

電廠熱回收鍋爐破管分析

陳瑞麒, 石振宇

台電綜合研究所

摘要

電廠熱回收鍋爐爐管焊道處發生破裂，經材料金相分析後於斷裂面發現由外壁向內壁傳播之疲勞條紋。在各種負載所造成的應力中，溫度造成的熱應力為最主要者，經有限元素法分析後，爐管龜裂處是局部應力最大處，它在熱機狀態時是壓應力，冷機狀態時是張應力，由於機組的多次起停，造成此處產生低週次疲勞 (low cycle fatigue)，最後壽命耗盡而產生龜裂。

關鍵字：鍋爐爐管、低週次疲勞、有限元素法、熱應力

ABSTRACT

A bead crack was found on the heat recovery boiler pipe of power station. Through metallographic analysis, we found fatigue stripes growing from outer wall to inner wall. Among all of the stresses, the temperature-induced thermal stress is the dominant one. Analyzed by finite element method, the maximum local stress is identical to the crack initiation position. It suffers compressive stress in hot state, and suffers tensional stress in cold state. After many times start-up and shot-down, the thermal stress may induce low cycle fatigue and cause the crack formation.

Keywords: Heat recovery boiler pipe, low cycle fatigue, finite element method, thermal stress

一、緒論

火力發電廠的熱回收鍋爐再經過 30 萬多小時的運轉，1758 次的起停機後，首次於熱回收鍋爐爐管與上集管的連接焊道處發生破管(圖 1)。該熱回收爐管位於鍋爐管排靠出口處，其功能是回收煙道中的餘熱加熱管內蒸氣，以充分利用燃燒的熱能。再熱器分上下集管，集管外徑為 219.1mm，上下集管以密集的爐管連接，爐管外徑為 38.1mm，爐管長度長達 15.6 米，作為熱交換器的功能，鍋爐熱氣流過管排，其熱量由爐管中之水蒸氣吸收以再利用，水蒸氣由較低溫的集管流經整排的爐管，吸收鍋爐排出氣體的熱量後，再由另一集管收集利用。由於鍋爐運轉溫度高達上百度，起停機所造成的溫度變化極大，推測熱應力會是主要的肇因。為了進一步了解其破裂的原因，對破裂組件進行了材料與有限元素的分析。

二、分析方法

2.1 材料分析

對破斷面進行了管壁厚度與材料成份分析，發現皆符合設計之規範。金相組織的觀察，也發現爐管並無明顯之劣化跡象。然而破斷面之一側，透過電子顯微鏡的觀察，在管外壁局部區域發現波浪狀條紋，方向由管外壁傳向管內壁，故推測破壞之起源點為管外壁，隨者機組長時間起停機後產生疲勞破壞，裂紋由管壁外側向管壁內成長，最終使爐管無法承受應力而穿管破裂。

2.2 有限元素分析

針對集管和爐管進行應力分析，以尋求爐管破損之肇因。首先根據集管和爐管的相關尺寸圖，建立三維幾何模型，如圖 2 所示。為了簡化分析模型，因此只取上、下集管的中間一小部分及相對應的爐管來建立幾何模型。而為了便於施加壓力負載條件，上、下集管的左右兩個端面均予以密封起來，這對於集管中間段和爐管的應力分布結果並不會有太大的影響。接下來將幾何模型網絡化，如圖 3 所示，所採用的是一階的

六面體元素。在邊界條件方面，X、Y、Z 方向位移固定的位置分別如圖 4~6 所示。在負載條件方面，必須包括溫度、蒸氣壓力和重力。由於分析共分為 2 個狀態，一是鍋爐在運轉時的熱機狀態，一是鍋爐在停機時的冷機狀態，這 2 個狀態的溫度和壓力是有所不同的。

在熱機狀態時，上集管的內壁溫度設為 330°C，下集管的內壁溫度設為 407°C，垂直爐管的內壁溫度設為由上到下(-Y 方向)由 330°C 線性變化到 407°C，而集管和爐管的外壁溫度設為由左到右(X 方向)由 500°C 線性變化到 489°C。蒸氣壓力方面，集管和爐管的內壁均設為 12.8 MPa。而在冷機狀態時，集管和爐管的溫度均為室溫 20°C，管內蒸氣壓力為室壓。各項參數及條件設定完之後，即可著手進行含熱傳之應力分析。

三、有限元素分析結果

由於破裂處是發生在上集管與爐管連接焊道處，結果僅截圖上集管部分。圖 7、8 是在熱機狀態上集管的絕對最大主應力分布。由於管壁外熱內冷，因此管壁外表面為壓應力，管壁內表面為張應力，最大主應力位於上集管內壁與中央爐管交接處，而爐管龜裂處則為壓應力。圖 9、10 是上集管的塑性應變分布，最大塑性應變亦位於上集管內壁與中央爐管交接處，而爐管龜裂處的塑性應變則為 4 個爐管鉚道中最大者。

圖 11 是在冷機狀態時上集管的絕對最大主應力分布情形，由於管壁在熱機狀態時有產生塑性應變，降為室溫後會產生殘留應力，此時管壁外表面為張應力，管壁內表面為壓應力。在冷機狀態時最大主應力位於爐管龜裂處，而上集管內壁與中央爐管交接處則為最小主應力處。圖 12 是在冷機狀態時上集管的塑性應變分布，最大塑性應變位於上集管內壁與中央爐管交接處，而爐管龜裂處的塑性應變則為 4 個鉚道中最大者。

四、結果討論

由以上的熱應力分析可知：

- 1、在各種負載所造成的應力中，溫度造成的熱應力為最主要者，蒸氣壓力所產生的應力次之，重力所產生的應力可忽略不計。
- 2、 爐管龜裂處雖不是應力最大的位置，但卻是局部應力最大處，也是 4 個爐管鉚道

中應力最大者，它在熱機狀態時是壓應力，冷機狀態時是張應力，由於機組的多次起停，造成此處產生低週次疲勞(low cycle fatigue)，最後壽命耗盡而產生龜裂。

3、在 4 個爐管中，龜裂的爐管位於熱煙氣的上游處，因此其管壁內外溫差最大，所產生的熱應力當然也最大，因此最先因壽命耗盡而產生龜裂。

4、應力最大處位於上集管內壁與中央爐管交接處，它在熱機狀態時是張應力，冷機狀態時是壓應力，由於機組的多次起停，亦會造成此處產生低週次疲勞，因此此處產生裂紋的機率也很高。但因集管管壁較厚，即使產生裂紋，也能撐較久的時間。因此，建議如果有機會的話，此處應進行裂紋檢測。

5、本集管與此次破裂爐管有相同位置的其他爐管亦可能因低週次疲勞而產生龜裂，建議下次大修應進行裂紋檢測。

五、圖片



圖 1、破管照片

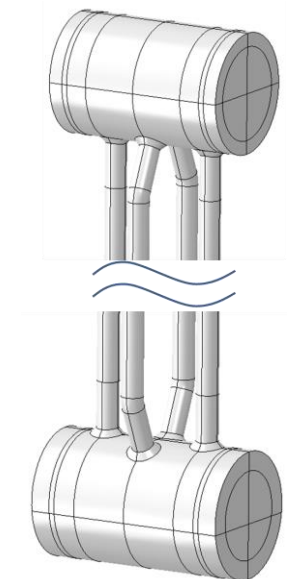


圖 2、三維幾何模型

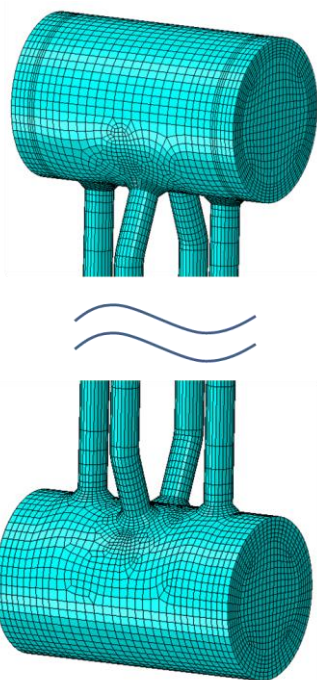


圖 3、網格化後之幾何模型

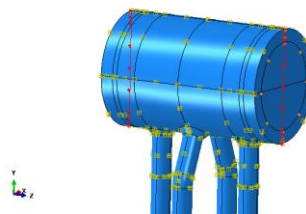


圖 4、邊界條件：X 方向位移固定的位置

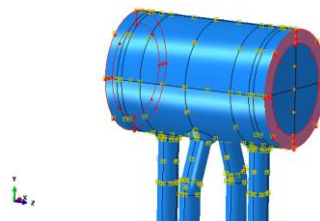


圖 5、邊界條件：Y 方向位移固定的位置

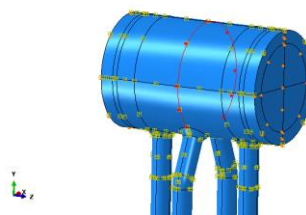


圖 6、邊界條件：Z 方向位移固定的位置

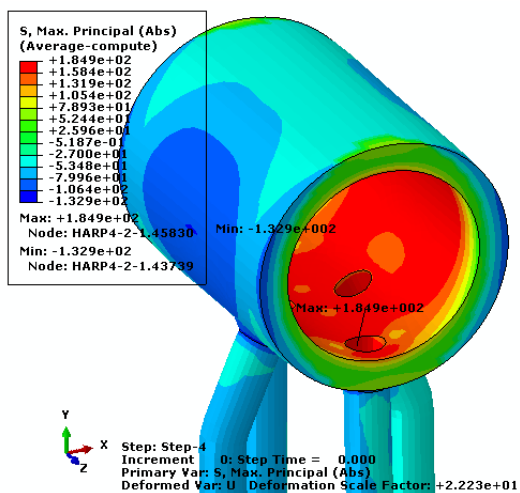


圖 7、熱機狀態時上集管的絕對最大主應力分布

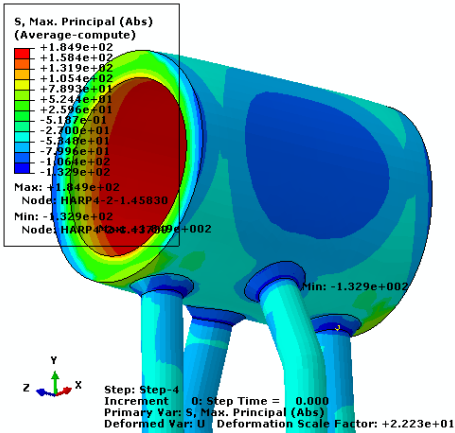


圖 8、熱機狀態時上集管的絕對最大主應力分布

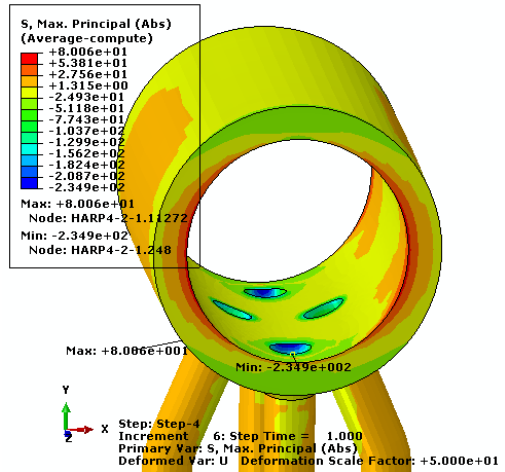


圖 11、冷機狀態時上集管的絕對最大主應力分布

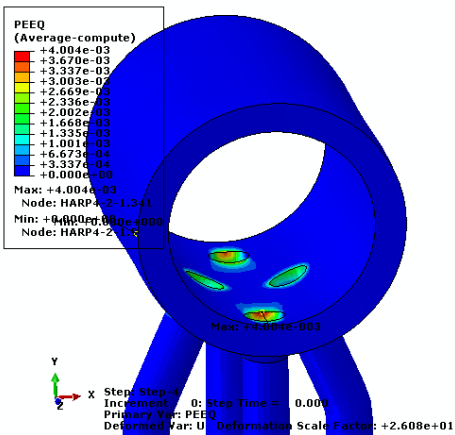


圖 9、熱機狀態時上集管的塑性應變分布

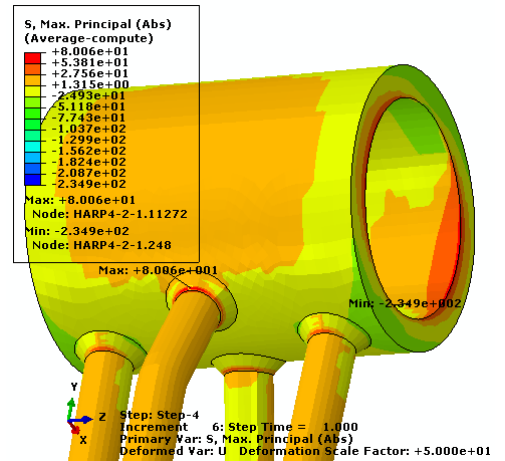


圖 12、冷機狀態時上集管的絕對最大主應力分布

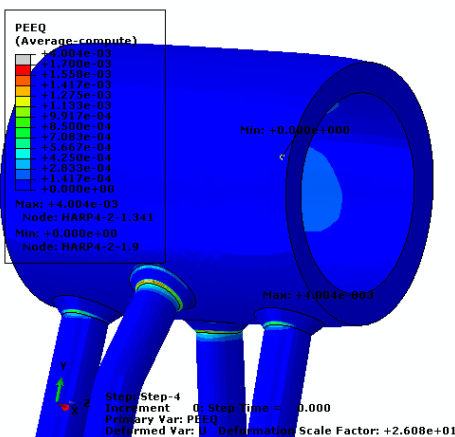


圖 10、熱機狀態時上集管的塑性應變分布

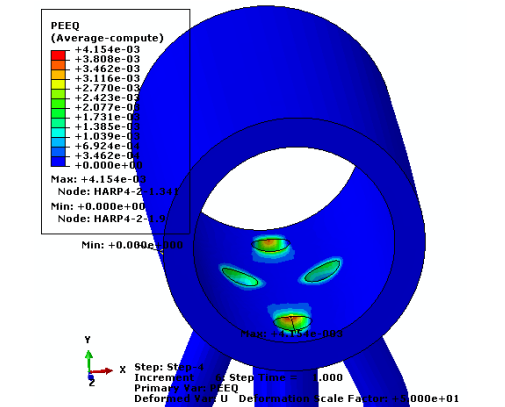


圖 13、冷機狀態時上集管的塑性應變分布

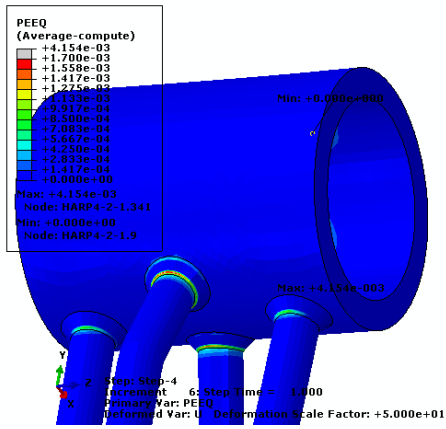


圖 14、冷機狀態時上集管的塑性應變分布