

加氢站定量风险分析研究

袁雄军¹，朱常龙²，任常兴³，葛秀坤¹，王凯全¹

(1.常州大学环境与安全工程学院，江苏常州213164；2.南京工业大学城市建设与安全工程学院，江苏南京210009；3.公安部天津消防研究所，天津300381)

摘要：结合定量风险分析理论和加氢站的特点，从加氢站的事故场景、事故频率、事故后果、死亡概率和个人风险与社会风险5个方面进行了研究，提出了加氢站定量风险分析模型，并结合某加氢站进行了实例计算分析，计算出该加氢站量化的个人风险和社会风险，再与国内外认可的可接受风险标准进行比较，得出其风险水平是否可接受的分析结论。其量化的风险分析结论将对加氢站建设的审批和公众安全认可具有重要指导意义。

0引言

氢能被视为21世纪最具发展潜力的清洁能源载体，一直备受人们的关注，但制氢工艺成本和氢气的安全性问题却制约了氢能的广泛应用和发展。随着太阳能制氢等多种制氢技术的突破，大量使用氢能必然成为新能源发展的一种趋势，而广泛建设加氢站是氢能大量使用的基础之一。加氢站的风险能否被公众所接受，其风险水平到底有多高已成为各国科研机构研究的热点。本文结合定量风险分析理论，对加氢站定量风险分析方法模型进行了研究，并结合某加氢站进行了实例计算分析，得出了该加氢站的个人风险和社会风险，并与国内外的可接受风险标准进行比较，得出相应的风险是否可接受的分析结论，该量化的风险分析结论对加氢站建设的审批决策和公众安全认可具有重要的指导意义。

1加氢站定量风险分析方法

1.1定量风险分析步骤

风险是危害造成事故的概率 P 及后果 C 的度量^[1]

，本文中的危害来源主要为氢气具有的易燃易爆的危险特性。一旦发生氢气风险事故，可能会造成人员伤亡、财产损失及环境破坏。就公共安全而言，风险一般指伤亡人数/频率。本文主要以人员伤亡的个人风险和社会风险作为风险度量的主要指标。

风险的基本表达式为

$$R=P\times C \quad (1)$$

式中： R 为风险指标值； P 表示伤亡事故的发生概率（一般以频率代替）； C 表示该事故产生的预期后果。

加氢站定量风险分析主要步骤如图 1 所示。



图 1 加氢站定量风险分析步骤

Fig.1 Quantitative risk analysis procedure of hydrogen refueling station

1.2加氢站定量风险分析计算模型

1.2.1事故频率计算

事故频率可以查阅相关行业的历史数据或相关数据库（比如OREDA）而得出，也可以先确定初始触发事件，构建事件树，再通过事件树的逻辑运算求出。事件树通过图示的形式结合各安全系统的失效频率，可计算出不同事故后果的频率。图2显示了事件树的计算事故频率的过程。FIE为初始事件频率，F1，F2，F3分别为子事件的失效概率。

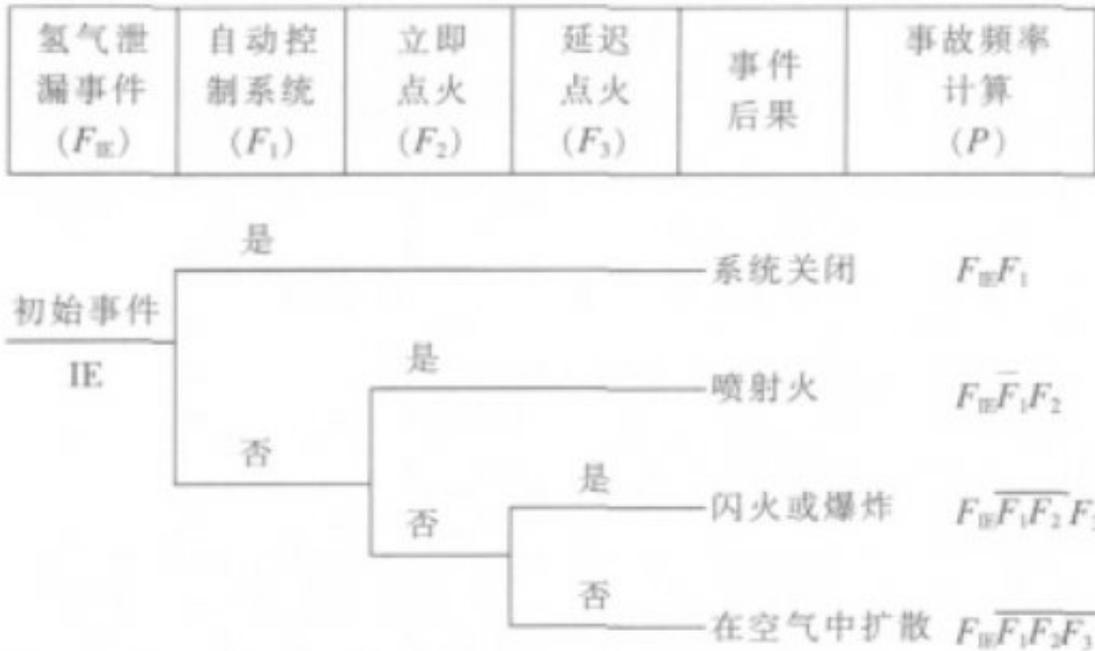


图 2 氢气泄漏事故事件树分析及事故频率计算方法
Fig.2 Event Tree Analysis of hydrogen leakage and calculation method of accident frequency

1.2.2 事故场景分析及后果计算模型

以气态加氢站为例，根据1.2.1可知，气态加氢站发生泄漏事件后，如果是持续泄漏且立即点火，则发生喷射火事故；如完全破裂且立即点火则可能发生爆炸事故；如持续或瞬间泄漏且延迟点火，则可能发生VCE爆炸或闪火事故。因此，其主要事故后果为喷射火灾、闪火或爆炸等，其中喷射火和闪火的主要危害来自热辐射和直接接触火焰。因有关闪火造成的热辐射影响方面的资料极少，闪火燃烧持续时间很短，与喷射火灾相比，物体从闪火中接收的热辐射十分有限，且闪火发生的条件和蒸气云爆炸的条件很相似，二者联系紧密，而蒸气云爆炸的危害比闪火热辐射危害要大得多，实际计算延

迟点火事故后果时往往选择蒸气云爆炸模型来计算事故影响后果，而忽略闪火的计算^{[2], [3]}

。因此，本文主要采纳喷射火、蒸气云爆炸事故后果模型计算方法，根据事故后果模型即可计算出加氢站不同位置的热辐射通量或爆炸超压值。

喷射火计算模型

高压氢气持续泄漏时会形成射流，如果被点燃，则形成喷射火。假定火焰为圆锥形，并用从泄漏处到火焰长度4/5处的点源模型来表示。距离火焰点源为X (m) 处接收到的热辐射通量可用式 (2) 表示[4]：

$$Q(x) = \frac{fH_C C_d A P (1 - 0.0565 \ln X)}{4\pi X^2 \times 1000} \sqrt{\frac{Mk}{R_g T} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{(k+1)/(k-1)}} \quad (2)$$

式中： $Q(x)$ 为距离 X 处接收的热辐射的通量， kW/m^2 ； f 为热辐射率，可取值 0.35； H_C 为燃烧热， J/kg ； C_d 为气体泄漏系数，与裂口形状有关，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 ； P 为容器内介质压力， Pa ； M 为泄漏气体的分子量， g/mol ； k 为绝热指数，即热容比， $k=c_p/c_v$ ； R_g 为理想气体常数，氢气为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ； T 为气体温度， K 。

爆炸计算模型

氢气泄漏后如与空气混合且浓度处于爆炸极限范围内，延迟点火则可能发生蒸气云爆炸事故，蒸气云爆炸事故后果主要为爆炸冲击波超压危害，因此，计算蒸气云爆炸中心点外给定位置的爆炸冲击波超压值是模拟此类事故计算的根本立足点。

距离爆炸中心点 X (m) 处的超压计算模型见式 (3) 所示^[5]。

距离爆炸中心点 X (m) 处的超压计算模型见式 (3) 所示^[5]。

$$\Delta p(x) = 6900 \exp \left[\frac{0.7241 - \sqrt{0.524321 - 0.1592 \times \left(3.5031 - \ln \left(\frac{X}{0.3967 \cdot (0.0066W_f Q_f)^{1/3}} \right) \right)}}{0.0796} \right] \quad (3)$$

式中： X 为计算点离爆炸中心点的距离， m ； W_f 为蒸气云中气体燃料的总质量， kg ； Q_f 为气体的燃料热， MJ/kg 。

1.2.3 死亡概率计算

事故后果模拟计算的结果为给定位置的热辐射通量和爆炸冲击波超压值，为了计算个人风险和社会风险，必须将该热辐射通量和爆炸冲击波超压值转化为死亡概率，因此可以结合概率方程来计算相应的死亡几率，再根据死亡几率求得死亡概率值^[6]。

①火灾热辐射致死概率方程

根据式(2)计算出喷射火的热辐射通量后，其位置的死亡几率值可按式(4)计算。

$$P_r = -36.38 + 2.56 \ln(Q^{4/3} \times t) \quad (4)$$

式中： Q 为热辐射强度， W/m^2 ； t 为暴露时间，s，最大值为 20 s。

②爆炸超压致死概率方程

通过式(3)确定计算位置的爆炸冲击波超压数值后，即可通过冲击波超压致死概率方程确定死亡几率，冲击波超压概率方程通常使用 Purdy 提出的经典概率方程^[6]：

$$P_r = 2.47 + 1.43 \log \Delta p \quad (5)$$

③死亡概率计算

死亡概率可采用概率函数法计算，死亡概率 P 与相应的致死几率值 P_r 可按式(6)进行换算。先通过式(4)，(5)求得死亡几率 P_r ，再通过式(6)求得其死亡概率 $P(0 \sim 1)$ 。

$$P = 0.5 \times \left[1 + \frac{P_r - 5}{|P_r - 5|} \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad (6)$$

1.2.4 个人风险与社会风险计算

定量风险分析的最终结果为个人风险和社会风险值的确定，并比对国内外通行的可接受风险值，来确定其风险是否可接受。个人风险是指一个人站在某个地理位置上每年伤亡的概率，所以也称地理风险，社会风险是针对事故而言的，是指造成N人伤亡的事故每年发生的概率（F）是多少。个体风险可表现为个人风险等高线，社会风险可表现为F-N曲线和潜在生命损失（PLL）^[7]。

①个人风险

个人风险与地理位置有关,不是针对任何人,而是对设施以外被计算的某一位置。其对区域内某一空间地理坐标 (x,y) 处产生的个人风险由下式计算:

$$R(x,y)=\sum_{S=1}^N f_S v_S(x,y) \quad (7)$$

式中: $R(x,y)$ 为危险源所在位置处产生的个人风险; f_S 为第 S 个事故场景发生的概率; v_S 为第 S 个事故场景时 (x,y) 位置处的个人死亡概率。

②社会风险

社会风险为某群体遭受特定事故死亡的人数及其相应频率的关系,它用某一给定区域发生事故时造成的死亡人数和累积事故率之间的关系表示。

$$P_f(x)=1-F_N(x)=P(N)=P(N>x)=\int_x^{\infty} f_N(x)dx \quad (8)$$

式中: $f_N(x)$ 为年死亡人数 N 的概率密度函数; $F_N(x)$ 为年死亡人数 N 的概率分布函数,表示死亡人数小于 x 的年概率; $P_f(x)$ 为死亡人数大于 x 的年概率。

社会风险的评估考虑了出现在定义的敏感或次敏感目标附近的人员数目，再结合事故发生的频率绘制F-N曲线，并根据给定的社会风险容忍标准（一般含可接受风险、不可接受风险和ALARA合理可行最低限度风险区）和F-N曲线落入的区域，判定其社会风险是否可接受。

2实例分析

2.1加氢站概述

本文以一外购压缩氢气作为供氢方式的加氢站为例，该站位于市郊，由氢气长管拖车（18MPa，每车氢气总质量为350kg）供应氢气，拖车通过压缩机将氢气加注至高压储罐系统，高压储罐系统由18个相互连接的高压圆柱型储罐（容积2m³）组成，操作压力为41.4MPa，需要加注时通过加注机给燃料电池汽车进行加注，加注压力为35MPa。

2.2加氢站事故场景及频率估算

加氢站主要工艺装置有氢气长管拖车、压缩机、高压储罐、管道、加注机等，主要的初始事件可分为爆裂和持续泄漏两种，根据点火条件的不同，造成的事故后果主要有爆炸或火球、VCE爆炸或闪火、喷射火、空气中消散等。可根据上述两种初始事件建立事件树，如图2所示。其中，立即点火概率根据紫皮书^[8]

可取0.2参考值，延迟点火概率可根据MHIDAS数据库取0.5参考值。延迟点火事件发生后，因气站一般为敞开式，属低障碍物类别，发生VCE爆炸概率可根据文献^[9]取0.1参考值。如图3所示，根据事件树，可初步估算每种初始事件后的各种事故后果的概率。

可取0.2参考值，延迟点火概率可根据MHIDAS数据库取0.5参考值。延迟点火事件发生后，因气站一般为敞开式，属低障碍物类别，发生VCE爆炸概率可根据文献^[9]取0.1参考值。如图3所示，根据事件树，可初步估算每种初始事件后的各种事故后果的概率。



图3 气态加氢站泄漏事故场景分析事件树

Fig.3 Event Tree Analysis of hydrogen leakage accident in a gaseous hydrogen refueling station

根据加氢站的主要工艺设施，构建事故场景，查阅紫皮书，得到各设施的失效频率数据^[9]

，并根据工艺设施的数量，计算出初始事件发生的频率，再结合图3事件树的概率估算结果，即可得出加氢站各后果事件发生的频率。具体见表1所示^[8]。

表 1 加氢站后果事件发生频率估算
 Table 1 Accident frequency calculation of hydrogen refueling station

工艺装置(含计算参数)	初始事件	初始事件发生的频率	事故后果	事故后果发生概率	后果事件发生频率(次/a)	
长管拖车(10管,18 MPa,35 kg H ₂ /管)	爆裂事件	8×10 ⁻⁹ /(车·a)	爆炸、火球	0.2	1.6×10 ⁻⁶	
			VCE 爆炸	0.04	3.2×10 ⁻⁷	
			闪火	0.36	2.88×10 ⁻⁶	
	泄漏事件	2.4×10 ⁻⁹ /(车·a)	喷射火	0.2	4.8×10 ⁻⁵	
			VCE 爆炸	0.04	9.6×10 ⁻⁶	
			闪火	0.36	8.64×10 ⁻⁵	
压缩机(41.4 MPa,2 kg H ₂)	爆裂事件	6.5×10 ⁻³ /a	爆炸、火球	0.2	1.3×10 ⁻³	
			VCE 爆炸	0.04	2.6×10 ⁻⁴	
			闪火	0.36	2.34×10 ⁻³	
	泄漏事件	5.85×10 ⁻³ /a	喷射火	0.2	1.17×10 ⁻²	
			VCE 爆炸	0.04	2.34×10 ⁻³	
			闪火	0.36	2.1×10 ⁻²	
高压储罐(18个容器,41.4 MPa,57 kg H ₂)	爆裂事件	9×10 ⁻⁹ /a	爆炸、火球	0.2	1.8×10 ⁻⁶	
			VCE 爆炸	0.04	3.6×10 ⁻⁷	
			闪火	0.36	3.24×10 ⁻⁶	
	泄漏事件	3.4×10 ⁻⁹ /a	喷射火	0.2	6.8×10 ⁻⁵	
			VCE 爆炸	0.04	1.63×10 ⁻⁵	
			闪火	0.36	1.2×10 ⁻⁴	
管道(33 m长,41.4 MPa,350 kg H ₂)	爆裂事件	3.3×10 ⁻⁹ /a	喷射火	0.2	6.6×10 ⁻⁶	
			VCE 爆炸	0.04	1.32×10 ⁻⁶	
			闪火	0.36	1.19×10 ⁻⁵	
	加注机(35 MPa,1 kg H ₂)	爆裂事件	1.46×10 ⁻³ /a	喷射火	0.2	2.92×10 ⁻⁴
				VCE 爆炸	0.04	5.84×10 ⁻⁵
				闪火	0.36	5.26×10 ⁻⁴

2.3事故后果计算

现以加氢站高压储罐泄漏事件为例,发生喷射火和蒸气云爆炸为主要事故场景,假设以其中一个高压储罐泄漏量为计算取值,输入相应的距离X,即可求得给定位置的热辐射通量和爆炸超压值。假设圆形孔径为100mm,距离泄漏点或爆炸中心距离为10m,其事故后果值计算过程如下:

$$\begin{aligned}
 Q(x) &= 0.019477 \times 0.35 \times 120021.6 \times 41.4 \times 10^6 \times \\
 & A(1 - 0.0565 \ln X) / 4\pi X^2 \\
 & = 2675624539.75 \times A(1 - 0.0565 \ln X) / X^2 \\
 & = 182.7 \text{ kW/m}^2
 \end{aligned}$$

代入式(4),(5),(6),即可求该点处死亡概率

$$\Delta p(x) = 6900 \exp \left[\frac{0.7241 - \sqrt{0.524321 - 0.1592 \times \left(3.5031 - \ln \left(\frac{X}{1.412} \right) \right)}}{0.0796} \right] = 6900 \times 11.9426 = 82.4 \text{ kPa}$$

值,该位置死亡概率计算结果分别为1和0.58。

2.4加氢站的个人风险与社会风险

根据2.3可知，由式（2），（3）可求得加氢站某工艺装置外各点的热辐射通量和爆炸冲击波超压值，再在此基础上由式（4），（5），（6）算出该位置的死亡概率值，然后与表1中各事故后果发生频率相乘，即可得该位置的个人风险值。如分别取不同的X值进行计算其死亡概率，与表1事故频率相乘后即得出风险源外各个位置的个人风险值R（x），汇总后结合影响距离X（m）可绘制个人风险曲线，如图4所示。同理，根据式（8），可计算绘制的加氢站高压储罐发生喷射火和蒸气云爆炸的社会风险F-N曲线，如图5所示。

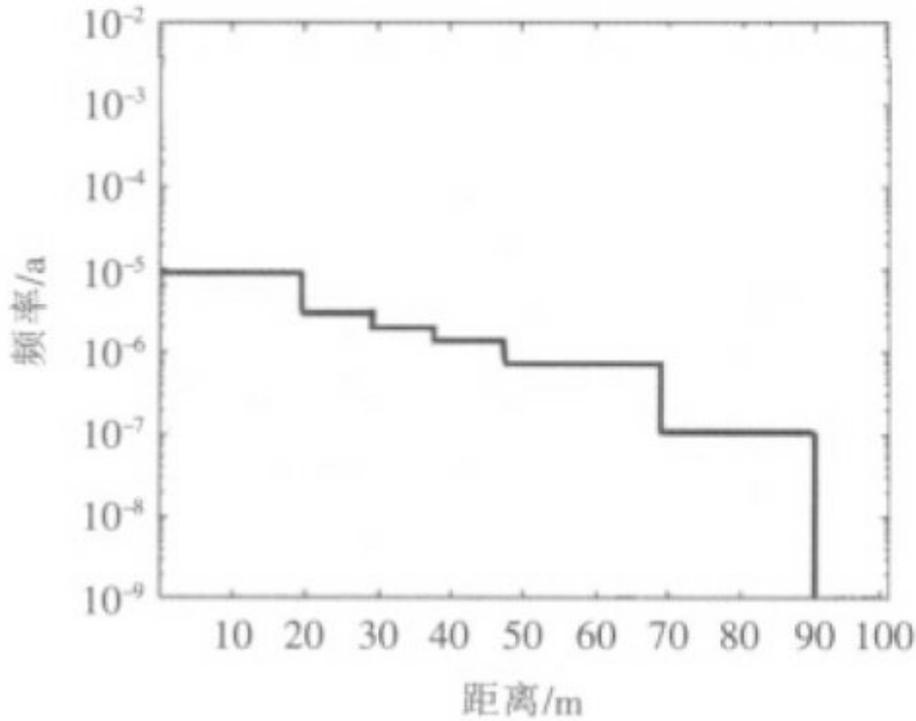


图 4 加氢站个人风险曲线图

Fig.4 individual risk of the station

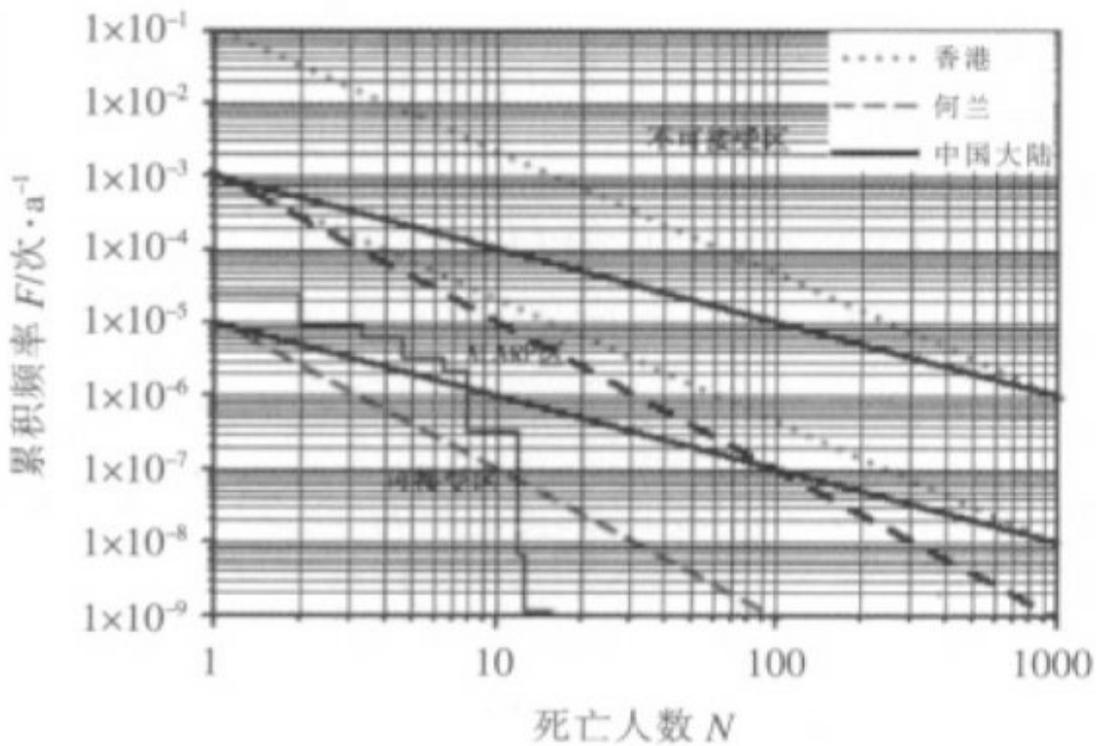


图 5 加氢站社会风险 F-N 曲线

Fig.5 Societal risk (FN-Curves) of the station

根据国家安全生产监督管理总局令（第40号）（2011年12月1日实施）^[10]

和其他国家地区有关的个人风险和社会风险可接受标准可

知^[11]，一般情况的个人风险可接受范围为 $<1 \times 10^{-6}$ ，而社会风险可接受标准见F-N曲线图所示。根据计算可知，加氢站内（以半径20m范围内为例）

个人风险略高于国家标准，而站外的个人风险 $<1 \times 10^{-7}$

，低于国内风险准则指标；其社会风险值则部分落在ALARP可接受区，该区需要在可能的情况下尽量减少风险；部分落在完全可接受区，均属可接受风险区域。总体上，该加氢站风险属可接受风险。

3结论

氢能要成为新的能源载体还有很长的路要走，除了发展安全技术之外，提高人们对氢能安全性的认识，增强对氢能发展与应用的信心也是需解决的关键问题之一。本文通过对加氢站的定量风险分析研究得出以下结论。

（1）定量风险分析理论方法能很好的应用于加氢站的量化风险分析上，并能得出可供参考的个人风险和社会风险。

（2）对加氢站（氢气基础设施）进行定量风险分析能更直观地得出其风险值及其与风险可接受准则的比对结论，从而使其风险水平更大程度上得到人们的认可，也可为政府部门的行政审批和监管提供依据。

（3）加氢站的定量风险分析方法模型应用还存在很多不确定性因素，下一步研究可以结合氢气及其设施的特点，分析其量化风险分析过程中的不确定性因素及影响，并进行修正研究。同时还可结合加油站和天然气加气站进行风险分析比较研究。

参考文献：

- [1] ALP E, ATKINSON D. Risk assessment – recommended practices for municipalities and industry [M]. Ottawa: Report from the Canadian Society for Chemical Engineering, 2004.
- [2] TAYLOR J R. Risk Analysis for Process Plant, Pipelines and transport [M]. UK: E&FN Spon, 1994. 295–296.
- [3] CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY OF THE AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERS. Guideline for Use of Vapor Cloud Dispersion Model [M]. 2nd edition. New York: AIChE, 1996. 25–47.

- [4] CCPS.Chemical Process Quantitative Risk Analysis[M].
New York :AIChE ,2000.
- [5] COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS.
Methods for the calculation of Physical Effects (Yellow
Book), CPR 14E[M].Hague :PGS ,2005.
- [6] ROOS A J.Methods for the determination of possible
damage (Green Book), CPR 16E [M].Voorburg :PGS ,
1989.
- [7] S N JONKMAN ,A J M VAN GELDER ,J K VRIJLING.
An overview of quantitative risk measures for loss of life
and economic damage [J]. **Journal of Hazardous
Materials** ,2003 ,99(A) :1–30.
- [8] COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTERS.

- Guide lines for quantitative risk assessment (Purple book), CPR 18E[M].Hague:PGS,2005.
- [9] CENTRAL ENVIRONMENTAL CONTROL AGENCY RIJNMOND. COVO Commission. Risk analysis of six potentially hazardous industrial objects in the Rijnmond Area [R]. Netherlands:the Rijnmond Public Authority Schiedam, 1981.
- [10] 国家安全生产监督管理总局网站.国家安全生产监督管理总局令(第40号)[EB/OL].http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/Contents/Channel_5351/2011/0908/148017/content_148017.htm.
- [11] HK PLANNING DEPARTMENT. Hong Kong planning standard and guidelines[Z]. Hong Kong:the Government of the Hong Kong Special Administrative Region,2008.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/156966.html>