

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## FRP 船殼 SCRIMP 技術之數值模擬解析

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2611-E-002-016-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：國立臺灣大學工程科學及海洋工程學系暨研究所

計畫主持人：陳重盛

共同主持人：李雅榮，徐堯

計畫參與人員：吳金翰，陳凱琳

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 1 月 14 日

# FRP 船殼 SCRIMP 技術之數值模擬解析

Study on Numerical Analysis of SCRIMP Technique Used in FRP Ship Hull

計畫編號：NSC 91-2611-E-002-016

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 年 7 月 31 日

主持人：陳重盛 台灣大學工程科學及海洋工程學系副教授

計畫參與人員：李雅榮 台灣大學工程科學及海洋工程學系教授

徐 堯 開南管理學院通識教育中心助理教授

吳金翰 台灣大學工程科學及海洋工程學系碩士班研究生

陳凱琳 台灣大學工程科學及海洋工程學系碩士班研究生

## 一、中英文摘要

本文主要探討 SCRIMP (Seemann's Composite Resin Infusion Molding Process) 技術中樹脂的流動特性，觀察不同積層組合下(純 Mat、純 Roving 與 M、R 交互疊層)的灌注試驗並計算滲透率，將各條件參數(孔隙率、纖維疊層厚度等)輸入 RTM-Worx 軟體，比較模擬分析與灌注試驗，其結果相當吻合。藉此分析程式幫助在電腦中模擬以 SCRIMP 方式灌注實船船殼，推測樹脂流動的波前分佈與所需時間，作為灌注前的重要參考。

在不同纖維疊層下，有效預估樹脂流動的特性將節省不少時間與金錢，藉由程式模擬將可掌握灌注時可能會發生的狀況並加以改善，有效提升 SCRIMP 技術的效能與競爭力。

關鍵詞：複合材料樹脂注入成型法、滲透率、纖維含有率

The purpose of this study is to understand the flowing characteristic of the resin in SCRIMP technology. First, find out the parameters (including porosity, thickness, etc.) which RTM-Worx needs. Then calculate the permeability by observing the shape of flow front. Comparing the result under experimental investigation and numerical simulation, it is found they match each other well. Under the simulation method, the ship hull injection could pre-work in calculator. We also could know the distribution of resin flow front with its corresponding time. It will help the engineer for reference before working.

The effective method of predicting the flowing characteristic of resin under

different arrangement will save time and money comparatively and can solve some problems occurred in the manufacture process. By this method, we can improve the efficiency and competitiveness of the SCRIMP technology.

Keywords: SCRIMP, Permeability, Fiber Content.

## 二、計畫緣起及目的

近年來 SCRIMP 施工法廣泛應用於造船產業，其技術係以真空將樹脂引入已排列之纖維，並於離模布之上方放置一擴散毯以增加樹脂於纖維之流動，而非 RTM 以施加正壓力的方式將樹脂注入纖維。因此，SCRIMP 只需製作單片模具，非常適合大型構件的製作，可降低製作成本。但影響此種方法最後產出產品性能好壞的參數相當的多，舉凡樹脂流動、樹脂硬化時間、纖維滲透率、氣泡含量等，卻因為國內投入此主題研究的機關單位有限，未能針對以上問題進行系統性的探討。另外，國內小型造船廠及遊艇工廠，對於複合材料船殼的製作，目前已有不少採用 SCRIMP 法之先進技術。不過其製造技術在使用上多是以試誤 (Trial and Error) 的方式累積經驗而得，使得製作的成功率及製作品質大打折扣。若本計畫能對 SCRIMP 問題加以探明，將研究成果應用於實際製作，對於船舶工業助益甚多。

### 三、結果與討論

#### (1) 孔隙率與厚度量測

SCRIMP 樹脂的灌注過程中，樹脂受壓力差的驅動而在玻璃纖維之間的孔隙中流動，孔隙越大對於樹脂流動的阻礙越小，因此孔隙率與玻璃纖維的滲透率 K 的計算有密切關係。「孔隙率」的定義，就是一個限定空間內，孔隙的體積與總體積的比例，以百分比表示。計算方法如下：

$$\phi = \frac{L \times W \times n \times (2.55 - \rho_f)}{L \times W \times t \times n}$$

$$\phi = 1 - V_f$$

L 為玻璃纖維長度，W 為玻璃纖維寬度，n 是玻璃纖維張數，t 是玻璃纖維每張的厚度，玻璃纖維的比重取 2.55，面密度是指玻璃纖維工廠所出廠的玻璃纖維中，每平方公尺為多少克的重量，以 Mat-300 或是 Roving-800 而言，分別代表每平方公尺 300 克重以及 800 克重。由上述的計算公式可知，必須先測定玻璃纖維厚度，而後經過計算可以得知  $\phi$  值大小。因此準確量測玻璃纖維厚度對於所計算的孔隙率有很大的影響。

由於纖維疊層於真空下會相互陷入，使得疊層厚度會比纖維未疊放之厚度疊加還少，所以厚度之量測需在真空底下量測其厚度，而量測之步驟如下：準備兩塊長條型的木塊，每塊長 30cm、寬 10cm、厚度 3cm，表面平滑。再剪裁玻璃纖維布數層，其尺寸稍微大於木塊，以避免在邊界的地方因為剪裁的關係使得玻纖的分佈不均。Mat 及 Roving 各自準備了不同張數疊層，將玻纖夾放到木塊中間，全部以真空袋包覆並抽真空，以電子游標尺記錄總厚

度，扣除木塊以及真空袋的厚度，即可得到玻璃纖維的厚度。

除了玻璃纖維，擴散毯（俗稱黑網）與離模布的孔隙率也要列入計算，將兩均質材料視為一體，計算綜合體積密度與綜合面積密度，總體積採用水中體積排開法，總重量則利用電子秤量測。將兩數據代入前面的公式計算孔隙率大小。所量測資料如表一所示：

表一、擴散毯+離模布的厚度與孔隙率

綜合面密度 = 266.67 g / m <sup>2</sup>	厚度 = 1 mm
綜合密度 = 0.6583 g / cm <sup>3</sup>	孔隙率 = 59.5 %

取得玻璃纖維、擴散毯與離模布的厚度、孔隙率之後，對不同的玻璃纖維疊層組合，厚度採取直接疊加的方式，而孔隙率可以依照不同厚度採取權重計算：

$$\phi' = \frac{t_1 \phi_1 + t_2 \phi_2 + K + t_n \phi_n}{t_1 + t_2 + K + t_n}$$

擴散毯、離模布、玻璃纖維組合之後的加權計算總厚度 總孔隙率如表二所示：

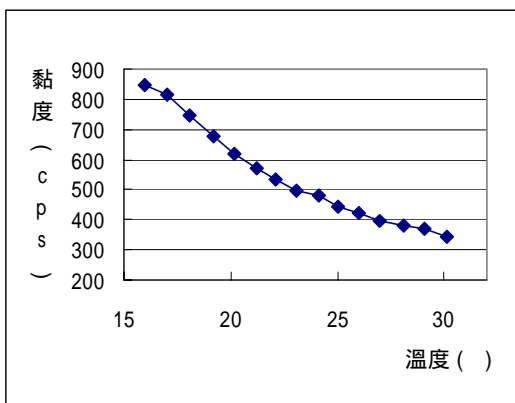
表二、擴散毯 + 離模布 + Mat、Roving 玻璃纖維布的總厚度與孔隙率

疊層組合	MRM-3	MRM-5	MRM-7
總厚度(mm)	2.2389	3.01265	3.7864
孔隙率 $\phi$	57.43%	54.07%	52.09%
疊層組合	MRM-9	MRM-11	MRM-13
總厚度(mm)	4.56015	5.3339	6.10765
孔隙率 $\phi$	50.78%	49.85%	49.15%

#### (2) 平板積層試驗

SCRIMP 灌注中，樹脂的黏度影響灌注速率甚多，而黏度又深受環境溫度影響，由圖一可以看出，環境溫度由室溫 20 度變化到 30 度時，樹脂的黏度變化了將近 2 倍之多，因此在每一次試驗時，需要利用黏度計記錄當時的樹脂黏度，以增加程式計算的準確性。而平板積層試驗可以用

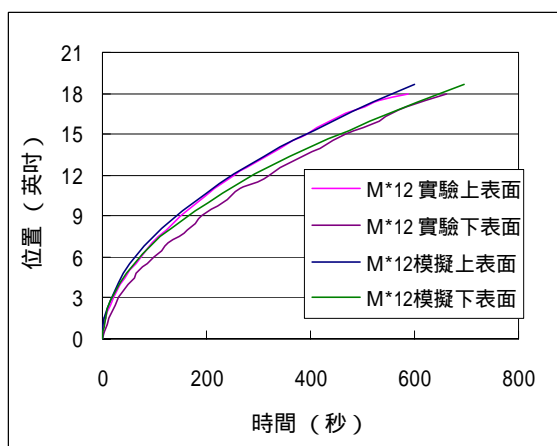
來觀察樹脂在 SCRIMP 製程中流動的狀況，灌注區域長 50 cm、寬 15 cm，並改變不同纖維疊層，樹脂採用長興化工 # 2862，已經預先添加促進劑，硬化劑使用比例為 1%，實驗時記錄溫度與樹脂黏度，並以攝影機紀錄上表面與下表面的樹脂流動，現以積層組合 M\*12、R\*2 及 (MR)\*5+M 之玻璃纖維疊層為例，M 表示 Mat-300；R 表示 Roving-800。



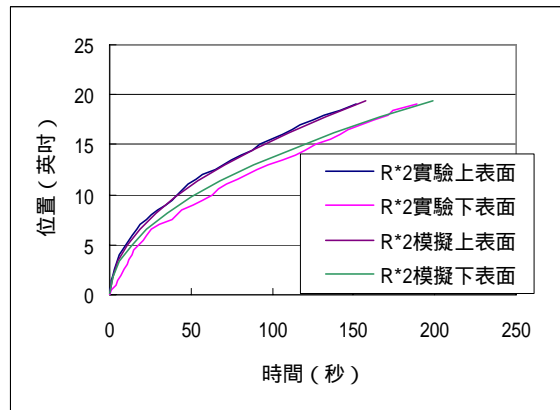
圖一、長興化工 # 2862 樹脂黏度溫度曲線圖

### (3) 實驗結果及數值模擬分析與比較

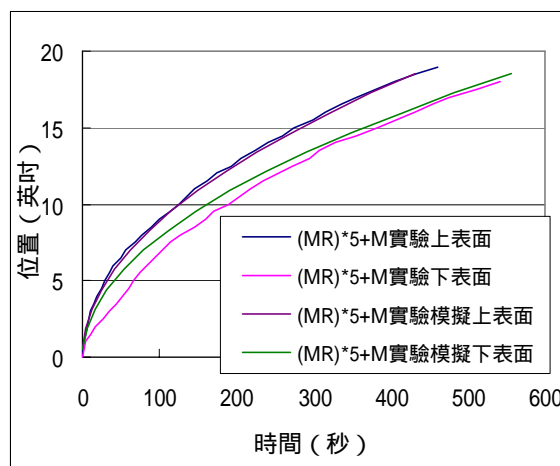
將上述之孔隙率、積層厚度、該次實驗之黏度值、壓力差及實驗所量測之滲透率代入 RTM-Worx 中，並將 M\*12、R\*2 及 (MR)\*5+M 之積層組合的實驗與模擬分析以 L 和 t 之關係來做一比較並將結果繪製於圖表如圖二至圖四所示：



圖二、M\*12 實驗與模擬分析 樹脂位置—時間 關係圖



圖三、R\*2 實驗與模擬分析 樹脂位置—時間 關係圖

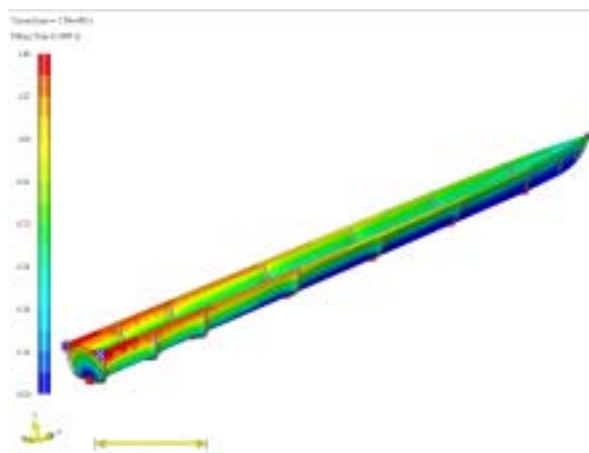


圖四、(MR)\*5+M 實驗與模擬分析 樹脂位置—時間 關係圖

由圖二至四可以看出隨著樹脂向前流動，灌注所花的時間迅速的增加，為了不讓壓力梯度下降過多導致樹脂灌注失敗，在適當距離應加設樹脂供應管，以維持較高的壓力梯度，增加整體的樹脂灌注效率。而分析實驗數據與模擬計算兩者的流動位置—時間曲線圖一致性相當高，流動波前外型與模擬時間都很準確，由這樣的結果可以瞭解滲透率實驗過程中的滲透率量測方法可以信賴，代回軟體計算後可以呈現出流動過程的原貌。

由以上得知，電腦分析的結果與試驗吻合度相當高，可以擴大應用於實船的外殼灌注製作。在此，模擬對象為台灣大學工程科學及海洋工程學系 CAD 實驗室所設計的太陽能船二代，該船全長 12 公尺、寬 1 公尺、深 0.5 公尺，假設以 SCRIMP

技術製造其船殼部分，玻璃纖維為 M、R 交互疊層共 13 層，樹脂採用長興化工 # 2862，工作環境溫度 25℃，硬化劑比例為 1%。灌注點設定在船底，沿著龍骨平均分佈共 6 個點，龍骨部分佈設有擴散毯以利樹脂流動，抽氣點設定在艙艵處共 3 個點，沿著船舷佈設有抽氣管。經過分析後總灌注時間為 25 分鐘，由圖中的色塊分佈可以看出灌注過程中的樹脂波前分佈與時間，工程師可藉此掌握樹脂灌注時的狀況。



圖五、實船模擬灌注分析

#### 四、結論

SCRIMP 技術的優越性將成為船舶工業中 FRP 構件製造的新趨勢。如何掌握施工中樹脂流動的特性，是業界所關心的課題。樹脂在玻璃纖維中的流動可以滲透性質來分析解釋，樹脂的黏度、玻璃纖維的孔隙率與滲透率、灌注時的壓力差，都會對滲透性質造成影響。本文實驗的重點為瞭解樹脂在玻璃纖維中的流動特性，藉由實驗的觀察加以歸納解析，以作為預估滲透率之先期研究。

根據一系列的實驗以及前人所推導的理論分析，將所得之綜合結論歸納如下：

- (1) 樹脂的黏度受環境溫度影響甚鉅，台灣日夜溫差有時達 10℃ 之譜，樹脂黏度變化可達將近 2 倍，對於流

動影響非常大，一般實驗或業界施工都需要準確測定黏度值，以掌握樹脂的特性。

- (2) 樹脂的流動速度隨著流動距離的增加而減緩，因為壓力差的梯度減緩之故，所以灌注時要適度安排樹脂供應管間距，以免灌注時間過長。
- (3) 實驗中，觀察樹脂波前可以求得每組灌注實驗的滲透率量值。代入程式中模擬計算，結果與各平板實驗吻合，確定實驗與分析軟體的可信度。
- (4) 利用軟體分析的便捷，可以在灌注前先利用程式模擬分析，以利施工者掌握樹脂的流動狀況，如此可以節省成本與提昇效率。

#### 五、參考文獻

- [1] Xiudong Sun, Shoujie Li, and L. James Lee, "Mold Filling Analysis in Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding. Part I: SCRIMP Based on a High-Permeable Medium", *Polymer Composites*, Vol.19, No.6, pp.807~817, 1998
- [2] Jun Ni, Shoujie Li, Xiudong Sun and L. James Lee, "Mold Filling Analysis in Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding. Part II: SCRIMP Based on Grooves", *Polymer Composites*, Vol.19, No.6, pp.818~829, 1998
- [3] Kerang Han, Shunliang Jiang, Chuck Zhang, Ben Wang, "Flow Modeling and Simulation of SCRIMP for Composite Manufacturing", *Composites, Part A*, Vol.31, pp.79~86, 2000