

文章编号: 1000-8241(2020)01-054-06

成品油管道周边区域个人风险分析

齐先志¹ 王晓霖¹ 张莉莉² 叶青³

1. 中国石油化工股份有限公司抚顺石油化工研究院; 2. 成都职业技术学院; 3. 中国石化销售有限公司华中分公司

摘要: 为了对成品油管道周边区域个人风险水平进行量化计算,建立了成品油管道个人风险计算模型,并给出了计算流程。成品油管道个人风险计算模型设定了各类危害因素的管道基准失效频率,采用对基准失效频率修正的方法计算管道失效频率;根据管道泄漏孔尺寸,将管道泄漏类型分为微孔泄漏、中孔泄漏、管道破裂泄漏3类;对管道失效危害后果进行计算,主要包括泄漏速率、引燃概率、火灾热辐射、热辐射伤害。在管道失效频率和失效危害后果计算的基础上,计算得出管道周边区域个人风险,并明确其是否处于可接受水平。该模型计算个人风险需要依赖于管道失效数据库的事故统计,建议加强中国油气管道失效数据库建设。(图3,表5,参20)

关键词: 成品油管道; 失效频率; 个人风险; 管道失效

中图分类号: TE88

文献标识码: A

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2020.01.008

Analysis on the individual risk in the periphery of products pipeline

QI Xianzhi¹, WANG Xiaolin¹, ZHANG Lili², YE Qing³

1. SINOPEC Fushun Research Institute of Petroleum and Petrochemicals;

2. Chengdu Polytechnic; 3. Central China Branch, SINOPEC Marketing Co. Ltd.

Abstract: In this paper, the model and procedure for calculating the individual risk of products pipeline were established in order to quantitatively calculate the individual risk in the periphery of products pipeline. In the model for calculating the individual risk of products pipeline, the basic pipeline failure frequency of each hazard factor is set and the pipeline failure frequency is calculated by modifying the basic failure frequency. Based on the size of pipeline leakage hole, pipeline leakage is classified into three types, i.e., micro-hole leakage, moderate-hole leakage and pipeline rupture leakage. Pipeline failure consequence calculation consists of 4 steps: release rate, ignition probability, thermal radiation and radiation injury. Based on the calculated pipeline failure frequency and failure hazard consequence, the individual risk in the periphery of the pipeline is calculated and whether it is acceptable is determined. The calculation of individual risk by this model relies on the accident statistics of the pipeline failure database, so it is suggested to strengthen the construction of China's oil and gas pipeline failure database. (3 Figures, 5 Tables, 20 References)

Key words: products pipeline, failure frequency, individual risk, pipeline failure

成品油管道将油品从炼厂输送至消费目的地,是成品油大批量输送最安全、最经济的模式。但成品油管道部分管段不可避免地敷设在人口密集区,其主要包括居民区、工厂、学校等区域^[1-2]。成品油管道一旦在人口密集区发生泄漏,对周边区域的人员生命、财产安全危害巨大。因此,准确量化评价成品油管道对周边区域造成的人员伤害风险水平有着重要意义^[3-4]。在中国,彭星煜等^[5]建立了输气管道个人风险计算模

型;姚安林等^[6-7]采用定量风险评价方法,评估了输气管道地区等级升级区域的风险,并提出了管控措施;张华兵等^[8]提出了基于个人风险的管道与周边人员密集场所的距离规划方法;赵新伟等^[9]提出了油气管道周边区域个人与社会风险水平可接受准则。在国外,WS Atkins等机构建立了汽油管道的定量风险计算模型^[10-11]。但该模型是基于国外管道的失效事故统计结果,中国成品油管道一般混输多种油品,因此单一油品

的计算模型不适用于中国成品油管道。为此,建立了成品油管道周边区域个人风险计算模型,以期为管道周边区域规划、减缓管道风险提供技术参考。

1 个人风险计算流程

成品油管道周边区域个人风险是指该区域某固定位置长期生活、工作且未采取任何防护措施的人

员遭受特定危害而死亡的概率^[12],其计算流程(图1)为:①采集管道数据,并对其进行危害识别;②识别失效模式,计算不同失效模式下的失效频率与失效危害后果,其中失效危害后果计算主要包括泄漏速率、引燃概率、火灾热辐射、热辐射伤害的计算;③对风险进行量化计算,风险是管道失效频率与失效危害后果的综合度量;④对风险进行综合评价,确定其是否处于可接受的水平。

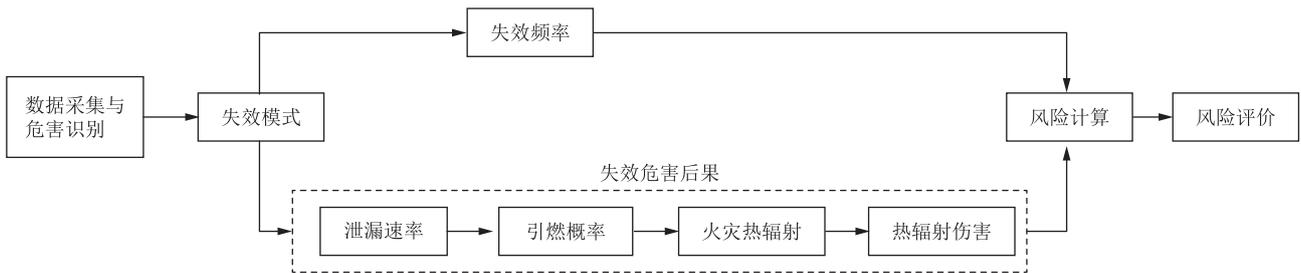


图1 成品油管道周边区域个人定量风险计算流程图

1.1 管道失效频率的确定

国外管道管理先进的国家和地区建立了管道失效数据库,用于采集、统计及分析管道失效事故信息^[13]。如欧洲 Concawe 记录了西欧输油管道自 1971 年以来的事故信息,统计分析了管道失效频率、失效原因及后果^[14]。参考国内外管道事故统计结果,将输油管道泄漏原因分为 7 类^[15](表 1),并确定了每类失效原因造

表 1 成品油管道失效原因分类、基准失效频率及修正因素

管道泄漏原因	基准失效频率/ (次·10 ⁻³ km ⁻¹ ·a ⁻¹)	修正因素
挖掘破坏	0.25	管道埋深,沿线干扰活动频率,巡线质量与频次
打孔盗油	0.15	打孔盗油发生频次及防范措施
内腐蚀	0.20	油品的水含量、硫含量、流速,内检测器性能与检测时间,管道壁厚
外腐蚀	0.20	阴极保护系统,防腐层质量,杂散电流干扰,内检测器性能与检测时间,管道壁厚
管体缺陷	0.08	管体缺陷严重程度,内检测器性能与检测时间,管道壁厚
环焊缝缺陷	0.08	环焊缝缺陷严重程度,内检测器性能与检测时间
地质灾害	0.05	地形地貌,降水量,管道敷设位置,管道保护措施,已识别地质灾害点的严重程度

成管道泄漏的基准频率。在计算特定区段管道失效频率时,采用修正系数对基准概率进行修正^[16]。

1.2 泄漏后果计算

参考国外管道泄漏类型的划分方法^[10],根据泄漏孔尺寸,将管道泄漏类型划分为 3 类:①微孔泄漏,泄漏孔直径小于 10 mm;②中孔泄漏,泄漏孔直径大于 10 mm,但小于 0.5 倍管道直径;③管道破裂泄漏,泄漏孔直径大于 0.5 倍管道直径。

1.2.1 管道泄漏速率

对于微孔泄漏,采用伯努利方程计算其油品泄漏速率:

$$v = AC_0 \sqrt{2\rho(p-p_0)} \quad (1)$$

式中: v 为油品泄漏速率,kg/s; C_0 为泄漏油品的泄漏系数,取值为 0.61; A 为泄漏孔面积,m²; ρ 为油品密度,kg/m³; p 为成品油管道内压,Pa; p_0 为成品油管道所在区域的大气压,Pa。

对于中孔泄漏,其泄漏速率取值为成品油管道油品流速的 75%^[10];对于管道破裂,泄漏速率取管道油品流速^[10]。

1.2.2 引燃概率

泄漏油品的引燃概率受多种因素影响,主要包括油品种类、泄漏量、泄漏处周边环境等。美国某时期埋地输油管道事故统计结果(表 2)^[10]表明,汽油和喷气燃料由于闪点较低,引燃概率高于其他油品。在欧洲

表2 美国某时期埋地输油管道事故统计结果

管道泄漏介质	事故数量/起		引燃事故所占比例
	泄漏	火灾	
原油	542	11	2.0%
柴油	66	1	1.5%
燃料油	85	0	0
汽油	228	7	3.1%
煤油	6	0	0
喷气燃料	26	1	3.8%
汽油调和油	19	0	0

Concawe 记录的 500 余起输油管道泄漏事故^[14]中,9 起发生了火灾,其中 5 起为原油泄漏、4 起为石脑油和汽油泄漏。同时,油品泄漏引燃概率受到外部环境的影响,管道事故统计结果表明,输油管道泄漏火灾的点火源多为外部因素。参考国内外管道泄漏事故统计结果,得到输送不同油品介质工况下泄漏油品的引燃概率(表 3)。

表3 国内外汽油、柴油管道泄漏引燃概率

泄漏油品类型	管道途经区域	引燃概率		
		微孔泄漏	中孔泄漏	管道破裂
汽油	人口密集城区	1.24%	5.2%	7.2%
	公路与铁路并行区	0.62%	2.0%	3.7%
	偏远地区	0.62%	1.5%	2.9%
柴油	人口密集城区	0.75%	2.8%	3.8%
	公路与铁路并行区段	0.36%	1.1%	1.9%
	偏远地区	0.34%	1.0%	1.5%

1.2.3 火灾热辐射

油品从管道泄漏后,在地表流淌扩散,被引燃后形成池火。油品在非密闭空间泄漏,闪火或蒸气云爆炸发生概率极低。因此,采用池火模型计算管道泄漏引发的火灾热辐射。

在池火燃烧条件下,当燃烧速率等于泄漏速率时,池火直径达到最大,其计算式^[17]为:

$$D=2\sqrt{\frac{v}{\pi v_0}} \quad (2)$$

式中: D 为池火火焰直径,m; v_0 为液体单位面积燃烧速率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

池火火焰高度计算式为:

$$L=42D\left(\frac{v}{\rho_a\sqrt{gD}}\right) \quad (3)$$

式中: L 为池火火焰高度,m; ρ_a 为空气密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 $9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。

池火表面热辐射通量的计算式为:

$$E=\frac{0.25\pi D^2\beta v H_c}{0.25\pi D^2+\pi DL} \quad (4)$$

式中: E 为池火表面热辐射通量, W/m^2 ; β 为热辐射系数,取值范围为 $0.13\sim 0.35$,成品油管道保守取值为 0.35 ; H_c 为液体油品热值, J/kg 。

假定某目标位置位于池火附近,其热辐射强度 q 的计算式为:

$$q=\tau EF_{\text{view}} \quad (5)$$

$$\tau=1-0.058\ln x \quad (6)$$

式中: F_{view} 为几何视角因子,其计算方法参见文献^[18]; τ 为大气透射率; x 为目标位置与池火中心线的距离,m。

1.2.4 热辐射伤害

假设人体的暴露面积为皮肤面积的 20% ,热辐射导致人员死亡概率值的计算式^[19]为:

$$P_r=-37.23+2.56\ln t^{4/3} \quad (7)$$

式中: P_r 为热辐射导致的人员死亡概率值; t 为热辐射持续时间(在定量风险评估计算中, t 的取值为 30 s),s。

根据文献^[18]热辐射人员死亡概率 P_d 计算式为:

$$P_d=0.5\left[1+\operatorname{erf}\left(\frac{P_r-5}{\sqrt{2}}\right)\right] \quad (8)$$

1.3 个人风险计算式

假设某成品油管道一年中保持同一运行状况,某目标位置与管道中心线的距离为 h (图2),则目标位置个人风险的计算式^[20]为:

$$\Delta\text{IR}=\sum_{k=1}^3\int_{-l}^l f_k P_k P_d dl \quad (9)$$

$$l=\sqrt{r_c^2-h^2} \quad (10)$$

式中: ΔIR 为目标位置的个人风险; k 为微孔、中孔、破

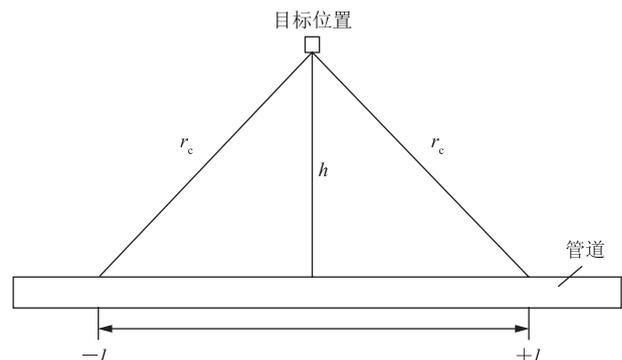


图2 成品油管道周边区域目标位置个人风险计算模型示意图

裂3种泄漏模式,分别用数字1、2、3表示; f_k 为不同泄漏模式发生频率; P_k 为不同泄漏模式下的油品引燃概率; l 为特定工况和泄漏模式下泄漏火灾对目标位置造成危害的管道段长度的50%,m; r_c 为目标位置与管道临界点的距离,即目标位置的临界距离(管道临界点一般取泄漏火灾热辐射致死概率为1%的位置^[20]),m。

成品油管道在一年中存在多种运行工况,如成品油管道输送不同批号的油品、管道各个季度的油品输量存在显著差异。根据每种工况的持续时间,按照式(11)计算目标位置的个人风险IR:

$$IR = \sum \omega_i \Delta IR_i \quad (11)$$

式中: i 为成品油管道的某种运行工况; ω_i 为某种运行工况持续时间在一年运行时间中的占比。

2 计算实例

某成品油管道材质为X60管线钢,采用3PE防腐层,管径355 mm,壁厚7.1 mm。该管道某区段从村庄东侧经过,居民房屋最近处距离管道20 m,管道中心线200 m范围内有居民房屋80栋。该处管道埋深1.5 m,管道施工、维修等干扰活动较少发生,防腐层质量优良,无杂散电流干扰,无地质灾害隐患。管道输送不同

批号的汽油和柴油,全年满负荷运行,输送汽油时间与输送柴油时间之比为1:1,当输送密度842 kg/m³、热值42 652 kJ/kg、燃烧速率0.039 kg/(m²·s)的柴油时,该处管道正常工况下运行压力为6.3 MPa,流量为490 m³/h;当输送密度753 kg/m³、热值43 070 kJ/kg、燃烧速率0.055 kg/(m²·s)的汽油时,该处管道正常工况下运行压力为5.1 MPa,流量为535 m³/h。采用文献[16]的计算方法,得到该处管道失效频率(表4)。

表4 某成品油管道泄漏失效频率计算结果

管道失效类型	失效频率/(次·10 ⁻³ km ⁻¹ ·a ⁻¹)		
	微孔泄漏	中孔泄漏	管道破裂
挖掘破坏	0.014 4	0.021 6	0.012 0
打孔盗油	0.002 5	0.006 5	0.001 0
内腐蚀	0.000 5	0.000 2	0.000 1
外腐蚀	0.002 5	0.001 0	0.000 3
管体缺陷	0.001 6	0.000 6	0.000 2
环焊缝缺陷	0.000 7	0.000 8	0.000 4
地质灾害	0.008 0	0.018 0	0.014 0

根据该成品油管道输送的汽油和柴油基本物性,由式(1)~式(3)可以计算得到不同油品输送工况下的泄漏速率、池火尺寸(表5)。

表5 某成品油管道油品泄漏速率、池火尺寸计算结果

管道泄漏类型	泄漏速率/(kg·s ⁻¹)		火焰直径/m		火焰高度/m	
	汽油	柴油	汽油	柴油	汽油	柴油
微孔泄漏	4.2	4.9	9.9	12.6	15.6	15.0
中孔泄漏	83.9	86.0	44.1	53.0	44.2	40.7
破裂泄漏	111.9	114.6	50.9	61.2	48.9	45.0

该成品油管道分为汽油输送和柴油输送两种工况,一年中汽油输送时间和柴油输送时间比为1:1,某目标位置在汽油、柴油输送工况下的个人风险分别为IR_{gasoline}、IR_{diesel},则该目标位置个人风险计算公式为:

$$IR = 0.5 IR_{gasoline} + 0.5 IR_{diesel} \quad (12)$$

由此,得出该处管道周边区域个人风险(图3)。在SY/T 6859—2012《油气输送管道风险评价导则》中,按照最低合理可行(As Low As Reasonable Practicable)原则,规定管道周边区域可容许风险的上限和下限分别为10⁻⁴/a和10⁻⁶/a,可见该成品油管道周边区域的个人风险处于可接受水平。

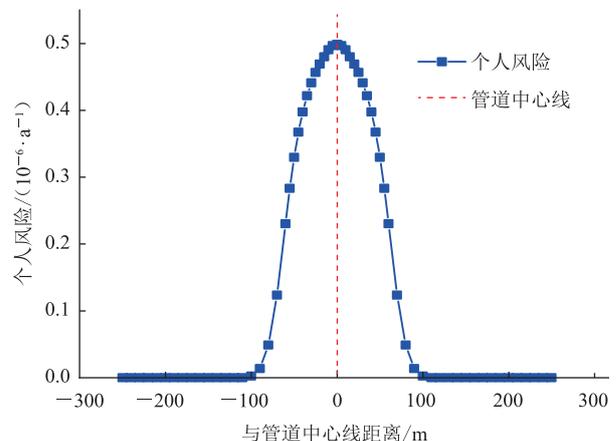


图3 某成品油管道中心线周边区域个人风险变化趋势图

3 结论

(1) 成品油管道个人风险计算模型的计算过程简单,能够用于具有多种工况的成品油管道周边区域个人风险计算,可进一步推广至原油管道、其他易燃液体危险品管道的个人风险计算。

(2) 在该计算模型中,管道失效频率、油品引燃概率、风险可接受水平的计算均依赖于管道失效数据库的统计分析结果。因此,有必要建立国家层面的管道失效数据库,采集管道失效事故数据,定期公布失效事故统计结果,反映管道安全的总体态势。

参考文献:

- [1] 高鹏,高振宇,杜东,刘广仁. 2017年中国油气管道行业发展及展望[J]. 国际石油经济,2018,26(3):21-27.
GAO P, GAO Z Y, DU D, LIU G R. The development and prospect of China's oil and gas pipeline industry in 2017[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(3): 21-27.
- [2] 高鹏,高振宇,王峰,刘广仁. 2018年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济,2019,27(3):54-59.
GAO P, GAO Z Y, WANG F, LIU G R. China's oil and gas pipeline construction in 2018[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(3): 54-59.
- [3] 张华兵,冯庆善,郑洪龙,税碧垣. 油气长输管道定量风险评价[J]. 中国安全科学学报,2008,18(3):161-165.
ZHANG H B, FENG Q S, ZHENG H L, SHUI B Y. Quantitative risk analysis of oil and gas long-distance pipeline[J]. China Safety Science Journal, 2008, 18(3): 161-165.
- [4] 张圣柱,吴宗之,张健,多英全. 油气管道选线和风险评价相关法规与方法[J]. 油气储运,2012,31(9):663-669.
ZHANG S Z, WU Z Z, ZHANG J, DUO Y Q. Relevant regulations and methods for route selection of oil and gas pipeline and risk assessment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2012, 31(9): 663-669.
- [5] 彭星煜,梁光川,张鹏,喻建胜,周飞,汪涛. 天然气管道失效个人生命风险评价技术研究[J]. 中国安全科学学报,2012,22(4):139-143.
PENG X Y, LIANG G C, ZHENG P, YU J S, ZHOU F, WANG T. Assessment of individual life risk from long natural gas pipeline failure[J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(4): 139-143.
- [6] 姚安林,周立国,汪龙,王棠昱,李又绿. 天然气长输管道地区等级升级管理与风险评价[J]. 天然气工业,2017,37(1):124-130.
YAO A L, ZHOU L G, WANG L, WANG T Y, LI Y L. Management of and risk evaluation on long-distance gas pipelines related to regional level upgrading[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(1): 124-130.
- [7] 周亚薇,张振永,田珊珊. 地区等级升级后的天然气管道定量风险评价技术[J]. 天然气工业,2018,38(2):112-118.
ZHOU Y W, ZHANG Z Y, TIAN S S. Quantitative risk assessment of the natural gas pipelines in upgraded areas[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(2): 112-118.
- [8] 张华兵,王新. 基于风险评价的管道安全距离确定方法[J]. 油气储运,2018,37(1):20-23.
ZHANG H B, WANG X. Pipeline safety distance determination method based on risk assessment[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2018, 37(1): 20-23.
- [9] 赵新伟,张华,罗金恒. 油气管道可接受风险准则研究[J]. 油气储运,2016,35(1):1-6.
ZHAO X W, ZHANG H, LUO J H. Risk acceptance criteria for oil and gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(1): 1-6.
- [10] Health and Safety Executive. Risks from gasoline pipelines in the United Kingdom[R]. London: CISDOC Database, 1999: 1-47.
- [11] MATHER J, LINES I. Assessing the risk from gasoline pipelines in the United Kingdom based on a review of historical experience[R]. London: CISDOC Database, 1999: 1-51.
- [12] GOODFELLOW G, LTD P, HASWELL J. A comparison of inherent risk levels in ASME B31.8 and UK gas pipeline design codes[C]. Calgary: 6th International Pipeline Conference, 2006: 1085-1096.
- [13] 齐先志,杨静,王晓霖,谢成,曹加园,席昱. 国外管道失效数据库简介及参考[J]. 当代化工,2016,45(4):853-855,859.
QI X Z, YANG J, WANG X L, XIE C, CAO J Y, XI G. Introduction of foreign pipeline failure databases and guidelines for us[J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(4): 853-855, 859.
- [14] DAVIS P M, DIAZ J M, GAMBARDELLA F, SANCHEZ-GARCIA E, UHLIG F, HAAN K D, et al. Performance of European cross-country oil pipelines: Statistical summary of reported spillages in 2016 and since 1971[R]. Brussels: Conservation of Clean Air and Water in Europe, 2018: 1-57.
- [15] 狄彦,帅健,王晓霖,石磊. 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.

DI Y, SHUAI J, WANG X L, SHI L. Study on methods for classifying oil & gas pipeline incidents[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(7): 109-115.

[16] 单克, 帅健, 张思弘. 基于修正因子的油气管道失效概率评估[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(1): 87-93.

SHAN K, SHUAI J, ZHANG S H. Adjustment factos based assessment of oil and gas pipelines failure probability[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(1): 87-93.

[17] 刘诗飞, 詹予忠. 重大危险源辨识及危害后果分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 85-88.

LIU S F, ZHAN Y Z. Major hazard identification and hazardous consequence analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 85-88.

[18] 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院. 石化装置定量风险评估指南[M]. 北京: 中国石化出版社, 2007: 56-97.

SINOPEC Research Institute of Safety Engineering. A guidance for quantitative risk assessment in the petrochemical plant[M].

Beijing: China Petrochemical Press, 2007: 56-97.

[19] 宇德明. 易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评估[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2000: 65-70.

YU M D. Quantitative risk assessment of flammable toxic and dangerous goods' transportation and storage[M]. Beijing: China Railway Press, 2000: 65-70.

[20] JO Y D, AHN B J. A method of quantitative risk assessment for transmission pipeline carrying natural gas[J]. Journal of hazardous materials, 2005, 123(1/2/3): 1-12.

(收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2019-12-02; 编辑: 李在蓉)

作者简介: 齐先志, 男, 1986年生, 工程师, 2012年硕士毕业于北京化工大学材料科学与工程专业, 现主要从事油气管道完整性管理和风险评估方向的研究工作。地址: 辽宁省大连市旅顺口区铁山街道南开街96号大连石油化工研究院, 116045。电话: 15804112025。Email: qixianzhi.fshy@sinopec.com



- ◎ 中文核心期刊
- ◎ 中国科技核心期刊
- ◎ 中国期刊全文数据库收录期刊
- ◎ 美国《化学文摘》(CA)收录期刊
- ◎ 中国石油文献数据库收录期刊
- ◎ 俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊

广告版心尺寸表

广告类型	版心尺寸/毫米
封二、邻封二、封三、封底	210×297
彩色插页	210×297

欢迎订阅!

◆《油气储运》杂志是国内专门报道油气储运学科科研成果和工程实践的知名刊物, 由中国石油天然气集团有限公司主管, 由中国石油天然气股份有限公司管道分公司主办。

◆《油气储运》杂志创刊于1977年, 主要刊载石油、天然气、成品油以及其他介质输送与储存相关技术的科技文章, 传递国内外油气储运技术领域的新理论、新技术、新工艺和新动态, 其内容新、实用性强, 深受广大读者喜爱。

◆《油气储运》杂志为A4开本, 120页, 全彩印刷, 每月25日出刊。国内每期定价50元, 全年600元; 国外每期定价50美元, 全年600美元。面向国内外公开发售, 全国各地邮局均可订购, 邮发代号: 18-89。

