

中文引用格式:王继贇,王子超,宗若雯,等. 柴油罐车泄漏火灾危害特性与突变时刻研究[J]. 中国安全科学学报, 2026, 36(3): 194–202.

英文引用格式:WANG Jiyun, WANG Zichao, ZONG Ruowen, et al. Study on hazard characteristics and onset time of hazard escalation of leakage fires in diesel road tankers [J]. China Safety Science Journal, 2026, 36(3): 194–202.

柴油罐车泄漏火灾危害特性与突变时刻研究^{*}

王继贇^{1,2,3} 助理研究员, 王子超^{1,2,3}, 宗若雯⁴ 副教授, 刘晔亚^{**1,2,3} 研究员

(1 应急管理部天津消防研究所, 天津 300381; 2 工业与公共建筑火灾防控技术应急管理部重点实验室, 天津 300381; 3 天津市消防安全技术重点实验室, 天津 300381; 4 中国科学技术大学火灾安全全国重点实验室, 安徽 合肥 230026)

中图分类号: X932

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2026.03.1528

基金项目: 应急管理部天津消防研究所青年科技人才创新基金资助(2024SJCXJJ02); 天津市科技计划项目(21JCZDJC00810)。

【摘要】 为防治柴油罐车泄漏燃烧耦合条件下的火灾危害, 首先, 采用容积 5 L 的油罐填充 1.65 L 的 0 号柴油开展小尺度试验, 柴油从油罐底部泄漏并燃烧, 分析柴油温度、油罐压力、热辐射强度和火焰形态演化特性; 然后, 对油罐受热过程开展数值模拟。结果表明: 一旦泄漏柴油温度达到 227.8 °C, 柴油泄漏至外部环境便会沸腾燃烧, 导致火灾危害突变, 即油罐压力骤增、池火热辐射强度和火焰尺寸突然变大; 突变时刻随填充率增加而呈现指数式增长, 填充率由 33% 增加至 80%, 不同热边界条件下的突变时刻平均扩大 2.32 倍; 火焰偏移油罐降低油罐受热功率, 导致柴油温升速率降低和突变时刻增加, 且突变时刻的增长率随着火焰偏移程度的增加而增加; 突变时刻的增加将提供更多的可用安全疏散时间 (ASET), 因此, ASET 随着填充率和火焰偏移程度的增加而增加。

【关键词】 柴油罐车; 泄漏火灾; 数值模拟; 火灾危害突变; 柴油温度

Study on hazard characteristics and onset time of hazard escalation of leakage fires in diesel road tankers

WANG Jiyun^{1,2,3}, WANG Zichao^{1,2,3}, ZONG Ruowen⁴, LIU Xuanya^{1,2,3}

(1 Tianjin Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Tianjin 300381, China; 2 Key Laboratory of Fire Protection Technology for Industry and Public Building, Ministry of Emergency Management, Tianjin 300381, China; 3 Tianjin Key Laboratory of Fire Safety Technology, Tianjin 300381, China; 4 State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026, China)

Abstract: In order to prevent and control the fire hazard of a road tanker coupling with diesel leaking and burning, small-scale experiments were first conducted using a 5 L tank filled with 1.65 L of 0# diesel fuel. The diesel was released from the tank bottom and burned, and the temporal evolution of the fuel temperature, tank pressure, thermal radiation, and flame morphology was investigated. Subsequently, numerical simulations of tank thermal exposure were conducted. The results show that once the temperature

* 文章编号: 1003-3033(2026)03-0194-09; 收稿日期: 2025-09-01; 修稿日期: 2025-12-13

** 通信作者: 刘晔亚(1976—), 男, 河南平顶山人, 博士, 研究员, 主要从事石油化工火灾与爆炸防治技术及数值模拟技术方面的研究。
E-mail: liuxuanya@tfri.com.cn.

of leaking diesel reaches $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, the diesel fuel leaking to the external environment will boil and burn. This leads to a sudden escalation of fire hazard, i. e., a sudden increase in the tank pressure, the thermal radiation and flame size. The onset time of hazard escalation increases exponentially with filling level. When the filling level rises from 33% to 80%, the onset time increases by an average factor of 2.32 across different thermal boundary conditions. Flame offset relative to the tank reduces the thermal load on the tank, thereby lowering the diesel temperature-rise rate and increasing the onset time. Moreover, the rising rate of the onset time grows with the flame offset degree. The increase in the onset time provides more available safe egress time (ASET). Thus, ASET increases as both the filling level and the flame offset degree increase.

Keywords: diesel road tanker; leakage fires; numerical simulation; sudden fire hazard escalation; diesel temperature

0 引言

我国具有庞大的液体燃料储存和运输规模,其中,油罐发挥着重要的载体作用。然而,由于设备失效、人员误操作、安全管理薄弱,油罐会破损形成泄漏孔,泄漏燃油遇点火源将形成池火并持续加热油罐,导致油罐超压失效爆炸,酿成严重事故^[1-2]。2018年6月28日,在安徽S102线阜阳市境内,一辆重型半挂牵引车追尾一辆油罐车后,致使油罐车异辛烷泄漏爆燃,造成8人死亡^[3];2022年,四川成都绕城高速外侧,运输柴油的重型牵引油罐车与重型仓栅式货车碰撞,柴油罐车泄漏并发生燃烧,造成1人死亡^[4]。因此亟需开展各类油罐车的泄漏火灾危害特性研究。

诸多学者针对于火灾作用下初始完好无损状态下的燃料储运容器热响应特性开展了研究,如BIRK等^[5]针对液化石油气储罐火灾,通过试验观测到沸腾液体扩展蒸气爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE),并指出储罐内部液体温度自上而下降低的分层现象削弱了BLEVE的爆炸威力;WANG Mingyan等^[6]采用气体池火加热柴油油箱,并通过ANSYS Fluent模拟软件准确预测柴油油箱内的温度和压力响应;刘健等^[7]开展明火炙烤柴油油箱试验,得出普通柴油、防火柴油和阻燃抑爆柴油对油箱爆炸特性的影响。针对油罐初始泄漏燃烧耦合状态下的演化特性,朱渊等^[8]建立了液化天然气储罐泄漏着火过程中的压力、泄漏速率预测模型,并根据超压失效准则预测了不同填充率对应的最大安全泄漏孔径;项莉等^[9]采用Matlab软件,迭代求解出储罐泄漏-燃烧耦合过程中的模型,包括泄漏速率计算、热流反馈和传热模型,预测了液化天然气储罐内部温度和压力响应过程;WANG Jiyun

等^[10-12]以正庚烷和汽油为填充燃料,开展了小尺度油罐泄漏火灾试验,发现泄漏燃油沸腾燃烧时油罐外部火焰、热辐射强度和内部压力骤增,导致火灾危害突变。在实际油罐泄漏火灾事故中,油罐很可能在火灾危害突变后爆炸,且骤增的火焰将会引燃周围可燃物,进一步扩大事故后果。然而,前期研究未能考虑常见液体燃料——柴油。柴油不同于正庚烷和汽油:一方面,柴油中的高沸点组分远远多于前者,从而柴油沸程远大于前者;另一方面,柴油的闪点远高于正庚烷和汽油。

鉴于此,笔者将以0号柴油开展试验,分析柴油罐泄漏火灾行为特性,确定柴油罐火灾危害突变温度,并采用数值模拟软件求解不同边界条件下的突变温度和突变时刻,以期对柴油罐车泄漏火灾事故应急处置和监测预警提供数据支撑。

1 柴油罐泄漏火灾危害特性

1.1 小尺度柴油罐泄漏火灾试验设计

参考柴油罐车实际运输过程中因交通事故引发的柴油泄漏燃烧火灾事故,设计小尺度柴油罐泄漏火灾试验平台,如图1所示。油罐长300 mm,外径为159 mm,罐壁厚4 mm,容积为5 L,油罐底部具有一个较大的洞,此洞被螺纹化处理,并被中心穿孔的螺栓填充,螺栓中心的小孔用以形成泄漏孔,直径为2.0 mm。边长0.5 m的方形油盘置于油罐下方用以形成柴油池火。

油罐内初始为一个大气压,从顶部注入0号柴油1.65 L(初始填充率 $F=33\%$)后并用螺栓将注油口封堵,然后拔掉封堵底部泄漏孔的细螺钉,使得柴油从油罐底部竖直向下泄漏,随后在泄漏液体与油盘的交界处被点燃(油盘内最初放置0.03 L正庚烷用以引燃柴油),形成柴油罐泄漏火灾。热电偶T1

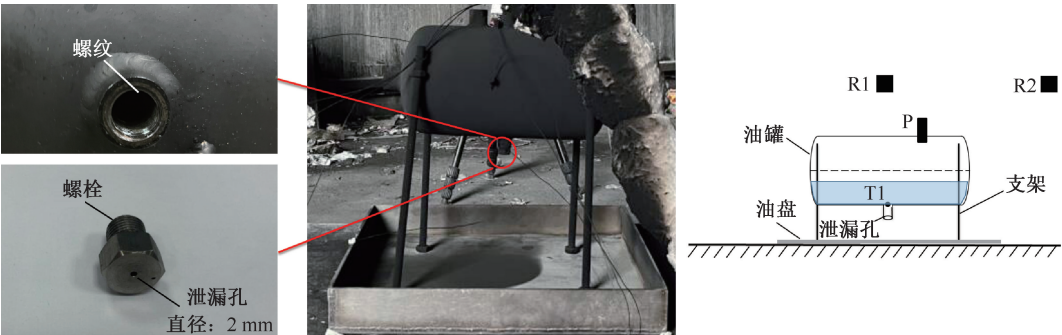


图1 柴油罐泄漏火灾试验平台

Fig. 1 Experimental setup of leakage fire of diesel tank

位于泄漏孔正上方,靠近内壁但未附着在内壁上(距内壁 1 mm),用以测量泄漏液体的温度。2 个辐射热流计(R1 和 R2)距离地面 0.7 m,并位于以油罐中心为圆心、半径为 1.25 m 的圆周上,用以监测目标接收的辐射热通量。在罐体顶部中心偏右位置安装 0~1 MPa 的压力传感器 P,监测罐内表压(相对压力)。试验开展 3 次,以保证试验结果的重复性和试验结论的可靠性。

1.2 火灾现象分析

正庚烷罐泄漏火灾试验结果^[10-12]表明:一旦泄漏正庚烷液体温度达到其沸点(98.6℃),火灾危害突变并进入沸腾燃烧阶段,具体表现为以下特征:①热辐射强度突然变大;②压力突然迅速增加;③外部火焰尺寸突然变大。

柴油作为宽沸程液体,无固定沸点,但在柴油罐泄漏火灾试验中,上述 3 个特征也在某一时刻后出现,因此,定义这个时刻的泄漏液体温度为柴油突变温度。根据上述 3 个特征反推柴油的突变温度,在反推过程中,以热辐射强度突然变大特征为主,其他 2 个特征为辅。

第 1 组试验参数变化如图 2a 所示,热辐射强度在时间 $t=391\text{ s}$ 时突然增加;图 2b 中,压力在 $t=391\text{ s}$ 后也进入快速增加阶段。因此,暂定 $t=391\text{ s}$ 为柴油罐沸腾燃烧阶段的初始时刻。进一步,图 3 分别给出 $t=391\text{ s}$ 前后的火焰变化:外部火焰尺寸突然变宽变高,并且火焰扩展不受 0.5 m 的油盘限制,火焰完全将油罐吞没。综上所述,认定 $t=391\text{ s}$ 为沸腾燃烧阶段的初始时刻,此时泄漏柴油温度为 227.8℃,即为突变温度。

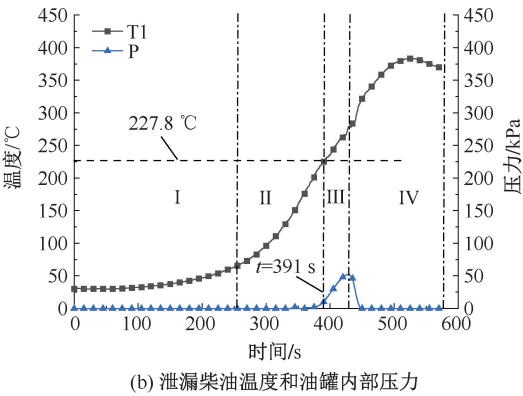
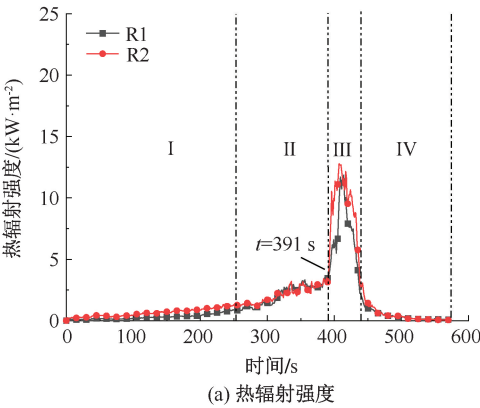


图2 第1组试验的参数变化

Fig. 2 Parameters distribution of No. 1 test

对于第 2、3 组试验,柴油罐火灾突变现象仍然出现,3 组试验的突变时刻和突变温度见表 1。

由于柴油主要由 C10—C20 的烷烃、环烷烃和芳香烃等组成,并且这些组分比例并非定值,而是在一定范围内,所以 3 组试验油罐内的柴油成分存在微弱差异,导致突变时刻和突变温度产生差异,考

表1 3组试验结果

Table 1 Experimental results of three tests		
试验序号	突变时刻/s	突变温度/℃
第 1 组	391	227.8
第 2 组	398	230.4
第 3 组	395	229.2

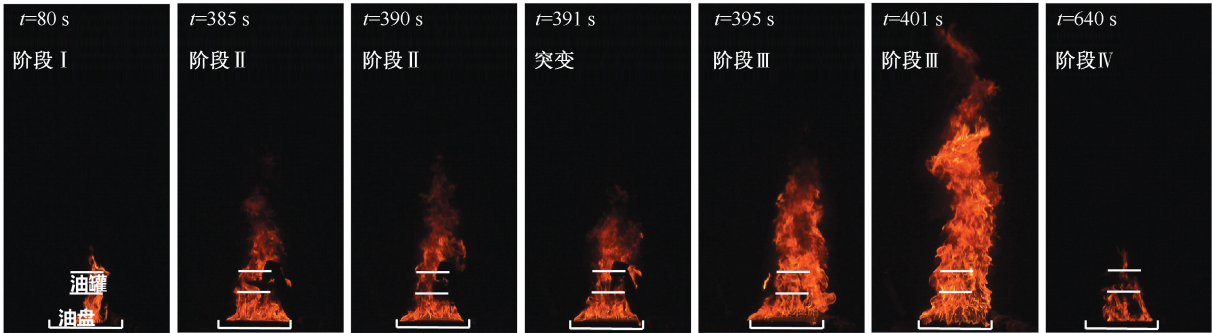


图 3 第 1 组试验不同阶段的火焰

Fig. 3 Flame in different stages of No. 1 test

考虑温度波动范围较小,仅为 2.6 ℃,因此,试验具有较高的可重复性。在实际柴油罐泄漏火灾过程中,需要保守评估,采用较低的突变温度,保证预测的突变时刻提前,因此,0 号柴油的突变温度取 227.8 ℃。

0 号柴油的沸程为 180~370 ℃,其突变温度也远高于正庚烷突变温度(98.6 ℃)。随着泄漏柴油温度升高至 227.8 ℃,柴油中的低沸点组分(如 C10—C12 烷烃和部分芳香烃)开始大量汽化并参与燃烧,显著提升燃烧速率与火焰强度,进一步加剧泄漏柴油温度上升,柴油中沸点较高的重组分(如 C16—C20 烷烃和环烷烃)也迅速汽化并参与燃烧,逐步推动整个柴油发生沸腾燃烧。因此,柴油沸腾燃烧是一个快速的渐进过程,特定比例轻组分的集中汽化与沸腾燃烧为火焰急剧强化提供足够能量,最终触发 0 号柴油所有组分的沸腾燃烧。0 号柴油的突变温度取决于其组分的物理性质,不受油罐尺度的影响,小尺度 0 号柴油罐泄漏燃烧过程中火灾突变行为和突变温度在全尺度柴油罐车的泄漏火灾中仍然存在。

因此,可类比正庚烷罐,将柴油罐泄漏火灾划分为 4 阶段:

1) 阶段 I。柴油从油罐底部泄漏而出,流入油盘并被点燃,且泄漏的柴油在油盘内扩散并燃烧,表现为火蔓延。

2) 阶段 II。泄漏柴油蔓延至整个油盘,稳定燃烧,火焰持续加热油罐,泄漏柴油温度因而持续增加,这也导致柴油燃烧速率和火焰尺寸也在持续增加,从而对外热辐射强度持续增加。

3) 阶段 III。泄漏柴油温度已达到突变温度 227.8 ℃,油罐内柴油泄漏至外部环境便沸腾燃烧,燃烧噪声强度增加,火焰变得极其紊乱,且火焰完全吞没油罐,猛烈加热油罐,造成油罐内压力骤增。

4) 阶段 IV。油罐内液态柴油全部泄漏完毕,高温可燃蒸气从油罐底部泄漏孔喷射而出,形成射流火,压力持续下降最终为 0,射流火尺寸逐渐减小并消失。此后,若油盘内存在残留的液态柴油,这些柴油将继续燃烧,油盘内再次形成池火状态,直至火焰消失。

2 基于数值模拟的火灾危害突变时刻计算

一旦泄漏柴油温度达到 227.8 ℃,火灾危害便会突变。因此,若能准确计算油罐内柴油温度响应过程,则可通过泄漏柴油达到 227.8 ℃的时刻以确定突变时刻。一方面,油罐内柴油主要通过罐壁获取热量以提升温度;另一方面,柴油持续泄漏会带走热量并降低内部柴油体积,而柴油体积的降低又提升了液体温升速率,因此油罐内柴油的温度响应较为复杂,而计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)数值模拟能够通过求解传热、湍流和多相流方程等以此计算油罐内液体温度响应^[13-18],因此,采用 CFD 方法计算第 1 组试验阶段 III 前油罐内柴油温度响应。

2.1 数值模拟参数设置

采用 ANSYS Fluent 软件建立同尺寸油罐 CFD 网格模型如图 4a 所示,加密底部泄漏孔区域,网格总数为 329 474,网格独立性检验见文献[11-12]。多相流模型选用流体体积模型,湍流模型选用 SST $k-\omega$ 模型,湍流动能 K 和湍流比耗散率 ω 初始值分别设置为 $10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 10^{-3} s^{-1} ,该模型及参数设定在前人油罐热响应数值模拟中得到广泛应用^[6,10-13,15-18]。罐壁边界条件为壁面,泄漏孔边界条件为压力出口。文献[11,13]研究结果表明:当火焰在油罐外壁间歇分布时,罐壁可分为吞没区

(火焰概率 ≥ 0.5)和过渡区。吞没区和过渡区的相对位置如图 4a 所示, W_H 为吞没区的高度, W_F 为过渡区弧长的一半, I_b 为过渡区下边缘热通量。

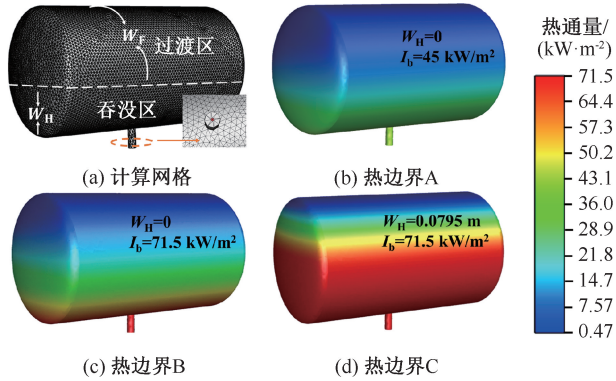


图 4 计算网格与热边界条件

Fig. 4 Computational grid and thermal boundary conditions

吞没区的火焰持续接触油罐外壁,其热通量 I_f 采用下式确定^[11,13]:

$$I_f = \varepsilon_1 \sigma T_f^4 \quad (1)$$

式中: ε_1 为火焰发射率, 为 $0.56^{[17]}$; σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 取 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_f 为油池火火焰温度, 取 $1\,223.15 \text{ K}^{[17]}$ 。因此, $I_f = 71.5 \text{ kW/m}^2$ 。

过渡区的火焰间歇出现在油罐外壁,其热通量 I_t 采用下式确定^[11,13,16]:

$$I_t = I_a + (I_b - I_a) \exp(-b \cdot W^2) \quad (2)$$

$$b = \frac{-\ln 0.01}{W_F^2} \quad (3)$$

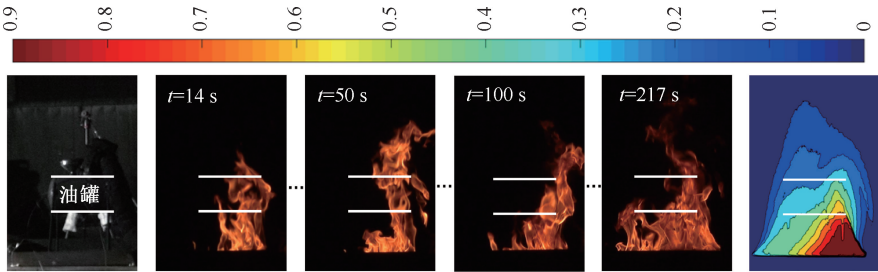


图 5 第 1 组试验火灾危害突变前的火焰概率分布

Fig. 5 Flame probability distribution before a sudden increase in fire hazard of No. 1 test

将 I_b 由 71.5 kW/m^2 依次下调,进行多次数值模拟,直到泄漏液体温度模拟值与试验值基本吻合,最终发现 I_b 位于 $40 \sim 50 \text{ kW/m}^2$ 区间,考虑 $I_b = 40$ 、 45 、 50 kW/m^2 ,第 1 组试验值与模拟值对比如图 6 所示,当 $I_b = 45 \text{ kW/m}^2$ 时,温度模拟值与试验值较为吻合,CFD 计算的突变时刻为 400 s ,相比试验值 391 s ,误差仅为 $+2.3\%$ 。该方法可用于全尺寸柴油

$$W_F = r_1 \cdot \arccos\left(\frac{W_H - r_1}{r_1}\right) \quad (4)$$

式中: W 为罐壁某一位置距过渡区下边缘的距离, $0 \leq W \leq W_F$, m ; b 为中间变量(以保证 $W = W_F$ 时,式(2)中的指数项为 0.01), m^{-2} ; I_b 为过渡区下边缘热通量, $I_b \leq I_f$; I_a 为过渡区上边缘热通量,取 0.47 kW/m^2 ; W_F 为过渡区弧长的一半, m , W_F 取决于 W_H ; W_H 为罐壁吞没区高度, $0 \leq W_H \leq 0.159 \text{ m}$, m ; r_1 为试验油罐外径的一半,取 0.0795 m 。

将式(1)—式(4)编写为用户自定义函数输入至 ANSYS Fluent,可实现火焰在油罐外壁的间歇分布,即油罐外壁热通量自下往上依次非线性降低。油罐外壁中心底部火焰概率 <0.5 ,则定义外壁不存在吞没区且只存在过渡区(图 4b), $I_b < I_f$,此时 I_b 取决于罐壁火焰概率数值分布;油罐外壁中心底部火焰概率 $\geq 0.5^{[11-12]}$,即火焰恰好持续接触油罐底部(图 4c)或油罐外壁存在吞没区(图 4d),此时 $I_b = I_f = 71.5 \text{ kW/m}^2$ 。因此,自热边界 A 至热边界 C,火焰接触油罐程度(或火焰加热油罐功率)在增加。

2.2 试验与数值模拟结果

火灾危害突变前,第 1 组试验阶段Ⅲ前的火焰概率如图 5 所示,在油罐外壁:仅右下角区域火焰概率超过 0.5 ,该区域占整个油罐表面约 10% ,其他区域火焰概率均 <0.5 ,表明较少火焰持续接触油罐外壁,火焰基本是断断续续出现在油罐外壁,可将油罐外壁完全等效为过渡区(基于图 4b 中的热边界条件 A),即油罐外壁不存在吞没区。此时, $I_b < I_f$ 。

罐数值模拟,通过计算泄漏柴油温度响应曲线及达到 $227.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 的时刻,从而给出不同条件下的实际柴油罐火灾危害突变时刻。

2.3 填充率对突变时刻的影响

随着油罐初始填充率(简称填充率)增加,阶段Ⅲ持续时间增加,从而提升了油罐压力峰值^[11]。但

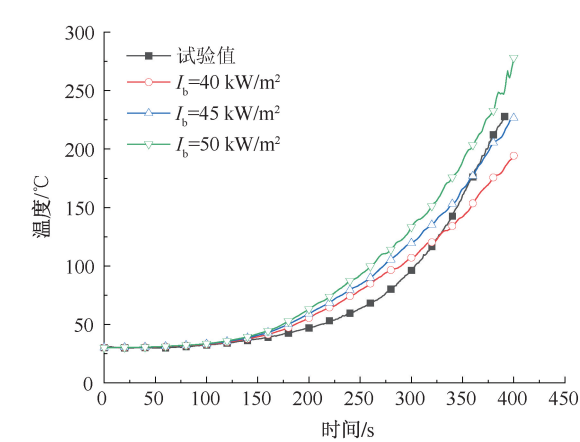


图 6 第 1 组试验值与模拟值对比

Fig. 6 Comparison between measured and predicted temperatures of No. 1 test

考虑试验安全性,未能开展更多填充率的柴油罐泄漏火灾试验,而借助 CFD 模拟可明确填充率对泄漏柴油温度和突变时刻的影响,不同填充率下的泄漏液体温度和突变时刻如图 7 所示。从图 7a—图 7c 看出,无论填充率如何变化,泄漏液体温度总是先平缓增加(几乎保持恒定)而后指数式增加,但平缓的持续时间随着填充率的增加而增加。火灾初期,火焰热量主要用于加热罐壁,因此油罐内部液体温度

基本不变;随着时间推移,内壁热边界层稳定形成,对流换热增强,从而液体温度迅速上升。填充率的增加意味着油罐内部液体含量增加,从而液体与内壁接触面积和液体总热容增大,强化了火灾初期液体对内壁的冷却效应,削弱了罐壁升温,导致内壁热边界层稳定形成时间推迟,导致温度平缓阶段的持续时间增加。由图 7d 表明:随着填充率增加,油罐内柴油含量增加,火灾危害突变时刻在延迟,原因如下:①油罐内柴油含量的增加会导致油罐总热容增加,在相同加热条件下,柴油升温更慢;②柴油升温速率降低,则进一步延长泄漏柴油达到 227.8 °C 的时刻,从而导致火灾危害突变时刻延迟。图 7d 表明:填充率由 33% 增加至 80%,热边界 A、B 和 C 对应的突变时刻分别扩大 2.38、2.34 和 2.24 倍,平均扩大 2.32 倍;同时,曲线的斜率随着填充率的增加而增加,并且在较小输入热量时(热边界 A:火焰较少接触油罐),这种斜率增加趋势更加显著。在实际油罐车火灾发生后,人员若能在火灾危害突变前远离油罐车,则可安全疏散。因此,填充率的增加能够为人员留下更多的可用安全疏散时间(Available Safe Egress Time,ASET),且从图 7d 看出,这种收益随着填充率的增加和火焰接触油罐程度的下降而更加显著。

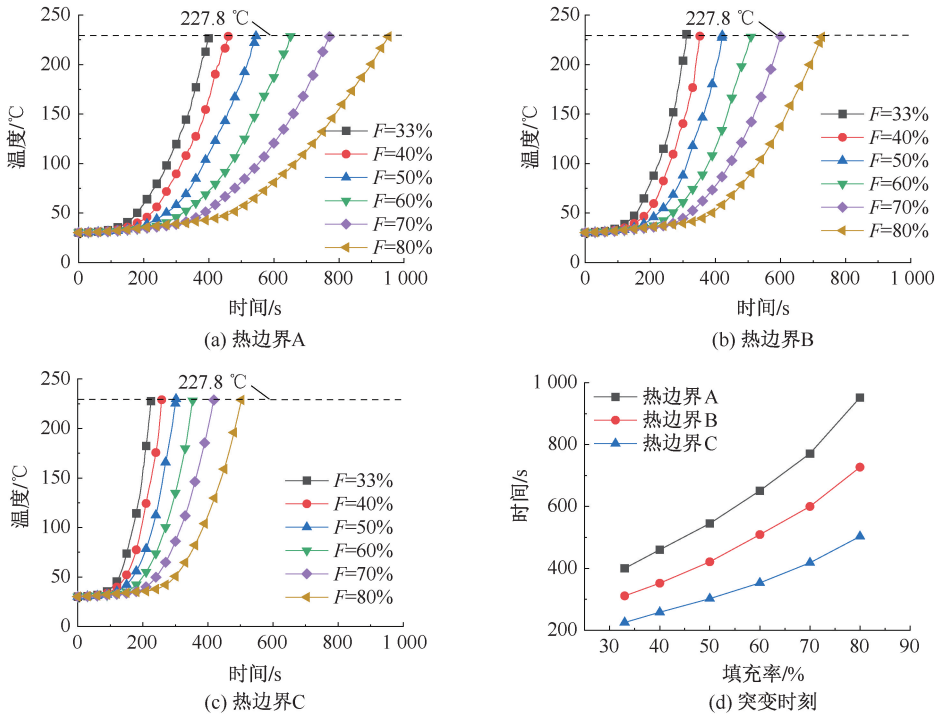


图 7 不同填充率下的泄漏液体温度和突变时刻

Fig. 7 Leakage liquid temperature and onset time of hazard escalation at different filling levels

2.4 火焰偏移对突变时刻的影响

在实际火灾中,受环境风或受限空间燃烧的影响,会导致火焰在油罐表面偏移,致使油罐外壁有一部分区域完全没有火焰存在。这里考虑火焰偏移油罐程度 k 对火灾突变时刻的影响。显然,图 4 中的火焰无偏移,即 $k=0$ 。当 $k=2/3$ 和 $1/3$,基于热边界 A、B 和 C,火焰不存在区域设置输入热通量为 $I_a = 0.47 \text{ kW/m}^2$,火焰存在区域采用式(1)一式(4)控制,油罐外壁热通量分布如图 8 所示。

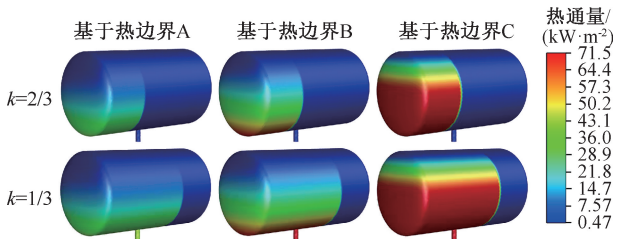


图 8 不同火焰偏移程度下的油罐外壁热通量分布
Fig. 8 Distribution of heat fluxes on external tank wall for different flame offset degrees

图 9 为不同火焰偏移程度下的油罐内柴油温度分布($t=100 \text{ s}$, $F=50\%$),温度最大值显示为 501 K ,近似为柴油的突变温度—— 500.95 K 。火焰偏移导致油罐内部柴油液体温度分布差异性显著,以 $k=2/3$ 为例,此时火焰只接触油罐外壁左侧,左侧

液体温度显著高于右侧。因此,火焰偏移导致油罐内部液体温度非均匀程度增加,从而影响液体与油罐内壁的自然对流换热,进一步影响液体升温,最终影响泄漏液体温度响应过程以及火灾突变时刻。此外,火焰偏移导致油罐内局部液体过热,引发局部液体汽化速率加快,从而增加油罐局部压力;另一方面,火焰加热局部油罐外壁导致外壁屈服强度下降,同时也会造成油罐外壁温度非均匀分布,从而在加热区形成较大的热应力;当罐壁等效力(由储罐局部内压升高导致的壁面应力与罐壁热应力共同合成)超过加热区外壁屈服强度时很容易诱发加热区外壁破裂,导致油气泄漏,从而火势升级。因此,在

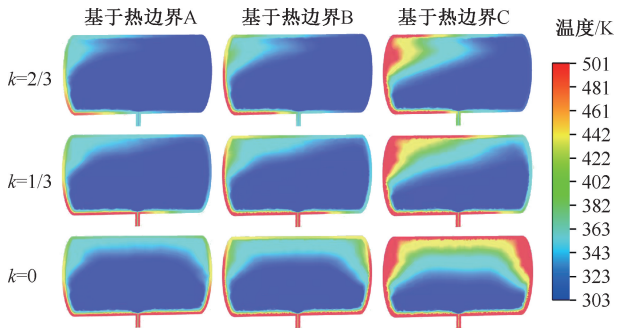


图 9 不同火焰偏移程度下的油罐内柴油温度分布
Fig. 9 Temperature distributions of diesel fuel in tank for different flame offset degrees

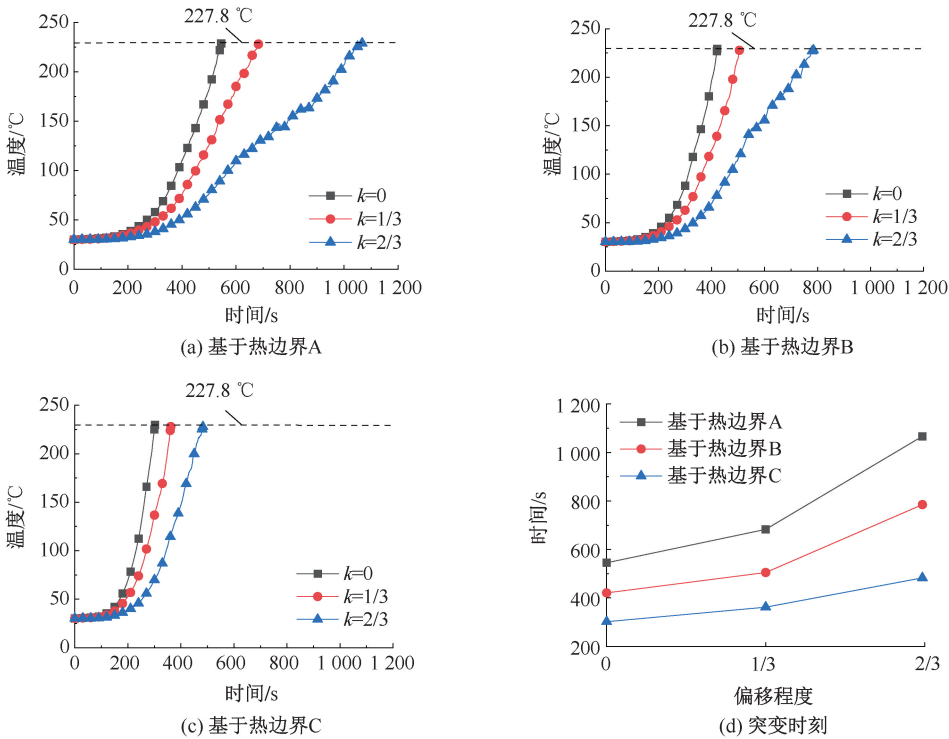


图 10 不同火焰偏移程度下的泄漏液体温度和突变时刻 ($F=50\%$)

Fig. 10 Leakage liquid temperature and onset time of hazard escalation for different flame offset degrees ($F=50\%$)

实际油罐车泄漏火灾事故中,若环境风导致火焰在油罐表面偏移,则周围人员需考虑油罐外壁局部破裂的风险,建议采用消防水喷射油罐外壁进行持续降温,以降低油罐破裂失效概率。

图 10 为火焰偏移程度对泄漏液体温度和突变时刻的影响,当 $k=0$ 和 $1/3$ 时,温度曲线均是先平缓增加随后指数式增长直至达到 $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,而当 $k=2/3$ 时,温度曲线在指数式增长一段时间后,增长率突然降低,并基本呈现线性增加直至达到 $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且这种现象在基于热边界 A 时更明显,表明当火焰原本较小程度接触作用油罐时,环境风所造成的火焰偏移对泄漏液体温度的影响更大。由图 10 d 表明:突变时刻曲线随着火焰偏移程度的增加而增加,即火焰偏移导致突变时刻延迟,且这种延迟效应在火焰较小程度接触油罐时更明显(基于热边界 A)。因此环境风导致的火焰偏移将增加 ASET,且火焰较小程度接触作用油罐时,这种收益将更加显著。当 $k=1$ 时,此时火焰完全偏移油罐,即火焰不与油罐接触,火焰则通过热辐射远距离加热油罐,此种情况下,作用油罐表面的热通量将会骤降,其危害性远小于 $k=0$ 、 $1/3$ 和 $2/3$ 时。随着火焰与油罐间距增加,输入至油罐表面的热通量也会迅速衰减,因此存在一个临界间距值,使得柴油罐即使满填充率泄漏,在其泄漏完毕时,泄漏柴油温度也不会到达 $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,即火灾不会突变。临界间距值与环境风速、外部火焰尺寸、油罐尺寸等因素有关,仍需要开展更多的模拟和试验探究。

3 结 论

1) 柴油罐泄漏-燃烧耦合过程中,对于 0 号柴油,其泄漏温度达到 $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,火灾进入沸腾燃烧阶段,燃烧噪声强度增加,火灾危害突变:油罐外部火焰尺度和内部压力增速突然增加。

2) 实际柴油罐车泄漏火灾中,若泄漏孔附近火焰突然变得紊乱且燃烧噪声突然增加,则人员需要提高警惕,扩大与油罐的安全距离,以应对即将到来的火灾危害突变行为。

3) 通过 CFD 数值模拟本文试验工况,油罐外壁热通量从底部以 45 kW/m^2 向上指数式衰减时,泄漏柴油温度的 CFD 计算值与试验值较为吻合,且火灾突变时刻计算误差为 $+2.3\%$ 。

4) 火灾危害突变时刻随着火焰接触油罐程度的增加而降低;突变时刻随填充率增加而呈现指数式增长,填充率由 33% 增加至 80% ,不同热边界条件下的突变时刻平均扩大 2.32 倍;突变时刻随着火焰偏移油罐外壁程度的增加而增加,且增加率随着火焰偏移程度的增加而增加。

当泄漏孔不在底部而在油罐中部时,随着泄漏持续,内部液位低于泄漏孔高度后,可能会出现纯气相泄漏,也可能出现气液相混合泄漏;多个泄漏孔的存在将会增加油罐泄漏流量,影响泄漏燃烧行为。因此,未来研究将综合考虑泄漏孔数量和位置对油罐泄漏火灾行为的影响,为评估柴油罐车泄漏火灾行为提供更多的数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 朱毅,夏登友. 面向终端决策需求的化工储罐火灾态势感知模型构建[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(5): 69-74.
ZHU Yi, XIA Dengyou. Development of chemical storage tank fire situation awareness model for terminal decision-making requirement [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(5): 69-74.
- [2] 姜子建,周荣义,石云霄,等. 基于贝叶斯网络的危化品爆炸事故隐患关联与溯源分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(6): 173-180.
JIANG Zijian, ZHOU Rongyi, SHI Yunxiao, et al. Correlation and traceability analysis of hazardous chemical explosion accidents based on Bayesian network [J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(6): 173-180.
- [3] 安徽省应急管理厅. 安徽省应急管理厅关于 S102 线阜阳市颍上县境内“2018. 6. 28”较大道路交通事故处理批复意见的通知[R/OL]. (2019-04-10). <https://yjt.ah.gov.cn/public/9377745/137997746.html>.
- [4] 成都发生油罐车侧翻事故导致一死一伤[OL]. (2022-07-26). <http://www.aqsc.cn/news/202207/26/c159444.html>.
- [5] BIRK A M, CUNNINGHAM M H. Liquid temperature stratification and its effect on BLEVEs and their hazards [J]. Journal of Hazardous Materials, 1996, 48: 219-237.

[6] WANG Mingyan, WANG Jiyun, YU Xiaoyang, et al. Experimental and numerical study of the thermal response of a diesel fuel tank exposed to fire impingement [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 227: DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120334.

[7] 刘健, 姚箭, 宋述忠, 等. 柴油的烤燃燃爆性能实验[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(3): 534-540.
LIU Jian, YAO Jian, SONG Shuzhong, et al. Experimental study on cook-off performance of diesel fuel [J]. Explosion and Shock Waves, 2108, 38(3): 534-540.

[8] 朱渊, 张肖锦, 师吉浩, 等. LNG 罐车泄漏火灾罐体超压失效预警及防控 [J]. 天然气工业, 2016, 36(8): 138-144.
ZHU Yuan, ZHANG Xiaojin, SHI Jihao, et al. Failure warning, prevention and control of LNG road tanker trucks: a cycle motivation of "leakage-fire-overload on the tank" in accidents [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(8): 138-144.

[9] 项莉, 谢启源, 张杰, 等. LNG 槽罐车泄漏-燃烧耦合演化特性分析 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(1): 81-86.
XIANG Li, XIE Qiyuan, ZHANG Jie, et al. Characteristics analysis on leakage-burning coupling of LNG tanker[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(1): 81-86.

[10] WANG Jiyun, WANG Mingyan, YU Xiaoyang, et al. Experimental and numerical study of the fire behavior of a tank with oil leaking and burning [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 159: 1 203-1 214.

[11] WANG Jiyun, CHEN Xiao, LI Yuanzhou, et al. Effects of filling level and tray size on the burning behavior of a tank during burning of leaking contents: an integrated experimental and numerical approach [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 168: 513-525.

[12] 王继贇. 典型易燃液体常压储罐泄漏火灾演化特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
WANG Jiyun. Investigation on evolution characteristics of leakage fires of atmospheric pressure tanks containing typical flammable liquids [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023.

[13] SCARPONI G E, LANDUCCI G, BIRK A M, et al. Three dimensional CFD simulation of LPG tanks exposed to partially engulfing pool fires [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 150: 385-399.

[14] 任靖杰. 热环境下液化气体储罐热质耦合响应机制研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
REN Jingjie. Research on heat-mass coupling response mechanism of liquefied gas tanks under thermal environments[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.

[15] SCARPONI G E, LANDUCCI G, BIRK A M, et al. LPG vessels exposed to fire: scale effects on pressure build-up [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 56: 342-358.

[16] SCARPONI G E, COZZANI V, ANTONIONI G, et al. Modeling the behavior of LPG tanks exposed to partially engulfing pool fires [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 182: 1 072-1 085.

[17] SCARPONI G E, LANDUCCI G, BIRK A M, et al. An innovative three-dimensional approach for the simulation of pressure vessels exposed to fire [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2019, 61: 160-173.

[18] IANNACCONE T, SCARPONI G E, LANDUCCI G, et al. Numerical simulation of LNG tanks exposed to fire [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 149: 735-749.

作者简介： 王继贇（1996—）,男,山东菏泽人,工学博士,助理研究员,主要从事油罐火灾动力学演化规律及防治技术研究。E-mail: wangjiyun@tfri.com.cn。

