

# 缸盖涡流比对柴油机性能的影响

杨海龙<sup>1,2</sup>, 辛欣<sup>2</sup>, 耿磊<sup>1,2</sup>, 赵旭<sup>1,2</sup>

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061;  
2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为提高柴油机制造精度和生产一致性,基于缸盖涡流比设计标准及生产一致性控制方法,进行生产调查,研究缸盖涡流比生产一致性真实分布;通过仿真研究分析缸盖涡流比对柴油机性能的影响,并进行台架试验验证,确定涡流比的最优设计。结果表明:涡流比为1.1~1.3对NO<sub>x</sub>比排放、483烟度比排放和燃油消耗率的影响均较小,可以保证发动机可靠性、性能和排放均满足要求。

**关键词:** 涡流比;一致性;NO<sub>x</sub>排放;483烟度;燃油消耗率

**中图分类号:** TK426

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-6397(2023)02-0085-05

**引用格式:** 杨海龙,辛欣,耿磊,等.缸盖涡流比对柴油机性能的影响[J].内燃机与动力装置,2023,40(2):85-89.

YANG Hailong, XIN Xin, GENG Lei, et al. Effect of cylinder head swirl ratio on diesel engine performance [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40(2): 85-89.

## 0 引言

柴油机生产过程中,制造公差使批量生产的柴油机的性能和排放具有一定的差异性,也会给整车配套带来巨大问题<sup>[1-3]</sup>,因此明确柴油机的制造精度对性能一致性的影响,对进一步提升柴油机的品质十分重要<sup>[4-5]</sup>。当前国内内燃机厂家对影响柴油机性能和排放的各关键参数基本为定性判断,各关键零部件及参数的设计边界及设计公差基本来自加工、工艺、生产控制能力,导致公差设计不合理,其中包括缸盖涡流比<sup>[6-7]</sup>。缸盖涡流比主要通过改变柴油机的充气效率来影响柴油机的燃烧,从而对排放产生影响<sup>[8]</sup>。即使发动机性能和排放均满足开发要求,由于设计公差和生产一致性的差异,也会导致批量生产的缸盖涡流比在一定范围内波动。

本文中以某柴油机为研究对象,通过仿真和试验验证方法,研究涡流比对排放和燃油消耗率的影响,确定涡流比的最优设计。

## 1 影响因素分析

### 1.1 气道的主要结构及进气机理

柴油机的进气道结构主要有切向气道、螺旋气道、带导气屏的进气道3种<sup>[9]</sup>,3种进气道结构如图1<sup>[10]</sup>所示。目前柴油机广泛采用螺旋气道结构,其进气示意图如图2所示。由图2可知:进气冲程开始时,空气从螺旋气道的进口流入并流经气道的最小截面处,经过该截面后,气体被分为2部分:一部分气体沿着气道蜗壳产生旋转的螺旋气流,绕气门中心旋转,在气道螺旋坡角 $\beta_2$ 的导向下,经涡流室、气门座

收稿日期:2021-11-08

基金项目:山东省重点研发计划项目(2020GXGC011004)

第一作者简介:杨海龙(1988—),男,山西怀仁人,高级工程师,主要研究方向为柴油机性能一致性控制技术,E-mail: yanghail@weichai.com。

和气门环带间的流通面,流入气缸;另一部分气体在气门导管凸台及气道底坡角 $\beta_1$ 的联合作用下,经气门导管凸台下部后直接穿过涡流室,沿着与气缸壁面近似相切的方向流向气缸。以上2部分气流流入气缸后,逐步形成绕气缸轴线旋转,并趋于稳定的旋转气流<sup>[11-13]</sup>。

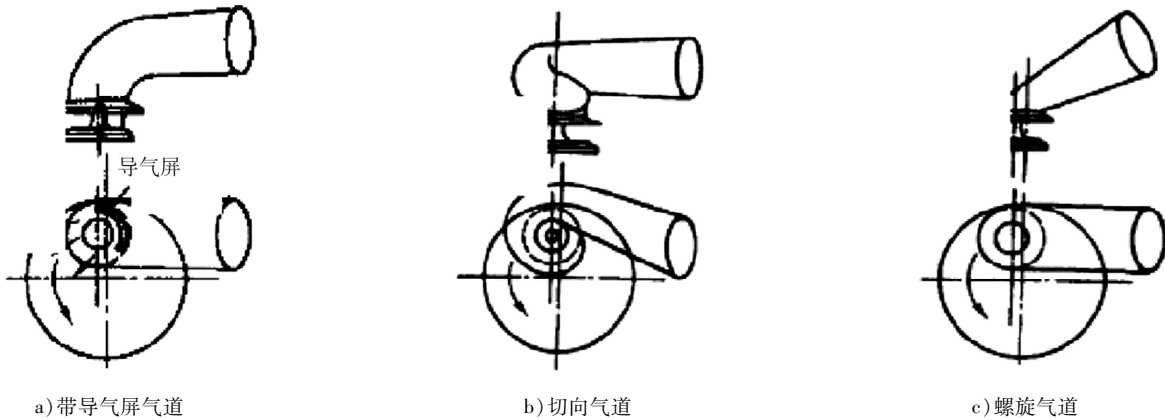


图1 3种气道结构示意图

螺旋进气道部分结构参数示意如图3所示,其中, $\beta_3$ 为主螺旋坡角, $\beta_4$ 为副螺旋坡角, $H$ 为涡流室高度, $e$ 为偏心距, $\alpha$ 为气门锥角<sup>[14]</sup>。

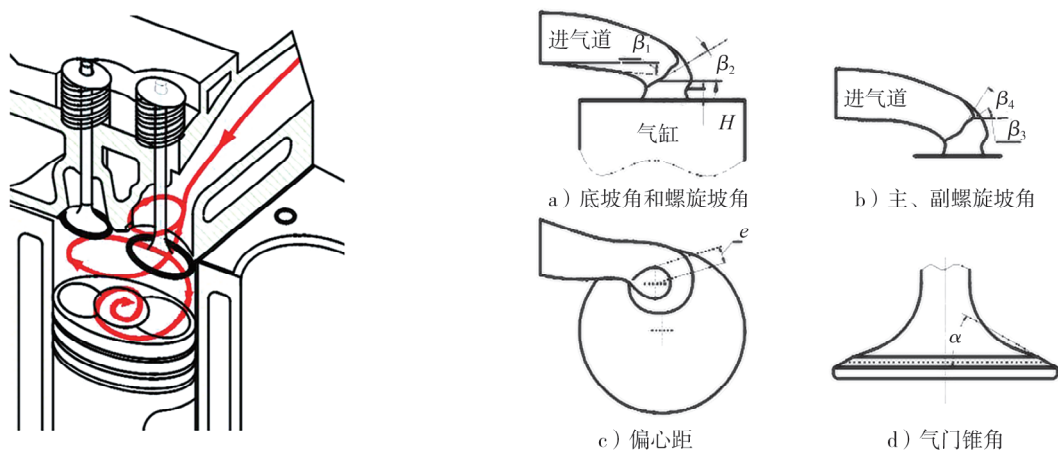


图2 典型螺旋气道进气示意图

图3 进气道主要结构参数示意图

## 1.2 缸盖气道制造偏差影响因素

缸盖生产过程中,加工工艺及精度直接影响缸盖气道的结构和形状,从而影响气道的涡流比和流量系数,如铸造时气道砂芯的漂移以及机加工中的误差等原因,往往使气道的位置发生偏心、倾斜和胀大现象。偏离设计要求的气道涡流比和流量系数,导致发动机燃烧恶化,对柴油机的动力性、经济性以及排放造成不利影响<sup>[15-16]</sup>。

## 2 性能仿真分析

### 2.1 缸盖涡流比生产统计

某柴油机缸盖涡流比设计要求为1.2~1.6,基于统计学原理,从产品中随机抽取125个缸盖样本进行涡流比测试,分析生产过程控制能力。由统计结果可知,125个缸盖的涡流比为0.72~1.65,过程控制能力仅为0.66,低于控制能力为1.33的设计要求。

基于此生产现状,研究涡流比波动对柴油机性能的影响,确认当前缸盖涡流比生产一致性偏差是否

满足性能要求,明确涡流比的最优设计范围。

## 2.2 性能仿真

基于某直列6缸增压中冷重型柴油机,选取转速为1900 r/min、转矩为1480 N·m作为仿真计算工况,计算不同涡流比下的发动机的NO<sub>x</sub>排放、AVL483测量的烟度(以下简称483烟度)和燃油消耗率,其中涡流比为0.8~1.8,步长为0.1。柴油机主要技术参数如表1所示。

表1 柴油机的主要技术参数

缸径/mm	行程/mm	排量/L	额定功率/kW	额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	最大扭矩/(N·m)
116	150	9.5	296	1900	1800

使用Converge三维软件进行建模,保持其它参数不变,只改变模型中的涡流比,计算不同涡流比下的NO<sub>x</sub>、483烟度和燃油消耗率,结果如图4、5所示。

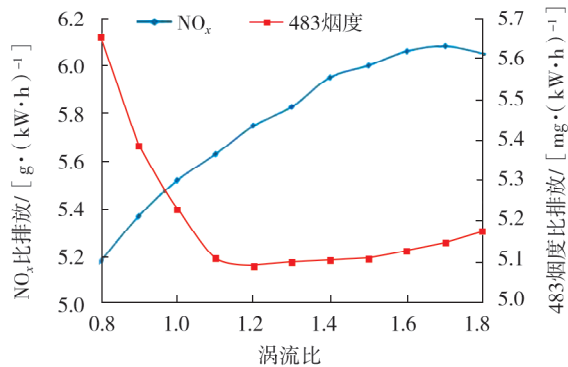


图4 涡流比波动对排放的影响

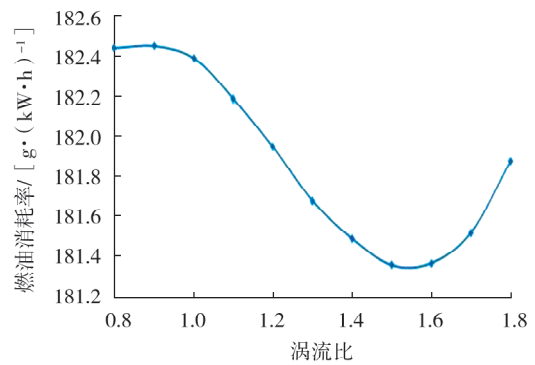


图5 涡流比波动对燃油消耗率的影响

由图4可知:涡流比为0.8~1.7时,随着涡流比增大,NO<sub>x</sub>比排放增大,NO<sub>x</sub>比排放与涡流比几乎呈线性关系;涡流比大于1.7时,NO<sub>x</sub>比排放有所降低;涡流比为0.8~1.1时,483烟度比排放下降明显,对涡流比的变化较敏感;涡流比大于1.2时,483烟度比排放缓慢增大。

由图5可知:涡流比增大,燃油消耗率先减小后增大;涡流比约为1.5时,燃油消耗率最小,为181.4 g/(kW·h)。主要原因为涡流比增大,燃油与空气充分混合,缸内燃烧愈发充分,导致NO<sub>x</sub>的生成量增大,483烟度的生成量减少,相同工况下的燃油消耗率降低;但随着涡流比继续增大,进气阻力增大,流量系数降低,483烟度和燃油消耗率呈上升趋势。

综合考虑涡流比对NO<sub>x</sub>、483烟度和燃油消耗率的影响,建议控制量产缸盖的涡流比为1.1~1.4。

## 3 性能试验研究

基于该柴油机,对装配不同涡流比缸盖的发动机进行台架试验,研究涡流比波动对NO<sub>x</sub>、483烟度和燃油消耗率的影响规律,进而明确此柴油机用缸盖涡流比的最优设计公差。

### 3.1 试验对象与设备

1) 柴油机。按照柴油机图纸及有关技术文件规定制造,装配合格。

2) 缸盖。通过缸盖气道修磨方式,分别制作涡流比为0.65、0.83、1.00、1.15、1.25、1.33、1.50的缸盖,并检测合格。

3) 试验用测试设备、仪器、仪表分别为:7500DEGR气体排放仪、483烟度计、FCD1301柴油机测控系统、AVL735油耗仪、JD445测功机,均校验合格。

### 3.2 试验项目与结果

首先,按照磨合规范进行柴油机磨合试验,确认柴油机各项参数符合技术要求;在柴油机试验台架

上,依次更换不同涡流比的缸盖进行万有特性试验,并确认数据有效性,对试验数据进行分析。设置柴油机缸盖的基准涡流比为1.0,偏离比为不同涡流比与基准涡流比下的 $\text{NO}_x$ 、483烟度比排放的差与基准涡流比下的 $\text{NO}_x$ 、483烟度比排放的比。

涡流比波动对标定点柴油机性能影响如图6、7所示。

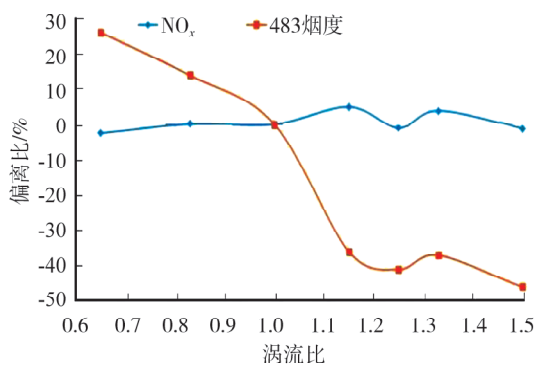


图6 涡流比波动对排放的影响

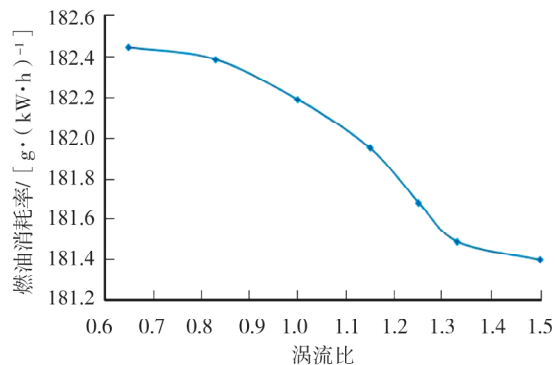


图7 涡流比波动对燃油消耗率的影响

由图6、7可知:涡流比为0.65~1.50时,对 $\text{NO}_x$ 比排放的影响较小,偏离比在 $\pm 5\%$ 以内,满足设计要求(不超过 $\pm 10\%$ );但涡流比为0.65~1.50时对483烟度比排放的影响较大,最大正偏离为+26%,最小负偏离为-46%,超出性能一致性要求(不超过 $\pm 25\%$ );涡流比为0.65~1.50时,燃油消耗率偏差不超过 $\pm 2 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,满足设计要求;涡流比为1.0~1.3时,对 $\text{NO}_x$ 、483烟度和燃油消耗率的敏感性影响较小,建议涡流比为1.0~1.3。

## 4 结论

对某柴油机缸盖涡流比进行了生产调查,明确了生产一致性现状;仿真分析涡流比波动对柴油机性能的影响规律,以仿真结果为基准,进行台架试验,研究了不同涡流比对 $\text{NO}_x$ 排放、483烟度和燃油消耗率的影响。

1) 仿真计算分析表明,综合考虑涡流比波动对 $\text{NO}_x$ 排放、483烟度和燃油消耗率的影响,建议涡流比控制为1.1~1.4。

2) 经台架试验验证,综合考虑涡流比波动对 $\text{NO}_x$ 排放、483烟度和燃油消耗率的影响,建议涡流比控制为1.0~1.3。

3) 由于燃烧仿真计算精度较低,建议以试验结果为主,此发动机涡流比控制为1.1~1.3。

4) 柴油机开发过程中,设计涡流比时不仅应考虑设计成本、加工工艺,还应考虑性能、排放一致性,确保发动机可靠性、性能和排放均满足要求。

### 参考文献:

- [1] 张刚.“中国制造2025”的质量发展展望[J].上海质量,2015(12):4-7.
- [2] 武志军.国务院印发《中国制造2025》要求加强质量品牌建设[J].中国品牌,2015(6):10-11.
- [3] 彭和平,刘晓军,蒋向前.基于多重相关特征质量损失函数的并行公差设计[J].中国机械工程,2010,21(6):690-693.
- [4] PENG H P. Concurrent tolerancing for design and manufacturing based on the present worth of quality loss[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 59:929-937.
- [5] 彭和平.考虑几何公差的设计与工序公差并行分配研究[J].组合机床与自动化加工技术,2021(10):133-138.
- [6] 马宏伟,贺象,张晶辉,等.柴油机缸内流动显示试验研究[J].汽车工程,2014,36(3):277-281.

- [7] WANG G X, YU W B, LI X B, et al. Experimental and numerical study on the influence of intake swirl on fuel spray and in cylinder combustion characteristics on large bore diesel engine[J]. Fuel, 2019, 237:209-221.
- [8] 史绍熙. 柴油机设计手册(中册)[M]. 北京:中国农业出版社, 1984:1015-1064.
- [9] 黄荣华, 肖华, 纪志高, 等. 4气门柴油机进气道结构参数对进气性能的影响[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008(7):52-56.
- [10] 卢志美. 493型柴油机的气道改进设计及其性能实验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2016.
- [11] 郑远春, 常汉宝, 李智勇. 某型柴油机进气道通流特性试验研究[J]. 海军工程大学学报, 2004(1):91-95.
- [12] 夏兴兰, 陈大陆, 王胜利. 内燃机气道性能的评价方法[J]. 现代车用动力, 2007(2):7-12.
- [13] 韩同群, 吴胜军, 李伟. 四气门车用柴油机进气道设计及试验评价[J]. 内燃机工程, 2007(2):39-42.
- [14] 吴浩. 柴油机螺旋进气道结构参数对气道性能的影响及其优化设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- [15] 丁光辉, 张敏. 柴油机缸盖气道性能的评价方法探讨[J]. 内燃机与动力装置, 2017, 34(2):26-30.
- [16] 刘书亮, 沈捷, 刘德新, 李玉峰, 等. 螺旋进气道形状和位置偏差对涡流比及流量系数的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2003(5):397-403.

## Effect of cylinder head swirl ratio on diesel engine performance

YANG Hailong<sup>1,2</sup>, XIN Xin<sup>2</sup>, GENG Lei<sup>1,2</sup>, ZHAO Xu<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Reliability of Internal Combustion Engine, Weifang 261061, China;

2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to improve the manufacturing accuracy and production consistency of diesel engine, based on the design standard of cylinder head swirl ratio and production consistency control method, the production census is carried out to determine the true distribution of cylinder head swirl ratio production consistency. Through simulation calculation, the influence of different cylinder head swirl ratio on diesel engine performance is determined, and bench test is carried out to determine the optimal design of swirl ratio. The results show that when the swirl ratio is between 1.1 and 1.3, the impact on NO<sub>x</sub> emissions, 483 smoke emissions, and fuel consumption rate is relatively small, which can ensure that the engine reliability, performance, and emissions meet the requirements.

**Keywords:** swirl ratio; conformity; NO<sub>x</sub> emission; 483 smoke; fuel consumption rate

(责任编辑:刘丽君)