

行政院國家科學委員會

熱塑性及熱固性複合材料組件疲勞與破壞之分析與評估 ():

熱塑性及熱固性複合材料受溫度循環及衝擊後之疲勞破壞機制探討與壽命分析

計畫編號：NSC 87 - 2212 - E - 002 - 020

執行期限：86年8月1日至87年7月31日

主持人：單秋成 國立台灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本研究乃針對熱固性之碳纖維強化環氧樹脂(Gr/Epoxy)及熱塑性之碳纖維強化聚二醚酮(Gr/PEEK)複合材料在不同溫度、經歷不同溫度循環、衝擊等作用下，量測其拉伸及疲勞之性質，並藉由對破壞試片的外觀及顯微觀察，進一步探討其損傷機制的發展。

觀察發現環氧樹脂基材對衝擊極為敏感；而聚二醚酮基材則極易受溫度變化之影響。此兩種經碳纖維強化之複材在各種不同之溫度變化及外力衝擊之作用下，所展現出不同之破壞行為，造成其拉伸強度及疲勞壽命之差異，皆與上述基材特性有相當大的關係。

關鍵詞：碳纖維強化環氧樹脂(Gr/Epoxy)、碳纖維強化聚二醚酮(Gr/PEEK)、溫度循環、衝擊、疲勞破壞、拉伸破壞

Abstract

This work investigated the tensile and fatigue behavior of Gr/Epoxy and Gr/PEEK composites under different temperatures, after different thermal cycling and low energy impact damages. The differences in behavior were traced to the variation in damage mechanisms

in the two composites.

2. 研究動機

高分子基複合材料由於具備比强度高、比模數優之特性，因此使用日益廣泛。⁽¹⁻⁸⁾

在實際應用中，材料常會受到不同環境溫度、溫度循環、外力的撞擊等作用；以致機械性質可能發生劣化，本文特針對常用熱塑性與熱固性高分子複合材料各一種，探討其在經過各種不同溫度循環及衝擊的交互作用下，其拉伸強度及疲勞壽命之變化，並試圖從其破壞機制之發展，解釋其性質的差異。

三、實驗材料及方法

Gr/Epoxy 使用日本東麗公司(Toray)所生產的單向碳纖維強化環氧樹脂預浸材壓製。Gr/PEEK 則使用英國ICI公司生產之APC-2單向碳纖維強化聚二醚酮預浸材壓製。實驗用擬均向性積層板採[0/45/90/-45]_{2s}的順序積疊16層。Gr/Epoxy積層板製作係採用壓力釜模壓法；Gr/PEEK積層板則因所需溫度與壓力皆較高，故採用熱壓機製造。

拉伸實驗依ASTM-D3039規範，利用MTS 810來進行試驗。疲勞實驗則依ASTM-D3479-76，拉伸-拉伸疲勞循環測試之

規範,不同溫度環境以架在試驗機上的溫控箱模擬。低能量衝擊破壞則使用Dynatup Mini-Tower低能量落錘衝擊試驗機模擬。溫度循環實驗分為熱循環與熱衝擊兩種。熱循環實驗其溫度範圍從50 ~200 ,循環次數為500次 (X循環)熱衝擊實驗在Gr/Epoxy中,其溫度範圍分為-196 ~200 100次 (Y循環), -196 ~30 100次 (Z循環)兩種;在Gr/PEEK中,其溫度範圍則僅有-196 ~200 100次 (Y循環)一種循環。

破壞後之試片使用肉眼、光學顯微鏡(O.M.)及掃描式電子顯微鏡(SEM)進行巨觀及微觀破壞機制之觀測。

有關試片之編號,基本以三碼表示,第一碼表示材料, E 代表 Gr/Epoxy, P 代表 Gr/PEEK. 第二碼表示環境狀況,其中 X, Y, Z 代表不同熱循環如上所述, C, R, H 分別代表-50 ,室溫及 120 ; 第三碼 T, F 分別代表拉伸及疲勞。

四、結果與討論

4.1 拉伸測試之破壞

4.1.1 Gr/PEEK 與 Gr/Epoxy 複材拉伸破壞機制之差異

自宏觀而言, Gr/Epoxy 較 Gr/PEEK 複材易產生脫層。SEM 觀察顯示在 Gr/Epoxy 試片之斷裂面基材偏向脆性破壞, 基材上有明顯的纖維印痕殘留, 顯示 Gr/Epoxy 複材在產生脫層前即已先發生纖維與基材間之脫鍵。在 Gr/PEEK 試片之斷裂面, 可發現纖維間殘留之基材有被扯離而造成之塑性延伸現象。

由上述觀察推測 Gr/Epoxy 在室溫拉伸之破壞機制發展是由基材與纖維間之

脫鍵造成微裂痕, 並由此破壞之連結而造成較大範圍之層間脫層, 進而分裂為許多單層, 最後因單層承受拉伸應力之能力較弱, 而於較低應力時即斷裂。Gr/PEEK 中則基材與纖維的鍵結力較強, 其斷裂部份多未發生脫層嚴重擴展之情形。其破壞主要為 90° 層先產生脫鍵, 接著在 0° 纖維較弱處發生斷裂, 進而引起周圍之纖維及基材斷裂。

4.1.2 溫度對拉伸性質之影響

Gr/Epoxy 及 Gr/PEEK 複材之拉伸強度均在低溫時有較高之拉伸強度, 在高溫時拉伸強度降低, 如圖一、二所示。Gr/Epoxy 在-50 測試時, 脫層現象明顯減緩許多, 此可能是因基材在低溫時呈現強度較高之玻璃態, 較不易造成脫層。Gr/PEEK 在-50 時脫層同有減緩之現象, 在 180 脫層現象則較室溫時嚴重, 此可能是基材受熱軟化使鍵結力減弱所致。

4.1.3 溫度循環對拉伸性質之影響

圖三、四顯示熱循環造成複材拉伸強度之降低。但熱衝擊則無此現象。此點可能是前者週次較多。熱衝擊或熱循環對複材會造成破壞之主因為基材與纖維之熱膨脹比率之差異, 以致造成材料之脫鍵及微裂縫。

SEM 之觀察發現不論 Gr/Epoxy 或 Gr/PEEK 複材在受到熱衝擊或熱循環後均會產生類似脫鍵之微小破壞, 但嚴重程度與拉伸強度並無特定關係。

4.1.4 衝擊對拉伸強度之影響

Gr/Epoxy 對衝擊極為敏感, 複材受衝擊後之拉伸強度明顯降低。衝擊所造成之破壞主要為層內脫鍵、纖維斷裂

與層間脫層。Gr/PEEK 對衝擊破壞並不敏感。

4.2 疲勞測試之破壞

4.2.1 疲勞破壞機制之差異

Gr/Epoxy 複材之疲勞破壞機制以脫層為主，而在 Gr/PEEK 試片中，其脫層較不明顯。除了脫層擴展程度之差異外，在 Gr/Epoxy 之試片中，疲勞測試試片斷裂面與拉伸測試亦有明顯不同，在拉伸測試中，斷裂面多呈現扯裂之現象，會有單層扯離、纖維脫鍵、破斷面雜亂之現象；在疲勞測試中，則為脫層明顯，但各層之斷裂面平整，幾無纖維斷裂、單層扯離之現象。此外，Gr/Epoxy 之疲勞破壞可分為兩個主要步驟；首先為因內部纖維與基材間脫鍵進而造成第三、四層(90°、-45°層)之層間脫層，此在低循環次數時即可發現；其次為第六、七層(45°、90°層)之層間脫層，其發展較前一機制為慢。

4.2.2 溫度對疲勞性質之影響

圖五、六為不同溫度下兩種材料的 S-N 曲線；低溫時均有較高之疲勞壽命，而高溫時之疲勞壽命則降低。此現象與拉伸強度跟溫度之關係相同，其解釋也相同。就同一疲勞應力而言，Gr/Epoxy 複材之疲勞壽命比 Gr/PEEK 要低。

宏觀觀察顯示 Gr/PEEK 在低應力等級時，室溫及高溫之試片有明顯脫鍵、脫層、纖維扯離之現象。SEM 觀察發現低溫時 Gr/PEEK 試片斷裂面上的基材殘存有明顯之纖維印痕，此印證了基材在低溫下處於較堅硬之脆性狀態，且其破壞機制以脫鍵、脫層為主；在

高溫下則可發現基材在呈現延伸(drawing)、扯離之現象；於高溫低應力等級時，斷裂端之纖維可看到片狀之塑性基材殘留，顯示基材軟化，而此時之破壞機制非以脫鍵為主，而是基材之延展性破壞，試片之破壞先由基材之延伸進而造成試片之脫層扯離。在 Gr/Epoxy 複材中，其破壞機制為先產生脫鍵進而造成層間脫層，最後導致斷裂。

4.2.3 溫度循環對疲勞性質之影響

前述 SEM 之觀察發現不論 Gr/Epoxy 或 Gr/PEEK 複材在受到熱衝擊或熱循環後均會產生類似脫鍵之微小破壞，但嚴重程度有所不同。承受疲勞應力之往復作用下，微小脫鍵逐漸擴展，進而造成纖維與基材間之脫鍵及層間脫層。Gr/Epoxy 不論受到熱衝擊或熱循環均會造成疲勞壽命之降低，如圖七所示，其中熱循環所造成之疲勞壽命衰減較熱衝擊嚴重。

Gr/PEEK 受熱衝擊後壽命略微降低；受熱循環後壽命卻有升高之趨勢(圖八)。可能是熱衝擊對 Gr/PEEK 雖造成微脫鍵，但因其基材為塑性，故脫鍵之擴展不若在 Gr/Epoxy 中容易，因此較不易產生脫層破壞，但基材易從裂縫處產生延伸，造成疲勞壽命降低。在熱循環中，較多週次之小幅度溫度變化造成基材之性質改變，使材料韌性增強，導致疲勞壽命增長。

五、結論

5.1 Gr/Epoxy 之破壞機制

Gr/Epoxy 基材屬脆性，故複材極易發生脫鍵、脫層之損傷，其破壞機制主要以層內脫鍵、層間脫層為主。拉伸

試驗中脫層主要集中在斷裂處，其脫層並無擴展之現象。另一方面 Gr/Epoxy 對衝擊極為敏感，複材受衝擊後之拉伸強度明顯降低。衝擊所造成之破壞主要為層內脫鍵、纖維斷裂與層間脫層。在疲勞測試下有明顯之脫層擴展，進而造成試片之斷裂。但於高疲勞應力時脫層較低疲勞應力時為低，溫度對 Gr/Epoxy 疲勞壽命之影響並不明顯。受衝擊後再進行疲勞測試則並無脫層擴展現象，此時之破壞主要為衝擊後產生纖維斷裂、脫鍵及層間脫層，而試片易於纖維斷裂處產生整片斷裂。

5.2 Gr/PEEK 之破壞機制

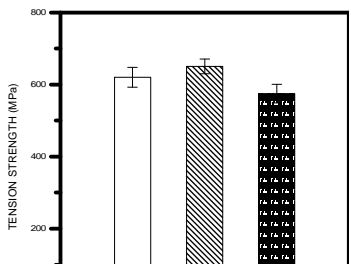
Gr/PEEK 基材屬塑性，對溫度之敏感性較高；其破壞機制主要為纖維之斷裂引起基材開裂，進而造成試片斷裂為主，較不易發生脫鍵、脫層之損傷。在高溫下之拉伸強度明顯降低，此乃因基材受熱軟化，致鍵結力減弱，此時之破壞機制會有脫層之產生；低溫時之拉伸強度較高，此因基材在低溫下為強度較高之玻璃態，此時之破壞無脫層現象。熱循環對 Gr/PEEK 複材會造成微小之脫層破壞，熱衝擊則影響較小。疲勞應力下破壞仍以纖維之斷裂為主，脫層之現象不如 Gr/Epoxy 之嚴重，但基材對疲勞壽命之影響明顯較 Gr/Epoxy 複材來的高。在高溫下會出現脫層之現象；低溫時則無脫層之發生。受衝擊後再疲勞雖有輕微之脫層，但不明顯。由疲勞測試中發現，Gr/PEEK 複材受熱循環後之疲勞壽命明顯提高，甚至能彌補衝擊所造成之損傷，此係因熱循環對基材之性質造成改變，使其韌性增強。

六、參考文獻

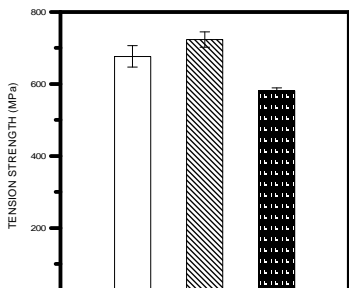
1. R. B. Ostrom, S. B. Kock and D. L. Wirz-Safranek, SAMPE Quarterly, pp.39-45, 1989.
2. B. C. Hoskin and A. A. Baker, American Institute of Aeronautics and Astronautics, INC., New York, U.S.A., 1986.
3. E. M. Silverman, R. A. Griese and W. C. Forbes, SAMPE Journal, Vol 25, No. 6, pp. 38-47, 1989.
4. H. B. Dexter, Tough Composite Materials Workshop, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, pp.447, 1983.
5. Jovan Mijoric, Thomas C. Gsell, SAMPE Quarterly, Vol. 21, No. 2, pp. 42-46, January, 1990.
6. M. M. Ratwani, SAMPE Quarterly, Vol. 17, No. 2, pp. 19-24, January, 1986.
7. H. D. Stenzenberger, Composite Structures, 24, pp. 219-231, 1993.
8. Y. Matsuhisa and J. E. King, 9th International Conference, ICCM, Vol. 5, pp. 145-152, 1993.

7. 計劃成果自我評估

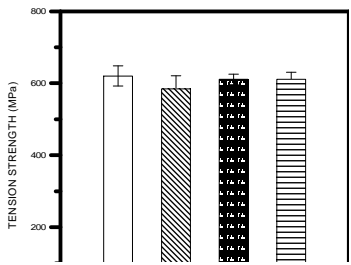
本研究之工作與計劃相符，並基本達成原定目標，因本項工作的性質屬基礎研究，其成果在學術上具有一定價值，至於應用價值，則有待進一步研究，目前對工程應用方面僅具有一般性之參考價值。



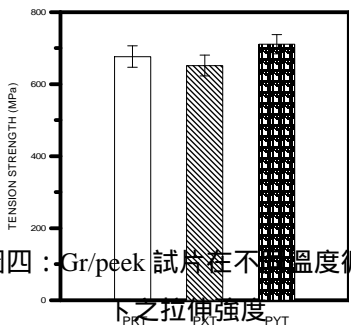
圖一：Gr/epoxy 試片不同溫度下之拉伸強度



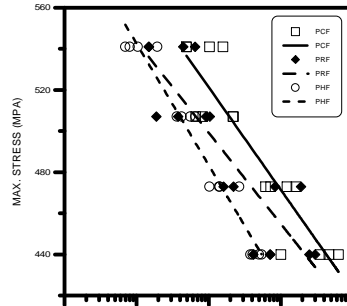
圖二：Gr/peek 試片不同溫度下之拉伸強度



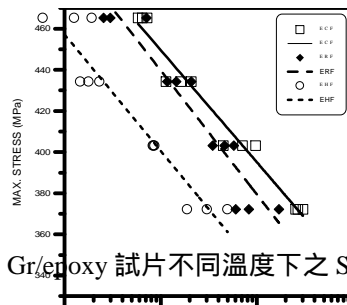
圖三：Gr/epoxy 試片在不同溫度循環下之拉伸強度



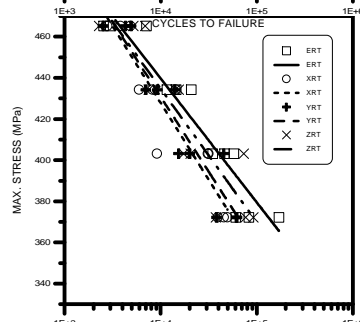
圖四：Gr/peek 試片在不同溫度循環下之拉伸強度



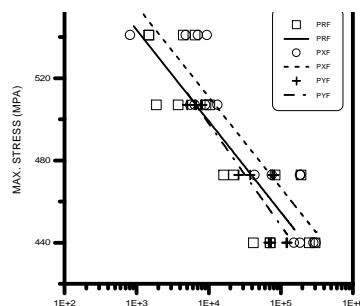
圖五：Gr/peek 試片不同溫度下之 S-N 曲線



圖六：Gr/epoxy 試片不同溫度下之 S-N 曲線



圖七：Gr/epoxy 試片在溫度循環後疲勞測試之 S-N 曲線



圖八：Gr/peek 試片在溫度循環後疲勞測試之 S-N 曲線