DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0323-09

# T 型分支管道对油气爆炸压力的影响*

杜 扬,李国庆,李阳超,齐 圣,王世茂,王 波
(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爆炸压力的影响,进行了不同初始油气体积分数、不同初始点火能工况下多参数对比实验,并对火焰传播进行了可视化研究。实验结果表明:T 型分支管道对油气爆炸压力有强化作用,强化程度和初始油气体积分数关系密切,在当量比附近,强化程度表现最显著;初始点火能对油气爆炸最大超压影响显著,随着点火能的增大,最大爆炸超压呈线性增长;波的绕射和反射、流场湍流度增强、管道通道面积增大和障碍物扰动是导致 T 型分支管道内爆炸压力增强的主要因素;T 型分支管道会导致火焰阵面严重地弯曲褶皱变形,增大火焰面积,并且回传火焰对 T 型分支结构壁面具有较强的破坏作用。

**关键词**:T 型分支管道;油气;爆炸波;可视化
**中图分类号**:O381;X932 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

在油料洞库、地下通道、隧道、矿井和燃气输送管网等受限空间内,可燃气爆炸事故时有发生,严重损害国家财产和人民人身安全。如:2013 年 11 月,中石油黄岛油库输油管道爆炸,造成 62 人遇难,9 人失踪,166 人受伤;2014 年 3 月 1 日,山西晋城一隧道因车祸发生甲醇液体燃料泄漏,发生“3.1 隧道爆炸案”,造成 31 人死亡。以往的研究表明,可燃气体在复杂空间结构受限空间内的爆炸传播过程,是一个气体流动与燃烧反应相耦合的流体动力学过程,涉及爆炸波和火焰的传播特性、火焰结构变化、化学反应强度以及火焰不稳定性等基本环节,是燃烧爆炸领域比较基础且复杂的内容[1-7]。顾金龙等[8]对连续拐弯管道中瓦斯爆炸传播特性进行了研究,发现瓦斯爆炸在管道拐弯处的传播过程是一个压力波、火焰、复杂流动相互作用的过程。在拐弯处,火焰传播速度和爆炸超压大幅上升,严重破坏弯管壁面。林柏泉等[9]初步研究了瓦斯爆炸在 T 型管道中的传播规律,发现管道分岔对瓦斯爆炸的火焰传播速度和爆炸波超压都有增强作用。G. Thomas 等[6]研究了管道中可燃气体爆炸后的火焰加速和爆燃转爆轰机理。他们分别进行了弯曲管道和直管中可燃气体爆炸传播特性的对比实验,实验表明:与相同实验工况下的直管相比较,在弯曲管道中,湍流强度会急剧增大,而这种湍流强度是由弯管下游气体产生的附加湍流引起的。尽管通过以上研究已经得到了复杂空间结构中可燃气体燃烧爆炸的相关规律,但是在上述研究中,大部分的燃烧反应介质采用的是瓦斯、甲烷、丙酮等纯净物,而对油气混合介质在 T 型分支管道等复杂受限空间内的燃烧爆炸规律研究较少。针对这一特性的研究,有利于深入认识油料等可燃气体在受限空间内燃烧爆炸的传播规律,进一步丰富可燃气体的爆炸理论体系,同时,也有助于提高油料储存、运输、加工过程的安全性,有利于降低工业油气爆炸事故的发生率,减少爆炸事故给人身和财产带来的危害。鉴于此,本文中以实验室激波管实验台架为基础,设计和加工 T 型分支管道,选用汽油-空气混合气体作为燃烧反应介质,重点研究 T 型分支管道对油气爆炸压力的影响。

## 1 实验系统和方案

### 1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,主要包括主实验装置(T 型分支管道模拟实验台架和直管道模拟实验台架)、

* **收稿日期**:2015-10-26;**修回日期**:2016-01-31
**基金项目**:国家自然科学基金项目(51276195);重庆市研究生创新基金项目(CYB16128,CYB15127,CYS15235);油气火灾爆炸成灾突变机理与控制应用基础研究基金项目(BX211J107)
**第一作者**:杜 扬(1958— ),男,博士,教授,博士生导师;**通信作者**:李国庆,boyueshe@sina.com。

测试系统(C/H 浓度测试系统、动态数据采集系统、高速摄影系统)、辅助系统(油气雾化装置、点火系统、气体循环系统、传感器标定系统)。主实验台架水平长度为 5 500 mm,分支管道深度为 500 mm,T 型分支管道竖直中轴线距离主管道左侧端部 3 250 mm,管道横截面尺寸为 186 mm×186 mm。实验台架非可视化部分为钢制管道,壁厚为 20 mm;可视化部分为有机玻璃管道,壁厚为 20 mm。各布置一只压力传感器在距离 T 型分支管道中轴线前后 500 mm 处,分别为测点 1 和测点 2。

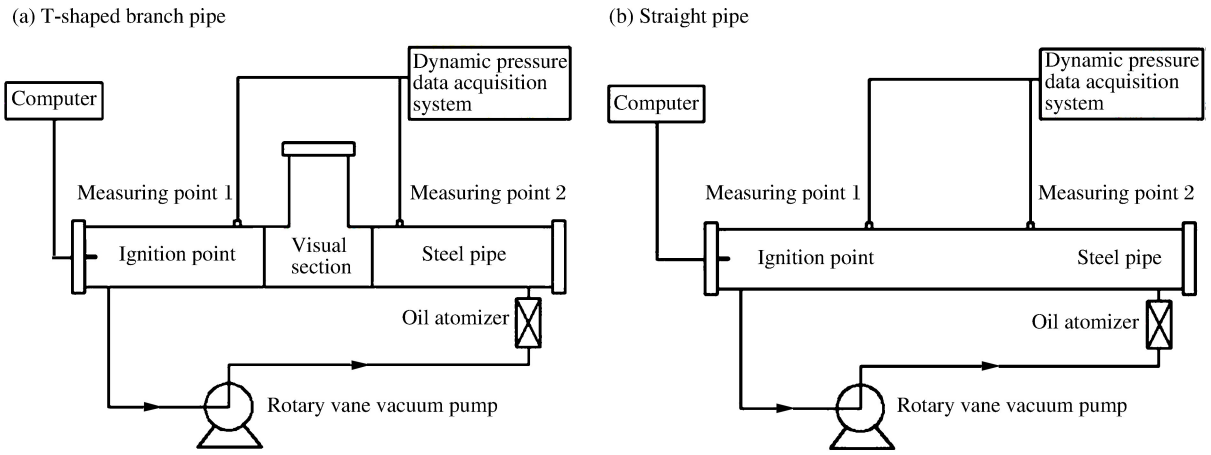


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

点火装置采用实验室定制的高能无干扰点火器,点火头如图 2 所示,实验中记录的点火头引爆油气过程的高速图像如图 3 所示。



图 2 点火头

Fig. 2 Ignition head

油气预混气体采用实验室定制的油气雾化装置制取,该装置的结构示意图如图 4 所示,雾化原理为:当气体流经通道面积较小的区域,气体流速增大,压力降低,根据伯努利原理,此处真空度加大,油壶里的液态汽油在压力差的作用下从喷管向上喷出,并与空气混合成较均匀的油气混合物,进入实验管道,再用碳氢浓度测试仪检测出实验所需的油气体积分数,预混气体初始压力为 99.12 kPa。

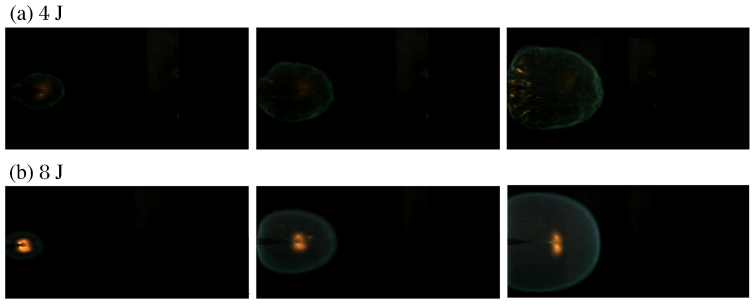


图 3 不同初始点火能下油气起爆过程

Fig. 3 Initial explosion progress of gasoline vaper at different initial igintion energies

采用动态数据采集分析系统对管道内承受的压力进行采集和分析。压力传感器采用型号为 CYG0401 的压阻式传感器,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。高速摄影仪的型号为 FASTCAM-ultima 512,拍摄速度为1 000 $s^{-1}$。

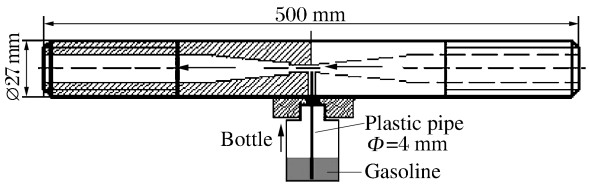


图 4 汽油雾化装置

Fig. 4 Oil atomizer

### 1.2　实验

实验由两部分组成。

第一部分是在初始温度、压力、湿度和点火能相同的情况下，采取闭端点火方式，依次采用初始体积分数为 0.9%到 2.6%、间隔步长为 0.1%的 18 组油气进行实验，对各组实验的爆炸超压值进行采集。同时进行相同初始条件下直管道中的对比实验，并在距离点火端相同位置采集爆炸波超压值。研究不同初始油气体积分数下 T 型分支管道对油气爆炸压力的影响。

第二部分是以第一部分实验为基础，分别选取低、中、高 3 种初始体积分数的油气，并改变电火花初始点火能量，研究不同初始点火能量下 T 型分支管道对油气爆炸压力的影响。

## 2　实验结果

### 2.1　不同初始油气体积分数下 T 型分支管道对油气最大爆炸压力的影响

进行了 18 组不同初始油气体积分数下 T 型分支管道与直管道中的对比实验。为保证实验结果的准确性，每种工况都进行了 10 次重复实验，实验的可重复性较好。为直观体现油气爆炸过程产生超压的机理，选取了图 5 所示的初始油气体积分数为 1.5%时，两对比实验中爆炸超压随时间和空间的变化关系图，它表征了空间不同测点油气爆炸反应进程和爆炸强度随时间的变化关系。在具体分析时，选取油气最大爆炸压力进行分析，该参数定量地反映了油气爆炸过程产生的压力波的最大强度。对多次重复实验得到的油气最大爆炸压力取算数平均值，绘制出如图 6 所示的 T 型分支管道和对比直管道中测点 1、2 的最大爆炸压力随初始油气体积分数变化的关系曲线。

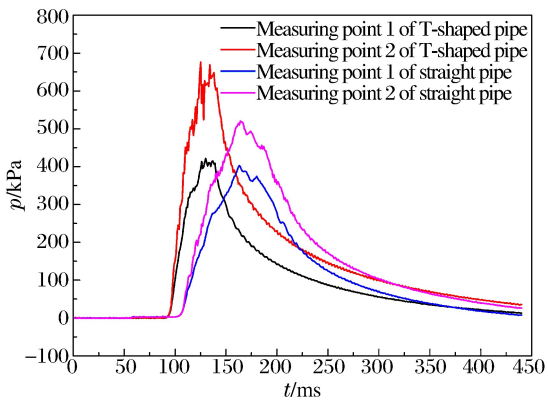


图 5　两对比实验中爆炸超压随时间和空间的变化

Fig. 5　Explosion overpressure varying with time and space in two contrast experiments

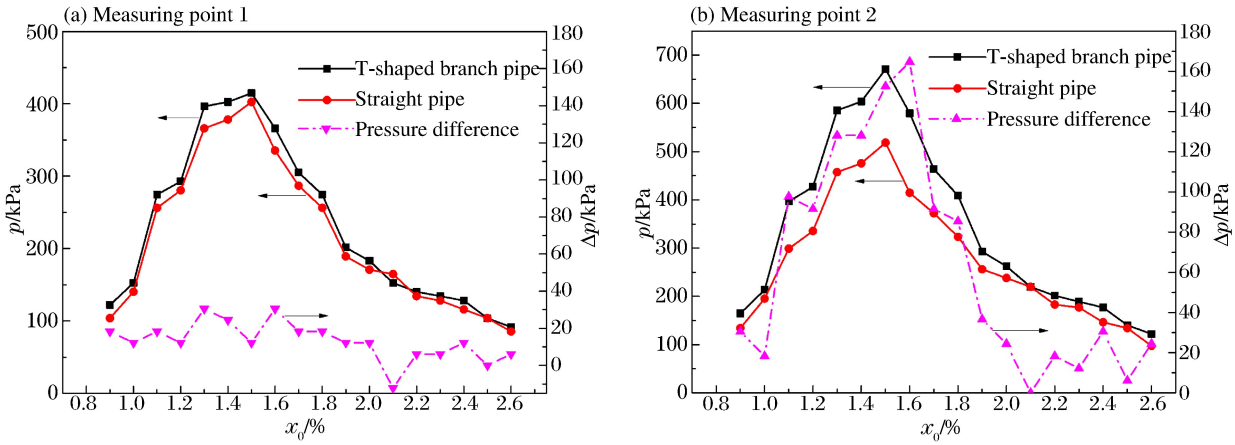


图 6　两对比实验测点 1、2 最大爆炸压力随初始油气体积分数的变化

Fig. 6　Maximum explosion pressure of measuring points 1 and 2 within two contrast experiments at different initial gasoline vaper volume fractions

从图 6(a)可以看出，两对比实验最大爆炸压力在测点 1 处具有相似的变化规律，都呈现先递增、再递减的抛物线型变化。在油气体积分数为 0.9%到 1.5%的区间内，最大爆炸压力递增；在油气体积分数大于1.5%的区间内，最大爆炸压力递减。从图 6(a)两测点压力差曲线可明显看出，在该实验工况下，T 型分支管道测点 1 的数值普遍大于直管道测点 1 的数值，但是数值差距很小，最大差距出现在体

积分数 1.3%处，为 30 kPa。由此可见，油气爆炸在没有经过 T 型分支结构作用时，其最大爆炸压力和直管道中相比，没有明显改变。

从图 6(b)可知，两对比实验中测点 2 的数值变化规律相似，也呈现先递增、再递减的抛物线型变化：在油气体积分数 0.9%到 1.5%的区间内，呈递增趋势；在油气体积分数 1.5%到 2.6%的区间内，呈递减趋势。从图 6(b)中压力差曲线可以看出，两对比实验测点 2 的压力差随初始油气体积分数的变化而显著变化，并始终大于 0 kPa。在油气体积分数 0.9%到 2.1%区间内，压力差随初始油气体积分数变大呈抛物线变化规律：在 1.6%处达到最大差距 160 kPa，在 2.1%达到最小差距 0.1 kPa，并且递增区间和递减区间的数值变化幅度都很大。初始油气体积分数大于 2.1%时，压力差呈现上下振荡变化规律。可见，两对比实验测点 2 的压力峰值具有显著差异。T 型分支管道表现出对管道内油气爆炸压力的强化作用，并且当初始体积分数为 1.5%时，最大爆炸压力达到最大，将此体积分数定义为“最危险体积分数”。

上述实验结果表明油气最大爆炸压力与初始油气体积分数密切相关。首先，当管道内油气的初始体积分数较低时，管道内空气过剩，燃烧反应属于“富氧反应”，多余的空气造成燃烧热量的大量损失，不利于产生活化分子，所以降低了燃烧反应速率，弱化了爆炸强度。其次，当管道内油气初始体积分数接近化学计量比时，燃烧反应进行得比较充分，释放出足够的热量支持燃烧和爆炸的进行，导致流场内压力和气流速度都较高，当压力受到 T 型分支管道的扰动时，压力得到的强化程度就表现得更明显。另外，当管道内油气初始体积分数较高时，管道处于“贫氧反应”，导致油气不能完全参加化学反应，过剩的油气阻碍了传热传质进行，增大了活化分子销毁的概率，同样不利于爆炸波的强化。

为定量比较 T 型分支管道对爆炸压力的强化程度，定义了压力强化因数：

$$\alpha = p_2 / p_1 \tag{1}$$

式中：$\alpha > 1$，表示强化作用；$\alpha < 1$，表示弱化作用。$p_1$ 和 $p_2$ 分别为用来做比较的两测点的最大爆炸压力。根据实验结果绘制出图 7 所示的不同初始油气体积分数下的压力强化因数，图 7 中 $p_1$ 和 $p_2$ 分别为 $T$ 型分支管道测点 1、2 的最大爆炸压力，$p_1'$ 和 $p_2'$ 分别为直管道测点 1、2 的最大爆炸压力。

图 7 中曲线 $p_1/p_2$ 和 $p_1'/p_2'$ 分别为 T 型分支管道和直管道中测点 2 相对于测点 1 的压力强化因数。可以看到，两实验台架的压力强化因数都大于 1，说明测点 2 最大爆炸压力较测点 1 的大。并且，T 型分支管道的压力强化因数明显大于直管道中的压力强化因数，表明在相同初始油气体积分数下，爆炸波经过 T 型分支管道扰动后，和直管相比其压力得到增强的程度更显著。对于 T 型分支管道，压力强化因数随着初始油气体积分数的增大呈现先上升、再下降的近似抛物线型变化，在1.5%处到达最大值 1.61；对于直管道，其压力强化因数变化趋势不规则，在 1%处达到最大值 1.39，然后急剧下降到 1.1%处的 1.16，在 1.1%到 2.6%的区间内变化规律接近抛物线型变化，在 2%处取得最大值1.38。

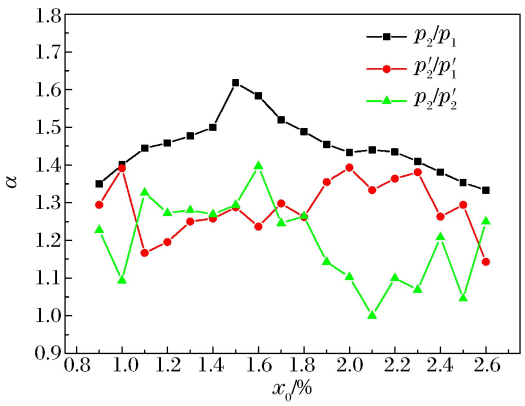


图 7 不同初始油气体积分数下的压力强化因数

Fig. 7 Enhancement coefficient of pressure at different initial gasoline vaper volume fractions

曲线 $p_2/p_2'$ 为分支管道测点 2 相比较于直管道测点 2 的压力强化因数，通过这个比较可以直观地看到在相同初始油气体积分数下，爆炸波经过 T 型分支管道扰动后，最大爆炸压力和直管道相比得到强化的程度。从曲线 $p_2/p_2'$ 可以看到压力强化因数始终大于 1，说明在实验工况下，和直管道相比，T 型分支管道对爆炸压力的强化更显著。并且在初始油气体积分数小于 1.1%和大于 1.6%时，强化因数震荡比较明显；在 1.1%到 1.6%的区间内，强化因数变化比较平缓，并且此区间内的强化因数比在其他区间更大，基本维持在 1.25 以上，在 1.6%处强化因数达到最大值 1.39。

### 2.2　不同初始点火能下 T 型分支管道对油气最大爆炸压力的影响

为了研究不同初始点火能下 T 型分支管道对油气最大爆炸压力的影响，采用了点火能变化范围为 2～10 J 的点火器，变化步长为 2 J。同时，分别选取了较低初始油气体积分数(1.0%)、中初始油气体积分数(1.5%)和较高初始油气体积分数(2.1%)进行了实验。图 8 是根据实验结果绘制的 3 种不同初始油气初始体积分数下 T 型分支管道内测点 1、2 的最大爆炸压力随初始点火能量的变化关系曲线。

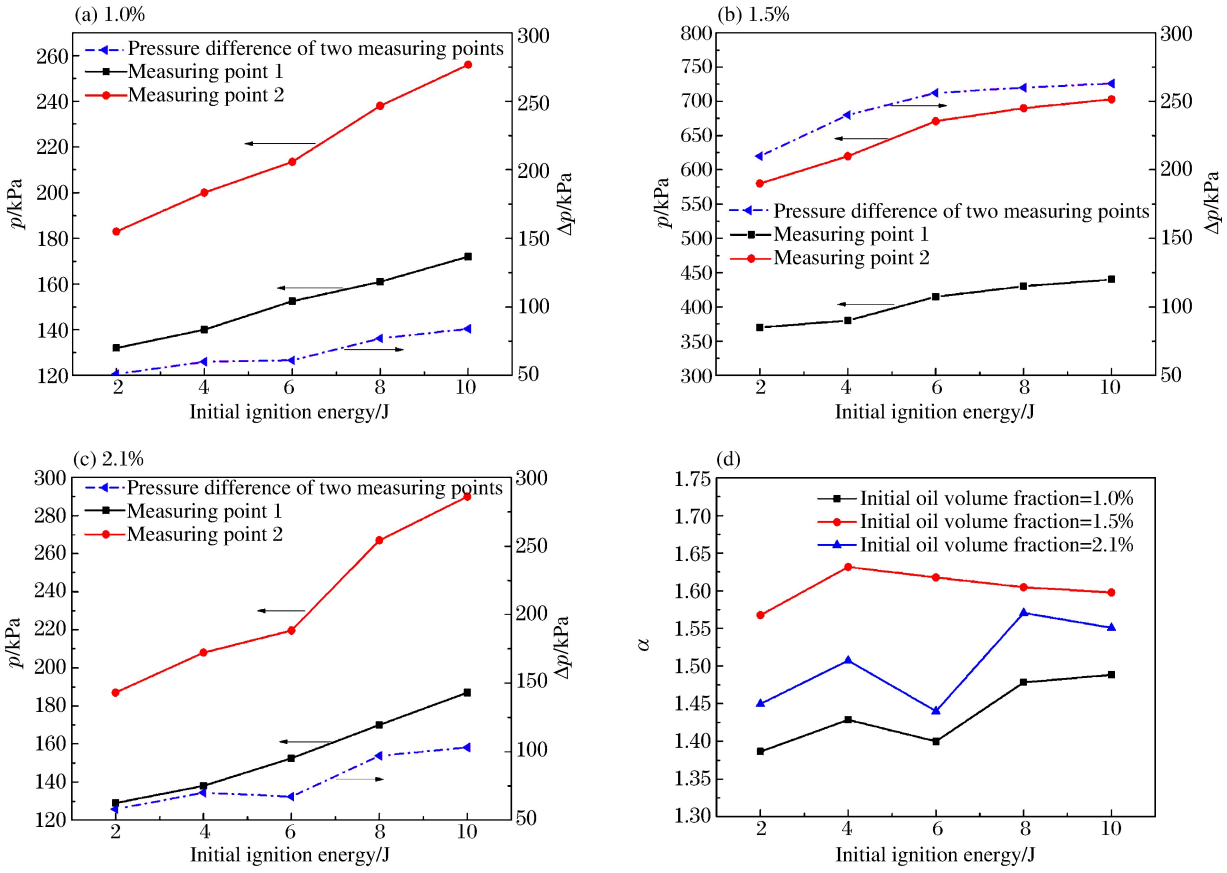


图 8　3 种不同初始油气体积分数条件下测点 1、2 压力峰值随初始点火能变化关系

Fig. 8　Peak overpressure of two measuring points varying with initial ignition energy at three different initial gasoline vaper volume fractions

从图 8(a)～(c)可以看出，在 3 种不同初始油气体积分数下，随着初始点火能的增大，T 型分支结构前后的最大爆炸压力都呈近似一阶线性递增关系，并且初始油气体积分数为 1.5%时变化相对 1%和 2.1%更平缓，尤其对于 2.1%时，测点 2 的压力在初始点火能大于 6 J 后增长幅度非常明显。从 T 型分支管道前后两测点压力差可见，在较低初始油气体积分数(1.0%)下，T 型分支管道前后测点压力差随初始点火能增大而增大：在 2～6 J 的范围内增长幅度较小，从 51.0 kPa 增长到 61.0 kPa，增长了 19%；在 6～10 J 的范围内增长幅度较明显，从 61.0 kPa 增长到 84.0 kPa，增长了 37.7%。对于中初始油气体积分数(1.5%)，T 型分支管道前后两测点压力差也随这初始点火能增大而增大：在 2～6 J 的范围内，增长幅度较明显，从 210.0 kPa 增长到 256.2 kPa，增长了 22%；在 6～10 J 范围内，增长幅度趋于平缓，从256.2 kPa增长到 263.0 kPa，增长了 2.6%。对于较高初始油气体积分数(2.1%)，T 型分支管道前后两测点压力差随初始点火能增大也呈递增趋势：在 2～6 J 范围内，增长幅度较平缓，从 58 kPa 增长到67.1 kPa，增长了 15.7%；在 6～10 J 范围内，增长幅度较大，从 67.1 kPa 增长到 103.0 kPa，增长了 53.5%。

图 8(d)是根据实验结果绘制的 3 种不同初始油气体积分数下 T 型分支管道测点 2 相对于测点 1

的压力强化因数随初始点火能的变化关系曲线。从图 8(b)可以看出,所有工况的压力强化因数都大于 1,其中较低初始油气体积分数(1.0%)和较高初始油气体积分数(2.1%)下,压力强化因数具有相似的变化规律,在 2～4 J 的范围内呈递增趋势,在 4～6 J 的范围内呈递减趋势,在 6～8 J 的范围内递增幅度显著,在 8～10 J 范围内变化较平缓;对于中间初始油气体积分数(1.5%),在 2～4 J 的范围内,压力强化因数增长较快,从 4 J 到 10 J 呈缓慢下降趋势。

初始点火能量对 T 型分支管道内油气最大爆炸压力的影响规律可以用化学动力学原理进行分析。首先,从链式反应的角度来看,油气爆炸的点火过程是一个由多个基元反应组合而成的链式反应过程,并且阿累尼乌斯的活化能理论指出活化分子才能发生化学反应,油气爆炸反应的起始链的激发需要吸收一定的能量,才能使 C－H 共价键发生断裂产生自由基。而且,为了能够支持燃烧向前传播,点火处必须有较高的温度,这样才能保证有足够的热量让燃烧反应继续进行,因此点火源必须让常温状态的油气混合物快速进入较高温度的爆炸状态。所以,点火能量越大,提供给点火头附近的油气混合物的能量就越多,产生的活化分子数量就越多,从而爆炸反应越剧烈。其次,点火能量越高,点火时点火头附近的油气对流越剧烈,流入点燃核心的气体越多,从而能够释放出越多的能量,产生越高的温度来对火焰锋面前未燃区域的油气进行预热,从而使未燃区域的油气参与燃烧反应,让化学反应持续下去,使得爆炸不断强化。由于以上两个原因,随着点火能量的增大,管道内燃烧化学反应速率增大,油气的热释放率也提高,单位时间内积累的热量增多,从而导致 T 型分支结构前后爆炸波压力峰值增大。

## 3 机理分析

### 3.1 T 型分支管道火焰传播与爆炸压力强化关系可视化分析

由上文的研究可知,T 型分支管道对油气爆炸压力具有强化作用,但是前文的研究主要是基于爆炸压力的数值大小变化来进行的。为了更直观地分析 T 型分支管道对爆炸压力的强化机理,利用高速摄影仪拍摄了火焰传播经过透明可视化管道时火焰形态的变化情况,如图 9 所示,$T_1$ 和 $T_2$ 分别为激波管水平管段和分支管段;A、B、C、D、E 依次为分支管道处 5 个点;Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ为火焰阵面。

由管道封闭端弱点火引起的油气爆炸在未到达分支管道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部时,如图 9(b)所示,由于有旁接 T 型支管道,连接处的管道横截面扩大,火焰传播通道面积突扩。同时,由于 A、C 这 2 个尖角直接嵌入流场中,可以将 AB 和 CD 这 2 个壁面视为流场障碍,A、C 这 2 点可以视为扰动源。因此,可以从面积突扩和障碍物扰动两方面来分析 T 型分支管道对爆炸的强化作用。

首先,在 T 型分支管道口部,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[10]。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,由于此处受气体旋涡的影响,当火焰传播至图 9(c)图所示区域时,Ⅰ区所示的火焰已经形成向上卷曲的“象鼻状”火焰形态,表现出明显向分支结构扩散的趋势。另外,当火焰传播至 C 点时,此处的扰动边界使主流区气流产生分割,并诱导其进入分支管道 $T_2$(如图 9(d)所示)中,对 $T_2$ 管道中的未燃气体进行快速预热并引发爆炸,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,进而提高了爆炸的强度。

其次,从图 9 可以看出火焰在经过 T 型分支管道的过程中,火焰阵面产生严重的皱褶弯曲变形。从图 9(d)能明显观察到火焰阵面发生变形后形成的“毛刷状”的火焰阵面结构(图 9(d)Ⅱ区所示)。火焰阵面产生的褶皱和变形导致气体燃烧火焰面增大,增强了对混合气体的卷吸作用,提高了燃烧反应速率,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。随着火焰传播速度的增大,火焰受流场湍流的影响更大,火焰阵面褶皱弯曲更明显,最终形成如图 9(e)Ⅲ区所示的形态扭曲的火焰阵面,产生明显的“火舌”,促使燃烧速率进一步增大。燃烧速率增大反过来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预热,对气流产生强扰动,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

励作用，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加。另外，通过图 9(g)、(h)可以看到由于管道末端的端部效应，导致流场气流产生回传，气流在回传的过程中推动油气燃烧的火焰也往回传播，并在 T 型分支管道左侧尖角 A 点附近产生火焰分流，对 AB 壁面产生较大的冲击和破坏。

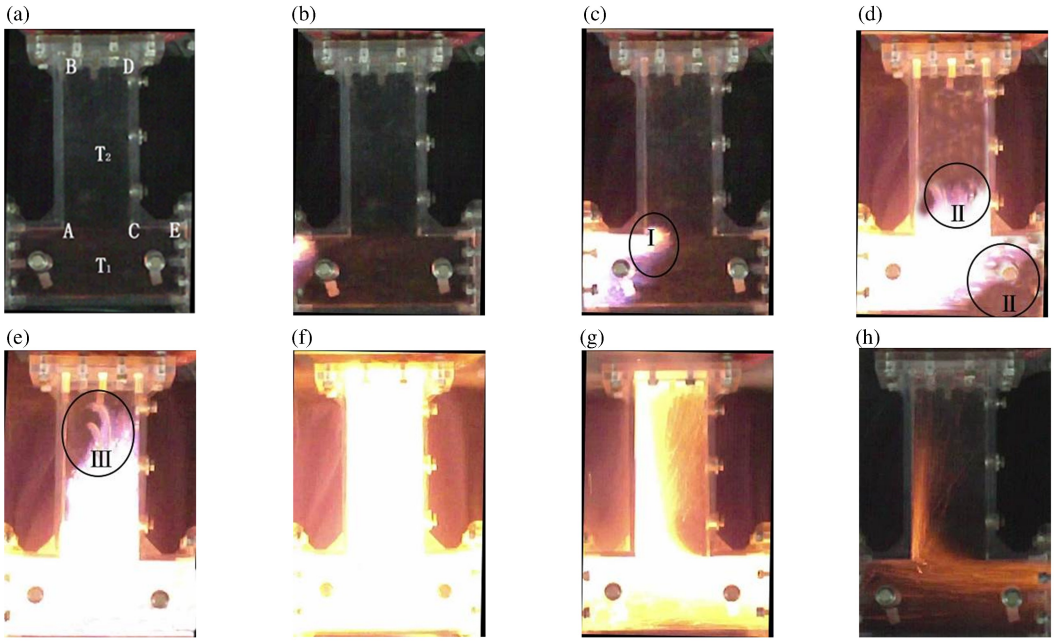


图 9　火焰传播经过 T 型分支管道时的形态变化过程

Fig. 9　Morphological changes of flame when propagating through T-shaped branch pipe

### 3.2　T 型分支管道中波的绕射和反射对爆炸波的强化作用机理分析

T 型分支管道由于几何结构的特殊性，爆炸波在传播经过时会产生波的绕射和反射[11-13]。这一复杂的波系演变过程与 T 型管道内油气爆炸压力波的强化具有密切关系。图 10 和 11 分别是 T 型分支管道附近爆炸波绕射区波系演化示意图和 $T_2$ 段管道中爆炸波的反射示意图。

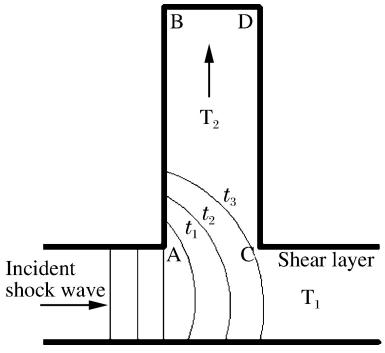


图 10　绕射区波系演化示意图

Fig. 10　Schematic diagram of diffraction of waves

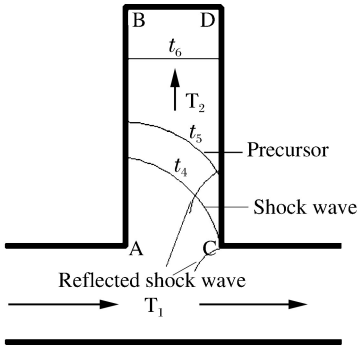


图 11　$T_2$ 段中激波反射示意图

Fig. 11　Schematic diagram of reflection of waves in the $T_2$ pipe

图 10 中，激波在 $T_1$ 段管道中从左至右传播过程中，经过尖角 A 时，受到 A 点产生的稀疏波的作用，将产生绕射进入 $T_2$ 管道，使波阵面产生弯曲。同时，$T_1$ 和 $T_2$ 管道中的激波波阵面继续向前传播，在 $t_3$ 时形成图 10 所示的波阵面。当激波继续传播到尖角 C 时($t_4$ 时)，将迅速与 CD 壁面碰撞($t_5$ 时)，并发生波的反射。反射波系将形成多道后传压力波，一部分反射波回传进入 $T_1$ 管道，与前 $T_1$ 管道中前传压力波相遇，不断聚集、叠加，进而使波后未燃气体的压力和温度迅速升高，增强油气燃烧化学反应速率，提高热释放率。另一部分反射波保持在 $T_2$ 管道内，与 AB 壁面和 $T_2$ 管道端部相碰撞，也产生复杂

的波系演变过程,对 $T_2$ 管道中未燃气体进行压缩预热,迅速诱发 $T_2$ 管道中油气爆炸,增强燃烧热的释放。同时,T 型分支管道附近复杂的压力波系演变过程也会导致剧烈的流场扰动,增强流场湍流度,加强已燃气体和未燃气体的对流速度,提高燃烧化学反应速率,使管道内爆炸压力得到强化。

## 4 结 论

通过实验研究了不同初始油气体积分数和不同初始点火能工况下,T 型分支管道对油气爆炸的影响规律,得到以下结论:

(1)T 型分支管道对管道内油气爆炸压力有强化作用,强化程度随初始油气体积分数的增加大致呈抛物线型变化,在初始油气体积分数 1.5%附近,强化程度最显著;

(2)在 3 种不同初始油气体积分数下,T 型分支管道前后最大爆炸压力都随初始点火能增大呈线性递增关系,并且对于较低和较高初始油气体积分数工况,压力峰值增长幅度比较明显;

(3)T 型分支管道对油气爆炸的强化作用主要受到波的绕射和反射、流场湍流度增强、管道面积突扩和障碍物扰动 4 个方面的影响;

(4)通过可视化分析,火焰经过 T 型分支管道时,火焰阵面产生严重的皱褶弯曲变形,火焰面积增大,引起燃烧速率增大,增强了热量和活性物质的输运速率,导致爆炸压力增大;并且也能观测到明显的火焰回传现象,发现爆炸对 T 型分支管道壁面的冲击和破坏很严重。

## 参考文献:


[1] 王世茂,杜扬,张少波,等. 顶部开口条件下油罐油气爆炸数值模拟[J]. 后勤工程学院学报,2015,31(4):52-56.
Wang Shimao, Du Yang, Zhang Shaobo, et al. Numerical simulation on fuel-air mixture explosion in the oil tank with an open top[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2015,31(4):52-56.

[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 Peili, 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 multiform 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 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] 顾金龙,翟成. 爆炸性气体在连续拐弯管道中传播特性的实验研究[J]. 火灾科学,2011,20(1):16-20.
Gu jinlong, Zhai Cheng. Gas explosion propagation characteritics in continuous turning pipe[J]. Fire Safety Science, 2011,20(1):16-20.

[9] 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 Baiquan, 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.

[10] 贾智伟,景国勋,程磊,等. 巷道截面积突变情况下瓦斯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 Zhiwei, Jing Guoxun, 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.

[11] 潘振华,范宝春,归明月. T 型管内流动气体中爆轰绕射过程的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2014,34(6):709-715.
Pan Zhenhua, Fan Baochun, Gui Mingyue. Numerical investigation on evolution of detonation diffraction in mov-

ing gas inside a T-shaped channel[J]. Expliosion and Shock Waves, 2014,34(6):709-715.

[12] Guo Changming, Wang Changjian, Xu Shengli. Cellular pattern evolution in gaseous detonation diffraction in a 90°-branched channel [J]. Combustion and Flame, 2007,148(3):89-99.

[13] 王昌建，徐胜利，郭长铭. 气相爆轰波在半圆形弯管中传播现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击，2003,23(5):448-453.
Wang Changjian, Xu Shengli, Guo Changming. Experimental investigation on gaseous detonation propagation through a semi-circle bend tube[J]. Expliosion and Shock Waves, 2003,23(5):448-453.

# Effects of a T-shaped branch pipe on overpressure of gasoline-air mixture explosion

Du Yang, Li Guoqing, Li Yangchao, Qi Sheng, Wang Shimao, Wang Bo

(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing* 401311, *China*)

**Abstract**: To investigate the effects of a T-shaped branch structure on the overpressures during the explosions of the gasoline-air mixture in a pipe, we conducted multiple parameter contrast experiments under the conditions of different initial gasoline vaper volume fractions and different initial ignition energy, and carried out visualized investigation on the flame propagation of the mixture. Our research reveal the following results: the T-shaped branch pipe can enhance the explosive overpressure of the gasoline-air mixture in a pipe, and the degree of this enhancement is closely related with the increase of the initial gasoline vaper volume fraction approximately in a parabolic trend, and with the maximum value obtained around the stoichiometric initial concentration. The maximum explosive overpressures before and after the T-shaped branch pipe increases linearly with the growth of the initial ignition energy. The effects of the T-shaped branch pipe on raising the degree of the explosion mainly originate from four factors: the wave diffraction and reflection, the turbulence enhancement, the sudden expansion of the pipe cross-section area and the reinforcement of the disturbance by the obstacles. It can be seen from the visual analysis that, when the flame propagates through the T-shaped branch pipe, the flame front is distorted seriously into creases, the flame surface area is enlarged, and the returning flames are observed, which exerts a destructive effect on the wall of the T-shaped branch pipe.

**Keywords**: T-shaped branch pipe; gasoline-air mixture; explosion wave; visualization

（责任编辑　张凌云）