

第一章 前言

在實際的工程上，時常遭遇到不對稱的週次應力或者應變負載作用在結構體或者構件上的問題。因此在設計上有其必要去了解在不對稱的週次負載作用下，對結構體或者構件在壽命上的影響情形。在實驗上模擬不對稱的週次負載作用，可藉由進行具有平均應力或者應變的疲勞實驗，來觀察平均應力或者應變對壽命的影響。由相關文獻上得知，在應力控制的模態下所施加平均應力的大小對於疲勞壽命及材料的週次應力應變曲線具有強烈影響。一般而言，在應力控制模式下具有平均張應力時，材料的疲勞壽命會降低，而在平均壓應力情形下反而提升疲勞壽命。在應變控制的模態下進行具平均應變疲勞實驗，此時材料會有應力鬆弛現象產生，若最終的平均應力收斂為零時，可發現平均應變對於材料的壽命及週次應力應變曲線幾乎沒有影響。因此可知，應變控制模式下所導致的穩態平均應力收斂為零時，雖然在有平均應變的作用，但材料的疲勞壽命及週次應力應變曲線並不因具有平均應變而有明顯改變。

由於探討平均應變對於疲勞壽命及週次應力應變曲線影響的文獻並不多見，故無法得知在具有平均應變的作用下，最終的平均應力是否必收斂為零？倘若最終的平均應力收斂並不為零，材料的疲勞壽

命與平均應變之間關連性為何？平均應變對週次應力應變曲線是否有影響？因此本研究將致力探討：在應變控制模式下且在具有平均應變作用下，若穩態平均應力不收斂為零時對疲勞壽命的影響，及探討平均應變對於週次應力應變曲線的影響。而平均應變對於疲勞壽命及週次應力應變曲線的影響程度，將以穩態遲滯曲線移動觀點進行說明，進而以穩態遲滯曲線移動的觀點，提出一個疲勞損傷參數來評估，材料在具有平均應力或者應變的週次負載作用下材料疲勞損傷。

為了了解不對稱的週次應力或者應變的作用下對於穩態遲滯曲線移動的影響，可先從分析週次應力應變的組合行為上著手。近些年來，許多週次塑性組合理論被提出用以描述材料週次應力應變行為。在這眾多的組合理論中，Valanis 所提出的黏塑內函時變理論一直受到廣泛注意，因此在本文中亦使用黏塑內函時變理論對材料週次行為進行理論分析。對於此理論將在本文第三章進行相關文獻回顧，說明此一理論發展現況及應用。同時在第三章中，也將針對具有平均應變的穩態遲滯環及週次應力應變曲線進行理論推導。第四章中，本文將提出一個新的說明方式來描述具平均應變的週次應力應變曲線。此新的方式可明顯表現出在不同平均應變對週次應力應變曲線的影響，同時對於具有平均應變的穩態遲滯環作兩個簡單假設，根據這些假設建立一個簡單估算公式，評估在具有平均應變的週次負載作用下其穩態

平均應力的大小。為了解平均應變對壽命及相關材料穩態行為的影響，本研究將進行一系列具有不同的平均者應變的疲勞實驗。測試材料選定為 AISI316 及 AISI304 兩種不鏽鋼。在第五章將說明相關的實驗參數設定、疲勞壽命數據以及穩態遲滯環量測與觀察等。在第六章中將一步對於 AISI316 及 AISI304 兩種不鏽鋼的週次的材料行為進行分析。同時對於所提出有關於穩態遲滯環的假設其合理性進行驗正，並且對於本文中所建立的相關方程式進行驗正。在本文中，由實驗上的觀察，發現在張力狀態下的塑性應變能大小明顯的影響材料疲勞壽命。因此在第七章中將提出以張力狀態下的塑性應變能當作疲勞損傷參數，對於具有平均應變的 AISI304 不鏽鋼疲勞壽命進行壽命預測。而此被建立的疲勞損傷參數同時亦和 S.W.T.疲勞損傷參數以及修正的 S.W.T.疲勞損傷參數分別進行壽命預測與比較分析。

第二章 文獻回顧

週次應力應變曲線(cyclic stress-strain curve)在設計上就經常被使用來評估結構體或是元件承受週次負載下的彈塑性週次行為及耐久性(durability)。這條應力應變曲線的產生，是連接許多具有不同大小穩態遲滯環的尖點所構成。這條被連接的曲線，在描述上一般是採用冪級數型式，來建立應力振幅與塑性應變振幅之間的關連性。關於產生這條應力應變曲線的方法，在實驗控制上，有兩種方法，分別為應力控制及應變控制。對於在施加週次負載方面，一般也可區分為兩大種類來建立週次應力應變曲線。第一類為施加在試桿上的負載為等振幅完全反覆的週次負載，且所施加的負載大小維持不變，直至試桿破裂為止。因此使用此一負載方式，必須使用許多試桿分別進行大小不同的等振幅完全反覆的週次負載實驗，方可建立週次應力應變曲線。根據此方法所建立的週次應力應變曲線，特稱為基本週次應力應變曲線(basic cyclic stress-strain curve)；另一類取得週次應力應變曲線的方法為使用僅單一試桿來承受經過設計的變動負載，直至試桿破裂為止，再對所得實驗數據進行分析，以取得所謂的使用週次應力應變曲線(service cyclic stress-strain curve)。對於週次應力應變曲線以及如何應用單一試桿以產生週次應力應變曲線，其相關研究如文獻[1-12]。

由於使用上述方法所得的週次應力應變曲線並沒有考量到平均應力或者應變對週次應力應變曲線的影響情形，但在實際的工程上卻時常遭遇到不對稱的週次負載作用。然而目前對於平均應力或者應變對週次應力應變曲線的影響情形研究也不多見。如文獻[13-16]中可看出，平均應力大小對週次應力應變曲線的影響相當顯著，但平均應變沒有影響。在文獻[18]中分析平均應變對 AISI316 不鏽鋼材料的週次應力應變曲線的影響，在此文中並不使用傳統方式來描述週次應力應變曲線，而是使用以最大應力與控制應變振幅為參數來描述週次應力應變曲線，此新的描述方式，可具體說明平均應變大小對週次應力應變曲線的影響程度。

一般而言，對於週次應力應變曲線的建立，常需花費大量時間來執行實驗與數據分析。故建立正確快速方法來產生週次應力應變曲線有其必要性。因此，本文將在修正黏塑內涵時變理論架構下，推導出以解析解型態展現的週次應力應變曲線方程式。此理論相關文獻探討將在第三章進行。

近些年來，較新及較有發展潛力方法是採用塑性應變能密度（ plastic strain energy density ）來做為疲勞損傷一個主要參數，相關的研究如文獻[29-53]。而應力應變的遲滯環面積代表著單位週次下塑性能密度，因此要採用塑性應變能密度來評估材料疲勞壽命，其關鍵

在於遲滯環的正確描述。

對於穩態遲滯環描述方面，一般方法上是判斷材料穩態遲滯行為是否滿足 Massing 假設，如果材料行為滿足 Massing 假設，其穩態遲滯曲線可由週次應力應變曲線放大兩倍來描述。若不滿足 Massing 假設，則需先求得所謂 master curve 再配合週次應力應變曲線，來建構不同應變範圍所對應之應遲滯曲線。但大部份材料行為皆不滿足 Massing 假設，假若對穩態應力應變遲滯曲線描述有高精度要求時，在僅有 master curve 輔助下將無法達成。而 master curve 取得，首先需作穩態遲滯環的平移，因此要避免座標平移所造成的不便及高精度的要求，發展新方法描述穩態遲滯曲線來減少相關實驗進行量，在時間上及經濟上有其必要性，而最佳的途徑是從材料週次變形行為理論中著手。因此本文亦使用此修正後的黏塑內涵時變理論，通過適當的假設，推導在具平均應變週次負載作用下，材料穩態應力應變行為反應。

對於平均應力或者應變對疲勞壽命影響方面，如文獻[58-71]中可看出，構件中若具有平均張應力時，將縮短疲勞壽命，反之壓應力存在將增加構件的疲勞壽命。若具有平均應變時，則須視平均應力是否會鬆弛為零。倘若穩態平均應力為零，平均應變大小並不影響疲勞壽命；反之，穩態平均應力不為零，則穩態平均應力的大小會明顯影

響疲勞壽命。由此可知，平均應力大小主導疲勞壽命受影響程度，同時由實驗上的觀察亦可發現張應力會助長疲勞裂縫成長。對於考量具有平均應力對疲勞壽命影響的疲勞壽命損傷參數將被建立。這些常見被建立的損傷參數可表如下：

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_u}\right)^2 = 1 \quad (2-a)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_u} = 1 \quad (2-b)$$

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_f} + \frac{\sigma_m}{\sigma_y} = 1 \quad (2-c)$$

$$\varepsilon_a = \left(\frac{\sigma_f - \sigma_m}{E}\right)(N_f)^b + \varepsilon_f' (N_f)^c \quad (2-d)$$

$$\sigma_1 \varepsilon_a E = \sigma_f'^2 (N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' E (N_f)^{b+c} \quad (2-e)$$

在上述方程式中， σ_a 代表應力振幅， σ_m 為平均應力， σ_f 為疲勞強度， σ_y 為降伏強度， σ_u 為極限強度。

文本將從穩態遲滯環的平移情況來考量平均應力或者平均應變對疲勞壽命影響，進而提出新的疲勞壽命損傷參數來評估具平均應力或者平均應變時材料的疲勞壽命。

第三章 在週次負載作用下的穩態應力應變關係式的建立

使用傳統塑性力學的理論，來描述材料彈塑性行為時，首先必須先選擇適當硬化律(hardening rule)及降伏面(yielding surface)以建立滿足負載條件下，應力增量與應變增量之間的組合方程式，再逐步求解材料行為反應，因此在計算流程上較顯複雜。若用於預測較複雜負載路徑下材料反應，則有其困難所在。

Valanis 在 1980 年代提出塑性內涵時變理論 (endochronic)來描述受力過程對材料彈塑性行為的影響。此理論對於應力應變之間關連性是以積分型態展現。近年來，許多學者使用此修正後的塑性內涵時變理論，來描述不同負載型式下材料的行為反應，其正確性獲得高度評價，因而受到廣泛注意。目前此理論應用範圍已擴展至大變形(finite deformation)領域、有限元素 (EndoFem)、材料潛變塑性行為 (creep-plasticity)、材料非等向性硬化材料行為(anisotropic hardening)及材料動態塑性(dynamic-plasticity)行為方面研究。

塑性內涵時變理論是建立在內部變數不可逆熱力學(irreversible thermodynamic with internal state variables)及內涵時間(intrinsic time)觀念，認為目前材料的應力狀態為材料在整體變形過程及溫度

變化過程的函數。此理論同時已將傳統塑性力學中的硬化律 (hardening rule) 及降伏面 (yielding surface) 等觀念皆包含其中，由此可知古典塑性力學理論將只是塑性內涵時變理論中的一個特例。而傳統塑性力學與塑性內涵時變理論之間的關連性，在文獻[75] 中被建立。

本文也將使用此理論，在適當假設下推演出一組代數型式的組合方程式來描述在具平均應變週次負載作用下的穩態遲滯曲線。假若穩態遲滯環對中心點具有對稱性，則可應用本文所發展的組合方程式對具平均應變穩態遲滯環進行理論模擬。更進一步，本文亦建立一個解析方程式來說明應力振幅與塑性應變振幅之間的關連性。

塑性內涵時變理論在單軸受力狀態下，組合方程式(constitutive equation)硬化函數及內涵時間之間關連性可表如下

$$\sigma(z) = \sigma_y^o \frac{d\varepsilon_p(z)}{dz} + \frac{3}{2} \mu_0 e^{-\alpha z} \int_0^z e^{\alpha z'} \frac{d\varepsilon_p(z')}{dz'} dz' + \frac{3}{2} \mu_1 \varepsilon_p(z) \quad (3-a)$$

$$d\zeta^2 = d\varepsilon_p \cdot d\varepsilon_p \quad (3-b)$$

$$dz = \frac{d\zeta}{f(\zeta)} \quad (3-c)$$

$$f(z) = C - (C - 1) e^{-\beta z} \quad (3-d)$$

本文根據上列關係式，進行材料行為反應的推導。在具平均應變穩態遲滯環理論分析方面，所建立的應力應變關係式如下：

$$\varepsilon_p(z_i) = \varepsilon_{2p} + C \times i \times \Delta z \quad (3-e)$$

$$\sigma(z_i) = C\sigma_y^0 + \frac{3}{2}\mu_0 e^{-\alpha z_{2n}} X_{2n} e^{-\alpha i \Delta z} + \frac{3}{2} \frac{\mu_0 C}{\alpha} (1 - e^{-\alpha i \Delta z}) + \frac{3}{2} \mu_1 \varepsilon_p(z_i) \quad (3-f)$$

在材料行為反應達到穩態時，相對映控制應變路徑兩端的內函時間差可表如下：

$$z_d = z_{2n+1} - z_{2n} = \frac{\varepsilon_{1p} - \varepsilon_{2p}}{C} \quad (3-g)$$

將此相對應內函時間差，進行離散後則可使用方程式(3-e)及(3-f)對具平均應變穩態遲滯環進行模擬。

在週次應力應變曲線理論模擬方面，本文所建立應力振幅與塑性應變振幅之間的關係式如下：

$$\sigma_a = C\sigma_y^0 + \frac{3\mu_0 C}{2\alpha} \left(\frac{1 - e^{-\Psi}}{1 + e^{-\Psi}} \right) + \frac{3}{2} \mu_1 \varepsilon_{ap} \quad (3-h)$$

由以上所建立的方程式中可看出以下幾點結論：

- (1)使用方程式(3-e)及(3-f) 對具平均應變穩態遲滯環進行模擬時，必須先得知，控制應變路徑兩端穩態的應力及塑性應變。
- (2) $\sigma_a, \varepsilon_{ap}$ 分別代表材料在等振幅應變控制下以及軸向承受週次反覆負載下，穩態遲滯曲線中最大張應力與相對應塑性應變。方程式(3-h)中 $\sigma_y^o, \alpha, C, \mu_o, \mu_1$ 皆為材料係數，因此利用方程式(3-h)可直接進行描述材料週次應力應變曲線。
- (3)方程式(3-h)中 $\sigma_y^o, \alpha, C, \mu_o, \mu_1$ 皆為材料係數，此五個材料係數取得，理論上僅需藉由一根試桿在固定較大應變範圍內，進行單軸向週次負載實驗，以取得材料週次應力應變曲線，而不必使用眾多試桿及花費許多時間來進行實驗及分析。如何系統化分析決定此五個材料係數，可參考文獻[76]。

第四章 具平均應變的週次應力應變曲線之描述 及其穩態平均應力之評估

在此章節中首要目標是要建立新的表示法來描述具有平均應變的週次應力應變曲線（cyclic stress-strain curve）。此新的描述方式擁有具體表現出平均應變對週次應力應變曲線影響的能力。

如同建立平均應變為零的週次應力應變曲線一般，具有平均應變的週次應力應變曲線的取得，亦需藉由執行具有相同平均應變但不同大小應變振幅的疲勞實驗，來取得一系列帶有相同平均應變的穩態遲滯環的實驗數據，且將實驗數據劃在共同的應力應變圖上，然後將各個穩態遲滯環上的尖點連接，則此被連接線即為具有平均應變的週次應力應變曲線。對此連接線描述如下：

$$\varepsilon_a = \left(\frac{\sigma_{peak}}{E}\right) + \left(\frac{\sigma_{peak}}{E_o}\right)^{1/n'} \quad (4-a)$$

其中 E_o 與 n' 皆為描述參數且符號 σ_{peak} 代表最大張應力。因此，直接比較方程式(4-a)中 E_o 與 n' 的大小，即可看出不同的平均應變對週次應力應變曲線的影響情形。此新表示法除可表達平均應變對週次應力應變曲線外，尚可與 Smith 與 Watson 及 Topper 所提出疲勞壽命曲線產生關連性，其關係式如下：

$$\sigma_{peak} \left[\left(\frac{\sigma_{peak}}{E} \right) + \left(\frac{\sigma_{peak}}{E_0} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \sigma_f^2 (2N_f)^{2b} + \sigma_f \varepsilon_f E (2N_f)^{b+c} \quad (4-b)$$

為使周次應力應變曲線一般性表示法與新建立的表示法具有一致性，在此假設具有平均應變穩態遲滯環在應力應變座標軸上會對稱於中心點，此中心點由穩態平均應力 σ_m 與平均應變 ε_m 所構成。

根據此一對穩態遲滯環的假設，可知若穩態遲滯環來自於完全反覆負載下的疲勞實驗，則應力振幅大小會等於最大張應力，因此用應力振幅與塑性應變振幅來描述週次應力應變曲線與本文所建立的描述方式，兩者是一致的。

由文獻[58-71]中顯現，週次應變負載過程中若具有平均應力，其大小與方向對疲勞壽有極大的影響。因此具有平均應力或平均應變之疲勞壽命預測方式，對於評估構件承受真實負載時的壽命評估極為重要。觀察應變控制下的疲勞實驗，平均應力有鬆弛(relax)現象的出現。一般而言，平均應力鬆弛的程度與施加應變振幅大小、平均應變大小及材料有很大的關係。因在週次應變負載過程中，平均應力掌握十分困難。如果平均應力在週次負載過程中能很快釋放，則平均應力對壽命的影響就很小。若無完全釋放，一般是採用實驗壽命二分之一處的平均應力，作為代入預測公式的依據。這是一種以實驗方式來決定平均應力的作法，實際上並無法確實掌握。

在本章節中根據實驗觀察，分析來自不同應變振幅與平均應變組合情形下，所取得的穩態遲滯環，同時對具有平均應變的穩態遲滯環做兩個基本假設，再根據對穩態遲滯環的假設，建立一個簡單計算公式，評估在具有平均應變的週次負載作用下穩態平均應力的大小。此外本研究再次對穩態遲滯環的假設陳述如下：假設分別在相同應變振幅但不同的平均應變作用下，其穩態遲滯環維大小型狀會維持不變；假設穩態遲滯環在應力應變座標軸上移動方向與施加平均應變的方向一致。推導平均應力公式可表如下：

$$\frac{\sigma_m}{E} = \varepsilon_m + \varepsilon_{ap} - \varepsilon_{1p} \quad (4-c)$$

方程式(4-c)用來估算在平均應變為 ε_m 且應變振幅為 ε_a 的週次負載作用下的穩態平均應力。其中 ε_{ap} 代表穩態時塑性應變振幅， ε_{1p} 代表最大塑性應變。若來自平均應變為 ε_m 的週次應力應變曲線為已知情形，則根據方程式(4-c)可求得對應應變振幅為 ε_a 的最大張應力，進一步可計算出穩態平均應力。同理在平均應變為零的週次應力應變曲已知情況下， ε_{ap} 大小可被決定，因此便可決定出平均應變為 ε_m 且應變振幅為 ε_a 的週次負載作用下的穩態平均應力。在穩態平均應力及最小控制應變已知情況下，其所對應的穩態應力與塑性應變便可得知，換句話說，平均應變為 ε_m 且應變振幅為 ε_a 所對應的最大最小控

制應變，其相對應的穩態應力與塑性應變大小，可在平均應變為 ε_m 與零的週次應力應變曲線已知情形下被決定。此應變路徑控制端點上穩態的應力應變訊息，可提供本文所發展具平均應變的穩態遲滯曲線模擬計算公式之用。

第五章 實驗流程

本研究將進行一系列具有不同平均應變的疲勞試驗，同時使用 Yip and Yu [108]所發表的 1070 鋁合金實驗數據與本文所提方法的理論計算結果來進行比較，藉以驗證本文所提方法正確性。同時將對應變控制下測試材料的特性、疲勞壽命以及周次穩態行為，進行分析與討論。

在本研究中選定測試材料為 AISI316 及 AISI304 兩種不鏽鋼材。這兩種不銹鋼材料的化學成分組成如表 5-1 及表 5-2。對於試桿的製作及加工後的熱處理程序方面:試驗所須的所有試桿的加工均使用車床加工成圓棒實心平滑試桿，其幾何外型如圖 5-1 及圖 5-2 所示。而 AISI316 及 AISI304 這兩種預加工不鏽鋼母材，試桿加工前均已經過固溶處理（Solution Treatment）。待試桿經粗加工後，AISI316 試桿直接進行試桿表面拋光。而 AISI304 試桿在粗加工後，再置於 480 °C 高溫爐中十分鐘，經空冷(Air Cooling)後復進行試桿表面拋光細加工。

在實驗設備及數據截取系統方面:本研究所有的疲勞實驗，皆在應變控制模態下進行。其應變控制模態形成是使用 Instron 公司 2620-601 型延伸計(Extensometer)與液壓動態試驗系統來構成應變

控制回饋閉合系統。其中所使用的液壓動態試驗系統為 Instron 1322 型及 Instron 8801 型，延伸計測標準長度(gage length)為 25 mm，控制器為 Fast-track 8800。在實驗參數設定方面，對於 AISI316 鋼材疲勞試驗的頻率皆控制在 0.5Hz，對於 AISI304 鋼材疲勞試驗進行頻率皆控制為 10^{-2}s^{-1} ，其中輸入波形皆為三角波，而實驗參數設定皆可藉由 Max 電腦軟體在電腦螢幕上進行相關參數設定。Max 軟體在數據的截取方面每秒可達 400 到 500 點之間，同時在實驗進行時可將所有實驗訊息，以圖形型式在電腦螢幕上顯示，即時掌握及記錄整個實驗過程。

本研究中對於疲勞壽命定義為，每週次相對應的最大張應力若下降 10%時，所對應的次數即為疲勞壽命，而穩態遲滯環取自此一疲勞壽命的定義次數的一半。根據穩態遲滯環可得知塑性應變能及週次應力應變曲線上的應力應變點。更進一步，在相關的實驗數據已取得的情況下，即可取得週次應力應變曲線、應變振幅與疲勞壽命之間的關係式以及塑性應變能與疲勞壽命之間的關係式。相關的材料參數的取得可使用最小平方法。一般而言，週次應力應變曲線、應變振幅與疲勞壽命之間的關係式及塑性應變能與疲勞壽命之間的關係式，常表如下：

$$\varepsilon_a = (\sigma_a / E) + (\sigma_a / E_o)^{(1/n)} \quad (5-a)$$

$$\varepsilon_a = K (N_f)^n \quad (5-b)$$

$$\Delta W_p = K' (N_f)^{n^*} \quad (5-c)$$

表 5-4 至表 5-6 列出 AISI316 及 AISI304 這兩種不鏽鋼材，對於方程式(5-a)至方程式(5-c)中，材料參數計算結果。本研究執行一系列具有不同平均應變的疲勞實驗，實驗所選取平均應變的大小如表 5-7 中所列。而疲勞壽命定義及穩態遲滯環的取得亦如同上述，相關參數計算結果如表 5-8 至表 5-10 中所述。

第六章 具平均應變情況下其週次應力應變行為 及疲勞壽命

在本章節中將對 AISI316 及 AISI304 這兩種不鏽鋼材的週次行為進行觀察及分析。比較 AISI304 不鏽鋼材的靜態拉伸與壓縮應力應變曲線，發線在低應變範圍內具有非等向性行為。由 AISI316 不鏽鋼材的張應力週次曲線圖可看出 AISI316 不鏽鋼材在完全反覆週次負載作用下，張應力隨著週次增加急速上升，然後緩慢下降直至穩定。而 AISI304 不鏽鋼材卻呈現應力週次軟化的現象。在此，更進一步比較 AISI304 不鏽鋼張應力週次曲線與壓應力週次曲線，以觀察張應力與壓應力在大小方面的不對稱性。由實驗中顯現不對稱性的程度隨著控制應變振幅增加而改善。

本研究中所有穩態遲滯環實驗數據皆取自相對於二分之一疲勞壽命週次，量測穩態遲滯環面積即可計算出單週次塑性應變能。比較分別來自不同大小的平均應變的疲勞實驗中所取得的穩態遲滯環，可得知單週次塑性應變能大小與控制應變振幅大小有關，且在相同應變振幅下其塑性應變能大小幾乎相同，因此使用塑性應變能疲勞壽命曲線來憑估具有具有平均應變或者應力的疲勞壽命是不合適的。更進一步對具有平均應變的穩態遲滯環進行觀察，發現本研究對於穩態遲滯

環所作的三個假設是可接受的。但對於 AISI304 不鏽鋼在平均應變大小控制在-0.2%情況下，本研究有關於穩態遲滯環的假設皆不成立。為了尋求這個特殊現象出現的原因，本研究另外進行具平均應變大小為-0.4%的疲勞實驗。由實驗結果得知，AISI304 不鏽鋼在低應變範圍具有材料非等向性行為，而導致這個特殊現象的出現。換句話說，材料非等向性行為將會影響到對於穩態遲滯環所作的三個假設是否成立。

在分析平均應變對週次應力應變曲線的影響方面，若使用本文所建立的新的描述方式對週次應力應變曲線進行說明，將可發現平均應變對週次應力應變曲線的影響。對於 AISI316 及 AISI304 這兩種不鏽鋼材而言，這兩個描述參數 E_o 與 n' 的大小將同時隨著施加的平均應變增加而減少，同時在相同的應變振幅情形下可發現穩態最大張應力將隨平均應變增加而增加，但對於 AISI304 不鏽鋼材在平均應變大小控制在-0.2%情況下，此現象並不存在。

對於平均應變大小對於穩態平均應力影響方面，根據實驗的結果可得到兩個重要的結論。結論一：隨著控制應變振幅的增加，對應的穩態平均應力將逐漸收斂為零。結論二：不同的應變振幅與平均應變的組合將導致不同程度的平均應力鬆弛。綜合結論一與二，平均應變的大小、應變振幅大小與材料將影響穩態平均應力的大小。在理論估

算穩態平均應力方面，根據建立在穩態遲滯環的假設下所推導的估算公式，估算穩態平均應力可發覺理論計算值與實驗值兩者之間相當的一致。

對於穩態遲滯環模擬方面，本研究在黏塑內函時變理論架構下進行理論推導，發展出一組以 $\Delta \varepsilon$ 為單一變數的應力應變組合方程式來描述在拉伸情況下具有平均應變的穩態遲滯曲線。藉由 AISI316 及 AISI304 兩種實驗數據及 1070 鋁合金實驗數據與理論計算值進行比較，實驗數據與理論計算值之間相當一致，足以確定這組應力應變組合方程式正確性。

本研究除了建立描述在拉伸情況下具有平均應變的穩態遲滯曲線的應力應變組合方程式外，同時亦在黏塑內函時變理論架構下也建立一個解析解，來描述週次應力應變曲線。此解析解對於應力振幅與塑性應變振幅之間具有一對一關係。同時由實驗結果顯現，理論計算與實驗數據之間有良好吻合情形，確立此解析解的正確性。

第七章 建立以張力狀態下的塑性應變能為損傷 參數對具平均應變（應力）作用下疲勞壽命預估

使用塑性應變能來做為疲勞損傷一個主要參數，基本上是認為材料本身所累積塑性應變能(cumulative plastic work)，將會引起材料本身許多不可逆改變(irreversible change)。這些被引發的不可逆改變是造成材料疲勞破壞主要原因。在此觀點下塑性應變能被使用來做為評估材料疲勞壽命疲勞損傷參數。本研究將以塑性應變能的觀點，評估具有平均應力或平均應變的週次負載下構件的疲勞壽命。

一般而言，基本的塑性應變能疲勞壽命曲線的取得，皆藉由進行具平均應變為零的低週次疲勞壽命實驗。由實驗中建立穩態遲滯曲線面積與疲勞壽命之間的相對關係，此關係式即是塑性應變能疲勞壽命曲線。

當比較來自於平均應變為零的穩態遲滯曲線與來自於相對應具有平均拉伸應變（拉伸應力）的穩態遲滯曲線，可發現後者在應力應變座標上有朝右或者朝上移動情況。不同的移動情況代表著材料承受不同的週次負載作用，因此若使用塑性功疲勞壽命曲線來估算材料疲勞壽命，即使穩態遲滯曲線面積相同，穩態遲滯曲線移動不同，材料

受到疲勞損傷也會不同，此意謂著塑性功疲勞壽命曲線不能直接用來預測具有平均拉伸應變或者平均拉伸應力作用下的材料疲勞壽命。

在本文中考量穩態遲滯曲線移動情況對疲勞損傷的影響，提出以張力狀態下的塑性應變能做為疲勞損傷參數，預估在平均拉伸應變或者平均拉伸應力週次負載下材料疲勞壽命。意謂著材料在張應力情況下所產生的塑性應變能對材料疲勞損傷有重大影響，具有滿足平均張或壓應力會降低或增加疲勞壽命的實驗觀察。修正的塑性應變能與疲勞壽命關係式如下：

$$(\Delta W_p)_T = P(N_f)^\alpha \quad (7-a)$$

其中 $(\Delta W_p)_T$ 代表著為在張應力情況下的塑性應變能， P 與 α 皆為材料係數，需由實驗方式決定。此修正的塑性應變能疲勞壽命曲線可由基本的塑性應變能疲勞壽命曲線直接進行修正。其因為來自於平均應變為零的疲勞試驗的穩態遲滯環，在應力應變座標軸上會對稱於座標原點，代表著在張應力情況下的塑性應變能為塑性應變能的一半，因此塑性應變能疲勞壽命曲線與修正的塑性應變能疲勞壽命曲線，參數之間關連性可表如下：

$$P = K' / 2 \quad (7-b)$$

$$n' = \alpha \quad (7-c)$$

而對於評估具平均應變(應力)的週次負載作用下材料的疲勞壽命，很有名的疲勞損傷參數為 S.W.T. 參數，此疲勞損傷參數定義為 $\sigma_{Max} \varepsilon_a$ 。很清楚在應力應變座標軸上代表著由最大應力與應變振幅所構成的長方形面積，而面積大小代表著應變能的大小，因此 S.W.T. 疲勞損傷參數基本上認為最大應力與應變振幅所構成的應變能對材料疲勞損傷有重大影響。同時根據 S.W.T. 疲勞損傷參數的定義，定義修正的 S.W.T. 參數，它代表著相對於 Smith 與 Watson 及 Topper (S.W.T.) 所提出疲勞損傷參數的塑性應變能，而此參數以 $(\sigma_{Max} \varepsilon_a)_M$ 符號代表。

在本研究中使用 S.W.T. 疲勞損傷參數、修正的 S.W.T. 疲勞損傷參數以及本文所建立的疲勞損傷參數，來預估在具平均應變的週次負載作用下，AISI304 不鏽鋼材的疲勞壽命。對於 AISI304 不鏽鋼材而言，這三個疲勞損傷參數與壽命關係式可表如下：

$$\sigma_{Max} \varepsilon_a = 25.8601 (N_f)^{-0.2876} \quad (7-d)$$

$$(\sigma_{Max} \varepsilon_a)_M = 68.3832 (N_f)^{-0.4426} \quad (7-e)$$

$$(\Delta W_p)_T = 151.7347 (N_f)^{-0.5035} \quad (7-f)$$

由圖中(7-8)及(7-13)可看出這三個疲勞損傷參數，對於預測具平

均應變的 AISI304 不鏽鋼材的疲勞壽命，實驗與理論預估均相當吻合。進一步藉由統計分析，可發現使用修正塑性應變能做為損傷參數來預測材料疲勞壽命，其準確度會均較 S.W.T. 疲勞損傷參數及修正的 S.W.T. 疲勞損傷參數更加提高。

第八章 結 論

在本研究中，作者選用 AISI316 及 AISI304 兩種不鏽鋼材料進行一系列具有大小不同的平均應變的疲勞實驗。同時針對這些測試材料進行實驗上的觀察與分析，從中了解平均應變對於疲勞壽命及對材料穩態行為上的影響，並且使用黏塑內函時變理論對於具有平均應變的穩態遲滯環及完全反覆負載下所得的週次應力應變曲線進行理論分析。

在此根據 AISI316 及 AISI304 兩種不鏽鋼材料，在具平均應變週次負載作用下所得的實驗結果，進行實驗上的觀察與分析及理論的驗證，從中可得知下列幾項結論：

- (一)、對於來自於負載為完全反覆的疲勞試驗的實驗數據進行週次應力應變曲線描述，傳統上是使用應力振幅與塑性應變振幅的方式來描述，此方式所描述曲線與本文所提出描述週次應力應變曲線方式，基本上將會一致。所不同的是本文所發展的描述方式主要可用來直接檢驗平均應變對於週次應力應變曲線影響。
- 使用本文所發展對於週次應力應變曲線的描述方式，對於 AISI316 及 AISI304 這兩種不鏽鋼材料可發現若增加平均應變則描述參數 n' 與 E_o 將會變少。

- (二)、對於具有平均應變的穩態遲滯環進行實驗觀察，可發覺三種有關於穩態遲滯環的材料特性：AISI316 及 AISI304 的穩態遲滯環在應力應變座標軸上會對稱於座標點 $(\varepsilon_m, \sigma_m)$ ；對於來自相同應變振幅但不同的平均應變其穩態遲滯環維大小型狀會維持不變；穩態遲滯環移動方向與給於平均應變大小方向一致。
- (三)、由實驗數據顯現，平均應變大小、應變振幅大小及材質將影響穩態平均應力大小。同時使用本研究所發展穩態平均應力估算公式來預估穩態平均應力，可發現實驗數據與理論預估兩者相當穩合。
- (四)、在塑性內函時變理論架構下，本研究建立一組以內函時間增量 Δz 為單一變數的應力應變方程式，來描述在拉伸情況下具有平均應變的穩態遲滯曲線。同時亦建立應力振幅與塑性應變振幅之間具有一對一關係解析解來描述週次應力應變曲線。由實驗結果顯現兩者有良好吻合情形，此外驗證本研究中所建立理論方程式的正確性。
- (五)、對於實驗的單軸拉力曲線與週次應力應變曲線進行比較，可發現 AISI316 不鏽鋼與 1070 鋁合金材料為週次硬化材料，而 AISI304 不鏽鋼為週次軟化材料。
- (六)、在本研究中將使用三種不同疲勞損傷參數來評估平均應力對於

AISI304 不鏽鋼材料疲勞壽命的影響。一般而言，這三種被使用疲勞損傷參數對於具有平均應力的疲勞壽命預估，均有令人滿意的結果。進一步藉由簡單的統計分析這三種不同疲勞損傷參數預估結果，將發現以張力狀態下所得的塑性功 $(\Delta W_p)_T$ 做為疲勞損傷參數比其它兩種疲勞損傷參數，較具有較佳的疲勞壽命預估能力。

(七)、因為張力狀態下所得的塑性功大小是全部塑性功大小的一半。

因此張力狀態下的塑性功與疲勞壽命之間關係式，可直接修正來自於完全反覆負載的疲勞試驗所得的塑性功壽命曲線。

附錄 [英文本]