临时加氢站火灾爆炸风险评估及防范对策

路世昌[1]，王刚[2]，彭锦志[3]，郭伟[1]

（1.公安部天津消防研究所，天津300381；2.深圳市公安局消防监督管理局，广东深圳518031；3.中南大学土木工程学院，湖南长沙410075）

摘要：对临时加氢站的火灾爆炸危险性进行分析，辨识场站的重大危险源，对移动加氢车和氢气长管拖车上的高压氢气集装管束进行火灾爆炸事故后果模拟分析。计算得到临时加氢站发生蒸气云爆炸和喷射火事故的死亡半径、重伤半径和轻伤半径，提出临时加氢站的重点防范区域，以弥补因临时加氢站选址和防火间距不足带来的火灾隐患和先天缺陷，为减少或降低临时加氢站发生火灾爆炸对人员和财产的危害提供技术依据。

深圳2011年第26届世界大学生夏季运动会期间共投入62辆燃料电池车辆，其中场地观光车60辆，大巴车2辆。燃料电池车辆投放使用是大运会新能源汽车示范运行的重要组成部分。为给燃料电池车辆加注氢气，需建设临时加氢站。临时加氢站位于深圳市宝龙大道和宝龙一路的交叉路口附近，占地面积1332m^2。南侧和西侧部分区域设有防爆墙，其余外墙均为铁丝网围护隔墙。

临时加氢站包括一辆氢气长管拖车（设计压力为20MPa）、一辆移动加氢车（设计压力为45MPa）、两台隔膜式压缩机（设计压力为45MPa，单台流量90m^3/h）、一台双枪加气机（设计压力为35MPa）以及一台卸气柱（设计压力为25MPa），还设有氮气集装格、氮气泄气管、氢气卸车软管、冷却器、空气压缩机、氢气放散管和电气控制设备等。其中，工艺管道主要包括氢气加注管道、氮气吹扫和自控气管道、氢气放散管道和空气正压吹扫管道。

站场内不设置氢气储罐，氢气通过氢气长管拖车从工厂运送至临时加氢站的指定区域。车辆加氢时由压缩机将管束车中输出的氢气加压到35MPa，通过加氢机充装到燃料电池汽车的车载储氢瓶中，或加压到43.8MPa，通过加氢机充装到移动加氢车的储氢瓶组中。

临时加氢站在城市干道的交叉路口附近，加氢站东侧和北侧为停车场，站场属二类保护物，站内的设施与停车场的防火间距不足，且北侧未采用实体墙进行分隔，这些均不符合现行国家标准GB50516-2010《加氢站技术规范》的相关规定。同时，氢气为易燃易爆气体，火灾爆炸的危险性高，为确保临时加氢站在大运会期间的安全使用和运营，对临时加氢站可能存在的火灾爆炸风险进行评估并提出相关防范对策具有重要的现实意义。

1临时加氢站火灾爆炸危险性分析

1.1重大危险源辨识

临时加氢站内贮存的化学危险品为氢气。依据现行国家标准GB18218-2009《重大危险源辨识》和安监管协调字[2004]56号《关于开展重大危险源监督管理工作的指导意见》文件规定，生产场所危险物质的临界量为1t，贮存区为10t。同时，属下列条件之一的压力容器构成重大危险源：介质毒性程度为极度、高度或中度危害的三类压力容器；易燃介质，最高工作压力≥0.1MPa，且PV≥100MPa·m^{3}的压力容器（群）。

临时加氢站内的氢气长管拖车采用9瓶559集装管束，设计压力25MPa，最高承压23MPa，容积为20.25m^3；移动加氢车采用7瓶406集装管束，工作压力为45MPa，容积为3.64m^3。因此，临时加氢站内的移动加氢车和氢气长管拖车均构成重大危险源。

1.2氢气固有的火灾爆炸危险因素分析

（1）易燃性。氢气属2.1类易燃气体，点火能量很低，在空气中的最小点火能为0.019mJ，在氧气中的最小点火能为0.007mJ，一般撞击、摩擦、不同电位之间的放电、各种爆炸材料的引燃、明火、热气流、高温烟气、雷电感应、电磁辐射等都可点燃氢-空气混合物；氢气燃烧时的火焰无颜色，肉眼不易察觉，具有较大的火灾危险性。

（2）易爆性。氢气在空气中的爆炸范围较宽，为4%~75%（体积分数），在氧气中的爆炸范围为4.5%~95%（体积分数），因此氢气-空气混合物很容易发生爆燃，爆燃产生的热气体迅速膨胀，形成的冲击波会对人员造成伤亡，对周围设备及附近的建筑物造成破坏。

（3）毒性。氢气无色、无味，为无毒性物质，空气中高浓度氢气易造成缺氧，会使人窒息。氢气比空气密度小，相对密度0.07，泄漏后会迅速向高处扩散；与空气混合容易形成爆炸性混合物。氢气的化学活性很大，与空气、氧、卤素和强氧化剂能发生剧烈反应，有燃烧爆炸的危险，而金属催化剂如铂和镍等会促进上述反应。

（4）热膨胀性。氢气的体积会随着温度的升高而明显膨胀，如果高压储存管道或容器遭受暴晒或靠近高温热源，容器内的介质受热膨胀造成容器内压增大而膨胀，可能发生压力容器爆炸，引起氢气泄漏。

1.3临时加氢站火灾爆炸危险因素分析

临时加氢站的整个工艺流程在无泄漏的条件下进行，当发生泄漏并达到燃烧浓度或爆炸浓度范围，同时有大于最小点火能的点火源存在时会引发火灾爆炸事故。因此，在对临时加氢站火灾爆炸危险因素进行分析时，应从氢气的泄漏和点火源两个角度加以考虑。

氢气的泄漏包括集装管束泄漏、压缩机泄漏、加气机泄漏，以及设计不合理、施工质量问题、连接处疲劳失效、腐蚀性危害、外力作用、违章作业、管理不到位等造成的高压管线系统泄漏。产生点火源的原因包括违章动火作业、现场吸烟、机动车辆排烟带来的明火，以及由于电气设备缺陷及故障、静电、雷击及杂散电流、机器通风散热不良、手机电磁火花、撞击火花等及高温物质。

2临时加氢站火灾爆炸事故后果模拟分析

临时加氢站内移动加氢车和氢气长管拖车上的高压氢气集装管束具有高压、易燃易爆的特点，火灾爆炸是高压氢气集装管束的主要危险因素。若发生火灾爆炸事故，将造成严重人员伤亡和巨大财产损失，影响社会安定。因此，对高压氢气集装管束进行火灾爆炸事故后果模拟分析，了解火灾爆炸事故后果的严重情况及影响范围，针对性地采取火灾爆炸事故防范措施，具有重要意义。

高压氢气集装管束作为压力容器，有可能发生的事故有泄漏、火灾、爆炸。高压氢气集装管束可能因超压引起集装管束破裂而发生物理性爆炸，同时，可能由于物理性爆炸引发二次化学爆炸，引起蒸气云爆炸。一般情况下，蒸气云爆炸比物理性爆炸严重得多。另外，当高压氢气集装管束由于管束破裂、管束阀门、管束或其他元器件接头处损坏等原因造成泄漏，当为有限孔洞的泄漏时，在泄漏口形成射流，遇点火源则可产生喷射火；当发生大面积的破裂时，泄漏的氢气有可能形成气云团，遇点火源时有可能形成蒸气云爆炸。因此，高压氢气集装管束可能发生的较为严重的事故有蒸气云爆炸和喷射火事故。

氢气长管拖车和移动加氢车上分别采用两种不同的高压氢气集装管束，笔者分别对这两种高压氢气集装管束进行火灾爆炸事故后果模拟分析。

2.1高压氢气集装管束蒸气云爆炸模型

蒸气云爆炸（Vapor Could Explorsion，简称“VCE”）是一类经常发生且后果十分严重的爆炸事故。在蒸气云爆炸情况下，爆炸波致死半径、重伤半径、轻伤半径均大于热辐射致死半径、重伤半径、轻伤半径。

2.1.1 蒸气云爆炸总能量

氢气的蒸气云爆炸总能量 E 如式(1)所示。

$$E=\alpha A V H_c \tag{1}$$

式中：E 为蒸气云爆炸的总能量，kJ；α 为地面爆炸系数，取 1.8；A 为蒸气云的 TNT 当量系数，即为参与蒸气云爆炸并对爆炸波的产生有实际贡献的燃料占泄漏燃料的百分比，取值范围为 0.02%～14.9%，这个范围的中值是 3%～4%，取 4%；V 为泄漏到空气中的氢气的体积，m^3；H_c 为泄漏的氢气的燃烧高热值，取 285.8 kJ/mol。

2.1.2 氢气的 TNT 当量 W_{TNT} 计算

氢气的 TNT 当量 W_{TNT} 如式(2)所示。

$$W_{TNT}=\frac{E}{Q_{TNT}} \tag{2}$$

式中：W_{TNT} 为蒸气云的 TNT 当量，kg；E 为蒸气云爆炸的总能量，kJ；Q_{TNT} 为 TNT 爆热，取值 4 520 kJ/kg。

2.1.3 爆炸冲击波伤害－破坏作用

对于在爆炸中人员的伤害评估，最有意义的是划分出死亡区、重伤区和轻伤区，评估标准如表 1 所示。

表 1 爆炸冲击波导致的人员伤害的评估标准

区域	定　义
死亡区	区域内人员因冲击波作用导致肺出血死亡概率为 50%
重伤区	区域内入射超压为 44 000 Pa 时，人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 50%
轻伤区	区域内入射超压为 17 000 Pa 时，人员因冲击波作用而耳膜破裂的概率为 1%

(1)死亡区半径。该区内的人员如缺少防护，则被认为将无例外地蒙受严重伤害或死亡。其内径为零，外径记为 R_1，如式(3)所示，表示外圆周处人员因冲击波作用导致肺出血而死亡的概率为 0.5。

$$R_1=13.6\left(\frac{W_{TNT}}{1\ 000}\right)^{0.37} \tag{3}$$

(2)重伤区半径。该区内的人员如缺少防护，则绝大多数将遭受严重伤害，极少数人可能死亡或受轻伤。其内径为死亡半径 R_1，外径记为 R_2，计算方法如式(4)所示，表示该处人员因冲击波作用耳膜破裂的概率为 0.5。

$$\Delta P=0.137Z^{-3}+0.119Z^{-2}+0.269Z^{-1}-0.091 \tag{4}$$

式中：$Z=R_2\cdot(P_0/E)^{1/3}$，R_2 为目标到爆源的水平距离，即重伤区外径，m；P_0 标准大气压，取值 101 300 Pa；E 为爆炸总能量，J；ΔP 为冲击波超压，$\Delta P=44\ 000/P_0$，Pa。

(3)轻伤区半径。该区内的人员如缺少防护，则绝大多数将遭受轻微伤害，少数人将受重伤或平安无事，死亡的可能性极小。该区内径为重伤区的外径 R_2，外径为 R_3，计算方法如式(5)所示，表示外边界处人员因冲击波作用耳膜破裂的概率为 0.01。

$$\Delta P=0.137Z^{-3}+0.119Z^{-2}+0.269Z^{-1}-0.091 \tag{5}$$

式中：$Z=R_3\cdot(P_0/E)^{1/3}$；R_3 为目标到爆源的水平距离，即轻伤区外径，m；P_0 标准大气压，取值 101 300 Pa；E 为爆炸总能量，J；ΔP 为冲击波超压，$\Delta P=17\ 000/P_0$，Pa。

(4)安全区。该区内人员即使无防护，绝大多数人也不会受伤，死亡率几乎为零。该区内径为轻伤区的外径 R_3，外径为无限大。

2.2高压氢气集装管束喷射火模型

喷射火由加压的可燃物泄漏时所形成射流在泄漏口处被点燃形成。氢气集装管束中气瓶压力高，一旦发生喷射火事故，会对周围人员和财产安全构成极大威胁。

2.2.1　热辐射强度计算模型

喷射火是一种包括气流效应在内的喷射扩散模式的扩展，把整个喷射火看成由沿喷射中心线上的所有点热源组成，每个点热源的热辐射通量相等，计算方法如式(6)所示。

$$q=\eta Q_0 Q_f \tag{6}$$

式中：q 为点热源辐射能量，W；η 为效率因子，取 0.35；Q_0 为氢气泄漏速度，kg；Q_f 为氢气燃烧热，取 285.8 kJ/mol。

(1)氢气泄漏速度。氢气泄漏速度与泄漏氢气的流速以及气瓶内的压力有关，氢气的流速不同，计算方法不同，泄漏速度也就不同。利用伯努利方程和绝热方程，可得泄漏速度估算公式如式(7)所示。

$$Q_0=YC_dAP\sqrt{\frac{Mk}{RT}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \tag{7}$$

其特征可以用临界或亚临界流来描述。临界流(其最大出口速度等于声速)发生与否依赖于储存压力与大气压力之比。

当 $\frac{P_0}{P}\leqslant\left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$ 时，气体流动属音速流动，流出系数 $Y=1.0$；

当 $\frac{P_0}{P}>\left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$ 时，气体流动属亚音速流动，流出系数计算如式(8)所示。

$$Y=\left[\frac{P_0}{P}\right]^{1/k}\times\left\{1-\left[\frac{P_0}{P}\right]^{(k-1)/k}\right\}^{1/2}\times\left\{\left[\frac{2}{k-1}\right]\times\left[\frac{k+2}{2}\right]^{(k+1)/(k-1)}\right\}^{1/2} \tag{8}$$

式中：C_d 为气体泄漏系数，当裂口形状为圆形时取 1.00，三角形时取 0.95，长方形时取 0.90；A 为裂口面积，m^2；M 为气体摩尔质量，kg/mol；k 为气体的绝热指数，即定压比热容 C_P 与定容比热容 C_V 之比，氢气 $k=1.41$；R 为气体常数，8.314 J/(mol·K)；T 为环境温度，其值取 293 K；P_0 为大气环境压力，其值为 101 300 Pa；P 为气瓶内的氢气压力，其值取 20×10^6 Pa。

(2)热辐射强度。距离假设点热源 x 处的目标的入射热辐射强度 I，如式(9)所示。

$$I=\frac{q\lambda}{4\pi x^2} \tag{9}$$

2.2.2　喷射火的伤害—破坏作用

当喷射火产生的热辐射强度足够大时，可能烧毁设备甚至造成人员伤亡等。热辐射造成伤害或损坏的情况取决于人员或物体处辐射热的多少，即入射热辐射通量。表 2 为不同入射热辐射通量造成损伤的情况。

表 2　不同的入射热辐射通量所造成的损伤情况

伤害分区	入射通量 /kW/m²	对设备的损害	对人的伤害
致死区	$37.5 \leqslant I$	操作设备全部损坏	1%死亡(10 s),100%死亡(1 min)
重伤区	$25 \leqslant I < 37.5$	在无火焰、长时间辐射下,木材燃烧的最小能量	重大烧伤(10 s),100%死亡(1 min)
轻伤区	$12.5 \leqslant I < 25$	有火焰时,木材燃烧,塑料熔化的最低能量	1 度烧伤(10 s),1%死亡(1 min)
危险区	$4.0 \leqslant I < 12.5$		20 s 以上感觉疼痛,未必起泡

从表 2 可以看出,在较小的辐射等级时,致人重伤需要一定的时间,这时,人们可以逃离现场或掩蔽起来。根据表 3 中不同损失入射通量阈值,可确定喷射火造成不同灾害的半径,如式(10)所示。

$$x=\sqrt{\frac{q\lambda}{4\pi I}} \tag{10}$$

2.3临时加氢站火灾爆炸事故后果分析结果

运用物理爆炸模型、蒸气云爆炸模型和喷射火模型，对氢气长管拖车和加氢车配备的高压氢气集装管束进行火灾爆炸事故后果分析，结果如表3所示。

表 3　蒸气云模型和喷射火模型计算结果

事故类型	发生位置	死亡半径 R_1 /m	重伤半径 R_2 /m	轻伤半径 R_3 /m
蒸气云爆炸模型	氢气长管拖车	5.6	15.9	24.9
	移动加氢车	4.4	12.8	19.9
喷射火模型	氢气长管拖车	9.8	11.9	16.9
	移动加氢车	14.6	17.9	25.3

3临时加氢站火灾爆炸防范对策

由于临时加氢站作为大运会临时设施仅在深圳大运会期间使用，为防范临时加氢站发生火灾爆炸对周边人员和财产造成损伤，同时，为弥补因临时加氢站选址和防火间距不足带来的火灾隐患和先天缺陷，结合表3火灾爆炸事故后果模拟分析所得到对人员的伤害范围，将重伤半径范围内的区域作为重点防范区域，建议在重点防范区域范围设置警戒标志，加强管理，严禁人员随意进入该区域。

由表3可得，氢气长管拖车的重点防范半径为15.9m，移动加氢车的重点防范半径为17.9m，同时，结合规范对加氢站防火间距的要求，得到临时加氢站所要设置的警戒区域，具体的警戒范围如图1所示。

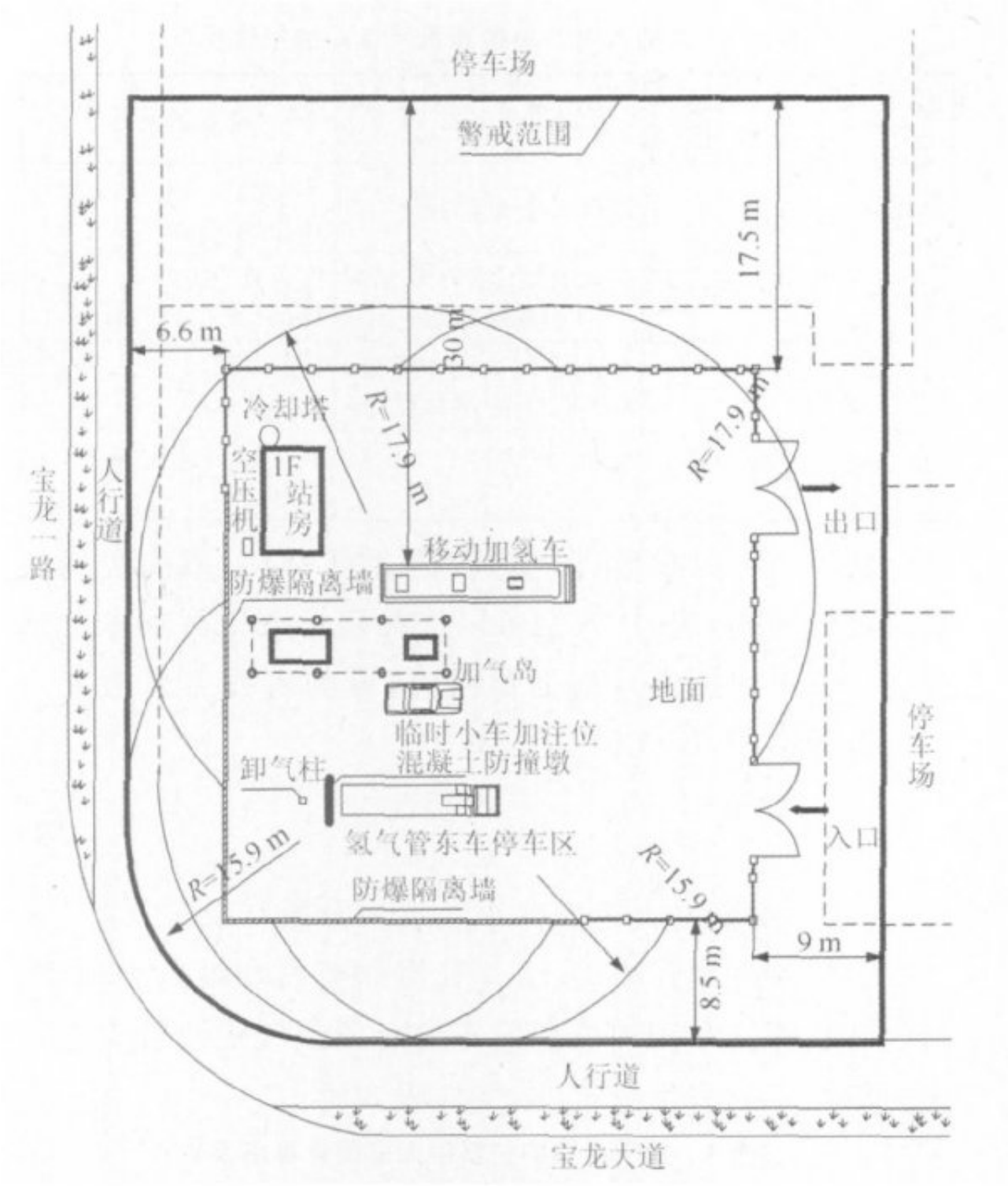

图 1　临时加氢站警戒范围示意图

4结束语

临时加氢站的建设是深圳第26届大运会新能源汽车的动力保证。氢气是易燃易爆气体，加氢站内的高压氢气集装管束最高压力达45MPa，火灾爆炸是高压氢气集装管束的主要危险因素。同时，临时加氢站选址在城市干道的交叉路口附近，站内设施与周边的防火间距不足，站场北侧未采用实体墙实施分隔，不符合国家现行标准的规定。因此，笔者对临时加氢站进行火灾爆炸风险评估，并提出相关防范对策以减少或降低临时加氢站发生火灾爆炸对人员和财产的危害。

（1）通过对临时加氢站进行重大危险源辨识，确定临时加氢站内的移动加氢车和氢气长管拖车上的高压氢气集装管束为重大危险源。同时，从氢气固有的火灾爆炸危险因素和站内设备设施存在的火灾爆炸危险因素对临时加氢站的火灾爆炸危险性进行分析。

（2）为了解临时加氢站发生火灾爆炸所产生的后果严重情况及影响范围，对移动加氢车和氢气长管拖车上的高压氢气集装管束进行火灾爆炸事故后果模拟分析。分别计算移动加氢车和氢气长管拖车发生蒸气云爆炸事故和喷射火事故的死亡半径、重伤半径和轻伤半径。

（3）为防范临时加氢站发生火灾爆炸对周边人员和财产造成损伤，并弥补因临时加氢站选址和防火间距不足所带来的火灾隐患和先天缺陷，由临时加氢站火灾爆炸事故后果分析结果，将重伤半径范围内的区域作为重点防范区域，结合规范对加氢站防火间距的要求，得到临时加氢站所要设置的警戒区域，建议在该区域内设置警戒标志，加强管理，严禁人员随意进入该区域，对确需进入此区域的工作人员配备必要的防护设施。

参考文献：

[1]深圳市公安局消防监督管理局，公安天津消防研究所.第26届世界大学生夏季运动会临时加氢站及维保基地火灾风险评估报告[R].深圳：深圳市公安局消防监督管理局，2011.

[2]GB50516-2010，加氢站技术规范[S].

[4]GB4962-2008，氢气使用安全技术规程[S].

[5]宇德明.重大危险源的评价及火灾爆炸事故严重度的若干研究[D].北京：北京理工大学.1997.

[6]张智超.化工装置安全评价软件研究与实现[D].大连：大连理工大学.2007.

[8]吴宗之，高进东.重大危险源辨识与控制[M].北京：冶金工业出版社，2001.

[9]宇德明.易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评价[M].北京：中国铁道出版社，2000.

[10]汪元辉，滕桂兰.安全系统工程[M].天津：天津大学出版社，2004.

原文地址：http://www.china-nengyuan.com/tech/156908.html