

加氢站风险评价研究现状与进展

李志勇^{1,2}, 潘相敏^{2,3}, 谢佳⁴, 马建新^{2,3}

1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092
2. 同济大学新能源汽车工程中心, 上海 201804
3. 同济大学汽车学院, 上海 201804
4. 上海市消防局防火监督部重点处, 上海 200051

摘要 伴随着世界各国氢燃料电池车示范项目的实施, 与之配套的氢能基础设施——加氢站也在全球范围内迅速发展。作为一种新兴的能源基础设施, 能否为公众提供足够的安全, 一直是政府和公众非常关心的问题。而目前国际上关于加氢站风险评价方面存在的主要争议, 即是损害限和风险接受标准确定的问题。本文通过回顾国外加氢站风险评价的研究现状和进展, 从危险辨识、概率分析、后果评价以及风险度量等方面总结了加氢站风险评价的方法, 对氢能设施风险评价开展的基础——氢气行为及其后果等氢能安全进行了分析, 在此基础上, 进一步综述了近几年国际上在该领域研究取得的进展。

关键词 氢能源; 加氢站; 风险评价

中图分类号 X928

文献标识码 A

文章编号 100-7857(2009)16-0093-06

Risk Assessment on Hydrogen Refueling Stations

LI Zhiyong^{1,2}, PAN Xiangmin^{2,3}, Xie Jia⁴, MA Jianxin^{2,3}

1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
2. Clean Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China
3. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China
4. Shanghai Bureau of Fire Protection, Shanghai 200051, China

Abstract With the world wide development of large-scale FCV demonstration projects, the global number of hydrogen refueling stations has increased rapidly in recent years. As a new energy infrastructure, it has always a public concern whether the hydrogen refueling station could ensure enough safety, which becomes one of the biggest obstacles to the further implementations of hydrogen as energy carrier. Therefore, many studies focus the attentions on risk assessment of hydrogen refueling stations, as reviewed in this paper. Firstly, the current studies are discussed in terms of hazard identification, probability analysis, consequences evaluation and risk

measurement. The fault tree analysis and the event tree analysis play important roles in risk assessment studies on hydrogen refueling stations due to the lack of failure probability data for hydrogen infrastructure. Secondly, different points of view on damage limit and risk acceptance criteria are analyzed. A unified or widely accepted damage limit criteria and risk acceptance criteria will be a target for future studies. Thirdly, the progress of studies on hydrogen behavior and consequences is summarized to emphasize the need for improvement in risk assessment of hydrogen refueling stations. The experimental studies and numerical researches both contribute to the development of risk assessment on hydrogen refueling stations. Finally, to facilitate the development of hydrogen infrastructure in China, two suggestions are made. On one hand, risk assessment methodology developed by other countries need to be studied. On the other hand, fundamental researches on hydrogen safety need to be strengthened to provide scientific basis to the establishment of hydrogen regulations, code and standards.

Keywords hydrogen energy; hydrogen refueling station; risk assessment

0 引言

氢能具有来源广泛、清洁环保、循环利用等一系列优点, 得到了各国科研机构、政府和企业的高度关注。在氢能经济的诸多前景中, 氢燃料电池车被认为是最有可能实现产业化

收稿日期: 2009-06-29

基金项目: 上海市科委世博科技专项(09dz0580103)

作者简介: 李志勇, 博士研究生, 研究方向为氢能安全, 电子信箱: lizhiyong000000@163.com; 马建新(通信作者), 教授, 研究方向为氢能与燃料电池, 电子信箱: jxma@tongji.edu.cn

的应用之一。伴随世界各国氢燃料电池车示范项目的实施,与之相配套的氢能基础设施——加氢站,也在全球范围发展迅速。2008 年末,全球加氢站总数已达 200 余座。随着氢燃料电池车的进一步发展,加氢站数量将快速增加,同时势必向市区人口密度更高的区域发展。加氢站建设能否为公众提供足够安全的、风险水平不高于传统油气站的技术保障,将成为其进一步普及发展的瓶颈。因此,加氢站风险评价问题已成为各国科研机构研究的热点。

中国目前建成的主要有北京和上海的两座加氢站,它们已成功地为科技部、联合国开发计划署(UNDP)和全球环境基金(GEF)组织的“中国燃料电池公共汽车商业化示范项目”和2008北京奥运会燃料电池汽车示范运行提供了氢气加注服务。而随着2010上海世博会期间更多燃料电池汽车的示范运行,以及国家“十城千辆”新能源汽车示范项目的开展,中国加氢站的建设也将进入加速发展阶段,因此迫切需要开展加氢站风险评价的相关研究。

风险评价关注的内容通常包括人员伤亡、设备损害、财产损失及环境影响等。加氢站尚处于初级发展阶段,人的安全问题是第一位的,目前更多关注的是人员伤亡。加氢站对人员造成的风险有三:第一方风险,即加氢站内部员工面临的风险;第二方风险,即加氢的顾客面临的风险;第三方风

险,即加氢站周边居民等面临的风险。

目前,国际上常用的加氢站风险评价的方法主要有两类,快速风险评级(Rapid Risk Ranking,RRR)和量化风险评价(Quantitative Risk Assessment,QRA)。前者是定性的评估,后者是定量的评价。

1 加氢站快速风险评级

快速风险评级是一种粗略的定性风险评估,它是由一组有经验的专家对氢能设施分析讨论得到的结果。欧洲氢能一体化计划阶段二 (European Integrated Hydrogen Project phase 2, EIHP2)^[1] 给出了 RRR 方法在加氢站评估应用方面详细的操作步骤,并且用此方法对氢裂解制氢、甲醇重整制氢、甲烷重整制氢和电解水制氢等 4 种不同类型的站内制氢加氢站进行了评估^[2]。类似的评估可以把重要的危险源和风险辨识出来,还可以根据专家经验找出最为危险的事故。例如,针对不同类型站内制氢加氢站的 RRR 评估表明,高压氢气泄漏是最危险的情形,它将导致较大的危险距离。RRR 最后给出的是通过与风险矩阵^[3](表 1)比较得出的风险评价结果,通过将专家讨论得出的后果和概率与风险矩阵比对,可以得出高、中、低 3 种风险等级。

RRR 的最大优势在于快,这是它被广泛应用的重要原因。

表 1 EIHP2 推荐风险矩阵标准
Table 1 EIHP2 recommended risk matrix

后果严重程度		频率(次/a)				
		A	B	C	D	E
		(<0.001)	($0.01\sim0.001$)	($0.1\sim0.01$)	($1\sim0.1$)	($10\sim1$)
灾难(数人死亡) 重大(一人死亡) 严重(终身残疾) 一般(需医疗救助) 较小(较小伤害)	高	高	高	高	高	
	中	高	高	高	高	
	中	中	高	高	高	
	低	低	中	中	高	
	低	低	低	低	中	

因,但由于它主要依赖专家的经验,主观性较强,仅可用于定性的粗略判断。当对风险进行更为深入的分析,尤其是对风险等级高的事故进行更为细致的评价时,就需要用到量化分析方法。

2 加氢站量化风险评价

量化风险评价技术(QRA)已成为国际上氢能设施安全研究的热点。主要原因在于,QRA 不仅可以科学地评价氢能设施或某一具体事故的风险,估计风险降低的可能,为风险减轻措施提供指导和建议;更重要的是,它可直接用于氢能安全相关标准的制定,如安全距离的确定等。而氢能安全相关标准的制定和完善,是氢能设施大规模走向公众的前提。

2.1 加氢站量化风险评估方法

目前国际上面向加氢站的量化风险评价中,有很多方法被吸收采纳,这些方法大致可分为 4 类。

1) 危险辨识技术。如预先危险分析(PHA)、危险与可操作性分析(HAZOP)以及失效模式和后果分析(FMEA)。

2) 概率分析技术。如故障树分析 (FTA)、事件树分析 (ETA) 等。

3) 后果量化评价。用于模拟泄漏的,如统一扩散模型(Unified Dispersion Model,UDM)和基于 CFD 原理的各类模型;用于模拟爆炸的,如 TNT 模型、TNO 模型及 Baker-Strehlow 模型等;用于模拟射流火焰的 API 模型和 Shell 模型等。

4) 风险度量技术。也就是把后果和概率综合为风险,量化表达风险水平。通常有两种方法度量加氢站的风险:个人风险(individual risk)和社会风险(societal risk)。

不论使用哪一种风险度量方法,最后的结果都需要与风险可接受标准(Risk Acceptance Criteria)进行比较,以评价风险能否被接受。上述方法结合起来,就组成了氢能设施量化风险评价的流程(图1)。

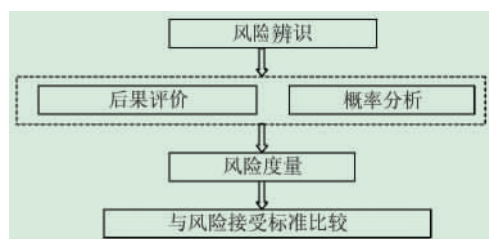


图1 氢能设施量化风险评价流程

Fig. 1 QRA flowchart for hydrogen facilities

危险辨识技术用到的各种方法大都是过程工业上较为成熟的技术,通常直接拿来用于加氢站风险评价。PHA是预先找出可能事故并定性评价事故后果的一种简单技术,优点在于快,但主观性强,主要有赖于专家的经验。HAZOP同样是由一组有经验的专家在一起集体分析讨论,不同的是,HAZOP是一种系统全面的分析,不仅是工业上非常成熟的一种技术,在氢能安全领域也应用很多年。早在1983年,加拿大国家研究理事会(National Research Council of Canada)就资助了面向加氢站的HAZOP研究^[4],如今HAZOP已被壳牌(Shell)、挪威船级社(DNV)等知名公司用于商业化的风险评价。FMEA也是工业中广为应用的一种分析技术,与HAZOP不同的是,后者侧重于找出所有可能的危险,而前者更侧重于找出系统所有可能的失效模式,并评估其严重性。FMEA的优势在于,它不仅定性描述后果,而且可以量化评价后果的严重性。最近有日本学者^[9]对加氢站进行风险评价时,把HAZOP和FMEA联合使用,以期对系统进行更为细致的检查。

故障树分析是一种寻找事故原因及发生概率的科学方法,可以从基本事件出发,找出顶上事件概率。氢能设施发展时间不长,故障概率统计缺乏,因此故障树分析显得尤为重要。德国的Rosyid等^[6]曾对加氢站储氢罐泄漏可能造成的原因进行了故障树分析,并从基本事件出发,推导估算了顶上事件发生的概率。分析提供了一种推演可能事故后果及其发生概率的方法,事件树可以把事件发生后安保系统的反应能力及失效概率考虑在内,冯屹等^[7]曾使用氢泄漏事件树对氢燃料电池汽车的道路安全性进行了初步分析评估。

后果量化评价以氢行为及其后果方面的研究为基础,由于控制方程复杂,计算量大,因此有软件化需要。目前,常用于氢行为后果量化评价的商业化软件有两个:一个是Gexcon公司的基于CFD原理的FLACS-Hydrogen软件,另一个是

DNV的Phast软件。

把后果和概率综合为最后的风险,需要用到风险度量工具。通常有两种方法度量加氢站的风险:个人风险和社会风险。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,每年发生的概率是多少。因此,个人风险最后绘出的是包括某个危险源的风险等高线,而社会风险则绘出的是伤亡概率对伤亡人数的一条曲线。

2.2 加氢站量化风险评价中存在的问题与争议

在加氢站量化风险评价中,涉及两类标准的选择。一类是后果评价时需用到伤亡标准,也就是多大的超压或辐射值会造成人死亡或受伤,即损害限(damage limit)的确定;另一类是风险可接受标准的确定,即风险处于什么水平认为是可接受的。这两类标准目前国际上尚无定论,不同机构组织给出的推荐值各不相同,存在一定争议。

2.2.1 不同后果损害限的确定

无论是个人风险,还是社会风险的确定,都是以后果量化评价为前提的。但后果量化评价时损害限的选用,国际上存在一定争议。如火灾辐射值的死亡限,欧洲工业气体协会(EIGA)的推荐值为 9.5 kW/m^2 ^[8],意大利塞维索法令(Seveso Directive)的规定值是 7 kW/m^2 ^[9]。再例如,对闪火后果评价时,国际火灾规范(International Fire Code, IFC)将闪火无危害限定为 $1/2$ 燃烧下限,即氢气浓度为2%就不会对人造成任何危害^[10],塞维索法令则认为 $1/2$ 的燃烧下限是造成死亡的起点^[9]。诸如此类,包括爆炸引起的超压的危害,各组织推荐值也不尽相同。如塞维索法令认为^[9], 0.03 Pa 超压即可造成伤害,而EIGA则认为该值为 0.07 Pa ^[8]。损害限选取的不同,将直接影响后果量化评价的结果。

2.2.2 风险可接受标准的确定

风险可接受标准的确定是QRA中的关键因素,不同的风险标准导致不同的QRA评价结果。目前国际上针对加氢站的风险标准的确定,就个人风险而言,大致有3种途径。

1) 参照个人意外死亡风险数据取百分比

把个人日常生活意外死亡风险统计数据取百分比作为风险可接受标准,这一方法已经被许多机构所采纳,但各机构所采用的百分数并不相同^[11]。如美国核管理委员会(NRC)把意外死亡风险数据乘以0.1%作为氢能事故的风险可接受标准,EIHP2则把这一百分数提高到1%,EIGA甚至采用17.5%。EIGA根据统计数据,个人意外死亡概率取 2×10^{-4} ,因此个人风险可接受标准确定为: $2 \times 10^{-4} \times 17.5\% = 3.5 \times 10^{-5}$,EIGA同时建议无害风险标准(No Harm Risk Criteria)比该标准低两个数量级。EIHP2也采纳个人意外死亡概率的统计数据 2×10^{-4} ,但乘以1%后,个人风险可接受标准为 2×10^{-6} ^[3]。可见,风险可接受标准在国际上是争议比较大的。

2) 参照火灾和爆炸风险数据

这种方法是对上述方法的一种改进,即仅把意外伤害或死亡数据中由火灾和爆炸引起的风险数据作为参照,而不是

拿总风险作为参照。这种方法虽然从理念上进步了许多,但需要根据实际需要认真考虑究竟选取哪个风险统计数据。比如说,美国由火灾引起的死亡风险^[12]是 1.2×10^{-5} ,由爆炸超压引起的死亡风险是 6.0×10^{-7} ,这是总的的数据。进一步的数据有,由高致燃物质导致的火灾死亡风险为 2.0×10^{-7} ,室内火灾死亡风险为 9.5×10^{-6} ,室外火灾死亡的风险为 8×10^{-8} 等。究竟选取哪一种死亡风险数据作为参照,需要根据风险评价的实际需要来选取。此外,由于致伤风险统计数据的缺乏,该方法建议致伤(injury)风险标准的选取参照死亡(fatality)风险标准,增加两个数量级。

3) 参照现有油气站的风险数据

参照现有油气站的风险数据似乎是更好的方法,遗憾的是,没有公开发布的油气站风险评价数据可供参考,因此,此方法应用受到很大限制。目前可找到的关于加油站火灾的有限数据,如 1 万座加油站统计数据表明^[13],单个加油站火灾的发生频率为 $7.4 \times 10^{-2}/a$,其中多数由车辆着火引起,大致为 $4.6 \times 10^{-2}/a$,占 62%;由汽油泄漏引起的大致为 $3 \times 10^{-3}/a$,占 4%。单个加油站每年发生的事故中由火灾导致的致死风险为 $2 \times 10^{-5}/(a \cdot \text{人})$,致伤风险为 $7 \times 10^{-4}/(a \cdot \text{人})$ 。这些有限的的数据,也可以为加氢站风险可接受标准的制定提供参考。

另外一种标准——社会风险可接受标准的确定,往往需要考虑人们对不同等级的危害的厌恶程度。有研究表明^[14],在伤亡人数相同的情况下,人们更能接受危害小频率高的事件,而不能接受危害大但频率低的事件。社会风险可接受标准可以由下式^[15]给出:

$$F \leq 10^{-3} N^{-2} \quad (1)$$

式中, F 为死亡概率, N 为死亡人数。即:造成 10 人死亡的事故发生概率必须小于 $10^{-6}/a$,造成 100 人死亡的事故发生概率必须小于 $10^{-7}/a$,依此类推。

3 氢气行为及后果研究

氢气行为及后果研究是氢能设施风险评价开展的基础。在上面的加氢站风险评价中,有一个重要的环节——后果量化评价,通常采用后果模拟计算的方式来进行,而模拟计算结果的好坏,很大程度依赖于人们对氢气行为的认识和把握。氢气行为方面研究,主要针对氢泄露(hydrogen release)、扩散(dispersion)、点火(ignition)、自燃(auto-ignition)、爆燃(deflagration)、爆轰(detonation)和瞬变效应(transitional effect)。氢气后果方面的研究,主要针对爆炸(explosion)、射流火焰(jet fire)、闪火(flash fire)及火球(fireball)等方面,以及由它们引起的热辐射和超压。

3.1 氢泄漏和扩散研究

法国环境与工业风险国家研究院 J. M. Lacomme 等^[16]对受限空间内 (80 m^3) 氢气云团的形成进行了试验研究,测试了不同泄漏速度下 ($0.2 \sim 1 \text{ g/s}$) 的浓度、温度和质量流,一些重要结论如氢气云团在顶部会先成层、继而扩散、数小时后均一化等,对人们理解氢气泄漏和扩散行为有一定帮助,还有诸如

氢气和氦气测试表现出高度相似等结论,为用氦代替氢做泄漏试验提供了依据。因此该团队又进一步进行了用液氢代替液氢的泄漏试验,以探讨液氢(液氦)挥发扩散形成蒸气云的机制^[17]。

Denisenko^[18] 在俄罗斯科技教育部和欧洲氢能许可项目(The EU HYPER Project)的资助下,进行了更为细致的氢气亚音速泄漏和扩散试验。试验空间(封闭圆柱容器)内分散布置了 24 个氢气探头和 24 个温度探头,用于实时追踪监视氢气浓度场和温度场。通过分析空间点同步试验记录数据,绘出基本流动样式,并区分了氢气亚音速泄漏的不同阶段。该项研究不仅有助于理解氢气扩散行为,所获的实验数据还可为数值模拟验证提供基础数据,同时也为室内氢气探头分布设置提供了参考。

美国 Sandia 国家实验室^[19]进行了试验和数值模拟联合研究,旨在表征和预测氢气泄漏行为。除了研究未点燃的氢气的浓度场和可燃区域外,还进一步研究了点燃氢气情况下射流火焰形成、火焰长度和热辐射通量等对安全距离至关重要的物理量,试验中还涉及射流火焰与障碍物的作用过程。为了更好地理解试验结果,研究小组还把 N-S 方程计算结果与试验结果作了比较。反之,这种比较也是对计算结果的验证。

日本 Kouchi 等^[20]试验研究了高压氢气从管道小孔泄漏到大气的情形,与 Sandia 国家实验室研究不同的是,该研究小组不是通过 CFD 原理来解释氢气行为,而是把浓度分布简化为一个方程。为了理解高压氢气扩散的基本行为,他们测试了基于时间平均的浓度,发现氢气浓度沿着扩散羽流轴的方向可以表示为一个简单方程,这一方程是下游距离和当量泄漏直径的函数。这一方程可以简单地预测出下游轴向某点最大浓度,为快速预测氢气泄漏后果提供了有效手段。

3.2 氢气自燃、爆燃、爆轰及瞬变效应研究

关于氢气点燃的起因,大致有 5 种机制,即氢气的负焦汤效应(Inverse Effect of Joule-Thompson)、静电释放(electrostatic discharge)、扩散点燃(diffusion ignition)、瞬间绝热压缩(sudden adiabatic compression)和热表面点燃(ignition by hot surface)。对加氢站泄漏事故而言,最关心的是扩散点燃,因此,很多人针对氢气射流自燃开展了研究,如俄罗斯的 Bazhenova 等^[21]研究了亚音速氢气射流自燃现象,该研究小组还进一步对高压氢气射向空气的自燃现象进行了详细的数值分析^[22]。也有科学家^[23-24]针对爆破片破裂引起的氢气泄漏自燃现象进行了研究。氢气点燃后,剧烈的燃烧可能引起爆燃和爆轰,引起的超压可能带来比氢气燃烧本身更大的危害。爆燃和爆轰都是剧烈的燃烧过程,其区别在于前者的前端冲击波是亚音速的,而后者则是超音速的。有科学家针对氢气泄漏到开放或半封闭空间引起的爆燃进行了试验研究^[25-26],还有一些科学家进一步研究了爆轰的条件并得出了相应的标准^[27-28]。

上述研究都为氢气爆燃和爆轰的模拟提供了一些经验参数或验证数据。对于二者的转换(Deflagration to Detonation

Transition, DDT), 德国 Friedrich 等^[29]试验研究了转换的临界条件, Gexcon 公司的 Middha^[30]进行了一系列试验和数值模拟研究, 以便更好地预测这一过程。

3.3 氢事故后果及其影响研究

氢事故的后果及其影响, 主要包括爆炸、射流火焰、闪火和火球及由此引起的热辐射和超压影响。爆炸方面的研究很多, 上面爆燃和爆轰方面的研究也属于爆炸的研究内容, 只是上面关注的是爆炸行为, 而这里关注的是爆炸后果, 也就是这里关注的重点是超压及其影响范围。

乌克兰风险调查研究中心 (Scientific Center of Risk Investigations) 专门针对爆炸引起的超压进行了研究^[31], 在 N-S 方程的基础上给出了超压计算的数学物理模型, 可以用于预测爆炸引起的超压分布。日本大阪煤气公司工程部的 Tanka 等^[32]对加氢站氢气泄漏可能引起的爆炸情形进行了试验研究, 结果表明在氢气泄漏后 1.2 s 时点火产生的超压最大, 并且氢气浓度是决定火焰速度和爆炸超压的主导因子。日本三菱重工进行了 40 MPa 氢气泄漏点火爆炸试验^[33], 发现爆炸能量不仅取决于氢氧混合物的浓度, 而且强烈受到点火前的湍流特性的影响。该试验中测试的浓度、超压等数据均可用于数值模拟验证, 同时也为氢能设施风险评估提供了基础参照。

射流火焰和闪火的研究是氢气泄漏研究的延续, 泄漏射流 (release jet) 如果迅速被点燃, 就形成了射流火焰 (jet fire), 如果推迟点燃, 则可能形成蒸汽云火 (vapor cloud fire), 或称为闪火 (flash fire)。为预测射流火焰, 壳牌公司开发了针对射流火焰的模型 (jet fire model), 可以用于计算火焰辐射值。氢气能否像碳氢化合物那样产生火球, 目前还没有直接的证据, 大多数对加氢站的风险评价并未考虑火球情形, 也有少数风险评价^[34]采用以往的碳氢化合物火球计算模型来评估氢气火球可能产生的危害。

4 结论与展望

加氢站风险评价中, 量化风险评价是国际上研究的热点和今后发展的方向。QRA 不仅可以量化分析氢能设施或某一具体事故的风险, 为采取风险降低措施提供指导和建议, 更重要的是它可直接用于氢能安全相关标准的建立。通过回顾国际上加氢站风险评价现状和研究进展, 可以得出以下结论。

1) 加氢站作为新兴的能源设施, 不同于以往的加油加气站, 其故障概率统计数据的缺乏, 是风险评价中的主要障碍。因此, 故障树、事件树等分析手段作为获取概率数据的有效方法, 将在今后的量化风险评价中发挥重要作用。

2) 目前量化风险评价中“损害限”和“风险可接受标准”存在较大的争议, 是加氢站风险评价中较大的挑战。修订和统一损害限标准和风险可接受标准, 是未来氢能基础设施风险评价研究的重点之一。

3) 氢气行为及后果研究作为加氢站风险评价的研究基础, 是氢能安全领域研究的热点。试验研究也正日益加深人们对氢气行为特性的了解, 从而能够更精确地模拟氢事故后果; 数值模拟则为更好地开展试验——如试验内容的设计和氢气探头的布置等——提供指导。两方面的研究相互促进, 相辅相成, 为预测评价氢事故后果及风险水平奠定了基础。

中国氢能基础设施正处于发展起步阶段, 迫切需要开展加氢站风险评价相关研究。在引进吸收国外先进的风险评价方法的同时, 应加强氢能安全基础研究, 为中国氢能基础设施相关标准和规范的建立提供科学依据, 从而推动氢能基础设施的建设和发展。

参考文献 (References)

- [1] Norsk Hydro ASA, DNV. Methodology for rapid risk ranking for hydrogen refueling station concepts [R]. European Integrated Hydrogen Project Phase 2, 2002.
- [2] Nilsen S, Andersen H S, Haugom G P, et al. Risk assessments of hydrogen refueling station concepts based on onsite production [R]. European Integrated Hydrogen Project Phase 2, 2003.
- [3] Norsk Hydro ASA, DNV. Risk acceptance criteria for hydrogen refueling stations[R]. European Integrated Hydrogen Project Phase 2, 2003.
- [4] Jones N G L. A schematic design for a HAZOP study on a liquid hydrogen filling station [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1984, 9(1-2): 115-121.
- [5] Kikukawa S, Mitsuhashi H, Miyake A. Risk assessment for liquid hydrogen fueling stations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(2): 1135-1141.
- [6] Rosyid O A, Jablonski D, Hauptmanns U. Risk analysis for the infrastructure of a hydrogen economy [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(15): 3194-3200.
- [7] 冯屹, 杜建波, 刘桂彬. 燃料电池汽车氢存储及道路安全评估[J]. 上海汽车, 2007(9): 6-8.
Feng Qi, Du Jianbo, Liu Guibing. *Shanghai Auto*, 2007(9): 6-8.
- [8] European Industrial Gases Association. Determination of safety distance, IGC Doc 75/01/E/rev [S]. EIGA, 2001.
- [9] Marangona A, Carcassi M, Engebø A, et al. Safety distances: Definition and values [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2192-2197.
- [10] International Code Council. International fire code [S]. ISBN 892395-60-6, International Code Council, INC. 2002.
- [11] La Chance J, Tchouvelev A, Ohi J, et al. Risk-informed process and tools for permitting hydrogen fueling stations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(14): 5855-5861.
- [12] National Safety Council. Injury Facts[R]. NSC, 2007.
- [13] National Fire Protection Association. Fires in or at service stations and motor vehicle repair and paint shops[R]. NEPA, 2002.
- [14] Health and Safety Executive. Proposals for revised policies to address societal risk around onshore non-nuclear major hazard installations[R]. HSE, 2007.
- [15] Matthijsen A J C M, Kooi E S. Safety distances for hydrogen filling stations [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 719-723.
- [16] Lacombe J M. Large-scale hydrogen release in an isothermal confined area [C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San

- Sebastian, Spain, Sep 11–13, 2007.
- [17] Proust C H. Processes of the formation of large unconfined clouds following a massive spillage of liquid hydrogen on the ground[C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, Sept 11–13, 2007.
- [18] Denisenko V P. Hydrogen subsonic upward release and dispersion experiments in closed cylindrical vessel [C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, Sept 11–13, 2007.
- [19] Houf W G. Analysis of jet flames and unignited jets from unintended releases of hydrogen[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, in press.
- [20] Kouchi A, Okabayashi K, Takeno K, *et al.* A dispersion tests on concentration and its fluctuations for 40 MPa pressurized hydrogen[C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, Sep 11–13, 2007.
- [21] Bazhenova T V, Bragin M V, Golub V V, *et al.* Self ignition of the impulse hydrogen sonic jet emerging in the air semi-confined space[C]//The 25th International Symposium on Shock Waves. Bangalore, India, July 17–22, 2005.
- [22] Bazhenova T V, Bragin M V, Golub V V, *et al.* Self ignition of a fuel gas upon pulsed efflux into an oxidative medium [J]. *Technical Physics Letters*, 2006, 32(3): 269–271.
- [23] Mogi T. Ignition of High Pressure Hydrogen by a Rapid Discharge[C]//The 31st International Symposium on Combustion. Heidelberg, Germany, Aug 6–11, 2006.
- [24] Dryer F L, Chaos M, Zhao Z W, *et al.* Spontaneous ignition of pressurized release of hydrogen and natural gas into air [J]. *Combustion Science and Technology*, 2007, 179(4–6): 663–694.
- [25] Sato Y, Iwabuchi H, Groethe M, *et al.* Experiments on hydrogen deflagration[J]. *Journal of Power Sources*, 2006, 159(1): 144–148.
- [26] Groethe M, Merilo E, Colton J, *et al.* Large-scale hydrogen deflagrations and detonations [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2125–2133.
- [27] Dorofeev S B, Sidorov V P, Kuznetsov M S, *et al.* Effect of scale on the onset of detonations[J]. *Shock Waves*, 2000, 10(2): 137–149.
- [28] Dorofeev S B, Kuznetsov M S, Alekseev V I, *et al.* Evaluation of limits for effective flame acceleration in hydrogen mixtures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2001, 14(6): 583–589.
- [29] Friedrich A. Experimental study of hydrogen–air deflagrations in flat layer [C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, Sep 11–13, 2007.
- [30] Middha P, Hansen O R. Predicting Deflagration to Detonation Transition (DDT) in hydrogen explosions [J]. *Process Safety Progress*, 2008, 27(3): 192–204.
- [31] Granovskiy E A, Lifar V A, Skob Yu A, *et al.* Computational Modeling of Pressure Effects from Hydrogen Explosions[C]//The 2nd International Conference on Hydrogen Safety. San Sebastian, Spain, Sept 11–13, 2007.
- [32] Tanaka T, Azuma T, Evans J A, *et al.* Experimental study on hydrogen explosions in a full-scale hydrogen filling station model[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2162–2170.
- [33] Takeno K, Okabayashi K, Kouchi A, *et al.* Dispersion and explosion field tests for 40 MPa pressurized hydrogen [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2144–2153.
- [34] Crerand A. Quantified risk assessment of anting hydrogen filling station and fuel cell bus/car refueling operations[R]. Shell Solution, 2006.

(责任编辑 杨书卷)

·学术动态·



“中华医学会第9次 全国消化系统疾病学术会议”征文

“中华医学会第9次全国消化系统病学术会议”由中华医学会消化病学分会主办,将于2009年12月4–6日在广州市举行。此次大会采用主会场主旨报告、分会场专题报告、研究论文报告及壁报展示形式,并邀请国内专家介绍本领域国内外学术前沿,报告本单位最新研究成果,充分交流近年来消化病领域基础及临床研究的进展,将是今年全国消化学界规模最大、学术水平最高的大会。

会议将以消化学会的学组或协作组为基本单元,设立功能性胃肠疾病及动力障碍性胃肠病,幽门螺杆菌及其相关疾病,胰腺疾病,肝胆疾病,胃肠道肿瘤,炎症性肠病,胃肠激素及消化疾病介入治疗等分会场。会议还将另设立青年委员会专场,由医药企业组织的卫星会将邀请国内外著名专家进行专题研讨。

征文内容包括:与消化系统疾病有关的流行病学、基础和临床研究,功能性胃肠疾病及动力障碍性胃肠病(包括胃食管反流病),幽门螺杆菌及其相关疾病,胰腺疾病,肝胆疾病,胃肠道肿瘤,炎症性肠病,胃肠激素,消化疾病介入治疗。详见会议网站:www.csge.org.cn。投稿和报告均使用英文。征文截止时间为:2009年9月15日。

联系方式:北京市东四西大街42号 中华医学会学术会务部(100710)CSGD2009秘书处;电话:13261045099;传真:010-65123754;电子信箱:cma2009@126.com。