

# 加氢站高压氢气泄漏爆炸事故模拟及分析

李静媛，赵永志，郑津洋

（浙江大学化工机械研究所，浙江杭州310027）

**摘要：**运用基于计算流体动力学的FLACS软件模拟上海世博加氢站内高压储氢气瓶发生泄漏并引发爆炸的情况，研究不同环境风速对高压氢气泄漏爆炸事故的影响规律。结果表明：基于FLACS的模拟方法，能够实现高压氢气泄漏爆炸事故全过程的模拟，对爆炸超压波进行实时的三维展示；爆炸强度随障碍区域拥塞度和环境风速的增大而显著增强，危害距离随环境风速的增大呈先减小后增大的趋势。对比危害距离模拟值与经验公式计算值可以发现，计算值略高于模拟结果，经验公式偏保守。

为了解决传统燃油汽车面临的日益严重的石油紧缺以及大气污染问题，清洁、高效的氢能汽车被认为是未来汽车行业发展的一个重要发展方向<sup>[1]</sup>

。加氢站作为实现氢能汽车商业化的必备基础设施，受到了各国政府的高度重视，截至2013年3月，全球范围内正在运行的加氢站已逾200座，此外还有107座计划待建<sup>[2]</sup>。

## 氢气

具有密度小、

扩散系数大、点火温度低、

爆炸极限宽（体积分数为4%~74%）、燃烧火焰速度快等特点<sup>[3]</sup>

，加氢站内存储的大量高压氢气若发生泄漏，极易形成大规模可燃气云，一经点燃便会引发剧烈的爆炸事故，对生命和财产安全构成严重威胁。对加氢站高压氢气泄漏爆炸事故进行研究，认清事故的发生过程及发展规律十分必要，对防爆区域划分、事故防范控制措施制定等方面都具有重要意义。

目前，评估可燃气

体泄漏爆炸事故后果常使用基于经验或半

经验的扩散和爆炸模型的传统方法<sup>[4]</sup>

。传统方法将气体泄漏后的扩散和爆炸从时间和空间上分

割<sup>[5]</sup>，显然与实际不符。随着计算技术的发展，针对泄漏爆炸事故新的数值方法不断涌现，其中FLACS（flame

accelerate simulator）是一种基于CFD技术的专业模拟气体扩散、燃烧和爆炸的软件，能够耦合火焰与装置、管道、设备等的相互作用和影响，直接对气体爆炸波进行计算，实现对泄漏爆炸后果的量化计算及分析。另外，该软件特别针对氢气的扩散和爆炸对模型进行修正，形成了针对氢气扩散和爆炸的模块。利用该模块的数值模拟结果得到了众多实验的验证，证实了该软件可以用于氢安全的研究<sup>[6-7]</sup>。

本文利用FLACS软件，基于实际运行的加氢站建立几何模型模型，考虑真实场景的情况，对高压氢气从泄漏扩散至点火爆炸的全过程进行模拟，得到了高压氢气泄漏扩散及爆炸的后果，并进行相关分析研究。

## 1 数学模型及参数

### 1.1 数学模型

FLACS是一款采用有限体积法的CFD软件，利用SIMPLE算法结合边界条件，求解质量、动量、能量和组分守恒方程，确定计算区域内的超压、燃烧产物、燃料消耗量、温度等变量。将流动和化学反应的影响通过以下方程予以考虑：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_i\rho\varphi) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho\Gamma_\varphi\frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi)\right] = S_\varphi \quad (1)$$

式中： $\varphi$  为求解变量（质量、动量和能量等变量）， $\rho$  为气体密度， $x_j$  为  $j$  方向上的积分， $\mu_i$  为  $i$  方向上的速度矢量， $\Gamma_\varphi$  为扩散系数， $S_\varphi$  为源项。

### 1.2 几何模型与网格划分

自2006年起，为了展示清洁、安全的氢燃料电池汽车，推动氢能基础设施建设，中国大陆先后建成5座示范运行的加氢站。现以上海世博加氢站为例，对高压氢气泄漏及爆炸后果进行模拟分析。该加氢站南北长60m，东西长50m，四周空旷，以西向东方向建立X轴，自南向北方向建立Y轴，竖直向上方向建立Z轴，计算区域扩大为85m × 80m × 10m，几何模型如图1所示。

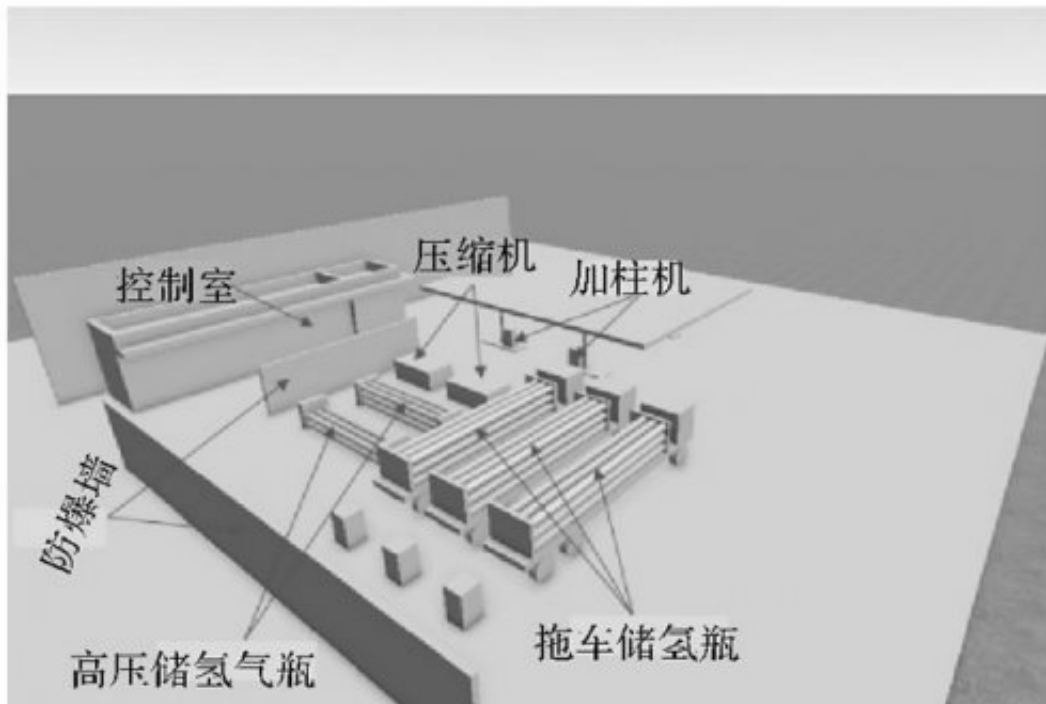


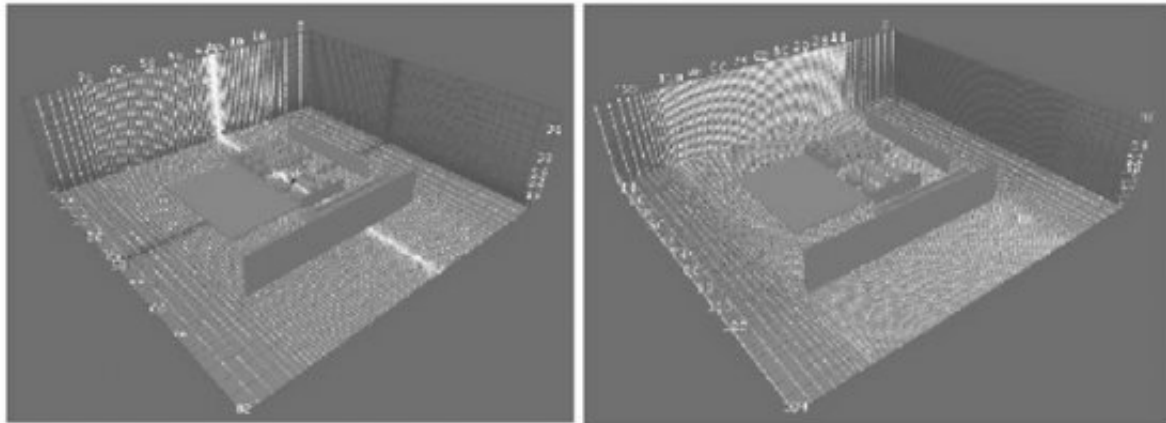
图 1 上海世博加氢站简化几何模型

Fig. 1 Simplified geometric model of Shanghai World Expo Hydrogen Refueling Station

该站采用35MPa压力对氢燃料汽车进行加注，可能发生氢气泄漏的储氢系统包括拖车储氢瓶（16MPa），高压储氢气瓶（39MPa）和加注机（43.8MPa）<sup>[8]</sup>。其中，高压储氢气瓶储氢时间长、储氢容量大、储氢压力高，瓶组仪表管道破损最常见，易引发泄漏事故。本文针对高压储氢气瓶100%直径仪表管道损坏后的泄漏及爆炸进行模拟研究，气瓶容积为0.89m<sup>3</sup>。

，泄漏孔直径为10mm。障碍物会阻碍氢气扩散，增大可燃气云积聚的风险，所以泄漏点、泄漏方向和风向的设定使高压喷射氢气进入储氢气瓶、压缩机和拖车储气瓶所围成的高拥塞度障碍区域。泄漏点位于气瓶中部，高压氢气沿X轴正方向泄漏，环境风速为1m/s，风向也为X轴正方向。在环境温度范围内，氢气密度的变化较小，泄漏量受温度的影响较小，假设瓶内气体温度和环境温度相等，均为常温15。

为了精确捕捉高压氢气高速喷射时的体积分数变化，在扩散求解模型中对泄漏点附近网格进行局部加密，在边界区域适当将网格拉伸以减少网格数量，缩短运算时间，网格划分如图2所示。



(a) 扩散求解的网格

(b) 爆炸求解的网格

图 2 FLACS 求解网格

Fig. 2 Grid in FLACS

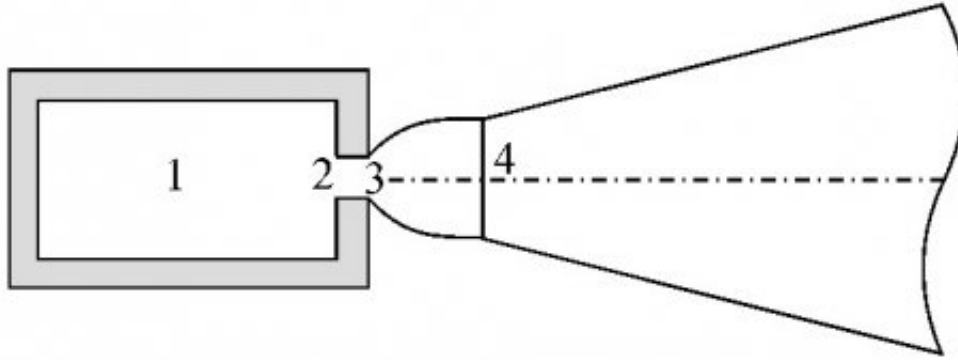
### 1.3 泄漏量计算

绝大多数高压氢气泄漏扩散初期属于亚膨胀射流，泄漏口处的速度为当地声速，但压力高于大气压力，氢气在在泄漏口外的一定区域内进一步膨胀至与环境压力相同<sup>[9]</sup>

，如图3所示。当氢气压力高

于10~20MPa时，理想气体状态方程已不再适用。Molkov等<sup>[10]</sup>基于Abel-

Noble状态方程以及能量和质量守恒方程推导出高压氢气亚膨胀射流的质量流量计算方法：



1-气瓶内部;2-泄漏入口;3-真实泄漏出口;4-假想泄漏出口

图 3 亚膨胀射流模型示意图

Fig. 3 Under-expanded jet scheme

$$\rho_1 = \frac{p_1}{bp_1 + R_{H_2} T_1} \quad (2)$$

$$\left(\frac{\rho_1}{1 - b\rho_1}\right)^{\kappa-1} = \left(\frac{\rho_3}{1 - b\rho_3}\right)^{\kappa-1} \left[1 + \frac{\kappa - 1}{2(1 - b\rho_3)^2}\right] \quad (3)$$

$$\frac{T_1}{T_3} = 1 + \frac{\kappa - 1}{2(1 - b\rho_3)^2} \quad (4)$$

$$\rho_3 = \frac{p_3}{bp_3 + R_{H_2} T_3} \quad (5)$$

$$u_3 = \sqrt{\frac{\kappa p_3}{\rho_3 (1 - b\rho_3)}} \quad (6)$$

$$q_m = \frac{1}{4} \pi d^2 \rho_3 u_3 \quad (7)$$

式中： $\rho_1$  为气瓶内氢气密度； $p_1$  为气瓶内压力， $p_1 = 39 \text{ MPa}$ ； $b$  为 Abel-Noble 余容系数， $b = 7.69 \times 10^{-3}$ ； $R_{H_2}$  为氢气气体常数， $R_{H_2} = 4\,124.24 \text{ J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ； $T_1$  为气瓶内氢气温度， $T_1 = 288 \text{ K}$ ； $\kappa$  为绝热指数，对于氢气取 1.4； $\rho_3$  为真实泄漏口处氢气密度； $T_3$  为真实泄漏口处氢气温度； $p_3$  为真实泄漏口处氢气压力； $u_3$  为真实泄漏口处氢气速度； $q_m$  为质量泄漏流量； $d$  为泄漏孔直径， $d = 10 \text{ mm}$ 。通过计算得到质量泄漏流量为  $1.67 \text{ kg/m}^3$ 。假设氢气以恒定速度泄漏，则  $0.89 \text{ m}^3$  的  $39 \text{ MPa}$  高压储氢气瓶总泄漏时长为  $14 \text{ s}$ 。

## 2扩散模拟结果及分析

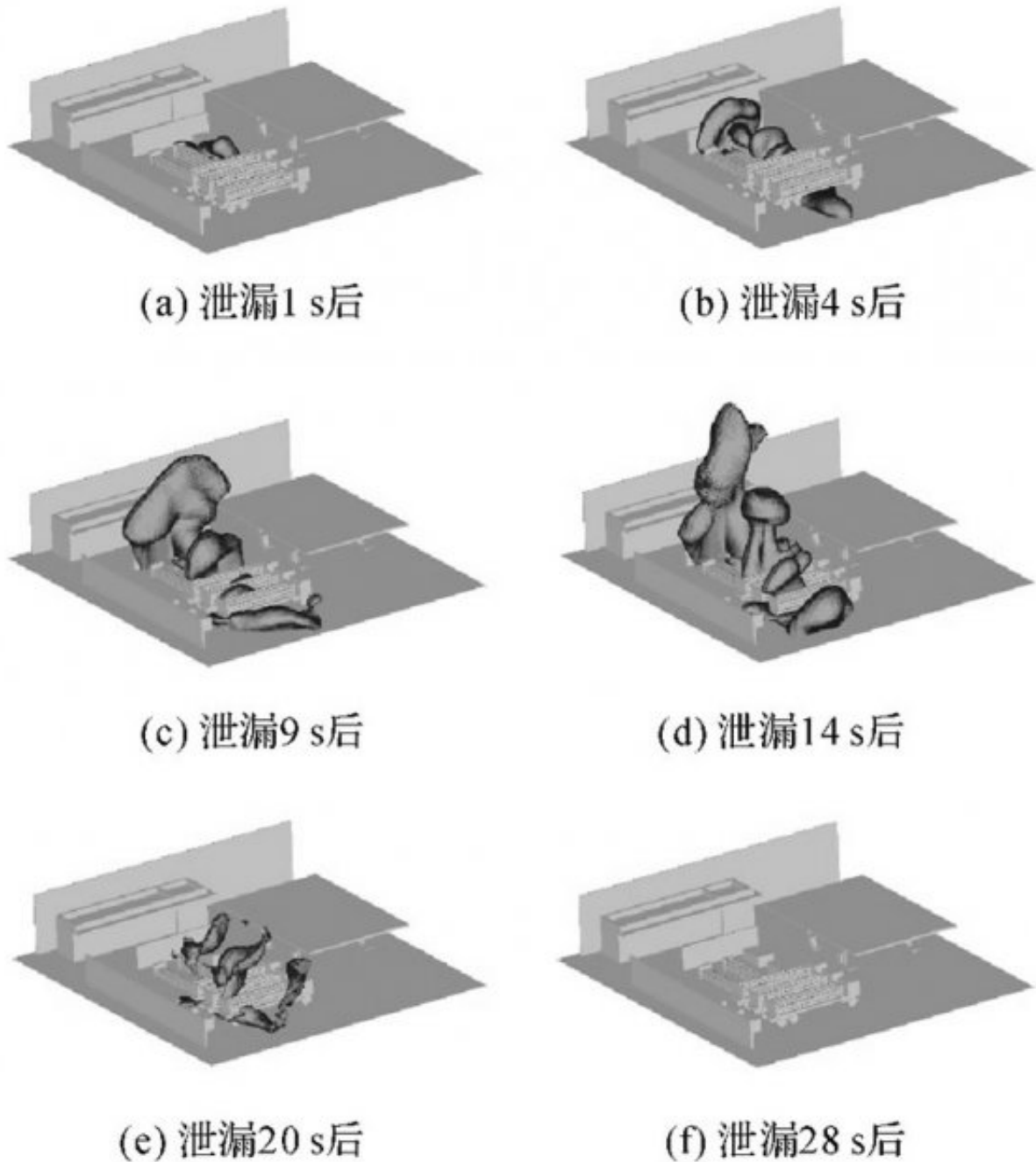


图 4 不同时刻的氢气可燃气云图

Fig. 4 Hydrogen flammable gas cloud at different time

如图4所示为高压储氢气瓶泄漏后不同时刻的氢气可燃气云图（氢气体积分数为4%~74%）。可以看出，在泄漏结束（14s）前，可燃气云体积持续增大，且因为氢气密度远小于空气，呈现不断上升的状态。受障碍物的限制，防爆墙和压缩机附近的可燃气云主要向上扩展，拖车储气瓶附近的氢气可以沿拖车底部及气瓶间空隙横向扩散，在地表形成较大面积的可燃气云，增大了被点燃的风险。同时，较小的环境风速对氢气水平方向扩散速度影响甚微，可燃气云几乎垂直上升。在泄漏停止（14s）后，氢气进一步扩散，体积分数不断减小，可燃气云体积逐渐减小，至泄漏28s后，完全消失。

综上所述可以得出，尽管泄漏孔径只有10mm，但高压氢气泄漏和可燃气体扩散速度极快，工作人员根本没有时间采取措施控制泄漏事故的扩大，该类事故应以预防为主。对于该站的布置情况，当环境风速较小时，可燃氢气云始终被限制在储氢气瓶、压缩机和拖车储氢气瓶所围成的高拥挤度障碍区域，并未大规模扩散至加注机和控制室等人员较密集的场所，在高压储氢区域外设置封闭设施是有效的控制泄漏可燃气体扩散的方法。

### 3 爆炸模拟结果及分析

若在泄漏形成氢气可燃气体云的基础上点燃氢气，就会发生爆炸事故，本文对爆炸过程进行模拟。由图4可知，泄漏结束时（14s）可燃气体云体积最大，被点燃的概率也最大，因此选择在此时将氢气点燃。压缩机内含有大量电气、电子设备，容易形成电火花而点燃氢气，将点火位置设定为压缩机附近。

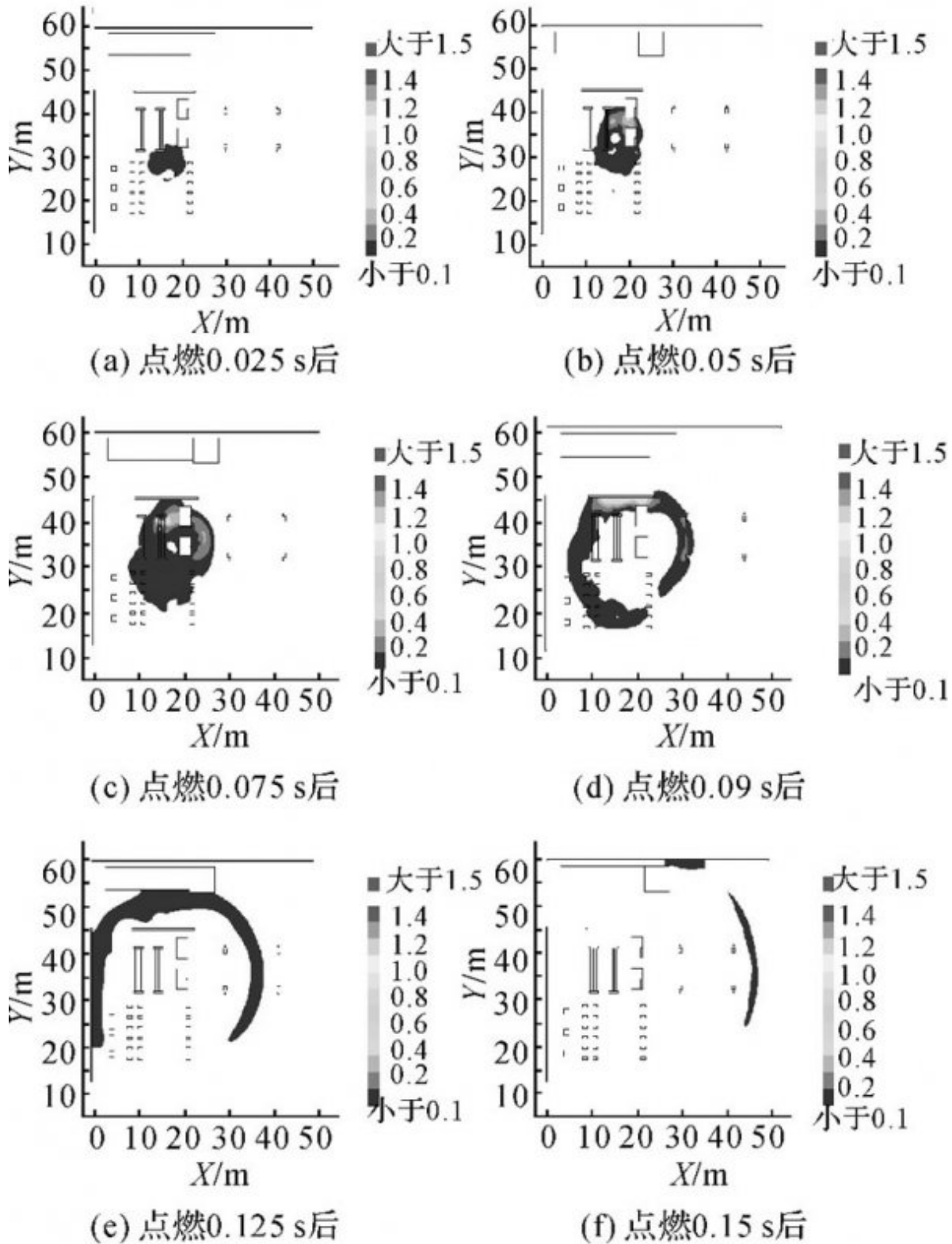


图 5 X-Y 截面爆炸超压随时间分布图

Fig. 5 Temporal trends of overpressure at X-Y cross section



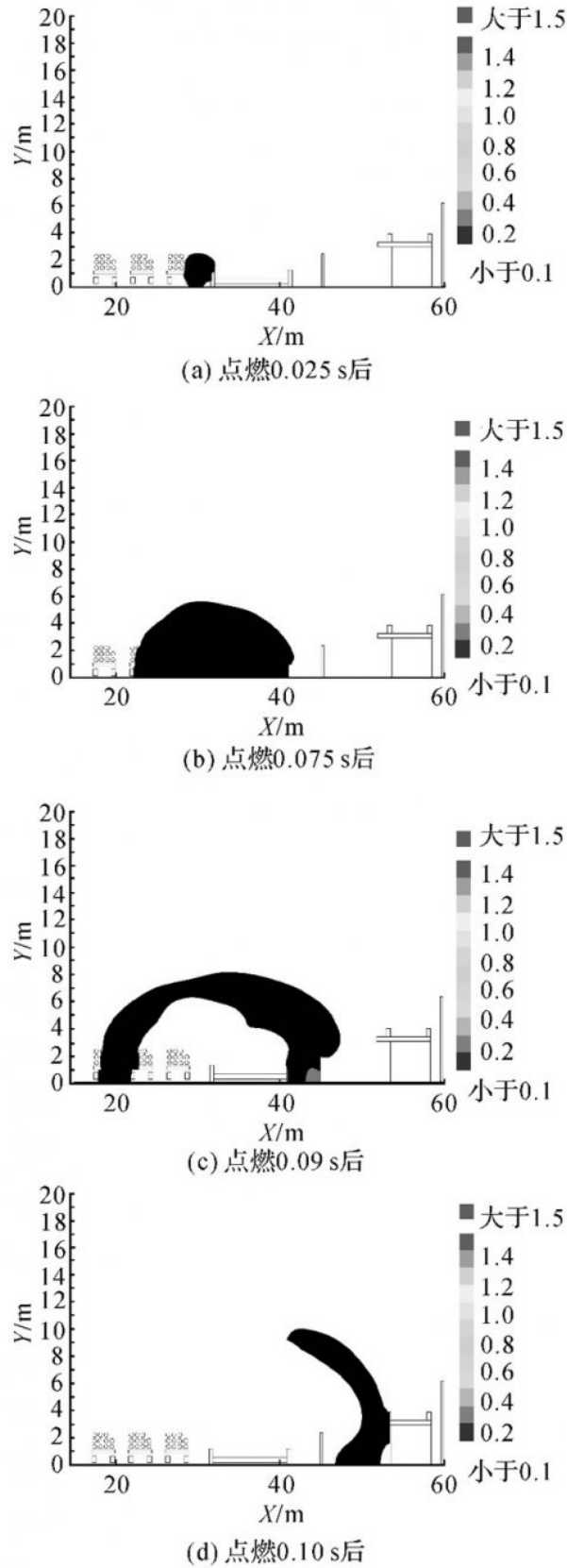


图 6 Y-Z 截面爆炸超压随时间分布图

Fig. 6 Temporal trends of overpressure at Y-Z cross section

如图5、6所示分别为X-Y截面和Y-Z截面爆炸超压随时间的分布图。氢气可燃气体点火爆炸后，超压逐渐由点燃位置以恒定值平稳向外传播（0~0.025s）。当遇到站内密集管道及设备时，如高压储氢气瓶、压缩机和防爆墙等，超压明显增强，且由图5（b）、（c）、（d）对比可知，障碍区域拥塞度越大，爆炸超压越强（0.05~0.09s），最大可以增至350kPa，是空旷区域超压的50倍。这是因为，在障碍区域氢气可燃气体云内混合气体的湍流程度较强，燃烧波面与未燃气体的接触面积较大，从而加快了气体化学反应速率，即燃烧速率<sup>[11]</sup>

，气体瞬间吸收大量燃烧产热后体积急剧膨胀，超压迅速上升；此外，超压波在障碍物壁面上反射，与火焰锋面相遇并相互作用，使得未燃烧气体全部参与燃烧，加剧了热量释放和气体体积膨胀，超压进一步增强。其中，高压储氢气瓶局部最大的超压为350kPa，小于能够承受的最大压力，因此不会造成其他气瓶的损坏，引发进一步的连续爆炸事故而产生更严重的后果。防爆墙的局部最大超压为60kPa，低于可致其破坏的超压值。随着时间的推移（0.09~0.15s），超压波可以越过防爆墙向外继续扩张，但强度逐渐减弱，直至0.15s完全消失殆尽。

可燃氢气云爆炸产生超压对人和建筑物均会造成伤害，本文选用的超压伤害准则如表1所示。为了保障加氢站发生重大事故时的人身安全，需要确定爆炸事故对人造成严重危害的影响距离<sup>[12]</sup>（以下简称危害距离）作为加氢站制定事故应急预案的重要依据。

表 1 爆炸超压伤害准则

Tab. 1 Damage criterion for explosion overpressure

对象	危害等级	超压/kPa
对人 <sup>[13]</sup>	可造成 1% 死亡概率	7
对建筑物 <sup>[14]</sup>	除防地震钢筋混凝土外 其他建筑物均被破坏	100
	防地震建筑物破坏或严重破坏	150

氢气可燃气体云爆炸的危害区域随时间分布如图7所示。深色部分对应的超压为7kPa。可燃气体云自点燃后，危害区域可在0.15s的时间内由点燃位置以不规则形状向外扩张，在向控制室以及拖车储氢瓶方向传播过程中，受障碍物的阻挡迅速消退，而在较空旷的加注区域继续延伸，最大危害距离可达32.2m。由模拟结果可知，氢气可燃气体云在体积最大时被点燃，爆炸危害区域可以覆盖几乎整个加氢站，对暴露在室外的人员造成伤害，而控制室外墙上的超压小于可对墙体造成破坏的容限值，因此，位于控制室内的人员相对安全。

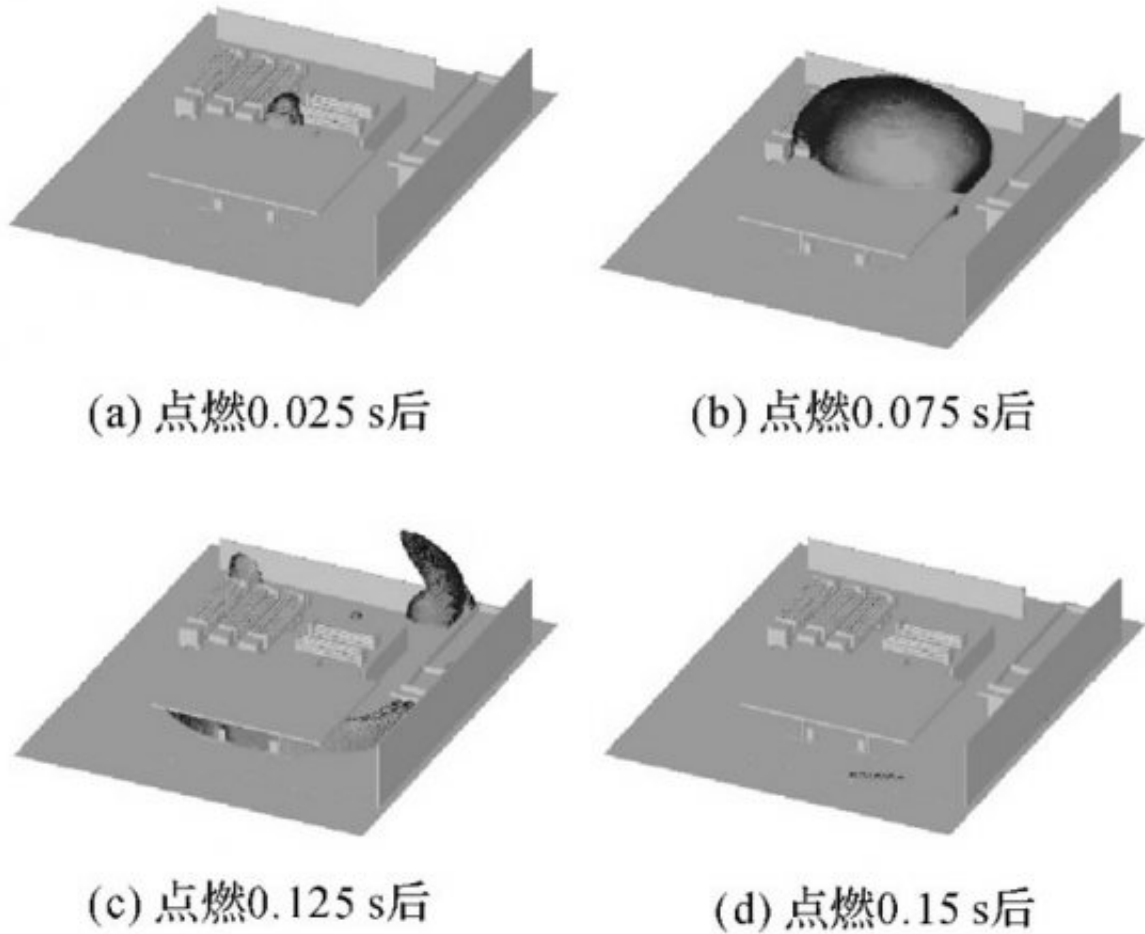


图 7 危害区域随时间分布图

Fig. 7 Temporal trends of hazard area

#### 4不同环境风速的影响

为了进一步研究不同环境风速对加氢站高压氢气泄漏后爆炸事故的影响规律，分别对风速为1、3、5、7、9、12m/s时的爆炸场景进行模拟。

较大的环境风速可能加剧了氢气可燃气体内混合气体的湍流程度，导致爆炸强度显著增强。如表2所示为模拟得到的不同环境风速防爆墙和氢气压缩机处最大超压。可以看出，爆炸超压随风速的增大而增大。当环境风速 $>9\text{m/s}$ 时，防爆墙处的最大超压已超过其可以承受的最大压力，不再具备防爆保护能力，严重威胁控制室内人员的安全。氢气压缩机处的最大超压随风速的增加可由 $50\text{kPa}$ 增至 $230\text{kPa}$ ，需要在压缩机外部设置足够强度的防爆保护设施，以免造成氢气压缩机的损坏，引发更大规模的高压氢气泄漏和爆炸，加重事故后果。

**表 2 不同环境风速防爆墙和氢气压缩机处最大超压**

Tab. 2 Max-overpressure at explosion-proof wall and hydrogen compressor in different wind speed

风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	最大爆炸超压	
	防爆墙处/kPa	氢气压缩机处/kPa
1	60	50
3	90	90
5	118	145
7	140	175
9	160	210
12	185	230

针对上海世博加氢站，将FLACS模拟得到的危害距离与文献[15]的计算结果进行对比，如表3所示。李志勇等<sup>[15]</sup>采用基于扩散模型与Baker-Strehlow气云爆炸模型相结合的传统方法，针对同样的泄漏条件，确定了可对人造成伤害的危害距离。

表 3 不同环境风速爆炸危害距离对比

Tab. 3 Hazard distance in different wind speeds

风速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	危害距离	
	经验公式计算	FLACS 计算
	结果 <sup>[15]</sup> /m	结果/m
1	40.2	32.2
3	41.2	31.0
5	42.2	28.6
7	43.2	30.2
9	44.2	34.5
12	44.2	36.2

从表3可以看出，不同环境风速的爆炸场景，经验公式偏保守，计算得到的危害距离较FLACS模拟结果均高20%~30%。此外，采用2种方法得到的危害距离随环境风速变化的规律不同：利用经验公式计算得到的危害距离随风速的增大而不断增大，通过FLACS模拟得到的危害距离随风速的增大呈先减小后增大的趋势。这可能是因为较大的风速在使可燃气体沿横向方向运动、增大其在顺风方向爆炸影响范围的同时，也加剧了氢气向四周的扩散运动，具有一定的稀释作用，使得氢气体积分数降低，可燃气体云的体积减小。如图8所示为不同环境风速下，高压氢气泄漏12s时的可燃气体云分布图。对于设备管道复杂密集、结构布置复杂的加氢站等场所，经验公式难以很好地适用。

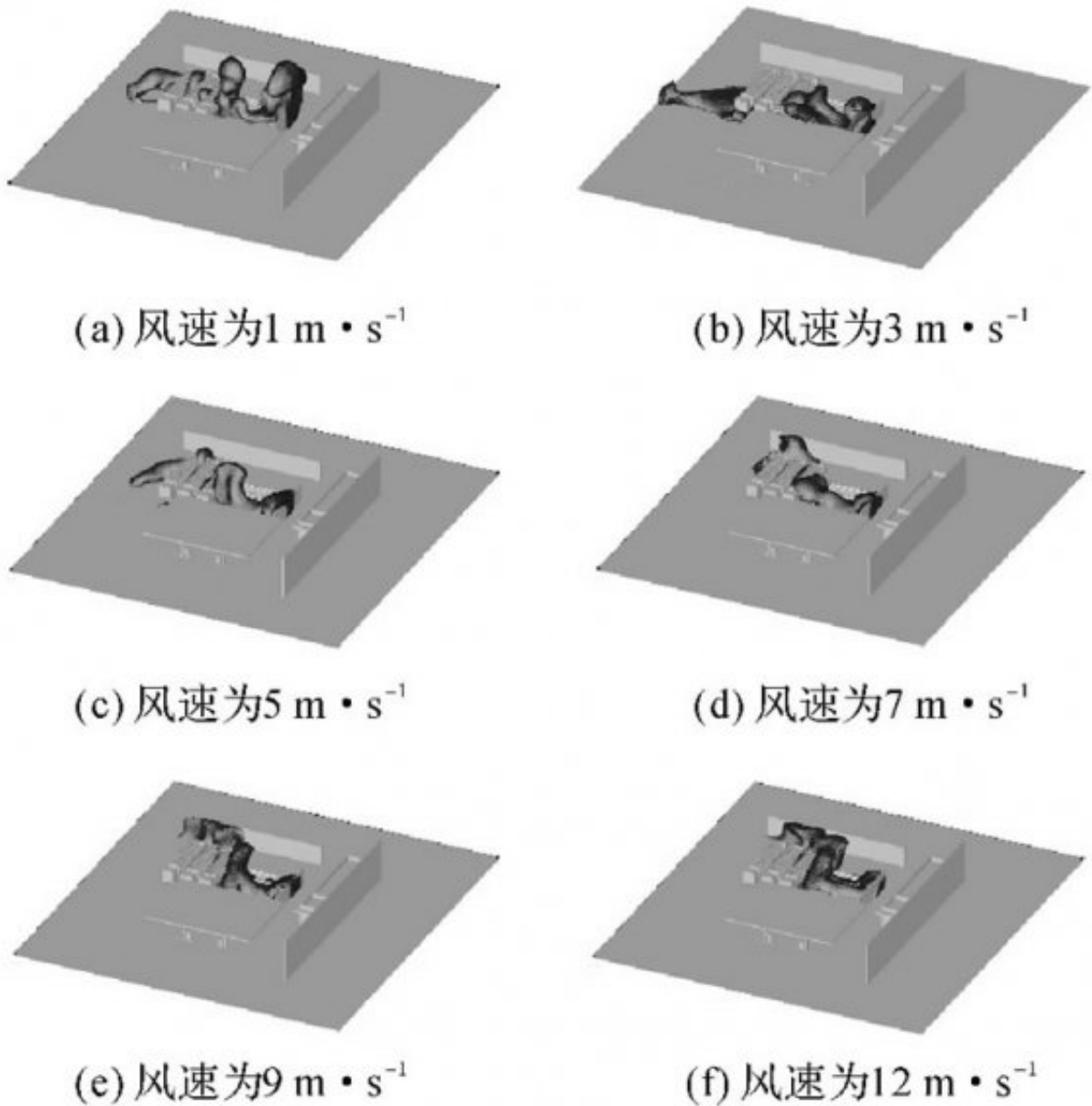


图 8 不同环境风速  $t=12 \text{ s}$  时的可燃气云

Fig. 8 Hydrogen flammable gas cloud at 12 second in different wind speeds

#### 5结论

(1) 基于FLACS的数值模拟方法能够实现高压氢气泄漏爆炸事故全过程的模拟，对爆炸超压波进行实时的三维展示，有助于认清爆炸事故的发生过程及发展规律，可以为加氢站装置应急状态下的防护区域划分、事故调查等提供依据。

(2) 爆炸强度在障碍区域明显增强，且障碍区域拥塞度越大，爆炸超压越强，最大可以增至空旷区域超压的50倍。采用数值模拟方法可以实现对拥塞区域局部超压的预测，而基于经验公式的传统方法无法做到。

(3) 随着环境风速的增加，爆炸强度随之增大，当环境风速超过 $9 \text{ m/s}$ 时，该加氢站的防爆墙已无法阻挡爆炸超压

波的传播，此外，需要在氢气压缩机外部设置足够强度的防爆设施，以免引起进一步的高压氢气泄漏和爆炸，加重事故的严重性。

(4) 对比危害距离模拟值与经验公式计算值发现：不同环境风速的高压氢气泄漏爆炸事故，采用经验公式计算得到的危害距离均略高于FLACS的模拟结果，较保守。

## 参考文献 (References) :

- [1] 郑津洋, 李静媛, 黄强华, 等. 车用高压燃料气瓶技术发展趋势和我国面临的挑战 [J]. 压力容器, 2014, 31(2): 43-50.  
ZHENG Jin-yang, LI Jing-yuan, HUANG Qiang-hua, et al. Technology trends of high pressure vehicle fuel tanks and challenges for china [J]. **Pressure Vessel**, 2014, 31(2): 43-50.
- [2] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH. Hydrogen filling stations worldwide [EB/OL]. 2014-06-16. <http://www.h2stations.org>.
- [3] 冯文, 王淑娟, 倪维斗, 等. 氢能的安全性和燃料电池汽车的氢安全问题 [J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 677-681.  
FENG Wen, WANG Shu-juan, NI Wei-dou, et al. The safety of hydrogen energy and fuel cell vehicles [J].

- Journal of Solar Energy**, 2003, 24(5): 677-681.
- [4] 张方敏, 徐冰, 尹新, 等. 氯化氢事故泄漏扩散的后果模拟分析 [J]. **安全与环境学报**, 2011, 11(4): 193-196.  
ZHANG Fang-min, XU Bing, YIN Xin, et al. Simulation analysis on accident consequence of hydrogen chloride leakage and dispersion [J]. **Journal of Safety and Environment**, 2011, 11(4): 193-196.
- [5] KIM E, PARK J, CHO J H, et al. Simulation of hydrogen leak and explosion for the safety design of hydrogen fueling station in Korea [J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2013, 38 (3): 1737-1743.
- [6] MIDDHA P, HANSEN O R, GROETHE M, et al. Hydrogen explosion study in a confined tube: FLACS CFD simulations and experiments [C]// **Proceedings of the 21st International Colloquium of Dynamics of Explosions and Reactive Systems**. Poitou: University of Poitiers, 2007.
- [7] PRANKUL M, OLAV R H. Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies [J]. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, 2009, 22(3): 295-302.
- [8] LI Zhi-yong, PAN Xiang-min, MA Jian-xin. Quantitative risk assessment on 2010 Expo hydrogen station [J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2011, 36(6): 4079-4086.
- [9] MOLKOV V. **Fundamentals of hydrogen safety engineering** [M]. London: Ventus Publishing ApS, 2012.
- [10] MOLKOV V, MAKAROV D, BRAGIN M. Physics and modelling of under-expanded jets and hydrogen dispersion in atmosphere [J]. **Physics of Extreme State of Matter**, 2009, 11(6): 143-145.
- [11] KENNETH K. **Principles of combustion** [M]. New York: Wiley, 2005.
- [12] 赵文芳. 化学品事故应急响应中危害距离的确定 [J]. **中国安全生产科学技术**, 2009, 5(4): 171-174.  
ZHAO Wen-fang. Determination of hazard distance in the chemicals accidents emergency [J]. **Journal of Safety Science and Technology**, 2009, 5(4): 171-174.
- [13] IGO Doc 75/07/E/rev, Determination of safety distances [S]. [S. l.]: European Industrial Gases Association, 2007.
- [14] 刘诗飞, 詹予忠. 重大危险源辨识及危害后果分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 94-96.
- [15] 李志勇, 潘相敏, 马建新. 加氢站氢气事故后果量化评价 [J]. **同济大学学报: 自然科学版**, 2012, 40(2): 286-291.  
LI Zhi-yong, PAN Xiang-min, MA Jian-xin. Quantitative assessment on hydrogen releases of hydrogen refueling station by consequence modeling [J]. **Journal of Tongji University: Natural Science**, 2012, 40(2): 286-291.



原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/156438.html>