

性能与排放

排气管特征参数优化设计研究

强永平, 郑昊, 徐春龙, 许俊峰, 文 明

(中国北方发动机研究所, 山西大同 037036)

摘 要: 对某型柴油机强化后的排气管的主要特征参数进行优化设计; 分析了排气管特征参数总管直径、喉口收缩率以及入流角对总体性能及换气损失的影响, 其中, 排气总管直径对性能影响较大, 喉口收缩率次之, 排气入流角的影响甚微; 并得出满足总体性能指标的排气管特征参数的合理范围。

关键词: 排气管; 特征参数; 优化

中图分类号: 423.4*5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4357(2011)01-0014-06

Optimization Design of Characteristic Parameters of Exhaust Pipes

Qiang Yongping, Zhen Hao, Xu Chunlong, Xu Junfeng, Wen Ming

(China North Engine Research Institute; Shanxi Datong 037036)

Abstract: The main characteristic parameters of an improved diesel engine's exhaust pipe are optimized. The influence of the main pipe diameter, contraction percentage and inflow angle on the overall performance and scavenge loss are analysed, which shows that the main pipe diameter has bigger influence on performance, contraction percentage's influence is less, and inflow angle's is the least. Moreover, the reasonable range of the characteristic parameters satisfying the overall performance requirements are given.

Keywords: exhaust pipe; characteristic parameter; optimization

0 前 言

发动机换气过程是由进、排气系统和配气系统的共同作用来完成的, 换气过程的各个环节的协调配合是保证发动机动力性能的前提和关键^[1]。因此内燃机对排气的要求为: 排气系统废气流通通畅, 能有效消减排气噪声, 有效利用废气能量等。而排气系统的选择及特征参数的选取对总体性能以及增压系统的匹配至关重要。

过去的经验设计法是一种试凑法, 设计周期长、消耗大, 难以得出最佳设计方案, 无法满足现代内燃机设计要求。近年来, 随着计算机技术的发展, 计算流体力学(CFD)软件在发动机工作过程的研究中得到广泛应用^[2], 大大缩短了发动机的研

究开发周期。本文采用的 AVL—BOOST 软件是适用于优化分析发动机主要结构参数的性能分析软件^[3], 它以一维流体动力学为基础, 用有限体积法进行数值计算, 能用于研究进排气系统结构因素(如分歧、汇合和弯曲等部分)对流动的影响; 使得对发动机主要结构参数优化设计成为可能。

本研究的目的是利用 AVL 公司的 BOOST 性能优化软件对某柴油机强化后排气管主要特征参数的合理范围进行研究。

1 排气系统参数

某柴油机排气系统采用 MPC 型式, 此系统特征参数主要为总管直径、喉口收缩率和入流角度。

排气总管直径: 50 ~ 120 mm; 间隔: 10 mm。

收稿日期: 2010-03-05; 修回日期: 2010-07-02

作者简介: 强永平(1971-), 男, 工程师, 主要从事内燃机工作过程研究, E-mail: qypqzb2003@163.com。

喉口收缩率：0.65~0.9；间隔：0.05。
入流角：20°~45°；间隔：5°。

2 初始边界条件和模型参数

2.1 主要参数及性能指标

本文研究的 150 柴油机主要结构参数及性能指标如表 1、表 2 所示。

表 1 150 柴油机的主要参数

型式	V 型 12 缸、四冲程、增压中冷
缸径/mm	150
行程/mm	160
发火次序	1-12-5-8-3-10-6-7-2-11-4-9
压缩比	13.5:1
每缸气门数	4
燃料	柴油

注：气缸编号左排：1~6；右排：7~12。

表 2 150 柴油机主要性能指标

p_{me}/MPa	≥ 2.2
p_{max}/MPa	< 17
$b_e/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	< 225
$T_r/^{\circ}\text{C}$	< 700

2.2 计算模型

根据 150 柴油机的实际结构参数建立的计算模型如图 1 所示。

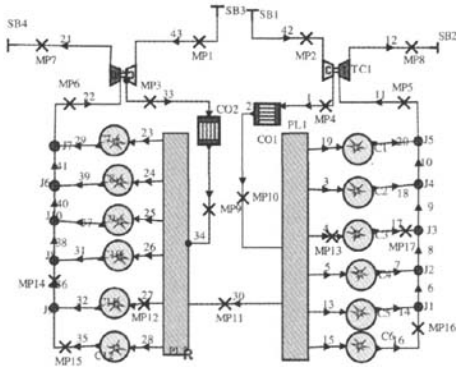


图 1 柴油机计算模型

计算模型有两个涡轮增压器 TC1 和 TC2，两个中冷器 CO1 和 CO2（每排缸各一组 TC 和 CO）。150 柴油机的排气管为 MPC；标定工况时中冷器压力损失：4 kPa（最大限制压损）；排气系统背压：90 kPa（大同地区气压）。

2.3 模型标定

以原机试验数据（功率、油耗、排温、空气流量）为计算模型验证指标，按照试验条件设置初始

条件和边界条件，对计算模型和模型参数进行调整使之适合实际状态。经过反复调整，使功率和试验吻合，对其它参数进行比较，从对比结果表 3 可以看出：计算参数的误差都小于 3%，认为计算模型及模型参数基本符合。

表 3 计算与试验对比

	试验值	计算值	误差
$b_e/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	210	206.8	-1.52%
$T_{r(\text{左})}/^{\circ}\text{C}$	647	648	-0.15%
$T_{r(\text{右})}/^{\circ}\text{C}$	623	641	2.89%
p_{max}/MPa	14.4	14.8	2.78%
$A_e/(\text{kg}/\text{h})$	5 785	5 874	1.54%

图 2 为缸内压力曲线的试验值与仿真值的对比，从图中可以看出：二者基本吻合，且最高燃烧压力和最高燃烧压力出现的曲轴转角一致。说明计算模型和模型参数的选取基本能代表实际状态，可进一步对排气系统参数进行优化。

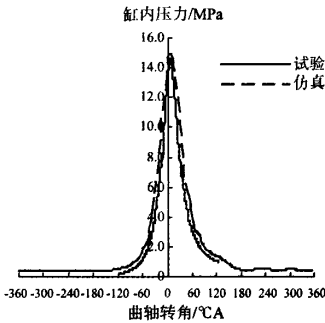


图 2 仿真与试验的缸内压力曲线对比

3 计算结果分析

3.1 不同排气总管直径的影响

表 4 为不同排气总管直径对总体性能的影响，从表中综合对比可得：如果考虑满足平均有效压力大于 2.2 MPa、最高燃烧压力小于 17 MPa、油耗小于 225g/(kW·h)，排温小于 700℃，排气总管直径大于 80 mm 即可，但同时考虑平均换气损失压力尽量小，容积效率尽可能大，排气总管直径为 100~110 mm 时综合性能较好。

从图 3~图 6 可以明显看出：随着排气总管直径的增加，平均有效压力、最高燃烧压力显著增加，油耗、排温显著降低；当排气总管直径达到 80 mm 以上时，平均有效压力、最高燃烧压力、油耗以及排温基本保持不变。说明排气总管直径至少大于 80 mm 才能满足发动机总体性能对换气过程的基本要求。

表 4 排气总管直径对总体性能的影响

排气总管直径/mm	p_{me}/MPa	p_{max}/MPa	$b_e/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	$A_e/(\text{kg/s})$	$T_e/^\circ\text{C}$	平均换气损失压力/MPa	容积效率
50	1.96	13.6	282.7	1.314	1 059	-0.120 48	0.71
60	2.21	15.0	232.5	2.068	849	-0.079 93	0.89
70	2.25	15.4	221.3	2.465	724	-0.049 83	0.96
80	2.25	15.5	218.5	2.591	687	-0.038 09	0.98
90	2.24	15.5	218.5	2.518	657	-0.038 92	0.98
100	2.24	15.5	218.7	2.478	651	-0.038 28	1.04
110	2.23	15.6	217.6	2.571	641.6	-0.033 92	1.05
120	2.24	15.5	216.8	2.598	639.3	-0.028 47	0.99

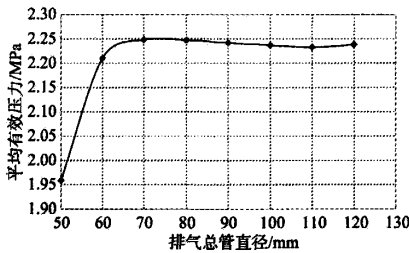


图 3 排气总管直径对平均有效压力的影响

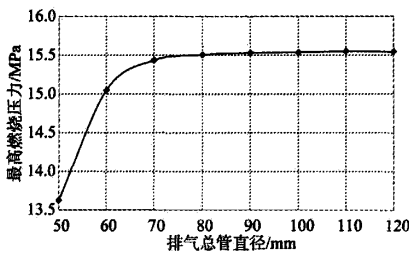


图 4 排气总管直径对最高燃烧压的影响

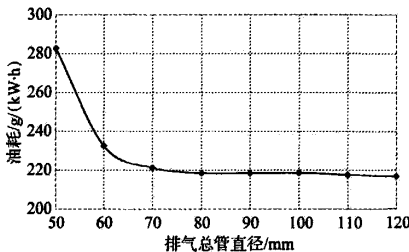


图 5 排气总管直径对油耗的影响

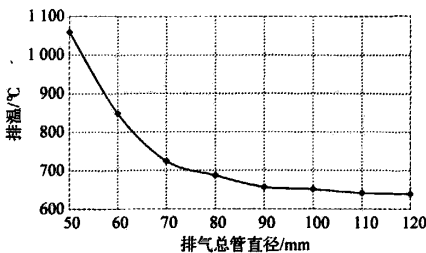


图 6 排气总管直径对排温的影响

从图 7 ~ 图 9 可以看出：随着排气总管直径的增大，空气流量、容积效率显著增加，平均换气压

力损失显著减少。当排气总管直径达到 80 mm 时，空气流量达到最大；在直径为 90 ~ 100 mm 时，空气流量略有降低；当管径继续增大到 110 mm 以上时，空气流量又达到最大值。当排气总管直径达到 80 mm 时，容积效率达到最大且随后基本保持不变。当排气总管直径达到 80 ~ 100 mm 时，平均换气压力损失基本不变；但当排气总管直径继续增大到 110 ~ 120 mm 时，平均换气压力损失又略微减小。说明总管直径在 80 ~ 120 mm 时，对于空气流量、容积效率以及平均换气压力损失均较为合理。

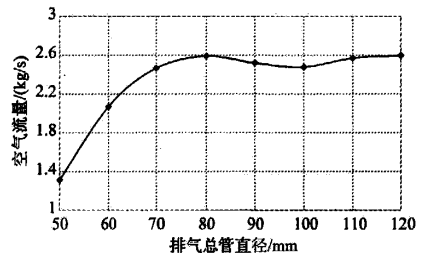


图 7 排气总管直径对空气流量的影响

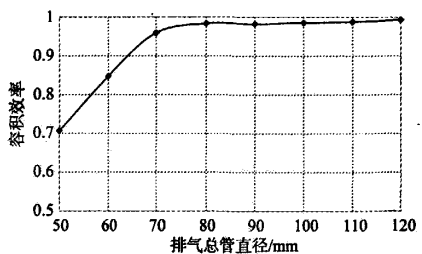


图 8 排气总管直径对容积效率的影响

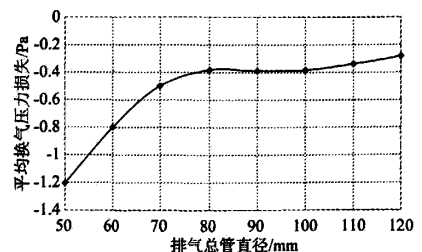


图 9 排气总管直径对平均换气压力损失的影响

3.2 不同喉口收缩率的影响

表 5 为不同喉口收缩率对总体性能的影响，从表 5 中可以看出：喉口收缩率对总体性能的影响较小。如果考虑满足功率大于 1 400 kW、最高燃烧

压力小于 17 MPa、油耗小于 225g/(kW·h)、排温小于 750 ℃，喉口收缩率大于 0.8 即可，但同时考虑泵气功尽量小、容积效率尽可能大，喉口收缩率为 0.9 时综合性能较好。

表 5 不同喉口收缩率对总体性能的影响

喉口收缩率	p_{me}/MPa	p_{max}/MPa	$b_e/\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	$A_e/(\text{kg}/\text{s})$	$T_e/^\circ\text{C}$	平均换气损失压力/MPa	容积效率
0.65	2.16	15.5	220.9	2.293	686	-0.049 57	0.95
0.7	2.16	15.4	220.9	2.401	687	-0.043 47	0.96
0.75	2.17	15.5	220.1	2.436	682	-0.039 82	0.97
0.8	2.18	15.5	219.3	2.47	676	-0.034 19	0.98
0.85	2.19	15.5	217.7	2.568	672	-0.029 49	0.99
0.9	2.21	15.5	216.0	2.596	661	-0.015 98	1.06

从图 10 ~ 图 13 明显看出：随着喉口收缩率的增大，平均有效压力随之增加；最高燃烧压力基本保持不变；喉口收缩率在 0.65 ~ 0.7 之间油耗基本不变，大于 0.7 后油耗略有降低；排温在喉口收缩率为 0.7 时有拐点，但随后排温呈线性减小，但总体变化幅度较小。说明喉口收缩率对总体性能影响较小。

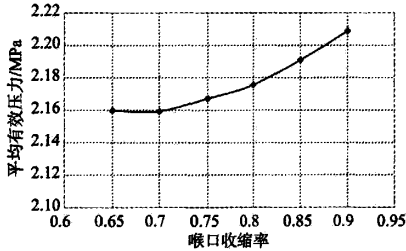


图 10 喉口收缩率对平均有效压力的影响

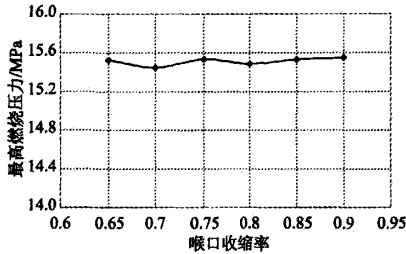


图 11 喉口收缩率对最高燃烧压力的影响

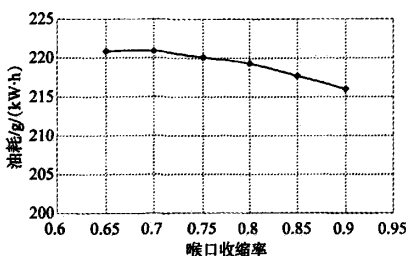


图 12 喉口收缩率对油耗的影响

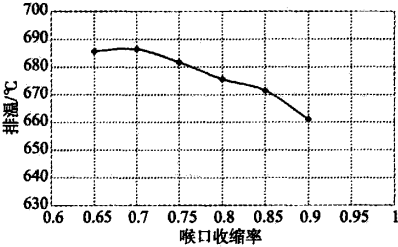


图 13 喉口收缩率对排温的影响

从图 14 ~ 图 16 可以看出：随着喉口收缩率的增大，空气流量基本是线性增加，但喉口收缩率在 0.6 ~ 0.7、0.8 ~ 0.85 之间空气流量变化较大，喉口收缩率在 0.7 ~ 0.8 之间空气流量变化很小；当喉口收缩率在 0.65 ~ 0.85 之间容积效率缓慢增加，当喉口收缩率由 0.85 增大到 0.9 时，容积效率快速增加；平均换气损失压力呈线性减少，喉口收缩率在 0.65 ~ 0.85 之间平均换气损失压力缓慢减小，当喉口收缩率由 0.85 增大到 0.9 时，平均换气损失压力快速减小。说明喉口收缩率对空气流量、容积效率以及换气损失影响较大。

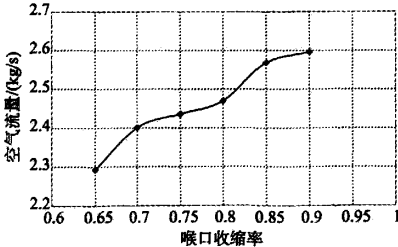


图 14 喉口收缩率对空气流量的影响

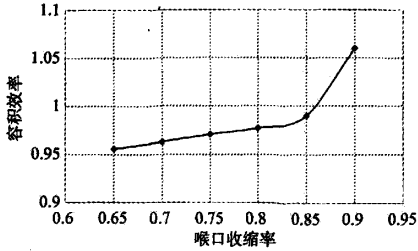


图 15 喉口收缩率对容积效率的影响

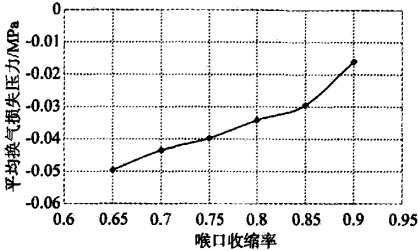


图 16 喉口收缩率对平均换气损失压力的影响

3.3 不同入流角的影响

表 6 为不同入流角对总体性能的影响，从表中综合对比可得：入流角对总体性能如平均有效压力、最高燃烧压力、油耗以及排温影响甚微，对空气流量、平均换气损失压力、容积效率影响较大。如果考虑满足总体性能指标：平均有效压力大于 2.2 MPa、最高燃烧压力小于 17 MPa，油耗小于 225g/(kW·h)、排温小于 700℃，入流角在 20°~45°之间均可满足；但同时考虑平均换气损失压力尽量小、容积效率尽可能大，入流角应在 20°~30°之间时综合性能较好。

从图 17~图 20 可以明显看出：随着入流角的增大，平均有效压力、最高燃烧压力、油耗基本保持不变；排温略有增加，但变化幅度很小。说明入流角度对总体性能影响甚微。

表 6 不同入流角对总体性能的影响

入流角度	p_{me}/MPa	p_{max}/MPa	$b_e/(\text{g}/\text{kW}\cdot\text{h})$	$A_e/(\text{kg}/\text{s})$	$T_e/^\circ\text{C}$	平均换气损失压力/MPa	容积效率
20	2.22	15.6	214.8	2.599	614.8	-0.00787	0.99
25	2.22	15.6	214.9	2.598	616.3	-0.00839	0.99
30	2.22	15.6	214.9	2.597	617.8	-0.00894	0.99
35	2.22	15.6	214.9	2.597	619.3	-0.00948	0.99
40	2.22	15.6	214.9	2.6	621.2	-0.01012	0.99
45	2.22	15.6	214.8	2.624	626.2	-0.01090	1.00

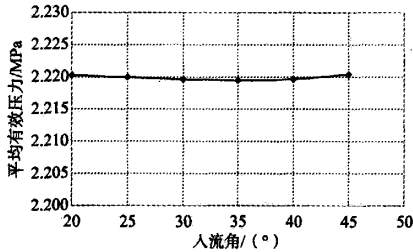


图 17 排气入流角对平均有效压力的影响

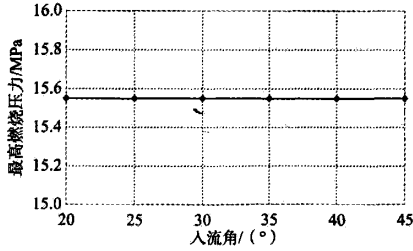


图 18 排气入流角对最高燃烧压力的影响

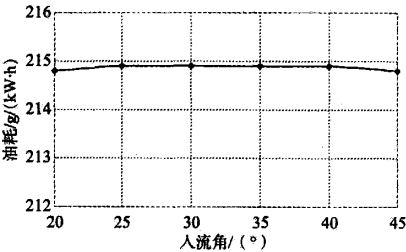


图 19 排气入流角对油耗的影响

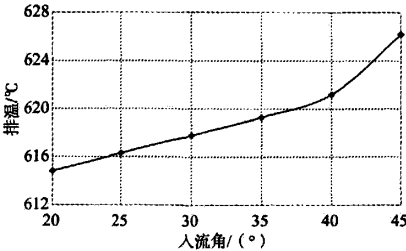


图 20 排气入流角对排温的影响

从图 21~图 23 可以看出：空气流量在入流角

20°~40°之间基本不变,在入流角 40°~45°之间,空气流量显著增加;容积效率在入流角在 20°~35°之间基本保持不变,在入流角在 35°~45°之间略有增加;平均换气损失压力线性增加。说明入流角主要影响换气损失。

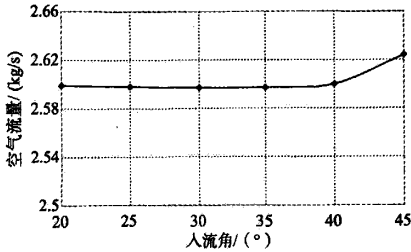


图 21 排气入流角对空气流量的影响

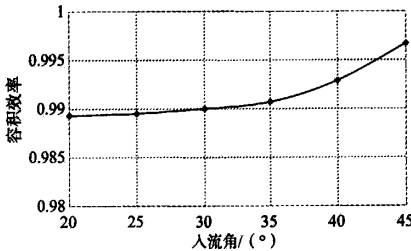


图 22 排气入流角对容积效率的影响

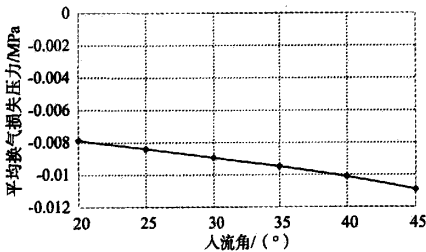


图 23 排气入流角对平均换气损失压力的影响

3.4 参数综合匹配及试验对比

根据上述各参数的优化结果,综合选取参数为:排气总管直径 100 mm,喉口收缩率 0.8,入流角 25°。

表 7 为参数综合匹配及试验结果,从表中可以看出:综合匹配计算值和试验值都满足总体性能要求,但试验值的最高燃烧压力偏小,油耗和排温偏高,空气流量偏小。由于在原型机(强化前)上进

行试验,原型机的最高燃烧压力控制在小于 14.5 MPa,考虑原型机的结构可靠性问题,本次试验最高燃烧压力控制在小于 15 MPa。因此试验值与计算值的最高燃烧压力和排温差别较大。但强化后的机型可通过优化供油参数进一步改善性能。说明参数综合匹配合理。

表 7 总体性能比较

参数	计算值	试验值
p_{me}/MPa	2.22	2.23
p_{max}/MPa	15.6	14.7
$b_e/g/(kW \cdot h)$	215	224
$A_e/(kg/s)$	2.608	2.48
$T_e/^\circ\text{C}$	655	680
平均换气损失压力/MPa	-0.010 2	-
容积效率	0.99	-

4 结 论

综合以上计算分析可得出以下结论。

- (1)总管直径对总体性能影响较大,喉口收缩率次之,排气入流角的影响甚微。
- (2)三者对平均换气损失压力和容积效率的影响显著;总管直径和喉口收缩率对平均换气损失压力和容积效率的影响较大,排气入流角的影响次之。
- (3)满足 150 柴油机性能提升指标的排气系统特征参数范围为,排气总管直径:80~120mm;喉口收缩率:0.8~0.9;入流角:20~45°。
- (4)综合匹配计算和试验结果表明排气管特征参数优化范围合理。

参考文献

[1] Morel T ,LaPointe L A. Concurrent simulation and testing concept in engine development[C]. SAE 940207,1994.
[2] 褚超美,陈家琪,等. 进排气管结构与配气系统匹配对汽油机性能的影响研究[J]. 内燃机工程,2003(5).
[3] AVL Inc. AVL - BOOST Use's Guide. Version 4. 0. 4. [R]. 2004.