第 23 卷 第 3 期 高 压 物 理 学 报 Vol. 23, No. 3
2009 年 6 月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS June, 2009

文章编号:1000-5773(2009)03-0203-06

高压氢气输运装置物理爆炸状态场特征及灾害效应研究*

李 伟,张 奇

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要:由于输运装置突然失效而引发的高压氢气喷射,能够在流场中造成超压和足以引发爆炸的扩散。运用数值计算方法,建立可用于计算的物理和数学模型对发生泄漏后有、无障碍物两种情况下的外部流场进行分析,可得到外部流场中的气体泄漏压力和浓度的分布等值线图。从计算结果可以得出氢气发生爆炸事故后的危险区域,障碍物对氢气的喷射泄漏以及爆炸所产生的影响,从而可为预防和处理氢气爆炸事故提供参考依据。

关键词:高压氢气;输运装置;物理爆炸

中图分类号:O383;X932 **文献标识码**:A

1 引 言

氢气被广泛使用于化工生产过程,其在输运过程中常常采用高压压缩的方法。由于结构缺陷、机械撞击、疲劳断裂、表面腐蚀等原因,长时间在高压下工作的输运装置常常发生断裂破碎,从而引起氢气输运装置的物理爆炸。物理爆炸之后高压氢气喷射外泄,由于其燃爆特性,易引发后继的化学爆炸。

2007 年某化工集团发生氢气爆炸事故,造成 9 人死亡、1 人重伤。事故原因是高压氢气造成管道破裂发生物理爆炸,在氢气扩散的过程中遇到点火源又发生更加剧烈的二次爆炸,造成人员伤亡和财产损失。通过数值模拟可以得出氢气喷射过程中在流场各区域中所形成的超压(绝对压力与环境压力的差值)、氢气浓度及温度分布,从而可以划分危险区域,以便给生产条件的整改和同类事故的预防提供依据。

国外学者 A. Hashimoto 和 A. Matsuo 对气体爆炸后的流场进行了数值模拟[1],Chernyshev 和 Lukyanchikov 等对气体物理爆炸和化学爆炸模型进行了研究[2]。国内学者刘难生、陆夕云、杨昭等对高速氢气喷流和危险气体泄漏后的危险区域进行了研究[3-4]。但国内外对于高压氢气射流喷射流场的研究成果较少。本研究通过计算流体力学有限元程序,以高压氢气输运管道破裂爆炸为例,研究高压容器爆炸初期(0.1 s 以内)泄漏气体在有、无障碍物两种情况下对外部流场的影响,得到外部流场中压力场和氢气浓度的分布。

2 计算模型

2.1 物理模型

采用的无障碍情况下计算模型如图 1 所示。管道直径为 120 mm,壁厚为 20 mm,内部初始压力为 34 MPa。发生物理爆炸后,氢气以管道横截面为泄漏口进行泄漏。在计算流体力学(CFD)软件中采用二维平面模型,以管道横截面中心为圆心,半径为 5 m 作为外部流场计算区域。

* **收稿日期**:2008-10-30;**修回日期**:2009-02-10

基金项目:北京理工大学研究生科技创新基金(GA200805)

作者简介:李 伟(1984—),男,博士研究生,主要从事燃烧爆炸安全技术研究. E-mail:leconan@bit.edu.cn

另设附加障碍物计算模型，如图 2 所示。取管道长度 1 m，外接长、宽均为 7 m 的外部流场，在外部流场中距离管口 5 m 处设置长 10 m、宽 100 mm 障碍物。

模型中进口为管道横截面，设定为压力进口，初始压力 34 MPa；出口设定为压力出口，管道和障碍物边界设定为固壁边界。为提高计算效率，采用对称模型进行计算。

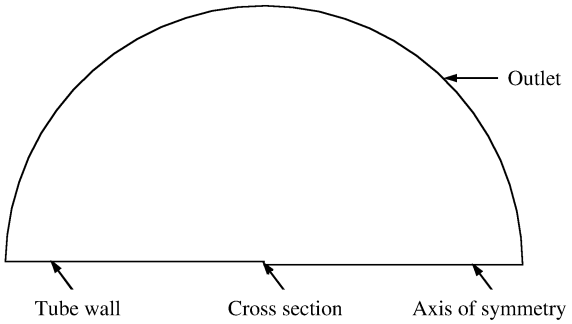


图 1 无障碍情况下计算模型示意图

Fig. 1 The configuration of computational model without obstacle

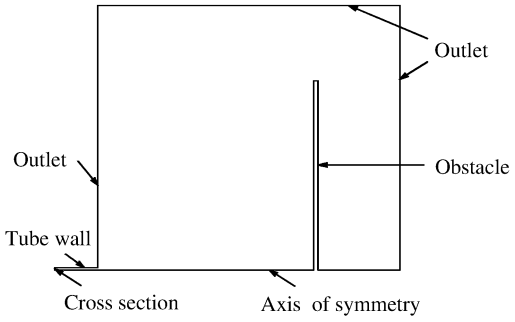


图 2 有障碍情况下计算模型示意图

Fig. 2 The configuration of computational model with obstacle

2.2 数学模型

本研究对于流场研究采用标准 k-ξ 湍流模型，计算过程中的组分输运及扩散主要通过以下方程来描述

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i)+\nabla\cdot(\rho \boldsymbol{v} Y_i)=-\nabla\cdot\boldsymbol{J}_i+R_i+S_i \tag{1}$$

$$\boldsymbol{J}_i=-\rho D_{i,m}\nabla Y_i \tag{2}$$

$$\boldsymbol{J}_i=-\left(\rho D_{i,m}+\frac{\mu_t}{S_{ct}}\right)\nabla Y_i \tag{3}$$

式中：Y_i 是第 i 种组分的质量分数；R_i 是第 i 种产物净产生速率；S_i 是离散相导致的额外产生速率；ρ 是气体密度；$\boldsymbol{J}_i$ 是物质 i 的扩散通量；S_{ct}是湍流施密特数，取 0.7；μ_t 是湍流速度；$D_{i,m}$是混合物中第 i 种物质的扩散系数，取 2.88×10^{-5} m^2/s。

3 计算结果及分析

利用计算流体力学软件对所设计的计算模型进行迭代计算，得到不同时刻计算区域内的压力、氢气浓度和温度等值线分布图。其中气体浓度用质量分数来表示。

3.1 物理爆炸状态场特征

外部流场无障碍情况下计算结果如图 3～图 10 所示。

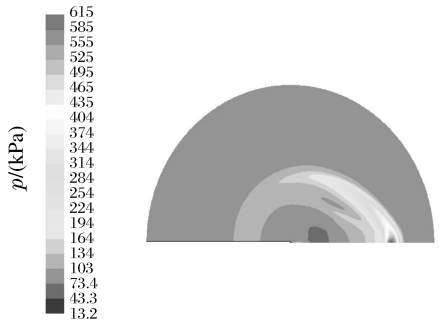


图 3 $t=0.005$ s 时压力等值线图

Fig. 3 Pressure contour at $t=0.005$ s

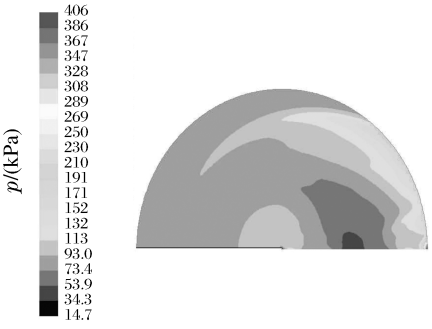


图 4 $t=0.01$ s 时压力等值线图

Fig. 4 Pressure contour at $t=0.01$ s

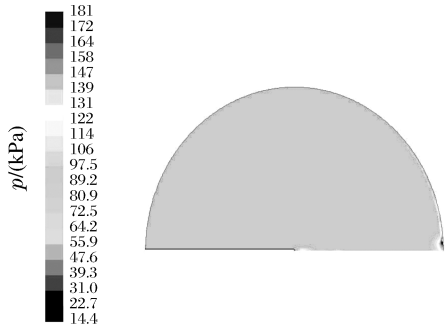


图 5　$t=0.1$ s 时压力等值线图

Fig. 5　Pressure contour at $t=0.1$ s

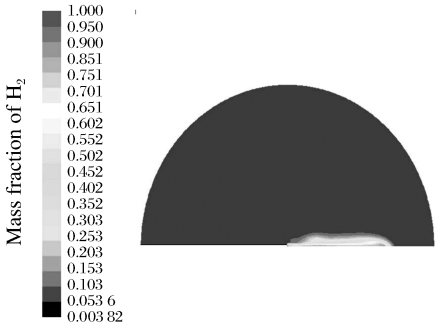


图 6　$t=0.005$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 6　Mass fraction contour of H_2 at $t=0.005$ s

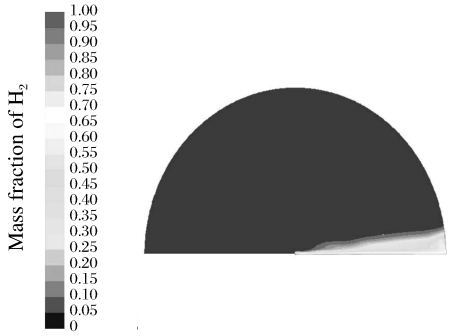


图 7　$t=0.01$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 7　Mass fraction contour of H_2 at $t=0.01$ s

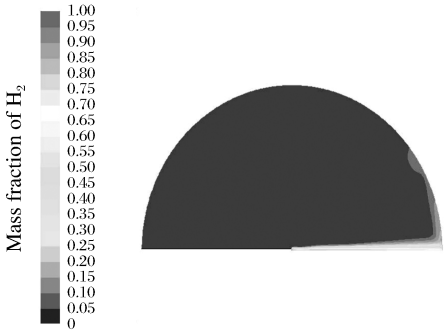


图 8　$t=0.1$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 8　Mass fraction contour of H_2 at $t=0.1$ s

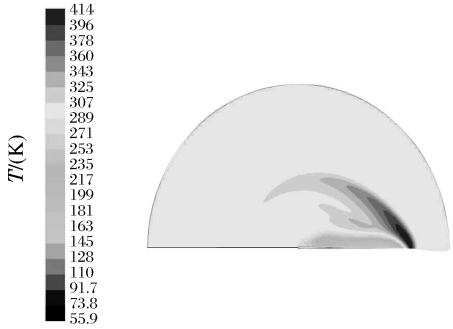


图 9　$t=0.005$ s 时温度等值线图

Fig. 9　Temperature contour at $t=0.005$ s

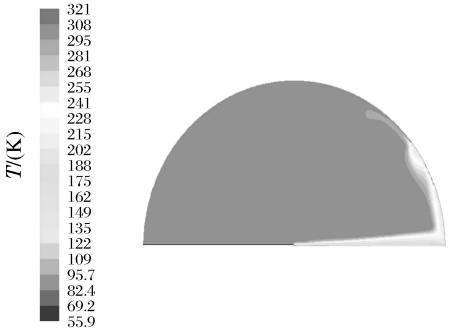


图 10　$t=0.1$ s 时温度等值线图

Fig. 10　Temperature contour at $t=0.1$ s

从以上计算结果可以看出,外部流场区域中无障碍情况下,氢气输运管道发生物理爆炸之后,冲击波及氢气组分主要沿管道轴线方向进行传播,主要集中在外部流场中与管道平行的区域中。此区域中氢气的浓度均在爆炸极限范围之内,存在着氢气发生化学爆炸的可能性。爆炸初期冲击波在外部流场传播的过程中的最高温度为 414 K,在整个 0.1 s 的时间范围内大部分区域都是处于室温状态下。

3.2　障碍物反射对外部流场状态的影响

外部流场设置障碍情况下计算结果如图 11～图 18 所示。在这种情况下,爆炸冲击波在自由空间传播时的超压数值与无障碍物情况下大致相当,但在遇到障碍物后由于反射作用会在反射点处出现 1.4 MPa以上的超压(如图 19 所示)并产生 584 K 的高温(如图 18 所示)。氢气组分也在高压驱使下沿障碍物在较大范围内扩散,氢气在空气中的爆炸极限为 4%～74.2%,由图 16 可知障碍物周围大部分区域中氢气浓度处于氢气爆炸极限范围之内,因此极易从该区域引发氢气的化学爆炸。外部流场一旦发生化学爆炸,在有障碍物的情况下,极易引发氢气输运管道内的氢气产生爆炸[5],破坏更长的氢气管道,在其它地方产生同样的物理爆炸引发化学爆炸的反应,引起一连串事故的发生。

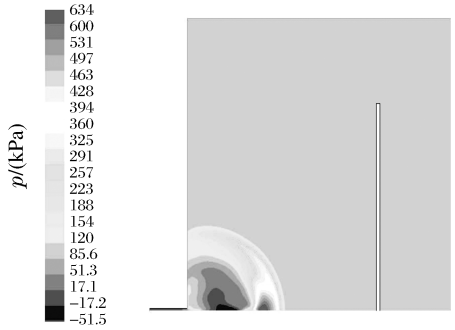


图 11 $t=0.005$ s 时压力等值线图

Fig. 11 Pressure contour at $t=0.005$ s

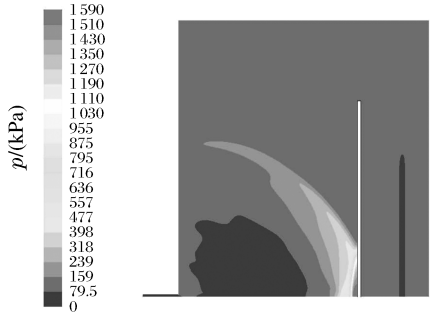


图 12 $t=0.01$ s 时压力等值线图

Fig. 12 Pressure contour at $t=0.01$ s

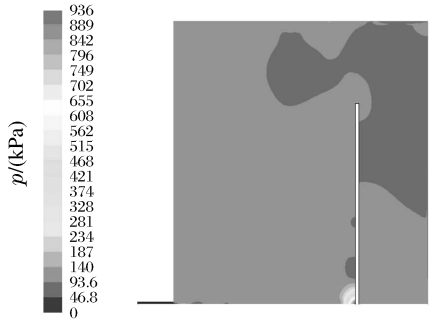


图 13 $t=0.1$ s 时压力等值线图

Fig. 13 Pressure contour at $t=0.1$ s

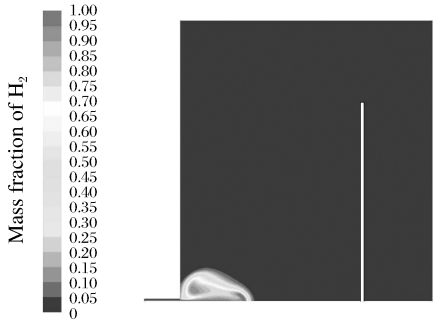


图 14 $t=0.005$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 14 Mass fraction contour of H_2 at $t=0.005$ s

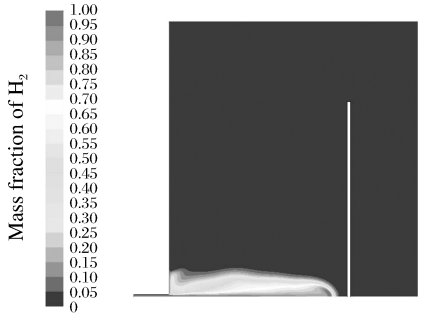


图 15 $t=0.01$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 15 Mass fraction contour of H_2 at $t=0.01$ s

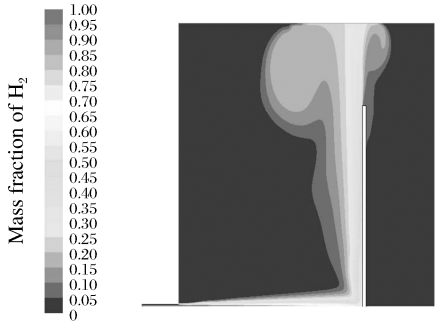


图 16 $t=0.1$ s 时氢气浓度等值线图

Fig. 16 Mass fraction contour of H_2 at $t=0.1$ s

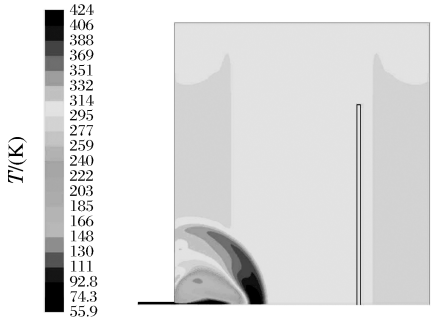


图 17 $t=0.005$ s 时温度等值线图

Fig. 17 Temperature contour at $t=0.005$ s

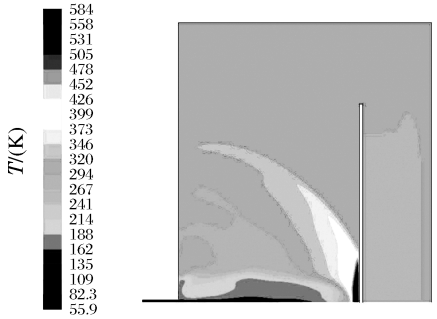


图 18 $t=0.01$ s 时温度等值线图

Fig. 18 Temperature contour at $t=0.01$ s

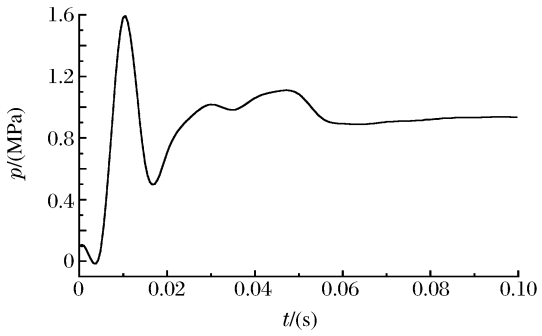


图 19　障碍物反射点处压力变化曲线

Fig. 19　Pressure history at the reflection point of an obstacle

3.3　物理爆炸冲击波衰减规律

为定量表示物理爆炸冲击波在外部流场中有无障碍物两种情况下在外部流场中各个方向的传播,现取以管道横截面中心为起点,与轴线所成的角度 α 分别为 0°、30°、60°、90° 4 条线上距离管口不同距离处在 0.1 s 时间内的最大超压数值,如表 1、表 2 所示。

从表 1 中可以看出,在无障碍物的情况下,距离管口 1 m 处出现 0.5 MPa 以上的超压,而且在外部流场中最大超压 Δp_{max} 随着与管口距离的增加而递减。在外部流场的大部分区域中,超压数值以及氢气质量分数均不能达到能够引发化学爆炸的程度,没有引起化学爆炸的危险。与管道中心线夹角在 30°范围内的超压值均超过 0.1 MPa,能够对人员造成死亡性伤害,并对建筑物造成严重的结构性破坏。但在与管道中心线夹角在 30°范围外超压值较低,仅可对人员及建筑物造成中等损害[6-7]。

在外部流场区域中设置障碍物的情况下,物理爆炸冲击波在接触到障碍物之后在障碍物正对管口处的较小范围内产生的超压可达 1.4 MPa 以上,并且在较大范围内发生反射,产生超过或接近 0.1 MPa的超压。由表 2 可以看出在外部流场中与管口不同偏角区域中不同距离上的最大超压 Δp_{max} 的数值没有明显差别,但各方向所具有的超压足以对人员及厂房设备等造成严重损害[8]。

在实际生产厂房中,高压氢气输运装置周围常有许多仪器设备,这些均可在氢气输运装置发生物理爆炸之后对爆炸冲击波产生反射。由于仪器设备实际形状比较复杂,易在外部流场中产生更复杂的影响。单纯物理爆炸的冲击波就可在相当大的范围内造成超压伤害,并可在多处形成能够引发化学爆炸的超压和高温,增大发生二次爆炸的可能性。

表 1　无障碍情况下最大超压 Δp_{max}

Table 1　Maximum of overpressure without obstacle　(Pa)

α/(°)	L/(m)				
	1	2	3	4	5
0	554 591	467 291	519 779	410 744	353 501
30	195 038	207 066	146 082	134 723	112 259
60	109 907	77 394	60 059	41 039	38 778
90	48 618	41 317	15 416	10 962	7 335

表 2　有障碍情况下最大超压 Δp_{max}

Table 2　Maximum of overpressure with obstacle　(Pa)

α/(°)	L/(m)				
	1	2	3	4	5
0	209 166	529 828	33 820	22 397	1 480 635
30	241 206	159 210	161 976	164 820	63 125
60	163 889	146 633	108 171	123 223	117 997
90	116 373	77 012	74 410	95 919	87 032

4　结　论

在高压氢气输运管道发生物理爆炸之后造成氢气泄漏的初期,高压(34 MPa)氢气从管道断裂横截面处以很高的速度喷射并伴随氢气组分扩散。在外部流场区域中无障碍的情况下,氢气的喷射扩散主要集中在与管道中心线夹角在 30°范围内的区域中,危险区域范围相对集中。在外部流场有障碍的情况下,由于障碍物的存在泄漏氢气所具有的高压及氢气组分在遇到障碍物的反射之后使冲击波产生的超

压以及氢气在较大范围内相对均匀地分布。由于氢气在空气中的最小点火能量为 0.019 mJ,在外部空间中大部分区域内处于氢气爆炸极限范围内的情况下,极易引发氢气爆炸,从而造成更大的破坏。

References:

[1] Hashimoto A, Matsuo A. Numerical Analysis of Gas Explosion Inside Two Rooms Connected by Ducts [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2007, 20(4-6): 455-461.

[2] Chernyshev A P, Lukyanchikov L A, Lyakhov N Z, et al. Physical-Chemical Model of Nanodiamand Formation at Explosion [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2007, 575(1-2): 72-74.

[3] Liu N S, Lu X Y, Zhuang L X. Numerical Study on Hydrogen Injection in Supersonic Flow [J]. Journal of China University of Science and Technology, 1999, 29(5): 551-559. (in Chinese)
刘难生,陆夕云,庄礼贤. 超声速气流中氢气燃料喷流的数值模拟研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 1999, 29(5): 551-559.

[4] Yang Z, Lai J B, Han J L. Study on Hazardous Area of Hole Leakage of Gas Pipelines [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(1): 156-159. (in Chinese)
杨 昭,赖建波,韩金丽. 天然气管道空口泄漏危险区域的研究 [J]. 天然气工业, 2006, 26(1): 156-159.

[5] Groethe M, Merilo E, Colton J, et al. Large-Scale Hydrogen Deflagrations and Detonations [J]. Int J Hydrogen Eng, 2007, 32(13): 2125-2133.

[6] Yu D M. Studies on the Major Source Risk Assessment and Fire Severity of Explosion [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 1996. (in Chinese)
宇德明. 重大危险源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, 1996.

[7] Yang Z H, Wang Z G, Tang C G, et al. Critical Estimation of the Internal Organ Injury in Human Being Subjected to Weak Blast Waves [J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(1): 83-88. (in Chinese)
杨志焕,王正国,唐承功,等. 弱冲击波对人员内脏损伤的危险性的估计 [J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 83-88.

[8] Lobato J, Canizares P, Rodriqo 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]. Int J Hydrogen Eng, 2006, 31(12): 1780-1790.

Study on the Physical Explosion Character and Ejection Effect of the High-Pressurized Hydrogen Transport Device

LI Wei, ZHANG Qi

(*State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: High-pressured hydrogen's ejection caused by the structural failure of transport device could result in overpressure and mass fraction within the explosion limits. External flow field characters, hydrogen jet pressure, and mass fraction in the field were numerically simulated by using physical and calculation model in case of external flow field with or without obstacle. Hazardous area after hydrogen explosion and effect of obstacle on preventing hydrogen leakage and diffusion were obtained. The drawn conclusion could be the reference for prevention and treatment of hydrogen explosion accidents.

Key words: high-pressurized hydrogen; transport device; physical explosion