

进气道滚流比对发动机压升率及噪声的影响

赵磊^{1,2}, 纪雷^{1,2*}, 赵铮^{1,2}, 关昊^{1,2}, 杨敏敏^{1,2}, 李东辉^{1,2}

1. 长城汽车股份有限公司, 河北 保定 071000; 2. 河北省车用发动机技术创新中心, 河北 保定 071000

摘要:以某双喷射6缸发动机为研究对象,设计高滚流比和低滚流比2种进气道,通过三维计算流体动力学软件AVL Fire对缸内流场进行仿真,分析发动机燃烧特性,并进行台架燃烧测试和噪声测试。仿真结果表明:在转速为2800 r/min、平均有效压力为1.3 MPa工况下,相比高滚流进气道方案,低滚流气道方案的缸内第一、二个峰值滚流比分别降低了43.3%、34.9%,最大缸内平均压力降低544 kPa,最大压力升高率降低16.84%。台架试验结果表明:2种进气道的燃烧持续期相差不大,相比高滚流进气道方案,低滚流方案以曲轴转角表示的燃烧重心推迟了2.02°,燃油消耗率增大0.67%,压力升高率(压升率)降低了19.87%,发动机在频率为700~1300 Hz时的噪声约降低6.0 dB,噪声改善效果明显。

关键词:进气道;滚流比;仿真分析;压升率;噪声

中图分类号:TK411.6;TK413.44

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)03-0051-06

引用格式:赵磊,纪雷,赵铮,等.进气道滚流比对发动机压升率及噪声的影响[J].内燃机与动力装置,2024,41(3):51-56.

ZHAO Lei, JI Lei, ZHAO Zheng, et al. Effect of intake port tumble ratio on engine pressure rise rate and noise[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(3):51-56.

0 引言

随着全球能源危机、环保问题的日益严峻,排放标准的更加严格,以及人们对燃油经济性和动力性需求的提高,改善燃油经济性、提高热效率和降低排放是内燃机行业的主要研究方向。发动机缸内流场对发动机燃烧过程及排放特性影响较大,提高气道性能是增强缸内流场的重要途径之一^[1-3]。过高的气道滚流虽然能提高缸内流场强度、改善燃烧速度,但也可能造成缸内燃烧压力升高率(压升率)过高,在燃烧爆发压力的激励下,运动机构因敲击、振动冲击而产生噪声,降低用户满意度^[3-4]。

本文中以某双喷射6缸汽油机样机为研究对象,采用计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法建立进气道的三维模型,研究不同滚流进气道对发动机燃烧特性及噪声的影响,并进行台架试验验证。

1 进气道设计

进气道结构是决定缸内滚流强度的主要因素,本文中将使缸内形成滚流的进气道称为滚流进气道。设计2款进气道,对比分析不同滚流比进气道对发动机燃烧性能及噪声的影响,2款进气道结构如图1所示。方案一为高滚流比气道,为提高滚流比,进气道上轮廓近似直线设计,进气道下轮廓为鱼腹形,保证进气道底部气流更多流向上部,增强正向滚流,如图1a所示;方案二为低滚流比气道,如图1b

收稿日期:2024-01-18

第一作者简介:赵磊(1988—),男,河南驻马店人,工学硕士,工程师,主要研究方向为发动机燃烧系统开发及流体仿真分析,E-mail:zziazhalei@163.com。

***通信作者简介:**纪雷(1987—),男,山东莱芜人,高级工程师,主要研究方向为发动机设计开发,E-mail:jljilei@126.com。

所示。2个方案的差异主要体现在气道下喉口处,相比于方案一,方案二通过削减下喉口处鱼腹轮廓延伸长度来增大气道喉口有效流通截面积,增大下喉口处气流流量,提高气道流量因数,降低滚流比,有利于降低燃烧速度。



图1 进气道方案

2 进气道稳态仿真

2.1 仿真模型

几何模型包含进气道、进气门、气门座圈、缸盖燃烧室、缸筒等,网格类型为 Trimmed Mesher (切割体网格),基础网格尺寸为 2.50 mm,局部采用尺寸为 0.25 mm 的网格加密,总网格数为 100 万左右。边界条件采用进出口压差(来源于气道试验),湍流模型采用 $k-\varepsilon$ 模型^[5-6]。

2.2 仿真结果

进气道稳态仿真结果如图2所示。由图2a)可知:升程为 1~5 mm 时,方案一和方案二的流量因数差异很小,在大升程区域,即升程为 6~10 mm 时,两方案的流量因数差别较大,相比方案一,方案二的流量因数平均增大 21.5%。由图2b)可知:在升程大于 5 mm 时,相比方案一,方案二的滚流比平均降低 44.7%。

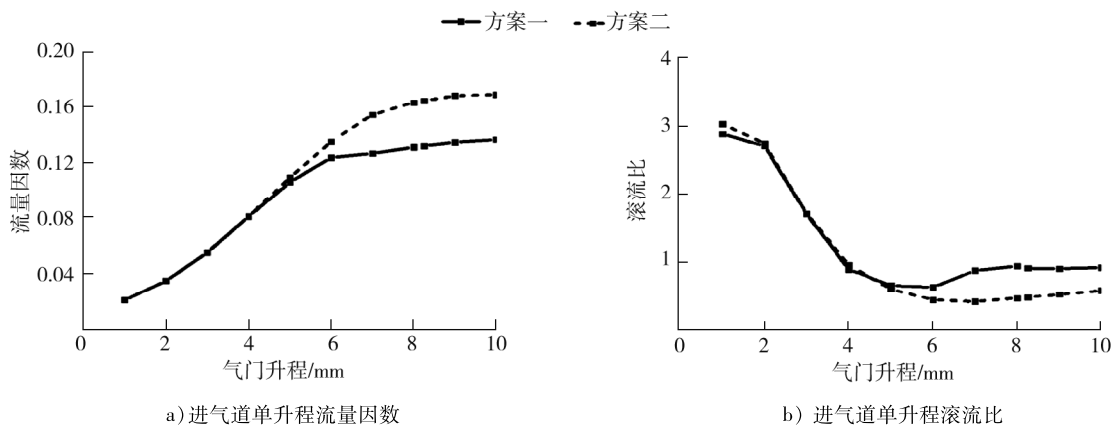


图2 进气道稳态仿真结果

3 缸内瞬态 CFD 仿真

本文中重点研究滚流比对部分负荷的影响,缸内瞬态仿真计算工况为:转速为 2 800 r/min、平均有效压力为 1.3 MPa。

3.1 仿真模型建立

基于 AVL Fire 软件对缸内流场进行瞬态仿真,燃烧模型主要包含进排气道、进气门、排气门、进气门座圈、排气门座圈、缸盖燃烧室、气缸套、活塞、火花塞等密闭区域。使用 AVL Fire 软件的 FAME Engine Plus 划分网格,网格类型以六面体网格为主,最大网格尺寸为 1 mm,最小网格尺寸为 0.125 mm。边界条件采用一维热力学模型提供的入口进气流量、温度,出口压力温度为瞬态边界。采用的模型有: $k-\varepsilon$ 标准

壁面处理模型、标准传热模型、拟序火焰模型(extended coherent flame model, ECFM)^[7-8]。燃烧系统模型如图3所示。

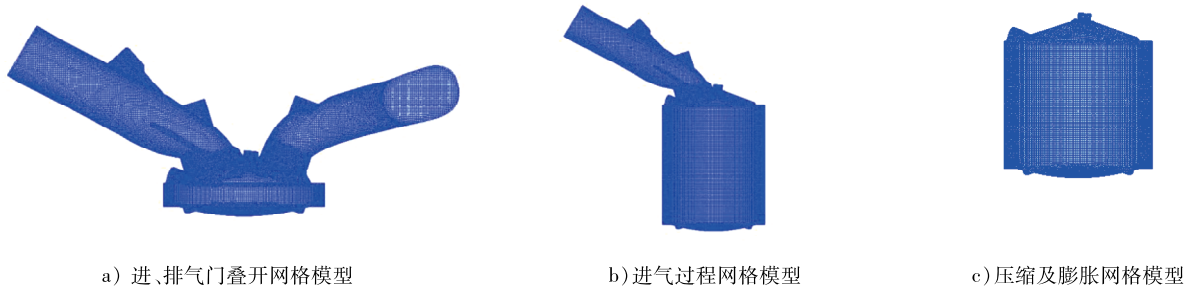


图3 燃烧系统仿真模型

3.2 缸内流场计算结果

3.2.1 缸内瞬态滚流比

滚流比第一个波峰出现在进气过程气门升程最大处,为进气和活塞共同影响所致。随着活塞下行,缸内体积变大,滚流比逐渐下降,压缩过程随着活塞上行缸内体积减小形成第二个波峰^[7-8]。

缸内滚流比仿真结果如图4所示。由图4可知:由于方案二进气道提高了进气充量能力,缸内气流不易形成滚流,导致进气过程的第一个峰值滚流比较方案一降低了44.3%,压缩行程所形成的峰值滚流比降低了34.9%。

缸内瞬态滚流比同稳态计算结果趋势相同,气道稳态计算能够真实有效地反映缸内瞬态流场变化趋势。

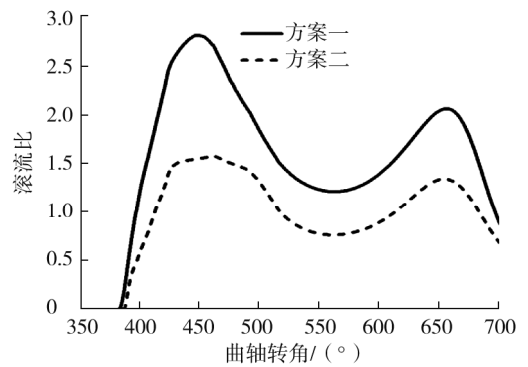


图4 缸内滚流比仿真对比

3.2.2 缸内瞬态湍动能

湍动能的第一个波峰大约出现在气门最大升程时刻,主要由进气气流形成。在压缩行程中,随着活塞对缸内大尺度滚流不断压缩,规则的滚流运动由于燃烧室内腔形状的干扰而逐渐破碎,导致滚流比逐步下降,湍动能逐渐上升并形成第二个小波峰,随后湍动能逐渐耗散^[9-10]。

方案一、二缸内湍动能仿真对比如图5所示。由图5可知,在点火时刻方案二缸内湍动能相比方案一降低33.1%。方案一、二在点火时刻的湍动能三维分布如图6所示。由图6可知:方案二的流场强度明显弱于方案一,二者的湍动能分布差异不大,对燃烧火焰扩散形态的影响较小。

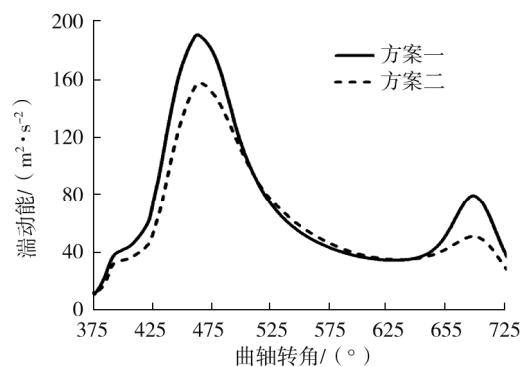


图5 缸内湍动能对比

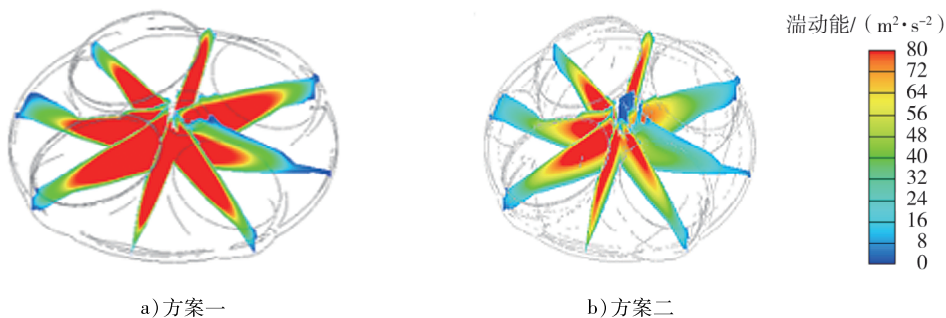


图6 2个进气道方案在点火时刻的湍动能三维分布

3.3 缸内燃烧计算结果

3.3.1 模型校核

通常采用缸内压力对 ECFM 燃烧模型进行校核。本文中对方案一进行缸压校核并将校好的燃烧模型应用于方案二的燃烧预测。方案一缸压校核结果如图 7 所示。由图 7 可知:方案一缸压的仿真结果与试验测试结果差异很小,缸压峰值相对误差在 2% 以内,以曲轴转角表示的峰值相位误差在 1° 以内,表明建立的燃烧模型精度较高,可以用于后期燃烧计算预测。

3.3.2 缸内燃烧计算

低滚流比进气道导致缸内流场减弱,使得燃烧速度减慢,相同情况下燃烧相位滞后。为更好地预测试验中低滚流进气道对缸内压升率的影响,假设高、低滚流 2 种状态的燃烧系统基础抗爆性差异不大,低滚流气道同样能达到高滚流的燃烧重心,即保证相同的 AI50 (指从火花塞点火到 50% 缸内燃料完全燃烧经过的曲轴转角),因此在燃烧计算时对低滚流进气道进行了点火角提前处理。

2 个进气道方案的缸内压力、放热率、压升率对比如图 8 所示。由图 8 可知:相比方案一,方案二的最大缸内平均压力降低 544 kPa;在燃烧中前期,方案二放热率小于方案一;曲轴转角为 $700^{\circ} \sim 750^{\circ}$ 时,方案一、二的最大压升率分别为 576、479 kPa/ $^{\circ}$,方案二较方案一低 16.84%。

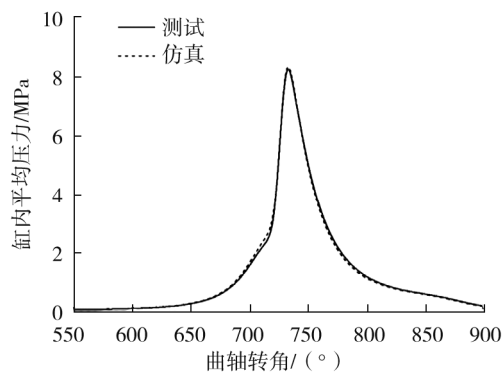


图 7 方案一缸内压力校核结果

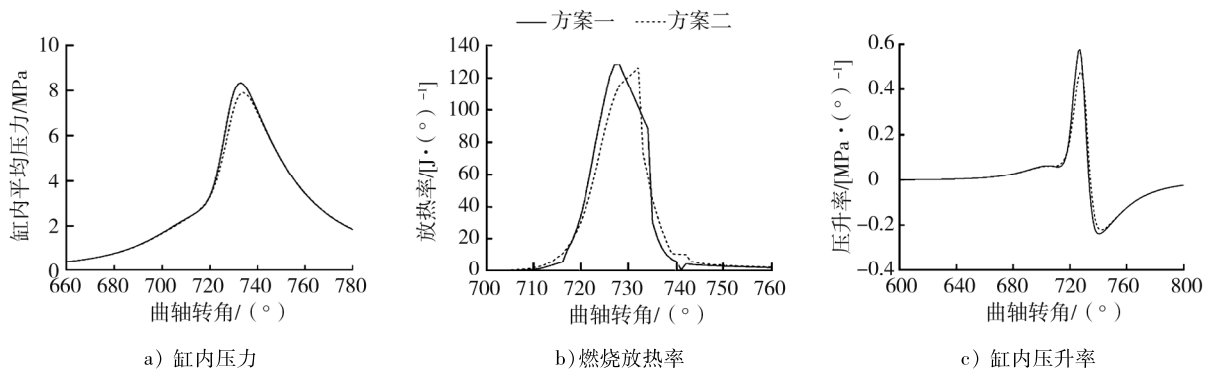


图 8 2 个进气道方案的缸内压力、放热率、压升率对比

4 台架试验结果对比

4.1 试验台架

试验台架示意图如图 9 所示。试验系统主要采用 AVL 燃烧分析仪对双喷发动机各缸缸压进行采集分析,样本发动机燃料选用国 92# 汽油,试验工况为全工况。试验用双喷发动机型式为 V 型、6 缸、四冲程,排量为 3.0 L,点火顺序为 1—2—3—4—5—6,压缩比为 11.1。

4.2 试验结果对比

4.2.1 燃烧特性

与方案一相比,方案二的进气效率提高了 1.98%,燃烧重心后移 2.02° ,燃烧持续期延长 0.15°,缸内

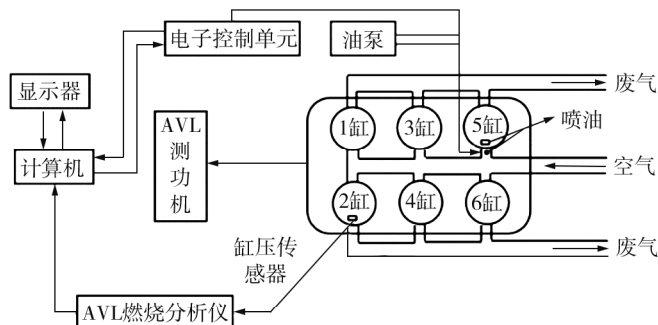


图 9 试验台架试验图

压升率降低 19.87%,油耗增加 0.67%。

4.2.2 发动机噪声

在燃烧爆压的激励下,活塞敲击缸壁和曲轴弯扭振动冲击而产生噪声^[11-15]。对发动机样机进行整机辐射噪声试验,噪声测试点布置分别位于距离整机的上部、进气面、排气面及正时面 1 m 位置处。测试工况为:转速为 1 000~4 000 r/min,间隔 100 r/min,每个转速下分别进行 25%、50%、100% 负荷噪声采集,采集周期 10 s,每组采集 3 次。不同进气道方案的噪声频谱如图 10 所示。由图 10 可知:相比方案一,方案二在频率为 700~1 300 Hz 时噪声降低了 6.5 dB,低滚流气道方案噪声改善效果较明显。

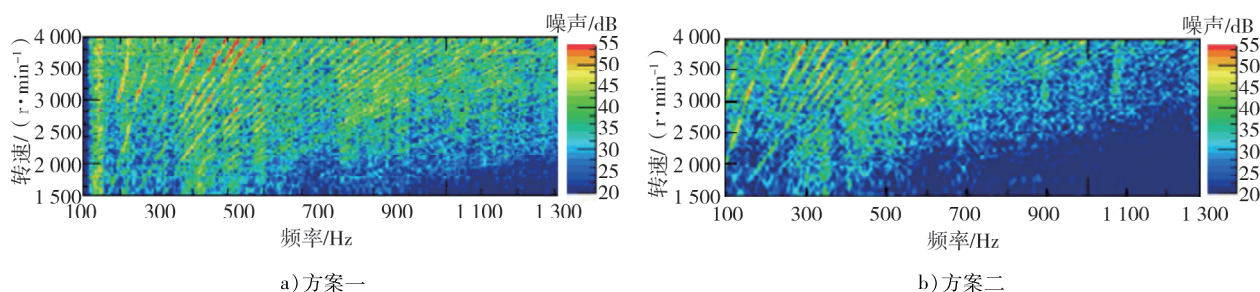


图 10 不同进气道方案的噪声频谱

5 结论

设计高滚流比和低滚流比 2 种进气道方案,采用三维 CFD 仿真软件对不同滚流气道进行稳态及瞬态分析,并对缸内燃烧和噪声进行台架试验。

1) 相比高滚流比进气道方案,稳态分析时低滚流比方案的流量因数在升程为 6~10 mm 时平均提高 21.5%,滚流比平均降低 44.7%。

2) 通过校核的仿真模型很好地预测了气道结构对缸内燃烧压升率的影响,仿真与试验差异较小。

3) 在转速为 2 800 r/min、平均有效压力为 1.3 MPa 工况下,相比于高滚流进气道方案,瞬态分析时低滚流比方案缸内压缩阶段峰值滚流比降低 34.9%,燃烧持续期变化不大,压升率降低 16.84%。

4) 缸内稳态与瞬态滚流计算结果趋势相同,气道稳态仿真能够较好地反映缸内瞬态流场变化趋势,采用稳态仿真对气道结构进行优化、筛选,可节约时间。

5) 台架试验结果表明:方案二缸内燃烧压升率降低 19.87%,以曲轴转角表示的燃烧重心推后 2.02°,燃油消耗率升高 0.67%;发动机在频率为 700~1 300 Hz 时的噪声平均降低 6.5 dB,发动机噪声显著降低。

参考文献:

- [1] HEYWOOD J B, WELLING O Z. Trends in performance characteristics of modern automobile SI and diesel engines[C]//Proceedings of SAE International Powertrains, Fuels and Lubricants Meeting. Florence, Italy: SAE International, 2009.
- [2] BERNTSSON A W, JOSEFSSON G, EKDAHL R, et al. The effect of tumble flow on efficiency for a direct injected turbocharged downsized gasoline engine [C]//Proceedings of 10th International Conference on Engines & Vehicles. Florence, Italy: SAE International, 2011.
- [3] CHEN H, XU M, HUNG D L S, et al. Cycle-o-cycle variation analysis of early flame propagation in engine cylinder using proper orthogonal decomposition[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 58:48-55.
- [4] 许振忠. 滚流对火花塞点火式发动机性能的影响[J]. 汽车工程, 2001, 23(4):247-251.
- [5] 王志国, 曹权佐, 曹亮, 等. 高滚流比进气道在增压汽油机上的应用[J]. 汽车实用技术, 2016(10): 102-104.
- [6] 吴强, 许敏, 杨杰, 等. 进气滚流强度对直喷发动机燃烧特性的影响[J]. 车用发动机, 2017(3): 1-6.
- [7] 韩文艳, 许思传, 周岳康, 等. 滚流比对缸内直喷汽油机混合气形成及燃烧的影响[J]. 内燃机学报, 2012, 30(6): 499-505.

- [8] 宋志平,李显,张连方,等.滚流比对缸内直喷汽油机燃烧速度的影响研究[J].现代车用动力,2020(1):27-33.
- [9] 贾志超,刘义克,王孟珂.滚流比对增压汽油机循环变动影响的试验研究[J].小型内燃机与车辆技术,2020,49(3):1-7.
- [10] 周龙保.内燃机学[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [11] 姜智超,姜顺超,甄龙信.EGR控制怠速下柴油机燃烧噪声的试验研究[J].车辆与动力技术,2022(2):56-59.
- [12] 桑梧海,刘永芳,苏益龙,等.乘用车涡轮增压器噪声改善装置设计[J].内燃机与动力装置,2020,37(3):32-35.
- [13] BUSCH S, ZHA K, MILES P C. Investigations of closely coupled pilot and main injections as a means to reduce combustion noise in a small-bore direct injection diesel engine[J]. International Journal of Engine Research, 2015, 16(1):13-22.
- [14] SHIBATA G, ISHI K, USHJIMA H, et al. Optimization of heat release shape and the connecting rod crank radius ratio for low engine noise and high thermal efficiency of premixed diesel engine combustion[C]//Proceedings of SAE 2015 World Congress & Exhibition. Detroit, USA: SAE International, 2015.
- [15] 施雨骁.内燃机燃烧噪声的传递特性试验研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.

Effect of intake port tumble ratio on engine pressure rise rate and noise

ZHAO Lei^{1,2}, JI Lei^{1,2*}, ZHAO Zheng^{1,2}, GUAN Hao^{1,2}, YANG Minmin^{1,2}, LI Donghui^{1,2}

1. Great Wall Motor Co., Ltd., Baoding 071000, China;

2. Hebei Automotive Engine Technology Innovation Center, Baoding 071000, China

Abstract: Taking a certain dual injection 6-cylinder engine as the research object, two types of intake ducts with higher and lower tumble ratio are designed. The cylinder flow field is simulated using the three-dimensional computational fluid dynamics software AVL Fire, the combustion characteristics of the engine is analyzed, and bench combustion tests and noise tests are conducted. The simulation results show that under the condition of a speed of 2 800 r/min and an average effective pressure of 1.3 MPa, compared with the higher tumble ratio scheme, the first and second peak tumble ratios in the cylinder of the lower tumble flow scheme are reduced by 44.3% and 34.9%, the maximum average cylinder pressure is reduced by 544 kPa, and the maximum pressure rise rate is reduced by 16.84%. The bench test results show that the combustion duration of the two intake ducts is not significantly different. Compared with the higher tumble ratio scheme, the tumble ratio scheme has a combustion center of gravity delayed by 2.02° in terms of crankshaft angle, an increase in fuel consumption rate of 0.67%, a decrease in pressure rise rate of 19.87%, and a reduction of about 6.0 dB in engine noise at frequencies of 700–1 300 Hz. The noise improvement effect is significant.

Keywords: intake port; tumble ratio; simulation analysis; pressure rise rate; noise

(责任编辑:臧发业)