

# 出油阀高压密封面气蚀失效分析及结构改进

李凯, 刘井年, 丁国华, 于百洪, 刘海军

潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为解决某高压共轨泵出油阀高压密封面气蚀问题,分析气蚀的机理和密封失效原因,采取在出油阀密封面增加凹槽、增大连通孔、在导向上增加导向槽、减小凹槽壁等优化措施,并对优化后出油阀进行仿真和台架试验验证。仿真结果表明:优化后,出油阀高压密封面处气泡的数量明显减少,爆破压力由140 MPa降低到10 MPa。台架试验后拆解发现出油阀高压密封面无明显气蚀痕迹。

**关键词:**气蚀;高压共轨泵;出油阀;高压密封

**中图分类号:**TK423.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)03-0074-05

**引用格式:**李凯,刘井年,丁国华,等.出油阀高压密封面气蚀失效分析及结构改进[J].内燃机与动力装置,2023,40(3):74-78.

LI Kai, LIU Jingnian, DING Guohua, et al. Cavitation failure analysis of high-pressure sealing surface of outlet valve and its structural optimization [J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023, 40 (3): 74-78.

## 0 引言

喷油泵是发动机的“心脏”,一旦出现故障将使整个发动机工作失常。高压供油泵是高压共轨喷油系统的重要组成部分,为喷油器的高压喷射提供稳定持续的高压燃油<sup>[1-2]</sup>。喷油泵柱塞运动过程中,出油阀的高频运动影响出油阀的可靠性和稳定性,当高压燃油从密封面泄漏,共轨系统内的燃油压力不足,导致喷油器喷射压力不足,雾化不良,严重时导致发动机功率不足甚至无法起动<sup>[3-4]</sup>。本文中为解决出油阀气蚀导致高压密封面密封失效故障,分析出油阀的结构和气蚀的机理,优化出油阀结构,通过有限元仿真计算和试验验证优化设计的有效性,解决气蚀问题。

## 1 出油阀结构及故障现象

出油阀位于喷油泵柱塞上部,与高压蓄压腔相连。出油阀为单向阀,燃油只能单方向通过,反向能够密封高压燃油。出油阀结构及工作过程如图1所示。

凸轮旋转到凸轮型线平缓部分时,柱塞向下运动,柱塞腔内产生负压,当进油口与柱塞腔内压差达到阀门开启压力时,进油阀阀芯下行,进油阀打开,泵外燃油进入供油泵内。柱塞由上止点运动到下止点,进油行程结束。当凸轮旋转到凸起型线,柱塞向上运动,工作腔容积变小,腔内压力迅速升高,当腔内高压顶开出油阀阀芯时,高压燃油流到共轨管。当柱塞由下止点运动到上止点,泵油过程结束<sup>[5-6]</sup>。喷油泵柱塞往复运动过程中,出油阀阀芯频繁开关,燃油压力变化较大,高压密封面易发生气蚀,导致出油阀密封面材料剥落,密封面失效,密封不严<sup>[7]</sup>。

某陆用发电柴油机发生多起喷油泵出油阀气蚀故障,耐久试验500 h出现出油阀高压密封面材料剥

收稿日期:2022-12-09

第一作者简介:李凯(1988—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为发动机燃油系统设计,E-mail:likai01@weichai.com。

落、密封失效问题,远远低于常用发电机寿命要求。出油阀高压密封面气蚀故障现象如图2所示。

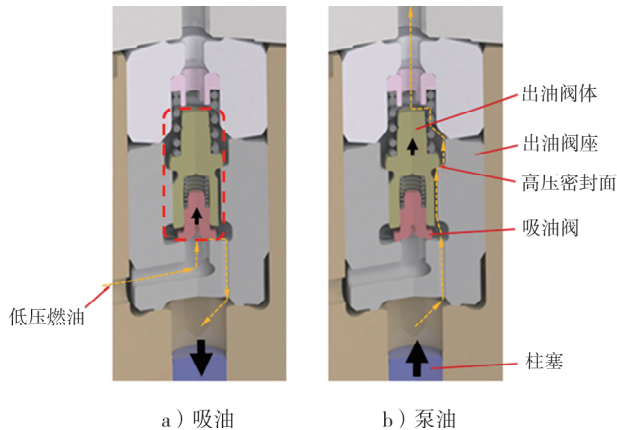


图1 出油阀结构及工作过程

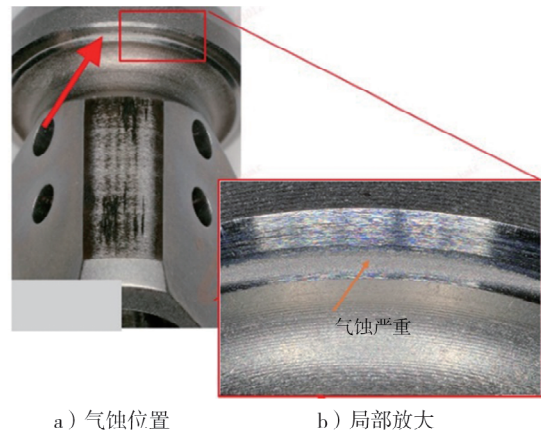


图2 出油阀高压密封面位置气蚀故障

## 2 出油阀密封失效分析

### 2.1 失效原因分析

高压共轨泵吸油和泵油过程中,出油阀座高压密封面处负压、正压频繁交替变化,当柱塞泵内部油液所受压力低于相应温度的饱和蒸汽压力时,油液中溶解的空气析出,产生大量气泡或空穴。气泡被带入共轨泵的高压区,在高压作用下快速溃灭,气泡溃灭时产生瞬间冲击力,对柱塞泵金属表面产生极大的机械破坏作用,这一过程即为气蚀<sup>[8]</sup>。

气蚀导致出油阀高压密封失效过程如图3所示,图3中蓝色箭头为气蚀的方向。阀体位置A处聚集的大气泡破裂造成气蚀,气蚀坑导致高压密封接触面减小,接触应力变大,高压密封面在阀体往复运动敲击过程中产生裂纹,裂纹向位置B、C扩展,随着裂纹数量的增加,位置C处材料逐渐剥落,密封失效。

### 2.2 仿真分析

原出油阀结构如图4所示,抽取控制阀内部流体域空间,并划分网格,网格模型如图5所示。表面网格基础尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ ,最小面网格尺寸为 $10\ \mu\text{m}$ ,流体域选择多面体网格;边界层设为5层网格,增长率为1.2,边界层总厚度为 $10\ \mu\text{m}$ ,交接面设置为一般重叠网格。

采用Fluent软件对出油阀进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)分析,采用分离流求解器和 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行计算。假设进口压力为220 MPa,出口压力为0.5 MPa,油温为 $40\ ^\circ\text{C}$ ;壁面为绝热边界条件,阀芯抬起速度为1 m/s,进行瞬态求解,时间步长为 $10^{-7}\ \text{s}$ ,内部迭代步长为10,最大物理时间为 $4\times 10^{-4}\ \text{s}$ ;根据残差曲线判断求解是否收敛<sup>[9-10]</sup>。

油液中气体空化占比云图如图6所示。由图6可知:随着柱塞的往复运动,出油阀燃油压力变化较大,大量气泡从燃油中析出,气泡主要集中在高压密封带位置。

重点分析原出油阀高压密封面气蚀情况,其气蚀气泡分布及气泡压力波动如图7所示,图7a)中气泡直径代表气泡爆破压力,直径越大爆破压力越高,气泡颜色代表该类气泡的数量。由图7可知:高压密封面位置汇聚大量大直径、高压气泡;这些气泡在高压密封面开启时间(1.6~7.0 ms)爆破,爆破压力峰值高达140 MPa。

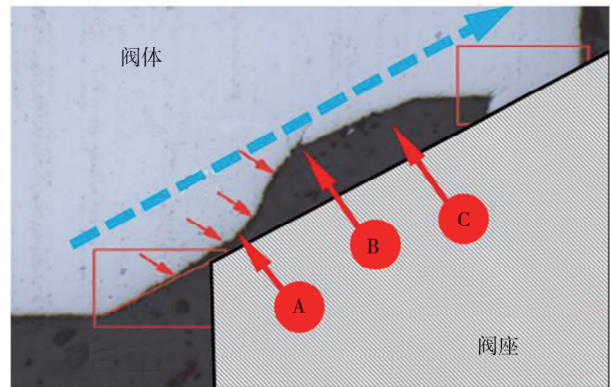


图3 气蚀导致出油阀高压密封失效过程

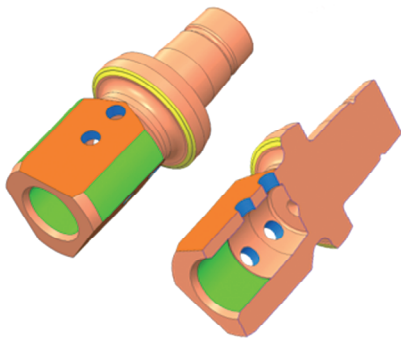


图4 原出油阀结构

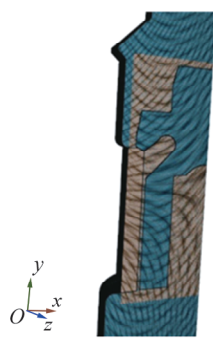


图5 控制阀内部流体域网格模型

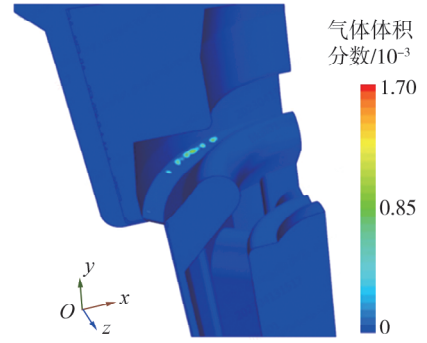
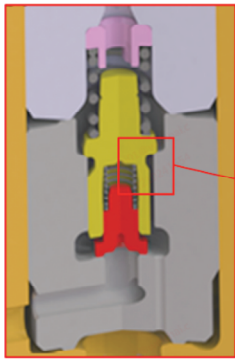
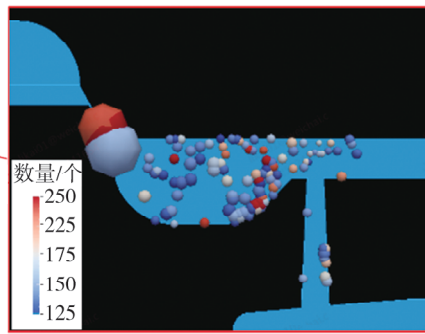


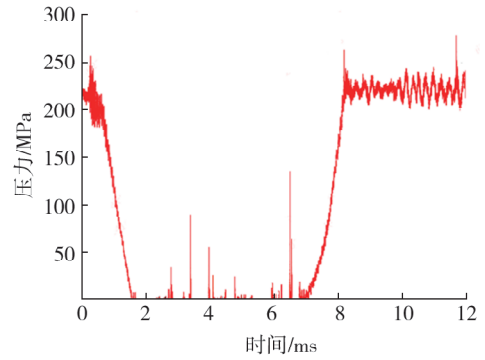
图6 油液中气体空化占比云图



a) 气泡聚集位置



b) 气泡分布



c) 气泡压力波动

图7 原出油阀高压密封面气蚀气泡分布及压力波动情况

### 3 结构优化及验证

通过分析出油阀结构和气蚀机理,优化出油阀结构:1) 出油阀密封面增加凹槽,将形成的气泡由阀座转移到凹槽;2) 增大连通孔,可快速开启、关闭阀门,使压力更快实现平衡,降低气泡析出和爆破的概率;3) 出油阀导向面上增加导向槽,使析出的气泡沿圆周方向均匀分布,防止气泡集聚在某出油阀某一个位置,加速高压密封面的气蚀失效。优化后出油阀结构如图8所示。

按相同条件对优化后的出油阀进行仿真验证。优化后出油阀气蚀气泡分布及气泡压力波动如图9所示。

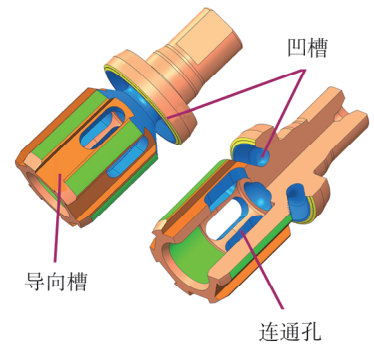
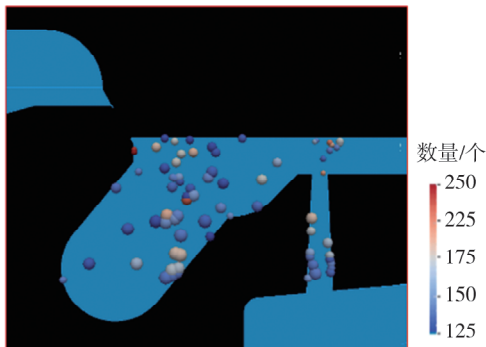
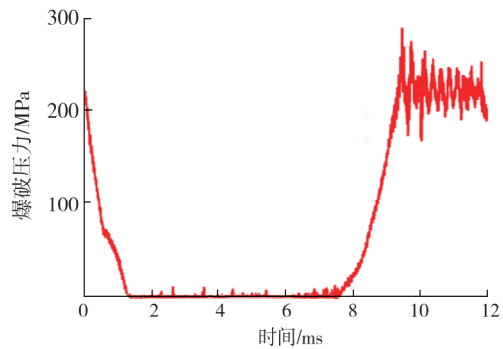


图8 优化后出油阀结构



a) 气泡分布



b) 气泡压力波动

图9 优化后出油阀气蚀气泡分布及气泡压力波动

由图9可知:气泡转移到出油阀的凹槽位置,数量减少,爆破压力降低到10 MPa以下。优化后的结构能够降低出油阀高压密封面气蚀速度和密封失效风险,提高出油阀寿命。

新组装一台喷油泵,安装优化后出油阀,进行台架耐久试验。喷油泵转速为2 500 r/min,高压共轨系统压力为160 MPa,燃油温度为(40±3)℃;采用TK1025型喷油泵试验台。喷油泵台架耐久试验原理<sup>[11]</sup>如图10所示。高速高轨压耐久循环试验140 h后,拆检出油阀,出油阀耐久试验气蚀情况如图11所示。由图11可知,优化后出油阀无明显气蚀痕迹,改进效果非常明显。

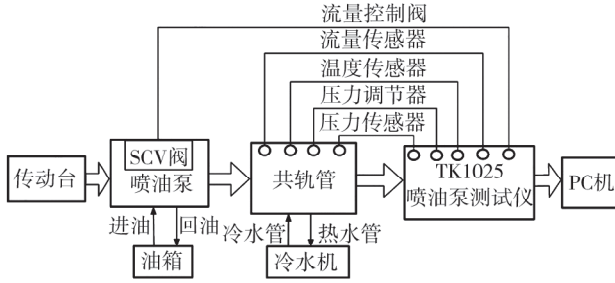


图10 喷油泵台架耐久试验原理

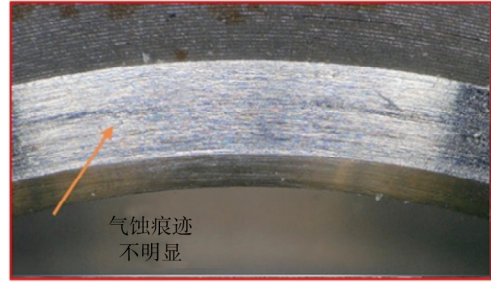


图11 优化后出油阀耐久试验气蚀情况

为进一步提升出油阀寿命,继续优化出油阀凹槽形状,减小高压密封面处凹槽的壁厚,防止析出气泡在此位置集聚附着,加剧气蚀。出油阀凹槽形状优化前、后对比如图12所示,气泡分布CFD仿真结果如图13所示。

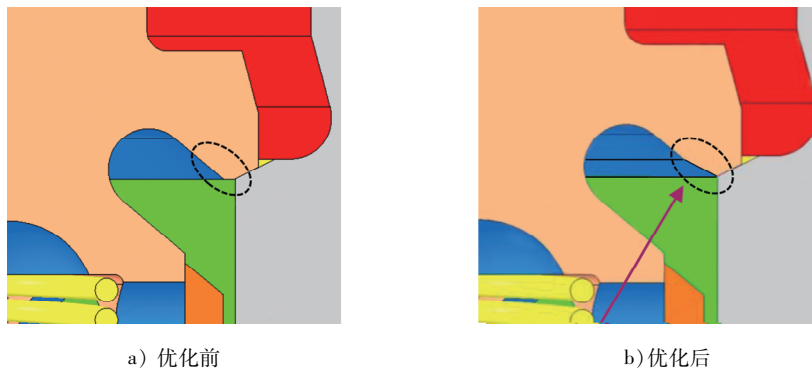


图12 出油阀凹槽形状优化前、后对比

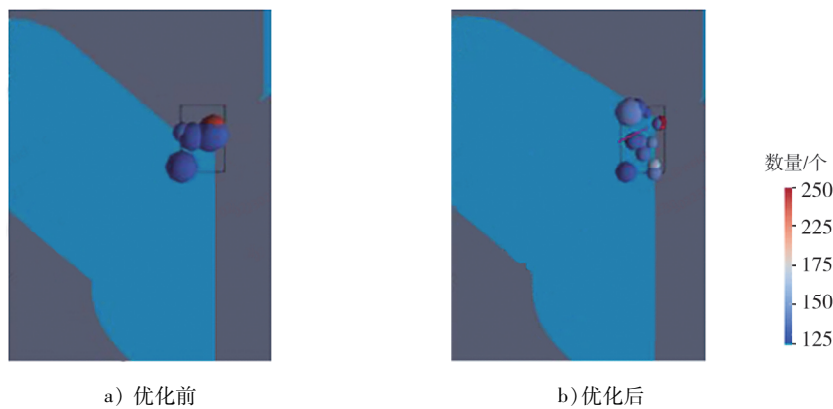


图13 出油阀凹槽形状优化前、后气泡分布CFD仿真对比

由图13可知:减小凹槽壁厚后,高压密封面位置气泡的数量、压力能够显著降低,可有效减小高压密封面的气蚀。

在喷油泵试验台再次进行高速高轨压耐久循环试验312 h,拆检出油阀,优化出油阀凹槽形状后气蚀

更加轻微。

## 4 结束语

在分析气蚀导致出油阀高压密封失效的过程和机理的基础上,采取在出油阀密封面增加凹槽、增大连通孔、在导向面上增加导向槽、消减凹槽多余壁厚等优化措施,采用 Fluent 软件对出油阀进行 CFD 分析和台架耐久试验验证。优化后出油阀高压密封面位置气泡的数量明显减少,爆破压力由 140 MPa 降低到 10 MPa,气蚀风险显著降低;台架试验后拆解发现出油阀高压密封面无明显气蚀痕迹,有效解决了气蚀导致出油阀高压密封失效故障。

### 参考文献:

- [1] 张秀梅, 姬振乾. 柴油机电控高压共轨技术探究[J]. 农业机械, 2020, 869(5): 107-110.
- [2] 张盛棕. 高压共轨系统瞬变流动特性研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [3] 代伟, 吴瑞斌, 李新, 等. 某型共轨柴油机轨压对供油特性影响研究[J]. 设备管理与维修, 2020(21): 37-38.
- [4] 胡天杰, 申立中, 王贵勇, 等. 柴油机高压共轨供油系统实时建模与仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程. 2021, 59(2): 42-47.
- [5] 张朝阳, 孙山峰, 韩景峰. 电控高压油泵供油效率仿真计算与分析[J]. 内燃机与动力装置, 2020, 37(1): 73-78.
- [6] 陈雪聪. 高压油泵配流阀流通特性数值仿真研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [7] 连历. 共轨系统高压油泵供油特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- [8] 杨云帆, 张清点, 黄创绵, 等. 柱塞泵气蚀故障模拟试验系统开发[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2022, 40(增刊 1): 87-92.
- [9] 王勤鹏, 王英杰, 杨建国, 等. 船用中速柴油机高压共轨燃油系统特性分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(6): 1058-1063.
- [10] 田丙奇. 柴油机高压共轨喷油系统动态特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2014.
- [11] 蒋波, 吴良军, 刘学添. 喷油泵测试台在电控柴油机故障诊断中的应用[J]. 农业装备与车辆工程, 2018, 56(11): 99-101.

## Cavitation failure analysis of high-pressure sealing surface of outlet valve and its structural optimization

LI Kai, LIU Jingnian, DING Guohua, YU Baihong, LIU Haijun

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

**Abstract:** In order to solve the cavitation problem of the high-pressure sealing surface of the oil outlet valve of a common rail pump, the mechanism of cavitation and the causes of seal failure are analyzed, and the structure of the oil outlet valve is optimized: increasing the groove on the sealing surface of the oil outlet valve, increasing the through hole, increasing the guide groove on the guide surface, and reducing the excess wall thickness of the groove. The simulation results show that after the optimization, the number of bubbles at the high-pressure sealing surface of the outlet valve is significantly reduced, and the bursting pressure is significantly reduced. In the bench test, it is found during disassembly that there are no obvious signs of cavitation on the high-pressure sealing surface of the oil outlet valve.

**Keywords:** cavitation; high-pressure common rail pump; outlet valve; high-pressure sealing

(责任编辑:郎伟锋)