

电控液态 LPG 喷射发动机混合气分层构造的数值模拟

Numerical Simulation for Mixture Stratification of Electronic Liquid LPG Injection Engine

耿德强, 张勇, 许伯彦

(山东建筑大学 机电工程学院, 山东 济南 250101)

摘 要: 提出了电控液态LPG喷射发动机通过采用前端向内弯曲的进气道和向内呈渐缩形布置的隔板, 同时配合使用凹面弯曲活塞顶的结构实现分层稀薄燃烧的方法。使用60% (摩尔比) 丙烷和40% (摩尔比) 正丁烷的混合气作为LPG燃料, 在查找、计算、建立LPG混合气自0K至临界温度的13种物性参数的数据库后, 编译了描述LPG的物化特性的自定义函数, 导入到通用CFD软件STAR_CD中。对发动机部分负荷下的分层混和气形成过程进行了数值模拟, 通过缸内速度场和燃料浓度场的分布, 分析了缸内滚流和混合气分层构造的形成过程。

关键词: LPG; 数值模拟; 闪急沸腾; 分层混合气; STAR_CD

Abstract: A method of lean stratified combustion was proposed for Electronic Control Liquid LPG Injection Engine with the front-end inward bending intake port and inward-shaped layout with the gradual reduction clapboard and the concave curved structure piston. The mixture of 60% (mole ratio) propane and 40% (mole ratio) n-butane was used as a calculated fuel because of its similar properties in chemical and physical to LPG. A database programmed with Fortran for LPG physical and chemical properties varying from 0 K to critical temperature has been imported into the CFD code. In this paper, a numerical simulation was performed using STAR_CD, where the process of Stratified gas mixture formation under part of the engine load was investigated. Through the in-cylinder velocity vector figure and the distribution of fuel concentration field, the process of in-cylinder tumble and mixture stratification formation was investigated.

Key words: Numerical simulation, LPG; Mixture stratification; STAR_CD

0 引言

目前为了减少汽车尾气对大气环境的污染, 世界各国都在积极研究各种汽车清洁燃料。液化石油气 (LPG) 汽车具有冷启动性好, 与汽油、柴油汽车相比, 燃烧时生成的碳烟 (PM) 和 CO_2 少等优点, 已成为当前国际上最具有推广价值的清洁车用燃料之一, 尤其适用于城市公交车和出租车汽车, 仅以 2000 年我国石油催化裂解生产能力 9285 万吨计算, 全年可生产 LPG 1006 万吨, 目前城市出租车通常采用在原汽油燃料供给系统之上, 再加装 LPG 装置的使用方式, 这种两用燃料的电控发动机的燃料供给方式主要有^[1]: 混合气方式; 气态电控喷射方式; 液态电控喷射方式^[3]。所谓液态电控喷射方式是在进气管上安装 LPG 喷嘴, 由 ECU 控制向进气歧管进行 LPG 液态喷射 (1MPa ~ 4MPa), 采用多点顺序喷射, 一部分燃料在进入气缸前蒸发汽化, 降低了吸气温度, 同时另一部分燃料进入气缸内后继续蒸发吸热, 降低了缸内温度, 使最高燃烧温度下降, 降低了 NO_x 的生成量。自 1994 年以来, 我国吉林大学等选用荷兰 Vialle 的燃料装置也开展了汽油和液态 LPG 系统共存方式发动机改

装与性能实验^[1]。目前电控 LPG 液态喷射发动机几乎都采用了预混合均质燃烧方式^[1~5]，这也是在发动机最常使用的部分负荷工况时仍存在燃料经济性不好的主要原因之一。而电喷汽油机采用稀薄燃烧方式是提高部分负荷经济性最有力的措施之一，发动机的热效率可提高 10%~15%^[3]。本文就实现稀薄燃烧最关键的缸内混合气分层构造的形成方法，使用通用 CFD 计算软件—STAR_CD 进行了较深入的研究。

1 实现缸内混和气分层构造的方法

在充分借鉴日本三菱公司^[4]的分层稀薄燃烧 (MVV) 电喷汽油机技术的基础上，结合 LPG 液态燃料喷射时发生剧烈的减压沸腾现象的特征，为了实现部分负荷工况时的缸内混合气的分层充气构造，如图 1 所示采用前端向内弯曲的进气道和向内呈渐缩形布置的隔板，强化沿滚流方向的进气门正面的流动，以减少与滚流方向相反的进气门背面的流动，并防止和抑制沿滚流轴线方向的燃料浓度的扩散。在压缩过程接近终了时，火花塞附近集中易于点火的较浓混合气。

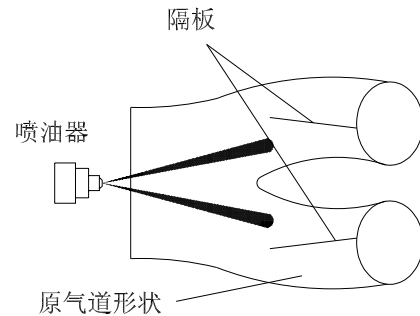


图 1 LPG 发动机进气道喷射示

凹面弯曲活塞顶的结构如图 2 所示，在凹坑的引导下，更利于加强进气时缸内滚流强度，以及在压缩过程接近终了时把较浓混合气集中于火花塞附近。这里恰当地设计凹坑的宽度 L 和高度 H ，使得在压缩过程后期（上止点前 45°CA 前后）在两侧凸沿形成的挤流作用下，大尺度滚流较早地破碎成众多小尺度湍流，减少失火和循环变动。

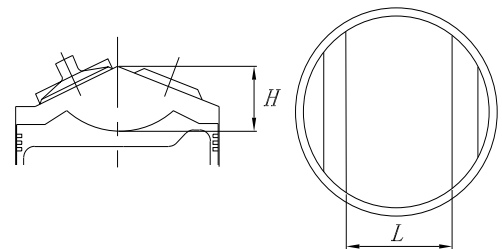


图 2 活塞表面形状

2 计算方法可行性认证

2.1 物性参数

另外使用通用 CFD 软件—STAR_CD 进行液态 LPG 的喷射、燃烧过程的数值模拟时应需要 LPG 燃料的液体密度、液体粘度、液态比热、表面张力、液态热传导系数、液体附面层的普朗特数、液体分子的热扩散系数、蒸发潜热、蒸汽压、气体的热传导系数、气态动力粘度、气态比热（包括积分比热和差分比热）等 13 种热物性参数，实际的发动机工作循环过程中 LPG 从喷射到燃烧的整个过程，燃料温度从大约 300K 上升到 2000K 以上，而且对于气态的物性参数值，STAR_CD 更是要求列表到 5000K。LPG 的主要成份是丙烷 (C_3H_8) 和丁烷 (C_4H_{10})，本文以市场上最常见的，由 60%（摩尔比）丙烷和 40%（摩尔比）正丁烷的混合物作为一种典型的车用 LPG 燃料并计算了其物性参数，生成了物性参数数据库。

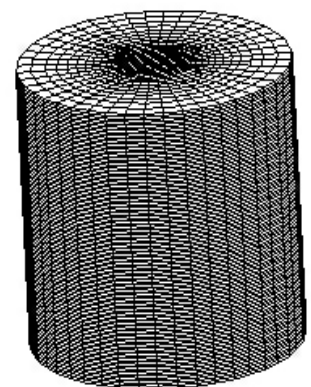


图 3 计算域网格模型

2.2 计算区域划分

建立一个直径为 100mm、高为 140mm 的圆柱体实体模型。单孔喷嘴设在网格模型的顶部中心处喷

嘴喷口直径为 0.4mm，划分后的网格如图 3 所示，网格总数为 112400。为与纹影实验的条件相符，初始边界条件的设定在如表 1 中列出。

表 1 初始边界条件的设定

项目	参数
环境气体	氮气
环境温度/K	293k
喷嘴类型	轴针式
环境压力/MPa	0.1
喷射压力/MPa	1
喷雾时间/ms	5
喷雾速率	1
喷射量/ mg	40.5
喷射角/ °	12.5

2.3 燃料喷射可视化实验

本文采用纹影方法观测 LPG 的液态喷雾过程，得到的结果用来与数值计算结果进行对比验证^[11]。

纹影法对流场中由于密度梯度的存在造成的折射率梯度而引起的光线偏折十分敏感，已成为气体动力学试验中使用最为广泛的流场测试工具之一。试验采用了双反射镜式纹影系统和“Z”字型光路，如图 4 所示。这种光路布置方式可减少轴外光线成像造成的像差。电光源发出的锥形光经反射镜 1 转换为平行光后，在试验喷雾区域被扰动，由反射镜 2 将其聚于刀口处，经道口切割光源像后进入 CCD 照相机。LPG 存储在一个专用钢瓶内，通过氮气加压使其保持液化并达到需要的喷射压力。试验过程中保持加载氮气使喷射压力恒定。试验中使用一个单喷嘴孔喷嘴，形成单孔喷雾。试验所用仪器的详细参数及试验条件如表 2 所示。

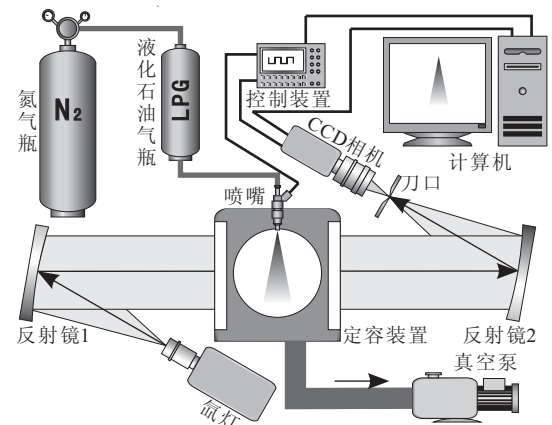


图 4 试验装置

表 2 试验仪器条件和试验参数

项目	参数
光源	150 瓦氙灯
反射镜	直径：D=150mm，焦距：f=1500mm
相机	快门：1/50000s；分辨率：656 × 490
镜头	焦距 f:8.5 ~ 51mm, 光圈 F1.2
喷嘴	单孔；孔径：0.4mm
	静态流量：356ml/min (1MPa)
喷射压力	1MPa
环境压力	0.1MPa

2.4 结果分析

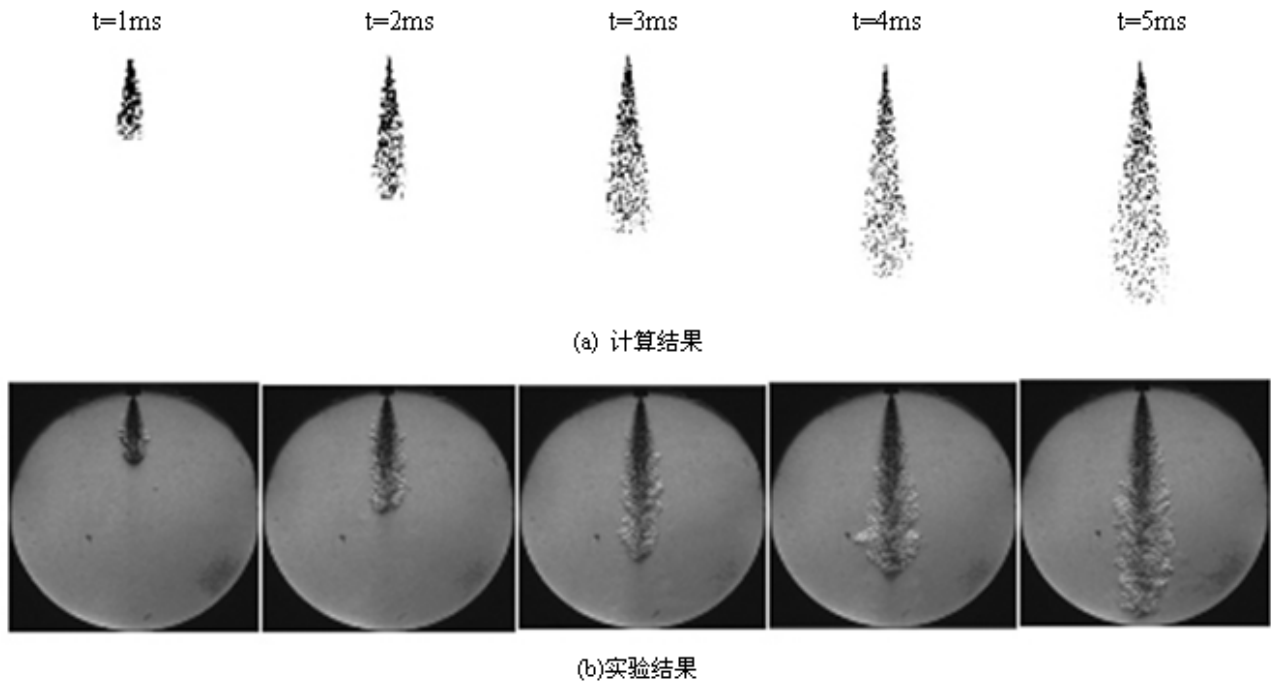


图 5 喷雾形状结构的对比

图 5 为喷雾形状的计算结果与纹影实验结果的比较, 喷雾锥角近似 25° , 由图可以看出计算结果与实验结果非常相似。图 6 是贯穿距离随时间的变化曲线, 由图中可以看出计算结果和实验结果也是比较相近的, 喷雾前期贯穿距离几乎成直线增加, 但随着 LPG 喷雾中液滴逐渐蒸发, 液滴的动量和速度逐渐减小, 贯穿距离的变化趋势开始减缓。由此验证了考虑 LPG 闪急沸腾现象, 并修改蒸发模型的数值计算方法的可行性, 以及验证了所建立的 LPG 物性参数数据库的准确性。

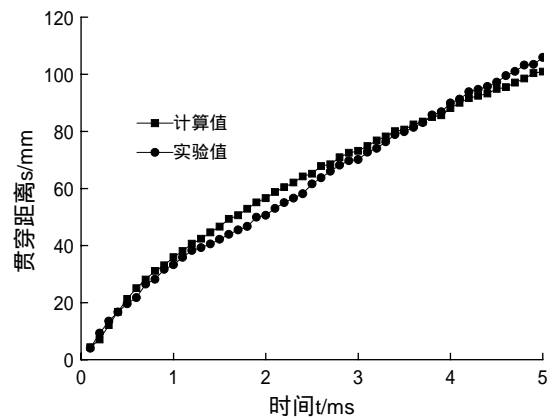


图 6 液态 LPG 在 1MPa 喷射压力下的贯穿距离

3 缸内混合气分层构造的形成

3.1 计算域的确定

本文研究的发动机采用的是目前广泛应用的双进气阀结构, 火花塞布置在缸体上方中心处。使用三维造型软件 Pro/E 建立实体模型, 转化成 STL 格式, 导入 STAR_CD 软件, 生成网格模型。由于本文研究的发动机是几何对称结构, 因此为了减少网格数量, 缩短计算时间, 只对其一半结构划分网格, 而且本文的研究集中于以液态 LPG 作为燃料时的缸内混合气的分层构造, 在整个混合气形成过程中, 排气阀

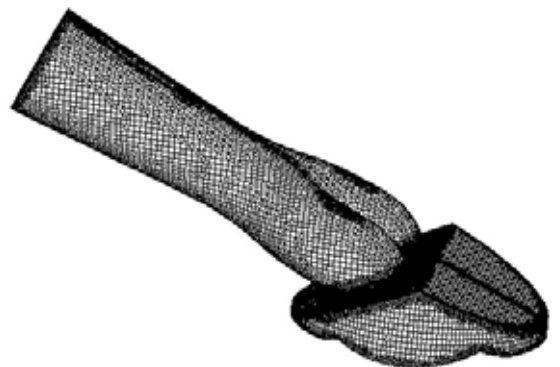


图 7 发动机网格模

一直是关闭的，所以建立网格的时候，可以不做排气阀部分的网格。由于活塞和进气阀采用的是移动边界，因此需要建立移动网格。建立的网格模型如图 7 所示，在上止点的网格数是 224560，下止点处的网格数达到了 294028。

3.2 结果分析

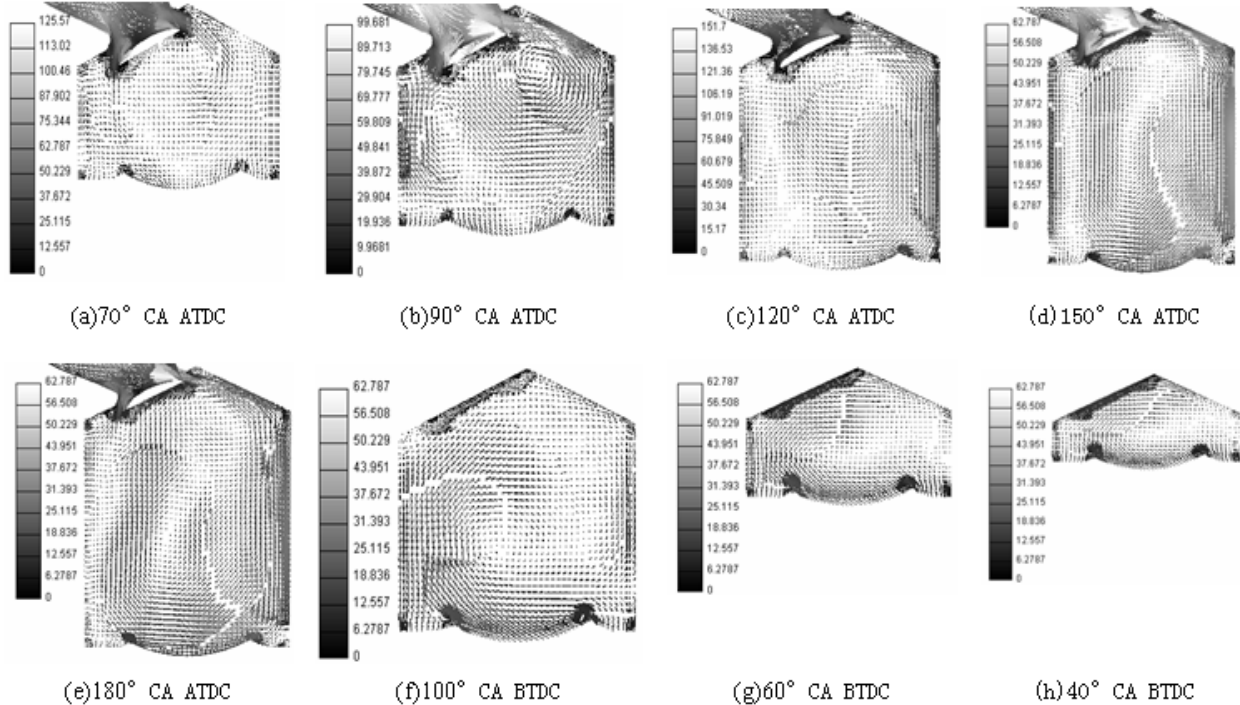


图 8 二维平面速度矢量图

图 8 为进气和压缩行程中竖直平面上二维速度场矢量分布图。由图所示，在进气冲程早期（70 和 90° CA ATDC），流场的上半部分混合气速度矢量方向向下，因此在排气门侧与活塞碰撞后产生了一个朝向进气门侧的水平速度分量，而在进气冲程中后期（120 和 150° CA ATDC）流动方向的总体趋势向下。滚流在 180° CA ATDC（即进气行程下止点）时开始形成，在压缩上止点前 100° CA 时缸内形成较强烈的滚流，随着活塞上行，滚流轴上移。在进气冲程中期（90-150° CA ATDC），燃烧室对称面附近的速度比其它区域的大的多，来自两个进气阀的流动在靠近排气阀侧的燃烧室顶端结合，并以很高的速度沿着燃烧室排气阀侧的壁面向下流动，流动随着进气阀升程的变大而增强，流场是由进气端向排气端的流动决定的。而在滚流轴方向上的速度分量很小，这可以防止燃料沿滚流轴方向的扩散。

如图 9 所示，为不同曲轴转角下缸内的燃料浓度场。由图可以看到在缸内较强的纵向滚流的作用下，在压缩行程上止点前（BTDC）50° CA 时到达燃烧室顶部，在 BTDC 20° CA 时形成了分层充气构造，此时在火花塞中心附近聚集了较浓的可燃混合气，空燃比达到 12.5 : 1（LPG 的理

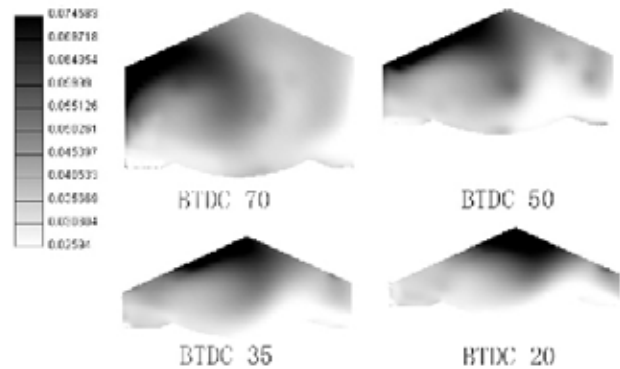


图 9 燃料浓度场

论空燃比是 15.43 : 1), 背离火花塞附近的区域, 混合气浓度逐渐降低, 缸内总体空燃比达到 23 : 1, 因此满足了稀薄分层燃烧的条件。

4 结论

(1) 提出了液态 LPG 发动机通过采用前端向内弯曲的进气道和向内呈渐缩形布置的隔板, 同时配合使用凹面弯曲活塞顶的结构实现分层稀薄燃烧的措施;

(2) 建立了 LPG(60%丙烷和 40%正丁烷) 的物性参数数据库;

(3) 数值模拟了液态 LPG 自由喷雾过程, 并将计算结果与纹影试验结果进行了对比, 研究表明喷雾形状和贯穿距离都与试验值有很好的 consistency, 因此验证了计算方法的可行性;

(4) 在验证计算方法可行性的基础上, 通过数值模拟的方式验证了所提出的分层稀薄燃烧方法的可行性, 并在发动机部分负荷下实现了缸内混合气的分层构造。

5 参考文献

- [1] 李君, 朱昌吉, 王立君等. 电控 LPG 液态喷射发动机的改装与性能试验, 吉林工业大学自然科学学报, 2001, 31(4): 1-5.
- [2] 李东. 液态喷射式 LPG 系统简介, 汽车技术, 2001(12): 30-31.
- [3] 桑原一成. ンブルを用いた希薄燃焼ガソリン機関の流動・燃焼に関する研究. Engine Technology. 2001, Vol3 (No3): 21-24.
- [4] 中島泰夫, 村中重夫. 新・自動車用ガソリンエンジン. 东京: 山海堂. 1997.
- [5] K.Y.Kang, D.Y.Lee, S.M.Oh, C.U.Kim. Performance of a Liquid Phase LPG Injection Engine for heavy Duty Vehicles, SAE Fuel and Lubricants, 2001-01-1958, 2001.