

文章编号:1673-9469(2025)02-0067-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.02.009

高压天然气管道泄漏火球危害模拟研究

王莉莉^{1,2}, 高兆基^{1,2}, 马松浩³, 付世博^{1,2}, 胡芳问^{1,2}, 王桦杰^{1,2}

(1. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 黑龙江省寒区新能源热利用及防灾减灾重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 3. 中国石油天然气股份有限公司东北销售分公司, 辽宁 沈阳 110013)

摘要: 基于热剂量准则, 建立了闪燃火球的数学模型, 使用 MATLAB 编程实现了动态闪燃火球热辐射剂量的程序化计算, 研究了泄漏孔径、管道运行压力和环境温度对火球热辐射危害范围的影响, 并由临界热辐射剂量得出了所研究工况下 8 种危害区域的界限范围。结果表明, 火球闪燃临界热辐射危害半径与泄漏孔径、管道介质输送压力近似成线性正相关, 其中泄漏孔径对临界热辐射危害半径的影响最大。

关键词: 天然气管道; 泄漏扩散; 火球火灾; 热剂量准则; 危害半径

中图分类号: TE88

文献标识码: A

Numerical Study on the Hazard of Fireball Caused by Leakage of High-Pressure Natural Gas Pipeline

WANG Lili^{1,2}, GAO Zhaoji^{1,2}, MA Songhao³, FU Shibo^{1,2}, HU Fangwen^{1,2}, WANG Huajie^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Thermal Utilization and Disaster Reduction of New Energy in Cold Regions, Daqing, Heilongjiang 163318, China; 3. Northeast Sales Branch of China National Petroleum Co., Ltd., Shenyang, Liaoning 110013, China)

Abstract: Based on the thermal dose criterion, the mathematical model of flash fireball is established. Using MATLAB programming, the thermal radiation dose of dynamic flash fireball is calculated programmatically. The influences of leakage aperture, pipeline operating pressure and ambient temperature on the thermal radiation hazard range of the fireball are studied, and the boundary range of eight hazard areas under the studied conditions is obtained according to the critical thermal radiation dose. The results show that the critical thermal radiation hazard radius of flash fireball is approximately linearly positively correlated with the leakage aperture and pipeline medium transportation pressure, and the leakage aperture exhibits the greatest influence on the critical thermal radiation hazard radius.

Key words: natural gas pipelines; leakage diffusion; fireball fire; heat dose criteria; hazard radius

管道输送是天然气陆路输运最有效的方式, 高压、大口径、高强度是目前长输管道的发展趋势, 这种情况下天然气长输管道的失效泄漏事故将更加普遍和危险^[1-3]。泄漏天然气和空气的混合气体在一定情况下遇明火可能出现火球闪燃事故, 其热辐射会对周边人员及设备造成巨大危害^[4-6]。

火球闪燃热辐射评价模型主要有静态和动态两种。静态模型基于最不利原则, 方法简单但计算结果偏于保守^[7]; 动态模型分阶段分析火球热

辐射, 更贴合实际情况^[8]。Abbasi 等^[9]通过总结大量的沸腾液体扩展蒸汽云爆炸事故, 首次提出了爆炸火球热伤害的标准; Baker 等^[10]提出了当前石油、化工等领域普遍采用的热辐射通量准则、热辐射剂量准则以及二者的伤害准则; Martinsen 等^[11]以热辐射传热理论为基础, 根据天然气管道泄漏爆炸火球影像呈现的真实过程提出了爆炸火球热辐射的动态模型; 汪侃等^[12-13]对荷兰应用科学研究组织动态模型进行了改进, 将火球燃烧过

收稿日期: 2024-03-21

基金项目: 黑龙江省重点研发计划“揭榜挂帅”科技攻关项目(2023ZXJ06A04)

第一作者: 王莉莉(1975—), 女, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士, 副教授, 从事高压天然气管道泄漏扩散方面的研究。

程分为先期扩大阶段和体积稳定阶段,并给出了持续时间、火球直径、升空高度、热辐射强度的表达式。

本文基于热辐射剂量准则建立高压天然气管道泄漏火球闪燃后果分析模型,参照中俄高压长输天然气管道的实际情况确定模拟工况,运用 MATLAB 编程实现闪燃火球热辐射剂量的动态计算,研究泄漏孔径、管道运行压力和环境温度 3 种因素对火球热辐射危害范围的影响规律。本研究所采用的工况新颖,可以较好地模拟高压、大口径的长输管道的特点,考虑了高纬度寒冷地区环境温度对火球热辐射的影响,实现了热辐射剂量的程序化计算。研究结果有利于进一步提升长输管道的生产和运营管理水平,为火球闪燃事故危害范围的预测和消防救援工作的开展提供参考。

1 瞬态火球热辐射危害数学模型

一般认为火球燃烧的前三分之一时间是火球体积膨胀阶段,之后属于升腾和熄灭阶段。火球闪燃过程的几何参量如图 1 所示,各参量均是关于时间的函数。

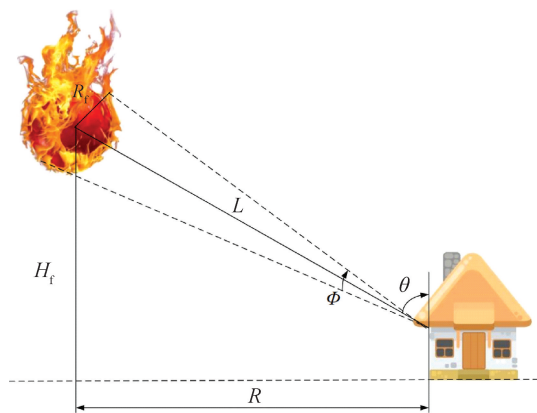


图 1 火球点源模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the fireball point source model

管内气体泄漏流动遵循一维流动准则,气体泄漏率 Q 为

$$Q = C_d A P_1 \sqrt{\frac{kM}{ZRT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \quad (1)$$

式中, C_d 是流量系数; A 是泄漏孔面积, m^2 ; P_1 是管内压力, Pa ; k 是绝热系数,对于天然气取 1.334; M 是气体摩尔质量, $kg/kmol$; Z 是气体压缩因子; R 是理想气体的普氏比例常数,取值为 $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot K)$; T 是天然气温度, K 。

泄漏天然气质量 m 为

$$m = CQt \quad (2)$$

式中, C 是衰减系数,取 0.25; t 是泄漏时间, s 。

火球持续时间 t_1 和参与燃烧的天然气质量 m 有关:

$$t_1 = 0.9m^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

TNO 模型假设火球在初始阶段不断膨胀,其直径在 $1/3t_1$ 时达到极值 $d_{\max}$ 后保持不变, $d_{\max}$ 和参与燃烧气体质量 m 有关。直径 $d(t)$ 为

$$d(t) = \begin{cases} 8.664m^{\frac{1}{4}}t^{\frac{1}{3}}, & 0 \leq t \leq \frac{1}{3}t_1 \\ d_{\max}, & \frac{1}{3}t_1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $d_{\max}$ 是火球最大直径, $d_{\max} = 5.8m^{\frac{1}{3}}$ 。

火球高度 $h(t)$ 为

$$h(t) = \begin{cases} \frac{d(t)}{2}, & 0 \leq t \leq \frac{1}{3}t_1 \\ \frac{3}{2} \frac{d_{\max}}{t_1} t, & \frac{1}{3}t_1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (5)$$

火球表面辐射能 $E(t)$ 为

$$E(t) = \begin{cases} E_{\max}, & 0 \leq t \leq \frac{1}{3}t_1 \\ E_{\max} \left[\frac{3}{2} \left(1 - \frac{t}{t_1} \right) \right], & \frac{1}{3}t_1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{\max} = 0.0133fHm^{\frac{1}{12}} \quad (7)$$

$$f = 0.27P^{0.32} \quad (8)$$

式中, $E_{\max}$ 是火球表面最大辐射能, kW/m^2 ; f 是热辐射系数; P 是大气压力, Pa ; H 是燃烧热, kJ/kg 。

通常火球热辐射影响的目标位置短时间内难以发生改变,因此,计算热辐射强度时要考虑目标接收热能与火球释放总热能之比。添加几何视角系数 $F(x, t)$ 以表征这一参数:

$$F(x, t) = \frac{d^2(t)}{4(h^2(t) + x^2)} \quad (9)$$

式中, x 是目标与火球中心的距离, m 。

大气传输率 $\tau(x, t)$ 为

$$\tau(x, t) = 2.02 \left[\varphi_w \times P_v \left(\sqrt{h^2(t) + x^2} - \frac{d(t)}{2} \right) \right]^{-0.09} \quad (10)$$

式中, φ_w 是相对湿度; P_v 是水汽分压, Pa 。

目标接收的热通量 $I(x, t)$ 是大气传输率 $\tau(x, t)$ 、几何视角系数 $F(x, t)$ 和火球表面辐射能 $E(t)$ 的乘积:

$$I(x, t) = \tau(x, t) F(x, t) E(t) \quad (11)$$

目标接收的热辐射剂量 $I_{\text{does}}(x)$ 是热通量 $I(x, t)$ 对时间 t 的积分,表达式如下:

$$I_{\text{does}}(x) = \int_0^{t_1} I(x, t) dt \tag{12}$$

以上模型通过 MATLAB 实现编程计算,见图 2。

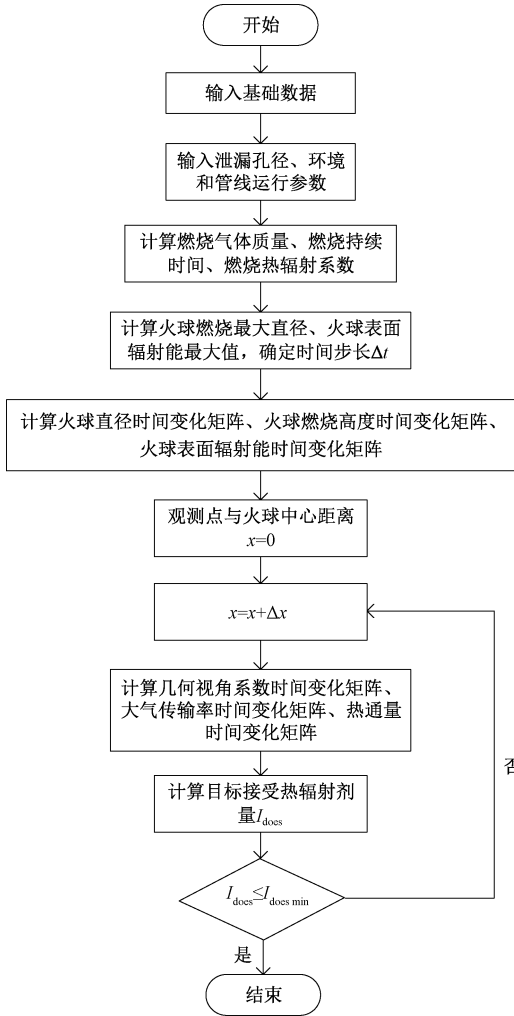


图 2 计算程序

Fig. 2 Calculation procedure

火球闪燃事故持续时间较短,目标接收到的热量来不及散失,因此,采用热辐射剂量准则评价热辐射危害。当目标受到的热辐射剂量超过临界值后,就会受到相应伤害,如表 1 所示。

表 1 瞬态火灾下热辐射剂量准则

Tab.1 Thermal radiation dose criterion under transient fire

临界热辐射剂量 Q /($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	伤害	临界热辐射剂量 Q /($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2}$)	伤害
1 030	点燃木材	375	三度烧伤
592	人员死亡	250	二度烧伤
392	人员重伤	125	一度烧伤
172	人员轻伤	65	疼痛

2 瞬态火球热辐射危害半径预测

使用上节模型对高压天然气管道泄漏火球闪燃事故热辐射危害范围影响因素进行研究,对泄漏孔径、管内压力和大气温度等主要影响因素进行分析。模拟工况参照中俄高压长输天然气管道的实际情况进行设计,管道外径为 1 422 mm,壁厚为 25.7 mm,管材采用 X70 钢,符合当前长输管道高压、大口径、高强度的发展趋势,所取环境温度考虑到了高纬度地区的低温情况,具体参数如表 2 所示。

表 2 高压天然气管道圆孔泄漏模拟工况参数表

Tab.2 Parameters of simulated working conditions of circular hole leakage in high-pressure natural gas pipeline

工况	泄漏孔径 /mm	管内 压力/MPa	环境温度/K
1—7	20, 50, 100, 150, 200, 250, 280	12	283. 15
8—14	150	5, 6, 7, 8, 9, 10, 11	283. 15
15—31	150	12	228. 15, 233. 15, 238. 15, 243. 15, 248. 15, 253. 15, 258. 15, 263. 15, 268. 15, 273. 15, 278. 15, 288. 15, 293. 15, 298. 15, 303. 15, 308. 15, 313. 15

2.1 泄漏孔径影响下热辐射危害半径预测

图 3 显示了泄漏孔径对热辐射危害半径的影响,不同泄漏孔径下的热辐射危害半径如表 3 所示。

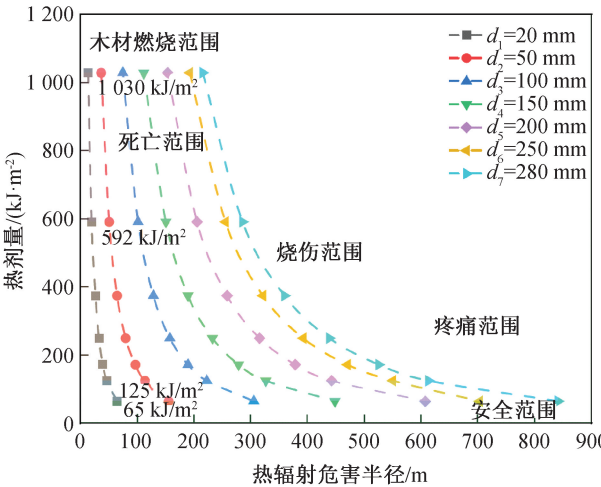


图 3 泄漏孔径对热辐射危害半径的影响

Fig. 3 Influence of leakage aperture on the hazard radius of thermal radiation

表 3 不同泄漏孔径下的热辐射危害半径统计表

(单位:m)

Tab. 3 Statistics of hazard radius of thermal radiation under different leakage aperture diameters (unit:m)

工况	木材燃烧半径	死亡半径	三度烧伤半径	二度烧伤半径	轻伤半径	一度烧伤半径/安全	疼痛半径
1	13	19	26	32	39	46	64
2	36	50	64	79	96	113	155
3	74	101	128	157	189	222	305
4	111	150	189	232	278	326	448
5	153	205	258	315	378	442	607
6	192	255	321	392	470	550	703
7	215	285	359	438	525	613	841

由图 3 可知,高压输气管道圆孔泄漏引发火球火灾时,基于临界热剂量的热辐射危害半径与泄漏孔径近似成线性正相关。这是因为泄漏孔径的大小决定了气体从管道中泄漏的速率,孔径越大,气体泄漏的速率越快,相同时间的泄漏量越大,形成可燃气体云团也越快,从而导致云团迅速扩张,扩大了火球临界热剂量的热辐射危害半径。

2.2 管道运行压力影响下热辐射危害半径预测

图 4 显示了管道运行压力对热辐射危害半径的影响,不同管道运行压力下的热辐射危害半径如表 4 所示。

由图 4 可知,高压输气管道圆孔泄漏引发火球火灾时,热辐射危害半径与管道运行压力近似成线性正相关,但管道运行压力对热辐射危害范围的影响明显小于泄漏孔径的影响。这是因为管道运行压力会影响泄漏速率,更高的压力会推动天然气更快地从管道泄漏孔中流出,进而扩大了火球临界热剂量半径。泄漏孔径直接决定着泄漏速率,而管道运行压力一般维持在相对稳定的范围内,相比泄漏孔径而言,管道运行压力对泄漏速率

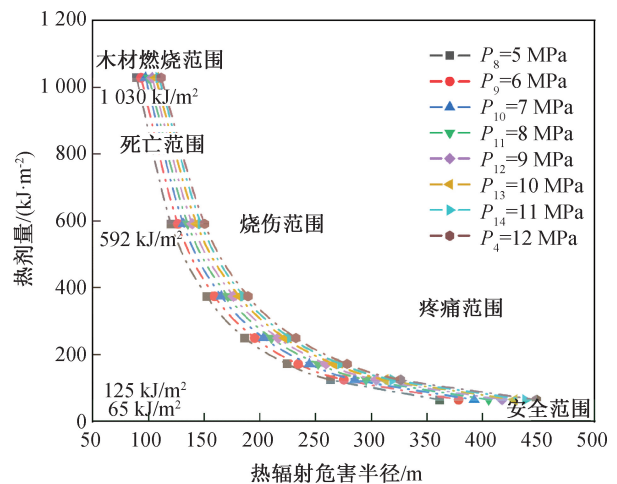


图 4 管道运行压力对热辐射危害半径的影响

Fig. 4 Influence of pipeline operating pressure on the hazard radius of thermal radiation

的影响是间接的,所以泄漏孔径对火球临界热剂量的热辐射危害半径的影响更为显著。

2.3 环境温度影响下热辐射危害半径预测

图 5 显示了环境温度对热辐射危害半径的影响,不同管道运行压力下的热辐射危害半径如表 5 所示。

表 4 不同管道运行压力下的热辐射危害半径统计表

(单位:m)

Tab. 4 Statistics of hazard radius of thermal radiation under different pipeline operating pressures (unit:m)

工况	木材燃烧半径	死亡半径	三度烧伤半径	二度烧伤半径	轻伤半径	一度烧伤半径/安全	疼痛半径
8	89	120	152	186	224	263	361
9	93	126	159	195	234	275	378
10	97	131	165	203	244	285	392
11	100	135	171	210	252	295	405
12	103	139	176	216	259	304	417
13	106	143	181	222	266	312	428
14	109	147	185	227	272	319	438
4	111	150	189	232	278	326	448

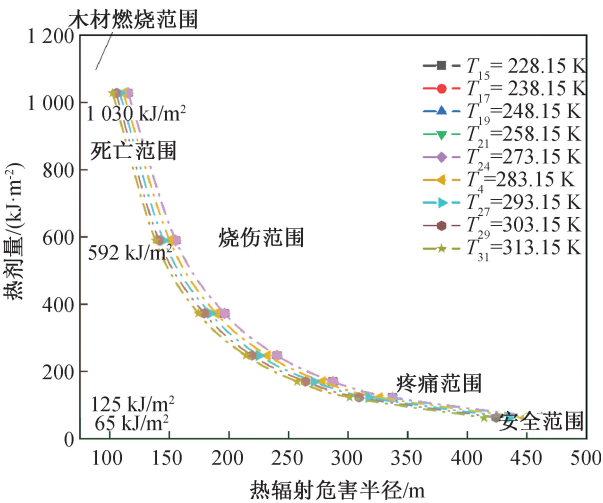


图 5 环境温度对热辐射危害半径的影响

Fig. 5 Influence of ambient temperature on the hazard radius of thermal radiation

由图 5 可知,高压输气管道圆孔泄漏引发火球火灾时,随着环境温度升高,热辐射危害半径在 0℃ 以下变化不大,在 0℃ 以上随温度增加而降低。这是因为当环境温度降低至 0℃ 以下时,作

为主要影响因素的环境空气水汽分压不再发生变化,从而不再对危害半径产生影响。

图 6 显示了三种影响因素下的最大危害半径。从图中可以看出,泄漏孔径对危害半径的影响最为显著,管道运行压力和环境温度对危害半径的影响较小。相应工况下高压天然气管道发生圆孔泄漏存在火球火灾风险时,附近 613 m 外为安全区域,可作为人员疏散标准;相似管段的建设选址最好远离林木区 215 m 以上,否则发生天然气泄漏引起火灾的风险将增大。

3 结论

本文对高压天然气管道圆孔泄漏后可能产生的火球闪燃的热辐射危害进行了研究,基于热剂量准则建立了高压天然气管道泄漏火球闪燃后果分析模型,得出了相应工况的热辐射危害范围预测结果。主要结论如下:

1) 高压输气管道圆孔泄漏引发火球火灾时,临界热剂量半径与泄漏孔径、运行压力近似呈线

表 5 不同环境温度下的热辐射危害半径统计表 (单位:m)

Tab. 5 Statistics of hazard radius of thermal radiation under different ambient temperatures (unit:m)

工况	木材燃烧半径	死亡半径	三度烧伤半径	二度烧伤半径	轻伤半径	一度烧伤半径/安全	疼痛半径
15	115	155	196	240	287	337	462
17	115	155	196	240	287	337	462
19	115	155	196	240	287	337	462
21	115	155	196	240	287	337	462
24	115	155	196	240	287	337	462
4	111	150	189	232	278	326	448
27	108	145	184	225	271	317	435
29	105	141	179	219	264	309	424
31	102	138	174	214	257	301	414

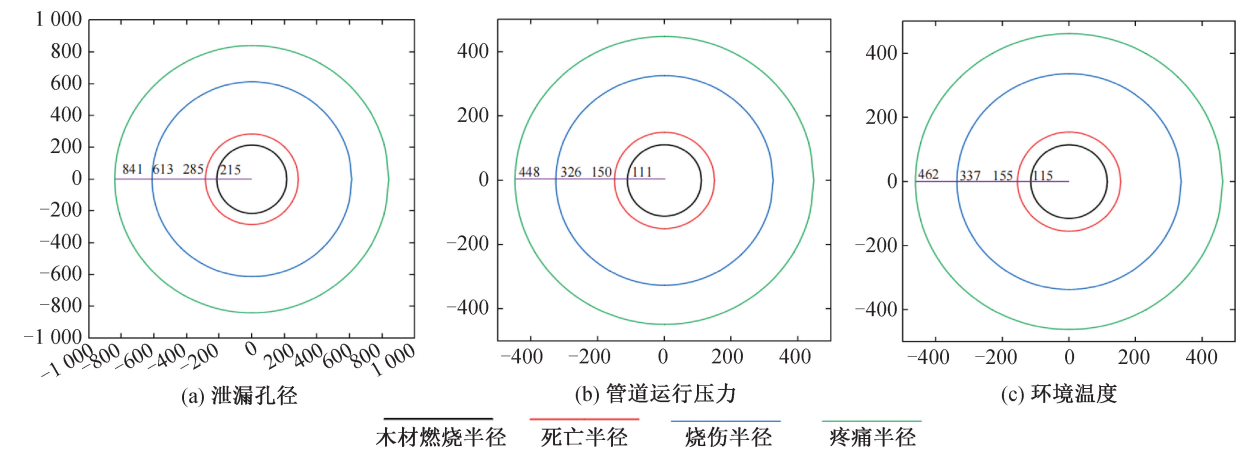


图 6 三种影响因素对应的危害半径示意图(单位:m)

Fig. 6 Schematic diagrams of hazard radius corresponding to three influencing factors(unit:m)

性正相关。

2)环境温度对热辐射危害的影响相对较小,临界热剂量半径在 0℃以上随温度增加而降低。

3)相较于管道运行压力和环境温度,泄漏孔径对临界热剂量半径的影响最显著,因此,在评估和控制火球危害时,需要着重考虑泄漏孔径的影响,采取相应的修复和预防措施。

参考文献:

- [1] 罗艾民,李万春,吴宗之,等. 扁平圆环局限空间蒸气云爆炸数值模拟及其在事故调查中的应用[J]. 中国安全科学学报,2008,18(1):95-99.
- [2] 骆洪森,王为民,张月,等. 高压天然气管道泄漏爆炸后危害分析[J]. 当代化工,2014,43(7):1330-1332.
- [3] 付小方,孙文栋,方江敏. 高压天然气管道危险区域分析[J]. 油气储运,2010,29(2):127-129.
- [4] BARIHA N, OJHA D K, SRIVASTAVA V C, et al. Fire and risk analysis during loading and unloading operation in liquefied petroleum gas (LPG) bottling plant[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023,81:104928.
- [5] 石军花,朱梅,李进,等. 化工园区储罐火灾热辐射模型仿真研究[J]. 中国安全科学学报,2022,32(S1):79-83.
- [6] 王怀远,丁彦铭,陈文露,等. 环境风作用下航空煤油池火上风区热辐射研究[J]. 中国安全科学学报,2022,32(10):142-147.
- [7] TNO. LPG integral report No. 1112[R]. The Hague: TNO,1983.
- [8] MARTINSEN W E, MARS J D. An improved model for the prediction of radiant heat from fireballs[C]//1999 International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials. San Francisco, California:CCPS,1999:605-621.
- [9] ABBASI T, ABBASI S A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management[J]. Journal of Hazardous Materials,2007,141(3):489-519.
- [10] BAKER W E, COX P A, KULESZ J J, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Elsevier,2012.
- [11] MARTINSEN W E, MARX J D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireball[C]//Proceedings of CCPS International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, San Francisco, California, September 28-October 1,1999:605-621.
- [12] WANG K, HE Y, LIU Z, et al. Experimental study on optimization models for evaluation of fireball characteristics and thermal hazards induced by LNG vapor cloud explosions based on colorimetric thermometry[J]. Journal of Hazardous Materials,2019,366:282-292.
- [13] 汪侃. 大开放空间高压天然气管道泄漏爆炸火球热毁伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学,2016.

(责任编辑 王利君)