

含硫气田水罐爆炸可能性探讨

高晓根¹ 邓翔² 周潮光³ 张镭¹

1. 中国石油西南油气田公司天然气研究院, 四川 成都 610213;

2. 中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川 遂宁 629000;

3. 四川长宁天然气开发有限责任公司, 四川 成都 610056

摘要:含硫气田水罐内闪蒸气主要组成为可燃气体,因其特殊作业过程,罐内气相空间存在形成混合爆炸气体的可能。结合生产过程的分析和混合气体爆炸极限的相关理论,建立了适合罐内混合气体爆炸浓度的变化模型和计算方法,通过具体实例的计算预测,展示了含硫气田水罐爆炸可能性及控制方式。研究结果表明:当前含硫气田水罐转水过程中存在爆炸形成的可能条件,爆炸极限可根据含惰性气体的混合可燃气体进行计算;应明确在液位下降过程中可燃气体浓度是否会在爆炸极限范围内,建议维持含硫气田水罐转水时的微正压,并在呼吸管上设置阻火器,做好防静电接地,优先采用非金属管道和设备等方式降低爆炸风险。

关键词:含硫气田水;闪蒸气;爆炸;模型;计算方法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.03.021

Discussion on Possibility of Explosion of Produced Water Tank of Sour Gas Field

Gao Xiaogen¹, Deng Xiang², Zhou Chaoguang³, Zhang Pu¹

1. Research Institute of Natural Gas Technology, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu, Sichuan, 610213, China;

2. Middle Sichuan Gas Fields, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Suining, Sichuan, 629000, China;

3. Sichuan Changning Natural Gas Development Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610056, China

Abstract: The flash gas from produced water tank of sour gas field consists of mainly flammable gas components. Due to certain specific operating procedure, explosive gas mixture can form in the vapour space of the tank. Combining the theory on explosion limits of the gas concentration and an analysis of production operations, a simulation model and calculation method can be developed to predict changes in concentration of the flammable gas in the vapour space. This model is calibrated against calculated flammable gas concentration of an actual situation and can be used to demonstrate how vapour space explosion in a produced water tank can be predicted and mitigated. The research result shows that vapour space explosion is possible when performing sour produced water tank transfer operations. Explosion limit of the gas mixture can be calculated based on the content of inert gas in the gas mixture, and should show

收稿日期:2019-12-31

基金项目:国家重大科技专项“四川盆地大型碳酸盐岩气田开发示范工程”(2016 ZX 05052)

作者简介:高晓根(1982-),男,江西黎川人,高级工程师,硕士,主要从事天然气储运和地面工程研究与技术管理工作。

E-mail:gaoxiaogen@petrochina.com.cn

clearly if gas explosion limit can be reached when water level drops during sour produced water transfer. It is suggested to maintain a slight over-atmospheric pressure in the tank during tank transfer, and provide flame arrestor in the breather pipe. Other mitigation measures include provision of anti-static grounding, and the preferential use of non-metallic pipes and equipment etc. to lower explosion risk.

Keywords: Sour produced water; Flash Gas; Explosion; Model; Calculation Methods

0 前言

天然气作为一种绿色清洁能源,具有广阔的发展前景,其开发和利用越来越受到人们重视^[1]。可燃性气体爆炸是天然气行业安全危害之一,随着国家安全环保要求的日益提高,企业和研究学者日益关注行业主要生产环节的可燃性气体爆炸风险^[2-5]。含硫气田水的储存作为气田生产辅助的一部分,中毒风险已逐步被大家所熟知^[6-9],然而由于作业过程的特殊性,其爆炸风险却少有提及。本文分析含硫气田水的储存过程中的爆炸风险,通过建立计算模型,帮助生产管理者了解爆炸可能性的计算方法,从而优化生产过程,减少安全风险。

1 爆炸可能性分析

1.1 工作过程及特点

含硫气田开采过程中,井口采出的高压含硫天然气经气液分离得到的含硫气田水先存储于站内的含硫气田水罐,再拉运或转输至回注站或处理站,典型流程见图 1。

含硫气田水从高压分离器到达接近常压的含硫气田水罐,由于压力降低以及输送到达新罐中流动扰动导致液面饱和蒸气压下降,都会闪蒸出一部分溶解在气田

水中的 H_2S 、 CO_2 、烃类及有机硫等气体^[10],合称闪蒸气。由于含硫气田水罐的非连续进水及不定期转水,闪蒸气的压力产生波动变化,分离器排水时压力最大,排水结束后逐渐趋于稳定,含硫气田水罐向外转水时压力逐渐下降,转水结束压力逐渐恢复,由于含硫气田水罐转水导致的罐内液体体积急速下降,为了平衡管内压力,含硫气田水罐与大气相连的呼吸管或多或少将倒吸进入空气。典型站场含硫气田水闪蒸气常规组分见表 1。

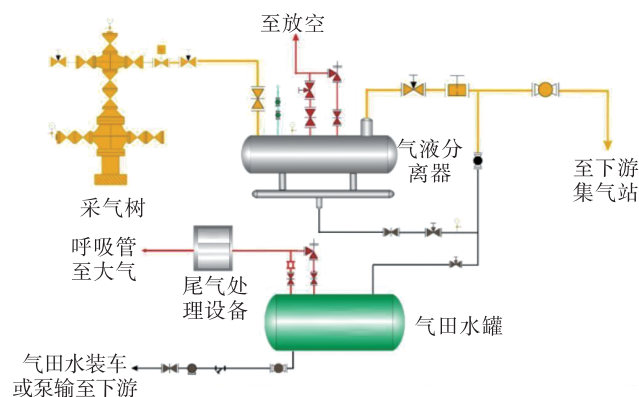


图 1 典型含硫气田水处理系统图

Fig. 1 Typical work process of water treatment system in sour gas field

表 1 典型站场含硫气田水闪蒸气常规组分表

Tab. 1 Conventional components of water flash steam in typical sour gas field

取样点	φ_{H_2S}	φ_{He}	φ_{H_2}	φ_{O_2}	φ_{N_2}	φ_{CO_2}	φ_{CH_4}	φ_{C_2}	φ_{C_3+}
西眉清管站	6.32	0.01	0.06	1.38	7.44	13.37	71.34	0.08	—
西区集气站	9.97	0.01	0.30	—	0.05	20.26	69.34	0.07	—
磨溪 22 井区试采集气站	20.92	—	0.03	—	0.09	36.56	42.37	0.03	—
北 6 集气站	8.72	—	0.02	8.01	36.07	20.32	26.83	0.03	—

从表 1 可以看出,闪蒸气主要组成为 H_2S 、 CO_2 、 CH_4 ,其中西眉清管站和北 6 集气站气田水闪蒸气中检测出 N_2 和 O_2 ,氮氧比接近 4,可知有空气进入。

1.2 爆炸可能来源

爆炸是一种急剧的物理或化学变化过程,是在限制状态下系统潜能突然释放并转化为机械能而对周围介质发生作用的过程。爆炸伴随着巨大的能量释放,表现的破坏形式有多种,冲击波是爆炸最直接、最主要的破

坏力量。如果容器发生爆炸,一部分能量会驱动容器破裂产生的碎片对外界目标形成打击作用,工业中的爆炸事故通常伴随碎片打击伤害^[11]。

可燃性气体爆炸是工业生产领域爆炸灾害的主要形式之一,自 1857 年英国发生城市煤气管道爆炸以来,许多学者就开始了气体爆炸的研究工作^[12]。近年来,各种工业场所可燃性气体火灾爆炸事故已屡见不鲜,严重威胁着天然气储运、石油化工等行业安全生产,给人

民生命财产带来极大危害。

众所周知,密闭空间爆炸的产生必须同时具备三个基本条件,即可燃物质、可燃物质与空气(或 O₂)混合达到爆炸浓度、引起爆炸的引燃能量。从含硫气田水罐的工作过程中可知,含硫气田水罐上部气相空间存在可燃气体(主要为 CH₄ 和 H₂S),若转水结束形成负压可能将环境中的空气倒吸入罐,形成爆炸性混合气体。对于金属罐体和管道,静电火花可能形成点火源,腐蚀产物 FeS 遇到 O₂ 将产生自燃,另外,含硫气田水罐放散管往往紧挨放空火炬,少数井站甚至同时将长明火点燃,若产生回火,将导致含硫气田水罐具备点火条件,存在爆炸的可能。如果通过研究发现含硫气田水罐内闪蒸气爆炸规律,预测整个爆炸过程,则可有效提出减灾防灾措施,最大程度减少由于爆炸所造成的损失。

2 爆炸过程计算方式探索

2.1 气体爆炸原理

可燃物质(可燃气体、蒸气和粉尘)与空气(或 O₂)必须在一定的浓度范围内均匀混合,形成预混气体,遇火源才会发生爆炸,这个浓度范围称为爆炸极限或爆炸浓度极限。可燃性混合物能够发生爆炸的最低浓度和最高浓度,分别称为爆炸下限和爆炸上限^[13](或着火下限和着火上限),爆炸上下限的范围越宽,爆炸的危险性越大^[14]。可燃气体混合物在低于爆炸下限时不爆炸也不着火,高于爆炸上限不爆炸但会着火。这是由于前者的可燃物浓度不够,过量空气的冷却作用,阻止了火焰蔓延;而后者则是空气不足,导致火焰不能蔓延。当可燃物的浓度大致相当于反应当量浓度时,具有最大的爆炸威力(即根据完全燃烧反应方程式计算的浓度比例)。爆炸极限是在常温、常压等标准条件下测定出来的,这一范围随着初始温度、压力、氧含量、惰性介质、点火能、容器材质及尺寸等条件的变化而有所变化^[15-17]。

2.2 含硫气田水罐可能的爆炸极限计算方式

含硫气田水罐中气相空间中主要含 H₂S、CH₄ 和 CO₂,前两者为可燃物质,其在空气中的爆炸极限见表 2^[18]。CO₂ 为惰性气体,可知该体系为含惰性气体的爆炸混合气体。

表 2 含硫气田水罐内可燃气体在空气中的爆炸极限表
Tab. 2 Explosion limits of flammable gases of water tank in sour gas field

气体	空气中的爆炸极限 /(%)	
	下限	上限
CH ₄	5.0	15.0
H ₂ S	4.3	45.5

可燃气体爆炸是工业中最常见的一种爆炸事故形式,根据爆炸气体的组成情况,爆炸一般可划分为两大类:一类是可燃单一气体爆炸,另一类是可燃混合气体爆炸^[19]。从含硫气田水罐闪蒸气的组成来看属于含惰性气体(CO₂)的可燃混合气体爆炸。

判断可燃单一气体的浓度是否处于爆炸极限范围内对照表 1 进行检查即可,若要计算可燃混合气体,尤其是含惰性气体的可燃混合气体爆炸极限,则需要根据理·查特里公式及其修正公式进行推导,由于本体系属于含惰性气体(CO₂)的可燃混合气体,可根据以下步骤计算^[20-21]。

1) 不含惰性气体的可燃气体混合物爆炸极限:

$$L = \frac{100}{\sum \frac{\varphi_i}{L_i}}$$

(1)

式中:L 为不含惰性气体的可燃混合气体爆炸极限(上限或下限),%; φ_i 为单一可燃气体在不含惰性气体燃气中所占的体积含量,%; L_i 为单一可燃气体的爆炸极限(上限或下限),%。

2) 不含 O₂、含惰性气体的可燃气体混合物爆炸极限:

$$L_D = \frac{L \left(1 + \frac{\varphi_D}{100 - \varphi_D} \right) \times 100}{100 + L \left(\frac{\varphi_D}{100 - \varphi_D} \right)} \times 100\%$$

(2)

式中:L_D 为含惰性气体的可燃混合气体爆炸极限(上限或下限),%; φ_D 为惰性气体在混合燃气中所占的体积含量,%。

2.3 爆炸混合物的形成过程模拟

含硫气田水罐工作过程见图 2。转水前由于罐内处于最高液位,罐内微正压,顶部气相空间内全部是可燃气体和惰性气体的混合物。转水时,液位逐渐下降,气相空间突增,罐内压力逐渐下降,空气由放散管进入并与原罐内可燃气体混合,转水结束时液位降至最低,O₂

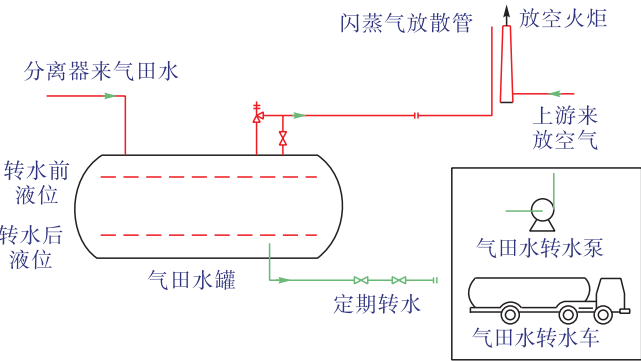


图 2 含硫气田水罐工作过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of working process of water tank in sour gas field

含量最大,当再次有气田水进入罐内,罐内重新闪蒸出可燃气体,罐内的混合气体就会从呼吸管溢出,罐内可燃气体的含量将逐步增加。

因此,可以设定最高液位时的气相空间为初始点,体积 V_1 ,爆炸极限为 $L_{D上}$ 和 $L_{D下}$,液位下降过程中进入的空气量等于转出水量 Q_i ,此时可燃气体体积含量为 φ_i ($\varphi_i = 100V_1 / (V_1 + Q_i)$),判断若 $L_{D下} \leq \varphi_i \leq L_{D上}$,说明

表 3 站场基本情况表

Tab.3 Basic situation of Natural gas station

站场	气田水罐 体积 /m ³	转水最高 液位 /mm	最高液位对 应气量 /m ³	φ_{H_2S} / (%)	φ_{CH_4} / (%)	φ_{CO_2} / (%)	混合气体爆炸 下限 /(%)	混合气体爆炸 上限 /(%)
A 站	56.6	1 800	9.92	16	72.4	11.6	4.49	18.89
B 站	56.6	1 800	9.92	10	70.0	20.0	5.30	19.66
C 站	56.6	1 800	9.92	25	50.0	25.0	4.17	24.20

通过前文建立的计算方法,可绘得 A 站、B 站、C 站转水过程中不同液位下对应闪蒸气含量及与爆炸极限关系,见图 3~5。

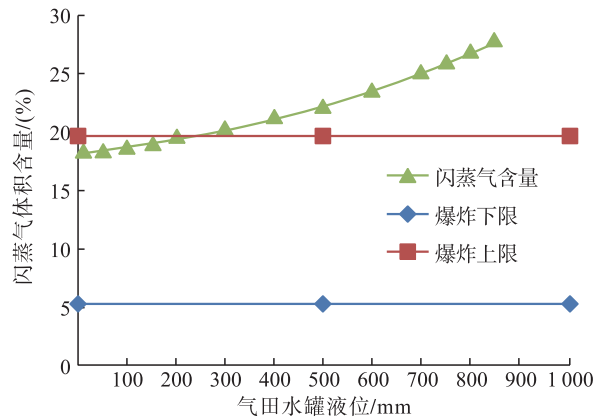


图 3 A 站转水中含硫气田水罐液位和闪蒸气含量关系图
Fig.3 Relationship between water level and flash gas content in transferring of gas field water tank-station A

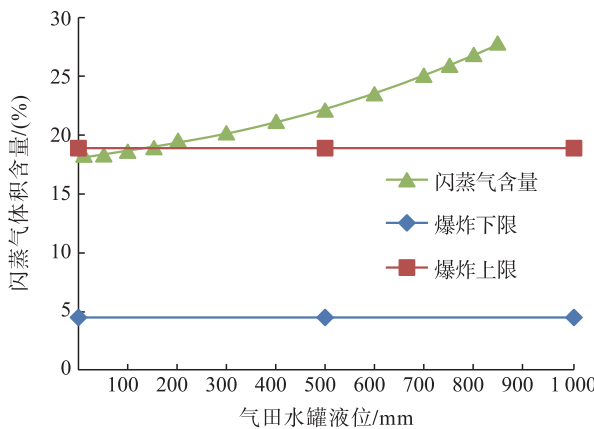


图 4 B 站转水中含硫气田水罐液位和闪蒸气含量关系图
Fig.4 Relationship between water level and flash gas content in transferring of gas field water tank-station B

此工况形成的混合气体具有爆炸风险,否则则没有。

3 案例分析

以三个生产站场 A 站、B 站、C 站为例,污水罐体积均为 56.6 m³,最高转水液位均为 1 800 mm,根据初始气质按式(1)~(2)可以计算其爆炸上限和爆炸下限,站场基本情况见表 3。

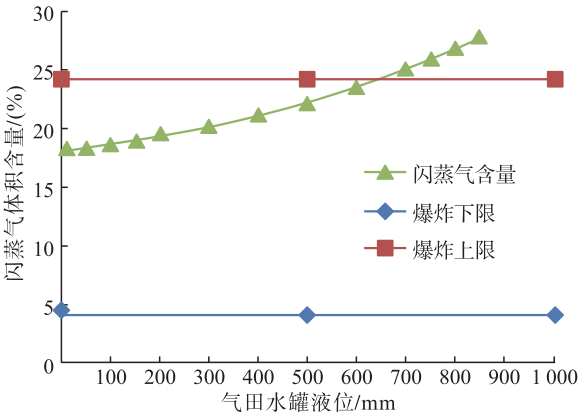


图 5 C 站转水中含硫气田水罐液位和闪蒸气含量关系图
Fig.5 Relationship between water level and flash gas content in transferring of gas field water tank-station C

从图 3~5 可知,A 站转水至 130 mm 以下,B 站转水至 230 mm 以下,C 站转水至 645 mm 以下时,混合气体含量处于爆炸极限范围内。若要避免形成爆炸极限范围的爆炸混合物,应控制转水最低液位在极限液位(达到爆炸极限的最低液位)以上。

目前,大多数新建站场在呼吸管上均设有阻火器,防止火苗从呼吸管回火导致含硫气田水罐发生爆炸,但阻火器若设置不合理或者失效卡堵可能导致紧急放空不畅,亦存在含硫气田水罐超压爆裂的风险,若能结合爆炸极限的计算进行预测,根据预测结果综合考虑阻火器的设置,考虑改变工作模式,转水时采用手动分离器进水的方式,或采用向含硫气田水罐内补气的方式维持污水罐一定的微正压,并控制转水速度,缓慢转水,以阻止空气进入。在没有其他防范措施条件下,应尽量限制转水液位在最低转水液位之上。

以含硫气田水罐容积 20 m³ 为例,含硫气田水罐每次转水 13 m³,剩余缓冲 5 m³ 空间,转水前压力 0.2 MPa,转

水后避免压力 < 0 MPa, 若没有进水补充, 转水结束时, 气相空间为 18 m^3 , 而转水前压力 0.2 MPa , 5 m^3 气相空间最多释放为 15 m^3 常压气体, 剩余 3 m^3 气相空间不能覆盖, 因此可能形成负压, 如果每次转水 10 m^3 , 则不会形成负压。反之同理, 如果需要转水 13 m^3 , 则需要转水前压力达到 0.26 MPa 。

此外, 为了减少 FeS 自燃导致的爆炸事故, 建议优先考虑采用非金属管道和设备, 开罐检修前进行 N_2 吹扫。此外, 为防止静电火花导致爆炸, 需要做好设备的防静电接地。

4 结论

当前工作模式下含硫气田水罐转水过程中可能导致爆炸混合气体形成, 爆炸极限可根据含惰性气体的混合可燃气体进行计算。应明确在液位下降过程中可燃气体浓度是否会在爆炸极限范围内, 为降低爆炸风险, 优先考虑改变工作方式, 维持罐内微正压以防止空气进入, 针对转水存在爆炸风险, 建议在呼吸管上设置阻火器, 做好防静电接地, 采用非金属管道和设备, 在开罐检修前进行 N_2 吹扫等等。

参考文献:

- [1] 马新华. 天然气与能源革命——以川渝地区为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(1): 1-8.
Ma Xinhua. Natural Gas and Energy Revolution: A Case Study of Sichuan-Chongqing Gas Province [J]. Natural Gas Industry, 2017, 37 (1): 1-8.
- [2] 陈永主, 郑会林, 李长伟. 天然气长输管道火灾爆炸危险性分析与应对措施[J]. 石油化工设计, 2015, 32(4): 27-30.
Chen Yongzhu, Zheng Huilin, Li Changwei. Hazard Analysis and Countermeasures Against Fire and Explosion of Long-distance Natural Gas Pipeline [J]. Petrochemical Design, 2015, 32 (4): 27-30.
- [3] 王 玉. 液化天然气槽车火灾爆炸危险性分析[J]. 化工生产与技术, 2015, 22(3): 50-52.
Wang Yu. Risk Analysis on Fire and Explosion Incident of Liquefied Natural Gas (LNG) Tanker Wogons [J]. Chemical Production and Technology, 2015, 22 (3): 50-52.
- [4] 马 砾, 崔祥华, 邓 军. 天然气储罐泄漏扩散的影响因素及危害性[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(1): 15-20.
Ma Li, Cui Xianghua, Deng Jun. The Influence Factors of Natural Gas Tank Leakage and Its Harmfulness [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37 (1): 15-20.
- [5] 纵 孟, 易 俊, 王文和, 等. 含硫天然气净化装置火灾爆炸危险性评价[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(5): 83-85.
Zong Meng, Yi Jun, Wang Wenhe, et al. Risk Evaluation of Fire and Explosion for Purification Device of Sour Natural Gas [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2014, 16 (5): 83-85.
- [6] 肖 芳, 周 波, 刘 静, 等. 高含 H_2S 气田水及闪蒸气处理新技术探讨[J]. 天然气与石油, 2013, 31(5): 94-96.
Xiao Fang, Zhou Bo, Liu Jing, et al. New Technology for Treating High H_2S Produced Water and Flash Gas [J]. Natural Gas and Oil, 2013, 31 (5): 94-96.
- [7] 叶 燕, 向启贵, 刘爱红, 等. 罗家寨高含硫酸性气田水的处理探讨[J]. 石油与天然气化工, 2005, 34(3): 221-222.
Ye Yan, Xiang Qigui, Liu Aihong, et al. Discussing for Treatment of High-acidic Sulphur Gasfield Wastewater in Luojiashai Gasfield [J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2005, 34 (3): 221-222.
- [8] 李 毅. 普光高含硫气田水中 H_2S 去除技术研究[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(4): 11-14.
Li Yi. Study on H_2S Removal Technology of H_2S in Water in Puguang High Sulfur Gasfield [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2012, 22 (4): 11-14.
- [9] 童富良, 张永红. 含硫气田水处置探讨[J]. 天然气与石油, 2008, 26(1): 61-63.
Tong Fuliang, Zhang Yonghong. Studies on Sour Produced Water Treatment [J]. Natural Gas and Oil, 2008, 26 (1): 61-63.
- [10] 戴万能, 高晓根, 计维安, 等. 含硫气田恶臭硫化物性质及阈值研究[J]. 天然气与石油, 2015, 33(6): 83-89.
Dai Wanneng, Gao Xiaogen, Ji Weian, et al. Study on Properties and Threshold Limit Values of Odor Sulfides in Sour Gas Fields [J]. Natural Gas and Oil, 2015, 33 (6): 83-89.
- [11] 王志荣, 蒋军成. 受限空间工业气体爆炸研究进展[J]. 工业安全与环保, 2005, 31(3): 43-46.
Wang Zhirong, Jiang Juncheng. The Research Development on Industrial Gas Explosion in Confined Space [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2005, 31 (3): 43-46.
- [12] 王 华, 邓 军, 王连华, 等. 可燃性气体爆炸研究现状及发展方向[J]. 矿业安全与环保, 2008, 35(3): 79-82.
Wang Hua, Deng Jun, Wang Lianhua, et al. Current Research and Developing Direction of Inflammable Gas Explosion [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2008, 35 (3): 79-82.
- [13] 赵雪娥, 孟亦飞, 刘秀玉. 燃烧与爆炸理论[M]. 北京: 化

学工业出版社,2011.

Zhao Xue'e, Meng Yifei, Liu Xiuyu. Combustion and Explosion Theory [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011.

- [14] 张小良,刘晓晨,刘婷婷,等.可燃气体爆炸极限测试装置现状及探索[J].应用技术学报,2018,18(3):224-227.

Zhang Xiaoliang, Liu Xiaochen, Liu Tingting, et al. The Current Situation and Explore of Combustible Gas Explosion Limit Testing Equipment [J]. Journal of Technology, 2018, 18 (3): 224 - 227.

- [15] 崔少朴,刘宜新,李旭,等.爆炸极限的影响因素及常用防爆措施[J].中国石油和化工标准与质量,2013,33(23):244-246.

Cui Shaopu, Liu Yixin, Li Xu, et al. Influencing Factors of Explosion Limit and Common Explosion-proof Measures [J]. China Petroleum and Chemical Industry Standards and Quality, 2013, 33 (23): 244 - 246.

- [16] 许满贵,徐精彩.工业可燃气体爆炸极限及其计算[J].西安科技大学学报,2005,25(2):139-142.

Xu Mangui, Xu Jingcai. Explosion Limits and Calculated Methods of Combustible Gas [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2005, 25 (2): 139 - 142.

- [17] 李永斌,李松.可燃气体爆炸极限计算的探讨[J].山西科技,2019,34(2):112-113.

Li Yongbin, Li Song. Discussion on Calculation of Explosion Limit of Combustible Gas [J]. Shanxi Science and Technology, 2019, 34 (2): 112 - 113.

- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国住房和城乡建设部.石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计规范:GB 50493-2009[S].北京:中国计划出版社,2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Specification for Design of Combustible Gas and Toxic Gas Detection and Alarm for Petrochemical Industry: GB 50493 - 2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.

- [19] 薛为阳.浅析可燃性气体爆炸及爆炸极限[J].计量与测试技术,2017,44(8):13-14.

Xue Weiyang. Analysis on Explosion and Explosion Limits of Combustible Gases [J]. Metrology & Measurement Technique, 2017, 44 (8): 13 - 14.

- [20] 武丽娜,陈睿谦,徐莹,等.确定混合燃气爆炸极限的重要意义及计算方法[J].化肥设计,2014,52(2):18-21.

Wu Lina, Chen Ruiqian, Xu Ying, et al. Important Meaning and Calculating Method for Determining Explosive Limit of Mixed Combustion Gas [J]. Chemical Fertilizer Design, 2014, 52 (2): 18 - 21.

- [21] 项友谦,严铭卿,周传利,等.混合燃气爆炸极限的确定[J].煤气与热力,1992,12(6):40-45.

Xiang Youqian, Yan Mingqing, Zhou Chuanli, et al. Determination of Explosion Limit of Mixed Gas [J]. Gas & Heat, 1992, 12 (6): 40 - 45.

声 明

本刊已授权相关电子杂志社及其数据库以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。作者版权使用费与稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

(《天然气与石油》编辑部)