

环境因素对液氧泄漏扩散过程影响的数值研究

余海帅¹, 蒲亮^{1,2}, 高强³, 孙若凡¹, 代明昊¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 航天低温推进剂技术国家重点实验室, 100028, 北京; 3. 西安航天动力实验技术研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对低温液氧推进剂在运输、储存、加注过程中可能发生泄漏的问题,开展了数值模拟研究。采用 Mixture 多相流模型,考虑气液两相间的滑移速度和水蒸气的相变,对液氧泄漏后地面液池、氧气浓度场和温度场的变化过程,以及环境温度、大气压力、风速等因素对液氧泄漏扩散过程的影响规律进行了研究。结果表明:液氧泄漏约 35 s 后,流场达到准稳定状态,液池、温度场、浓度场的分布基本不变;环境温度从 278 K 升高到 308 K 时,促进了液氧吸热蒸发的过程,地面附近最大氧气体积分数从 44.71% 升高到 47.1%;风速从 0 m/s 增加到 10 m/s 时,加快了氧气团稀释扩散的速度,低温伤害范围从 175.4 m² 缩小到 32.81 m²,危险浓度区域从 257.0 m² 缩小到 50.70 m²;大气压力从 0.09 MPa 升高到 0.1 MPa 时,低温伤害范围最远距离从 26.5 m 缩短到 20.05 m,危险浓度区域最远距离从 38.81 m 缩短到 30.82 m;大气相对湿度从 20% 提高到 100% 时,抑制了氧气团的稀释扩散,危险浓度区域最远距离从 37.67 m 增加到 39.24 m。此项研究对后续液氧试验的开展提供了理论支撑,对液氧泄漏事故的应急处理具有指导意义。

关键词: 液氧泄漏;扩散规律;低温推进剂;安全性分析

中图分类号: V555.1 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtubx202108015 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0119-11



OSID 码

Numerical Study on the Influence of Environmental Factors on the Diffusion Process of Liquid Oxygen Leakage

YU Haishuai¹, PU Liang^{1,2}, GAO Qiang³, SUN Ruofan¹, DAI Minghao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Technologies in Space Cryogenics Propellants, Beijing 100028, China;

3. Xi'an Aerospace Power Experimental Technology Institute, Xi'an 710049, China)

Abstract: A numerical simulation study is carried out to investigate the leakage problem of cryogenic liquid oxygen propellant in the process of transportation, storage and filling. The slip velocity of gas-liquid two phases and the phase transformation of water vapor is considered and the mixture multiphase flow model is used to study the change process of the ground liquid tank, oxygen concentration field and temperature field after the liquid oxygen leakage, as well as the influence of environmental temperature, atmospheric pressure, wind speed and other factors on the liquid oxygen leakage and diffusion process. After the leakage of liquid oxygen for about 35 s, the flow field reaches a quasi-stable state, and the distribution of liquid pool, temperature field and concentration field are basically unchanged. The increase of ambient temperature from 278 K to 308 K promotes the process of liquid oxygen endothermic evaporation, and the maximum

oxygen concentration near the ground increases from 44.71% to 47.1%. The increase of wind speed from 0 m/s to 10 m/s accelerates the dilution and diffusion speed of oxygen masses. The damage range of low temperature decreases from 175.4 m² to 32.81 m², and the dangerous concentration area decrease from 257.0 m² to 50.70 m². When the atmospheric pressure increases from 0.09 MPa to 0.1 MPa, the maximum distance of low temperature damage range decreases from 26.5 m to 20.05 m, and the maximum distance of dangerous concentration area decreases from 38.81 m to 30.82 m. When the relative humidity of the atmosphere increases from 20% to 100%, the dilution and diffusion of oxygen clusters are inhibited, and the longest distance of the dangerous concentration area increases from 37.67 m to 39.24 m. The research results of this paper provide theoretical support for the subsequent development of liquid oxygen leakage tests, and have guiding significance for the emergency treatment of liquid oxygen leakage accidents.

Keywords: liquid oxygen leakage; diffusion law; cryogenic propellant; safety analysis

作为运载火箭的动力来源,液氢/液氧、液态甲烷/液氧组合推进剂具有效率高、绿色环保、经济性好的特点,并且可以把更多的有效载荷送入轨道^[1],已成为国内外新一代主力运载火箭的主要推进剂^[2]。尽管液氢、液态甲烷与液氧组成的推进剂组合与传统推进剂相比危害较小,但三者都是低温液体,一旦在环境中泄漏将发生剧烈蒸发,因此在推进剂的运输、存放、加注过程中存在安全隐患。未来,低温推进剂将在航天领域得到大规模的应用,因此对液氢、液态甲烷、液氧泄漏后的危害性进行研究,具有现实意义。

液氢和液态甲烷易燃易爆,危险性大。1980年美国国家航空航天局开展了系列液氢泄漏实验,研究了液氢储罐快速爆裂后的危险性^[3]。2010年,英国健康安全实验室针对液氢转注时软管失效引起的安全问题,在山谷中进行了小流量的液氢泄漏实验^[4-5]。之后对于液氢、液态甲烷泄漏扩散的研究主要以数值模拟为主,Giannissi等人分析了环境湿度和相间速度滑移对氢气和甲烷蒸汽扩散的作用,发现考虑环境湿度和相间滑移更符合实验结果^[6-7]。Shao等基于构建的液氢泄漏扩散三维瞬态数值模型,同样考虑速度滑移的作用,研究了可燃云团在大气中的运动扩散过程和季节、风速、大气压力对液氢泄漏可燃云的影响^[8-9]。Jin等分析了液氢泄漏扩散过程中风温、风速、地面温度等环境因素的影响规律^[10]。唐鑫基于英国健康安全实验室的液氢泄漏实验,建立模型研究了泄漏流量和高度对氢气浓度场和温度场分布的影响^[11]。Wu从单个粒子和粒子群的视角研究了液氢初始阶段的相变过程^[12]。Liu研究了氢源周围堤坝的存在对氢气团扩散的影响^[13]。研究人员在液氢和液态甲烷泄漏扩散研究上

已经做了大量工作,并且得到了很多具有指导意义的结论。Tolias在前人的研究基础上提出了氢安全应用数值模拟和CFD基准测试中的最佳实践准则^[14]。

低温液氧的泄漏会对人体和金属材料造成低温伤害,引起人的皮肤或其他组织冻伤,降低金属材料的性能。同时,氧气具有强烈的助燃作用,与氢气、甲烷等易燃气体混合极易引发火灾甚至爆炸,可能造成严重的人员伤亡和财产损失^[15]。但是,国内外学者对液氧泄漏扩散安全性的关注很少,相关研究几乎为零。前人针对液氢、液态甲烷泄漏扩散的研究表明,环境因素对气云扩散具有重要的影响,因此本文针对开放空间液氧泄漏问题建立低温推进剂泄漏扩散的三维瞬态模型,探究推进剂泄漏和云团扩散的宏观特性,以及环境温度、大气压力、风速等因素对泄漏扩散过程的影响规律,以期液氧泄漏试验的开展和事故的应急处理提供理论支持。

1 模型建立

1.1 物理模型

经过前期多次试算,在不影响计算结果的前提下,决定选取60 m×50 m×3 m的空间区域进行计算。为了减少计算量,以Z=0 m平面为对称面,只对一半的空间进行计算,并选择结构化网格对其离散。泄漏口位于(10,1,0) m处,直径为106 mm,液氧沿X轴方向水平流出。

由于泄漏口尺寸小,且周围流体运动较为复杂,因此将计算流域分为近场区域和远场区域两部分,两部分之间用interface面进行连接,对近场网格进行加密,使网格质量和数量都满足需要。全局最小网格尺寸为0.01 m,水平和竖直方向最大尺寸分别为1 m和0.3 m,相邻网格放大系数不超过1.2。计

算域网格划分和边界条件设置如图 1 所示,其中 $Y=0$ 平面为水平混凝土地面,设置为无滑移壁面,具有 10 m 厚度,且厚度 10 m 处温度为 298 K,材料选择 C30 混凝土。

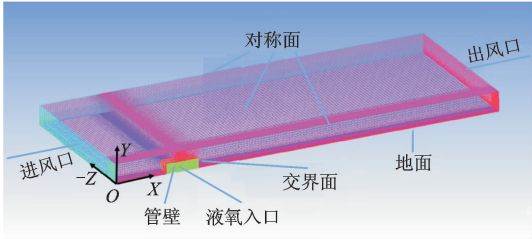


图 1 计算域与边界条件设置

Fig. 1 Computational domain and boundary conditions

1.2 数学模型

由于液氧泄漏后蒸发的氧气具有较大范围的分布,气液两相的曳力规律不清晰,因此本文选用 Mixture 多相流模型。考虑到两相速度滑移与实际结果更为相符,故选择 slip velocity 选项。液相为液氧,气相为氧气、氮气和水蒸气的混合物,相变传质系数取 1。液氧泄漏扩散过程涉及的液相体积分数方程、相间滑移速度方程、组分输运方程、蒸发冷凝模型^[16]如下。

液相体积分数方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p u_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p u_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (1)$$

式中: α_p 、 α_q 分别为液相、气相的体积分数; α_l 、 α_v 分别为液相、气相中某一组成的体积分数; ρ_p 、 ρ_q 、 ρ_m 分别为液相密度、气相密度和混合相密度; u_q 、 u_m 、 $u_{dr,p}$ 、 u_{pq} 分别为气相速度、混合相速度、液相的漂移速度和滑移速度; $\dot{m}_{qp}$ 、 $\dot{m}_{pq}$ 、 $\dot{m}_{p_j q_i}$ 、 $\dot{m}_{q_i p_j}$ 分别为气相向液相传递的质量、液相向气相传递的质量、由液相中第 j 组分向气相中第 i 组分传递的质量和由气相中第 i 组分向液相中第 j 组分传递的质量; t 、 α 、 J 分别为时间、液相加速度和扩散通量; T_l 、 T_v 、 T_{sat} 分别为液相温度、气相温度和饱和温度。

相间滑移速度方程

$$u_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \alpha \quad (2)$$

组分输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q Y_{q_i}) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q u_q Y_{q_i}) = -\nabla \cdot (\alpha_q J) + (\dot{m}_{p_j q_i} - \dot{m}_{q_i p_j}) \quad (3)$$

蒸发冷凝模型

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{l \rightarrow v} &= c \alpha_l \rho_l (T_l - T_{sat}) / T_{sat}, & T_l > T_{sat} \\ \dot{m}_{v \rightarrow l} &= c \alpha_v \rho_v (T_v - T_{sat}) / T_{sat}, & T_v < T_{sat} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: f_{drag} 、 p 、 Y_{q_i} 分别为曳力系数、压力、 q 相中第 i 种组分的质量分数; c 、 μ_m 、 τ_p 分别为蒸发冷凝系数、混合物黏度、 p 相颗粒的弛豫时间; $\dot{m}_{l \rightarrow v}$ 、 $\dot{m}_{v \rightarrow l}$ 分别代表液相至气相、气相至液相传递的质量。

1.3 模型设置

采用 FLUENT 2020R1 开展数值模拟,由于需要对液氧泄漏和扩散的整个过程进行模拟分析,所以需要求解瞬态问题,故压力速度耦合选用 PISO 算法。在进行液氧泄漏扩散的计算之前,需要首先计算非稳态的风场作为非稳态泄漏扩散计算的初始条件,以提高计算精确度。压力离散格式选择 Body Forced Weighted,其余项均选择 QUICK 格式。时间步长随着计算进行逐渐从 0.000 1 s 增加到 0.005 s,收敛判据为 1×10^{-3} 。

1.4 网格无关性和模型验证

在液氧泄漏扩散模型的网格划分中,本文选择 3 种数量(520 198、622 492、712 936)的网格,并选取计算域中 6 个位置处的氧气体积分数、温度进行比较。如图 2 所示,网格数为 622 492 和 712 936 时的计算结果差距最大仅为 0.1%,而网格数为 520 198 时的计算结果差距较大,因此可以认为当网格数达到 622 492 时,足够满足网格密度的需要。

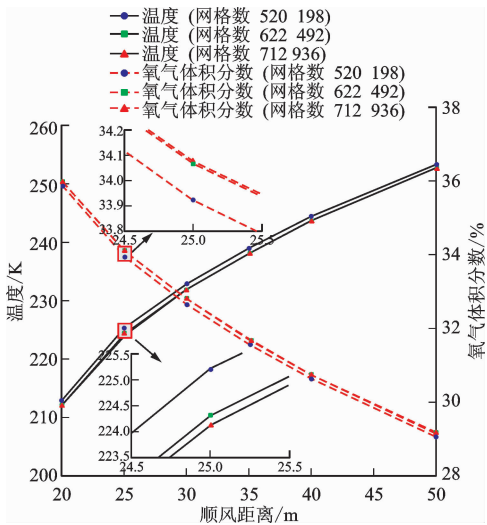


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence validation

目前,国内外鲜见液氧泄漏相关实验的公开报道,因此本文选用英国健康安全实验室的液氢泄漏实验 5^[17]来验证低温推进剂泄漏扩散模型的正确性。图 3、图 4 为使用本文建立的低温推进剂泄漏

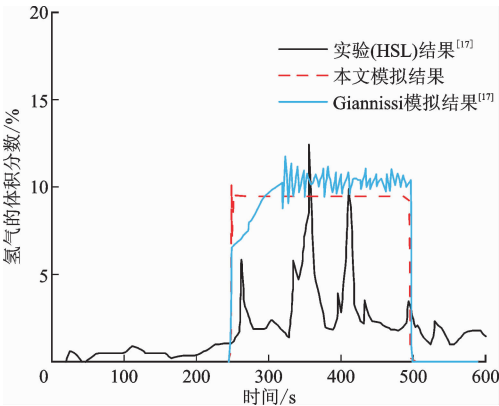


图 3 点(4.5,0.25) m 处模拟结果与实验结果对比
Fig. 3 A comparison of simulation and experimental results at point (4.5,0.25) m

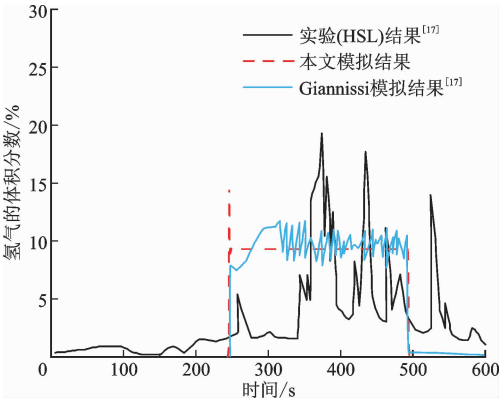


图 4 点(7.5,0.75) m 处模拟结果与实验结果对比
Fig. 4 A comparison of simulation and experimental results at point (7.5,0.75) m

扩散模型计算得到的对称面上两点的氢气体积分数与 Giannissi 通过 ADREA-HF 程序计算得到的结果^[17]、实验⁵结果的对比。图 5、图 6 为实验 5 氢气可视云团形态和本文模拟得到的氢气体积分数云图。考虑到实验中大气不稳定性、传感器误差的影响,认为本文模拟结果的平均氢气体积分数、最大氢气体积分数与英国健康安全实验室实验结果基本一致,且在点(4.5,0.25) m、(7.5,0.75) m 处的氢气体积分数与 Giannissi 等人的模拟结果相符合,可以说明本文所建立的低温推进剂泄漏扩散模型对模拟液氢泄漏扩散具有一定的适用性。唐鑫等建立了相似的低温推进剂泄漏扩散模型对液氢、液氧低温推进剂的扩散特性进行了模拟研究^[18],结果显示氢气云团在竖直方向和下风向扩散范围较大,而氧气团一直匍匐在地表,在水平地面上扩散范围较广,符合液氧、液氢泄漏扩散的宏观规律,说明本文建立的泄漏扩散模型可以用来模拟液氧的泄漏扩散。



图 5 液氢泄漏实验云团
Fig. 5 An experimental cloud of liquid hydrogen leakage

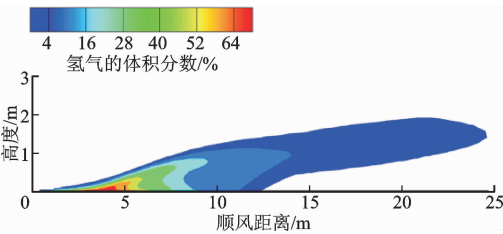


图 6 液氢泄漏模拟云团
Fig. 6 A simulation cloud of liquid hydrogen leakage

2 模拟结果与讨论

当外界温度在 233.16 K 以下时,现场设施和人体会受到低温危害^[19],当氧气体积分数高于 30% 时对可燃物具有明显的助燃作用^[20],因此将 233.16 K 和 30% 的氧气体积分数边界作为本文的危险判定标准,定义温度低于 233.16 K 的区域为低温区域,氧气体积分数高于 30% 的区域为高氧浓度区域。

2.1 液氧泄漏扩散过程

以风速 3 m/s、环境温度 298 K、大气压力 0.1 MPa、泄漏量 5 kg/s,顺风方向作为基本工况研究了液氧泄漏扩散过程。从液氧泄漏开始到危险区域达到准稳态需要约 35 s,如图 7 所示,可分为两个主要阶段:①第一阶段,液氧开始泄漏,在重力作用下到达地面向各个方向运动,形成液池,由于存在巨大的温差,液氧从地面和空气中吸收热量并剧烈蒸发;②第二阶段,氧气团继续从地面和空气中吸收热量,温度上升,并且在风的输送和掺混稀释作用下氧气浓度不断降低,直到温度和浓度都扩散出危险范围。

由于液氧泄漏存在初速度,导致顺风方向流动的液氧相比逆风方向的要多,但是顺风方向液氧流动的速度较快,并且不断向两侧扩展,分布的面积较大,单位面积上蒸发的液氧有限,导致氧气浓度与展向的高浓度区域相比相对较低。而逆风方向和侧向流动的液氧在风力的作用下,速度逐渐降低,方向改变,在展向形成一片液氧集聚区,并且在流动过程中与周围空气和地面不断交换热量,蒸发产生较高的氧气浓度,并显示出侧面“拉长”的叶状分叉特征。在

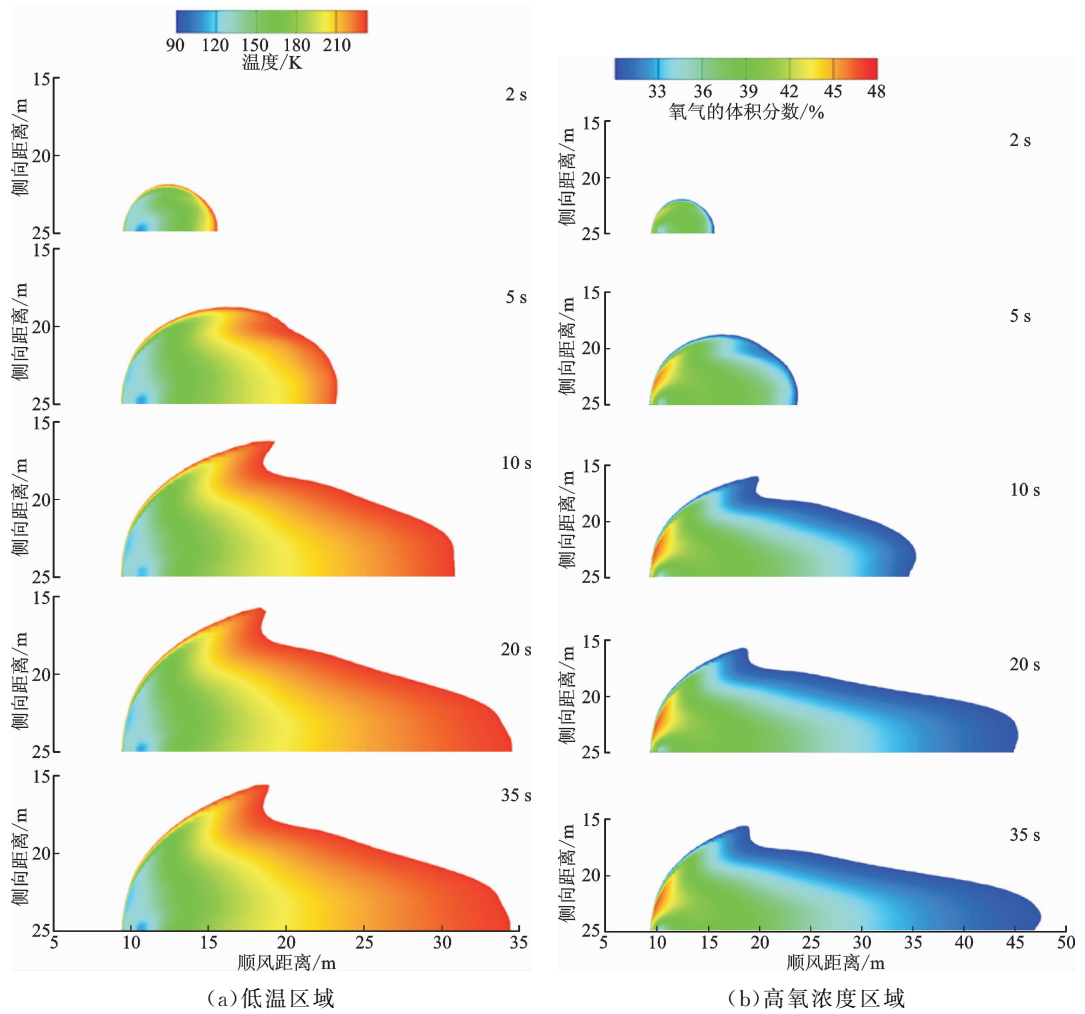


图 7 液氧泄漏过程中地面附近低温区域和高氧浓度区域变化
Fig. 7 The change process of dangerous zones during liquid oxygen leakage

泄漏源附近,液氧从周围环境吸收热量蒸发后,由于氧气团与空气掺混稀释有限,导致氧气团浓度较高的同时保持着较低的温度,因此在液氧泄漏扩散过程中,高氧浓度区域和低温区域在空间分布上具有一致性。

2.2 环境温度对数值模拟结果的影响

环境温度对液氧泄漏扩散过程具有重要的影响,常压下液氧的饱和温度仅为 90.062 K,一旦出现泄漏,液氧及氧气团将在巨大温差的作用下与空气和地面不断进行换热,使得液氧蒸发,氧气团与空气混合稀释,温度升高。为了分析环境温度对液氧泄漏扩散过程的影响,在模型中设置环境温度分别为 278、288、298、308 K,并重新计算泄漏过程。

如图 8 所示,随着环境温度的升高,环境与液氧、氧气团之间温差增大,换热增强,低温区域面积显著减小,从 251.3 m² 依次缩小到 188.7、143.4 和 110.3 m²,同时液氧蒸发速度加快,高浓度区域的面

积却出现增长,从 205.3 m² 依次增长到 217.3、225.8 和 232.5 m²,并且地面处氧气最大体积分数从 44.71% 依次增长到 45.68%、46.47% 和 47.10%。

在逆风方向,低温区域和高氧浓度区域的扩展距离随着环境温度的升高有所增加,如图 9、图 10 所示。这是由于在泄漏近场,温差是液氧蒸发和氧气扩散的主要动力,环境温度升高,温差增大,液氧蒸发速度加快,蒸发产生的氧气增多,低温氧气团与空气的掺混也更加强烈,导致低温区域和高氧浓度区域最远扩展距离增加。

但是由于决定逆风方向低温区域和高氧浓度区域扩展距离的主要因素是风,因此随着温度的继续升高,低温区域和高氧浓度区域在逆风方向的最远扩展距离并没有太大的变化。高浓度氧气团在顺风方向最远扩展距离随着温度升高而延长,从 33.6 m 依次增加到 36.2、37.5 和 38.1 m,因为在近场区域扩散的动力主要是温度差,而在远场区域扩散动力主

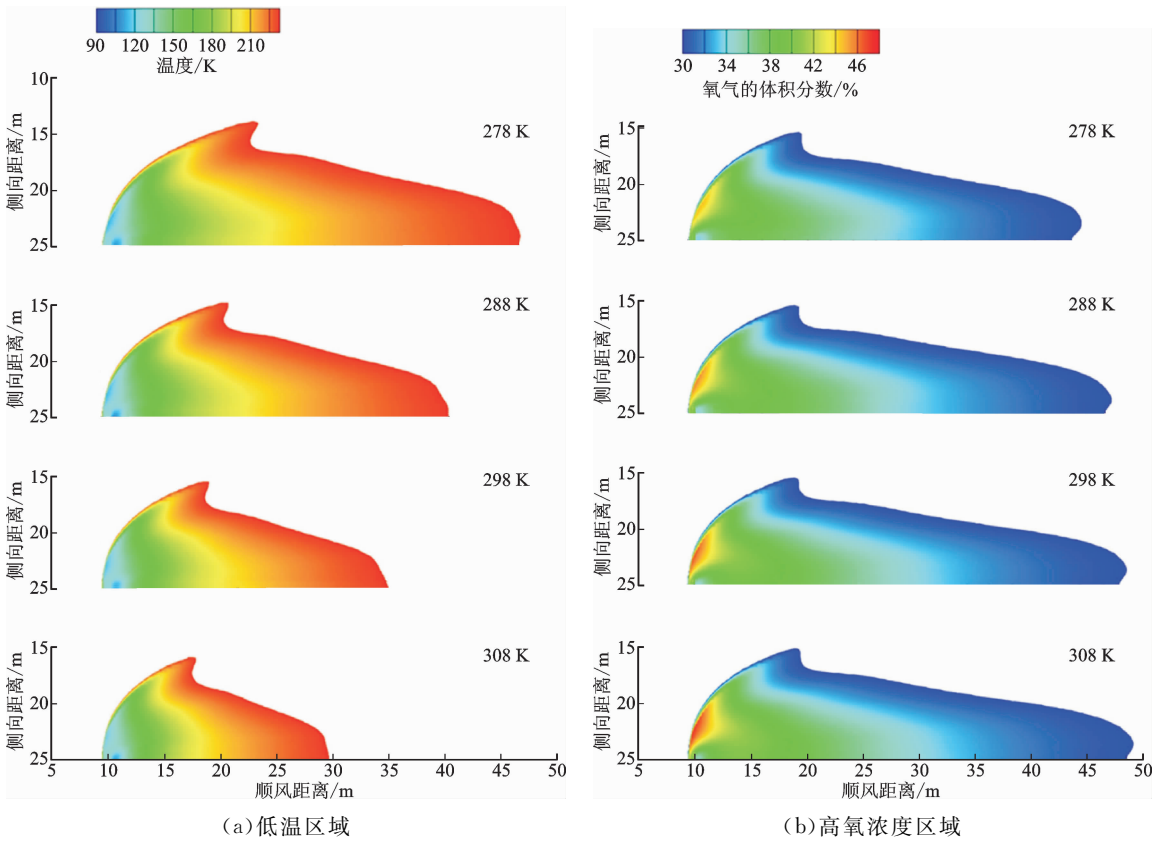


图 8 不同环境温度下地面上低温区域和高氧浓度区域
Fig. 8 Dangerous zones on the ground at different ambient temperatures

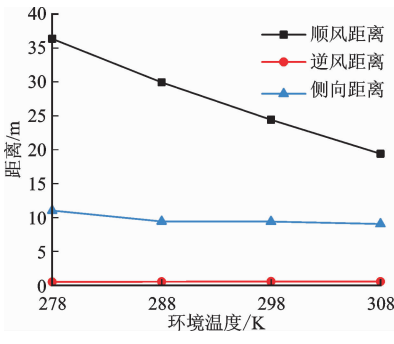


图 9 不同环境温度下低温区域的最远扩展距离
Fig. 9 The maximum expansion distance of the cryogenic zone at different ambient temperatures

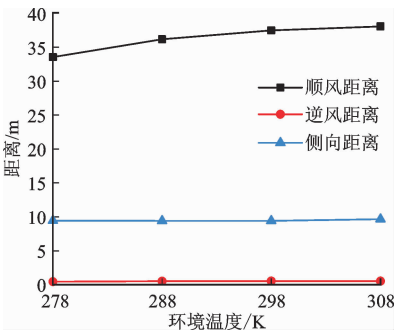


图 10 不同环境温度下高氧浓度区域最远扩展距离
Fig. 10 The maximum expansion distance of the high oxygen concentration zone at different ambient temperatures

要是氧气浓度差;随着温度从 278 K 增加到 308 K, 空气密度从 1.2538 kg/m^3 依次降低到 1.2101 、 1.1694 、 1.1314 kg/m^3 , 空气受到的浮力增大, 阻碍了氧气团的扩散, 导致浓度较高的氧气团扩散出高浓度范围所需要的时间和距离都增加。因此简单地提高温度并不是促进泄漏的液氧快速稀释扩散的有效方法。

2.3 风速对数值模拟结果的影响

风对氧气团的扩散作用有两个方面:一是输送

作用,二是混合稀释作用。为了探究风速对于大规模液氧泄漏扩散行为的影响,针对无风、微风、强风、疾风、狂风天气分别设置了 0、1、3、5 和 10 m/s 的风速条件。

如图 11 所示,无风时,氧气团在顺风、逆风和侧风方向自由扩散,需要约 80 s 达到准稳态。由于泄漏初速度的存在,在顺风方向上扩展距离较远,此时低温区域面积最大,达到 175.4 m^2 , 高氧浓度区域同样最大,达到 257.0 m^2 。随着风速从 0 m/s 增加

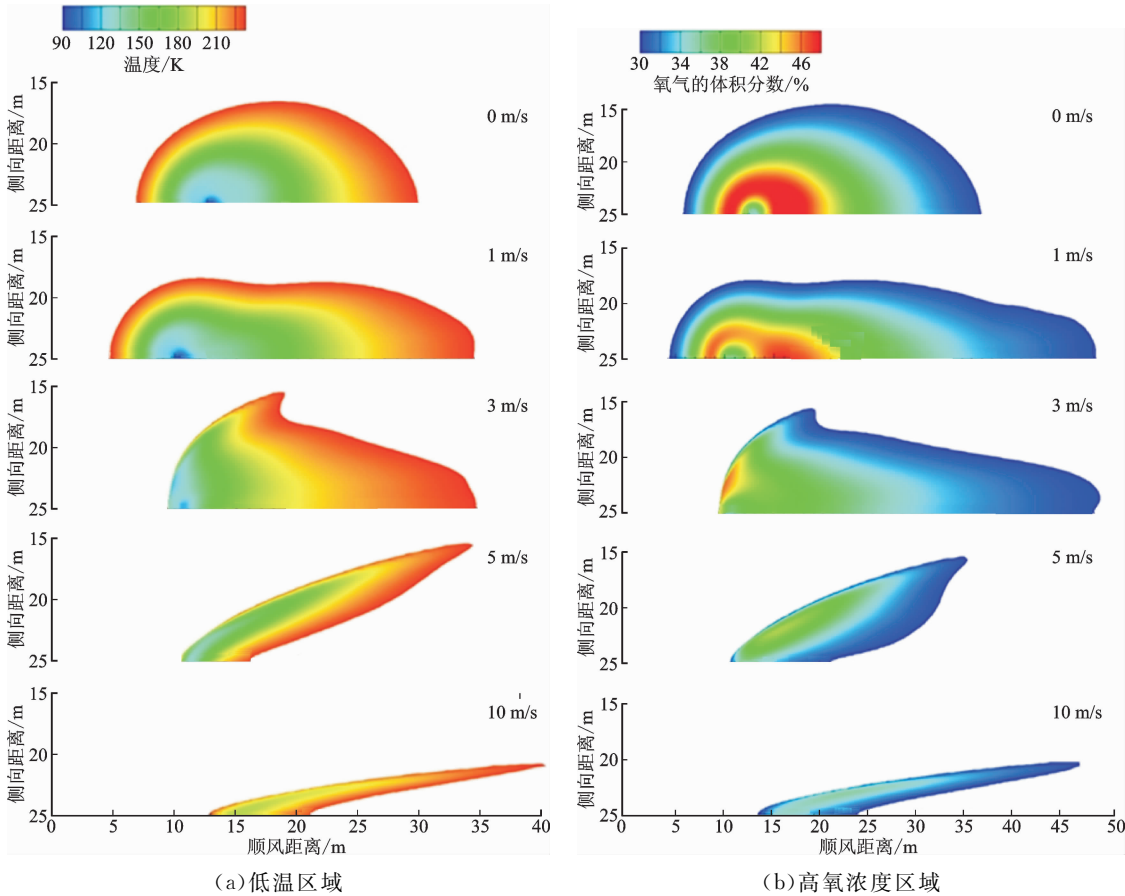


图 11 不同风速下低温区域和高氧浓度区域
Fig. 11 Dangerous zones on the ground at different wind speeds

到 10 m/s,低温区域面积减小到 32.81 m²,高氧浓度区域面积减小到 50.70 m²,因为风速增加,空气的脉动速度增大,湍流强度增大,导致低温云团和空气之间相互掺混增强,空气对氧气的携带能力增强,加快了氧气团的稀释扩散,同时增加的湍流强度也加速了氧气团与周围环境的热交换,加快了低温云团温度的上升,导致低温面积和高氧浓度区域面积减小。

如图 12、图 13 所示,当风速增加到 1 m/s 时,

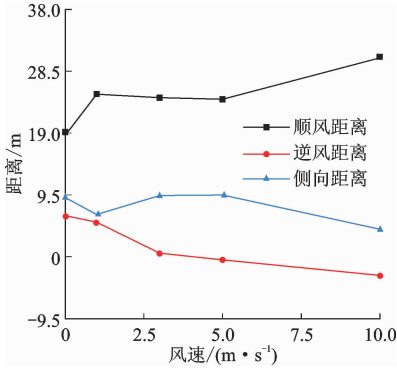


图 12 不同风速下低温区域的最远扩展距离
Fig. 12 The maximum expansion distance of the cryogenic zone at different ambient temperatures

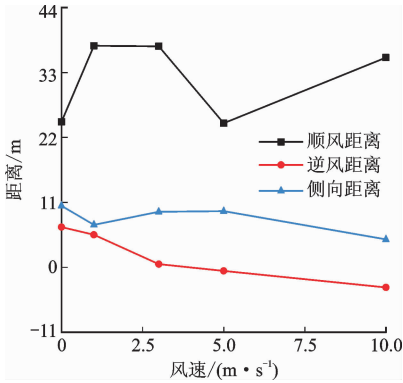


图 13 不同风速下高氧浓度区域最远扩展距离
Fig. 13 The maximum expansion distance of the high oxygen concentration zone at different ambient temperatures

风的携带作用使云团在顺风方向最远扩展距离增加,却抑制了逆风、侧风方向的运动。逆风方向的最远扩展距离随着风速增大持续缩短,当风速为 5 m/s 时,危险云团逆风方向边界已经到达泄漏口下方位置。而在顺风方向上,随着风速增大,对称面附近氧气团温度上升,浓度下降,并扩散出危险范围。同时,风速增加提高了气云下风向的漂移速度,促进了

侧向的低温高浓度氧气团向下游移动,使得侧向拉长区域在顺风方向和侧向最远扩展距离增大。可以看出,增加风速加速了泄漏液氧的稀释和扩散,故在发生液氧泄漏时,可以适宜采取增大风速的方式进行事故处置。

2.4 大气压力对数值模拟结果的影响

为了研究不同大气压力下液氧泄漏的扩散规律,本文选取 0.09、0.095、0.1、0.105 和 0.11 MPa 5 种工况进行研究。危险区域扩展距离如图 14、图 15

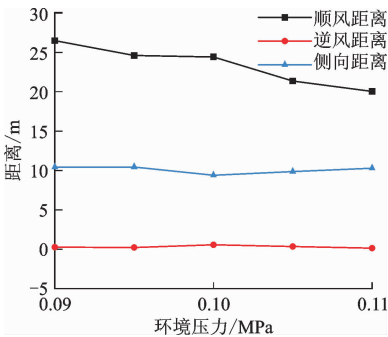


图 14 不同环境压力下低温区域的最远扩展距离
Fig. 14 The maximum expansion distance of the cryogenic zone at different atmospheric pressures

所示,危险区域分布如图 16 所示。可以看出,随着大气压力的增大,低温伤害最远距离从 26.5 m 缩短到 20.05 m,危险浓度区域最远距离从 38.81 m 缩短到 30.82 m。低温区域的面积从 166.3 m² 减小到 120.8 m²,高氧浓度区域的面积从 257.2 m² 减小到 193.5 m²,因为大气压力的提高增加了氧气和空气的密度,导致空气与氧气团向下沉,氧气团与周围空气之间相互作用增强,掺混增强,不断交换质量和传递热量,有利于低温氧气云团的快速扩散。

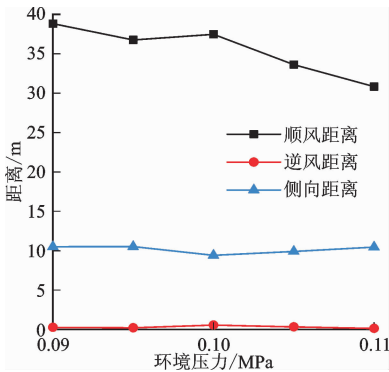
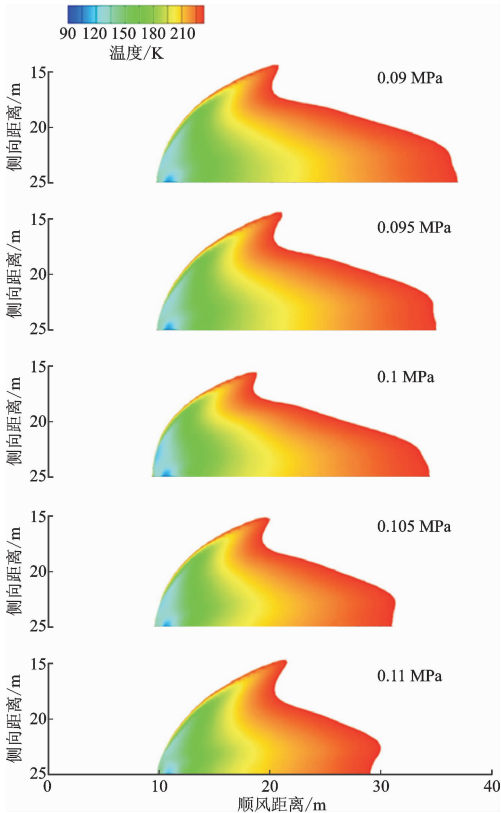
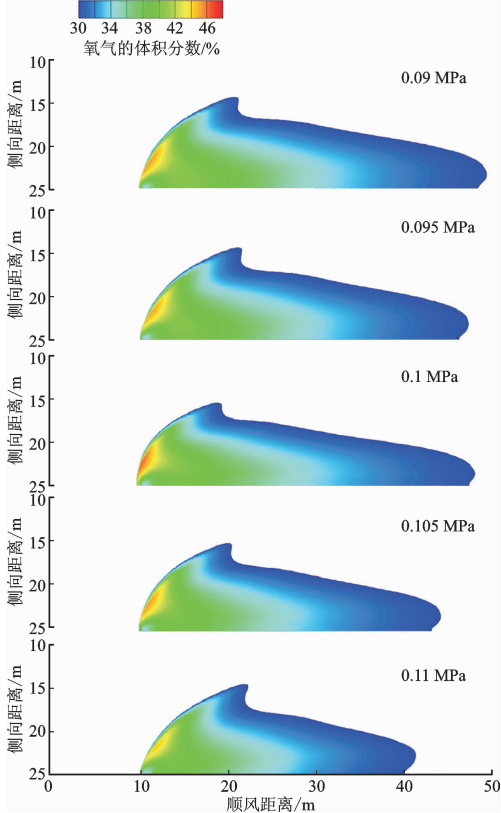


图 15 不同大气压力下高氧浓度区域最远扩展距离
Fig. 15 The maximum expansion distance of the high oxygen concentration zone at different atmospheric pressures



(a)低温区域



(b)高氧浓度区域

图 16 不同大气压力下低温区域和高氧浓度区域
Fig. 16 Dangerous zones on the ground at different atmospheric pressures

但在大气压力从 0.095 MPa 增加到 0.1 MPa 这个阶段,大气压力的增大导致空气和氧气的密度增大,氧气团分布范围的高度下降,从而使氧气团迎风面积减小,氧气团前缘受到空气施加的顺风方向的推动力减小,在云团前缘位置,氧气团与空气的相互作用减弱,导致危险云团侧风方向,最远扩展距离从 10.4 m 缩减到 9.4 m,但在逆风方向,最远扩展距离从 0.21 m 增加到 0.55 m。

在 0.1 MPa 到 0.11 MPa 这个阶段,压力增大导致气体密度增大重新占据了影响液氧泄漏扩散现象的主导地位,低温区域、高氧浓度区域的面积持续减小,各区域在顺风方向和逆风方向的最远扩展距离均减小。但在侧风方向上,由于风力作用的增强,风力推动云团向顺风方向运动,与增大风速的影响

相似,云团在侧向最远扩展距离增加。

2.5 大气相对湿度对数值模拟结果的影响

常压下液氧沸点很低,仅为 90.062 K,而空气中水蒸气的露点温度远远高于 90.062 K,水蒸气便会冷凝甚至凝固,释放的热量被氧气团吸收,此外液滴、固态水造成氧气团密度改变会影响氧气团的扩散特性,并且我国几个主要航天发射场地理环境不同,相对湿度存在较大差异,因此本节选择相对湿度为 20%、40%、60%、80%和 100% 5 个工况研究大气湿度对液氧泄漏扩散的影响规律。

如图 17 所示,随着大气相对湿度从 20% 逐渐增加到 100%,低温区域的面积从 122.0 m² 依次缩小到 100.8、86.7、75.9 和 67.1 m²,而高氧浓度区域面积从 231.9 m² 依次扩大到 235.8、243.7、250.9

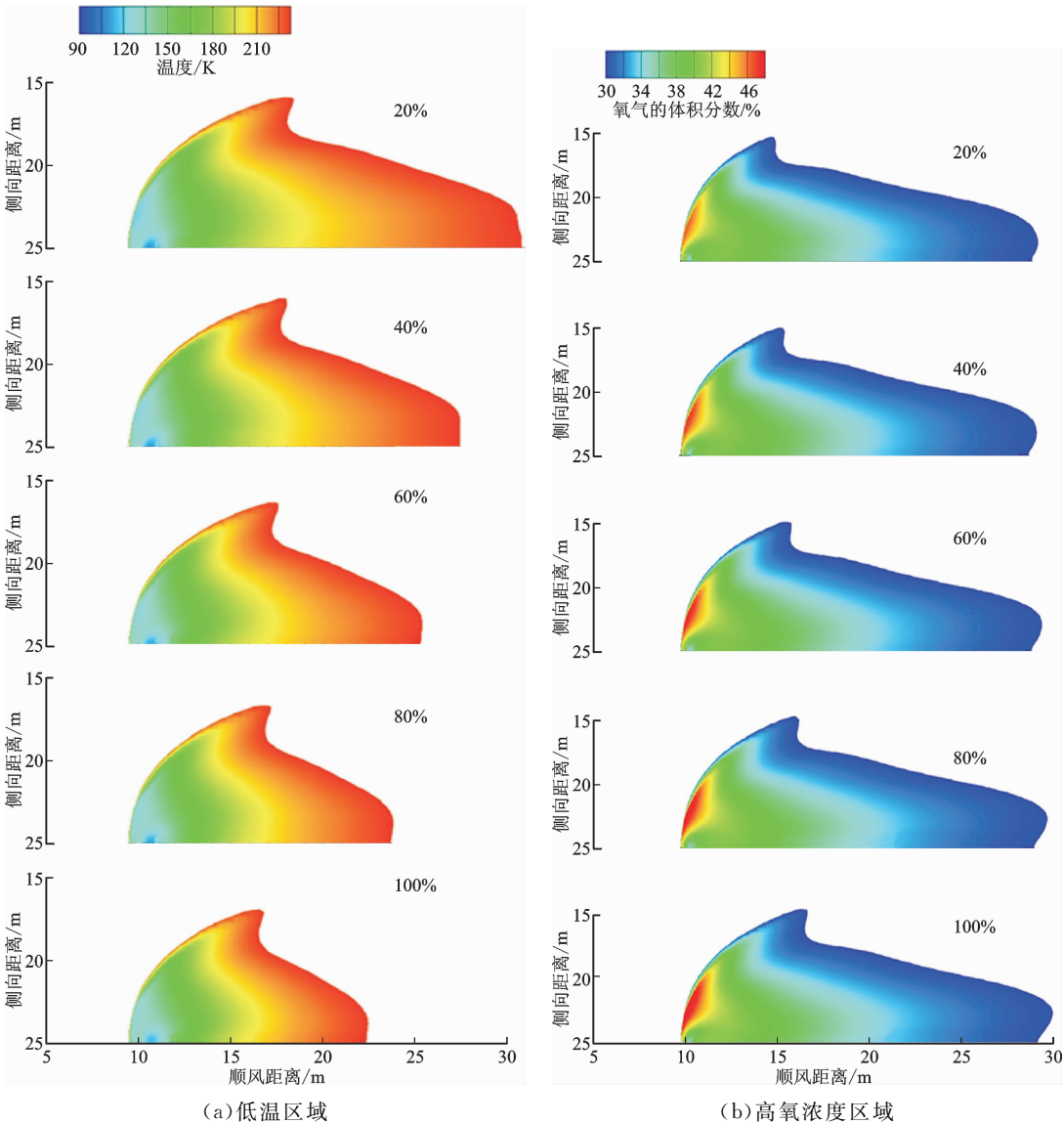


图 17 不同相对湿度下低温区域和高氧浓度区域

Fig. 17 Dangerous zones on the ground at different relative humidity

和 258.3 m^2 , 并且地面附近最高氧气体积分数也从 46.75% 依次增长到 47.53% 、 48.18% 、 48.80% 和 49.36% 。如图 18、图 19 所示, 低温区域在顺风 and 侧风方向最远扩展距离与面积变化一致, 随相对湿度增加, 扩展距离缩短, 高氧浓度区域在顺风方向和侧向的最远扩展距离小幅增大, 其中顺风方向最远距离从 37.67 m 增加到 39.24 m , 两个区域的逆风方向距离基本不变。空气低于露点温度, 水蒸气发生相变, 在冷凝甚至凝固的过程中放出热量, 虽然空气中水蒸气含量较低, 但是水的汽化潜热高达 2260 kJ/kg , 并且低于露点发生相变的范围很大。液氧和氧气团吸收热量后蒸发加快, 温度升高, 低温区域的分布范围缩小。但是氧气团温度升高导致氧气团与空气的温度差缩小, 掺混减弱, 并且水蒸气冷凝和凝固产生的液滴和固态水会导致氧气团密度增大, 空气受到的浮力增大, 抑制了氧气团的稀释扩散, 导致氧气团稀释所需要的物理空间变大。

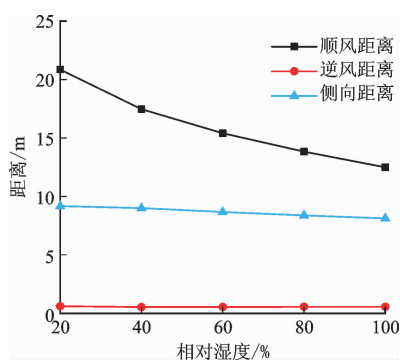


图 18 不同相对湿度下低温区域的最远扩展距离

Fig. 18 The maximum expansion distance of the cryogenic zone at different relative humidity

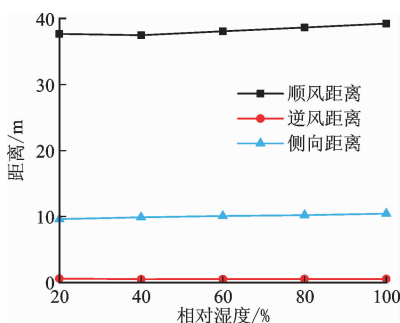


图 19 不同相对湿度下高氧浓度区域最远扩展距离

Fig. 19 The maximum expansion distance of the high oxygen concentration zone at different relative humidity

3 结 论

(1) 液氧连续泄漏初始阶段云团向周围扩散, 约

35 s 后危险区域的温度场和氧气浓度场趋于准稳态, 并且温度与氧气浓度分布相对应, 温度越低的地方氧气浓度越高。

(2) 环境温度越高, 液氧蒸发越快, 氧气云团升温越快, 低温区域面积从 251.3 m^2 减小到 110.3 m^2 , 而高浓度氧气云团面积从 205.3 m^2 扩大到 232.5 m^2 , 扩展距离最远达到 38.1 m 。

(3) 随着风速的增加, 空气的脉动速度增大, 湍流强度增大, 导致低温云团和空气之间相互掺混增强, 低温区域面积从 175.4 m^2 缩小到 32.8 m^2 , 高氧浓度区域面积从 257.0 m^2 减小到 50.7 m^2 。

(4) 大气压力的提高增加了氧气和空气的密度, 氧气团与空气的相互作用增强, 促进了氧气团的稀释扩散, 低温区域面积从 166.3 m^2 减小到 120.8 m^2 , 高氧浓度区域面积从 257.2 m^2 减小到 193.5 m^2 。

(5) 大气中水蒸气的相变增加了氧气团的温度和密度, 加快了液氧的蒸发, 却抑制了氧气团的稀释扩散, 随着大气湿度的提高, 最高氧气体积分数从 46.75% 增长到 49.36% , 最远扩展距离从 37.67 m 增加到 39.24 m 。

参考文献:

- [1] 樊东磊, 王华, 崔村燕, 等. 低温推进剂泄漏扩散的危险性分析 [J]. 低温与超导, 2016, 44(6): 6-9, 13. FAN Donglei, WANG Hua, CUI Cunyan, et al. Risk analysis on leakage and diffusion of cryogenic propellant [J]. Cryogenics & Superconductivity, 2016, 44(6): 6-9, 13.
- [2] 黄涛, 黄迪, 杨开, 等. 国外新型主力运载火箭发展趋势分析 [J]. 飞航导弹, 2020(7): 72-76.
- [3] WITCOFSKI R D, CHIRIVELLA J E. Experimental and analytical analyses of the mechanisms governing the dispersion of flammable clouds formed by liquid hydrogen spills [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1984, 9(5): 425-435.
- [4] HALL J E, HOOKER P, WILLOUGHBY D. Ignited releases of liquid hydrogen: safety considerations of thermal and overpressure effects [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(35): 20547-20553.
- [5] STATHARAS J C, VENETSANOS A G, BARTZIS J G, et al. Analysis of data from spilling experiments performed with liquid hydrogen [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 77(1/2/3): 57-75.
- [6] GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, MARKATOS N, et al. CFD modeling of hydrogen dispersion under

- cryogenic release conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(28): 15851-15863.
- [7] GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, MARKATOS N. CFD modeling of LNG spill: humidity effect on vapor dispersion [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 633: 012136.
- [8] SHAO Xiangyu, PU Liang, LI Qiang, et al. Numerical investigation of flammable cloud on liquid hydrogen spill under various weather conditions [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(10): 5249-5260.
- [9] PU Liang, SHAO Xiangyu, ZHANG Shengqi, et al. Plume dispersion behaviour and hazard identification for large quantities of liquid hydrogen leakage [J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2019, 14(2): e2299.
- [10] JIN Tao, WU Mengxi, LIU Yuanliang, et al. CFD modeling and analysis of the influence factors of liquid hydrogen spills in open environment [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(1): 732-739.
- [11] 唐鑫, 邵翔宇, 雷刚, 等. 液氢泄放状态对连续泄漏扩散安全性影响研究 [J]. 低温工程, 2019(4): 14-20, 53.
- TANG Xin, SHAO Xiangyu, LEI Gang, et al. Influence of liquid hydrogen release state on safety of continuous leakage and diffusion [J]. Cryogenics, 2019(4): 14-20, 53.
- [12] WU Nannan, DUAN Chengdong, JIANG Yuncong, et al. Simulation and safety analysis of the leakage of liquefied hydrogen from high-pressure container [J]. Thermal Science, 2019, 23(3): 829-836.
- [13] LIU Yuanliang, WEI Jianjian, LEI Gang, et al. Numerical investigation on the effects of dike around liquid hydrogen source on vapor cloud dispersion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(10): 5063-5071.
- [14] TOLIAS I C, GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, et al. Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(17): 9050-9062.
- [15] 王爱玲. 液氧的危险性分析及其安全防护技术措施 [J]. 载人航天, 2008, 14(3): 19-21.
- [16] 邵翔宇, 蒲亮, 雷刚, 等. 液氢泄漏事故中氢气可燃云团的扩散规律研究 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(9): 102-108.
- SHAO Xiangyu, PU Liang, LEI Gang, et al. Investigation on the hydrogen flammable cloud dispersion in liquid hydrogen leakage accident [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(9): 102-108.
- [17] GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, BARTZIS J G, et al. CFD modeling of LH2 dispersion using the ADREA-HF code [EB/OL]. [2020-10-08]. <http://conference.ing.unipi.it/ichs2011/papers/196.pdf>.
- [18] 唐鑫, 邵翔宇, 雷刚, 等. 不同低温推进剂的泄漏扩散特性及安全性分析 [J]. 低温工程, 2020(3): 69-74.
- TANG Xin, SHAO Xiangyu, LEI Gang, et al. Dispersion features and safety analysis after leakage of different low-temperature propellants [J]. Cryogenics, 2020(3): 69-74.
- [19] LI Zhiyong, PAN Xiangmin, SUN Ke, et al. Comparison of the harm effects of accidental releases: cryo-compressed hydrogen versus natural gas [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38(25): 11174-11180.
- [20] 陈国霖, 肖荣中. 氧气助燃性研究 [J]. 冶金动力, 1997, 16(5): 46-47.
- CHEN Guolin, XIAO Rongzhou. Study of oxygen combustion-supporting [J]. Metallurgical Power, 1997, 16(5): 46-47.

(编辑 亢列梅)