

管道末端存在障碍物时的丙烷燃爆实验研究

陈国鑫*, 王正

中国石化安全工程研究院, 青岛 266071

* 通信作者, chengx.qday@sinopec.com

收稿日期: 2016-11-15

国家科技支撑计划课题(2015BAK37B03) 和国家自然科学基金项目(51574210) 联合资助

摘要 2013年11月22日发生的黄岛管道爆炸事故共造成62人死亡, 136人受伤。调查显示, 在排水管道内部存在多处混凝土栅栏障碍物, 油气在排水管道内聚集爆炸产生的超压和物体碎片是造成伤害的主要原因。为了定量探究障碍物对管道内油气燃爆破坏效应的影响, 本文搭建了长3 m、内径100 mm的油气管道燃爆测试装置, 在管道后半段可根据需要安置各类障碍物。在常温常压下以丙烷与空气的混合气为燃爆介质, 采用弱点火方式进行了燃爆试验, 研究了在不同障碍物阻塞率、数量和间距条件下管道内部的超压分布和变化。

关键词 丙烷; 爆炸; 超压; 障碍物

0 引言

随着我国经济建设发展, 城区地下管网包含了供水、排水、燃气、热力、电力、通信、广播电视、工业、油品运输等管线, 各管线交错分布难免存在交汇。由于腐蚀、人为等因素, 一旦油品管道破损泄漏进入市政管网, 在市政管网中挥发积聚, 遇到火源就可能引发火灾爆炸事故, 造成严重的人员伤亡和社会损害。黄岛11·22爆炸事故就是典型的输油管道泄漏引发的市政管道受限空间燃爆事故。近年来, 国内外的专家学者通过自建测试管道, 布局燃爆监测装置, 对不同点火能、气体类型和燃气浓度等条件下, 管道内的可燃气体火焰传播规律、压力变化等爆炸特性进行了大量实验研究^[1-9]。

调查发现, 在黄岛发生燃爆事故的排水暗渠内存在各种混凝土障碍物; 黄岛爆炸原油的可燃气组分的主要成分为丙烷。综合以上两点因素本文采用丙烷与空气的混合气, 通过搭建管道爆炸测试装置, 研究管道末端存在障碍物时对丙烷燃爆的影响。

1 实验系统

整个管道爆炸测试系统主要由点火器、真空泵、燃气源、动态采集系统及控制系统等组成, 如图1所示。管道总长3.0 m, 由两节1.5 m长的不锈钢材质子管道通过法兰连接, 子管道为套管结构, 外管外径168 mm、内径118 mm; 内管外径118 mm、内径100 mm, 耐压22 MPa。在管道首部中央位置连接电炉丝打火器, 电压为40 V; 管道尾部采用开口, 动态采集器采用TST6400, 采集器共有16个高速数据采集通道, 可实时采集压力、火焰、温度等传感器信号, 并进行数据的快速存储、处理与分析; 压力传感器采用压阻式, 量程1 MPa。

管道轴向方向上共开设10个传感器接口, 全部位于第二节子管道上, 各接口位置如图2所示, 分别距离管道首部160.0、175.0、190.0、202.5、220.0、230.0、247.5、260.0、275.0、290.0 cm, 可根据实验需要选择合适接口安装传感器。

引用格式: 陈国鑫, 王正. 管道末端存在障碍物时的丙烷燃爆实验研究. 石油科学通报, 2016, 03: 477-483

CHEN Guoxin, WANG Zheng. Experimental study of propane explosions with obstacles in the pipelines. Petroleum Science Bulletin, 2016, 03: 477-483. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.044

在第二节子管道上可安装不同物性参数的障碍物。在本文中障碍物主要采用圆柱结构，通过截面圆柱个数差异控制障碍物的阻塞率。图3为三种不同阻塞率的障碍物截面示意图，圆柱直径1.2 cm，分别由1、3、5根圆柱构成。图4为障碍物实物及卡槽结构示意图。圆柱采用焊接形式固定在与子管道内管尺寸相同的圆环上，障碍物圆环采用卡槽结构固定在子管道内管上。通过组合不同尺寸内管可以控制障碍物的间距和数量。

实验采用分压法进行配气作业，先将管道尾部端

面用法兰封闭，利用真空泵对管路进行抽真空，再根据所需丙烷气体体积浓度打开进气阀进行充气，之后关闭进气阀开启吸气阀，利用大气压把空气冲入管道，再利用循环系统将管内气体混合均匀，最后卸掉尾部法兰进行点火，采集压力数据。

2 实验结果与讨论

丙烷爆炸极限为 2.1%~9.5%，本文采用丙烷体积浓度 2.5%、0.1 MPa 常压为基础实验条件，在本

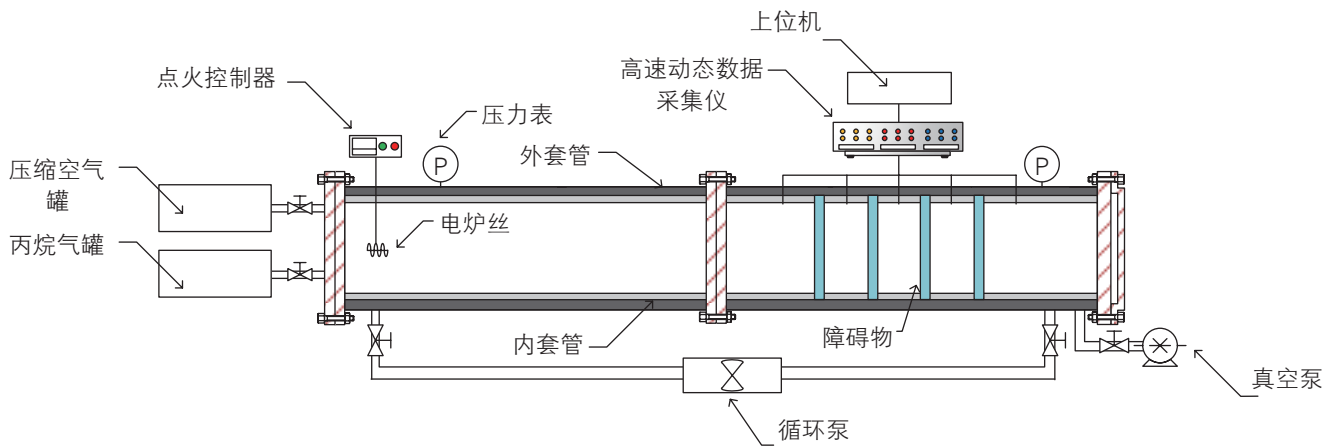


图1 实验系统示意图
Fig. 1 The experimental system schematic diagram

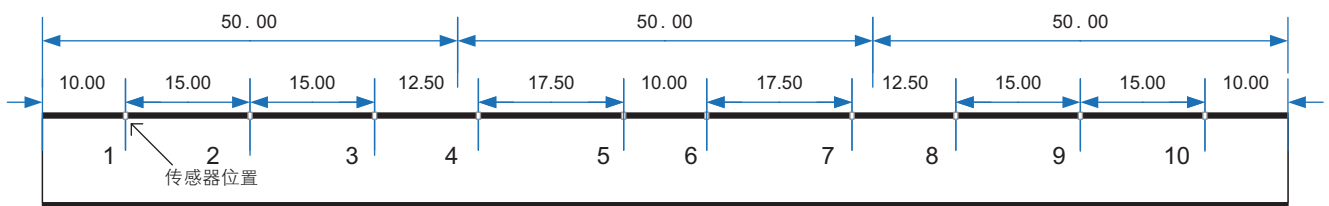


图2 轴向压力传感器接口示意图
Fig. 2 The axial distribution of pressure sensor

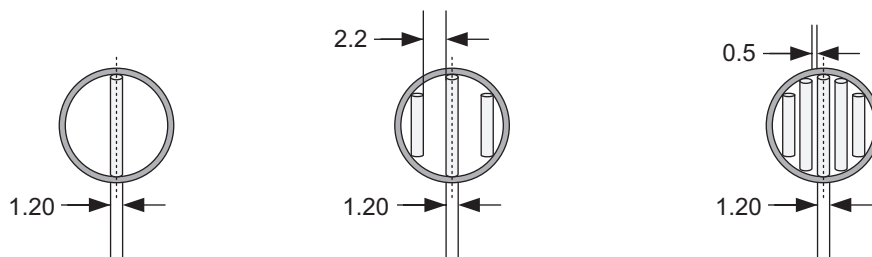


图3 障碍物截面示意图
Fig. 3 Obstacles cross section diagram

实验中选择 1、3、5、7、10 接口作为动态压力监测点，距离管道点火端距离分别为 160.0、190.0、220.0、247.5、290.0 cm。

2.1 障碍物阻塞率实验

如图 3 所示，利用圆柱个数可以改变障碍物的阻塞率。在该实验中，障碍物均匀分布在第二节子管道中，障碍物数量为 4 个，间距 30 cm，1、3、5 根圆柱的阻塞率分别为 15.3%、34.0%、62.1%，4 个障碍物分别处于 1、3、5、7、10 五个测点之间，如图 5 所示。

以障碍物阻塞率 34.0% 为例，各测点的超压-时间曲线如图 6 所示。从图中可以看出，测点 1、3、5、7、10 的曲线趋势一致，符合两波三区理论。丙烷-空气混合气被电炉丝点火后发生燃烧反应发出大量热量，使邻近的气体膨胀，温度上升，形成朝开口端传

播的前驱压力波，推动未燃混合气压缩，并向开口端移动。同时生成了靠自身反应传播的火焰，先燃烧的混合气放出的能量引燃邻近的未燃混合气，放出更多能量。以测点 3 为例，前驱压力波通过测点 3 后，测点 3 处的超压开始上升，由于燃烧反应一直持续，反应区持续发出压力波，压缩未燃区域的气体，另一方面随着燃烧反应的进行，其放出的热量通过传导与辐射方式加热未燃区的混合气，致使未燃区的气体压力和温度升高，随着未燃区的推进，测点 3 处的超压缓慢提高。当火焰阵面到达测点 3 时，在很短的时间内混合气燃烧速率达到极值，放出大量的热量，超压达到最大。之后随着反应区的推进，反应物逐渐消耗完毕，由于缺乏能量补充，测点 3 处的温度和超压逐渐下降。又因为反应区气体膨胀和压力波对未燃混合气的推动，大量未燃混合气从管道开口端溢出，残存气



图 4 障碍物实物及卡槽结构示意图
Fig. 4 Obstacles and card slot structure diagram

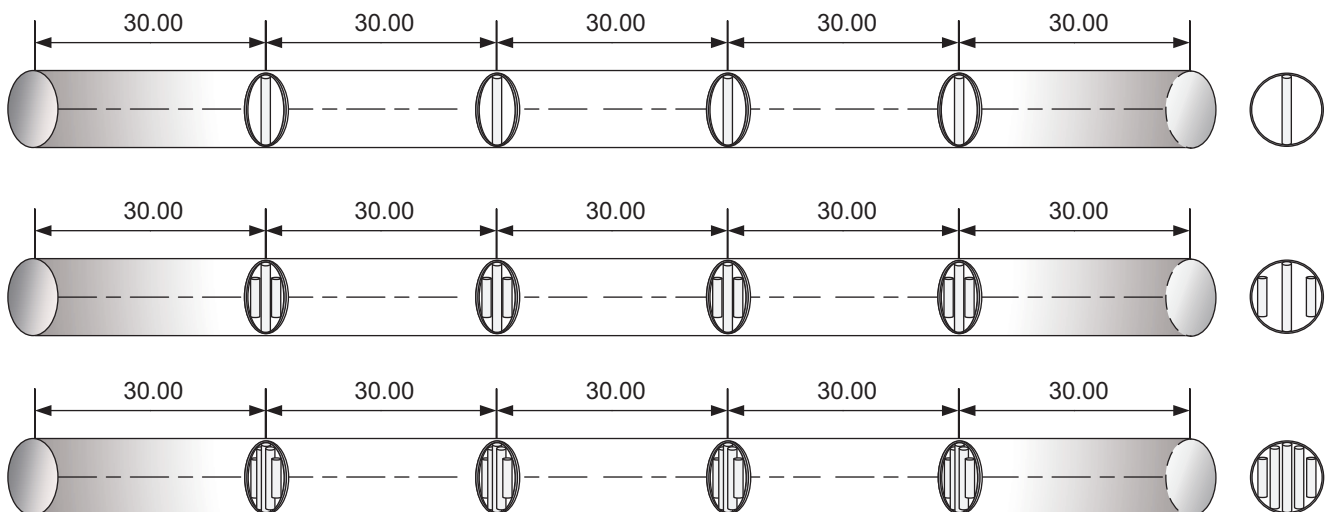


图 5 障碍物阻塞率布局
Fig. 5 The layout of obstacle blocking rate

体的燃烧无法补充爆炸传播过程中的能量损耗,进一步导致温度和超压下降并形成负压。此时由于管道开口端处于常压,在压差作用下,空气从开口端涌入管内,管内压力上升回到正压,又造成管内压力高于外部压力,管内气体又经由开口端流出管外,如此反复,测点3处的超压值出现小幅度震荡,超压极值越来越小。

管道末端不同障碍物阻塞率下的测点超压如图7所示。从图中可以看出,障碍物对管道内的超压发展具有重要影响。随着障碍物阻塞率提高,各测点的超

压值逐渐增大,但超压与阻塞率呈非线性关系,在15.3%~34.0%阻塞率下,超压变化明显。

由于管道末端障碍物的存在,火焰经过时发生褶皱、畸变,成大小不同的漏斗状,增大了燃烧接触面积和速率,导致大量能量释放,致使火焰加速和超压增大。随着管道阻塞率的增加,这种畸变和扰动更为明显,造成超压进一步的增大。

2.2 障碍物间距实验

在该实验中,障碍物阻塞率统一为34.0%,数量

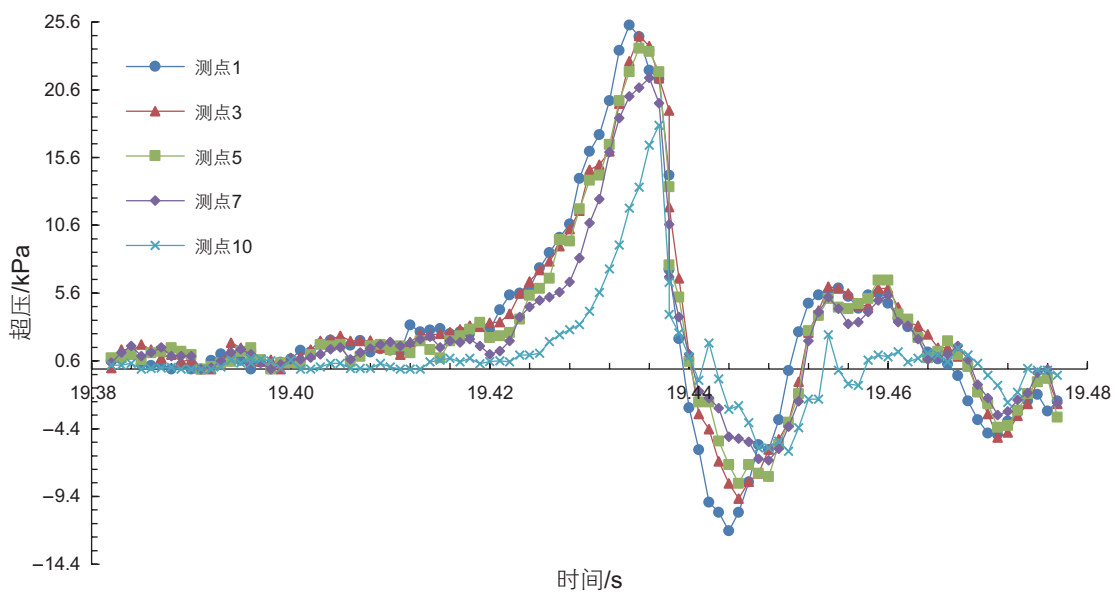


图6 阻塞率34%下的各测点超压—时间曲线

Fig. 6 The overpressure - time curve(BR, 34%)

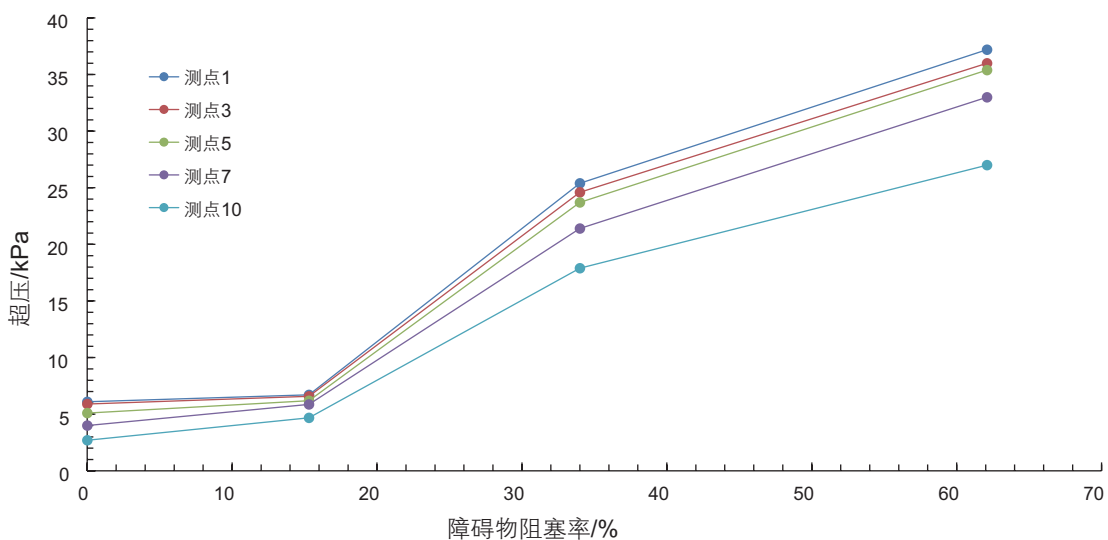


图7 不同障碍物阻塞率下的测点超压值

Fig. 7 The overpressure of different obstacle BR

均为4个，间距分别为20 cm、30 cm、40 cm，以管道中心为参考点对称分布，如图8所示。

管道末端不同障碍物间距下的测点超压如图9所示。从图中可以看出，障碍物对管道内的超压发展影响不是十分明显，随着间距增大超压逐渐减小，呈非线性关系。间距从20 cm扩展到30 cm的超压下降幅度大于间距从30 cm扩展到40 cm。这是因为当障碍物集中放置时，火焰通过障碍物时湍流强度大幅度提升，有效促进燃烧反应释放大量能量，提高超压。而当障碍物疏松放置时，由于间距增大，湍流强度不能在极短的时间和距离内产生叠加，降低了能量利用率，

相比集中放置对超压的提升作用较弱。

2.3 障碍物数量实验

在该实验中，障碍物阻塞率统一为34.0%，间距30 cm，数量分别为4、2、1、0，以管道中心为参考点对称分布，示意图如图10所示

管道末端不同障碍物数量下的测点超压如图11所示。从图中可以看出，随着障碍物数量的增加，超压逐渐增大。这主要是由于障碍物数量越多，对管道内的火焰传播扰动越明显，释放的能量越多。

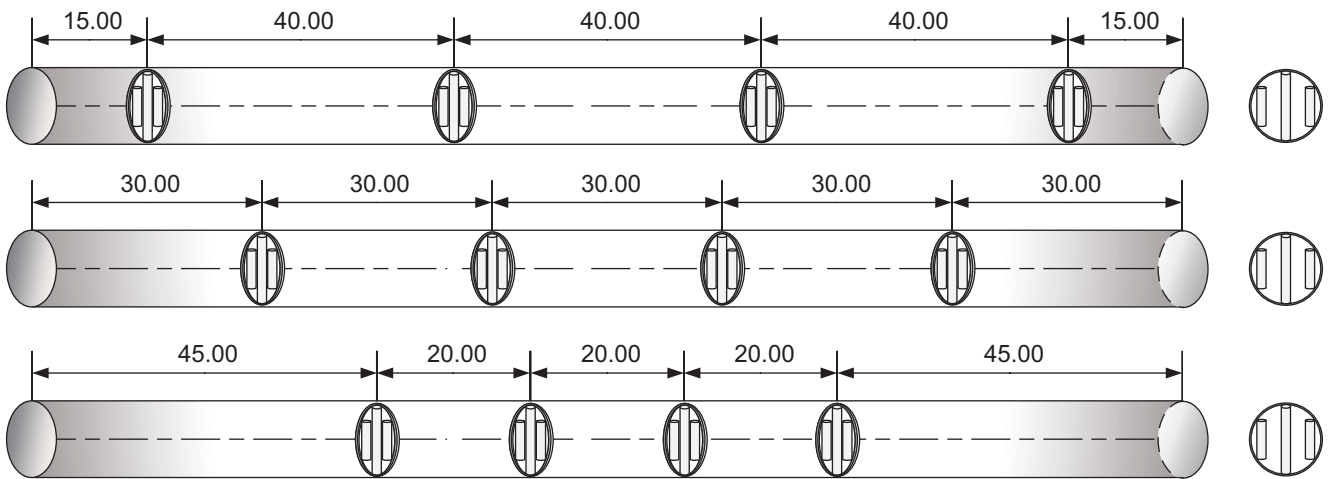


图8 障碍物间距布局

Fig. 8 The layout of obstacle spacing

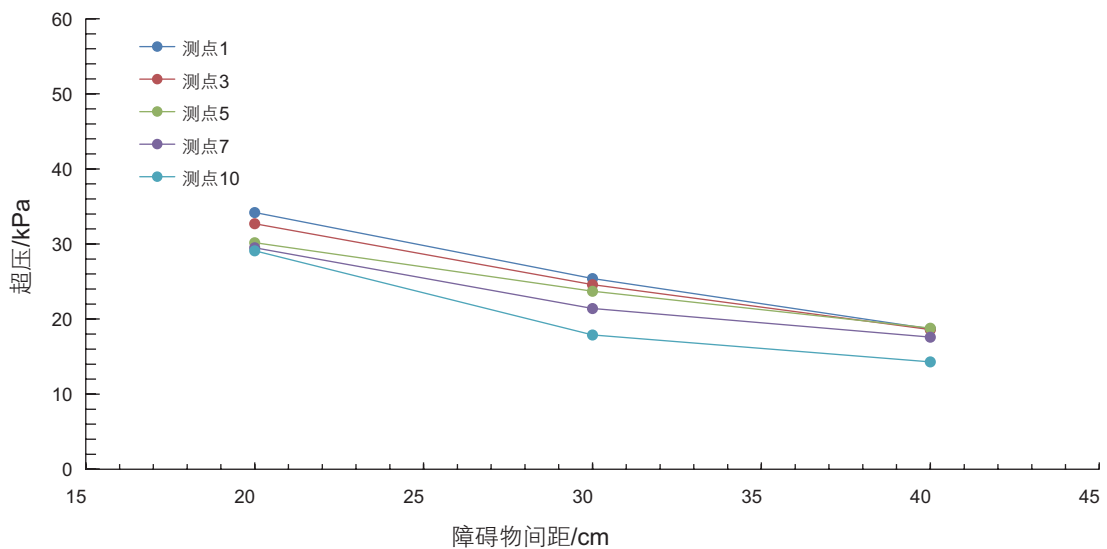


图9 不同障碍物间距下的测点超压值

Fig. 9 The overpressure of different obstacle spacing

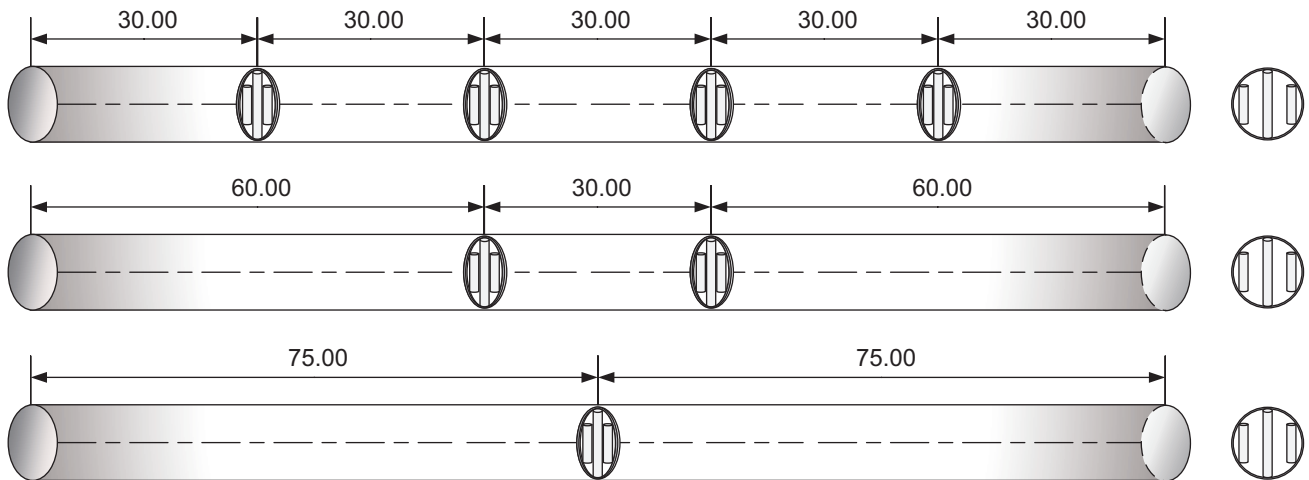


图 10 障碍物数量布局

Fig. 10 The layout of obstacle quantity

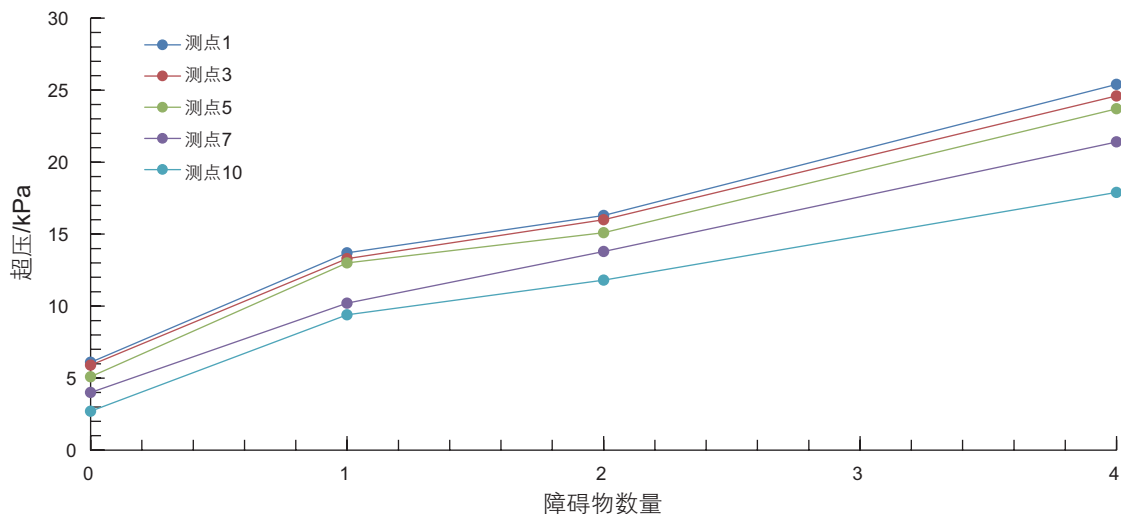


图 11 不同障碍物数量下的测点超压值

Fig. 11 The overpressure of different obstacle quantity

3 结论

通过在受限管道末端安置不同阻塞率、间距、数量的障碍物，研究了障碍物对管道内丙烷—空气混合气爆炸的超压影响，结论如下：

(1)障碍物阻塞率对管道内的超压具有重要影响，

障碍物在 15.3%~34.0% 阻塞率区间内，超压变化最为明显；

(2)障碍物间距对管道内的超压影响不明显。通过缩短障碍物间距，集中放置，能在一定程度上提高管道内的超压；

(3)障碍物数量对管道内的超压具有一定影响，增设障碍物，可以提高管道内的超压。

参考文献

- [1] VAN WINGERDEN K, BJERKETVEDT D, BAKKE J R. Detonations in pipes and in the open[C]. Paper in Proceedings of the Petro-Chemical Congress, 1999, 15.
- [2] 林柏泉, 张仁贵. 瓦斯爆炸过程中火焰传播规律及其加速机理的研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(1): 56-59. [LIN B Q, ZHANG R G. Research on accelerating mechanism and flame transmission in gas explosion[J]. Journal Of China Coal Soc Iety, 1999, 24(1): 56-59.]
- [3] IBRAHIM S S, MASRI A R. The effects of obstructions on overpressure resulting from premixed flame deflagration[J]. Journal of Loss

- Prevention in the Process Industries, 2001, 14(3): 213-221.
- [4] 谢波, 范宝春. 挡板障碍物加速火焰传播及其超压变化的实验研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(6): 627-631. [XIE B, FAN B C. Experimental study of flame acceleration and overpressure induced by baffle-obstacle[J], 2002, 27(6): 627-631.]
- [5] 尉存娟. 水平管道内甲烷-空气预混气体爆炸过程研究[D]. 太原: 中北大学, 2010. [WEI C J. Research of explosion process on premix gas of methane-air in horizontal pipeline[D]. Taiyuan: North University of China, 2010.]
- [6] 高玉刚. 管道中可燃气体燃爆特性研究[D]. 安徽: 安徽理工大学, 2011. [GAO Y G. Study on burning explosion characteristics of flammable gas in tube[D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2010.]
- [7] FAIRWEATHER M, HARGRAVE G K, IBRAHIM S S, et al. Studies of premixed flame propagation in explosion tubes [J]. Combustion and Flame, 1999, 116(4): 504-518.
- [8] 欧益宏, 王冬, 蒋新生, 等. 狭长密闭空间油气爆炸燃烧数值研究[J]. 后勤工程学院学报, 2011, 27(3): 25-29. [OU Y H, WANG D, JIANG X S et al. Numerical simulation research on fuel-air mixture explosion combustion in closed narrow-long space[J]. Journal Of Logistical Engineering University, 1999, 116(4): 504-518.]
- [9] 陈汉林, 杜扬, 韩宇澄. 狭长密闭空间中油气爆炸的实验研究[J]. 中国储运, 2011, (3): 100-101. [CHEN H L, DU Y, HAN Y C. Long and narrow confined spaces in the oil and gas explosion experimental research [J]. China Storage & Transport, 2011(3):100-101.]

Experimental study of propane explosions with obstacles in the pipelines

CHEN Guoxin, WANG Zheng

SINOPEC Research Institute of Safety Engineering, Qingdao 266071, China

Abstract On November 22th 2013, in Qingdao, the Huangdao, pipeline exploded. In this accident 62 people died and 136 people were injured. The survey shows that the drainage pipe explosion overpressure and object debris were the main reasons for the huge damage. There are many concrete fence obstacles in the pipelines that may increase the explosion overpressure. In order to study the effect of obstacles on pipeline explosion, a 3m-long, 100mm-diameter device was built for oil and gas pipelines explosion tests. The device consists of 2 short pipelines and all kinds of obstacles can be installed in the second one. In the experiments weak ignition was used to ignite the mixtures of propane and air. The distribution and variation of overpressure in the pipeline were investigated with obstacles at different blocking rates, quantities and spacing.

Keywords propane; explosion; overpressure; obstacle

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2016.03.044

(编辑 马桂霞)