

汽油机排气门碰撞活塞失效分析及优化

马京卫^{1,2}, 常雪嵩^{1,2}, 于鹏飞^{1,2}, 王晨曦^{1,2}, 刘鲁平^{1,2}, 王晋林^{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:为解决某出口发动机运行中排气门碰撞活塞导致的发动机失火故障,通过对气门导管和排气门杆的化学成分及金相组织、气门弹簧受力、整车排温、驾驶习惯对发动机热负荷的影响等进行多维分析,确定故障原因为发动机出现急加速与急减速等激烈工况且持续时间较长,气门导管热负荷增大,气门导管间隙减小,造成气门卡滞撞击活塞,导致发动机失火。采用增大气门导管包裹面积的方案进行优化,仿真结果表明:优化后导管最高温度由245.3℃降为208.5℃,气门导管最大收缩量由0.0261 mm减小为0.0143 mm。将气门导管下端杆径由5.948 mm减小为5.943 mm,对优化后的发动机进行300 h急加速与急减速台架试验,发动机正常运行,未出现气门撞击活塞故障。

关键词:汽油发动机;排气门;热负荷;气门导管;活塞

中图分类号:TK418

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2025)02-0073-05

引用格式:马京卫,常雪嵩,于鹏飞,等.汽油机排气门碰撞活塞失效分析及优化[J].内燃机与动力装置,2025,42(2):73-77.

MA Jingwei, CHANG Xuesong, YU Pengfei, et al. Analysis of gasoline engine failure by exhaust valve-piston collision and its optimization[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2025, 42(2): 73-77.

0 引言

汽油机的气门控制气缸进、排气,进气冲程时,通过开启进气门,使混合气进入气缸;排气冲程时,通过开启排气门,将燃烧后的废气排出。气门还承担燃烧室的密封功能,是配气机构主要零部件之一,对发动机燃油经济性、可靠性和排放有重要影响^[1-3]。由于气门工作环境恶劣(工作温度为650~900℃),排气门需承受高爆发压力、落座冲击及燃烧产物腐蚀,在运行过程中还会因冷却或润滑不足导致磨损,因此气门应具有高强度、高硬度、高耐磨性和高耐腐蚀性的特性^[4-8]。气门导管对气门杆起导向作用,排气门打开时,高温废气聚集在气门导管下端排出,导管下端承受高温气体,称为“热端”;气门导管上端与气缸盖储油池内的机油相连,对气门杆起散热作用。气门运动使气门导管承受侧向推力,气门和气门导管的相对运动形成摩擦副,如果气门一侧磨损,会使气门卡滞或断裂,导致机油异常消耗、燃烧不完全等问题,影响燃油经济性和发动机动力性,严重时造成发动机报废^[9-11]。本文中针对某出口汽油发动机排气门碰撞活塞问题,分析发动机失效原因,进行结构优化,并对优化后的发动机进行台架试验验证。

1 故障及原因分析

1.1 故障现象

某出口海外的汽油车起动困难,并出现失火故障。检查该车机油正常,测量缸压发现其中一缸缸压异常,进一步拆解发现该缸排气门杆部轻微弯曲,弯曲位置距杆端面64 mm,且气门杆部距杆端面

收稿日期:2025-02-23

第一作者简介:马京卫(1985—),男,山东海阳人,高级工程师,主要研究方向为汽车发动机设计开发,E-mail:372674115@qq.com。

50~67 mm 处有明显周向黄色黏附物,且黄色黏附物有两处,呈 180°对称分布,气门杆底面及活塞顶面同一位置处均存在多次磕碰痕迹,确认失火原因为排气门底部与活塞碰撞,导致发动机失火。拆解后的排气门杆如图 1 所示。

1.2 原因分析

为确认排气门碰撞活塞的根本原因,对排气门和气门导管进行化学成分和金相组织分析、气门弹簧受力分析、发动机排温分析及驾驶习惯对缸盖热负荷影响分析。

1.2.1 化学成分分析

排气门杆部材料为 X50CrMnNiNbN219,气门导管材料为 CuZn36Mn3Al2SiPb,两种材料都具有较好的耐腐蚀性和较高的机械强度,对排气门杆部和气门导管进行取样,采用直读光谱仪进行化学成分分析,检测各元素在材料中的质量分数 w ,排气门杆部和气门导管化学成分设计要求及检测结果如表 1、2 所示。

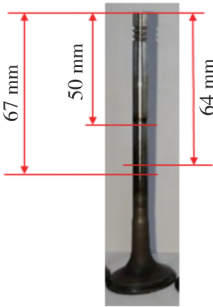


图 1 拆解后的排气门杆

表 1 排气门杆部化学成分设计要求及检测结果 单位: %

元素的质量分数	$w(\text{C})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{P})$	$w(\text{S})$	$w(\text{Cr})$
检测结果	0.490	0.210	8.900	0.016	0.002	21.580
设计要求	0.45~0.55	≤ 0.45	8.00~10.00	≤ 0.05	≤ 0.03	20.00~22.00

元素的质量分数	$w(\text{Ni})$	$w(\text{W})$	$w(\text{N})$	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{Fe})$
检测结果	3.730	0.970	0.510	0.044	2.080	61.640
设计要求	3.50~5.00	0.80~1.50	0.40~0.60	≤ 0.30	1.80~2.50	57.00~65.00

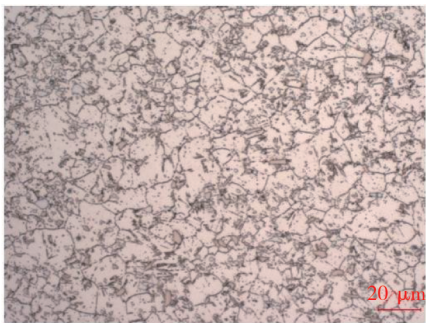
表 2 气门导管化学成分设计要求及检测结果 单位: %

元素的质量分数	$w(\text{Cu})$	$w(\text{Zn})$	$w(\text{Pb})$	$w(\text{Fe})$	$w(\text{Mn})$	$w(\text{Si})$	$w(\text{Al})$	其它
检测结果	58.390	35.260	0.417	0.081	3.084	0.679	1.804	0.214
设计要求	57.00~60.00	31.90~38.60	0.30~0.60	≤ 0.25	2.00~4.00	0.60~0.90	1.50~2.00	≤ 0.40

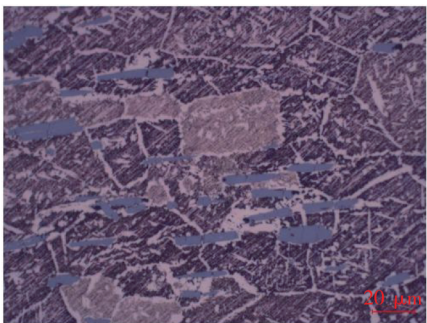
由表 1、2 可知:所有元素检测结果均满足设计要求,排除了生产过程中的混料及材料误用错误。

1.2.2 金相组织分析

采用蔡司倒置研究级金相显微镜观察经硫酸铜盐酸水溶液浸蚀后的排气门杆部和气门导管金相试样,两种材质的金相组织如图 2 所示。



a) 排气门杆部



b) 气门导管

图 2 排气门杆部和气门导管的金相组织

由图 2 可知:排气门杆部金相组织为奥氏体与碳化物复合组织,呈现较大的多边形晶粒,晶界较明显清晰,有良好的耐高温性能、耐腐蚀性和抗蠕变性;气门导管金相组织为 β 相、 α 相、析出相多相结构, β 相

呈现体心立方结构,以枝晶形态分布,具有较好的韧性和高温强度; α 相呈现板条状或针状结构分布,可以提高硬度和抗蠕变性;析出相呈现针状或片状结构,分布在晶界或晶内,具有很好的硬度和耐磨性。综上所述,2种材质的金相组织均正常。

1.2.3 气门弹簧分析

气门弹簧为配气机构的核心部件,通过弹簧回弹力及凸轮轴转动实现气门的开启和闭合,如果气门弹簧无法回弹,使气门和活塞碰撞,损坏气门和活塞,导致车辆熄火^[12-14]。经检测,气门弹簧安装压力为289 N,工作压力为618 N,均合格(要求弹簧安装压力为 $296.0 \text{ N} \pm 17.5 \text{ N}$,工作压力为 $625 \text{ N} \pm 31 \text{ N}$),气门弹簧无异常。

1.2.4 整车排温分析

发动机排气温度过高,使配气机构零部件(如气门、气门导管和弹簧)承受更高热负荷,导致零部件变形或损坏;高温环境下,润滑油性能下降,导致配气机构润滑不良,增加气门导管与气门间的磨损,增大气门出现故障的风险。

采用INCA软件,标定转速、负荷和点火提前角等,得到排气温度模型。不同相对进气量(实际进气质量与标准进气质量的比)、转速下,排气温度偏差(模型排气温度与实际发动机排气温度的差)仿真结果如图3所示。

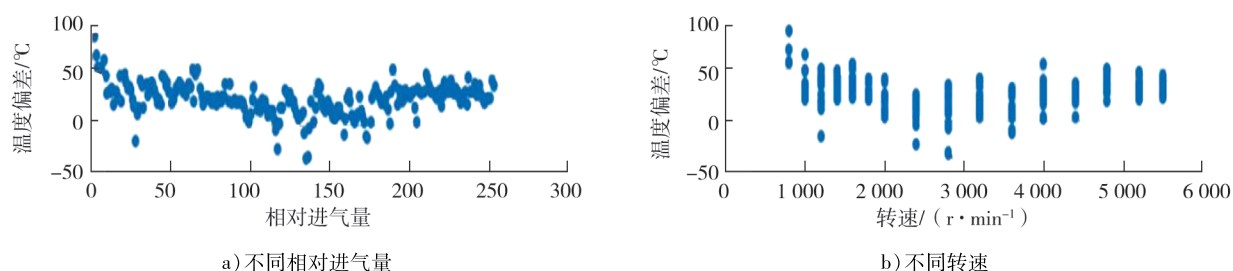


图3 不同相对进气量、转速下排气温度偏差仿真结果

由图3可知:不同相对进气量和转速下的排温偏差均满足技术要求($-100 \sim 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$),仿真计算的发动机排气温度无异常。

相同工况下,国内、外使用的发动机排气温度台架测量结果如图4所示。由图4可知:相同工况下,国内、外使用的发动机排温台架实测数据基本一致;台架试验国内、外使用的发动机性能基本一致。

1.2.5 驾驶习惯对发动机热负荷影响分析

驾驶习惯影响发动机使用寿命,该顾客驾驶习惯为:高速公路占比为80%,平均车速为130 km/h,最高车速为170 km/h,经常出现急加速、急减速等激烈工况且持续时间长。国内同机型运行在激烈工况的概率小于0.012%,且累计持续时间小于0.5 h。初步分析由于海外运行时驾驶习惯影响缸盖热负荷,使气门导管热量过大,散热性差,导致气门与活塞碰撞。

为验证海外驾驶习惯对缸盖热负荷的影响,进行高速行车(车速为110~130 km/h)、城郊行车(车速为70~100 km/h)、城市行车(车速为40~70 km/h)、四轮驱动低速挡、沙地、全速全负荷(发动机转速为5 500 r/min,负荷为2.458 MPa)、急加急减速7种工况(分别记为工况1~工况7)台架试验,选取水温传感器处,发动机进水口,发动机出水口,第1、2、3、4缸鼻梁区,缸盖排气歧管测点1、2(2个测点对称分布)共9个测点(记为测点1~测点9)的温度进行测试,发动机不同工况、不同位置的台架实测温度如图5所示。

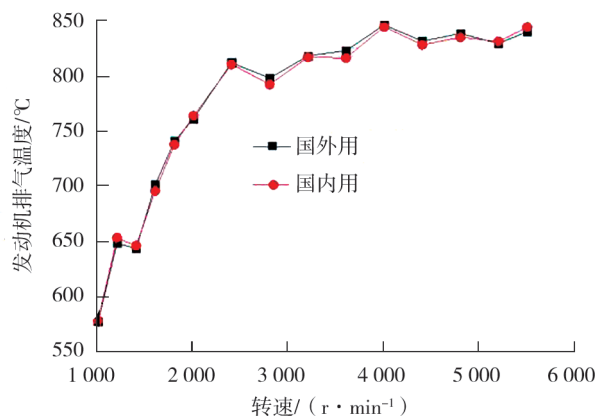


图4 国内、外使用的发动机排气温度台架测量结果

由图5可知:测点4~9处,工况7比工况6的瞬态热负荷明显增大。综上分析,车辆运行时,国外较国内易出现急加速、急减速等激烈工况且持续时间长,使气门导管热负荷高,气门导管间隙减小,导致气门卡滞撞击活塞。

2 优化与验证

该发动机为4缸、4气门,气门双进双排,将各排气门及对应的气门导管分别记为 V_{ij} 、 D_{ij} (i 为气缸数, $i=1、2、3、4$; j 为对应的排气门编号, $j=1、2$)。采用 ABAQUS 软件仿真分析全速全负荷工况下的气门及气门导管热负荷如图6所示。

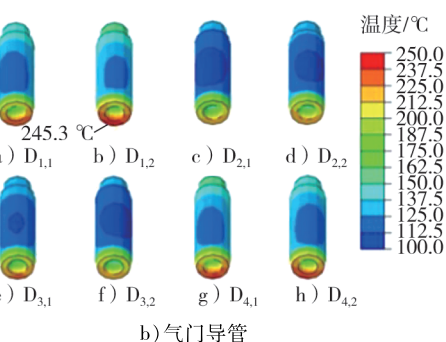
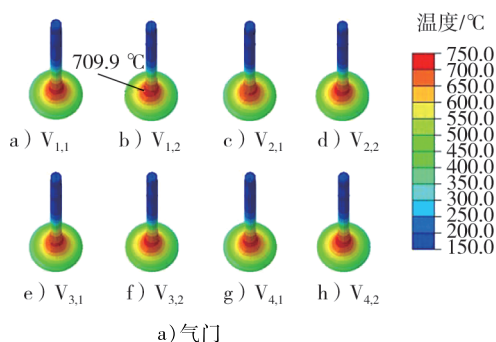


图6 全速全负荷工况下气门及气门导管的热负荷仿真分析结果

由图6可知:气门最高温度为709.9℃,气门导管最高温度为245.3℃。为验证气门导管在此温度下的最大收缩量,在温度为245.3℃时,将气门导管分别保温1h和4h,测量气门导管内径最大收缩量,分别为0.0175、0.0261mm。

为降低气门导管收缩量,增加气门导管包裹面积,增大气门导管散热量,降低导管温度,气门导管包裹面积对比如图7所示。优化后,导管包裹面积增大了36.8mm²。

优化后,全速全负荷工况下气门及气门导管热负荷仿真分析如图8所示。由图8可知:增加气门导管包裹面积后,气门导管最高温度由245.3℃降低为208.5℃,气门最高温度由709.9℃降低为708.9℃,气门最高温度变化不大,气门导管最高温度明显下降。

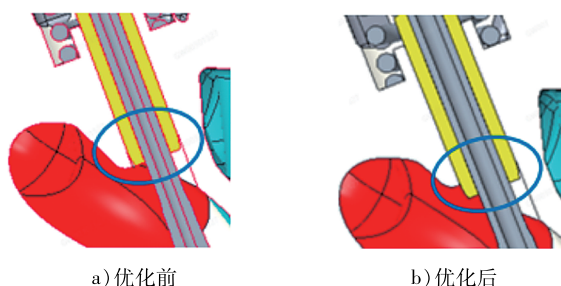


图7 优化前、后导管包裹面积对比

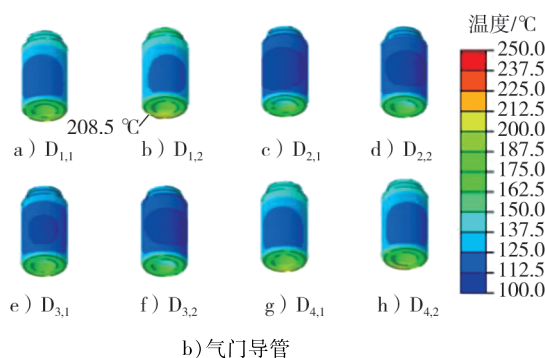
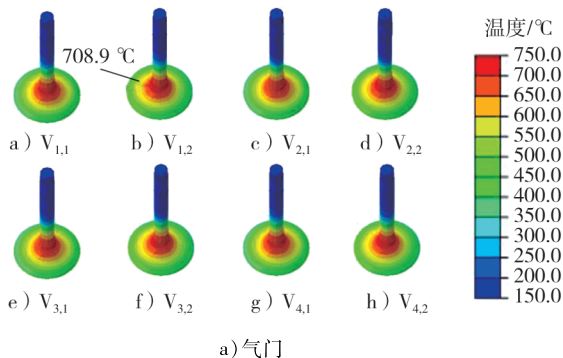


图8 优化后,气门及气门导管温度场仿真分析云图

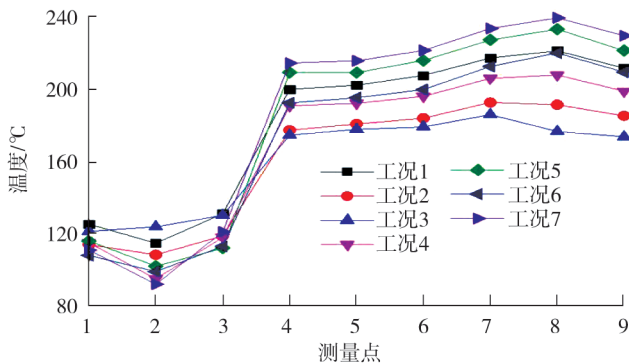


图5 发动机不同工况、不同位置的台架实测温度

采用 ABAQUS 软件仿真分析全速全负荷工况下的气门及气门导管热负荷如图6所示。

在温度为 245.3 ℃ 时,对优化后的气门导管保温 4 h,气门导管最大收缩量由 0.026 1 mm 减小为 0.014 3 mm,气门导管收缩量减小了 45.2%。在增大气门导管包裹面积的基础上,将气门热端杆径由 5.948 mm 减小为 5.943 mm,增大气门杆与气门导管间隙,降低气门卡滞风险。将优化后的发动机进行 300 h 急加急减速台架试验,未出现气门卡滞及排气门碰撞活塞现象,发动机正常运行,优化措施有效。

3 结论

1) 驾驶习惯明显影响发动机使用寿命,若车辆经常出现急加速、减速等激烈工况且持续时间较长,会使气门导管热负荷增大,气门导管间隙减小,造成气门卡滞撞击活塞。

2) 增大气门导管包裹面积,气门导管最高温度由 245.3 ℃ 减小为 208.5 ℃,气门导管最大收缩量由 0.026 1 mm 减小为 0.014 3 mm;同时将气门热端杆径减小 0.005 mm,可以有效解决排气门撞击活塞。

参考文献:

- [1] 肖晓玲,况敏,乐有树. 柴油机排气阀盘面断裂的失效分析[J]. 材料研究与应用,2012,6(4):271-275.
- [2] 张刘. 可变气门升程对甲醇发动机燃烧和排放性能的影响研究[D]. 长春:吉林大学,2023.
- [3] 李成艳,乔芳,徐得石,等. 某船用重油柴油机排气门锥面烧蚀故障分析[J]. 内燃机,2024,40(1):38-44.
- [4] 罗长增,曾笑笑,魏东博,等. 基于双辉技术的气门盘锥面 TiN 涂层制备和高温摩擦行为[J]. 金属热处理,2024,49(7):195-199.
- [5] 符兴胜,韩杰. 柴油机进气门断裂失效分析及改进措施[J]. 柴油机设计与制造,2023,29(1):45-50.
- [6] 常雪嵩,王晨曦,王岩,等. 某车辆汽油发动机排气门烧蚀原因分析[J]. 客车技术与研究,2025,47(1):58-62.
- [7] WITEK L. Failure and thermo-mechanical stress analysis of the exhaust valve of diesel engine[J]. Engineering Failure Analysis,2016,66:154-165.
- [8] 郑志飞,张少宗. 发动机排气门开裂原因分析[J]. 理化检验(物理分册),2015,51(11):820-823.
- [9] 於双月,池文慧,区云锋. 缸盖气门导管与座圈压装质量控制[J]. 装备制造技术,2015(2):166-167.
- [10] 张孝超,宣天鹏,戴泽玉,等. 汽车发动机排气门导管的偏磨失效分析[J]. 热加工工艺,2016,45(20):255-258.
- [11] AKASH G, KANDAVEL T K, KISHAN I S, et al. Experimental investigations on deformation, densification and mechanical properties of sintered Fe-C-Mn low alloy P/M steels under hot upsetting[J]. Materials Today: Proceedings,2018,5(8):16073-16079.
- [12] 程鹏,丁嘉怡,姜膺,等. 过喷引起的气门弹簧断裂失效分析[J]. 金属热处理,2011,36(增刊1):145-148.
- [13] 曾鹤龄,相华. 发动机气门弹簧断裂问题分析[J]. 装备制造技术,2010(11):137-138.
- [14] 刘宝昌,王红梅. 发动机气门弹簧断裂失效分析[J]. 林业机械与木工设备,2010,38(6):30-32.

Analysis of gasoline engine failure by exhaust valve-piston collision and its optimization

MA Jingwei^{1,2}, CHANG Xuesong^{1,2}, YU Pengfei^{1,2}, WANG Chenxi^{1,2},
LIU Luping^{1,2}, WANG Jinlin^{1,2}

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

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

Abstract: In order to solve the export engine misfire fault caused by the collision of the exhaust valve with the piston during the operation of an engine, the chemical composition, metallographic structure, valve spring force, vehicle exhaust temperature, and driving habits of the valve guide and exhaust valve stem are analyzed,

(下转第 85 页)

acceleration and VSP. Based on the power based window method, among 32 vehicles with normal reactant consumption, there is a significant difference in NO_x specific emissions, with 40.6% of heavy-duty diesel vehicles meeting the standard limit of $4 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ for specific emissions. 10 vehicles with fixed reactant consumption have NO_x specific emissions exceeding the standard limit, with the maximum NO_x specific emission being 3.4 times the standard limit. The analysis of the specific emissions of vehicles traveling on different roads shows significant differences in emissions among urban, suburban, and highway conditions, with average NO_x specific emissions of $6.08 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, $8.06 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, and $3.43 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, respectively.

Keywords: heavy-duty diesel vehicle; micro driving condition; VSP; power based window method; emission rate; specific emission

(责任编辑:臧发业)

.....
(上接第 72 页)

flow injection of urea at different space velocity and temperatures on NO_x conversion efficiency, ammonia storage and ammonia leakage are investigated experimentally. The diesel engine used in the experiment employed an exhaust aftertreatment system with selective catalytic reduction (SCR) technology. The experimental results show that for a fixed air flow, the extent of ammonia leakage is related to changes in temperature. As the temperature increases, the catalytic reduction reaction accelerates and the ammonia leakage decreases. The temperature has a great influence on the catalytic reduction reaction rate. At a flow velocity of $10\,000 \text{ h}^{-1}$, the reaction rate of SCR at high temperature is much higher than that at low temperature. The flow velocity has a weak influence on the reaction rate. When the flow velocity changes from $10\,000 \text{ h}^{-1}$ to $40\,000 \text{ h}^{-1}$ at the same temperature, the average reaction rate within the SCR remained largely unchanged. However, increasing the flow velocity can accelerate the leakage of ammonia, thereby mitigating the benefits associated with the NO_x conversion.

Keywords: diesel engine; ammonia leak; conversion efficiency; reaction rate; flow velocity

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第 77 页)

and the influence of the vehicle exhaust temperature and driving habits on the engine thermal load is determined. The cause of the fault is that the engine is prone to intense working conditions such as sudden acceleration and deceleration during operation, which lasts for a long time. The thermal load of the valve guide is increased, and the clearance of the valve guide is decreased, causing the valve to jam and impact the piston, resulting in engine misfire. The optimization is carried out by increasing the wrapping area of the valve guide. The simulation results show that the maximum temperature of the optimized guide is decreased from 245.3°C to 208.5°C , and the maximum contraction of the valve guide is decreased from 0.0261 mm to 0.0143 mm . At the same time, the lower end diameter of the valve guide is reduced from 5.948 mm to 5.943 mm . A 300 hour rapid acceleration and deceleration test is conducted on the optimized engine, and no valve impact piston failure occurs, indicating normal engine operation.

Keywords: gasoline engine; exhaust valve; heat load; valve guide; piston

(责任编辑:胡晓燕)