

混成疊層板之成形極限與模擬分析

Forming Limit Diagram of Fiber Metal Laminate and Simulation Analysis

李宥樂、陳彥儒
Li, Yu-Le; Chen, Yen-Ju

摘 要

混成疊層板可克服分別單獨使用各種材料的缺點。由於混成疊層板具輕量化、高性能(耐用/強度)、可加工等特性，在汽車、船舶、航空和土木工程行業受到越來越多的關注。然而對於此材料之成形條件，國內業者多以嘗試錯誤法(Try and error)進行，導致耗時耗能等問題。

成形極限試驗在產品設計與製程規劃過程可先透過模擬比對應變數值，推測製程中材料是否產生缺陷。本研究依循 ISO-12004-2 規範製作等比例縮小試片，並依循 ASTM E2218(2015)測試規範進行試驗。並將測試後之成形極限曲線配合模擬分析進行比對，此技術未來在開發混成疊層板相關產品時可先行評估再投入打樣，減少開發成本以及開發時程。

Abstract

Hybrid laminates can overcome the disadvantages of using each material separately. Due to its lightweight, high performance (durability/strength), and processability properties, hybrid laminates have received increasing attention in the automotive, marine, aerospace and civil engineering industries. However, for the forming conditions of this material, domestic manufacturers mostly use the try and error method, which leads to problems such as time-consuming and energy-consuming.

In the process of product design and process planning, the forming limit test can first compare the strain values through simulation, and infer whether there are defects in the material during the process. This study follows the ISO-12004-2 specification to make equal-scale test pieces and follow ASTM E2218 (2015) Test specifications to test. The forming limit curve after the test is compared with the simulation analysis. In the future, when developing products related to hybrid laminates, this technology can be evaluated first and then put into proofing, reducing development costs and development time.

一、前 言

隨著全球能源議題和行動載具結構減重的要求逐步提升，輕量化材料和輕量化結構受到越來越多的應用與重視，在過去的幾十年裡，金屬與複合材料混成疊層板(Hybrid laminates)作為結構部件的輕量化材料引起了眾多學者相當大的興趣。通常混成疊層板由兩層金屬板作為表層，複合材料作為中間芯層，使用熱壓製程將三層材料壓合在一起。與單一金

屬板材相比，混成疊層板具有更低的密度、更高的比抗彎剛性、更好的阻尼特性[1, 2]。

由於這些優點，混成疊層板在航空、海洋、汽車和土木工程中的應用越來越多。最早開發的混成疊層板多用於飛機蒙皮，以及運輸產業，為了減輕運輸工具整車重量，混成疊層板被用於製造一些部件，如儀表板、車體內構件等[3]。雖然混成疊層板具有諸多優點，但由於複合材料和金屬板材的力學性能和規格差異極大，這些材料的成形方式非常複

雜。混成疊層板在成形過程中與金屬板材的過程有很大不同。

外層金屬板和芯層複合材料之間的界面對混成疊層板的變形有很大影響[4]。此外，外層金屬板和芯層複合材料之間會發生滑動和剪切，因此影響混成疊層板的成形性。因此在研究其成形性對於提高混成疊層板的應用具有重要意義。

2003 年有學者提出[5]測量混成疊層板成形極限曲線圖(FLD)，透過實驗改進了 M-K 理論的 FLD。

2007 年有學者研究[6]溫度對混成疊層板成形的影響，發現溫度對材料機械性質的影響很大，但須定義其破壞標準。

2013 年有學者[7]進行了混成板的成形極限試驗，並與模擬分析作比對，並對其界面剪切與界面剝離性質做測試，發現其界面性質會影響其成形性。

在眾多試驗裡其中成形極限(FLD)是分析板材成形性最常用的方式之一，它代表了關於板材成形極限以及材料流動與應變路徑的表現。

經由以上文獻可得知混成疊層板在成形方面具有相當複雜的變化，為了改善過去嘗試錯誤法，以及成形模擬準確度不足等情況，本研究進行混成疊層板之成形極限試驗，可藉由實驗數據更加了解混

成疊層板成形特性，以及提升混成疊層板模擬成形準確度，提升國內業者在混成疊層板之產品應用以及節省開發成本。

二、混成疊層板成形極限試片製作與試驗模具製作

此次試驗使用之混成疊層板為 3 層板(上、下兩層厚度均為 0.3mm 之 AA5052 鋁合金、中間芯層厚度為 0.4mm 之玻纖複材、總厚度 1.0mm)，由於測試量較大，混成疊層板製作流程較複雜，因此試片將等比例縮小。

1.混成疊層板成形極限試片

參考測試規範及國際文獻制定可成形性試驗參數數值及變動範圍，試驗材料設計共 7 種裁邊(7 種應變路徑)；試片設計依循 ISO-12004-2 等比例縮小、測試溫度為常溫、140°C、170°C、210°C，應變速率 2.0mm/s，試片設計與試驗參數如圖 2 及表 1 所示，加工完成後試片如圖 3 所示。

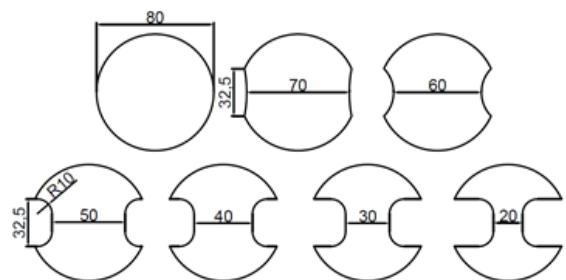


圖 2 成形極限試驗試片設計圖

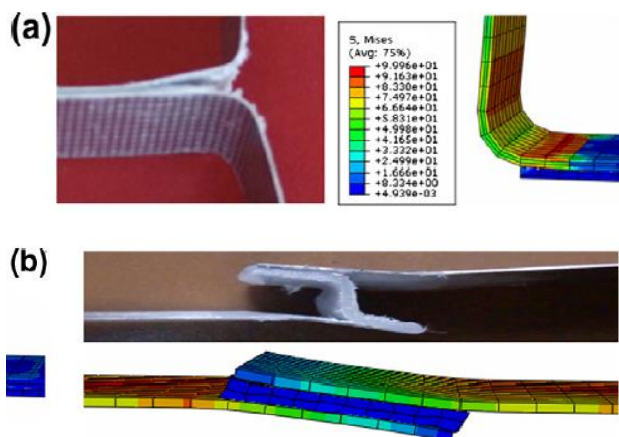


圖 1 疊層混成板(a)T 型剝離試驗和(b)單搭接剪切試驗的試樣和 FEA 網格[10]



圖 3 混成疊層板成形極限試驗試片

表 1 成形極限試驗參數

材料	參數	測試速率	測試溫度
混成板 (1.0mm)		2.0mm/s	常溫、140°C、 170°C、210°C

2. 成形極限試驗試片網格製作

以往網格製作大多使用電化學蝕刻方式進行，但國內近年來進行此研究越趨減少，製作網格之電化學蝕刻儀器與網板較難尋找，因此後來採取雷射雕刻方式進行網格製作；由於鋁合金板材表面容易造成雷射反射，導致無法雕刻，因此使用黑色耐熱噴漆噴覆於混成疊層板表面上，並確認雕刻後網格角點可清楚辨認，以利試驗前後應變量測。

使用 35W 之 CO₂ 雷射進行雕刻，雕刻速度 15mm/sec，設計之網格尺寸間隔為 1mm 之正方形，完成雕刻之實際網格大小為 1mm，線寬 0.35mm，完成後試片與網格如圖 4、圖 5 所示。

3. 成形極限試驗模具設計與製作

混成疊層板之高溫成形性試驗模具設計採用 ASTM E2218(2015)規範，依等比例縮小試片設計沖頭，直徑 50mm，模具整體設置有沖頭鎖附、壓料塊、下模以及支撐塊，並具有加熱孔可提供加熱棒加熱模具維持材料溫度進行高溫成形極限試驗，模具設計如圖 6 所示，組裝後作動測試無異常，模具組立如圖 7 所示。

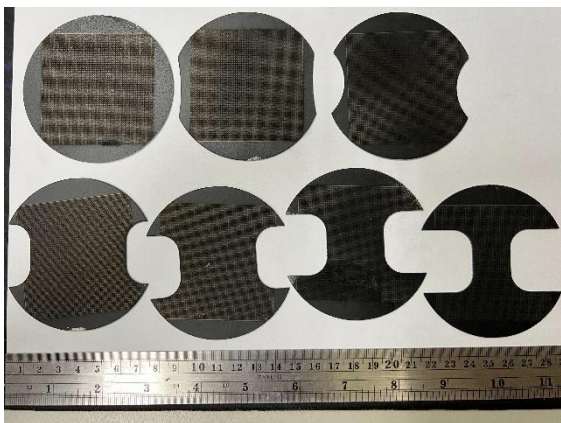


圖 4 網格製作完成之成形極限試驗試片

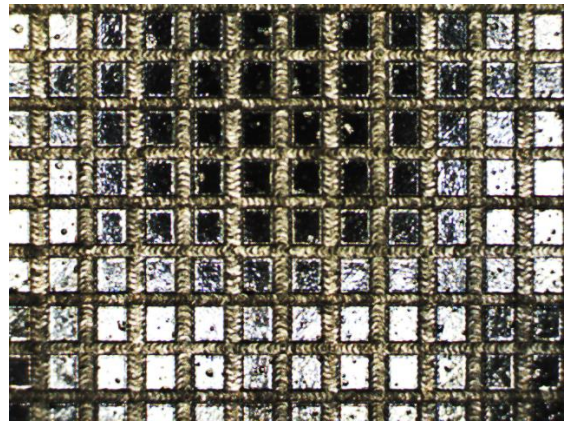


圖 5 成形極限分析試片網格尺寸細部圖

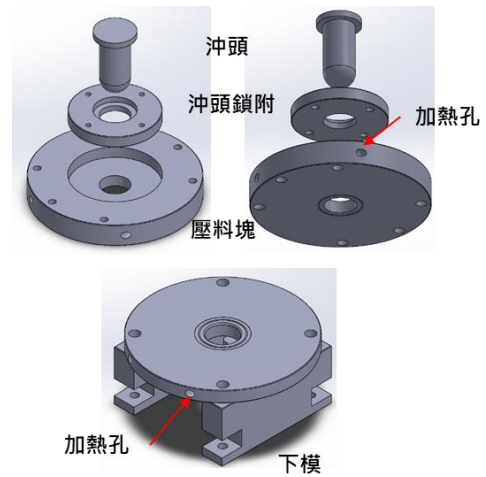


圖 6 成形極限試驗模具設計

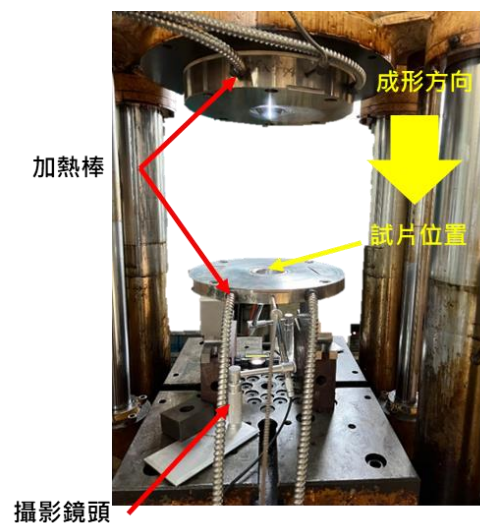


圖 7 成形極限試驗模具組裝作動測試

三、成形極限試驗與成形極限圖

1. 成形極限試驗

混成疊層板之成形極限試驗共製作 7 種裁邊試片(7 種應變路徑)，每種試片各重複 3 次。試驗後試片外觀如圖 8 所示；混成疊層板材在常溫下成形性雖不佳，但試片破裂位置符合 ASTM E2218 規定，所量測到的應變數據具參考性，試驗過程中利用兩隻鏡頭即時攝影兩個角度拍攝試驗中成形前後網格，紀錄空間中網格變化，後續再進行 3D 網格校正如圖 9 所示。



圖 8 混成疊層板材成形極限試片試驗後破裂圖

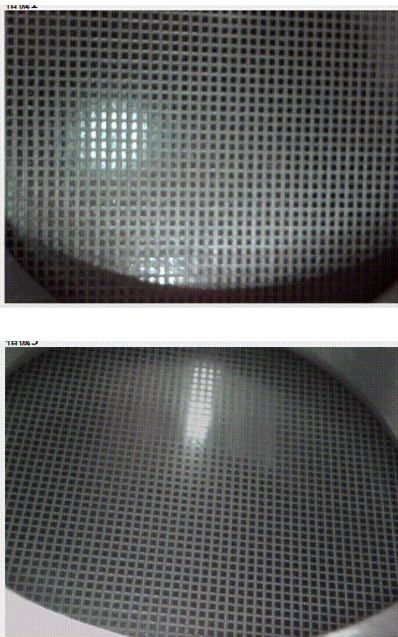


圖 9 成形性試驗記錄網格變化

2. 混成疊層板成形極限圖

混成板之成形試驗由常溫至 210°C，其成形極限曲線逐漸提高，符合加熱後成形性能提升趨勢，但在 140°C 之前成形性較差，常溫與 140°C 之間提升幅度較小，推估原因為樹脂在玻璃轉化溫度附近流動性較差，當超過 140°C 後成形性有明顯提升。各溫度之成形極限圖如圖 10 所示。

比較鋁合金與混成板各溫度成形極限曲線發現，在常溫與 140°C 混成板材並未因板厚增加而提高成形極限，與鋁合金相比不論在雙軸拉伸區、平面應變區及拉伸-壓縮區的極限主應變與次應變數值相差不遠，判斷其原因可能為雖然混成板材有較優良之機械性能，但在成形時由於金屬與纖維複材材料流動方式不同導致。

3. 模擬數據與成形極限圖分析

完成以上混成疊層板常溫至高溫之成形極限試驗後，取得成形極限圖，在模擬分析中可藉由成形極限圖判別製程過程中混成疊層板材是否會產生皺摺或破裂，圖 11 為模擬分析混成疊層板熱成形後皺褶與破壞情形，可發現與實驗數據比對其安全區域與皺褶區域與實驗數據吻合，對於未來進行混成疊層板之成形製程開發有很大的幫助。

四、結 論

混成疊層板由金屬板和複合材料所組成，利用了複合材料的高比強度和剛度特性和抗疲勞性，以及金屬的韌性，與單一金屬板相比，混成疊層板具有出色的抗衝擊性。

本次混成疊層板之常溫至高溫成形極限試驗，高溫成形性試驗對板料溫度掌控容易受到環境熱傳及模具熱傳條件變動影響，慣用的熱顯像儀或紅外線測溫槍量測準確度不足，容易造成實驗條件及結果誤判；進行實驗時需確認板料在加熱爐中溫度、轉移至模具上時的板料溫度，以及成形時溫度是否與實驗規劃條件相符，因此利用熱電偶以接觸方式即時量測板料溫度，並確認板料放置加熱爐須持溫時間、轉移至模具上時的板料溫度，並校正加熱系統感測點溫度以使模具溫度及板料溫度符合實驗規

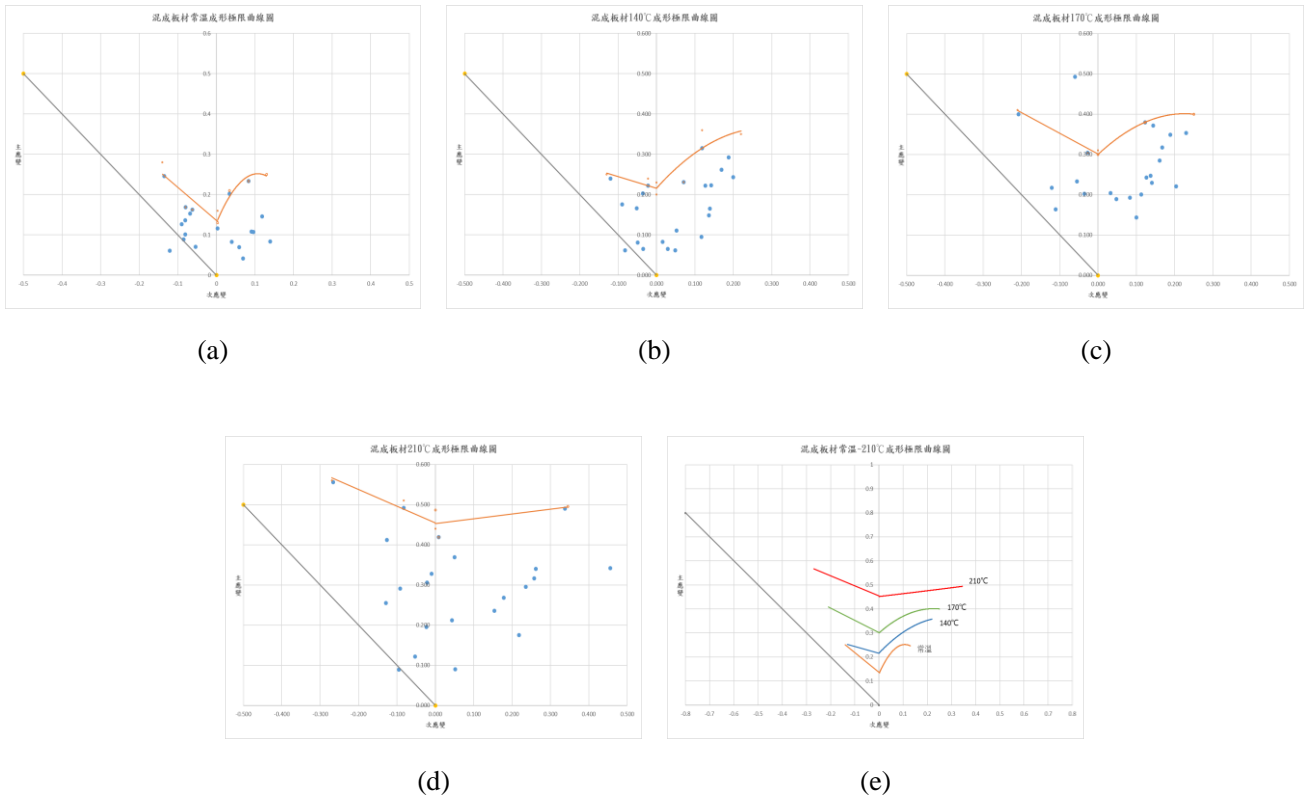


圖 10 混成疊層板成形極限曲線(a)25°C，(b)140°C，(c)170°C，(d)210°C，(e)比較圖

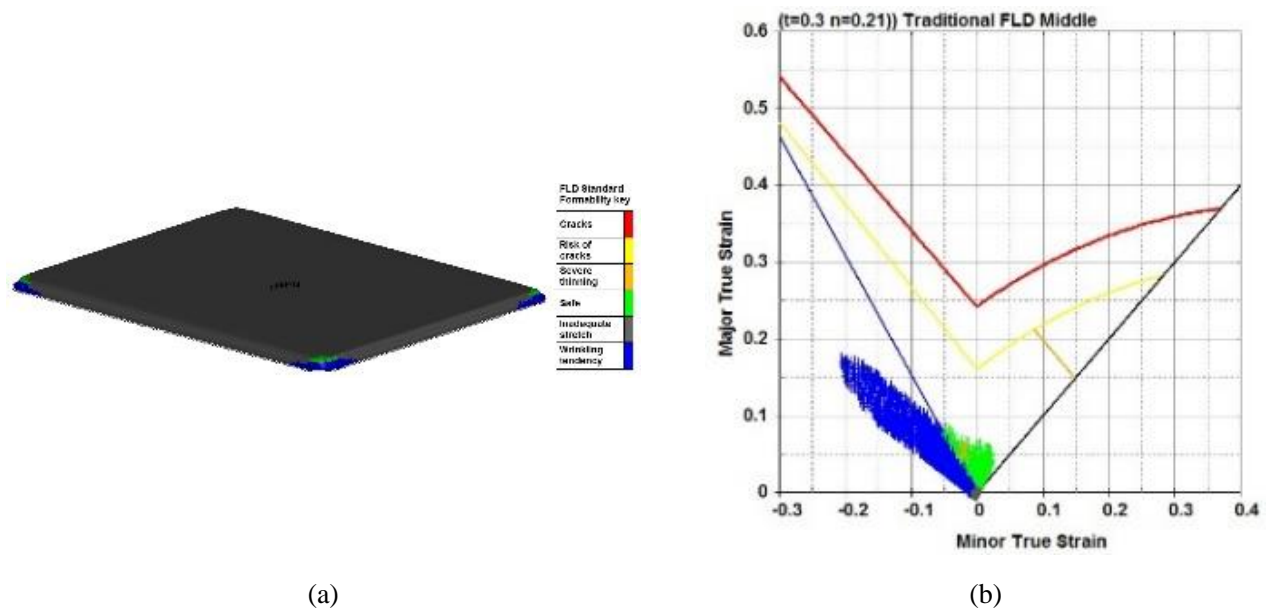


圖 11 模擬分析與混成疊層板成形極限試驗比對(a)板料皺褶區與轉角安全，(b)皺褶區與安全趨勢顯示於成形極限圖

劃條件，再進行板料成形性測定；過程中使用兩隻攝影鏡頭即時監測網格之應變變化。

試片網格製作部分使用 35W 之 CO₂ 雷射進行雕刻，完成雕刻之實際網格大小為 1mm，線寬 0.35mm；完成試驗後使用立體顯微鏡進行量測，並完成混成疊層板之成形極限圖。

後續模擬分析做比對，發現與實驗數據比對其安全區域與皺褶區域與實驗數據吻合，將數據輸入模擬資料庫可提升往後混成疊層板製程模擬準確度。

本研究所件立之混成疊層板成形極限數據，可在產品開發過程可更準確評估材料在不同溫度、不同受力條件下是否能夠順利完成成形而不產生皺摺、破裂等問題，並提升對於回彈量及成品尺寸的評估準確度，確認製程參數與產品設計是否正確。

五、參考文獻

- [1] Miller WK. Metal-plastic laminates for vehicle weight reduction. In: SAE international congress. SAE paper no. 800077, Detroit; 1980.
- [2] DiCello JA. Steel-polypropylene-steel laminate – a new weight reduction material. In: SAE international congress. SAE paper no. 800078, Detroit; 1980.
- [3] Yao H, Chen CC, Liu SD, Li KP, Du C, Zhang L. Laminated steel forming modeling techniques and experimental verifications. In: SAE international congress. SAE paper no. 2003-01-0689, Detroit; 2003.
- [4] Makinouchi A, Yoshida S, Ogawa H. Finite element simulation of bending process of steel-plastic laminate sheets. J JSTP 1988; 29: 755–60.
- [5] Compston P, Cantwell WJ, Cardew-Hall MJ, Kalyanasundaram S, Mosse L. Comparison of surface strain for stamp formed aluminum and an aluminum-polypropylene laminate. J Mater Sci 2004; 39: 6087–8.
- [6] Weiss M, Dingle ME, Rolfe BF, Hodgson PD. The influence of temperature on the forming behavior of metal/polymer laminates in sheet metal forming. Trans ASME J Eng Mater Technol 2007; 129: 530–7.
- [7] Jianguang Liu, Wei Liu, Wei Xue. Forming limit diagram prediction of AA5052/polyethylene/AA5052 sandwich sheets, Materials & Design Volume 46, April 2013, Pages 112-120.