

# 甲烷预混气螺旋爆轰的定量不稳定性研究

赵焕娟<sup>1)</sup>, John H. S. LEE<sup>2)</sup>, 张英华<sup>1)</sup>✉

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083 2) 麦吉尔大学机械工程系, 蒙特利尔 H3A 2K6, 加拿大

✉ 通信作者, E-mail: zyhustb@163.com

**摘要** 针对  $\text{CH}_4$  这种特别气体, 对其实验结果运用数字化处理方法研究  $\text{CH}_4$  稳定性。在内径 50.8 mm 圆形管道内获得  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气在不同初始压力条件下的胞格爆轰结果并使用烟膜记录, 且测得的平均爆轰速度数据与 CJ 爆轰速度接近, 在初始压力高于 5 kPa 时爆轰可稳定传播。烟膜上形成的三波点轨迹十分不规则。为减少人为误差, 使用改进后的数字化处理烟膜图像的技术方法, 从烟膜轨迹中得出柱状图及自相关函数结果, 发现  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  是一种爆轰十分不稳定的气体, 并给出  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气的爆轰胞格尺寸及差距, 结果显示人为测量结果偏大而数字化处理方法更为准确。这种方法能计算  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气胞格尺寸及不稳定性, 完善了量化预混气不稳定程度的方法。

**关键词** 甲烷; 爆轰; 定量分析; 不规则性; 图像处理; 自相关

**分类号** TD75

Quantitative irregularity analysis for spinning detonation of premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$

ZHAO Huan-juan<sup>1)</sup>, John H. S. LEE<sup>2)</sup>, ZHANG Ying-hua<sup>1)</sup>✉

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal H3A 2K6, Canada

✉ Corresponding author, E-mail: zyhustb@163.com

**ABSTRACT**  $\text{CH}_4$  is a typical and special detonation mixture. Based on the experimental method, digital image processing was performed to study the detonation stability theory of methane. A premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  mixture was ignited in a tube with an inner diameter of 50.8 mm under different initial pressures. Smoked foils were used to record the cellular structure of spinning detonation. The average detonation velocity measured is similar with the CJ detonation velocity and it demonstrates that steady detonation happens when the initial pressure is higher than 5 kPa. The triple point trajectory leaves a very irregular pattern in smoked foils. In order to decrease human error, the digital processing technology was utilized and improved. The  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  mixture shows high degree of irregularity in the computation of histograms and the autocorrelation function. The cellular size and gap of the unstable premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  were given. It is found that the results measured by digital image processing are accurate and by eyes are too big. The research can calculate the cellular size and the degree of instability of the unstable premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  and improves the quantitative irregular calculation method.

**KEY WORDS** methane; detonation; quantitative analysis; irregularities; image processing; autocorrelation

爆轰波传播过程中借助燃烧释放的化学能实现自持传播, 爆轰波的这种自持燃烧特性可能给煤矿、石

---

收稿日期: 2016-01-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目( E041003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目( FRF-TP-15-105A1); 中国博士后科学基金资助项目( 2015M580049); 国家自然科学基金青年科学基金资助项目( E11602017)

化、化工行业及其他存在可燃气体的场所带来严肃的安全防爆问题,是一个不可忽视的研究题目。安全领域无可避免地涉及各种爆燃形态,有些事故难以用普通燃爆理论解释,常规研究甚少考虑爆轰。甲烷是煤矿井下瓦斯气的主要成分,研究甲烷预混气的爆轰特性十分必要。许多学者使用烟膜研究爆轰现象,胞格结构是研究爆轰的关键<sup>[1]</sup>。国内的学者也对气相规则胞格爆轰波起爆与传播进行研究<sup>[2-3]</sup>,最近在胞格形成机理及其量化规律方面取得了重大进展<sup>[4-7]</sup>。

Lee 等<sup>[8]</sup>指出,根据爆轰是否稳定,存在着两种爆轰机制。对于稳定爆轰,爆轰结构可以通过 ZND 模型来描述,并且横波在爆轰传播中的作用可以忽略。相反,对于不稳定爆轰,横波则起到决定性作用。左手三波点轨迹和右手三波点轨迹形成的胞格结构的量化研究在爆轰传播中非常重要。因此,定量分析甲烷预混气的爆轰不稳定性对完善甲烷的爆轰机理有重要意义。多年来,使用烟熏过的烟膜来记录爆轰的胞格结构一直是主要的爆轰现象研究手段,三波点轨迹组成胞格结构,现在这种技术已经成为测量不稳定爆轰面胞格尺寸的标准技术<sup>[9]</sup>。然而,实验中获得的烟膜上的记录并非直线前进,为了解释这个现象并且给出选择“代表三波点轨迹间距”数据的依据,就需要相当多的经验来进行实验及分析。以往描述“规则轨迹”和“不规则轨迹”分别指向“稳定爆轰”和“不稳定爆轰”,通常来说,烟膜轨迹来描述的“规则轨迹”和“不规则轨迹”的分类是定性和主观的。文献[10]中所提到的某些所谓的“稳定”的混合气(如使用 Argon 气体进行过高度稀释的  $C_2H_2 + O_2$  和  $2H_2 + O_2$  混合气)所得到的烟膜上的记录是相当规则的,因此比较容易确定间距。然而,对于所谓的“不稳定”的混合气(例如  $C_2H_2 + 5N_2O$ ,  $CH_4 + 2O_2$  等)所得到的烟膜上的记录是高度不规则的。如果爆轰是不稳定的,那么烟膜记录的结构形态也不规则。

实际上烟膜记录的是管道内壁处三波点留下的轨迹,不能定义其为胞格尺寸,爆轰波在管道中的空间结构当前并不清楚,只能观察管壁上的情况。此处称前面学者描述的胞格尺寸为三波点轨迹间距,以三波点轨迹的不规则度来描述预混气爆轰不稳定性是合理的。

于是,需要得到更客观衡量的爆轰规律性和三波点轨迹不规则性的定量描述办法<sup>[11-12]</sup>。Shepherd 等<sup>[13-14]</sup>和 Lee 等<sup>[8]</sup>都尝试过使用数字图像处理技术进行分析。然而,如果直接扫描烟膜来获得三波点轨迹线是十分困难的。因为存在非均匀烟灰沉积物导致的“灰度不均匀”和“误差”,调整“灰度”是必需

的。在 Lee 等<sup>[8]</sup>和 Zhao 等<sup>[15]</sup>的研究中,他们最终求助于手绘记录扫描,得到可以进行数字处理的图片。在进行烟膜手绘记录时需要一定的主观性人为判断,以消除少量的杂散线和实验中误操作导致的线条。实际上,  $CH_4 + 2O_2$  是一种不稳定爆轰气体,但是其爆轰初始压力极限较高,相较于很多敏感且不稳定的气体来说,  $CH_4$  是一种不敏感且不稳定气体,在实验过程中需要十分精确地操作以避免影响不规则度的分析,所以目前为止少见有针对  $CH_4$  的研究。在过去几十年里,尽管对爆轰的稳定性理论开展广泛研究,但目前仍然没有一个定量的理论,仍然缺少合理的分析。

本文使用数字化图像技术处理实验得到的烟膜记录,研究不同初始条件下  $CH_4 + 2O_2$  预混气的爆轰速度和爆轰不稳定程度,系统给出  $CH_4 + 2O_2$  预混气的性质,以分析甲烷的爆轰机理。

## 1 $CH_4 + 2O_2$ 预混气爆轰实验

### 1.1 实验内容

该爆轰实验使用内径 50.8 mm 的起爆管,如图 1 所示。实验管道由引爆管段和实验管段组成,引爆管材料为 Q345 钢,长度为 1.01 m; 实验段材料为透明的高强度塑料管,为便于采集数据并考虑稳固性,由两管段构成,单管段长度为 1900 mm,两管段间靠法兰内部的橡胶圈达到密封效果。在引爆管段内充入  $C_2H_2 + O_2$ (采用化学计量配比,称为 Drive 气),用于促进爆轰开始。实际操作中,在金属管前端外接一个小型的金属管,金属管两端均设置开关,该小型金属管存储之后充入引爆管的 Drive 气。首先,断开小型金属管与实验管道,在实验管道内充预混气的压力至  $P_1$ (kPa); 然后,在小型金属管内充 Drive 气压力至  $P_2$ ; 之后,连通小型金属管和实验管道,将 Drive 气快速平稳地放入实验管道,避免 Drive 气与实验气混合过多而影响实验结果。小型金属管与实验管道连通后,两个管道内压力均变成  $P_T$ ,  $P_T$  即是实际的实验初始压力。利用等容条件计算所需要使用的 Drive 气及  $CH_4 + 2O_2$  预混气分压,计算公式如下:

$$\begin{cases} P_1 V_1^\gamma = P_T (V_1 - V_0)^\gamma, \\ P_2 V_2^\gamma = P_T (V_2 + V_0)^\gamma. \end{cases} \quad (1)$$

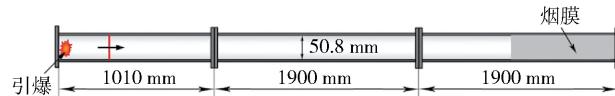


图 1  $\phi 50.8$  mm 爆轰管道结构简图

Fig. 1 Detonation structure diagram with an inner diameter of 50.8 mm

式中:  $V_1$  为实验管道及连通通路体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_2$  为小型金属管及连通通路体积,  $\text{m}^3$ ;  $V_0$  为 Drive 气在实验管道内的体积,  $\text{m}^3$ , 甲烷气引爆需要长度为 6~8 个实验管道直径的 Drive 气;  $\gamma$  为绝热指数, 取 1.4.

在实验段管道后端放入 1.0 m 长已经均匀熏制的膜片, 称为烟膜. 根据实验经验,  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气的极限引爆(爆轰)初始压力为 5 kPa, 所用烟膜的厚度应大于 0.04 mm.

在实验段管道外壁固定装有光纤, 当爆轰面传播到某处时, 因为爆轰面的物质仍在进行化学反应, 会有光的产生, 被光纤感知后信号传输到数据盒, 可以从示波器读取光纤感光时间, 光纤间的距离也可测得, 即可通过公式计算出爆轰速度.

所有的爆炸性混合物都已预先在高压瓶由分压的方法制备, 通过控制面板将不同气体分别安全输入到

预混气高压瓶中, 充罐后预混气放置 24 h 以上后才能开始使用, 以确保罐内不同气体均匀混合.

## 1.2 实验结果

起爆后, 将管内抽真空然后缓慢放入大气, 以保证不要在烟膜上形成冲刷痕迹. 取出烟膜后均匀喷透明的保护漆, 为后续手描做好准备. 烟膜记录螺旋爆轰的结构. 取初始压力 5 (单头)、7.25、10、13 和 19 kPa 烟膜见图 2, 随初始压力的增高, 逐渐演变为多胞格, 胞格尺寸减小.  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  的螺旋表现出比较弯曲复杂的结构. 胞格内出现许多细弱的线. 在许多较大的胞格中能够观察到三波点轨迹的增长, 这些三波点轨迹的增长由爆轰胞格中精细的三波点轨迹的形态来显示. 追踪一条痕迹线时, 发现胞格有时相互融合, 减少了三波点轨迹的数量; 有时出现更多的三波点轨迹模式, 影响着主干模式.

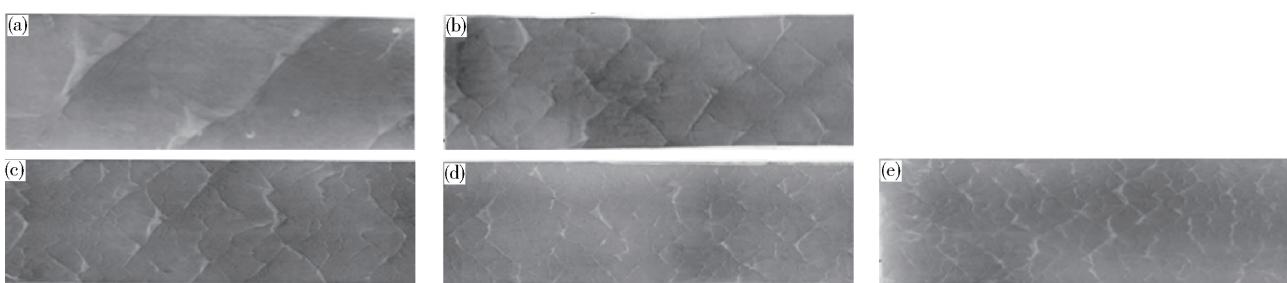


图 2 不同初始压力下  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气烟膜记录. (a) 5 kPa; (b) 7.25 kPa; (c) 10 kPa; (d) 13 kPa; (e) 19 kPa

Fig. 2 Smoked foil records of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  under different initial pressures: (a) 5 kPa; (b) 7.25 kPa; (c) 10 kPa; (d) 13 kPa; (e) 19 kPa

记录示波器上爆轰波到达的时间, 计算出每一处的平均速度. 不同初始压力下的爆轰平均速度与 CJ 爆轰速度比见图 3, 其中横轴为传播距离, 纵轴为爆轰波速度  $v$  与 CJ 爆轰速度  $v_{\text{cj}}$  之比. 由图 3 可见, 5 kPa 的初始压力下形成爆轰且没有熄灭, 结果有效.

## 2 结果分析

### 2.1 烟膜数字化处理

为了获得三波点轨迹间距, 将三波点轨迹线分为两个方向, 与传播方向之间夹角的角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  间的称为右旋波, 角度在  $-90^\circ \sim 0^\circ$  间的称为左旋波. 因此对于每张烟膜, 选择清晰区域后, 在经历人为去噪后获得右旋波图和左旋波图, 如图 4 所示. 图中 “theta -” 代表左旋, “theta +” 代表右旋.

以三波点轨迹间距的波动代表轨迹的不规则度, 见图 5. 编制图像处理程序, 进行数字化处理, 见图 6.

首先, 获得每一个左旋或者右旋波的离散函数. 如图 6 所示, 当一条垂直线在左旋或者右旋波运动, 碰到三波点轨迹线时即记录下这个线上突变的像素的位

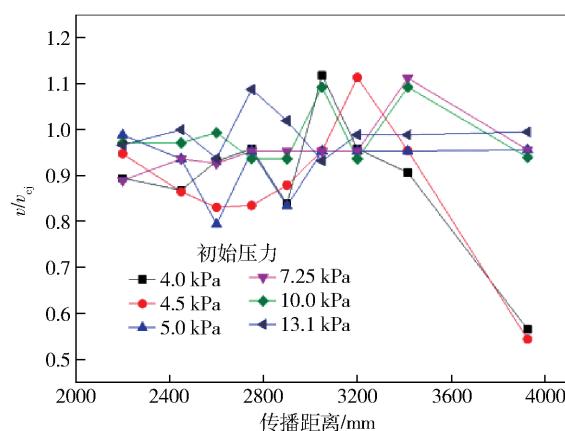


图 3 不同初始压力下  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  爆轰速度曲线

Fig. 3 Velocity curves of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  under different initial pressures

置, 即交点处像素点值记为 1, 其他的像素点值记为 0, 每一个像素都被离散数值化, 于是就将图片转化得到一个离散函数. 一幅垂直线方向高度为 139.3 mm 的图片, 且其垂直线的像素离散点的数量是 660 (真正的直线长度是 139.3 mm), 一条垂直线的离散图如

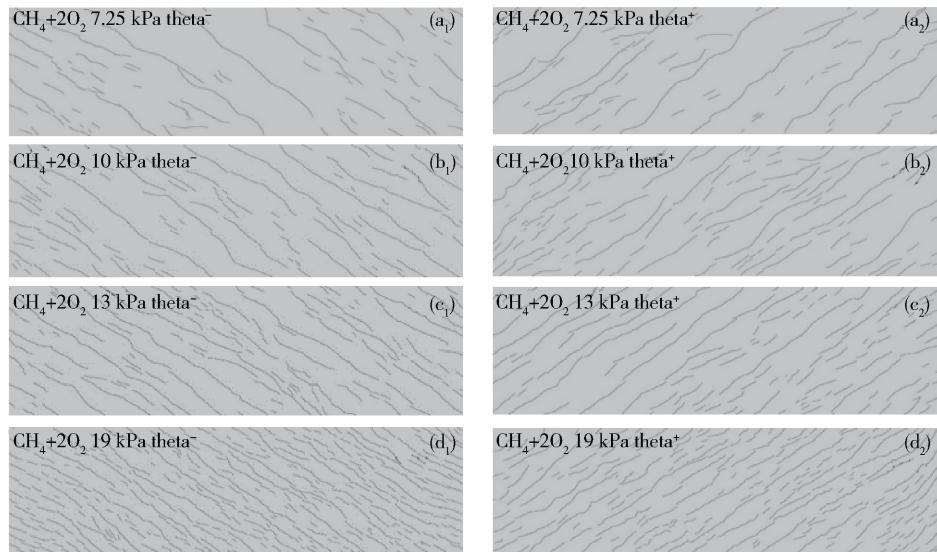


图4 不同初始压力下  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  爆轰左旋波及右旋波. ( a<sub>1</sub> ) 7.25 kPa ,左旋波图; ( a<sub>2</sub> ) 7.25 kPa ,右旋波图; ( b<sub>1</sub> ) 10 kPa ,左旋波图; ( b<sub>2</sub> ) 10 kPa ,右旋波图; ( c<sub>1</sub> ) 13 kPa ,左旋波图; ( c<sub>2</sub> ) 13 kPa ,右旋波图; ( d<sub>1</sub> ) 19 kPa ,左旋波图; ( d<sub>2</sub> ) 19 kPa ,右旋波图

**Fig. 4** Two sets of patterns of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  under different initial pressures: ( a<sub>1</sub> ) 7.25 kPa , left-running transverse wave; ( a<sub>2</sub> ) 7.25 kPa , right-running transverse wave; ( b<sub>1</sub> ) 10 kPa , left-running transverse wave; ( b<sub>2</sub> ) 10 kPa , right-running transverse wave; ( c<sub>1</sub> ) 13 kPa , left-running transverse wave; ( c<sub>2</sub> ) 13 kPa , right-running transverse wave; ( d<sub>1</sub> ) 19 kPa , left-running transverse wave; ( d<sub>2</sub> ) 19 kPa , right-running transverse wave

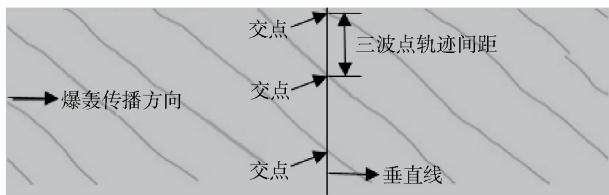


图5 三波点轨迹间距示意图

**Fig. 5** Sketch of triple point trajectory spacing

图6( a )所示. 在该左旋波图上画二十垂直线,采集到总共有  $660 \times 20 = 13200$  个离散点,如图6( b )所示. 然后通过程序计算两个相邻 1 之间的距离,即三波点轨迹间距.

## 2.2 三波点轨迹间距柱状图

在单向三波点轨迹图上画一条竖线,记录下竖线

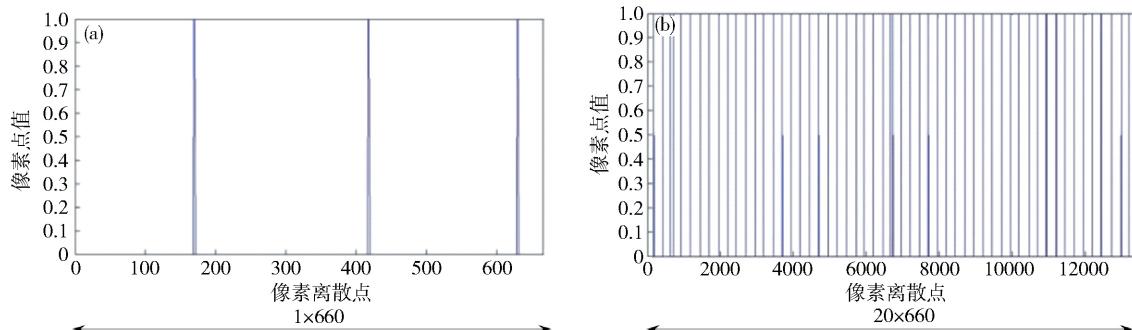


图6 对图5三波点轨迹的离散化. ( a ) 一条垂直线对应的离散结果; ( b ) 20条垂直线的离散结果

**Fig. 6** Discretization of the triple point trajectory in Fig. 5: ( a ) discretization to one line; ( b ) discretization to twenty lines

与三波点轨迹线的交点坐标,那么一条竖线上相邻交点的距离就是三波点轨迹间距,因为实际的三波点轨迹总是因为相互干涉等原因而弯曲,因此三波点轨迹间距是一个范围,这个范围及分布情况与爆轰稳定度有关.

为比较烟膜的三波点轨迹间距数据的差别,采用等三波点轨迹间距和等数据比例两种方法来得到柱状图. (1) 尝试不同间距尺寸后,将间距数据每 5 mm 定为一个间距(即一个柱子),作柱状图,会有不同比率的数据数量落在这 15 个柱子上,比较柱子的高低及分布情况即可给出不规则程度,见图 7 所示; (2) 将间距数据范围等比例均分为 15 份,作柱状图,会有不同比率的数据数量落在这 15 个柱子上,比较柱子的高低及

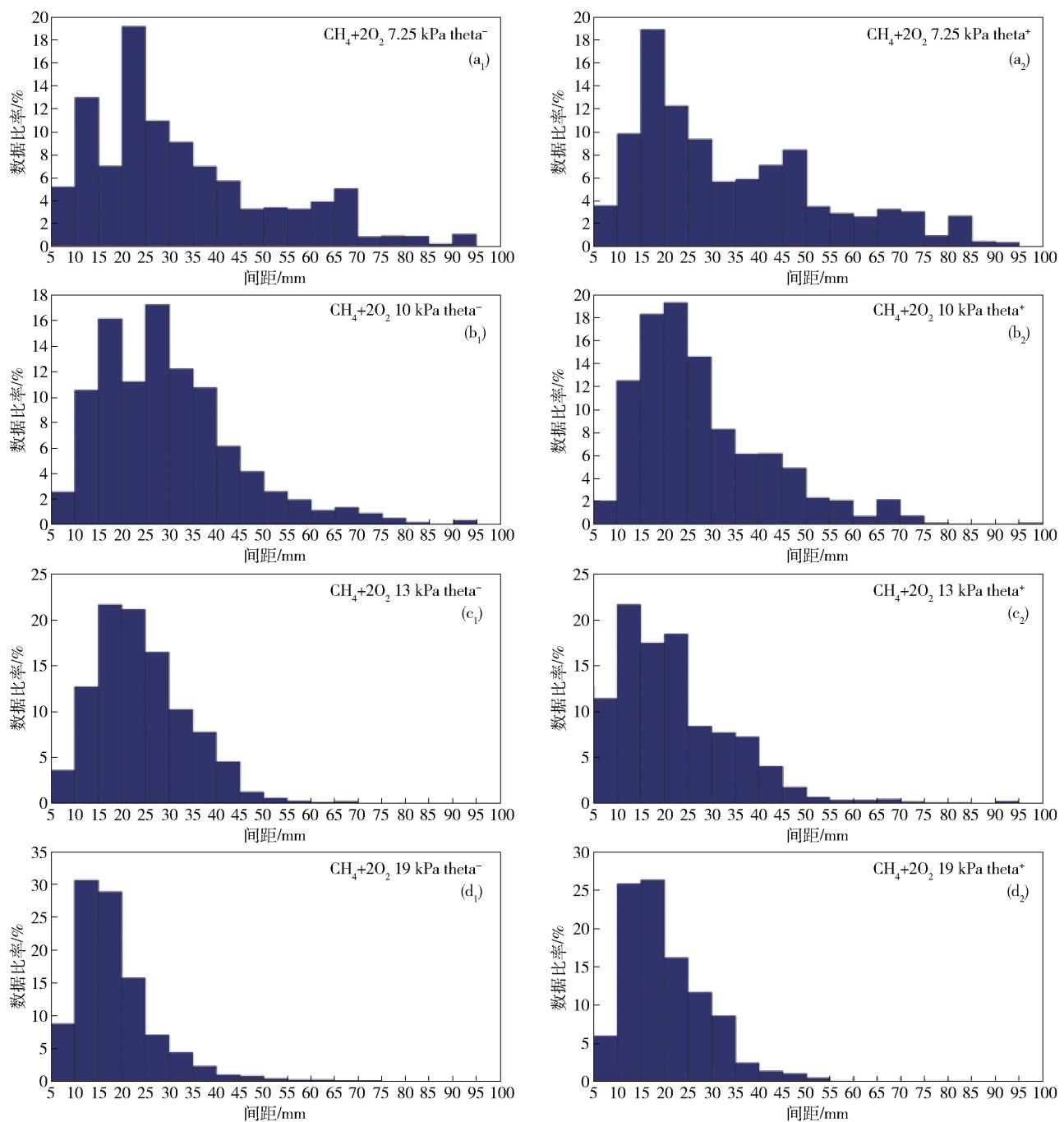


图 7  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰三波点轨迹间距数据等间距柱状图. (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa, 左旋; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa, 右旋; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, 左旋; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, 右旋; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, 左旋; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, 右旋; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, 左旋; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, 右旋

**Fig. 7** Histograms with the same triple point trajectory spacing of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ : (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa left-running transverse wave; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa right-running transverse wave; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, left-running transverse wave; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, right-running transverse wave; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, left-running transverse wave; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, right-running transverse wave; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, left-running transverse wave; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, right-running transverse wave

分布情况即可给出不规则程度, 见图 8 所示.

因为基准不同, 两种方法的柱状图形形状会有所区别, 但是两种柱状图的峰值(最可能的三波点轨迹间距尺寸)大致接近, 离散情况也基本一致. 常规观察只能描述  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  爆轰轨迹十分不规则, 柱状图表现

出多个波峰且数据分布离散程度高, 且呈现不对称的整体形状.

### 2.3 三波点轨迹间距方差值

使用统计学方差公式计算间距数据, 得出间距方差值, 这是一个很明确的定量化间距不规则度的量, 同

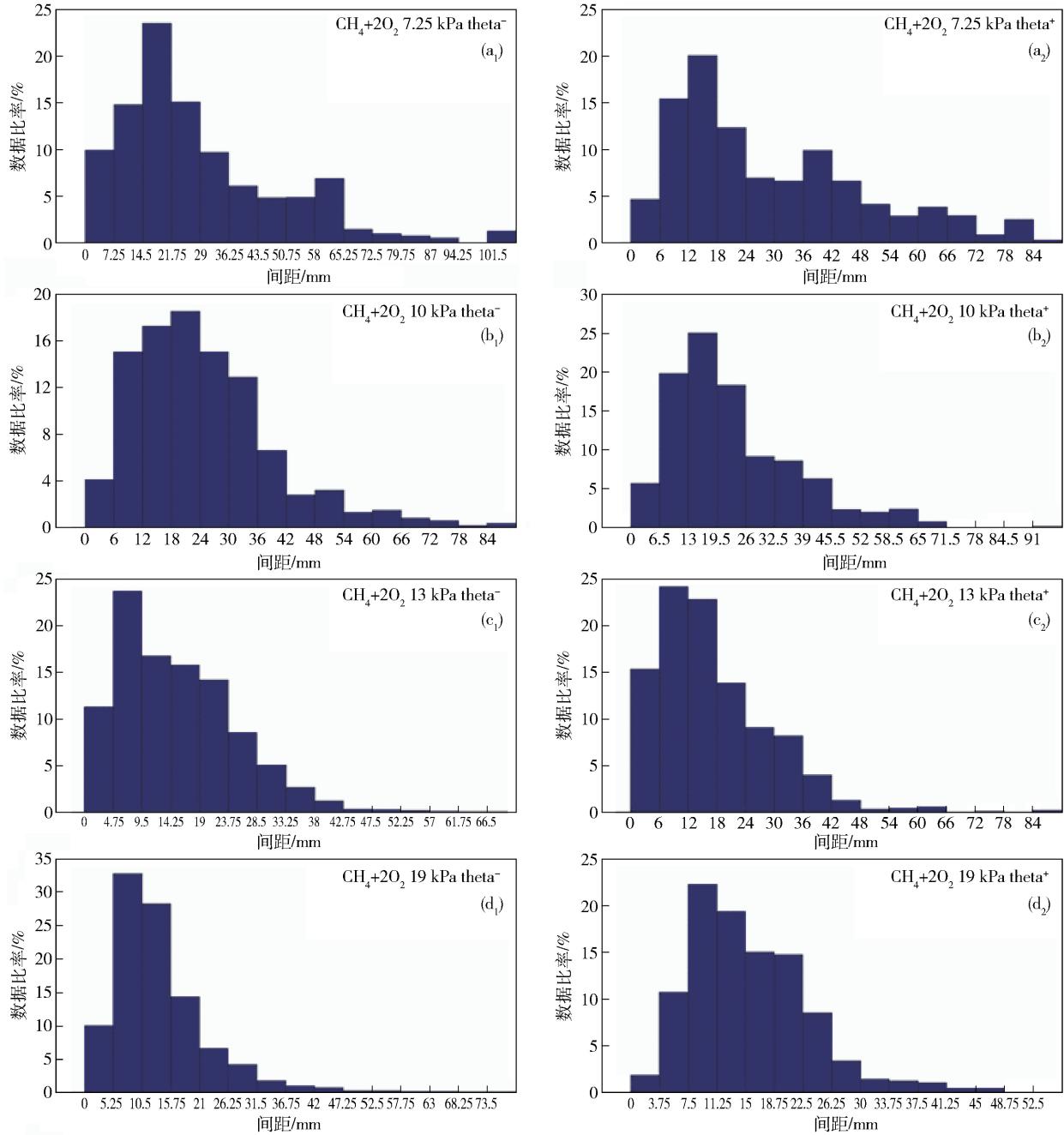


图 8  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰三波点轨迹间距数据等比例柱状图. (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa, 左旋; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa, 右旋; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, 左旋; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, 右旋; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, 左旋; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, 右旋; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, 左旋; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, 右旋

**Fig. 8** Histograms with the same ratio of triple point trajectory spacing of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ : (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa, left-running transverse wave; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa, right-running transverse wave; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, left-running transverse wave; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, right-running transverse wave; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, left-running transverse wave; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, right-running transverse wave; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, left-running transverse wave; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, right-running transverse wave

时计算出所有间距数据的平均值. 两个方向的三波点轨迹所得到的方差比较一致,  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  的方差值均集中在很高的数值(14.4 ~ 24.1 mm 之间), 表现出典型的不稳定爆轰特性.

## 2.4 自相关

从柱状图的结果来看, 柱状图不能清晰地给出

$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  三波点轨迹间距. 自相关函数可以表述一种信号在移动一定距离的条件下与本身重复的程度. 使用自相关来定量不规则度.

以序列函数  $x(n)$  记录离散函数(见图 6 示例), 含有 1 和 0 的离散信号.  $n$  是离散点的数量;  $x$  是离散点的值, 由 1 和 0 构成. 初始函数  $x(n)$  中有  $M$  个单元. 如果

$n$  是偶数, 则  $M$  等于  $n$ ; 如果  $n$  是一个奇数, 则  $M$  取  $n - 1$ .  $y(n)$  是  $x(n)$  的零填充序列平移函数, 平移值是  $m$ .

$$y(n) = \begin{cases} x(n), & 0 \leq n \leq \frac{M}{2}; \\ 0, & \frac{M}{2} < n \leq M. \end{cases} \quad (2)$$

最后, 得到如下  $x(n)$  的自相关函数  $\varphi_{xx}(m)$ :

$$\varphi_{xx} = C_{xy}[m] = \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1+m-1} x(n) y(n+m), \quad 0 \leq |m| \leq \frac{M}{2} - 1. \quad (3)$$

式中  $C_{xy}[m]$  是  $x(n)$  和  $y(n)$  的互相关函数<sup>[11-12]</sup>.

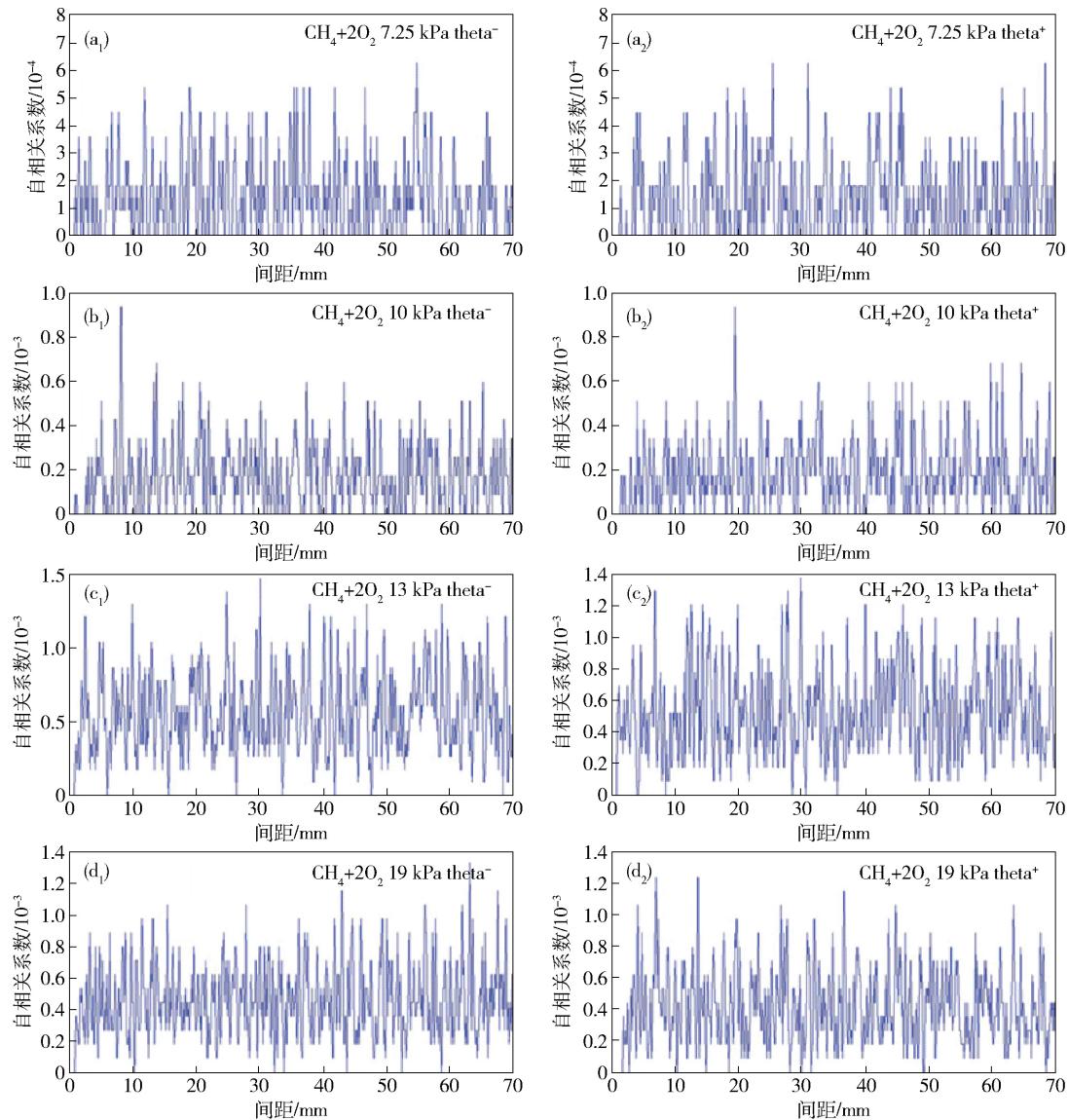


图9  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰三波点轨迹自相关结果. (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa, 左旋; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa, 右旋; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, 左旋; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, 右旋; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, 左旋; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, 右旋; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, 左旋; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, 右旋

**Fig. 9** ACF results of the triple point trajectory of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ : (a<sub>1</sub>) 7.25 kPa, left-running transverse wave; (a<sub>2</sub>) 7.25 kPa, right-running transverse wave; (b<sub>1</sub>) 10 kPa, left-running transverse wave; (b<sub>2</sub>) 10 kPa, right-running transverse wave; (c<sub>1</sub>) 13 kPa, left-running transverse wave; (c<sub>2</sub>) 13 kPa, right-running transverse wave; (d<sub>1</sub>) 19 kPa, left-running transverse wave; (d<sub>2</sub>) 19 kPa, right-running transverse wave

如果三波点轨迹完全规则, 那么间距的离散函数在被平移一定间距后仍会与原函数重复. 只有平移距离就是间距的倍数时, 规则的间距对应的离散函数才会与平移后的离散函数完全重复. 自相关函数 (autocorrelation function, 后文称为 ACF) 可以计算出这个平移间距及其倍数, 也就是间距及其倍数, 而自相关函数的第一个峰值对应的平移距离就是三波点轨迹的间距. 即使是不完全规则的三波点轨迹线, 自相关函数的第一个峰值也代表出现频率最高的三波点轨迹间距. 得到甲烷-氧气预混气爆轰记录的离散化数据的自相关函数结果, 见图9.

从图 6( b) 中可见, 有距离十分相近的竖线。这是由于手工描画中画笔粗度大于 1 像素而导致像素连续, 可以将离散函数中的相连的 1 进行优化, 使自相关函数的结果更为显著。使用这种思路对 Lee 的自相关计算进行改进的办法<sup>[8]</sup>。举例来说,  $x(n) = 000111001110011100$ , 把这个离散函数改进为

$000100001000010000$ , 使其在垂直线和三波点轨迹线的交叉留一个突变点 1。改进后的自相关结果更清晰地表现出峰值, 但抹去一部分后面出现的小峰值, 这些小峰值可能代表其他出现频率较高的间距。将离散函数优化后, 得到改进后的  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰轨迹线离散化数据的自相关函数结果, 见图 10。

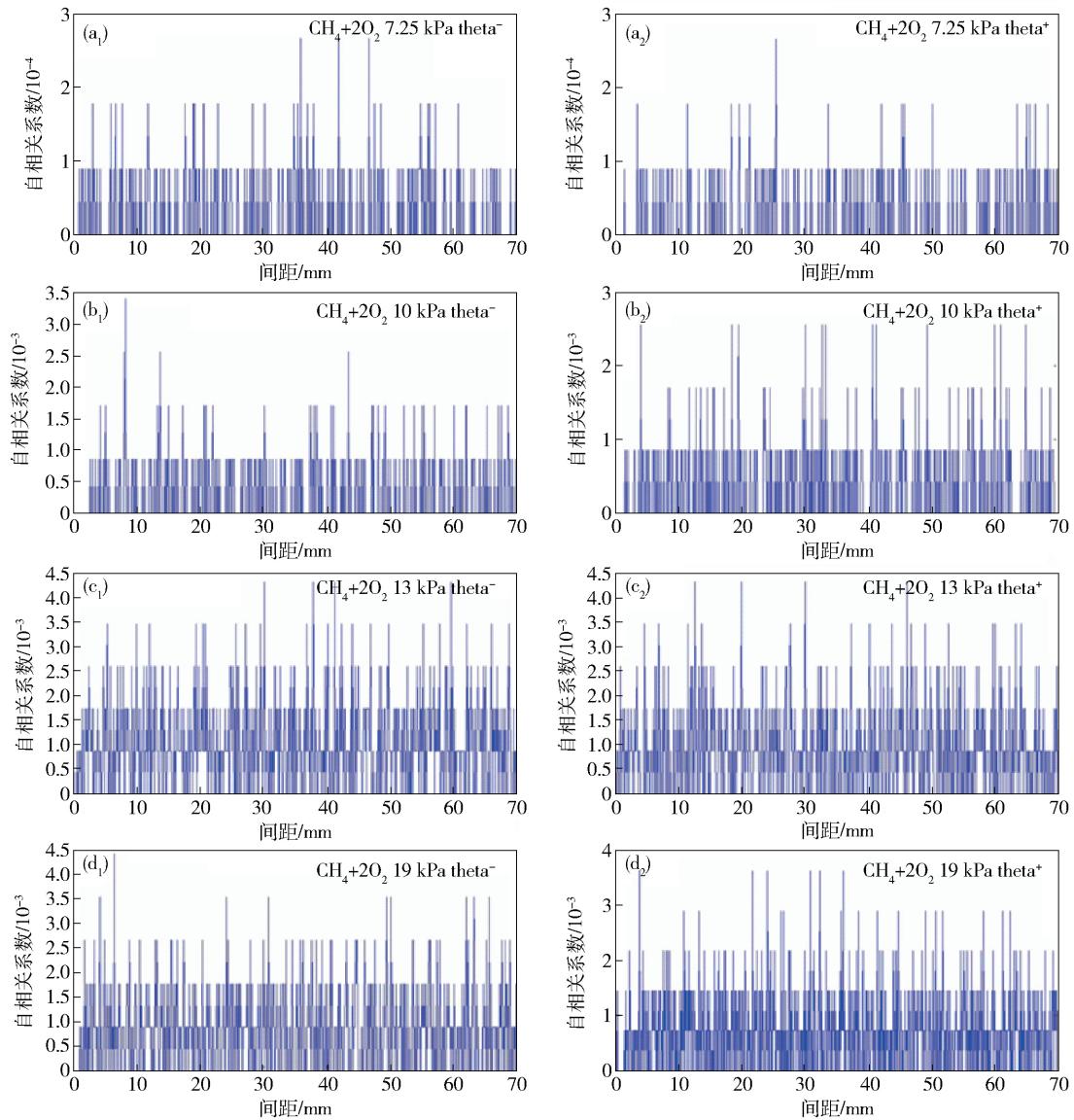


图 10 改进的  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰三波点轨迹自相关结果. ( a<sub>1</sub> ) 7.25 kPa, 左旋; ( a<sub>2</sub> ) 7.25 kPa, 右旋; ( b<sub>1</sub> ) 10 kPa, 左旋; ( b<sub>2</sub> ) 10 kPa, 右旋; ( c<sub>1</sub> ) 13 kPa, 左旋; ( c<sub>2</sub> ) 13 kPa, 右旋; ( d<sub>1</sub> ) 19 kPa, 左旋; ( d<sub>2</sub> ) 19 kPa, 右旋

**Fig. 10** Improved ACF results of the triple point trajectory of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ : ( a<sub>1</sub> ) 7.25 kPa, left-running transverse wave; ( a<sub>2</sub> ) 7.25 kPa, right-running transverse wave; ( b<sub>1</sub> ) 10 kPa, left-running transverse wave; ( b<sub>2</sub> ) 10 kPa, right-running transverse wave; ( c<sub>1</sub> ) 13 kPa, left-running transverse wave; ( c<sub>2</sub> ) 13 kPa, right-running transverse wave; ( d<sub>1</sub> ) 19 kPa, left-running transverse wave; ( d<sub>2</sub> ) 19 kPa, right-running transverse wave

## 2.5 三波点轨迹间距数据差距

如果三波点轨迹完全规则, 那么四种方法给出的间距应该一致, 所以预混气爆轰烟膜轨迹的间距的差

距直接反映了不规则度, 见图 11( a) 和图 11( b)。

将数字化方法获得的左旋轨迹平均值、柱状图峰值及自相关函数第一个峰值对应的间距结果与以往学

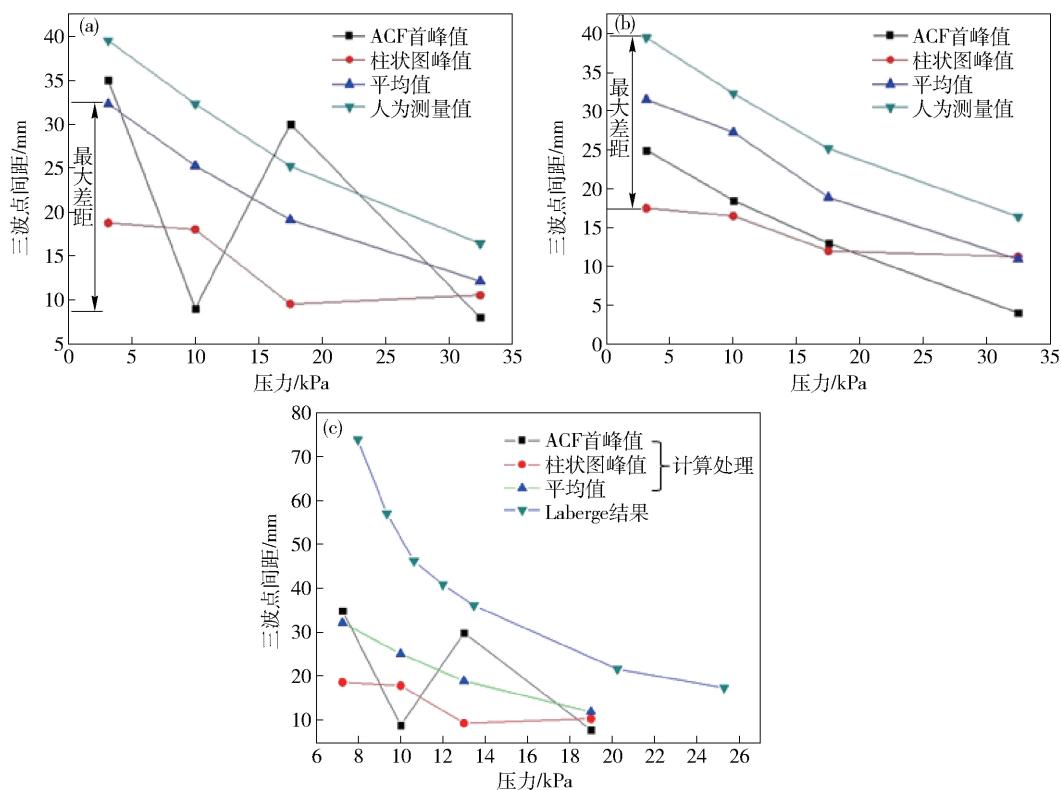


图 11  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰三波点轨迹间距结果差距. (a) 左旋; (b) 右旋; (c) 与其他学者的结果对比<sup>[16]</sup>

Fig. 11 Triple point trajectory spacing of the premixed  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  measured by four methods: (a) left-running transverse wave; (b) right-running transverse wave; (c) comparison with other results<sup>[16]</sup>

者所得到数据进行比较, 得到图 11(c). 对比结果显示, 通过减噪数字化处理得到的结果跟其他学者的结果趋势一致, 且其他学者人为观察的数据都高于数字化处理得到数据, 说明在一定误差内, 人为测量得到的数据是可信的, 虽然人为测量没有数字化处理的工作效率及低误差.

### 3 结论

(1) 本文的实验研究得出, 内径 50.8 mm 圆形管道内测得的  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气的平均爆轰速度数据与 CJ 爆轰速度接近. 初始压力高于 5 kPa 时, 获得自持爆轰传播. 即使爆轰速度为  $0.6v_{ej}$  也可能持续爆轰, 可见  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  爆轰不敏感、不稳定且不容易受内部噪声的影响. 实验结果给出不同初始压力条件下  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气爆轰烟膜, 烟膜上形成的三波点轨迹十分不规则.

(2) 给出数字化处理烟膜图像的技术方法, 减少人为误差. 从烟膜轨迹中计算出的三波点轨迹间距数据的柱状图、方差曲线、自相关函数结果与其他预混气进行对比后发现,  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  是一种爆轰十分不稳定的气体. 完善定量化预混气不稳定程度的方法, 可以系统地分析不同预混气的不稳定程度.

(3) 给出不同初始条件下  $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$  预混气的胞格结构及尺寸. 与以往学者数据比较, 验证了所得到数据的正确性, 并且发现以往人为测量的数据偏高.

### 参 考 文 献

- [1] Trotsuk A V, Fomin P A, Vasil'ev A A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures. *J Loss Prev Process Ind*, 2015, 36: 394
- [2] Jiang Z L, Teng H H. Research on some fundamental problems of the universal frame work for regular gaseous detonation initiation and propagation. *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2012, 42(4): 421  
(姜宗林, 滕宏辉. 气相规则胞格爆轰波起爆与传播统一框架的几个关键基础问题研究. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2012, 42(4): 421)
- [3] Zhang B, Bai C H. Research progress on the dynamic characteristics of gaseous detonation. *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2014, 44(7): 665  
(张博, 白春华. 气相爆轰动力学特征研究进展. 中国科学: 物理学, 力学, 天文学, 2014, 44(7): 665)
- [4] Xu X F, Xie L F, Peng J H, et al. Study on the detonation cellular structure of propylene epoxide-air. *Explos Shock Waves*, 2004, 24(2): 158  
(徐晓峰, 解立峰, 彭金华, 等. 环氧丙烷-空气混合物爆轰

- 波胞格结构的研究. 爆炸与冲击, 2004, 24(2): 158)
- [5] Wang C J, Xu S L. Numerical study on cellular detonation in a straight tube based on detailed chemical reaction model. *Explos Shock Waves*, 2005, 25(5): 405  
(王昌建, 徐胜利. 直管内胞格爆轰的基元反应数值研究. 爆炸与冲击, 2005, 25(5): 405)
- [6] Liu Y, Wu D, Wang J P. Structure of oblique detonation wave at low in flow Mach number. *Explos Shock Waves*, 2015, 35(2): 203  
(刘岩, 武丹, 王健平. 低马赫数下斜爆轰波的结构. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 203)
- [7] Teng H H, Ng H D, Li K, et al. Evolution of cellular structures on oblique detonation surfaces. *Combust Flame*, 2015, 162(2): 470
- [8] Lee J J, Garinis D, Frost D L, et al. Two-dimensional autocorrelation function analysis of smoked foil patterns. *Shock Waves*, 1995, 5(3): 169
- [9] Ciccarelli G, Dorofeev S. Flame acceleration and transition to det-  
onation in ducts. *Prog Energy Combust Sci*, 2008, 34(4): 499
- [10] Lee J H S. *The Detonation Phenomenon*. New York: Cambridge University Press, 2008
- [11] Schwartz M, Shaw L. *Signal Processing: Discrete Spectral Analysis, Detection and Estimation*. New York: McGraw-Hill, 1975.
- [12] Oppenheim A V, Schafer R W. *Discrete-time Signal Processing*. 2nd Ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999
- [13] Shepherd J E, Moen I O, Murray S B, et al. Analysis of the cellular structure of detonations // 21st Symposium (International) on Combustion. Munich, 1986: 1649
- [14] Shepherd J E. Detonation in gases. *Proc Combust Inst*, 2009, 32(1): 83
- [15] Zhao H, Lee J H S, Lee J, et al. Quantitative comparison of cellular patterns of stable and unstable mixtures. *Shock Waves*, 2016, 26(5): 621
- [16] Kaneshige M, Shepherd J E. *Detonation Database* [DB/OL]. California Institute of Technology. (1999-09-03) [2016-01-05]. [http://shepherd.caltech.edu/detn\\_db/html/db.pdf](http://shepherd.caltech.edu/detn_db/html/db.pdf)