

文章编号: 1001-4888(2002)04-0438-06

# 可燃气体非稳定爆轰波通过 90° 圆弯管传播特性的实验研究\*

夏昌敬<sup>1</sup>, 周凯元<sup>1</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>, 董永香<sup>2</sup>, 年伟民<sup>1</sup>, 王汉良<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 工程力学和机械工程系, 安徽合肥 230026;

2. 中科院力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 对丙烷- 氧气- 空气的混合气体非稳定爆轰波通过 90° 圆弯管传播特性的变化进行了初步的实验研究。同时实验研究了预混气体的初始浓度和初始压力对非稳定爆轰波经过弯管前后传播特性的影响。实验结果表明, 可燃气体非稳定爆轰波经过 90° 圆弯管后传播速度和压力与直管中相比有了显著地提高。这一研究结果对于工业上安全使用管道阻火器具有重要的实际意义。

**关键词:** 非稳定爆轰波; 90° 圆弯管; 传播特性; 管道阻火器

**中图分类号:** O 381 **文献标识码:** A

## 1 引言

在火炬系统、加热炉系统和油气回收系统的管道网路中, 都存在着各种各样的弯管。气体爆轰波通过弯管时, 其传播特性势必发生很大变化。尤其是爆燃火焰或非稳定爆轰火焰经过弯管时其传播速度的变化已引起了人们的关注。因为在工业上广泛使用管道阻火器来阻止非正常爆燃火焰或爆轰火焰在输运可燃气体的管道网路中传播, 遏止爆炸事故的发生, 保护工业设备的安全。每一台管道阻火器的主要性能是其额定阻火速度, 当管道中的爆燃火焰或爆轰火焰传播速度超过这一额定值时, 该阻火器就可能失去其阻火能力, 这是非常危险的。因此根据实际情况, 选择相应规格的管道阻火器来阻止非正常爆燃火焰或爆轰火焰通过管道的回火就显得非常重要了。管道阻火器的选择依据是非正常爆燃火焰或爆轰火焰通过管道的回火速度。目前国内有关可燃气体爆燃火焰及爆轰波通过弯管传播特性的研究尚未见详细报道。国外有关这方面的研究公开报道的也比较少。因此工业上面临着这样一个急需解决的难题, 即非稳定气体爆轰波经过带有弯管的管道系统, 应如何选择管道阻火器的规格。而且系统地研究非稳定气

\* 收稿日期: 2002-05-11; 修订日期: 2002-11-22

作者简介: 夏昌敬(1975- ), 中国科学技术大学工程力学博士, 从事爆炸和工业安全等方面的研究工作。

体爆轰波经过弯管后爆轰参数的变化, 不仅有助于更好地了解爆轰波的绕射现象, 也对工业上安全使用管道阻火器具有重要的参考价值

气体爆燃火焰在一维等截面直管道中的加速运动及其机理已经进行了广泛的研究<sup>[1-3]</sup>。研究表明, 管道内有障碍物时, 显著增加了爆燃火焰的加速度, 在较短的距离内可获得较大的火焰传播速度。相对直管而言, 气体爆轰波经过弯管时的传播特性则复杂得多。Edwards 等人<sup>[4]</sup>1979 年研究了平面稳定爆轰波在管道面积突然变化处的绕射问题。他指出在临界和超临界情况下, 发生爆轰波阵面的重新点火现象, 并提出了爆轰波阵面的重新点火的临界条件。Bartma 等人<sup>[5]</sup>1986 年探讨了平面稳定爆轰波在不同角度的凸壁处的绕射, 他指出几何形状对爆轰波绕射的影响是主要因素。Edwards 等人<sup>[6]</sup>1983 年对稳定爆轰波在 90° 弯管道中绕射进行了实验研究。利用烟迹技术初步分析了爆轰波在弯管凹壁面附近发生马赫反射而形成超驱动现象, 在凸壁面附近由于膨胀波的作用造成爆轰波的局部熄灭, 继而由于横波的相互作用重新点火, 最终恢复稳定爆轰。

本文实验研究了丙烷-氧气-空气的预混气体非稳定爆轰波通过 90° 圆弯管时传播速度和压力的变化。同时研究了丙烷质量百分比浓度和混合气体初始压力对非稳定爆轰波通过弯管前后传播特性的影响。

## 2 实验装置

可燃气体爆轰实验是在内径为 50mm 的激波管中进行的。实验装置如图 1 所示。激波管全长为 14m, 在离点火端 6.5m 处安装 90° 圆弯管。弯管的内径为 50mm, 曲率半径为 70mm。弯管后激波管长 7.5m。在弯管前 0.1m 和弯管后 0.1m 处分别安装火焰传感器和压力传感器。

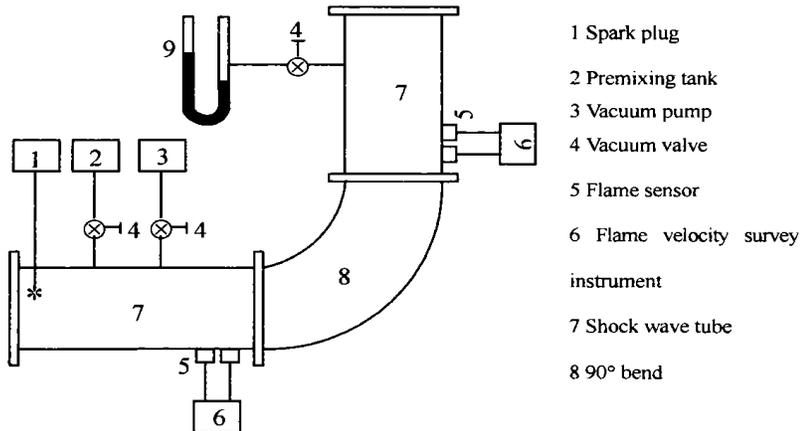


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

采用静态分压配气法在配气罐中进行丙烷、氧气和空气的混合。丙烷、氧气和空气按化学当量比进行配气, 混合 6 小时后使用。这种配气方法混合精度高, 降低了多次重复实验时由于配气成分偏差造成的实验误差。实验时采用电火花点火, 火花塞设置在激波管端部, 点火能量是 6.25 J。实验使用的 KD 5003 电荷放大器是一种输出电压与输入电荷量成正比的低噪音电荷放大

器 其输出灵敏度是  $\text{mV}/\text{Unit}$ , 精度误差小于  $\pm 1\%$ . 实验使用的 DTS 瞬态波形存储器是一个 8 通道同步采集, 采样速率为  $40\text{M}$  样点/秒, 分辨率为  $12\text{bit}$  的存储仪 实验时, 点火端和管道尾端均是封闭的

实验时, 首先将整个管道抽成真空, 再将预混气体注入管内, 并使其达到一定的初始压力 在起爆端用电火花点火, 使其引燃爆炸气体, 形成爆轰波 由压力传感器和火焰传感器分别采集爆轰波压力波形的数据和爆轰波到达的时间, 经 KD 5003 电荷放大器后输入到 DTS 瞬态波形存储器检测, 读取和存储 根据爆轰波到达的时间以及两相邻火焰传感器之间的距离可以计算出可燃气体非稳定爆轰波在进入弯管时和离开弯管时的速度

### 3 实验结果及分析

预混气体的爆轰实验是在如图 1 所示管道中进行, 激波管中预混气体的初始压力为  $0.101\text{MPa}$  实验结果如图 2 和图 3 所示, 每一个实验点都是多次重复实验的算术平均值 由图 2 和图 3 可知, 可燃气体非稳定爆轰波经过  $90^\circ$  弯管后其传播速度和压力有一个显著的增加 从图 2 中可以看出, 气体非稳定爆轰波经过  $90^\circ$  弯管有一个明显的加速过程,  $90^\circ$  弯管后非稳定爆轰波传播速度比弯管前增加幅度超过了  $38\%$ . 在丙烷质量百分比浓度为  $6.98\%$  时, 非稳定爆轰波传播速度由弯管前的  $1712\text{m/s}$  增加到弯管后的  $2688\text{m/s}$ , 约增加  $57\%$ .

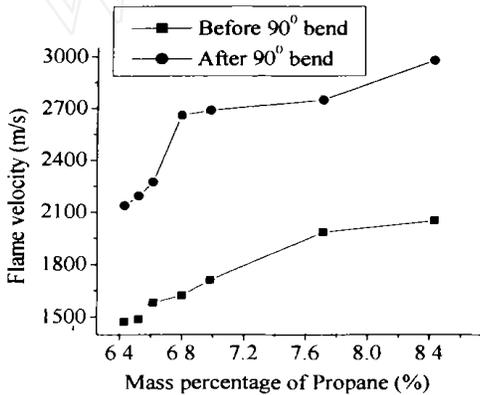


图 2  $90^\circ$  弯管前后非稳定爆轰波火焰面传播速度与丙烷质量百分比浓度的关系

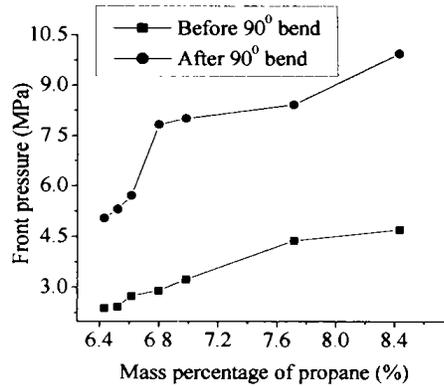


图 3  $90^\circ$  弯管前后非稳定爆轰波前驱激波阵面压力与丙烷质量百分比浓度的关系

g 2 Flame velocity of unsteady detonation before and g 3 Front pressure of unsteady detonation before and after  $90^\circ$  bend versus mass percentage of propane after  $90^\circ$  bend versus mass percentage of propane

从图 3 中可以看出,  $90^\circ$  弯管后非稳定爆轰波压力比弯管前也有明显地增加, 弯管后非稳定爆轰波压力比弯管前增加幅度超过  $92\%$ . 这说明非稳定爆轰波通过  $90^\circ$  弯管后, 其强度显著地提高了. 从图 3 中还可以看出, 在丙烷质量百分比浓度为  $6.98\%$  时, 非稳定爆轰波压力从弯管前  $3.238\text{MPa}$  增加到弯管后  $8.008\text{MPa}$ , 约增加  $147\%$ .

为了研究非稳定爆轰波经过弯管传播速度和压力与直管中相比有何差别, 我们把通过  $90^\circ$  弯管前后非稳定爆轰波传播速度和压力与直管中实验结果进行了对比 实验时我们用等内径等

中心轴线长度的直管来代替 90° 弯管进行可燃气体的爆轰实验, 实验条件与 90° 弯管的实验条件完全相同。实验时在与 90° 弯管前后位置相同的地方测量该替代直管前后非稳定爆轰波的传播速度和压力, 实验结果如表 1 所示。

表 1 90° 弯管前后非稳定爆轰波传播速度和压力与直管中对比

Table 1 Comparison of detonation velocity and pressure before and after 90° bend with straight tube

序号	非稳定爆轰波在 90° 弯管中传播				非稳定爆轰波在直管中传播			
	弯管前 0.1m		弯管后 0.1m		替代直管前 0.1m		替代直管后 0.1m	
	速度 (m/s)	压力 (MPa)	速度 (m/s)	压力 (MPa)	速度 (m/s)	压力 (MPa)	速度 (m/s)	压力 (MPa)
1	906	0.89	1736	3.317	912	0.90	1330	1.941
2	977	1.038	2039	4.624	977	1.039	1359	2.027
3	1087	1.290	2273	5.699	1059	1.224	1453	2.319
4	1106	1.335	2000	4.405	1116	1.362	1437	2.269
5	1147	1.440	2193	5.304	1096	1.313	1359	2.028
6	1168	1.493	2232	5.498	1168	1.490	1488	2.434
7	1202	1.582	1838	3.721	1050	1.203	1453	2.315
8	1582	2.754	2273	5.703	1582	2.756	2049	4.631
9	1712	3.238	2688	8.008	1506	2.502	1953	4.219

由表 1 可以看出, 在非稳定气体爆轰波到达弯管前 0.1m 或替代直管前 0.1m 处传播速度和压力基本相等的情况下, 90° 弯管后非稳定爆轰波传播速度和压力增加程度都明显高于替代直管后的非稳定爆轰波传播速度和压力。因此弯管部分对可燃气体非稳定爆轰波的加速效果非常明显。这可能是因为弯管的存在, 破坏了原来管道中的层流火焰, 加速湍流火焰的形成。因为当非稳定爆轰波传播到弯管时, 在弯管的凹壁面不断地发生马赫反射, 使凹壁面附近非稳定爆轰波强度不断增加。而在凸壁面附近, 由于壁面产生的稀疏波的作用可能造成爆轰波的部分熄灭。由于横波的作用, 重新点燃凸壁侧熄灭区的未燃介质, 造成局部的子爆炸现象。非稳定爆轰波继续沿弯管向下游传播, 在弯管出口处形成超驱动爆轰, 因而非稳定爆轰波的传播速度和压力都大大地提高。根据这一实验结果, 在有弯管存在的管道系统中, 不能简单地依据爆轰火焰在直管中的传播速度来选择阻火器的规格, 应考虑弯管存在对非正常爆燃火焰或非稳定爆轰火焰传播速度的影响, 从而选择合适的阻火器, 达到阻止火焰回火的目的。

### 3.1 初始浓度的影响

从图 2 和图 3 可知, 90° 弯管前后可燃混合气体非稳定爆轰波传播速度和压力随着丙烷质量百分比浓度的增加而增加。由图 2 可以看出, 当丙烷的质量百分比浓度从 6.43% 增加到 8.43% 时, 在 90° 弯管前, 非稳定爆轰波传播速度由 1471m/s 增加到 2049m/s, 约增加 39%。而在 90° 弯管后, 非稳定爆轰波传播速度由 2137m/s 增加到 2976m/s, 约增加 39%。由图 3 可以看出, 当丙烷的质量百分比浓度从 6.43% 增加到 8.43% 时, 在 90° 弯管前, 非稳定爆轰波压力由 2.375MPa

增加到 4.70 MPa, 约增加 98%。而在 90° 弯管后, 非稳定爆轰波压力由 5.031 MPa 增加到 9.939 MPa, 约增加 97.6%。可见丙烷的质量百分比浓度对非稳定爆轰波通过弯管前后传播速度和压力的影响很显著。这与直管中非稳定爆轰波传播规律随着可燃气体百分比浓度的变化是一致的。这是由于随着丙烷质量百分比浓度的增加, 非稳定爆轰波反应区的反应速率增加, 支持非稳定爆轰波传播所需要的化学反应热能释放率也相应地增加, 从而增加了非稳定爆轰波的传播速度和压力。

### 3.2 初始压力的影响

由图 4 和图 5 可以看出, 90° 弯管前后非稳定爆轰波传播速度和压力随着预混气体初始压力的增加而增加。从图 4 可知, 当预混气体的初始压力由 0.06 MPa 增加到 0.10 MPa 时, 在弯管前, 非稳定爆轰波传播速度由 791 m/s 增加到 1712 m/s, 约增加 116%。而在弯管后, 非稳定爆轰波传播速度由 1344 m/s 增加到 2688 m/s, 增加一倍。由图 5 可知, 当预混气体的初始压力由 0.06 MPa 增加到 0.10 MPa 时, 弯管前非稳定爆轰波压力由 0.41 MPa 增加到 3.23 MPa, 几乎增加七倍。而弯管后非稳定爆轰波压力由 1.20 MPa 增加到 8.00 MPa, 约增加 567%。可见弯管前后非稳定爆轰波传播速度和压力受预混合气体初始压力的影响很大。90° 弯管前后非稳定爆轰波传播特性随着可燃混合气体的初始压力的变化关系可从预混气体的密度来解释。随着预混气体初始压力的增加, 其初始密度也就相应地增加了, 从而增加了丙烷的量, 也就相应地增加了支持非稳定爆轰波传播所需要的化学反应热能, 最终增加了非稳定爆轰波的传播速度和压力。

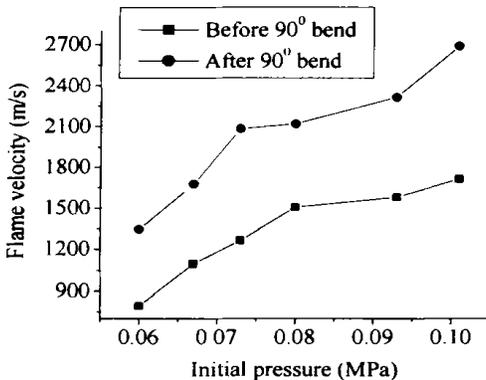


图 4 预混气体初始压力对 90° 弯管前后非稳定爆轰波火焰面传播速度的影响

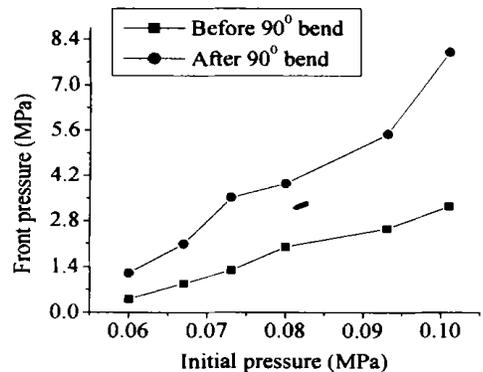


图 5 预混气体初始压力对 90° 弯管前后非稳定爆轰波前驱激波阵面压力的影响

ig 4 The influence of initial pressure on flame velocity g 5 The influence of initial pressure on front pressure of unsteady detonation before and after 90° bend of unsteady detonation before and after 90° bend

## 4 结论

(1) 可燃气体非稳定爆轰波经过 90° 弯管后, 其传播速度和压力都明显地增加。非稳定爆轰波传播速度增加程度超过 38%, 非稳定爆轰波压力增加程度超过 92%。

(2) 可燃气体非稳定爆轰波经过 90° 弯管后, 其传播速度和压力都比直管有很大程度地提高。这一结论对工业使用阻火器具有指导意义。

(3) 90°弯管前后可燃气体非稳定爆轰波的传播速度和压力随着丙烷质量百分比浓度的增加而增加

(4) 90°弯管前后可燃气体非稳定爆轰波的传播速度和压力随着混合气体初始压力的增加而增加

#### 参考文献:

- [1] Rogowski ZW. Manual for Testing Flame Arresters. Borehamwood UK: Crown Copyright, Building Research Establishment, 1987.
- [2] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 137.
- [3] Lee J H, Knystautus R and Chan C K. Turbulent Flame Propagation in Obstacle-filled Tubes. 20th Symposium (International) on Combustion. Pittsburgh: the Combustion Institute, 1984, 663.
- [4] Edwards D H, Thomas G O. The Diffraction of a Planar Detonation Wave at an Abrupt Area Change. Fluid Mech. 1979, 95 (1): 79.
- [5] Bartma F, Schroder K. The Diffraction of a Plane Detonation Wave at an Convex Corner. Combust Flame. 1986, 66: 237.
- [6] Edwards D H, Thomas G O. The Diffraction of Detonation Waves in Channels with 90° Bends. Combustionis. 1983, 3 (1): 65.

## Experimental Study on the Propagation Characteristics of Unsteady Gaseous Detonation through 90° Round Bend

XIA Chang-jing<sup>1</sup>, ZHOU Kai-yuan<sup>1</sup>, SHEN Zhao-wu<sup>1</sup>,  
DONG Yong-xiang<sup>2</sup>, NIAN Weimin<sup>1</sup>, WANG Hang-liang<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;

2. LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

**Abstract:** Propagation characteristics of unsteady gaseous detonation in propane-oxygen-air mixtures through 90° bend were studied by experiments. The influence of initial pressure and mass percentage of combustible gas on the detonation parameters before 90° bend and after 90° bend were also investigated. The experimental results indicate that comparing with the fact in straight tube, the velocity and the pressure of unsteady detonation after 90° bend are significantly increased. This conclusion is of great importance for the safe use of flame arresters.

**Key words:** unsteady detonation; 90° round bend; propagation characteristics; flame arresters