

预燃室结构参数对汽油机稀薄燃烧的影响

李钰怀^{1, 2}, 占文锋¹, 祁宏钟¹, 陈泓¹, 杜家坤¹, 江泉泉¹

(1. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434; 2. 天津大学 内燃机燃烧学国家重点实验室, 天津 300072)

Effect of pre-chamber structure parameters on lean-burn characteristics for gasoline engine

LI Yuhuai^{1,2}, ZHAN Wenfeng¹, QI Hongzhong¹, CHEN Hong¹, DU Jiakun¹, JIANG Xiaoxiao¹

(1. GAC Automotive Research & Development Center, Guangzhou, 511434; 2. State Key Laboratory of Engines, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Influence of pre-chamber on thermal efficiency based on ultra-lean combustion was studied on a single-cylinder research engine (SCRE). The effects of the structural parameters of pre-chamber on combustion and emissions were explored. In this study, the working condition was selected which was 2750 r/min @ 1.05MPa IMEP. The excess air coefficient in the test was controlled by adjusting the intake volume and the circulation injection volume. The research results with the selected conditions and technology strategies showed that: the comparative study on the effect of the pre-chamber structural parameters on combustion showed that, the structural design of the straight hole with 120° jet cone angle and 6.8 mm² nozzle area can improve the combustion rate more effectively in cylinder, which is conducive to the suppression of knock combustion, and it can achieve a better combustion stability and lower HC、CO、NO_x emissions when using the ultra-lean combustion technology.

摘要: 本文基于研究型热力学单缸机试验研究了预燃室射流点火汽油机超稀薄燃烧热效率的影响, 探索了预燃室结构参数对发动机燃烧及排放的作用规律。研究中选取发动机常见最低油耗点工况 2750 r/min, 平均指示压力为 1.05 MPa, 通过调节进气量及循环喷油量改变过量空气系数, 在试验所选工况及所选方案范围内的研究表明: 预燃室结构参数对燃烧过程影响较为明显, 采用射流锥角为 120°、喷孔面积为 6.8 mm² 的直孔的结构设计能够更为有效地提高缸内的燃烧速率, 有利于抑制爆震, 在超稀薄模式下燃烧稳定性较优, 并有利于降低未燃碳氢 (HC)、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x) 排放。

关键词: 汽油机; 预燃室; 稀薄燃烧; 压缩比; 结构参数.

Key words: gasoline engine; pre-chamber; lean-burn; Structure Parameter.

中图分类号: TK421.5

文献标识码: A

0 概述

内燃机经历百余年的发展, 以其高热效率的优点, 广泛应用于汽车、农业机械、工程机械等领域。内

燃机节能减排成为了当下内燃机技术进步的重要课题。稀薄燃烧技术是通过加入大量的空气使缸内混合气的温度下降, 传热损失大幅下降的同时, 可抑制爆震, 使进一步增大压缩比成为可能^[1]; 且大量

收稿日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 国家科技部重点项目多模驱动插电式乘用车性能优化 (编号: 2017yFB0103300)

作者简介: 李钰怀 (1984-), 男, 博士, 主要研究方向为高效发动机技术开发, E-mail: liyuhuai@gacrnd.cn;

空气的加入，也有助降低泵气损失，进一步增大有效热效率^[2]。稀燃是满足未来油耗和排放法规的主流技术路线，也是使发动机有效热效率达到 45% 以上的必由之路^[3]。在降低泵气损失、传热损失，以及提升压缩比和混合气比热容的多重作用下，使用稀薄燃烧技术可以使发动机热效率拓展至 45%~50%^[4-8]。但稀燃状态下缸内混合气密度增大、燃油浓度降低，使得火花塞击穿和点燃混合气都变得困难，火焰传播过程也变迟缓，若采用传统点火系统存在精度不足、点火能量不够、触点易烧蚀等缺点，一定程度上限制了发动机热效率的进一步提升。针对此，国内外学者提出了多种高性能点火技术方案，包括电晕点火、等离子点火、微波点火、预燃室射流点火等^[8-14]。

基于 Vitaly Bychkov 等人^[15]提出的火焰经障碍物加速机理可以得出，一般来说经过障碍物前后火焰的速度会增加 5-8 倍，采用预燃室射流点火模式的发动机，预燃室内的混合气燃烧后经预燃室的小孔传播到主燃烧室时可形成高速射流火焰及较强的热自由基射流，同时形成的射流火焰可作为分散式的能量源点燃主燃室内的混合气，并有效提高湍流强度和燃烧速率^[16-18]，有利于减缓爆震倾向，且由于其对缸内燃烧特性影响较大（火焰速度、燃烧速率、循环变化和爆震倾向等），成为了近年来国内外先进燃烧技术研究的焦点^[19-21]。相关试验证明，预燃室射流点火技术能提高点火的稳定性，提升燃烧速度，在降低发动机油耗的同时，可大幅度减少 NO_x 排放，是未来实现超高燃效、低排放的最具潜力技术之一。

针对预燃室结构参数，国外的研究机构做过一些相关的研究，Bunce 等人^[22]的研究表明，预燃烧室采用较小的孔板设计，燃烧室内会产生强度更高

的湍流，但孔板过小则会堵塞进入主燃烧室内的主流，致主燃烧室失火。邢小伟等人^[23]的模拟结果表明，预燃室通孔的直径太小一方面增加节流损失，另一方面会减小主燃烧室内的火焰发展区域，不利于主燃烧室内混合气的着火及火焰传播，而通孔直径过大则会降低火焰贯穿度，减少射流火焰的湍动能，显著降低主燃烧室内的湍流扰动，同样不利于火焰传播。

以上研究均表明预燃室结构参数对发动机的燃烧性能有优化潜力和明显影响，但文献针对预燃室结构参数的研究有限，且结构参数变化对发动机缸内燃烧性能影响的试验研究相对较少，对发动机缸内燃烧的影响效果暂不明晰。为了最优化预燃室的结构设计，充分发挥预燃室射流点火技术对发动机热效率的提升潜力，本文基于一台采用预燃室射流点火技术的单缸发动机，首先研究了稀薄燃烧条件下压缩比变化对发动机热效率的提升潜力，并针对性地研究了预燃室结构参数变化对燃烧的影响规律。

1 试验用发动机及测试设备

1.1 试验用发动机

研究中采用一台匹配 35 MPa 高压供油系统的单缸热力学汽油发动机，进气压力及进气温度采用进气模拟增压系统进行控制，喷油时刻、喷油量及点火时刻采用可编程的时序控制模块进行调整。试验用发动机主要技术参数见表 1。

表 1 发动机主要参数

参数	数值
型式	单缸、四冲程
缸径/mm	79
行程/mm	102
排量/L	0.5
喷油方式	缸内直喷
进气方式	进气模拟增压系统
燃油供给系统	35 MPa 高压供油系统

研究中采用的单缸热力学发动机测控系统主要包括一台可自由切换预燃室结构的单缸热力学发动

机系统, AVL PUMA 瞬态测功机, 其测试精度为扭矩 $\pm 0.03\%$ 、转速 $\pm 1 \text{ r/min}$; AVL 515 进气模拟增压系, 测试精度为 $\pm 50 \text{ mbar}$; AVL 577 油水恒温控制单元, 测试精度为 $\pm 1^\circ \text{ C}$; Scienlab DICU 喷油控制单元及时序控制单元等系统组件。缸压测量采用 Kistler 6054BR 缸压传感器测量, 过量空气系数 (λ) 测量采用 ETAS 630 测量仪, 排放测量采用 HORIBA MEXA-7500D 测量仪, 转角信号由 AVL 365C 角标器输出, 利用 AVL Indicom 系统对燃烧过程示功图及时序控制信号进行采集, 采样分辨率为 0.5° CA , 每个工况点均采集 200 个循环进行平均以消除测量误差。

图 1 为试验台架示意图。

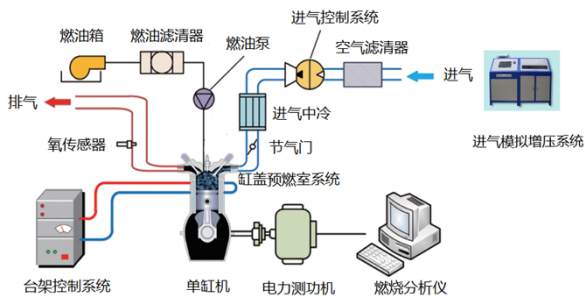


图 1 试验台架示意图

本文采用的汽油机预燃室燃烧系统如图 2 所示, 其包含两个喷油器, 主燃烧室喷油器采用六孔的设计方案, 布置在主燃烧室内; 预燃室喷油器采用单孔的设计方案, 布置在预燃室内部, 预燃室单孔喷油器的设计流量为 $1.4 \text{ g/s}@10 \text{ MPa}$ 。为保证燃油压力的实时在线控制, 研究中自行设计开发了 35 MPa 高压汽油供油系统和 10 MPa 的预燃室喷油器供油和控

制系统, 具有精度高、响应快等特点, 满足试验研究的需要。

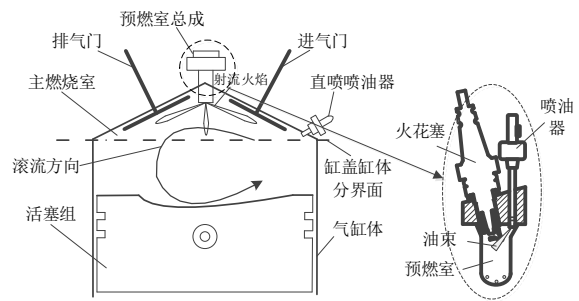


图 2 汽油机预燃室燃烧系统示意图

预燃室结构参数的定义如图 3 所示, 研究中预燃室内喷油器的喷油压力固定为 10 MPa , 脉宽固定为 0.25 ms , 主要研究了预燃室射流锥角以及喷孔面积等结构参数的变化对汽油机燃烧和排放的影响规律, 其中, 旋孔为斜向转孔, 图 3 (b) 示例了相对于直孔偏移 15° 的旋孔角设计, 其剖视图如图 3 (c) 所示, 为今后预燃室结构设计提供技术参考。

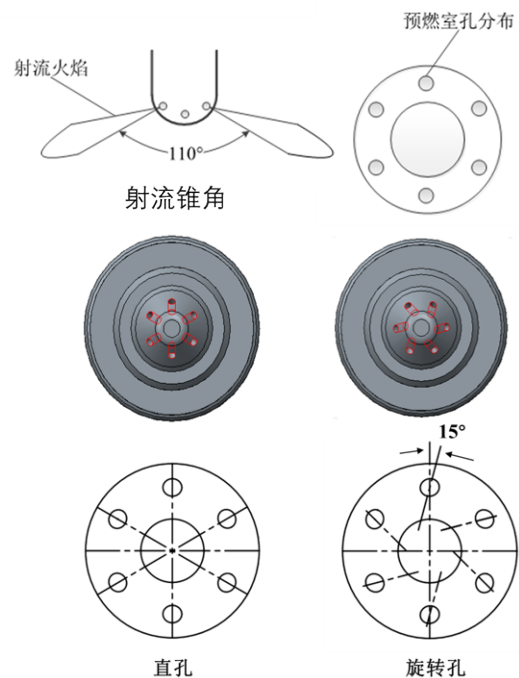


图 3 预燃室结构参数示意图

1.2 试验研究方法

试验研究中选取发动机常见最低油耗点工况 2750 r/min , 平均指示压力为 1.05 MPa , 研究压缩比

和预燃室参数对燃烧和排放的影响。试验中通过调节进气量及油耗量改变过量空气系数。

研究中试验参数控制如表 2 所示，进气过程中较早的单次喷射使得缸内混合气在点火时刻呈均质状态。试验过程中通过调节点火时刻使发动机工作在爆震边界或燃烧相位 (CA50) 为 8°CA ATDC 左右，此时热功转化过程最优，其中点火时刻的调整范围为 -25~1°CA ATDC。控制 200 个循环缸内平均指示压力 (IMEP) 的循环变动系数 (COV_{IMEP}) 在 3% 以内。

通过时序控制单元调节喷油脉宽控制喷油量，并通过进气模拟增压系统调节进气量，将过量空气系数控制在要求值。

表 2 主要试验参数

参数	数值
进气温度/°C	30±2
冷却水温度/°C	65±2
机油温度/°C	60±2
点火时刻/°CA ATDC	-25~1
Lambda	1~稀燃极限
发动机转速/rpm	2750
IMEP / MPa	1.05

试验中采用 AVL 735S 瞬态油耗仪监控采集实际喷油量数据，热效率的计算是基于循环喷油总量计算求得。文中燃烧持续期 (CA10-90) 定义为 10% 累积放热量到 90% 累积放热量的曲轴转角，CA50 定义为 50% 累积放热量对应的曲轴转角。

2 试验结果与分析

2.1 预燃室射流锥角对燃烧过程的影响

为探究预燃室结构参数对汽油机燃烧及排放物生成的影响规律，研究中基于 16.4 压缩比开展试验对比分析。图 4 为不同射流锥角预燃室结构的指示热效率和指示油耗率随 Lambda 变化情况。图 5 和图 6 分别为循环变动系数 (COV) 和燃烧参数的对比结果。从图中可以看出，采用射流锥角为 140° 的结构设计，过量空气系数达 2.2，COV 保持在 3% 以内；而采用射流锥角为 120° 的结构，Lambda 极限可扩展至 3.0，COV 低于 3%，指示热效率在整个 Lambda 运行范围内均得到提升，指示热效率峰值提升约 1.1 个百分点。射流锥角较大时，缸内射流火焰分布更靠近缸盖燃烧室壁面，预燃室产生的高速射流火焰易发生撞壁，导致火焰在燃烧室内传播距离缩短，

射流火焰加速缸内燃烧的效果减弱，燃烧速率降低，预燃室高速射流火焰对爆震的抑制效果降低，且稀释比较大时缸内燃烧速率整体降低，爆震倾向增加，图 8 可得，Lambda=1.7 以上 CA50 推迟，燃烧持续期明显增加，这限制了预燃室结合稀薄燃烧技术对热效率的提升潜力。由图 4 和图 6 可知，射流锥角为 140° 的最佳热效率点对应工况的 CA50 为上止点之后 9.2°CA，因爆震的限制无法控制在理想的上止点后 8°CA 附近，基于同样的工况，相比于采用射流锥角 120° 的结果，指示热效率和指示油耗率均恶化，且因受燃烧速率和 COV 恶化的影响，Lambda 极限无法进一步扩展，热效率提升幅度有限。

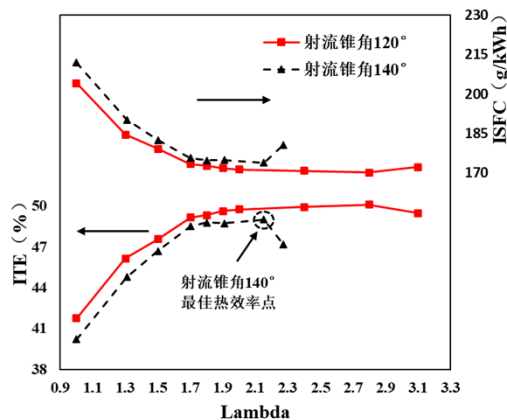


图 4 不同射流锥角指示热效率和油耗率随 Lambda 的变化

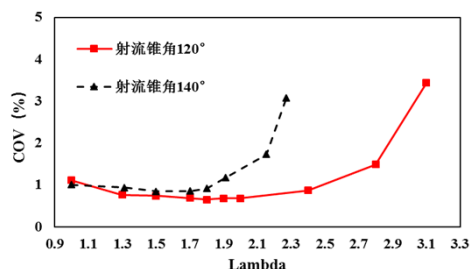


图 5 不同射流锥角 COV 随 Lambda 的变化

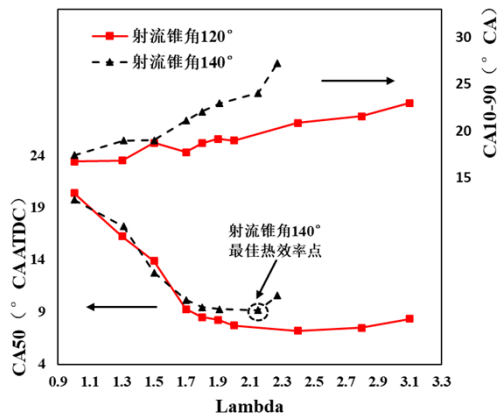


图 6 不同射流锥角燃烧参数随 Lambda 的变化

图 7 为不同预燃室射流锥角的未燃 HC 排放随 Lambda 的变化情况。因预燃室特有的射流点火特性，

喷入主燃室时裹挟了大量活性基团的中间产物及未燃 HC。相比于射流锥角 120°的结果,射流锥角 140°的预燃室产生的射流火焰分布靠近壁面,淬熄反应更易发生,且燃烧持续期增加,更多的燃料在膨胀行程中完成燃烧,此时缸内的温度及压力持续降低,不利于燃料的完全燃烧,如图 9 所示,取射流锥角 140°最佳热效率点对应的工况作对比,未燃 HC 排放增加约 33%,进一步增大 Lambda,受 COV 恶化的影响,燃烧不稳定性提升,部分工作循环燃烧完全度降低,未燃 HC 排放进一步增大,最大增幅约达 60%。

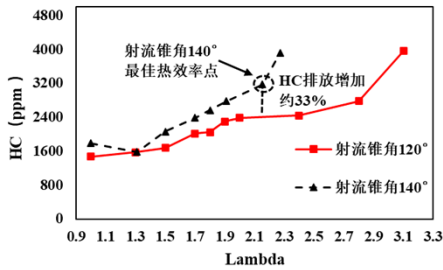


图 7 不同射流锥角未燃 HC 排放随 Lambda 的变化

如图 8 所示,相比于射流锥角 120°的结果,射流锥角 140°的燃烧持续期增加,有更多的燃料在温度、压力持续降低的膨胀行程中燃烧,在此条件下燃料燃烧的不完全性增加,CO 排放增加,取射流锥角 140°最佳热效率点对应的工况作对比,CO 排放增加约 87%,进一步增大 Lambda,受 COV 恶化的影响,燃烧不稳定性提升,部分工作循环燃烧完全度降低,CO 排放进一步增大。

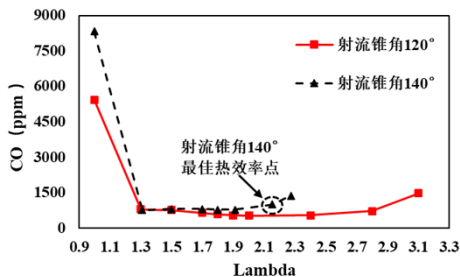


图 8 不同射流锥角未燃 CO 排放随 Lambda 的变化

图 9 为不同射流锥角 NOx 排放随 Lambda 的变化情况。两种射流锥角的预燃室设计在相同的 Lambda 下,NOx 排放整体上差别并不明显,但相比于射流锥角 140°的结果,射流锥角 120°的预燃室结构对应的 Lambda 极限可进一步扩展,随着过量空气系数的增大,缸内燃烧温度得到进一步的降低,NOx 排放随之降低,如图 9 所示,以两者可实现的最低 NOx 排放作对比,射流锥角 120°的预燃室结构可实现的最低 NOx 排放,相比与 140°射流锥角的结果,降低约达 57%。

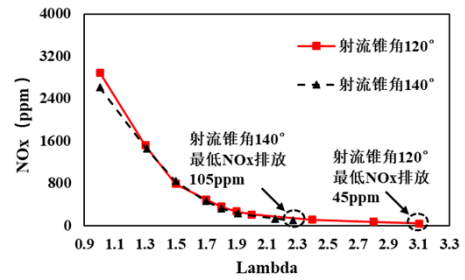


图 9 不同射流锥角未燃 NOx 排放随 Lambda 的变化

2.3 预燃室喷孔面积对燃烧的影响

本节基于直孔和旋孔两种预燃室射流孔三维空间方向设计探索其对指示热效率影响规律,射流锥角选取 120°,旋孔角度设计为 15°。图 10 为两种结构参数下指示热效率和指示油耗率随 Lambda 的变化规律。从图中可以看出,两种结构在整个 Lambda 范围内,热效率和油耗率整体上差别不大,但热效率峰值有所差异,主要是由于 Lambda 极限的差异导致。

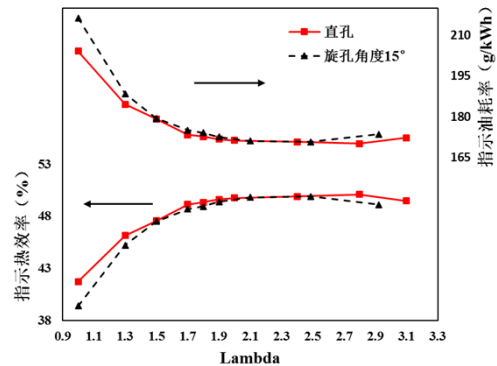


图 10 不同旋孔角度指示热效率和油耗率随 Lambda 变化

图 11 和图 12 分别为两者 COV 和燃烧参数的对比结果。预燃室内湍动能的升高有助于主燃烧内燃烧速率的提升,直孔结构设计燃烧持续期整体低于旋孔,燃烧速率的提升也相应的提升了该设计下爆震的抑制效果及燃烧的稳定性, Lambda=1.5 以下时,直孔方案在 CA50, COV 方面的表现均优于旋孔的方案,提前的 CA50 及较快的燃烧速率,均使缸内混合气的燃烧放热更为集中,燃烧持续的时间短,缸内的传热损失降低,直孔方案在热效率和油耗率方面的表现也均更优。直孔方案在燃烧速率方面的优势也有利于稀燃极限的扩展。

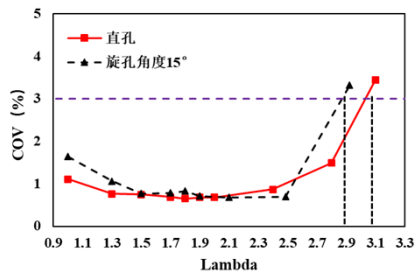


图 11 不同旋孔角度 COV 随 Lambda 的变化

从图 11 可知，相比于旋孔设计下 Lambda 极限的 2.9，采用直孔的结构设计，Lambda 极限可扩展至 3.1。最终，相比于旋孔的结构设计，采用直孔的结构，得到的指示热效率峰值提升 0.2 个百分点，指示油耗率降低约 0.7 g/kWh。Lambda=1.7 以上两者 CA50 差别不大，这主要时由于此时缸内混合气稀释比较大，爆震倾向较弱。

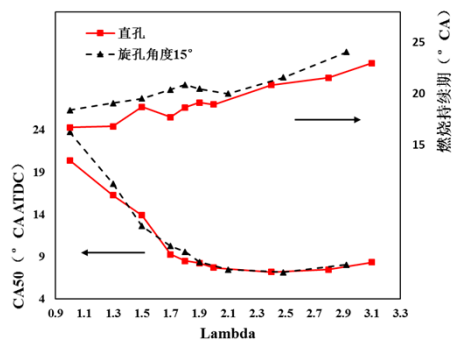


图 12 不同旋孔角度燃烧参数随 Lambda 的变化

相比于旋孔的结构设计，因直孔的结构燃烧速率相对更快，未燃 HC 排放在整个 Lambda 运行范围内均降低，最大降幅达 26%，如图 13 所示。

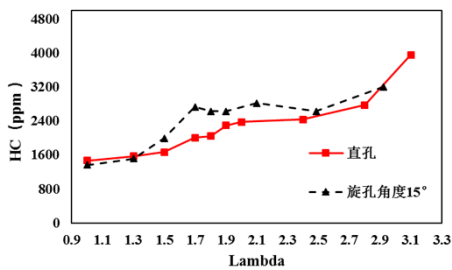


图 13 不同旋孔角度 HC 排放随 Lambda 的变化

相比于旋孔的结构设计，因直孔的结构燃烧速率相对更快，燃烧持续期缩短，燃烧温度升高，燃烧完全度增加，整体上有利于 CO 排放降低，最大降幅达 15%，如图 14 所示。

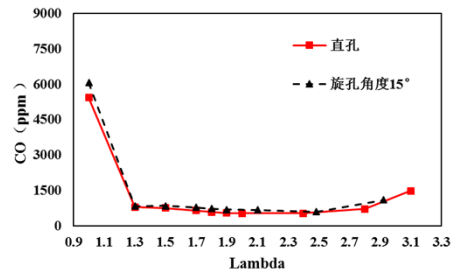


图 14 不同旋孔角度 CO 排放随 Lambda 的变化

相比于旋孔的结构设计，因直孔的结构燃烧速率相对更快，稀燃极限增加，可实现的最佳 NOx 排放降低，降幅达 36%，如图 15 所示。

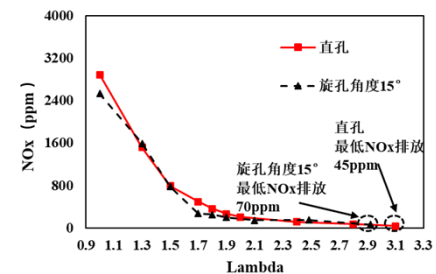


图 15 不同旋孔角度 NOx 排放随 Lambda 的变化

4 结论

本文基于一台研究型热力学单缸机，选取发动机常见最低油耗点工况 2750 r/min，平均指示压力为 1.05 MPa，通过试验研究了了预燃室结构参数对发动机燃烧及排放的作用规律。主要研究结论如下：

(1) 预燃室射流锥角与喷孔面积均对稀薄燃烧汽油机燃烧过程及热效率具有显著影响。相比于射流锥角为 140°的结构设计，采用射流锥角为 120°的结构，燃烧速率更快，稀燃条件下抑制爆震的效果更强，Lambda 极限可扩展至 3.1，指示热效率在整个 Lambda 运行范围内均有所升高，指示热效率峰值提升了 1.1 个百分点。相比于射流锥角 120°的结果，取射流锥角 140°最佳热效率点对应的工况作对比，未燃 HC 排放增加约 33%，CO 排放增加约 87%；射流锥角 120°的结构有利于稀燃极限的扩展，可实现的最低 NOx 排放，相比于射流锥角 140°的结果，降低约达 57%。

(2) 喷孔面积较小的结构设计不利于缸内燃烧速率的进一步提升，喷孔面积为 6.8 mm² 的燃烧持续期整体较 4.7 mm² 为有所缩短，且指示热效率有所升高，其中指示热效率峰值提升 1.5 个百分点，指示油耗率降低 5.3 g/kWh。采用喷孔面积较小的结构

设计, 未燃 HC 排放最大增幅约 46%, CO 排放最大增幅约 150%; 因稀燃极限的扩展, 喷孔面积 6.8 mm² 预燃室结构设计可实现的最低 NO_x 排放相比于喷孔面积 4.7 mm² 的结果, 降低约达 50%。

(3) 预燃室旋孔角度对热效率的影响相对较小。相比于旋孔的结构, 直孔能提高预燃室内的湍动能, 有利于主燃烧内燃烧速率的提升, 有利于 Lambda 进一步提升, 同时保持较好的燃烧稳定性, 利于稀燃极限的提升。相比于旋孔的结果, 直孔的指示热效率峰值提升 0.2 个百分点, 对应指示油耗率降低 0.7 g/kWh, 未燃 HC 排放在整个 Lambda 运行范围内均降低, 最大降幅达 26%, CO 排放最大降幅达 15%, 因稀燃极限增加, 可实现的最佳 NO_x 排放最大降幅达 36%。

参考文献:

- [1] AYALA F A, GERTY M D, HYWOOD J B. Effects of combustion phasing, relative air-fuel ratio, compression ratio, and load on SI engine efficiency [C/OL]//SAE Paper, 2020, 2006-01-0229. (2006-04-03) [2020-09-06]. DOI:10. 4271/2006-01-0229.
- [2] Atis C, Chowdhury S S, Y Ayele, et al. Ultra-Lean and High EGR Operation of Dual Mode, Turbulent Jet Ignition (DM-TJI) Engine with Active Pre-chamber Scavenging[C]// WCX SAE World Congress Experience. 2020.
- [3] Kojima, S., Kiga, S., Moteki, K., Takahashi, E. et al., Development of a New 2L Gasoline VC-Turbo Engine with the World's First Variable Compression Ratio Technology, SAE Technical Paper 2018, 2018-01-0371
- [4] Nakata, K., Nogawa, S., Takahashi, D., Yoshihara, Y. et al., Engine Technologies for Achieving 45% Thermal Efficiency of S.I. Engine, SAE Int. J. Engines 9(1):179-192, 2016
- [5] Luszczyk P, Takeuchi K, Pfeilmaier P et al. Homogeneous lean burn engine combustion system development - Concept study. Internationals struttgarter symposium 2018:205-223.
- [6] 吴坚, 陈嘉雯, 杜家坤, 等. 稀燃条件下主动预燃室式直喷汽油机燃烧和排放特性研究[J]. 内燃机工程, 2021, 42(3):6.
- [7] 占文锋, 罗亨波, 陈泓, 等. 预燃室射流点火对汽油发动机性能影响[J]. 内燃机学报, 2022(040-003).
- [8] 蔡文远, 徐焕祥, 马帅营, 等. 采用高性能点火的均质稀薄燃烧汽油机试验[J]. 内燃机学报, 2020, 38(4): 298-303.
- [9] Jung D, Sasaki K, Iida N. Effects of increased spark discharge energy and enhanced in-cylinder turbulence level on lean limits and cycle-to-cycle variations of combustion for SI engine operation[J]. Applied Energy, 2017, 205.
- [10] Smy D. Application of high energy ignition systems to engines[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1997.
- [11] Robinet C, Higelin P, Moreau B, et al. A New Firing Concept for Internal Combustion Engines: "I'APIR"[C]// 1999.
- [12] Stockman E S, Zaidi S H, Miles R B, et al. Measurements of combustion properties in a microwave enhanced flame[J]. Combustion & Flame, 2009, 156(7):1453-1461.
- [13] Attard W P, Patrick P. A Normally Aspirated Spark Initiated Combustion System Capable of High Load, High Efficiency and Near Zero NO_x Emissions in a Modern Vehicle Power-train[J]. Sae International Journal of Engines, 2010, 3(2):269-287.
- [14] Alvarez C, Couto G E, Roso V R, et al. A review of pre-chamber ignition systems as lean combustion technology for SI engines[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128:107-120.
- [15] Bychkov V, Petchenko A, Akkerman, V'yacheslav, et al. Theory and modeling of accelerating flames in tubes[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2005, 72(4):046307
- [16] William P. Attard, Hugh Blaxill. A Lean Burn Gasoline Fueled Pre-Chamber Jet Ignition Combustion System Achieving High Efficiency and Low NO_x at Part Load [J]. SAE Technical Paper 2012-01-1146, 2012, doi:10.4271/2012-01-1146.
- [17] Sens M., Binder E. Pre-Chamber Ignition as a Key Technology for Future Powertrain Fleets[J]. Mtz Worldwide Magazine, 2019, 80(2):44-51.
- [18] 王博远, 王志, 齐运亮, 等. 基于快速压缩机的预燃室式射流点火试验[J]. 内燃机学报, 2018, 36(4):8.
- [19] Bunce M, Blaxill H, Kulatilaka W, et al. The Effects of Turbulent Jet Characteristics on

Engine Performance Using a Pre-Chamber Combustor[J]. Sae Technical Papers, 2014, 1.

- [20] Attard W P , Blaxill H , Anderson E K , et al. Knock Limit Extension with a Gasoline Fueled Pre-Chamber Jet Igniter in a Modern Vehicle Powertrain[J]. 2012.
- [21] Validi, AbdoulAhad, Schock, Harold, Jaber, Farhad. Tur-bulent jet ignition assisted combustion in a rapid compression machine[J]. Combustion & Flame, 2017, 186(dec.):65-82.
- [22] Bunce M, Blaxill H, Kulatilaka W, et al. The Effects of Tur-bulent Jet Characteristics on Engine Performance Using a Pre-Chamber Combustor[J]. SAE Technical Papers, 2014, doi:10.4271/2014-01-1195
- [23] 邢小伟, 赵晓晓, 王婷婷等. 预燃室形状对天然气发动机燃烧过程的影响[C]//中国汽车工程学会汽车发动机分会. 2013年APC联合学术年会论文集. 广州: 汽车发动机分会, 2013:359-363