
汽油机滚流评价方法的模拟研究

王瑾¹, 王天友¹

(1. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 在内燃机中, 良好的缸内空气运动直接影响着发动机缸内的燃烧状况, 进而影响发动机的动力性、经济性以及排放特性。而内燃机中气道的优劣是决定这些因素的关键。通过气道稳流试验获得内燃机进气道的流量系数、涡流比、滚流比等流动特性参数, 从而对气道性能进行评价, 是目前国内外内燃机开发广泛采用并且行之有效的办法。目前, 气道稳流试验评价方法有 Ricardo、FEV、AVL 以及 SwRI 等多种, 但没有一个公允的标准, 尤为体现在对滚流的测试及评价。

本文采用内燃机工作过程三维数值模拟软件 CONVERGE, 针对滚流的直接测量方法建立计算模型, 选取不同截面探索了使用计算机模拟进气道稳流试验及其性能评价的方法, 并详细阐述了模型的建立、网格的划分以及气道性能通过改变模型参数(即出口直径、气道压差)研究不同工况下缸内滚流变化规律, 并与稳流试验结果进行对比, 对现有滚流预测方法深入理解并优化。为在较短周期内, 全面、细致的了解缸内气流运动, 以更为可操作的手段对滚流运动进行评价、研究、设计。

关键词: 汽油机; 模拟; 进气道; 滚流

Abstract: In the internal combustion engine, the air flow determined by the intake ports in the cylinder directly affects the combustion characteristics, thereby affecting the engine power, economy and emissions. It is an efficient and widely used method to develop internal combustion engine that evaluating the ports by the flow parameters such as flow coefficient, swirl ratio, tumble ratio acquired by the steady flow test rig. Nowadays, there are several evaluation method of steady flow including Ricardo, FEV, AVL and SwRI methods, but not a full and fair standard, especially for the tumble test and evaluation.

In this paper, using the internal combustion engine CFD simulation software CONVERGE, creates a calculation model of the direct measurement method for tumble, selects different cross sections to explore the method that simulation of the inlet steady flow test and its performance evaluation. Elaborated on the model division of the grid and intake ports performance by changing the model parameters (ie, the exit diameter, the pressure) to study cylinder Tumble variation under different conditions. Compared with the steady flow test results on the existing tumble to forecast the method of an in-depth understanding and optimization. It makes it possible that the tumble motion for a shorter period, comprehensive, detailed understanding of the cylinder air movement, more workable means to evaluate,

research, designed.

Key words: the gasoline engine; simulation; intake ports; tumble

在内燃机中,良好的缸内空气运动直接影响着发动机缸内的燃烧状况,进而影响发动机的动力性、经济性以及排放特性。缸内气流运动的组织主要由发动机气道来完成,故而内燃机中气道的优劣是决定这些因素的关键。研究发现,组织良好的缸内空气运动对提高汽油机的火焰传播速率,降低燃烧循环变动,适应稀燃或层燃有重要作用^[1]。

近年来,多气门汽油机及滚流进气系统已成为汽车发动机中广泛应用的缸内流动组织方式。滚流对汽油机性能的改善作用已被广泛证实。随着缸内直喷汽油机的迅速发展,滚流在组织缸内直喷汽油机的分层充量方面也发挥着越来越重要的作用。滚流作为汽油机广泛采用的气体流动组织形式,一直备受关注并得到广泛应用^[2-5]。

滚流是一种大尺度的漩涡,因此其在气流中所占有的能量的比例较高,可以说占绝大部分。在汽油机中,滚流的作用主要有两个。第一,滚流可在压缩终了时转变成湍流,而较强的湍流对燃烧是有非常大的好处的,能加快燃烧速率。第二,由于滚流是一种大尺度的流动,并且方向是已知的,因此可以预见气流的总体方向性,从而可以有利于控制降低循环变动率。因此如何定量地测量、分析气道的流通特性及滚流(涡流)特性,并合理预测真实发动机缸内瞬态流动特性就成为发动机研究与开发的重要内容。

在现采用的各种滚流评价方法,都有其缺陷与不足的情况下,随着计算机技术和数值模拟技术的发展,三维数值模拟在进气道的设计开发过程中的应用越来越广泛。通过 CFD 数值模拟方法不仅可以计算获得流道内气体流动的大量信息,而且还大大缩减试验周期,是现在研究汽油机进气过程气体流动的重要手段。

从 20 世纪 70 年代开始,国外就开始对内燃机进气道气体流动的多维数值模拟进行了很多研究工作,并且取得了很大进展。20 世纪 80 年代末,国外出现了对进气道—气门—气缸所组成的进气系统进行三维流动模拟研究的高潮。Gosman^[6]等人对轴对称进气道—气门—气缸所组成的流动系统的气体流动进行了稳态计算和试验,通过计算结果和试验结果对比发现,对中小气门升程的平均流动的计算结果和试验结果比较吻合,但在大气门升程时计算结果和试验结果相差较大。Sugiura Shigeki^[7]等人对进气道—气门—气缸所组成的进气系统进行了二维稳态和三维稳态流动计算,以研究进气系统几何形状对质量流量和流线形状的影响。Ken Naitoh^[8]等人采用 SIMPLE 和 ICE 法分别计算模拟了 2 气门和 4 气门发动机进气道和气缸内的三维流动,计算结果显示出了复杂的流动现象,如在进气门座附近由于气流速度过快,气流与气门壁面产生分离流动现象,使得该处的湍动能增大;对于双进气道发动机,进气过程中发生剧烈的气流干涉现象,以及接近压缩终了时在缸内产生大量的小涡旋。

随着发动机燃油喷射、燃烧和排放数值模拟技术的深入发展，迫切需要直接评估喷雾燃烧开始前一时刻气缸内平均流动状态和湍流强度，只有瞬态流动分析才能达到这一要求。为此，一些学者开始了瞬态流动分析的探索性工作。1992年，美国通用汽车研究所的 Tang-WeiKuo 对 KIVA 程序进行了修改，运用 O'Rourke 和 A.A.Amsden^[9]提出的粒子阻滞技术处理气门运动，对一由切向气道—气缸组成的系统进行了三维瞬态模拟。随后 Kang.Y.Huh 改进了 KIVA-II 程序，运用障碍物单元技术处理气门运动，对一四气门两冲程发动机工作过程进行了模拟计算。1996年，MIT 的 Wolf Bauer 和 J.B.Heywood^[10]采用 Sar-CD 预测一台单缸两气门汽油机进气系统内的瞬态流动，并与试验结果比较；计算模型包括进气管、进气道、气缸、排气管。其研究目的在于了解整个进气流动过程，包括倒流现象。

综上所述，国外已掌握有关进气道—气门—气缸流动多维数值模拟计算的关键技术，如数值模拟方法、湍流模型、网格生成及运动边界(活塞和气门)的处理等，但大量工作仍在深入开展之中。目前，发动机行业中较为成熟的流动模拟计算软件，越来越多的应用在发动机的研发设计过程中。

本课题采用内燃机工作过程三维数值模拟软件 CONVERGE，针对滚流的直接测量方法建立计算模型，通过改变模型参数(即出口直径、气道压差)研究不同工况下缸内滚流变化规律，并与稳流试验结果进行对比，对现有滚流预测方法深入理解并优化。为在较短周期内，全面、细致的了解缸内气流运动，以更为可操作的手段对滚流运动进行评价、研究、设计。

1 发动机气缸模型

为了便于与实际相结合，本课题建立的计算模型是以已完成的汽油机气道滚流比测试方法的试验研究中采用的模拟缸套的基本参数，见表 1 为蓝本，进行设计建造的。这样，在使模拟结果可与试验结果相互验证，增强模拟得出规律的可靠度的同时，也可以完善试验结论。

表 1 测试发动机基本参数

项目	参数
缸径(mm)	79
行程(mm)	81.5
连杆长度(mm)	129.5
气阀直径(mm)	27.8

在本次模拟中，将整个装置划分为由边长分别为 0.4mm、0.15mm、0.1mm 三种不同类型的三角形面网格组成的整体，并输出 STL 文件。通过在各个初始文件中设定，确定进气口和出气口的压差可调，整个装置的温度假定都为 298.15K，空气中氮氧比为 0.77:0.23.设定

进出口面，加密气缸处的网格。同时，指令输出 rank、velocity、tke、eps、temp、pressure、yplus、density、volume、mass、vorticity。

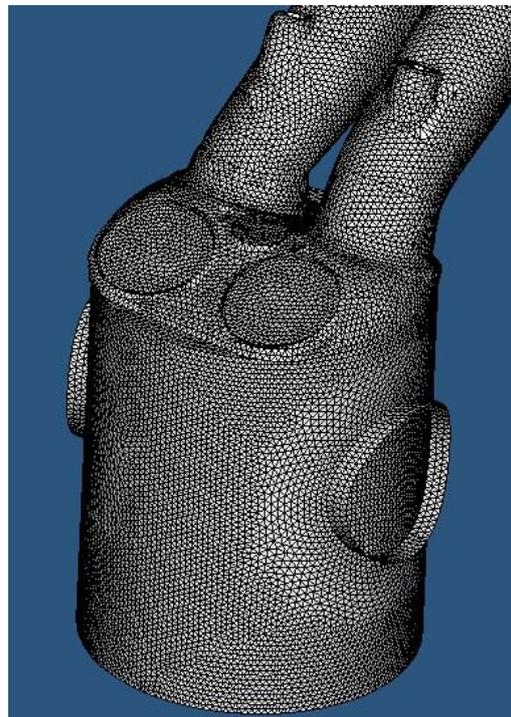
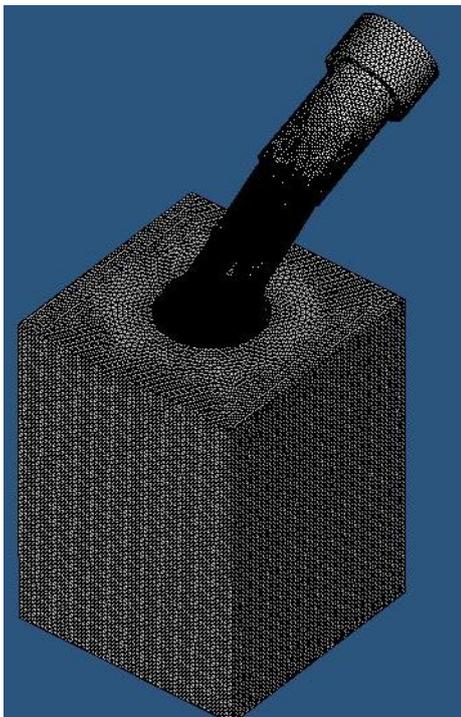


图 1 运用 hypermesh 划分网格整体 图 2 进行加密的部分(0.15mm 为单位的三角形)

2 汽油机气道滚流比测试方法的试验研究

为了研究滚流测量方法对评价结果的影响，以 FEV 测试方法为依据搭建了光学可视化 FEV 滚流测试平台，采用稳流试验与激光诊断技术相结合的方式，对缸内滚流流场进行对比研究，以期建立合理的稳流试验方法和滚流预测模型，为汽油机的燃烧系统设计提供理论依据。

图 4 为可视化 FEV 滚流测试装置示意，测试装置由透明模拟缸套、透明稳压箱、反射镜及测试缸盖组成。装置置于气道稳流试验台上，通过计算机控制稳流试验参数(如气道压差等)。其中，测试缸盖为汽油机缸盖。稳流试验台采用的是天津大学自主开发 TUST 102 气道稳流试验台。PIV 测试系统由相机、激光器、粒子发生器及控制系统组成。光路布置如图 3 所示，激光器与 CCD 相机成 90 度角，激光器片光源经反射镜反射到模拟缸套中，由 CCD 相机拍摄速度场。

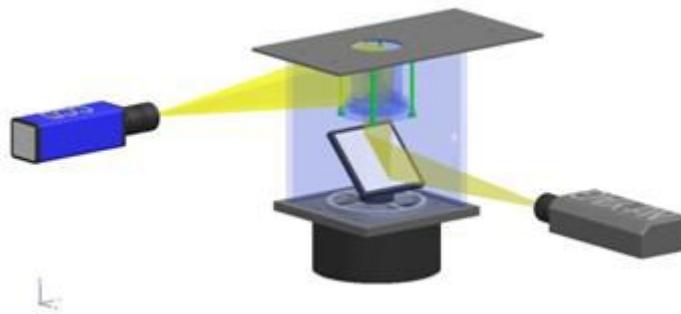


图 3 PIV 测试系统光路布置图

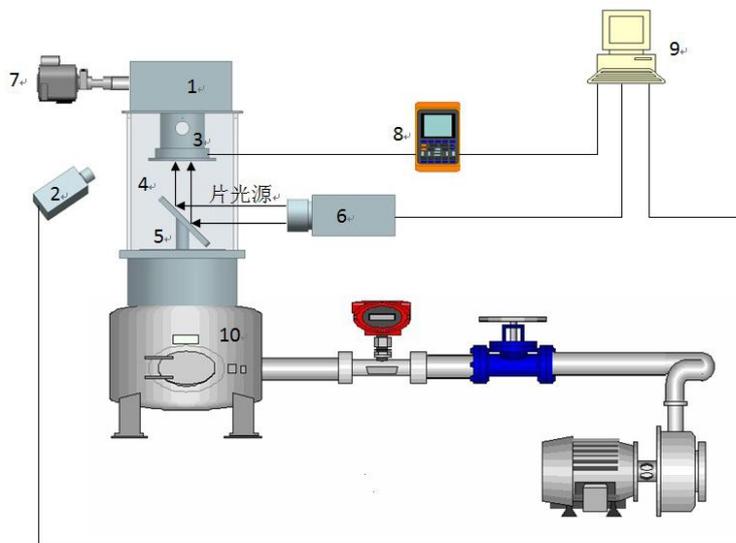


图 4 气道稳流试验台设置示意图

- 1 测试缸盖 2 照相机 3 透明模拟缸套 4 透明稳压箱 5 反射镜
6 激光器 7 粒子发生器 8 采集仪 9 计算机 10 稳流试验台主体

选用模拟缸套的出口直径、拍摄平面位置以及气门升程作为调整参数，调整参数如表 2 所示。

表 2 调整变量

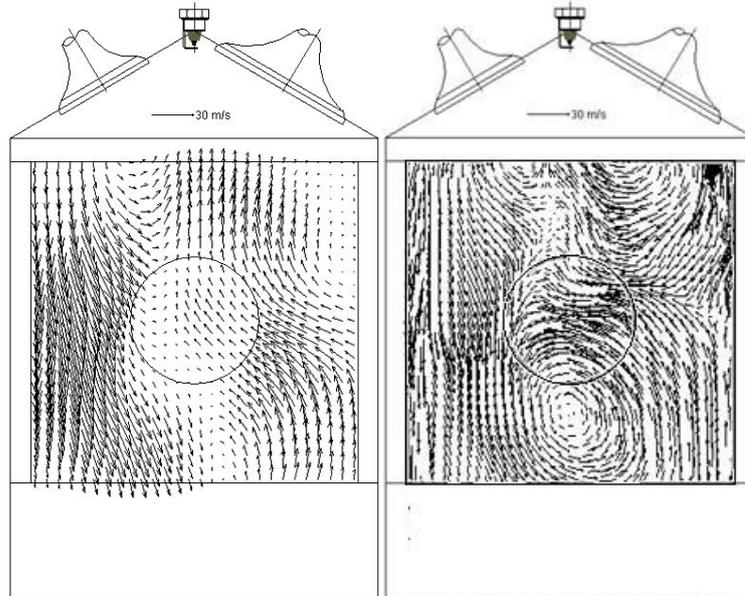
	A	B	C
模拟缸套出口直径/mm	27.65(0.35 倍缸径)	39.11(0.495 倍缸径)	67.70(0.857 倍缸径)
测量平面	平面 1	平面 2	平面 3
气门升程 h/mm	7.54	8.12	8.70
	9.28	9.86	10.44

注： D 为缸套内径等于 79 mm.

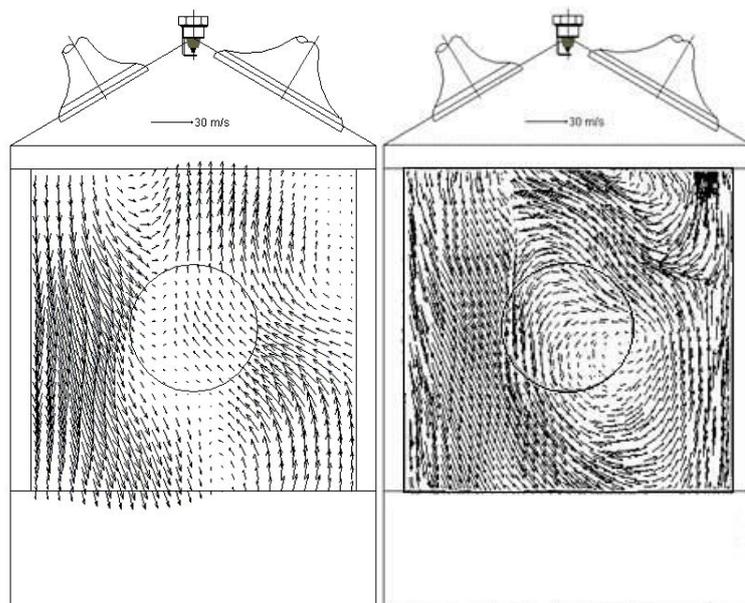
3 模拟结果的试验验证

3.1 相同口径相同压差下缸内流场变化规律

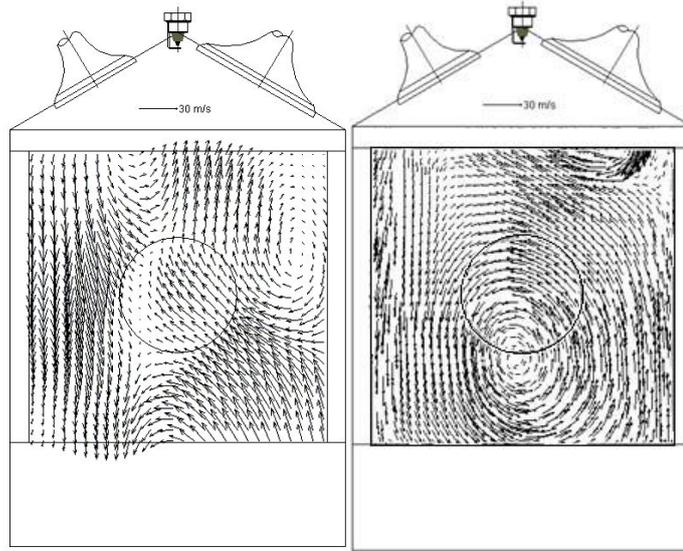
为了方便进行对比，虽然模拟得出的速度矢量图是完整全面的，在本章节内的比较中，仅截取可同试验结果产生对比的部分进行分析，如图 5 右侧图形所示。



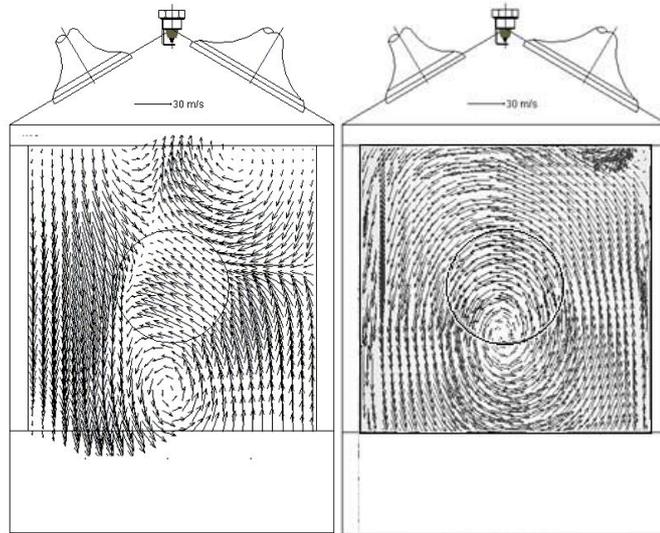
a) 6.96mm 气门升程下的对比



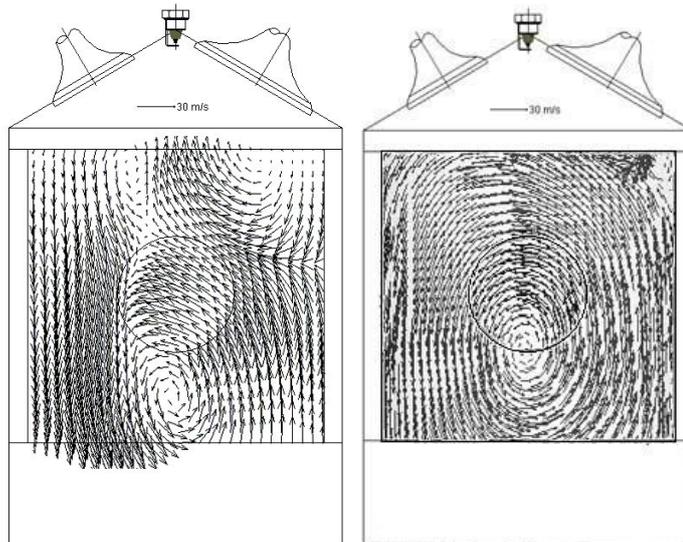
b) 7.54mm 气门升程下的对比



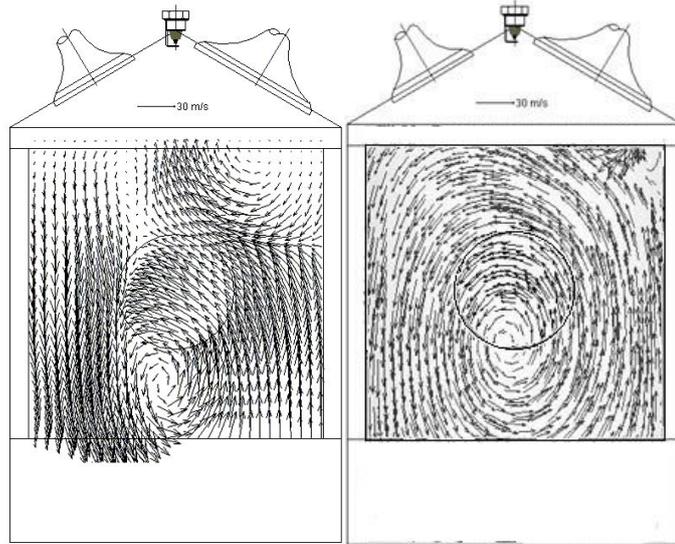
c) 8. 12mm 气门升程下的对比



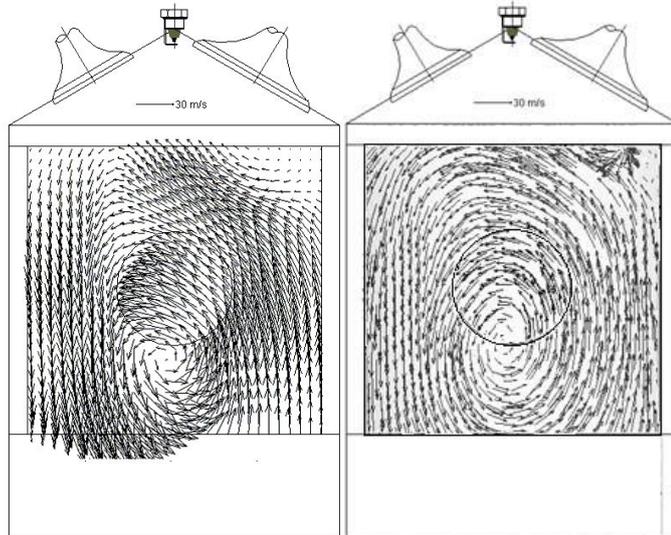
d) 8. 70mm 气门升程下的对比



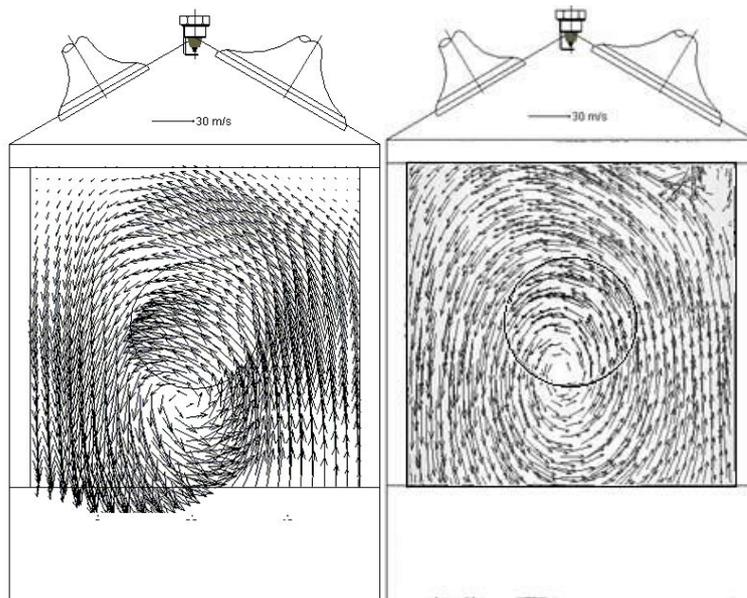
e) 9. 28mm 气门升程下的对比



f) 9.86mm 气门升程下的对比



g) 10.44mm 气门升程下的对比



h) 11.02mm 气门升程下的对比

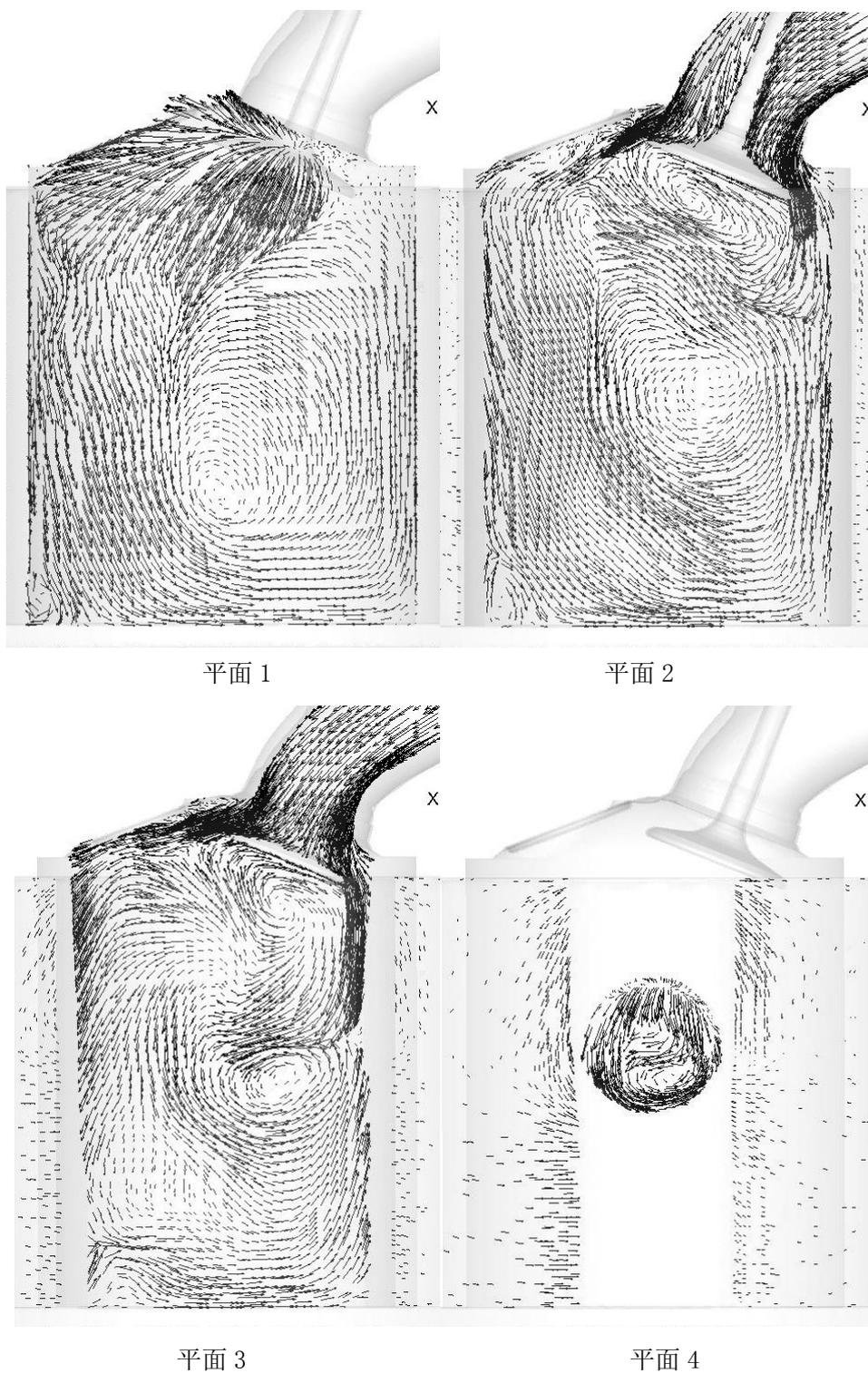
图 5 压差为 4kpa 时，试验结果(左)和模拟结果(右)的速度矢量图的对比

图 4-5 为相同气门升程下模拟结果的流场分布与试验结果的流场分布的比较。从 4-5 可以看出，当气门升程较低时(如 $h=7.54\text{mm}$)，试验和模拟的缸套内流场结构都较复杂，在缸套左侧均有气流分别从进气门上侧进入缸套，沿壁面向下运动。左侧下行气流在模拟缸套壁面导流作用下到达右侧后向上运动，在缸套底部形成一逆时针旋转的大涡，同时小部分向上运动，在气缸上部形成逆时针旋转的小涡。试验和模拟的缸套内流场大体相似，仅在涡心位置上，模拟结果要比试验结果靠右一些。当气门升程升高时(如 $h=9.28\text{mm}$)，从进气门左侧进入缸内向下的气流同左侧气流反弹后沿右侧壁面上行的气流一起，形成了逆时针大尺度旋涡，同时，与小气门升程相比，右上方的逆时针小涡的趋势减弱。在这一阶段气门升程附近，滚流趋势越来越明显，而模拟结果在表现这一方面时比试验结果更加明朗化。随着气门升程的进一步升高(如 $h=11.02\text{mm}$)，从进气门左侧进入缸内向下的气流同左侧气流反弹后沿右侧壁面上行的气流都不断加大，形成了更大尺度的逆时针旋涡，而在小气门升程时还较为明显的右上方的逆时针小涡已经减弱至难以观测，可以忽视。

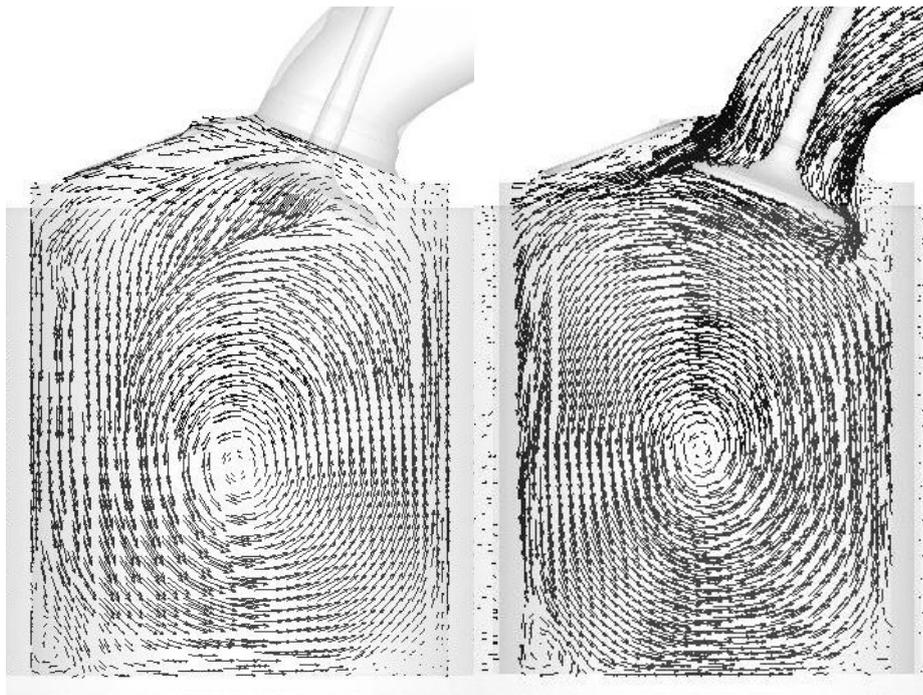
这是由于在低气门升程下，分别从两进气门进入模拟缸套的两股进气相互抑制，而随着气门升程不断提高，这两股气流相互抑制的趋势逐渐转变为相互促进。而且该转变对经过进气门上方进入气缸的左侧气流影响更为明显。在此转变过程中，进气门左侧气流速度增长快于进气门右侧下行气流，致使进气门右侧下行气流被左侧气流反弹后沿右侧壁面上行的气流所取代，最终形成大尺度逆时针滚流。而右侧下行气流形成的小涡也随着气门升程的增大而逐渐消失。

3.2 相同出口直径、相同压差下滚流运动随截面变化的变化规律

在压差为 4kpa，出口径为 0.35D 时，我们可以通过观察在小气门升程($h=7.58\text{mm}$)、中等气门升程($h=9.28\text{mm}$)、大气门升程($h=11.02\text{mm}$)时不同截面的速度矢量图来进行研究。



a) 7.54mm 气门升程时四截面的速度矢量图



平面 1

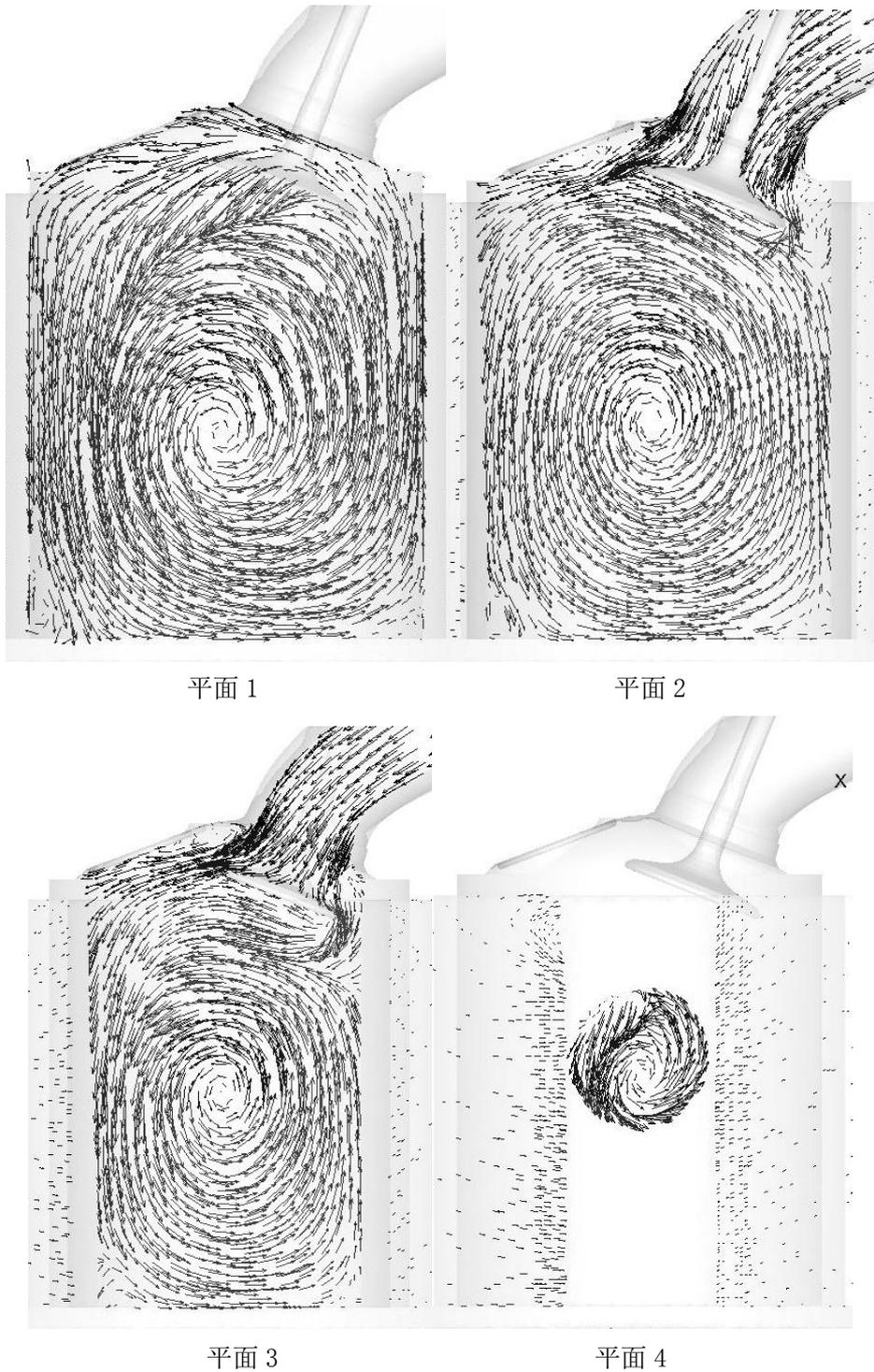
平面 2



平面 3

平面 4

b) 9.28 mm 气门升程时四截面的速度矢量图



c) 11.02 mm 气门升程时四截面的速度矢量图

图 4-7 压差为 4kpa 时同一气门升程下不同截面的速度矢量图

综合观察图 4-7，各个气门升程的不同测量平面内流场结构的变化规律基本一致，但在低气门升程下略有不同。从缸套轴对称面(平面 1)，依次到进排气门中心连线下侧面(平面 2)，距 1 平面 27mm 平面(平面 3)，及至出口面(平面 4)，也就是从缸套中心面依次向出口靠拢时，涡心位置逐渐上移，直至达到出口面的水平位置。还可以观察到，低气门升程时，在平面 2、

平面 3 平面内的流场中,缸套出口附近存在向上运动的气流。当气门升程不断提高时,该气流逐渐产生向左上运动的趋势。尤其是平面 3 测量平面,在气门升程达加大时,该气流已完全形成左行气流,在缸内形成大尺度逆时针滚流。随着气门升程继续提高,缸内滚流迅速增强。并且滚流增长速度要远远大于前两测量平面,滚流强度也明显强于前两测量平面。

4 总结

1)气道稳流模拟试验得出的四个不同测量平面的滚流场变化规律基本一致,滚流场结构在气门升程为 8.12 mm 或 8.70mm 时均会发生显著变化,形成大尺度逆时针滚流。

2)气道稳流模拟试验缸套内流场不同区域流场运动情况不同。出气口附近截面内滚流强度受缸套形状影响最大。

3)气道稳流模拟试验缸套内流场随进出口压差的变化不显著。

4)各测量平面内滚流强度的增大是由于流场结构的变化造成的,并且流场结构变化的增大的幅度却与模拟缸套参数有直接关系,模拟缸套出气口截面直径越小,滚流强度增大幅度越大。缸内滚流比的变化规律从根本上受角动量守恒定律的支配,过小的出口直径是导致滚流比跃升的直接诱因。

参考文献

- [1] 解茂昭. 内燃机计算燃烧学[M]. 2 版. 大连: 大连理工大学出版社, 2005.
- [2] Omor I S, et al. Effect of In-take Port Flow Pattern on the In-Cylinder Tumbling Air Flow in Multi-Valve S. I. Engines. SAE 910477.
- [3] Stone C R. The measurement and analysis of swirl in steady flow[J]. SAE Trans, 1964, 72: 1624.
- [4] Yufeng Li, et al. Stratification of fuel for better engine performance. Fuel, 2006, 85: 465 - 473
- [5] P.G. Aleiferis, et al. The nature of early flame development in a lean-burn stratified-charge spark-ignition engine. Combustion and Flame, 2004, 136 : 283 - 302
- [6] Gosman A. D, Ahmed A. M. Y, Measurement and Multidimensional Calculation of Comprehensive Study[J]. Proc. Imech E, 1994, 208

-
- [7] Sugiure Shigeki, et Numerical Analysis of Flow in the Induction System of an Internal Combustion Engine—Multidimensional Calculation Using a New Method of Lines **【C】**. SAE 900255
- [8] Naitoh K, Fujii H, Urushihara T et al, Numerical Simulation of the Detailed Flow in Engine Ports and Cylinders[J], SAE 900256
- [9] Anthony Amsden A, Peter O' Rourke J, Daniel Butler T, Keith Meintjes, Todd Fansler, Comparisons of Computed and Measured Three-Dimensional Velocity Fields in a Motored Two-Stroke Engine[J], SAE 920418
- [10] Wolf Bauer and John B. Heywood, et, Flow Characteristics in Intake Port of Spark Ignition Engine Investigated by CFD and Transient Gas Temperature Measurement[J], SAE 961997