集输管道不同压力、管径、泄漏孔径下泄漏点处的流场进行了模拟研究。

1 油田集输管道泄漏理论及数值模型

1.1 模型建立及参数设置

集输管道规格众多、工况复杂, 其中站间管线管

径较大、流量较大、工况相对较好, 适合作为研究对象。以某段站间管线为例, 管道管径主要有 $\phi 114$, $\phi 133$, $\phi 168$, $\phi 219\text{ mm}$ 4 种, 泄漏孔径以 $1\sim 4\text{ mm}$ 为主, 首站压力较高, 为 3 MPa , 而末站由于输送过程能量损失等原因, 压力较低, 为 $0.1\sim 0.2\text{ MPa}$, 管道材质为 $20^\#$ 钢, 运行温度 $43\sim 45^\circ\text{C}$, 流量为 $14\text{ m}^3/\text{h}$, 管输介质经过三相分离后的原油含水率小于 0.5% , 为了使模型得到简化, 在此作以下假设: 模拟管道为满管输送、管输介质为单一介质、管道压力恒定、管道温度恒定。

为了便于分析流场规律, 管道孔径设置为 $\phi 130$, $\phi 160$, $\phi 190$, $\phi 220\text{ mm}$, 压力设置为 $0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5\text{ MPa}$, 泄漏孔径设置为 $1, 2, 3, 4\text{ mm}$, 如表 1 所示。

表 1 模拟泄漏参数

序号	管径 ϕ/mm	压力/ MPa	泄漏孔径/ mm
1	130	0.1	1
2	160	0.5	2
3	190	1.0	3
4	220	1.5	4
5	—	2.0	—
6	—	2.5	—

几何模型选取管段长度为 200 mm , 泄漏孔位于管道中间正下方, 泄漏喷流区的长度设置为 20 mm ^[10]。

* 基金项目: 油田环境敏感区钢质集输管道泄漏在线监测预警技术研究与应用, 编号: 2017D-1608, 中国石油天然气股份有限公司科学研究与技术开发项目。

钱程, 中国石油天然气股份有限公司安全环保技术研究院机械工程专业 2016 级在读硕士, 研究方向: 机械设计及理论。通信地址: 北京市昌平区沙河镇西沙屯桥西中国石油创新基地 A 座, 102206。E-mail: 943052611@qq.com。

网格划分采用 All Quad 方式,基本网格尺寸为 1 mm,对泄漏喷流区进行网格加密处理,网格尺寸达到 0.5 mm,如图 1 所示。

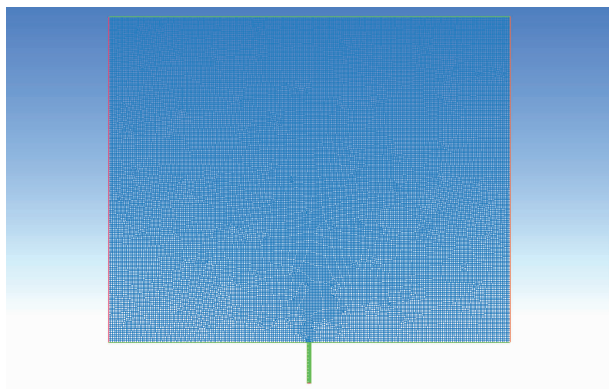


图 1 集输管道模型网格划分

1.2 计算模型

油田集输管道压力较低,其内部的原油表现为大雷诺数下的湍流运动,又因为 45 °C 下原油的黏性小,所以适合选用标准 $k-\epsilon$ 双方程模型^[11]。

依据 Fluent 中各种出入口各种边界条件的使用范围^[12]以及所需模拟的实际工况,选择以下边界条件:入口为压力入口、出口为压力出口、泄漏孔为压力出口。

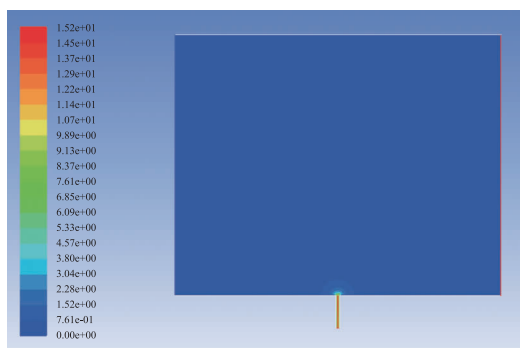
2 油田集输管道泄漏的仿真模拟结果及分析

2.1 管道内流场分析

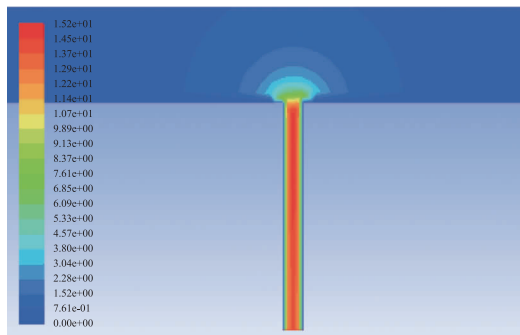
根据现场调研,管径 $\varphi 160$ mm、泄漏孔径 2 mm 的泄漏较多,因此对管径 $\varphi 160$ mm、泄漏孔径 2 mm 的泄漏进行模拟。管径几何模型如图 2 所示,压力设置为 0.1 MPa,得到管道的速度云图(图 3)和压力云图(图 4)。



图 2 集输管道几何模型



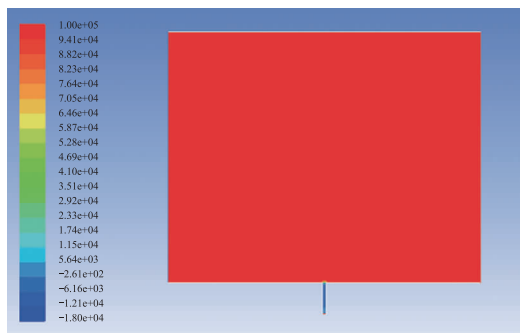
(a) 主体泄漏速度云图



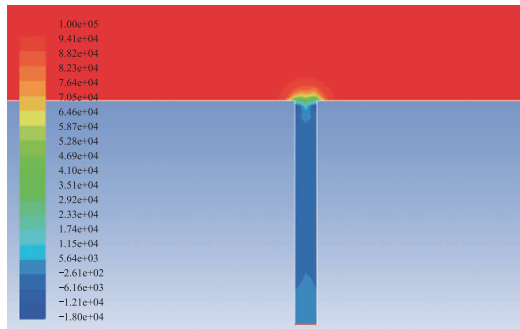
(b) 局部泄漏速度云图

图 3 泄漏速度云图

从图 3 可以看出,管道泄漏时,管道内原油流速变化很小,但在泄漏孔附近的扇形流场中,流速迅速提高至 10.7 m/s;在泄漏喷流区,流速分布均匀,靠管壁处流速较小,为低流速区域,中间流速最大,达到 15.2 m/s,是高流速区域。



(a) 主体泄漏压力云图



(b) 局部泄漏压力云图

图 4 泄漏压力云图

从图 4 可以看出,管道泄漏时,管道内原油的压力变化很小,但在泄漏孔附近压力从 0.1 MPa 下降至 0.04 MPa,压力区域跟泄漏孔径大小相当,在泄漏喷流区压力下降缓慢,压力从 0.04 MPa 下降至 0.01 MPa。

2.2 不同管道运行参数流场特性影响分析

2.2.1 压力变化对流场特性的影响

管径设置为 $\varphi 160$ mm,泄漏孔径为 2 mm。图 5 为管道压力为 0.1,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 MPa 时的泄漏速度云图。

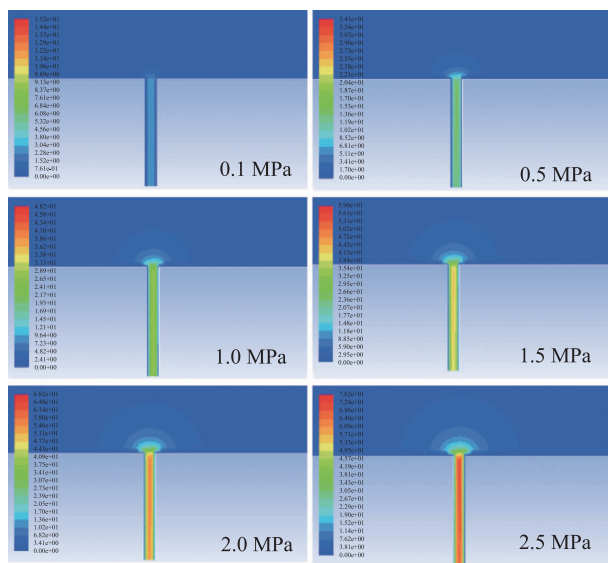


图 5 不同管道压力时的泄漏速度云图

从图 5 可以看出,随着管道压力的增加,泄漏孔附近的扇形流场面积增大,流速增加幅度变大;泄漏喷流区中间高流速区域扩大,靠管壁的低流速区域缩小,泄漏速率提高。

为了研究管道压力与泄漏速率的变化规律,增大压力范围,模拟 0.1~7 MPa 管道压力时的泄漏速率,如图 6 所示。

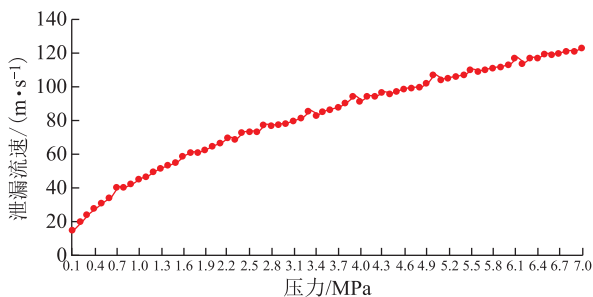


图 6 不同管道压力时的泄漏速率折线

从图 6 可以看出,随着压力提高,泄漏速率提高,但是泄漏速率的增幅越来越小。通过拟合,得到管径

$\varphi 160$ mm、泄漏孔径 2 mm 时,泄漏速率 v (m/s)与管道压力 P (MPa)的函数关系:

$$v = 45.575 P^{0.5078} \quad (1)$$

2.2.2 泄漏孔径变化对流场特性的影响

管径设置为 $\varphi 160$ mm,压力设置为 0.1 MPa。

图 7 为泄漏孔径 1,2,3,4 mm 时的泄漏速度云图。

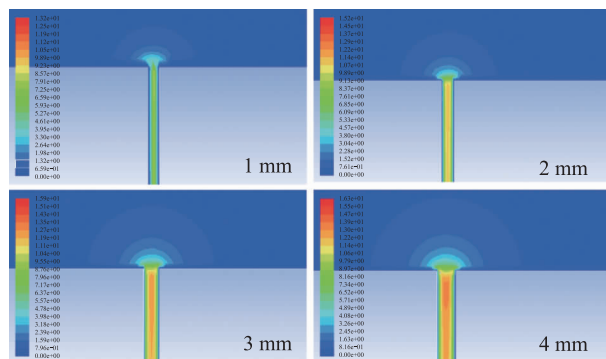


图 7 不同泄漏孔径时的泄漏速度云图

从图 7 可以看出,随着泄漏孔径的增加,泄漏孔附近的扇形流场面积增大,流速增加幅度变大;泄漏喷流区中间高流速区域扩大,靠管壁的低流速区域缩小,泄漏速率提高。

为了更好地研究孔径与泄漏速率的变化规律,增大压力范围,模拟 1~10 mm 泄漏孔径时的泄漏速率,如图 8 所示。

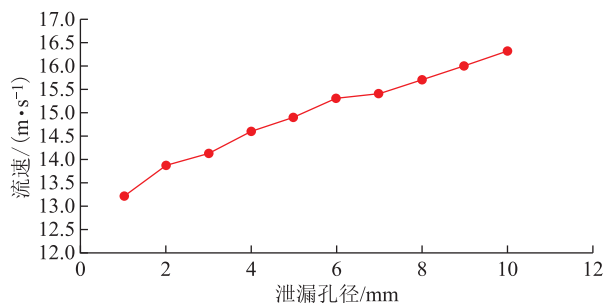


图 8 不同泄漏孔径时的泄漏速率折线

从图 8 可以看出,随着泄漏孔径的增大,泄漏速率提高,泄漏速率增幅变化不明显,基本上呈线性变化。通过拟合,得到管径 $\varphi 160$ mm、泄漏孔径 2 mm 时,泄漏速率 v (m/s)与泄漏孔径 r (mm)的函数关系:

$$v = 0.3236 r + 13.16 \quad (2)$$

2.2.3 管径变化对流场特性的影响

泄漏孔径设置为 2 mm,压力设置为 0.1 MPa。

图 9 为管径 $\varphi 130$, $\varphi 160$, $\varphi 190$, $\varphi 220$ mm 时的泄漏速度云图。

表 2 为不同管径时的泄漏孔速率。

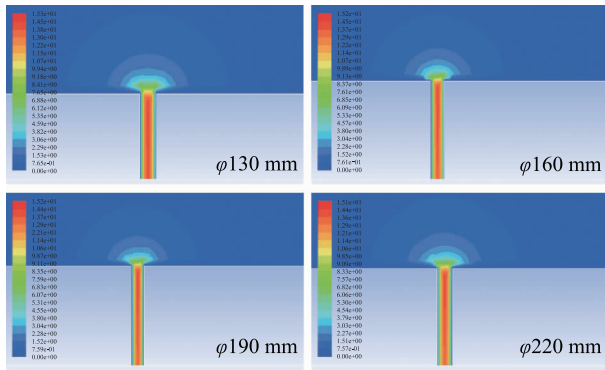


图9 0.1 MPa 时不同管径的泄漏速度云图

表2 0.1 MPa 时不同管径的泄漏速率

管径 φ/mm	泄漏速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
130	10.7
160	10.7
190	10.6
220	10.6

可以看出,泄漏孔附近的扇形流场面积几乎不变,流速增加幅度变化很小;泄漏喷流区中间高流速区域几乎不变,靠管壁的低流速区域几乎不变,泄漏速率下降不足 0.1 m/s,几乎没有变化。

为了排除管道压力过小导致的流速变化不明显,将泄漏孔径设置为 2 mm,压力设置为 3 MPa。表 3 为 MPa 时不同管径的泄漏速率。

表3 3 MPa 时不同管径的泄漏速率

管径 φ/mm	泄漏速率/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
130	38.5
160	38.4
190	38.3
220	38.2

由表 3 可知,随着管径的增加,泄漏速率下降幅度约为 0.1 m/s,几乎可以忽略。

3 结论

通过对集输管道不同压力、管径、泄漏孔径下泄漏点处的流场进行模拟研究,得出以下结论。

管道发生泄漏时,在泄漏孔处,介质流速会迅速提高,压力下降,而管道内的流速、压力几乎不受影响。

管道管径、泄漏孔径不变的情况下,管道压力越大,泄漏速率越大,且泄漏速率增幅越来越小,呈非线性变化。说明高压力的泄漏容易检测,低压力的泄漏难以检测。

管径、压力不变的情况下,泄漏孔径越大,泄漏速率越大,呈线性变化。说明大孔径的泄漏容易检测,小口径的泄漏难以检测。

管道泄漏孔径、压力不变的情况下,管径变化对泄漏速率影响小,说明管径变化对于管道的泄漏监测影响不大,实际监测过程中可以忽略。

软件模拟研究中发现,模拟结果受管道压力、泄漏孔径的影响较大,不同管道压力、泄漏孔径时泄漏流场不同,泄漏规律也受到影响。因此,今后可进一步研究更多压力、泄漏孔径时的泄漏流场,以更准确地揭示管道压力、泄漏孔径对泄漏流场分布规律的影响。

参考文献

- [1] 单芳,陈悦.陕西长庆油田发生原油泄漏事故 附近河道“黑水”横流[DB/OL]. <http://pic.people.com.cn/n/2015/0327/c1016-26760764.html>.
- [2] 高政超.长庆油田发生原油泄漏 延安饮用水受到严重威胁[N/OL]. http://news.cnwest.com/content/2015-05/12/content_12476088.html.
- [3] 狄彦,帅健,王晓霖,等.油气管道事故原因分析及分类方法研究[J].中国安全科学学报,2013,23(7):109-115.
- [4] 杨筱衡,张国忠.输油管道设计与管理[M].北京:石油大学出版社,1996:42-45.
- [5] 刘昱瑭,夏勋,曹纯洁,等.胡尖山油田集输管道隐患分析及下步治理对策[J].工业,2016(3):71.
- [6] 王黎宏.基于次声波的油气管道泄漏检测系统研究[D].西安:西安石油大学,2016:1-65.
- [7] 肖国清,肖仁杰,陈云龙,等.天然气门站泄漏扩散模拟研究[J].工业安全与环保,2016,42(2):41-45.
- [8] 郝永梅,徐明,严欣明,等.城市燃气管道泄漏数值模拟和实验分析[J].常州大学学报(自然科学版),2017,29(1):79-85.
- [9] 姜璐,梁伟,仇经纬.基于 Fluent 的埋地原油管道泄漏事故后果分析[J].安全与环境学报,2017,17(1):199-203.
- [10] 金浩,张来斌,梁伟,等.天然气管道泄漏声源特性及传播机理数值模拟[J].石油学报,2014,35(1):172-177.
- [11] HUANG Z, LIU Z, CHEN S, et al. Numerical simulation and study on the transmission law of flame and pressure wave of pipeline gas explosion[J]. Safety science, 2012, 50(4):806-810.
- [12] 段中喆. ANSYS FLUENT 流体分析与工程实例[M].北京:电子工业出版社,2015:24-33.

(收稿日期 2018-08-20)

(编辑 王蕊)