

## 结构与可靠性

## 某柴油机曲轴单拐疲劳试验件断裂失效分析

徐聪聪, 焦亚飞, 刘 凯, 巫立民, 梁 刚, 李丽婷

(七一一研究所, 上海 201108)

**摘 要:** 针对某柴油机曲轴单拐平台弯曲疲劳试验中, 曲轴圆角处发生非正常断裂现象, 建立曲轴疲劳破坏故障树, 从试验载荷过大、曲轴本体结构设计强度不足、曲轴制造缺陷等方面进行排查。最终确定导致曲轴单拐圆角失效的主要原因为圆角表面存在氧化腐蚀坑。分析结果为曲轴设计、生产过程控制及后续质量验收提供了重要依据。

**关键词:** 曲轴; 疲劳试验; 断裂; 氧化腐蚀

**中图分类号:** TK423.3<sup>+</sup>1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4357(2019)05-0043-04

## Fracture Failure Analysis of Single-Throw Crankshaft Fatigue Test Piece for a Diesel Engine

Xu Congcong, Jiao Yafei, Liu Kai, Wu Limin, Liang Gang, Li Liting

(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

**Abstract:** During the bending fatigue bench test of a diesel engine single-throw crankshaft, abnormal fracture occurred at the corner of the crankshaft. A fault tree for fatigue failure of crankshaft was established. The main reasons are investigated from the aspects of excessive test load, insufficient strength of crankshaft structure and defects of crankshaft manufacturing. And the main reason for the failure at the corner of the single-throw turned out to be oxidative corrosion pits on the surface of the corner. The research provides good reference to the design, manufacturing, and quality acceptance of crankshafts.

**Key words:** crankshaft; fatigue test; fracture; oxidative corrosion

## 0 引言

疲劳试验是考核柴油机受力零部件可靠性的主要手段之一。曲轴是柴油机的关键件, 为了得到曲轴实际疲劳强度, 一般会采用单拐弯曲疲劳试验来评估其可靠性。通过曲轴单拐弯曲疲劳试验可验证曲轴实际疲劳强度是否满足曲轴许用疲劳强度要求; 验证曲轴是否具有安全裕度; 获得曲轴单拐实物最大疲劳强度极限。

曲轴所承受的载荷主要为弯曲扭转复合载荷。弯曲疲劳破坏是曲轴失效的最常见形式。曲轴弯曲疲劳试验的危险部位一般为连杆轴颈过渡圆角和主轴颈过渡圆角处, 其中以连杆轴颈过渡圆角处破坏

更多<sup>[1]</sup>。如在试验过程中发生非正常断裂, 其结果会影响曲轴真实疲劳强度的判定。

## 1 单拐试验件断裂问题描述

某柴油机曲轴进行单拐疲劳试验, 同厂家同批次单拐疲劳试验件, 第一根顺利完成通过性试验, 第二根在加载约 850 万次时, 监控台提示因曲轴断裂停止试验。拆检曲轴并进行着色探伤, 发现: 从动摆曲柄销圆角正下方、圆角内侧距离圆角与轴颈交界处 10 mm, 有长约 130 mm 的裂纹, 如图 1、图 2 所示。

为得到该曲轴的真实疲劳强度, 须查找试验件断裂的真正原因。

收稿日期: 2018-11-21; 修回日期: 2019-01-04。

作者简介: 徐聪聪(1985-), 女, 主要研究方向为动力单元零部件结构设计, xucongcong@csic711.com。



图1 开裂曲轴单拐试验件

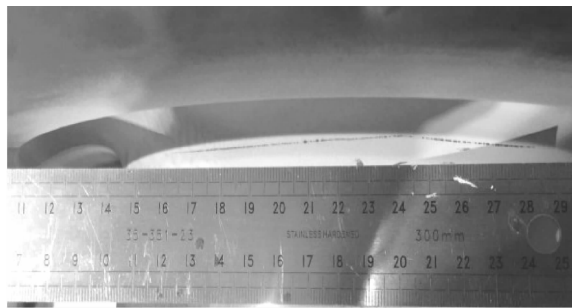


图2 裂纹形貌

## 2 原因分析

采用故障树的方法对曲轴圆角开裂原因进行逐一分析、排查。根据故障现象建立如图3所示故障树。

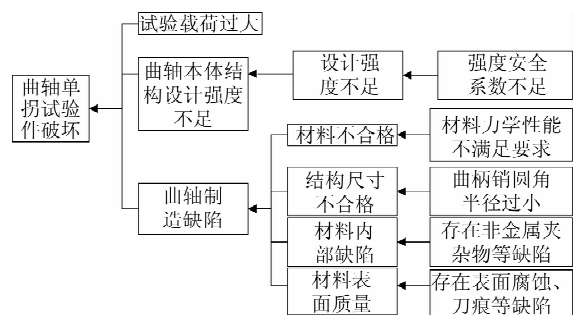


图3 曲轴单拐试验件破坏故障树

### 2.1 试验载荷过大

本次试验载荷采用动态标定法确定。试验测控系统自动利用最小二乘法原理对电机转速与试验件圆角应力关系进行拟合,载荷精度在 $\pm 2\%$ 以内。根据试验确定的载荷应力值,以及上述动态标定确定的转速与应力的拟合曲线,明确试验工况对应的试验转速。本次试验动标结果如图4所示。

试验过程中,测控系统自动记录循环次数及实时转速、实时加速度值。本次试验实际运行平均转速与设定试验目标转速差值在 $5 (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$ 以内,实际应力值如图4所示。在试验过程中未出现超速现象(即转速超过设计目标转速),试验载荷

稳定。因此可排除试验载荷过大的可能因素。

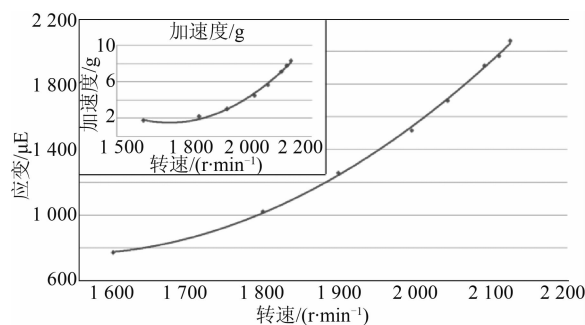


图4 曲轴单拐试验动态标定曲线

### 2.2 曲轴本体结构设计强度不足

依据 CCS《钢质海船入级规范》,采用 AVL Designer 软件对曲轴结构强度进行一维校核计算。在最高燃烧压力、最高转速时,曲柄销圆角合格系数满足船规要求,详见图5。

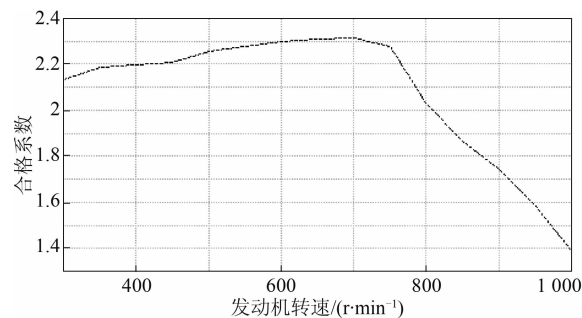


图5 曲柄销圆角合格系数

采用 AVL EXCITE Power Unit (PU) 多体动力学分析软件校核最高转速、最高燃烧压力时曲轴圆角的安全系数。曲柄销最小安全系数高于评判标准,满足安全要求。

对曲轴单拐试验件在弯曲疲劳试验台上实际的受力情况进行仿真分析。当曲柄销圆角载荷为计算疲劳强度时,该处圆角安全系数大于评判标准限值,圆角应力最大值位于距曲柄销圆角与轴颈交界处 16 mm 处;而实际发生断裂位置位于该交界处 10 mm 处,如图6。

从整机曲轴一维、三维计算结果看:曲轴满足设计要求,且有一定的设计裕度。从曲轴单拐试验台仿真结果看:在曲轴圆角应力为计算疲劳强度的情况下,曲轴单拐的疲劳安全系数亦有一定裕度,且实际曲轴断裂位置与仿真计算的应力最大位置不一致。因此,曲轴本体结构设计强度不足这一因素也可排除。

### 2.3 曲轴制造缺陷

#### 2.3.1 材料不合格

材料化学成分及力学性能不满足设计要求可能

会导致疲劳强度不足。对断裂曲轴进行化学元素及力学性能分析。在曲轴上截取试样进行化学元素分析, 所检元素均符合技术要求。按照图纸要求截取纵向力学试样进行力学性能分析, 分析结果符合技术要求。因此材料不合格因素可排除。

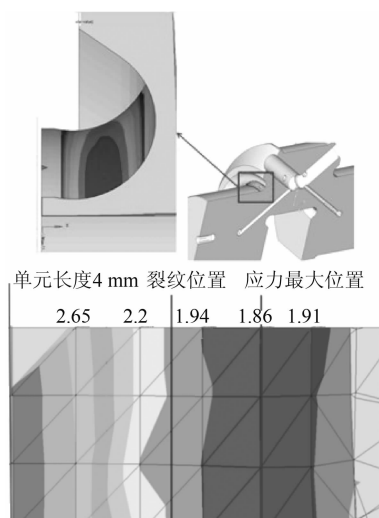


图6 曲轴在疲劳试验台受力情况

### 2.3.2 结构尺寸不合格

曲轴单拐试验件验收时, 供方须提供全尺寸自检记录, 查验合格后, 甲方对关键特性进行复验。曲轴主轴颈、曲柄销圆角为重要特性, 经供方自检、甲方复验均满足设计要求。故结构尺寸不合格因素可排除。

### 2.3.3 材料内部缺陷

对曲轴开裂处截面进行非金属夹杂物等级评定。截取纵向剖面试样, 经镶嵌、磨抛后置于光学显微镜下观察 (图7); 并按 GB/T 10561-2005 标准中的实际检验 A 法评定试样非金属夹杂物级别, 结果为: A0、B0.5、C0、D0.5, 均满足设计要求, 见图8。因此材料内部缺陷因素也可排除。

### 2.3.4 材料表面质量

对断裂曲轴进行失效分析。对曲轴开裂区域进行断口宏观分析 (图9)、断口 SEM 形貌观察 (图10) 及能谱分析 (图11) 和金相分析, 结果表明:

(1) 裂纹源区位于圆角表面;

(2) 开裂面较为平坦, 无明显的塑性变形, 为脆性开裂特征;

(3) 裂纹扩展方向由圆角呈  $45^\circ$  方向向曲臂方向扩展, 与曲轴实际工作状态下应力分布情况一致;

(4) 裂纹源区存在较多腐蚀坑, 能谱分析表明该腐蚀坑为氧化腐蚀产物。

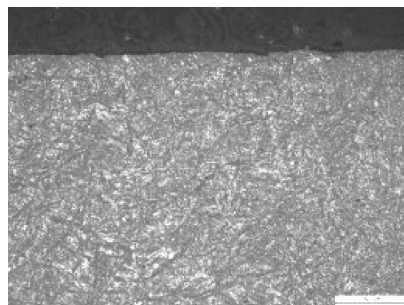


图7 圆角表面显微组织形貌



图8 非金属夹杂物形貌

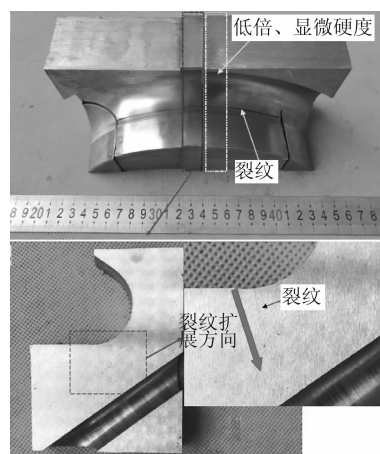


图9 裂纹扩展方向

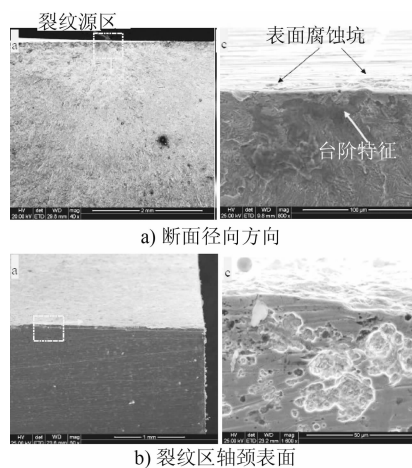


图10 SEM 形貌

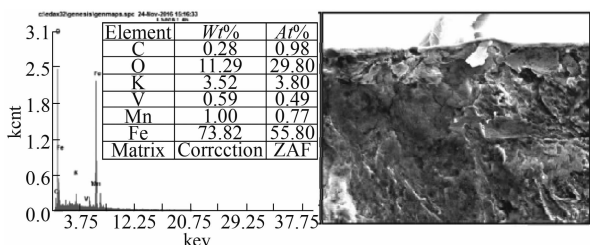


图 11 能谱分析

综上, 曲轴圆角断裂源处存在氧化腐蚀坑, 曲轴材料表面质量问题是造成本次故障的主要原因。

### 3 氧化腐蚀原因

上述故障分析表明: 曲轴圆角表面存在氧化腐蚀坑是曲轴圆角失效的主要原因。

经与曲轴厂技术人员交流分析, 曲轴圆角断裂区域存在锈蚀, 且该圆角粗糙度相对较差的具体原因如下:

(1) 曲轴单拐生产过程中, 尤其是雨天较多的 7~8 月, 未对成品面进行防锈蚀保护; 曲轴圆角精加工、抛光后发现圆角部位已经产生明显可见锈蚀点。

(上接第 42 页)

表 1 测试与计算结果对比

| 位置    | a      | b    | c     | d    |
|-------|--------|------|-------|------|
| 公式法误差 | -10.4% | -9%  | -6.2% | 9.6% |
| 修正法误差 | 0.6%   | 0.5% | 4.6%  | 3.1% |

表 2 热流量计算结果

| 方法      | 公式法    | 修正法   |
|---------|--------|-------|
| 热流量计算误差 | -35.4% | 4.08% |

### 4 结论

本文介绍了一种活塞燃气侧换热边界的修正方法。该方法在经验公式法的基础上, 引入了以三维燃烧分析获得的温度分布作为依据, 调整活塞顶各分区的换热系数。调整过程中, 总换热量和平均换热系数不变, 从而达到准确预估活塞顶温度分布的目的。

与传统经验公式相比, 该修正方法更准确、合理, 为活塞设计阶段提供了一种高效预估活塞温度场的方法。

#### 参考文献

[1] 许广举, 李铭迪, 赵洋, 等. 基于热机耦合的柴油机

(2) 锈蚀区域手动抛光处理, 锈蚀点未完全处理掉, 形成疲劳源。

(3) 采用手动抛光方法完成锈蚀区域打磨, 造成该圆角粗糙度相对较差。

### 4 结论

本文从某柴油机曲轴单拐疲劳试验件断裂现象出发进行分析, 得到如下结论:

(1) 造成曲轴单拐圆角失效的主要原因为圆角表面存在氧化腐蚀坑。这为曲轴设计、生产过程控制及后续质量验收提供了重要依据。

(2) 采用故障树失效分析方法可以全面排查可能因素, 准确找出最终原因, 对柴油机零部件研发有借鉴意义。

#### 参考文献

- [1] 姬战国, 尹庭林, 尹芳芳, 等. 微机控制曲轴疲劳试验台的研发 [J]. 工程与试验, 2009 (4): 54-56.
- [2] 陈大荣. 船舶柴油机设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [3] 王韵成, 邵敏. 有限元法基本原理与数值方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.
- [4] 活塞热应力及疲劳寿命分析 [J]. 内燃机工程, 2017, 38 (2): 96-100.
- [5] 卢熙群, 何涛, 邹德全, 等. 基于传热系数反求法的船用柴油机组合活塞热分析 [J]. 内燃机工程, 2012, 33 (4): 71-75.
- [6] 刘晶晶, 刘友, 杨晓涛, 等. 基于反求法的船用柴油机三维活塞热分析 [C]. 第十八届全国大功率柴油机学术年会暨第十五届华东四省一市内燃机学会联合学术全会论文集, 2013, 265-270.
- [7] 冯立岩, 高希彦, 夏惠民, 等. 8E160 柴油机活塞组热负荷及机械负荷耦合分析 [J]. 内燃机学报, 2002, 20 (5): 441-446.
- [8] 仲杰. 活塞喷油振荡冷却的稳、瞬态模拟计算及活塞温度场分析 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [9] 施力强, 李大潜, 王景寅. 用有限元法计算内燃机活塞温度场的研究 [J]. 内燃机, 1977 (5).
- [10] 李林安, 佟景伟, 李鸿琦, 等. 非对称活塞稳态温度场的三维有限元分析 [J]. 天津大学学报, 1995, 28 (1): 107-112.
- [11] BUSH J E, LONDON A L. Design data for "Cocktail Shaker" cooled pistons and valves [C]. SAE Paper 650727.