DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0729-06

T 型分支管道对油气爆炸强度的影响*

杜 扬,李国庆,吴松林,张培理,周 毅,齐 圣,王世茂
(后勤工程学院供油系,重庆 401311)

摘要:为了研究 T 型分支结构对管道内油气混合物爆炸强度的影响规律,测试了不同初始体积分数条件下直管和具有 T 型分支管中爆炸波超压值,并利用有机玻璃透明管道对火焰传播规律进行了可视化研究。得到以下结论:(1)T 型分支管道对油气爆炸有强化作用,在油气体积分数为 1.2%至 1.6%范围内表现最明显;(2)T 型分支管道对油气爆炸的强化作用受管道横截面突扩和障碍物扰动以及波的反射、绕射三方面的影响;(3)火焰经过分支管道时,火焰阵面发生极大的扭曲,火焰表面积显著增大,燃烧速率增大,增强了热量和活性物质的输运速率,提高了爆炸波的强度;(4)在 T 型分支管道附近,油气爆炸的压力突变增强,是由压力波反射、绕射引起的温升效应和压力波引起湍流强度增强共同导致。

关键词:爆炸力学;爆炸强度;T 型分支管道;油气混合物;爆炸波;火焰
中图分类号:O381;X932 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在市政燃气管网、油料洞库、煤矿坑道、交通隧道等受限空间内,各种可燃性气体爆炸事故时有发生,给人们的人身和财产安全带来了巨大的损害,如 2013 年青岛“11·22”输油管道爆炸事故造成 62 人遇难,136 人受伤,经济损失高达 7.5 亿元。大量的实际受限空间往往具有 Z 型、L 型、T 型等复杂的几何结构。以往的研究表明[1-7]:可燃气体的爆炸超压、火焰传播速度、湍流强度等重要参数受这些特殊几何结构影响很大。因此,近年来许多学者开始重视不同几何结构对受限空间内可燃气体燃烧爆炸特性影响的研究。王汉良等[8]研究了丙烷和空气爆轰波通过 L 型管道时的传播特性,发现 L 型管道对爆燃和爆轰火焰有明显的加速作用;杨志等[9]研究了丙烷-空气混合气体爆炸通过 2 个垂直 Z 型管道的传播规律,结果表明:稳定爆轰波和非稳定爆轰波的火焰传播速度具有差异,呈现出不确定性;林柏泉等[10]初步研究了瓦斯爆炸在 T 形管道中的传播规律,研究表明管道分岔对瓦斯爆炸的火焰传播速度和爆炸波超压值都有增强作用。以上研究中,尽管对可燃气体在复杂结构中的爆炸传播特性有大量分析,并得出了相关结论,但是没有对油气这种特殊混合气体在 T 型分支管道中的爆炸传播规律进行研究。这一特性的研究,对油气爆炸灾害的防治具有重大意义。鉴于此,本文中利用实验室分支管道模拟实验台架,利用汽油-空气混合气作为燃烧反应介质,重点研究 T 型分支管道对管道内油气爆炸传播过程中的爆炸波超压值和火焰传播形态的影响。

1 实验系统与方案

1.1 实验系统

实验系统见图 1,主要由温度采集系统、图像采集系统、油气体积分数测试系统、压力动态采集系统、油气雾化系统、气体循环装置、点火系统、传感器标定系统等组成。采用动态数据采集分析系统对受限空间内承受的压力进行采集和分析。压力传感器采用 CYG0401 压阻式传感器,压力数据采集系统采用 TST3125 动态测试分析仪,采集分析软件为 TOPVIEW2000,测试频率为100~300 kHz,测试压力量程为 0~2 MPa。高速摄影仪的型号为 FASTCAM-ultima 512,拍摄速度为 1 000 s^{-1}。

* **收稿日期**:2014-03-07;**修回日期**:2014-06-27
基金项目:国家自然科学基金项目(51276195);重庆市科委重点攻关项目(cstc2014yykfB90001);
油气火灾爆炸成灾突变机理与控制应用基础研究项目(BX211J107)
第一作者:杜 扬(1958—),男,博士,教授,博士生导师;**通讯作者**:李国庆,boyueshe@sina.com。

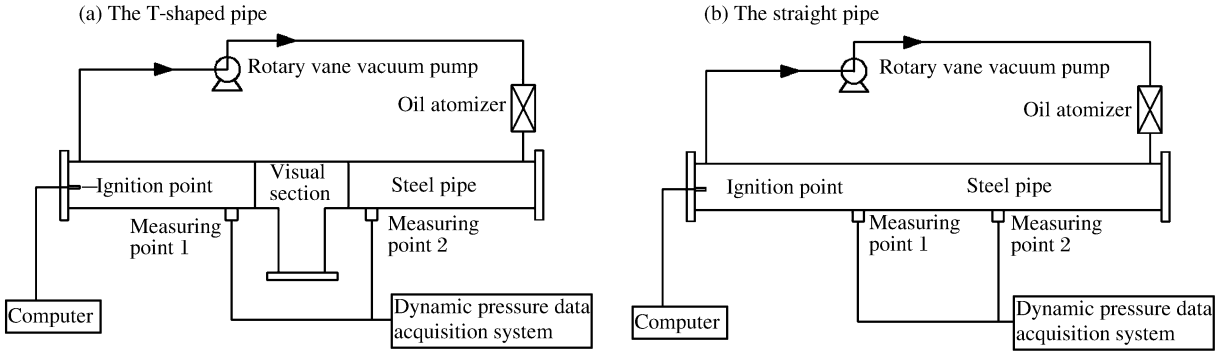

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

1.2 实验方案

在初始压力、温度、湿度、点火能量相同的情况下，在内径为 100 mm、长度为 6 000 mm 的钢制管道中，依次利用初始体积分数为 0.9%、1.0%、1.1%、1.2%、1.3%、1.4%、1.5%、1.6%、1.7%、1.8%的油气混合物进行油气爆炸实验，实验装置如图 1(a)所示。采取端部点火的方式，在距点火端 3 000 mm 处有一个与主管道等截面的 T 型分支管道，深度为 550 mm。在分支管道前 500 mm(测点 1)和分支管道后 500 mm(测点 2)处分别安装了一个压力传感器，用来测量分支管道前后爆炸波超压值。

同时，为了能更好地体现分支管道对爆炸的强化作用，取内径为 100 mm、长度为 6 000 mm 的等直径直管，进行相同初始条件下的爆炸对比实验，实验装置见图 1(b)。在与图 1(a)中实验台架相同的位置测量爆炸波超压值，并进行比较。另外，为了直观分析分支管道内火焰的传播形式，加工了一段长为 500 mm、横截面为 186 mm×186 mm 的方形 T 型有机玻璃激波管，用法兰将它接入总长为 5 500 mm 的等截面钢制激波管上，在管道中进行油气爆炸实验，利用高速摄影仪拍摄火焰传播经过分支管道过程中火焰阵面的变化形态。为了保证气密性，在法兰盘结合处使用密封圈加强管道连接处的密封性。

2 实验结果

2.1 T 型分支管道对爆炸波超压值的强化作用

为确保实验结果准确，对每一工况都进行 10 组重复实验，实验可重复性较好。实验数据分析中，选取爆炸波峰值进行重点分析，根据对 2 测点多次测量所得爆炸波峰值取算术平均值，绘制不同初始油气体积分数下具有 T 型分支结构管道和对比直管道中爆炸波超压变化曲线，如图 2 所示。

由图 2(a)可知：在测点 1 处，油气爆炸还未传播至 T 型分支管道，油气爆炸产生的爆炸波超压值在具有 T 型结构的管道内和对比直管内具有相似的变化规律。当初始油气体积分数从 0.9%变化至 1.1%时，两对比实验测得的爆炸波超压值几乎相同，并且都随体积分数增大而增大；当油气体积分数增大至 1.2%时，爆炸波超压值开始随体积分数增大呈下降趋势，直到体积分数为 1.3%时停止；随后爆炸波超压值又恢复增大的趋势，直到体积分数达 1.6%时达到最大值，之后又出现递减趋势。两组对比实验中，在测点 1 处所得数据差别很小，在体积分数为 1.7%时差距最大为 50 kPa。由此可见，油气爆炸没有经过分支管道时，爆炸波超压值受分支管道的影响很小。

由图 2(b)可知：在测点 2 处，油气爆炸传播已经经过了 T 型分支管道，在油气体积分数从 0.9%变化至 1.1%的过程中，两组实验中测点 2 的爆炸波超压值都随油气体积分数增大而增大，并且数值差距不大，在油气体积分数为 1.1%时达到最大差值 50 kPa；当油气体积分数在 1.2%到 1.3%之间时，两组实验中测点 2 的数值都随油气体积分数增大而降低，并且具有 T 型分支管道的主管道内测点 2 数值比无分支管道的直管道中测点 2 数值下降慢，而且数值差距也随体积分数增大而变大，在油气体积分数为 1.3%时达到最大差值 200 kPa；当油气体积分数超过 1.3%后，具有 T 型分支管道的主管道内测点 2 数值变化较慢，直到油气体积分数超过 1.7%后，爆炸波超压值急剧下降，而无 T 型分支管道的直管道内

测点 2 的数值在油气体积分数为1.3%～1.6%时递增较明显，直到油气体积分数超过 1.6%后发生急剧下降。在油气体积分数变化的整个过程中，可以直观地看到在各种初始油气体积分数下，具有 T 型分支管道的主管道内测点 2 处的爆炸波超压值明显比直管中相同测点的爆炸波超压值大。由此可见，分支管道对管道内油气爆炸产生的爆炸波具有强化作用。

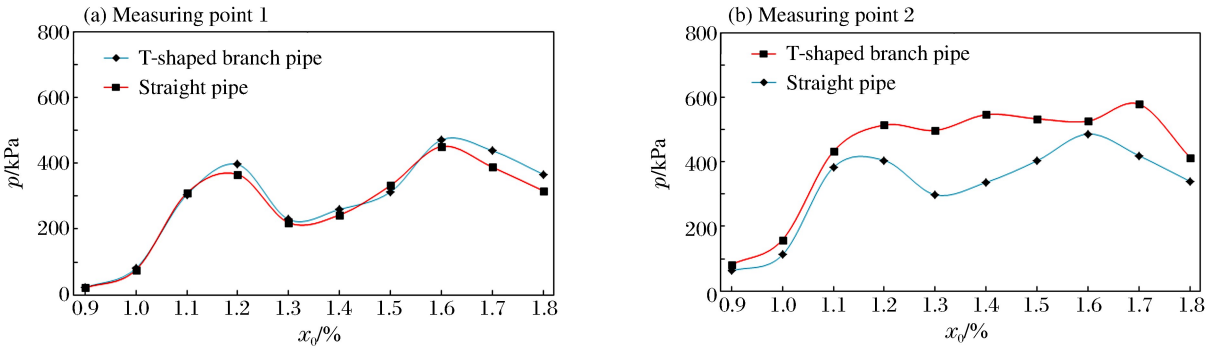

图 2　不同测点爆炸波超压值随油气初始体积分数的变化

Fig. 2 Overpressure values of different measuring points varied with initial volume fraction of oilgas

2.2　不同初始油气体积分数下，T 型分支管道对爆炸超压值突变的影响

由 2.1 节已知，T 型分支管道对油气爆炸具有强化作用，在此基础上进一步分析不同初始油气体积分数对 T 型分支管道内油气爆炸的强化程度。图 3 为具有 T 型分支管道的管道内测点 1、2 的爆炸波超压值及两测点压力差随初始油气体积分数变化的关系曲线。

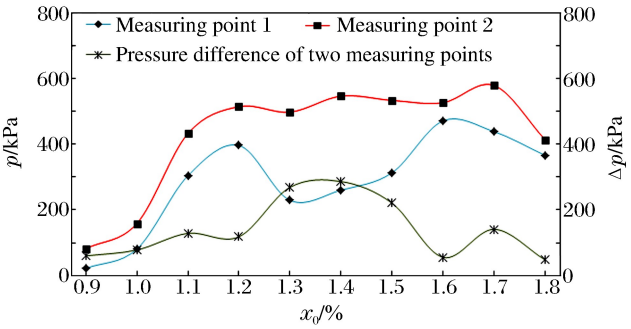

图 3　具有 T 型分支管道的管道内 2 测点的爆炸波超压值及压力差随油气初始体积分数的变化

Fig. 3 Overpressure values of two measuring points in the T-shaped branch pipe and their pressure difference varied with initial volume fraction of oilgas

从图 3 可知：在不同初始油气体积分数下，T 型分支管道后测点 2 所得可燃混合气体非稳定爆轰波压力都比分支管道前测点 1 的数据有很大程度的提高。从图 3 中测点 1、2 压力差关系曲线看出：在混合油气的体积分数从 0.9%增长到 1.1%的过程中，测点 1、2 的压力差呈平缓上升趋势；在油气体积分数从 1.1%增大到 1.4%的过程中，测点 1、2 的压力差随油气体积分数增大急剧上升，从 118 kPa 增加到 286 kPa，增长幅度为 142%；当油气体积分数超过 1.4%时，压力差急剧下降，直到油气体积分数为 1.6%时再一次上升，并于体积分数 1.7%处停止，之后急剧下降。由此可见，在低油气体积分数（低于 1.2%）和高油气体积分数（大于 1.6%）的条件下，T 型分支管道对爆炸波的强化作用不是很明显；在中间段油气体积分数（1.2%～1.6%）的条件下，T 型分支管道对爆炸波的强化作用较明显，整个变化过程呈现两侧平缓、中间凸起的驼峰状趋势。

3　机理分析

3.1　分支管道对爆炸波强化作用的可视化分析

由 2.1 节的分析可知，T 型分支管道对爆炸波具有强化作用。由管道封闭端弱点火引起的油气爆炸在未到达分支管道之前的传播特性与直管道中相似。当火焰传播接近分支管道口时（如图 4 所示），由于有旁接分支管道，管道的横截面扩大，这部分管道可以视为面积突扩管。同时，由于 A、C 这 2 个尖角直接嵌入流场中，可将 AB 和 CD 这 2 个壁面视为流场障碍，A、C 可以视为扰动源。因此，可以从面积突扩和障碍物扰动 2 方面来分析分支管道对爆炸的强化作用。为了直观地观测爆炸火焰经过分支管

道的变化形态，加工了一段可视化管道，利用高速摄影仪记录火焰经过分支管道的全过程，选取其中具有代表性的图片(图 5)进行分析。

首先，在分支管道口部，由于管道横截面积突扩，导致流场湍流度增大，进而引起燃烧速率和火焰传播速度增大[11-14]。当气流经过 A 点和 C 点时，由于受 2 个尖点的扰动作用，气流发生分离，产生气体漩涡，并在分离区产生涡流。另外，扰动边界使主流区气流产生分割，并诱导其进入分支管道 T2 中(如图 4 所示)，对 T2 管道中的未燃气体进行快速预热，使其产生爆炸，进一步加强了流场湍流度。由于湍流度的增强，增大了未燃气体和已燃气体的化学反应速率，进而提高爆炸的强度。

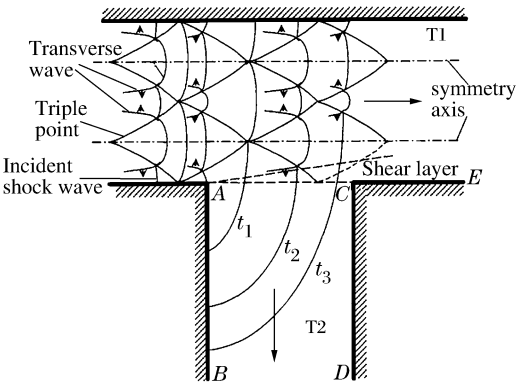

图 4 绕射区波系演化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of diffraction of waves

其次，由图 5 可看出：分支管道处，火焰阵面产生皱褶弯曲变形，气体燃烧火焰面增大，使燃烧反应过程中活性物质和热量的输运速率增大，从而导致火焰传播速度增大，如图 5(a)～(c)所示。随着火焰传播速度的增大，火焰阵面褶皱弯曲更明显，最终形成形态扭曲的火焰阵面，使燃烧速率进一步增大，见图 5(d)。燃烧速率增大促使爆炸产生的压缩波强度进一步增大，同时前驱冲击波对火焰前未燃气体进行更强烈地压缩和加热，产生强扰动，使流场梯度进一步增大，提高了燃烧速率和湍流动能。由此形成了燃烧过程和气体流动的正反馈激励，使爆炸过程中释热速率、火焰传播速度和爆炸波强度迅速增大。

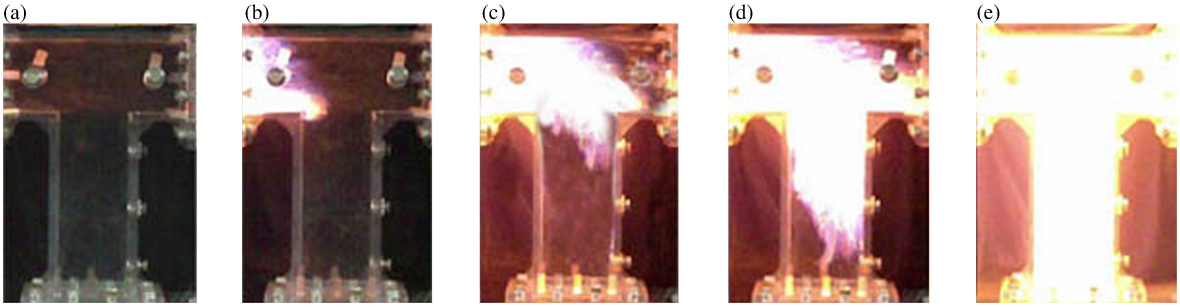

图 5 有机玻璃管道可视化照片

Fig. 5 Pictures by a high-speed camera in the organic glass pipeline

3.2 分支管道中波的绕射和反射对爆炸强度增强的机理分析

T 型管道对管道内油气爆炸产生的压力波强化作用，也表现在 T 型管道处激波的绕射和反射作用。这种波的反射和绕射是一个很复杂的过程，而且爆炸波的增强与在分支管道口这种复杂的波形也有一定关系。在研究爆轰波的过程中，定义爆轰波(或横波)模数为 $n=2W/Z$，其中 W 为激波管宽度，Z 为胞格宽度。为了便于分析，取模数为 4 的三波结构进行分析。由此做出管道中绕射区波系演化图(图 4)和 T2 段中激波的反射图(图 6)。由之前的研究知道，横波是气相爆轰波阵面结构的一个重要特征，马赫杆和入射激波是前导激波，而横波是反射冲击波，横波不是定常波，它依靠与壁面或与其相反方向运动的其他横波相互碰撞，循环性地恢复，持续存在。

激波在 T1 段从左向右运动过程中，经过拐角点 A 时，在 A 点产生的稀疏波作用下，马赫杆发生绕射，并进入 T2 段，使波阵面弯曲。同时，T1 和 T2 段中的激波波阵面一起向前运动，t_3 时刻形成图 4 中的波阵面。当前驱激波传至尖点 C 处时，C 点可视为流场障

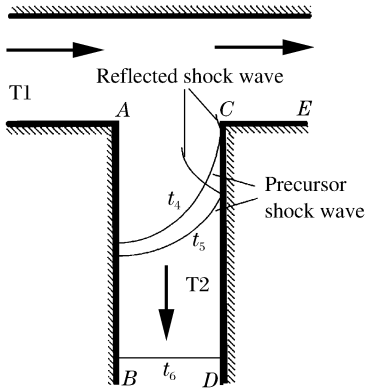

图 6 T2 段中激波的反射示意图

Fig. 6 Schematic diagram of reflection of waves in the T2 pipe

碍，在 t_4 时刻前驱激波在 CD 边发生碰撞，产生波的反射。由于波的反射作用，造成向后传播的压力波系形成多道后传压力波，并在分支管道封闭端 AB 边界也发生反射，进而导致爆炸产生的前传和反射压力波不断聚集、叠加，使波后未燃气体的压力和温度迅速升高，增强了燃烧化学反应速率，同时也会引起剧烈的流场扰动，形成较大的湍流度，最终提高了爆炸强度。

3.3　油气体积分数对 T 型分支管道爆炸强度的影响分析

由 2.2 节可知：初始油气体积分数低于 1.2%时，油气体积分数对分支管道内油气爆炸强度影响较小，而体积分数为 1.2%～1.6%时，油气体积分数对分支管道内油气爆炸强度影响较大，体积分数约为 1.4%时影响最大，但油气体积分数超过 1.6%时，影响又变小。这是因为实验过程中，管道内实际供应的空气量与燃烧需要的理论空气量不完全相等。管道内油气体积分数较低时，由于燃烧反应所需理论空气量小于管道内实际空气量，管道内空气富余量大，在空气的冷却作用下，燃烧产生的热量散失较快，活化中心的销毁数增大，而产生数减少，导致火焰的蔓延受到阻碍，降低了爆炸的强度，所以油气体积分数较低时 T 型管道对爆炸的强化作用不明显。管道内油气体积分数较大时，燃烧反应所需理论空气量大于管道内实际空气量，燃烧反应不完全，空气中的氧气已经耗尽，但管道内油气有剩余，过量的油气也有冷却作用，对火焰的蔓延也有不良影响，不利于体现出 T 型管道对爆炸强度的增强作用。当管道内油气与空气中氧气的配比基本符合化学反应方程式中的当量关系，油气几乎被全部氧化，燃烧反应较充分，放出的热量足够大，能进一步支持燃烧爆炸，使管道内爆炸强度增大幅度明显。

4　结　论

(1)T 型分支管道对管道内油气爆炸产生的爆炸波强度有强化的作用，在油气体积分数为 1.2%～1.6%的范围内表现得最明显。(2)T 分支管道对油气爆炸的强化作用可以从管道横截面突扩和障碍物扰动以及波的反射和绕射 3 个方面的机理进行分析。(3)通过可视化分析，在分支管道的扰动作用下，火焰阵面发生极大的扭曲，火焰表面积显著增大，导致燃烧速率增大，增强了热量和活性物质的输运速率，提高了爆炸波的强度。(4)在 T 型分支管道附近，油气爆炸的压力波突变增强，既是因为压力波反射、绕射引起的温升效应，也是由于压力波引起湍流强度增强而导致。

参考文献：

[1] 蒋新生，杜扬，袁占国，等. 局部扰动对主坑道爆炸波发展的数值模拟与实验研究[J]. 安全与环境学报，2005，5(5)：19-23.
Jiang Xin-sheng, Du Yang, Yuan Zhan-guo, et al. Experimental and numerical simulated study of explosive waves expansion by local disturbance in main tunnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2005,5(5):19-23.

[2] Park D J, Lee Y S, Green A R. Experiments on the effects of multiple obstacles in vented explosion chambers[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008,153(1/2):340-350.

[3] Blanchard R, Arndt D, Grätz R, et al. Explosions in closed pipes containing baffles and 90 degree bends[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010,23(2):253-259.

[4] Zhang Pei-li , Du Yang, Zhou Yi, et al. Explosions of gasoline-air mixture in the tunnels containing branch configuration[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1279-1284.

[5] Vasil′ev A A, Trotsyuk A V. Experimental investigation and numerical simulation of an expanding multifront detonation wave[J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2003,39(1):80-90.

[6] Thomas G, Oakley G, Bambrey R. An experimental study of flame acceleration and an experimental study of flame acceleration and deflagration to detonation transition in representative process piping[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2010,88(2):75-90.

[7] Ciccarelli G, Dorofeev S. Flame acceleration and transition to detonation in ducts[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008,34(4):499-550.

[8] 王汉良，周凯元，夏昌敬. 气体爆轰波在弯曲管道中传播特性的实验研究[J]. 火灾科学，2001，10(4)：209-212.
Wang Han-liang, Zhou Kai-yuan, Xia Chang-jing. Experimental studies of the propagation of detonation waves

through the bends[J]. Fire Safety Science, 2001,10(4):209-212.

[9] 杨志,周凯元,谢立军,等. Z 型管道中气体火焰传播规律的实验研究[J]. 火灾科学,2006,15(3):111-115.
Yang Zhi, Zhou Kai-yuan, Xie Li-jun, et al. Experimental study of flame transition in the Z-type tube[J]. Fire Safety Science, 2006,15(3):111-115.

[10] 林柏泉,叶青,翟成,等. 瓦斯爆炸在分岔管道中的传播规律及分析[J]. 煤炭学报,2008,33(2):136-139.
Lin Bai-quan, Ye Qing, Zhai Cheng, et al. The propagation rule of methane explosion in bifurcation duct[J]. Journal of China Coal Society, 2008,33(2):136-139.

[11] 戴林超,赵彩虹,刘桢,等. 管道内瓦斯爆炸传播规律的数值模拟研究[J]. 矿业工程研究,2011,26(1):31-34.
Dai Lin-chao, Zhao Cai-hong, Liu Zhen, et al. Numerical simulation study of gas explosion propagation law in the pipe[J]. Mineral Engineering Research, 2011,26(1):31-34

[12] 尤明伟,蒋军成,喻源,等. 不同管长条件下连通容器预混气体泄爆实验[J]. 化工学报,2011,62(10):2969-2973.
You Ming-wei, Jiang Jun-cheng, Yu Yuan, et al. Experimental premixed flammable gas explosion venting in linked vessels with different pipe length[J]. CIESC Journal, 2011,62(10):2969-2973.

[13] 贾智伟,景国勋,程磊,等. 巷道截面积突变情况下瓦斯爆炸冲击波传播规律的研究[J]. 中国安全科学学报,2007,17(12):92-94.
Jia Zhi-wei, Jing Guo-xun, Cheng Lei, et al. Study on propagation rules about gas explosion shock wave in the laneway with abrupt change of sectional area[J]. China Safety science Journal, 2007,17(12):92-94.

[14] 秦涧. 变直径管及弯管对瓦斯爆炸的影响研究[D]. 太原:中北大学,2009:32-39.

Explosion intensity of gasoline-air mixture in the pipeline containing a T-shaped branch pipe

Du Yang, Li Guo-qing, Wu Song-lin, Zhang Pei-li,
Zhou Yi, Qi Sheng, Wang Shi-mao
(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: To research the influence of the T-shaped branch structure during the explosions of gasoline-air mixture in pipelines, the explosion wave overpressure of gasoline-air mixture explosion in the T-shaped branch pipeline and the straight pipeline at different initial volune fractions were measured through contrast experiments, and the flame propagation rules were researched in an organic glass pipeline by visualized study. The results show that the T-shaped branch pipe can strengthen the explosions of gasoline-air mixture in pipelines, which is the most obvious within the volume fraction range of oilgas from 1.2% to 1.6%. The effect of the T-shaped branch pipe to strengthen the explosion of gasoline-air mixture comes from three aspects: the sudden enlargement of the pipeline cross section, the reinforcement of the disturbance and the obstacles, and the influence of the reflection and diffraction of the waves. When the flame propagates to the T-shaped branch pipeline, the flame front creases distorted, the flame surface area and combustion rate increase significantly, which enhances the heat and the transport rate of active material and improves the strength of the explosion waves. Near the T-shaped branch pipe, the pressure of gasoline-air mixture explosion increased suddenly, both because of the temperature effect caused by the pressure wave reflection and diffraction, and the turbulence intensity increased by explosion waves.

Key words: mechanics of explosion; explosion intensity; T-shaped branch pipe; gasoline-air mixture; explosion wave; flame

(责任编辑 张凌云)