

# 汽轮机 T 型叶根的超声纵波检测

张文雍, 王 岗, 徐 鸿

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206)

**摘 要:** 汽轮机的叶片是汽轮机的主要部件, 而叶片叶根的完整性关系到机组的安全稳定运行。为了检测 T 型叶根的完整性, 利用有限元计算软件对 T 型叶根的受力状况进行分析, 从而判定 T 型叶根的应力集中部位, 确定超声导波重点检查的位置。并且利用超声波探伤原理和自行设计的小角度微型纵波斜探头, 提出利用超声纵波对汽轮机 T 型叶根进行检测的方法, 并进行了试验分析, 证明汽轮机 T 型叶根的超声纵波检测是一种较为理想的探伤方法。

**关键词:** T 型叶根; 有限元; 应力分析; 超声波探伤; 微型纵波斜探头

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2010)09-0710-03

## Ultrasonic Testing of the T-Shaped Root of Turbine Blade by Longitudinal Wave

ZHANG Wen-Yong, WANG Gang, XU Hong

(Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment Ministry of Education,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Turbine blades are the main turbine components, the integrity of whose roots are related to the safe and stable operation of the unit. In order to test the integrity of the T-shaped leaves roots, stress analysis of the T-shaped leaves roots was performed by the finite-element computing software to define the location of the stress concentration and the ultrasound examination. The ultrasonic testing method on the T-shaped Root of Turbine Blade was put forward with law detection principle of ultrasonic, and through the self-designed micro longitudinal wave angle probe been self-designed, the experimental analysis was carried out. It was concluded that the ultrasonic testing method of the T-shaped Root of Turbine Blade by longitudinal wave was ideal.

**Keywords:** T-Leaf Root; Finite element; Stress analysis; Ultrasonic detection; Micro longitudinal wave angle probe

汽轮机是火力发电厂的主要部件, 而汽轮机的叶片则是汽轮机的命脉, 其结构完整性是保证汽轮机安全运行的重要因素<sup>[1]</sup>。多年来, 已经发现了许多叶片损坏的事例, 这不仅影响生产, 还造成其他叶片的碰伤。以往只是侧重于检测叶片的裸露工作部位, 而忽略了叶片根部(插入在轮缘部位)的检测。事实和理论说明, 叶片的根部(简称叶根)是受力较大, 腐蚀严重, 易产生应力腐蚀发生断裂的部位。

叶根的结构有许多型式<sup>[1]</sup>, 如: 叉型、T 型和枞树型等。型式不同, 所采用的探伤方法也不同。T 型叶根是汽轮机最常见的一种叶根型式, 它埋藏在

叶轮槽内, 结构复杂、尺寸小。若叶根在拆卸情况下进行检测, 会延长检修周期, 且拆卸工艺复杂、成本高。故在不拆卸的情况下采取有效的检测方法对 T 型叶根进行探伤具有很大意义。为了有效准确地检测出危害缺陷, 笔者利用超声波探伤的原理<sup>[2]</sup>, 通过有限元应力分析, 利用设计的纵波微型斜探头, 对 T 型叶根超声波检测方法进行了探讨研究。

### 1 应力分析

为了确定叶根的最危险截面, 便于重点检测, 利用大型商用有限元分析软件 ANSYS, 对 T 型叶根的应力分布状况进行模拟。

#### 1.1 模型的建立和网格划分

选取 T 型叶根, 根据实际尺寸建立二维几何模

收稿日期: 2009-09-14

作者简介: 张文雍(1983—), 男, 工学硕士, 主要研究方向为管道超声导波无损检测技术。

型,通过定义单元类型、材料属性和网格划分等得到有限元实体模型<sup>[3]</sup>。为了更好地分析敏感部位的应力分布情况,对预期的应力集中部分进行网格细化,如图 1 所示。

## 1.2 有限元计算结果与分析

在建立的模型的基础上施加载荷和约束条件,运行计算得到的 T 型叶根应力分布如图 2 所示。

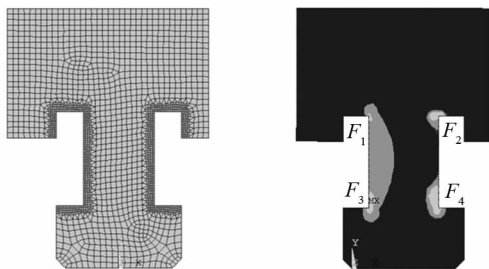


图 1 T 型叶根模型的网格 图 2 应力分布图

从现实情况考虑,叶根处产生裂纹的原因主要表现在:受切向或径向应力;叶根的加工精度不高;湿度过大,产生应力腐蚀;铆接时过紧或过松,从而产生交变应力<sup>[4]</sup>。

由于以上原因,应力主要集中在叶根颈部和叶根底部交叉处,即如图 2 所示的  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  处。因此,在对 T 型叶根进行超声波探伤时, $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$  和  $F_4$  处应是重点考虑的对象。

## 2 纵波检测方案的提出

### 2.1 纵波检测的可行性

T 型叶根深藏在叶轮内,只能从外露部分寻找探伤面,且可探伤面狭小,探头能扫查的范围受到限制,而且叶片间隙狭窄,探头放置困难。另外,叶片叶根尺寸小、形状复杂,超声波探伤时固有反射波和变形波多,严重影响了对缺陷回波的判断。

以往对于 T 型叶根的检测,采用微型纵波探头<sup>[5-6]</sup>探伤,如图 3 所示,这对平直探测面的探伤是可行的。但大多数叶根探伤面为凹型弧面,同样存在探测面与探头的耦合问题。因此,根据以上叶根结构形式的特点,通过研究发现,采用纵波微型斜探头在叶身的背弧面进行探伤是可行有效的。

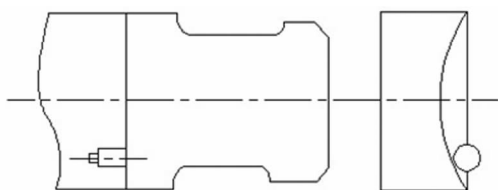


图 3 微型纵波探头探伤

### 2.2 探头、仪器和试块的选择

#### 2.2.1 纵波微型斜探头选择

在实际应用中,导波探头的设计取决于以下几个方面<sup>[7]</sup>:① 管中导波的频散曲线。② 待检验管件的规格(包括外径、壁厚等)与声学特性。③ 检测灵敏度。④ 管件中缺陷的性质(原始制造缺陷还是服役期间可能产生的缺陷)。⑤ 检测环境(包括温度、表面状态等)。

根据叶根结构形式的特点以及以上要求,选择了纵波微型斜探头方法。选择探头角度应遵守的基本原则<sup>[8]</sup>有:① 主声束入射到裂纹与叶根面形成的端角处。② 裂纹产生的回波信号尽可能避开杂波信号或固有回波。③ 波形单一,容易判断。④ 确定探伤灵敏度尽可能用固有回波信号。

叶根探伤要求探头体积小、前沿短、灵敏度高。按照要求,设计出如图 4 所示的斜探头(采用聚枫树脂)结构,方便安装。图中  $L_0$  为最小前沿长度, $a$  为晶片宽度, $\alpha$  为入射角,从图 4 可以看出:

$$\frac{a}{2} = L_0 \cos \alpha \quad (1)$$

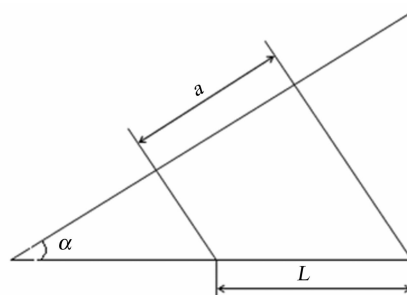


图 4 斜探头结构图

由折射角与入射角关系式:

$$\frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{3230} \quad (2)$$

式中  $c_1$  为透声楔中纵波声速; $\beta$  为折射角。

由式(1)和(2)可得最小前沿长度  $L_0$  为:

$$L_0 = \frac{a}{2 \cos \alpha} \quad (3)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{c_1}{3230} \cdot \sin \beta \right) \quad (4)$$

由上述分析,为减小  $L_0$ ,晶片的尺寸应尽可能小。此外,对于一定的晶片尺寸和折射角  $\beta$ ,减小透声楔中纵波声速,也可以减小入射角  $\alpha$ ,以达到减小前沿尺寸  $L_0$  的目的。

由于汽轮机转轮上叶片间隙大部分都  $< 7 \text{ mm}$ ,因此所用探头的高度也应该  $< 7 \text{ mm}$ 。通过多方面

的综合考虑和分析,选择了微型短前沿纵波探头。其频率为 5 MHz、晶片尺寸 6 mm×6 mm(或 5 mm×5 mm)、高度 6 mm、折射角 35°~70°之间,探头楔块采用聚枫树脂,探伤面改在叶片的背弧面,利用一次或二次波来探测 T 型叶根的裂纹。

### 2.2.2 检验仪器和试块的选择

(1) 超声波探伤仪应符合 JB/T 10061 标准的要求:① 超声波探伤仪工作频率为 1~10 MHz。② 衰减器的总衰减量≥60 dB,在探伤仪规定的工作频率范围内衰减器每 12 dB 的工作误差≤±1 dB。③ 水平线性误差≤2%。④ 垂直线性误差≤8%。

(2) 叶片检测所用的试块分为标准试块和对比试块 2 种。标准试块采用 JB/T 10063 标准的 1 号试块,用于对探头入射点、折射角等有关性能测试和仪器的基线调节。对比试块可采用材质相近的同型号叶片,若无法做到则应根据该级叶根结构图,选择合适的探伤技术条件。

(3) 耦合剂的选择非常重要,透声性较好的甘油(丙三醇)或机油是较好的选择。其次,被探叶片的叶身或叶根的探测面应进行清理,并按顺序编号,以便整理总结。

## 3 试验分析

### 3.1 探头安装

由上面的应力分析,如图 5 所示,探头装在在叶片的背弧面, $F_1$ , $F_2$ 处为裂纹,叶根端面为  $B$ , $B'$ 。

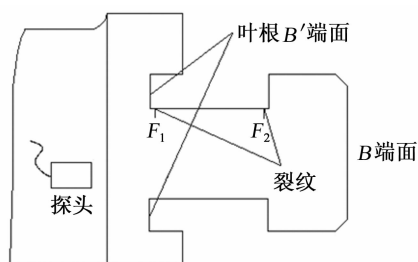


图 5 探头安装图

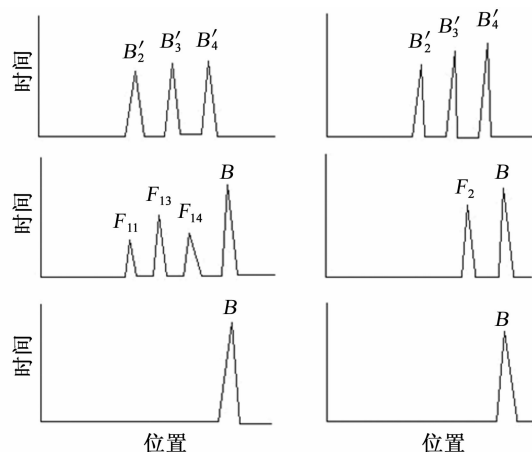
### 3.2 灵敏度的确定

根据文献[8]的结论及 DL/T 417—2000 标准<sup>[9]</sup>,以叶根端面回波为参考信号波,再增益 20 dB 即可。

### 3.3 裂纹的判定

叶根探伤的特点不仅是定点,还要定位。由上述的应力分析可知,应重点检测图中  $F_1$  位置。 $F_1$  位置采用一次波探伤, $F_2$  位置采用二次波探伤。探

测  $F_1$  位置时,左右移动发现图 6(a)所示波形,当  $B$  端面波和裂纹波交替变化,且波高超过探伤灵敏度时,即可判定为裂纹信号;探测  $F_2$  位置时,出现图 6(b)所示动态波形,裂纹波应该位于叶根端面波前,波高超过探伤灵敏度时,即可判为裂纹信号。



(a)  $F_1$  动态波形 (b)  $F_2$  动态波形  
图 6 探伤动态波形

## 4 结论

(1) 采用有限元方法,对叶根的受力情况进行了分析,确定了叶根的应力集中位置。根据有限元分析所得到的应力分布结果,对叶根进行超声波探伤有很大的帮助作用。

(2) 叶根超声波检验所用的探头耦合的好坏直接关系着叶根检测方法的可靠性和准确性,这需要进行细致的设计和长期的试验才能完成。上述所用的纵波微型斜探头,具较强的可靠性与准确性。

(3) T 型叶根纵波检测,可以克服传统的检测范围小、容易漏检和误判的缺点,且缺陷波直观、明显,大大提高了叶根检测的准确性和可靠性,并有操作简单、检测效率高等优点,实践证明是一种对 T 型叶根裂纹检测的理想工艺。

### 参考文献:

- [1] 韩中合,田松峰,马晓芳,等. 火电厂汽轮机设备及运行[M]. 北京:中国电力出版社,2002:51—63.
- [2] 李克明. 超声波探伤[M]. 北京:电力工业出版社,1980:270—282.
- [3] 马庆增,冯活河,黄建冲. 有限元应力分析在叶根超声波探伤上的辅助应用[J]. 广东电力,2000,15(1):300—306.

(下转第 718 页)

合方式。

## 7 讨论

(1) 由对缺陷的检验概率分析可知,如果缺陷达到一定尺寸,射线检验可达到 100% 的检出概率。实际上,大部分缺陷检验尺寸和真实尺寸存在较大的差异(如裂纹尺寸),这种测量结果的差异显然谈不上检验结果“可靠”。除了用缺陷检出概率来考虑检验可靠性外,还要考虑缺陷检验精确度的因素。

(2) 射线检验可靠性还应该包含更为广泛的意义,是一系列综合特性的综合体现,包括:射线检验方法对缺陷的检验能力(狭义可靠性);射线检验方法的适用性及可操作性;射线检验方法的正确性;对缺陷判定的准确性;记录、报告的完整性;对检验过程的控制能力等。要提高射线检验可靠性,必须优化射线检验活动中的每一个过程。

(3) 射线透照方法的影响:当射线源放在焊缝中心平面时,缺陷与射线束平行,最容易被检验出来。当射线束与缺陷平面成一定角度时,如:源与焊缝中心平面倾斜度从  $0^\circ$  到  $15^\circ$ ,再倾斜到  $25^\circ$ ,角度逐渐增加,缺陷在射线底片上的影像也从有到无,或从大到小。所以对于沿径向(壁厚方向)变化的缺陷容易被检验出来,而这类缺陷从受力和安全方面考虑是最危险的缺陷。因此,为了更好地发现缺陷,透照时应尽量让源处在焊缝中心平面上或让射线束的方向与缺陷平面平行。

(4) 裂纹开口宽度和裂纹平面与射线夹角:从评片结果表中可以看出,解剖后裂纹的真实长度比射线检验底片上评片得出的影像长度长。经金相显微镜放大裂纹的开口宽度测量得出:裂纹开口宽度  $< 0.09 \text{ mm}$  时,射线检验不可能检出。裂纹开口宽度  $> 0.09 \text{ mm}$ ,但与射线夹角  $> 15^\circ$  时,射线检出率明显下降。

(上接第 712 页)

- [4] 刘志江,袁平,蔡礼东. 一台 300MW 汽轮机次末级叶片断裂损伤原因分析[J]. 中国电力,2000,33(6):7—10.
- [5] 宋绍河. 汽轮机叶根新型超声波探头的研制[J]. 甘肃电力,1994(2):43—45.
- [6] 路正基,王兴明. 汽轮机叶片 T 形叶根裂纹的检测[J].

## 8 结论

对预埋在异种金属焊缝试块中一定位置上的人工缺陷进行射线检验可靠性分析,得出如下结论:

(1) 相同透照方式时,未熔合的检验可靠性高于裂纹检验可靠性。

(2) 对试块中预埋的人工自然裂纹来说,如果裂纹开口尺寸  $> 0.09 \text{ mm}$  时,检验可靠性  $> 90\%$ 。

(3) 中心透照法  $0^\circ$  检验可靠性要高于偏心透照法  $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$  和双壁单影透照法  $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ$  的检验可靠性。

(4) 在进行射线透照时,优先选用中心透照法,可以得到较高的检验可靠性。

## 参考文献:

- [1] RSE-M—2005 Surveillance and ISI rules for mechanical components of PWR nuclear islands[S].
- [2] ASME—2004 Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI Rules for In-service Inspection of NPP Components[S].
- [3] 曾秋成. 技术数据统计方法[M]. 安徽:安徽科技出版社,1983:223—242.
- [4] 郑世才. 无损检验技术的可靠性[J]. 无损检测,1995,17(8):218—230.
- [5] Alan P Berens. NDE reliability data analysis [J]. Quantitative Non-Destructive Evaluation, :689—701.
- [6] 程志虎,等. 常规无损检验可靠性概念的分析与修正[J]. 无损检测,1999,21(1)
- [7] 刘品,等. 可靠性工程基础[M]. 北京:中国计量出版社,2002.
- [8] 王纪林,等. 概率论与数理统计[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [9] 王沫然. MATLAB6.0 与科学计算[M]. 北京:电子出版社,2001.
- [10] ASME XI—2004 [S].

无损探伤,1989(4):14—16.

- [7] 江学荣,杜好阳. 无缝钢管超声导波检测技术[J]. 广东电力,2002,15(5):33—35.
- [8] 林德源,陈开路,陈秉忠. 汽轮机叶片 T 形叶根的超声横波探伤[J]. 无损探伤,2005,27(10):556—558.
- [9] DL/T 714—2000 汽轮机叶片超声波检验技术导则[S].

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告