DOI: 10.11883/bzycj-2017-0371

催化重整单元氢气气团爆炸超压分析*

姜 楠,秘义行,吕 东,王 璐,慕洋洋
(公安部天津消防研究所,天津 300381)

摘要:基于计算流体力学分析软件(FLACS),以催化重整反应单元为例建立事故模型,研究不同形状障碍物、泄漏位置,对不同泄漏时间和泄漏监测点的氢气爆炸超压的影响情况。通过研究,建立了与气体燃烧热与爆炸监测点距气团中心距离相关的最大爆炸超压模型。研究结果表明,在研究设计的遮挡物条件下,气体爆炸最大超压与折合距离在对数坐标系中均呈近似线性关系;对于不同的遮挡物,爆炸超压模型需进行修正;在反应器中部发生的事故场景,泄漏 5 min 后最大爆炸超压明显增大。

关键词:催化重整工艺;氢气;爆炸;超压
中图分类号:O381 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

中国是石油加工与其产品消费大国,截止到 2015 年,中国原油年加工能力达 7.1 亿吨[1]。随着产业转型升级,具有原油一次加工能力 3000~5 000 万吨/年、芳烃产量 200~300 万吨/年的大型石化基地必将产生,且为生产高辛烷值汽油所配套的催化重整工艺装置也必不可少,风险累积效应将显现。近年来,涉及催化重整联合装置的爆炸火灾事故较常见,其中以工艺管道受损后物料泄漏、法兰连接处物料泄漏导致的爆炸火灾事故居多,且以氢气、轻烃管道事故危害最大(表 1 为 2 起典型催化重整工艺火灾/爆炸事故)。对于不同单元而言,由于其进出物料种类与数量、反应条件等不同,涉及的设备、管道类型、数量、规格多有不同,涉及的引火源种类复杂。此外,催化重整工艺中涉及较多高大设备,一旦发生泄漏极易形成立体事故,扩散速度快,可能引发连串事故。

表 1 典型催化重整工艺火灾/爆炸事故

Table 1 Fire/explosion accidents in catalytic reforming process

时间	设备	类型	物料	原因
2008 年 9 月 12 日	PSA 单元	爆炸	氢气	管线弯头破裂,导致氢气泄漏
2015 年 4 月 6 日	吸附分离单元	爆炸/燃烧	混合芳烃	管道焊口断裂,混合芳烃泄漏

对于可燃气体的爆炸,科研人员采用理论、半经验和实验的方式进行研究[2]。由于爆炸的危害极大,很难进行等体积或缩放比较小的缩尺度试验,所以通过对爆炸场景建立模型进行分析的半经验和理论的研究方法十分重要。气体的爆炸模型通常包括 TNT 当量法、TNO 多能法以及 Baker-Strehlow 法[3-4]。其中,TNT 当量法主要是基于炸药爆炸经验产生的一种方法,对气体爆炸适用性一般[5];TNO 多能法是基于聚集程度产生的一种方法,对于局部受限的几何形状考察较少,主要是由使用者选择受限程度的严重系数[6];Baker-Strehlow 法基于火焰速度产生,通常是用于预测远处的压力。对于这 3 种方法而言,对于具体遮挡物体及其形状、气体的封闭状况等因素对气体爆炸的影响情况并未做细致考虑。但研究表明,点火点位置[7],混合气体组成[8],障碍物的数量、大小[9-13]等会对气体爆炸超压造成影响,可能带来更严重的事故。

本文中,采用一款基于计算流体力学技术开发的模拟软件 FLACS 对芳烃联合生产工艺中涉及的典型临氢反应单元(催化重整单元)的氢气爆炸场景进行模拟。在研究中以真实工艺场所为例建立模型,考察不同形状障碍物、泄漏位置,对不同泄漏时间和泄漏监测点的氢气爆炸超压的影响情况,建立最大爆炸超

* **收稿日期**:2017-10-17;**修回日期**:2018-04-03
基金项目:"十三五"国家重点研发计划课题(2017YFC0806602)
第一作者:姜 楠(1985—),男,博士,助理研究员,jiangnan@tfri.com.cn。

压与气体燃烧热、爆炸监测点距气团中心距离之间的数学模型。以期相关研究成果对于氢气爆炸方面的事故防范、实验设计、工程泄压等方面具有一定的借鉴意义。

1　催化重整工艺简介

芳烃联合生产工艺的催化重整单元，是以预加氢直馏石脑油和加氢裂化重石脑油为原料，在催化剂的作用下，烃类分子发生以芳构化反应为主的多种反应，最终获得芳烃、异构烃及氢气[14]。根据重整反应器划分，催化重整工艺主要分为连续重整工艺、半再生重整工艺和组合床重整工艺。其中，连续重整工艺多在大型化工厂内应用。目前，连续重整工艺主要包括法国 IFP 工艺和美国 UOP 工艺。其中，UOP 工艺催化重整反应器采用轴向重叠排列方式，整个反应器组可高达 50 m 以上。催化重整反应器是催化重整单元的核心设备，其内部存在一定量的循环氢气，主要作用包括：(1)保持催化重整反应器中催化剂的稳定性；(2)将反应产物从催化剂上带走；(3)减少积碳速度；(4)能加快石脑油通过反应器的速度，减小吸热反应产生的温降。

2　氢气泄漏模型的建立与泄漏量的计算

2.1　氢气泄漏源模型

重点针对催化重整反应器的氢气管线泄漏事故场景进行模拟。对于氢气而言，其压力、密度、温度等参数遵循气体状态方程。氢气的泄漏过程可按可压缩气体以自由膨胀的形式经小孔泄漏考虑。根据机械能守恒定律，忽略轴功、势能变化、气体初始动能，并将气体近似为理想气体，可得氢气泄漏流量[15]：

$$Q=p_0AC_0\sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}\frac{M}{RT_0}\left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma}{2}}-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}}\right]} \tag{1}$$

式中：p_0 为初始压力；C_0 为孔流系数；A 为泄漏孔面积；γ 为绝热指数；M 为泄漏物分子量，T_0 为泄漏源温度，R 为理想气体常数，p 为泄漏通道处压力。

对式(1)求最大值，可得当 $\frac{p}{p_0}=\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$ 时，氢气泄漏最大流量为：

$$Q_{\max}=p_0AC_0\sqrt{\frac{\gamma M}{RT_0}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \tag{2}$$

2.2　事故场景及泄漏参数的确定

对于氢气，氢气分子量取 2.0，绝热指数取 1.40，理想气体常数取 8.314，孔流系数取最大值 1.0(泄漏流量最大时)。泄漏孔大小假设为 20 cm^2。催化重整反应器的设备参数与工艺条件取自中国某大型催化重整反应单元。温度取 538 ℃，压力取 0.65 MPa。该工艺段 H_2 循环量约为 1.3077×10^5 m^3/h。

该工艺下氢气临界泄漏压力为：

$$p=p_0\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}=1.85\times10^5\ \text{Pa}>10^5\ \text{Pa(大气压力)}$$

因此，氢气泄漏最大流量为：

$$Q_{\max}=p_0AC_0\sqrt{\frac{\gamma M}{RT_0}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}=0.217\ \text{kg/s}$$
$$=8\ 749.44\ \text{m}^3/\text{h}<1.307\ 7\times10^5\ \text{m}^3/\text{h}(H_2\ \text{循环量})$$

根据上述计算，本文将 0.217 kg/s 选作氢气泄漏速率，选取的事故场景中氢气的泄漏时间分别选为 1、3、5、7 min，根据泄漏流量计算可得泄漏量分别为 13.04、39.11、65.19、91.26 kg。

3　模型建立及参数设置

选取中国某大型芳烃联合生产工艺催化重整反应器(UOP 工艺)进行模拟，分别假设氢气输送管线最高端和中间部位(与催化剂再生设备高度接近)作为氢气泄漏位置。采用 FLACS 建立事故场景三维模型

（见图 1）。图 1 中右侧为催化重整反应器，整个反应器置于框架结构之上，其顶部距地面约 51.1 m；4 个催化重整反应器的高度自下而上依次约为 10.9、9.6、9.4、9.0 m，直径依次约为 4.5、3.6、3.0、2.7 m；催化重整反应器右侧管路为氢气输送管，直径为 0.25 m；左侧为催化剂再生装置，再生装置大部分处于框架结构之中，其顶部距地面约 40.3 m；催化剂再生装置高度约为 21.5 m，直径为 3.2 m。

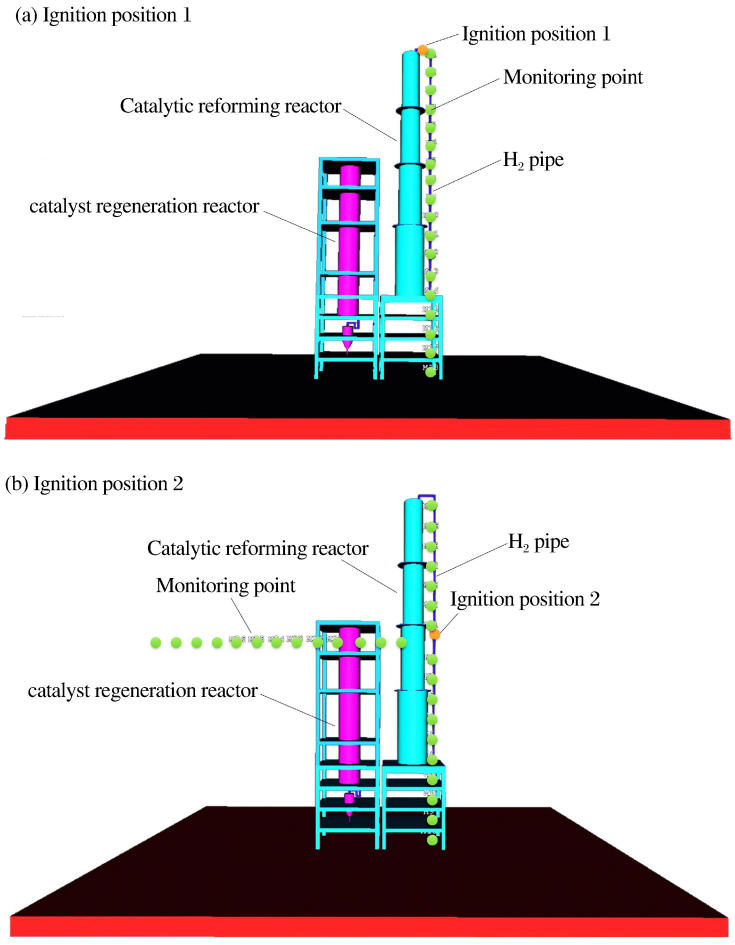


图 1　几何模型及点火位置、监测点示意图

Fig. 1　Schematic diagrams for the geometric model, ignition positions and some overpressure monitors

FLACS 采用标准 k-ε 模型进行计算湍流的产生与消散，可解决三维笛卡尔网格中的质量、动量、能量和组分等守恒问题。计算方程如下：

$$S_\varphi = \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_i \rho\varphi) - \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho\Gamma_\varphi \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi)\right] \tag{3}$$

式中：S_φ 为源项；ρ 为气体密度；φ 为质量、动量、能量等求解变量；x_j 为 j 方向上的积分；μ_i 为 i 方向上的速度矢量；Γ_φ 为扩散系数。

因为管道及其法兰、焊缝、转角等部位是实际事故中发生泄漏事故及引发点火位置，所以本文中将引火点设置为固定点，通过改变气团位置对不同爆炸情景进行模拟。计算中将氢气-空气气团设置为立方体。引火点位于氢气-空气气团中心。2 种泄漏场景下，气团分别位于图 1 中引火点 1 和引火点 2 附近。根据泄漏时间与泄漏量，1、3、5、7 min 泄漏的氢气-空气气团边长分别为 7.78、11.22、13.30、14.89 m。

设置计算范围为 70 m×60 m×90 m，将整个计算范围分为 150×130×100 即 1 950 000 个单元格；大气压为 100 kPa，温度为 20 ℃；考虑最危险情况，风速设为零。设置氢气与空气按当量比混合，混合比为12∶25，氢气的体积分数约为32.4%。

对于引火点 1，周边主要设备位于其下方，相对较危险，因此考察引火点 1 下方的监测点；对于引火

点 2，除了与其平行并远离装置的方向外，其余方向均有较大危险性，因此考察 3 个方向上的监测点。将监测点距气团中心距离作为位置变量，相应点火位置与监测点示意图如图 1 所示。

4　数据分析

4.1　反应器顶部引火点爆炸超压分析

经过模拟，氢气-空气气团在引火点 1 场景下发生爆炸时的最大超压如表 2 所示。

对表 2 中数据进行分析可知，4 种泄漏时间下最大超压检测点分别位于 7、7、10 和 10 m。而氢气-空气气团边长分别为 7.78、11.22、13.30 和 14.89 m。整体来看，气团范围内，压力随距离的增大而升高，气团范围外压力随距离的增大而降低。这是因为在气团范围内，可燃气体（氢气）量充足，且处于当量比附近，因而链式反应不断加速，进而使爆炸压力不断提高。但是对于气团范围外的监测点，其压力主要是由于气体扩散至该处并引起爆炸与气团内爆炸冲击波的传递造成的。参照 TNO 多能法，引入一个无量纲的比拟距离（折合距离），按下式计算从气团中心到监测点的距离：

$$S_{\mathrm{vol}}=(E/p_0)^{1/3}=d/r_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

式中：S_{vol} 为距离缩放系数，m；E 为氢气燃烧热，J；p_0 为大气压强，Pa；d 为监测点距气团中心的距离，m；r_{s} 为折合距离。

表 2　引火点 1 不同泄漏时间氢气-空气气团爆炸最大超压

Table 2　Maximum overpressure of H_2-air cloud explosion in ignition position 1

距离/m	$p_{\max}$/Pa			
	1 min	3 min	5 min	7 min
1	4.97×10^3	4.40×10^3	3.99×10^3	3.73×10^3
4	5.67×10^3	4.39×10^3	4.01×10^3	3.73×10^3
7	6.09×10^3	5.47×10^3	4.49×10^3	3.86×10^3
10	3.77×10^3	4.57×10^3	4.75×10^3	5.51×10^3
13	2.88×10^3	3.25×10^3	3.10×10^3	3.72×10^3
16	2.35×10^3	2.63×10^3	2.51×10^3	2.66×10^3
19	1.97×10^3	2.18×10^3	2.06×10^3	2.19×10^3
22	1.66×10^3	1.81×10^3	1.68×10^3	1.83×10^3
25	1.44×10^3	1.53×10^3	1.42×10^3	1.59×10^3
28	1.26×10^3	1.30×10^3	1.24×10^3	1.40×10^3
31	1.10×10^3	1.10×10^3	1.08×10^3	1.19×10^3
34	9.78×10^2	9.72×10^2	9.62×10^2	1.03×10^3
37	8.92×10^2	8.92×10^2	8.60×10^2	8.82×10^2
40	8.47×10^2	8.51×10^2	7.93×10^2	7.98×10^2
43	7.88×10^2	7.38×10^2	5.81×10^2	6.14×10^2
46	8.29×10^2	7.20×10^2	5.70×10^2	6.27×10^2
49	8.84×10^2	6.93×10^2	5.49×10^2	6.29×10^2
52	9.27×10^2	6.88×10^2	5.55×10^2	6.43×10^2

将折合距离与最大爆炸超压作图可得图 2(a)。由图 2(a)可知，在最大爆炸超压之后的超压数据与折合距离呈近似对数关系。对距气团中心 10 m 以外（气团范围外）的监测点的折合距离与最大爆炸超压在对数坐标系统中作图，可得图 2(b)。

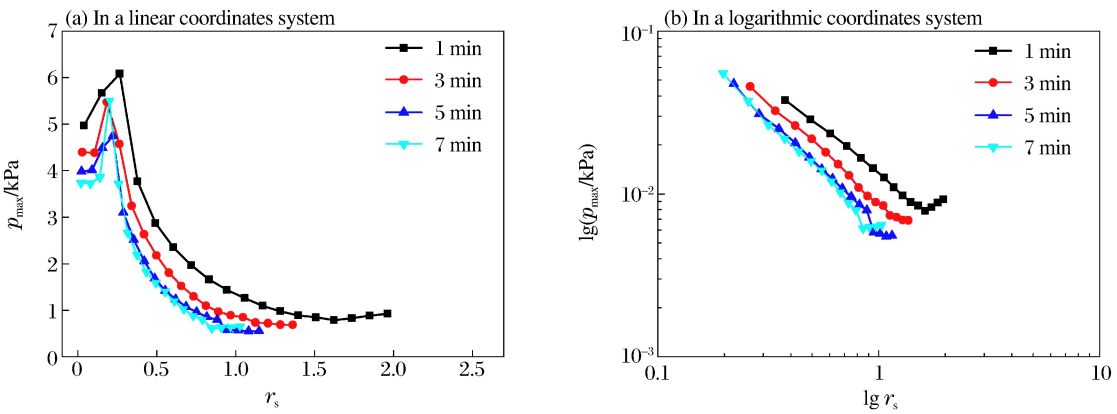


图 2　引火点 1 气体爆炸最大超压与折合距离的关系

Fig. 2　Relationship between maximum overpressure and scaled distance from explosion source centre for ignition position 1

对图 2(b)中数据进行线性（$y=ax+b$）拟合，可得表 3 中的数值。

表 3 引火点 1 上方不同氢气泄漏时间模拟公式 a、b 系数及决定系数 r^2

Table 3 Values of a, b and r^2 in each formula of H_2 in ignition position 1 for different leakage times

泄漏时间/min	a	b	r^2	泄漏时间/min	a	b	r^2
1	−0.97	−1.86	0.955 9	5	−1.341	−2.20	0.991 7
3	−1.211	−2.05	0.994 1	7	−1.361	−2.23	0.989 6

因此，结合催化重整反应器顶部氢气输送管道泄漏后，氢气爆炸超压和氢气燃烧热、距气团中心距离关系式为：$p_{max}=10^{a\lg\left[d\left(\frac{p_0}{E}\right)^{\frac{1}{3}}\right]+b}$，决定系数 r^2 均大于 0.95，具有良好的可靠性。此关系式与针对甲烷进行的研究成果[3]相似。

4.2 反应器中部引火点爆炸超压分析

经过模拟，氢气-空气气团在引火点 2 场景下发生爆炸时的最大超压如表 4 所示。

表 4 引火点 2 不同泄漏时间氢气-空气气团爆炸最大超压

Table 4 Maximum overpressure of H_2-air cloud explosion in ignition position 2

相对方位	距离/m	p_{max}/Pa			
		1 min	3 min	5 min	7 min
气团中心下方	2.5	5.09×10^3	6.20×10^3	1.73×10^4	1.82×10^4
	5.5	7.13×10^3	6.38×10^3	1.53×10^4	1.59×10^4
	8.5	3.67×10^3	6.99×10^3	1.29×10^4	1.32×10^4
	11.5	3.16×10^3	6.56×10^3	1.27×10^4	1.10×10^4
	14.5	2.69×10^3	5.46×10^3	1.15×10^4	1.07×10^4
	17.5	2.52×10^3	5.42×10^3	1.56×10^4	1.33×10^4
	20.5	1.95×10^3	3.54×10^3	5.97×10^3	5.67×10^3
	23.5	2.02×10^3	3.59×10^3	6.62×10^3	5.99×10^3
	26.5	2.14×10^3	3.66×10^3	6.02×10^3	5.81×10^3
	29.5	2.27×10^3	3.84×10^3	6.84×10^3	6.87×10^3
气团中心上方	2.5	5.03×10^3	6.10×10^3	1.74×10^4	1.85×10^4
	5.5	6.87×10^3	6.26×10^3	1.48×10^4	1.54×10^4
	8.5	4.30×10^3	7.50×10^3	1.36×10^4	1.23×10^4
	11.5	3.32×10^3	5.94×10^3	1.21×10^4	9.15×10^3
	14.5	2.60×10^3	4.67×10^3	1.17×10^4	1.00×10^4
	17.5	2.14×10^3	3.79×10^3	1.00×10^4	8.23×10^3
	20.5	1.79×10^3	3.09×10^3	8.27×10^3	6.50×10^3
气团中心平行位置	4.5	6.20×10^3	6.66×10^3	1.48×10^4	1.58×10^4
	7.5	5.40×10^3	7.07×10^3	1.31×10^4	1.26×10^4
	10.5	5.09×10^3	7.69×10^3	1.72×10^4	1.40×10^4
	13.5	2.85×10^3	5.05×10^3	1.41×10^4	1.30×10^4
	16.5	2.22×10^3	4.38×10^3	1.30×10^4	1.26×10^4
	19.5	1.81×10^3	3.72×10^3	1.08×10^4	1.04×10^4
	22.5	1.53×10^3	3.11×10^3	8.99×10^3	8.08×10^3
	25.5	1.32×10^3	2.57×10^3	7.27×10^3	6.32×10^3
	28.5	1.14×10^3	2.10×10^3	5.95×10^3	4.97×10^3
	31.5	9.52×10^2	1.65×10^3	4.78×10^3	3.96×10^3
	34.5	7.37×10^2	1.24×10^3	3.76×10^3	3.23×10^3
	37.5	4.78×10^2	8.08×10^2	2.71×10^3	2.49×10^3
	40.5	1.69×10^2	3.00×10^2	1.15×10^3	1.06×10^3

对表 4 中数据进行分析，并将监测点距气团中心距离换算为折合距离。对折合距离与最大爆炸超压作图，可得图 3。与反应器上部泄漏爆炸场景相似，氢气泄漏时间为 1 和 3 min 时，最大爆炸超压之后

的超压数据与折合距离部分呈近似对数关系。氢气泄漏 5 和 7 min 后的最大爆炸超压数据明显大于其他泄漏情景下的爆炸超压数据。这说明，由于氢气-空气气团在反应器中部的受限空间内发生爆炸，受到周围催化重整反应器、设备框架结构和催化剂再生设备等明确引起强烈冲击波的设施的影响，可能已不是单纯的爆燃。氢气爆炸时产生的冲击波是氢气-空气混合气体传播的燃烧波，其速度包括其本身传播速度和已燃烧气体膨胀引发的气体流动速度。因此，随着燃烧的进行，传播速度会越来越大。在某些情况下（如已燃气体膨胀不断加剧、障碍物等因素），火焰传播一定距离后，速度突然急剧增大，最终成长为冲击波。冲击波可进一步引起未燃气体的物理加热并维持火焰的传播，进而使火焰传播速度大于未燃气体中的声速，形成爆轰波[16]。因此，此时爆炸超压突增可能是正在发生由爆燃向爆轰的转变。

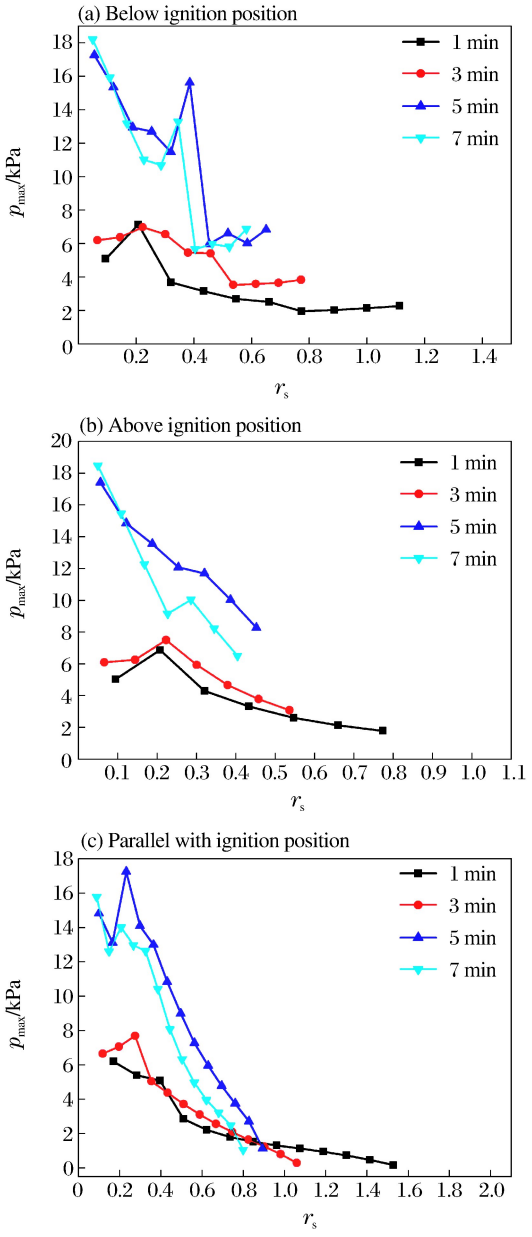


图 3　引火点 2 气体爆炸最大超压与折合距离的关系

Fig. 3　Relationship between maximum overpressure and scaled distance from explosion source centre for ignition position 2

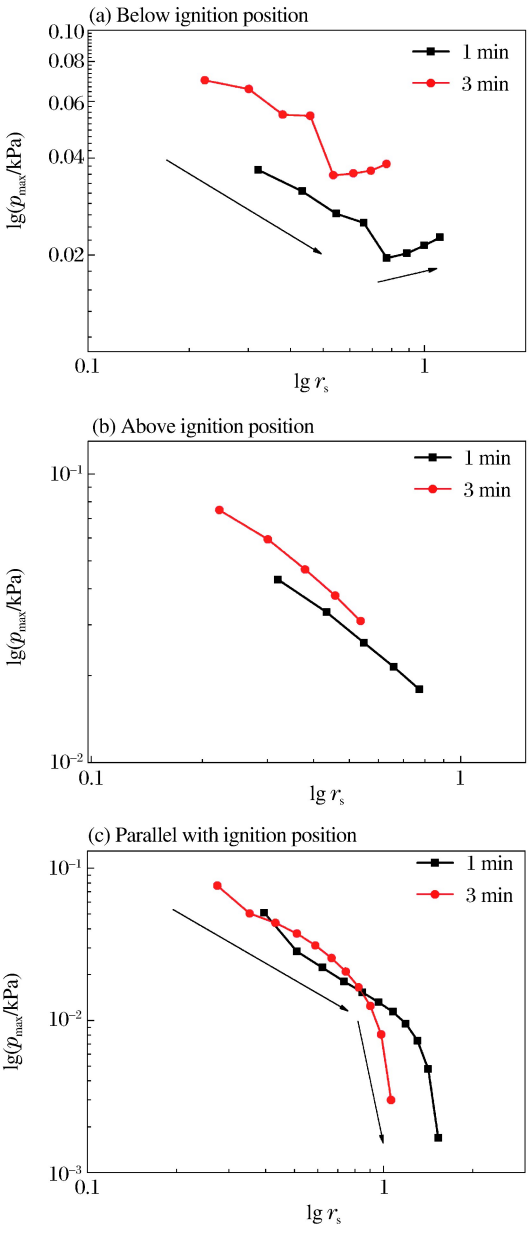


图 4　对数坐标系下引火点 2 气体爆炸最大超压与折合距离的关系

Fig. 4　Relationship between maximum overpressure and scaled distance from explosion source centre in a bilogarithmic coordinates system for ignition position 2

采用与图 2(b)同样的处理方法，对氢气泄漏 1 和 3 min 后，最大爆炸超压以后的监测点的折合距离与最大爆炸超压在对数坐标系统中作图，可得图 4。对图 4 进行分析，可知图 4(b)中数据呈线性相关性，按 $y=ax+b$ 线性拟合，可得表 5。由表 5 可知，图 4(b)中数据的决定系数 r^2 均大于 0.95。此种情况下，氢气爆炸超压和氢气燃烧热、距气团中心距离关系式与反应器上部泄漏的关系式相同。这是由于反应器中部上方的障碍物情况与反应器上部下方的障碍物情况相同。

表 5 引火点 2 上方不同氢气泄漏时间模拟公式 a、b 系数及决定系数 r^2

Table 5 Values of a, b and r^2 in each formula of H_2 above ignition position 2 for different leakage times

泄漏时间/min	a	b	r^2
1	−1.00	−1.85	0.996 2
3	−1.01	−1.77	0.987 8

对图 4(a)进行分析，其数据呈两段线性关系(如图中箭头所示)，先负线性相关，后正线性相关。结合图 1(b)中监测点位置与三维模型结构布局可知，在第 5 个监测点(距气团中心约 20.5 m，见表 2)附近，是催化重整反应器与框架结构的交界附近，之后的障碍物(框架结构楼板)明显增大，且每层障碍物均有增多，造成冲击波逐渐加大，所以在此监测点后，最大超压随折合距离的增加而增大。对于图 4(c)而言，其位置处于与引火点 2 平行方向，周边有催化剂再生装置的阻碍。但催化剂再生装置与催化重整反应器下部的框架结构相比在冲击波传播方向上的阻碍相对较小，所以对于最大超压而言，其效果是降低最大超压下降速度。在经过催化剂再生装置后，最大超压下降速度增大；完全离开催化剂再生装置框架结构后，其下降速度进一步增大。

4.3　现实意义分析

通过对事故场景下的爆炸超压数据分析可知，本设计场景下，引火点 1 发生爆炸时，爆炸超压低于 6.1 kPa，破坏等级属于轻微破坏(>3.5 kPa)；引火点 2 最大爆炸超压可达 18.5 kPa，破坏等级属于中等破坏(>17 kPa)。从检测点最大爆炸超压产生的时间来看，泄漏 5 min 以后产生的爆炸超压属于中等破坏范围。对于此类情况，若事故并未第一时间引发爆炸或燃烧，消防应急救援应避免泄漏 5 min 后发生的爆炸；从检测点最大爆炸超压的位置来看，处于引火点 5.5 m 范围内的人员应特别注意，此外应尽量避开这范围内的设备，防止因爆炸造成的破坏倒塌。

此外，对于引火点 2，应重点关注泄漏 5 min 后引燃产生的爆轰现象。近年来，此类可能由爆轰造成的事故较多。例如“腾龙芳烃 4.6 爆炸着火事故”，该事故是管线泄漏后发生爆炸，致使约 50 m 外的连续重整装置框架严重变形、约 67.5 m 外的重石脑油储罐和轻重整液储罐罐壁内陷与罐顶间焊口撕裂并先后爆炸着火。由此可见，对于可燃气体/蒸气，在障碍物环境下，一旦形成爆炸氛围并导致爆轰，其爆炸威力常常很大

总体上看，对于可能产生由爆燃向爆轰转变或爆轰的事故而言，随着泄漏事件的延长，爆炸超压会变大。本模拟状态引火源大小约为 0.001 m^3，属于弱引火源。对于弱引火源，极易在障碍物存在条件下发生加速燃烧和爆炸[17]。因此，对于大型设备泄漏事故发生后的应急救援来说，面对易形成爆炸性氛围的事故，应尽力避开周边障碍物，合理布置消防战力。

5　结　论

通过对催化重整反应器氢气泄漏爆炸事故场景的分析，本文中设计了 4 种泄漏时间下，催化重整反应器顶部与中部氢气输送管道泄漏爆炸的事故场景，并得出爆炸最大超压的传播规律。相关结论如下：

(1)通过研究催化重整反应器顶部氢气爆炸与反应器中部爆炸上方的最大超压传播规律，得到在本设计事故场景下(未发生爆轰时)，氢气-空气混合气团爆炸超压和气体燃烧热、监测点距气团中心距离的函数关系式为 $p_{\max}=10^{a\lg\left[d\left(\frac{p_0}{E}\right)^{\frac{1}{3}}\right]+b}$。

(2)分析催化重整反应器中部氢气爆炸事故场景,发现随着超压传播方向上障碍物(框架结构、催化剂再生装置)遮挡程度的增大,其最大超压可能会发生下降变缓甚至增大的情况;但在相似遮挡程度下,其折合距离与最大爆炸超压在对数坐标系中仍呈线性相关。

(3)基于本研究结果可知,在一定的场景条件下,可通过在遮挡程度较高的方向上增设泄压设备,减小最大爆炸超压的破坏力。

(4)在本文设计事故场景(引火点 2)下,泄漏 5 min 后应注意可能产生由爆燃向爆轰转变的现象;对于在障碍物较多的爆炸性环境发生的事故,应注意可能发生的爆轰现象,布置救援力量时应尽量远离障碍物,选择较空旷区域布置。

参考文献:

[1] 孙贤胜,钱兴坤,姜学峰. 2015 年国内外油气行业发展报告[M]. 北京:石油工业出版社,2016:1-30.

[2] 张秀华,段忠东,李玉顺. 燃气爆炸冲击加载试验研究与数值模拟[J]. 振动与冲击,2015,34(10):142-146. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.024.
ZHANG Xiuhua, DUAN Zhongdong, LI Yushun. Tests and numerical simulation for gas blast shock loading[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(10):142-146. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2015.10.024.

[3] MERCX W P M, BERG A C Van Den, HAYHURS C J, et al. Developments in vapour cloud explosion blast modeling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71(1):301-319. DOI:10.1016/S0304-3894(99)00085－0.

[4] LOBATO J, CAIZARES P, RODRIGO M A, et al. A comparison of hydrogen cloud explosion models and the study of the vulnerability of the damage caused by an explosion of H_2[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006,31(12):1780-1790. DOI:10.1016/j.ijhydene.2006.01.006.

[5] 宋元宁,于立友,李彩霞. TNT 当量法预测某石化设备爆炸后果评价[J]. 中国安全生产科学技术,2005,1(3):66-68. DOI:10.3969/j.issn.1673-193X.2005.03.017.
SONG Yuanning, YU Liyou, LI Caixia. TNT equivalent method predicts the consequence that some petrochemical industry equipment explodes[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2005,1(3):66-68. DOI:10.3969/j.issn.1673-193X.2005.03.017.

[6] VAN DEN BERG A C. The multi-energy method: a framework for vapour cloud explosion blast prediction[J]. Journal of Hazardous Materials, 1985,12(1):1-10. DOI:10.1016/0304-3894(85)80022-4.

[7] 曹勇,郭进,胡坤伦,等. 点火位置对氢气-空气预混气体泄爆过程的影响[J]. 爆炸与冲击,2016,36(6):847-852. DOI:10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.
CAO Yong, GUO Jin, HU Kunlun, et al. Effect of ignition locations on vented explosion of premixed hydrogen-air mixtures[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(6):847-852. DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0847-06.

[8] 程关兵,李俊仙,李书明,等. 氢气/丙烷/空气预混气体爆轰性能的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2015,35(2):249-254. DOI:10.11883/1001-1455(2015)02-0249-06.
CHENG Guanbing, LI Junxian, LI Shuming, et al. An experimental study on detonation characteristics of binary fuels hydrogen/propane-air mixtures[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(2):249-254. DOI:10.11883/1001-1455(2015)02-0249-06.

[9] 杜扬,李国庆,王世茂,等. 障碍物数量对油气泄压爆炸特性的影响[J]. 化工学报,2017,68(7):2946-2955. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20161612.
DU Yang, LI Guoqing, WANG Shimao, et al. Effects of obstacle number on the characteristics of vented gasoline-air mixture explosions[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2017,68(7):2946-2955. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20161612.

[10] NA'INNA A M, PHYLAKTOU H N, ANDREWS G E. The acceleration of flames in tube explosions with two obstacles as a function of the obstacle separation distance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1597-1603. DOI:10.1016/j.jlp.2013.08.003.

[11] 余明高,袁晨樵,郑凯. 管道内障碍物对加氢甲烷爆炸特性的影响[J]. 化工学报,2016,67(12):5311-5319. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20160645.

YU Minggao, YUAN Chenqiao, ZHENG Kai. Effects of hydrogen addition on explosion characteristics of gas under condition of obstacles[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2016,67(12):5311-5319. DOI:10.11949/j.issn.0438-1157.20160645.

[12] LI Dong, ZHANG Qi, MA Qiuju, et al. Influence of built-in obstacles on unconfined vapor cloud explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,43:449-456. DOI:10.1016/j.jlp.2016.07.007.

[13] NA'INNA A M, SOMUANO G B, PHYLAKTOU H N, et al. Flame acceleration in tube explosions with up to three flat-bar obstacles with variable obstacle separation distance[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 2015,38:119-124. DOI:10.1016/j.jlp.2015.08.009.

[14] 徐承恩. 催化重整工艺与工程[M]. 北京:中国石化出版社,2014:1-17.

[15] 赵劲松. 化工过程安全[M]. 北京:化学工业出版社,2015:103-106.

[16] 史文虎. 氢气燃烧与爆炸原因浅析[J]. 华北电力技术,1991(7):54-60. DOI:10.16308/j.cnki.issn1003-9171.1991.07.010.
SHI Wenhu. Simple analysis of the reasons of hydrogen combustion and explosion[J]. North China Electric Power, 1991(7):54-60. DOI:10.16308/j.cnki.issn1003-9171.1991.07.010.

[17] 郭丹彤,吕淑然,杨凯. 障碍物布置对气体爆炸压力场的影响效果研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(9):88-93. DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2015.09.014.
GUO Dantong, LÜ Shuran, YANG Kai. Research on impact effect of obstacle arrangement to pressure field of gas explosion[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015,11(9):88-93. DOI:10.11731/j.issn.1673-193x.2015.09.014.

Explosion overpressure of hydrogen cloud in catalytic reforming process

JIANG Nan, Bi Yixing, LÜ Dong, WANG Lu, MU Yangyang
(*Tianjin Fire Research Institute of MPS*, *Tianjin* 300381, *China*)

Abstract: Because the structure and shape of processing equipment in petrochemical industry are complex normally, the explosion overpressure of gas is hard to be predicted by traditional explosion overpressure models. Base on the computational fluid dynamics software (FLACS) and the accident model of the catalytic reforming process, the effects of different factors (obstacle shape, leakage position) on the explosion overpressure of hydrogen at different times and different monitoring points were investigated. The explosion overpressure models for overpressure, combustion heat of hydrogen and distance from the center of gas cloud were established. The results show that, the overpressure approximately follows a linear relationship with scaled distance in a logarithmic coordinate system; the explosion overpressure model should be modified for different kinds of obstacles; when the leakage time achieves 5 minutes, the accident occurring in the middle of the reactor shows increasing overpressure obviously.

Keywords: catalytic reforming process; hydrogen; explosion; overpressure

(责任编辑　张凌云)