

# 基于气-固耦合的风扇应力分析与结构优化

高建红<sup>1,2</sup>, 刘伦伦<sup>1,2</sup>, 段良坤<sup>1,2</sup>, 王俊然<sup>1,2</sup>, 付春雨<sup>1,2</sup>

1. 内燃机可靠性国家重点实验室, 山东 潍坊 261061;  
2. 潍柴动力股份有限公司, 山东 潍坊 261061

**摘要:**为解决某装载机工作过程中出现的风扇断裂故障,采用气-固耦合仿真方法,考虑风扇叶片静压及风扇作业旋转离心力影响,对故障风扇进行应力仿真计算。仿真分析结果表明,风扇断裂位置应力较大是风扇断裂的主要原因。对风扇结构进行优化,将轮毂厚度由0.3 mm增加至0.4 mm,并对优化后的风扇进行仿真和市场应用验证。仿真分析显示优化后风扇轮毂最大应力由204.7 MPa下降到141.5 MPa,且市场验证无故障反馈,有效解决了风扇断裂故障。

**关键词:**风扇;气固耦合;静压;离心力;应力;结构优化

**中图分类号:**TK424.22

**文献标志码:**A

**文章编号:**1673-6397(2023)01-0072-04

**引用格式:**高建红,刘伦伦,段良坤,等.基于气-固耦合的风扇应力分析与结构优化[J].内燃机与动力装置,2023,40(1):72-75.

GAO Jianhong, LIU Lunlun, DUAN Liangkun, et al. Stress analysis of fan and its structure optimization based on gas-solid coupling[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2023,40(1):72-75.

## 0 引言

风扇是发动机冷却系统重要组成部件,为散热器、中冷器、冷凝器等系统提供适量空气,保证发动机润滑系统、液力缓速器等散热需求<sup>[1-2]</sup>。发动机通常利用带传动驱动风扇工作,柴油机型风扇最高转速可达2000~3500 r/min,工作过程中一旦发生风扇断裂故障,在较大离心力作用下,极有可能造成散热器、风扇罩等周边零部件的连带损坏,严重影响车辆性能及人员安全,同时产生高昂的维修费用<sup>[3-4]</sup>。

某型号装载机市场反馈发生多起风扇断裂故障,给用户造成了较大损失。本文中结合风扇实际作业工况,采用气-固耦合方法,通过Fluent-Abaqus软件联合仿真<sup>[5]</sup>,对故障风扇进行流场分析和结构强度分析,识别风扇应力危险区域,提出结构优化方案,并通过仿真和市场应用验证优化风扇的可靠性,有效解决了风扇断裂问题。

## 1 风扇故障现象

故障风扇为5叶不等距风扇,叶片不等距分布可以使风扇在通过频率处产生调制现象,将基频对应的声能量峰值对称分布在基频两侧,降低风扇旋转噪声<sup>[6]</sup>,在工程机械领域应用较为普遍。风扇断裂位置和断口情况如图1所示。由图1可知:风扇从小间距扇叶轮毂根部断裂,并造成扇叶破损。

对故障风扇进行核查,发现多起故障断裂位置接近,故障发生时间集中在装载机作业1100~1700 h范围内。在故障风扇断口处机加工取样,利用超声波清洗后进行电镜观察和分析,断口微观形貌如图2所示。由图2可初步判断风扇扇叶断裂原因为弯曲疲劳断裂。

收稿日期:2022-08-29

第一作者简介:高建红(1989—),女,山西临汾人,工学硕士,工程师,主要研究方向为新能源车零部件性能及结构可靠性,E-mail:gaojianh@weichai.com。

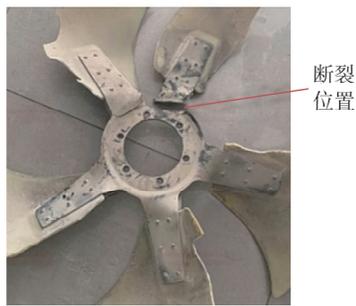


图 1 风扇断裂位置

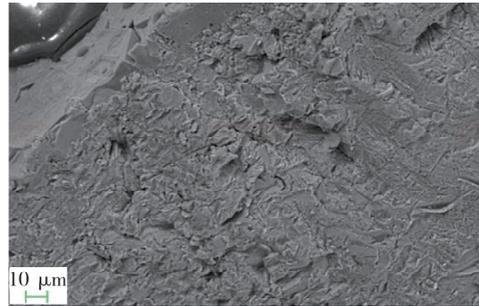


图 2 风扇断口微观形貌

## 2 风扇应力分析

### 2.1 受力情况分析

风扇工作时主要承受离心力载荷、叶片表面静压载荷和动不平衡引起的载荷<sup>[7]</sup>,其中离心力载荷和叶片表面静压载荷起主要作用,在满足设计要求(一般动不平衡不大于  $30 \text{ g} \cdot \text{cm}$ )的情况下动不平衡载荷对风扇可靠性的影响可忽略不计。

### 2.2 有限元分析模型

风扇断裂位置在轮毂根部,非风扇螺栓安装位置,因此与风扇连接的零部件(如风扇连接盘、垫块等)相关性较小。进行有限元仿真分析时,对模型进行简化处理,只考察风扇本体,以风扇安装螺栓孔为固定边界。风扇本体由扇叶和轮毂通过铆钉连接在一起,扇叶为非金属复合材料。风扇直径为  $780 \text{ mm}$ ,质量为  $6.4 \text{ kg}$ 。

气-固耦合分析包括流场分析和结构强度分析,分别在 Fluent 软件和 Abaqus 软件中求解。利用 Hypermesh 软件进行网格处理,流场分析和结构强度分析对模型处理和网格划分要求不同<sup>[8]</sup>。流场分析不考察接触零部件连接关系,扇叶和轮毂接触位置不能有间隙,需将风扇及扇叶网格处理成整体;强度仿真重点考察轮毂根部位置应力,需保证轮毂沿厚度方向至少两层以上网格,在保证网格质量前提下,去除扇叶边缘圆角、特征线等特征<sup>[9]</sup>,风扇流体和强度分析网格模型如图 3 所示。处理完成后风扇模型共生成  $421\,220$  个网格,  $117\,145$  个节点。

风扇轮毂材料为 Q235,弹性模量为  $212 \text{ GPa}$ ,泊松比为  $0.288$ ,密度为  $7.860 \text{ t/m}^3$ ,抗拉强度为  $390 \text{ MPa}$ ,屈服强度为  $235 \text{ MPa}$ 。

### 2.3 风扇表面静压仿真

#### 2.3.1 模型简化及参数设置

流场分析目的是提取风扇表面静压,风扇安装在机舱冷却模块导流罩内,导流罩截面为圆形,直径较风扇直径大  $30 \text{ mm}$ ,为简化模型及考虑流场分析收敛性,将流场仿真模型设计为长筒型结构,参考文献[10]中的 D 型管道进出气装置,将流场仿真模型简化处理为进口、管道、多重参考坐标系(multi-reference frame, MRF)旋转流体区、风扇、出口 5 部分,如图 4 所示。管道直径设置与导流罩直径一致,各部分模型及网格尺寸参数如表 1 所示。

该装载机装配的发动机额定转速为  $2100 \text{ r/min}$ ,风扇速比为  $0.91$ ,因此流场分析风扇转速设置为  $1890 \text{ r/min}$ ;湍流模型选择能更好地处理流线弯曲程度的 RNG 模型,压力修正算法采用 SIMPLE,湍动能和湍流耗散率首先选择一阶迎风格式,计算收敛后调整为二阶迎风格式<sup>[11]</sup>,设置最大迭代次数为  $3000$

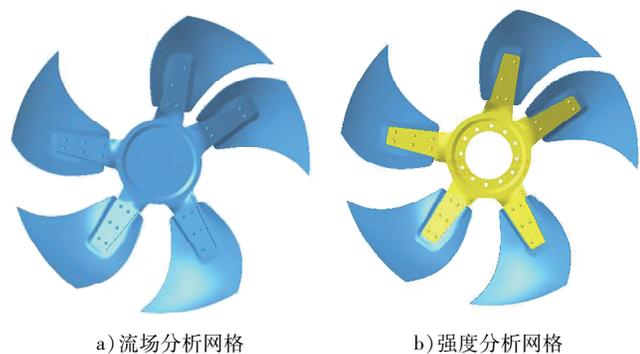


图 3 风扇有限元网格模型

次,残差收敛条件为  $10^{-4}$ 。

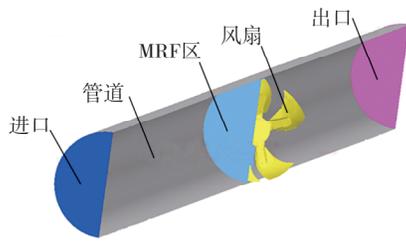


图4 风扇流场仿真模型

表1 模型各部分网格尺寸参数 单位:mm

区域	直径	网格尺寸
进口区	810	20
管道	800	20~30
MRF区	790	4~5
风扇	780	2~5
出口区	810	20

### 2.3.2 静压仿真结果

基于风扇图纸性能数据,在体积流量为  $5.7 \text{ m}^3/\text{s}$  工况下,风扇表面静压结果如图5所示。在Flunet软件 Solution Data 命令窗口,将风扇表面静压结果导出 ASCII 格式数据。

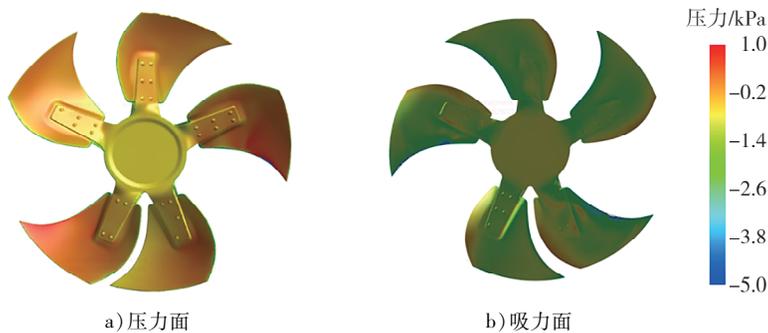


图5 风扇表面静压分布

### 2.4 应力分析

在Abaqus软件中进行风扇强度分析,包括压力映射和旋转离心力2个载荷步,其中旋转离心力载荷步继承压力映射载荷步结果<sup>[12]</sup>。在压力映射载荷步,通过Analytical Field(分析场)命令,将Fluent获取的风扇静压数值映射到结构强度分析网格上。在旋转离心力载荷步,设置旋转轴线及旋转角速度后软件自动计算旋转载荷<sup>[13]</sup>。该载荷步转速设置与流场分析保持一致,换算角速度为  $197.9 \text{ rad/s}$ 。

在静压和旋转离心力共同作用下,风扇轮毂最大应力分布云图如图6所示。由图6可知:风扇轮毂所受最大应力为  $204.7 \text{ MPa}$ ,虽低于Q235材料屈服强度限值  $235 \text{ MPa}$ ,但安全系数仅为  $1.15$ ,低于推荐安全系数  $1.5$ 。风扇轮毂最大应力出现在小间距叶片根部区域,与故障位置一致。

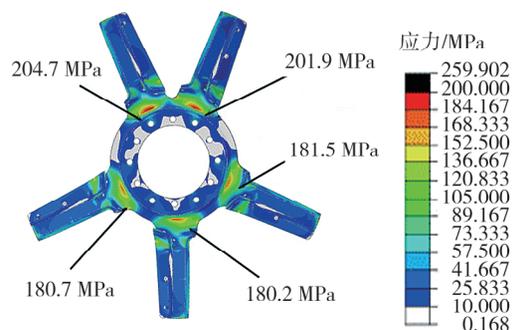


图6 风扇轮毂应力分布云图

## 3 风扇轮毂优化与验证

### 3.1 结构优化

根据风扇最大应力出现位置及产品加工工艺,确定风扇优化方案为:将风扇轮毂壁厚由  $3 \text{ mm}$  增加至  $4 \text{ mm}$ ,风扇叶片保持不变。

### 3.2 优化方案可靠性分析

按2.4节仿真方法对优化后的风扇进行强度分析,结果如图7所示。由图7可知,优化后风扇轮毂最大应力为  $141.5 \text{ MPa}$ ,较原结构下降  $31\%$ ,安全系数提升至  $1.66$ ,满足可靠性要求,最大应力出现位置

与原结构接近。

对优化后的风扇进行约 80 台次装机市场验证,实际运行时间约 2500~3000 h,未出现风扇断裂故障,优化措施有效。气-固耦合仿真分析准确高效,可用于车辆风扇设计、选型。

## 4 结语

通过 Fluent-Abaqus 软件联合仿真,对故障风扇进行可靠性分析,识别风扇应力危险区域。仿真分析结果显示,风扇断裂位置最大应力为 204.7 MPa,且安全系数较低,是风扇断裂的主要原因。对风扇进行优化,将轮毂厚度由 0.3 mm 增加至 0.4mm。优化后风扇轮毂最大应力下降到 141.5 MPa,安全系数提高到 1.66,满足可靠性要求,且市场无故障反馈,有效解决了风扇断裂故障。针对风扇结构的气-固耦合仿真方法准确高效,对风扇设计、选型及配套具有参考作用。

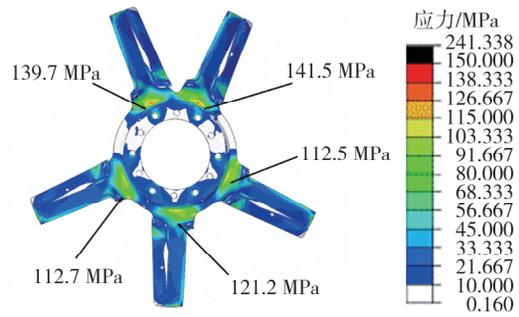


图 7 优化后风扇轮毂应力分布云图

## 参考文献:

- [1] 傅晓磊,王洪山,朱杨,等. 牵引车冷却系统的匹配优化[J]. 内燃机与动力装置,2019,36(5):5-9.
- [2] 程露,陆俊帅,宋晓颖,等. 某乘用车冷却系统进风量仿真及优化[J]. 汽车实用技术,2022,47(12):34-38.
- [3] 周东辉,罗仁宏,王之丰. 某商用车发动机舱冷却模块布局优化[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(2):378-385.
- [4] 纪嘉树,侯衍华,李振峰,等. 工程机械冷却风扇性能 CFD 仿真研究[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(6):36-40.
- [5] 王定标,汉落乐,王光辉,等. 基于流-固耦合的离心式压气机叶轮叶片仿真研究[J]. 热科学与技术,2020,19(1):64-71.
- [6] 胡肖琬玥. 不等距叶片风扇的性能计算及降噪研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
- [7] 李瑞,张行,王阳,等. 民用发动机附件风扇叶轮疲劳寿命数值分析[J]. 民用飞机设计与研究,2020(4):117-124.
- [8] 王福山. 基于流固耦合的机车散热器风扇疲劳性能与模态分析[D]. 大连:大连交通大学,2020.
- [9] 姚明镜,唐璇,贾曾浩. 基于 CAE 的车架结构模态分析及优化设计[J]. 机械设计与制造工程,2021,50(12):97-100.
- [10] 中国机械工业联合会. 工业通风机用标准化风道进行性能试验:GB/T 1236—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [11] 张寒彬,华良斌,华文波,等. 发动机水泵风扇系统可靠性仿真方法[J]. 内燃机与动力装置,2018,35(6):41-46.
- [12] 周际鹏,陈清阳,罗铁彬. 基于 ABAQUS 的某型发动机涡轮叶片静强度及振动特性分析[J]. 长沙航空职业技术学院学报,2021,21(6):6-9.
- [13] 沈海涛,安子军. 双激波套筒活齿传动的接触应力分析及其优化[J]. 机械强度,2021,43(4):874-880.
- [14] 周思柱,祝克强,吴汉川,等. 基于 Workbench 的混砂车搅拌叶轮疲劳寿命分析[J]. 石油机械,2012,40(2):36-38.
- [15] 刘俊杰,高建红,刘伦伦,等. 基于 Femfat 软件的风扇连接盘结构可靠性分析[J]. 柴油机设计与制造,2020,26(2):15-17.

## Stress analysis of fan and its structure optimization based on gas-solid coupling

GAO Jianhong<sup>1,2</sup>, LIU Lunlun<sup>1,2</sup>, DUAN Liangkun<sup>1,2</sup>, WANG Junran<sup>1,2</sup>, FU Chunyu<sup>1,2</sup>

1. State Key Laboratory of Engine Reliability, Weifang 261061, China; 2. Weichai Power Co., Ltd., Weifang 261061, China

**Abstract:** In order to solve the fan fracture fault during the operation of a loader, the gas-solid coupling simulation method is used to simulate the stress of the fault fan, taking into account the static pressure of the fan

(下转第 80 页)