

## 火力電廠汽機轉子龜裂之破損評估

陳瑞麒, 石振宇

台灣電力公司綜合研究所

### 摘要

某火力電廠大修時發現，低壓汽機L-1級動葉片轉子鳩尾槽有多處發生龜裂，電廠為了評估L-1鳩尾槽裂紋問題，包括其運轉使用之應力分布、殘餘壽命及未來在運轉和維修上的可行之道，因此委託本所進行葉根槽的結構力學分析工作。本研究針對該型低壓汽機L-1級動葉片、轉子鳩尾槽及附近轉軸進行幾何尺寸量測，並建立三維實體模型，然後進行FEM應力分析、模態分析及破裂力學分析，根據分析結果找出鳩尾槽發生龜裂的肇因，評估裂紋的成長速率，並提出因應之道。

**關鍵字：**鳩尾槽裂紋、有限元素法、裂紋成長

### ABSTRACT

L-1 stage steeple of low pressure steam turbine in power station was found some cracks. In order to evaluate the condition of cracked steeples, including stress distribution, remaining life and repair suggestion, power station entrusts TPRI to do some analyses on it. The content of this research includes geometrical measurement of L-1 stage blade and steeple, solid model construction, FEM stress analysis, modal analysis and fracture analysis. According to the analysis results, we find the root cause of the problem, evaluate the crack propagation rate and propose a solution for it

**Keywords:** cracked steeples, finite element method, crack propagation

### 一、緒論

某火力發電廠大修時發現，低壓汽機倒數第二級 (L-1 級) 動葉片轉子鳩尾槽有多處發生龜裂，經檢修人員拆除 2 組葉片 (3 片 1 組) 以磁粉探傷 (MT) 檢測裂紋長度，由於裂紋尚淺並考量營運壓力，因此清理後隨即回裝運轉發電。為了評估 L-1 鳩尾槽裂紋問題，包括其運轉使用之應力分布、殘餘壽命及未來在運轉和維修上的可行之道，希望以有限元素方法進行結構力學分析工作，以尋求解決的對策。本計畫針對低壓汽機 L-1 級動葉片、轉子鳩尾槽及附近轉軸進行幾何尺寸量測，並建立三維實體模型，然後進行 FEM 應力分析、模態分析及破裂力學分析，根據分析結果找出鳩尾槽發生龜裂的肇因，評估裂紋的成長速率，並提出因應之道，以維護機組運轉安全。

### 二、分析方法

#### 2.1 L-1 級動葉片三維實體模型之建立

L-1 級動葉片及鳩尾槽欲進行有限元

素模擬分析必須先取得其實體幾何模型，而這些資料無法由原廠提供，因此必須利用逆向工程的方式來獲得。首先必須利用三維座標量測儀器進行幾何量測，所採用的是光學掃描式量測儀器。之後再利用 CAD 軟體從點群資料來建立三維實體模型，由於整圈的 L-1 級葉片共有 120 片，每 3 片葉片利用護環連接在一起，因此只須建立整圈 L-1 級葉片 1/40 的模型即可，圖 1 是 L-1 級整體組合在一起的實體模型。

#### 2.2 以 XFEM 進行裂紋分析

目前 ABAQUS 有限元素軟體發展了 XFEM 的技術來簡化破裂力學分析工作，只要將代表裂紋的曲面定位在原來鳩尾槽的實體模型上，鳩尾槽在做網格劃分時不必考慮裂紋的存在，軟體在進行分析工作時即可依據代表裂紋的曲面將原有的網格切開，這大大節省了網格劃分的工作。磁粒檢測的結果顯示，最大裂紋在位於鳩尾槽凹側面靠下層凹槽的出口端，出口端面長 8 mm，溝槽內長 6 mm。因此，分析時即以此裂紋尺寸

為代表，假設其為橢圓形的裂紋，如圖 2 所示，加上 3600 RPM 的離心力，進行應力分析。

### 三、分析結果

#### 3.1 含裂紋鳩尾槽之離心應力分析

圖 3 是葉根及含裂紋鳩尾槽受離心力的變形量分布，裂紋因受離心力而被拉開，因此鳩尾槽在裂紋上方的部位，其變形量比其他鳩尾槽相對應部位為高。原無裂紋鳩尾槽的最大主應力位置是發生在第 1 支葉片鳩尾槽凹側面靠下層凹槽的出口端，如圖 4 所示，其直接進材料的降伏應力且與裂紋發現位置相符；鳩尾槽產生裂紋後其最大主應力位於裂紋尖端靠下層凹槽處，如圖 5 所示。裂紋因受離心力而被拉開，因此是屬於第一型的破壞模式。

#### 3.2 含裂紋鳩尾槽之破裂力學分析

有了應力分布，即可利用 ABAQUS 計算出此裂紋的應力強度因子 (Stress Intensity Factor)。8 mm\*6 mm 尺寸的橢圓形裂紋，其最大應力強度因子  $K_I$  為  $2318 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ，而鳩尾槽所屬鋼材之臨界應力強度因子  $K_{Ic}$  (Critical Stress Intensity Factor) 保守估計約為  $6300 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ，因此該鳩尾槽的裂紋還不會急速裂穿。

裂紋成長後其對應的  $K_I$  值即產生變化， $\Delta K_I$  也會隨之變化，因此在利用裂紋傳播速率圖估算裂紋成長量時必須先有裂紋深度與  $K_I$  的關係曲線，才能據以估算在裂紋深度  $a$  情況下之  $\Delta K_I$  值。通常裂紋深度  $a$  與  $K_I$  的關係曲線是利用有限元素軟體分析計算而得，由於 L-1 鳩尾槽目前最大裂紋的深度在切線向及軸向分別為 8 mm 及 6 mm，因此假設目前裂紋的形狀為橢圓形，當裂紋成長時其形狀還是維持同樣長短軸比例的橢圓形。圖 6 即是裂紋深度與  $K_I$  關係曲線的計算結果，一開始  $K_I$  值隨著軸向裂紋深度的增加而增加，當軸向裂紋深度達到約 19.6 mm 其  $K_I$  值即達臨界應力強度因子，因此裂紋會急速裂開，此時葉根與鳩尾槽的接觸位置隨之改變，含裂紋鳩尾槽所承受離心力的負載，一部分轉由相鄰的鳩尾槽來承受，含裂紋鳩尾槽的應力隨之降低，因此  $K_I$  值便隨之下降，當軸向裂紋深度繼續增加時值又隨之上升。

#### 3.3 鳩尾槽裂紋成長分析

目前 L-1 鳩尾槽所受週期變化負載的來源有二，其一為機組在穩定運轉狀態下的蒸氣擾動，其二為起停機離心力的變化。針對蒸氣的擾動，其  $\Delta K_I$  值很小，並未超過  $\Delta K_I$  的門檻值  $78.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ，因此不會造成裂紋的成長。針對起停機離心力的變化，目前鳩尾槽在軸向裂紋深度為 6 mm，其  $\Delta K_I$  值為  $2318 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ，為簡化計算程序及保守估算起見，以軸向裂紋深度為 8 mm 時的值  $2520 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$  作為起停機時的  $\Delta K_I$  值，由裂紋傳播速率圖可得其裂紋傳播速率  $da/dN$  保守估算約為 0.05mm/次。由運轉歷史可知保守估算約起停 10 次/年，至下一次大修止必須運轉 2 年，因此其軸向裂紋約成長 1 mm ( $0.05 \text{ mm/次} * 10 \text{ 次/年} * 2 \text{ 年}$ )，此時軸向裂紋深度約為 7 mm，其  $K_I$  值約為  $2419 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$ ，離臨界應力強度因子尚遠，因此運轉至下次大修尚可安全無虞。

### 四、圖片



圖 1、L-1 級動葉片整體組合在一起的實體模型



圖 2 將代表裂紋的曲面定位在原來鳩尾槽的實體模型上

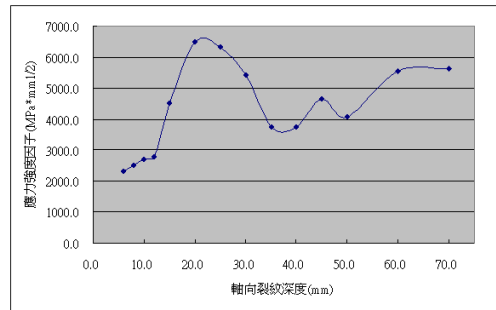


圖 6、鳩尾槽裂紋深度 a 與  $K_I$  的關係曲線

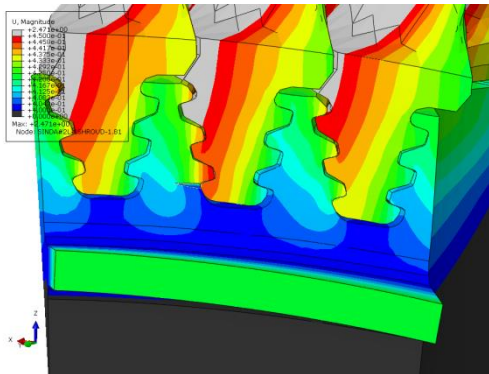


圖 3、葉根及含裂紋鳩尾槽受離心力的變形量分布

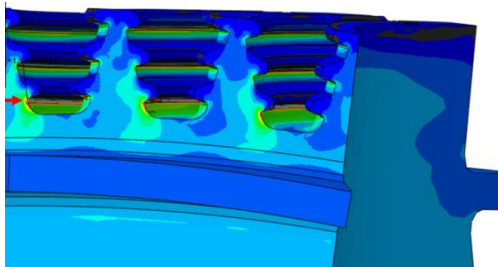


圖 4、原無裂紋鳩尾槽的最大主應力位置

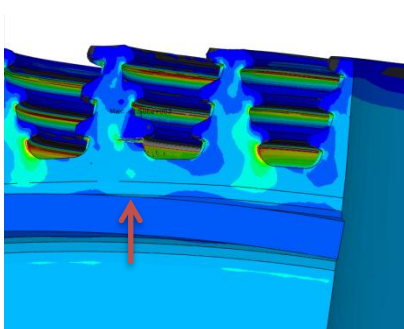


圖 5、含裂紋鳩尾槽受離心力的最大主應力分布