

文章编号: 1001-1455(2003)05-0448-00

# 气相爆轰波在半圆形弯管中 传播现象的实验研究\*

王昌建, 徐胜利, 郭长铭

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

摘要: 对气相( $2\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$  系统)爆轰波在半圆形弯管中的传播现象进行实验研究。用烟迹膜记录了弯管中爆轰波的胞格结构, 采用压电传感器测量了沿弯管内外母线指定点的压力时间曲线, 得到了爆轰波沿弯管内、外母线的平均速度和胞格尺寸的变化。结果表明: 当平面爆轰波进入弯管后, 受壁面的几何形状作用, 诱导激波阵面发生弯曲。沿诱导激波阵面, 自内母线到外母线方向, 激波强度逐渐增大。同时, 爆轰波后的化学反应区也受到影响, 胞格尺寸发生较明显的变化。在本文条件下, 当初压  $p_0 \geq 8.00\text{kPa}$ , 受扰动的爆轰波在弯管出口下游仍恢复为强度不变的稳定爆轰。胞格记录的三波点迹线表明: 受扰动的爆轰波在出口段发生了马赫反射。实验结果还表明: 当  $p_0$  降至  $5.33\text{kPa}$ , 平面稳定爆轰波经过半圆形弯管后, 其强度发生衰减并直至出现熄灭。

关键词: 诱导激波 气相爆轰波 胞格结构 马赫反射

中图分类号: O381

国标学科代码: 130°3510

文献标志码: A

## 1 引 言

气相爆轰波传播特性的实验研究主要在直管中进行, 相关内容包括诱导激波、化学反应区和障碍物之间的相互作用<sup>[1~3]</sup>, 以及在突变截面内爆轰波衰减、熄灭及二次点火<sup>[4~6]</sup>等问题。在可燃气体输送管道中, 常常会有弯管等连接段。当发生意外爆炸事故时, 需要认识爆轰波在弯管中传播的新现象, 搞清诱导激波、化学反应区和几何壁面之间相互作用机理, 这对抑制事故的发生也是有意义的。D. H. Edwards 等<sup>[7]</sup>认为: 气相爆轰波在  $90^\circ$  弯管中传播时, 会产生诱导激波与化学反应区的分离, 爆轰波衰减后可恢复稳定, 弯管内局部压力变化范围为  $(0.5 \sim 2.5)p_{CJ}$ 。王汉良等<sup>[8]</sup>分别采用火焰探测器和压力传感器研究了气相爆轰波在  $90^\circ$  弯管中的传播特性。结果表明: 在凸壁侧产生局部火焰熄灭区, 在凹侧产生高压区, 高压区能重新点燃未燃介质, 并产生较大的速度增量。

在弯管中, 依赖压力时间曲线无法准确判断爆轰是否发生。因此, 本文中以南圆形弯管为研究对象, 通过胞格记录和爆轰波速度测量, 认识气相爆轰波在弯曲管道中传播的新现象和物理机制。

## 2 实验装置及测试系统

实验研究是在横截面为  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$  方形激波管中进行。如图 1 所示, 实验段入口(下方)和  $6.2\text{m}$  的激波管直段出口相连, 稳定爆轰波由直段产生。采用高压放电点火, 实验气体为  $75\% (2\text{H}_2 + \text{O}_2) + 25\% \text{Ar}$ , 加入氩气有助于胞格的形成。压电传感器分布在  $1, 2, \dots, 11, 3', 4', \dots, 11'$  测点。除  $1, 2$  点外, 同段管沿内外母线相邻测点的间隔角度为  $15^\circ$ , 对应的内、外间隔弧长分别为  $132.2\text{mm}$  和  $142.7\text{mm}$ 。压力信号经电荷放大器放大后送入多通道瞬态波形存储器记录。胞格记录采用熏烟铝板

\* 收稿日期: 2002-11-18; 修回日期: 2003-02-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(10172083); 国家自然科学基金委员会和中国工程物理研究院联合基金项目(10076018)

作者简介: 王昌建(1975—), 男, 博士研究生。

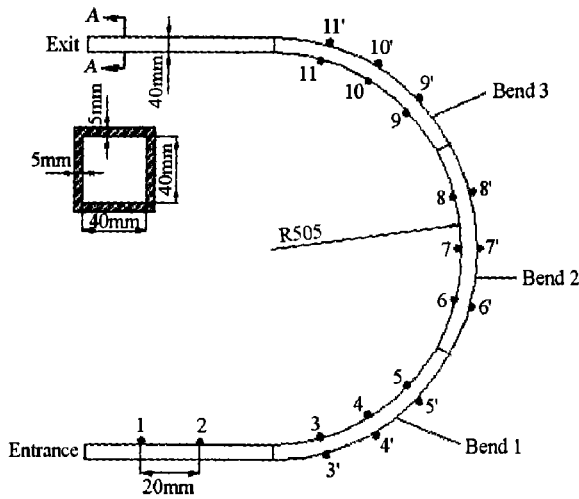


图 1 实验段示意图

Fig.1 Scheme of test section

作为烟迹片,为确保清晰度,烟迹片上的胞格结构采用数码相机分段拍摄后拼接。

### 3 爆轰波在半圆形弯管中传播机理

爆轰波在半圆形弯管中传播时,存在诱导激波、化学反应区和几何壁面之间的相互作用。

由激波 Whitham 理论可知:当激波沿凸形扩张壁面绕射,受稀疏波作用,激波强度会衰减;当激波沿凹形压缩壁面传播,受到压缩波作用,激波强度会加强。

图 2 给出了本文条件下爆轰波在半圆形弯管中传播的波系演化图。图 2(a)表明,当稳定爆轰波刚进入半圆形弯管时,沿内母线一侧(III区),诱导激波受稀疏波的作用,其强度衰减,波后压力、温度也降低,因此化学反应速率降低,诱导区变宽,胞格尺寸变大。在外母线一侧(I区),爆轰波刚进入半圆形弯管时,在壁面发生规则反射或马赫反射。反射波(或马赫杆)后压力、温度升高,化学反应速率加快,诱导激波强度增强,胞格尺寸变小。上述作用结果,导致爆轰波沿外母线传播速度大于内母线一侧。本实验条件下,沿过圆弧圆心的同一截面,爆轰波沿外母线传播的距离大于内母线一侧,因此,爆轰波传播内侧领先于外侧。这就是说,受管道几何壁面的影响,爆轰波阵面形状发生了畸变。沿同一时刻的爆轰波阵面,诱导激波的强度自外母线向内母线是逐渐减小的。图 2(b)表明,爆轰波在半圆形弯管中继续传播时,其波后流场(IV区)受到多种波系的作用:(1)爆轰波在外母线压缩壁面的反射激波;(2)内母线壁面的稀疏波;(3)稀疏波在外母线壁面的一次反射波;(4)稀疏波的一次反射波和反射激波在内外壁面的多次反射波。因此,受扰动的爆轰波后压力、密度,特别是温度、化学反应速率等的变化受到多波叠加作用的影响,这将导致诱导激波强度的增强或衰减。在本实验条件下,多波作用结果导致爆轰波沿内、外母线传播速度衰减。图 2(c)表明,当爆轰波传播至半圆形弯管出口时,由于外母线一侧的爆轰波速度大于内母线一侧,爆轰波外侧波阵面在出口段直管中追上并超过内侧波阵面。当内侧波阵面法线与内侧壁夹角大于马赫反射临界角,发生爆轰波马赫反射。马赫杆后的温度迅速升高,化学反应速率加快,又导致爆轰波在内侧壁速度加快。随着马赫杆成长,最终将以稳定爆轰波向前传播。

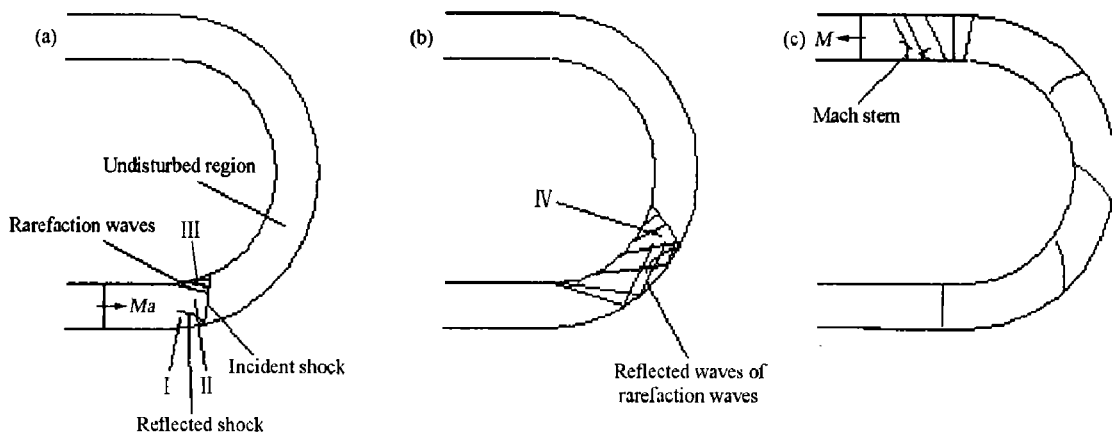


图 2 半圆形弯管内的波系演化

Fig.2 Wave structures in semi-circle bend tube

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 胞格测量

对初压为 5.33、8.00、10.67、13.33、16.00、18.67 kPa 的预混气分别进行了气相爆轰实验。其典型的胞格结构如图 3、图 4 所示,受页面尺寸限制,将对应图 1 入口段、弯管 1、弯管 2、弯管 3 和出口段的胞格结构自上而下拆开摆放,其连接顺序分别  $A_1B_1C_1D_1E_1F_1G_1H_1I_1J_1$  和  $A_2B_2C_2D_2E_2F_2G_2H_2I_2J_2$ 。图 3 表明:(1)当预混气初压大于或等于 10.67kPa 时,胞格变化非常明显。沿内母线一侧胞格尺寸最大,外母线一侧胞格尺寸最小。这说明:爆轰波在半圆形弯管中传播时,其诱导激波强度沿阵面由内至外逐渐升高。受弯曲管道几何壁面的干扰,诱导激波阵面不是平面的,而是弯曲的。当预混气初压为 5.33kPa 和 8.00kPa 时,由于预混气初压较低,在半圆形弯管径向只有一至二个胞格,此时,几何壁面对胞格变化的影响不明显。(2)不同初压预混气形成的爆轰波,在进入半圆形弯管前,胞格尺寸是均匀的,说明已形成了稳定爆轰波;进入半圆形弯管后,爆轰波沿管道轴向传播,胞格尺寸逐渐变大。这说明爆轰波在半圆形弯管中传播,其强度不断衰减。(3)当预混气初压大于或等于 8.00kPa 时,稳定爆轰波经过半圆形弯管后进入出口段直管,胞格逐渐恢复至平衡胞格尺寸,且胞格大小与入口段相同。爆轰亦恢复至稳定爆轰且强度不变。这说明:该实验条件下,半圆形弯管对爆轰波传播的影响是局部的。对于初压为 5.33kPa 的预混气,稳定爆轰波进入半圆形弯管前,其模数(即管道直径或宽度与半胞格宽度之比)为 2(如图 4(a)所示);进入弯管后,爆轰波强度发生衰减;进入第三段时(如图 4(d)所示),其模数为 1,已达到临界爆轰(或螺旋爆轰)。在出口段进一步衰减,爆轰波熄灭(衰减为爆燃波)且未发生二次点火(见图 4(e))。从图 3(e)还看出,在出口段的爆轰波胞格结构有一条明显的分界线,在分界线两侧,胞格尺寸大小、形状和数目明显不同,下侧胞格尺寸明显小于上侧,该分界线即是三波点迹线<sup>[1]</sup>。这说明:爆轰波由半圆形弯管进入出口段,弯曲的波阵面发生了马赫反射。

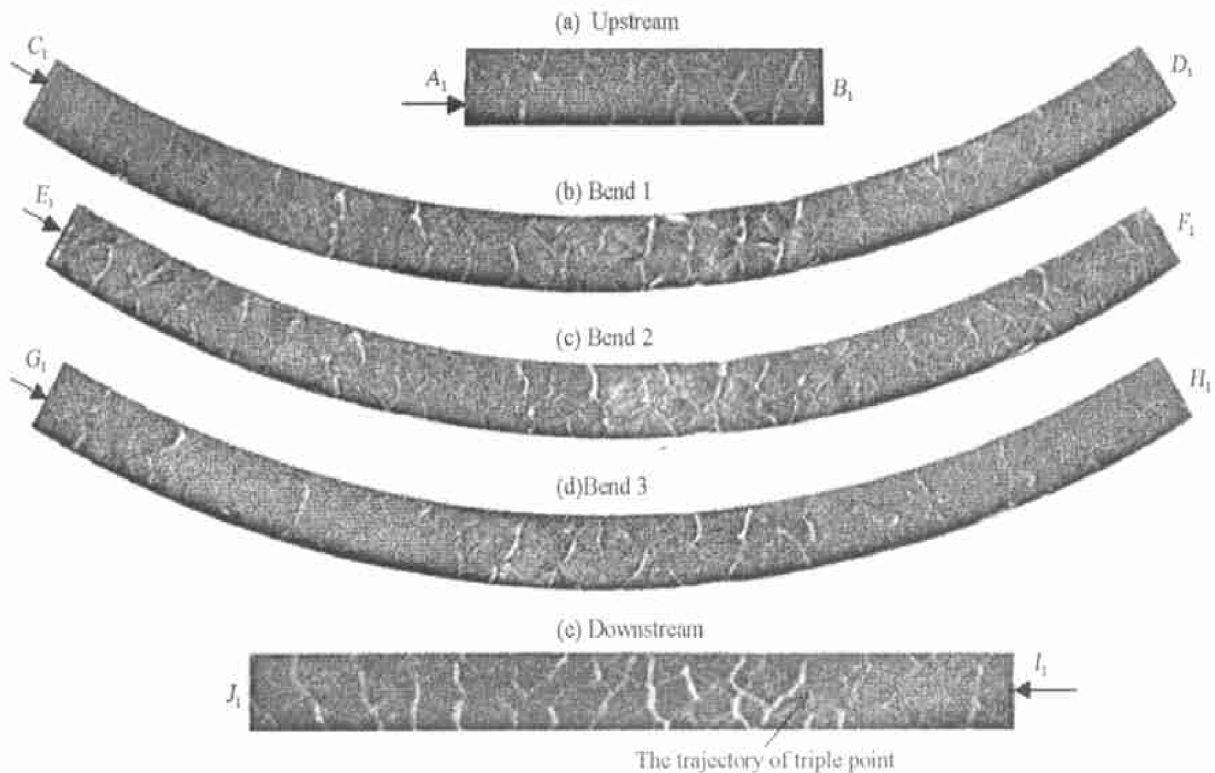


图 3 典型胞格结构图( $p_0=13.33\text{kPa}$ )

Fig. 3 Typical cellular structures

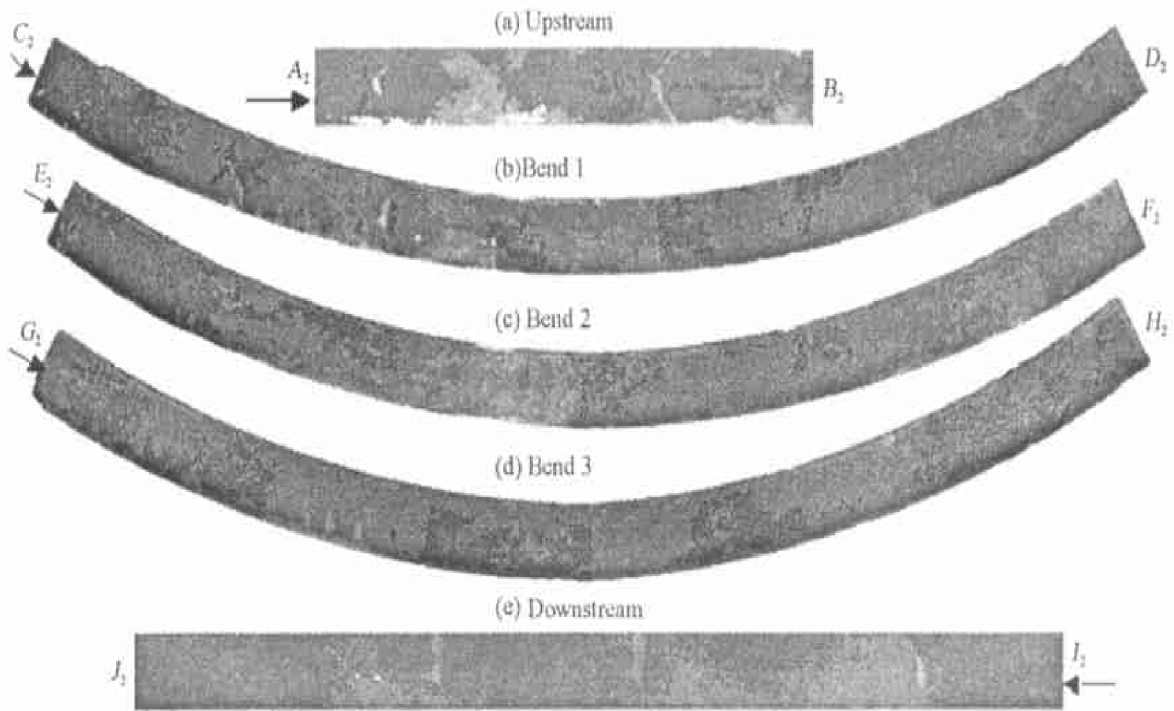


图 4 爆轰波熄灭的胞格结构图 ( $p_0=5.33\text{kPa}$ )

Fig.4 Cellular structures in the case of detonation extinguishing

#### 4.2 爆轰波速度测量

对应图 1 中各传感器位置,还测量了不同初压预混气爆轰波传播的压力时间曲线。其典型的压力时间曲线如图 5 所示,横轴对应时间,纵轴为压力幅值所对应的电压值。由图 5,对同一截面(如 3-3'、6-6'、9-9'等),爆轰波到达内母线的的时间小于到达外母线时间,说明爆轰波在半圆形弯管中传播,沿内母线一侧的波阵面领先于外母线一侧的波阵面。

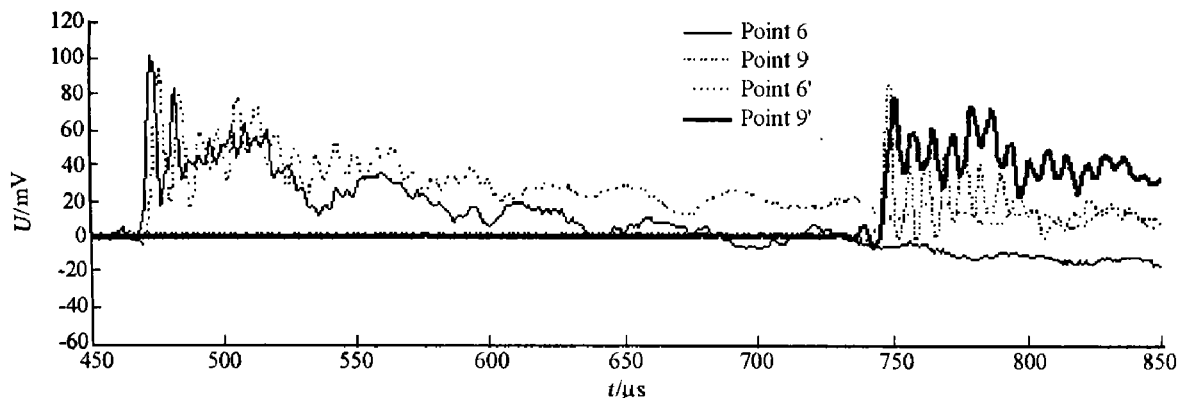


图 5 典型的压力时间曲线

Fig.5 Typical pressure time history

根据各指定点的压力时间曲线,可计算出爆轰波在半圆形弯管中传播的速度。图 6 给出了不同初压下爆轰波沿内母线传播的平均速度。其中入口段平均速度指 1、2 之间的平均速度;弯管 1、2、3 的平均速度分别指 3-5(或 3'-5')、6-8(或 6'-8')、和 9-11(或 9'-11')的平均速度。图 6 表明:(1)随着初压提高,入口段及弯管 1、2、3 内爆轰波传播速度增大,但增幅较小,约为 100m/s。假设各初压下的预混气发生 C-J 爆轰,根据 Gordon-McBride 程序<sup>[9]</sup>,对初压分别为 8.00、10.67、13.33、16.00、18.67kPa 预混气,其 C-J 爆轰速度分别为 2154.1、2166.7、2176.6、2184.7、2191.6 m/s,变化幅度仅 1.

7%。(2)气相爆轰波进入半圆形弯管时,随着预混气初压提高,其速度衰减幅度由 200m/s 降至 100m/s。原因是:预混气初压越高,其化学组元摩尔浓度越大,化学反应速率增大,因此爆轰波马赫数增大。相对而言,爆轰波在传播过程中受几何壁面影响减小。(3)初压不变,当稳定爆轰波进入半圆形弯管时,其传播速度突然衰减,变化幅度约为 120~250m/s;在半圆形弯管沿内母线传播过程中,其传播速度衰减较小,约 50m/s。

图 7 给出了不同初压下爆轰波沿外母线传播的平均速度。图 7 表明:(1)随着初压提高,爆轰波沿外母线传播速度增大,但增幅较小,约为 100m/s。(2)初压不变,爆轰波沿外母线传播较复杂。当预混气初压大于 10.67kPa,稳定爆轰波刚进入半圆形弯管时,其速度增大;沿半圆形弯管外母线传播过程中,爆轰波速度衰减,但均大于稳定爆轰波速度。当预混气初压为 10.67kPa,稳定爆轰波进入半圆形弯管时,其速度增大;沿半圆形弯管外母线传播过程中,爆轰波速度由大于稳定爆轰波速度衰减至小于稳定爆轰波速度。当预混气初压为 8.00kPa,爆轰波在半圆形弯管传播的整个过程中,其速度衰减且均小于稳定爆轰波速度。

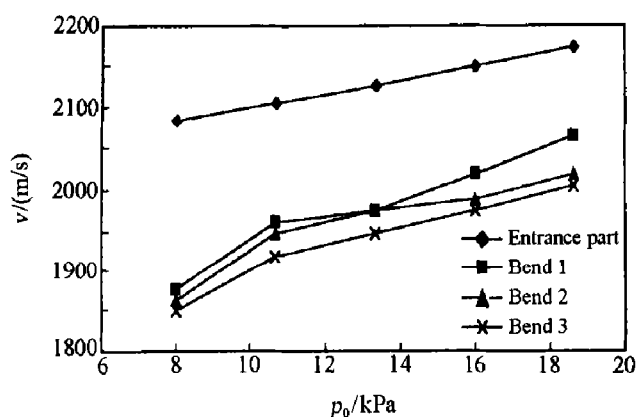


图 6 不同初压下爆轰波沿内母线传播的平均速度

Fig.6 Average velocity of gaseous detonation at different  $p_0$

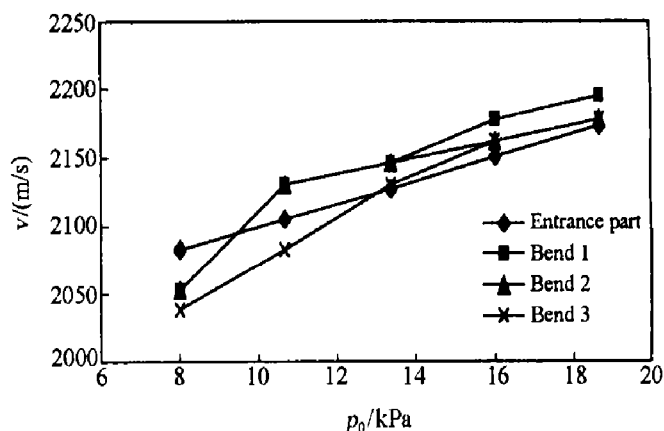


图 7 不同初压下爆轰波沿外母线传播的平均速度

Fig.7 Average velocity of gaseous detonation at different  $p_0$

## 5 结 论

在本文条件下,可得如下结论:

(1)当初压  $p_0 \geq 8.00$  kPa,受扰动的爆轰波在弯管出口下游仍恢复为强度不变的稳定爆轰。这表明,半圆形弯管对该类爆轰波的传播影响是局部的。预混气初压降至 5.33kPa 时,稳定爆轰波经过半圆形弯管后,衰减直至熄灭。

(2)爆轰波在半圆形弯管传播过程中受到多种波系的共同作用,其强度衰减,波阵面弯曲。诱导激波强度沿阵面由内母线至外母线逐渐增大。

(3)胞格记录的三波点迹线表明,受扰动的爆轰波在出口段发生了马赫反射。

## 参考文献:

- [1] GUO Chang-ming, ZHANG De-liang, XIE Wei. The Mach reflection of a detonation based on soot track measurements [J]. Combustion and Flame, 2001, 127: 2051-2058.
- [2] 周凯元,李宗芬,陈志坚.气相爆轰波平衡胞格稳定性实验研究 [J].爆炸与冲击,1990,10(2):129-134.  
ZHOU Kai-yuan, LI Zong-fen, CHEN Zhi-jian. Experimental investigations on the stability of equilibrium cellular in gaseous detonation [J]. Explosion and Shock Waves, 1990, 10(2): 129-134.
- [3] 周凯元,李宗芬.丙烷-空气爆燃火焰通过平板狭缝时的淬熄研究 [J].爆炸与冲击,1997,17(2):112-118.  
ZHOU Kai-yuan, LI Zhong-fen. The quenching of propane-air deflagrations by narrow parallel channels [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(2): 112-118.

- [4] 徐胜利, 陈成光, 李剑. 爆轰波在扩张管内临界传播特性研究[J]. 爆炸与冲击, 1995, 15(1): 69—75.  
XU Sheng-li, CHENG Cheng-guang, LI Jian. Investigation on the detonation wave propagating through divergent tubes under critical conditions[J]. Explosion and Shock Waves, 1995, 15(1): 69—75.
- [5] Edwards D H, Thomas G O, Nettleton M A. The diffraction of a planar detonation wave at an abrupt area change [J]. J Fluid Mech, 1979, 95: 79—96.
- [6] Bartlmä F, Schröder K. The diffraction of a plane detonation wave at a convex corner[J]. Combustion and Flame, 1986, 66: 237—248.
- [7] Edwards D H, Thomas G O. The diffraction of detonation waves in channels with  $90^\circ$  bends[J]. Combustion, 1983, 3(1): 65—76.
- [8] 王汉良, 周凯元, 夏昌进. 气相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] Gordon S, McBride D J. Computer program for a calculation of complex chemical equilibrium compositions, rockets performance, incident and reflected shocks, Chapman—Jouguet detonations[R]. NASA SP-273, 1971.

## Experimental investigation on gaseous detonation propagation through a semi-circle bend tube

WANG Chang-jian<sup>\*</sup>, XU Sheng-li, GUO Chang-ming

(*Department of Mechanics and Mechanical Engineering,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China*)

**Abstract:** The paper presents the results of experimental investigation on gaseous detonation of  $2\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$  mixture propagation through a semi-circle bend tube with a square cross-section. The pressure time history at specific ports was recorded by piezo-electric transducers and cellular patterns were recorded by smoked foil respectively. The average velocity of detonation along the concave and convex wall and the change of cell size were obtained. Experimental results indicate that originally planer precursor front is curved when detonation wave enters the bend tube due to the interactions among the detonation wave, rarefaction wave and reflected shock wave. Along the front, from convex to concave wall, the precursor strength is increased. Influenced by this change, the chemical reaction behind the front is also disturbed, and the cell size is obviously changed. Under the conditions in our experiments, when initial pressure  $P_0$  is larger than 8.00kPa, the stable detonation wave with the same cell size as the undisturbed one is re-established in the downstream region. The trajectory of triple points in cellular patterns denotes the Mach reflection occurs in downstream region of bend tube. Detonation extinguishes in downstream region of the bend tube, as the initial pressure decreases to 5.33kPa.

**Key words:** lprecursor shock wave; gaseous detonation; cellular structure; Mach reflection

\* Corresponding author: WANG Chang-jian

E-mail address: chjwang@mail.ustc.edu.cn ; Telephone: 0551-3607322