

文章编号:1001-4888(2019)02-0267-08

管长对带弯头管道内可燃预混气体 爆炸规律及薄壁动态响应的影响研究^{*}

陈兵¹, 时训先¹, 张国文², 王文秀², 于巧燕², 赵会军², 袁雄军², 周宁²

(1. 中国安全生产科学研究院, 北京 100012; 2. 常州大学油气储运技术省重点实验室, 江苏常州 213016)

摘要: 基于气云燃爆实验平台, 开展了不同长度弯曲管道内丙烷-空气预混气体燃爆实验测试与分析, 探索管道长度对弯曲管道内可燃气体燃爆特性及爆炸冲击波对管道薄壁加载效应的影响。实验分别采用光电传感器、压力传感器和应变传感器对管道内爆炸参数和管道薄壁的应力应变规律进行了测试, 结果表明, 管道越长, 弯曲段两侧壁面超压和管壁最大应变越大, 压力时程曲线与管道薄壁应变时程曲线具有良好的一致性; 弯管一定程度上激励了火焰加速传播, 火焰传播速度在 90° 拐点处降至最低; 管道长度对管道内火焰燃爆规律的影响是整体的, 管道长度越长, 管内压力和火焰速度越大, 最大爆炸压力出现在管道末端, 冲击波对管壁的加载属于动态加载。

关键词: 管道长度; 丙烷爆炸; 火焰传播速度; 冲击波; 动态响应

中图分类号: TE88 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-131

0 引言

可燃气体输运和使用过程中, 由于泄漏导致火灾和爆炸事故层出不穷, 往往造成重大人员伤亡和财产损失。工业管道系统和可燃气体输送管网中, 常使用一些弯管, 因此, 弯曲管道内可燃气体燃爆规律的研究对于认识事故演化规律和事故防控十分重要。火焰在大曲率弯管中的传播理论最早由 Edwards^[1] 等人提出激波在弯管传播过程中由于受到入射波、反射波、稀疏波的共同作用产生局部熄灭和复燃。王昌建^[2], Xiao^[3] 等人对弯管结构中的爆轰波传播规律研究结果表明: 自内母线到外母线, 爆轰波的强度逐渐增大, 并且爆轰波的胞格尺寸发生了明显变化。Phylaktou^[4], Sato^[5], Thomas^[6] 等人实验研究了 90° 弯管内的火焰传播特性, 结果表明预混火焰到达弯管后, 火焰阵面发生畸变, 对称结构遭到破坏, 火焰阵面在凸壁面逐渐超过凹壁面, 火焰传播在弯管内受到多波相互叠加及湍流的作用出现脉动振荡现象^[7,8]; 弯管内径向产生的强压力梯度会导致反梯度传热现象^[9]。前人对弯管内预混气体燃烧的火焰结构研究较多, 而对进入弯管前的直管段长度对弯管内燃爆规律、弯管管壁在冲击荷载下的响应研究较少。

^{*} 收稿日期: 2018-05-30; 修回日期: 2018-09-29

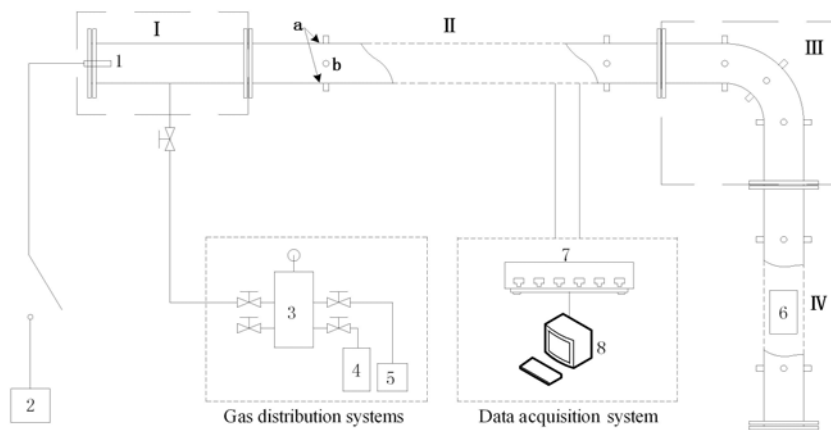
基金项目: 国家重点研发计划重点专项“高温熔融金属作业事故预防与控制技术研究”(2017YFC0805100); 建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题“化工管廊事故多米诺风险评价与应急辅助决策模型开发”(KFKT2015ZD03); 公安部科技项目“危化品灾害事故侦检与应急处置决策、调查技术与装备研究及应用示范”(2016JSYJD04); 天津市科技计划项目“石油化工企业消防监管与事故应急处置决策系统研发”(16ZXCXS00080); 江苏省高校自然科学基金研究重大项目(16KJB620001, 17KJA440001); 国家重点研发计划重点专项“特种消防产品关键技术研究及应用示范”(2017YFC0806600)。

通讯作者: 周宁(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事爆炸与冲击力学、油气爆炸安全、油气储运工程等方面的研究。Email: zhouning@cczu.edu.cn

当管道壁厚 δ 与管道中面直径 D 的比值小于等于 0.1 时,则认为管道为薄壁管道。当爆炸冲击波在管道内传播时,薄壁管道的管壁在爆炸冲击波加载下容易产生较大的塑性变形,发生失效,甚至管壁撕裂引发多次爆炸加剧事故后果^[10-12]。Brown^[13], Jones^[14] 等人研究了内空圆管受冲击的问题,对 4~14.1m/s 低速范围内弹体造成低碳钢管的穿透规律进行了详细阐述。Zhang^[15], Kouretzis^[16], Jamma^[17], 雷文杰^[18] 等人建立了多种弹体正冲击和斜冲击下钢管的破坏模式,并推导了爆炸荷载作用下管道中的应力应变分布函数表达式。管道长度是影响管道振动频率和振幅的重要因素,上述工作对冲击荷载作用下薄壁柱壳的破坏分析具有一定的参考价值,但针对长径比较大的管道或储罐内可燃气体爆炸条件下的管壁动力学响应研究尚不充分。因此,本文对不同管道长度下丙烷-空气预混气体在封闭弯管内燃爆实验测试与分析,探索弯管结构及不同长度管道对火焰传播规律和管道薄壁动态响应的影响,以期为弯管结构的安全设计和强度校核提供理论支撑。

1 实验

气云爆炸实验装置由点火系统(EPT-6 点火能装置、点火电极)、配气系统、可自由组合爆轰实验管道和数据采集系统(各类传感器、动态数据采集仪)等组成(图 1)。实验管道设计压力为 6MPa,管道内径为 125mm。实验采用 EPT-6 点火试验台,点火能量可调,最小点火能量 50mJ,最大点火能量 1000mJ。测试采集系统包括火焰传感器、压力传感器、应变传感器和动态数据采集处理系统。火焰传感器响应时间 $\leq 100\mu\text{s}$,可见光响应光谱为 340~980nm,对火焰阵面到达的时间可进行精确采集。压力传感器为 CY400 型压电式高频响应动态压力传感器,响应迟滞为 0.05FS,应变传感器由灵敏系数为 110 的半导体应变片采用惠斯特电桥连接而成。动态数据采集仪型号为 TST3406,其采集样点每秒可达 10~40MSPS,具有可靠性高、性能稳定的特点。图 1 中激波管的 I、II、III 和 IV 段分别为点火端、水平管道、弯管段和垂直管段。



1. 点火电极; 2. EPT-6 点火能装置; 3. 配气罐; 4. 空压机; 5. 丙烷钢瓶; 6. 可视窗口;
7. 动态数据采集仪; 8. 工作机; a. 压力传感器接口; b. 火焰传感器接口

图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental device

1. The experimental pipe; 2. EPT-6 ignition energy device; 3. Gas distribution tank;
4. Compressor; 5. Propane cylinder; 6. Visual window; 7. Dynamic data acquisition instrument; 8. Computer; a. Pressure sensor interface; b. Flame sensor interface

分别采用 12.8m、11.15m、9.8m、8.8m 和 7.3m 五种长度的封闭管道进行空载实验。实验中仅改变水平管段 II 的管道长度,垂直管段 IV 的长度和传感器位置不做改变,研究不同长度封闭管道内可燃预混气体燃爆特性及管壁动态响应。各实验工况下传感器布置如表 1 所示,其中 F1~F10 为火焰传感器,S11 为应变传感器,P12~P20 为压力传感器。点火能量为 1J,采用体积分压比配置浓度为 4% 的丙烷-空气混合气。

表 1 不同实验工况下传感器设置
Tab. 1 Sensor settings in different experimental conditions

管道总长度 /m	传感器编号	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10
	传感器类型	光电	光电	光电	光电	光电	光电	光电	光电	光电	应变
12.8m	距点火端 距离/m	1.5	3	4.7	5.9	6.65	8	8.3	9.5	10.8	11.8
11.15m		1.5	2.5	3.5	4.75	5.75	6.35	6.65	7.85	9.15	10.15
9.8m		1.5	2.5	3.4	4.2		5	5.3	6.5	7.8	8.8
8.8m		1.15	1.9	2.65	3.4		4	4.3	5.5	6.8	7.8
7.3m		0.9	1.3	1.7	2.1		2.5	2.8	4	5.3	6.3
管道总长度 /m	传感器编号	S11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P20
	传感器类型	应变	压力	压力	压力	压力	压力	压力	压力	压力	压力
12.8m	距点火端 距离/m	8.15	1.5	3	4.45	5.9	6.9	8.15	9.1	10.8	12.3
11.15m		6.5	1.5	2.5	3.5	4.75	5.5	6.5	7.45	9.15	10.65
9.8m		5.15	1.5	2.5	3.4	4.2		5.15	6.1	7.8	9.3
8.8m		4.15	1.15	1.65	2.4	3.15		4.15	5.1	6.8	8.3
7.3m		2.65	0.9	1.3	1.7	2.1		2.65	3.6	5.3	6.8

2 弯管内预混气体燃爆特性分析

2.1 管道结构对火焰传播速度的影响

由图 2 可知,对于总长为 12.8m 的弯管,在 0m 到 8.15m 管段范围,火焰传播速度随传播距离的增加而增大,传播规律与相同条件下的直管类似。火焰在 a 点(拐点)的速度大幅降低,迅速下降至 90.77 m/s,出弯头后火焰速度迅速提升,到 b 点时速度为 212.92m/s,于 c 点达到峰值。气流在转弯处产生反向传播,降低了火焰传播速度;通过弯头之后,火焰出现新一轮加速,且加速度远大于相同条件下直管中的加速度,火焰峰值速度相较于相同长度直管段内火焰的峰值速度提升了 33.57%。实验结果说明,90°弯管对火焰有显著加速作用,火焰传播过弯曲段后,其传播速度明显增大。

2.2 管道长度对弯管火焰传播特性的影响

以 90°弯管的拐点处为原点,绘制不同长度管道内火焰传播速度—距离曲线,如图 3 所示。不同长度管道中,火焰传播速度曲线存在一定的差异性,但在火焰传播的初期阶段,不同长度管道内火焰传播速度相差不大。随着火焰的传播,火焰阵面受扰动而发生皱褶,燃烧反应面积增大,燃烧速度增加,导致火焰传播速度迅速增加,直管段越长,火焰的加速时间越长,火焰速度越大。

火焰传播至弯曲管段,管道结构突变,稳定的激波传播至转弯处,其传播方向发生改变,原来的稳定传播条件遭到破坏,出现燃烧不稳定或弱爆炸的现象。激波在弯管传播过程中,受到入射激波、反射激波、稀疏波及它们在凹壁面的反射波共同作用,导致燃烧反应减缓、火焰传播速度降低,到达弯管拐点处出现最低火焰传播速度。

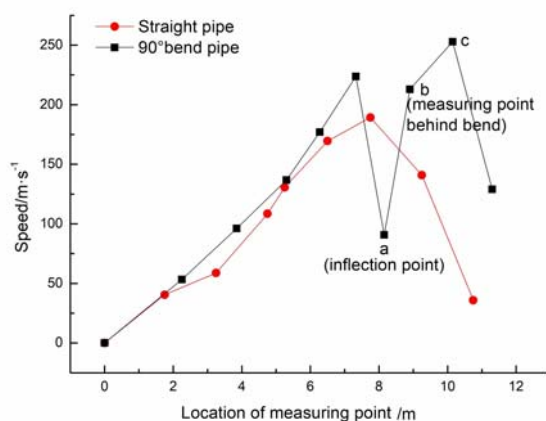


图 2 直管和 90°弯管火焰速度与传播距离的关系
Fig. 2 Relationship between flame speed and distance in straight pipe and 90° bend pipes

火焰通过拐点后,火焰阵面会发生变形、膨胀和拉伸,其表面积迅速增大,燃烧面积激增、燃烧反应加剧,激波加强;在前驱激波作用下形成更大的流场梯度,诱发火焰阵面产生更大程度的弯曲及褶皱,这些正反馈耦合作用导致火焰传播速度急剧增大,火焰出弯头后经过 2m 的加速传播后速度达到峰值。管道总长由 7.3m 增加至 12.8m,火焰最大传播速度增大 30.68%。

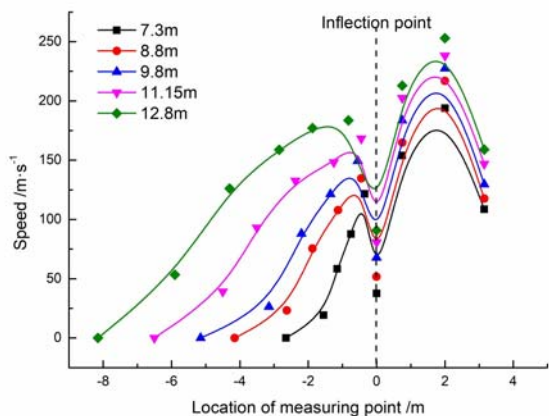


图3 火焰传播速度

Fig. 3 Flame propagation velocity

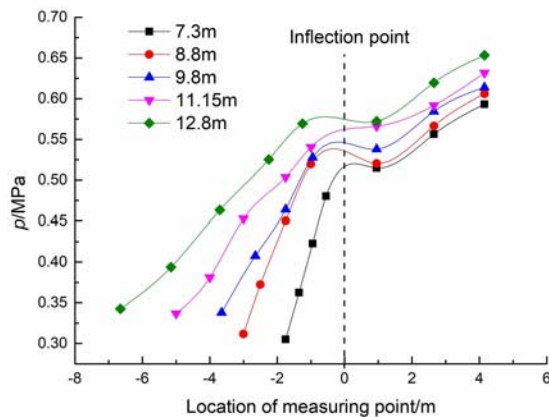


图4 爆炸超压与传播距离的关系

Fig. 4 The relationship between the overpressure and the propagation distance

2.3 管道长度对爆炸超压的影响

图4描述了弯头前后丙烷爆炸压力随传播距离的变化关系,图4中将弯头 90° 拐点作为X轴“0”点,以便探究管内超压变化规律和管道长度对爆炸超压的影响。由图4可知,初始点火阶段,距点火头较近的测点处压力大致相等,随着传播距离的增加,爆炸超压逐渐上升,在进入弯头前达到最大值,且该压力值随管道长度的增加而增大。管道越长,管内参与爆炸反应的可燃气体就越多,火焰有更多时间和空间进行加速和反应,可燃气体湍流度和燃烧剧烈程度更高,造成长管内爆炸压力比短管更高。分析图中数据发现,短管内压力上升速度明显快于长管,管道长度较小时,压力前锋和火焰前锋之间的距离在该段管内传播时也比较小,两者之间的相互作用更大,压力上升更快。

由图4不难看出,爆炸压力在出弯头后0.95m处已恢复至进弯头前水平且略有提升,由此可知,本次实验中冲击波转弯后7.5倍管径的等效距离前就已恢复为平面波^[19,20]。此后,爆炸压力随传播距离的增加不断上升,在管道末端达到峰值。竖直管段同一位置处爆炸超压随管道长度增加而增大,管长由7.3m增至12.8m,最大爆炸压力增加了15.13%。长管内冲击波恢复为平面波后的强度明显强于短管,强度更大的压力波对前方未燃气体压缩加热,来自管道末端的反射激波也对管内流场进行扰动,高温、高湍流度的未燃气体迅速参与反应。管段Ⅱ较长的管道内,竖直管段同一位置处火焰的燃爆剧烈程度更高,燃烧速率更快,反应放热更多,管内压力上升至更高水平。

综上所述,弯头前水平管段(Ⅱ)管长的减小,首先影响该段管道内的火焰加速以及进入弯头反应区内的可燃气体燃爆剧烈程度,进而造成竖直管段内的火焰加速不到更高水平,燃烧区反应激烈程度较小。由此可知,管道长度对管道内火焰燃爆规律的影响是整体的,管道长度越长,管内压力和火焰速度越大。

2.4 管道长度对弯头压力分布的影响

冲击波在管道内传播至弯曲段,凹壁面和凸壁面结构会对冲击波和火焰结构产生不同的作用,影响燃爆过程、火焰传播规律和冲击波对壁面的作用。本文按图5设置测试传感器,研究弯管对冲击波传播过程及管道内压力分布的影响。

图6为不同长度管道下弯曲段各测点凹凸壁面处的峰值压力变化规律。随着火焰传播接近弯曲管段,当燃烧冲击波沿凸形扩展避免绕射时,冲击波受到稀疏波作用强度降低,当燃烧冲击波沿凹形壁面传播时,冲击波受到压缩波作用而加强,造成凹壁面各测点峰值压力均高于对应凸壁面处的压力。弯管

段凹壁面侧的爆炸压力先下降,在拐点处(b点)下降到最小压力,此时的压力约为入口处(a点)压力的91%~96%,冲击波通过b点后压力逐渐回升,至弯管出口(c点)时的压力与弯管入口(a点)时的压力相当。弯管段凸壁面侧的爆炸压力呈现持续下降趋势直至弯管出口,c点压力约为a点压力的73%~78%。这是因为冲击波在弯曲段与壁面产生斜反射,于凹壁面产生的压缩波使能量积聚,由于拐点后流场压力降低,能量释放,对前方未燃区域做功,爆炸更加剧烈,峰值压力迅速上升;凸壁面激波沿凸形壁面绕射,受稀疏波影响,激波强度发生衰减,1号至2号测点稀疏波较强,爆炸峰值压力衰减较快。稀疏波转向后强度减小,对激波的影响进一步减弱,压力衰减变小。冲击波拐弯后向前传播0.4m(d点),该处由弯曲结构产生的稀疏波和压缩波的影响已经消失,压力迅速回升,凹壁面处压力上升速度低于凸壁面,管道越长,压力恢复速度越快。

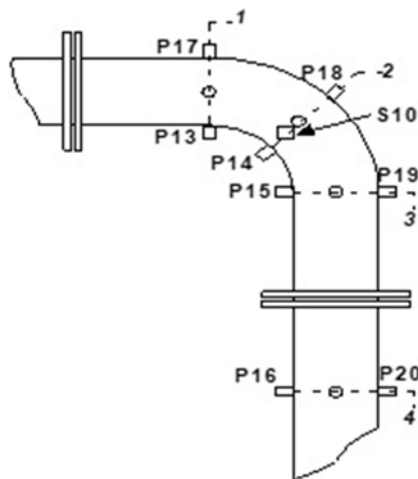


图5 弯曲段传感器布置图

Fig. 5 Sensors arrangement on bend section

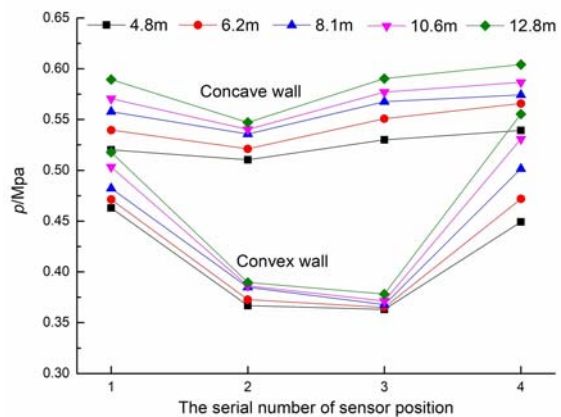


图6 不同长度管道弯曲段管壁峰值压力

Fig. 6 Peak pressure on bend section of different pipe lengths

3 内载冲击波作用下管道薄壁动力学响应分析

3.1 弯曲段管道薄壁应力应变特性分析

为研究不同长度管道内弯曲段气体燃爆过程中管壁动态规律,选取90°转角处应变传感器所测信号进行分析,并与同一位置处压力信号进行对比。图7为不同长度管道弯曲段90°拐角处压力波传播与管壁应变关系图。

图7中不同长度管道的弯管拐点处的压力信号与应变信号呈现较好的一致性。以12.8m弯管为例,管壁环向应变是由于前驱冲击波传播至弯曲段,管道薄壁在冲击荷载下产生突跃的周向应力,从而使管道薄壁发生动态应变。图中红色框标识了前驱冲击波压力与管道薄壁动态应变的对应关系,前驱冲击波压力在弯曲段发生突跃,管道环向膨胀增强,应变相应地产生突变。由于管道为封闭管道,管道末端产生的来回反射激波对燃烧反应产生持续的正激励作用,冲击压力不断升高,管壁应变持续增大;同时弯曲段外侧壁面火焰受压缩波影响,拐角处产生的横波在上下壁面来回反射,逐次加载上下壁面,产生较大的环向应变。随着燃烧反应的结束,激波在来回反射的过程中不断衰减,管壁应变也最终达到稳定状态。

由表2可知,管道薄壁的应变随管道长度的增加而增大,管道内前驱冲击波的压力约为来回反射叠加后峰值压力的1/2,满足刚壁反射效应。分析管壁应力与应变关系,得到本实验条件下管道内冲击波压力与管道薄壁应变存在 $\epsilon=0.01672p^3-0.01365p^2+0.00372p$ 关系,峰值压力与管壁应变存在 $\epsilon=0.0081p-0.0155p^2+0.0099p^3-0.0014$ 关系。对于狭长空间结构内的气云爆炸,空间长度与爆炸场作用下结构的响应有较大的影响,工程设计时应考虑采取抗爆或泄爆措施。

3.2 管道薄壁应变率分析

为探索拐点处管道薄壁加载特性,对0~48.83Hz和48.83~97.66Hz低频带内的主体应变一阶求

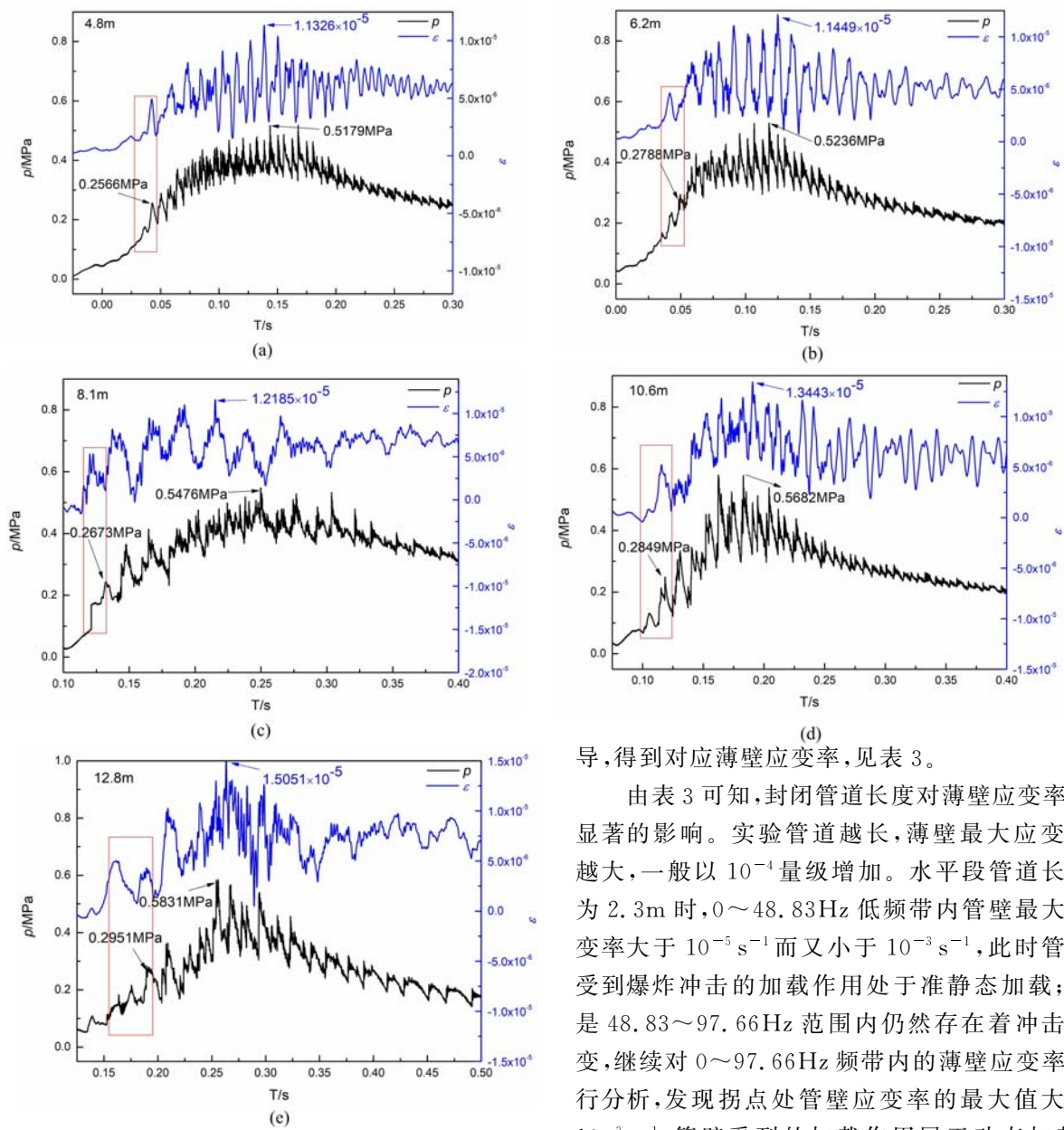


图7 不同长度管道弯曲段90°拐角处压力与管壁应变

Fig. 7 The pressure and shock strain at the 90° bend of the pipe with different length

导,得到对应薄壁应变率,见表3。

由表3可知,封闭管道长度对薄壁应变率有显著的影响。实验管道越长,薄壁最大应变率越大,一般以 10^{-4} 量级增加。水平段管道长度为2.3m时,0~48.83Hz低频带内管壁最大应变率大于 $10^{-5} s^{-1}$ 而又小于 $10^{-3} s^{-1}$,此时管壁受到爆炸冲击的加载作用处于准静态加载;但是48.83~97.66Hz范围内仍然存在着冲击应变,继续对0~97.66Hz频带内的薄壁应变率进行分析,发现拐点处管壁应变率的最大值大于 $10^{-3} s^{-1}$,管壁受到的加载作用属于动态加载。由于不同长度管道管壁应变率在97.66~781.25Hz频带内均大于 $10^{-3} s^{-1}$,这里便不在表中罗列具体数据。

表2 管道薄壁的应力应变值

Tab. 2 The stress and strain of thin-walled pipeline

水平段管道长度/m	先驱冲击波压力/MPa	管壁应变	反射叠加后的峰值压力/MPa	管壁应变
2.3	0.2566	4.6441×10^{-6}	0.5179	1.1326×10^{-5}
3.8	0.2788	4.8987×10^{-6}	0.5236	1.1449×10^{-5}
4.8	0.2673	4.8013×10^{-6}	0.5476	1.2185×10^{-5}
6.15	0.2849	4.9971×10^{-6}	0.5682	1.3443×10^{-5}
7.8	0.2951	5.2503×10^{-6}	0.5831	1.5051×10^{-5}

表3 不同长度管道90°拐点处应变率
Tab.3 Strain rate at 90° inflection point of pipe with different length

水平段管道长度/m	频带/Hz	0~48.83	48.83~97.66
2.3	最大应变率 $\dot{\epsilon}/(s^{-1})$	5.47×10^{-4}	3.95×10^{-3}
3.8		1.01×10^{-3}	4.16×10^{-3}
4.8		2.24×10^{-3}	5.82×10^{-3}
6.15		3.62×10^{-3}	7.85×10^{-3}
7.8		5.17×10^{-3}	10.18×10^{-3}

4 结论

通过开展不同管长的90°弯管内丙烷-空气预混气体燃爆特性,及爆炸冲击波对管道薄壁的加载作用的实验测试,得到以下结论:

(1) 弯管在一定程度上对火焰加速起到激励作用,火焰进入弯管后,传播速度在多波综合作用下产生衰减,拐点处出现最低火焰传播速度。出弯管后,火焰经过2m的加速传播,速度达到峰值。

(2) 管道长度对丙烷燃爆的影响是整体的,管道越长,火焰传播速度和爆炸超压越大,管长由7.3m增至12.8m,最大火焰传播速度增加30.6%,最大爆炸压力出现在管道末端。

(3) 弯曲段两侧壁面爆炸超压和管壁最大应变随管道长度增加而增大,凹壁面产生压缩波作用使该侧各测点峰值压力均高于凸壁面对应位置峰值压力。各测点峰值压力沿凹壁面先下降后上升,沿凸壁面则呈现下降趋势。

(4) 管壁应变信号和压力波信号呈现较好的一致性。弯曲段管壁的最大环向应变是由拐角处产生的横波上下反射,以及反射激波在管道两侧来回反射的共同叠加作用所引起的,冲击波对管壁的加载属于动态加载。

参考文献:

- [1] Edwards D H, Thomas G O. The diffraction of detonation waves in channels with 90° bends[J]. *Combustions*, 1983, 3(1):65-67.
- [2] 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 of the propagation of gas detonation in a semicircular bend[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(5):448-453 (in Chinese))
- [3] Xiao H, He X, Wang Q, et al. Experimental and numerical study of premixed flame propagation in a closed duct with a 90 curved section[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 66:818-822.
- [4] Phylaktou H, Foley M, Andrews G E. Explosion enhancement through a 90° curved bend[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1993, 6(1):21-29.
- [5] Sato K, Sakai Y, Chiga M. Flame propagation along 90° bend in an open duct[J]. *Symposium on Combustion*, 1996, 26(1):931-937.
- [6] Thomas G O, Williams R L. Detonation interaction with wedges and bends[J]. *Shock Waves*, 2002, 11:481-492.
- [7] Tagawa M, Matsubara F, Ohta Y. Heat transfer characteristics of a non-premixed turbulent flame formed in a curved rectangular duct[J]. *Combust Flame*, 2002, 129:151-163.
- [8] He X, Chen S. Flame behaviors of propane/air premixed flame propagation in a closed rectangular duct with a 90-deg bend[C]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2008:7126-71260P-7.
- [9] Kris C, Going J E, Bill G. Flame propagation in industrial scale piping[J]. *Process Safety Progress*, 2010, 20(4):286-294.
- [10] Bjerketvedt D, Bakke J R, Wingerden K V. Gas explosion handbook[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1997, 52(1):1-150.
- [11] Lunn G A, Holbrow P, Andrews S, et al. Dust explosions in totally enclosed interconnected vessel systems[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1996, 9(1):45-48.

- [12] Uchida M, Suda T, Fujimori T, et al. Pressure loading of detonation waves through 90-degree bend in high pressure $H_2-O_2-N_2$ mixtures[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(2):2327–2333.
- [13] Brown M, Jacobs M, Mihsein M. Impact and perforation of mild steel pipes by low velocity missile[C]//In Structures Under Shock and Impact II. Ed. Bulson P S, Computational Mechanics Publications, Southampton and Boston and Thomas Telford, London, 1992:39–50.
- [14] Jones N, Birch S E, Birch R S, et al. Experimental study on the lateral impact of fully clamped mild steel pipes [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E:Journal of Process Mechanical Engineering, 1992, 206(25):111–127.
- [15] Zhang T G, Stronge W J. Rupture of thin ductile tubes by oblique impact of blunt missiles: experiments[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(7):571–587.
- [16] Kouretzis G P, Bouckovalas G D, Gantes C J. Analytical calculation of blast-induced strains to buried pipelines [J]. International Journal of Impact Engineering, 2007, 34(10):1683–1704.
- [17] Jama H H, Nurick G N, Bambach M R, et al. Steel square hollow sections subjected to transverse blast loads[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53(53):109–122.
- [18] 雷文杰, 李绍泉, 商鹏, 等. 微震响应煤与瓦斯突出模拟试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1):161–166 (LEI Wenjie, LI Shaoquan, SHANG Peng, et al. Coal and gas outburst simulation experiment reacted by microseismic monitoring[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2014, 31(1):161–166 (in Chinese))
- [19] 覃彬, 张奇, 向聪, 等. 矿山巷道转弯处冲击波紊流区的数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2008(10):16–20 (QIN Bin, ZHANG Qi, XIANG Cong, et al. Research on the shock wave turbulence area inside the bend tunnel by numerical simulation[J]. Metal Mine, 2008(10):16–20 (in Chinese))
- [20] 王云艳, 覃彬, 张奇. 爆炸空气冲击波在巷道转弯处的传播特性[J]. 安全与环境学报, 2007, 7(3):105–106 (WANG Yunyan, QIN Bin, ZHANG Qi, et al. Characteristic propagation features of the explosion air shock wave at the corner of tunnel[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 7(3):105–106 (in Chinese))

Study on the effects of curved pipeline length on the explosion law of combustible premixed gas and the dynamic response of thin wall

CHEN Bing¹, SHI Xun-xian¹, ZHANG Guo-wen², WANG Wen-xiu²,
YU Qiao-yan², ZHAO Hui-jun², YUAN Xiong-jun², ZHOU Ning²

(1. COFCO Trading LTD, Beijing 100005, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Oil & Gas Storage and Transportation Technology, Changzhou University, Changzhou 213016, Jiangsu, China)

Abstract: Based on the gas cloud deflagration experimental platform, the propane-air premixed gas blasting experiments inside curved pipelines of different length are carried out. The curved pipeline length effect on the combustible gas explosion in pipeline and the explosion shock wave effect on thin-walled pipeline loading are investigated. Photoelectric, pressure and strain sensors are used to evaluate the explosion parameters within the pipeline and the stress-strain relation of the thin-walled pipeline, respectively. The results indicate that a longer pipeline corresponds to the higher wall overpressure and the bigger maximum strain of the pipeline wall. The pressure-time curve is in good agreement with the thin-walled pipeline strain-time history curve. The curved shape of the pipeline accelerates the flame propagation to a certain extent, and the flame propagation rate decreases to the minimum value at the 90 degree inflexion. The pipeline length has global effects on the flame deflagration within the pipeline. A longer pipeline results in higher pressure and flame speed. The maximum explosion pressure appears at the end of the pipeline, and the loading of the shock wave to the pipeline wall belongs to the dynamic loading.

Keywords: pipeline length; propane explosion; flame propagation velocity; shock wave; dynamic response