

压缩余隙对发动机性能的影响

杨海龙^{1,2}, 辛欣^{1,2}, 杨永春^{1,2}, 刘斌^{1,2}, 刘阳^{1,2}, 刘波^{1,2}

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 发动机研究院, 山东 潍坊 261061

摘要:为确定某柴油发动机压缩余隙设计范围,进行尺寸链公差分析、燃烧仿真分析、台架试验验证。通过尺寸链公差得出压缩余隙设计范围为 1.08~1.32 mm;燃烧仿真分析结果表明,压缩余隙为 0.8~1.4 mm, NO_x 排放、483 烟度及燃油消耗率变化满足性能一致性要求;台架试验验证结果表明,压缩余隙为 0.96~1.26 mm, NO_x 排放、483 烟度及燃油消耗率的变化满足性能一致性要求。综合分析,发动机压缩余隙设计范围为 0.96~1.26 mm。

关键词:压缩余隙;性能;一致性;公差

中图分类号:TK427

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0072-04

引用格式:杨海龙, 辛欣, 杨永春, 等. 压缩余隙对发动机性能的影响[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(4):72-75.

YANG Hailong, XIN Xin, YANG Yongchun, et al. Influence of compression clearance on engine performance [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(4):72-75.

0 引言

发动机的生产制造受生产效率、生产成本等因素的影响,制造公差导致批量生产的发动机在性能上存在较为明显的差异。若发动机生产一致性差,会造成燃油经济性低、可靠性能差、排放性能下降等问题^[1-2]。

在性能和排放均满足开发要求的前提下,发动机设计公差导致压缩余隙在一定范围内波动^[3]。压缩余隙越大,压缩比越小,发动机燃烧效率越低^[4]。本文以某款柴油发动机为研究对象,通过理论分析、仿真设计、试验验证等方法,研究压缩余隙波动对性能一致性的影响,确定压缩余隙的最优设计公差。

1 压缩比对换气和燃烧的影响

内燃机压缩比

$$\varepsilon = \frac{V_s + V_y}{V_c + V_y}, \quad (1)$$

式中: V_c 为最小燃烧室容积, L; V_y 为压缩余隙变化导致的燃烧室容积变化, L; V_s 为气缸总容积, L。

在燃烧过程中,压缩比影响压缩终了时气缸内工质的压力和温度,关系为:

$$t_c = t_a \varepsilon^{n-1} \quad (2)$$

$$p_c = p_a \varepsilon^n \quad (3)$$

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,工程师,工学学士,主要研究方向为柴油机性能一致性控制技术, E-mail: yanghail@weichai.com.

式中: t_a 、 t_c 分别为进气终了和压缩终了时气缸内工质的温度,℃; p_a 、 p_c 分别为进气终了和压缩终了时气缸内工质的压力,kPa; n 为气缸内工质的多变指数。

1.1 压缩比对换气过程的影响

四冲程发动机的换气过程是指从排气门的开启时刻到进气门的关闭时刻。换气过程应排净本循环燃烧产生的废气,吸入下一循环的新鲜空气。发动机压缩余隙增加,压缩比减小,残余废气的相对量增加,充气效率降低,过量空气系数下降,新鲜进气量减少,换气质量下降,柴油机燃烧不完全,颗粒物增大,甚至冒黑烟^[5-8]。

1.2 压缩比对燃烧过程的影响

根据内燃机理论循环,压燃发动机的实际循环简化为混合加热循环或等压加热循环^[9]。基于等压加热循环理论可知,压缩余隙变大, V_y 正向变大,导致燃烧室容积变大,由式(1)~(3)可知, ε 减小,会降低发动机热效率,排放恶化,导致压缩终了气缸内工质的压力和温度降低,着火延迟期延长,燃烧品质差,工作粗暴^[10-12],影响柴油机运转的平稳性和启动性。压缩余隙减小,导致燃烧室容积减小, ε 增大,压缩终了缸内压力及温度上升,提高热效率和平均有效压力。

2 压缩余隙偏差对排放影响

2.1 影响压缩余隙的关键参数

基于小位移旋量理论及 Monte Carlo 算法仿真建立几何公差-压缩比分析模型^[13-14],对压缩余隙进行尺寸链公差计算^[15],得出该机型压缩余隙公差为 1.2 ± 0.12 mm,压缩余隙为 1.08~1.32 mm,对应压缩比为 18 ± 0.48 。试验样机实测压缩余隙为 1.20 mm,对应压缩比 18。

对该机型的压缩余隙及影响压缩余隙的关键零部件尺寸进行生产普查,确定样本标准差 σ ,为满足数据统计最小样本数要求,样本数定为 125 台,压缩余隙、连杆大小头孔中心距、机体顶面高度、缸套凸出量、活塞压缩高的样本标准差(记为 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 、 σ_4 、 σ_5),统计结果见表 1。

由表 1 可知,各关键零部件的 σ 较低,低于制造业基本要求标准 3.39。

表 1 压缩余隙及关键零部件样本标准差统计结果 mm

σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
0.42	2.19	2.04	2.55	2.91

2.2 仿真与试验

某款 6 缸、直列、增压中冷重型柴油发动机主要参数如表 2 所示。采用 CONVERGE 软件建立燃烧模型^[16-17],通过试验数据对标校正,模型中缸盖涡流比设置为 1.1,压缩余隙为 1.2 mm,喷油器喷雾锥角为 149° ,喷孔直径为 0.169 mm。在保持其它参数不变的前提下,调整压缩余隙为 0.2~2.0 mm,步长为 0.3 mm,压缩余隙与压缩比对应关系如表 3 所示。

表 2 某重型柴油发动机主要参数

缸径/mm	行程/mm	排量/L	额定功率/kW	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	最大扭矩/($N \cdot m$)
116	150	9.5	296	1900	1800

表 3 压缩余隙与压缩比对应关系

压缩余隙/mm	0.2	0.5	0.8	1.1	1.4	1.7	2.0
压缩比	11.8	14.2	16.4	17.6	18.8	20.0	21.2

选取额定工况、最低油耗工况进行分析,额定工况转速为 1900 r/min,转矩为 $1480 N \cdot m$;最低油耗工况转速为 1200 r/min,转矩为 $1200 N \cdot m$ 。在 2 种工况压缩余隙分别为 0.2、0.5、0.8、1.2、1.4、1.7、

2.0 mm 下对发动机的 NO_x 排放、483 烟度和燃油消耗率进行仿真计算,并计算偏差率

$$\lambda = \frac{Q_i - Q'}{Q'} \cdot 100\%$$

式中: Q_i 为不同压缩余隙下各参数的测量结果, Q' 为压缩余隙 1.2 mm 各参数的测量结果,为中值。

仿真试验下 2 种工况不同压缩余隙相关参数偏差率如图 1 所示。

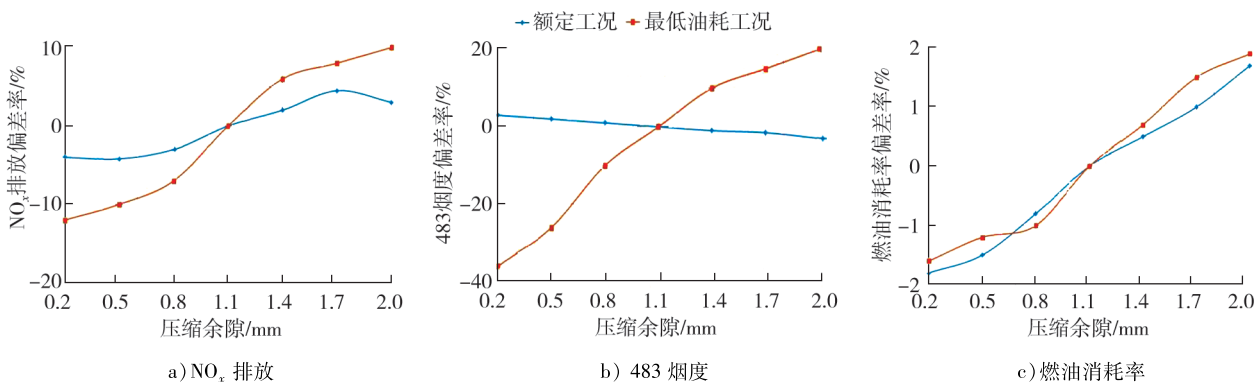


图1 仿真试验下 2 种工况不同压缩余隙相关参数的偏差率

由图 1a)可知:压缩余隙为 0.8~1.4 mm, NO_x 排放偏差率在 2 种工况下均随着压缩余隙增加而升高,最大偏差率在±10%以内,满足 NO_x 排放偏差率小于±10%的一致性要求;

由图 1b)可知:压缩余隙为 0.8~1.4 mm, 483 烟度偏差率在额定工况随压缩余隙增加而降低,但变化率较小;在最低油耗工况随压缩余隙增加而升高,偏差率在±10%以内,满足 483 烟度值偏差率小于±25%的一致性要求。

由图 1c)可知:压缩余隙为 0.8~1.4 mm,燃油消耗率偏差率在 2 种工况下均在±1.5%以内,满足燃油消耗率偏差率小于±2%的一致性要求。

经仿真试验验证,建议压缩余隙控制在 0.8~1.4 mm。

2.3 台架试验

采用同款柴油机,进行发动机磨合试验后确认发动机额定工况下的各项边界条件参数均符合技术要求,具体对比结果如表 4 所示。

表 4 边界条件参数技术要求和实测结果对比

项目	出水温度/℃	机油温度/℃	中冷后气温/℃	空调出口温度/℃	空调出口相对湿度/%
技术要求	85~92	80~116	45~50	20~30	40~50
实测结果	88	90.5	46.8	25.3	45.6

台架试验所用仪器、设备主要包括:1) HORIBA7500DEGR 气体排放仪,0~10%量程的测量精度为±0.2%,10%~100%量程的测量精度为±2%;2) AVL483 颗粒排放仪,测量精度为 0.01%;3) FCD1301 发动机测控系统;4) AVL73 油耗仪,测量精度为≤0.12%;5) JD445 测功机,测量精度为±2%。

试验过程中,更换不同厚度的缸盖垫片模拟不同的压缩余隙,调整压缩余隙为 0.7、0.9、1.2、1.3、1.6 mm,对应的压缩比分别为 16.0、16.8、18.0、18.4 和 19.6,测量额定工况及最低油耗工况在不同压缩余隙下的 NO_x 排放、483 烟度和燃油消耗率,计算相关参数偏差率,如图 2 所示。

由图 2a)可知:压缩余隙为 0.7~1.6 mm 时, NO_x 排放偏差率在 2 种工况不同压缩比下均在±5%以内,满足 NO_x 排放偏差率小于±10%的一致性要求。

由图 2b)可知:压缩余隙为 0.7~1.6 mm 时,483 烟度偏差率在 2 种工况不同压缩比下均大于中值,额定工况最大偏差率为+16%,最低油耗工况最大偏差率为+43%,超出 483 烟度偏差率小于±25%的一致

性要求,建议压缩余隙控制在 0.96~1.26 mm。

由图 2c)可知:压缩余隙为 0.7~1.6 mm 时,燃油消耗率偏差率在 2 个工况表现出的规律不一致,最低油耗工况燃油消耗率最大偏差率+1.7%;额定工况压缩余隙为 0.7~1.2 mm 时,燃油消耗率低于中值,2 种工况在不同压缩比下均满足燃油消耗率偏差率小于 $\pm 2\%$ 的一致性要求。

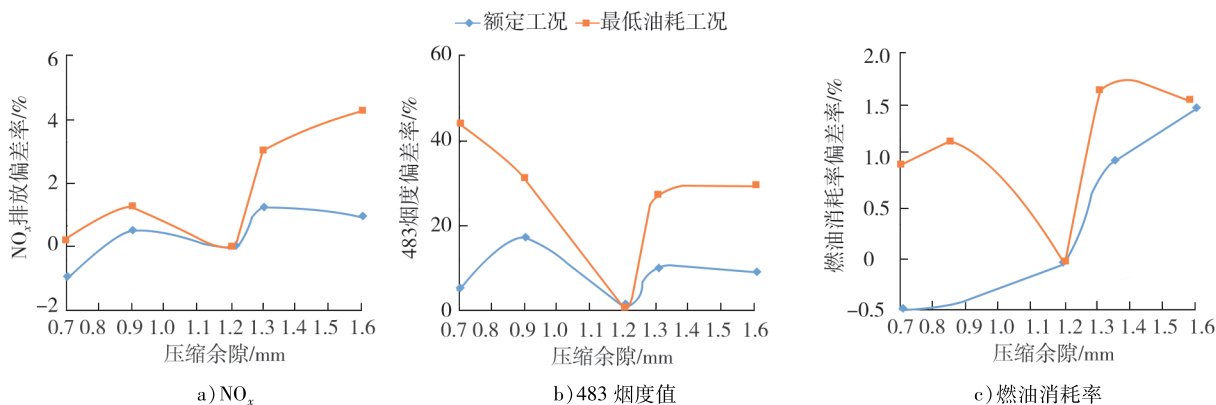


图2 台架试验下2种工况不同压缩余隙相关参数的偏差率

经台架试验验证,建议压缩余隙控制在 0.96~1.26 mm。

3 结论

1)通过额定工况和最低油耗工况下不同压缩余隙对 NO_x 排放、483 烟度和燃油消耗率的影响,结合仿真试验与台架试验可有效判断压缩余隙的设计范围。

2)由于当前燃烧仿真计算精度较低,应以试验结果为主,仿真结果作为参考,建议压缩余隙控制在 0.96~1.26 mm 范围内。

3)压缩余隙公差设计不仅要考虑设计成本、加工工艺,还要考虑发动机性能一致性及排放要求。

参考文献:

- [1] 钟明明. 发动机制造精度与性能关系研究[D]. 上海:上海交通大学,2012.
- [2] 王宝. 基于摩擦功一致性要求的发动机制造精度研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [3] 查栋烨. 数据驱动的发动机功率一致性分析与控制研究[D]. 上海:上海交通大学,2021.
- [4] 周保龙. 内燃机学[M]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [5] 袁贵星,王平. 蒙特卡洛模拟及其在公差设计中的应用[J]. 天津科技大学学报,2008,23(2):60-64.
- [6] 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.
- [7] 葛永飞. 影响发动机压缩比的因素[J]. 农机维修,2000(4):19-23.
- [8] 王敏. 发动机压缩比的影响因素及保证措施[J]. 车用发动机 2003(6):19.
- [9] 袁春. 内燃机压缩比的测量[J]. 内燃机,1987(3):32-33.
- [10] 阮见明,董健,潘志翔. 压缩比对内燃机性能的影响研究[J]. 内燃机,2011(3):13-15.
- [11] 梁登旺,高国强,曲彪. 压缩比变化对发动机性能的影响[J]. 工程机械与维修,2009(9):208.
- [12] 邹振宇,刘晶. 压缩比对柴油机性能影响[J]. 长春工业大学学报(自然科学版),2011,32(4):319-322.
- [13] 蔡胜凯,吕林. 非道路柴油机的排放特性研究[J]. 内燃机,2017,2(1):19-21.
- [14] 赵英勋,刘明. 汽车检测与诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社,2003:287-304.
- [15] 付颖斌,江平宇,刘道玉. 多工序尺寸及公差优化[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(1):142-146.
- [16] 李明,许敏,赵金星,等. 基于 GT-Power 仿真的 2.0L 汽油机动力性能分析与优化[J]. 汽车技术,2011(3):5-11.
- [17] 张永栋,朱文英,倪江忠. 基于 GT-POWER 的柴油机排放仿真分析[J]. 农业装备与车辆工程,2011(3):51-53.

(下转第 80 页)