

## 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8s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30m, 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60s的时间, 此阶段可燃云团维持在约40m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。

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(0.019mJ)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、地温及空气中氮氧化物对氢气扩散的影响; 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, 以期对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。

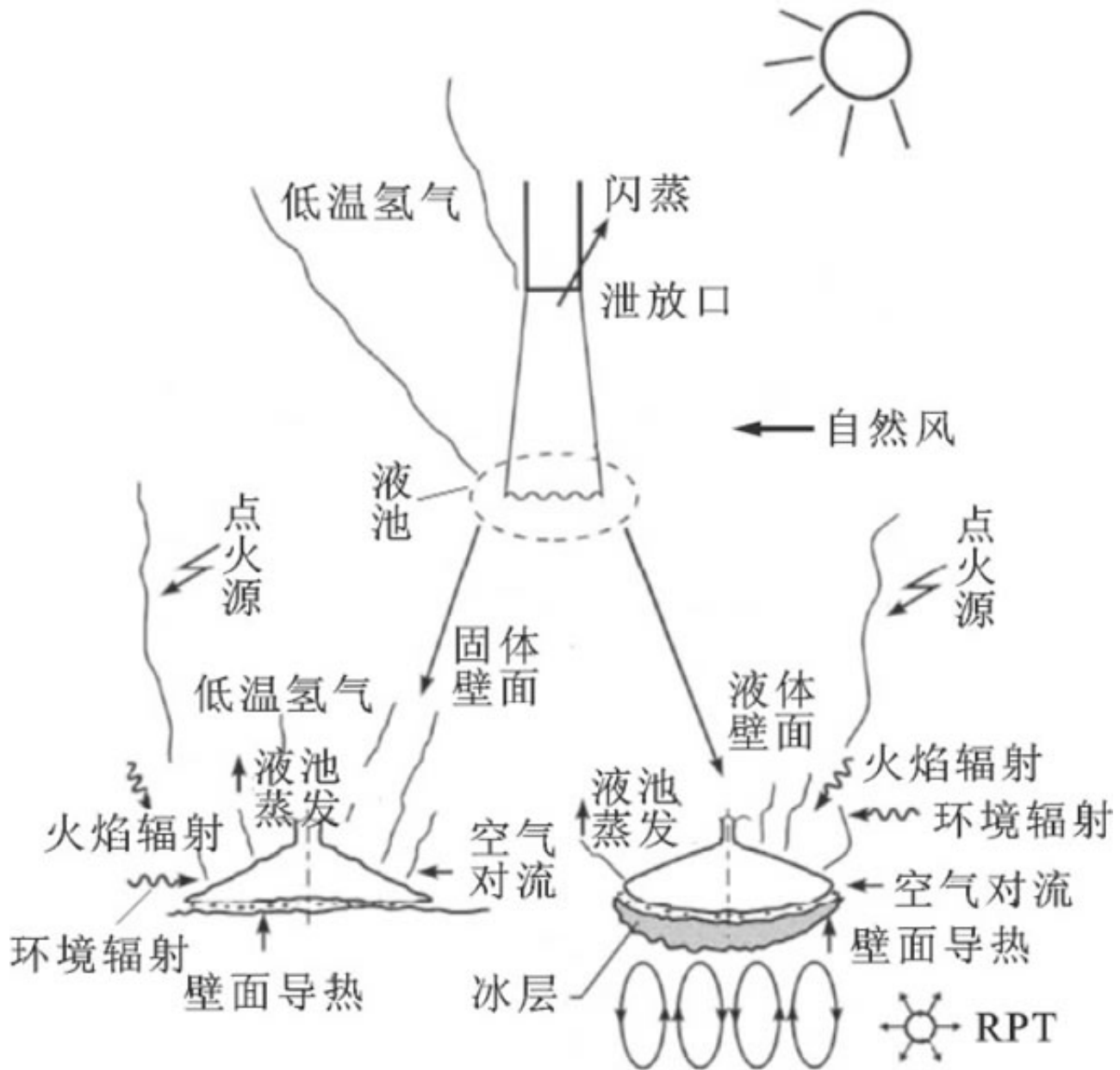


图 1 液氢泄漏后的物理现象<sup>[18]</sup>

(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280K）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 [5, 10]

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。5.7m<sup>3</sup>液氢自杜瓦经绝热管道（长为30m，内径为15.2cm）从泄放口泄放到开放空间，泄放时间为38s。泄放口位于一个直径为9.14m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78630Pa。在下风向布置了9个19.5m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、3m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。

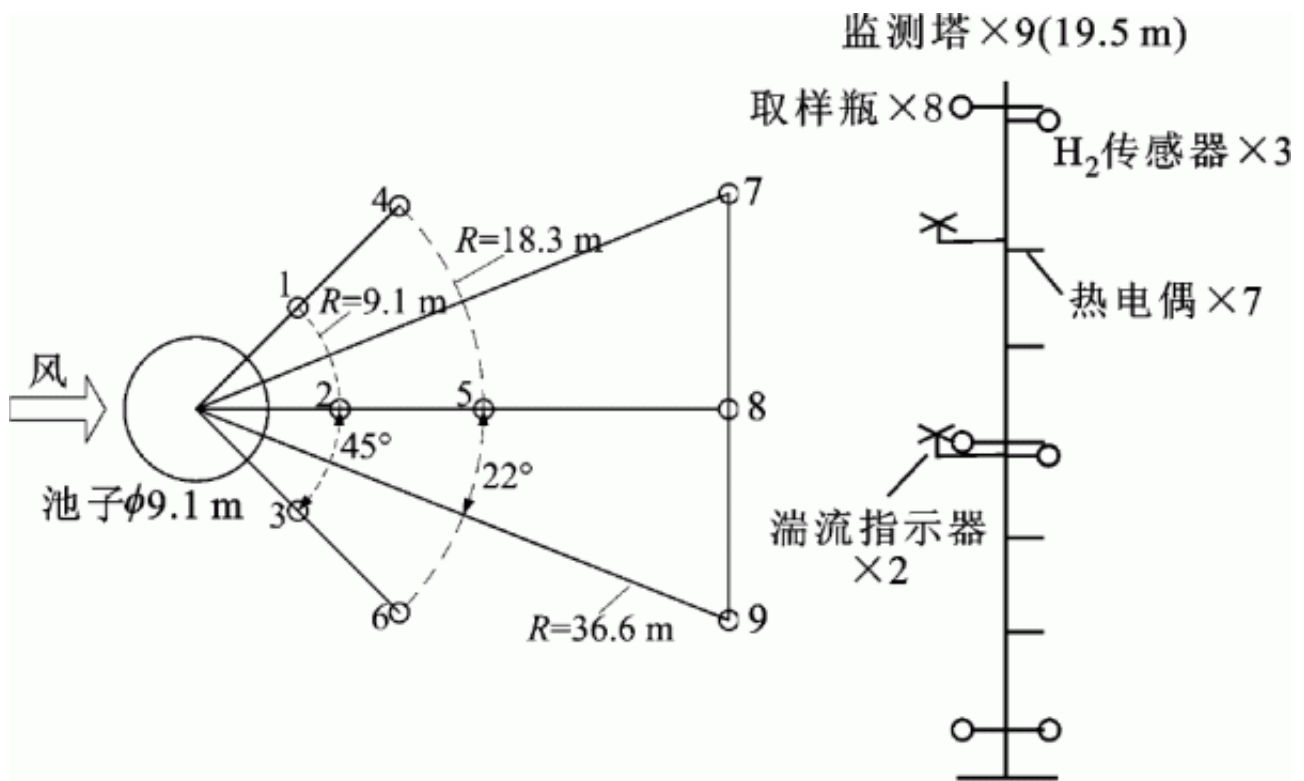


图2 监测塔及仪表布置图 [5]

实验中，可见云团的持续时间为90s，水平、竖直方向扩散的最远距离分别为160、65m，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400m×100m×60m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(24.70m, 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538049，水平方向最小、最大网格尺寸分别为300、2176mm，竖直方向分别为70、1361mm，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，10m高处风速为2.2m/s，x=400m平面为空气出口，z=0、-30m和y=100m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 [16]。

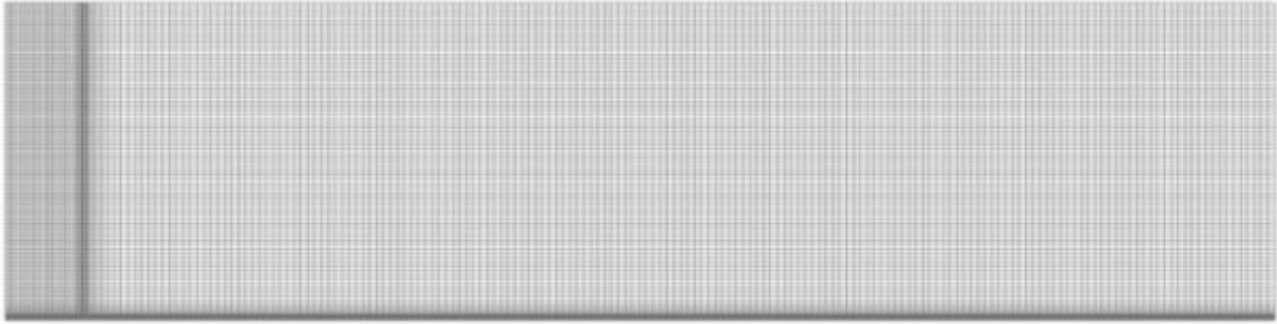


图 3 计算域离散示意图 ( $z=0$ )<sup>[16]</sup>

### 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-

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

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

### 动量方程

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

### 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

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

式中： $\dot{m}$ 、 $T$ 、 $v$ 、 $\alpha$ 、 $\rho$  分别为质量流量、温度、速度、体积分数、密度； $\mathbf{a}$ 、 $E_k$ 、 $f_{drag}$ 、 $\mathbf{F}$ 、 $\mathbf{g}$  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； $k_{eff}$ 、 $p$ 、 $S_E$ 、 $Y_q^i$  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LH<sub>2</sub>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，LH<sub>2</sub>的泄放条件通过自定义函数（UDF）实现（0<t≤38s，4.76kg/s；t>38s，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0.001s，收敛判据为0.001<sup>[16]</sup>。

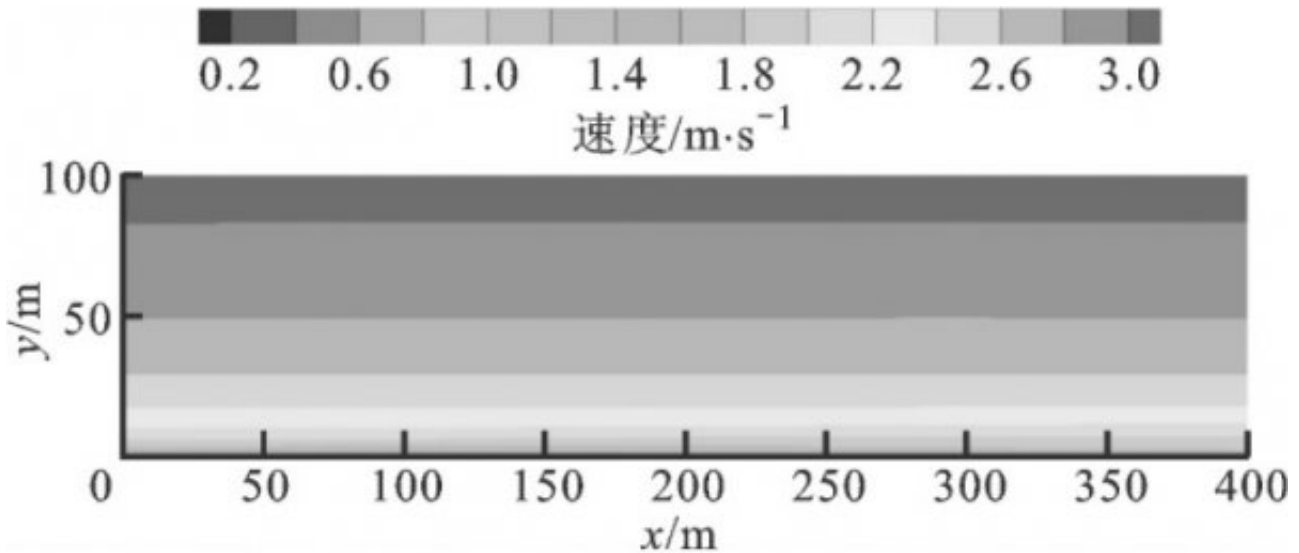


图 4 稳态风场速度云图(t=0)

### 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H<sub>2</sub>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H<sub>2</sub>和空气云团的演变过程，图5给出了不同时刻H<sub>2</sub>的浓度场，t为自LH<sub>2</sub>泄放开始的时间。由图5可知：在LH<sub>2</sub>泄放期间（t=10s），由于LH<sub>2</sub>在由液态向气态H<sub>2</sub>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H<sub>2</sub>云团，其在浮力作用下开始上升，但在泄放口处不断有LH<sub>2</sub>向H<sub>2</sub>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LH<sub>2</sub>停止泄放后（t=40~60s），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H<sub>2</sub>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>60s），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。

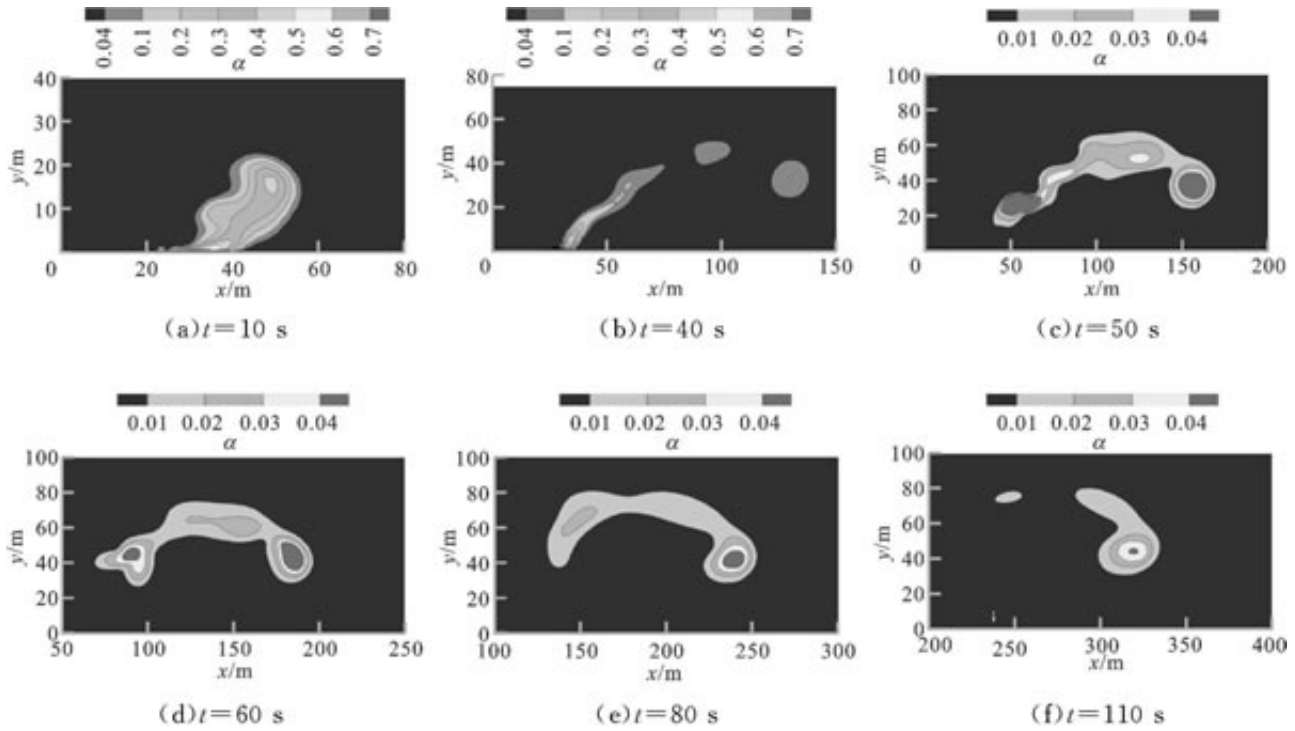


图5 不同时刻  $H_2$  的浓度场

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 ( $t \leq 38s$ )，最大 $H_2$ 体积分数基本高于70%；在停止泄放较短时间 ( $38 < t \leq 60s$ )，最大 $H_2$ 体积分数急剧下降至较低水平 (7%)；随后较长时间内 ( $60 < t \leq 114s$ )，最大 $H_2$ 体积分数下降非常缓慢；在 $t > 114s$ 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。

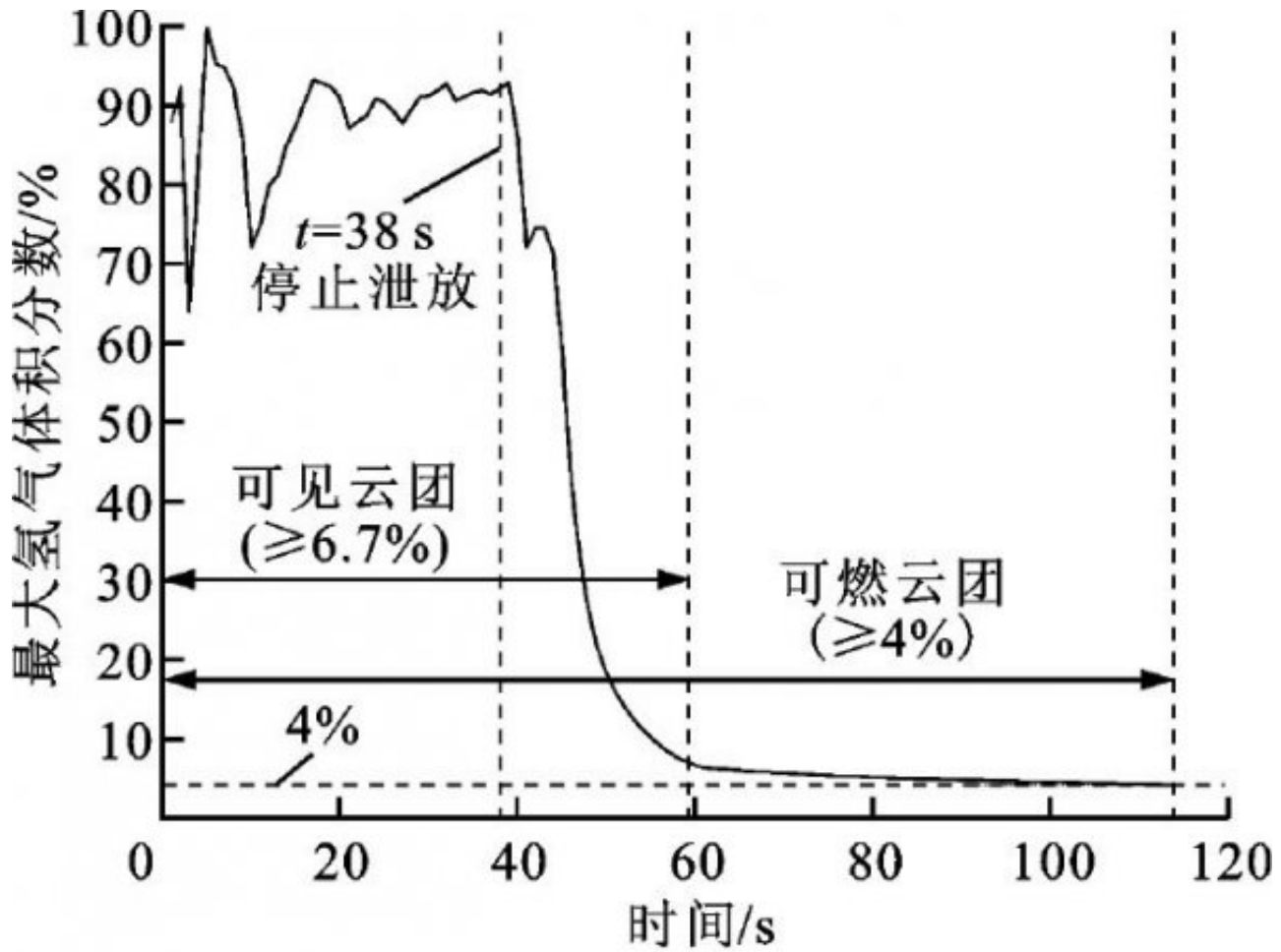


图 6 H<sub>2</sub> 和空气云团最大 H<sub>2</sub> 体积分数<sup>[16]</sup>

#### 4.2 温度场和密度场变化规律

H<sub>2</sub>和空气云团最低温度的变化规律如图7所示,可知在LH<sub>2</sub>泄放期间最低温度接近饱和温度(20K),停止泄放后(38<t<60s),云团最低温度快速升高(260K),此后开始缓慢上升至接近环境空气温度(288.65K)。



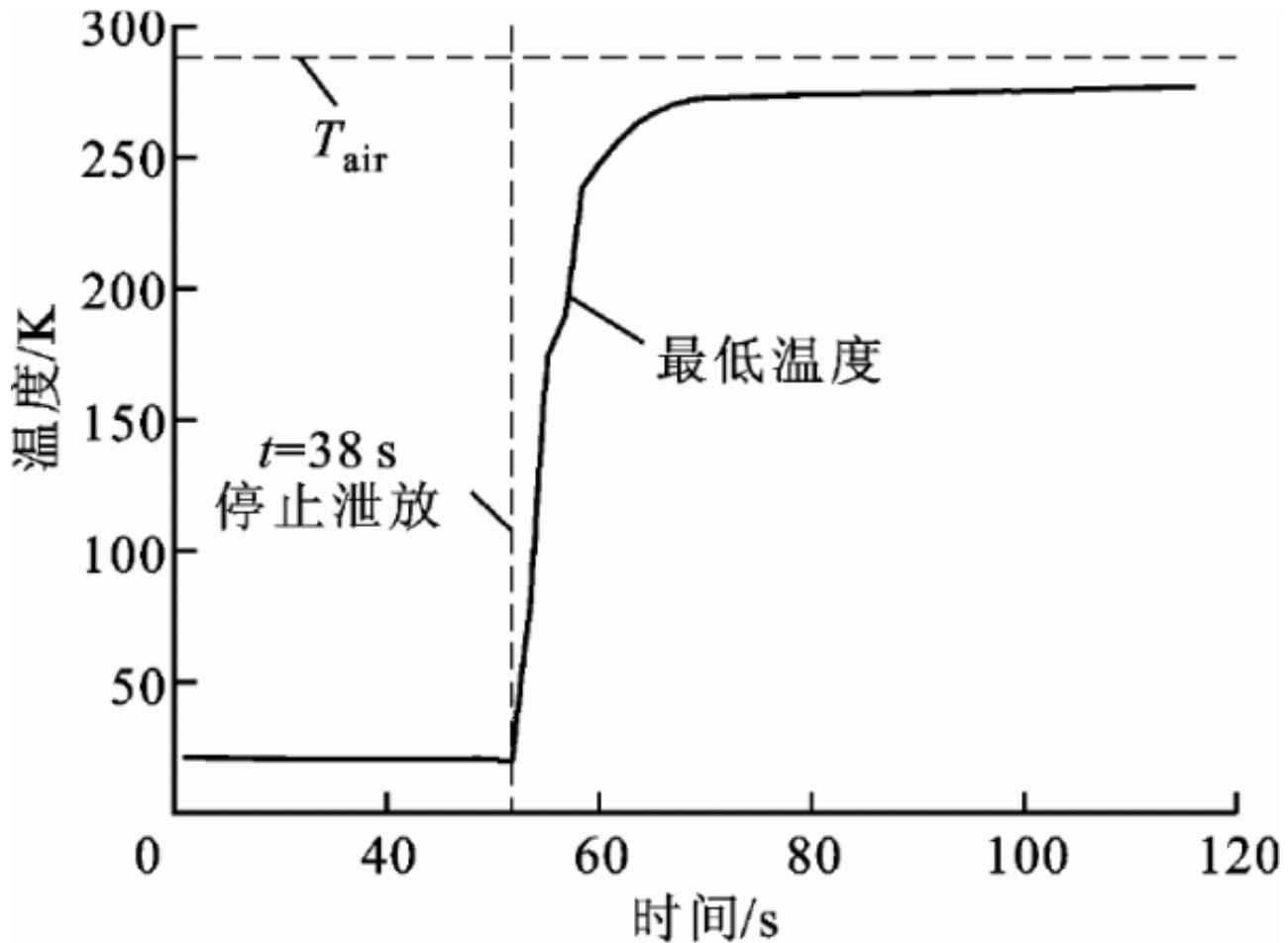


图 7 H<sub>2</sub> 和空气云团最低温度

H<sub>2</sub>和空气云团密度极值的动态变化过程如图8所示，可知H<sub>2</sub>和空气云团的最大密度在整个LH<sub>2</sub>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=10sH<sub>2</sub>云图的形态。在38<t 60s期间，H<sub>2</sub>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，因此云团最大浓度快速下降，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=40s和50s时H<sub>2</sub>云图的形态。同样，60<t 114s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<sub>2</sub>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。

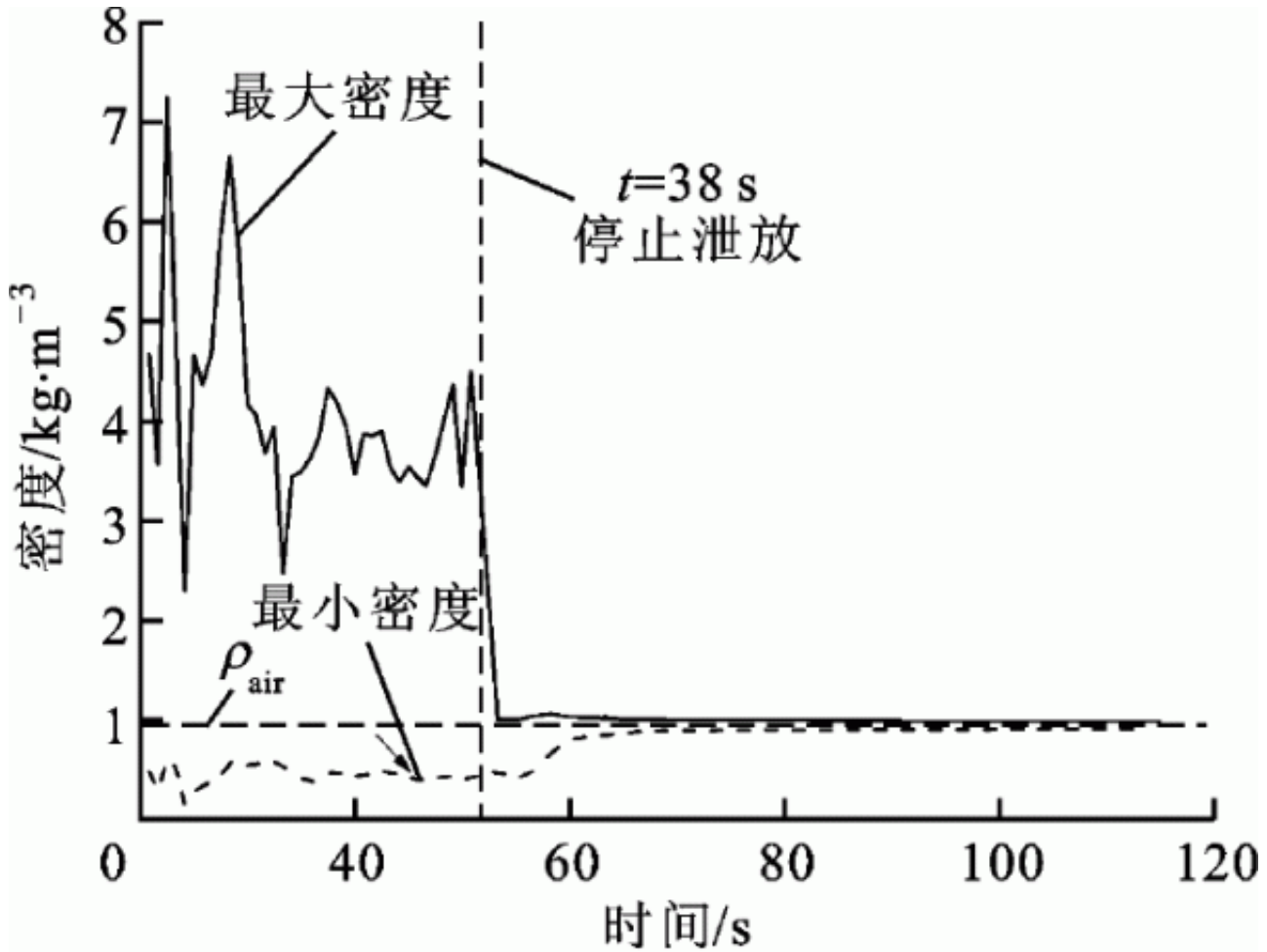


图 8 H<sub>2</sub> 和空气云团最大和最小密度

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<sub>2</sub>

泄放期间（t = 38s），可燃云团（LFL）头部呈不断上升趋势，最高约50m，其尾部始终贴近地表；停止泄放后的较短时间内（t = 8s），可燃云团尾部脱离地表，并快速上升，至约65s后缓慢上升，维持在40m左右的高度。

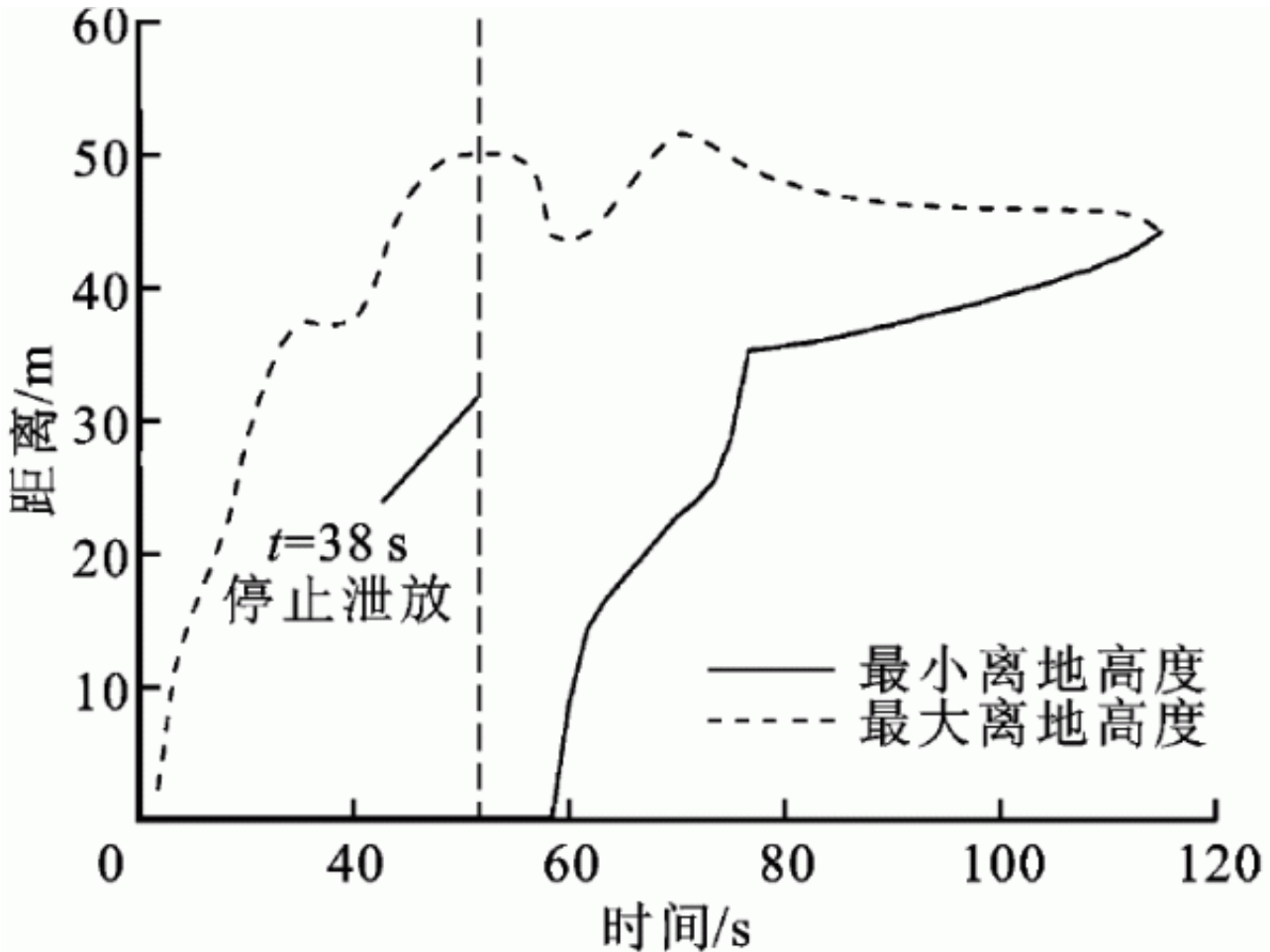


图 9 可燃云团(LFL) 竖直方向的扩散范围

由4.1、4.2节可知，造成LH<sub>2</sub>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<sub>2</sub>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，虽然可燃云团持续时间为114s，但在液氢停止泄放约20s内（t = 65s），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（5m<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过程中的主要阶段，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<sub>2</sub><10s），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<sub>3</sub> ~ 6t<sub>2</sub>），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。

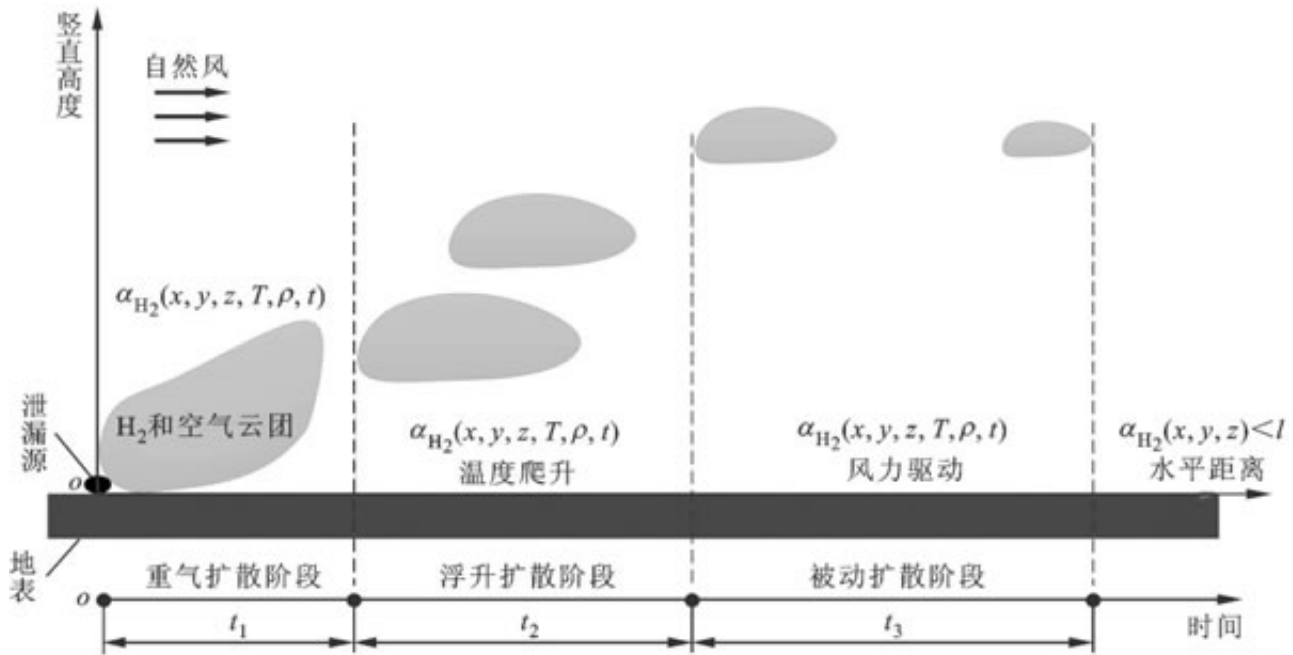


图 10 可燃云团宏观扩散行为示意图

## 5结论

(1) 开放空间里  $H_2$

2  
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  $H_2$  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  $H_2$

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  $5m^3$  量级的  $LH_2$

泄漏事故，风速为  $2.2m/s$  时，在停止泄放  $8s$  内可燃云团即脱离地表，并维持在约  $40m$  的高度，发生火灾/爆炸事故的可能性较小，即使发生此类事故，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  
原文地址: <http://www.china-nengyuan.com/tech/158341.html>
- 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)