

船用淡水泵泵轴开裂的仿真分析及改进

吴 鹏¹, 张华兵², 张延亭², 张学艳², 王 彪², 王 彬², 于寰宇²

(1. 海军驻上海地区第四军事代表室, 上海 201108; 2. 七一一研究所, 上海 201108)

摘 要: 针对某船用淡水泵泵轴开裂故障, 建立泵轴有限元模型, 并采用应力-疲劳理论和线性累积损伤模型, 基于安全系数法分析了泵轴的高周疲劳损伤。结果表明: 泵轴键槽为结构疲劳薄弱区域, 疲劳安全系数不足导致键槽处产生疲劳裂纹, 裂纹扩展, 直至开裂失效。仿真和试验验证表明: 取消键槽并加大轴径的改进措施成效显著; 泵轴的疲劳安全系数得到提高, 满足材料的许用要求。

关键词: 泵轴; 断裂; 疲劳分析; 安全系数

中图分类号: U664.5+8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4357(2020)05-0024-03

Simulation Analysis of the Crack on a Marine Freshwater Pump Shaft and its Solution

Wu Peng¹, Zhang Huabing², Zhang Yanting², Zhang Xueyan², Wang Biao², Wang Bin², Yu Huanyu²

(1. Fourth Military Representative Office in Shanghai, Shanghai 201108;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 201108)

Abstract: To deal with the crack on a marine freshwater pump shaft, finite element model of the pump shaft was established. Then the high cycle fatigue damage of the pump shaft was analysed by using the stress-fatigue theory and the linear cumulative damage model based on the safety factor method. The results showed that the cracking reason of the pump shaft was that the key groove was the weak area of fatigue, and the fatigue safety factor was insufficient, which led to fatigue cracks at the groove, the crack grow and the groove failure occurred. Simulation and tests results verifies that the improvement design of removing the key groove and increasing the shaft diameter has achieved good results, the fatigue safety factor of the pump shaft is improved and meets with the material requirements.

Key words: pump shaft; crack; fatigue analysis; safety factor

0 引言

轴类零件作为机械设备的重要核心零件, 用于连接并传递运动与动力, 在水泵、发动机、变速箱等旋转机械中承担重要作用。对泵轴疲劳寿命的预测有助于提高设备的可靠性, 具有重要的现实意义。

目前, 对于泵轴失效的研究主要集中在理化检验分析; 对其疲劳可靠性分析也主要依赖传统的经验设计和实机试验^[1-4], 而对于泵轴的高周疲劳仿

真研究较少。本文针对某船用淡水泵泵轴的断裂失效问题, 耦合有限元法和疲劳损伤理论, 建立泵轴三维模型, 进行疲劳损伤仿真计算, 分析失效原因并提出改进措施。

1 泵轴开裂问题

某船用淡水泵在试验过程中, 泵轴和叶轮连接配合处发生断裂故障(图1)。该泵轴的材料为调质热处理钢。对材料的化学成分和金相组织分析表明: 材料性能均符合标准要求。观察断口宏观形

收稿日期: 2019-05-22; 修回日期: 2020-07-04

作者简介: 吴鹏(1984—), 工程师, 主要研究方向为船舶动力工程, wlj0929@163.com。

貌，可见：裂纹起点源于泵轴与叶轮连接的键槽处，后延伸至台阶面。根据断口形貌初步认定泵轴为疲劳断裂。

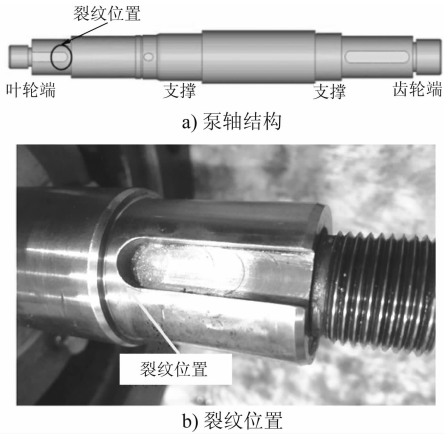


图 1 泵轴结构及裂纹位置

2 仿真计算

2.1 计算模型

建立如图 2 所示的有限元模型，考虑到键槽附近可能的应力集中效应，局部细化网格。整个计算网格模型包括 334 264 个单元，70 290 个节点，最小单元尺寸为 0.285 mm。

根据泵轴实际工作情况，在轴承支撑处施加约束支撑自由度，一端施加旋转工作扭矩，见图 2。计算时泵轴材料属性设置如表 1。

表 1 泵轴材料属性

弹性模量/MPa	210×10^3
泊松比	0.3
密度/($t \cdot mm^{-3}$)	7.89×10^{-9}
屈服强度/MPa	800

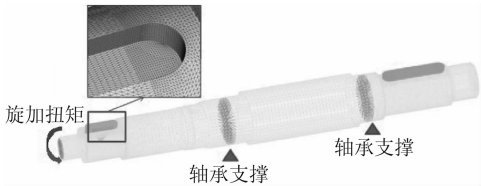


图 2 泵轴网格模型

2.2 载荷及计算工况

为模拟泵轴实际负载时的应力状态，分别按额定扭矩、波动负载扭矩的峰值加载计算。其额定扭矩 T_e 由下式计算：

$$T_e = 9\,550 \frac{P}{n} \tag{1}$$

式中： P 为泵轴传递的额定功率，kW； n 为转速，r/min。

波动负载扭矩通过淡水泵驱动齿轮力（图 3）转换获得，计算时选取最大齿轮力 F_{max} 和最小齿轮力 F_{min} 代入下式：

$$T = Fr\cos\theta \tag{2}$$

式中： T 为波动扭矩； F 为齿轮力； r 为分度圆半径； θ 为压力角。

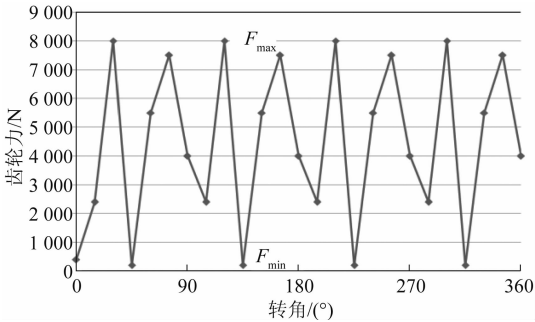


图 3 淡水泵驱动齿轮力

计算工况如表 2 所示。分别计算泵轴典型工作时刻的应力状态。

表 2 计算工况

应力计算工况	载荷/($N \cdot m$)	疲劳计算工况
工况 1	$T_e = 90$	额定工况
工况 2	$T_e + T_{min} = 102$	实际工况
工况 3	$T_e + T_{max} = 320$	实际工况

2.3 应力结果

对比分析了 3 种工况下的泵轴应力，其分布趋势基本相同，叶轮端键槽处的应力均较大，其中，额定负载（工况 1）下，键槽最大应力为 406 MPa，低于材料屈服强度；而在最恶劣负载情况（工况 3）下，键槽处应力值为 1 027 MPa（图 4），在叶轮端的键槽附近有局部应力集中，但小于材料极限强度 1 050 MPa。上述情况表明：该泵轴静态强度可满足要求，但仍须进一步进行疲劳寿命评估。

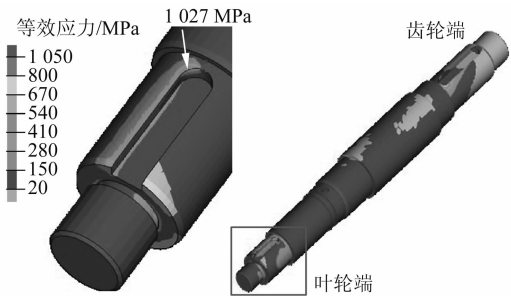


图 4 工况 3 的泵轴等效应力

2.4 疲劳计算

由于影响结构疲劳寿命的因素很多，可采用基于修正的 Miner 法则和线性累积损伤理论，将波动变化的应力历程按雨流计数法计算多轴疲劳安全系

数。计算时基于材料试件满足无限循环疲劳寿命 (10^7 次) 的疲劳 Haigh 图 (图 5), 考虑“循环应力比为恒定值”的过载方式, 表现为通过原点 O 和工作点 W 的直线, 疲劳安全系数为材料许用应力幅与工作应力幅的比值^[5]。

分别按额定工况 (工况 1 + 工况 2) 以及实际工况 (工况 2 + 工况 3) 下的应力组合计算泵轴的疲劳寿命; 模拟泵轴在两种工作状态下的疲劳安全系数, 如图 6 所示。由图可知: 额定工况下最小安全系数为 2.0, 满足设计校核的要求; 而实际工作状态下的最小安全系数为 0.67, 位于键槽顶部边缘, 是结构的疲劳薄弱区域。通过平均应力结果进一步分析: 键槽顶部边缘处主要受压应力, 键槽底部受拉应力, 存在应力集中, 应力幅值大于材料许用要求, 有可能导致泵轴疲劳断裂。这与实际疲劳裂纹位置一致。

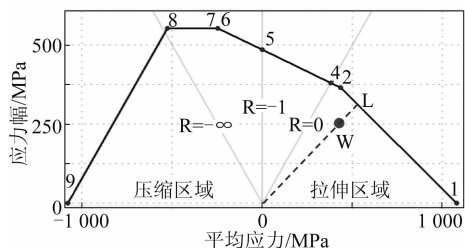


图 5 材料的疲劳 Haigh 图

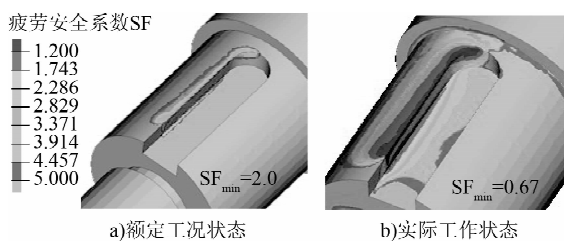


图 6 泵轴的疲劳安全系数

3 原因分析及改进

3.1 原因分析

泵轴的宏观断口有明显的疲劳辉纹, 为疲劳断裂的典型特征。经仿真分析并结合宏观形貌分析可知: 泵轴键槽过渡圆角区域为应力集中区域, 是泵轴的疲劳薄弱区域, 容易引起疲劳裂纹。泵轴在启动、关闭以及工作波动过程中反复受到扭转冲击作用, 导致局部应力集中, 引发脆性开裂。

因此, 该泵轴失效为疲劳断裂。由于在运行过程中载荷波动, 导致产生疲劳裂纹, 裂纹扩展, 直至瞬断。为防止类似失效, 提出如下改进措施:

(1) 局部加大轴径, 取消键槽, 采用过盈配合方法改进泵轴与叶轮的连接, 以满足安全使用要求。

(2) 确保缓慢启动, 保证泵轴运行过程平稳, 降低疲劳载荷的波动幅度。

3.2 改进方案验证

根据改进的泵轴方案 (取消键槽并局部加大轴径), 计算得到实际工况下的疲劳安全系数 (图 7)。结果显示: 淡水泵泵轴去除键槽结构后, 安全系数明显提高, 可满足疲劳要求。目前实机已运行至少 100 h, 无任何问题。计算结果和实机应用均表明改进措施成效显著。

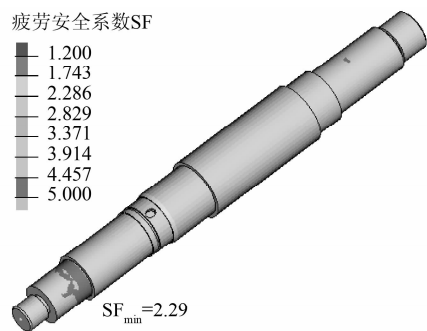


图 7 泵轴改进方案的疲劳安全系数

4 结论

(1) 淡水泵泵轴开裂是由于键槽区域为结构疲劳薄弱区域, 在波动工作载荷作用下产生疲劳裂纹, 裂纹扩展, 直至瞬断。计算结果与实际开裂位置一致。

(2) 经实机应用, 取消键槽和局部加大轴径的改进方案成效显著。泵轴的疲劳安全系数得到提高, 满足材料疲劳要求。

参考文献

- [1] 王兆前, 杨杰, 朱玲玉. 发动机机油泵轴失效分析 [J]. 内燃机与配件, 2014 (4): 36-38.
- [2] 何晓峰, 刘厚林, 谈明高, 等. WD-450 型多级泵泵轴静态特性分析 [J]. 机械设计与制造, 2011 (10): 170-172.
- [3] 齐学义, 王岩, 敏政. 多级泵轴断裂分析 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版), 2008 (6): 502-506.
- [4] 陈志静, 王大成. 基于可靠性设计的高压水泵轴断裂分析 [J]. 水泵技术, 2014 (4): 45-48.
- [5] 张华兵, 李丽婷, 苗伟驰, 等. 单缸柴油机排气管疲劳开裂的仿真分析 [J]. 机械强度, 2019, 41 (2): 430-435.