

隔热涂层活塞对汽油机性能的影响

王向阳¹, 刘宇¹, 杜家坤², 陈泓², 解方喜¹, 芦大佑¹

(1. 吉林大学汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022; 2. 广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要: 采用试验研究方法在不同负荷和过量空气系数下研究了隔热活塞对汽油机性能的影响。结果表明: 采用隔热涂层活塞, 小负荷工况下最佳点火时刻提前, 着火延迟期和燃烧持续期延长; 相反, 大负荷工况下, 燃烧中心推迟。此外, 采用隔热涂层活塞会导致 NO_x 排放量上升, CO 和 HC 排放量下降; 在大负荷空气稀释燃烧和当量比燃烧下, 隔热涂层活塞对发动机性能影响相同。

关键词: 动力机械及工程; 隔热涂层活塞; 当量比燃烧; 空气稀释燃烧; 发动机性能

中图分类号: TK41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)09-2828-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240238

Effect of thermal insulation coating piston on performance of gasoline engine

WANG Xiang-yang¹, LIU Yu¹, DU Jia-kun², CHEN Hong², XIE Fang-xi¹, LU Da-you¹

(1. National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. GAC Automotive Research & Development Center, Guangzhou 511434, China)

Abstract: An experimental study was conducted to investigate the effects of an insulated piston on gasoline engine performance under different loads and excess air ratios. The results show that the optimal ignition time is advanced at low load, the ignition delay period and the combustion duration are prolonged; conversely, the combustion center is postponed at high load. Additionally the use of thermal insulation coating pistons has led to an increase in NO_x emissions and a decrease in CO and HC emissions; the thermal insulation coating pistons has the same effect on engine performance during both and stoichiometric air dilution combustion at high loads combustion.

Key words: power machinery and engineering; thermal insulation coating piston; stoichiometric combustion; air dilution combustion; engine performance

0 引言

目前, 由于全球对化石能源供应的担忧, 提高

热效率^[1,2]成为内燃机研发的主要目标。根据经典内燃机原理^[3], 传热损失占缸内燃烧放热总量的 30% 以上。降低传热损失^[4,5]以改善经济性是内燃

收稿日期: 2024-03-09.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51876079); 吉林省科技发展计划项目(20210201039GX); 动力机械与工程教育部重点实验室开放课题项目(4914683); 吉林大学大学生创新训练国家级项目(202310183119).

作者简介: 王向阳(1998-), 男, 博士研究生. 研究方向: 能源多元化与新型动力总成. E-mail: 753403128@qq.com

通信作者: 刘宇(1981-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 能源多元化与新型动力总成. E-mail: liuyu1981@jlu.edu.cn

机研究的重要方向。通过隔热涂层技术降低壁面导热系数,是降低传热损失的有效方式。

自 20 世纪 80 年代以来,隔热涂层技术一直受到关注。Woschni 等^[6]通过计算得出,在低负荷时采用绝热燃烧室可以提高柴油机热效率。Kam-mo 等^[7]在柴油机上的研究发现,在铝制活塞顶涂上薄陶瓷涂层,可在中高负荷下使燃油消耗改善 10%。Taymaz^[8]在六缸柴油机不同转速和负荷工况下的试验显示,在燃烧室表面、气缸盖、气门和活塞顶涂上陶瓷材料可降低发动机的燃油消耗。Yan 等^[9]在单缸轻型柴油机上研究了隔热涂层技术对低温燃烧的影响,研究结果表明,隔热图层技术使发动机的燃烧效率和指示热效率均提高了 1%~2%。胡艳娇等^[10]建立了高强度活塞等离子喷涂涂层隔热性能分析数学物理模型,分析得出,随着隔热效果的增加,涂层表面温度提高,其表面传递的热流密度减小,铝活塞基体与涂层结合处温度降低。张利敏等^[11]提出采用空气和隔热衬垫复合隔热的钢顶铝裙活塞,仿真结果显示,经活塞环槽区输出的热流减小约 20%。

综上所述,隔热涂层活塞对改善发动机性能具有重要意义,但是现有研究主要集中在隔热涂层活塞结构设计^[12,13]及柴油机应用^[14]方面,与汽油机相关的研究较少。相较于柴油机,汽油机的燃烧温度更高,传热损失更大,且近壁面燃烧对排放影响更大。因此,隔热涂层活塞对汽油机的经济性和排放性能可能会有更好的优化效果。本文将通过试验探究高压压缩比汽油机采用隔热涂层活塞后,对其在当量比燃烧和大负荷空气稀释燃烧情况下经济性、燃烧特性和排放特性的影响。

1 试验装置和方法

1.1 试验装置和测试设备

本文采用一台可更换隔热涂层活塞的单缸汽油机。该汽油机配备了电动模拟增压系统以控制进气压力和进气温度,其喷油参数和点火时刻均可通过可编程的时序控制模块调整,燃油供给系统采用 35 MPa 的规格。试验所用发动机的技术参数如表 1 所示。

本文采用的隔热涂层活塞基于等离子体电解氧化(Plasma electrolytic oxidation, PEO)技术在活塞表面隔热涂层涂覆制成。图 1 为活塞表面隔热涂层的材料分布^[15]。本试验还采用了 PEO 密

表 1 发动机技术参数	
Table 1 Engine specifications	
参数	数值
缸径/mm	79
活塞行程/mm	102
排量/L	0.5
压缩比	15.8
连杆长度/mm	152

封剂填充 PEO 涂层的微孔和孔隙,以提高涂层的耐久性和可靠性,同时进一步降低活塞的导热性。普通铝制活塞的导热系数为 200~250 W/(m·K),本文使用的隔热涂层导热系数约为 1 W/(m·K)^[16]。查阅文献[17-19]可知,POE 技术可在铝表面形成均匀耐用、完全黏附的涂层,且涂层组分硬度极高,通常为 1 400~1 700 HV^[19]。图 2 为试验前、后的隔热涂层活塞。对比可见,试验结束后隔热涂层基本完整,烧损程度轻微,形态没有发生改变,基本能够满足试验要求。

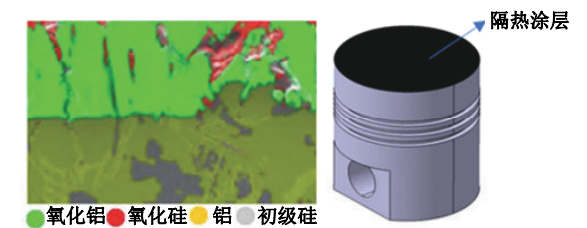


图 1 活塞隔热涂层的材料分布

Fig. 1 Material distribution of piston thermal insulation coatings

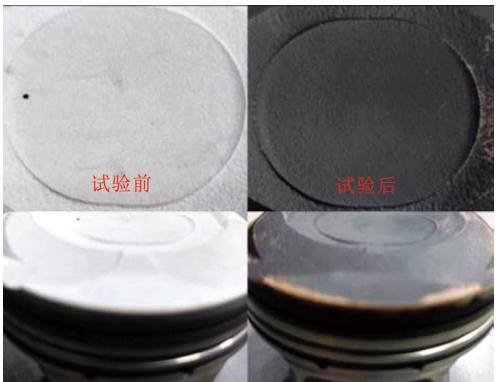


图 2 试验前、后隔热涂层活塞对比

Fig. 2 Comparison of thermal insulation coating pistons before and after experiment

本试验中,汽油机控制部分采用 AVL 515 进气模拟增压系统控制进气压力和进气温度;采用 AVL 577 油水恒温控制单元控制汽油机润滑油和冷却液温度;采用 Scienlab DICU 喷油控制单元及时序控制单元控制喷油时刻和喷油量。发动

机测试部分由 ACWA-100 5-4-290 瞬态测功机测试发动机动力参数;由 Kistler 6054BR 缸压传感器输出缸压信号,由 AVL 365C 角标仪输出曲轴转角信号,将信号传输至 AVL INDIMCRO 602 燃烧分析仪得到发动机燃烧数据,采用 AVL 7361 CST 瞬态油耗仪监控并采集实际喷油量数据。采用 HORIBA MEXA-7500D 气体排放分析仪测试发动机常规排放污染物。发动机测控主要仪器设备型号及精度如表 2 所示,发动机试验装置示意图如图 3 所示。

表 2 发动机测控主要仪器设备型号及精度

Table 2 Model and accuracy of main instruments and equipment for engine measurement and control

仪器设备	型号	精度
进气模拟增压系统	AVL 515	$\pm 50 \times 10^8 \text{ Pa}$
油水温控制单元	AVL 577	$\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$
喷油控制单元	Scienlab DICU	
瞬态测功机	ACWA-100 5-4-290	扭矩: $\pm 0.03\%$ 转速: $\pm 1 \text{ r/min}$
缸压传感器	Kistler 6054BR	$\pm 0.3\%$
角标仪	AVL 365C	$\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{CA}$
燃烧分析仪	AVL INDIMCRO 602	
瞬态油耗仪	AVL 7361 CST	$\pm 0.05\%$
气体排放分析仪	HORIBA MEXA-7500D	校准检查: $\pm 0.5\%$ 重复试验: $\pm 0.5\%$

1.2 试验方法

本次试验中,进气温度保持 $30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,冷却液温度保持 $65 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,进排气相位固定,喷油压力控制在 35 MPa ,喷油时刻控制在 300°CA BTDC ,发动机压缩比为 15.8。试验选取原型机典型的万有特性最低油耗工况点对应的转速 (2750 r/min)。在上述条件下进行当量比燃烧试验和大负荷空气稀释燃烧试验。当量比燃烧的净平均指示压力(Gross indicated mean effective pressure, GIMEP)选择 0.65、0.75、0.85、0.95 和 1.05 MPa 共 5 个工况点。大负荷空气稀释燃烧试验中,当 GIMEP 为 1.05 MPa 时,过量空气系数选择 1.0、1.1、1.2、1.3、1.4 和 1.5 共 6 个值。本试验通过调节点火时刻,使汽油机工作在爆震边界或达到热效率最高点的最佳扭矩最小点火提前角(Minimum advance for best torque, MBT)。基于经验,将 5% 作为每 50 个循环的循环变动临界值。当量比燃烧试验和大负荷空气稀释燃烧试验均分别在普通活塞和隔热涂层活塞 2

种条件下进行。

1.3 参数定义

当燃料在气缸中燃烧时,其化学能无法完全转换为机械能,还存在不完全燃烧损失、传热损失、排气损失。燃烧过程中的能量组成为:

$$Q = Q_i + Q_{ex} + Q_h + W_i \quad (1)$$

式中: Q 为输送到气缸内燃烧的总化学能; Q_i 为不完全燃烧损失; Q_{ex} 为废气带走的热能损失; Q_h 为传热损失; W_i 为净指示功。

不完全燃烧损失的计算公式为:

$$Q_i = \frac{M_{CO} \times LHV_{CO} + M_{THC} \times LHV_{FUEL}}{3600} \quad (2)$$

式中: M_{THC} 和 M_{CO} 分别为总碳氢和 CO 的直流流量排放, g/h; LHV_{CO} 为 CO 的低热值, MJ/kg; LHV_{FUEL} 为燃料的低热值, MJ/kg。

排气损失的计算公式为:

$$Q_{ex} = Q_{exh} - Q_{inh} \quad (3)$$

式中: Q_{exh} 为排气流动焐值; Q_{inh} 为进气流动焐值。

$$Q_{exh} = \frac{M_{exh} \times C_{p,exh} \times (T_{exh} - 20)}{3.6 \times 10^6} \quad (4)$$

$$Q_{inh} = \frac{M_{inh} \times C_{p,inh} \times (T_{inh} - 20)}{3.6 \times 10^6} \quad (5)$$

式中: M_{exh} 、 M_{inh} 分别为排气、进气的湿基质量流量, kg/h; $C_{p,exh}$ 、 $C_{p,inh}$ 分别为排气、进气的定压比热容, J/(kg·K); T_{exh} 、 T_{inh} 分别为排气、进气的歧管温度, $^\circ\text{C}$ 。

净指示热效率可以表示为:

$$\text{GITE} = W_i / Q \quad (6)$$

一般将着火延迟期定义为火花点火到燃料化学能释放 5% 之间的曲轴转角,将燃烧持续期定义为缸内放热量 10%~90% 的曲轴转角。将 CA50 定义为缸内放热量达到 50% 时的曲轴转角位置^[20,21]。

2 试验结果分析

2.1 隔热涂层活塞对汽油机当量比燃烧的影响

图 4 为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞最佳点火时刻 MBT 对比。与普通活塞相比,在小负荷时隔热涂层活塞 MBT 提前,在大负荷时则相反。当 GIMEP 分别为 0.65 和 1.05 MPa 时,隔热涂层活塞的点火时刻相较于普通活塞分别提前 2°CA 和推迟 0.5°CA 。这是因为,相较于普通活塞,隔热涂层活塞燃烧持续期和着火延迟期在小负荷时延长,而在大负荷时缩短。

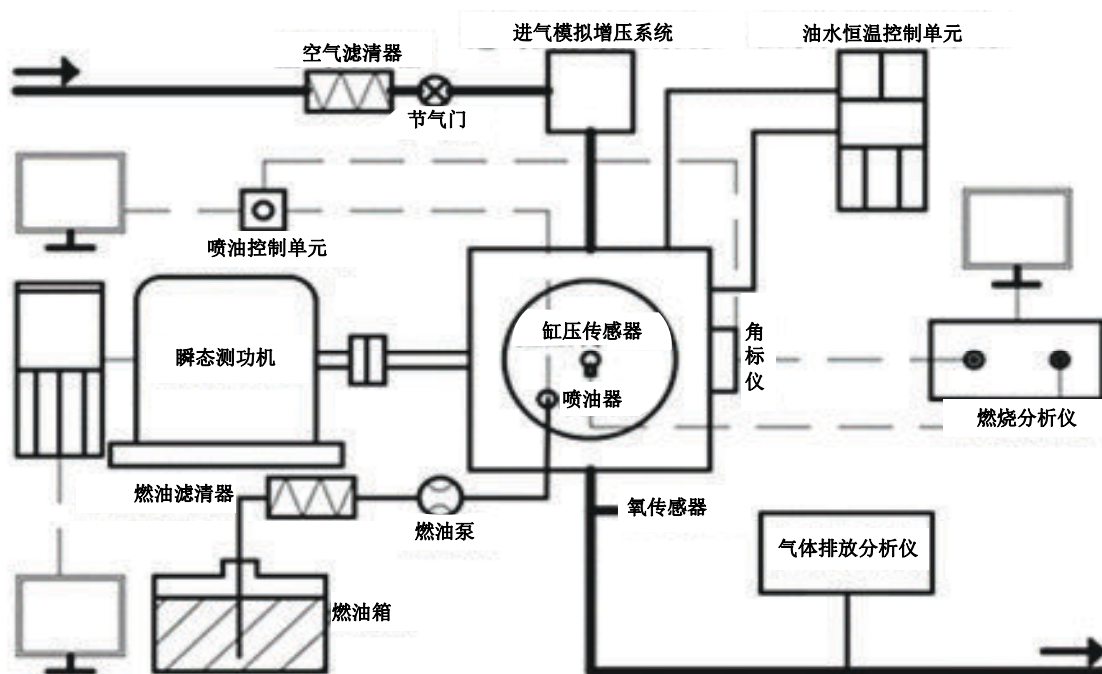


图3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of experiment set-up

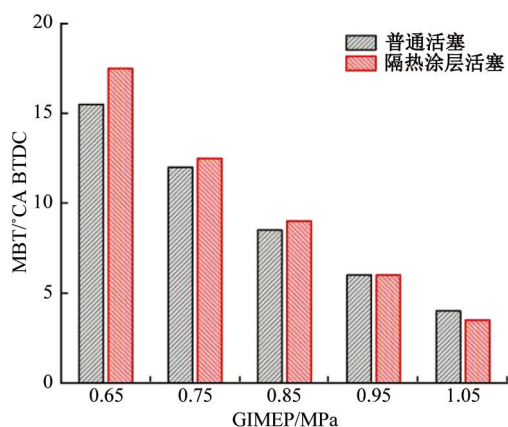


图4 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞最佳点火时刻MBT对比

Fig. 4 Comparison of the optimal spark timing MBT between regular pistons and thermal insulation coating pistons in gasoline engines under stoichiometric combustion

图5为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞着火延迟期和燃烧持续期对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞在小负荷时着火延迟期和燃烧持续期更长,在大负荷时则相反。对于采用2种不同传热性能活塞的燃烧过程,缸内热氛围是影响着火延迟期和燃烧持续期的主要因素。实验中,发动机进气温度保持在 (303 ± 2) K。汽油机正常工作时,活塞温度保持在 $400 \sim 500$ K,远高于进气温度。

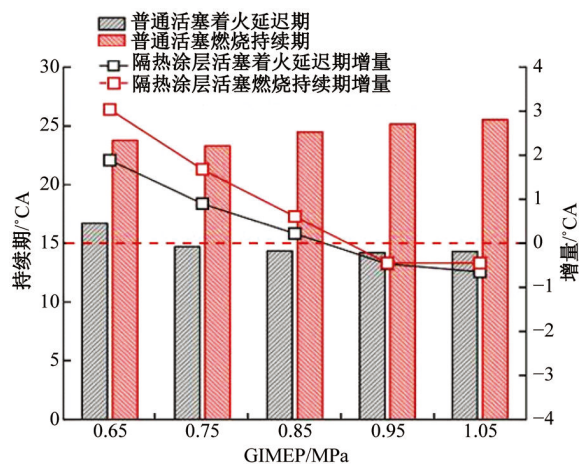


图5 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞着火延迟期和燃烧持续期对比

Fig. 5 Comparison of ignition delay period and combustion duration between regular pistons and thermal insulation coating pistons in gasoline engines under stoichiometric combustion

由此可推断,在进气冲程和压缩冲程前半段,活塞加热缸内工质;而在压缩冲程后半段,缸内工质通过活塞散热。相较于普通活塞,隔热涂层活塞会减少缸内工质与活塞之间的传热量,进而使活塞加热缸内工质对应的曲轴转角增大,而缸内工质通过活塞散热的曲轴转角减小。进一步推断,随着负荷的增大,压缩冲程的缸内工质温

度和压力升高,隔热涂层活塞在压缩上止点附近的工质温度接近普通活塞,在大负荷时可能超过普通活塞。图6为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞的平均缸内压力和平均缸内温度对比。当曲轴转角为 30°CA BTDC 、GIMEP为0.65 MPa时,普通活塞的缸内平均缸内温度比隔热涂层活塞高8.6 K;而当GIMEP为1.05 MPa时,普通活塞的缸内平均温度比隔热涂层活塞低7.3 K。这与上述推论相符,且与本文试验得出的着火延迟期和燃烧持续期的规律相符。

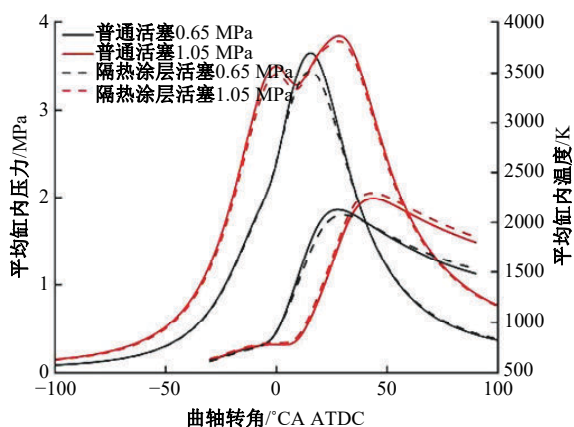


图6 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞的平均缸内压力和平均缸内温度对比

Fig. 6 Comparison of average cylinder pressure and average cylinder temperature between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under stoichiometric combustion

图7为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞CA50对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞在小负荷时CA50推迟,而在大负荷时基本不变。当GIMEP分别为0.65和1.05 MPa时,相比普通活塞,隔热涂层活塞CA50分别推迟 1.51°CA 和 0.12°CA 。这主要是因为隔热涂层活塞会减少缸内工质和活塞之间的传热量,从而使燃烧末期活塞顶附近混合气体温度上升。此外,隔热涂层活塞在小负荷时着火延迟期和燃烧持续期会延长,这进一步加重了爆震倾向,因此小负荷时,推迟CA50以抑制爆震。在大负荷时,隔热涂层活塞着火延迟期和燃烧持续期会缩短,可以抵消活塞顶附近混合气体温度上升带来的爆震倾向增加,因此在大负荷时,隔热涂层活塞的CA50变化不大。

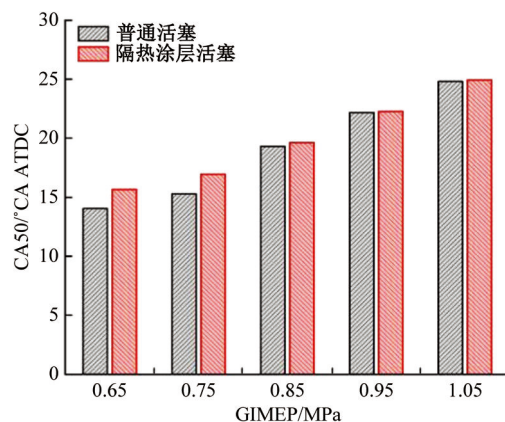


图7 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞CA50对比

Fig. 7 Comparison of CA50 between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under stoichiometric combustion

图8为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞常规排放物对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞会导致 NO_x 排放量升高。当GIMEP为0.85 MPa时, NO_x 排放量升高最为明显,此时隔热涂层活塞的 NO_x 排放量较普通活塞升高22.78%。高温 NO_x 是汽油机 NO_x 排放量主要来源,根据高温 NO_x 反应机理,生成 NO_x 的条件是温度、氧浓度和反应时间^[22]。相较于普通活塞,隔热涂层活塞会减少燃烧过程中通过活塞顶的散热量,导致缸内温度维持在 NO_x 生成高温区的曲轴转角范围变长,使得 NO_x 排放升高。

由图8可知,与普通活塞相比,隔热涂层活塞的CO和THC排放量明显降低,且当GIMEP为0.85 MPa时最为明显,此时CO和THC排放量相对普通活塞分别降低了62.12%和16.61%。这主要由两方面因素造成:一是隔热涂层活塞减少发动机在燃烧过程和膨胀冲程中缸内工质与活塞的换热量,提高了缸内燃烧温度,降低了CO和THC排放量;二在燃烧过程和膨胀冲程中隔热涂层活塞表面温度高于普通活塞,有助于改善活塞近壁面燃烧状态^[23],降低CO和THC排放量。

图9为当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞GITE、未燃损失、排气损失和传热损失对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞会使传热损失降低,未燃损失和排气损失变化不大,GITE上升。这主要是因为,相较于普通活塞,隔热涂层活塞减少了发动机在燃烧过程和膨胀冲程

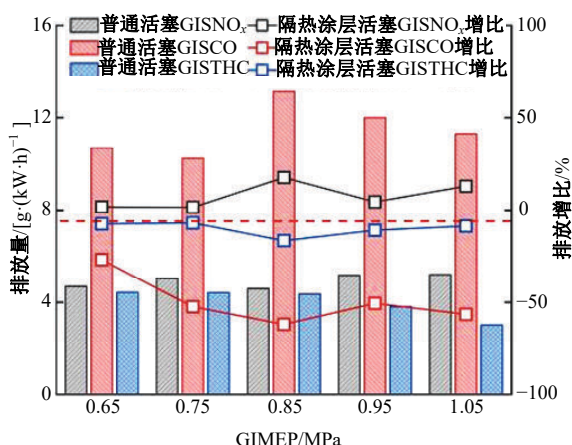


图8 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞常规排放物对比

Fig. 8 Comparison of regulated emissions from gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under stoichiometric combustion

中缸内工质与活塞的换热量,从而降低了传热损失,提高了排气温度。但是由于隔热涂层活塞可以降低油耗,减少进入缸内的燃料热量,因此排气损失变化不大。此外,相较于普通活塞,隔热涂层活塞降低了CO和THC排放量,减少未燃损失,但由于未燃损失的基数较小,因此变化不大。由于传热损失降低,未燃损失和排气损失变化不大,因此GITE升高。

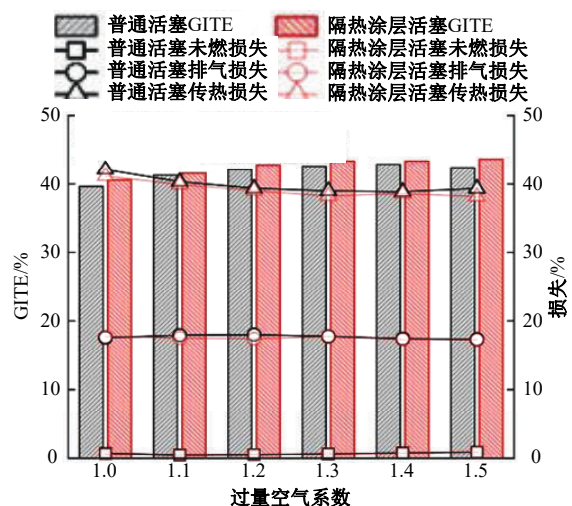


图9 当量比燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞GITE、未燃损失、排气损失和传热损失对比

Fig. 9 Comparison of GITE, unburned losses, exhaust losses, and heat transfer losses between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under stoichiometric combustion

2.2 隔热涂层活塞对汽油机大负荷空气稀释燃烧的影响

图10为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞MBT对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞的MBT推迟。这是由于隔热涂层活塞的着火延迟期和燃烧持续期相较于普通活塞缩短。

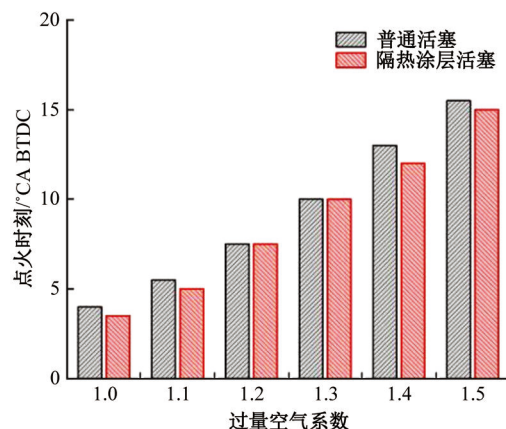


图10 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞MBT对比

Fig. 10 Comparison of MBT between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

图11为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞的着火延迟期和燃烧持续期对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞的着火延迟期和燃烧持续期缩短,这与大负荷下当量比燃烧得出的结论一致。随着过量空气系数的增大,着火延迟期和燃烧持续期延长,这是过量空气系数的增大会减缓燃烧速度所致。

图12为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞CA50对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞的CA50基本不变,这与大负荷下当量比燃烧得出的结论一致。随着过量空气系数的增大,CA50提前。采用普通活塞时,过量空气系数为1.5的燃烧中心CA50较过量空气系数为1的提前了2.21 °CA。这主要是因为过量空气系数的增加降低了燃烧温度,从而降低了爆震倾向,导致CA50提前。

图13为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞的循环变动COV_{IMEP}对比。由图13可见,采用隔热涂层活塞和普通活塞对发动机循环变动的影响不大,当过量空气系数

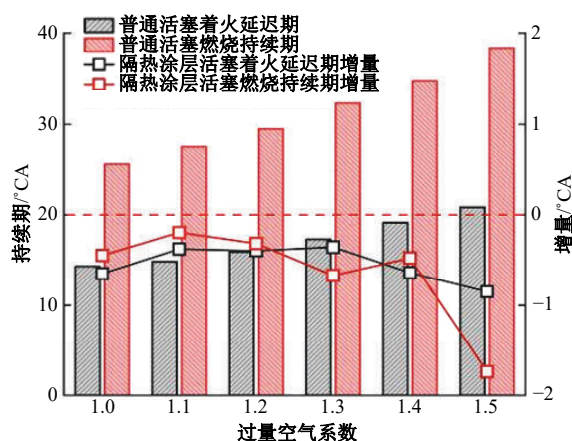


图 11 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞着火延迟期和燃烧持续期对比

Fig. 11 Comparison of ignition delay period and combustion duration between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

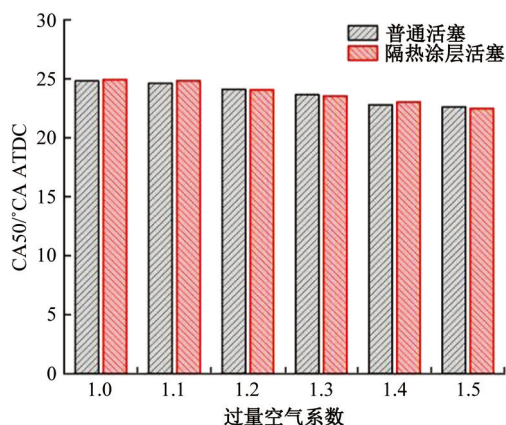


图 12 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞 CA50 对比

Fig. 12 Comparison of CA50 between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

高于 1.3 时,2 种活塞的 COV_{IMEP} 均大于 5%;当过量空气系数为 1.0~1.4 时,隔热涂层的着火延迟期活塞相较于普通活塞只缩短了 0.5 °CA 左右。这说明隔热涂层活塞对火花塞周围热氛围的影响较小,因此 2 种活塞的循环变动 COV_{IMEP} 差异不大。

图 14 为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞常规排放物对比。在大负荷空气稀释燃烧下,相较于普通活塞,隔热涂层活塞会导致 NO_x 排放量升高、CO 和 THC 排放量

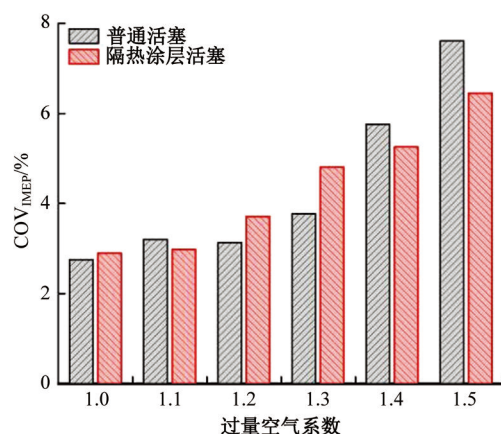


图 13 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞 COV_{IMEP} 对比

Fig. 13 Comparison of COV_{IMEP} between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

降低。以过量空气系数为 1.3 为例,隔热涂层活塞相较于普通活塞 NO_x 排放量升高了 25.87%,CO 排放量降低了 5.56%,THC 排放量降低了

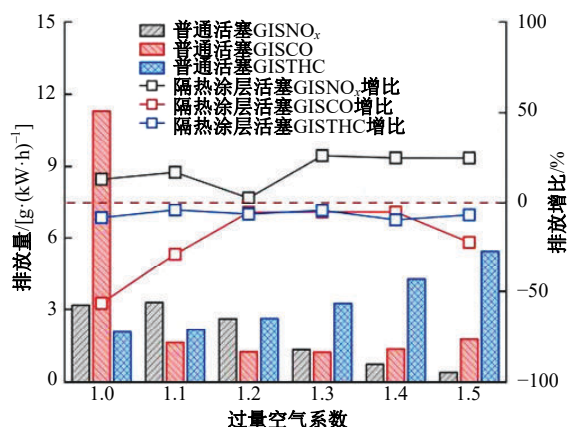


图 14 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞常规排放物对比

Fig. 14 Comparison of regulated emissions between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

4.66%,这与大负荷当量比燃烧下得出的结论一致。

图 15 为大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞 GITE、未燃损失、排气损失和传热损失对比。与普通活塞相比,隔热涂层活塞会使传热损失和未燃损失降低,排气损失变化不大,GITE 上升。以过量空气系数 1.3 为例,相较于普通活塞,隔热涂层活塞的传热损失

下降0.74%,未燃损失和排气损失变化很小,GITE增大0.75%,这与大负荷当量比燃烧下得出的结论一致。

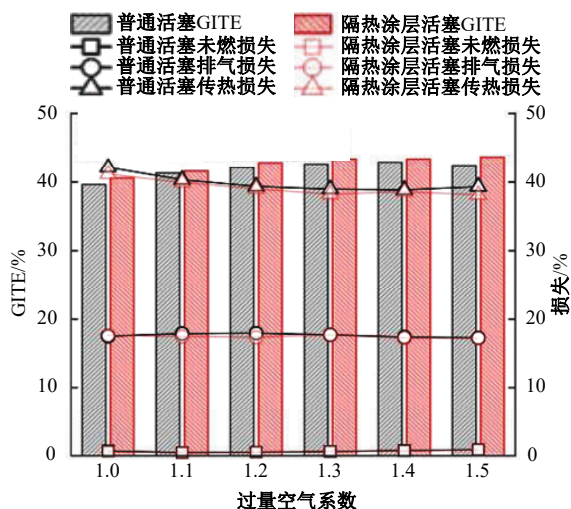


图15 大负荷空气稀释燃烧下汽油机采用普通活塞和隔热涂层活塞GITE、未燃损失、排气损失和传热损失对比

Fig. 15 Comparison of GITE, unburned losses, exhaust losses, and heat transfer losses between gasoline engines using regular pistons and thermal insulation coating pistons under high load air dilution combustion

3 结 论

(1)当量比燃烧下,采用隔热涂层活塞相较于采用普通活塞,小负荷时点火提前,着火延迟期和燃烧持续期延长;而大负荷时则相反。CA50在小负荷时推迟,在大负荷时基本不变。

(2)大负荷空气稀释燃烧下,采用隔热活塞相较于采用普通活塞点火提前,着火延迟期和燃烧持续期缩短,CA50基本不变。

(3)当量比燃烧和大负荷空气稀释燃烧下,采用隔热涂层活塞相较于采用普通活塞均能降低传热损失,提高发动机经济性。当量比燃烧下,当GIMEP为0.85 MPa时,隔热涂层活塞相较于普通活塞的传热损失降低,GITE上升。大负荷空气稀释燃烧下,当过量空气系数为1.3时,隔热涂层活塞相较于普通活塞的传热损失降低0.74%,GITE上升0.75%。

(4)当量比燃烧和大负荷空气稀释燃烧下,采用隔热涂层活塞均会使NO_x排放上升、CO和THC排放下降。当量比燃烧下,当GIMEP为0.85 MPa时,隔热涂层活塞相较于普通活塞NO_x

排放升高22.78%,CO和THC排放分别降低62.12%和16.61%。大负荷空气稀释燃烧下,当过量空气系数为1.3时,隔热涂层活塞相较于普通活塞NO_x排放升高了25.87%,CO排放降低了5.56%,THC排放降低了4.66%。

参考文献:

- [1] Chen B, Zhang L, Han J, et al. A combination of electric supercharger and Miller Cycle in a gasoline engine to improve thermal efficiency without performance degradation[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2019, 14: No. 100429.
- [2] Zhao J, Xi Q, Wang S, et al. Improving the partial load fuel economy of 4-cylinder SI engines by combining variable valve timing and cylinder-deactivation through double intake manifolds[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 141: 245-256.
- [3] 周龙保. 内燃机学[M]. 3版. 北京:机械工业出版社, 2012.
- [4] 李晓娜, 解方喜, 窦慧莉, 等. 气门重叠角对GDI发动机性能和微粒排放的影响[J]. 汽车工程, 2023, 45(4): 654-662.
Li Xiao-na, Xie Fang-xi, Dou Hui-li, et al. Effects of valve overlap angle on GDI engine performance and particulate emissions[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(4): 654-662.
- [5] 杨尚升, 黄勇成, 曹银波. 停缸技术对缸内直喷点燃式发动机燃烧与排放及燃油经济性的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 68-74.
Yang Shang-sheng, Huang Yong-cheng, Cao Yin-bo. Effects of cylinder shutdown technology on combustion, emissions and fuel economy of in-cylinder direct injection ignition engine[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 68-74.
- [6] Woschni G, Spindler W, Kolesa K. Heat insulation of combustion chamber walls—A measure to decrease the fuel consumption of I. C. engines[C]//SAE Technical Paper, 870339.
- [7] Kamo R, Bryzik W. Adiabatic turbocompound engine performance prediction[C]//SAE Technical Paper, 780068.
- [8] Taymaz I. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine[J]. Energy, 2006, 31(2/3): 364-371.
- [9] Yan Z, Gainey B, Gohn J, et al. The effects of thick thermal barrier coatings on low-temperature combustion[C]//SAE Technical Paper, 2020-01-0275.

- [10] 胡艳娇, 李敏, 刘宇平, 等. 高强度活塞等离子喷涂涂层隔热性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 141-145.
- Hu Yan-jiao, Li Min, Liu Yu-ping, et al. Research on thermal insulation performance of high-strength piston plasma spray coating[J]. Thermal Processing Technology, 2019, 48(6): 141-145.
- [11] 张利敏, 王延荣, 许春光, 等. 复合隔热组合活塞结构设计及优化[J]. 内燃机学报, 2020, 38(5): 472-479.
- Zhang Li-min, Wang Yan-rong, Xu Chun-guang, et al. Design and optimization of composite thermal insulation composite piston structure[J]. Transactions of Csic, 2020, 38(5): 472-479.
- [12] 姬亚萌, 张卫正, 原彦鹏, 等. 复合隔热结构活塞界面材料接触热阻实验研究[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(7): 1728-1734.
- Ji Ya-meng, Zhang Wei-zheng, Yuan Yan-peng, et al. Experimental study on contact thermal resistance of piston interface materials with composite thermal insulation structure[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(7): 1728-1734.
- [13] 陈国争, 张卫正, 原彦鹏, 等. 活塞隔热性能有限元分析及试验验证[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(6): 603-610.
- Chen Guo-zheng, Zhang Wei-zheng, Yuan Yan-peng, et al. Finite element analysis and experimental verification of piston thermal insulation performance[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(6): 603-610.
- [14] Osada H, Uchida N, Zama Y. An analysis on heat loss of a heavy-duty diesel engine by wall-impinged spray flame observation[C]//SAE Technical Paper, 2015-01-1832.
- [15] 程章, 黄昭明, 吕冬梅, 等. 绝热涂层涂覆活塞耦合预燃室射流点火技术的试验研究[J]. 机械科学与技术, 2025, 44(3): 404-411.
- Cheng Zhang, Huang Zhao-ming, Lyu Dong-mei, et al. Experimental research on coupling pre-ignition chamber jet ignition technology of thermal insulation coating coated piston[J]. Mechanical Science and Technology, 2025, 44(3): 404-411.
- [16] Wang B, Xie F X, Hong W, et al. Extending ultra-lean burn performance of high compression ratio pre-chamber jet ignition engines based on injection strategy and optimized structure[J]. Energy, 2023, 282: No. 128433.
- [17] Cheng Y L, Cao J H, Mao M K, et al. High growth rate, wear resistant coatings on an Al-Cu-Li alloy by plasma electrolytic oxidation in concentrated aluminate electrolytes[J]. Surface and Coatings Technology, 2015, 269: 74-82.
- [18] Wang K, Kim Y J, Hayashi Y, et al. Ceramic coatings on 6061 Al alloys by plasma electrolytic oxidation under different AC voltages[J]. Journal of Ceramic Processing Research, 2009, 10(4): 562-566.
- [19] Tavares M M, Vitoriano J O, Silva R C L, et al. Effect of duty cycle and treatment time on electrolytic plasma oxidation of commercially pure Al samples[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(2): 2141-2147.
- [20] Brendon B. Analysis of combustion in plasma electrolytic oxidation (PEO) coatings of the piston surface in spark ignition engines[D]. Canada: University of Windsor, 2022.
- [21] Li D C, Yu X M, Du Y D, et al. Study on combustion and emissions of a hydrous ethanol/gasoline dual fuel engine with combined injection[J]. Fuel, 2022, 309: No. 122004.
- [22] Iodice P, Amoresano A, Langella G, et al. A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on NO_x emissions in spark-ignition engines[J]. Biofuel Research Journal, 2021, 8: 1465-1480.
- [23] Bertsch M, Koch T, Velji A, et al. Thermodynamic and optical investigations on particle emissions in a DI-SI engine at boosted operation[C]//SAE Technical Paper, 2015-01-1888.