

內燃機引擎缸頭缸體結構疲勞分析

黃麒禎、楊青松

華擎機械工業股份有限公司

摘要

隨著引擎性能的需求越來越高，且油耗與排汙法規的要求也越來越嚴格，引擎的設計面臨巨大的挑戰，因此CAE分析在設計流程中扮演更重要的角色。缸頭與缸體為引擎最重要結構件，在引擎運轉過程中需承受高溫與反覆的爆炸壓力，故缸頭缸體的強度與耐久性為設計的重點之一。本文以分析手法確認引擎缸頭缸體疲勞安全係數符合需求，首先以CFD計算出熱傳分析所需之邊界條件，接著以Abaqus進行熱傳分析與應力分析，最後使用fe-safe計算疲勞安全係數。

關鍵字：內燃機、缸頭、缸體、疲勞安全係數、Abaqus、fe-safe

ABSTRACT

As the demand for engine power increased and the regulation of fuel consumption and emission became stricter, the design of engine had been facing up to great challenges. Therefore, CAE play a more important role during the engine design procedure. Cylinder head and block are the main components in engine. During engine operation, Cylinder head and block suffer for high temperature and combustion pressure, so the strength and durability of cylinder head and block is very important. In this paper, the factor of strength of cylinder head and block were calculated to check the satisfaction of design requirement. First, CFD was conducted to obtain the thermal boundary conditions for thermal analysis. Then the thermal analysis and stress analysis were executed using Abaqus. Finally, the factor of strength was calculated using fe-safe.

Keywords: Internal combustion engine, Cylinder head, Cylinder block, Factor of strength, Abaqus, fe-safe

一、緒論

近年來隨著全球暖化議題的興起與環保意識的抬頭，汽車的耗能與污染問題備受消費者關注，因此全球車廠皆全力投入於研發生產更環保的汽車，其中改善內燃機引擎效能是一大重點。目前引擎發展趨勢是小型化（down sizing）並使用渦輪增壓器（turbocharger），能大幅改善油耗降低碳排放量，並能維持原有性能等級甚至更為增加。增加性能也意味著引擎各零件所承受的負荷也會增大，因此引擎的設計面臨巨大的挑戰，而 CAE 在設計流程中扮演更重要的角色。

缸頭與缸體為引擎最重要的結構件，大多數的引擎零組件皆安裝於上，內部則有冷卻水流道、機油流道與燃燒室，在引擎運轉過程中需承受高溫與反覆的爆炸壓力，故

缸頭缸體的強度與耐久性為設計重點，本文以分析手法確認引擎缸頭缸體疲勞安全係數符合需求。

二、分析模型

缸頭缸體結構疲勞分析包含熱傳分析與應力分析兩個部份，3D CAD 模型使用 Creo 建立後匯入 Hypermesh 進行幾何清理與網格建立工作，最後匯入 Abaqus/CAE 做有限元素模型所需前處理工作，建立的缸頭缸體系統有限元素模型如圖 1 所示，包含零件有缸頭、缸體、缸頭墊片、缸頭螺栓、缸套、進排氣閥、閥導桿、閥座與火星塞。

熱傳分析使用一階熱傳元素 DC3D4 與 DC3D6，共約 30 萬節點與 113 萬元素。應力分析模型部份，其中缸頭墊片使用二階 Gasket 元素 GK3D12M，其餘部份使用二階

應力元素 C3D10M，共約 178 萬節點與 105 萬元素。

三、熱傳分析

熱傳分析是計算引擎在最大馬力時缸頭缸體系統溫度分佈，作為後續應力計算時的溫度條件。熱傳分析所需的熱邊界條件包含三個部份：氣體側邊界條件、冷卻水套側邊界條件與機油側邊界條件。

氣體側邊界條件部份，使用 AVL/FIRE 計算最大馬力點完整循環(720° crank angle)的缸內燃燒分析，輸出熱傳係數(Heat transfer coefficient)與近壁面流體溫度(Fluid temperature)的循環平均值，並將數值映射至有限元素網格表面，如圖 2 所示。

水套的功用在於冷卻缸頭缸體，避免燃燒所產生的高溫造成零件損壞，冷卻水套使用 Star-ccm+ 進行流場計算，將熱傳係數映射至有限元素網格表面，如圖 3 所示，而冷卻水溫度則是固定值。

引擎機油除潤滑作用外也具有散熱功能，因此缸頭缸體與機油接觸的表面皆需設定熱邊界條件，依經驗值將機油溫度設為固定，熱傳係數則隨機油流動情況分兩區域給定數值，如圖 4 所示。

將模型、材料性質與上述熱邊界條件輸入 Abaqus 中進行熱傳分析，計算結果缸頭缸體溫度分佈如圖 5 與圖 6 所示，其最高溫度符合廠內材料耐用溫度規範，不需進行設計變更。

四、應力分析

由於缸頭缸體承受較高的溫度氣體壓力，因此應力分析模型中，需給定不同溫度下的塑性應力應變曲線(如圖 7)，其餘零件則簡化為線彈性體即可。

缸頭墊片為應力分析中重要零件，其功能在於防止燃燒室漏氣、冷卻水套漏水與油道漏油，根據不同區域的密封需求，墊片上結構可分為全波紋(full bead)、半波紋(half bead)、止檔片(stopper)與墊片本體，每個部份的壓縮量與壓力曲線也不同(如圖 8)，在 Abaqus 中使用 Gasket 元素來描述缸頭墊片各部份的壓縮卸載特性。

應力分析的重點在於燃燒室周圍的位置，因此為減少邊界條件設定對於分析結果的影響，邊界條件的設定在離燃燒室較遠的

缸體下方處(如圖 9)。

應力分析步驟列於表 1，首先是第一步是模擬常溫組裝，給定缸頭螺栓鎖附軸力、閥導桿與缸頭間緊配量、閥座與缸頭緊配量，第二步是升溫至引擎最大馬力點情況，考慮各零件材料的熱膨脹性質，溫度場使用先前熱傳分析計算的結果，升溫後的應力分析結果如圖 10，應力無明顯異常現象，可接續進行後續工作。組裝升溫後依序在 1-4 缸燃燒室表面給定燃燒爆炸壓力，壓力分佈如圖 11 所示，接著卸載壓力後完成第一次負載循環。第二次負載循環，重複上述步驟施加爆炸壓力後卸載，第二次負載循環(Load case 8-12)係作為後續疲勞分析的計算工況。

疲勞分析使用 fe-safe 進行，疲勞性質方面輸入不同溫度的 S-N 曲線(圖 12)，將 Abaqus 應力計算結果 odb 檔匯入 fe-safe 中，選取第二次負載循環的應力歷程，進行高周疲勞計算，疲勞安全係數(Factor of strength)計算結果如圖 13，安全係數較小的區域在缸頭水套接近燃燒室處，其數值皆大於安全係數設計要求，確認無高周疲勞發生的疑慮。

五、結論

本文首先以 CFD 計算出熱傳分析所需之邊界條件，接著以 Abaqus 進行熱傳分析與應力分析，最後使用 fe-safe 計算疲勞安全係數。在引擎開發階段，先以分析手法確認引擎缸頭疲勞安全係數符合需求後，再推進至下一階段進行試做驗證，節省反覆設計變更所需的大量時間與開發成本。

六、表格

Load case		Description
1	Cold assembly	Bolts pretension Valve seats oversize Valve guides oversize
2	Warm assembly	Temperature Field
3	Gas load-1	Gas pressure in Cyl. 1
4	Gas load-2	Gas pressure in Cyl. 2
5	Gas load-3	Gas pressure in Cyl. 3
6	Gas load-4	Gas pressure in Cyl. 4
7	Warm assembly	Gas Pressure Removed
8	Gas load-1	Gas pressure in Cyl. 1
9	Gas load-2	Gas pressure in Cyl. 2
10	Gas load-3	Gas pressure in Cyl. 3
11	Gas load-4	Gas pressure in Cyl. 4
12	Warm assembly	Gas Pressure Removed

表 1 分析步驟

七、圖片

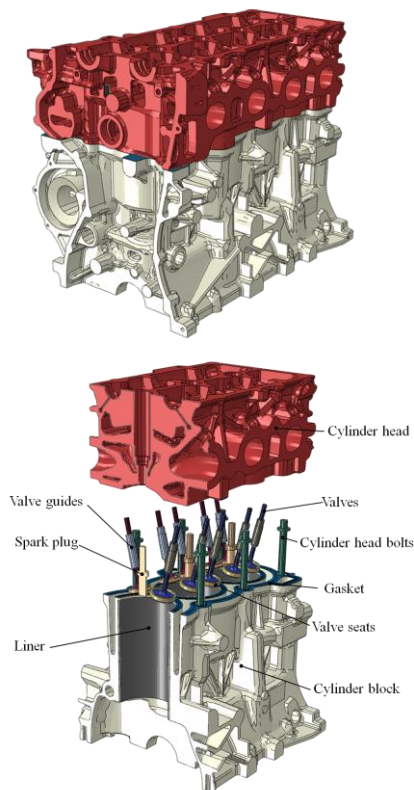


圖 1 缸頭缸體系統模型

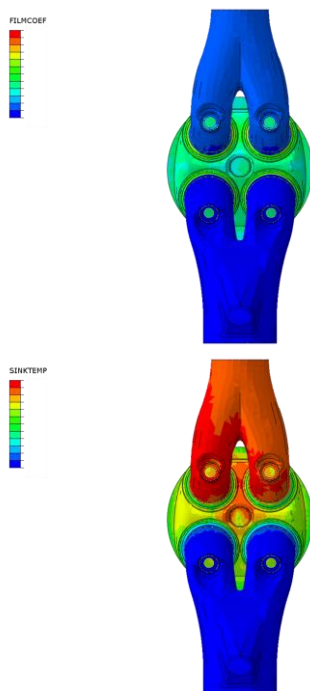


圖 2 氣體側熱邊界條件

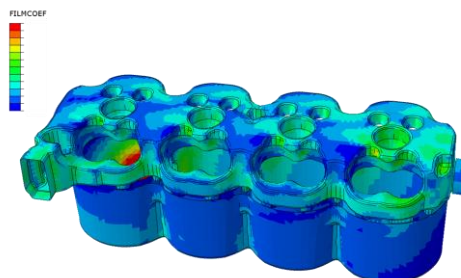


圖 3 水套側熱邊界條件

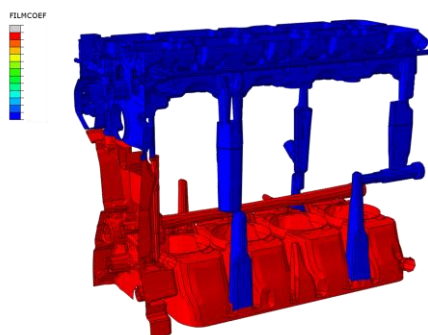


圖 4 機油側熱邊界條件

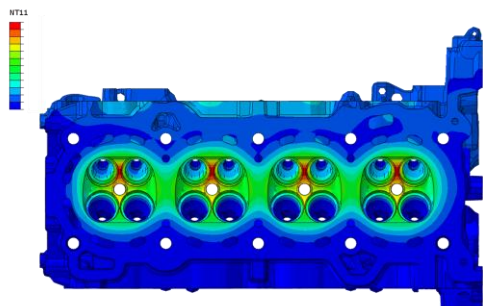


圖 5 缸頭溫度計算結果

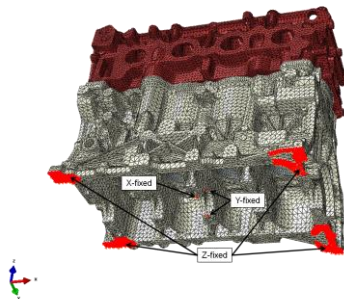


圖 9 邊界條件

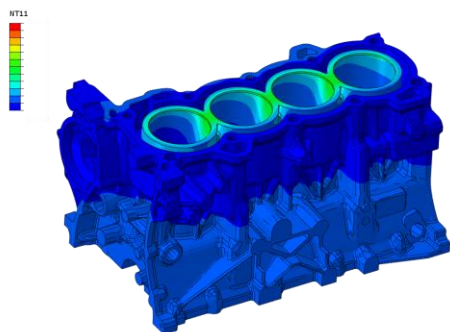


圖 6 缸體溫度計算結果

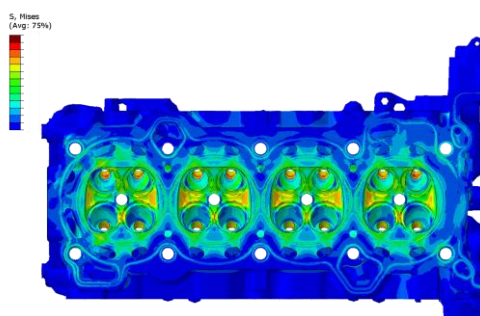


圖 10 組裝升溫後應力分佈結果

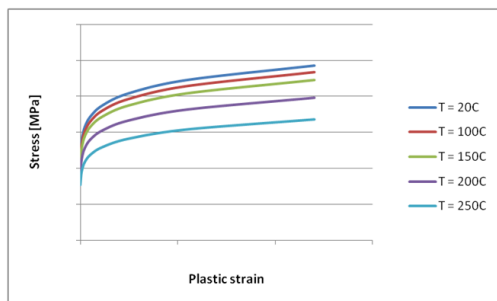


圖 7 缸頭材料應力應變曲線

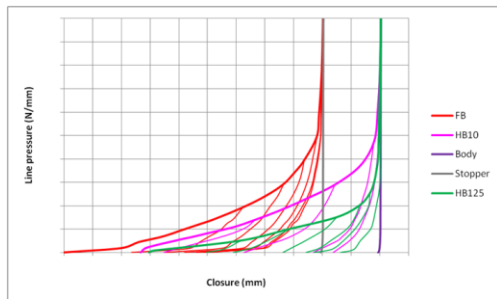


圖 8 缸頭墊片特性曲線

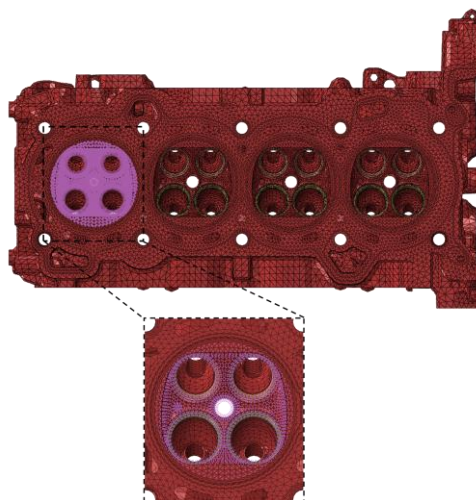


圖 11 燃燒室壓力分佈

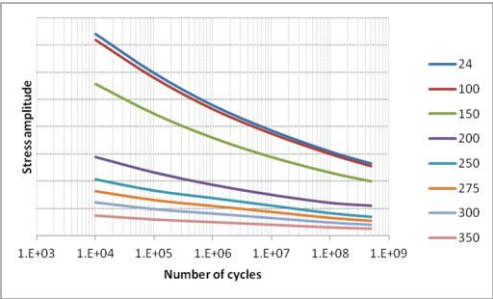


圖 12 缸頭材料 S-N 曲線

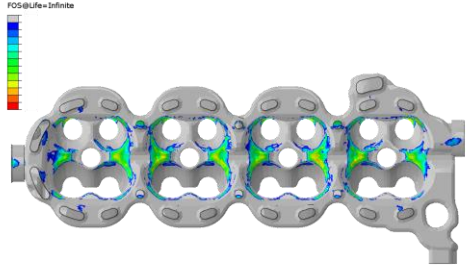


圖 13 缸頭水套疲勞安全係數