

# 燃气轮机转子裂纹扩展及刚度特性研究

王祥和, 张楠, 回翔, 李辉

(中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

**摘要:** 燃气轮机转子工作环境恶劣, 转子结构易出现裂纹故障, 为了解决燃气轮机转子裂纹难以被识别的问题, 以某型燃气轮机高压转子为研究对象, 通过三维建模以及 ABAQUS 仿真模拟其工作状态。首先, 对易产生裂纹的位置进行了仿真计算; 然后, 在转子三维模型中对易产生裂纹的位置预置大小不同的裂纹模型, 得到转子裂纹拓展情况; 最后, 在裂纹拓展后的转子模型上施加一定载荷, 测量转子在不同裂纹状态下的拉压刚度、扭转刚度以及弯曲刚度。结果表明: 某型燃气轮机高压转子的高压涡轮封严轮盘区域易出现裂纹故障, 且转子刚度伴随裂纹增大呈下降趋势。

**关键词:** 燃气轮机; 转子; 裂纹; ABAQUS

中图分类号: TK473

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.019

[引用本文格式] 王祥和, 张楠, 回翔, 等. 燃气轮机转子裂纹扩展及刚度特性研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 174-182.

WANG Xiang-he, ZHANG Nan, HUI Xiang, et al. Research on Crack Propagation and Stiffness Characteristics of Gas Turbine Rotors[J].

Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 174-182.

## Research on Crack Propagation and Stiffness Characteristics of Gas Turbine Rotors

WANG Xiang-he, ZHANG Nan, HUI Xiang, LI Hui

(No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

**Abstract:** The working environment of gas turbine rotors is very poor, and the rotor structure is prone to crack faults. In order to solve the problem of difficult identification of gas turbine rotor cracks, taking a certain type of gas turbine high-pressure rotor as the research object, the working conditions were simulated by three-dimensional modeling and ABAQUS simulation. First, the location where cracks were prone to occurring was simulated and calculated; then, crack models of different sizes were preset in the three-dimensional model of the rotor for the location where cracks were prone to occurring, obtaining the crack propagation situation of the rotor; finally, a certain load was applied on the rotor model after the crack propagated, and the tension and compression stiffness, torsional stiffness and bending stiffness of the rotor were measured in different crack states. The results show that the high-pressure turbine sealing disc area of a certain type of gas turbine high-pressure rotor is prone to crack failure, and the rotor stiffness shows a decreasing trend with the increase of cracks.

**Key words:** gas turbine, rotor, crack, ABAQUS

## 引 言

燃气轮机转子结构由轮盘、轮毂和叶片等众多部件组成,各部件依靠焊接、短螺栓连接及过盈装配等工艺组合成整体结构。因发动机转子长期在高温高压环境下工作,转子结构件在离心载荷、热载荷、气流冲击、振动应力等作用下,易产生疲劳现象,进而出现裂纹故障。例如,转子法兰连接结构开孔处易出现应力集中,应力集中处大多伴随较大的交变应力以及热应力,长时间的工作状态会产生裂纹并伴随裂纹拓展<sup>[1-5]</sup>。由于初期转子产生的裂纹较小,且多产生在结构内部,难以被内窥镜等常规检查发现,随着裂纹拓展至一定深度与长度后,会改变燃气轮机转子刚度,进而使燃气轮机的振动特性恶化,降低燃气轮机性能。若及时发现转子的裂纹故障,持续使用很大几率会造成转子结构件的损坏,甚至直接造成燃气轮机的损毁。然而燃气轮机转子初期裂纹的发现往往是发动机振动特性恶化后,发动机进行返厂分解检查时才能发现。众多学者对转子裂纹的做了大量研究工作。Guo 等人<sup>[6]</sup>使用 Hilbert-Huang 变换法对存在裂纹的转子的动力学特性展开分析,结果表明,裂纹转子在亚临界转速区域存在 2 阶和 3 阶共振峰。Al-Shudeifat 等人<sup>[7]</sup>通过谐波平衡法对裂纹转子-轴承-轮盘系统的动力学方程进行求解,理论解经试验验证后得出,裂纹深度的增加将引发转子系统特征频率幅值和轴心轨迹的特殊变化。Bachschmid 等人<sup>[8]</sup>通过建立的三维非线性模型,对转子裂纹的呼吸机制进行了较为准确的研究。韩冰等人<sup>[9]</sup>对含有转轴裂纹故障的多盘转子系统振动特性进行了相关测试。

众多研究中多以预置裂纹参数为输入,未考虑裂纹拓展对其力学特性的影响。本文研究对象为燃气轮机高压转子,通过建立转子三维结构模型,利用 Abaqus 仿真模拟其工作状态,确定了易产生裂纹位置。而后在三维模型中对易产生裂纹的位置预置大小不同的裂纹模型,计算了转子裂纹拓展情况,并在裂纹拓展后的转子模型上施加一定的力或载荷,测量转子在不同裂纹状态下的拉压刚度、扭转刚度以

及弯曲刚度,最终确定裂纹对发动机转子刚度的影响情况。

## 1 裂纹位置的确定

为确定转子容易产生裂纹的位置,采用 Abaqus 软件模拟转子实际工作的载荷、固定约束等条件,通过分析计算出的应力分布来确定裂纹可能出现的位置。

### 1.1 三维建模与网格划分

某型燃气轮机高压转子结构主要包括 9 级压气机结构和 2 级涡轮结构,其轮盘、轮毂及轴径之间通过短螺栓-止口等连接方式构成整体部件。

为减小计算量,在建模前对转子叶片和密封盘等结构进行等质量简化,用 UG 软件对简化后的转子进行三维建模,用 HYPERMESH 软件对模型进行六面体网格划分。转子三维模型如图 1 所示,转子模型的面网格划分如图 2 所示。

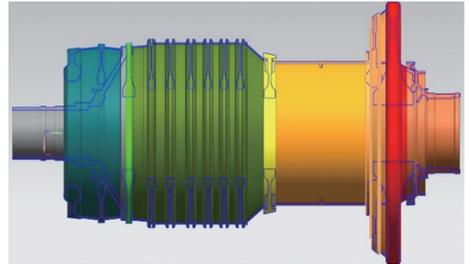


图 1 转子三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of rotor

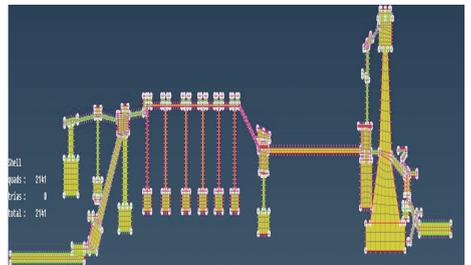


图 2 模型面网格图

Fig. 2 Meshes on model surface

### 1.2 仿真分析

#### 1.2.1 材料属性及边界条件

某型燃气轮机高压压气机转子,其叶片材料主要为钛合金及高温合金材质,轴径材料主要为不锈

钢材质,轮盘材料主要为高温合金材质。转子轮盘的材料属性及裂纹拓展相关参数如表 1、表 2 所示。

表 1 材料属性

Tab. 1 Material properties

密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	导热系数/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	膨胀系数/ $10^{-7}\text{K}^{-1}$	弹性模量/ $10^5\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$
8.23	27.6	16.2	16.6

表 2 裂纹拓展相关参数

Tab. 2 Related parameters of crack propagation

最大主应变	损伤稳定 粘性系数/ $10^{-5}$	断裂能/ $10^7\text{J}\cdot\text{m}^{-3}$
84.4	1	4.22

按照各部件材料属性在 Abaqus 内设置材料参数,按照 1-0-1 型支撑结构、且止推轴承位于转子后轴径处的支撑方案给定边界条件,按照 10 000 r/min 转速设定工作载荷。

### 1.2.2 裂纹位置确定

转子应力云图如图 3 所示。由图可知,燃烧室出口至高压涡轮间的封严轮盘处应力最大,这是因为此处紧邻高温燃气,附近结构承受的热应力相较于其他区域更加恶劣,易发生裂纹。在此处添加一定状态的片体裂纹模型,按转子实际工作状态进行仿真发现,预置裂纹处发生了明显的裂纹拓展,裂纹拓展结果如图 4 所示。另外,根据对近百台该型燃气轮机状态的跟踪发现,该型燃气轮机转子发生裂纹的区域均在燃烧室出口至高压涡轮区域,与仿真结果一致。

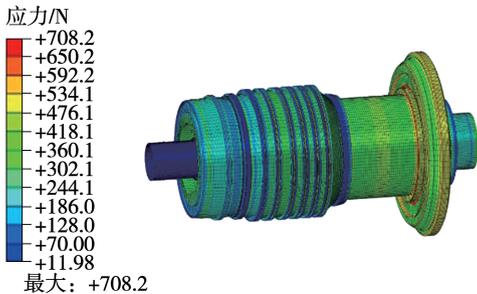


图 3 仿真结果应力云图

Fig. 3 Stress cloud map of simulation results

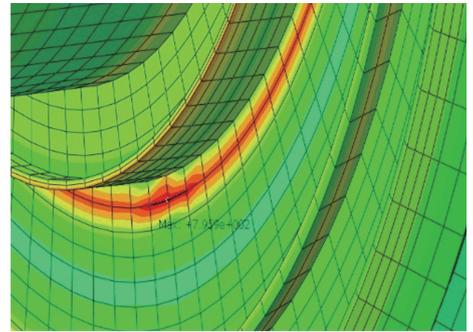


图 4 裂纹拓展图

Fig. 4 Crack propagation diagram

## 2 裂纹变量控制

裂纹位置及燃气轮机工作参数确定后,裂纹的形状及大小成为影响转子刚度的主要变量。根据对近百台某型燃气轮机状态的跟踪,以及对裂纹形状、大小的统计结果,构建了对应系列的裂纹模型。该型燃气轮机转子裂纹故障的部分情况如图 5、图 6 所示。



图 5 早期转子裂纹图

Fig. 5 Early rotor crack diagram

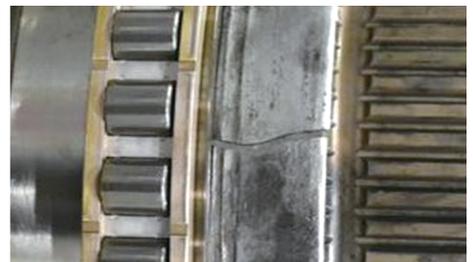


图 6 中期转子裂纹图

Fig. 6 Mid stage rotor crack diagram

为准确控制变量,按照以下规则对裂纹模型进行描述。裂纹模型采用片体模型,建模方式为长度固定的线段绕高压转子轴线旋转一定角度生成,裂纹模型加载在转子封严轮盘位置处,裂纹模型如图

7 所示。由于位置固定且裂纹是片体模型,裂纹模型的可调节参数为模型的长度与宽度。片体模型长度即为预置裂纹宽度,片体模型宽度即为预置裂纹深度。

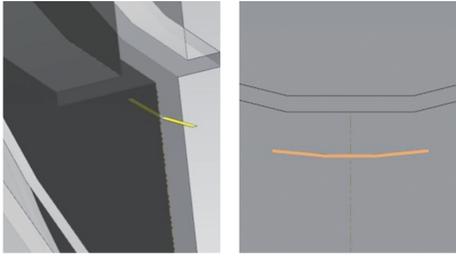


图 7 裂纹片体三维模型图

Fig. 7 Three-dimensional model diagram of cracks

由于裂纹模型是长度固定的直线绕转子轴线旋转一定角度生成,因此裂纹的宽度可用旋转角度表示;由于裂纹发生在封严轮盘位置处,因此裂纹的深度可用其与轮盘长度的比表示。为确定裂纹的单一变量,在计算裂纹宽度变化对转子刚度的影响时,裂纹深度给定值为 5%;在计算裂纹深度变化对转子刚度的影响时,裂纹宽度为给定值 5°。

### 3 裂纹转子刚度仿真及分析

刚度变化可由挠度变化来反映,本文通过计算裂纹转子在额定载荷下的变形量,来探究裂纹对燃气轮机转子扭转、弯曲及轴向拉压刚度的影响。

仿真步骤为:将不同深度、宽度的裂纹模型分别置于转子封严轮盘处,定义裂纹拓展、载荷、分析步、温度场及边界条件等不变,得出转子裂纹拓展情况;而后在裂纹拓展后的转子模型上,施加固定的载荷以及边界条件,得出转子位移值变化量,通过分析位移值变化量得出转子刚度的变化情况。

#### 3.1 轴向拉压刚度测定

首先,把各裂纹模型分别预置到转子封严轮盘处,按照 1.2.1 节定义其载荷及边界条件,得到不同预置裂纹状态下的裂纹拓展结果。其中,部分裂纹拓展结果如图 8 所示。

而后在经裂纹拓展后的转子模型上设定边界条件,并在其轴径后端面施加 150 MPa 的压应力,定义

静力通用分析步后进行计算,得到不同预置裂纹下的转子位移变形量。载荷加载位置如图 9 所示,部分裂纹转子在拉压载荷下的位移云图如图 10 所示,每个裂纹转子在拉压载荷下的位移计算结果如表 3 所示。

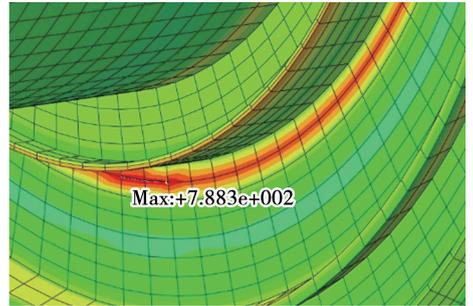


图 8 预置裂纹宽度为 5°,深度为 10%时裂纹拓展结果

Fig. 8 Diagram of crack propagation results with preset crack width of 5° and depth of 10%

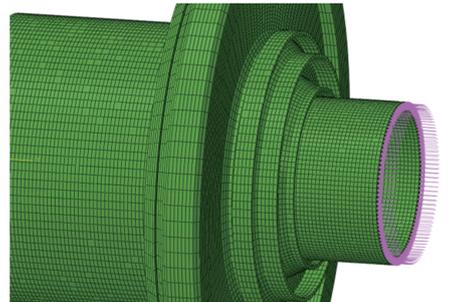


图 9 施加轴向载荷图

Fig. 9 Diagram of applied axial load

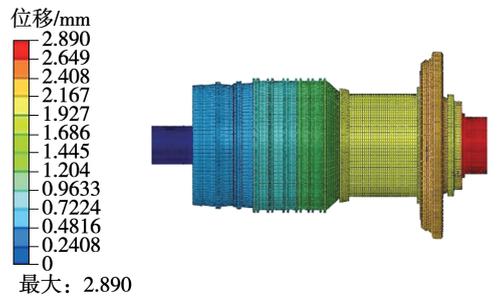


图 10 裂纹深度为 5%,宽度为 25°时转子形变量云图

Fig. 10 Deformation cloud map of rotor with crack depth of 5% and width of 25°

表 3 轴向载荷下不同裂纹情况转子形变表  
**Tab. 3 Deformation table of rotor at axial load under different crack conditions**

模型	整体形变量/mm
无裂纹	2.713
5°,5%	2.725
5°,10%	2.761
5°,15%	2.816
5°,20%	2.871
8°,5%	2.779
10°,5%	2.807
15°,5%	2.834
20°,5%	2.860
25°,5%	2.890

根据刚度与形变量成线性反比例的关系,以无裂纹时转子刚度为基准,对仿真结果进行无量纲化处理,得到转子无量纲轴向拉压刚度随裂纹深度、宽度的变化情况,如图 11、图 12 所示。

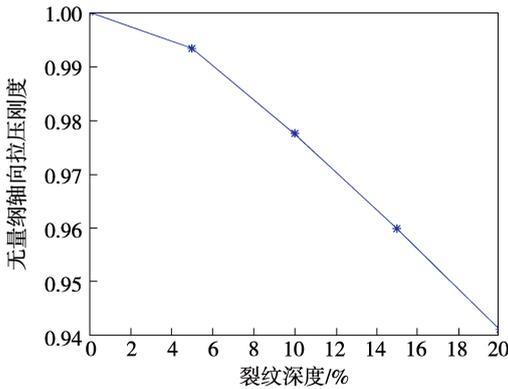


图 11 转子轴向拉压刚度随裂纹深度变化拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of axial tension and compression stiffness of rotor varying with crack depth

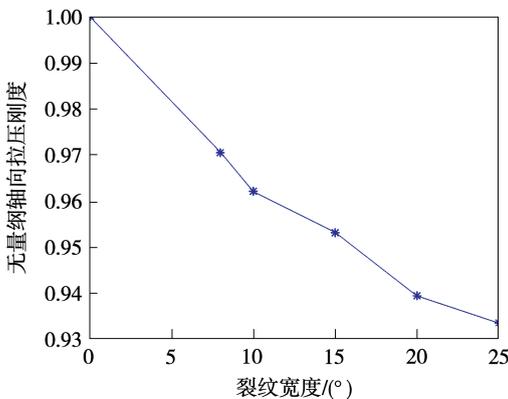


图 12 转子轴向拉压刚度随裂纹宽度变化拟合图

Fig. 12 Fitting diagram of axial tension and compression stiffness of rotor varying with crack width

转子无量纲轴向拉压刚度随裂纹深度的变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_1 = 0962 + 0.0381 \cos(2.5x) - 0.005 \sin(2.5x) \quad (1)$$

转子无量纲轴向拉压刚度随裂纹宽度的变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_1 = 2180 - 2179 \cos(-0.00075z) + 17.65 \sin(-0.00075z) \quad (2)$$

式中: $k_1$ —无量纲拉压刚度值; $x$ —裂纹宽度,°; $z$ —裂纹深度,%。

### 3.2 扭转刚度测定

得到不同预置裂纹状态下的转子裂纹拓展结果后,在经裂纹拓展的转子模型上,设定对应的边界条件,在其后轴径表面加载 100 MPa 扭转载荷,定义静力通用分析步后计算得到不同预置裂纹下的转子位移变形量。其中,部分转子裂纹拓展结果如图 13 所示,载荷加载位置如图 14 所示,部分裂纹转子在扭转载荷下的位移云图如图 15 所示,每个裂纹转子在扭转载荷下的位移计算结果如表 4 所示。

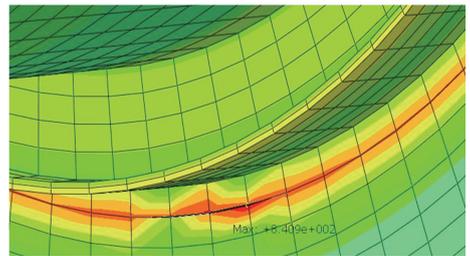


图 13 预置裂纹宽度为 5°、深度为 20% 时裂纹拓展结果图

Fig. 13 Diagram of crack propagation results with preset crack width of 5° and depth of 20%

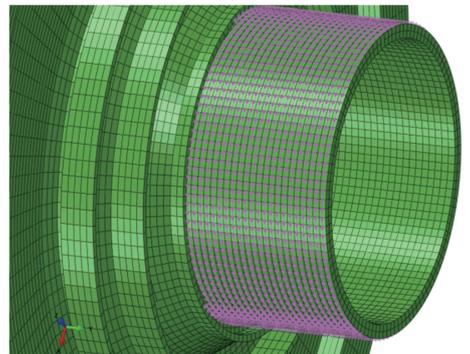


图 14 扭转载荷设定图

Fig. 14 Diagram of torsion load setting

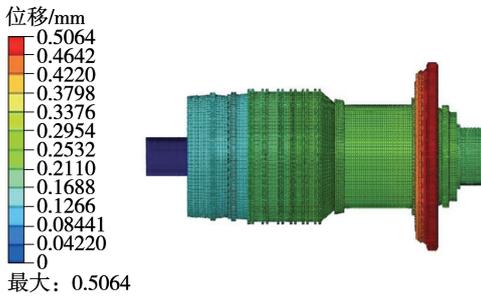


图 15 裂纹深度为 5%、宽度为 25°时  
转子形变量云图

Fig. 15 Deformation cloud map of rotor with crack  
depth of 5% and width of 25°

表 4 扭转载荷下不同裂纹情况转子形变表

Tab. 4 Deformation table of rotor at torsional load  
under different crack conditions

模型	整体形变量/mm
无裂纹	0.437 9
5°,5%	0.446 9
5°,10%	0.459 6
5°,15%	0.473 0
5°,20%	0.486 4
8°,5%	0.452 9
10°,5%	0.466 3
15°,5%	0.479 7
20°,5%	0.493 0
25°,5%	0.506 4

根据刚度与形变量成线性反比例的关系,以无裂纹时转子刚度为基准,对仿真结果进行无量纲化处理,得到了转子扭转刚度随裂纹深度及宽度增加的变化情况,如图 16、图 17 所示。

转子无量纲扭转刚度随裂纹深度的变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_2 = 0.951 1 + 0.049 \cos(4.311x) - 0.010 73 \sin(4.311x) \quad (3)$$

转子无量纲扭转刚度随裂纹宽度的变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_2 = 0.895 + 0.105 1 \cos(0.017 9z) - 0.056 75 \sin(0.017 9z) \quad (4)$$

式中: $k_2$ —无量纲扭转刚度。

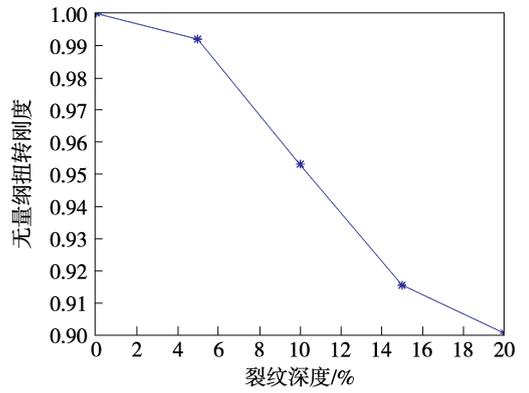


图 16 转子扭转刚度随裂纹深度变化拟合图  
Fig. 16 Fitting diagram of rotor torsional stiffness  
varying with crack depth

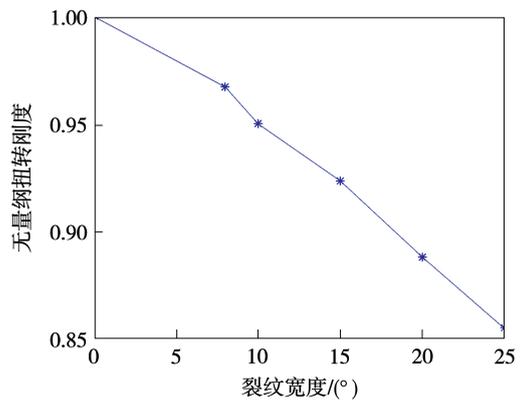


图 17 转子扭转刚度随裂纹宽度变化拟合图  
Fig. 17 Fitting diagram of rotor torsional stiffness  
varying with crack width

### 3.3 弯曲刚度测定

得到不同预置裂纹状态下的转子裂纹拓展结果后,在经裂纹拓展后的转子模型上,设定相应的边界条件,在其后轴径处加载 100 MPa 弯曲载荷。载荷加载方法为:在其后端截面使用 Abaqus 软件的耦合功能,耦合端面至其中心一点,耦合方式为运动耦合,且六自由度全部耦合。在载荷界面内选中耦合点为其施加 100 MPa 的拉应力,应力方向垂直于轴线,定义静力通用分析步后计算,得到不同裂纹下的转子的位移变形量。载荷加载位置及加载方向如图 18,部分裂纹转子在弯曲载荷下的位移云图如图 19 所示,每个裂纹转子在弯曲载荷下的位移计算结果如表 5 所示。

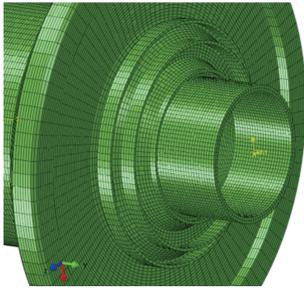


图 18 弯曲载荷设定

Fig. 18 Bending load setting

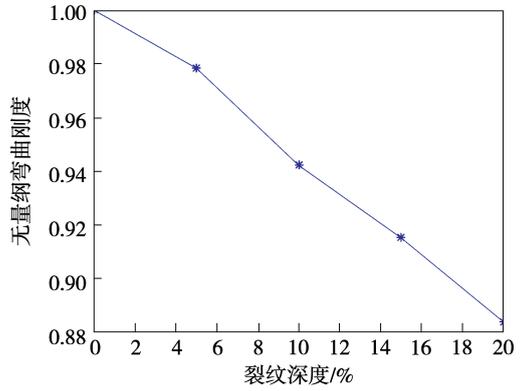


图 20 转子弯曲刚度随裂纹深度变化拟合图

Fig. 20 Fitting diagram of rotor bending stiffness varying with crack depth

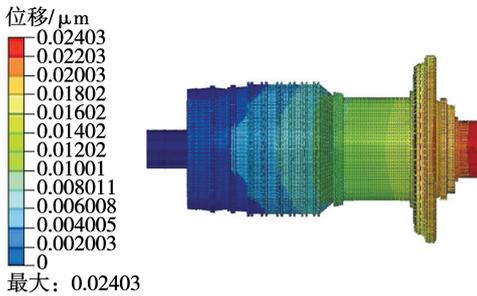


图 19 裂纹深度为 5% ,宽度为 25° 时形变量云图

Fig. 19 Deformation cloud map of rotor with crack depth of 5% and width of 25°

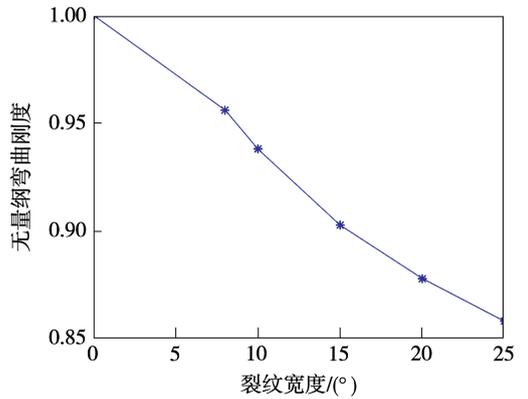


图 21 转子弯曲刚度随裂纹宽度变化拟合图

Fig. 21 Fitting diagram of rotor bending stiffness varying with crack width

表 5 弯曲载荷下不同裂纹情况转轴形变表

Tab. 5 Deformation table of rotating shaft at bending load under different crack conditions

模 型	整体形变量/ $10^{-5}$ mm
无裂纹	2.054
5°,5%	2.101
5°,10%	2.181
5°,15%	2.244
5°,20%	2.308
8°,5%	2.054
10°,5%	2.149
15°,5%	2.190
20°,5%	2.276
25°,5%	2.403

转子弯曲刚度随裂纹深度变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_3 = 0.937 + 0.064\cos(2.102x) - 0.04538\sin(2.102x) \quad (5)$$

转子弯曲刚度随裂纹宽度变化情况,其数据采用插值法的拟合公式为:

$$k_3 = 0.93 + 0.0714\cos(0.025z) - 0.07711\sin(0.025z) \quad (6)$$

式中: $k_3$ —无量纲弯曲刚度。

### 4 试验结果对比

为保证裂纹拓展转子刚度计算结果的正确性,对仿真结果进行了相关试验验证。由于燃气轮机高压转子在载荷作用下的轴向拉压值变化量最大,可

根据刚度与形变量成线性反比例关系,以无裂纹时转子刚度为基准对仿真结果进行无量纲化处理,得到转子弯曲刚度随裂纹深度及宽度增加的变化情况,如图 20、图 21 所示。

有效减小试验误差的影响,保证试验结果的有效性,因此本次研究工作实际测量了某型燃气轮机裂纹转子工作状态下的拉伸形变值,并与计算值进行对比。

#### 4.1 试验方法

该型燃气轮机在其高压压气机转子前端设有电涡流位移传感器,正常状态下电涡流位移传感器配合高压压气机转子上的齿轮,对外输出脉冲电压形式的转速信号。当需要检测转子轴向状态时,通过更换监测软件,电涡流位移传感器可直接输出高压转子的相对位移信号。

选取了该型燃气轮机裂纹转子在拆检之前其高压转子在各运行工况下的位移测试数据,其裂纹状态如图 6 所示。按照本文仿真计算办法,构建了对应的裂纹模型,通过测试各级压气机气流压力,计算了高压转子在各工况下的轴向力。在考虑转子热膨胀效应的前提下,进而计算了在各轴向力下的裂纹拓展转子轴向位移值,并与实际测量值进行了对比。实验原理如图 22 所示,电涡流位移传感器实际位置如图 23 所示。

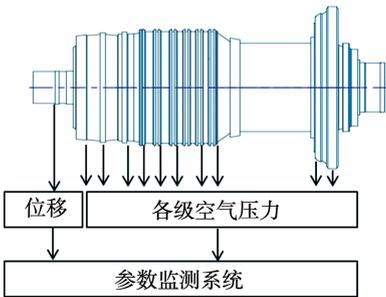


图 22 试验原理图

Fig. 22 Experimental schematic diagram

#### 4.2 实验结果

该型燃气轮机在使用时,分为 10% ~ 100% 共 10 个负荷运行工况。因高工况下试验误差对结果影响较小,因此选取了 50% ~ 100% 负荷运行工况进行对比。结果表明,裂纹拓展转子轴向位移的计算结果与测量结果较接近,最大误差约 9%,验证本文仿真计算方法正确有效,其对比结果如图 24 所示。



图 23 电涡流位移传感器实际图

Fig. 23 Real image of eddy current displacement sensor

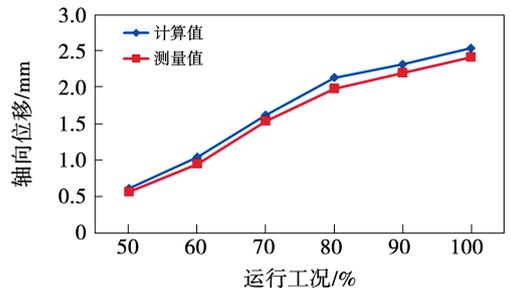


图 24 轴向位移对比结果

Fig. 24 Comparison result of axial displacement

## 5 结论

(1) 通过对某型燃气轮机高压转子进行三维建模,利用 Abaqus 软件计算得到转子在固定载荷下的应力云图,发现燃烧室及高压涡轮之间的封严轮盘处局部应力较大。

(2) 在燃烧室和涡轮之间的封严轮盘处预置转子裂纹模型,计算发现,该处裂纹发生明显扩展,确定此位置容易产生裂纹故障。

(3) 在转子模型的封严轮盘处预置不同状态的裂纹,得到了对应的裂纹拓展结果,而后在经裂纹拓展的转子模型上,施加不同的载荷条件,得到了转子拉压刚度、扭转刚度及弯曲刚度随裂纹深度、宽度的变化曲线,并通过插值法得到了转子拉压刚度、扭转刚度及弯曲刚度随裂纹变化的拟合公式,最终确定了裂纹对转子刚度的影响情况。

参考文献:

[1] 朱厚军,赵 玫,王德洋. Jeffcott 裂纹转子动力特性的研究 [J]. 振动与冲击,2001,20(1):1-4.  
ZHU Hou-jun,ZHAO Mei,WANG De-yang. A study on the dynamics of a cracked Jeffcott rotor [J]. Journal of Vibration and Shock,2001,20(1):1-4.

[2] 林言丽,褚福磊,郝如江. 开斜裂纹转子的动力特性 [J]. 振动与冲击,2008,27(1):25-29.  
LIN Yan-li,CHU Fu-lei,HAO Ru-jiang. Dynamic analysis of a Jeffcott rotor system with an opening slant crack on its shaft [J]. Journal of Vibration and Shock,2008,27(1):25-29.

[3] 林言丽,卢文秀,褚福磊. 直裂纹和 45°斜裂纹转子系统动力特性对比 [J]. 振动与冲击,2008,27(7):25-28.  
LIN Yan-li,LU Wen-xiu,CHU Fu-lei. Dynamic comparison between a transverse crack and a 45 degree slant one on shaft of a rotor system [J]. Journal of Vibration and Shock,2008,27(7):25-28.

[4] 朱厚军,郑艳平,赵 玫. 裂纹转子振动研究的现状与展望 [J]. 汽轮机技术,2001,43(5):257-261.  
ZHU Hou-jun,ZHENG Yan-ping,ZHAO Mei. Vibration of cracked rotor: A state of the art review [J]. Turbine Technology, 2001, 43(5):257-261.

[5] 高 建,朱晓梅. 转轴上裂纹开闭模型的研究 [J]. 应用力学学

报,1992,9(1):108-112.  
GAO Jian,ZHU Xiao-mei. Study on the model of the shaft crack opening and closing [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1992,9(1):108-112.

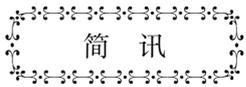
[6] GUO D,PENG Z K. Vibration analysis of a cracked rotor using Hilbert-Huang transform [J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2007,21(8):3030-3041.

[7] AL-SHUDEIFAT M A,BUTCHER E A,STERN C R. General harmonic balance solution of a cracked rotor bearing-disk system for harmonic and sub-harmonic analysis: Analytical and experimental approach [J]. International Journal of Engineering Science,2010,48(10):921-935.

[8] BACHSCHMID N,PENNACCHI P,TANZI E. Some remarks on breathing mechanism, on non-linear effects and on slant and helioidal cracks [J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2008,22(4):879-904.

[9] 韩 冰,刘占生,何 鹏,等. 裂纹深度逐渐增加的转子动力学特性试验 [J/OL]. 航空动力学报:1-9 [2023-06-14]. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.20220856.  
HAN Bing,LIU Zhan-sheng,HE Peng, et al. Experimental study on rotor dynamic characteristics with gradually increasing crack depth [J/OL]. Journal of Aerospace Power:1-9 [2023-06-14]. DOI:10.13224/j.cnki.jasp.20220856.

(丛 敏 编辑)



## RWE 集团将在日本交付 684 MW 海上风电项目

日本政府选择了一个由 RWE、三井和大阪燃气组成的联合体,在日本沿海建设一个大规模的海上风电项目。该项目计划的电力容量为 684 MW,可为国家的可再生能源目标做出重大贡献,并可加强国内和区域的电力供应链。项目的全面调试计划于 2029 年 6 月进行。这标志着 RWE 集团在日本和更广泛的亚太地区海上风电招标中首次取得成功。

RWE 集团目前运营着 19 个海上风电场,并计划将其全球海上风电装机容量从目前的 3.3 GW 增加到 2030 年的 10 GW。

(孙嘉忆摘译自 <https://www.powerengineeringint.com>)