

超彈性材料組成律於橡膠機械性質曲線嵌合度之研究

張正雄 張維敏

中山科學研究院第二研究所

摘要

橡膠材料的力學行為相當複雜，具有高度非線性彈性與大變形的特性，在連體力學中係屬超彈性材料的範疇，其應力與應變關係之組成律，可用合適的應變能函數形式來描述，再輔以材料機械性質實驗數據嵌合，獲得應變能函數內的待定係數，而得確定應變能函數之解析式，此解析式再套入有限元素法之勢能函數中，即可對此橡膠元件的工程問題進行力學分析。應變能函數的模型有多種，其準確度與材料機械性質實驗數據提供有關。橡膠材料機械性質實驗共有五種，但往往因經費或設備限制，實驗數據無法全部提供，僅能提供一至兩項實驗數據。本文旨在研究比較於有限的實驗項目提供下，分別對各應變能函數模型進行機械性質材料實驗數據曲線嵌合，探討各模型的準確度。本文採用 Simulia Abaqus/CAE 套裝軟體為本研究之分析工具。

關鍵字：超彈性材料、應變能密度函數、曲線嵌合

ABSTRACT

With highly nonlinear elastic and large deformation abilities, rubber is a kind of very complex amorphous polymeric material. In the category of continuum mechanics, rubber is characterized as the most important hyperelastic materials that its constitutive equation could be represented by a proper strain energy density function with unknown coefficients. By using data curve fitting techniques to the test data from various types of rubber mechanical material tests, the coefficients can thus be determined, and then substitute them into the potential energy function implemented in the finite element program. Therefore, the mechanical problems that include rubber components could be analyzed. Various forms of strain energy density function have been developed in literatures. However, their accuracies are related to the availability of the types of rubber material test data. In general, multiple types of test data are essential for the characterization of rubber material properties, but it's usually hard to get all of them due to the limitations of budget or test facilities. Instead, only one or two types of test data could be acquired. This paper aims to study the accuracy of the various forms of strain energy density functions when only limit types of test data are available. Simulia Abaqus/CAE has been employed as the analysis tool in the study.

Keywords: hyperelastic material, strain energy density function, finite element method

一、緒論

橡膠是一種高分子聚合物，其材料研究係屬於高分子材料的範疇，橡膠材料所製作的彈性體是以單元化學鏈重複製鏈結所構造而成的長鏈高分子結構[1]。鏈與鏈間交錯的網絡為均勻且不具方向性，可視為是一種均勻等向性材料。

在這些高分子聚合物中加入各種不同的配方，混煉後再經過加熱硫化過程，即成為頗具強度及高彈性的橡膠體。橡膠材料最大伸長率通常可達500%~700%之間，除了在小變形區域應力與應變關係呈近似線性外，大部份區域為非線性，彈性係數隨變形而變化。這種低彈性係數與高伸長率的材料特徵與一般熟知的金屬材料完全不同，使得傳統的力學分析方法，已很難準確的再應用在橡膠結構力學行為的預測上。

今日橡膠材料已被廣泛的應用在各工程領域之中。例如飛機、船艦、火車、各式運輸車輛、敏感導航儀器及精密電子構裝等之振動與衝擊的減振與緩衝器上；另軟管、輪胎、墊圈、密封件和港灣船舶護舷、...等等亦是廣泛的使用。每項橡膠零件均有其重

要力學功能需求，該功能在設計之初即需納入考量，為了精準掌握橡膠的力學行為預測，建立準確的橡膠力學分析模型，將有助於協助研發人員對於橡膠結構元件的應力與應變計算、各方向勁度或剛度的計算與較佳的幾何構型設計。而這些高柔性橡膠結構元件性能分析的關鍵，在於對使用材料的了解，需選擇相對準確的超彈性材料組成律或稱本構方程，描述所選用橡膠的基本力學特性，這是後續應用非線性有限元素法建立合適的橡膠材料力學分析模型的重要基礎。

過去幾十年來，橡膠材料與結構力學研究人員研究橡膠的高彈性大變形與非線性力學行為的組成律，主要從統計唯象法與熱力法等兩個方向著手[2]。唯象法的材料組成律模型乃採觀察或依經驗假設一個應變能密度函數，並由一些基本材料實驗數據，利用曲線嵌合出來的一組材料參數，去解釋其他各種較複雜受力模式之下之變形與應力狀態，輔以實驗比對來確認其準確性。唯象法的缺點在於沒有物理意

義為基礎，缺乏對橡膠材料本質的認識。另一方面，以分子統計熱力學為模型基礎的材料組成律模型日益發展。尤以晚近之Arruda-Boyce 八鏈模型[3]，利用應變不變量來表示應變能函數，已在某種程度上成功的解釋了大變形時分子鏈的非高斯特性，由此也為唯象法組成律模型和分子統計熱力學法組成律模型之間的一些物理意義架起聯結關係。

為了測試各種不同材料組成律模型是否能準確的描述橡膠材料的力學基本特性，Simulia Abaqus/CAE軟體對其所擁有的組成律提供了嵌合準確性測試的評估功能，即以各種單一變形模式的橡膠試片材料機械性質實驗數據或其組合為輸入，進行各種組成律模型的嵌合，嵌合結果做圖面輸出，方便使用者做準確性比較，了解所選用的各組成律之適用性，以供後續工程上橡膠設計元件分析時組成律模型選用之依據。

橡膠材料機械性質實驗共有五種，本文旨在研究比較於有限的實驗項目提供下，分別對各組成律模型進行機械材料實驗數據之曲線嵌合，探討各模型的準確度。

二、超彈性材料的組成律

對於橡膠材料，即使變形相當大，也仍可近似當成彈性材料來處理，而它存在一種應變能密度函數 U 來描述它的力學行為，此種材料稱為超彈性材料。一般可將橡膠視為等向性不可壓縮的超彈性體，應變能密度函數自變量為變形張量，應變能密度函數對應變分量的微分就是應力分量[4]。

$$S_{ij} = \frac{\partial U}{\partial E_{ij}}$$

式中 S 為第二 Piola-Kirchhoff 應力張量； E 為拉格朗日應變張量。或是可以表示成 Cauchy 應力張量，如下式：

$$\sigma = -pI + 2 \frac{\partial U}{\partial I_1} B - 2 \frac{\partial U}{\partial I_2} B^{-1}$$

式中 σ 為 Cauchy 應力張量； B 為左 Cauchy-Green 變形張量； p 是由於不可壓縮所引入的靜水壓力； I_i 是左 Cauchy-Green 變形張量 B 的不變量(Invariants)，而不變量與主拉伸比 λ_i 間的關係如下：

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned}$$

由上述公式得知，欲獲得應力必須先有應變能密度函數 U ，此函數是各研究者努力尋找探討的對象，因橡膠屬於幾乎不可壓縮材料其不變量 I_3 可視為 1，為常數。本文挑選 Simulia Abaqus/CAE 軟體現有的函數中常使用的九種應變能密度函數進行準確度研究比對。這些函數形式如下[5, 6]：

1. Mooney-Rivlin形式

$$U = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3)$$

2. 二階多項式形式

$$U = \sum_{i+j=1}^2 C_{ij}(I_1 - 3)^i (I_2 - 3)^j$$

3. neo-Hookean形式

$$U = C_{10}(I_1 - 3)$$

4. Yeoh形式

$$U = \sum_{i=1}^3 C_{i0}(I_1 - 3)^i$$

以上公式 C_{ij} 為待定常數。

5. 二階Ogden形式

$$U = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

其中 μ_i ; α_i 為待定常數。

6. 三階Ogden形式

$$U = \sum_{i=1}^3 \frac{\mu_i}{\alpha_i} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

其中 μ_i ; α_i 為待定常數。

7. Van Der Waals形式

$$U = \mu_0 \left\{ -(\lambda_m^2 - 3) [\ln(1 - \eta) + \eta] - \frac{2}{3} a \left(\frac{\tilde{I} - 3}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \right\}$$

$$\tilde{I} = (1 - \beta)I_1 + \beta I_2 \quad \text{and} \quad \eta = \sqrt{\frac{\tilde{I} - 3}{\lambda_m^2 - 3}}$$

$$a = \frac{2C_{01}}{3\mu} + \frac{\lambda_m^2}{\lambda_m^3 - 1}$$

其中 λ_m 為鏈鎖長度(locking stretch)； μ_0 為起始剪力模數； C_{01} 為 Mooney-Rivlin 公式第二項常數； β 是一個混合參數(invariant mixture parameter)。

8. Arruda-Boyce形式

$$U = \mu \left[\frac{1}{2}(I_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2}(I_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4}(I_1^3 - 27) \right. \\ \left. + \frac{19}{7000\lambda_m^6}(I_1^4 - 81) + \frac{519}{673750\lambda_m^8}(I_1^5 - 243) \right]$$

$$\mu_0 = \mu \left(1 + \frac{3}{5\lambda_m^2} + \frac{99}{175\lambda_m^4} + \frac{513}{875\lambda_m^6} + \frac{42039}{67375\lambda_m^8} \right)$$

其中 λ_m 為鏈鎖長度(locking stretch)； μ_0 為起始剪力模數。

9. Marlow形式(Abaqus User's Manual未詳列公式)

$$U = f(I_1)$$

三、超彈性材料的基本機械性質實驗

由於多數橡膠結構元件於實際工程應用中，結構體係處於一種相當複雜的應力與應變狀態下。欲正確地描述橡膠彈性體元件的構成材料特性，必須要有更多的基本材料機械性質實驗數據作為輔助。根據橡

膠彈性體一般變形基本模式,過去的研究設計了下列五種材料機械性質實驗,如圖1所示,提供有限元素法分析前對材料的評估[5, 6]:

1. 單軸拉伸實驗
2. 單軸壓縮實驗
3. 平面剪切或純剪實驗
4. 雙軸或等雙軸拉伸實驗
5. 體積壓縮實驗

這五種材料實驗方法,往往受限於經費、實驗設備或夾具的限制無法全部執行。僅能提供一至兩項實驗數據,本文針對這種情況進行研究,以硬度為Shore 50度的NBR合成橡膠為例,設計執行了上述前三項實驗,實驗數據如圖2所示。

四、曲線嵌合

曲線嵌合時係以第三節所述各材料實驗模式的變形條件,分別代入各組成律的應變能密度函數中,再應用第二節所述的微分方式對變形做一次微分,獲得對應實驗模式內含待定係數的應力與應變關係之解析式。這些待定係數在各模型所獲得應力對應變關係內,有的是具線性關係,有的則是非線性關係(如Ogden, Arruda-Boyce, and Van der Waals),透過線性或非線性最小平方差法做曲線嵌合[6, 7],以獲得這些待定係數。

現在工程應用上有數種較通用的非線性結構分析套裝軟體,各自有其超彈橡膠材料機械性質實驗數據評估的功能。本篇報告係以 Simulia Abaqus/CAE 軟體對 NBR 合成橡膠實驗數據進行評估,經由單一元素測試,它可迅速繪出各種不同變形模式及組成律的實驗曲線與預測曲線的比較圖,以供判斷曲線嵌合之準確度。

單一元素超彈性材料組成律測試的原理相當簡單, Simulia Abaqus/CAE 內部先對所輸入的實驗數據與使用者所預先選用的超彈性材料組成律作曲線嵌合,獲得該組成律函數內部所需的係數後,材料組成律解析式已確定, Simulia Abaqus/CAE 內部會自動取一個六面體元素,再施加適當的邊界條件,以模擬不同的變形模式,並採用上面所獲得的材料組成律,進行材料非線性分析,最後再繪出其應力對應變 X-Y 圖。

本文採用第三節所述的三種材料機械性質實驗數據,分別做以下五種不同情況組合的輸入為嵌合分析對象:

1. 單軸拉伸實驗輸入嵌合
2. 單軸壓縮實驗輸入嵌合
3. 平面剪切實驗輸入嵌合
4. 單軸拉伸與壓縮兩種實驗同時輸入嵌合
5. 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗同時輸入嵌合

並分別以單軸拉伸、單軸壓縮、平面剪切等三種不同情況做分析後,輸出應力應變,輸出數據與實驗數據做比對,來探討第二節所述九種應變能函數模型之材料機械性質曲線嵌合或預測之準確度。

五、嵌合與預測結果

使用單一變形模式的橡膠試片材料實驗數據或其組合都可以進行組成律模型的係數嵌合。被選用輸入的實驗,本文將嵌合後的結果與原始輸入數據做比對,藉以探討嵌合準確度。此外 Simulia Abaqus/CAE 亦可輸出其它無實驗數據當輸入的基本材料試驗之預測結果,本文也將此預測結果與實驗結果做比對,藉以研究各模型預測基本機械材料實驗結果準確度的能力。以下針對第四節所述五種不同情況組合做嵌合,並對九種應變能密度函數模型的嵌合與預測結果進行討論。

1. 單軸拉伸實驗輸入嵌合

本情況為僅以圖 2 所示之單軸拉伸實驗數據為輸入對象。拉伸應變輸入範圍為 0 到 3,單軸拉伸實驗的應力與應變嵌合結果如圖 3 所示,由該圖顯示應變在 2(即 200%)以後 neo-Hookean 模型變差,而 Mooney-Rivlin 模型應變在 2.5 以後也漸變差,因這兩模型均為一階多項式,無法預測橡膠大變形時應力應變曲線向上彎曲的行為所致。而其餘模型均可得合理的嵌合結果。

為了能有量化的評估,表 1 列出各分析結果與實驗結果比較在應變全程中誤差最大值者,如本分析所有模型以 Marlow 的最大誤差 1.72%為最小。而表 2 則列出應變全程中的平均誤差,所有模型中以 Marlow 的平均誤差為最小,僅 0.11%。

圖 4 繪出預測壓縮實驗的結果並與實驗值比較,由圖顯示 Mooney-Rivlin 和二階多項式等兩模型無法合理的預測。而二階及三階的 Ogden 模型在壓縮應變達 0.25 以上其準確性已漸變差。其餘五模型其變形趨勢與實驗結果較近似,但仍有一定的誤差,表現較佳為 Marlow,其次是 neo-Hookean 模型。

圖 5 繪出預測平面剪切實驗的結果並與實驗值比較,由圖顯示 Mooney-Rivlin 和二階多項式等兩模型也是無法獲得合理的趨勢。而二階及三階的 Ogden 模型在平面剪切應變達 0.25 以上其準確性也逐漸背離實驗值。其餘五模型在應變前段均低於實驗值,而後段則有高於實驗值的趨勢,表現較佳為 Marlow 模型,平均誤差為 7.10%,其次是 Van Der Waals 模型,平均誤差為 11.56%。

綜合上述結果顯示,只有使用單軸拉伸實驗數據作曲線嵌合時,欲預測其它兩種變形行為時, Mooney-Rivlin 和二階多項式等兩模型無法獲得合理的趨勢。若在變形不大時其餘七種模型應可獲得合理的結果。但是在比較大變形時則以 Marlow 模型表現最準確。

2. 單軸壓縮實驗輸入嵌合

本情況僅採圖 2 所示之單軸壓縮實驗數據為輸入對象,壓縮應變取用範圍從 0 到 0.4。單軸壓縮實驗的應力與應變嵌合結果示於圖 7,單軸拉伸與平面剪切應力與應變預測結果分別列於圖 6 與圖 8。由圖 7 顯示各種模型對壓縮實驗應變在小於 0.3 均有很好的嵌合結果,但應變大於 0.3 以後 Mooney-Rivlin、neo-Hookean、二階 Ogden 及 Arruda-Boyce 嵌合度變

差,尤其二階 Ogden 有急劇反向變化的不合理現象。

由圖 6 與圖 8 顯示僅用壓縮實驗數據來預測拉伸與平面剪切應力與應變關係,各種模型均無法獲得準確的結果,甚至有些模型呈發散狀態。本分析結果顯示,若僅採用壓縮實驗數據當輸入,僅能用於分析純壓縮外力的工件,且對應變接近壓縮實驗數據上限,或大於壓縮實驗數據所提的供範圍,其準確性不佳,而對於非純壓縮應力狀態,則不建議採用。

3. 平面剪切實驗輸入嵌合

本情況輸入對象僅為圖 2 之平面剪切實驗數據,應變取用範圍從 0 到 1。平面剪切實驗的應力與應變嵌合結果示於圖 11,單軸拉伸與壓縮應力與應變預測結果則分別示於圖 9 與圖 10。本分析所選用的九種模型中 Simulia Abaqus/CAE 僅有 neo-Hookean、Yeoh、Arruda-Boyce、Marlow 等四種模型可選用。這四種模型中僅 Marlow 對平面剪切實驗數據有較佳的嵌合結果,最大誤差為 4.04%,平均誤差為 0.17%。

對於單軸拉伸及壓縮應力應變關係的預測,由圖 9、10 顯示,只有 Yeoh、Marlow 兩模型在壓縮應變小於 0.25、拉伸應變小於 1 的較低應變範圍可得較佳的預測結果,但 Yeoh 模型在拉伸應變大於 1 以後有急劇發散現象,較不穩定。

本分析結果得知僅用平面剪切實驗數據當輸入,只有 Marlow 模型表現較佳,且須限制拉伸及壓縮應變在較小範圍內。

4. 單軸拉伸與壓縮兩種實驗同時輸入嵌合

本情況組合單軸拉伸與壓縮兩組實驗數據同時輸入為嵌合對象。圖 12 和圖 13 分別示出單軸拉伸與壓縮應力與應變的嵌合結果,比較圖 3 與圖 12 及表 2,發現增加了壓縮實驗數據除了 Marlow 模型嵌合度不變外,對拉伸實驗數據的嵌合度均變較差。

比較圖 4 與圖 13 及表 2 顯示,對壓縮實驗數據的嵌合度各模型均比純拉伸實驗預測值佳,但再比較圖 7 與圖 13 及表 2 顯示,則壓縮實驗數據的嵌合準確度,除了 Marlow 模型不變外,其餘各模型均比單軸壓縮實驗嵌合值略差。此外由圖 13 得知,二階多項式、及二階和三階 Ogden 模型在壓縮應變大於 0.4 以上有發散趨勢,因壓縮應變大於 0.4 已無實驗數據提供嵌合,導致這些模型嵌合不準。

圖 14 與表 2 顯示平面剪切實驗預測結果,九種模型中有些模型變好,有些模型則變差,但還是以 Marlow 模型預測最準。綜合上述本種組合情況以 Marlow 模型預測最準確,趨勢也最相近。

5. 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗同時輸入嵌合

將單軸拉伸、單軸壓縮與平面剪切等三種實驗數據同時輸入嵌合,所嵌合的的果分別列於圖 15 至圖 17。

因 Marlow 模型分析時僅需選用一種實驗數據輸入即可,而 Simulia Abaqus/CAE 軟體在分析時係將拉伸與壓縮實驗數據合併在一起,視為同一種輸入而嵌合之,而在執行本項分析時雖有輸入平面剪切實驗

數據,但 Abaqus 並未計入分析,因此本情況的分析結果會與情況 4 相同。

比較均有用拉伸實驗數據嵌合的圖 3、12、15、均有用壓縮實驗數據嵌合的圖 4、13、16、及有用平面剪切實驗數據嵌合的圖 11、17 等的結果,並配合表 2 的平均誤差結果顯示, Marlow 模型雖未計入平面剪切效應,但仍以它的嵌合準確度最佳,其餘模型的嵌合準確度均會受計入其它實驗數據的影響,而比純單一實驗嵌合準確度差,但對三種實驗整體的考量,它的平均誤差有變好的趨勢。

六、結論

本文利用超彈性橡膠材料機械性質三種實驗數據,研究比較在各種實驗數據的組合下,對九種超彈性應變能密度組成率模型準確度的影響做分析評估,試圖由分析結果對單一或有限的實驗數據提供下,提出分析方法的建議。本文採用 Simulia Abaqus/CAE 套裝軟體做為分析工具。

對單一實驗數據採用時,若僅有單軸拉伸實驗,在變形不大情況下,除了 Mooney-Rivlin 和二階多項式等兩模型外,其餘七種模型應可獲得合理的趨勢;而在比較大變形時則以 Marlow 模型表現較佳。若僅有單軸壓縮實驗時,各模型僅在該單項實驗下預測準確,除兩項實驗均不準,在分析應用上,除非工件僅需分析純壓縮變形外,不建議採用。在僅採用平面剪切實驗時, Marlow 模型表現較佳,但也須限制在較小範圍拉伸及壓縮應變內。

在兩種或三種實驗數據同時採用時,由分析結果顯示採用的實驗型式愈多,各種模型準確度整體而言會愈好,但對個別實驗嵌合度而言,因受它種實驗數據的加入嵌合,而降低它的準確度。本文採用的九種模型中, Marlow 模型雖僅需單軸拉伸及壓縮兩種實驗數據的組合輸入,但它的整體準確度表現為最佳。

七、參考文獻

- [1] L. R. G. Treloar, "Physics of Rubber Elasticity", Oxford University Press, 1975.
- [2] 李曉芳,楊曉翔, "橡膠材料的超彈性本構模型", 彈性體, China Elastomerics, 2005.
- [3] E. Arruda, M. C. Boyce, "A Three-Dimensional Constitutive Model for the Large Stretch Behavior of Rubber Elastic Material", Journal of the mechanics and physics of solids, 1993.
- [4] D. Boast and V. A. Coveney ed., "Finite Element Analysis of Elastomers", Professional Engineering Publishing, UK, 1999.
- [5] "ABAQUS Analysis User's Manual", Simulia Corp. of Dassault Systems, 2008.
- [6] "ABAQUS Analysis Theory Manual", Simulia Corp. of Dassault System, 2008.
- [7] E. H. Twizell, and R. W. Ogden, "Non-linear Optimization of the Material Constants in Ogden's Stress-Deformation Function for Incompressible Isotropic Elastomers," Journal of the Australian Mathematical Society, Series B 24, pp. 424-434, 1986.

八、表格

表 1：各種試驗數據輸入嵌合後各種模型分析結果與實驗值比較最大誤差百分比(%)

試驗數據輸入	預測試驗型態	Mooney-Rivlin	Poly-N2	neo-Hookean	Yeoh	Ogden-N2	Ogden-N3	Van Der Waals	Arruda-Boyce	Marlow
拉伸	拉伸	58.84	7.65	30.36	15.26	5.92	5.38	9.27	21.66	1.72
	壓縮	107.08	224.69	31.73	36.05	45.42	24.76	31.38	40.85	25.81
	平剪	73.40	518.55	38.05	41.95	62.05	29.17	37.23	46.33	32.68
壓縮	拉伸	100.48	3.06E+04	47.61	1.90E+04	1.44E+06	7.56E+14	8.94E+03	47.61	53.45
	壓縮	6.21	0.89	14.63	5.76	3.74	1.17	3.24	14.63	1.01
	平剪	74.43	3.08E+03	54.62	6.51E+02	1.26E+04	1.68E+08	3.52E+02	54.62	40.16
平面剪切	拉伸			34.43	1797.59				34.43	50.85
	壓縮			35.72	11.36				35.72	11.20
	平剪			41.67	19.19				41.67	4.04
拉伸+壓縮	拉伸	28.51	11.42	38.16	26.14	36.67	17.92	25.69	38.16	1.72
	壓縮	22.03	20.76	20.10	14.50	14.20	9.11	7.00	20.10	1.01
	平剪	40.44	31.30	44.72	27.36	27.47	29.90	19.13	44.72	32.68
拉伸+壓縮+平面剪切	拉伸	29.54	16.67	32.95	31.42	40.92	16.60	26.96	32.95	1.72
	壓縮	20.80	12.18	23.11	16.03	14.44	10.48	7.37	23.11	1.01
	平剪	41.94	51.81	39.26	23.70	23.53	19.70	15.84	39.26	32.68

表 2：各種試驗數據輸入嵌合後各種模型分析結果與實驗值比較平均誤差百分比(%)

試驗數據輸入	預測試驗型態	Mooney-Rivlin	Poly-N2	neo-Hookean	Yeoh	Ogden-N2	Ogden-N3	Van Der Waals	Arruda-Boyce	Marlow
拉伸	拉伸	15.03	0.55	13.30	5.37	1.75	1.15	4.53	6.06	0.11
	壓縮	88.94	106.79	21.23	26.48	21.26	12.95	23.35	31.43	18.81
	平剪	56.09	192.00	16.29	13.22	32.73	18.89	11.56	15.11	7.10
壓縮	拉伸	65.75	1.29E+04	24.62	4.89E+03	2.67E+05	5.46E+13	1080.48	24.62	19.78
	壓縮	2.32	0.36	7.67	2.09	2.33	0.74	2.41	7.67	0.55
	平剪	45.65	1.14E+03	32.16	1.29E+02	2.93E+03	1.62E+07	68.97	32.16	20.06
平面剪切	拉伸			13.48	404.40				13.48	23.34
	壓縮			25.84	5.56				25.84	5.96
	平剪			14.27	5.22				14.27	0.17
拉伸+壓縮	拉伸	16.12	3.44	19.53	14.80	22.33	6.89	12.69	19.53	0.11
	壓縮	10.74	8.39	9.57	6.22	5.50	4.96	2.47	9.57	0.55
	平剪	23.86	9.98	26.22	20.30	19.02	10.96	13.97	26.22	7.10
拉伸+壓縮+平面剪切	拉伸	15.72	8.88	17.11	15.25	22.75	7.21	13.48	17.11	0.11
	壓縮	10.30	8.28	11.29	6.92	5.17	4.59	2.57	11.29	0.55
	平剪	24.66	14.72	23.24	16.84	14.09	9.12	11.11	23.24	7.10

九、圖

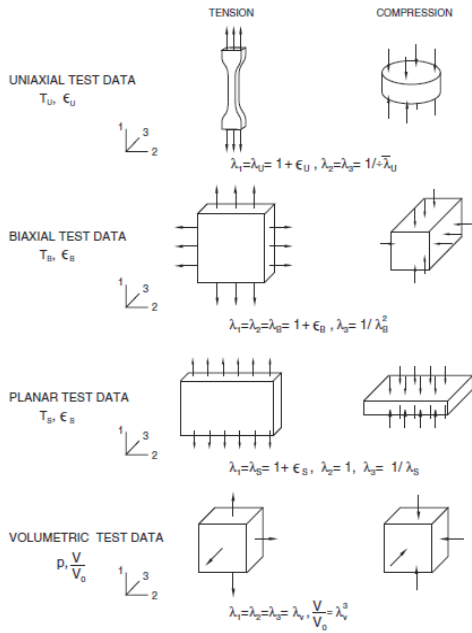


圖 1 超彈性材料力學基本機械性質測試之變形模式

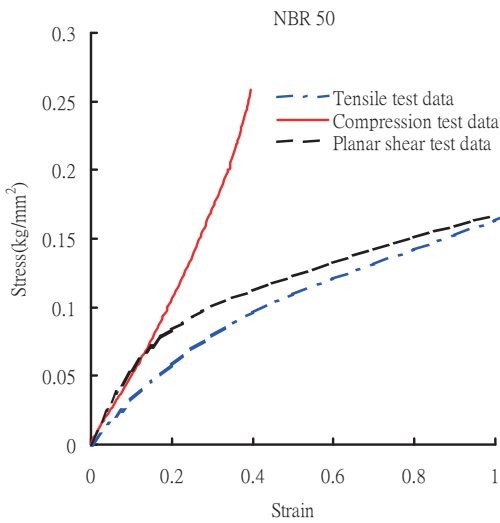


圖 2 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗數據應力對應變曲線圖

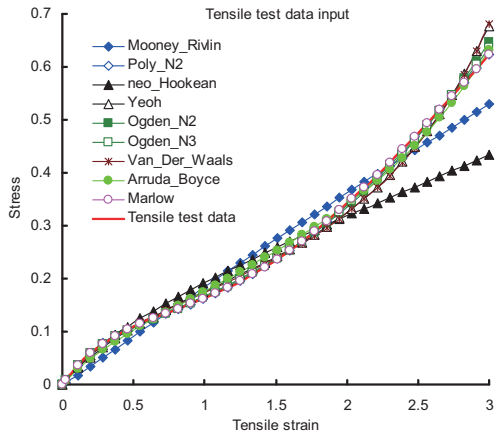


圖 3 僅拉伸實驗數據輸入拉伸應力應變嵌合結果

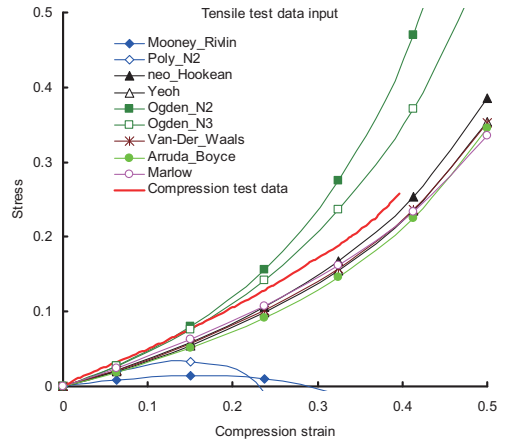


圖 4 僅拉伸實驗數據輸入壓縮應力應變預測結果

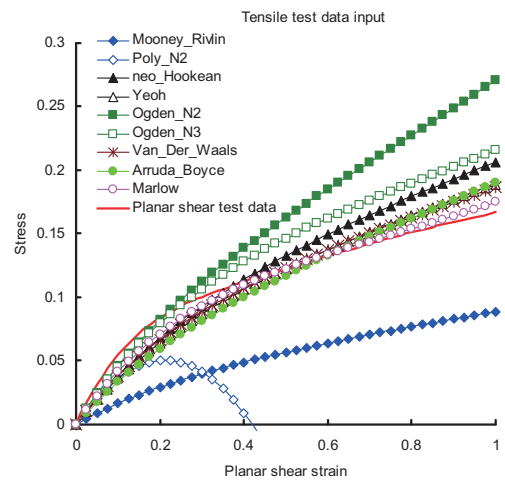


圖 5 僅拉伸實驗數據輸入平面剪切應力應變預測結果

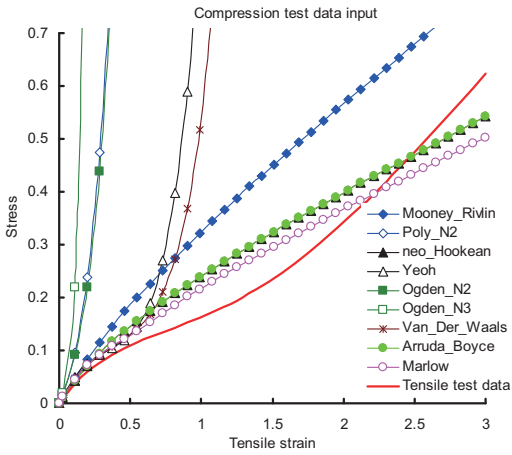


圖 6 僅壓縮實驗數據輸入拉伸應力應變預測結果

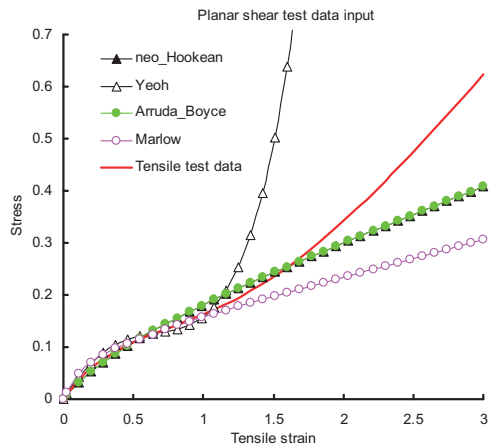


圖 9 僅平面剪切實驗數據輸入拉伸應力應變預測結果

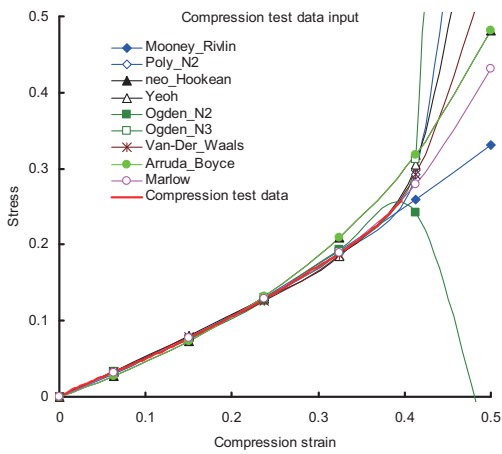


圖 7 僅壓縮實驗數據輸入壓縮應力應變嵌合結果

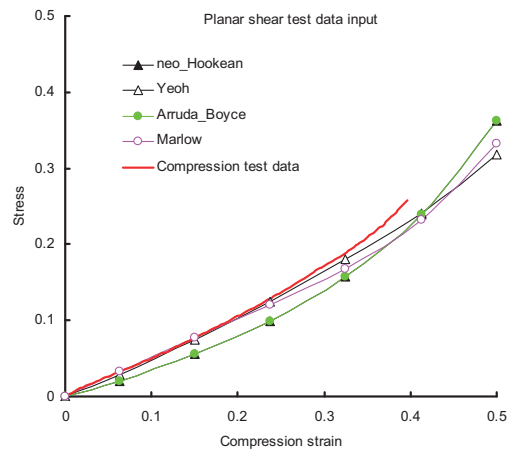


圖 10 僅平面剪切實驗數據輸入壓縮應力應變預測結果

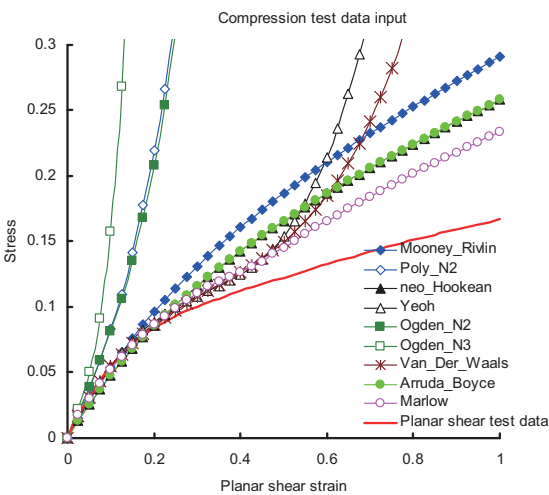


圖 8 僅壓縮實驗數據輸入平面剪切應力應變預測結果

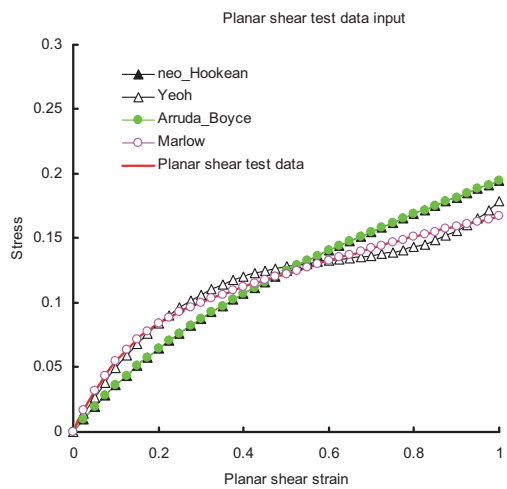


圖 11 僅平面剪切實驗數據輸入平面剪切應力應變嵌合結果

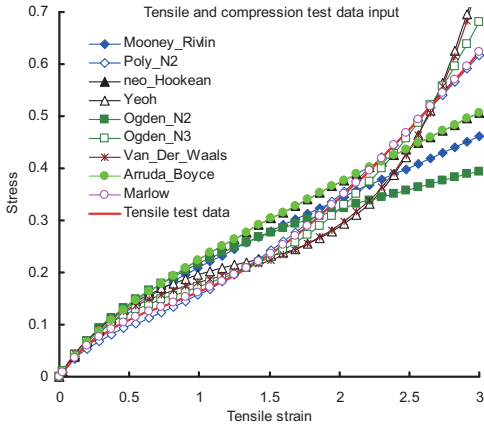


圖 12 單軸拉伸與壓縮兩種實驗數據同時輸入拉伸應力應變嵌合結果

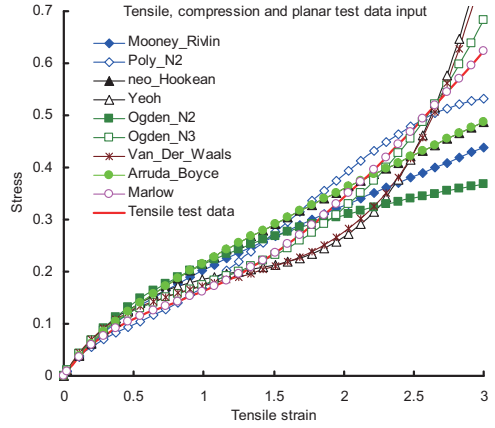


圖 15 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗數據同時輸入拉伸應力應變嵌合結果

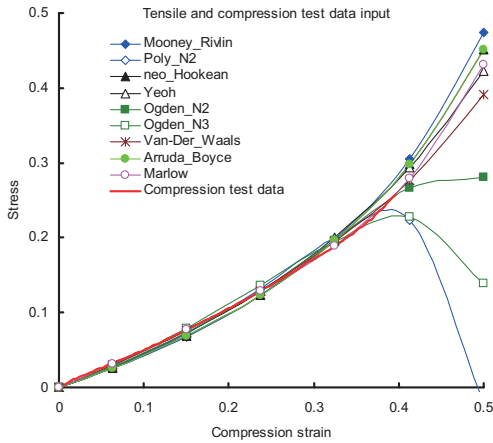


圖 13 單軸拉伸與壓縮兩種實驗數據同時輸入壓縮應力應變嵌合結果

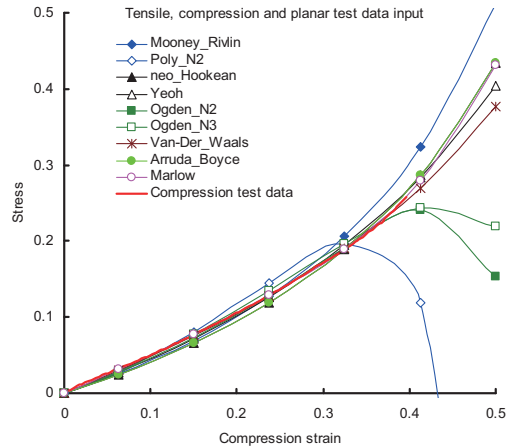


圖 16 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗數據同時輸入壓縮應力應變嵌合結果

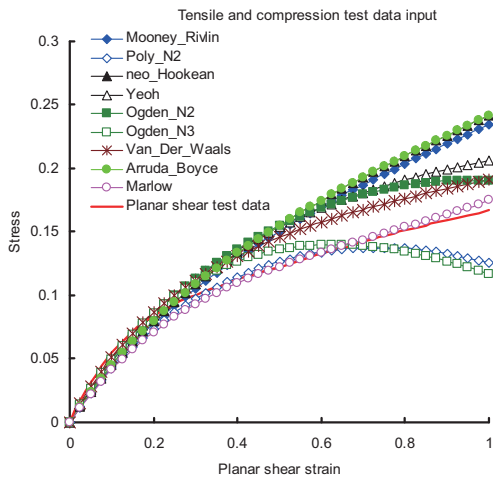


圖 14 單軸拉伸與壓縮兩種實驗數據同時輸入平面剪切應力應變預測結果

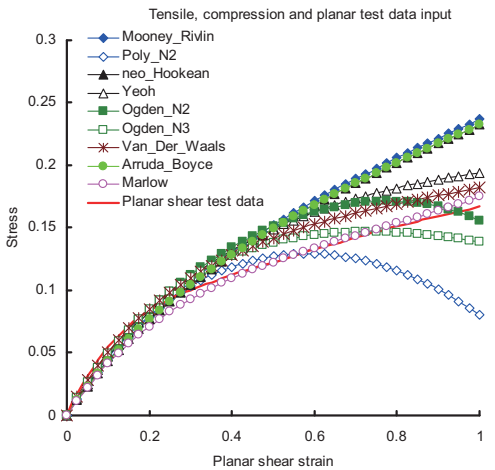


圖 17 單軸拉伸、壓縮與平面剪切等三種實驗數據同時輸入平面剪切應力應變嵌合結果