

## 引擎排氣系統熱結構分析

范詔欽  
華擎機械

### 摘要

隨著日趨嚴格的排汙與油耗法規要求，汽車引擎的設計朝向小排量高性能的趨勢前進。各系統零件所受到的負荷也越來越嚴苛，其中排氣系統負責廢氣的排放與轉化以符合排汙法規。而在高排氣溫下嚴重的熱應力與變形影響零件間的密封墊片的密封特性、螺栓鎖附特性變化及零件破壞等問題在引擎開發中是非常重要的課題之一。

在本文中我們建立排氣系統熱結構模擬計算模型，使用Abaqus進行熱結構應力與塑性變形分析，其中的溫度邊界條件使用STAR-CCM+搭配一維軟體AVL BOOST計算排氣與水套流場。

從計算結果可以評估密封墊片的密封性能、螺栓鎖附力在引擎工作中的軸力變化、排氣歧管熱塑性變形結果等，了解排氣系統的設計問題與改善方向。

**關鍵字：**密封墊片、塑性變形、STAR-CCM+、AVL BOOST、排氣歧管

### ABSTRACT

With increasingly stringent emission and fuel consumption regulations, automobile engine design trend toward small-displacement high performance forward. Each system parts are subject to increasingly stringent load, wherein the exhaust system is responsible for the conversion of exhaust gas emissions and to comply with emission regulations. At high exhaust temperatures and severe thermal stress sealing characteristics of the gasket, bolt loads change between the parts and destruction are very important topics in engine development.

We build an exhaust system thermal structure model. And using Abaqus to calculate structural stress and thermal plastic deformation, in which the temperature boundary conditions calculated by STAR-CCM+ with the one-dimensional calculation software AVL BOOST, include water jacket and exhaust flow field.

From the results can be assessed sealing gasket, bolt load change in engine work and exhaust manifold plastic deformation to understand the problem and improve the design direction.

**Keywords:** gasket, plastic deformation, bolt load

### 一、緒論

引擎排氣歧管在工作時承受非常高的溫度。為了在設計開發初期可排除後續可能的零件破壞，排氣歧管的熱結構疲勞分析(Thermal Mechanical Fatigue, TMF)被廣泛的應用。

常見的方式是以簡化的結構模型進行分析，在3D模型中將排氣歧管鎖付至一方塊，歧管內部手動設置溫度邊界條件。在溫度邊界設置準確的條件下可以與測試結果得到良好的對比，如[1]。2009年FEV發表了利用排氣歧管TMF計算結果進行歧管優

化的方式[2]，可提供有效的設變方向。可見排氣系統TMF分析對設計有很大的幫助。

本文以某機型排氣管熱結構分析為例，說明熱結構分析在引擎排氣系統的應用。

### 二、分析流程

排氣系統熱結構分析主要依照圖1之流程進行。主要的結構應力計算使用Abaqus完成，零件溫度變化以Abaqus進行熱傳計算獲得，其中的流體域邊界則使用計

算流體力學(CFD)軟體產生。

根據冷熱循環測試模式，引擎工況分為全負荷、倒拖及怠速三種工況。因此流體溫度場的計算根據工況分別計算，完成的計算結果依其邊界映射至結構網格以做後續的流固耦合計算。

### 三、模型設定

針對排氣歧管的模擬，計算的物理範圍包含缸頭、排氣歧管、渦輪至觸媒，以及相鄰的固定支架等。以下說明流體與結構模型的設置。

#### 3.1 流體邊界條件

根據冷熱循環模式(圖 2)，氣體側根據引擎負荷包含三種工況模式，冷卻水側包含兩種工作溫度。

這裡須注意的是氣體側流場的計算依照引擎循環採用暫態計算，其入出口的邊界條件則採用與測試結果標定完成的一維分析軟體 AVL BOOST 的計算結果，如圖 3。計算完成之溫度與熱傳係數以一個引擎循環的平均值作為邊界條件。

#### 3.2 結構有限元素模型

有限元素模型包含兩部分，熱傳與結構應力。網格的部分採用 Hypermesh 產生，計算模型則在 Abaqus/CAE 中完成。完成之模型如圖 4。

熱傳計算中所需的邊界條件透過映射由 CFD 網格映射至有限元素網格(圖 5)。計算時根據冷熱測試循環的時間讀入不同的工況邊界，計算零件溫度分布結果。

密封墊片的特性根據廠商提供的量測數據輸入，特性曲線如圖 6。

結構應力計算模型中以缸頭的節點設置為固定邊界，螺栓鎖附力加載後固定支架節點以模擬引擎組裝狀態，之後讀入熱傳計算結果計算熱應力。

### 四、計算結果

#### 4.1 熱傳計算

圖 7 為根據冷熱循環模式計算得到的溫度分布狀況。節點的溫度變化如圖 8，從

結果可以發現溫度可以超過 900°C，非常接近零件可以承受的極限。

#### 4.2 排氣歧管應力

從整體排氣系統來看，觸媒的配置與固定方式對排氣歧管及渦輪的膨脹行為產生很大的影響。在升溫階段觸媒膨脹將渦輪與歧管往左側推擠，在降溫階段觸媒又將渦輪往右側拉扯。這個現象有可能使得渦輪與歧管間以及渦輪與觸媒間這兩個墊片的密封性降低，造成排氣洩漏的問題。(圖 9)

針對排氣歧管，因本身熱膨脹以及前述系統配置的影響，零件內部的應力變化如圖 10。在升溫階段，與渦輪相接的出口段內部隔板承受拉應力，隔板底部周圍則為壓應力；在降溫階段隔板的拉應力降低，底部則轉變為拉應力，這兩個位置承受非常高的塑性應變。

歧管的塑性應變同樣集中在歧管出口隔板周圍，如圖 11。在塑性應變異常高的位置與測試零件之破壞點有很高的對比，顯示計算結果可以正確地預測測試結果。

根據計算結果與設計者討論後調整破壞區域設計，改善了應力集中現象，並且塑性變形變化量  $\Delta PEEQ$  也有效降低(圖 12)。新版設計經測試後未發生開裂，與 CAE 模擬的趨勢相符。

#### 4.3 墊片面壓

案例之排氣系統包含三個墊片，缸頭排氣墊片、排氣渦輪墊片與渦輪觸媒墊片。從計算的結果可以知道面壓的分布與變化狀況，以確認墊片設計是否符合需求。(圖 13~15)

#### 4.4 螺栓軸力

缸頭排氣歧管螺栓在不同工況下軸力變化如圖 16，從曲線可以發現在第 2 缸位置的 #6、#7 螺栓軸力變化最劇烈。其中 #6 螺栓平均軸力值約 7.85 kN，軸力的變異量約 9.9 kN。

從面壓的結果來看，雖然軸力在工作過程中會下降，但是缸頭與排氣歧管兩零件間的密封是沒有問題的。

### 五、結論

透過排氣系統的熱結構 CAE 分析可以了解螺栓軸力變化、墊片面壓分布以及排氣歧管應變狀況，對於問題的解析有非常大的幫助。設變前利用此流程預估測試結果可以節省大量的試作與測試成本。

### 六、參考文獻

- [1] R. M. Hazime, S. H. Dropps, D. H. Anderson, M. Y. Ali. Transient Non-linear FEA and TMF Life Estimates of Cast Exhaust Manifolds. SAE International, 2003-01-0918.
- [2] Taner Gocmez, Udo Deuster. An Integral Engineering Solution for Design of Exhaust Manifolds. SAE International, 2009-01-1229

### 七、圖片

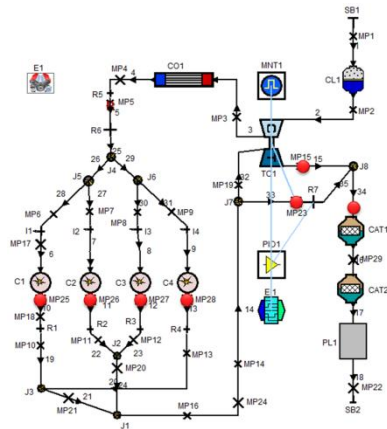


圖 3. 一維熱力學模型

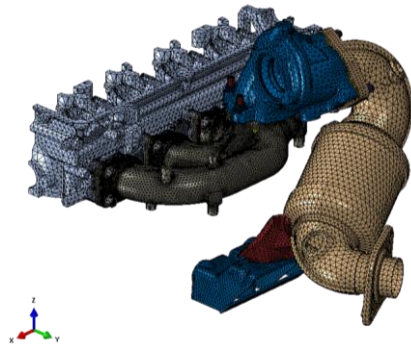


圖 4. 排氣系統 FEM 模型

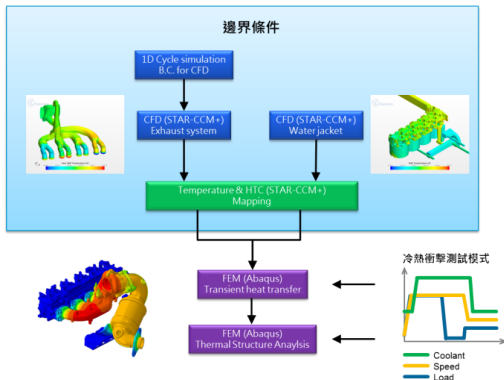


圖 1. 分析流程

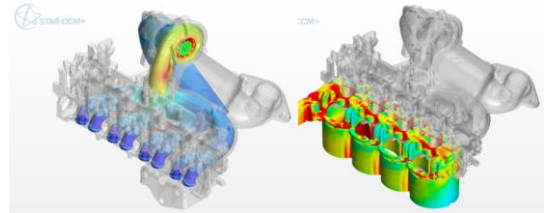


圖 5. 邊界條件映射

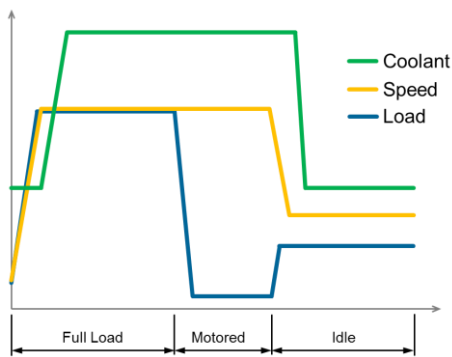


圖 2. 冷熱循環模式曲線

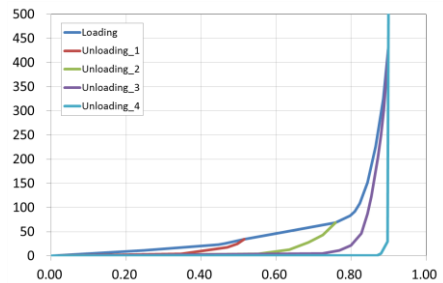


圖 6. 缸頭排氣墊片特性曲線

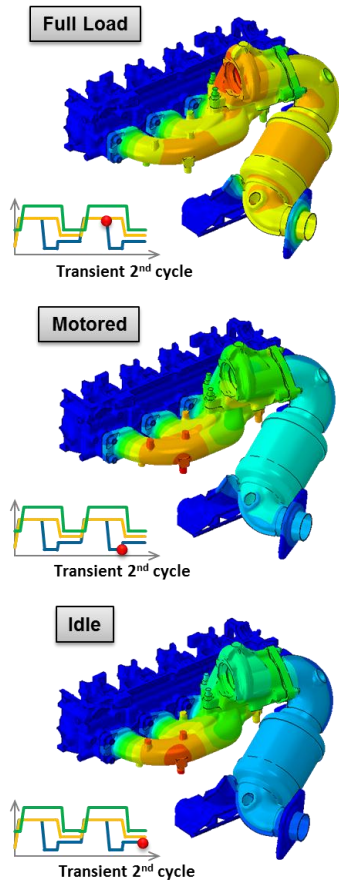


圖 7. 暫態熱傳計算結果

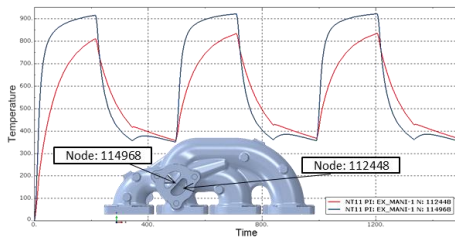


圖 8. 某節點溫度變化曲線

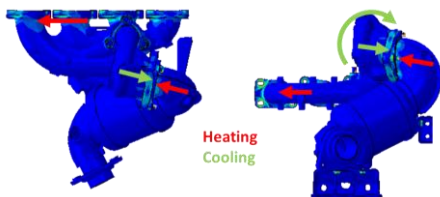


圖 9. 排氣系統膨脹變形趨勢

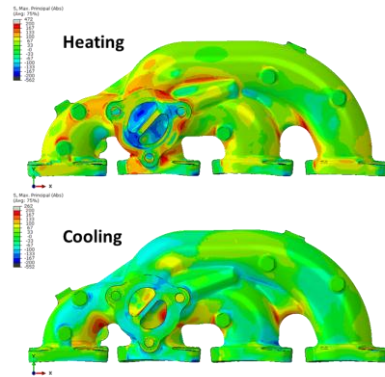


圖 10. 排氣歧管應力變化

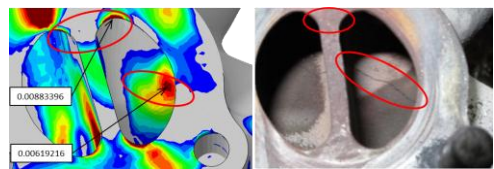


圖 11. 塑性應變與測試後零件比對

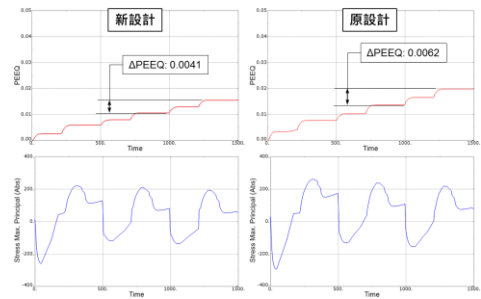


圖 12. 新舊版設計應力與應變改善效果

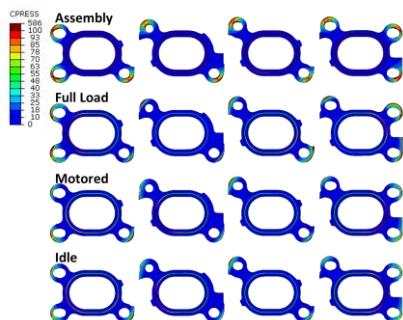


圖 13. 缸頭排氣墊片面壓

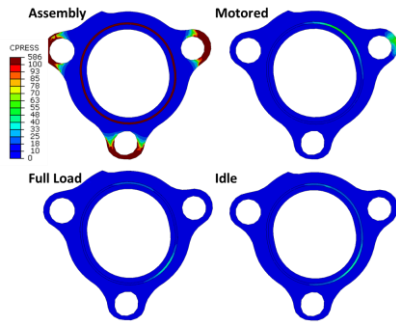


圖 14.排氣渦輪墊片面壓

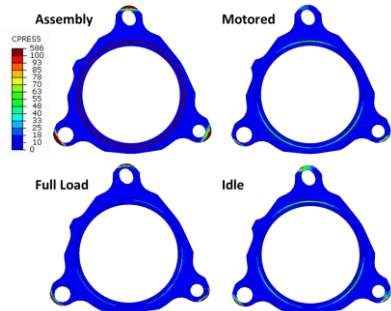


圖 15.渦輪觸媒墊片面壓

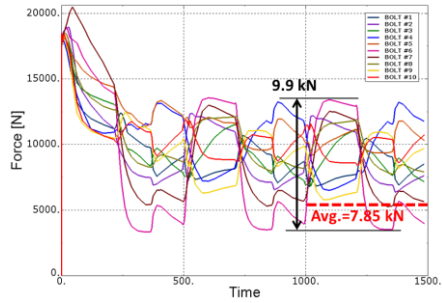


圖 16.缸頭排氣歧管螺樁軸力變化曲線