

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

經使用劣化後 Gr/PEEK 複材之修補(3/3)--子計畫五：
Gr/PEEK 複材在變動負荷下之疲勞特性及可靠度研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-128

執行期間：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

計畫主持人：吳文方

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立台灣大學機械工程學系

中 華 民 國 九 十 年 十 月 五 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

Gr/PEEK 複材在變動負荷下之疲勞特性及可靠度研究

Fatigue Reliability Analysis of Gr/PEEK Composites

under Variable-Amplitude Loading

計畫編號：NSC 89-2212-E-002-128

執行期限：89 年 8 月 1 日至 90 年 7 月 31 日

主持人：吳文方 國立台灣大學機械工程學系

計畫參與人員：張順庭、許嘉元 台灣大學機械工程學研究所

一、摘要

基於疲勞模數的概念，本論文針對碳纖維強化聚醚醚酮複合材料 Gr/PEEK [0/45/90/-45]_{2S} 積層板試片進行研究，建立單一疲勞應力作用下之疲勞壽命預估式與多階段疲勞應力作用下之疲勞損傷評估模式。此外，也藉由 SLERA (Strength Life Equal Rank Assumption) 的概念配合機率統計方法與上述之評估模式，針對 Gr/PEEK 複材提出一套單一應力與多階段應力作用下疲勞壽命分佈之預估方法。經由實驗數據驗證的結果顯示，透過疲勞模數所建立的評估方法，能夠適切評估 Gr/PEEK 複材的疲勞壽命與疲勞損傷，對於單一與多階段疲勞應力作用下之疲勞壽命機率分佈也都有不錯的預估能力。

關鍵詞：機率分佈、疲勞模數、疲勞損傷、疲勞壽命、Gr/PEEK 複合材料

Abstract

To study the fatigue modulus degradation of a batch of Gr/PEEK laminates, some commonly used fatigue life prediction equations (FLPE) and fatigue damage models (FDM) are discussed and employed for the analysis in the present study. The appropriate FLPE and FDM are then established through the verification of experimental data. The strength life equal rank assumption (SLERA) is employed furthermore to predict the fatigue life distribution of the laminates based on the already known strength distribution. Both single-level and multi-level fatigue stresses are considered. It is

found through experimental verification that the proposed models can be used to predict the probabilistic fatigue life distribution reasonably well for both stress conditions.

Keywords: probability distribution, fatigue modulus, fatigue damage, fatigue life, Gr/PEEK composites

二、緣由與目的

由於在機械性質方面，複合材料具有高比強度 (specific strength)、高比勁度 (specific stiffness) 以及抗腐蝕、抗疲勞性佳等特性；在設計製造方面，又可以利用不同材料的疊合或纖維排列方向的改變，以因應設計需求作局部強化，以達到我們質輕且強度高的需求，所以近年來已被廣泛的運用於各種工業上，加上加工技術不斷的精進，使得複合材料應用範圍更是無遠弗屆。

複合材料在機械性質、疲勞特性等方面與傳統的金屬材料有著顯著的差異性，其中複合材料在受到應力反復作用時的疲勞行為十分複雜，諸多的機械性質都會隨著應力作用的循環週次而有所變化[1]；除了殘餘強度、殘餘勁度等由現象學觀點所提供的損傷指標外，在模數遞減(modulus degradation)方面，也有許多相關的文獻發表，其中，由疲勞模數(fatigue modulus)觀點出發所建立的壽命預估式[2-5]，對於單一階段與多階段應力作用下的疲勞壽命，

都能夠提供適切的預估。

另外，由於所有的複合材料都是異質的(heterogeneous)，且絕大部分為非等向性(anisotropic)，使得複合材料的異質程度遠較一般金屬材料嚴重許多，也因此造成複合材料的許多機械性質較之金屬材料呈現更大的變異性，所以應用機率與統計等隨機理論來輔助解釋複合材料的疲勞行為，遂成為一種合理且可行的作法。

在本研究中，我們首先透過疲勞模數(fatigue modulus)的概念，針對複合材料建立一套疲勞壽命與疲勞損傷評估模式；接著再藉由 SLERA(Strength Life Equal Rank Assumption)假設，建立評估單一與多階段應力作用下疲勞壽命之機率分佈方法；最後以本研究室針對 Gr/PEEK 複合材料所進行試驗之結果，將之加以驗證分析。

三、結果與討論

針對擬均向 $[0/45/90/-45]_{25}$ 順序疊層之石墨纖維強化聚醚醚酮(Gr/PEEK)複合材料積層板，基於疲勞模數所建立之疲勞壽命預估式與疲勞損傷評估式，不論對於其在單一疲勞應力作用下之疲勞壽命與多階段疲勞應力作用下之殘餘壽命都能有良好的預估結果。

3.1 單一與多階段應力作用下之疲勞壽命

由數組疲勞模數退化模式(Fatigue Modulus Degradation Model)所發展建立之疲勞壽命預估式中，利用本實驗室之疲勞試驗數據分別加以對照驗證，挑選出最適用之疲勞壽命預估式如下：

$$N = \exp\left[M(p^B - q^B)\right] \quad (1)$$

上式中， $M(= E_0^B / p^B A)$ 、 p 及 B 均為材料常數。當取得疲勞實驗數據之疲勞壽命 N 及所對應之應力等級 q (施加應力/平均靜態強度)後，便可利用非線性最小平方法求得式(1)中的參數 M 、 p 及 B ，進而預估其它應力等級下之疲勞壽命。

對於單一疲勞應力作用下材料試片之疲勞壽命，分別將五組疲勞應力等級與對

應之疲勞壽命預估值 實驗數據繪製於圖 1 之半對數 S-N 關係圖，並將實驗結果與預估結果列於表 1。其中實線為透過式(1)所繪得，實心原點為實驗數據點，而虛線部分則為傳統之線性半對數 S-N 曲線。由圖形與表中數據結果可知，疲勞壽命預估式所得到疲勞壽命的預估結果與實驗結果之趨勢相當吻合，也較傳統之線性半對數 S-N 曲線有更好的預估能力。

對於多階段疲勞應力作用下之殘餘壽命，由過去研究文獻中均可了解到應力施加順序對於殘餘壽命有不可忽視的影響，據此，利用疲勞模數在疲勞損傷累積過程之變化對於疲勞損傷加以定義，再將之以疲勞應力等級與施加循環週次等參數加以代換，以便於工程設計之計算分析。由數據知驗證結果，對於兩階段高-低應力與低-高應力、三階段應力分別定義了不同的疲勞損傷評估式如下：

兩階段高-低應力

$$D = \frac{V(n) - V_0}{V_f - V_0} = \frac{q}{p - q} \left[\frac{p}{\left(p^B - \frac{\ln(n)}{M}\right)^{\frac{1}{B}}} - 1 \right] \quad (2)$$

兩階段低-高應力與三階段應力

$$D = \frac{V(n)}{V_f} = q \left[\frac{1}{\left(p^B - \frac{\ln(n)}{M}\right)^{\frac{1}{B}}} \right] \quad (3)$$

上兩式中， n 為各階段應力作用之循環週次，其餘的參係數與式(1)相同。利用式(2)或式(3)配合疲勞累積損傷法則便可以預估各階段應力作用下之殘餘壽命。

上述之疲勞壽命預估式是對於實驗數據加以嵌合而得到預估式中的參數值，故藉由多次函數之疲勞壽命預估式能獲得精確的疲勞壽命預估結果並不意外，然而利用相同的參數值，代入基於疲勞模數堆導得到的疲勞損傷評估式中，再配合損傷累積法則，對於兩階段、三階段疲勞應力順序作用後之殘餘壽命，也都能得到相當令人滿意的結果，其實驗結果與預估結果列於表 2 中。

3.2 疲勞壽命與殘餘壽命之機率分佈

在疲勞壽命機率分佈方面，基於 SLERA 的假設，靜態強度與疲勞壽命間存在有某一比例關係，故在假設疲勞壽命分佈為 Weibull 分佈函數的條件下，利用 SLERA 的概念配合疲勞壽命預估式，即可藉由靜態拉伸強度之 Weibull 分佈預估得到疲勞壽命之分佈情形。表 3 中列出了疲勞壽命 Weibull 分佈尺寸因子 (scale parameter, s_N) 與形狀因子 (shape parameter, s_N) 之預估結果與實驗數據嵌合結果，在圖 2 的疲勞壽命累積分佈函數圖中，實心點為實驗數據而實線部分則為預估結果，由圖形顯示預估結果均能適切的吻合疲勞壽命分佈趨勢。

另外，將選定之疲勞壽命累積函數值 (CDF=10%、50%、90%)，繪製其疲勞壽命與應力等級關係圖為 P-S-N 曲線於圖 3，圖中實心圓點為實驗數據嵌合後所得到各應力等級、疲勞壽命與其累積分佈函數值之對應位置，而實線部分則為經由預估結果所繪製之曲線。由圖中可觀察出應力等級較低的部分其囊括範圍較小，意即其變異性較低，而隨著應力等級的增加，所包含範圍有擴張的趨勢，此一趨勢與實心圓點所代表之實驗值相吻合；再分析表 3 中預估獲得的 Weibull 分佈形狀因子，有隨著施加應力等級減低而增大的趨勢，亦符合材料疲勞壽命變異性隨應力等級降低而減低的實驗結果。

由於評估疲勞損傷模式的複雜與非線性度會造成多階段應力作用下殘餘壽命分佈預估的誤差，致使過度高估殘餘壽命分佈的變異性，所以我們將應用 Yang[1] 觀察應力負載歷史順序對疲勞壽命機率分佈與疲勞可靠度影響研究中的結論：「應力大小施加順序對於疲勞壽命分佈及疲勞可靠度並沒有太大的影響，而與最後施加應力等級大小的關聯性最大」，對於殘餘壽命分佈預估方法加以修正。據此，我們將沿用最後一個階段施加疲勞應力等級所對應疲勞壽命之累積分佈函數特性，即其 Weibull 分佈之形狀因子與尺寸因子，配合疲勞損傷評估式與疲勞累積損傷法則所計

算得到的等效週次、殘餘壽命，進而評估殘餘壽命之機率分佈。圖 4 為兩階段高-低應力殘餘壽命累積分佈圖，其中的實心圓點為實驗數據結果，虛線部分為未修正預估方法所得到的結果，可明顯觀察出預估結果的變異性過大，以致殘餘壽命隨 CDF 值小到大的範圍較分散，而修正後的預估結果則以實線表示，能夠相當吻合的貼近實驗結果，預估多階段應力下殘餘壽命分佈之趨勢。在其它的應力等級施加情況下，也都有類似的結果。

四、結論

透過疲勞模數概念所建立之疲勞壽命預估式與疲勞損傷評估式，對於擬均向之 Gr/PEEK 複合材料層板在單一或多階段應力作用下之疲勞壽命能提供適切的預估結果，有助於設計時之參考及基本機械性質之探討。

藉由 SLERA 的假設，可由已知的靜態強度分佈適切評估單一階段應力下疲勞壽命之分佈，直接求得 Weibull 分佈之參數也便於求得各應力等級下之可靠度與 P-S-N 曲線之繪製，亦提供設計時風險考量之評估參考。多階段應力作用下殘餘壽命之分佈結果，確也驗證了最終施加應力影響疲勞壽命分佈最巨之說法，亦有助於殘餘壽命機率分佈之參考。

五、計劃成果自評

本計畫大致完成如題目「Gr/PEEK 複材在變動負荷下之疲勞特性及可靠度研究」所稱之研究工作，較值得自我檢討之處或許在於子計畫與總計畫間之聯繫有待加強，而本計畫也較少涉及總計畫所稱之「修補」主題。

六、參考文獻

- [1] Yang, J.N. and Jones, D.L., AIAA Journal, "Effect of Load Sequence on the Statistical Fatigue of Composites,"

AIAA Journal, Vol. 18, No. 12, pp. 1525-1531, 1980.

- [2] Hwang, J.H. and Han, K.S., "Cumulative Damage Models and Multi-Stress Fatigue Life Prediction," *J. of Com. Mat.*, Vol. 20, pp. 125-153, 1986.
- [3] Hwang, W. and Han, K.S., "Fatigue of Composites - Fatigue Modulus Concept and Life Prediction," *J. of Com. Mat.*, Vol. 20, pp. 154-165, 1986.
- [4] Hwang, W., Lee, C.S., Park, H.C. and Han, K.S., "Single- and Multi-Stress Level Fatigue Life Prediction of Glass/Epoxy Composites," *J. of Adv. Mat.*, pp. 3-9, 1995.
- [5] Lee, C.S. and Hwang, W., "Fatigue Life Prediction of Matrix Dominated Polymer Composite Materials," *Poly. Com.*, Vol. 21, No. 5, pp. 798-805, 2000.

表 1 單一應力作用下之疲勞壽命預估比較

應力等級	0.88	0.85	0.82	0.79	0.76	平均誤差
EXP.	2388	10918	30084	69404	210156	
S-N	2494	7280	21254	62052	181162	18.30%
預估式	2535	9496	29998	81287	191947	9.05%
預估式參數：p=1.0006 M=15.7947 B=4.9136						

表 2 多階段應力作用下之疲勞壽命預估比較

	實驗平均值	預估值	等效週次
85%-79%	51107	51033	$n_{12}=18371$
85%-82%	24491	23410	$n_{12}=6674$
79%-85%	11463	10146	$n_{12}=754$
79%-82%	26723	26493	$n_{12}=3591$
85%-79%-82%	16646	16113	$n_{23}=13971$
79%-85%-82%	22613	18862	$n_{23}=11222$

表 3 疲勞壽命 Weibull 分佈參數

應力等級 q	88%	85%	82%	79%	76%	
EXP.	n_N	2755	11791	34895	79313	240380
	S_N	1.17	1.84	1.79	2.4	2.06
預估值	n_N	3548	12609	38047	99080	226076
	S_N	0.86	1.02	1.22	1.46	1.77

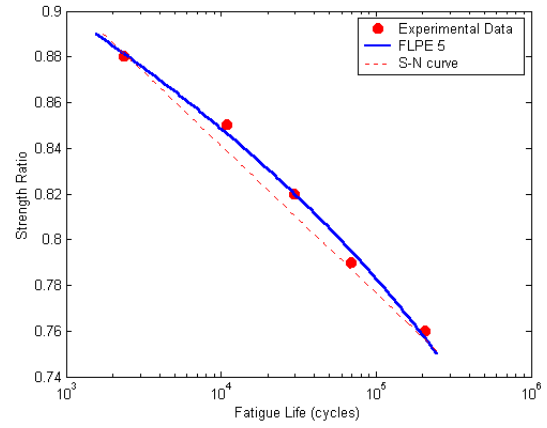


圖 1 單一應力作用下之疲勞壽命半對數圖

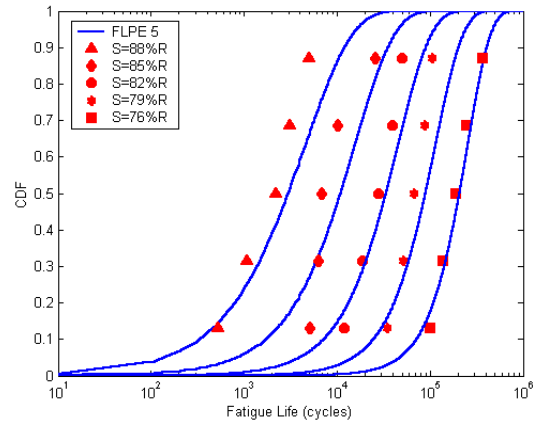


圖 2 疲勞壽命累積分佈圖

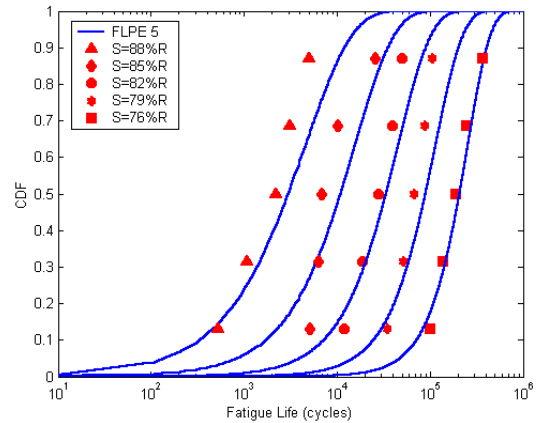


圖 3 P-S-N 曲線圖

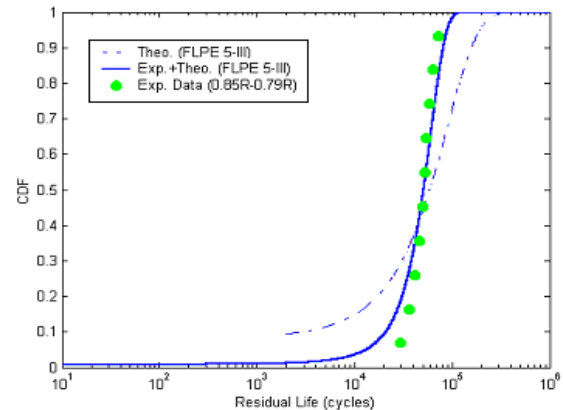


圖 4 兩階段高-低應力下殘餘壽命累積分佈圖