



ABAQUS，所採用的分析元素為 C3D8 R 及 C3D8 [4]，在動力分析中，主要模擬以不同的速度(等速)置入燃料束時，裝置底部直接正向撞擊鄰近之鎖緊裝置組合時的螺栓受力狀況。此外，另一組參照的動力分析為螺栓施加預緊力後，裝置底部直接正向撞擊之狀況。分析主要觀察的對象則是螺栓受力後的應力分布情形，特別是螺栓頸部漸縮處的位置(靠近螺帽及螺紋兩處)，並由該位置處找出最大值，經顯式動力分析(Explicit Dynamic Analysis)[5]計算結果確認，螺栓頸部漸縮處且靠近螺帽位置，在撞擊發生期間表面之等效應力(von Mises Stress)最大，故以此最大應力值之節點為基準，繪製在以不同速度(等速)撞擊下之應力變化歷時圖，藉此研判螺栓可能產生沿晶應力腐蝕(IGSC)前的初始裂紋原因。

本分析模型針對零件的材料性質設定是以彈塑性為主[6]，而假設被撞擊物則是設定為剛體。但如前所述，本分析主要觀察的對象為螺栓受力後的應力分布，鎖緊裝置在撞擊間將吸收部份的撞擊能，實際上亦是如此，若將此裝置的模型設定為彈塑性，其與剛體(被撞物)的撞擊接觸之數值分析中，容易造成穿侵及沙漏(hourglass)[7]的現象，導致降低應傳遞的撞擊能，故本分析將另一組鎖緊裝置設定為剛體的對照分析結果一併列出，提供作為適當吊運速度之參考。

## 二、分析設定

### 2.1 幾何模型

新舊式燃料鎖緊裝置組合整體分析模型的設定原則上大致相同，唯獨由於幾何外觀上不同，因此對於有限元素之數量必定不同。圖 2 分別為新式和舊式的模型，主要差異為鎖緊裝置外觀及些微尺寸上的不同，圖 3 即為裝置組合分析模型與實際裝置圖。

### 2.2 材料設定

在材料性質設定方面，主要參考 X-750 鎳合金材料特性，在室溫 80 °F 下，其楊式模數為  $31 \times 10^3$  ksi、Poisson's Ratio 為 0.29、密度為  $0.299 \text{ lb/in}^3$  以及其降伏應力為 100 ksi，在塑性區設定如表 1。

### 2.3 接觸及耦合設定

整體模型主要由五種零件所構成，零件與零件間的接觸設定區分為切向及正向，在

切向是設定為光滑摩擦，主要是考慮組件吊運至燃料池或爐心之含水環境中，正向接觸則為硬接觸(Hard Contact)。在實際的組裝上，螺栓螺紋是鎖入燃料束，而燃料匣是被鎖緊裝置於側向抵住，在圖 4 的模型則是將部分長度的燃料匣模型建出，主要目的在於確定整組燃料束重心線位置，但在分析計算時予以排除。

在分析中，將燃料束在水中重量模擬的方式為在重心線上定義點質量(Point Mass)[8]，此點質量主要是提供慣性力以耦合方式束制螺栓螺紋表面區域元素節點的位移、速度等物理現象。雖吊運速度為等速，但若承受撞擊時，螺栓螺紋位置的節點仍是會受到燃料束的慣性力作用，使其不會產生過大的變位或移動速度。

## 三、分析結果

在顯示動力分析方面，主要區分為舊式及新式鎖緊裝置組合，而各式的分析模型間再針對不同的吊運速度(3fpm、5fpm 及 7fpm)進行計算，各分析再包含了有、無螺栓預緊力的結果，計算結果列於表 2。

螺栓預緊力設定方面，主要採用 Machinery's Handbook 內[9]力矩與軸向力的轉換公式：

$$T = P \times (0.159/n + 1.156 \mu D);$$

其中；

T：施加力矩(lb-in)；

n：螺栓每英吋之螺紋數，18 條

(5/16-18 UAC 2A)；

P：軸向力(lb)；

$\mu$ ：0.15 摩擦係數；

D：標稱直徑(in)。

預緊力矩的大小 75lb-in，主要根據設計廠商之設計文件[2]所給定，經換算之軸向力為 1198.4lb，為分析模型之外力輸入值。計算結果如圖 5、6 所示，在螺栓頸部漸縮處上下位置的應力值分別為 28.0ksi 及 31.0ksi，較材料降伏應力值 100ksi (X-750 合金)尚有一段差距。而整根螺栓預緊力的分析結果將設定為顯式動力分析之初始應力。

顯式動力分析主要觀察重點在於螺栓承受撞擊後的應力分布情形，特別是螺栓頸部漸縮處的位置(靠近螺帽及螺紋兩處)，並由該兩處位置處找出較大值，經計算結果確







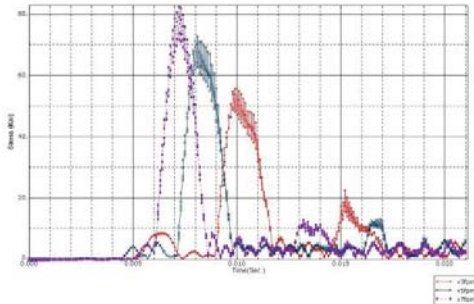


圖 10 各速度下新式鎖緊裝置之螺栓檢核點位置應力歷時圖

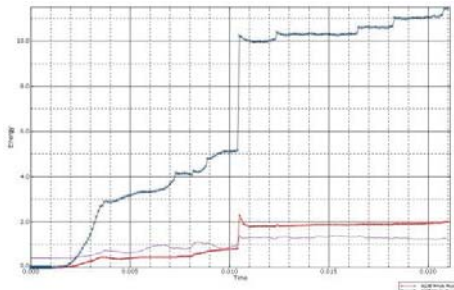


圖 11 舊式鎖緊裝置(採用 C3D8R 元素)撞擊能量歷時圖

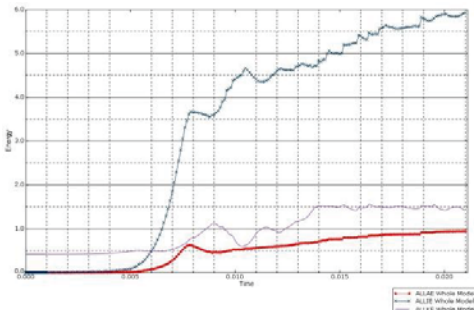


圖 12 新式鎖緊裝置(採用 C3D8R 元素)撞擊能量歷時圖

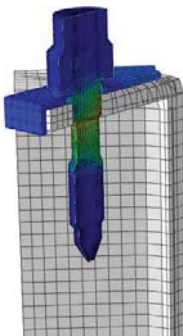


圖 13 舊式鎖緊裝置(剛體)之分析模型

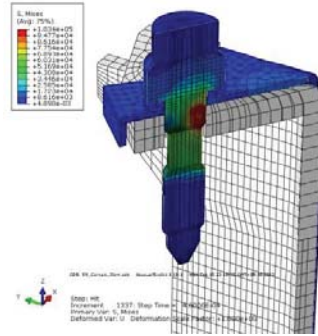


圖 14 新式鎖緊裝置(剛體)之分析模型

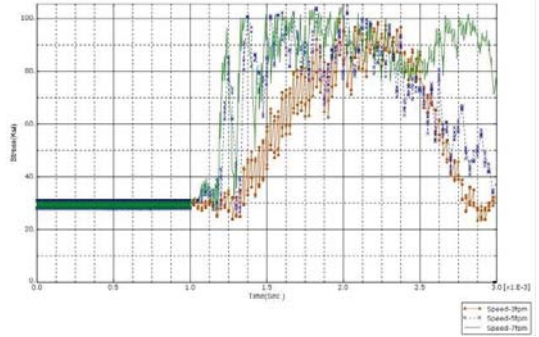


圖 15 舊式鎖緊裝置(剛體)撞擊時之應力歷時圖

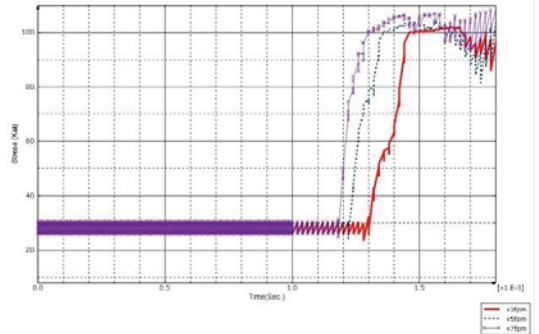


圖 16 新式鎖緊裝置(剛體)撞擊時之應力歷時圖