

可燃气体爆炸火焰和压力波传播特性的实验研究*

喻健良 周崇 刘润杰 严清华

(大连理工大学化工学院)

喻健良等. 可燃气体爆炸火焰和压力波传播特性的实验研究. 天然气工业, 2004; 24(4): 87~90

摘 要 对预混可燃气体在圆形管道内的爆炸过程进行了实验研究, 根据实验结果将超压的变化过程分为4个阶段, 将气体燃烧的变化过程分为3个阶段。得出了计算火焰传播速度的经验公式。随着火焰的传播, 火焰传播速度不断加快, 且测点处的火焰传播速度越快、测点距点火处越远, 燃烧时间就越短。对前驱冲击波与火焰面的相对时间及相对位置关系进行了分析。对爆燃转爆轰过程(DDT)进行了初步研究, 观察到此过程中前驱冲击波阵面仍然行进在火焰面的前方, 但二者的间距在减小。火焰面紧跟在激波前缘的后面, 二者同速传播, 超压峰值的位置与火焰面重合。

主题词 可燃气体 爆炸 超压 冲击波 火焰 燃烧速率 燃烧 时间 爆燃转爆轰

石油天然气工业是现代工业的重要组成部分, 却时刻受到爆炸和火灾的威胁^[1]。为消除这些威胁, 前人已做过大量工作。文献[2]、[3]从理论方面分析了燃烧爆炸的本质, 文献[4]指出可燃气体燃烧爆炸过程中形成2波3区结构, 文献[5]、[6]中给出了火焰速度和最大超压值的简单关系。但上述文献中并未介绍前驱冲击波阵面和燃烧波阵面的具体位置关系, 未提及压力和火焰之间是如何相互影响的, 也没有具体说明爆炸时超压值是如何变化的。燃烧理论认为湍流火焰的燃烧反应弥散在一个反应区内, 其厚度厘米为量级^[7]。但文献[8]中的实验数据则表明反应区的厚度可达数米。可见在反应区厚度的度量问题上还有待进一步研究。

鉴于上述研究的局限与不足, 笔者对预混气体在圆形管道内的爆炸过程进行了进一步的实验研究。据实验结果分析了超压和燃烧变化的各个阶段, 介绍了火焰传播速度和燃烧时间的变化规律, 并对爆燃状态和爆燃转爆轰状态下的前驱冲击波、火焰面和激波3者间的时空间位置关系进行了分析。

实验装置

实验装置如图1所示。圆形管道内径为81 mm, 长分别为1.5 m和2.8 m两种, 点火端用法兰

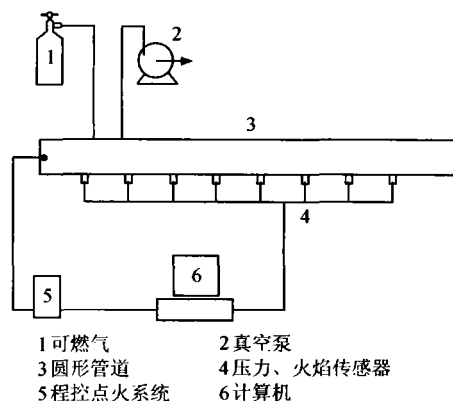


图1 实验装置示意图

密闭, 点火点位于管端的中心处, 爆炸时出口端是开放的, 无约束。实验所用的预混可燃气体为乙炔/空气混合气, 乙炔浓度为化学计量比(7.75%)。采用压力分配法配气, 实验时向管道内充入可燃气体, 点火前管道内压力为常压。1.5 m的管道内沿轴向布有8个等间距的测点, 间距为0.15 m; 2.8 m的管道内沿轴向布有14个测点。测点处装有光敏火焰传感器和高频动态压力变送器, 可以测出超压变化及火焰通过测点时火焰光的强弱变化, 并可计算出测点处的火焰传播速度。

* 本成果为国家自然科学基金(50276009)和教育部博士研究生学科点专项科研基金(2001041026)资助项目。

作者简介: 喻健良, 1963年生, 副教授; 1989年毕业于大连理工大学, 现在大连理工大学化工学院从事工业防爆抑爆等机理与技术的研究工作。地址: (116012) 辽宁省大连市西岗区英华街52号。电话: (0411) 83629481。E-mail: yj163@21cn.com

实验结果

1. 爆炸过程介绍

2.8 m 管道中测点 7 处的超压和火焰变化情况如图 2 所示。从图中可看出爆炸时超压的变化可分

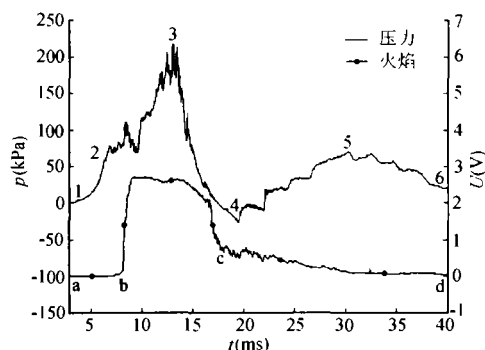


图 2 2.8 m 管道测点 7 处的爆炸过程

为 4 个阶段:1~2 为前驱冲击波阶段,2~3 为升压阶段,3~4 为降压阶段,4~6 为余波阶段,其中 4~5 为二次反冲过程。火焰光的强弱变化是用电压值来度量的,从图 2 中可看出火焰燃烧的变化过程可分为 3 个阶段:a~b 为未燃阶段,b~c 为燃烧阶段,c~d 为已燃阶段。火花塞点火后气体开始燃烧,燃烧释放出的热量使气体的温度骤升、体积膨胀进而诱导形成前驱冲击波(压力波),前驱冲击波使未燃气体发生扰动并推动气体向管道的出口端流动。从图 2 可以看出测点处的超压值随着前驱冲击波的到来而逐渐上升,上升曲线比较规则。前驱冲击波行进在火焰阵面的前方,6.25 ms 时前驱冲击波阶段结束,此时火焰阵面还未传到测点处。8.2 ms 火焰阵面到达,燃烧阶段开始,此时超压正在无规则地上升。13 ms 时超压达到最高值,而火焰仍在燃烧,16.8 ms 火焰开始熄灭,燃烧阶段结束,在已燃阶段有些微小气团还将持续燃烧一段时间,这里忽略不计。19.5 ms 超压开始回升,余波阶段开始,测点处超压呈现高低震荡过程,时间达上百毫秒。图 3 为 1.5 m 管道测点 2 处的爆炸过程。

2. 火焰传播速度和传播距离的关系

图 4 是 1.5 m 和 2.8 m 管道内各测点处的火焰传播速度图。由图 4 可知,随着火焰的不断传播,其传播速度也越来越快。由图中实验值可以拟合出本实验条件下圆形管道内火焰传播速度的经验公式:

$$v = 333.7x \quad (1)$$

式中: v 表示火焰传播速度; x 表示火焰传播的距离。

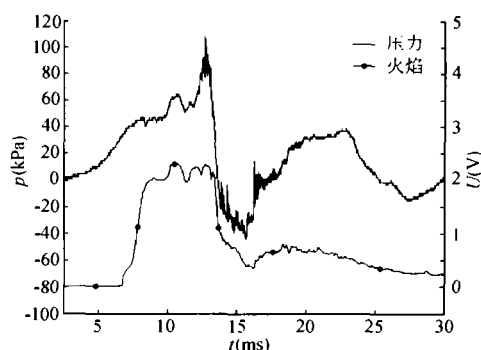


图 3 1.5 m 管道测点 2 处的爆炸过程

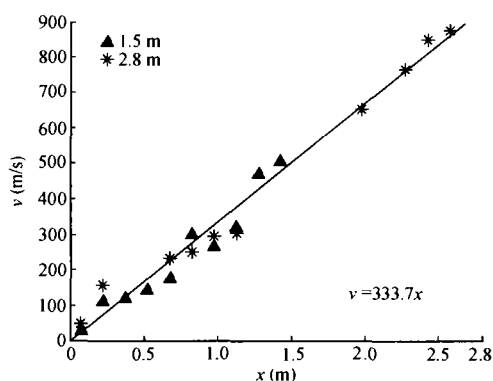


图 4 各测点处的火焰传播速度

将各测点处的火焰传播速度除以该管道内的最大平均火焰传播速度,将测点距点火处的距离除以管长,即可将图 4 无量纲化,其结果绘于图 5。可以看出本实验条件下不同长度的管道内,火焰传播速度的增加趋势基本相同,火焰传播速度与传播距离呈线性关系。

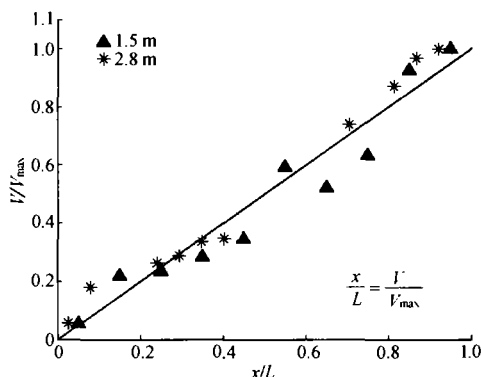


图 5 无量纲火焰传播速度对比图

3. 燃烧时间的变化情况

将各测点处燃烧时间与火焰传播速度的关系绘于图 6,从图中的实验数据可以看出各测点处的燃烧

时间均为毫秒量级,图中实验值分布在一个较宽的区域内,且火焰传播速度越大,燃烧时间越短。当火焰传播速度低于 600 m/s 时燃烧时间与火焰传播速度基本上呈线性关系,超过 600 m/s 时燃烧时间变化不大。各测点处的燃烧时间如图 7 所示,距离点火端越近,燃烧时间越长,且基本上呈直线关系,在 2.125 m 处直线的斜率有所变化。

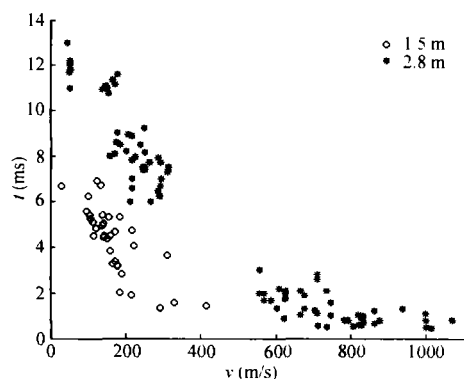


图6 燃烧时间与火焰传播速度关系

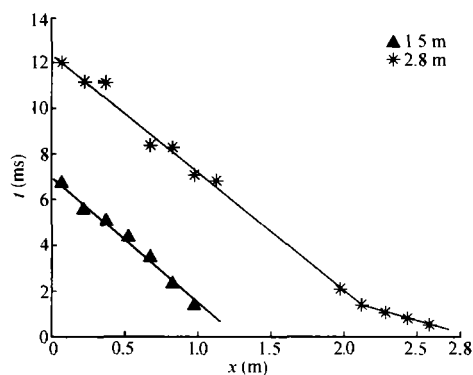


图7 各测点处的燃烧时间

4. 前驱冲击波与火焰面间的距离

图2中前驱冲击波结束时测点处还未开始燃烧,前驱冲击波行进在火焰阵面的前方。图3中 6.74 ms 时测点处的部分气体开始燃烧,7.2 ms 前驱冲击波阶段结束,8.6 ms 测点处全部气体参与燃烧,前驱冲击波的主体行进在火焰阵面前方,末端与燃烧反应区的前端有少许重合。将各测点处前驱冲击波阶段结束时刻与燃烧阶段开始时刻的时间差值绘于图8。将各测点处的瞬时火焰传播速度与时间差相乘,即可粗略得到前驱冲击波与火焰阵面间的空间距离,其结果见图9,但此计算方法得到的距离偏大。由图可知在 1.5 m 管道中二者的时间间隔与空间距离都是逐渐增大的。2.8 m 管道中时间曲线先增大,在管道末端开始下降,但由于火焰传播速度

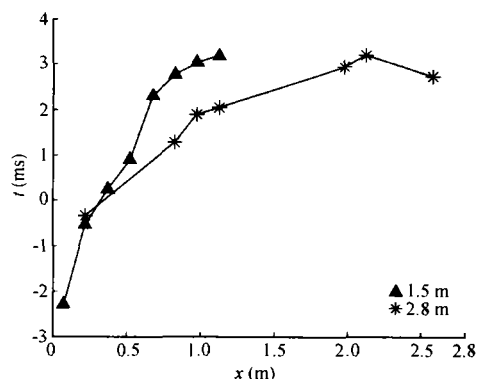


图8 各测点处前驱冲击波与火焰面的时间间隔

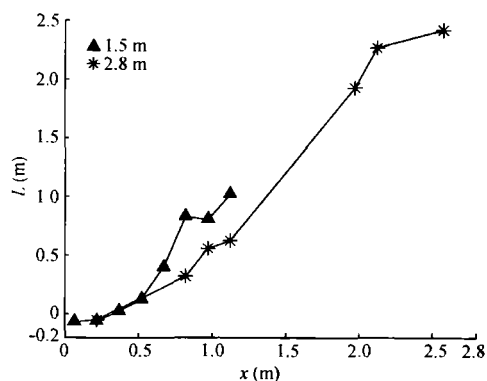


图9 各测点处前驱冲击波与火焰面的空间间隔

是增加的,距离曲线仍在上升,但上升速度则明显减缓。

5. 爆燃转爆轰状态下超压与火焰的关系

图10、11绘出了 1.5 m 和 2.8 m 管道内各测点处的超压变化情况。从图中可以看出 1.5 m 管道内的爆炸状态为爆燃,超压和火焰传播速度较低。当管长增至 2.8 m 时爆炸状态已经开始由爆燃向爆轰转变(DDT),火焰传播速度已达每秒近千米,最大超压已达兆帕量级,并出现了激波。但由于管道长度

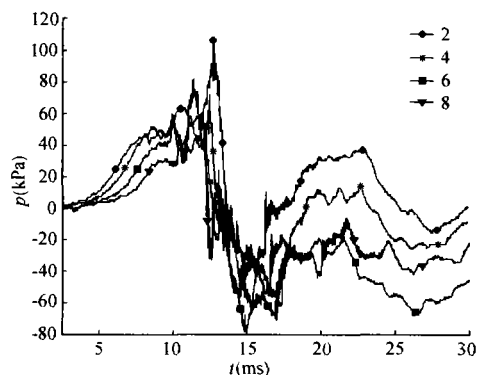


图10 1.5 m 管道内各测点处的超压变化情况

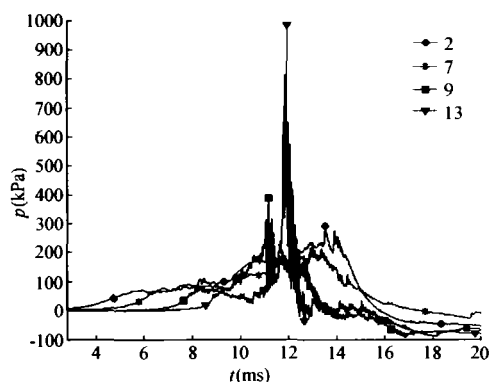


图 11 2.8 m 管道内各测点处的超压变化情况

有限,还未出现稳定传播的爆轰波。2.8 m 管道中测点 13 处的超压和火焰的变化情况如图 12 所示,前驱冲击波行进在火焰面的前方,在升压阶段后期已经出现了激波,并且激波与火焰面重合。

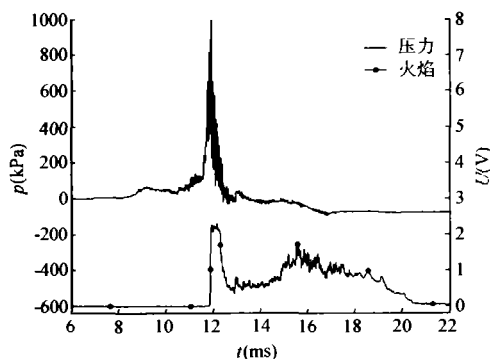


图 12 DDT 状态下超压和火焰的变化情况

结 果 分 析

在前驱冲击波阶段中超压是逐渐升高的,从空间上来说,前驱冲击波不是 1 个超压突然上升的间断面,而是 1 个超压逐渐上升的、具有一定厚度的区域。而燃烧反应区同样也是具有一定厚度的区域,由于处于湍流状态,其最前端是弯曲皱褶甚至为已撕裂了的火焰面。火花塞点火后,前驱冲击波和燃烧反应区同时同地开始传播,二者有相互重叠的部分。前驱冲击波的传播速度快,随着传播的进行,2 个区域逐渐脱离,相距越来越远。当管道内爆炸状态转变为爆燃转爆轰时,2 个区域间的距离又开始缩小。

最大超压出现在升压阶段结束时,在爆燃状态下,此时刻处于火焰的燃烧阶段,即最大超压出现在火焰面后方的反应区内。在爆燃转爆轰状态下,火焰传播速度已达到每秒近千米,最大超压值上升到兆帕量级,图 12 中超压曲线陡然上升,已出现了明显的激波。激波前缘在火焰面的前方,最大超压处与火焰面已经重合。

文献[4]中对爆轰波的描述是火焰面追赶上前驱冲击波阵面,火焰阵面和压力阵面合二为一,成为一个带化学反应区的冲击波。文献[3]中提到爆轰波由激波和紧跟在激波后面的化学反应区组成,反应区可以与激波有相同的传播速度。从实验结果来看,在爆燃转爆轰状态下前驱冲击波和火焰面的距离已经出现缩小的趋势,而且爆炸波结构中也出现了激波和紧跟其后的具有相同传播速度的反应区,但此时激波与前驱冲击波仍然是分开的。由于管道长度有限,还未出现稳定传播的爆轰波,在本实验中还无法判断前驱冲击波、火焰面、激波是否会在爆轰时合三为一,对此还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 Khan Faisal I, Abbasi S A. Major Accidents in Process Industries and an Analysis of Causes and Consequences. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1999;12(5):361~378
- 2 傅维镛,张永廉,王清安. 燃烧学. 北京:高等教育出版社, 1989:241~269
- 3 陈义良,张孝春,孙慈等. 燃烧原理. 北京:航空工业出版社, 1992:185~231
- 4 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理. 北京:北京理工大学出版社, 1996:80~89, 13~14
- 5 桂晓宏,余华,林伯泉. 瓦斯爆炸过程中火焰与超压的实验研究. *江苏煤炭*, 2000;(1):14~16
- 6 桂晓宏,林伯泉. 火焰速度与超压关系. *淮南工业学院学报*, 1999;(12):14~17
- 7 刘正白. 燃烧学. 大连:大连理工大学出版社, 1992: 57~60, 90~93
- 8 王从银,何学秋. 瓦斯爆炸火焰厚度的实验研究. *爆破器材*, 2001;(4):28~32

(收稿日期 2003-12-18 编辑 居维清)