

# 液氢泄漏事故中氢气可燃云团的扩散规律研究

邵翔宇<sup>1</sup>, 蒲亮<sup>1,2</sup>, 雷刚<sup>2</sup>, 李强<sup>1</sup>, 厉彦忠<sup>1,2</sup>

(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)

**摘要:** 针对液氢生产、储存、运输过程中发生瞬时大流量泄漏的问题, 对美国国家航空航天局进行的液氢泄放实验进行了数值模拟。采用非均相的混合模型, 考虑气液相间速度滑移, 对氢气、空气云团内部浓度、温度、密度等物理量的动态变化规律, 以及可燃云团在竖直方向的扩散范围进行研究, 揭示了可燃云团在开放空间的动态扩散行为, 其扩散行为分为重气扩散、浮升扩散和被动扩散3个阶段。浮升扩散阶段为可燃云团扩散的最主要阶段, 发生在停止泄放后大约8 s的很短时间内, 氢气浓度急剧下降, 云团快速脱离地表并升高至约30 m, 在被动扩散阶段可燃云团扩散最慢, 却占据大部分时间, 即大约60 s的时间, 此阶段可燃云团维持在约40 m的高空并且随风飘移。在风速较低的工况下, 温差导致的低温氢气与空气的局部湍流相混合, 是可燃云团扩散的主要动力。

**关键词:** 液氢; 泄漏; 可燃云团; 扩散行为; 开放空间

**中图分类号:** TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)09-0102-07

## Investigation on the Hydrogen Flammable Cloud Dispersion in Liquid Hydrogen Leakage Accident

SHAO Xiangyu<sup>1</sup>, PU Liang<sup>1,2</sup>, LEI Gang<sup>2</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, LI Yanzhong<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** Aiming at the problem of massive liquid hydrogen leakage in the processes of production, storage and transportation, a CFD model was built based on an assumed large scale leakage accident, and the liquid hydrogen leakage experiment of NASA(National Aeronautics and Space Administration) was simulated, where the non-homogeneous equilibrium model was adopted considering the slip velocity between liquid phase and vapor phase. The dispersion behavior of the flammable cloud was revealed based on the analyses on the concentration, temperature and density of H<sub>2</sub>/air mixture cloud. There are three phases in the flammable cloud dispersion, i. e., dense gas dispersion, drift dispersion and passive dispersion, among them the drift dispersion is the major phase occurring shortly (about 8 s) after the tapping of liquid hydrogen is shut off. At this time, the concentration of hydrogen decreases dramatically, and the cloud gets off the ground quickly and arises to a height of approximately 30 m. The hydrogen disperses most slowly in the passive dispersion phase, taking approximately 60 s, and the cloud is driven by the wind at a height of almost 40 m. At a relatively low wind speed, the major drive force of the dispersion is the local turbulent mixing caused by the great temperature difference

收稿日期: 2017-11-16。 作者简介: 邵翔宇(1983—),男,博士生;蒲亮(通信作者),男,副教授。 基金项目: 航天低温推进剂技术国家重点实验室开放研究课题(SKLTSCP 1809, SKLTSCP 1511)。

网络出版时间: 2018-06-24

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180624.1129.004.html>

between the cryogenic hydrogen gas and air.

**Keywords:** liquid hydrogen; leakage; flammable cloud; dispersion behavior; open area

液氢将逐步作为主流推进剂,广泛应用于发射空间站、载人登月、登陆火星和深空探测领域<sup>[1]</sup>。虽然液氢与其他推进剂相比具有显著优势,但其易扩散、可燃范围宽(4%~75%)、点火能量小(0.019 mJ)的特点,使得其在贮存、运输、加注过程中存在严重的安全隐患,历史上曾发生过多次由液氢泄漏引起的安全事故<sup>[2-3]</sup>。因此,开展液氢泄漏扩散规律的研究,对于预防和避免火灾、爆炸事故发生,指导事故应急处置,降低人身和财产损失,有着重要的现实意义。

国内外研究机构开展了 6 组液氢泄漏扩散的实验研究<sup>[4-9]</sup>,其中美国国家航空航天局(NASA)进行的大流量瞬时泄放实验,英国健康与安全实验室(HSL)进行的小流量连续泄放实验,具有较强的代表性。NASA 于 1980 年在白沙试验基地(WSTF)进行的液氢泄放实验,获得了液氢池的大小和测点的氢气浓度等数据,以及可见云团的动态扩散过程<sup>[5,10]</sup>,但是该实验并未获得远场(监测塔之外)的氢气浓度场。2011 年,HSL 在山谷中进行了 14 次液氢泄放实验,来模拟液氢储罐在转注过程中连接软管的泄漏事故<sup>[8]</sup>。与其他实验不同的是,部分实验中发现了液氢池附近空气组分(氧气和氮气)的凝华现象,在 4 次点燃实验中也得到了火焰速度、热辐射通量等数据,但该实验同样仅获得了近场的氢气浓度场。此外,国内唯一有液氢实验资质的北京航天试验技术研究所也在 2016 年进行了小规模液氢泄放实验<sup>[9]</sup>。

考虑到液氢泄放实验的安全和经济因素,国内外一些学者采用 CFD 来模拟上述实验,并得到了一些有益的结论。文献[7,11]分别采用 ADREA-HF、FLACS 程序验证了数值模拟研究的可行性;文献[12-13]研究了环境湿度和大气稳定度对氢气扩散的影响;文献[14-15]研究了风温、风速、地温及空气中氮氧液化对氢气扩散的影响;文献[16]研究了典型季节温度、风速、大气压力对可燃云团扩散的影响规律。

综上所述,国内外学者虽然开展了一些液氢泄漏扩散方面的研究,但很少关注可燃云团整个扩散进程中的行为特性。本文以 NASA 的大规模液氢泄放实验为物理模型,在文献[16]数值模拟研究的基础上,对处于可燃浓度下限的可燃云团的宏观扩

散行为特性进行了研究,以期事故的安全评估提供理论指导。

1 物理现象

液氢泄漏到大气环境后所发生的物理现象,可分为以下 4 个阶段<sup>[17-18]</sup>,液氢泄漏后的物理现象如图 1 所示。

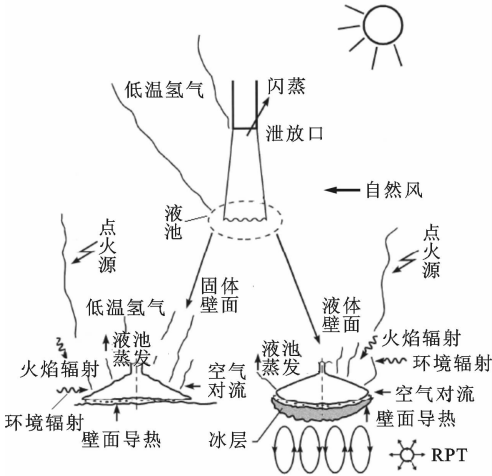


图 1 液氢泄漏后的物理现象<sup>[18]</sup>

(1)由于环境温度远高于液氢的饱和温度,当泄漏速度小于瞬时气化速度时,液氢将在泄漏口附近快速气化;若泄漏速度大于瞬时气化速度,少量的液氢在泄漏口附近气化,剩余的液氢在固体、液体壁面累积并逐步扩展为液池,直至气化速度等于液化速度时,液池停止扩展,达到最大面积。

(2)液池在扩展的过程中不断吸收固体、液体壁面以及大气环境中的热量(主要为壁面导热<sup>[19]</sup>)而蒸发。在壁面处由于极大温差(约 280 K)的存在,导致液体沸腾,而在液池和空气的交界面处,液池与环境的对流和辐射换热,使得液氢进一步气化,于是液池面积开始逐渐缩小,分裂为若干小液池,直至消失。在此过程中,快速的气化存在发生急剧相变爆炸 RPT 的可能。

(3)气化后的低温氢气与周围空气之间存在着较大的温差,使得二者快速混合,并在大气湍流的作用下加速混合、扩散,直至扩散至安全浓度(<4%)。

(4)上述液氢泄漏、气化和低温氢气扩散的过程中,可燃云团遇到合适的点火源,将发生燃烧、爆炸甚至爆轰事故。

## 2 物理模型

### 2.1 实验描述<sup>[5,10]</sup>

NASA 共进行了 7 次液氢泄放实验,其中第 6 次获得了较为全面的数据。5.7 m<sup>3</sup> 液氢自杜瓦经绝热管道(长为 30 m,内径为 15.2 cm)从泄放口泄放到开放空间,泄放时间为 38 s。泄放口位于一个直径为 9.14 m 的圆形池子(地表为压实的沙子)中心。环境温度为 15 ℃,相对湿度为 29%,风速为 (1.75±0.55) m/s,大气压力为 78 630 Pa。在下风向布置了 9 个 19.5 m 高的监测塔,每个监测塔上设有热电偶、氢气传感器、气体取样瓶和湍流指示器,监测塔到泄放口距离为  $R$ ,如图 2 所示。此外,在泄放口外围 1、2、3 m 处设置热电偶,用以探测液氢池的动态变化,可见云团的动态扩散过程会被摄像机记录下来。虽然低温氢气并不可见,但当其温度低于环境空气中水蒸气的饱和温度时,造成水蒸气的冷凝并反射光线,使得无色的氢气云团被观测到,因此称其为可见云团。

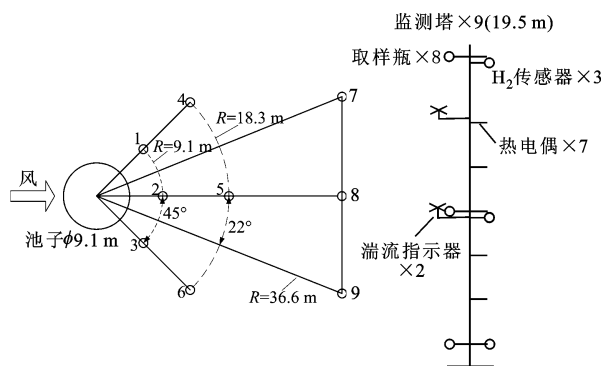


图 2 监测塔及仪表布置图<sup>[5]</sup>

实验中,可见云团的持续时间为 90 s,水平、竖直方向扩散的最远距离分别为 160、65 m,可见云团边缘对应的氢气体积分数为 6.7%。

### 2.2 网格划分及边界条件

在 400 m×100 m×60 m 的空间区域内,选取一半作为计算域,采用结构化网格进行离散。坐标原点设在(0,0,0)处,泄放口位于(24.70 m,0,0)处。在靠近泄放口的位置进行了网格加密,远离泄放口的位置网格逐渐稀疏,网格总数为 538 049,水平方向最小、最大网格尺寸分别为 300、2 176 mm,竖直方向分别为 70、1 361 mm,全场网格尺寸放大因子小于 1.2,计算域离散示意图如图 3 所示。 $x=0$  平面为空气入口,风速廓线采用对数律分布,10 m 高处风速为 2.2 m/s, $x=400$  m 平面为空气出口, $z$

$=0$ 、 $-30$  m 和  $y=100$  m 平面为对称面边界, $y=0$  平面为无滑移壁面,液氢泄放口为质量流量入口<sup>[16]</sup>。

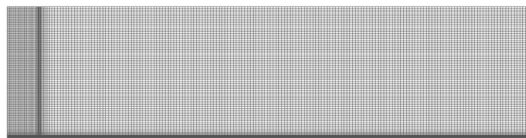


图 3 计算域离散示意图( $z=0$ )<sup>[16]</sup>

## 3 数值求解方法

### 3.1 控制方程及代数方程

混合模型(Mixture)是一种简化的多相流模型,考虑相间速度滑移时为非均相模型(NHEM),否则为均相模型(HEM)。在液氢泄漏扩散的数值模拟研究中,HEM 被广泛采用<sup>[14,19-20]</sup>,但 Giannissi 等的研究<sup>[21]</sup>发现,与 HEM 相比,NHEM 的计算结果与实验更为接近。本文采用 NHEM 模型来解决气液相的混合问题,采用增强壁面函数处理的 Realizable  $k-\epsilon$  湍流模型模拟湍流现象。液相  $p$ (第二相)为液氢(LH<sub>2</sub>),气相  $q$ (主相)为空气(air)和氢气(H<sub>2</sub>)的混合物。混合物的质量、动量、能量方程、第二相的体积分数方程、相变模型、组分传输模型<sup>[16]</sup>如下。

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \cdot \mathbf{v}_m) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \mathbf{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}_m \mathbf{v}_m) = \\ - \nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \mathbf{v}_m + \nabla \mathbf{v}_m^T) + \\ \rho_m \mathbf{g} + \mathbf{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \mathbf{v}_{dr,k} \mathbf{v}_{dr,k}) \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n [\alpha_k \mathbf{v}_k (\rho_k E_k + p)] = \\ \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \end{aligned} \quad (3)$$

液相的体积分数方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_m) = \\ - \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \mathbf{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \end{aligned} \quad (4)$$

气、液相之间的滑移速度

$$\mathbf{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \mathbf{a} \quad (5)$$

相变模型

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{l \rightarrow v} &= \lambda \alpha_l \rho_l (T_l - T_{sat}) / T_{sat}, & T_l > T_{sat} \\ \dot{m}_{v \rightarrow l} &= \lambda \alpha_v \rho_v (T_v - T_{sat}) / T_{sat}, & T_v < T_{sat} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

组分输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q Y_{q^i}^i) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mathbf{v}_q Y_{q^i}^i) =$$
$$-\nabla \cdot (\alpha_q \mathbf{J}) + (\dot{m}_{p^i q^i} - \dot{m}_{q^i p^i}) \quad (7)$$

式中: $\dot{m}$ 、 $T$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\alpha$ 、 $\rho$  分别为质量流量、温度、速度、体积分数、密度; $\mathbf{a}$ 、 $E_k$ 、 $f_{\text{drag}}$ 、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{g}$  分别为第二相加速度、混合物中第  $k$  相的能量、曳力系数、体积力和重力加速度; $k_{\text{eff}}$ 、 $p$ 、 $S_E$ 、 $Y_{q^i}^i$  分别为有效热导率、压力、热量源项、 $q$  相中的第  $i$  组分的质量分数; $\lambda$ 、 $\mu_m$ 、 $\tau_p$  分别为相变传质系数、混合物黏度、 $p$  相颗粒的弛豫时间。

3.2 模型设置

在  $\text{LH}_2$  泄漏和扩散之前,首先进行稳态风场的计算,作为非稳态计算的初场,稳态风场速度云图如图 4 所示。非稳态计算中, $\text{LH}_2$  的泄放条件通过自定义函数(UDF)实现( $0 < t \leq 38 \text{ s}$ ,  $4.76 \text{ kg/s}$ ;  $t > 38 \text{ s}$ ,  $0$ ),蒸发相变系数为  $0.25$ 。压力速度耦合采用 PISO 算法,对流项采用 QUICK 格式离散,时间步长为  $0.001 \text{ s}$ ,收敛判据为  $0.001^{[16]}$ 。

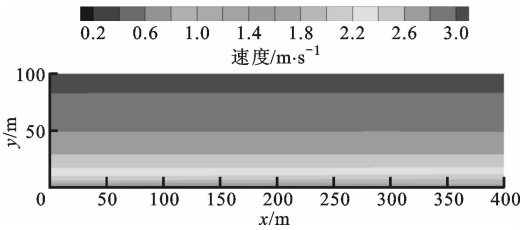


图 4 稳态风场速度云图( $t=0$ )

4 数值模拟结果

在前期研究中,通过与 NASA 实验数据对比,验证了上述数值模型的精度<sup>[16]</sup>。在本节中,将对数值模拟的数据进行进一步分析,通过  $\text{H}_2$  和空气云团内部物理量(体积分数、温度、密度)的动态变化规律,以及竖直方向扩散范围的研究,来揭示其在大气环境中的扩散行为特性。

4.1 浓度场变化规律

为直观展示  $\text{H}_2$  和空气云团的演变过程,图 5 给出了不同时刻  $\text{H}_2$  的浓度场, $t$  为自  $\text{LH}_2$  泄放开始的时间。由图 5 可知:在  $\text{LH}_2$  泄放期间( $t=10 \text{ s}$ ),由于  $\text{LH}_2$  在由液态向气态  $\text{H}_2$  转变的过程中,其体积有了很大程度的膨胀,伴随着周围空气被卷吸进入  $\text{H}_2$  云团,其在浮力作用下开始上升,但在泄放口处不断有  $\text{LH}_2$  向  $\text{H}_2$  转变,其尾部并未脱离地表,同时在外界大气湍流的作用下,云团向下风向偏移,因此在此阶段云团呈现出与地表在下风向有一定夹角的上浮状态;在  $\text{LH}_2$  停止泄放后( $t=40 \sim 60 \text{ s}$ ),云团与周围空气在温差作用下发生急剧混合换热,浮力逐渐超过重力,致使云团脱离地表并上升到更高的高度,同时在大气湍流和局部旋涡的共同作用下,云团内部  $\text{H}_2$  浓度表现出较为显著的不均匀、不连续现象;在云团浮升阶段之后( $t > 60 \text{ s}$ ),云团基本维持在一定高度上,并在大气湍流的作用下,沿下风向飘移,相比较前两个阶段,此阶段可燃云团的体积变化非常缓慢。

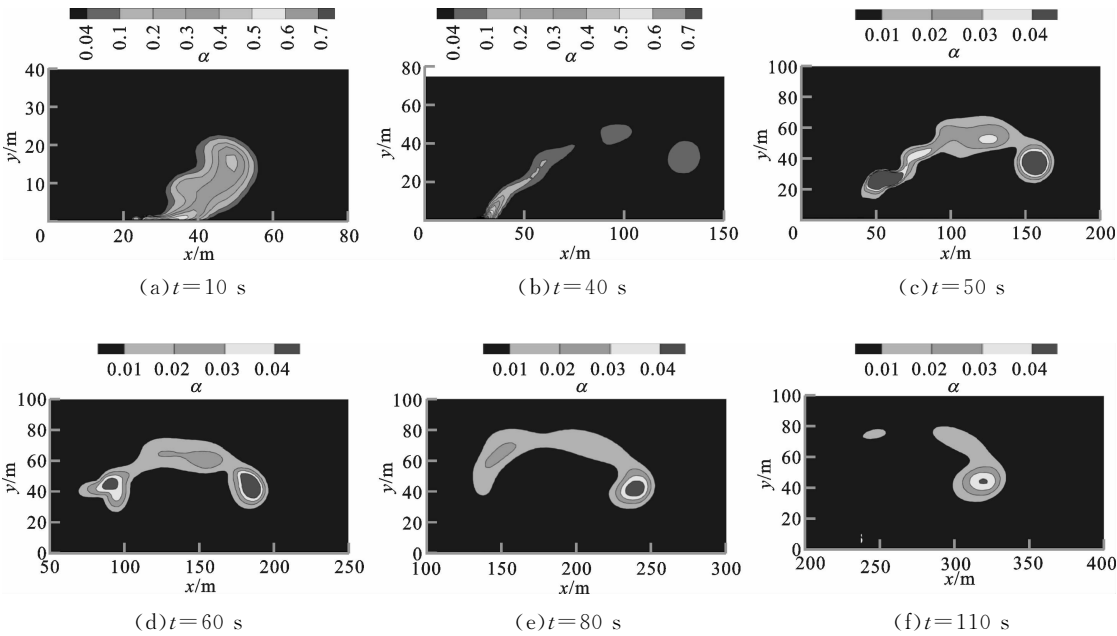


图 5 不同时刻  $\text{H}_2$  的浓度场

图6给出了 $H_2$ 和空气云团最大 $H_2$ 浓度的动态变化规律。由图6可知:在 $LH_2$ 泄放期间( $t \leq 38$  s),最大 $H_2$ 体积分数基本高于70%;在停止泄放较短时间内( $38 < t \leq 60$  s),最大 $H_2$ 体积分数急剧下降至较低水平( $\approx 7\%$ );随后较长时间内( $60 < t \leq 114$  s),最大 $H_2$ 体积分数下降非常缓慢;在 $t > 114$  s之后, $H_2$ 和空气云团体积分数降至可燃体积分数下限以下。

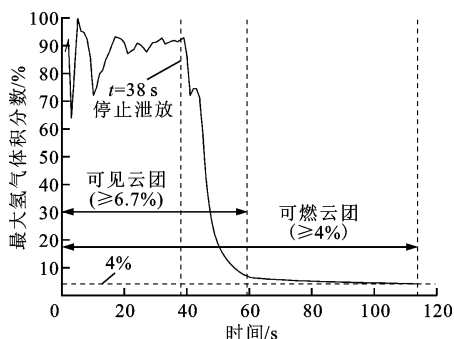


图6  $H_2$ 和空气云团最大 $H_2$ 体积分数<sup>[16]</sup>

#### 4.2 温度场和密度场变化规律

$H_2$ 和空气云团最低温度的变化规律如图7所示,可知在 $LH_2$ 泄放期间最低温度接近饱和温度( $\approx 20$  K),停止泄放后( $38 < t \leq 60$  s),云团最低温度快速升高( $\approx 260$  K),此后开始缓慢上升至接近环境空气温度(288.65 K)。

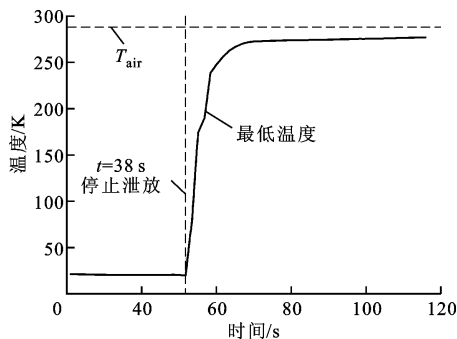


图7  $H_2$ 和空气云团最低温度

$H_2$ 和空气云团密度极值的动态变化过程如图8所示,可知 $H_2$ 和空气云团的最大密度在整个 $LH_2$ 泄放期间均大于空气密度,因此该阶段云团尾部的重力大于浮力,使其贴近地表,而云团最小密度曲线显示,在该阶段其头部密度小于空气密度,使其在浮力作用下上升,这点进一步解释了图5中 $t=10$  s  $H_2$ 云图的形态。在 $38 < t \leq 60$  s期间, $H_2$ 和空气云团的最大密度快速下降至接近空气密度,同时最小密度值也增大至接近空气密度值,此阶段最低温度快速升高代表云团与空气发生急剧混合换热,因

此云团最大密度快速下降,并在浮力的作用下上升至更高高度,也进一步解释了图5中 $t=40$  s和50 s时 $H_2$ 云图的形态。同样, $60 < t \leq 114$  s阶段,由于云团的温度和空气温度接近,局部发生混合换热的动力减弱,致使 $H_2$ 体积分数下降极其缓慢,同时,由于云团和空气密度接近,浮力与重力也近乎相等,使得云团维持在一定高度基本不变,在大气湍流的作用下往下风向漂移。

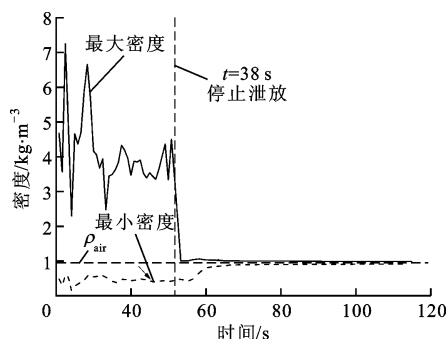


图8  $H_2$ 和空气云团最大和最小密度

#### 4.3 竖直方向扩散范围

图9进一步定量地展示了可燃云团在竖直方向的扩散范围(最小离地高度和最大离地高度)。由图9可知,在 $LH_2$ 泄放期间( $t \leq 38$  s),可燃云团(LFL)头部呈不断上升趋势,最高约50 m,其尾部始终贴近地表;停止泄放后的较短时间内( $\approx 8$  s),可燃云团尾部脱离地表,并快速上升,至约65 s后缓慢上升,维持在40 m左右的高度。

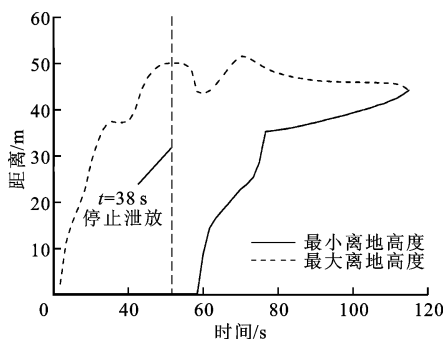


图9 可燃云团(LFL)竖直方向的扩散范围

由4.1、4.2节可知,造成 $LH_2$ 停止泄放后短期内可燃云团快速上升,并随后维持一定高度的原因,是低温 $H_2$ 与周围空气在巨大温差的作用下而发生急剧混合换热,导致可燃云团在浮力作用下升高,随着温差和密度差的减小,局部混合的动力减弱,可燃云团不再升高,维持在一定高度随风移动。值得注意的是,虽然可燃云团存续时间为114 s,但在液氢停止泄放约20 s内( $t \leq 65$  s),可燃云团快速升高并

维持在数十米的高度,据此有理由推断,对此类开放空间的液氢泄放事故(5 m<sup>3</sup> 量级),发生燃烧/爆炸事故的可能性较小,即便发生此类事故,对地面人员或建筑物的影响也有限。

#### 4.4 宏观扩散行为特性

对于本文研究的开放空间 LH<sub>2</sub> 泄放工况,可燃云团的宏观扩散行为可归纳为 3 个阶段:①重气扩散阶段,该阶段主要位于 LH<sub>2</sub> 泄放期间,云团尾部

贴近地表,头部上浮,与地表在下风向呈一定夹角;②浮升扩散阶段,该阶段是可燃云团扩散历程中的主要阶段,H<sub>2</sub> 体积分数快速下降,其发生在停止泄放后很短时间内( $t_2 < 10$  s),云团尾部脱离地表,随后快速上浮,上升至数十米高度;③被动扩散阶段,该阶段在可燃云团扩散过程中占据大部分时间( $t_3 \approx 6t_2$ ),云团维持在数十米高度,并在风力驱动下漂移,云团 H<sub>2</sub> 体积分数下降非常缓慢。

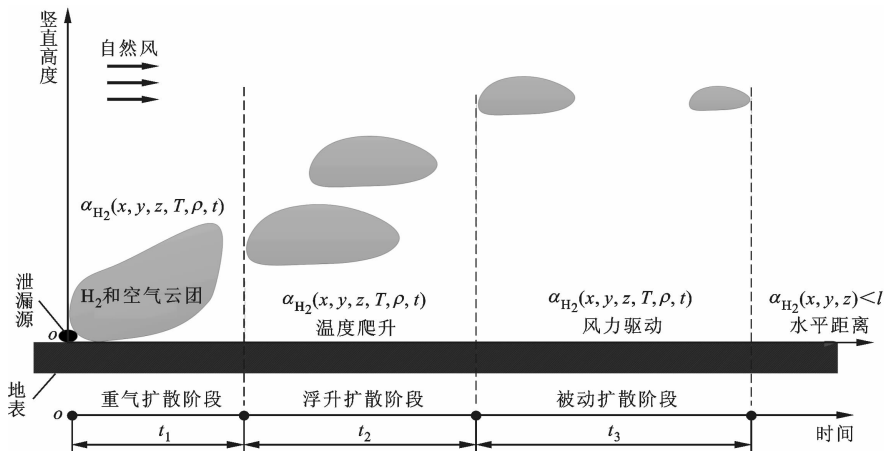


图 10 可燃云团宏观扩散行为示意图

## 5 结 论

(1)开放空间里 H<sub>2</sub> 可燃云团的宏观扩散行为,可分为重气扩散阶段、浮升扩散阶段和被动扩散阶段。重气扩散阶段长短主要依赖于 LH<sub>2</sub> 泄漏时间,被动扩散阶段占据可燃云团扩散的绝大部分时间。浮升扩散阶段为可燃云团扩散的最主要阶段,发生在较短时间内,该阶段 H<sub>2</sub> 体积分数快速下降至较低水平,同时云团快速上升,到达数十米高空。

(2)在较低风速下,温差导致的低温 H<sub>2</sub> 与周围空气的局部湍流混合,是主导可燃云团扩散的主要因素。随着温差减小,局部混合的动力减弱,使得云团在被动扩散阶段扩散非常缓慢。

(3)对于开放空间 5 m<sup>3</sup> 量级的 LH<sub>2</sub> 泄漏事故,风速为 2.2 m/s 时,在停止泄放 8 s 内可燃云团即脱离地表,并维持在约 40 m 的高度,发生火灾/爆炸事故的可能性较小,即使使发生此类事故,对地面人员或建筑物的影响也有限。

#### 参考文献:

[1] 刘展, 厉彦忠, 王磊, 等. 低温推进剂长期在轨压力管理技术研究进展 [J]. 宇航学报, 2014, 35(3): 254-261.

LIU Zhan, LI Yanzhong, WANG Lei, et al. Progress of study on long-term in-orbit pressure management technique for cryogenic propellant [J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(3): 254-61.

[2] 黄久忠. 能源号运载火箭第一级发动机试车爆炸 [J]. 导弹与航天运载技术, 1992(5): 11.

HUANG Jiuzhong. Explosion of the first engine of the energy carrier rocket [J]. Missiles and Space Vehicles, 1992(5): 11.

[3] 郑治仁. 氢爆炸事故十四例 [J]. 中国航天, 1999(12): 12-14.

ZHENG Zhiren. Fourteen accidents of hydrogen explosion [J]. Aerospace China, 1999(12): 12-14.

[4] ZABETAKIS M G, FURNO A L, MARTINDILL G H. Explosion hazards of liquid hydrogen [C] // Advances in Cryogenic Engineering. Berlin, Germany: Springer, 1961: 185-194.

[5] 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.

[6] VERFONDERN K, DIENHART B. Experimental and theoretical investigation of liquid hydrogen pool spreading and vaporization [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1997, 22(7): 649-660.

- [7] 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, A77: 57-75.
- [8] 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.
- [9] 凡双玉, 何田田, 安刚, 等. 液氢泄漏扩散数值模拟研究 [J]. *低温工程*, 2016(6): 48-53.  
FAN Shuangyu, HE Tiantian, AN Gang, et al. Numerical simulation of liquid hydrogen leakage diffusion [J]. *Cryogenics*, 2016(6): 48-53.
- [10] CHIRIVELLA J E, WITCOFSKI R D. Experimental results from fast 1500-gallon LH<sub>2</sub> spills [EB/OL]. [2017-10-06]. [https://www.researchgate.net/publication/281392026\\_EXPERIMENTAL\\_RESULTS\\_FROM\\_FAST\\_1500-GALLON\\_LH2\\_SPILLS](https://www.researchgate.net/publication/281392026_EXPERIMENTAL_RESULTS_FROM_FAST_1500-GALLON_LH2_SPILLS).
- [11] MIDDHA P, HANSEN O R, STORVIK I E. Validation of CFD-model for hydrogen dispersion [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2009, 22(6): 1034-1038.
- [12] GIANNISSI S G, VENETSANOS A G, BARTZIS J G, et al. CFD modeling of LH<sub>2</sub> dispersion using the ADREA-HF code [C]//The 4th International Conference on Hydrogen Safety. Amsterdam, Holland: Elsevier, 2011: 12-14.
- [13] MIDDHA P, ICHARD M, ARNTZEN B J. Validation of CFD modelling of LH<sub>2</sub> spread and evaporation against large-scale spill experiments [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(3): 2620-2627.
- [14] JIN T, WU M Q, LIU Y L, 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: 732-739.
- [15] 吴梦茜, 刘元亮, 雷刚, 等. 氧氮相变对液氢泛溢过程数值模型的影响分析 [J]. *低温工程*, 2016(6): 18-23.  
WU Mengqian, LIU Yuanliang, LEI Gang, et al. Influence of oxygen and nitrogen phase transition on numerical modeling of liquid hydrogen spill [J]. *Cryogenics*, 2016(6): 18-23.
- [16] SHAO X Y, PU L, LI Q, 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.
- [17] JAEKEL C, VERFONDEM K, KELM S, et al. 3D modeling of the different boiling regimes during spill and spreading of liquid hydrogen [J]. *Energy Procedia*, 2012, 29: 244-253.
- [18] VERFONDERN K, DIENHART B. Pool spread and vaporization of liquid hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2106-2117.
- [19] VENETSANOS A G, BARTZIS J G. CFD modelling of large-scale LH<sub>2</sub> spills in open environment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 1(13): 2171-2177.
- [20] ICHARD M, HANSEN O R, MIDDHA P, et al. CFD computations of liquid hydrogen releases [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(22): 17380-17389.
- [21] GIANNISSI S G, VENETSANOS A G. Study of key parameters in modeling liquid hydrogen release and dispersion in open environment [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(1): 455-467.

(编辑 赵炜)

(上接第75页)

- [12] SEN S, CHOUDHURY R R, NELAKUDITI S. CSMA/CN: carrier sense multiple access with collision notification [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2012, 20(2): 544-556.
- [13] 邹敏, 纪学军. 射频自适应干扰抵消系统的分析与设计 [J]. *无线电工程*, 2011, 41(4): 39-41.  
ZOU Min, JI Xuejun. Analysis and design of RF self-adaptive interference cancellation system [J]. *Radio Engineering*, 2011, 41(4): 39-41.

(编辑 赵炜)