

# 汽油机 PIV 稳态进气试验及滚流比计算

朱忠攀, 林 瑞, 杜爱民, 朱沛沛, 袁峥正  
(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

## PIV Steady State Air Intake Experiment and Tumble Ratio Calculation of Gasoline Engines

ZHU Zhongpan, LIN Rui, DU Aimin, ZHU Peipei, YUAN Zhengzheng  
(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** A visual particle image velocimetry (PIV) test system was set up for the in-cylinder flow field measurement of a 3-cylinder gasoline engine. On this basis a test method for tumble ratio calculation at different flow field cross section was studied, and the test results were compared with the simulation data. Results show that the transversal velocity field in the cylinder measured by 2D3C PIV test is consistent with the simulation data calculated by using AVL FIRE software. Flow coefficient and tumble ratio obtained by test measurements and simulation calculations are in agreement along with the change trend of valve lift, and the error is within a reasonable range. The 2D2C PIV test can be used to measure the velocity field at different cross section of the cylinder to show the variation of the 3D flow field in the cylinder, in which the valve axisymmetric velocity field can be well used to characterize the motion state of the tumble flow. In addition, the transversal velocity field can be synthesized by the equally spaced axial cross-sectional velocity field and rotary axial cross-sectional velocity field measured by a series of PIV measurement. The velocity distributions and the gradient field change trend are the same as that of the transversal velocity field measured by 2D3C PIV test, but the measured tumble flow ratio is smaller than the calculated value.

**摘要:** 针对某3缸汽油机,搭建了粒子图像测速(PIV)可视化试验测试系统,并进行缸内流场测量。研究了通过不同流场切面进行滚流比计算的试验方法,并进行了试验与仿真结果的对比。研究表明:基于2D3C PIV试验测得的缸内横切面速度场与AVL FIRE软件仿真数据具有较好的一致性,试验与仿真计算的流量系数与滚流比随气门升程的变化趋势吻合,误差在合理范围内。通过2D2C PIV可以测得缸内不同切面的速度场来表征缸内三维的流场变化,其中气门轴对称切面很好地表征了滚流的运动状态,此外,通过一系列PIV测量得出的等间距轴向切面与旋转轴向切面可以拟合横切面的速度场,其速度分布与梯度变化趋势与2D3C测得的速度场相同,但测得滚流比计算值偏小。

**关键词:** 内燃机;汽油机;PIV试验;进气;滚流比

**Key words:** IC engine; gasoline engine; particle image velocimetry (PIV) test; air intake; tumble ratio

**DOI:** 10.13949/j.cnki.njgc.2017.04.020

中图分类号: TK417

文献标识码: A

收稿日期: 2015-12-10

基金项目: 校企合作项目(20151757)

Fund Project: University-Enterprise Cooperation Projects(20151757)

作者简介: 朱忠攀(1988—),男,博士生,主要研究方向为汽油机试验与仿真,E-mail:521bergsteiger@tongji.edu.cn;

杜爱民(联系人),副教授,E-mail:duaimin1971@aliyun.com。

## 0 概述

汽油机进气道设计的流动特性参数指标主要有流量系数和滚流(涡流)强度等。相关研究表明:流量系数是表征充气量的重要指标,而滚流比则对气流运动、混合气形成及燃烧排放具有重要影响,高滚流比可以提高燃烧速率,改善燃烧稳定性与经济性,气道设计一般需要在获得足够流量系数的前提下尽量加大滚流强度<sup>[1-2]</sup>。因此,流量系数、滚流比日益成为汽油机气道设计的重要性能衡量指标。

目前,国内外广泛采用稳态流动试验法检测试验发动机气缸盖进、排气道的宏观流动特性参数,但针对滚流比的计算评价方法尚未取得统一,常见的方法包括 Ricardo 评价方法、FEV 评价方法、AVL 评价方法及 SwRI 评价方法等<sup>[3]</sup>,由于试验设备、试验条件、计算方法等影响,其滚流比计算结果差异较为明显,且上述试验方法无法从微观角度展开流场测量分析。文献[4-6]表明:随着光学技术与图像处理技术的发展,粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)测试技术应用于发动机缸内流场及喷雾油气混合等领域,能有效克服此前其他测试仪器(如流量计、叶轮等)对缸内流动测试的单点、非瞬态和对流场有干扰的缺点,具有广阔的应用前景。运用 PIV 测试技术开展缸内流场测试的方法主要有两种方案:(1)采用二维平面内对 2 个速度分量测试(2-dimensional 2-component, 2D2C)的 PIV 测试系统,顾名思义该系统包含两个部件,由 1 个激光发射器形成被测光面,由 1 个摄像头进行光面拍摄,拍摄到的粒子运动轨迹可表征在该光学平面的二维流场运动。目前该方案运用的较多,如:文献[7]通过 2D2C PIV 技术研究了稳态滚流测试过程中流场的微观结构及其演化规律,阐明不同模拟缸套结构参数对气道滚流比计算结果影响规律;文献[8]采用 2D2C PIV 测试方法对不同进气道不同发动机转速下的某透明单缸机缸内流场及滚流进行了详细研究。(2)采用二维平面内对 3 个速度分量测试(2-dimensional 3-component, 2D3C)的 PIV 测试系统。该系统包含 1 个激光器与 2 个摄像头,2 个摄像以一定角度对光面进行拍摄,从而可合成该平面处三维的流场运动。AVL 公司便采用了基于 2D3C PIV 技术的稳态流动试验法进行滚流比测试代替了传统的 AVL 稳流试验台,但该方案只能观察到 1/2 缸径处的横切面流场流动情况,其他缸内微观流场变化对其试验精度影响机理无法获得。综上,为深入分析缸内进气过程不同纵横切面的速度场变化,探究 2D2C

与 2D3C 进行滚流比计算分析的方法的优异,本文中搭建了可视化的进气道稳态试验台,采集了大量 PIV 流场数据信息,并进一步结合计算流体动力学(CFD)仿真技术对试验测量结果进行了对比分析,得出了发动机稳态进气试验缸内三维的流动情况。

## 1 流量系数及滚流比计算理论分析

### 1.1 流量系数

流量系数  $\delta$  的定义为气门座的实际空气流量与理论空气流量之比,其计算式为:

$$\delta = \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{th}} \quad (1)$$

式中,  $\dot{m}$  为试验测得的实际空气流量;  $\dot{m}_{th}$  为理论进气量。

$$\dot{m}_{th} = Z\pi \frac{d_v^2}{4} \sqrt{2\rho\Delta p} \quad (2)$$

式中,  $Z$  为气门数目;  $d_v$  为气门座内径;  $\rho$  为气门座处气体密度;  $\Delta p$  为进气道压力降。

AVL 评价方法中平均流量系数  $\delta_m$  为:

$$\delta_m = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^\pi \left( \frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^3 \frac{1}{\delta^2} d\alpha}} \quad (3)$$

式中,  $\alpha$  为曲轴转角;  $c_m$  为活塞的平均速度;  $c(\alpha)$  为活塞在  $\alpha$  时的运行速度。其中  $c_m$  计算式为:

$$c_m = \frac{n \cdot s}{30} \quad (4)$$

式中,  $s$  为发动机行程;  $n$  为发动机转速。在稳态试验中,  $c_m$  与通过 PIV 测量得到的发动机平均轴向速度  $\bar{W}$  相等。

### 1.2 滚流比

根据速度场求解滚流比  $R_i$  的计算式为:

$$R_i = \frac{\omega_{FK}}{\omega_{MOT}} \quad (5)$$

式中,  $\omega_{FK}$  为 PIV 测量的速度场旋转角速度;  $\omega_{MOT}$  为由平均轴向速度  $\bar{W}$  求得的平均轴向角速度,其计算式为:

$$\omega_{MOT} = \frac{\pi \bar{W}}{s} \quad (6)$$

由式(4)和式(6)可推导出:

$$\omega_{MOT} = \frac{n \cdot \pi}{30} = \omega \quad (7)$$

即 PIV 测量求得的平均轴向角速度与发动机角速度相等。

根据有限元的理论,将速度场分割为小单元, $f_i$  为第  $i$  个单元的面积, $\omega_i$  为相对滚流轴线的角速度, $r_i$  为第  $i$  个区域到滚流轴的距离。 $\omega_{FK}$  的计算式为:

$$\omega_{FK} = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i r_i^2 f_i}{\sum_{i=1}^n r_i^2 f_i} \quad (8)$$

平均滚流比的计算式为:

$$R_m = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{\omega_{FK}}{\omega_{MOT}} \left( \frac{c(\alpha)}{c_m} \right)^2 d\alpha \quad (9)$$

综上,汽油机滚流比的计算可以转换为速度场轴向角速度与旋转角速度等参数的测量与计算,为此本文搭建了稳流试验台 PIV 测试系统,并结合 CFD 仿真进行深入研究。

## 2 试验设备与试验方案

### 2.1 试验设备

传统 AVL 气道稳流试验台的结构组成示意图如图 1 所示。气缸套内的动量计会对发动机实际缸内流场产生影响,造成试验误差。本文中采用 PIV 测试系统代替动量计和流量计来进行流量及流速的测量,气道稳流试验平台的其他基本组成保持不变,这样有效规避了传统测试系统对流场变化造成的影响。

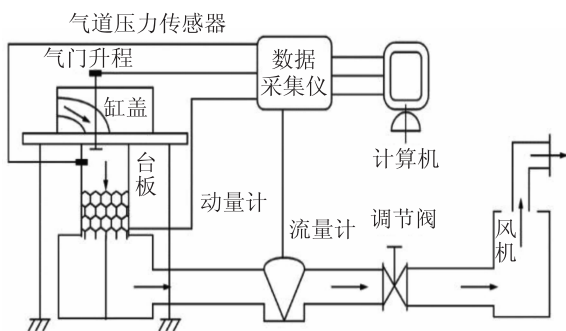


图 1 AVL 气道稳流试验台

市场上主流 PIV 试验系统主要来自于 3 家企业:德国的 Lavision 公司、美国 TSI 公司、丹麦 Dantec 公司。本文中采用 TSI 公司的 PIV 测试系统,包括三氧化二铝示踪粒子、高功率激光器、高速摄像头、玻璃纤维导光臂、滤光镜、分光镜、PC 机、Insight3G 软件等。

试验中风机采用三叶型罗茨鼓风机进行抽气,其主轴转速 1 850 r/min,流量为 3 m<sup>3</sup>/min。试验平台可通过气道压力传感器反馈调节阀流量控制来稳定气道压力。

### 2.2 发动机样机参数

本文以某 3 缸直喷汽油机缸盖为试验研究对

象,汽油机主要参数见表 1。

表 1 发动机参数

| 项目            | 参数        |
|---------------|-----------|
| 气门数           | 4         |
| 缸径/mm×活塞行程/mm | 80.0×88.2 |
| 曲轴回转半径/mm     | 44.1      |
| 连杆长度/mm       | 142.9     |
| 气门座内圈直径/mm    | 28.8      |
| 压缩比           | 9.5       |

为进行 PIV 试验,采用透明石英缸套模拟发动机的缸套,其内径是 80 mm,透明缸套与缸盖进行胶装密封,并通过直角管与稳压腔、风机相连,其连接方式如图 2 所示。

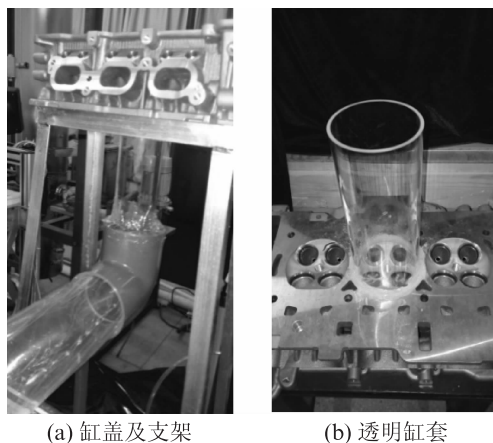
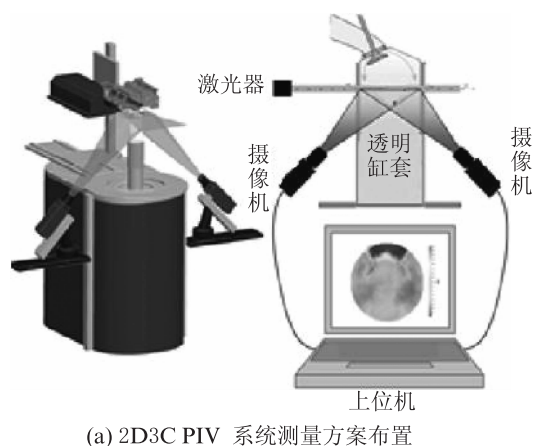


图 2 发动机缸盖与透明缸套连接

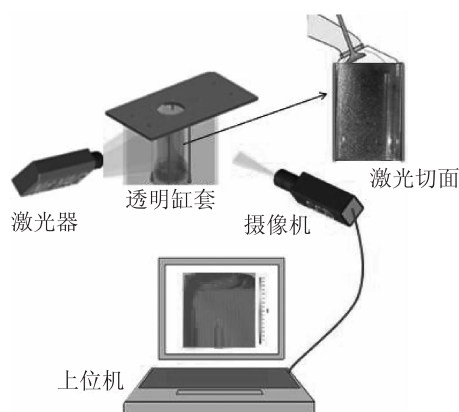
### 2.3 试验方案

图 3 为透明缸套径向横切面速度场测量的 2D3C PIV 系统布置方案与透明缸套轴向纵切面速度场测量的 2D2C PIV 系统布置方案对比图。2D3C PIV 系统通过测量 1/2 缸径处的径向横切面速度场来进行滚流比计算,该方案默认切面中心即滚流中心。试验中激光器水平光束切割透明缸套形成光学横切面,呈一定角度布置的两个摄像头分别对通过横切面的粒子成像。而 2D2C PIV 系统的激光器发出光束纵向切割透明缸套形成轴向光学纵切面,与之呈 90°角度布置的摄像头拍摄轴向纵切面的粒子速度场,可对二维平面滚流比进行计算并进一步分析滚流中心位置及滚流状态。

为研究缸内速度场分布对发动机滚流比的影响,本文首先进行了 2D3C PIV 试验获得滚流比计算的横切面速度场,随后选择等间距纵切面速度场测试与旋转纵切面速度场测试 2 种方式进行了 2D2C 平面速度场的试验测量,其切割示意图如图 4 所示。2 种方式可以得到不同切面的速度场,同时可



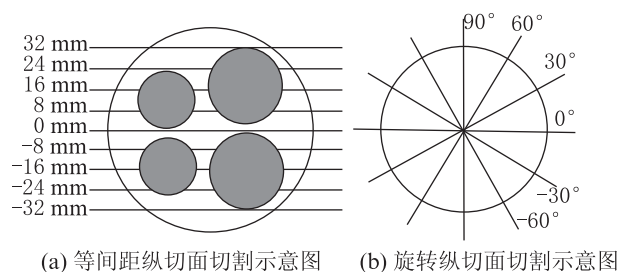
(a) 2D3C PIV 系统测量方案布置



(b) 2D2C PIV 系统测量方案布置

图 3 PIV 测试方案

以根据试验数据拟合缸内横截面速度场流场图,以不同角度来研究滚流的形态特征。由参考文献[9-10]对示踪粒子的分析可知,粒子直径越小跟随性越好,但示踪粒子过小成像效果较差。为避免粒子造成误差,本文经多次试验最终选择采用粒子直径  $15\ \mu\text{m}$  的三氧化二铝作为示踪粒子。根据粒子速度及光源宽度,双曝光时间选择为  $15\ \mu\text{s}$ 。



(a) 等间距纵切面切割示意图 (b) 旋转纵切面切割示意图

图 4 测试切割面示意图

## 2.4 缸内流场 CFD 建模

2D3C 与 2D2C PIV 测试都是针对某一特定切面进行速度场测量,不能完全表征缸内的三维流动情况,且难以进行关联分析,故有必要针对汽油机缸内流场进行 CFD 建模分析,模型如图 5 所示。进气

道稳态仿真模型包括进气道、进气门、缸盖燃烧室、2.5 倍缸径的模拟缸套和入口稳压腔。模型大部分采用六面体网格,最大尺寸为  $4\ \text{mm}$ ,在进气门、气门座等处进行了细化,共有 1 089 453 个网格。湍流模型采用二阶精度的  $k-\zeta-f$  模型,离散方程组的压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法,进出口边界采用定压差法,压差为  $2\ \text{kPa}$ 。

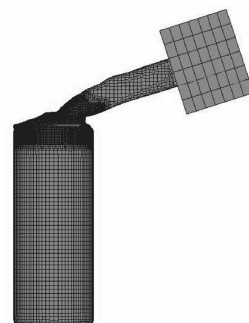
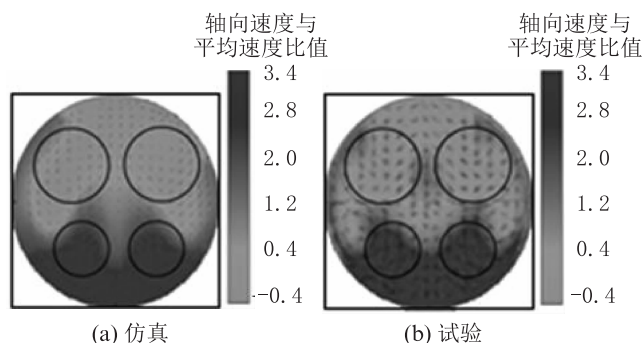


图 5 进气道稳态仿真模型

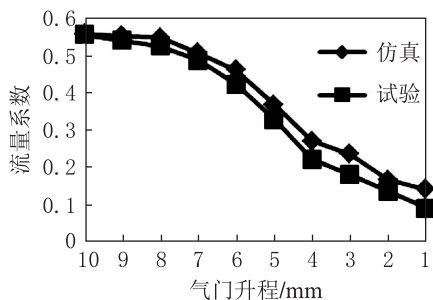
## 3 试验与仿真结果分析

### 3.1 滚流比计算

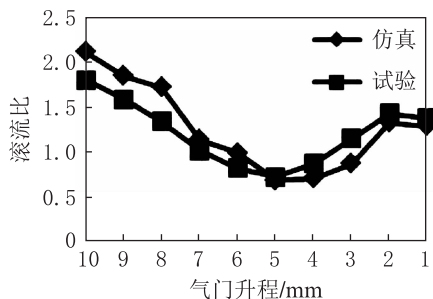
设置进气压力为外界大气压力,气道进气与透明缸套出气的压差稳定在  $2\ \text{kPa}$ ,依据 2D3CPIV 测试方案分别测量了  $1\sim 10\ \text{mm}$  范围内不同气门升程的速度场,并与 CFD 仿真结果进行了对比分析。图 6 展示了气门升程为  $10\ \text{mm}$  时,试验与仿真分别得到的速度场对比情况,仿真与试验测得的速度场分布大致相同,且均能表征进排气门对应不同区域的速度梯度分布及变化。以上通过添加 10 个厚度为  $1\ \text{mm}$  的精加工垫片来保证  $10\ \text{mm}$  气门升程,每减少一个垫片气门升程可降低  $1\ \text{mm}$ ,进而可测得不同气门升程的速度场。

图 6 气门升程  $10\ \text{mm}$  时缸内速度场对比图

结合流量系数与滚流比的计算式,通过 MATLAB 编程导入 PIV 速度场试验数据并进行数值计算,可以求得不同气门升程下滚流比与流量系数。该数据与 CFD 仿真的计算结果对比如图 7 所示。



(a) 不同气门升程的流量系数



(b) 不同气门升程的滚流比

图7 流量系数与滚流比仿真试验对比

由试验数据与仿真数据对比可知,试验与仿真数据的变化趋势一致,误差在许可范围内。随着气门升程的降低,流量系数逐渐降低,而滚流比的试验结果先降低后升高。这是因为在压差一定的情况下,升程较低,气流速度越快,更易形成滚流。本文中选择气门升程为10 mm的条件下进一步深入分析不同切面速度场对滚流比测试的影响。

### 3.2 等间距纵切面速度场分析

针对2D2C PIV试验,气门升程为10 mm条件下的等间距切面的速度场如图8所示。速度场滚流运动在靠近中心切面时表现较为明显,离中心越远的切面滚流越弱。

根据式(5)~式(8)计算求得各切面的滚流比数值,如图9所示。由滚流比的计算可以得出缸内速度场呈现对称分布的特点,这主要是由于汽油机进气道滚流设计及进气门呈轴对称分布的物理结构决定的。

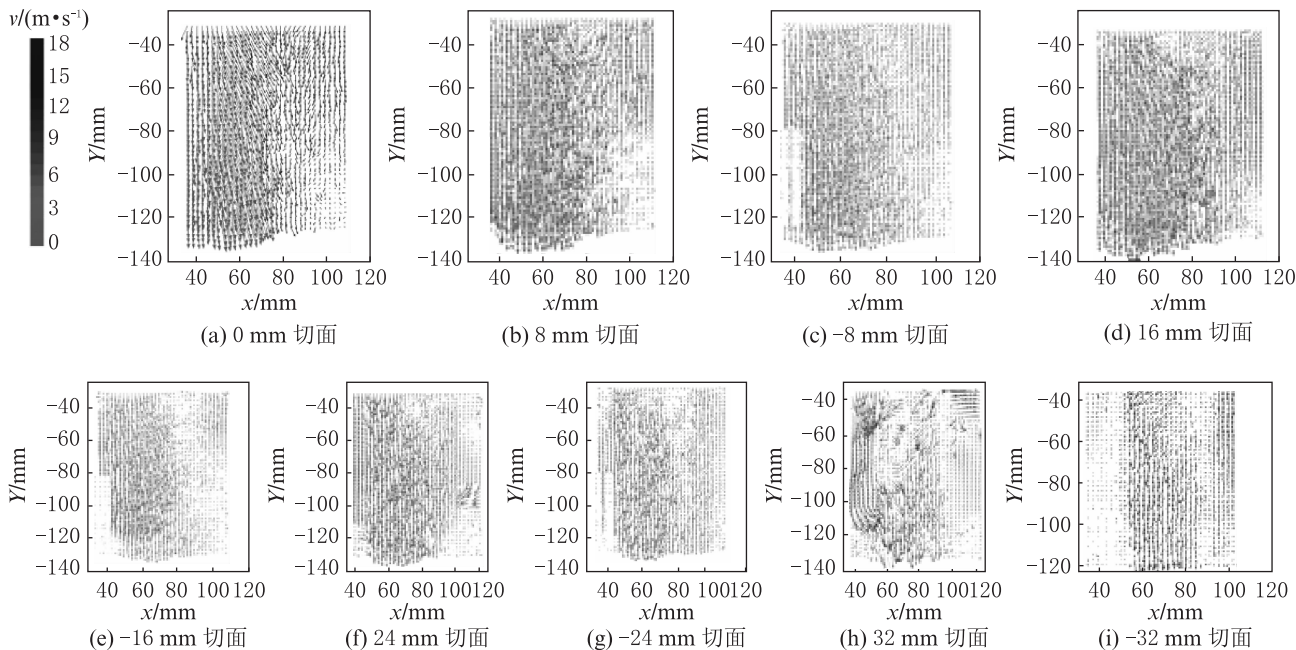


图8 PIV等间距测试切面速度场分布图

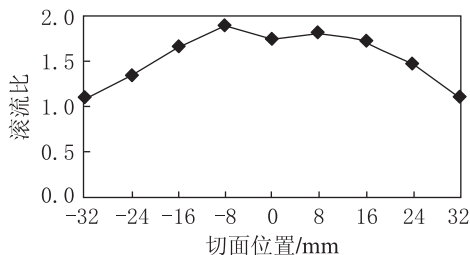


图9 等间距切面速度场滚流比计算

### 3.3 旋转纵切面速度场分析

由等间距轴向切面PIV测试数据分析可知,采取中切面进行滚流比的研究最能表征整体滚流运动情况。为比较不同旋转角度的中切面速度场运动规律,不同旋转角度的中切面速度场通过2D2C PIV进行了测量,其切面图如图10所示。由各切面速度场可以看出缸内三维流动情况呈对称分布,其中 $30^\circ$ 切面与 $-30^\circ$ 切面速度场分布类似, $60^\circ$ 与 $-60^\circ$ 切面

速度场类似,由于  $0^\circ$  切面与  $90^\circ$  切面互相垂直,故所拍得的流场图片差异较大。根据式(5)~式(8)计算求得各切面的滚流比数值,各切面滚流比计算数值

如图 11 所示。各旋转切面滚流比计算结果表明,旋转切面以  $0^\circ$  切面对称分布,证明  $0^\circ$  切面是最能诠释缸内滚流形成的切面。

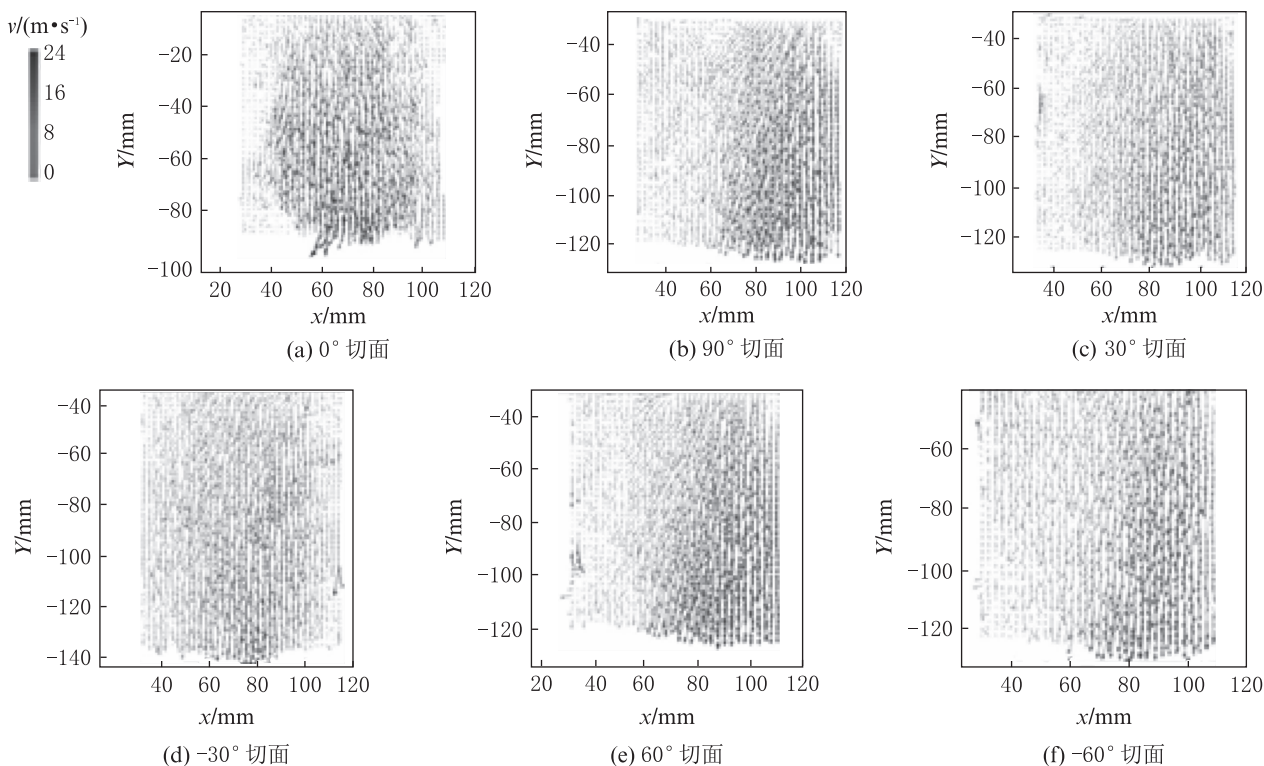


图 10 PIV 旋转中切面速度场分布图

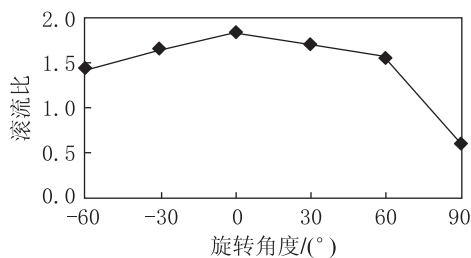


图 11 旋转切面速度场滚流比计算

### 3.4 2D2C 纵切面拟合横截面计算滚流比

为对比分析 2D2C 与 2D3C PIV 试验方法之间的区别与联系,本文对 2D2C 测得的纵切面原始数据进行了数据挖掘,筛选出各切面在  $1/2$  缸径处界面位置的速度场数据进行平面拟合,如图 12 所示。两者对比可知,2 种方法拟合得到的缸内速度场的分布情况基本一致,排气门侧的流场速度较进气侧大,但等间距拟合不能得到完整的横切面速度场。

进一步计算分析发现,两者求得的滚流比数值也相差不大,但与 CFD 仿真计算及 2D3C 方法计算的滚流比相比,计算结果偏小。拟合速度场求得滚流比的计算结果与仿真及 AVL 2D3C 试验的对比结果如图 13 所示。2D2C 法拟合横截面计算滚流比的结果偏小,主要是因为该方法拟合后的速度场依然是二维速

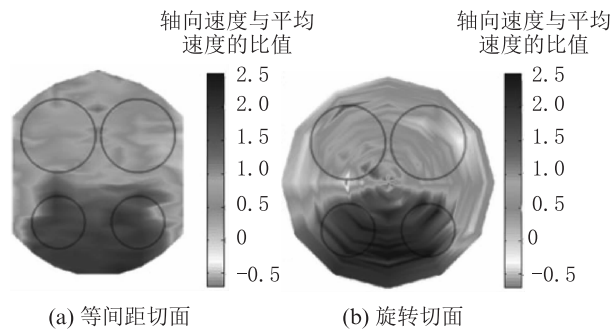


图 12 轴向切面拟合横向切面速度场度且采集的速度场数据量太少所致的误差。

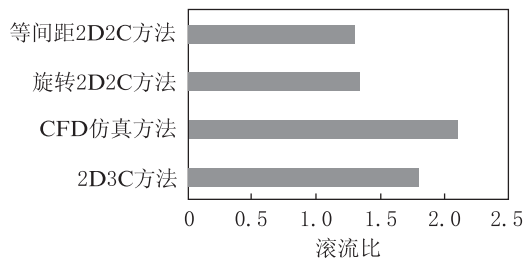


图 13 横切面速度场的滚流比计算对比

综上,由不同滚流比计算方法对比可知,2D3C 方法测量进行滚流比计算的方案更为准确,而由

2D2C 切面拟合横截面后再进行滚流比计算会存在拟合误差;因此对发动机滚流比进行精确测量还是应该选择 2D3C PIV 测试方法。

#### 4 结论

(1) 通过 PIV 试验可以有效地进行汽油机缸内流场测量,基于 2D3C PIV 试验方法可以精确开展流量系数与滚流比的测量计算,通过与 CFD 仿真数据对比,流量系数与滚流比在气门升程从 1 mm 到 10 mm 区间的变化趋势一致,计算误差在合理范围内,流量系数随着气门升程降低而降低,而滚流比则先降低后增大。

(2) 不同切面的 2D2C PIV 试验可以有效观察缸内不同区域的速度变化情况及缸内滚流的微观状态。缸内三维流场  $0^\circ$  轴向纵切面(基本沿着气门对称分布的轴向切面)呈对称分布,该轴向纵切面也最能表征滚流形成及变化特点。

(3) 利用一系列 2D2C PIV 试验测量轴向纵切面速度场可进一步通过数据挖掘及平面拟合得到在  $1/2$  缸径处的横截面速度场及其滚流形成情况,其中旋转纵切面比等间距纵切面的拟合方法好,但由这两种方法计算得到的滚流比的值都略小,为精确开展滚流比计算,依然需要 2D3C PIV 试验。

#### 参考文献:

- [1] 韩文艳,许思传,周岳康,等. 滚流比对缸内直喷汽油机混合气形成及燃烧的影响[J]. 内燃机学报,2012,30(6):499-505.  
HAN W Y, XU S C, ZHOU Y K, et al. Roll flow ratio on direct injection gasoline engine mixture formation and combustion in cylinder effect [J]. Transactions of CSICE, 2012,30(6):499-505.
- [2] AMER A A, REDDY T N. Multidimensional optimization of in-cylinder tumble motion for the new chrysler hemi[C]//SAE Paper. Auburn Hills, Michigan, USA, 2002,2002-01-1732.
- [3] 戴崇洲. 变压差气道稳流试验台的应用[J]. 天津汽车,2007(2):22-24,40.  
DAI C Z. Application of test rig of port steady flow with variable pressure drop[J]. Journal of Tianjin Automobile, 2007(2):22-24,40.
- [4] STANSFIELD P, WIGLEY G, JUSTHAM T, et al. PIV analysis of in-cylinder flow structures over a range of realistic engine speeds[J]. Experiments in Fluids, 2007,43:135-146.
- [5] WILSON T, HASTE M, XU H M, et al. In-cylinder flow with negative valve overlapping-characterized by PIV measurement[C]//SAE Paper. Whitley, Coventry, UK, 2005,2005-01-2131.
- [6] 范佳琪,张振东,尹丛勃,等. 4 气门直喷汽油发动机可变滚流进气系统的试验研究[J]. 内燃机工程,2013,34(5):50-56.  
FAN J Q, ZHANG Z D, YIN C B, et al. Experimental investigation on flow field of variable tumble intake system for 4-valve GDI engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2013,34(5):50-56.
- [7] 金帅,王天友,刘大明,等. 4 气门汽油机气道滚流比测试方法的试验研究[J]. 内燃机学报,2012,30(1):29-34.  
JIN S, WANG T Y, LIU D M, et al. An experimental investigation on tumble flow characteristics in a four-valve gasoline engine[J]. Transactions of CSICE, 2012, 30(1): 29-34.
- [8] HEIM D, GHANDHI J. A detailed study of in-cylinder flow and turbulence using PIV [C]// SAE Paper. Madison, Wisconsin, USA, 2011,2011-01-1287.
- [9] 胡华,刘书亮,王天友,等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究[J]. 小型内燃机与摩托车,2002,31(1):5-8.  
HU H, LIU S L, WANG T Y, et al. An investigation into tracer particles for air flow in cylinder of IC engines[J]. Small Internal Combustion Engine, 2002,31(1):5-8.
- [10] 赵宇. PIV 测试中示踪粒子性能的研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.