

# 高压共轨系统喷油嘴开裂失效分析及优化

张进,李凯,王浩,刘井年,许连超

潍柴动力股份有限公司,山东 潍坊 261061

**摘要:**为解决某高压共轨系统油嘴开裂故障,通过宏观形貌分析、扫描电镜分析、能谱分析、断口金相分析、硬度测试等查找故障原因,并对油嘴材料、结构和工艺进行优化。分析结果表明:机组用燃油中含有P、K等腐蚀性元素形成酸性环境,安装工艺导致油嘴肩部处存在非对称拉应力,肩脚圆角过小导致应力集中,油嘴表面马氏体组织粗大、硬度高造成的应力敏感是油嘴开裂的主要原因。采取优化油嘴材料,将油嘴肩部处圆角半径由0.45 mm加大到1.20 mm,在喷油器和高压连接器最终紧固前增加预紧工序等优化措施,优化后油嘴经过4 000 h的耐久试验未开裂,有效解决油嘴开裂故障。

**关键词:**高压共轨;喷油嘴;沿晶开裂;氢应力腐蚀

中图分类号:TK423.8

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2024)04-0027-06

**引用格式:**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.

ZHANG Jin,LI Kai,WANG Hao,et al. Cracking failure analysis of nozzle for high pressure common rail injector and its optimization[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2024,41(4):27-32.

## 0 引言

随着石油资源日渐枯竭以及排放标准要求日益严格,经济性和排放性能更好的电控高压共轨燃油系统已取代传统机械式燃油系统成为现代柴油机的主流<sup>[1-2]</sup>。高压共轨系统主要由喷油泵、共轨管、高压油管和喷油器组成<sup>[3-4]</sup>。喷油器作为燃油系统的末端执行机构,其头部喷油嘴结构(以下简称油嘴)直接伸入燃烧室内,对燃油的雾化效果产生决定性影响。油嘴失效可能导致发动机出现燃烧不充分、冒黑烟、抖动等故障。由于油嘴在柴油机工作时直接与燃烧产物接触,因此其材质的要求除了耐高温高压外,还需要耐腐蚀<sup>[5]</sup>。

某型喷油器在使用过程中出现油嘴开裂故障,本文中通过进行宏观形貌分析、扫描电镜分析、能谱分析、断口金相分析、硬度测试等,确定故障的根本原因并针对性地提出了改进建议。

## 1 故障描述

某型高压共轨发动机在东南亚海边作为常用发电机组使用,常用运行温度在45℃左右。油嘴结构如图1所示。

在运行过程中发动机出现冒黑烟、油耗增大故障。3个故障喷油器的运行时间分别为2 825、2 454、3 000 h。更换喷油器后故障解决。将故障喷油器在台架上进行打压试验,发现在油嘴螺帽处存在燃油泄漏的情况。

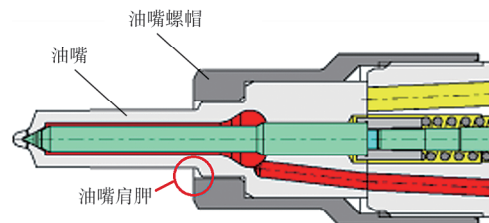


图1 油嘴结构示意图

收稿日期:2023-12-20

第一作者简介:张进(1997—),男,山东聊城人,工学硕士,工程师,主要研究方向为柴油机高压共轨燃油系统,E-mail:zhangjin05@weichai.com。

## 2 故障原因分析

### 2.1 宏观形貌分析

拆检故障喷油器,目视可见油嘴前端表面及肩胛圆角处有黑色附着物,与在实验室进行 2 500 h 耐久试验后的同型号喷油器有明显差异。故障油嘴肩胛圆角圆片及与同型号油嘴台架试验形貌对比如图 2 所示。

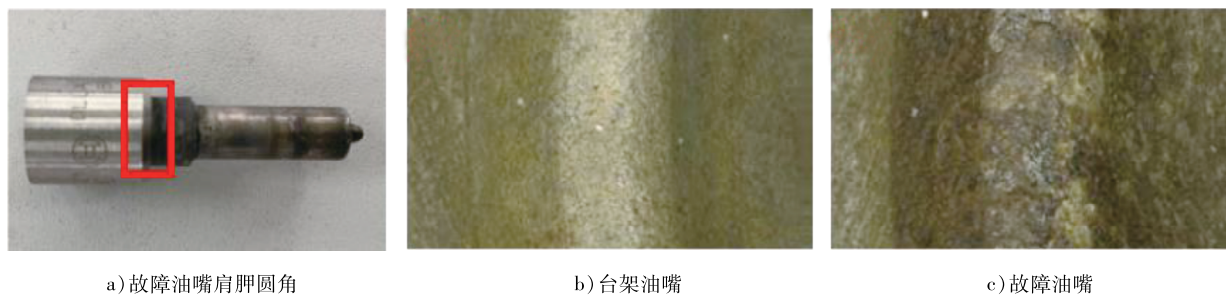


图 2 故障油嘴肩胛圆角圆片及与同型号油嘴台架试验形貌对比图

对故障喷油器进行渗透探伤<sup>[6]</sup>,结果如图 3 所示。由图 3 可知:在油嘴肩胛存在圆弧形裂纹,长度为截面周长的 1/6~1/3。开裂导致燃油严重外漏,从而导致喷油器喷射失效。

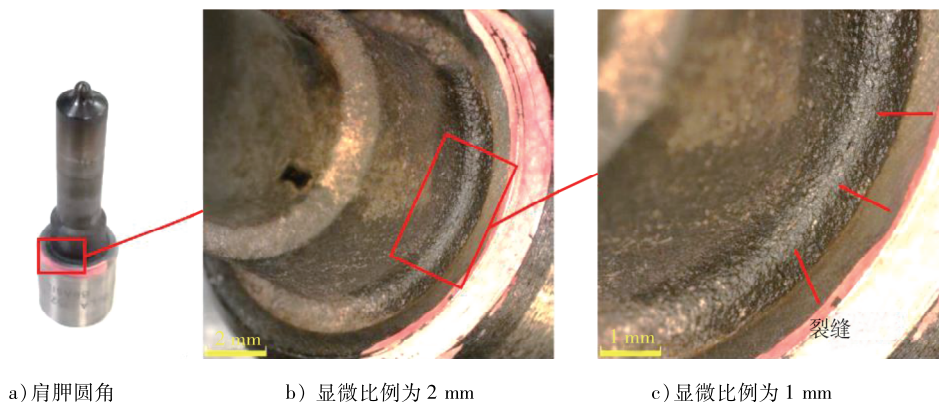


图 3 故障喷油器油嘴探伤结果

将肩胛圆角处裂缝剖开后,断口宏观形貌如图 4 所示。由图 4 可知:裂纹在外壁开裂向内壁扩展,且断口表面氧化严重。

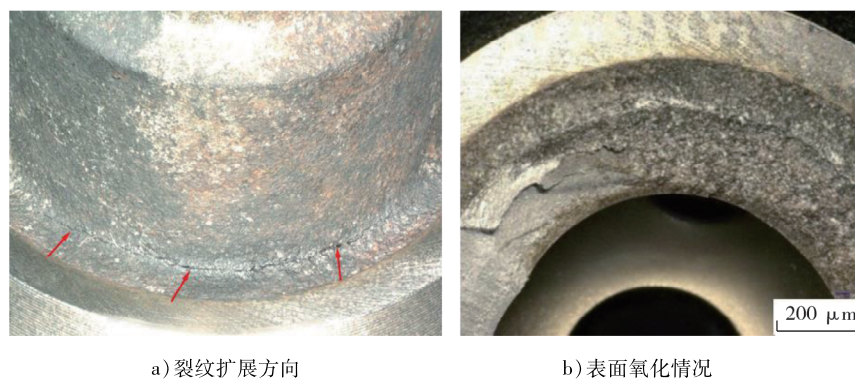


图 4 油嘴肩胛断口形貌图

高压燃油经高压连接器(high pressure connector, HPC)进入喷油器油口,喷油器与 HPC 的安装示意图如图 5 所示。通过进一步检查发现,HPC 对侧的喷油器表面均有明显磨损痕迹,如图 6 所示,油嘴肩胛

裂缝所在的位置正在此侧。

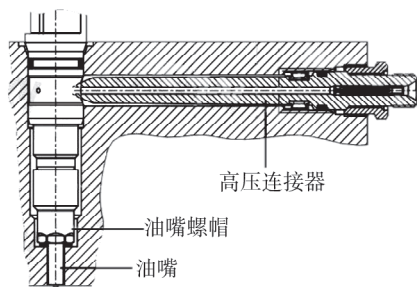
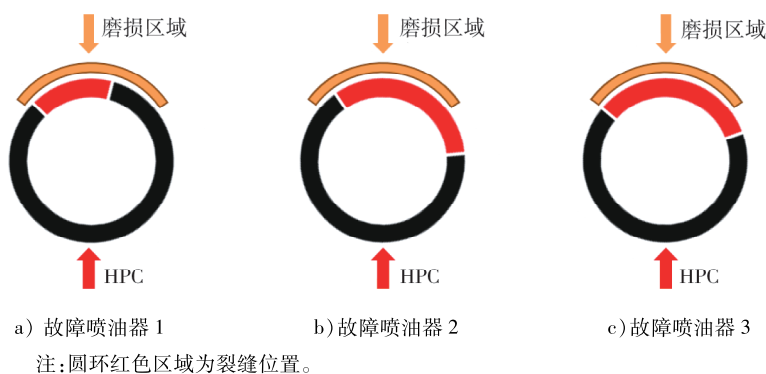


图5 喷油器与 HPC 接头安装示意图



图6 故障喷油器磨损情况

油嘴裂缝及喷油器磨损区域分布示意图如图7所示。由图7可知:3个喷油器的裂缝位置和磨损区域在同一侧,说明裂缝产生原因和喷油器磨损原因有一定关系。



注:圆环红色区域为裂缝位置。

图7 油嘴裂缝及喷油器磨损区域分布示意图

对照安装要求查核喷油器的配合间隙,均满足要求。继续核查喷油器与 HPC 的安装工艺,发现喷油器最终紧固之前并没有进行预紧,推断肩胛处存在非对称拉应力。油嘴肩胛圆角半径仅为 0.45 mm,该位置为应力集中处,容易产生裂纹和疲劳破坏等问题。但同样机型在试验室与其他装机地区并没有发现油嘴肩胛开裂故障,推断应力集中与非对称拉应力并不是故障的主要原因或单一原因。

## 2.2 扫描电镜与能谱分析

对喷油嘴进行分区域电镜扫描<sup>[7]</sup>,表面的扫描结果如图8所示。由图8可知:油嘴肩胛面和小外圆表面均有明显的腐蚀痕迹。

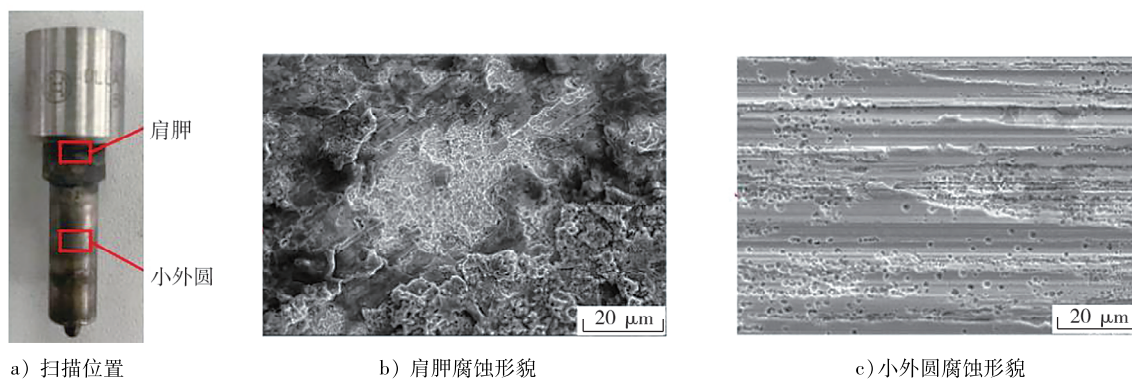


图8 喷油嘴分区域电镜扫描位置及腐蚀形貌

结合台架试验喷油器和故障喷油器油嘴形貌,推测开裂油嘴上的黑色附着物为腐蚀产物,腐蚀元素来自故障机组使用的燃油。油嘴断口的电镜扫描结果如图9所示。由图9可知:整个断口上断裂路径沿晶界延伸,属于典型的沿晶断裂特征,并且在A区域,即油嘴外壁区域存在腐蚀坑。

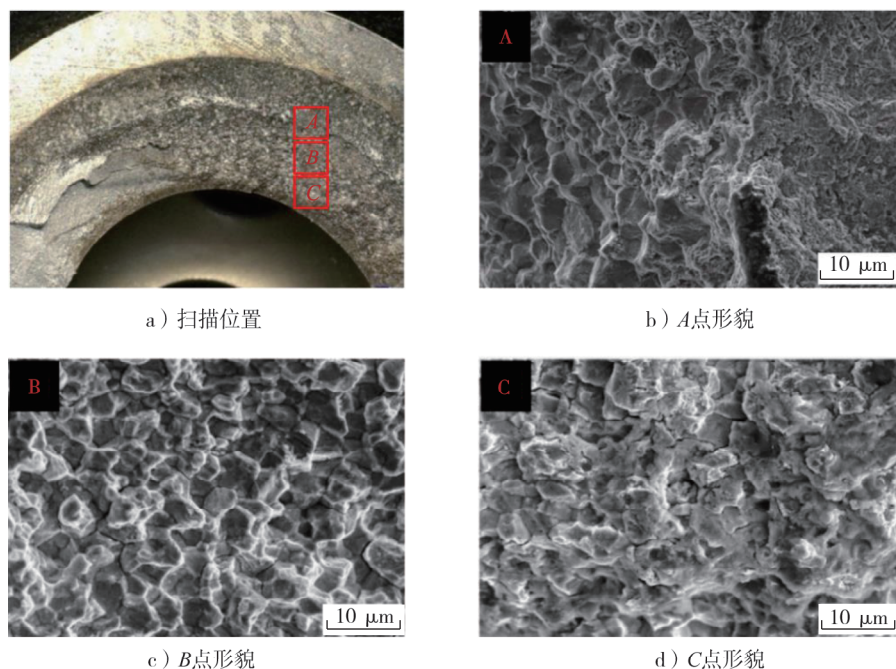


图9 油嘴断口区域电镜扫描形貌

为了进一步分析腐蚀物成分,对油嘴断口进行能谱分析<sup>[8]</sup>,扫描区域如图10所示,扫描结果如表1所示。由表1可知:1)O元素的质量分数大于20%,说明断口氧化严重,与体视及电镜结果相对应;2)断口处存在Na、P、K等腐蚀性元素。同时在肩胛表面还检测出Cl元素。

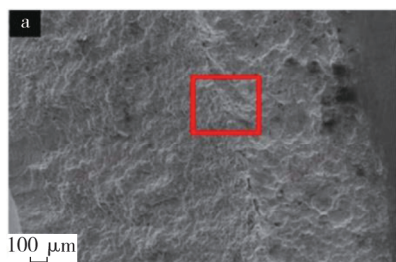


图10 油嘴断口能谱分析扫描区域

表1 油嘴断口能谱分析结果

元素名称	C	O	Na	Si	P
质量分数/%	12.55	26.15	1.86	0.89	0.26
元素名称	K	Cr	Ni	Fe	
质量分数/%	0.15	1.96	1.36	54.82	

检测机组用燃油和国内用燃油的成分,结果如表2所示。

表2 油品成分检测结果

油品来源	固体微粒的 质量浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	油品中各成分的质量分数/10 <sup>-6</sup>				
		Cl	S	K	P	Na
机组用柴油	0.3	1.4	6.8	0.11	<0.1	<0.1
国内用柴油	—	—	3.0	0.10	—	—

注:—为无法获得。

由表2可知:机组用燃油中也含有S、P、Cl、K等元素,推断油嘴断口的腐蚀性元素来自燃油。此外故障机组的常用工况负荷较低,燃料燃烧不充分产生碳烟,腐蚀性元素随碳烟附着在油嘴上,肩胛处间隙小,空气流动性差,碳烟在此处附着、堆积形成积碳。积碳进一步隔绝肩胛与燃烧室内的环境,喷油器衬套周围的冷却水降低环境温度,使水蒸气冷凝,S、P、Cl、K等腐蚀性元素形成酸性环境,对油嘴进行腐蚀。

发动机高温高湿的工作环境加速了腐蚀过程。根据油嘴肩胛处腐蚀情况以及应力集中情况推测油嘴开裂的原因为氢应力腐蚀。

### 2.3 断口金相分析与硬度测试

油嘴材料为 18CrNi8 渗碳钢,对断口附近表面进行金相分析,根据文献[9]确定其马氏体、残留奥氏体和碳化物的等级并对芯部组织进行评价。油嘴非断裂表面、断口附近表面、芯部金相组织如图 11 所示。由图 11 可知:油嘴表面组织为细针状马氏体,级别为 3~4 级,该等级的马氏体组织硬脆且比较大,增加了内部应力和产生微裂纹的倾向,在局部高应力作用下容易发生开裂<sup>[10]</sup>;残余奥氏体级别为 3~4 级,碳化物级别为 3 级;在金相上可以看到断口表面存在腐蚀坑;芯部基体组织为低碳马氏体加少量游离铁素体,等级为 3 级。

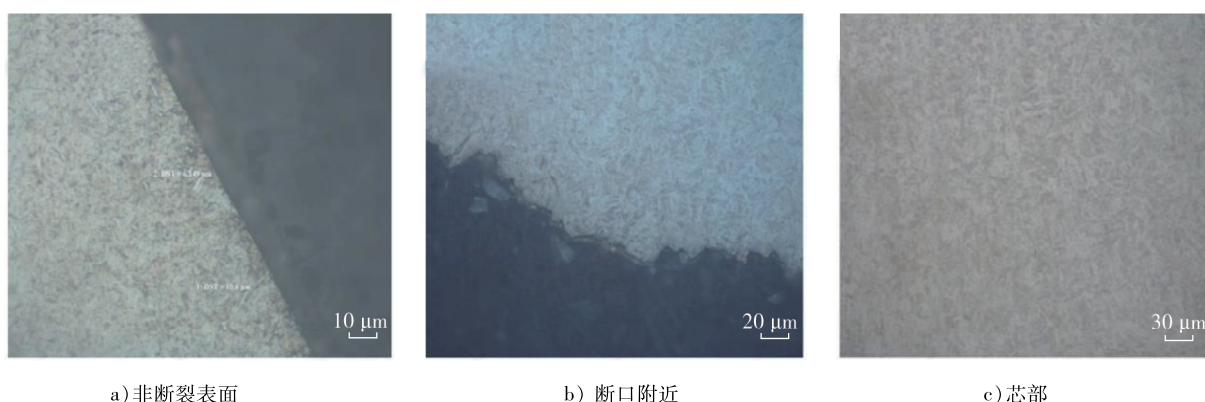


图 11 油嘴非断裂表面、断口附近表面、芯部金相组织

在喷油器断口附近两处圆角(位置 1、3)及内壁(位置 2)进行载荷为 1.96 N 的维氏硬度(vickers hardness, HV)梯度测试,测试位置及结果如图 12 所示。由图 12 可知:3 个位置的淬硬层深度分别为 0.10、0.48、0.25 mm;芯部的平均硬度为 HV441,而外壁表面硬度接近 HV650;相对于芯部,油嘴肩胛表面应力较高,对应力腐蚀更敏感。

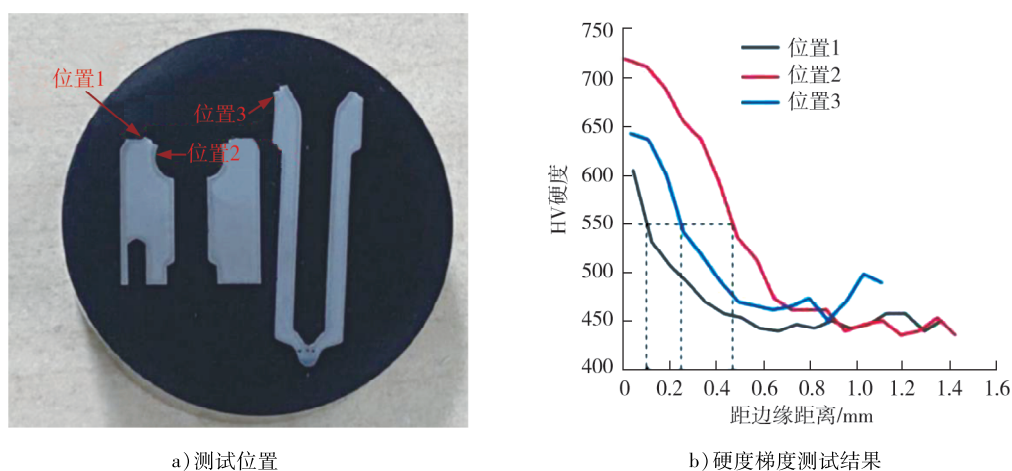


图 12 硬度梯度测试位置及结果

氢应力腐蚀发生的条件包括材料具有较大的硬度、存在较大的拉应力、处于腐蚀环境等。通过上述分析可知:由于机组使用的油品较差,燃油中含有 P、K 等腐蚀性元素,发动机低负荷工况与高温高湿的工作环境促进了油嘴腐蚀的产生;安装工艺导致油嘴肩胛处存在非对称拉应力,结构上肩胛圆角过小导致应力集中,油嘴表面马氏体组织粗大、硬度高,对应力腐蚀有较高的敏感性;腐蚀、应力与材料本身的性质共同作用导致肩胛处发生氢应力腐蚀,酸性物质首先在肩胛处腐蚀出微裂纹,在拉应力作用下氢原子

沿晶界渗透,使裂纹沿着晶界延伸,最终导致肩胛开裂,燃油在开裂处泄漏使喷油器喷射失效。

### 3 优化与验证

针对故障原因采取以下优化措施:1)提高油品质量减少腐蚀性;2)提高材料性能,将油嘴材料由 18CrNi8 改为 4Cr5MoSiV1,与之前相比表面强度相当,芯部强度更高,高温性能更好;3)改进结构,将油嘴肩胛处圆角半径由 0.45 mm 增大到 1.20 mm,避免应力集中;4)优化工艺,在喷油器和高压连接器最终紧固之前增加预紧工序,消除或减小装配应力。

将优化后的喷油器装在发动机上进行实机验证,在常用工况下运行 4 000 h,未发生故障。试验后将喷油器进行拆解,喷油器油嘴外观如图 13 所示,在肩胛部位没有发现微裂纹。



图 13 优化喷油器耐久试验后油嘴外观

### 4 结束语

通过宏观形貌分析、扫描电镜分析与能谱分析、断口金相分析与硬度测试等对某高压共轨系统油嘴开裂故障原因进行分析,确定故障的根本原因是氢应力腐蚀导致油嘴肩胛部位发生沿晶开裂,燃油泄漏最终导致喷油器失效。针对失效原因对喷油器的材料、结构、装配工艺以及使用油品进行优化后,喷油器满足预期使用寿命。

#### 参考文献:

- [1] 温占永. 柴油机电控高压共轨增压式喷油器的设计与仿真研究[D]. 天津:天津大学,2012.
- [2] 孙春鹏. 柴油机整体式喷油器设计及有限元分析[D]. 武汉:华中科技大学,2004.
- [3] 冯皓明. 基于扭矩控制的高压共轨柴油机燃油喷射系统的研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2009.
- [4] 张秀梅, 堰振乾. 柴油机电控高压共轨燃油系统概论[J]. 农业装备, 2020(4): 38-40.
- [5] 颜靖, 黄东亮, 向洋, 等. 高压共轨式喷油器开裂失效分析[J]. 汽车工艺与材料, 2023(8): 62-66.
- [6] 王伟, 赵建军, 张丽敏, 等. 渗透检测技术探伤缺陷及其显示特征的应用[J]. 锻造与冲压, 2023(19): 66-69.
- [7] 刘显宏. 柴油发动机气缸盖喷油器孔开裂故障分析及应对[J]. 装备制造技术, 2020(11): 132-134.
- [8] 宋全, 曹辉辉, 张甜琪, 等. 液压工装螺栓断裂失效分析[J]. 金属热处理, 2024, 49(6): 301-304.
- [9] 全国热处理标准化技术委员会. 钢件渗碳淬火回火金相检验:GB/T 25744—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [10] 何静, 郑鑫, 沈亚冬, 等. 高压共轨喷油嘴针阀体开裂失效分析[J]. 现代车用动力, 2018(1): 39-43.

## Cracking failure analysis of nozzle for high pressure common rail injector and its optimization

ZHANG Jin, LI Kai, WANG Hao, LIU Jingnian, XU Lianchao

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

**Abstract:** To solve the nozzle cracking failure in a certain high-pressure common rail system, macro morphology analysis, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis, fracture metallographic analysis, and hardness testing, are investigated to find the causes of failure. The nozzle material, structure and process, are

(下转第 40 页)