

嬰幼兒搖椅金屬底座的破裂分析

明門工程團隊
明門實業股份有限公司

摘要

本公司研發的嬰幼兒搖椅的金屬底座會進行壓縮及扭轉兩種誤用測試，在承受荷重約 1176 N 及 490 N 時會發生結構破裂現象，本文應用 ABAQUS 提供的材料累進損傷與失效模型進行分析，以重現底座結構的實際破裂行為，並做為後續底座設計變更，預估極限荷重與破裂位置的基礎。

關鍵字：材料損傷與失效、破裂行為、極限荷重

ABSTRACT

The ultimate loads for base of swing chair are 1176 N in compression test and 490 N in torsion test. Material progressive damage and failure model is applied in this analysis to verify the physical fracture behaviors. The study results will be used to predict the ultimate load and fracture behavior in the following design revision.

Keywords: ultimate load, progressive damage and failure, fracture behavior

一、前言

明門實業股份有限公司(以下簡稱明門公司)專注於嬰兒車、嬰兒床、汽車安全椅、高腳椅等嬰幼兒產品之全球市場需求與產品設計研發改良。而嬰幼兒搖椅為明門公司領先全球研發之新產品，經過多種嚴謹測試，其中包含了搖椅底座(以下簡稱底座)的壓縮測試與扭轉測試，以模擬消費者的誤用情境。

在嬰幼兒產品的測試中，特別重視零件發生破裂的狀況，因為零件斷裂而產生小碎片時，容易讓嬰幼兒誤食而發生危險。而底座經如圖 1 的壓縮測試可得極限荷重為 1176 N，破裂狀況如圖 2 所示；如圖 3 的扭轉測試可得極限荷重為 490 N，破裂狀況如圖 4 所示。

ABAQUS 的材料模型庫中提供了多種損傷失效模式，本文旨在根據實際破裂行為嘗試找出合適的失效模式與參數，以作為底座設計變更後，預估其極限荷重與破裂位置的基礎。

二、損傷失效模型的選擇

由於底座是以鋁合金 ADC 12 壓鑄成型，在 ABAQUS 中提供了多種金屬損傷失效模型，包括 shear failure、tensile failure、ductile damage、John-Cook (J-C) damage、shear damage、forming limit diagram (FLD) damage、forming limit stress diagram (FLSD) damage、Marciniak-Kuczynski (M-K) damage 及 Müschenborn-Sonne forming limit diagram (MSFLD) damage 等可供用戶選擇。

其中 shear failure 與 tensile failure 模型是應用在高應變率的變形行為，FLD、FLSD、M-K 與 MSFLD 等模型是應用在鈹金成型方面，J-C damage 則與應變率相關，並不適合用於底座的靜態測試分析。而 ductile damage 是應用在孔隙(voids)的成核(nucleation)、成長(growth)以及合併(coalescence)所產生的破裂狀況，shear damage 則是應用在局部的剪力帶(shear band)產生的破壞現象。

觀察底座的破裂狀況與剪力帶破壞較無關聯，因此本文嘗試應用 ductile damage

模型來分析比對底座結構的破裂行為。

三、損傷失效模型的說明

Ductile damage 模型是 ABAQUS 中材料累進損傷失效(Progressive Damage and Failure)模型中的一種，其概念可由圖 5 典型的金屬試片拉伸的應力應變曲線做說明：

圖中 a-b 段是材料的線彈性曲線，b-c 段是材料達到降伏點後的應變硬化曲線，c-d 段則是試片開始頸縮至斷裂的曲線，此段曲線會存在局部應變現象(strain localization)。ABAQUS 的 Ductile damage 模型將 c 點視為損傷起始點(damage initiation)，c-d 段則是根據損傷發展準則(damage evolution criterion)來計算局部應變所造成的勁度退化。

Ductile damage 模型的損傷起始與損傷發展的定義在 ABAQUS Analysis User's Manual 中[1]有詳細的闡述，本文簡單說明如下：

損傷起始：假設當元素的某個積分點在特定的應力三軸度(stress triaxility, η)與應變率(strain rate, $\dot{\epsilon}$)下，達到特定的等效塑性應變(equivalent plastic strain, $\bar{\epsilon}^{pl}$ ，以下簡稱為 PEEQ)時，即為損傷起始點 $\bar{\epsilon}_D^{pl}(\eta, \dot{\epsilon})$ ，其中應力三軸度是等效壓應力(equivalent pressure stress, p)的負數與蒙氏應力(Mises equivalent stress, q)的比值($\eta = -p/q$)。

損傷發展：當元素的積分點達到損傷起始值之後，可以用塑性位移或是能量消耗做為損傷值(定義在 0~1 之間)，來決定元素勁度退化的幅度，以達到損傷的發展。當損傷起始時，損傷值為 0；當損傷值達到 1 時，則元素的勁度退化為 0，即達到元素失效。在後處理中可以隱藏失效的元素，以觀察結構破裂的狀況。

三、材料參數的假設

由於金屬壓鑄件在公司的產品中佔極少數，投資材料參數的量測並不符合經濟成本，廣泛搜尋仍難以獲得 ADC 12 的應力應變曲線，而參考 matweb 材料網站提供的 ADC 12 材料數據，僅可得拉伸降伏應力為 165 MPa，拉伸抗拉強度為 331 MPa，伸長率為 2.5%，楊氏模數為 71000 MPa。

因此本文假設材料達到降伏點之後，其塑性硬化段為單調上升的直線，並在達到材料容許的伸長率後隨即斷裂(假設此材料試片的頸縮行為造成的局部應變極小)。

根據上述有限的材料數據與假設，可得 ADC 12 的真實應力應變曲線如圖 6，其相對應的 PEEQ 值 2.24% 即為單軸向拉伸試驗所對應的應力三軸度之損傷起始值，而損傷發展可定義為極小的能量消耗值。

其他應力三軸度與損傷起始的 PEEQ 之關係，則參考文獻[2]提供的 EN AW-7108 T6 數據，比對單軸向拉伸試驗之損傷起始 PEEQ 值，調整如圖 7 所示。如此即完成包含彈塑性與 ductile damage 損傷失效模型的材料參數設定。

四、分析程序與邊界條件的設定

雖然底座的壓縮與扭轉屬於靜態測試，而 ABAQUS/Standard 也從 6.9 版開始支援材料的累進損傷失效模型，但需要調整元素的黏性(viscosity)以避免其在勁度退化過程中導致的分析不收敛，同時也不可避免地會增加結構所能負載的極限荷重，因此本文選擇以 ABAQUS/Explicit 透過準靜態手法進行求解，將底座取一半的對稱結構，以前處理軟體 Hypermesh 對 3D-CAD 模型建立二階四面體網格，共使用 172910 個節點與 94844 個 C3D10M 元素。

在壓縮分析的邊界條件中，對中央底腳的對稱結構面施加完全拘束，外側底腳以剛體平面施加壓縮方向位移以求取反力，如圖 8 所示。

在扭轉分析的邊界條件中，對中央底腳的對稱結構面施加完全拘束，在外側底腳施加向下位移以求取反力，如圖 9 所示。

五、分析結果

壓縮分析所得的極限荷重 1346 N 與實測值 1176 N 的誤差約 14%，扭轉分析所得的極限荷重 530 N 與實測值 490 N 的誤差約 8%，誤差原因來自本文對此鑄鋁材料在塑性硬化段的應力應變曲線之假設，以及鑄鑄工藝的變異，在工程應用上屬於合理範圍。

觀察圖 11 的壓縮分析 PEEQ 分布結果和圖 12 的扭轉分析 PEEQ 結果，與實際測試的破裂位置完全相同，並可發現部份區域的 PEEQ 值已遠超過單軸向拉伸試驗所允

許的 PEEQ 值 (如圖中之灰色區域) 卻未發生破裂, 顯示此兩種底座測試的破裂的確是由孔隙的成核、成長以及合併所產生, 因此應用 ABAQUS 的 ductile damage 材料模型可以成功重現實際的破裂行為。後續的底座設變模型, 即以此材料模型及假設的參數, 預估其極限荷重與破裂位置。

六、結論與未來展望

本文應用鑄鋁合金的基本材料性質, 透過合理的假設推估 ABAQUS 的材料累進損傷與失效模型-ductile damage model 的必要參數, 成功重現嬰幼兒搖椅金屬底座在壓縮與扭轉測試的破裂行為, 並做為後續底座設計變更, 預估極限荷重與破裂位置的基礎。

未來除了評估進行材料試驗以取得應力應變曲線及應力三軸度與損傷起始值的關係, 並且將進一步嘗試將此模型應用在公司的多數產品—塑膠零件的破裂行為分析中。

七、參考文獻

- [1]“Abaqus Analysis User's Manual”, 21. Progressive Damage and Failure, Simulia Corp. of Dassault System, 2009.
- [2]“Abaqus Example Problems Manual”, 2.1.16 Progressive failure analysis of thin-wall aluminum extrusion under quasi-static and dynamic loads, Simulia Corp. of Dassault System, 2009.

八、圖片



圖 1 底座的壓縮測試



圖 2 底座壓縮測試的破裂狀況



圖 3 底座的扭轉測試



圖 4 底座扭轉測試的破裂狀況

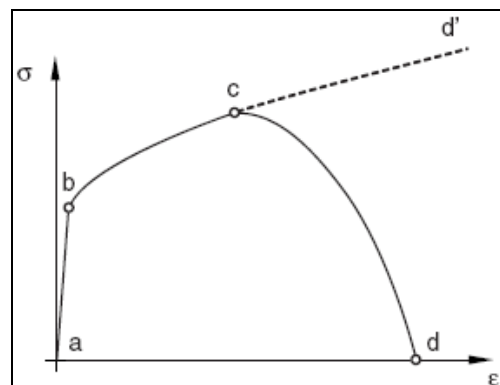


圖 5 典型的金屬試片應力應變曲線

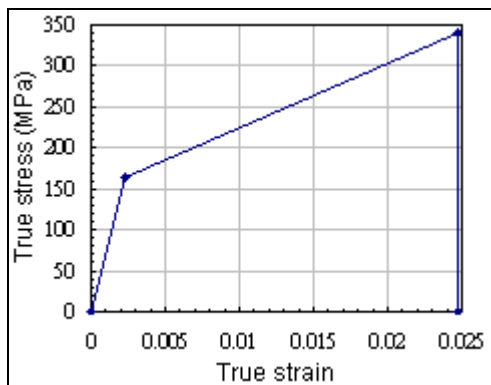


圖 6 假設的真實應力應變曲線

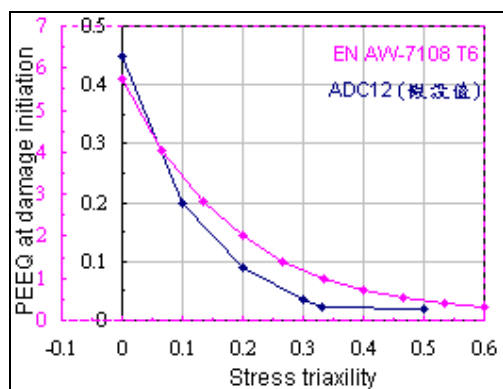


圖 7 應力三軸度與損傷起始 PEEQ 值

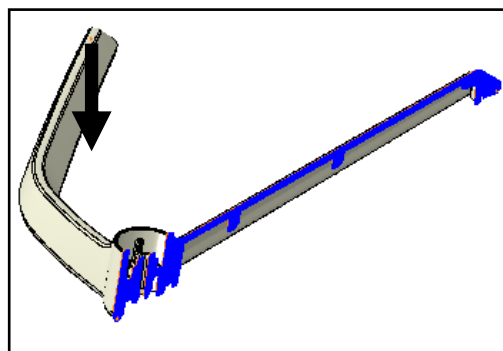


圖 9 扭轉分析的邊界條件

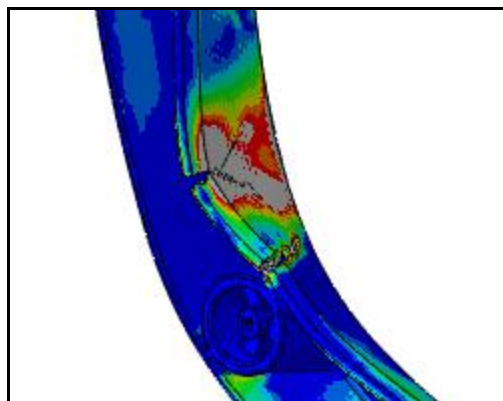


圖 10 壓縮分析的 PEEQ 等值線圖

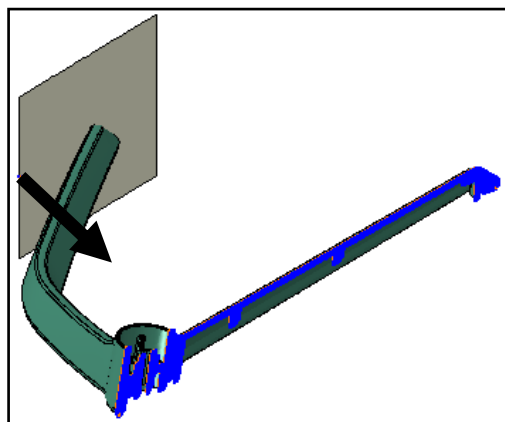


圖 8 壓縮分析的邊界條件

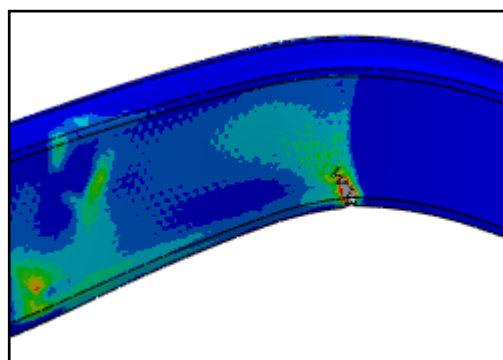


圖 11 扭轉分析的 PEEQ 等值線圖