

# 喷射装置导管对大缸径气体燃料 发动机缸内混合效果的影响

王天波 常思勤 刘 梁

南京理工大学机械工程学院,南京,210094

**摘要:**在喷射装置出口加装导管,将燃气分别导向大缸径多点电喷气体燃料发动机的螺旋进气道和切向进气道,建立了联合喷射装置内部流动区域的发动机瞬态 CFD 计算模型,分析了导管位置对缸内掺混过程的影响。研究表明:对于该切向气道、螺旋气道的组合进气道,进气冲程在缸内靠近缸盖截面上产生了干涉涡流,对于螺旋气道喷射方案,燃气向气缸中心靠近,压缩末了时刻燃气集中在缸盖附近;而对于切向气道喷射方案,燃气冲向活塞顶,压缩末了时刻燃气集中在活塞顶附近。点火时刻的混合效果从优到劣依次为螺旋气道喷射方案、无导管喷射方案、切向气道喷射方案。

**关键词:**大缸径气体燃料发动机;组合进气道;导管;混合效果

中图分类号:TK434.6

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2017.22.004

## Effects of Large-bore Gas-fuelled Engine with Elbow Connected to Gas Injection Device on Mixing Performance

WANG Tianbo CHANG Siqin LIU Liang

School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094

**Abstract:** Gas fuel was induced to the helical intake port and the tangential intake port of a large-bore port fuel injection engine separately by elbow connected to the outlet of gas fuel injection device (GID). The transient computational fluid dynamics(CFD) engine model incorporating the GID's motions was established to analyze the effects of injection location on the in-cylinder mixing processes. The results indicate that the intake flow of two adjacent intake ports, the helical intake port and the tangential intake port will interfere with each other near the cylinder head during the intake stroke. For the helical port injection case, the gas fuel approaches to the cylinder center and concentrate on the cylinder head near the end of the compression stroke; while for the tangential port injection case, the gas fuel flows to the piston top and concentrate on the piston top near the end of the compression stroke. At ignition time, the helical port injection case shows best in-cylinder mixing performance, while the tangential port injection case is the worst.

**Key words:** large-bore gas-fuelled engine; combined intake port; elbow; mixing performance

## 0 引言

对于多点喷射发动机,缸内燃烧、排放情况与进气道、缸内混合效果有着密不可分的联系。

GARG 等<sup>[1]</sup>研究了燃气进气道内喷射位置、喷射方向、喷射定时等因素对缸内分层效果的影响,相对于预混方式,进气道喷射时缸内混合气浓度差异可达 40%。YAMATO 等<sup>[2]</sup>使用计算流体力学(CFD)与粒子图像测速法(PIV)相结合的方法研究了燃气通过切向进气道的四个不同区域喷射

收稿日期:2017-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50876043);江苏省自然科学基金资助项目(BK20130762)

[18] KUZNETSOVN W, MITOR W W, DUBOVSKI I E, et al. Thermal Calculations of Steam Boilers (Standard Method)[M]. Moscow: Energia, 1973: 61-68.

(编辑 王昱玥)

械工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为电站设备安全及寿命评估、高温部件损伤表征与检测技术。发表论文 70 余篇。E-mail: xuhong@ncepu.edu.cn。邓 博,男,1981 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院博士研究生。蒋东方,男,1986 年生。国网能源研究院工程师。郭 鹏,男,1987 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院博士研究生。倪永中,男,1976 年生。华北电力大学能源动力与机械工程学院讲师。

作者简介:徐 鸿,男,1959 年生。华北电力大学能源动力与机

的缸内混合气分布情况。SOANES 等<sup>[3]</sup>和 HERRERA 等<sup>[4]</sup>将一台六缸汽油机分别改装成多点和单点电喷 CNG 发动机,他们指出:燃气冲击在进气门表面形成涡流,进气门打开后燃气与空气在进气门附近强烈的湍流涡流影响下混合效果较好。

根据 CARLUCCI 等<sup>[5]</sup>的研究结果:对于组合进气道,单螺旋进气道模式(切向进气道气门不打开、螺旋进气道燃气喷射)有利于同时降低  $\text{NO}_x$  和 HC 排放。纪少波等<sup>[6]</sup>研究了多点电喷供气方式下四种不同结构形式的导管对燃烧循环差异的影响规律。上述研究均侧重于直接揭示喷射策略对发动机燃烧情况的影响规律,对燃气射流与螺旋进气道、切向进气道内湍流之间相互作用的分析不够深刻,没有研究双进气道不同组合形式对混合效果的影响规律从而揭示组合形式对缸内燃烧、排放情况产生影响的根本原因。

目前本课题组已经完成了大功率气体燃料发动机电控喷射装置的设计与样件研制<sup>[7]</sup>,从出流速度、喷射效率等方面优化了气体燃料喷射装置的稳态喷射特性<sup>[8]</sup>,分析了无导管条件下喷射角度、阀门开启方向对进气道、缸内混合均匀度的影响规律<sup>[9]</sup>。本文在气体燃料喷射装置出口加装导管,分别将燃气引向螺旋气道和切向气道,分析加装导管对缸内工质运动以及缸内掺混过程的影响。

## 1 计算模型与模型验证

### 1.1 计算模型

根据大缸径气体燃料发动机多点电喷供气系统的功能分析(主要包括大供气量和高可控性两个方面),设计了气体燃料电控喷射装置,如图 1

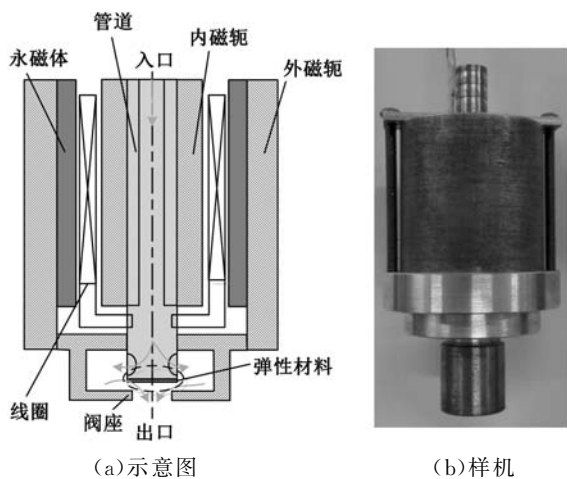


图 1 气体燃料喷射装置工作原理示意图与样机  
Fig.1 Structure and prototype of gas injection device

所示。采用动圈式电磁直线执行器作为驱动部件,采用盘型弹性阀门作为执行部件。

有关该喷射装置的参数设计与详细性能参见文献<sup>[9]</sup>。该气体燃料喷射装置可以实现在  $90^\circ$  CA(曲轴转角)内为大缸径发动机额定工况下各缸提供足够的燃气,气体燃料发动机参数如表 1 所示。

表 1 某大缸径柴油机改装气体燃料发动机参数

Tab.1 Specification of engine

发动机参数	数值
缸径×行程(mm×mm)	131×155
排量(L)	12.53
压缩比	11.5
额定功率(kW),转速(r/min)	255,1900
IVO/IVC(CA)	$30^\circ$ BTDC/ $46^\circ$ ABDC
EVO/EVC(CA)	$78^\circ$ BBDC/ $30^\circ$ ATDC

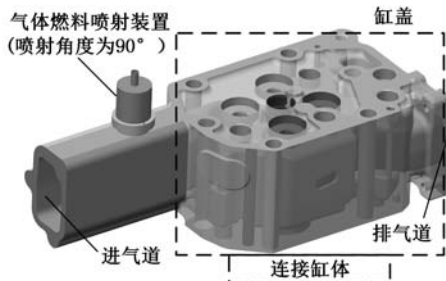
气体燃料电控喷射装置安装在进气道上,如图 2a 所示,提取进气道、气缸和排气道内部流动区域,如图 2b、图 2c、图 2d 所示。由图 2b 可知,喷射装置与进气道中心轴线夹角为  $90^\circ$ ,喷射出口不加装导管;由图 2c 可知,在喷射出口加装导管,将燃气引向螺旋进气道附近,导管出口处于两个进气门的连线上;由图 2d 可知,与图 2c 相反,将燃气引向切向进气道,同样地,导管出口处于两进气门的连线上。三种条件下气体燃料喷射装置在进气道上的安装位置相同,区别在于有无导管和有导管条件下燃气导向不同。文中为了描述简便,称无导管条件为喷射方案 1,导向螺旋进气道条件为方案 2,导向切向进气道条件为方案 3。

### 1.2 模型验证

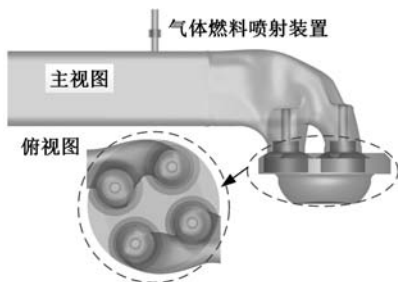
气体燃料进气道喷射也涉及到壁面冲击射流的问题。针对标准  $k-\epsilon$  湍流模型在计算壁面冲击射流时低估射流贯穿距离的问题,并且考虑到发动机复杂的几何结构和高雷诺数湍流,本文分析 RNS 计算方法下三种湍流模型(标准  $k-\epsilon$  模型、RNG  $k-\epsilon$  模型以及 realizable  $k-\epsilon$  模型)对壁面冲击射流贯穿距离的影响,并分别使用标准壁面函数以及非平衡壁面函数计算壁面处的湍流,对比两者的差别。

使用文献<sup>[10-11]</sup>的实验结果作为仿真计算的参考值。由图 3a、图 3b 可见,无论自由射流还是壁面冲击射流,相对于标准  $k-\epsilon$  模型以及 Realizable  $k-\epsilon$  模型,使用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型计算的贯穿距离与实验测量值相差较小;图 3c 中,非平衡壁面函数相对于标准壁面函数较为精确,因为非平衡壁面函数可以更精确地计算壁面剪切力。

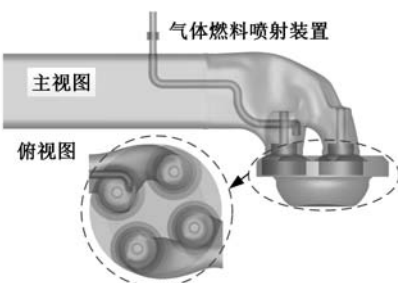
喷射装置出口截面上网格数是准确计算喷射



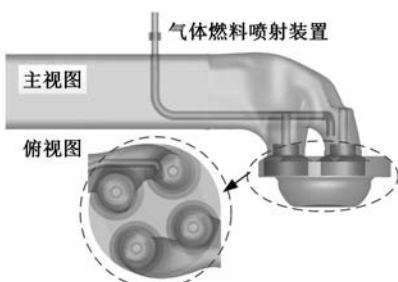
(a) 气体燃料喷射装置布置在进气道上



(b) 无导管-喷射角度 90°



(c) 导管导向螺旋进气道



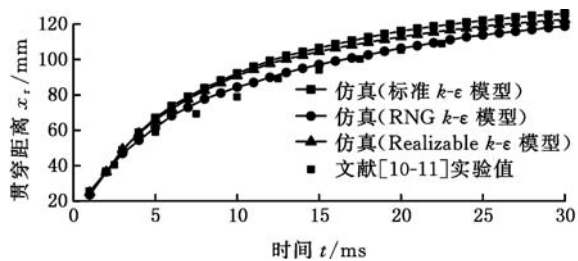
(d) 导管导向切向进气道

图 2 气体燃料供给系统三维模型

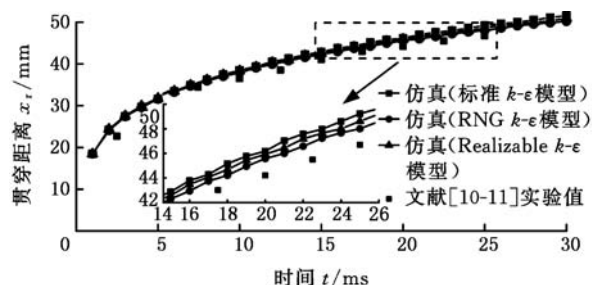
Fig.2 Computational domain of gas fuel injection system

阀下游喷射过程的关键。在靠近阀门出口处加密网格,而在远离阀门处使用较粗网格。喷射阀内部和出口处截面网格尺寸  $d$  分别取 2.0 mm、1.5 mm、1.0 mm、0.8 mm、0.6 mm 和 0.4 mm。在不同网格密度条件下,分析喷射开始 0.1 ms 后沿出口中心轴线的燃气质量分数,如图 4 所示,随着出口截面上网格尺寸逐渐减小,出口轴向燃气分布逐渐稳定。

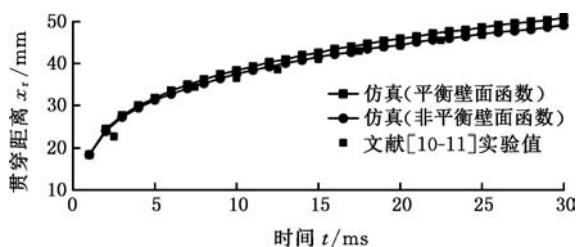
喷射装置内部及出口附近网格尺寸取 0.4 mm 必定会带来更为精确的计算结果,但发动机处于上止点时模型总网格数就达到 300 万,这是因为在粗



(a) 湍流模型对自由射流贯穿距离的影响



(b) 湍流模型对冲击射流贯穿距离的影响



(c) 壁面函数对冲击射流贯穿距离的影响

图 3 湍流模型验证

Fig.3 Turbulence model validation

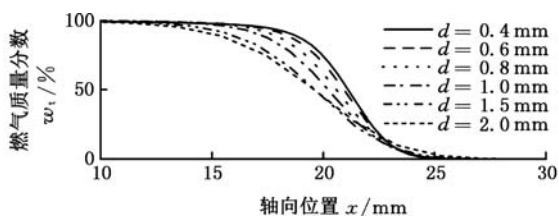


图 4 网格无关性验证结果

Fig.4 The results of grid independency check

细网格之间需要相当数量的过渡层网格,粗细网格之间尺寸相差越大,过渡层就越多。过多的网格数会导致计算速度缓慢,增加计算成本,0.4 mm 网格尺寸对应的计算达到 300 h (Intel I7),而 1 mm 的网格尺寸对应的计算时间仅为 90 h 左右。

据此搭建了气体燃料喷射装置的流量测定台架(图 5)来验证上述网格无关性的结果。从实验安全方面考虑,使用空气替代 CNG 作为实验气源。压缩空气通过调压阀分别减压到 0.02 MPa、0.03 MPa、0.04 MPa、0.05 MPa,使用涡街式流量计测定喷射装置的稳态流量,并与仿真结果对比,如图 6 所示,实验值与仿真值最大相差 3.1%。

### 1.3 计算设置

根据网格无关性验证结果,在喷射阀内部及靠

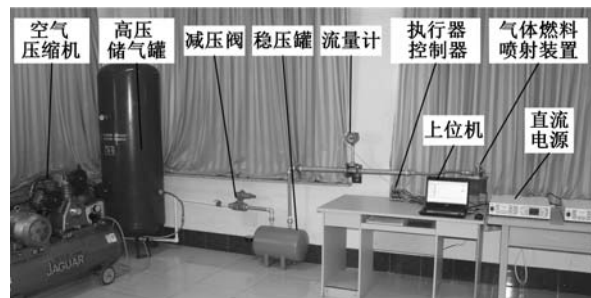


图 5 喷射装置流量特性测试台架

Fig.5 Test platform of experimental validation

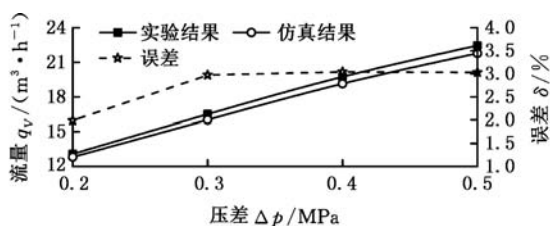


图 6 仿真与实验结果对比

Fig.6 Comparison of the experiment and CFD simulation

近其出口区域、发动机进排气门附近区域加密网格,其他区域使用最大尺寸为 3 mm 的网格。进气道入口压力设定为 0.2 MPa,进气温度为 353 K,排气道出口压力设定为 0.18 MPa,排气温度为 773 K,气体燃料喷射装置入口压力为 0.7 MPa,温度为 298 K。假设缸内初始速度为 0,其他区域的初始温度、压力取值参考相应的边界条件。计算使用 RNG  $k-\epsilon$  湍流模型和非平衡壁面函数,使用 PISO 算法,动量、能量和湍流方程都使用一阶迎风离散方式。

## 2 结果分析

三种方案缸内气体燃料分布情况如图 7 所示,分别取 430°C A(进气冲程上止点为 360°C A,燃气喷射起点为 340°C A,430°C A 时刻阀门开始关闭,447°C A 时刻喷射装置完全关闭)、520°C A、600°C A、680°C A 时刻为分析节点,图 7 中自左至右依次为无导管、导向螺旋进气道、导向切向进气道即方案 1、2、3。图 7a 将燃气质量分数低于 0.18 的部分隐去(无导管条件下将低于 0.08 的部分隐去,因为无导管条件下燃气与空气在进气道内已经经历了较长时间的混合过程);图 7b 将质量分数低于 0.04 的区域隐去;图 7c、图 7d 将低于 0.025 的区域隐去。该燃气质量分数阈值仅仅是为了表示当前时刻燃气集中的区域。

430°C A 时,喷射方案 2,燃气经过进气门边缘的导向作用向火花塞靠近,燃气主要集中于缸盖附近;喷射方案 3,燃气沿气缸轴线冲向活塞

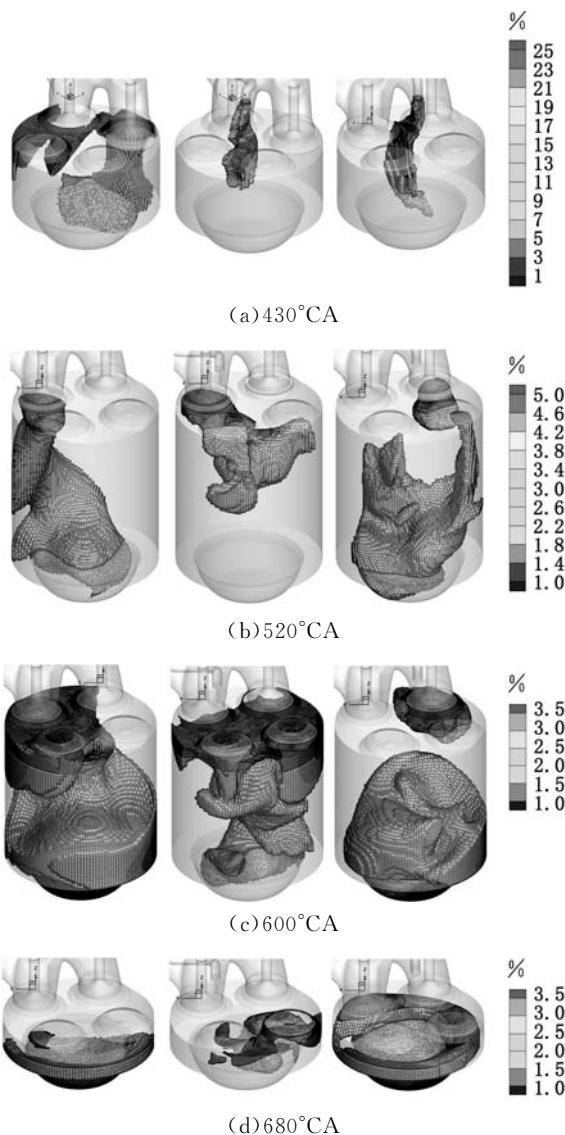


图 7 不同喷射方案燃气分布情况(质量分数)

Fig.7 The gas fuel distribution of different cases (mass fraction)

顶;喷射方案 1,部分燃气处于缸盖附近,另一部分经切向进气道靠近缸壁截面进入气缸,这一部分燃气沿着缸壁流向活塞顶。520°C A 时,燃气喷射过程已经结束,喷射方案 1 中,较浓混合气主要集中在螺旋进气道气门下方和活塞顶附近;而喷射方案 2 中,燃气流经气缸中心后到达靠近排气门一侧的缸壁,在螺旋进气道所产生的涡流作用下旋向螺旋进气道,燃气集中在缸盖附近;喷射方案 3 中,燃气主要集中在活塞顶位置。600°C A 时,进气门已经关闭,没有外部扰动的气流进入气缸,活塞上行压缩缸内气体,进气涡流继续保持的同时,在燃烧室内得以进一步稳定和加强,并围绕燃烧室轴线旋转,形成压缩涡流,各喷射方案缸内的燃气分布情况与 520°C A 时差别不大,并且在压缩终了时刻依然保持着这种分布规律,即随着曲轴角度的增大,虽然燃气分布情况有一些变化,

但是混合气分层的构造并没有被破坏。这是因为刚性涡结构会有利于混合气在水平方向的均匀混合,而在沿气缸中心方向上的混合效果将保持之前的状态。

由此可见,燃气在缸内的上下分层结构主要取决于进气门关闭前,即大幅度掺混阶段,因此有必要深入分析进气门关闭前 430°C 时刻缸内涡流与燃气分布规律,揭示不同进气道喷射燃气导致掺混效果不同的根本原因。

图 8 为 430°C 时刻三种喷射方案缸内不同横截面上的轴向涡量云图和速度矢量图,自左至右分别为方案 1、2、3,  $z=0$  对应缸盖平面,  $z=-3$  mm 截面为缸盖平面下方 3 mm 的截面。由图 8 可见,气流从气门开启截面呈环状射出,在气门外缘发生气流迹线分离,气门下侧边缘气流速度较大,从切向进气道进入的气流与从螺旋进气道进入的气流在两气门鼻梁向下延伸处干涉最为严重,气门附近气流运动十分激烈、复杂,且气流的最大速度也发生在气门喉口处,在缸盖顶部产生干涉涡流,如图 8 中箭头所示,这种干涉涡流成对出现,即一个顺时针涡流对应一个逆时针涡流,对称地分布在左右两侧。此时缸内流场较为紊乱,

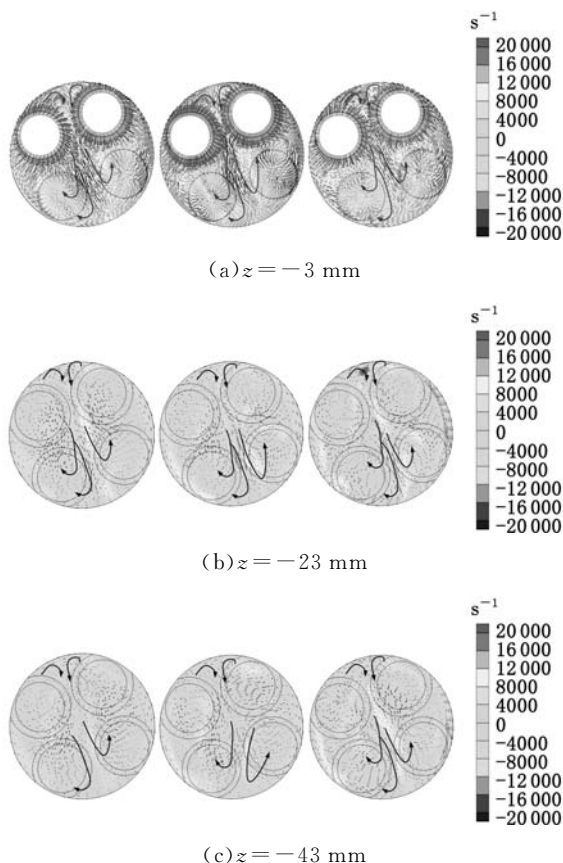


图 8 430°C 缸内轴向涡流强度云图与速度矢量图  
Fig.8 In-cylinder axial vortex strength contour and velocity vector at CA430

呈现为小尺寸涡流,未见大尺寸单一旋向涡流。另外,从图中可见在进气初期干涉涡流甚至可以达到靠近活塞截面上,随着截面位置远离缸盖,这种细小干涉涡流逐步削弱。

图 9 为各喷射条件下缸内横截面上的燃气质量分数云图,从左至右分别为方案 1、2、3。喷射方案 2 中,因为靠近缸盖截面上存在较强的干涉涡流对(图 8),通过螺旋进气道进入气缸的燃气集中在气缸左侧,左右两侧燃气分布存在一条较为明显的分界线,如图 9a 所示。随着横截面位置下移,原本集中在左侧的燃气有少量扩散到气缸右侧,这是因为干涉涡流对随着截面位置远离缸盖而削弱。随着截面位置进一步远离缸盖,干涉涡流对强度进一步削弱,从而燃气分布的分界线逐渐消失。切向进气道条件下,在靠近缸盖截面上同样存在燃气分布的左右分界线,燃气集中在气缸右侧,随着截面位置下移,燃气逐渐向左侧扩散,分界线逐渐消失。无导管条件下,部分燃气经由螺旋进气道进入,其他燃气经切向进气道靠近缸壁截面进入气缸,这一部分燃气沿着缸壁流向活塞顶,

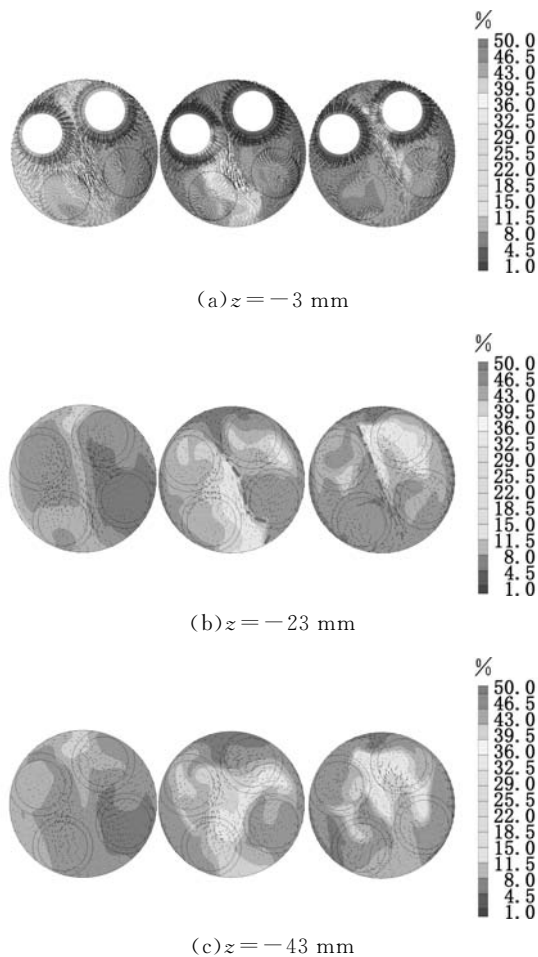


图 9 430°C 缸内燃气质量分数云图与速度矢量图  
Fig.9 In-cylinder gas fuel mass fraction contour and velocity vector at CA430

由缸盖下方23 mm截面上的质量分数云图可见同样存在左右分界线,右上角燃气主要来自于切向进气道,左下角燃气主要来自于螺旋进气道,同样地,随着截面位置进一步下移,分界线逐渐模糊并消失。

空气运动和燃气喷射时间对轴向分层有很大作用。一般地,涡流起到维持混合气分层的作用,而喷射时刻决定浓混合气在缸内的位置。然而根据本文上述研究,在喷气时刻相同的情况下,燃气通过切向进气道喷射时,燃气在缸盖附近的干涉气流分界作用下直接冲向活塞顶,喷射后期燃气会沿着缸壁流向活塞顶,从而导致浓混合气集中在活塞顶;通过螺旋进气道喷射时,在螺旋进气道和干涉气流分界共同作用下,燃气集中在靠近螺旋气道的缸盖附近。因此,对于拥有双进气道(螺旋进气道和切向进气道组合)的内燃机,浓混合气在缸内的位置还取决于燃气通过单侧进气道的流动情况。

缸内燃气质量受加装导气管的影响如图 10 所示,可以看到加装导管会导致燃气始入气缸时间相对于无导管 90°条件下提前 30°CA,燃气在缸内的保持时间不同,缸内混合效果必然会有差异。虽然加装导管可以让燃气始入气缸时间提前,但是因为导管将高速燃气直接引入进气门附近,形成壁面冲击射流,进气门阻挡了燃气的自由喷射,因此加导管方案会导致喷射流量减小,最终进气门关闭后缸内燃气总量减少。导管分别导向螺旋进气道和切向进气道也会导致缸内燃气量不同,经过螺旋进气道的比经过切向进气道的更少,这是因为螺旋进气道相对于切向进气道流量系数偏小。根据进气门关闭后缸内混合气总质量和气体燃料总质量可知,若缸内混合均匀,无导管 90°喷射条件的最佳浓度(质量分数  $w$ ) 区间处于 2.5%~3%之间,加导管条件下的最佳浓度区间处于 2%~2.5%之间。

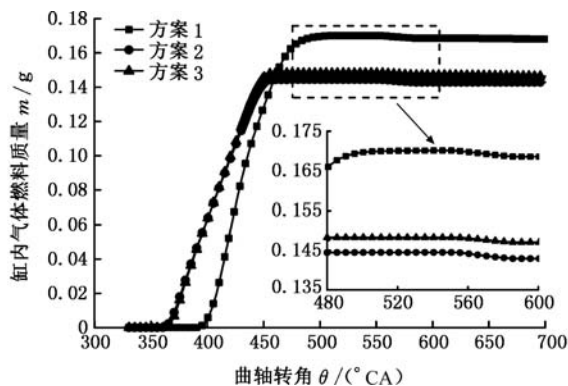
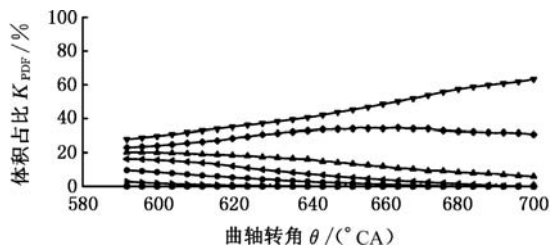


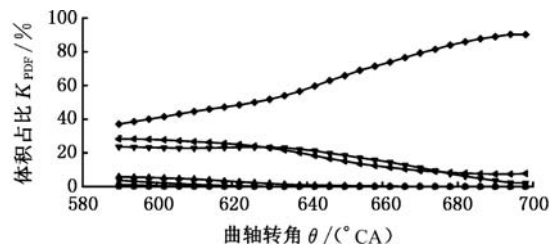
图 10 导管对缸内燃气质量的影响

Fig.10 In-cylinder fuel of different cases

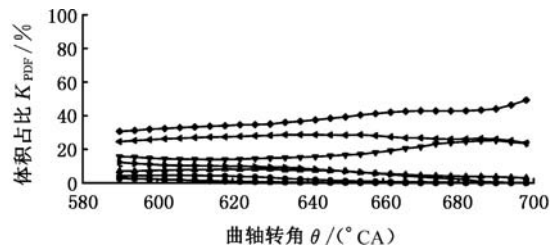
进气门关闭后缸内混合气各浓度区间的体积百分比如图 11 所示。总体来看,进气门关闭后各喷射条件下的最佳浓度区间占比随着曲轴转角的增大而提高,这说明混合气逐渐趋向于均匀,符合分子扩散不可逆原理,这也证明了以最佳浓度区间体积占比作为评价混合效果的指标的有效性。对比分析图 11a、图 11b 和图 11c 可见,螺旋进气道入射方案下进气门关闭时刻的混合已经较为充分,其混合气浓度主要分布在最佳浓度区间及其  $\pm 0.005$  范围内,其他较浓和较稀混合气体积占比均低于 8%,这是由于有导管方案(包括螺旋进气道入射和切向进气道入射方案)相对于无导管方案燃气始入气缸时间提前 30°CA(图 10),然而切向进气道入射方案此刻的混合气浓度区间分布较为分散,即混合效果不佳,与无导管方案差别不大,这表明在强混合阶段螺旋进气道入射方案因为螺旋进气道较强的涡流而改善了混合效果。随着活塞上行,螺旋气道方案在 640°CA 时刻附近混合气浓度区间集中在 2%~3.5% 范围内,不再有分布在其他较浓或者较稀区间的混合气,点火时刻



(a) 喷射方案 1



(b) 喷射方案 2



(c) 喷射方案 3



图 11 缸内各浓度(质量分数)区间体积占比

Fig.11 PDF of each mass fraction region

(700°C)最佳浓度区间体积占比达到 90.2%,在所有方案中该数值最大,混合效果最佳。无导管、切向气道入射方案在点火时刻的最佳浓度区间占比分别为 63.3%和 49.3%,可见尽管切向气道入射方案燃气始入气缸时间较无导管方案下提前 30°C,但是因为在缸盖附近干涉涡流的导向作用下,燃气冲向活塞顶部,又因为缸内刚性涡的限制,这一部分浓混合气在点火时刻依然集中在活塞顶附近,混合效果较差。

### 3 结论

(1)对于切向气道、螺旋气道的组合进气道,进气冲程初期在两进气门鼻梁向下延伸处产生了干涉涡流对,从而缸内燃气分布呈明显的分界规律。

(2)螺旋气道喷射方案,喷射初期燃气向气缸中心靠近,压缩末了时刻燃气集中在缸盖附近;而切向气道喷射方案,喷射初期燃气冲向活塞顶,压缩末了时刻燃气集中在活塞顶附近。混合效果从优到劣依次为螺旋气道喷射方案、无导管喷射方案、切向气道喷射方案。

(3)加装导管条件下因为导管出口射流与进气门之间形成了壁面冲击射流,导致喷射流量减小,其中螺旋气道喷射方案流量最小。

#### 参考文献:

- [1] GARG M, RAVIKRISHNA R. CFD Modeling of In-cylinder Fuel-Air Mixing in a CNG-fuelled SI Engine with Port Gas Injection [J]. SAE Technical Papers, 2010-32-0003.
- [2] YAMATO T, SEKINO H, NINOMIYA T, et al. Stratification of In-cylinder Mixture Distributions by Tuned Port Injection in a 4-valve SI Gas Engine [J]. SAE Technical Papers, 2001-01-0610.
- [3] SOANES C, KOOPMANS L. On the Application of Compressed Natural Gas for an SI Internal Combustion Engine and Two Different Injector Positions [M]//Sustainable Automotive Technologies 2012. Berlin:Springer, 2012: 111-118.
- [4] HERRERA J, TOOHEY J, JIN B, et al. Effects of Different Port Injection CNG System Configurations on a 3.8 L V6 Engine [M]//Sustainable Automotive Technologies 2012. Berlin: Springer, 2012: 103-110.
- [5] CARLUCCI A P, LAFORGIA D, SARACINO R, et al. Combustion and Emissions Control in Diesel-

methane Dual Fuel Engines: the Effects of Methane Supply Method Combined with Variable In-cylinder Charge Bulk Motion [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(8): 3004-3017.

- [6] 纪少波, 季魁玉, 程勇, 等. 喷射结构对大功率多点喷射燃气发动机混合过程及燃烧差异影响规律分析[J]. 内燃机工程, 2016, 37(4): 33-38.  
JI Shaobo, JI Kuiyu, CHENG Yong, et al. Influence of Injection Structure on Mixture Formation and Combustion Variation of High Power Multi-point-injection Gas Engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2016, 37(4): 33-38.
- [7] 葛文庆, 刘梁, 常思勤, 等. 一类大功率气体燃料发动机电控喷射装置的设计[J]. 中国机械工程, 2012, 23(22): 2770-2771.  
GE Wenqing, LIU Liang, CHANG Siqin, et al. Design of an Electronically Controlled Injection Device for Heavy-duty Gas Engine [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(22): 2770-2771.
- [8] 王天波, 刘梁, 常思勤, 等. 气体燃料喷射装置的稳态流动特性研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2041-2046.  
WANG Tianbo, LIU Liang, CHANG Siqin, et al. Steady-flow Characteristic of Gas Fuel Injection Device [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(15): 2041-2046.
- [9] WANG T, CHANG S, LIU L. Influence of Injection Angle and Valve Opening Manner on Mixing Performance in a Large-bore Port Fuel Injection Compressed Natural Gas-fueled Engine [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 138(12): 122804.
- [10] FUJIMOTO H, HYUN G S, NOGAMI M, et al. Characteristics of Free and Impinging Gas Jets by Means of Image Processing [J]. SAE Technical Papers, 970045.
- [11] TOMITA E, HAMAMOTO Y, TSUTSUMI H, et al. Visualization of Ambient Air Motion and Entrainment into a Transient Gas Jet Impinging on a Flat Wall [J]. SAE Technical Papers, 1995, 952513.

(编辑 王旻玥)

作者简介:王天波,男,1990年生。南京理工大学机械工程学院博士研究生。主要研究方向为新能源车动力装置。常思勤(通信作者),男,1954年生。南京理工大学机械工程学院教授、博士研究生导师。E-mail:changsq@njust.edu.cn。刘梁,男,1984年生。南京理工大学机械工程学院副教授。