

電廠低壓汽機末級葉片龜裂肇因分析

陳瑞麒

台電公司綜合研究所

摘要

電廠低壓汽機運轉僅 7 年即發生 3 次末級動葉片 cover segment 龜裂事件，為確保機組穩定運轉及減少運轉壓力，必需尋求其龜裂肇因及改善對策。本研究針對低壓汽機之末級動葉片及軸碟等部位進行幾何尺寸量測及實體模型建立，然後進行 FEM 應力分析，由分析結果找出 cover segment 發生龜裂的肇因，並進行 cover segment 尺寸微調分析以降低其應力值，避免龜裂問題再度發生，影響機組運轉安全。

關鍵字：應力分析、汽機葉片、龜裂

ABSTRACT

Cover segments of L-0 turbine blade were found cracking problem 3 times in 7 years. In order to let the unit operate stably and reduce operation pressure, we must find cracking root cause and its countermeasure. The contents of this project include geometry measurement of L-0 blade and disk, solid model construction, FEM stress analysis. From analysis results, we can find cracking root cause. Then we tune the size of cover segment to reduce its stress level. So we can avoid cracking problem happening again and make sure the unit operates safely.

Keywords: stress analysis、turbine blade、cracking

一、緒論

電廠低壓汽機如圖 1 所示，於大修時發現 cover segment 損壞，如圖 2。該型汽機 cover segment 運轉僅 7 年即發生 3 次損壞事件，故需尋求肇因及改善對策，以為確保機組穩定運轉及減少運轉壓力。

本研究對低壓汽機之動葉片及軸碟(disk)等部位進行幾何尺寸量測及實體模型建立，然後進行 FEM 應力分析，由分析結果找出 cover segment 發生龜裂的肇因，進而尋求改善對策，以避免龜裂問題再度發生，影響機組運轉安全。

二、低壓汽機動葉片之應力分析

本節針對低壓汽機末級動葉片進行應力分析，圖 3 是低壓汽機末級動葉片細部構造，圖 4 是低壓汽機末級動葉片之 cover segment。首先依照原廠的幾何模型進行離心應力分析，再依現場實際的幾何模型進行應力分析，依據分析結果比較其差異性，同時判斷 cover segment 龜裂的肇因。接著再

針對 cover segment 的尺寸進行各種微調，企圖降低其應力值，以解決 cover segment 龜裂的問題。

2.1 應力分析

本節將針對低壓汽機末級動葉片進行離心應力分析，首先依照原廠 cover segment 的幾何模型進行離心應力分析，再依現場實際 cover segment 的幾何模型進行應力分析，依據分析結果比較不同 cover segment 幾何形狀所造成的差異性，同時判斷 cover segment 龜裂的肇因。

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模型中提供，因此必須利用逆向工程的方式來獲得。再用 CAD 軟體從點群資料來建立三維實體模型，由於整圈的末級動葉片共有 94 片，葉片與葉片間利用 cover segment 連接在一起，因此只須建立整圈末級葉片 1/94 的模型即可，圖 5 是末級動葉片的實體模型，本模型定義為模型 1，圖 6 是葉片頂部

的實體模型，圖 7 是葉片中段的實體模型。

有了動葉片之葉片、軸碟及轉軸的三維實體模型後，接著再將其網格化，圖 8 是整體組合在一起的網格模型。葉片根部、插銷和軸碟間、葉片頂部和 cover segment 間、葉片中段凸出的 rod 和 sleeve 間均採用 contact pair 邊界條件。轉軸兩側端面採固定邊界條件，如圖 9 所示。整個 1/94 圈的模型利用 cyclic symmetry 的技巧進行分析，轉速為 3600 RPM。

在離心力作用下的應力分析結果如圖 10 所示，圖 11 是軸碟的最大主應力分布圖，在插銷孔處其所受應力已超過降伏應力；圖 12 是插銷的最大主應力分布圖，其所受應力也超過降伏應力，因此會產生永久的塑性變形而卡在孔內，如果將來有必要須將插銷取出會比較困難；圖 13 是葉根的最大主應力分布圖，在插銷孔處其所受應力也超過降伏應力；圖 14 是 cover segment 的最大主應力分布圖，靠近蒸汽入口側的實心 tenon 和靠近蒸汽出口側的空心 tenon 其所受應力超過降伏應力，此分析結果與原廠相比大致吻合。

接著再依現場實際 cover segment 的幾何模型進行應力分析，其實心 tenon 被鉚平，空心 tenon 被擴孔，如圖 15 所示，本模型定義為模型 2。cover segment 的最大主應力分析結果如圖 16 所示，除了靠近蒸汽出口側的實心 tenon 外，其餘 3 個 tenon 所受應力均超過降伏應力。此分析結果與模型 1 相比有一定的差距，這是因為 tenon 的幾何形狀不同，則其與葉片間在受離心力後的接觸狀態就會不一樣，因此應力的分布就會跟著改變。

cover segment 所受應力的來源可分為 3：第 1 為 cover segment 本身受到旋轉離心力而產生；第 2 為葉片受旋轉離心力後會產生徑向的伸長，如圖 17 所示，整圈葉片頂端的圓周長度也跟著伸長，因此 cover segment 就會被沿著切線方向拉長而產生應力；第 3 為葉片受旋轉離心力後還會產生 untwist 的現象，如圖 18 所示葉片會產生順時鐘旋轉，因此 cover segment 就會被沿 tenon 凸出的方向拉長而產生應力。

由以上分析可知，受力來源 1 可藉由降低 cover segment 的重量來減少其所受應力，但必須考慮葉片自然頻率的變化，不可

使自然頻率落入共振區。受力來源 2 和 3 可藉由調整 cover segment 與葉片間的間隙來減少其所受應力，而這個方式則有多種做法。在下一節中，我們將探討各種方法對降低 cover segment 所受應力的效果。

2.2 各種改善方案

第 1 種改善方案是將 2 個空心 tenon 加長 0.5 mm，如圖 19 所示，定義此模型為模型 3，分析結果如表 1 所示。此法預留了一點空隙，讓 cover segment 被拉長時有緩衝的作用，確實可有效降低空心 tenon 的應力。

第 2 種改善方案是切除部分 cover segment 的體積，如圖 20 所示，定義此模型為模型 4，分析結果如表 1 所示，此法降低空心 tenon 應力的效果有限。

第 3 種改善方案是將 cover segment 的寬度加寬 1 mm，如圖 21 所示，定義此模型為模型 5，分析結果如表 1 所示，此法亦可降低空心 tenon 的應力。

第 4 種改善方案是將 2 個空心 tenon 向左平移 0.5 mm，如圖 22 所示，它所代表的含意是 2 個空心 tenon 與葉片孔洞的間隙（靠出汽側）加寬 0.5 mm，如圖 23 所示，定義此模型為模型 6，分析結果如表 1 所示。此法同樣預留了一點空隙，讓 cover segment 被拉長時有緩衝的作用，因此可有效降低空心 tenon 的應力。

由以上 4 種改善方案的分析可知，第 1 種改善方案效果最好，第 4 種改善方案次之。本研究 cover segment 龜裂的肇因是由於靜態應力過高，再加上振動應力的作用，產生高週次疲勞（high cycle fatigue），最終導致壽命耗盡而產生龜裂。本研究的解決之道便是同時採用上述的第 1 種和第 4 種改善方案，可有效降低空心 tenon 的靜態應力，而達到延長壽命的效果。同時這種方法既不用改變 cover segment 的幾何形狀，也不用改變其材質，只要在安裝 cover segment 時預留一點間隙即可，是最簡單而實用得方法。

三、結論與建議

- 1、本研究建立了動葉片及軸碟的分析模型。
- 2、本研究針對力學分析模型及結果作一簡述，完成低壓汽機末級動葉片的應力分

析，確定 cover segment 龜裂的肇因，並提出改善方案。

3、 原廠分析模型中，cover segment 實心 tenon 並未與葉片鉚接，空心 tenon 也沒擴孔，與現場實際形狀不符，因此實際 cover segment 的應力分布會與原分析結果有所出入。

4、 在離心力作用下的應力分析結果顯示，葉根、插銷和軸碟間互相接觸的位置，其所受應力超過降伏應力，因此會產生永久的塑性變形。

5、 依現場實際 cover segment 的幾何模型進行應力分析，cover segment 的最大主應力分析結果顯示，除了靠近蒸汽出口側的實心 tenon 外，其餘 3 個 tenon 所受應力均超過降伏應力，由於此靜態應力過高，再加上振動應力的作用，產生高週次疲勞，最終導致空心 tenon 根部壽命耗盡而產生龜裂。

6、 cover segment 所受應力的來源可分為 3：第 1 為 cover segment 本身受到旋轉離心力而產生；第 2 為葉片受旋轉離心力後會產生徑向的伸長，整圈葉片頂端的圓周長度也跟著伸長，因此 cover segment 就會被沿著切線方向拉長而產生應力；第 3 為葉片受旋轉離心力後還會產生 untwist 的現象，因此 cover segment 就會被沿 tenon 凸出的方向拉長而產生應力。

7、 受力來源 1 可藉由降低 cover segment 的重量來減少其所受應力，這是原廠的做法，但必須考慮葉片自然頻率的變化，不可使自然頻率落入共振區。受力來源 2 和 3 可藉由調整 cover segment 與葉片間的間隙來減少其所受應力。

8、 本研究的解決之道便是同時採用 2.2 節的第 1 種和第 4 種改善方案，可有效降低空心 tenon 的靜態應力，使其遠離疲勞極限，而達到延長壽命的效果。同時這種方法既不用改變 cover segment 的幾何形狀，也不用改變其材質，只要在安裝 cover segment 時預留一點間隙即可，是最簡單而實用的方法。

四、參考文獻

[1] 陳瑞麒，「台中電廠汽機發電機轉子自然頻率之量測與分析」，台電公司 91 年度研究計畫 546-2305-03 完成報告。

[2] 陳瑞麒、蒯光陸、鍾秋峰、唐文元，「興達三、四號機低壓汽機末兩級動葉片

CAMPBELL 之建立」，台電公司 93 年度研究計畫 546-2312-03 完成報告。

[3] 陳瑞麒，「核三廠#1 機 LP 末兩級動葉片之模態分析」，台電公司 94 年度研究計畫 546-2309-9407 完成報告。

五、表格

	tenon 根部最大主應力 (MPa)			
	空心 tenon 靠入汽側	空心 tenon 靠出汽側	實心 tenon 靠出汽側	實心 tenon 靠入汽側
模型 1	520	892	205	1057
模型 2	673	693	174	874
模型 3	352	495	134	963
模型 4	570	683	420	916
模型 5	470	566	141	901
模型 6	409	495	153	895

表 1、各種分析模型 cover segment 的 4 個 tenon 根部最大主應力比較表

六、圖片



圖 1 低壓汽機末級動葉片



圖 2 動葉片 cover segment 龜裂

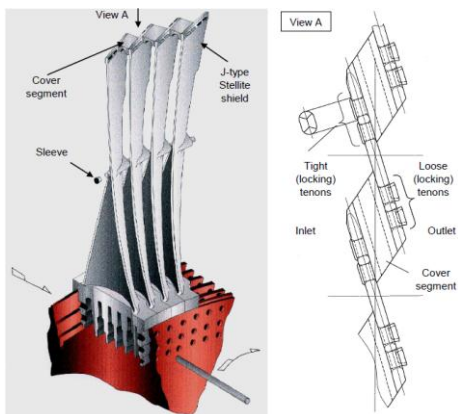


圖 3 低壓汽機末級動葉片細部構造圖

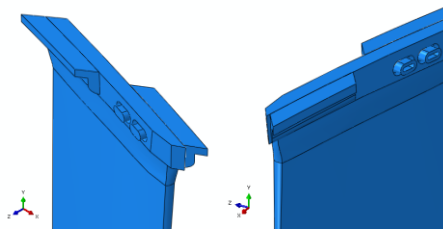


圖 6 葉片頂部的實體模型 (模型 1)

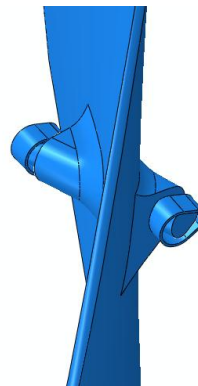


圖 7 葉片中段的實體模型



圖 4 低壓汽機末級動葉片之 cover segment

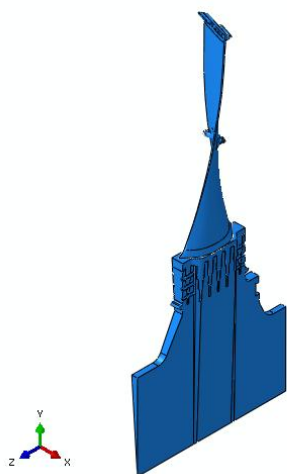


圖 5 低壓汽機末級動葉片 1/4 的實體模型



圖 8 低壓汽機末級動葉片、軸碟及轉軸的網格模型

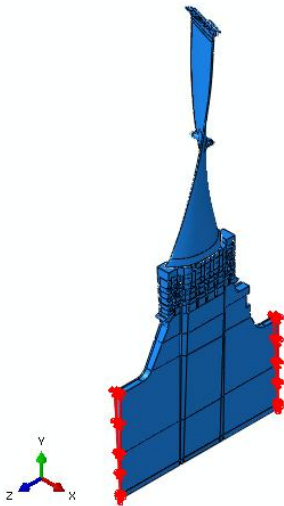


圖 9 轉軸兩側端面採固定邊界條件

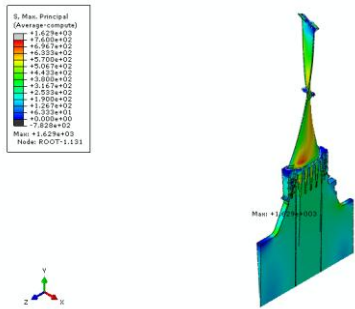


圖 10 模型 1 之整體離心應力分布圖

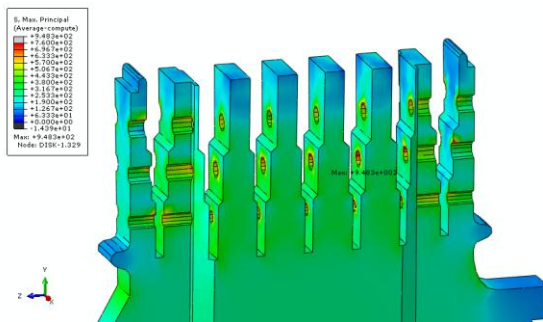


圖 11 模型 1 之軸碟離心應力分布圖

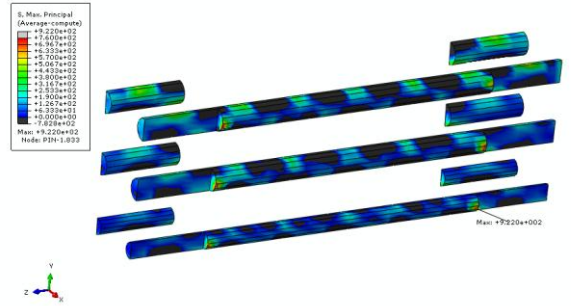


圖 12 模型 1 之插銷離心應力分布圖

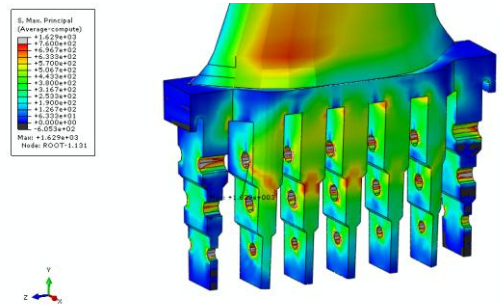


圖 13 模型 1 之葉根離心應力分布圖

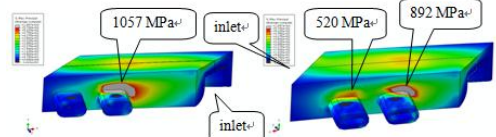


圖 14 模型 1 之 cover segment 離心應力分布圖

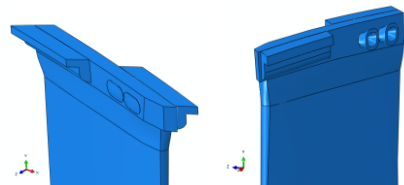


圖 15 現場實際 cover segment 的實體模型 (模型 2)

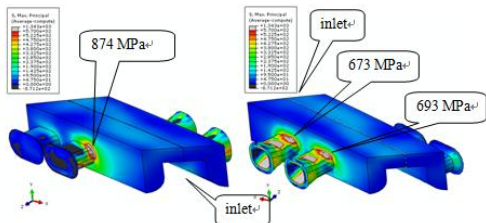


圖 16 模型 2 cover segment 的離心應力分布圖

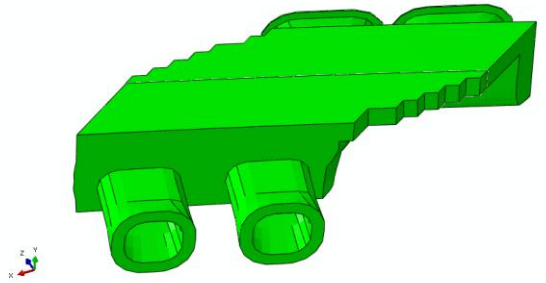


圖 20 模型 4：切除部分 cover segment

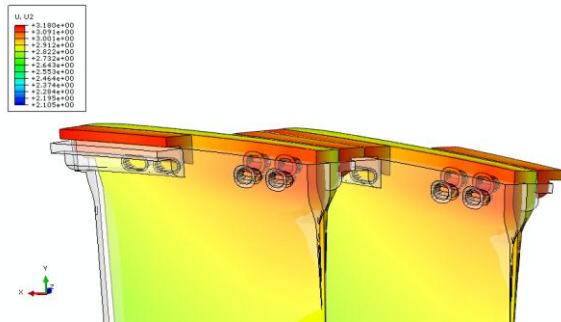


圖 17 模型 2 cover segment 受旋轉離心力而變形

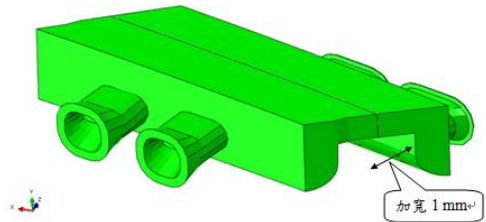


圖 21 模型 5：將 cover segment 的寬度加寬 1 mm

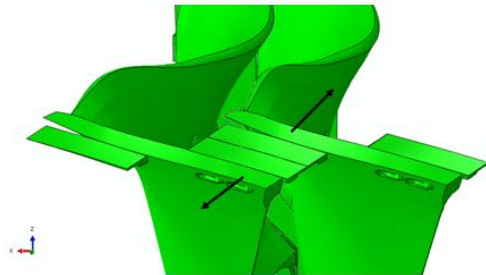


圖 18 葉片受旋轉離心力後會產生 untwist (順時鐘旋轉) 的現象

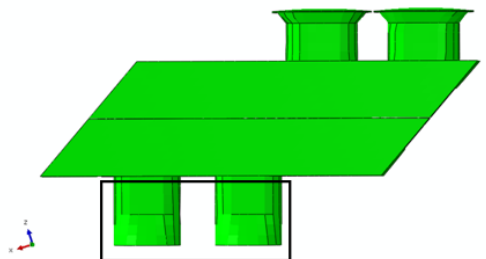


圖 22 模型 6：2 個空心 tenon 向左平移 0.5 mm

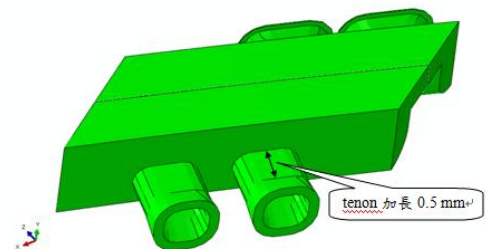


圖 19 模型 3：空心 tenon 加長 0.5 mm

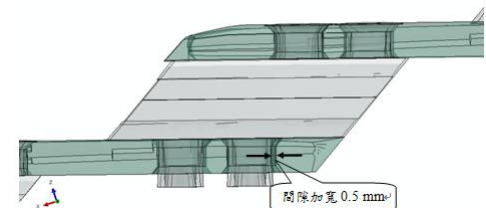


圖 23 模型 6：2 個空心 tenon 與葉片孔洞的間隙 (靠出汽側) 加寬 0.5 mm