

基于 CFD 的 LNG 水上泄漏后果计算模型的有效性评价

谢澄^{1,2}, 孙兰心¹, 郝国柱¹, 汪瑞¹, 朱明昌¹, 黄立文^{1,2}

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘要:随着国家“双碳”目标下内河液化天然气(LNG)燃料在能源结构中的占比不断提高,LNG水上泄漏后果成为其推广营运过程中首要考虑的风险因素。已有研究对LNG地面泄漏模型的有效性进行验证,然而与地面相比,水面与LNG之间存在剧烈的热交换过程,其对LNG泄漏后果的影响不可忽略。在已有研究成果的基础上,提出LNG水上泄漏水面传热模拟方法,耦合多相流模型、湍流扩散模型和燃烧模型等,利用大型LNG水上泄漏试验Falcon-1号试验和Phoenix-1号试验数据,引入相对偏差(FB)、几何平均偏差(MG)、几何平均方差(VG)、相对均方误差(MRSE)、归一化的均方误差(NMSE)和FAC2等统计学参数作为定量评价指标,对LNG水上泄漏后果计算模型进行有效性验证。结果表明:基于LNG水上泄漏水面传热模拟方法对LNG水上泄漏扩散和燃烧后果进行模拟时,各定量评价统计指标的取值均能满足模型有效性评价标准的要求,该模型未来可有效应用于LNG水上泄漏后果仿真模拟中,对LNG燃料内河营运相关政策的制定和其安全保障也具有重要的意义。

关键词:液化天然气水上泄漏;液化天然气试验;计算流体力学模型;统计偏差分析;有效性评价

中图分类号:U69 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.015

Validity evaluation of calculation model of LNG water leakage consequences based on CFD

XIE Cheng^{1,2}, SUN Lanxin¹, HAO Guozhu¹, WANG Rui¹, ZHU Mingchang¹, HUANG Liwen^{1,2}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: With the increasing proportion of inland LNG fuel in the energy structure under China's "dual-carbon strategy", the consequences of LNG leakage on water surfaces have become a primary risk factor in its promotion and operational processes. While some studies have verified the validity of LNG ground leakage models, the heat exchange process between water surfaces and LNG is far more intense than on land, and its impact on leakage consequences cannot be overlooked. Based on existing research, this paper proposes a heat transfer simulation method for LNG leakage on water surfaces, integrating a multiphase flow model, turbulent diffusion model, and combustion model. Using data from large-scale LNG water leakage tests (Falcon-1 and Phoenix-1), statistical parameters such as FB, MG, VG, MRSE, NMSE, and FAC2 are employed as quantitative evaluation metrics to assess LNG leakage behavior and its effects. The results demonstrate that when simulating LNG waterborne leakage, diffusion, and combustion using this method, the quantitative evaluation indices meet the model validity criteria. This confirms that the model can effectively predict the consequences of LNG waterborne

收稿日期:2024-05-29

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52471382);湖北省自然科学基金计划项目(2023AFB148)

作者简介:谢澄(1988—),男,助理研究员,研究方向为交通环境和安全保障。E-mail:exie@whut.edu.cn

通信作者:黄立文(1963—),男,教授,博士,研究方向为智能航行。E-mail:lw Huang@whut.edu.cn

引用格式:谢澄,孙兰心,郝国柱,等.基于CFD的LNG水上泄漏后果计算模型的有效性评价[J].中国航海,2025,48(2):118-126.

XIE C, SUN L X, HAO G Z, et al. Validity evaluation of calculation model of LNG water leakage consequences based on CFD[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 118-126. (in Chinese)

leakage, providing critical insights for policymaking related to inland waterway LNG operations and fuel safety. Thus, the model can serve as a reliable tool for future LNG waterborne leakage simulations.

Key words: LNG water leakage; LNG test; CFD model; statistical deviation analysis; validity evaluation

近年来,随着国家“双碳”目标的不断实施,内河航运能源结构持续优化,液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)燃料的推广应用成为实现内河货运船舶深度减碳的一种有效途径。然而,LNG 在储运过程中一旦发生泄漏会快速气化,遇到明火便会迅速燃烧、爆炸,对泄漏点周围的人员、通航环境等均会造成极大的危害^[1-2]。因此,LNG 燃料动力船在内河营运过程中发生泄漏后的扩散、燃烧后果逐渐成为海事安全领域的关注重点。根据 LNG 水上泄漏演变机理,LNG 水上泄漏的风险后果较为复杂,需综合考虑泄漏源、气云扩散、燃烧和爆炸等过程。因此,基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型的 LNG 泄漏模拟方法,由于其具有经济、高效的优势,能较好地模拟 LNG 泄漏蒸发的蒸汽云在大气中流动和扩散,逐渐成为分析 LNG 泄漏后果的主要方法。

目前,国内外许多学者利用 CFD 模型对 LNG 泄漏场景下的风险后果进行模拟,研究主要集中在 LNG 管道、LNG 储罐等泄漏方面。

1) HORVAT^[3]通过 FLACS 软件模拟 LNG 泄漏,从最初的释放、在水面上的扩散和快速相转变(Rapid Phase Transition, RPT)到随后的扩散,计算可燃云团的体积、分布和 RPT 事件产生的超压;李兆慈等^[4]利用 Fluent 软件对 LNG 管线连续泄漏和扩散进行模拟计算,分析不同管内压力、泄漏孔径和环境风速条件对 LNG 连续泄漏及扩散过程的影响,同时分析气云随时间扩展过程中的燃烧爆炸范围和低温冻伤范围的变化。由于数值模拟方法的计算值与实际值可能存在一定的偏差^[5],偏差值的大小直接影响到模拟计算的精确性,因此,在使用 CFD 模型进行 LNG 泄漏模拟前,需结合实际情况对模型的有效性进行验证^[6-7]。

2) HANNA 等^[8]对 15 个重气扩散模型的模拟精度进行分析,也为 LNG 扩散模型有效性评价方法提供理论依据;SKLAVOUNOS 等^[9]借助 Coyote 现场试验数据对液化气泄漏引起的大气云雾扩散进行数值模拟,结果验证了 CFX 数值计算结果的有效性;庄学强^[10]通过 CFD 模型对大型 LNG 储罐可能的泄漏及蒸汽云扩散危害后果进行模拟研究与分析,得出 Fluent 软件对 LNG 储罐泄漏扩散行为模拟的有效性;杨兆晶等^[11]利用 Fluent 软件模拟 LNG 储罐泄漏扩散过程,并对扩散过程的影响因素进行分析,

分析结果为制定应急防护措施提供了参考;周宁等^[12]借助 Burro-8 号现场试验数据验证 Fluent 数值计算结果的有效性,研究风速对 LNG 泄漏扩散过程的影响。

根据国内外相关研究成果,现有关于 LNG 风险后果的研究多为陆域 LNG 泄漏的模拟仿真,在模型的有效性评价方面,无论是 LNG 扩散模型还是燃烧模型的有效性评估,其评价重点都是将相同泄漏条件下的模拟值与试验值进行对比,并进行统计偏差分析^[13]。目前,虽已有部分研究对 LNG 地面泄漏模型的有效性进行验证,然而与地面相比,水面与 LNG 之间存在剧烈的热交换过程,水体对 LNG 的加热作用不可忽略,造成直接引用 LNG 地面泄漏模型分析 LNG 水上泄漏问题可能带来计算失真的风险后果。因此,本文在现有研究的基础上,针对 LNG 与水面的剧烈传热现象提出一种基于 CFD 模型的 LNG 水上泄漏水面传热模拟方法。同时,为验证该方法的有效性,通过对现有的 LNG 泄漏试验进行筛选,选取适应度高的 Falcon-1 号试验和 Phoenix-1 号试验数据集,并引入相对偏差(Fractional Bias, FB)、几何平均偏差(Geometric Mean Bias, MG)、几何平均方差(Geometric Mean Variance, VG)、相对均方误差(Mean Relative Square Error, MRSE)、归一化的均方误差(Normalized Mean Square Error, NMSE)和 FAC2 值等统计学参数作为定量评价指标,对该模型进行有效性评价,基于评价结果得出该模型应用于 LNG 水上泄漏后果仿真模拟有效性的结论,对 LNG 燃料在内河营运相关政策的制定和其安全保障也具有重要意义。

1 LNG 水上泄漏计算模型

目前,国际上基于 CFD 的计算模型众多,主流的有 Fluent、FDS、CFX、FLACS、FEM3 和 AutoReaGas 等,Fluent 软件则作为通用性的 CFD 仿真工具,几乎在所有涉及流动和燃烧问题上均具有较高的精确度和鲁棒性。通过对主流 CFD 计算工具的特点及性能进行对比,选取 Fluent 软件作为 LNG 水上泄漏计算模型的构建平台。

1.1 LNG 水上泄漏演变机理

根据 LNG 泄漏的相关研究,发生 LNG 水上泄漏事故后,LNG 水上泄漏随时间变化的演变机理见图 1,大致可分为以下几个阶段。

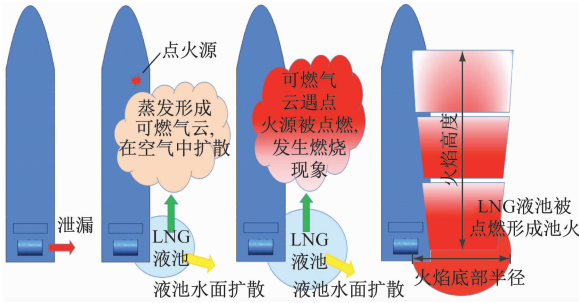


图1 LNG水上泄漏演变机理(按时间顺序)

Fig. 1 Evolution mechanism of LNG water leakage (in chronological order)

1.1.1 泄漏源阶段

LNG泄漏按泄漏持续时间可分为连续泄漏和瞬时泄漏^[14],此时泄漏口形成液相的喷射流以一定的初始泄漏速率向外喷射。喷射流中的部分LNG快速吸热蒸发,在空气中扩散形成可燃燃气云,另一部分则直接以液态形式落在水面上形成LNG液池。

1.1.2 可燃燃气云扩散

LNG水上泄漏伴随着LNG的蒸发过程,蒸发形成的可燃燃气云密度大约是大气密度的1.5倍,此时大气湍流效应不显著,受重力作用呈现明显的重气扩散特征,随着低温气云与周围环境温差进一步减小,大气湍流影响占主导作用,当气云温度上升到 $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时,重气扩散特征基本消失。

1.1.3 燃烧过程

LNG泄漏蒸发形成的可燃燃气云在空气中不断累积,当其浓度在可燃范围内遇到明火便会快速燃烧,泄漏后是否被点燃决定其危害后果的表现形式和严重程度,同时,根据点燃时机的不同可形成喷射火、闪火和池火等不同火灾形式^[15]。

1.2 LNG水面传热模型构建

当模拟LNG泄漏与水面传热时,假设下方水体充足,能源源不断为LNG的蒸发提供大量热量,热量主要沿重力方向传递,LNG与水面的传热方程可根据Fourier方程得出:

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} = \kappa_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} \quad (1)$$

式(1)中: κ_w 为水的热扩散系数, $1.43 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$; T_w 为水面的温度,K; t 为LNG与水面接触的时间,s; z 为方向分量,m。

在LNG泄漏初期,水面的初始温度为 T_0 ,LNG从水面吸收的热量与LNG和水面的温差成正比,因此,LNG泄漏与水面传热的初始条件为

$$t = 0, T_w = T_0 \quad (2)$$

$$z = \infty, T_w = T_0 \quad (3)$$

$$z = 0, \left. \frac{\partial T_w}{\partial z} \right|_{z=0} = \frac{h}{\lambda_w} (T_{w0} - T_b) \quad (4)$$

式(2)~式(4)中: λ_w 为水的导热系数, $0.599 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; h 为水与LNG之间的传热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T_{w0} 为水面的温度; T_b 为LNG的沸腾温度。

利用 $\theta = T_w - T_b$ 对式(1)进行变量转换可得

$$T_{w0} = T_b + (T_0 - T_b) \exp(t_1) \operatorname{erfc}(\sqrt{t_1}) \quad (5)$$

式(5)中: $t_1 = \frac{h^2}{\lambda_w^2} \kappa_w t$; erfc 为高斯误差补函数。

将 $\kappa_w = \frac{\lambda_w}{\rho_w c_w}$ 代入式(5)为

$$t_1 = \frac{h^2}{\rho_w c_w} t \quad (6)$$

式(6)中: ρ_w 为水的密度, $1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$; c_w 为水的比热容, $4.2 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

因此,对于LNG泄漏水面传热模拟而言,LNG从水面吸收的热量计算为

$$Q_w = h(T_{w0} - T_0) \quad (7)$$

式(7)中: Q_w 为LNG从水面吸收的热量; T_{w0} 为在 t 时刻的水面温度; T_0 为水面的初始温度。

由式(7)可知:从水面吸收的热量 Q_w 不仅与温差有关,还与水和LNG之间的传热系数 h 有关, h 的计算主要取决于LNG在水面的沸腾形式。根据相关研究,LNG在常压下的沸点约为 $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$,LNG水上泄漏时由于水体的加热作用会迅速达到沸腾状态,根据LNG所处的温度与沸点温度之间的温差 ΔT 的不同,可将LNG的沸腾状态分为核沸腾、过渡沸腾和膜沸腾等3类。

1) 核沸腾是指LNG与水面直接接触传热,接触面之间存在少量的气泡。

2) 过渡沸腾是指一部分传热为核沸腾,一部分传热为膜沸腾的中间形式。

3) 膜沸腾是指LNG与水面之间形成一层薄蒸气层,LNG与水面通过蒸气层传热。

3种沸腾形式几乎同时发生在LNG水上泄漏过程中,温差 ΔT 与LNG蒸发沸腾形式的关系见图2。

由图2可知:在LNG泄漏初期,随着 ΔT 的增加,LNG进入核沸腾阶段,此时LNG与水面的热通量逐渐上升,蒸发速率也快速增加;当达到临界温差 ΔT_{cr} 时,热通量和蒸发速率均达到峰值,此时LNG进入过渡沸腾阶段;当温差 ΔT 进一步增加,达到最小温差 ΔT_{min} 时,过渡沸腾向膜沸腾阶段转变并一直保持膜沸腾状态。

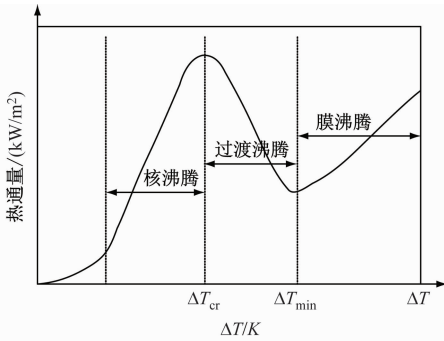


图2 温差 ΔT 与 LNG 蒸发沸腾形式的关系

Fig.2 Relationship between temperature difference ΔT and LNG evaporation boiling forms

根据上述推导过程,在 LNG 泄漏水面传热参数的设置上,使用 Fluent 软件中的 DEFINE_PROFILE UDF,对式(5)和式(7)进行联立求解,最终得到 LNG 从水面吸收的热量 Q_w 作为水面的边界条件。

1.3 LNG 水上泄漏计算模型耦合

根据 LNG 水上泄漏演变机理,使用 Fluent 软件模拟过闸系统风险后果,主要涉及 LNG 泄漏蒸发、湍流流动、燃烧和辐射换热等过程,除遵循 Fluent 中质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程和组分守恒方程^[16]等基本控制方程外,还需增加对上述过程的耦合计算模型,从而实现对 LNG 水上泄漏风险后果的仿真。

1.3.1 泄漏多相流模型

对于 LNG 泄漏蒸发过程而言,处于低温状态下的 LNG 泄漏时呈液相,在温度梯度作用下部分 LNG 蒸发形成可燃气云,在此过程中存在液相和气相 2 种不同的物质存在形式,需使用多相流模型对不同相的流动形态进行模拟计算。同时,考虑到 LNG 泄漏过程中不断蒸发形成可燃气云,可燃气云的形成规模也决定了后续过闸系统风险后果的严重程度,因此,在使用多相流模型的基础上,进一步构建 LNG 液相蒸发子模型,从而模拟整个 LNG 泄漏蒸发过程。

1.3.2 湍流扩散模型

无论是 LNG 泄漏扩散还是燃烧过程均涉及湍流流动。湍流作为自然界一种复杂的非稳态流动过程,目前暂无一种普遍适用的湍流模型能有效模拟各种湍流流动,国内外关于湍流流动的求解方法主要有直接模拟(Direct Numerical Simulation, DNS)、大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)和雷诺时均(Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS)方法等 3 种^[17]。目前,本文选取使用最广泛、适用性最强的 RANS 方法求解 LNG 泄漏过程中的湍流流动问题。

1.3.3 燃烧模型

由于 LNG 属于多组分物质,其蒸发形成的可燃气体中绝大部分为 CH_4 ,因此,在使用 Fluent 软件进行燃烧过程模拟时,可将可燃气体的燃烧过程简化为 CH_4 的氧化反应,使用 Fluent 软件中自带的 CH_4 -空气二步燃烧化学反应机理。目前,Fluent 软件提供了 5 种燃烧模型,其中,有限速率涡耗散模型是有限速率模型和涡耗散模型的结合,其既克服了有限速率模型无法对快速化学反应进行模拟的缺点,又避免了涡耗散模型中仅考虑湍流运动对化学反应速率的影响,具有较高计算精度的同时,还能较好地适用于 LNG 泄漏燃烧的数值模拟。

2 有效性评价方法

2.1 评价方法和标准

对于使用 CFD 模型开展 LNG 泄漏后果计算的有效性评价而言,具体步骤基于已有的现场试验和风洞试验数据库^[18],筛选出符合条件的评价数据集,评价重点在于将相同泄漏条件下的模拟值与试验值进行对比,并进行统计偏差分析。目前,关于重气扩散模型和碳氢化合物燃烧模型的有效性评价统计偏差分析方面,国际上公认的验证模型有效性的定量评价指标主要有 B_F 、 G_M 、 G_V 、 S_{MRE} 、 S_{NME} 以及模拟值与试验值的比值在 0.5 ~ 2.0 之间的模拟值占总体数据的比例(FAC2)等,并将上述各指标的计算值与有效性评价标准进行对比,从而判断计算模型的准确性^[19],各指标的计算公式为

$$B_F = \frac{2(\bar{X}_o - \bar{X}_p)}{(\bar{X}_o + \bar{X}_p)}; G_M = \exp(\ln X_o - \ln X_p);$$

$$G_V = \exp(\overline{(\ln X_o - \ln X_p)^2});$$

$$S_{MRE} = \left(4 \left(\frac{X_o - X_p}{X_o + X_p}\right)^2\right); S_{NME} = \frac{(X_o - X_p)^2}{X_o \times X_p} \quad (8)$$

式(8)中: X_o 为试验的测量值; X_p 为模型的计算值。

在模型有效性评价标准方面,根据相关研究成果,文献[20]通过研究和对比不同模型之间定量评价指标的取值情况,确定当评价模型为有效时,上述各定量评价指标的取值范围为: $-0.4 < B_F < 0.4$, $0.67 < G_M < 1.50$, $G_V < 3.3$, $-0.5 < S_{MRE} < 0.5$, $S_{NME} < 2.3$, $\text{FAC2} > 0.5$ 。

因此,基于 Fluent 后果计算模型的有效性评价步骤主要为:开展评价数据集的筛选,包含 LNG 扩散试验和燃烧试验;利用 Fluent 软件对现场试验进行模拟,将相同监测点位置处的气云浓度、温度和表面辐射率的模拟值与现场测量值进行对比分析;对

各定量评价指标进行计算,并与定量评价标准进行对比,从而验证基于 Fluent 的后果计算模型的有效性。

2.2 评价数据集的筛选

有效性评价数据集中试验数据的合理性,直接影响到模型的有效性评价结论。开展 LNG 扩散与燃烧的安全研究方法主要为现场试验,现场试验主要是指二十世纪七八十年代国外开展的一系列著名的 LNG 泄漏试验,如 Burro 系列、Falcon 系列和 Esso 系列试验等,旨在研究 LNG 泄漏后的扩散现象,还有一些试验如 Coyote 系列、Maplin Sands 系列、Phoenix 系列和 China Lake 系列试验等则既包含了 LNG 扩散试验,也通过在 LNG 泄漏后立即点火或延迟点火的方式对 LNG 泄漏后的燃烧情况进行测量研究,为 LNG 后果计算模型的验证和有效性评价提供丰富的原始数据。

考虑到在早期 LNG 泄漏现场试验中,由于受到测量仪器、试验方案设计的限制和试验中存在的偶发因素等方面的影响,一些现场试验数据的精确性较差,无法运用于数学模型的验证中。因此,在评价数据集的选择上主要选择一些大型、测量精度较高的 LNG 泄漏试验数据。

综合国内外相关研究成果,针对 LNG 泄漏后果的特点,提出 LNG 扩散、燃烧计算模型有效性评价数据集的选取原则主要有以下几个方面。

1) 涉及 LNG 泄漏扩散的现场试验应对泄漏速率、泄漏时间、大气条件、测量点气体浓度和可见气云的扩散距离等进行记录^[21]。

2) 涉及 LNG 泄漏燃烧的现场试验应对立即点火或延迟点火的点火方式、点火源情况、可视火焰规模、火焰温度和热辐射量等进行记录。

3) 所选择的现场试验应记录完整、可查,所使用的测量仪器有效且具备较好的测量精度。

基于以上评价数据集选取原则与 LNG 水上泄漏试验要求,对国外著名的 LNG 泄漏试验进行梳理,分别得出在 LNG 扩散试验方面,Falcon 试验作为 LNG 扩散模型验证的评价数据集,在 LNG 燃烧试验方面,Phoenix 试验作为燃烧模型验证的评价数据集。

①Falcon 系列试验是美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Laboratory, LLNL)于1987年在内华达州国家安全区的一处盆地进行的一系列 LNG 扩散试验,该试验较以往的 LNG 泄漏试验而言,仪器测量精度较高,其中 Falcon 系列的1号试验被认为是对模拟复杂地形条件下

LNG 泄漏扩散模型验证的重要评价数据集。

②Phoenix 系列试验是美国桑迪亚国家实验室于2009年进行的大型 LNG 泄漏现场试验,其中,Phoenix-1号试验 LNG 的泄漏量达 $1\ 172\ \text{m}^3$,为所有现场试验中最多的泄漏量,其试验数据能为 LNG 燃烧数学模型的开发和验证提供有效的数据支持。

3 基于 Fluent 的模型有效性验证与分析

3.1 几何模型的构建

Falcon 试验是在一个长 $60.0\ \text{m}$ 、宽 $40.0\ \text{m}$ 的水池中进行的,水池中心为 LNG 泄漏点,水池周围布置了长 $88.0\ \text{m}$ 、宽 $44.0\ \text{m}$ 、高 $8.7\ \text{m}$ 的蒸气围栏用来模拟 LNG 在障碍物影响下的扩散情况,同时还设置了一个宽 $22.0\ \text{m}$ 、高 $13.7\ \text{m}$ 的障碍物,并在下风处设置了3列浓度探测装置用来测量 LNG 泄漏过程中气体浓度的分布情况。

1) Falcon-1 号试验的风速为 $1.7\ \text{m/s}$,环境温度为 $32.8\ ^\circ\text{C}$,泄漏速率为 $28.7\ \text{m}^3/\text{min}$ 。Falcon-1 号试验布置情况见图3和图4,基于 ICEM CFD 建立的 Falcon-1 号试验几何模型和网格划分情况见图5。

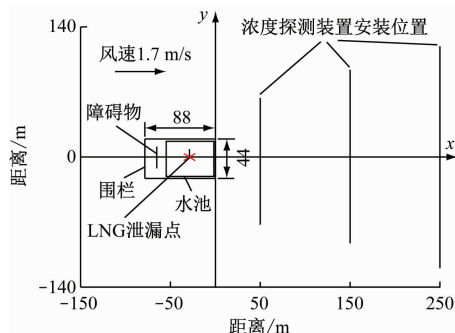


图3 Falcon-1号试验布置情况(单位:m)

Fig. 3 On-site setup of Falcon-1 test (unit: m)

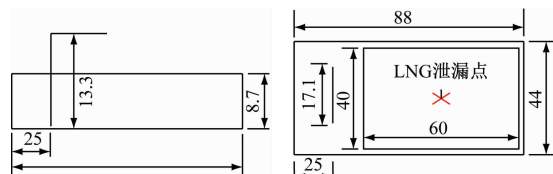


图4 水池及围栏尺度设置情况(单位:m)

Fig. 4 Pool and containment scale configuration (unit: m)

2) Phoenix 试验在一个直径约 $120.0\ \text{m}$ 、水深约 $2.0\ \text{m}$ 的水池中进行,泄漏孔的有效直径为 $0.381\ \text{m}$,在水池4个方位设置有1~3号测量塔,装载有13个温度探测器和4组辐射计,包括窄角辐射计和广角辐射计2种,目的是对燃烧过程中温度和热通

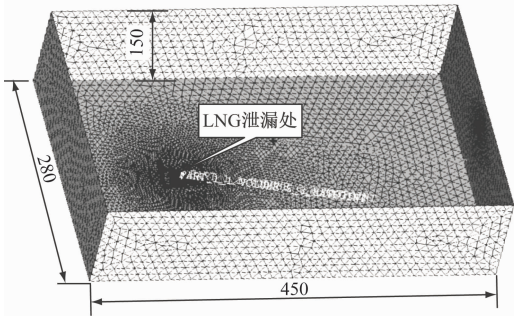


图5 Falcon-1号试验几何模型和网格划分情况(单位:m)
Fig. 5 Geometric model and meshing of Falcon-1 test (unit: m)

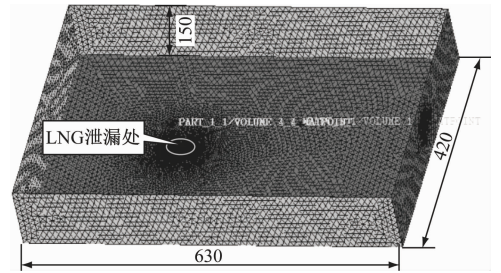


图7 Phoenix-1号试验几何模型和计算网格(单位:m)
Fig. 7 Geometric model and computational grid of Phoenix-1 test (unit: m)

量的变化进行测量,其中 Phoenix-1 号试验的风速为 4.8 m/s,环境温度为 4 ℃,泄漏速率为 50.8 kg/s。Phoenix-1 号试验布置情况见图 6,基于 ICEM CFD 建立的 Phoenix-1 号试验几何模型和计算网格见图 7。

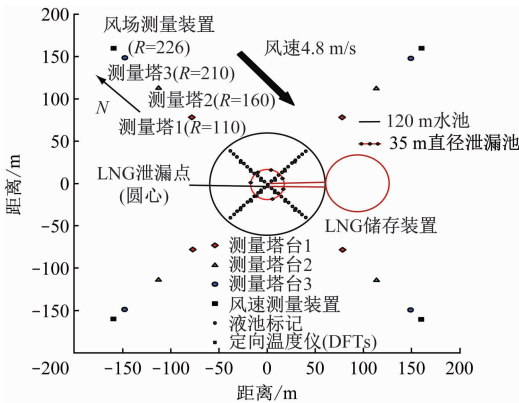


图6 Phoenix-1号试验布置情况(单位:m)
Fig. 6 On-site setup of Phoenix-1 test (unit: m)

3.2 网格划分

本文采用网格无关性验证对计算网格的尺寸进行选择。对于 Falcon-1 号扩散试验和 Phoenix-1 号试验分别使用 6 种尺寸对计算域的几何模型进行划

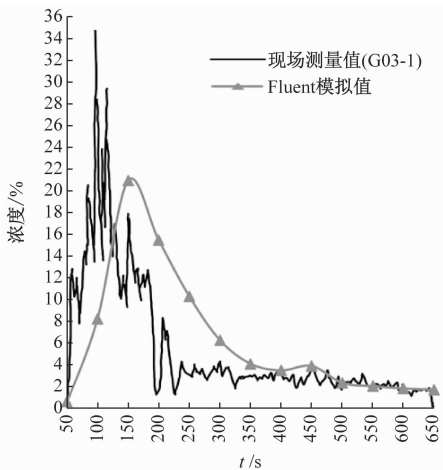
分,得到网格数量为 45 万、92 万、156 万、310 万、520 万和 890 万的划分结果。以静风状态下 LNG 发生泄漏燃烧这一现象进行模拟,对使用不同网格计算时出口处的温度值进行测量。通过计算结果可发现,当网格数量达到约 310 万时,再往上增加网格数量,出口处的温度变化在 5% 以内,且计算效率降低。因此,最终选取约 300 万的网格数量所对应的网格尺寸。

3.3 模拟结果

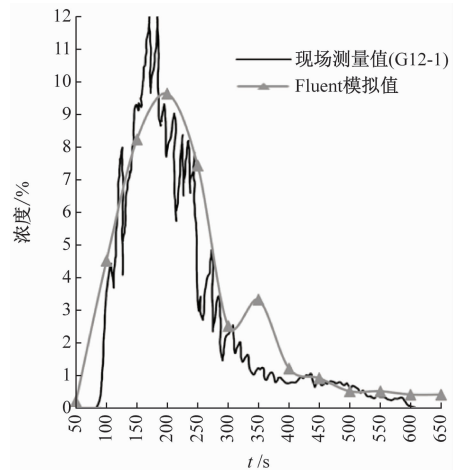
3.3.1 Falcon 扩散试验模拟

利用 Fluent 对 Falcon-1 号试验在相同试验条件下进行模拟,对于模拟 LNG 扩散而言,主要是衡量下风向 LNG 可燃气体浓度的模拟值与测量值的误差。根据 Falcon 试验报告结果,选取其中 G03-1 点坐标为(50, -22, 1)、G12-1 点坐标为(50, 25, 1)、G16-5 点坐标为(250, -56, 5)和 G17-5 点坐标为(250, -28, 5)^[22] 4 个点处可燃气体体积浓度测量值与 Fluent 模拟值的对比情况见图 8。

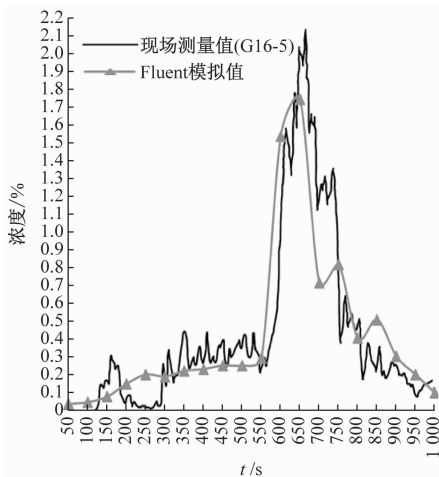
由图 8 可知:模拟值峰值较测量值小约 15% 如图 8a 所示,模拟值峰值较测量值小约 3% 如图 8b 所示,模拟值峰值较测量值小约 5% 如图 8c 所示,模拟值峰值较测量值小约 4% 如图 8d 所示,Fluent



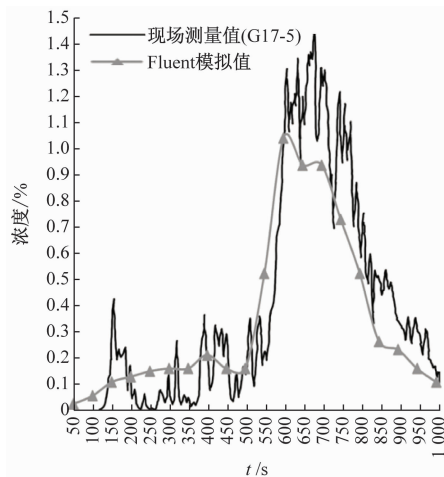
(a) G03-1 点



(b) G12-1 点



(c) G16-5点



(d) G17-5点

图8 可燃气体体积浓度测量值与Fluent模拟值的对比情况

Fig. 8 Comparison between the measured value of the flammable gas cloud volume concentration and the Fluent simulation value

模拟的最大值较测量的最大值均偏小,且与现场测量值相比,部分Fluent模拟值与测量点的数据存在一定的滞后,是因为在泄漏扩散过程中,与LNG进行热交换的有太阳辐射、空气对流传热和水面传热,由于在模拟仿真中只考虑到与接触面的热交换,没有考虑与空气和太阳辐射的换热,但此时LNG蒸发量较少产生的误差较小,不会对模型的准确性造成影响。总体来看,气云浓度的模拟值与现场试验测量值的吻合程度较好。

3.3.2 Phoenix 燃烧试验模拟

利用Fluent软件在相同试验条件下对Phoenix-1号试验进行模拟,对于LNG燃烧的模拟而言,主要是衡量火焰温度及表面辐射率的模拟值与测量值的误差。根据Phoenix-1试验数据,火焰表面平均温度的模拟值与测量值的对比情况见表1。由表1可知:看到选取的4个时间点^[23]下模拟值和测量值的误差均在10%以内,平均误差为4.68%。

表1 火焰表面平均温度模拟值与测量值的对比情况

Tab. 1 Comparison of simulated and measured flame surface temperature

时间/s	模拟值/°C	测量值/°C	误差/%
322	1 288	1 197	7.60
350	1 305	1 354	3.62
382	1 351	1 289	4.81
468	1 278	1 209	5.71
平均值	1 301	1 262	4.68

在火焰表面辐射率模拟上,选取现场试验中正东和正南方向的窄角和广角辐射计的测量情况与Fluent模拟值进行拟合见图9。由图9可知:表面辐

射率的Fluent模拟值与现场测量值的走势较为一致,且与广角辐射计的测量结果吻合程度较高,这也说明Fluent在模拟LNG燃烧过程中所具有的适用性。

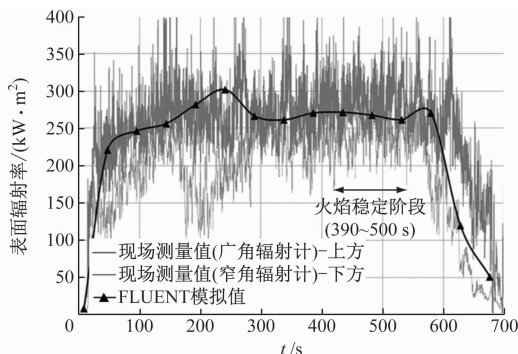


图9 火焰表面辐射率的测量值和模拟值的拟合情况

Fig. 9 Fitting of measured and simulated values of flame surface emissivity

4 模型有效性评价

根据上述Fluent的计算结果,将Fluent的模拟值与现场测量值进行统计偏差分析,结合模型有效性评价标准,对模型有效性进行判断, B_F 、 G_M 、 G_V 、 S_{MRE} 、 S_{NME} 和FAC2值的计算情况见表2。

综上所述,当使用Fluent软件进行LNG水上泄漏扩散和燃烧模拟时,各定量评价统计指标 B_F 、 G_M 、 G_V 、 S_{MRE} 、 S_{NME} 和FAC2的取值均能满足模拟有效性评价标准的要求。因此,本文所提出的在考虑LNG与水面剧烈传热现象的前提下,利用基于Fluent平台构建的LNG水上泄漏水面传热模拟模型来计算LNG水上泄漏后果是准确有效的。

表2 模拟值与现场测量值的统计偏差计算情况

Tab.2 Calculation of statistical deviation between simulated value and field measured value

系列	B_F	G_M	G_V	S_{MRE}	S_{NME}	FAC2
Falcon	-0.30	0.74	1.26	0.22	0.29	1.00
Phoenix	0.32	1.39	1.12	0.41	0.11	1.00
均值	-0.07	0.95	1.09	0.09	0.11	1.00
有效性评价标准	-0.40 ~ 0.40	0.67 ~ 1.50	<3.30	-0.50 ~ 0.50	<2.30	>0.50
是否符合	是	是	是	是	是	是

5 结束语

为提高 LNG 水上泄漏后果模拟的准确性,本文在考虑 LNG 与水面剧烈传热现象的前提下,基于 Fluent 平台构建一种 LNG 水上泄漏水面传热模拟模型,同时,为验证该方法的有效性,在耦合 LNG 泄漏扩散、燃烧等模型的基础上,通过对现有的 LNG 泄漏试验进行筛选,选取适应度高的 Falcon-1 号试验和 Phoenix-1 号试验数据集,并引入统计学参数作为定量评价指标,对该模型进行有效性评价。评价结果显示,各定量评价统计指标的取值均能满足模型有效性评价标准的要求,该模型未来可有效应用于 LNG 水上泄漏后果仿真模拟中,对 LNG 燃料在内河的推广应用具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] PALTRINIERI N, TUGNOLI A, COZZANI V. Hazard identification for innovative LNG regasification technologies [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 137:18-28.
- [2] 刘君军. LNG 储罐事故的危害及应急处置研究[J]. 化工安全与环境, 2023, 36(5): 73-75.
- LIU J J. Research on the hazards and emergency response of LNG tank accidents [J]. Chemical Safety and Environment, 2023, 36 (5): 73-75. (in Chinese)
- [3] HORVAT A. CFD methodology for simulation of LNG spills and rapid phase transition [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2018, 120: 358-369
- [4] 李兆慈, 张文花, 郑梅, 等. LNG 连续泄漏扩散过程模拟 [J]. 化工学报, 2015, 66(增刊2): 158-165.
- LI Z C, ZHANG W H, ZHENG M, et al. LNG continuous leakage and diffusion process simulation [J]. CIESC Journal, 2015, 66 (Suppl. 2): 158-165. (in Chinese)
- [5] HISSONG D W. Keys to modeling LNG spills on water [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 140 (3): 465-477.
- [6] 李成兵, 王亚洲, 李春兴, 等. 基于通用 CFD 软件的 LNG 液池泄漏蒸发模型研究 [J]. 安全与环境学报,

2020, 20 (6): 2286-2294.

LI C B, WANG Y Z, LI C X, et al. On the model for the pool spill and evaporation of LNG for the Computation Fluid Dynamics (CFD) [J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(6): 2286-2294. (in Chinese)

- [7] 杨云. 气化站中 LNG 泄漏扩散的数值模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- YANG Y. Numerical simulation study on LNG leakage and diffusion in gasification stations [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [8] HANNA S R, CHANG J C, STRIMAITIS D G. Hazardous gas model evaluation with field observations [J]. Atmospheric Environment Part A: General Topics, 1993, 27(15): 2265-2285.
- [9] SKLAVOUNOS S, RIGAS F. Simulation of coyote series trials-part I: CFD estimation of non-isothermal LNG releases and comparison with box-model predictions [J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61 (5): 1434-1443.
- [10] 庄学强. 大型液化天然气储罐泄漏扩散数值模拟 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- ZHUANG X Q. Numerical simulation of leakage and diffusion in large liquefied natural gas storage tanks [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [11] 杨兆晶, 侯磊, 朱森. 某大型 LNG 储罐泄漏扩散及其影响因素研究 [J]. 天然气与石油, 2020, 38 (1): 47-53.
- YANG Z J, HOU L, ZHU M. Study on leakage diffusion and its influencing factors in a large LNG storage tank [J]. Natural Gas and Petroleum, 2020, 38(1): 47-53. (in Chinese)
- [12] 周宁, 张倩, 李雪, 等. 风速对 LNG 泄漏扩散过程影响的数值模拟 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21 (1): 285-294.
- ZHOU N, ZHANG Q, LI X, et al. Numerical simulation of the effect of wind speed on the dispersion process of LNG leakage [J]. Journal of Safety and

- Environment, 2021, 21(1): 285-294. (in Chinese)
- [13] BETTERIDGE S. Modelling large LNG pool fires on water[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 56:46-56.
- [14] GOPALASWAMI N, KAKOSIMOS K, ZHANG B, et al. Experimental and numerical study of Liquefied Natural Gas (LNG) pool spreading and vaporization on water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 334: 244-255.
- [15] WOODWARD J L, PITBLADO R M. LNG pool fire modeling [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2010.
- [16] MOOSEMILLER M. Development of algorithms for predicting ignition probabilities and explosion frequencies [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24(3):259-265.
- [17] Sagaut P. Large eddy simulation for incompressible flows. An introduction [J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(10):1745-1746.
- [18] CARISSIMO B, JAGGER S F, DAISH N C, et al. The SMEDIS database and validation exercise [J]. International Journal of Environment and Pollution, 2001, 16(1-6): 614-629.
- [19] IVINGS M J, LEA C J, WEABBER D M, et al. A protocol for the evaluation of LNG vapour dispersion models[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(1): 153-163.
- [20] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E, et al. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [21] 张彬,于桂峰,吴宛青,等.液化天然气泄漏扩散数值模拟[J].大连海事大学学报,2013,39(2):99-102.
- ZHANG B, YU G F, WU W Q, et al. Numerical simulation on LNG spilling and dispersion[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2013, 39(2): 99-102. (in Chinese)
- [22] BROWN T C, CEDERWALL R T, CHAN S T, et al. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials [R]. Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), Livermore, CA (United States), 1990.
- [23] SIMPSON R B, JENSEN R P, DEMOSTHENOUS B, et al. The phoenix series large scale LNG pool fire experiments[R]. Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), 2010.

(上接第 117 页)

- [17] 李东东,朱钱唯,程云志,等.基于自适应惯量阻尼综合控制算法的虚拟同步发电机控制策略[J].电力自动化设备,2017,37(11): 72-77.
- LI D D, ZHU Q W, CHENG Y Z, et al. Control strategy of virtual synchronous generator based on self-adaptive rotor inertia and damping combination control algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 72-77. (in Chinese)
- [18] 邱姣姣,任碧莹,刘欢,等.基于VSG双机并联系统的参数自调节优化控制策略[C]//中国电工技术学会.2018第十二届中国电工装备创新发展论坛暨第八届电工技术前沿问题学术论坛,2018.
- QIU J J, REN B Y, LIU H, et al. Parameter self-adjusting optimization control strategy based on double VSGs parallel system [C]//China Electrotechnical Society. 2018 The 12th China Electrical Equipment Innovation and Development Forum and the 8th Academic Forum on Frontier Issues in Electrical Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] 李志军,杨梦伟,张家安,等.VSG惯量及阻尼的协同自适应控制研究[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(1): 36-43.
- LI Z J, YANG M W, ZHANG J A, et al. Research on synergistic adaptive control of inertia and damping of VSG [J]. Proceedings of The CSU-EPSA, 2023, 35(1): 36-43. (in Chinese)