

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.01.011

运油罐车尾部遭撞击爆炸燃烧传播机理分析研究

王 勇, 周利坤, 张 颖, 李高扬

(武警后勤学院 后勤保障系, 天津 300309)

摘要: 为了具体研究运油罐车爆炸燃烧传播机理,对运油罐车在运输途中因尾部遭撞击引发爆炸事故进行详细分析。选取 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型和有限速率涡耗散燃烧模型作为研究对象的流场控制方程,利用 Fluent 模拟仿真软件对运油罐车罐尾部遭受撞击后罐内油气爆炸燃烧的传播过程进行模拟仿真,得到运油罐车罐内油气爆炸火焰传播云图、压力波传播云图、温度和压强变化曲线。仿真结果表明:运油罐车油罐内油气爆炸火焰传播经历弧形-抛物线形-凹形-倒 V 形-凹形的变化过程,爆炸压力波在罐内大部分时间以平面波形式做往复运动。罐内温度、压强随着爆炸的进行逐渐升高直至混合气体完全反应,最高温度 3 000 K,最大压强 0.8 MPa,对油罐损害很大,易引发二次爆炸。

关键词: 运油罐车; 油气爆炸; Fluent 模拟; 火焰传播; 压力波

中图分类号: TU996

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)01-0078-05

Analysis of the mechanism for combustion propagation in impact explosion at the tail of oil tanker

WANG Yong, ZHOU Likun, ZHANG Ying, LI Gaoyang

(Logistics Support Division, China Logistics College of People's Armed Police Forces, Tianjin 300309, China)

Abstract: In order to specifically study the explosion and combustion propagation mechanism of oil tanker, a detailed analysis is carried out of the explosion accident caused by the collision of the tail of the oil tanker during transportation. The $k-\epsilon$ RNG turbulent model and the finite rate vortex dissipative combustion model are selected as the flow field control equations to the research objects, with the Fluent simulation software used to simulate the propagation process of the explosion and combustion of oil and gas in the tank after the tail of the tanker is impacted. The flame propagation cloud diagram, pressure wave propagation cloud diagram, temperature and pressure changing curves of the oil and gas explosion in the tank of the oil tanker are obtained. The simulation results show that the flame propagation of the oil and gas explosion in the tank of the oil tanker undergoes the changing process of arc, parabola, concave, inverted V-shaped and concave, and that the explosion pressure wave reciprocates in the form of plane wave for most of the time in the tank. The temperature and pressure in the tank gradually increased as the explosion progressing till the mixed gas is completely reacted. The maximum temperature is 3 000 K, and the maximum pressure is 0.8 MPa, which damaged the tank greatly and led to a secondary explosion easily.

Key words: tank truck; oil vapor explosion; Fluent simulation; flame propagation; pressure wave

油气运输是石油安全生产过程中的重要环节,一旦发生意外,后果将不堪设想。运油罐车运输石油过程中,常温下油罐内会出现石油蒸汽与空气的

混合气体,当混合气体浓度达到其爆炸极限1.4%~7.6%,遇明火就易发生爆炸事故,尤其是刚卸完油后的空罐,罐内积聚大量可燃混合蒸汽,更易爆炸。

收稿日期: 2020-09-20; 网络出版日期: 2020-12-15

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.n.20201215.0846.002.html>

第一作者: 王勇,男,硕士生,研究方向为交通运输安全。E-mail:3033588411@qq.com

通信作者: 周利坤,男,博士,副教授,硕导,研究方向为油料安全与装备。E-mail:172548703@qq.com

油气爆炸实质是石油蒸汽与空气快速反应,释放大 量热量,产生高温高压的化学燃烧过程。由于封闭 的运油罐车油罐的长径比较小,所以这种类型的爆 炸属于爆燃形式。

近年来,国内外学者对可燃气体爆炸做了大量 研究。其中,国外学者 Costin^[1]对受限空间气体爆 炸做了数值模拟实验,得到爆炸后的反射超压比入 射超压增大的值取决于受限空间的壁面形状。 Feldgun 等^[2]论述了受限空间气体爆炸的残余爆炸 压力,提出了不同的压力预测模型并对模型的实用 性进行了实物实验验证。国内学者毛金辉^[3]、蔡运 雄^[4]等对封闭管道中的油气爆炸进行了仿真模拟并 与实验数据进行了对比。杜扬^[5]、陈超^[6]等研究了 油气爆炸的影响因素和爆炸超压的分布规律。刘冲 等^[7]进行了含双侧分支受限空间油气爆炸大涡模 拟,得到爆炸火焰和压强在分支结构处的变化过程。 江丙友^[8]、高佳丽^[9]等对瓦斯爆炸冲击波的传播特 性进行了研究。目前,对运油罐车这类储运载体的 研究还十分匮乏,对油气爆炸传播机理的研究还不 够深入。研究运油罐车油气爆炸实验需要投入大 量的人力物力,不仅危险系数较高,而且实验数据很 难获得。因此,本文采用目前比较成熟的流体动力 学软件 Fluent,对卸完油后的运油罐车在运输途 中,遭遇车追尾引发罐内摩擦起火,进而导致其爆 炸的过程进行仿真模拟,既安全高效,又能获得准确 的油气爆炸数据。

1 物理模型建立与网格划分

1.1 物理模型

运油罐车油罐模型见图 1,长宽高为 4 m×1.2 m×1 m,罐壁厚 4 mm。油罐顶位于上表面的几何 中心,其直径 0.4 m,高 0.1 m。运油罐车在行驶途 中被后方一货车追尾,使油罐尾部内壁发生碰撞,摩 擦起火。

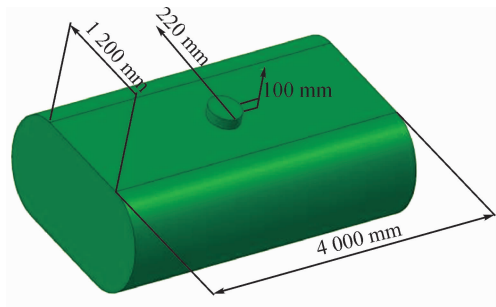


图 1 运油罐车油罐模型
Fig. 1 Oil tank model of tanker

由于油罐模型沿长轴对称,可以取长轴截面进 行模拟实验,长轴截面见图 2。

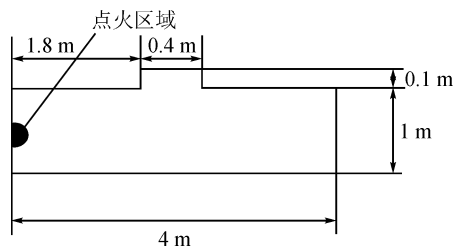


图 2 油罐长轴截面
Fig. 2 Cross section of long shaft of oil tank

1.2 网格划分

本文利用 ICEM CFD 专业网格划分软件对长 轴截面图进行网格划分,见图 3。在保证实验顺利 进行的情况下,为加速计算时间,网格尺寸统一采取 10 mm,共计划分网格数:40 400,网格质量:1。

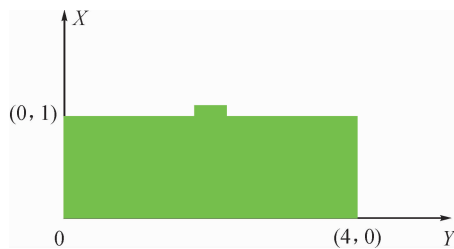


图 3 网格模型
Fig. 3 Grid model

2 数学模型选择以及流场控制方程

运油罐车油罐中的油气混合物爆燃是典型的湍 流爆炸,其本质是一种带压力波的高湍流度、高反 应速率的油蒸汽与氧气燃烧过程。本文采用基于总 能的 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型来描述湍流流场。基本控制 方程式为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_k u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} + G_k - \rho \epsilon \right) \quad (1)$$

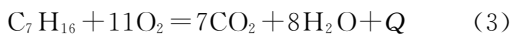
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\epsilon u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

式中: i, j, k 分别代表第 i, j, k 个; u 为速度 (m/s); ρ 为密度 (m/s); μ 为动力粘性系数 (Pa·s); l, t 分别代表层流和湍流; G_k 表示由层流速度梯度而 产生的湍动能; α_k 和 α_ϵ 分别代表 k 方程和 ϵ 方程的 湍流 Prandtl 常数; $C_{1\epsilon}$ 和 $C_{2\epsilon}$ 为经验常数,分别为 1.42, 1.68。

由于油蒸汽与氧气反应十分复杂,涉及到几十 种组分和基元反应,为简便计算,本文采用单步不可

逆化学反应模型。

90 号汽油的主要成分是庚烷,其与氧气燃烧反应方程式如下:



式中: Q 为反应释放的热量。

用有限速率/涡耗散(Finite-Rate/Eddy-Dissipation)燃烧模型来描述化学反应速率,其基本控制方程如下:

$$R_{fu,T} = C_{EBU} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min(Y_1 Y_2 Y_3) \quad (4)$$

$$R_{fu,A} = B \rho^2 Y_1 Y_2 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (5)$$

$$R_{fu} = -\min(|R_{fu,A}|, |R_{fu,T}|) \quad (6)$$

式中: $R_{fu,A}$ 为 Arrhenius 类型燃烧速率, $R_{fu,T}$ 为湍流燃烧速率, R_{fu} 为 $R_{fu,A}$ 和 $R_{fu,T}$ 的较小值代表化学反应速率; C_{EBU} 为经验常数,通常取 0.34~0.40; Y_1 , Y_2 , Y_3 分别表示 C_7H_{16} , O_2 , H_2O 的质量分数。

3 仿真模拟与结果分析

3.1 模拟环境设置

不考虑油罐的破损、变形,模拟封闭油罐中的油气爆炸,所以不需设置进出口边界。假设油罐壁面绝热,不考虑其与外界的能量传递与交换,边界类型均设为刚性,绝热,无滑移,无渗透的 wall 边界。忽略壁面厚度,壁面粗糙度取 0.5,由于壁面附近流场压力梯度较大,为提高模拟精度采用非平衡壁面函数法处理壁面附近流场。利用 SIMPLEC 算法求解压力与速度的耦合关系。

假设油罐内混合气体点火前处于常温常压静止状态且均匀混合,罐内压强设为 0.1 MPa,表压为 0 Pa,温度为 300 K。油蒸汽的体积分数取 2%,空气为 98%,空气中氧气含量可定为 22%。用庚烷代替油蒸汽,换算成质量分数,庚烷占 6.6%,氧气占 22.8%。

根据运油罐车遭遇撞击剧烈程度,可以在油罐尾部内壁中点附近设一半球形点火源,半径为 0.1 m,用电火花方式进行点火,点火能量为 0.12 J,点火持续时间为 0.001 s。为加快收敛,确保计算精度,时间步长设为 0.001 s,每个时间步最大迭代步数设为 20。最后进行计算,每隔 1 ms 自动保存一次结果。

3.2 模拟结果分析

3.2.1 火焰发展和传播过程分析

选取 14 个时刻的混合气体爆炸燃烧的火焰传播云图进行分析,见图 4。

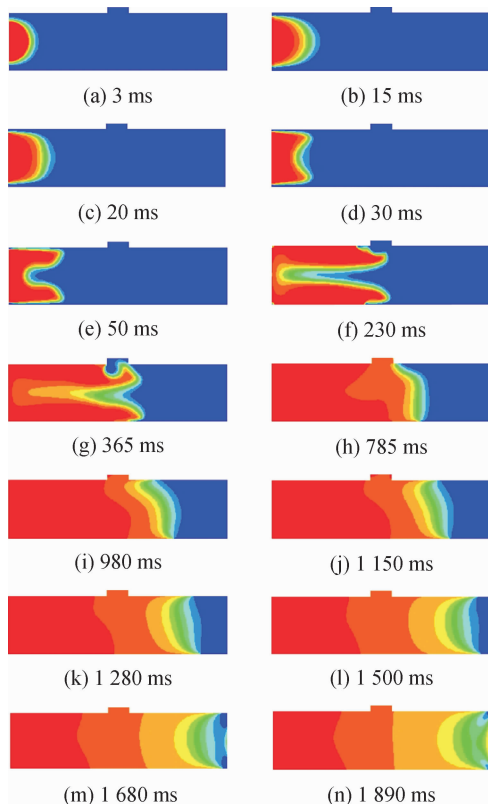


图 4 火焰传播云图

Fig. 4 Cloud chart of flame propagation

图中深色表示已燃区域,蓝色表示未燃区域。已燃区混合气体反应释放的热量不断加热未燃区混合气体,直到达到其着火点,未燃区的混合气体被点燃,形成新的火焰面,火焰就是以这种方式逐渐向运油罐车油罐右侧传播的。可以用图 5 简单地表示。

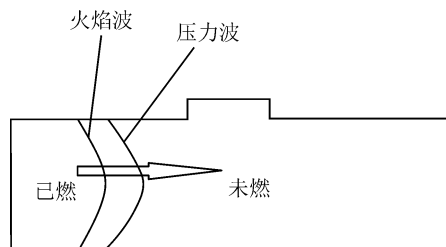


图 5 火焰传播简图

Fig. 5 Flame propagation diagram

从 3 ms 时的云图可以看到,点火后油罐左侧壁面附近的混合气体首先被点燃,火焰呈圆弧状。此时温度较低,最大只有 827 K,化学反应速率较慢。而后火焰面以点火位置为中心,向四周扩散。从 15 ms 时的云图可以看出,由于受到左侧壁面的约束和反射作用使得火焰的轴向速度大于径向速度,火焰呈现抛物线型。此时最高温度达 2 490 K,混合气体被完全点燃,化学反应速率较快,最快反应速率达到 64.2 m/s,见图 6。

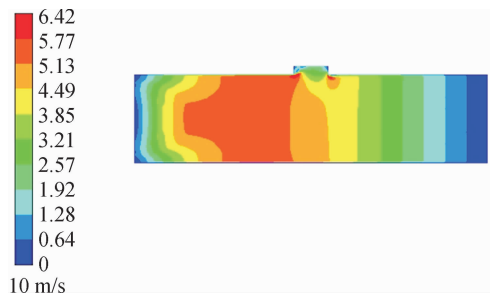


图6 15 ms 的化学反应速率云图

Fig. 6 Chemical reaction rate of 15 ms

当火焰传播到上下壁面附近时,由于壁面湍流作用使得壁面附近火焰速度大于轴向速度,于是火焰形状逐渐由抛物线型向平面型再到凹型的转变,从第 20 ms 到第 230 ms 云图可以清楚的看到这个变化过程。随着火焰面积的增大,上下壁面附近的气体反应速率不断加快,使得火焰逐渐向轴线靠拢,火焰面开始呈现倒 V 型。365 ms 时,火焰传播至油罐顶附近,被分成两部分分别向灌顶和罐右侧传播,由于受到油罐顶的约束和扰动作用,灌顶区域火焰开始变形。785 ms 后灌顶区的混合气体完全反应,火焰继续向油罐右侧传播。同样由于上下壁面的湍流作用,油罐右侧部分火焰面呈现不规则的凹形。计算进行到 2 000 ms 时混合气体完全反应,火焰布满油罐。

因此可得到,运油罐车油罐内油气爆炸火焰传播经历弧形-抛物线形-凹形-倒 V 形-凹形的变化过程。

3.2.2 温度变化过程分析

选取 a(0.5,0.5)、b(2.0,1.1)、c(3.5,0.5) 三个点作为监测点,得到其温度-时间变化曲线,见图 7,分析油罐中油气爆炸的温度变规律。

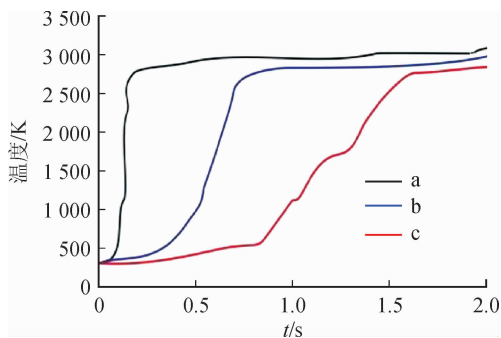


图7 温度-时间曲线

Fig. 7 Temperature time curve

点火后,已燃区混合气体反应释放的热量加热附近的混合气体,点 a 距离点火区域最近,首先被加热,温度缓慢上升。当火焰峰面传播至点 a,其温度迅速上升达到 2 600 K,而后随着爆炸的进行缓慢增加至最大值。同理点 b、点 c 变化趋势也和点 a 一

样,但各点温度上升速率有所不同,点 a、点 b 温度上升速率要大于点 c,因为爆炸后期化学反应速率很低,释放热量缓慢。各点最大值在 3 000 K 附近,这比实际值略高,因为本文所选模型是封闭的油罐,不考虑与外界的能量传递与交换。此外可以通过图 7 估算出火焰水平方向的平均传播速度。点 a 到点 b、点 b 到点 c 水平距离均为 1.5m,前者所需时间约为 400 ms,后者时间约为 1 200 ms,利用平均速度公式算出火焰水平传播速度分别为 3.75 m/s、1.25 m/s。可以得到火焰后期处于减速传播阶段,这是因为油罐右侧压力越来越高,火焰所能传播的空间越来越小,造成油罐右侧未燃混合气体反向流动,增加火焰向油罐右端传播的阻力。

由以上分析,油罐内各点温度均呈上升趋势,而开始上升时间和上升速率分别由火焰峰面和气体反应速率决定,气体反应速率越快,温度上升速率越快

3.2.3 压力波发展和传播过程分析

见图 8,选取 8 个时刻的压力分布云图进行运油罐车油气爆炸压力波的传播规律分析。

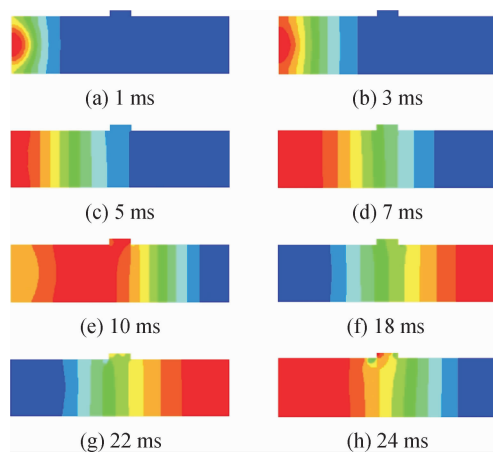


图8 压力波传播云图

Fig. 8 Pressure wave propagation cloud

从图 8 可以看出,点火后点火区域的压力骤增,压力波以球形波的形式向四周传播,当传播至上下壁面时发生反射。随着爆炸的进行,上下壁面的反射波相互接触,使得压力波以平面波的形式向油罐右侧传播。在油罐顶左侧的直罐区域内,压力波均以平面波的形式传播,从第 1 ms 到第 7 ms 的压力分布云图可以看出这一变化过程。当压力波传播至罐顶附近时,受到油罐顶的扰动作用发生轻微的倾斜,形成凹面状,到灌顶右侧区域后继续以平面波的形式传播。当压力波传至右侧壁面时,发生反射向油罐左侧传播,如 10 ms 至 22 ms 云图所示,传至左侧后再次发生反射向右传播,以此往复循环直至混

合气体完全反应。

综上,油罐内油气爆炸压力波在罐内做往复运动,大部分时间是以平面波形式传播,经过灌顶区域时会发生轻微的倾斜。

3.2.4 压力变化过程分析

图 9 为油气爆炸过程中 a(0.5,0.5)、b(2.0,1.1)、c(3.5,0.5)三个监测点压力随时间变化曲线,依图分析油罐中油气爆炸的压力变化过程。

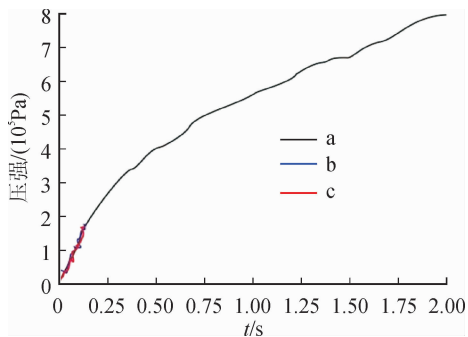


图 9 压强-时间变化曲线
Fig. 9 Pressure time cure

从图 9 可以看出,随着爆炸的进行罐内压力逐渐增大,直至混合气体反应完全,最大压力达到 0.8 MPa,对油罐损害很大,容易引起油罐破裂使得混合气体迅速扩散到空气中遇到明火引发二次爆炸,带来更大的损失。由于本文所选模型是封闭油罐,所以最终结果要比实际值稍大。各监测点的压力曲线到 110 ms 时几乎完全重合,说明封闭空间内的气体爆炸是个瞬间过程,罐内压力很快达到平衡。从爆炸全程来看,压力上升过程分为两段,第一段曲线较陡压力上升速率大,第二段上升曲线较平缓压力上升速率小。因为前期化学反应速率快,快速放热使气体迅速膨胀,所以压力上升的快。相反,爆炸后期化学反应速率很慢,释放热量慢,因此压力上升也较慢。选取第 12 ms 和第 1 800 ms 两个时刻的化学反应速率云图进行对比,见图 10 和 11。第 12 ms 时最快反应速率可达 56.5 m/s;而第 1 800 ms 时最快反应速率仅有 0.19m/s。

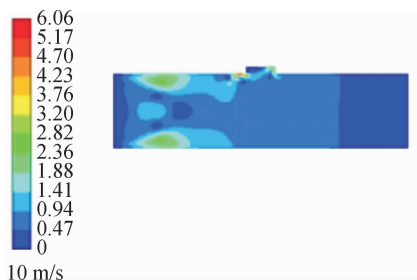


图 10 12 ms 的化学反应速率
Fig. 10 Chemical reaction rate of 12 ms

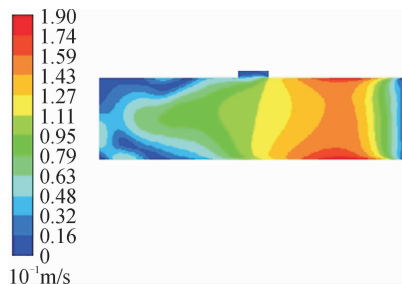


图 11 1 800 ms 的化学反应速率
Fig. 11 Chemical reaction rate of 1 800 ms

由以上分析可知,油罐内压力随着爆炸进行很快达到平衡,并一直增大直至混合气体完全反应,压力上升过程分为两段,表现为前快后慢。

4 结 语

本文选取 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型,单步化学反应和有限速率/涡耗散燃烧模型,采用 SIMPLEC 算法,利用 Fluent 软件模拟对卸完油后的运油罐车在油罐初始油气浓度为 2% 时,遭遇尾部撞击引起油罐内油气爆炸的过程,得到如下结论。

1) 运油罐车油罐内油气爆炸火焰传播经历弧形-抛物线形-凹形-倒 V 形-凹形的变化过程。油罐内各点温度均呈上升趋势,而开始上升时间和上升速率分别由火焰峰面和气体反应速率决定,气体反应速率越快,温度上升速率越快。

2) 运油罐车油罐内油气爆炸压力波在罐内做往复运动,大部分时间是以平面波形式传播,经过灌顶区域时会发生轻微的倾斜。油罐内压力随着爆炸进行很快达到平衡,并一直增大直至混合气体完全反应,压力上升过程分为两段,表现为前快后慢。

3) 油气爆炸时油罐内最高温度在 3 000 K,最大压强在 0.8 MPa,对油罐损害很大,易引发二次爆炸。

模拟结果对运油罐车构造设计以及石油的运输安全研究具有借鉴意义。

参考文献:

- [1] COSTIN N S. Numerical simulation of detonation of an explosive atmosphere of liquefied petroleum gas in a confined spaced[J]. Defence Technology, 2014, 10(3): 294-297.
- [2] FELDGUN V R, KARINSKI Y S, EDRI I, et al. Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016, 90: 46-60.

(下转第 121 页)

- term memory[J]. *Neural Computation*, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [18] 卢强,朱振方,徐富永,等. 融合语法规则的 Bi-LSTM 中文情感分类方法研究[J]. *数据分析与知识发现*, 2019,3(11):99-107.
LU Qiang, ZHU Zhenfang, XU Fuyong, et al. Chinese sentiment classification method with Bi-LSTM and grammar rules[J]. *Data Analysis and Knowledge Discovery*, 2019, 3(11): 99-107.
- [19] 翟社平,杨媛媛,邱程,等. 基于注意力机制 Bi-LSTM 算法的双语文本情感分析[J]. *计算机应用与软件*, 2019,36(12):251-255.
ZHAI Sheping, YANG Yuanyuan, QIU Cheng, et al. Bilingual text sentiment analysis based on attention mechanism Bi-LSTM [J]. *Computer Applications and Software*, 2019, 36(12): 251-255.
- [20] 王丽亚,刘昌辉,蔡敦波,等. 基于 CNN-BiLSTM 网络引入注意力模型的文本情感分析[J]. *武汉工程大学学报*, 2019,41(4):386-391.
WANG Liya, LIU Changhui, CAI Dunbo, et al. Text sentiment analysis based on CNN-BiLSTM network and attention model[J]. *Journal of Wuhan Institute of Technology*, 2019, 41(4):386-391.
- [21] DEVLIN J, CHANG M W, LEE K, et al. BERT: pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[J]. *arXiv preprint arXiv: 1810.04805*, 2018.

(责任编辑 周 蓓)

(上接第 82 页)

- [3] 毛金晖,高建丰,邱云钦,等. 海底管道原油油气燃烧爆炸实验与数值仿真模拟[J]. *中国水运(下半月)*, 2017, 17(6):101-102,128.
- [4] 蔡运雄,杜扬,王世茂,等. 封闭管道油气爆炸超压及火焰传播特性[J]. *中国安全生产科学技术*, 2019, 15(6): 61-66.
CAI Yunxiong, DU Yang, WANG Shimao, et al. Overpressure and flame propagation characteristics of gasoline-air mixture explosion in closed tube[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2019, 15(6): 61-66.
- [5] 高建丰,杜扬,蒋新生,等. 油气爆炸冲击载荷对金属油罐断裂损伤的模拟实验研究[J]. *中国储运*, 2016(3): 129-134.
- [6] 陈超,周利坤. 汽车油罐车爆炸燃烧特性的数值模拟分析[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(6): 148-154, 159.
CHEN Chao, ZHOU Likun. Numerical simulation analysis on explosion and combustion characteristics of oil tank trucks[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(6): 148-154, 159.
- [7] 刘冲,杜扬,梁建军,等. 含双侧分支受限空间油气爆炸火焰行为与超压特性大涡模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(6):83-92.
LIU CHONG, DU Yang, LIANG Jianjun, et al. Large eddy simulation of gasoline/air mixture explosion in a semi-confined space with bilateral branches[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(6): 83-92.
- [8] 江丙友,林柏泉,朱传杰,等. 瓦斯爆炸冲击波在采煤工作面巷网中传播特性的数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2011, 36(6):968-972.
JIANG Bingyou, LIN Baiquan, ZHU Chuanjie, et al. Numerical simulation on propagation characteristics of gas explosion shock waves in coalface tunnel network [J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(6): 968-972.
- [9] 高佳丽. 不同类型管道内瓦斯爆炸冲击波传播特性数值模拟研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
GAO Jiali. Numerical simulation of gas explosion shock wave propagation characteristics in different types of pipelines [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2017.

(责任编辑 王绪迪)