

CNG 发动机排气门-座圈磨损机理分析与改进

李加旺, 张志福, 田身军, 李德银

奇瑞汽车股份有限公司, 安徽 芜湖 241009

摘要:为解决某压缩天然气(compressed natural gas, CNG)发动机排气门-座圈异常磨损失效的问题,通过分析座圈磨损机理,确定座圈材料的屈服强度、座圈表面接触应力、有效表面膜和表面温度为影响 CNG 发动机排气门-座圈磨损特征的关键因素。提出优化座圈材料、降低座圈表面法向载荷的接触应力、降低排气门-座圈摩擦副的表面温度及保证座圈有效表面膜的生成等优化方案。对优化方案进行台架和整车试验验证,结果表明优化后座圈最大磨损量由 0.288 mm 降到 0.078 mm,满足设计要求,改进效果明显,市场反馈表现良好,没有出现因座圈异常磨损导致的发动机缸压不足、抖动等故障。

关键词:CNG 发动机;座圈;黏着磨损;台架验证

中图分类号:TK433.4

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)04-0096-06

引用格式:李加旺,张志福,田身军,等. CNG 发动机排气门-座圈磨损机理分析与改进[J]. 内燃机与动力装置, 2022,39(4):96-101.

LI Jiawang, ZHANG Zhifu, TIAN Shenjun, et al. Analysis on wear mechanism of exhaust valve-valve seat in CNG engine and its improvement[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022,39(4):96-101.

0 引言

为了满足日益严格的排放标准和低油耗需求,各大主机厂在提高发动机热效率的同时不断寻找清洁的代用燃料。作为清洁燃料,压缩天然气(compressed natural gas, CNG)可降低爆震敏感性,提高压缩比和燃烧效率,减少 CO₂ 排放,燃烧产生的颗粒物也很少,汽车尾气排放更容易达到国六标准,相同行驶里程的燃料成本较汽油机大幅降低^[1]。CNG 燃料发动机在原基础机型上改动小,主机厂投资少,用户使用成本低,因此越来越受到汽车行业青睐。

CNG 发动机排气门-座圈磨损失效是行业技术难题,经常出现由于排气门-座圈异常磨损造成气门密封不严,导致发动机失火抖动或加速无力的情况。关于该失效模式的研究较多,大部分改进措施局限于经验方法和试验结果。本文中以某 1.6 L CNG 发动机作为研究对象,对 CNG 发动机排气门-座圈磨损机理进行深入研究,找到影响 CNG 排气门-座圈磨损特性的关键因素,围绕关键影响因素进行优化,为 CNG 发动机排气门-座圈选型设计和改进提供参考。

1 CNG 燃烧特性对排气门-座圈磨损的影响

相比于汽油的燃烧速度(39~47 m/s),CNG 在缸内的燃烧速度(33.8 m/s)较慢,致使气门座圈和导管在高温状态下的工作时间相对较长,CNG 没有液态汽油燃烧的气化吸热过程,燃烧的最高温度高于汽油燃烧温度,燃烧温度高达 1000 ℃,因此气门和座圈的温度很高。采用气门和座圈特制样件进行的温度场测试结果为:CNG 排气门接触锥面温度比汽油机高 50~80 ℃,CNG 排气座圈接触面温度比汽油机高

收稿日期:2022-06-09

第一作者简介:李加旺(1969—),男,回族,湖南常德人,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为发动机设计,E-mail:lijiaawang@mychery.com。

30~50 ℃。

CNG 主要成分为甲烷(CH_4),与新鲜空气易充分混合,实现了理论空燃比下的完全燃烧,但燃烧产物过于洁净,没有润滑成分,气门与座圈之间完全没有润滑而处于干摩擦状态^[2],造成气门-座圈早期磨损失效。

2 CNG 排气门-座圈磨损机理

2.1 磨损类型分析

机械磨损主要有黏着磨损、磨粒磨损、表面疲劳磨损、腐蚀磨损、冲蚀磨损和微动磨损 6 种类型,各种机械磨损的特点见表 1。机械摩擦副之间的磨损通常是几种磨损共同作用,但在一定条件下,以某一种磨损为主。

表 1 机械磨损类型及其特点

磨损类型	特点
黏着磨损	摩擦面相对滑动时,接触点发生塑性变形或剪切、零件表面温度升高发生黏着,在相对运动时黏着的金属小颗粒剥离表面
磨粒磨损	一个凸起的硬表面和另一表面接触,或者在 2 个摩擦表面之间存在或嵌有硬颗粒,在相对运动过程中导致材料转移
疲劳磨损	由于交变接触应力的作用而使材料表面出现麻点或脱落的表面材料损耗现象
腐蚀磨损	在磨损和腐蚀交互作用下,所导致材料损耗或去除的过程
冲蚀磨损	流体或含有固体粒子的流体冲击固体表面,或流动的液体中气泡破裂形成的冲击波使材料局部变形和损耗的现象
微动磨损	当 2 个承载件的相互接触表面经受相对往复的切向振动时,由于振动所产生的循环应力的作用而导致的材料转移或损耗

正常磨损座圈的显微照片如图 1 所示。由图 1 可以看出正常磨损座圈的金相组织较稳定,无剥离和塑性变形,蓝色圈内显微组织正常。某 1.6 L CNG 发动机开发过程中排气门-座圈异常磨损,为确定磨损类型,将排气门-座圈置于电子显微镜下观察,结果如图 2 所示。由图 2 可知:座圈的金相组织呈现较粗糙的剥离现象(红圈所示)和塑性流动(红色箭头所示),摩擦副表面局部发生黏着,在相对运动时黏着的金属小颗粒被分开或被拉出来,形成典型的黏着磨损。

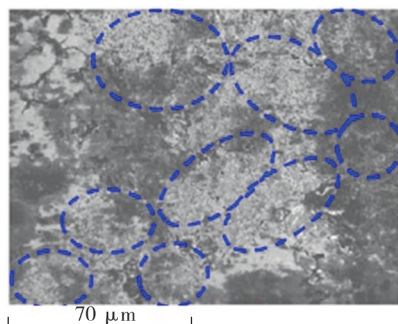


图 1 正常磨损座圈显微组织

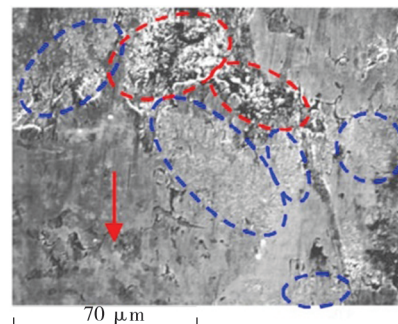


图 2 异常磨损座圈显微组织

2.2 黏着磨损机理

黏着磨损是在滑动摩擦条件下,因缺少润滑油或摩擦处的氧化膜被破坏,摩擦副表面局部发生黏着,在相对运动时黏着小颗粒被分开或被拉出来,由一个表面转移到另一个表面,或脱落成磨屑而产生的磨损。

2.2.1 阿查德(Archard)磨损理论

假设在一系列等高度、大小相仿的半球形微凸体上形成磨屑,单个微凸体的接触面积的半径为 r ,面

积为 πr^2 , 半球的体积 $V = 2\pi r^3/3$, 则所受载荷 $N_i = \sigma_b \pi r^2$, 其中, σ_b 为较软材料的屈服极限, Pa。设 n 为接触表面间接触点数, L 为滑动距离, 则总体积磨损量

$$W_V = \sum \frac{2}{3} \pi r^3 \cdot \frac{L}{2r} = \frac{n \pi r^2 L}{3} \quad (1)$$

所受法向总载荷

$$N = n \sigma_b \pi r^2 \quad (2)$$

由式(1)(2)可得:

$$W_V = \frac{NL}{3\sigma_b} \quad (3)$$

一对摩擦副在整个磨损过程中, 微凸体不会每次都被剪断成为磨屑, 而是存在一定概率, 因此:

$$W_V = \frac{kNL}{3\sigma_b} \quad (4)$$

式中: k 为黏着磨损系数, $\text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{mm})$ 。 k 受很多因素影响, 通过一定试验方法和大量试验数据获得。

在一定摩擦边界范围, 当接触应力在弹性范围内, k 变化不大, 磨损量与法向载荷成正比, 与较软材料的屈服强度成反比; 而当载荷增加到使接触应力超过材料屈服极限, 产生塑性变形破坏, 摩擦表面组织呈现塑性流动或剥落, 出现剧烈的黏着磨损——咬合, 则摩擦表面被严重破坏。因此, 当接触应力超过材料屈服极限, 阿查德磨损定律不再适用, 磨损特性发生根本性改变^[3]。

2.2.2 罗厄(Rowe)对阿查德理论的修正

罗厄考虑了摩擦副表面膜的影响, 有表面膜存在时金属直接接触的面积只是真实接触面积的一部分^[4]。设 A_m 为金属直接接触的面积, A_r 为真实接触面积(包括有表面膜分隔的面积), β 为表面膜分隔缺陷因数, 则 $\beta = A_m/A_r$, 且 $\beta < 1$ 。

罗厄磨损公式:

$$W_V = k_m \beta (1 + \alpha \mu^2)^{\frac{1}{2}} \frac{NL}{3\sigma_b} = \frac{kNL}{3\sigma_b} \quad (5)$$

式中: k_m 为有表面膜的概率; μ 为摩擦副接触面的摩擦因数; α 为由剪切力引起的接触面积增大因数, 它满足 $\sigma^2 + \alpha \tau^2 = \sigma_b$, 其中, σ 为表面膜压应力, Pa, τ 为表面膜剪切强度, Pa, σ_b 为接触点应力, Pa, 由材料屈服强度决定。

由式(5)可得:

$$k = k_m \beta (1 + \alpha \mu^2)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

由式(6)可知, k 与 k_m 、摩擦副材料、几何性质、表面膜的破损程度等因素有关。

2.2.3 威尔士(Welsh)的研究

威尔士(Welsh)在上述理论的基础上考虑了摩擦表面温度对黏着磨损特征影响^[5]。威尔士认为, 随着外界载荷与滑动速度的改变, 可引起摩擦表面温度的升降, 表面温度对材料硬度、表面膜、磨损系数等都有影响。黏着磨损特征随温度变化如图3所示。由图3可知: 温度低于 T_1 时, 磨屑基本上是氧化物, 属于轻磨损; 温度高于 T_1 , 进入严重磨损, 特征是磨屑经金属之间咬合后再剪断而产生的, 表明此时表面上在轻载时建立的氧化膜破裂, 磨损表面产生塑性变形破坏, 是从轻微磨损到严重磨损的转变点; 当温度达到 T_2 后, 表面温度相当高, 引起表面层的相变(如出现“白层”结构), 将阻碍塑性变形的发展; 如果温度继续升高到 T_3 , 表面层迅速硬化, 此时磨损率又显著下降。

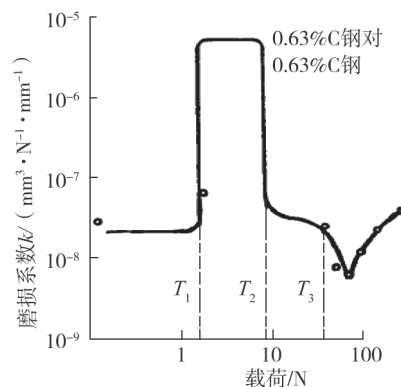


图3 黏着磨损特征随温度变化

排气门-座圈摩擦表面载荷相对较小,表面温度不超过 500 ℃,磨损特征处于在 T_1 或 T_2 阶段之前。

2.3 影响 CNG 排气门-座圈磨损的关键因素

基于上述黏着磨损理论,结合 CNG 燃料特性,确定影响 CNG 排气门-座圈磨损的关键因素为:1)较软材料座圈的屈服强度;2)座圈表面法向载荷的接触应力;3)排气门-座圈摩擦副的表面膜;4)排气门-座圈摩擦副的表面温度。

3 改进措施及验证结果

3.1 改进措施

为解决某 1.6 L CNG 发动机排气门-座圈异常磨损问题,围绕气门-座圈磨损机理及关键影响因素,提出以下改进措施。

3.1.1 优化座圈材料

CNG 座圈由粉末冶金加工而成,通过添加某些合金元素获得较好的高金相组织和物理特性。优化前座圈材料 V545A 和优化后座圈材料 S33E(供应商牌号)的主要成分和性能参数对比如表 1 所示。

表 1 优化前座圈材料 V545A 和优化后材料 S33E 的主要成分和性能参数对比

材料	$w(\text{C})/\%$	$w(\text{Cr})/\%$	$w(\text{Mo})/\%$	$w(\text{Co})/\%$	$w(\text{Ni})/\%$	$w(\text{Cu})/\%$	$w(\text{V})/\%$	$w(\text{W})/\%$	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	HRC 硬度	300 ℃ 导热率/ ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)
V545A	1.2~1.7	7.5~11.0	7.5~11.0	20.0~25.0	2.6~4.6	0.5~1.5			6.7~7.1	23~38	23~38
S33E	0.5~1.5	3.0~6.0	7.0~14.0	16.0~22.0		15.0~25.0	1.0~3.0	3.0~6.0	7.5~8.2	45~63	64~68

由表 1 可知,座圈材料由 V545A 升级为 S33E,最大变化是将 Cu 元素添加到 Fe 基粉末混合料中,形成 Fe-Cu 合金扩散化合物,获得更高的导热性,新材料座圈的导热率提升约 70%。S33E 座圈材料不仅具有良好导热性,延展性也得到提升,增强座圈与铝质缸盖的空隙填充能力,传导热流通畅,从而使排气门-座圈表面的最高温度得以显著降低^[6]。

S33E 添加合金元素 W、V、Cr 等元素,与碳结合生成高硬度的碳化物,抗黏着能力强,材料 HRC 硬度由原来 23~38 提升至 45~63,硬度提升率达 66%;通过添加 Mo、Co、Cr 等元素,与其他合金元素结合生成合金相的固体润滑膜,具有较好的润滑性,改善座圈磨损量。座圈材料优化前、后的气门-座圈单体磨损试验结果如图 4 所示。由图 4 可知,300 ℃ 时 S33E 材料座圈磨损量较原来座圈降低约 43%;350 ℃ 时降低约 36%。

3.1.2 降低座圈表面法向载荷的接触应力

保持气门落座力 F_c 不变,更改气门-座圈接触面密封宽度可以降低接触应力^[7]。气门-座圈表面受力分析如图 5 所示。把气门-座圈接触面密封锥角 α 由 45° 改为 30°,即密封带宽 Δ_t 由 1.3 mm 改为 1.8 mm,根据力学关系 $F_c = F_N \cos \alpha$ 和 $F_Q = F_N \sin \alpha$ 可知:法向载荷力 F_N 增加 22.5%,同时接触面积增加 41.0%,接触应力降低 13.3%,切向载荷力 F_Q 减少 29.3%,从而降低了表面膜

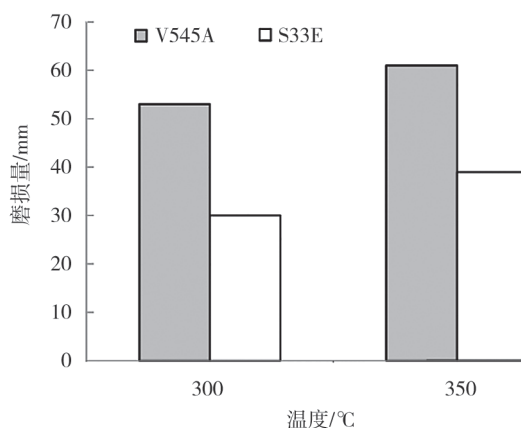


图 4 磨损试验的座圈磨损量

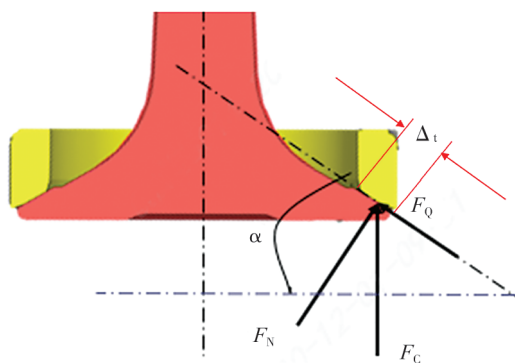


图 5 气门-座圈表面受力分析

剪切力。

3.1.3 保证座圈有效表面膜的生成

汽油机工作过程中,座圈表面通常会形成一层表面膜,通常包括氧化膜和润滑膜。铁基粉末冶金座圈含 Fe 丰富,Fe 的氧化初始温度较低,约为 $500\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$,易被氧化成为 FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 及其混合物,构成氧化膜。汽油重组分燃烧后产生烟炱(即炭烟胶质物),烟炱具有润滑作用,形成润滑膜。但是,CNG 是 CH_4 为主的气体燃料,可与新鲜空气充分混合且完全燃烧,座圈表面很难生成氧化膜;而且天然气没有重组分,燃烧产物过于洁净,不会生成类似于汽油燃烧产物的炭烟胶质润滑膜。

为确保座圈表面形成有效的表面膜,可在粉末冶金座圈制作过程中添加 Mo、Co、Cr 等元素,高温下与其他合金元素结合生成固体润滑膜,减小座圈表面摩擦因数,从而改善座圈磨损。双燃料汽车有 CNG 燃料和汽油燃料 2 套喷射系统。发动机水温低于 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷启动工况采用汽油喷射燃烧策略,目前使用的乙醇汽油是富氧燃料,不同氧浓度的混合气在排气座圈表面易生成氧化物,主要成分为 FeO 、 Fe_2O_3 、 Fe_3O_4 及其混合物,这种致密的氧化膜,显微硬度高,与座圈基体材料结合牢固,提高了耐磨性^[8]。在喷射系统切换为 CNG 燃料后,这种致密的含 Fe 氧化膜能承受较长时间干摩擦,避免了基体材料直接接触产生黏着磨损。CNG 发动机座圈与汽油机座圈密封带颜色如图 6 所示,座圈磨损量随氧化物质量分数的变化如图 7 所示。

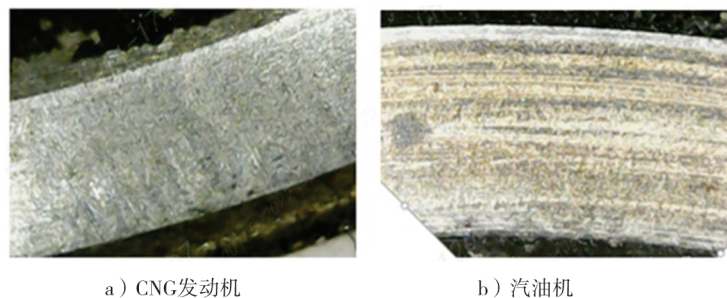


图 6 CNG 发动机与汽油机的座圈密封带颜色

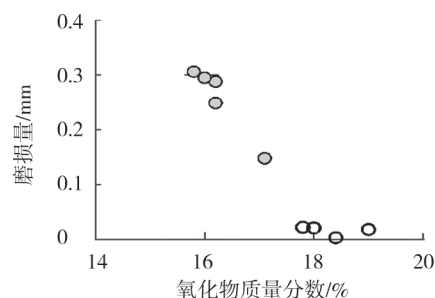


图 7 座圈磨损量随氧化物质量分数的变化

由图 6 可知:CNG 发动机座圈密封带表面光亮,呈金属光泽,说明金属间直接接触产生磨损;汽油机排气座圈密封带表面呈现灰色,具有一层氧化膜。由图 7 可知:CNG 发动机排气座圈表面氧化物质量分数越大,即氧化膜越厚,座圈磨损量越小,如图 7 的空心圆所示;反之,氧化膜越薄,座圈磨损量越大,如图 7 的实心圆所示。

3.1.4 降低排气门-座圈摩擦副的表面温度

试验研究表明,排气门热量的 70% 通过排气座圈传递给缸盖。由于座圈材料的导热率低于铝材质缸盖的导热率^[9-10],为使热流通畅,需要尽可能提高座圈导热率。

本文中优选含铜量较高的粉末冶金座圈材料 S33E,其导热率提升了 70%(见表 1)。为更快带走座圈传递给缸盖的热量,座圈附近的水套设计对热交换至关重要。采用计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)对缸盖水套进行优化,优化前、后对比如图 8 所示。由 CAE 模拟计算,从气门中心通过气门座圈直至冷却液的温度变化趋势可知,座圈附近的水套壁越薄,水套包裹座圈越充分,热传导效果越好,座圈表面温度越低。缸盖水套优化前、后排气座圈表面温度仿真如图 9 所示。由图 9 可知,优化排气座圈水套的壁厚及结构,使得排气座圈表面温度降低 $12\sim 19\text{ }^{\circ}\text{C}$,温度降幅达到 6%。

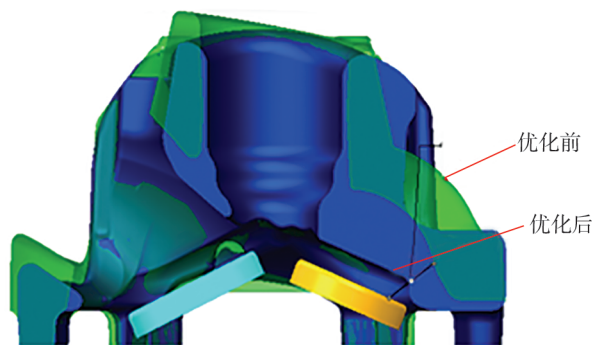


图 8 缸盖水套壁厚及结构优化

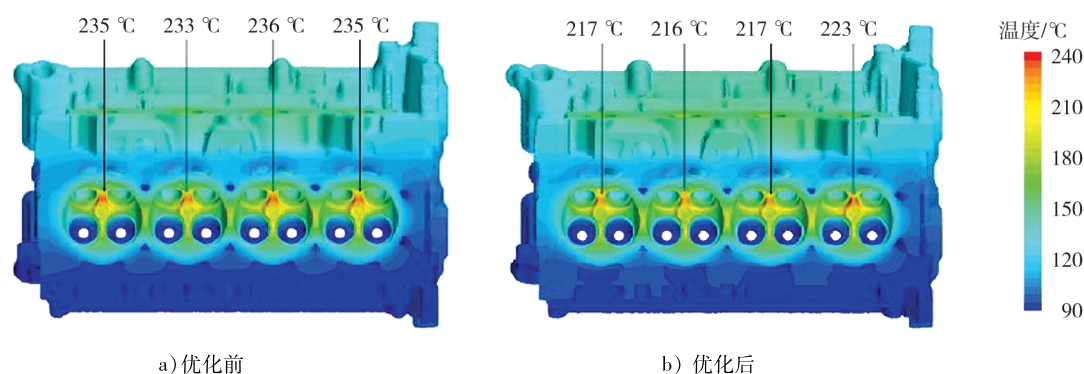


图9 缸盖水套优化前、后排气座圈温度仿真

3.2 验证

对实施上述改进措施前、后的 CNG 发动机进行 500 h 台架额定负荷试验,测量排气门座圈的磨损量,结果如图 10 所示。由图 10 可知:优化前的排气座圈最大磨损量为 0.288 mm,超过设计要求的 0.120 mm,优化后的座圈最大磨损量约 0.078 mm,满足设计要求,改进效果明显。

对搭载 CNG 发动机的整车,除实施以上改进措施外,进一步优化双燃料喷射燃烧策略,在发动机水温低于 50 °C 冷启动工况下采用汽油喷射燃烧,正常行驶工况下采用 CNG 燃料喷射燃烧。统计优化后的 CNG 发动机售后情况,市场反馈表现良好,没有出现因座圈异常磨损导致的发动机缸压不足、抖动等现象。

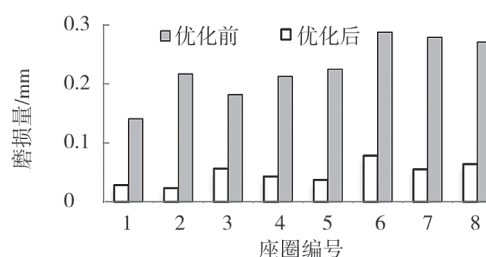


图10 台架试验后的排气座圈磨损量对比

4 结论

1) 影响 CNG 发动机排气门-座圈磨损的关键因素为座圈材料的屈服强度、座圈表面接触应力、表面膜、表面温度。

2) 采取优化座圈材料,降低座圈表面法向载荷的接触应力,通过减小缸盖水套壁厚降低排气门-座圈摩擦副的表面温度,保证座圈有效表面膜的生成等措施,并进行台架耐久试验。试验结果表明座圈最大磨损量由优化前的 0.288 mm 降到优化后的 0.078 mm,满足设计要求,优化改进效果明显。

参考文献:

- [1] YANG C, LI W X, YIN J D, et al. Port fuel injection of CNG for downsized 1-liter 3-cylinder turbocharged engine with high efficiency[C]// International Powertrains, Fuels & Lubricants Meeting. Beijing, China: SAE International, 2017.
- [2] 汪红兵. 准静态和动态载荷下人字齿轮黏着磨损数值计算[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [3] 王振, 张育春, 杨沫, 等. 高压压缩比天然气发动机气门座圈磨损问题分析及解决[J]. 内燃机, 2018(5): 17-20.
- [4] 王振廷, 孟君昊. 摩擦磨损与耐磨材料[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012.
- [5] 桂长林. Archard 的磨损设计计算模型及其应用方法[J]. 润滑与密封, 1990(1): 12-20.
- [6] 袁兴栋, 郭晓斐, 杨晓洁. 金属材料磨损原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [7] DALAL K, KRUEGER G, TODSEN U, et al. Dispersion strengthened copper valve seat inserts and guides in automotive engines[C]// International Congress & Exposition. Detroit, USA: SAE International, 2017.
- [8] 胡立萍, 任恒, 周学东. CNG 发动机排气门-气门座磨损失效分析[J]. 车用发动机, 2010(6): 71-74.
- [9] 朱远志, 尹志民, 曾渝, 等. 重型发动机气门座圈磨损机理与材料[J]. 内燃机工程, 2004, 25(4): 78-82.
- [10] BEAULIE U, ORAZEM S, REISSINGER G, 等. 改善热传导的气门座和气门导管[J]. 汽车与新动力, 2019, 2(5): 36-40.

(下转第 111 页)