

柴油发动机油管开裂分析

陈健良 梁靖谐* 王艺东

广西玉柴机器股份有限公司, 中国·广西 玉林 537005

摘要: 针对多款柴油发动机高压油管在使用过程中出现的纵向开裂故障, 采用宏观形貌观测、断口显微分析、金相组织检验、力学性能测试, 并结合有限元仿真计算等手段开展全面失效分析。结果表明: 裂纹均从油管内壁多处萌生, 裂纹源区呈现韧窝特征, 属于过载断裂; 裂纹向外扩展区域可见典型疲劳辉纹, 为疲劳断裂, 最终形成纵向贯穿裂纹。结合装机案例与台架试验可知, 高压燃油产生的高频脉冲油压是主要载荷诱因, 油管未实施内壁强化工艺是开裂的根本原因。采用内壁自增强强化工艺并完善图纸及工艺标准后, 该故障得到彻底解决。

关键词: 柴油机; 高压油管; 开裂; 过载断裂; 疲劳断裂; 内壁强化

Analysis on Cracking of Fuel Pipes for Diesel Engine

Chen Jianliang, Liang Jingxie*, Wang Yidong

Guangxi Yuchai Machinery Co., Ltd., China Guangxi Yulin 537005

Abstract: Aiming at the longitudinal cracking failures of high-pressure fuel pipes of various diesel engines during service, comprehensive failure analysis was conducted by means of macroscopic morphology observation, fracture microscopic analysis, metallographic structure inspection, mechanical property test and finite element simulation. The results show that cracks initiate at multiple locations on the inner wall of the pipes. The crack source areas present dimple characteristics, which belong to overload fracture. Typical fatigue striations are observed in the crack propagation zones, indicating fatigue fracture, and longitudinal through cracks are finally formed. Combined with field application cases and bench tests, the high-frequency pulsating oil pressure generated by high-pressure fuel is the main load inducement, and the absence of inner wall strengthening process on the pipes is the root cause of cracking. The failure has been completely eliminated after adopting the inner wall self-reinforcement process and improving relevant drawings and process standards.

Keywords: Diesel engine; High-pressure fuel pipe; Cracking; Overload fracture; Fatigue fracture; Inner wall strengthening

0 引言

柴油机高压油管在燃油系统中扮演着至关重要的角色。它主要利用高压环境对燃油进行压缩, 以此维持稳定的存储压力。同时, 高压泵的作用在于平衡因脉动供油产生的压力波动, 确保即使燃油从共轨中喷射出去, 共轨内的压力也能保持在一个相对恒定的水平。

高压油管是燃油系统的主要部件之一, 也属于柴油机钟高精度、高可靠性要求的部件, 一旦出现内壁磨损、接头密封失效、管壁裂纹等问题, 会直接导致燃油泄漏、喷油压力不足, 进而引发柴油机启动困难、功率不足、排气冒黑烟等故障。本公司发动机高压油管近期发生了多次开裂事故, 造成了严重的影响, 和一定得经济损失。为了查明高压油管开裂的原因, 本文在市场故障件中回厂一件进行分析。本文从宏观形貌、化学成分、显微组织、硬度性能等方面对高压油管开裂的原因进行了分析。

1 材料力学性能分析

1.1 宏观分析

送检高压油管, 见图 1, 红框部位为开裂处,



图1 送检的增压器叶轮

图 2 图 3 是裂纹打开后的断口、匹配断口在立体显微镜下的形貌, 裂纹从内壁多处起源, 在不同高度起始的裂纹在扩展中相遇, 汇合成辐射状台阶或条纹。裂纹向外扩展, 直至贯穿至外壁表面, 形成沿高压油管纵向分布的裂纹。



图2 裂纹打开后的断口、匹配断口

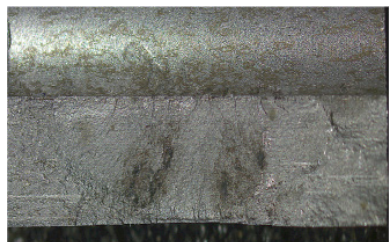


图3 裂纹打开后的断口、匹配断口

图 4 是裂纹断口稍放大后的形貌。



图4 断口稍放大后的形貌

1.2 显微观察

显微观察分析：图 5 是断口低倍形貌（摆放的方位转动了 90° ）。

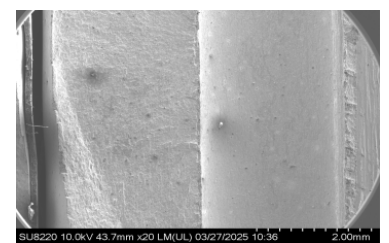


图5 叶片1断口源区及邻近区域的低倍形貌
对叶片 1 断口源区放大，见图 6。

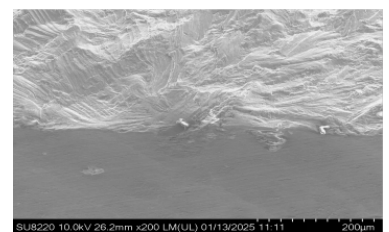


图6 断口低倍形貌

图 7 为其中一处断口源区（位于靠内壁的区域，测得由内壁往左的尺寸约 0.07mm ）及裂纹扩展区。

图 8 显示另一处断口源区及裂纹扩展区，裂纹扩展方

向如箭头所指。

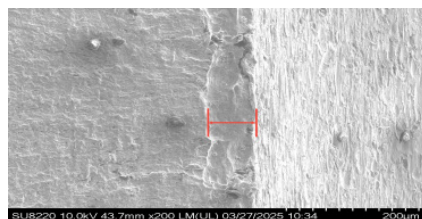


图7 其中一处断口源区及裂纹扩展区

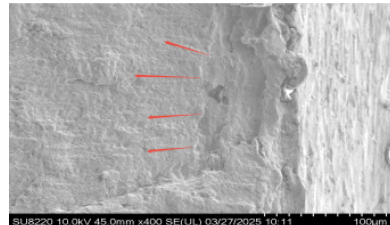


图8 另一处断口源区及裂纹扩展区

高倍下，断口源区出现韧窝花样，见图 9，这是材料过载断裂的典型特征。源区再往左，为疲劳断裂。

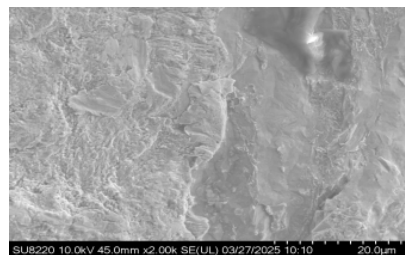


图9 断口源区出现韧窝花样（高倍）

图 10 是另一处断口源区的低倍形貌。

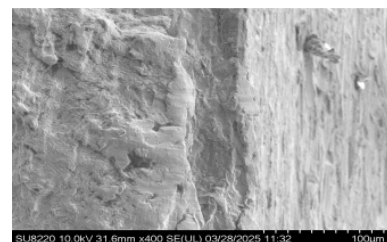


图10 另一处断口源区的低倍形貌

高倍放大后，此处断口源区也可见韧窝花样，如图 11 所示，说明这是具有代表性的断口细节特征。

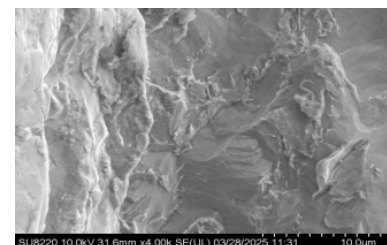


图11 叶片2断口源区放大

断口源区再往左的裂纹扩展区为疲劳断裂，图 12 是其中具有代表性的区域。

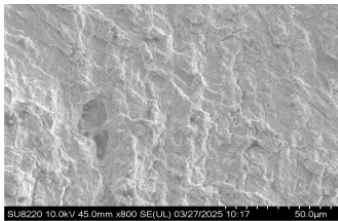


图12 断口源区再往左的裂纹扩展区为疲劳断裂
在高倍下，裂纹扩展区显示典型的疲劳辉纹，见图 13。

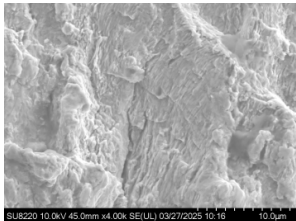


图13 裂纹扩展区在高倍下显示典型的疲劳辉纹

1.3 金相分析

从紧邻开裂处取横截面作为检测磨面，除了开裂处
外，内壁其余部位未发现裂纹，见图 14、图 15。

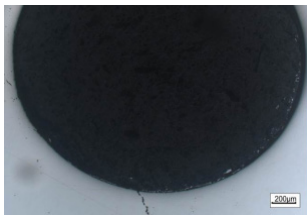


图14 紧邻开裂处的横截面



图15 紧邻开裂处的横截面（放大）
腐蚀后，组织为铁素体 + 部分珠光体，见图 16、图 17。



图16 横截面金相组织

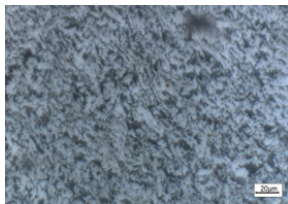


图17 横截面金相组织（放大）

再取纵剖面作为检验磨面，金相组织呈纵向变形的特
征，见图 18、图 19。

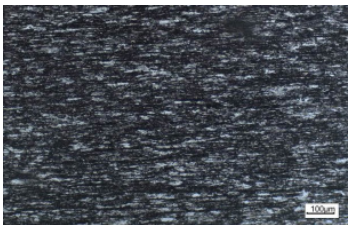


图18 纵剖面金相组织



图19 纵剖面金相组织（放大）

1.4 力学性能分析

从高压油管开裂处邻近取样检测，结果如表 1：

表1 力学性能

玉柴内部 材料牌号	以前材料牌号 （德国）	抗拉强度 （MPa）	断后伸长率 （%）	硬度 （HV0.5）
YCGY5	DSG1800	≥740	≥13	---
实测值		836	16.5	278

由表 1 可知，油管抗拉强度、断后伸长率均高于技术
指标，硬度指标正常，原材料力学性能完全满足设计要求，
排除材质不合格导致开裂的因素。

2 载荷有限元仿真分析

采用 Abaqus 有限元软件还原柴油机实际运行工况，
分别分析油压、振动载荷对高压油管静强度、疲劳强度的
影响。仿真基础条件：振动载荷设定为上下方向 20g，前
后、左右方向各 10g。

油压对油管强度的影响：

设置两组油压区间开展对比仿真，计算结果见表 2。

表 2 不同油压下油管强度安全系数

油压工况	最小静强度安全系数	最小疲劳安全系数
（50-170）MPa	1.96	1.24
（50-210）MPa	1.71	1.05

结合仿真数据可知：随着系统油压升高，油管静强
度、疲劳安全系数同步下降；当油压达到 200 MPa 时，疲
劳安全系数已接近临界值，高压脉冲油压是影响油管使用
寿命的核心因素。

3 失效机理与原因分析

3.1 失效机理

电控单体泵工作时，电磁阀瞬时启闭，油管内油压在

极短时间内由 0 骤升至 140 MPa 以上, 形成高频高压脉冲冲击。高压油管可等效为多层轴向筒状结构, 内壁直接接触高压燃油, 受力面积最小、承载应力最大, 局部应力超过材料强度极限, 在内壁多处萌生过载微裂纹。

柴油机持续运转过程中, 高压脉冲载荷反复循环, 内壁微裂纹以疲劳形式不断向外扩展, 裂纹逐步延伸至外壁, 最终形成贯穿管壁的纵向裂纹, 引发燃油泄漏。该失效机理在 AV700、D2000、4E 等多款同类型机型中完全复现。

3.2 根本原因

依据企业标准 Q/YC739.2--2018《高压油管工程规范》规定: 系统压力超过 1400 bar 的电控单体泵系统、压力超过 1800 bar 的高压共轨系统, 配套高压油管必须强制开展内壁强化处理。

经图纸与生产工艺核查:

(1) 本次失效的 TH100-1104100B、TH100-1104100C ($\Phi 8\text{mm}$) 油管, 产品图纸未标注内壁强化工艺要求, 生产环节未执行该工序;

(2) 同系列 $\Phi 6.35\text{mm}$ 规格油管, 图纸明确要求内壁强化(强化压力 $\geq 6000\text{ bar}$), 实际生产全部落实工艺, 该规格油管未出现任何开裂故障;

(3) 高压油管在拉拔、弯折加工过程中, 内壁会不可避免产生原生微裂纹, 缺少内壁强化工艺的防护, 微裂纹在高压脉冲载荷下快速扩展, 最终导致批量开裂。

综上, 未按标准执行内壁强化工艺, 是高压油管开裂的根本原因。

4 改进措施及验证

4.1 内壁自增强强化工艺原理

内壁强化采用自增强工艺: 向油管内部施加 6000bar 以上超高压, 使管壁内层发生塑性变形, 外层保持弹性状态; 卸载后, 油管内壁形成稳定的周向残余压应力。机组正常工作时, 残余压应力可抵消燃油工作压力, 同时有效束缚内壁微裂纹扩展。相关试验数据表明, 经内壁强化处理的高压油管, 疲劳寿命可提升 5 倍以上。

4.2 具体整改方案

(1) 工艺补全: 对系统压力 $\geq 1400\text{bar}$ 电控单体泵; $\geq 1800\text{bar}$ 共轨系统的所有高压油管, 统一增加内壁强化工序, 根据管径匹配对应强化压力(常规 6000 bar 及以上);

(2) 图纸修订: 在 TH100-1104100B、TH100-1104100C 等问题油管图纸中, 补充内壁强化工艺技术要

求, 做到图纸与工艺一致;

(3) 标准落地: 全系列高压油管严格执行 Q/YC 739.2--2018 规范, 按系统压力、管径分类管控工艺, 建立工序抽检机制。

4.3 改进后试验与市场验证

(1) 台架耐久试验: 选取整改后的油管装配至故障同款 V 型船用柴油机、4E 机型柴油机, 完成 500h 强化耐久试验, 油管无开裂、无渗漏现象;

(2) 市场装机验证: 将整改后油管批量替换市场故障件, 累计装机 300 台柴油机, 持续跟踪 6 个月, 未再出现油管开裂故障, 故障彻底消除。

5 结语

(1) 本次柴油发动机高压油管失效模式为内壁多源过载断裂 + 疲劳扩展断裂, 裂纹由内壁起裂, 最终形成纵向贯穿裂纹; 油管金相组织、力学性能均符合技术要求, 开裂与原材料、冶金缺陷无关。

(2) 电控单体泵系统产生的高频高压脉冲油压是油管开裂的主要载荷诱因, 振动载荷对失效几乎无影响。

(3) TH100-1104100B、TH100-1104100C 等油管图纸缺失内壁强化要求、生产未执行对应工艺, 是本次批量开裂的根本原因, AV700、D2000、4E 等机型同类失效也印证了该结论。

(4) 全面推行内壁自增强强化工艺、修订产品图纸、严格执行企业标准, 可有效解决高压油管纵向开裂问题, 建议在全系列高压燃油系统油管中常态化应用该工艺。

参考文献:

- [1] 杨圣奇, 苏承东, 徐卫亚. 大理岩常规三轴压缩下强度和变形特性的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(3).
- [2] 周应华, 周德培, 封志军. 三种红层岩石常规三轴压缩下的强度与变形特性研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(04).
- [3] 许宝田, 阎长虹, 许宏发. 三轴试验泥岩应力 2 应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6).
- [4] 王贵荣, 任建喜. 基于三轴压缩试验的红砂岩本构模型[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2006, 26(6).

作者简介: 陈健良(1983-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向: 柴油发动机零部件失效分析。

* 通讯作者: 梁靖谐(1986-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 柴油发动机零部件失效分析。