

柴油机高压共轨喷油器针阀体裂纹分析

耿旭^{1,2}, 王光明^{1,2}, 刘明^{1,2}, 贾小丽^{1,2}, 李慧慧^{1,2}

1. 内燃机与动力系统全国重点实验室, 山东 潍坊 261061

2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

摘要:为解决喷油器针阀体肩胛圆角处开裂故障,采用扫描电子显微镜、能谱分析仪、显微硬度检测、计算机断层扫描等方法分析故障原因及失效机理并提出解决方案。结果表明:失效位置表面含有 S、Cl 等腐蚀性元素,裂纹表面存在多处不规则腐蚀坑,裂纹处维氏硬度比肩胛处降低了 28%,最小壁厚比正常件减小了 47%,腐蚀性裂纹是导致针阀体失效的主要原因。可采用使用符合国家标准的燃油及在针阀体表面增加涂层等解决针阀体腐蚀失效问题。

关键词:柴油机;针阀体;裂纹;腐蚀;喷油器

中图分类号:TK423.8

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)05-0087-05

引用格式:耿旭,王光明,刘明,等. 柴油机高压共轨喷油器针阀体裂纹分析[J]. 内燃机与动力装置,2024,41(5):87-91.

GENG Xu, WANG Guangming, LIU Ming, et al. Crack analysis of needle body of diesel engine high pressure common rail injector[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(5):87-91.

0 引言

随着人们环保意识的提高,污染物排放控制成为指导柴油机开发的重要指标之一。高压共轨技术可以精确控制喷油时间、喷射压力,从而提高油压和喷油雾化质量,减少燃油浪费和有害排放,已成为当今柴油机技术中不可或缺的一部分^[1-2]。

喷油器是高压共轨系统的重要组成部分,主要功能是将高压燃油雾化后喷入燃烧室。安装在喷油器末端的针阀偶件是柴油机喷油器的三大精密偶件之一,配合间隙通常控制在 3~5 μm 。针阀在针阀体内沿轴向不停地往复运动,在开闭中实现喷油,直接影响柴油机的经济性与可靠性^[3-5]。针阀偶件在高温高压的恶劣环境中工作,常发生针阀磨损、喷孔堵塞、密封不良等故障,严重影响柴油机的正常运转。

主要在城乡道路上行驶的某载货车累计行程约 200 000 km 时发生故障。对故障发动机进行排查,发现喷油器已无法满足密封性要求。在设定的轨压下,电磁阀未通电,高压燃油从针阀体肩胛位置呈雾状向外喷射。本文中采用断口形貌扫描、表面元素分析、显微硬度检测等方法分析故障原因及失效机理,提出解决措施,为相关零部件的故障分析与诊断提供参考。

1 故障现象及试验方法

故障发动机针阀体的材料为 R18CrNi8,主要化学成分及其质量分数如表 1 所示。针阀体经低压真空渗碳、淬火、回火等热处理工艺处理,HV1 硬度可达 600,满足发动机使用要求。对故障喷油器进行拆

收稿日期:2024-05-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD2000300)

第一作者简介:耿旭(1995—),男,山东潍坊人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机高压共轨系统开发,E-mail: gengxu@weichai.com。

检,针阀体表面可见明显沉积物,主要包括燃烧产物及油、气路的残余物质等。采集沉积物后清洗针阀体,发现针阀体表面无接触磨损、干涉痕迹,肩胛圆角处有肉眼可见的横向裂纹,如图1所示。

表1 R18CrNi8 主要化学成分及其质量分数

单位: %

成分	C	Mn	Cr	Si	Ni
质量分数	0.14~0.21	0.40~0.60	1.80~2.10	0.15~0.40	1.80~2.10

为分析裂纹产生原因,拟通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)对裂痕表面、断裂面的形貌进行观测;使用能谱分析仪(energy dispersive spectrometer, EDS)对附着沉积物以及裂纹表面的元素进行检测;采用维氏硬度仪对圆角裂纹处、肩胛位置进行硬度对比测试,以衡量硬度的变化;通过工业计算机断层扫描(computed tomography, CT)扫描,识别故障针阀体相比正常件的外形变化。



a) 裂纹位置

b) 局部放大

图1 针阀体肩胛圆角处的裂纹

2 试验结果

2.1 针阀体附着沉积物分析

通过 SEM 观测针阀体附着的沉积物颗粒,如图2所示。采用 EDS 检测沉积物元素进行,结果如图3所示。

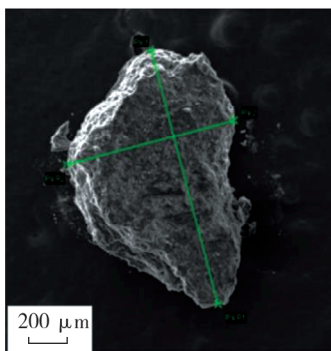


图2 针阀体附着沉积物颗粒

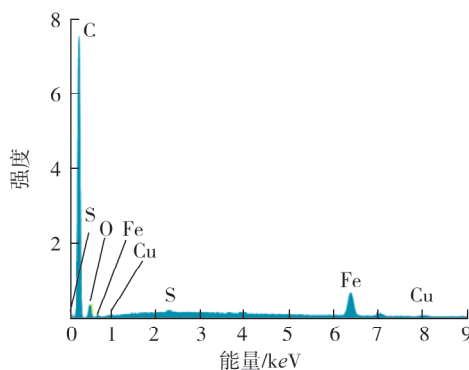


图3 沉积物元素分析

由图2可知:沉积物颗粒轮廓长度为1463.0 μm ,宽度为963.5 μm ;沉积物中含有粗糙态颗粒,这种较大的碳烟颗粒不是发动机正常燃烧的产物,而是燃油喷雾质量恶化或者异常喷射导致的^[6]。由图3可知:沉积物中包含C、O、Fe、S等元素。Fe元素来自于针阀体的基体材料,C、O元素主要来自于附着于针阀体表面的燃油燃烧产物,S元素对针阀体有一定的腐蚀性,通常情况下不应该存在。

2.2 裂纹表面分析

通过超声波清洗去除针阀体表面的沉积物,清洗后采用 SEM 观测裂纹处的微观形貌,如图4所示。由图4可知:在裂纹两侧有多处不规则的坑洼现象。

使用 EDS 对裂纹表面进行元素分析,结果如图5所示。由图5可知:除针阀体基体材料的 Fe、Cr、Ni 元素以及燃油燃烧产物的 C、O 元素外,还含有 S、Cl、K、P、Mg、Na、Al 等元素。其中的 Mg、Al 元素可能来源于发动机活塞,在喷油器喷油异常后引起剧烈燃烧,导致少量活塞材料融化后附着在针阀体表面;S、Cl

等非金属元素主要来源于外部,通常存在于劣质柴油中^[7],并且具有一定的腐蚀性。

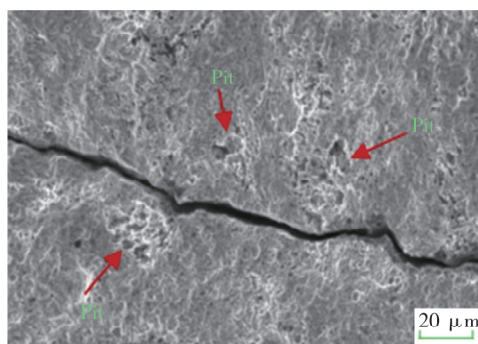


图4 裂纹表面微观形貌

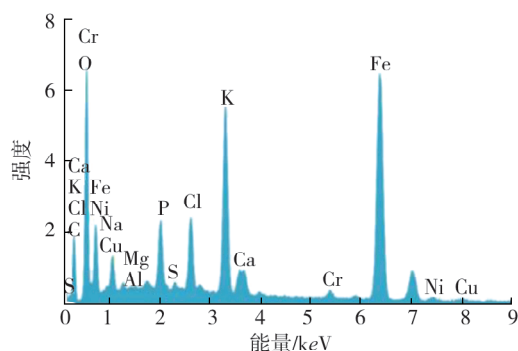


图5 裂纹表面元素分析

2.3 断裂面分析

沿裂纹方向将针阀体剖开,如图6所示。由图6可知:沿截面外圆的裂纹范围广且相对平坦,内圆裂纹的范围窄而粗糙,可以判断裂纹是由外部产生,向内部逐渐扩展,最终导致针阀体密封失效。

放大裂纹横截面,对其表面形貌进行观测,结果如图7所示。由图7可知:裂纹横截面存在多处坑洼,且分布不规则。结合元素分析结果,可以判断裂纹表面的坑洼是由S、Cl等腐蚀性元素与基体材料反应形成的腐蚀坑。这种点蚀坑在腐蚀环境与疲劳载荷的双重作用下,不断演化达到临界状态时转化为腐蚀疲劳裂纹,裂纹不断扩展导致针阀体的断裂^[8-9]。

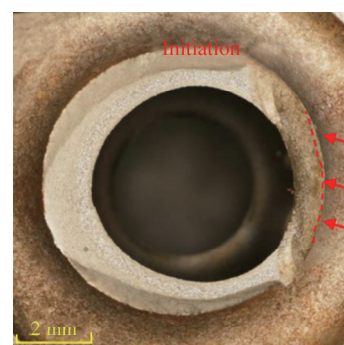


图6 裂纹横截面

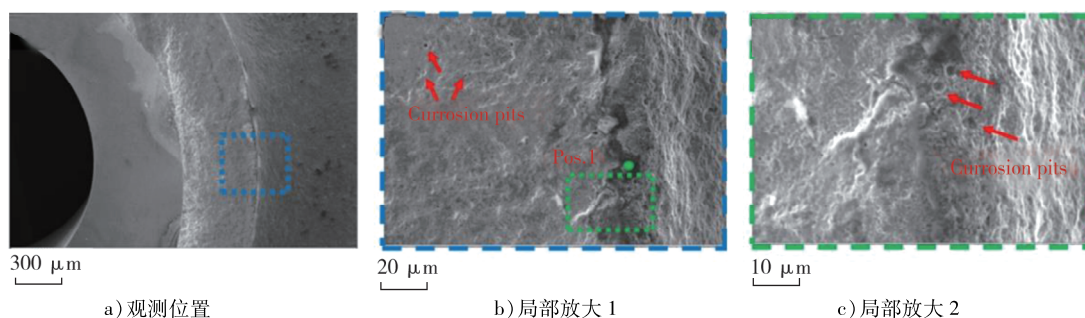
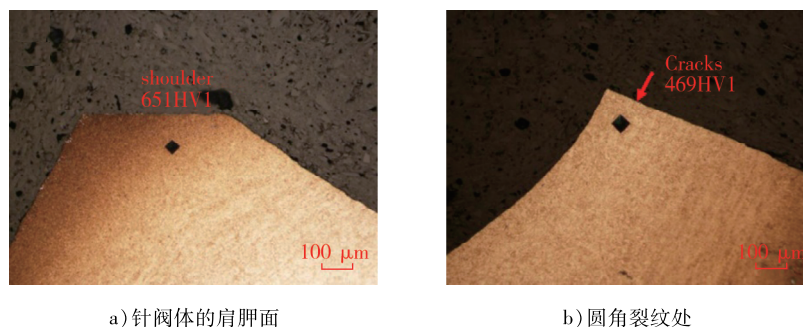


图7 断裂面微观形貌

2.4 显微硬度分析

针阀体的肩胛面与油嘴紧帽形成接触密封,未与燃烧室接触,等同于针阀体热处理后的初始硬度。圆角裂纹处则与燃烧室及燃烧产物直接接触。

通过维氏硬度仪对针阀体肩胛面、圆角裂纹处进行硬度检测,测试位置及测试结果如图8所示。



a) 针阀体的肩胛面

b) 圆角裂纹处

图8 针阀体显微硬度测试位置与测试结果

由图8可知:肩胛处 HV1 硬度为 651,圆角末端即裂纹处的 HV1 硬度为 469。相比于肩胛处针阀体,裂纹处的 HV1 硬度约降低 28%。腐蚀后新生成的物质往往与针阀体在材料性质上存在显著差异,改变针阀体表面的组织结构和力学性能,表现为材料硬度降低。

2.5 工业 CT 图像测量分析

使用工业 CT 分别对故障针阀体、正常针阀体进行图像测量对比分析,结果如图9、10所示,图中灰色部分为金属实体。由图9、10可知:故障针阀体壁厚不均匀,沿扫描横截面检测最小与最大壁厚,分别为 0.98、1.44 mm;正常针阀体壁厚均匀,最小、最大壁厚分别为 1.85、1.89 mm;针阀体径向横截面的扫描结果差异较大,相比正常件,故障针阀体最小壁厚降低 47%;对比沿轴向的扫描结果,故障针阀体肩胛面的过渡圆角较正常零部件有所增大,明显下陷,与横截面检测最小壁厚的结果相对应。由此可见,针阀体受腐蚀作用,导致过渡圆角增大,针阀体壁厚减小。

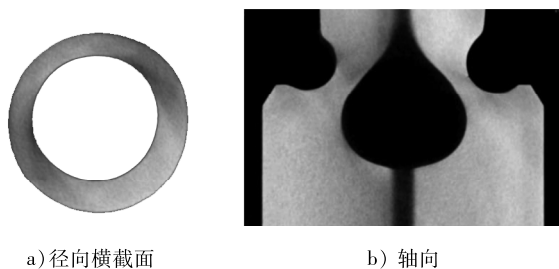


图9 故障针阀体扫描结果

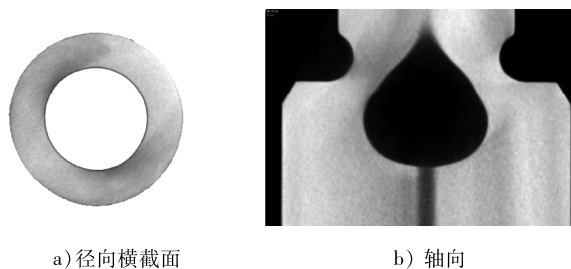


图10 正常针阀体扫描结果

3 分析与讨论

检测发现的 S、Cl 等腐蚀性元素并非发动机内部零部件作用产生,大多是由外部环境经由油路、气路进入到发动机本体内。这些元素参与到复杂的燃烧过程中,形成的产物与针阀体材料发生腐蚀作用,导致材料劣化。在这些外部来源中,使用不合格燃油的情况最常见,劣质燃油中有害元素远超国家标准,显著降低零部件的使用寿命。

针阀体与腐蚀元素的作用过程主要包括两方面:1)硫化物在高温燃烧过程中产生二氧化硫、三氧化硫气体,直接与针阀体发生化学反应,导致材料腐蚀;2)发动机在低温运行时,来自于油路或气路中的水分在高温环境中被汽化,在上升到喷油器针阀体的过程中随温度降低产生冷凝水。燃烧室中的硫化物、氯化物与冷凝水生成硫酸、盐酸等酸性物质,更加强烈地腐蚀金属^[10-11]。

从燃烧产物的传递过程来看,喷油器的结构也会加速这种腐蚀现象的发生。腐蚀性物质通过喷油器垫片与针阀体之间的间隙上升,最终沉积在针阀体与紧帽的端面密封处,即针阀体圆角处。这也是针阀体处于腐蚀性环境中,最先失效位置出现在肩胛圆角的原因。

针对喷油器针阀体腐蚀失效问题,可采取以下解决措施:首先,基于针阀体腐蚀失效机理,使用符合国家标准的规范燃油,故障柴油机在更换符合国家标准的燃油后,经长时间持续运行,未再出现针阀体腐蚀失效的问题;其次在针阀体表面增加涂层以阻隔燃烧产物直接接触,提高抗腐蚀能力,但是涂层表面需致密不得有缺陷,否则会导致基体与涂层间电子的转移,引起金属材料的电化学腐蚀;再次,改变针阀体密封结构,使燃烧产物的窜动路径发生变化,降低腐蚀的影响。

4 结论

1)针阀体肩胛圆角失效位置表面含有 S、Cl 等腐蚀性元素,裂纹表面也存在不规则腐蚀坑,因此,针阀体的开裂失效是由腐蚀导致的。

2)在腐蚀作用下,针阀体肩胛圆角末端即裂纹处的硬度比肩胛处降低了 28%,最小壁厚比正常件降

低了47%。

3) 腐蚀性元素经高温燃烧形成的产物、发动机在低温运行时产物与冷凝水生成的酸性介质,是针阀体被腐蚀失效的直接原因。

4) 使用符合国家标准的燃料是解决针阀体腐蚀性裂纹的有效途径,或者在针阀体表面增加涂层、更改燃烧产物的窜动路径也可以降低腐蚀的影响,提高零部件的使用寿命。

参考文献:

- [1] 韩宇豪. 高压共轨系统喷油器针阀磨损及结构对密封性能影响规律的研究[D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [2] 王尚勇. 现代柴油机电控喷油技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [3] 张进, 李凯, 王浩, 等. 高压共轨系统喷油嘴开裂失效分析及优化[J]. 内燃机与动力装置, 2024, 41(4): 27-32.
- [4] 叶枫, 孙峰, 李立国, 等. 发动机喷油器开裂失效分析[J]. 金属加工(热加工), 2022(9): 79-82.
- [5] 王楚翹. 柴油机喷油器针阀运动对各孔喷射特性影响研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- [6] 刘圣华. 内燃机学[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [7] 张玉峰, 梁成铎, 王成才. 浅谈劣质柴油对柴油机的危害[J]. 建筑机械化, 2008(10): 63-64.
- [8] MEDVED J J, BRETON M, IRVING P E. Corrosion pit size distributions and fatigue lives: a study of the eifs technique for fatigue design in the presence of corrosion[J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26(1): 71-80.
- [9] 黄小光, 王黎明. 腐蚀疲劳点蚀演化及腐蚀疲劳裂纹成核机制研究[J]. 船舶力学, 2016, 20(8): 992-998.
- [10] 刘妍岑, 鲜行, 张从浩, 等. 金属材料腐蚀及表面处理技术研究综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2023, 41(4): 7-12.
- [11] 郑恒伟, 罗红, 余俊锋, 等. 金属材料腐蚀疲劳机理及研究方法综述[J]. 山东化工, 2021, 50(23): 54-55.

Crack analysis of needle body of diesel engine high pressure common rail injector

GENG Xu^{1,2}, WANG Guangming^{1,2}, LIU Ming^{1,2}, JIA Xiaoli^{1,2}, LI Huihui^{1,2}

1. State Key Laboratory of Engine and Powertrain System, Weifang 261061, China;

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

Abstract: To solve the problem of cracking at the scapular corner of the injector needle valve body, methods such as scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer, microhardness testing, and CT are used to analyze the cause and failure mechanism of the fault, and solutions are proposed. The results show that the surface of the failure site contained corrosive elements such as S and Cl, and there are multiple irregular corrosion pits on the crack surface. The Vickers hardness at the crack site decreased by 28% than that at the scapular corner of the needle valve body, and the minimum wall thickness decreased by 47% compared to the normal part, and the main cause of needle valve body failure is corrosive cracks. Use fuel that meets national standards and add coatings on the surface of the needle valve body can solve the problem of needle valve body corrosion failure.

Keywords: diesel engine; needle valve body; crack; corrosion; injector

(责任编辑: 臧发业)