

國立臺灣大學工學院機械工程學系



碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

飛機複合材料零件於熱壓爐成型之熱傳模擬分析

Simulation of Heat Transfer in the Autoclave Forming

Process of Aircraft Composite Parts

謝閔軒

Min-Hsuan Hsieh

指導教授：陳復國 博士

Advisor: Fuh-Kuo Chen, Ph.D.

中華民國 105 年 7 月

July 2016

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

飛機複合材料零件於熱壓爐成型之熱傳模擬分析
Simulation of Heat Transfer in the Autoclave Forming
Process of Aircraft Composite Parts

本論文係謝閔軒君 (R03522527) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 105 年 07 月 12 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

陳復國 (指導教授)

陳復國

孫珍理

孫珍理

洪景華

洪景華

林恆勝

林恆勝

系主任

楊耀州

楊耀州

誌謝




兩年碩士生涯好快就告一段落了，若是沒有意外，這應該會是人生中最後的求學階段，這也意味著即將脫離學生身分，將要踏入社會歷練。首先非常感謝指導教授陳復國老師，老師常常分享很多他的人生經驗，並告訴我們其中的道理，希望我們不只是會做研究，也要學習待人處世的道理。此外感謝台灣大學孫珍理教授、交通大學洪景華教授以及高雄應用科技大學林恆勝教授，於論文口試中提出許多問題與改善的方法，使本論文能夠更加完整。

在研究期間，感謝林信良與洪梓豪兩位博士班學長的幫助，在我遇到問題時提供他們的想法給我參考，使我可以關關難過關關過。特別感謝執行同計畫的李念庭學姐，在研究前期已經將軟體摸熟，使得我在後續研究上能夠順利進行下去，同時也謝謝林秉勳學弟時常跟我一起討論研究的方向，讓我能夠從另外一個方向去進行思考。另外也非常感謝一起在實驗室努力了兩年的同學陳梓維、洪昇皇與吳昇穎的陪伴，感謝你們讓我愉快的度過這段時光，也感謝學弟黃浩維、姚順偉、林翔陽、王承緯共同分擔實驗室事務。最後感謝家人、女朋友以及同學的默默支持與關心，讓我可以專心完成學業。

謝閔軒 謹致於台灣大學

中華民國 105 年 7 月


摘要



纖維複合材料因其優異的機械性質和質量輕等特性，已經逐漸取代傳統金屬材料而被大量使用在飛機主要結構、內裝與引擎外罩等部位，許多現代的大型客機之複合材料使用比例已超過 50%，也就是說複合材料已經成為了現代飛機零件中主要使用的材料。而在航太工業中常見的複合材料零件製造係採用熱壓爐成型製程，此製程可以穩定產出品質較好且形狀複雜之飛機零件，符合了航太工業高品質要求，但是因為製程時間長且需要花費大量的人力進行檢測，藉由不斷的測試方能找出穩定生產的方式，故本論文希望能透過電腦輔助工程減少測試次數以及縮短製程時間，達到節省零件製造成本的目的。

本論文首先建立了熱壓爐模型與邊界條件，並且將通風口所測量到的流速結果代入模擬中，在忽略放置模具架子與複合材料的情形下進行單一模具不包含複材之熱壓爐成型熱傳 CAE 分析，接著將模擬與實驗結果進行驗證，比對結果發現模擬結果與實驗有相同的升溫趨勢，且模具前、中、後段的升溫效果也與實驗結果接近，驗證結果顯示此組熱壓爐 CAE 模型能夠完整模擬實際熱壓爐成型中之模具升溫情形。

由於複合材料以非常多材料所組合而成，造成了幾何形狀非常複雜且厚度差異非常大，導致複合材料模型與材料參數的建立需要花費



大量時間，故本論文建立了等效複合材料分析模型，採取等厚度的等效複合材料模型，分別討論複合材料之等效熱傳導係數、等效比熱與等效密度共三種關鍵係數之建立方式。最後以此等效複合材料模型在不考慮樹脂成化所產生的放熱反應下進行 CAE 模擬分析，並針對模具、複合材料和蜂巢共三種位置之測量點分別進行實驗驗證，驗證結果發現以此 CAE 分析模型所預測到達成化溫度之平均時間誤差小於 10%，顯示本論文所建立之 CAE 分析模型已具實務應用之價值。

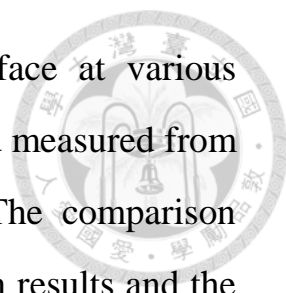
關鍵字：計算流體力學、熱壓爐製程、纖維複合材料、樹脂成化、有限元素法

Abstract



Fiber-reinforced composite has gradually replaced the traditional material, such as metallic material, to be used in aircraft structure, interior and nacelle due to its excellent mechanical properties and light-weight. Nowadays, the percentage of fiber-reinforced composite used in airliner has over 50%. In other words, fiber-reinforced composite has become the main material for manufacturing modern aircraft parts. In the aerospace industry, autoclave forming process is commonly adopted for the manufacture of composite parts. This process can stably produce high quality and complex shape parts. Although autoclave forming process can reach the standard of aerospace, it spends a lot of time for trial and error to search for a steady way to produce parts. Therefore, in this thesis efforts were endeavored to reduce the lead time and save the production cost for the autoclave forming process with the use of the finite element analysis.

This thesis first establishes the finite element model which can simulate both the air flow and the heat transfer presented in the autoclave forming process. The air flow speeds at different locations around the circumference of the autoclave inlet were measured and used as the initial air flow speeds for the simulation model. A measured temperature at the autoclave inlet was also used as an input data. The finite element simulations were then performed for a simplified model in which the composite layers were not considered. The heating efficiency is represented by the temperature evolution of the die surface at various locations during the heating process and a fast heating rate was



anticipated. The temperature evolution of the die surface at various locations obtained from the finite element simulations and measured from the actual autoclave forming process was compared. The comparison reveals that the heating paths resulted from the simulation results and the measured data agree with each other in trend and the quantitative difference is within an acceptable range. It confirms that established finite element model with the specified initial and boundary conditions is capable of predicting the heat transfer during the autoclave process.

In addition, this thesis also builds an equivalent material model for the composite in order to decrease the computation time that strongly depends on the complex geometry and the various thicknesses of the composite layers. The equivalent material model considers the composite layers having an equal thickness with the honey-cone structure built in. The equivalent thermal properties such as the thermal conductivity, specific heat and density were also determined by experiments performed and the theoretical derivations . With the equivalent material properties of the composite layers applied to the simulation model aforementioned, the temperature evolution of the die surface at various locations obtained from the finite element simulations differs from that measured from the actual autoclave forming process only within a range of 10%.

Keywords: CFD, autoclave forming process, fiber-reinforced composite, epoxy curing, finite element analysis.

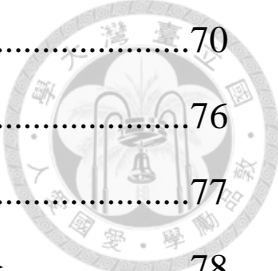
目錄



目錄.....	I
圖目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
第一章 緒論.....	1
1.1 背景與目的.....	2
1.2 研究方法與步驟.....	4
1.3 文獻回顧.....	6
1.4 論文總覽.....	9
第二章 熱壓爐成型介紹.....	11
2.1 熱壓爐製程介紹.....	11
2.1.1 預浸材的準備.....	12
2.1.2 模具準備.....	14
2.1.3 疊貼.....	15
2.1.4 進爐成化.....	16
2.2 熱壓爐簡介.....	19
2.3 熱壓爐成型量測實驗介紹.....	21
2.4 有限元素軟體 FLUENT 介紹.....	25
2.5 材料性質.....	26
2.5.1 固體材料性質.....	26
2.5.2 流體材料性質.....	27

第三章 初始熱壓爐模型與邊界條件建立	29
3.1 初步模型建立	29
3.1.1 模具模型建立	32
3.1.2 初始熱壓爐分析模型建立	34
3.1.3 模擬時間探討	38
3.1.4 第一版熱壓爐邊界條件	40
3.2 第一版模擬結果與實驗驗證	41
3.3 進風口邊界條件探討	44
3.4 第二版模擬結果與實驗驗證	45
3.5 小結	47
第四章 改良熱壓爐模型與邊界條件建立	50
4.1 改良熱壓爐模型建立	50
4.2 改良熱壓爐邊界條件	53
4.3 第三版熱壓爐空爐狀態模擬	54
4.4 第三版模擬結果與實驗驗證	55
4.5 通風口邊界條件探討	58
4.6 第四版模擬結果與實驗驗證	60
4.7 小結	63
第五章 熱壓爐加熱單一模具與複合材料之分析	65
5.1 等效複合材料模型建立	65
5.1.1 複合材料介紹	66
5.1.2 複合材料模型建立	68
5.2 複合材料等效熱傳係數建立	69





5.2.1 等效熱傳導係數	70
5.2.2 等效密度	76
5.2.3 等效比熱	77
5.3 模具與複合材料熱傳分析結果討論與實驗驗證.....	78
5.4 小結	85
第六章 結論.....	86
參考文獻.....	88

圖目錄



圖 1.1 波音 787 複合材料使用狀況[27].....	2
圖 1.2 研究流程圖	5
圖 1.3 熱壓爐內部熱傳機制[12].....	8
圖 2.1 熱壓爐製程之流程圖[18].....	12
圖 2.2 預浸材製造流程[18].....	13
圖 2.3 完成之預浸材[18].....	13
圖 2.4 航太複材成型模具	14
圖 2.5 平面組與曲面組之模具	15
圖 2.6 封袋完成的複合材料示意圖[18].....	16
圖 2.7 模具進爐準備成化	17
圖 2.8 成化曲線	17
圖 2.9 廠商監控點溫度測量報告	18
圖 2.10 廠商要求之成化曲線規範	18
圖 2.11 廠商量測之最快與最慢到達成化溫度時間差	19
圖 2.12 熱壓爐.....	20
圖 2.13 熱壓爐結構與運轉機制	20
圖 2.14 合作廠商放置模面測量點之位置示意圖	22
圖 2.15 合作廠商放置複合材料測量點之位置示意圖	22
圖 2.16 合作廠商放置複材內部測量點位置示意圖	23
圖 2.17 實驗成化曲線	23
圖 2.18 最快測量點位置	24
圖 2.19 最慢測量點位置	24
圖 2.20 最快速與最慢點溫度-時間圖	25

圖 2.21 流體材料卡設定	28
圖 3.1 FLUENT 軟體檢查網格	30
圖 3.2 ICEM 檢查網格面板	31
圖 3.3 ICEM 網格檢查結果顯示	31
圖 3.4 ICEM 之 Aspect ratio 相對四面體示意圖	32
圖 3.5 本論文之模具	33
圖 3.6 熱壓爐架子	33
圖 3.7 模具於爐內之位置	34
圖 3.8 模具分析模型	34
圖 3.9 合作廠商提供之 OLMAR 熱壓爐規格	35
圖 3.10 熱壓爐初始模型	36
圖 3.11 邊界層網格	36
圖 3.12 流體網格加密	37
圖 3.13 流體區域網格	37
圖 3.14 模擬與實驗之溫度-時間圖	39
圖 3.15 施加進風口之溫度-時間圖	40
圖 3.16 第一版邊界條件示意圖	40
圖 3.17 模擬與實驗比較之測量點位置	41
圖 3.18 第一版之第 70 分鐘模具溫度分布圖	42
圖 3.19 第一版之第 101 分鐘模具溫度分布圖	43
圖 3.20 第一版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較	43
圖 3.21 不同高度所測得之流速值[16]	44
圖 3.22 進風口隨高度變化之模擬設定	45
圖 3.23 第二版之第 70 分鐘模具溫度分布圖	46

圖 3.24 第二版之第 101 分鐘模具溫度分布圖	46
圖 3.25 OLMAR 熱壓爐廠商之 CFD 分析結果	48
圖 3.26 第一版之流速圖	48
圖 3.27 第二版之流速圖	49
圖 4.1 爐門內部曲面造型	51
圖 4.2 改良熱壓爐模型	51
圖 4.3 流體網格加密區域	52
圖 4.4 改良熱壓爐之流體網格	52
圖 4.5 第三版邊界條件示意圖	53
圖 4.6 第三版空爐流場情形	54
圖 4.7 第三版第 70 分鐘模具溫度分布圖	56
圖 4.8 第三版第 101 分鐘模具溫度分布圖	56
圖 4.9 第三版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較	57
圖 4.10 第三版爐內流場情形	57
圖 4.11 廠商協助測量熱壓爐通風口之流速結果	59
圖 4.12 進風口劃分與模擬設定	59
圖 4.13 第四版第 70 分鐘模具溫度分布圖	61
圖 4.14 第四版第 101 分鐘模具溫度分布圖	61
圖 4.15 第四版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較	62
圖 4.16 第四版爐內流場情形	62
圖 4.17 第三版爐體中央 XY 截面流場情形	64
圖 4.18 第四版爐體中央 XY 截面流場情形	64
圖 5.1 蜂巢結構	66
圖 5.2 複合材料組成圖	67

圖 5.3 本論文之複合材料模型	67
圖 5.4 等厚複合材料與含有蜂巢結構模型	68
圖 5.5 等厚複合材料網格示意圖	69
圖 5.6 工研院提供之介面材料熱阻與熱傳導係數量測裝置	72
圖 5.7 工研院所使用的量測試片	72
圖 5.8 工研院量測裝置細部圖及實驗原理說明	73
圖 5.9 工研院提供 model A 複合材料等效熱傳導係數計算	75
圖 5.10 工研院提供 model B 複合材料等效熱傳導係數計算	75
圖 5.11 厚度修正之複合材料等效熱傳導係數	76
圖 5.12 模具與複材之爐內位置	79
圖 5.13 靠近熱風處之複合材料測量點	80
圖 5.14 靠近模具處之複合材料測量點與蜂巢測量點	80
圖 5.15 第 70 分鐘有蜂巢之複合材料與模具升溫狀況	82
圖 5.16 第 101 分鐘有蜂巢之複合材料與模具升溫狀況	82
圖 5.17 有蜂巢之複合材料最快升溫點成化曲線圖	83
圖 5.18 有蜂巢之複合材料最慢升溫點成化曲線圖	83
圖 5.19 模具測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較	84
圖 5.20 複材測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較	84
圖 5.21 複材與蜂巢測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較	85

表目錄

表 2-1 模具材料性質	26
表 3-1 步長設定之影響	39
表 5-1 工研院實驗量測結果	74
表 5-2 材料密度與厚度	77
表 5-3 材料比熱	78





第一章 緒論

複合材料為結合兩種或兩種以上的不同材料，使複合材料比個別材料有更好的特性。早期複合材料製造成本高，僅能運用在航太與國防等尖端科技，但隨著製造技術的進步，使得複合材料成本降低與品質更好，複合材料已逐漸應用於民生工業，如汽車產業、風力發電、運動器材和電子材料等工業。複合材料一般來說由基材(Matrix)與補強材料(Reinforcement)所組成，而常用的基材有金屬、陶瓷和高分子材料三種，根據需求分別用於不同工業，補強材料最常見的為纖維材料，如碳纖維和玻璃纖維等，根據需求可以製造出不同複合材料的結構體，如疊層板、三明治結構等。

複合材料具有高強度、高韌性、質量輕、耐腐蝕、耐磨耗等特性，以逐漸大量取代傳統的金屬材料。文獻統計，前三大成長最快的複合材料產業為汽車、航太與綠能產業，政府近日所主導的國防自主政策，希望透過此政策帶動國內航空產業發展，目前國內廠商也獲得不少國內外航空品質系統與產品認證，並與多家世界知名大廠如奇異、波音、空中巴士等有長期合作關係，另外複合材料更是我國二十一世紀支持的十大重點新興產業，因此複合材料之設計、製造、修補技術將是發展重點。



1.1 背景與目的

早期飛機為了減輕重量，主要使用材料為鋁合金，但是隨著碳纖維技術進步，使碳纖維複合材料表現出優異的機械性質且價格合理，隨著技術成熟複合材料已能大量使用在飛機主要結構件上，近年來複合材料應用在飛機上的比例更是將近一半的比例，其中大量使用複合材料於機體結構及引擎外罩，圖 1.1。

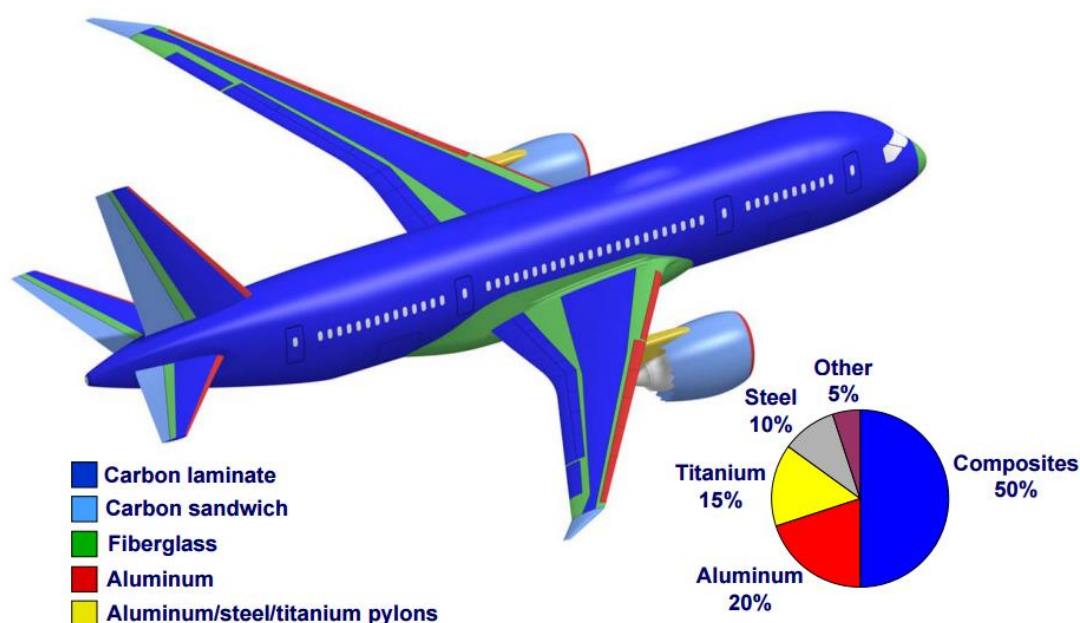


圖 1.1 波音 787 複合材料使用狀況[27]

大型客機近年來主要強調安全性、經濟性、舒適性及環保性，在相同設計要求下，複合材料應用於飛機零件不但可以減輕 25% 機身重量，且複合材料可以根據不同的製程生產出複雜曲度的零件，一個複合材料零件可取代數十個以扣件接合之金屬組零件，如波音 787 採用複合材料後減少了 15000 片鋁板和 50000 個扣件，零件的減少也就相

對減輕飛機重量。航太複合材料常用的製造方法為熱壓爐成型 (Autoclave process)，將複合材料貼在模面上後，將模具連同複合材料一同送進熱壓爐中進行高溫高壓成型，使複合材料中的樹脂產生成化反應轉換成固體，然後與纖維材料緊密結合，進而得到高品質與低空隙率的複合材料零件。

隨著電腦科技的發展，現代的產品設計已經大量使用電腦輔助工程(Computer-Aided Engineering)之分析結果來提供使用者初步的設計概念，電腦輔助工程分析不但可以縮短產品開發的時間，更可以在產品設計階段即可判斷結構設計缺陷並給予修正改善，節省產品開發的成本。為了得到成化後品質較好之複合材料，進行熱壓爐成型時，複合材料中 fastest 與最慢到達成化溫度之時間差最大不可超過 30 分鐘，在製程中要使複合材料達到標準，往往都需要耗費大量人力與時間反覆進行進爐成化直到通過測試，又因熱壓爐成型時間長，通常時間為數小時，造成能源巨大的損耗，故希望透過 CAE 之分析結果進行模具的設計以及模具在爐子擺放最佳位置等等參數，提供使用者進行初步參考，藉此減少測試次數和成化時間，達到省時省力的效果。

本論文研究目標為將電腦輔助工程(CAE)應用於航太複合材料常見的熱壓爐成型，主要目標為建立一套複合材料成形模具之 CAE 熱傳分析最佳化模式，並透過對於實際製程之瞭解，合理的簡化模型並找出最佳的分析模式，以提高模擬之準確性，最後根據實際試驗結果與分析模擬結果進行驗證。



1.2 研究方法與步驟

本論文先針對航太熱壓爐製程做一系列的介紹，透過從一開始複合材料的進爐成化前的準備到複合材料開始進爐後的加熱加壓過程進行詳細了解，藉此找出模擬熱壓爐成型中的最適當邊界條件以及簡化的方法，並且引入計算流體力學(Computational Fluid Dynamic)之數值分析方法，計算流體力學是在 21 世紀流體力學相當重要的技術，是利用數值方法在計算機中對流體力學的控制方程式進行求解，進而預測流場的流動，可以解決 3D 複雜流場、多相流和流固耦合等複雜的問題，目前有多種商業 CFD 軟體，如 FLUENT、PHOENICS、CFX 等，本論文將使用 FLUENT 軟體進行分析。

航太之熱壓爐成型中，熱壓爐扮演非常重要的角色，影響爐體內部加熱均勻性的因素非常多，例如風扇的設計、加熱器的功率、進風口與出風口的設計、熱壓爐門的曲率、放置模具的架子等，但由於熱壓爐廠商無法提供風扇與加熱器之模型，造成無法完整模擬爐體運轉狀況，故本論文首先針對熱壓爐數值分析方面蒐集國內外相關文獻，將文獻進行整理，根據文獻與廠商建議方式進行初始熱壓爐體模型建立與邊界條件設定，進行單一模具無複材熱壓爐成型之熱傳分析，並將模擬結果與實驗結果進行比較，若是初始模型與邊界條件能夠準確預測模具升溫情形，就能將此分析加入複合材料模型進行新的分析，反之則是重新建立新的熱壓爐模型與邊界條件到能夠準確預測模具升溫為止。

由於複合材料可根據需求進行不同的組合，導致複合材料的幾何比模具相對複雜許多，且不同複合材料的熱傳特性之差異也非常顯

著，將探討複合材料簡化方式，以及工研院所協助測量整理的複合材料之等效熱傳係數代入模擬後，再進行單一模具加上複合材料熱壓爐成型之熱傳分析，同樣也將模擬結果與實驗值相互比較且進行探討，最後將歸納出航太複合材料熱壓爐成型最佳化分析，使後人能夠依據此分析流程，讓所有的熱壓爐成型之分析速度變快，本論文之研究方法與流程架構如圖 1.2。

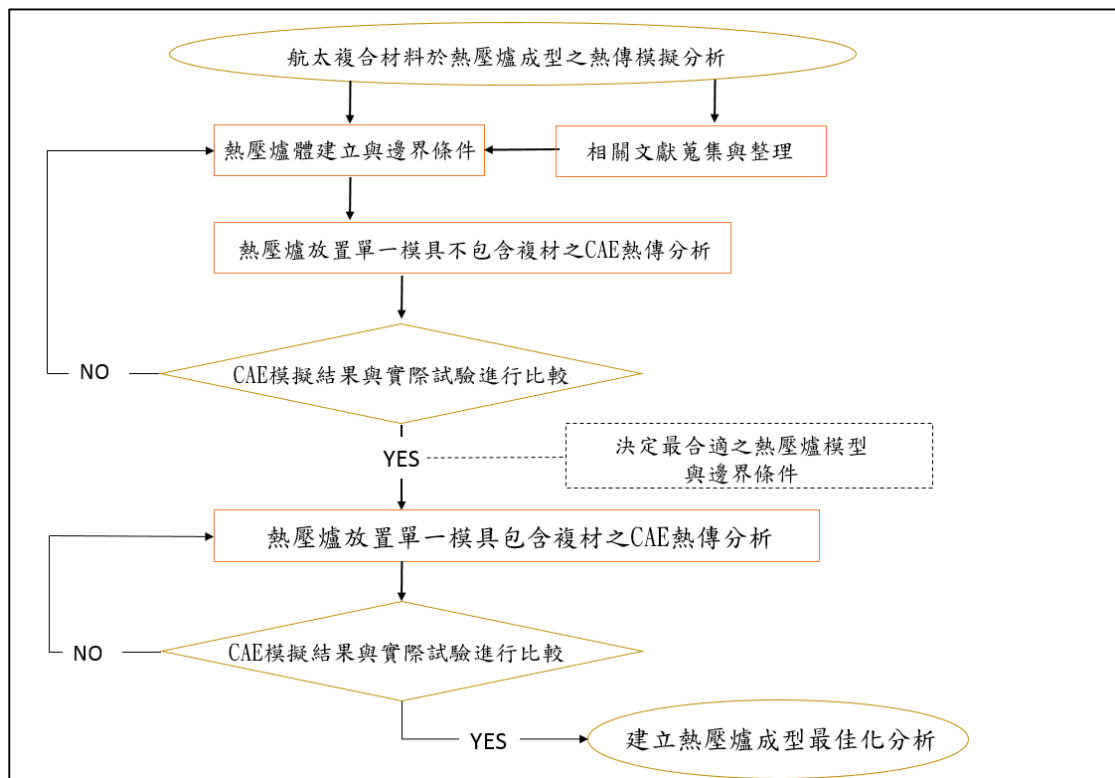


圖 1.2 研究流程圖



1.3 文獻回顧

近年來複合材料已經大量運用在許多工業領域上，尤其近期飛機主要結構件已經使用大量複合材料取代傳統金屬材料，使得複合材料朝向越來越厚的零件發展，航太領域對於複合材料要求的精度甚高，影響複合材料品質有許多，影響最劇烈的因素為加熱之均勻性，若是加熱不均勻將導致材料熱膨脹不均勻而產生變形，且樹脂到達成化溫度後會產生化學反應由液體轉化成固體造成體積改變，尤其當複合材料厚度變厚時，材料內部過度加熱的現象會更明顯，所以已有大量的文獻研究複合材料的熱傳機制與熱壓爐製程之加熱機制。

在複合材料部分，Heisler[1]探討在等溫且對稱之熱對流邊界條件下，平板一維暫態熱傳導之現象，並提出了 Heisler 熱分佈曲線。Loos 和 Springer[2]利用有限差分法建立一維模型，探討平板之成化現象。Bogetti 和 Gillespie[3]建立了二維的複合材料分析，提出了可以預測任意斷面之幾何形狀的溫度分佈與成化程度的分佈，而 Park 和 Lee[4]以有限元素法建立二維模型，他們計算了複合材料厚度方向的溫度分佈以及包含了芯材的溫度分佈。Magali[5]著重了解複合材料與模具熱傳導機制，測量複合材料厚度方向與平面之不同熱傳導係數，並提出模型與三維溫度場實驗測量進行比對。Blest 等人[6]研究複合材料內部樹脂流動與熱傳，他們提出模型進行模擬並與已知的實驗數據進行比較。Kim 和 Lee[7]提出可以改善複合材料內部過熱現象，透過改變傳統的熱壓爐成化曲線，根據此成化曲線建立模擬與實驗比較，Joven 等人[8]量測了不同編織方法的碳纖維材料之熱傳係數，同時也測量

了離型劑的熱傳導係數，測量發現是碳纖維的三分之一，所以離型劑阻隔了複合材料與模具表面的傳熱。



Pillai 等人[9]利用數值分析找出最佳成化製程，並將得到之最佳化參數實際應用於熱壓爐控制器當中。ANTONUCCI 等人[10]在忽略模面與複材間的熱交換提出兩種參數影響複材升溫的參數，第一個參數決定了流體帶了多少能量給複合材料，而第二個參數決定了複合材料內部放熱反應的關聯性。Upadhyia 等人[11]詳細介紹了熱壓爐內部運作情形，如加壓系統、加熱系統等，並提出未來航太熱壓爐製程所遇到的挑戰。Xie 等人[12]指出模面均溫性對於複合材料品質有很大的影響，建立了模具在熱壓爐進行成化之模擬，以此模擬討論不同組合的成化溫度曲線對於模面均溫性的影響。Maffezzoli 和 Grieco[13]指出影響熱壓爐製程最主要因素為流體溫度，而他們提出新的方法可以安排不同模具於不同位置，縮短成化時間。Liebers 等人[14]建立了名為 Masterbox 的動態熱壓爐控制器。Dumont 等人[15]透過模擬熱壓爐製程之擺放模具於不同位置，可以透過模擬結果去改善實際製程零件的品質與縮短製程時間。Kluge 等人[16]~[17]透過實際實驗研究熱壓爐，發現熱壓爐體內部流速是會隨著高度產生變化，距離底部越高會有越慢的現象，並且也探討了升溫率以及爐內壓力對於模具溫度分布的影響，同時也將所測得的實驗數據應用於模擬中，進行模具溫度分布的預測，發現了熱輻射對於模具升溫的效應是不可忽略的，最後他們也提出更詳細的流速測量以及精準的湍流模型將會提升模擬準確度。

從上述文獻資料統整得知，複合材料三維熱傳導問題大多是利用數值分析進行研究，隨著計算機的進步，現今以能使用數值分析進行模擬內部情況複雜的熱壓爐製程，並且可以透過分析，提升複合材料品質與縮短熱壓爐製程之時間，而上述之優點則是建立於熱壓爐對於複合材料加熱的效果改善，影響複合材料升溫狀況有成化溫度曲線、複合材料內部樹脂成化放熱反應、模面溫度等，如圖 1.3。

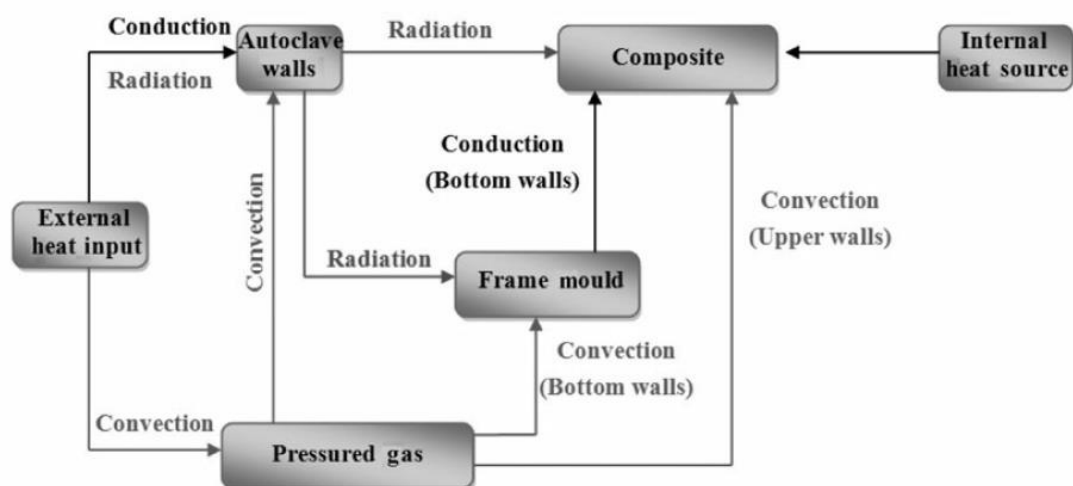


圖 1.3 熱壓爐內部熱傳機制[12]



1.4 論文總覽

本論文分為六章，以下依照章節依序簡述本論文之內容：

第一章為緒論。介紹複合材料目前趨勢以及複合材料對於飛機零件的重要性，同時也說明了數值分析應用於航太熱壓爐製程之優點，最後蒐集與本論文相關之文獻，研究熱壓爐整體內部情形，並且建立本論文之架構與步驟。

第二章為熱壓爐製程介紹。本章將熱壓爐成型的過程進行詳細的介紹，透過對製程的詳細了解提供了後續章節在模擬的分析模型建立與邊界條件設定，同時也要介紹熱壓爐成型量測實驗介紹，使後續章節可以使用此實驗結果與模擬結果進行比較。

第三章將建立初始熱壓爐模型與邊界條件。本章將模擬熱壓爐成型，並在簡化熱壓爐架子與複合材料的情形下，以及合作廠商所建議的邊界條件下進行單一模具不包含熱壓爐成型之熱傳分析，將模擬分析結果與實驗結果進行比較，結果發現模擬與實驗結果誤差太大，接著參考文獻進行新邊界條件設定，但對於模擬結果改變不大，最後發現熱壓爐原廠於網站上所提供之模擬空爐爐內流場之後處理結果，將它與模擬結果比對發現差異太大，也就是說初始熱壓爐模型與邊界條件過於簡單，無法完整模擬熱壓爐內部實際情形。

第四章為第三章之延續，將前面探討出的問題進行改良熱壓爐模型與邊界條件。將改良熱壓爐模型與邊界條件進行空爐分析，將模擬結果與原廠進行比較，最後發現改良後的熱壓爐模型與進風口使用實驗數據進行設定較能反應真實熱壓爐內部流場情形，最後再將此熱壓爐模型與邊界條件進行單一模具不包含熱壓爐成型之熱傳分析，與實

驗結果對照後發現此組邊界條件較接近實際升溫情形。

第五章為熱壓爐加熱模具包含複合材料之研究。本章建立了等效複合材料模型，同時也探討複合材料之等效材料參數的建立，在忽略樹脂成化放熱反應的情況下，進行模擬熱壓爐加熱單一模具加上等效複合材料之分析，並與實際實驗所得之實驗值進行比對，檢視等效複合材料與材料參數建立之方法。

第六章為結論，整理本論文中所得到的成果。



第二章 熱壓爐成型介紹

複合材料種類眾多，不同的複合材料結構又有不同的製造方法，而疊層結構與三明治結構是航太零件常見的兩個複合材料結構，其中製程非常多樣化，如熱壓成型、熱壓爐成型、濕積成型、樹脂轉注成形、繞線成型等，前兩種成型法採用複合材料貼在模具上進行加壓加熱成型，這種成型法工件品質佳，此種成型法能夠滿足航太零件高品質要求，故航太常見製程為熱壓爐成型。

2.1 熱壓爐製程介紹

在航太工程中熱壓爐成型已廣泛應用於製造飛機複合材料零件，熱壓爐成型是一種使用模具成形的製造方式，這種製造方式可產生高品質的零件，但是這種方法需要耗費大量時間、人力和能源，而通常這種製程有以下主要流程：

- a. 預浸材的準備。
- b. 模具的準備。
- c. 切割預浸材，並根據零件需求將預浸材疊貼於模面上。
- d. 完成疊貼的零件進行封袋連同模具一起送進熱壓爐進行成化。
- e. 完成零件成化後，將複合材料零件從模具上移除。

後面小節將針對每一個流程進行詳細的介紹，熱壓爐製程之整體流程如圖 2.1 所示。

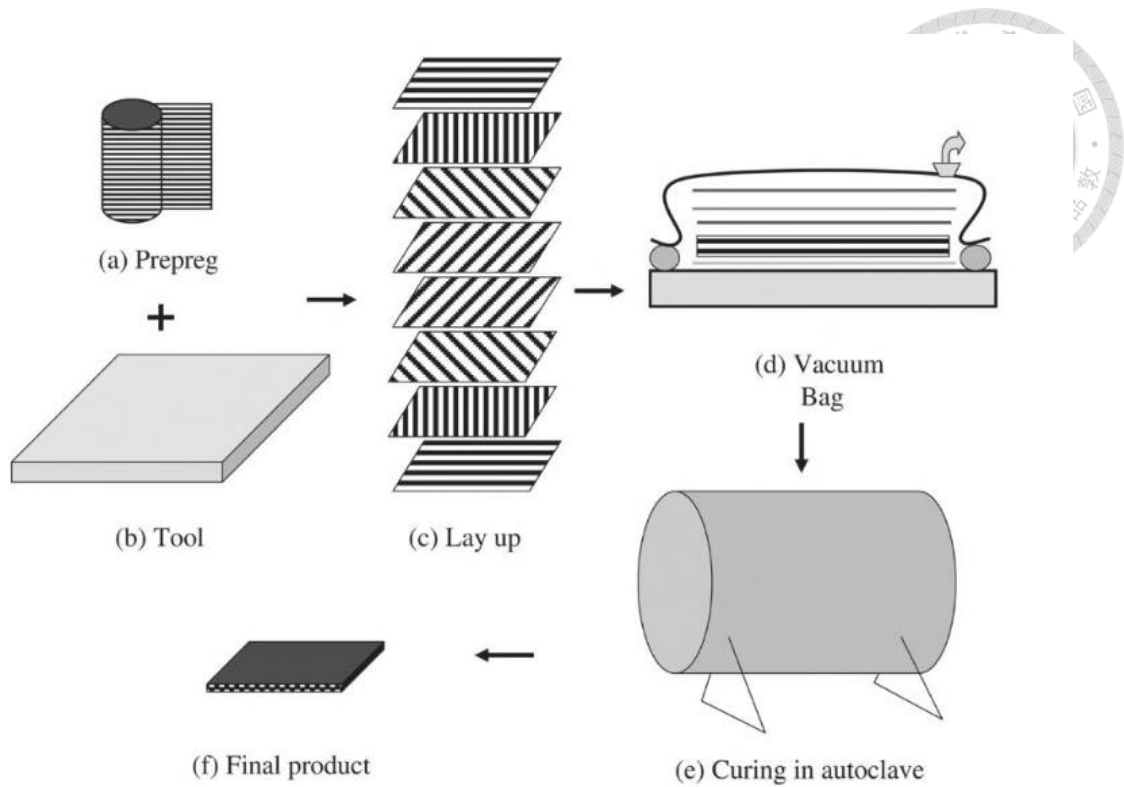


圖 2.1 熱壓爐製程之流程圖[18]

2.1.1 預浸材的準備

將乾燥的纖維泡入樹脂槽後，將混有樹脂的纖維進行加熱，目的是為了讓樹脂液體轉化到特定的成化狀態，使得樹脂具有相當的黏性可以維持纖維呈現平板的狀態，此時的狀態就稱之為預浸材，最後將預浸材兩面覆蓋一層膜後即可以捲成圓柱狀進行儲存以及運送，如圖 2.3，而預浸材是常見的商業產品，通常廠商會提供特定的儲存溫度以及最大保存期限，預浸材流程可由圖 2.2 所示。

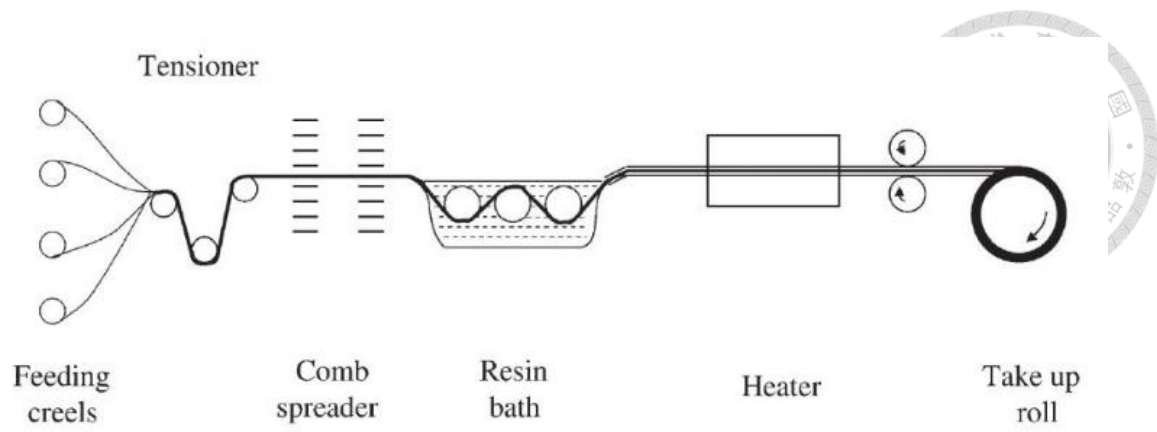


圖 2.2 預浸材製造流程[18]



圖 2.3 完成之預浸材[18]



2.1.2 模具準備

在熱壓爐成型製程中，複合材料在高壓下緊貼模具表面形狀進行成型，所以模具的大小會根據材料的大小決定，熱壓爐製程一般都在溫度 180 °C 以及壓力 600 kPa 的條件下進行成化數幾個小時，所以選用的模具材料必須要能夠承受此環境條件，另外還必須考量模具成本、重量、強度、加工性、熱膨脹、熱傳導等其他材料性質，一般熱壓爐製程常見的模具材料為金屬材料，如鋁、鐵、鎳合金(Invar)等，其中鎳合金因為它的熱膨脹係數較接近複合材料的熱膨脹係數，但因為材料較貴所以用於生產精度要求較高的複合材料零件，模具大多由模面以及肋條所構成的支撐結構組成，根據模面形狀又可分為平面組與曲面組，如圖 2.4 和圖 2.5。

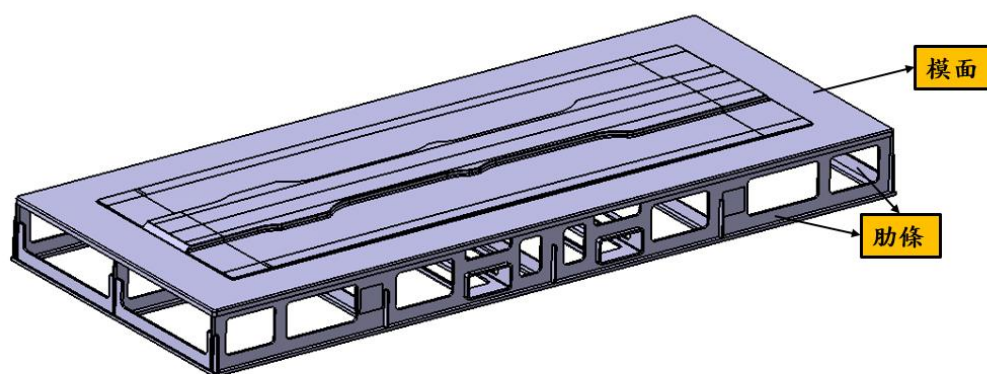


圖 2.4 航太複材成型模具

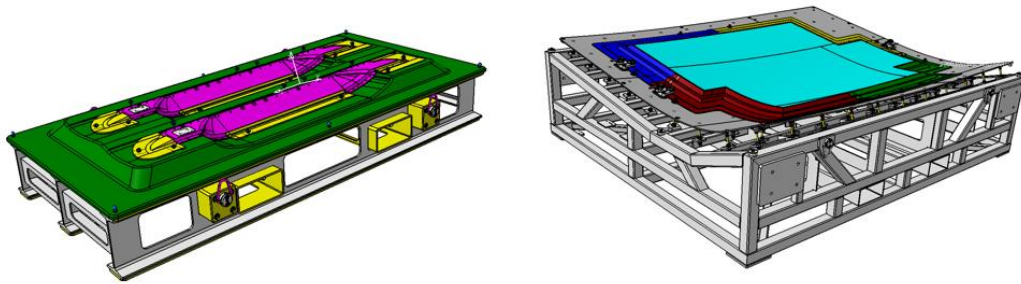


圖 2.5 平面組與曲面組之模具

2.1.3 疊貼

從冷凍庫中儲存的預浸材取出至環控室進行退冰至室溫，將整卷的材料裁切成片狀，再將片裝材料裁切成適當外型及尺寸，在疊貼之前需要對模具表面進行處理，清潔表面以及施加離型劑或離型膜，目的為維持好的模具表面以及讓複合材料能夠順利脫離模具，根據施工文件並參考模具上定位線或輔助定位工具將預浸材第一層、第二層疊貼至最後一層，而疊貼過程中每 3 層到 5 層會進行 5~15 分鐘的層間抽氣，以確保層與層之間緊密貼在一起，最後再進行封袋並將內部抽氣使其呈現真空狀態，讓真空袋完全接觸零件，就可以準備送至熱壓爐前進行成化，完成疊貼流程後的複合材料如圖 2.6 所示。

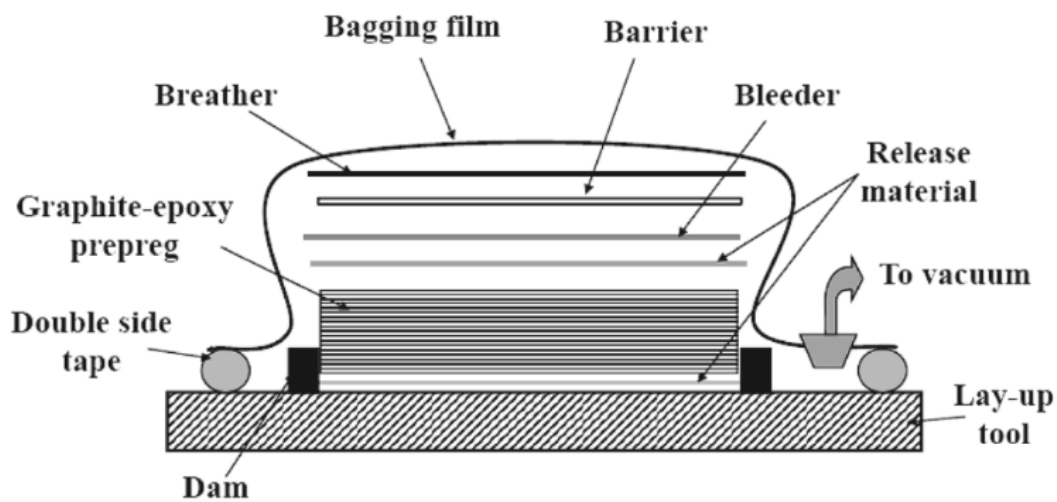


圖 2.6 封袋完成的複合材料示意圖[18]

2.1.4 進爐成化

將疊貼完成的零件與模具移出環控室，模具根據需求擺放對應位置的熱壓爐架子上，將架子移入熱壓爐內，接著連接壓力管線至模具上的真空閥以及將模具上所安裝的熱電偶接入爐壁上的插座進行溫度監測，確認所有管線安裝完成後即可關上爐門準備進行成化，如圖 2.7，根據施工文件所給予的成化曲線進行高溫高壓製程，一般成化溫度分別為 120 °C (250 °F) 跟 177 °C (350 °F) 兩種，而成化曲線可由三個階段所構成，加熱階段、保溫階段與降溫階段組合而成，如圖 2.8。



圖 2.7 模具進爐準備成化

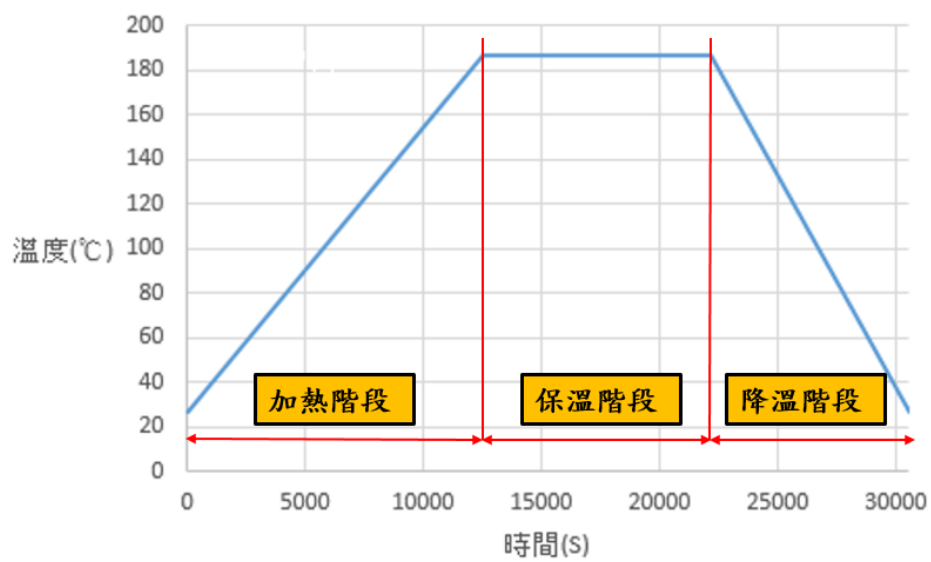


圖 2.8 成化曲線

最後將成化完成的零件移出熱壓爐後，從模具上移除進行檢視，同時也檢查每個溫度測量點的報告，如圖 2.9 所示。檢測標準有升溫情形、保溫時間和降溫情形不可超過廠商所規定之範圍和最快到達成化溫度與最慢到達成化溫度之測量點時間差不可大於 30 分鐘，如圖 2.10 與圖 2.11。

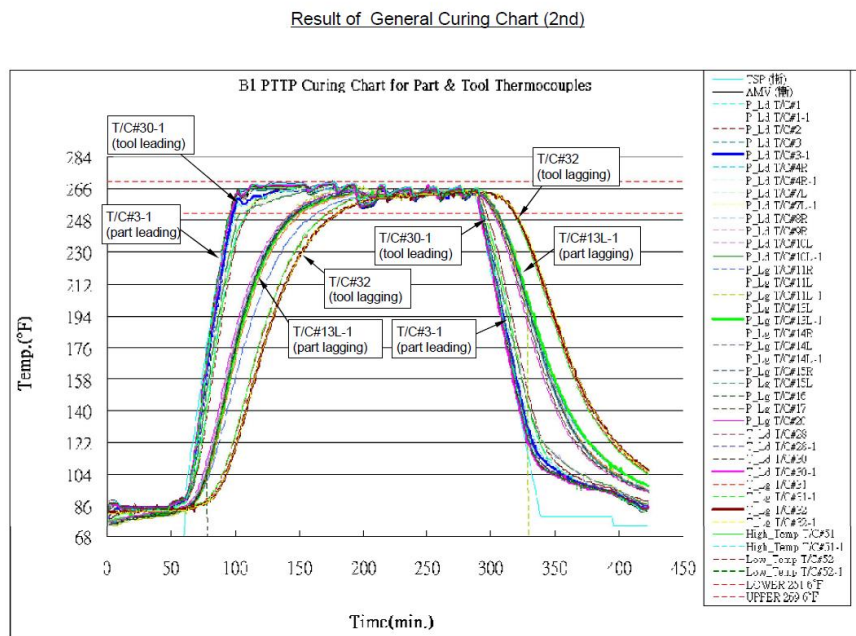


圖 2.9 廠商監控點溫度測量報告

- (1) Heat-up rate
 - (a) 130-190F Range: 2 to 8 F/min
 - (b) 191-230F Range: 1 to 8 F/min
 - (c) 231-250F Range: 0.3 to 8 F/min
- (2) Holding time: 90 minutes minimum
- (3) Cooling rate: 5 F/min maximum

圖 2.10 廠商要求之成化曲線規範

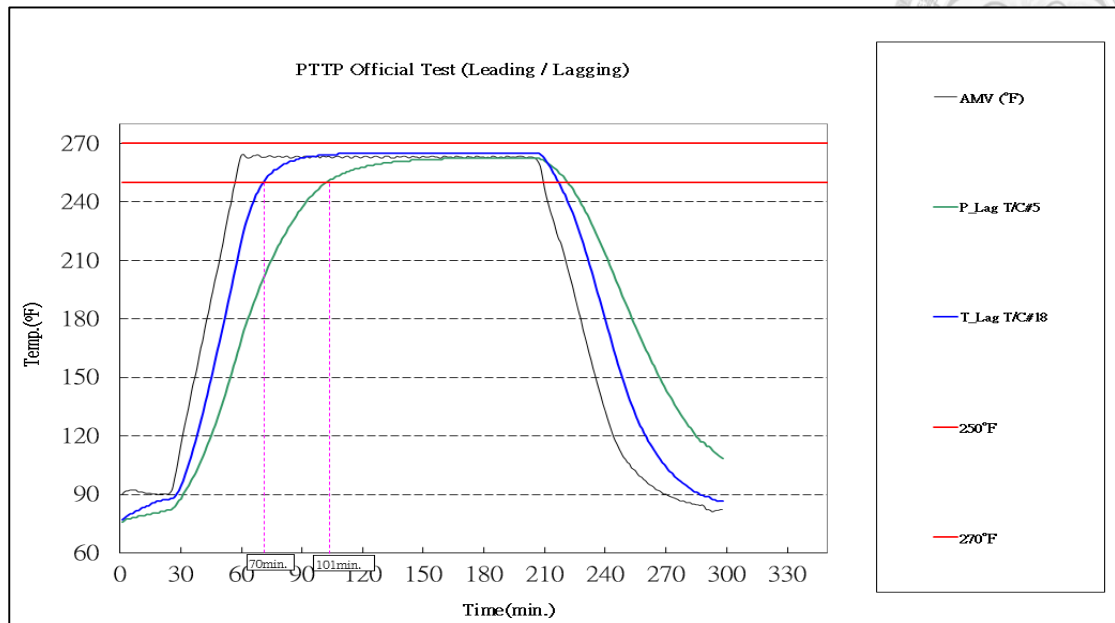


圖 2.11 廠商量測之最快與最慢到達成化溫度時間差

2.2 熱壓爐簡介

熱壓爐的外型就像是一個大型的圓柱體容器，它可以在內部提供高壓高熱的環境，由於航太複合材料零件都非常的大件，因此航太用的熱壓爐必須大到內部可以裝載複合材料零件，而航太複合材料零件一般都需要加熱至 175 °C 和 600 kPa(80 psi)的壓力，所以熱壓爐也必須要有承受這種負載的能力，一般而言使用熱壓爐有兩個主要的優點，一是因為熱壓爐可以生產範圍非常廣的複合材料零件，只要成化溫度與壓力在熱壓爐能夠提供的範圍內即可，而另一個優點則是熱壓爐提供壓力於複合材料上使其緊貼模面產生各式各樣不同的零件形狀，故以上兩個優點使得熱壓爐成型在航太工業中很常見，圖 2.12 為熱壓爐外型與爐門構造示意圖。



圖 2.12 熱壓爐

圖 2.13 為一般熱壓爐常見的結構，主要結構有可以放置模具的可移動式平台、用來帶動熱壓爐內部空氣的風扇以及提高空氣溫度的加熱器等。熱壓爐的運轉方式分為三個步驟，首先風扇將爐體內部放置模具區域的空氣帶到後方加熱器進行升溫後，再將加熱後的空氣送至通風口，最後空氣經由爐門反射至爐體內部放置模具區域對模具進行加熱，以上步驟敘述為一個循環，同時熱壓爐對模具施加高壓進行成形製程。

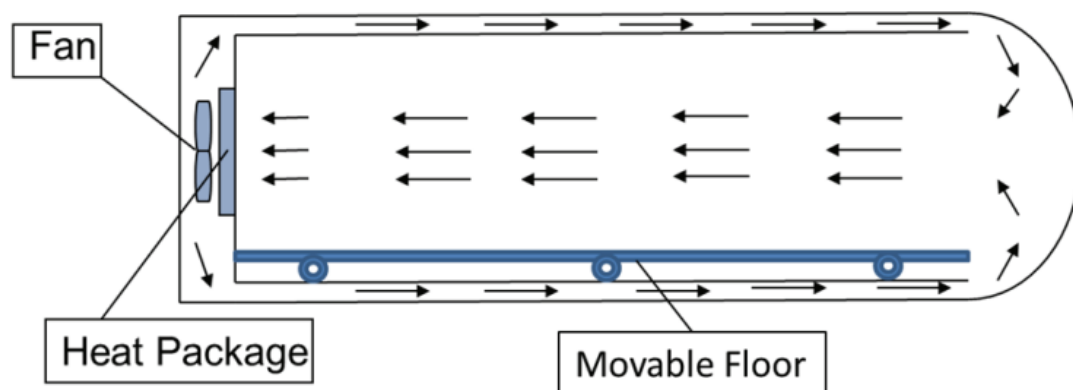


圖 2.13 熱壓爐結構與運轉機制

2.3 熱壓爐成型量測實驗介紹



如同 2.1.4 節所述，模具與複合材料在進爐成化前會先將安置在模具上面的熱電偶接入爐壁上的插座進行溫度監測，而本論文總共有安裝了 29 個熱電偶進行監測，其中 12 個熱電偶安裝於模具模面上 (TC16~TC27)，剩下 17 個熱電偶則是安裝於複合材料內，詳細安裝位置如圖 2.14 與圖 2.15 所示。另外安裝於複材上的測量點又可以根據在複材內部監測的位置分為三種，第一種為安裝在疊貼完成之預浸材倒數第二層中 (TC1~TC6) 也就是較靠近導氣布的那一側，第二種為安裝至疊貼完成之預浸材第二層中 (TC7~10、TC9-1 與 TC10-1) 這些熱電偶安裝位置較靠近模具部份，最後一種則是安裝於蜂巢結構中 (TC11~TC15)，如圖 2.16 所示。

而在本次實驗中複合材料規定之成化溫度為 120°C (250°F)，其中總製程時間為 297 分鐘，成化曲線溫度部份可分為四個階段，0~20 分鐘為保溫階段，溫度保持在 32°C 、21~59 分鐘為加熱階段，溫度由 32°C 升溫至 128°C 、60~209 分鐘為第二次保溫階段，溫度保持在 128°C 、最後 210~297 分鐘則為降溫階段，溫度由 128°C 降溫回到 32°C ，而成型中熱壓爐內部維持 310 kPa 之壓力，如圖 2.17。根據實驗結果顯示，最快到達成化溫度的測量點為 TC18，位置為最靠近進風口側之模面測量點，如圖 2.18，到達時間為製程中第 70 分鐘，而最慢到達成化溫度的測量點為 TC5，位置為複材中間部份，詳細位置如圖 2.19 所示，到達時間為製程中第 101 分鐘，最快與最慢時間差為 31 分鐘，如圖 2.20。

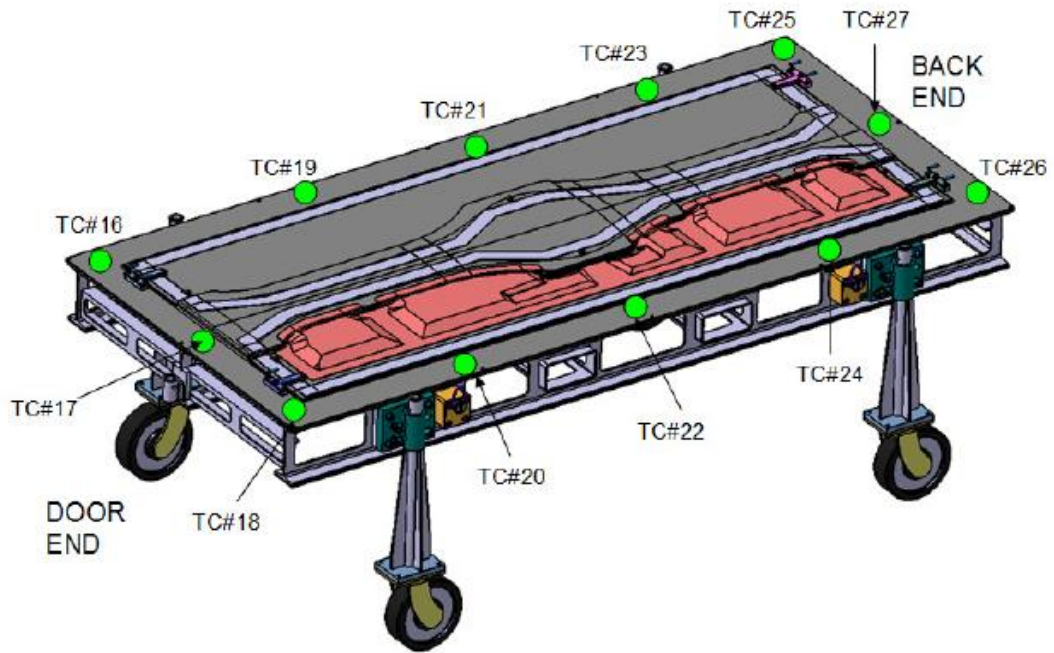


圖 2.14 合作廠商放置模面測量點之位置示意圖

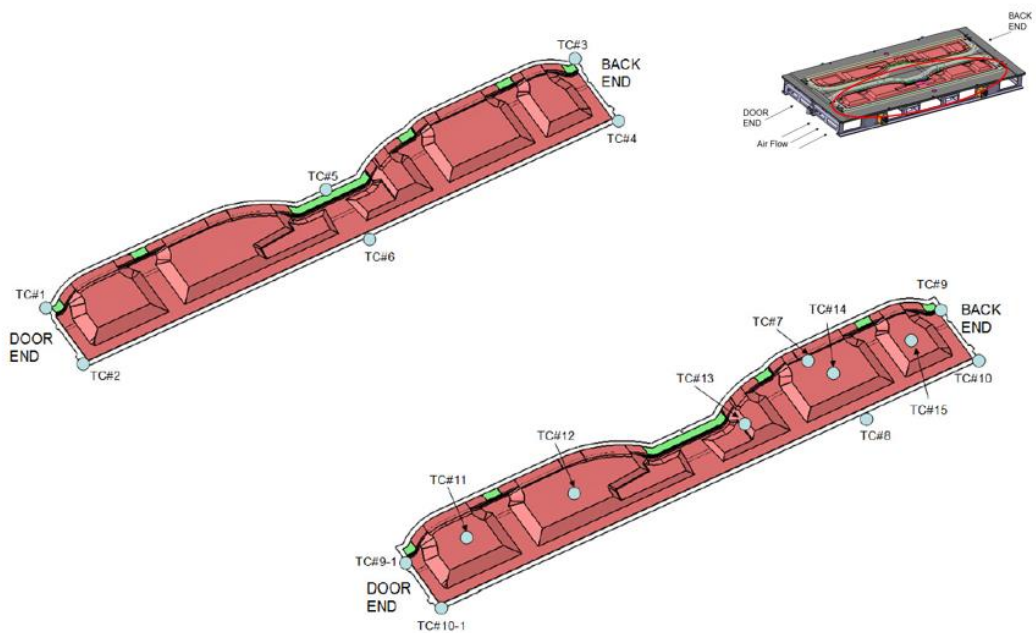


圖 2.15 合作廠商放置複合材料測量點之位置示意圖

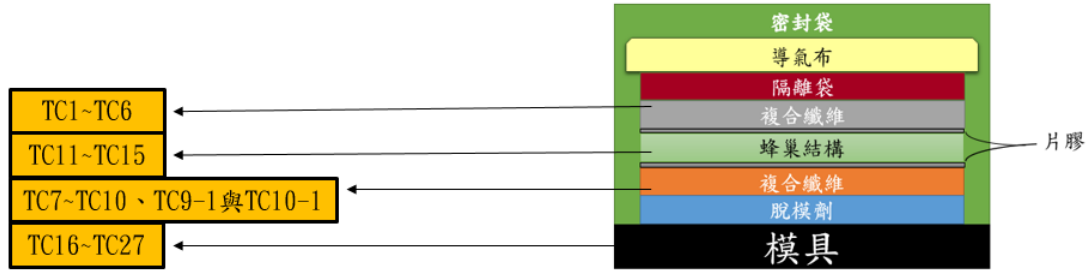


圖 2.16 合作廠商放置複材內部測量點位置示意圖

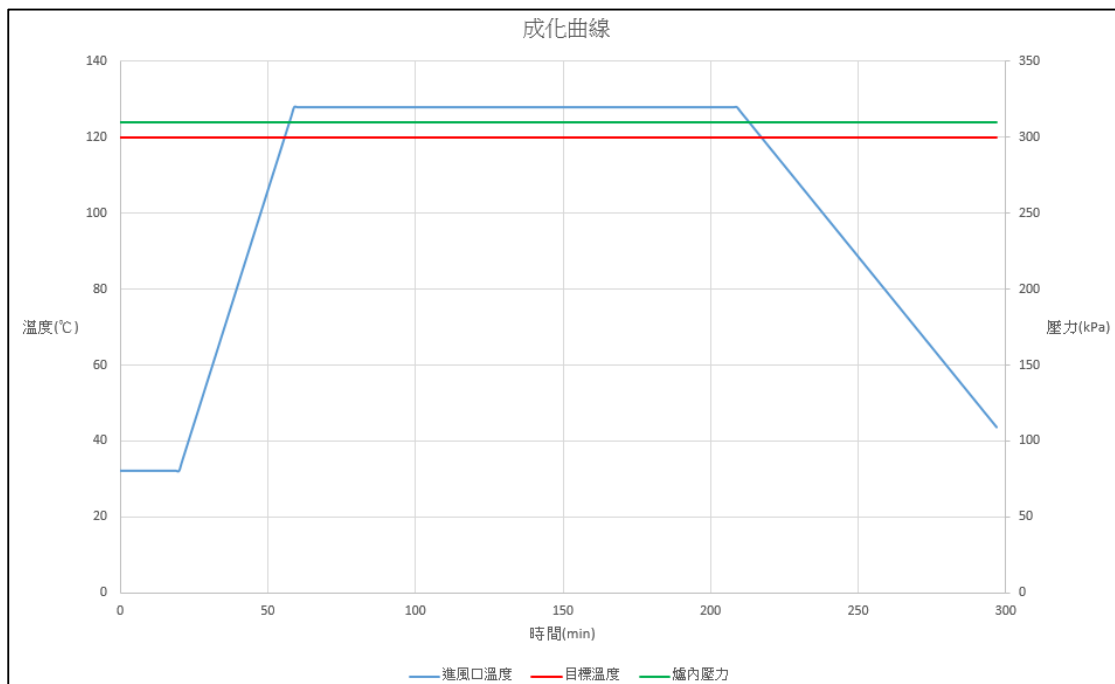


圖 2.17 實驗成化曲線

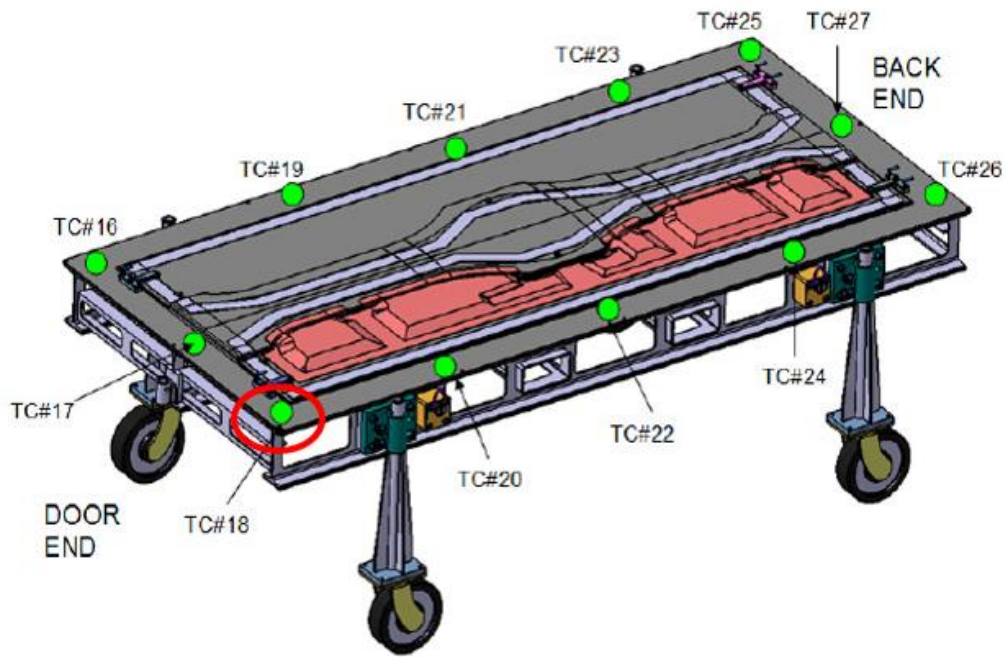


圖 2.18 最快測量點位置

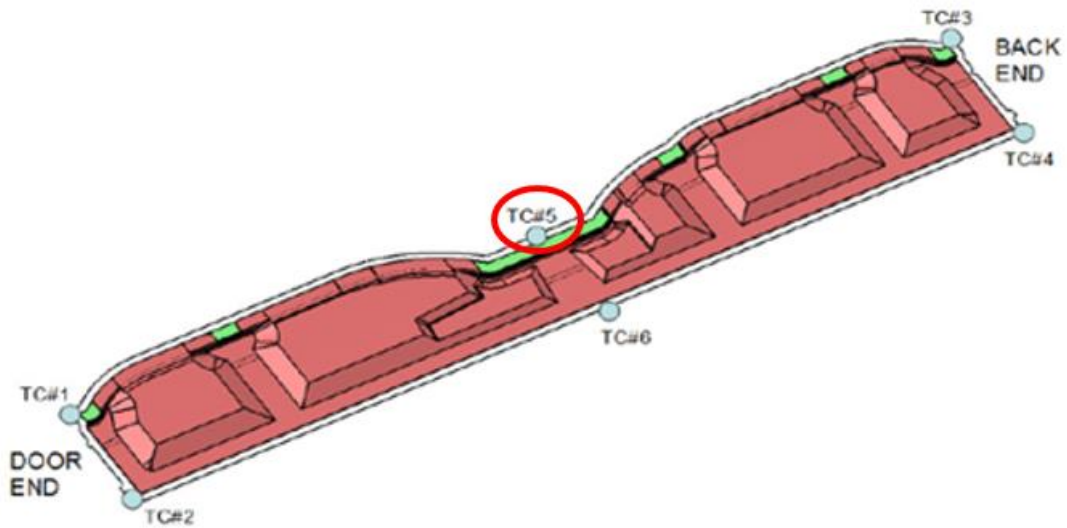


圖 2.19 最慢測量點位置

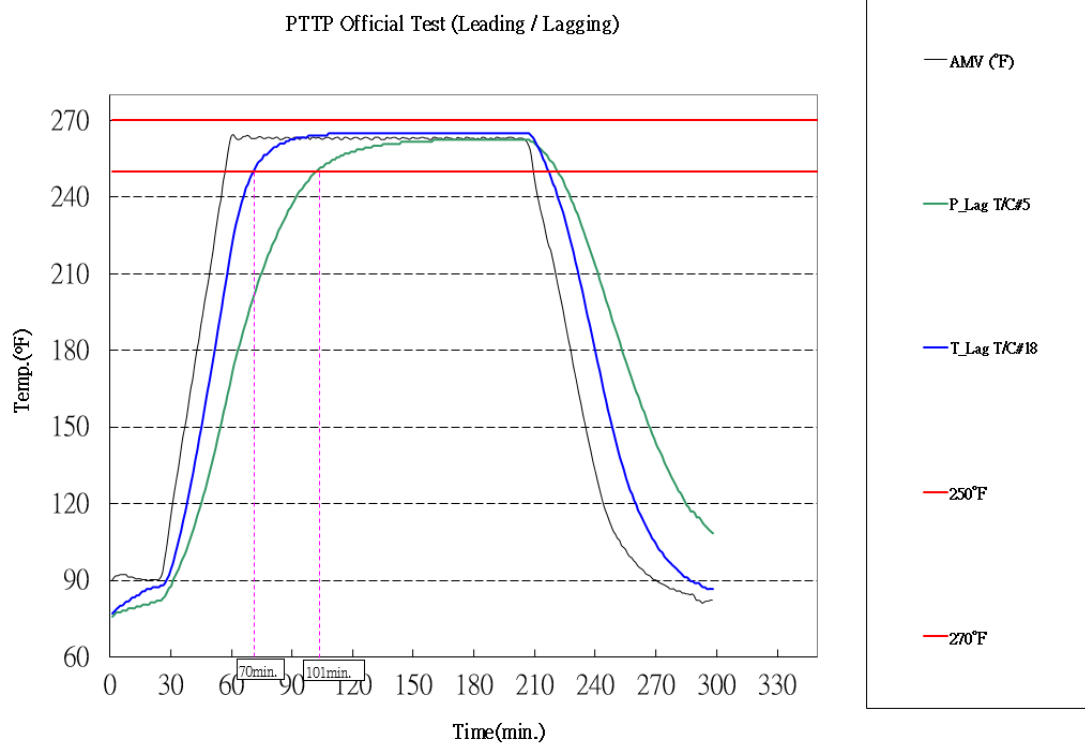


圖 2.20 最快速與最慢點溫度-時間圖

2.4 有限元素軟體 FLUENT 介紹

FLUENT 是以數值方法為基礎的計算流體力學商用軟體，目前以廣泛應用於航空、汽車、水利、電子等產業，FLUENT 廣泛用於模擬各種流體流動、傳熱、燃燒等複雜物理問題，舉例來說，FLUENT 可用於模擬飛機機翼上的空氣流動、管線內部流體的流動、甚至是化學反應等。FLUENT 僅是一個求解器，提供計算的物理模型、施加邊界條件與材料特性、求解和後處理，而 FLUENT 支持的生成網格包括 GAMBIT、Tgrid、ICEM 等軟件。



2.5 材料性質

由於熱壓爐製程中，製程中依照廠商規定的成化曲線由空氣對模具進行加熱，所以材料狀態有固體與流體兩種，而在 FLUENT 中固體材料僅計算熱傳方程式，故只需要輸入密度、比熱與熱傳導係數，但是在流體材料方面多增加了流動計算，所以需要多輸入流體的黏滯係數於模擬中。

2.5.1 固體材料性質

本研究分析所使用到的固體材料有兩種，分別為模具與複合材料，模具材料通常為金屬類，本論文模具材料為 SS400 鋼材，複合材料部份則根據廠商需求進行疊貼，其厚度差異非常的大，如本論文複合材料厚度範圍在 3 mm~21.69 mm 之間，且某些位置還會在內部加上蜂巢使結構強化，由於複合材料屬於混合物，所以材料性質相對模具較複雜，故在後續第五章節再進行介紹，模具材料性質如表 2-1

表 2-1 模具材料性質

材料性質	SS400 鋼材
熱傳導(W/m·K)	16.27
比熱(J/kg·K)	502.48
密度(g/cm ³)	8.03

2.5.2 流體材料性質

流體材料方面，本研究使用空氣進行加熱，而熱壓爐製程中，會施加固定壓力，且過程中溫度會隨著時間改變，這些將對流體性質造成一定的影響，故本研究在 FLUENT 中空氣密度設定為可壓縮之理想器體方程式，空氣密度公式如(式 2.1)，其中 P 為入口邊界上之初始壓力， P_0 為所施加之環境壓力、R 為理想氣體常數、T 為溫度(K)。

$$\rho = \frac{P_0 + P}{\frac{R}{M} \cdot T} \quad (\text{式 2.1})$$

而理想氣體之熱傳導係數及比熱是以分子動力學公式所推導出，其公式如(式 2.2)和(式 2.3)所示，其中 R 為理想氣體常數、M 為氣體分子量， c_p 為比熱。流體黏滯係數採用 Sutherland 由氣體動力學推出的 Sutherland's law，Sutherland's law 定義理想氣體動力黏滯係數與絕對溫度之關係，Sutherland's law 如(式 2.4)與(式 2.5)所示，其中 μ 為動力黏滯係數，單位為 $\text{kg/m}\cdot\text{s}$ ，T 為絕對溫度，S 為 Sutherland 定義之溫度定值， T_{ref} 為參考溫度、 μ_{ref} 為參考溫度下之氣體動力黏滯係數，流體材料設定可由圖 2.21 得知

$$K = \frac{15}{4} \cdot \frac{R}{M} \mu \left[\frac{4}{15} \frac{c_p M}{R} + \frac{1}{3} \right] \quad (\text{式 2.2})$$



$$c_{P,i} = \frac{1}{2} \frac{R}{M_i} (f_i + 2) \quad (\text{式 2.3})$$

$$\mu = \frac{C_1 T^{\frac{3}{2}}}{T + S} \quad (\text{式 2.4})$$

$$C_1 = \frac{\mu_{ref}}{T_{ref}^{\frac{3}{2}}} \cdot (T_{ref} + S) \quad (\text{式 2.5})$$

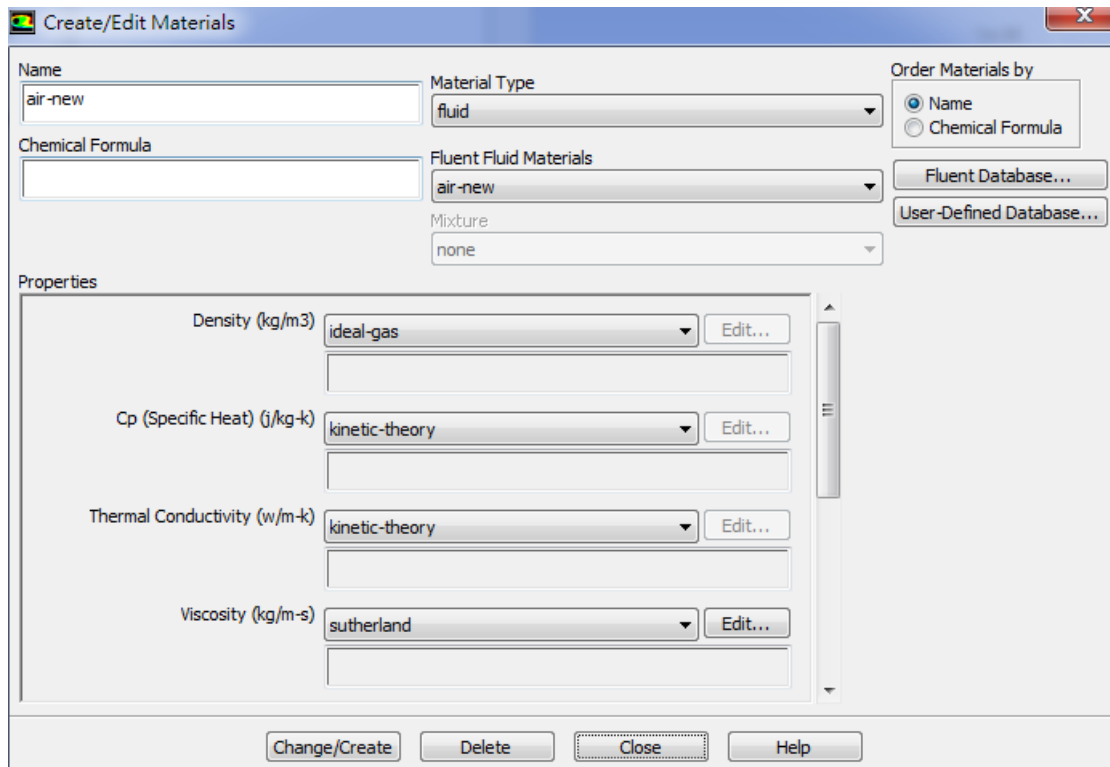


圖 2.21 流體材料卡設定



第三章 初始熱壓爐模型與邊界條件建立

前一章節提到熱壓爐在航太工業製造複合材料上扮演非常重要的角色，雖然熱壓爐外觀看起來都是一個圓柱形容器，但是根據爐內放置模具空間的大小、加熱器的功率、風扇推動空氣的能力等，會造成不同爐體間內部環境有非常大的差異，一般來說，熱壓爐廠商會告知爐體內部哪些區域的加熱會有最好的效果，以及爐體內部環境最大溫差會落在某個範圍內作為驗收標準。本章節將建立熱壓爐模型與模具模型，由於複合材料模型與材料參數建立較複雜許多，將再後續章節再進行討論，故本章先建立單一模具不包含複材熱壓爐成型之熱傳分析，並將實驗結果之模面測量點與模擬結果相同位置之模面測量點進行比較。

3.1 初步模型建立

熱壓爐成型包含了流體與固體兩種材料，在模擬分析中需要分別建立流體網格與固體網格，且流體靠進模具區域又需要另外建立流體邊界層網格，這種網格較能捕捉流體經過模具時所造成的影響。由於模具模面造型複雜且底部肋板為了通風良好而產生之孔洞結構，肋板與肋板間相交所造成的空隙，這些都是造成建立網格上需要花費大量時間，為了建立品質優良的網格，使用 CATIA 軟體進行移除模具導角與填補肋板間的空隙，此舉不但可以使網格質量提昇也能減少網格數量，使後續計算時間可以縮短。

本論文將使用 ICEM 軟體進行固體與流體網格劃分，而 ICEM 特點為可以接受對於非常複雜或是破碎不完整的幾何模型，並提供了多種幾何修補功能，同時也可以輸出網格檔案給近百種求解器，尤其 ICEM 在流體網格劃分方面非常強大，對於模具底部孔洞結構非常多的流體邊界層網格建立有幫助。由於在 FLUENT 軟體中主要檢查網格質量有 Orthogonal Quality 與 Aspect Ratio 共兩種，如圖 3.1，其中 Orthogonal Quality 不可小於 0.01，若是小於 0.01 軟體會出現警告訊息，而 Aspect Ratio 則是根據模擬分析的狀況不同有著不同的標準，一般來說數值越小越容易收斂。質量不好的網格對於模擬精度有很大的影響，甚至無法將網格匯入 FLUENT 進行求解，同時也要能夠控制網格數量，否則計算時間會大量的增加。

ICEM 軟體提供了許多檢查網格質量的方法，首先可以利用 Edit Mesh 面板中的 Display Mesh Quality 選項進行檢查網格，可根據想要檢查的網格類型與網格質量進行選擇，而 ICEM 在 Orthogonal Quality 與 Aspect Ratio 檢查結果皆以 0~1 顯示，數值越靠近 1 代表網格質量越好，如圖 3.2 與圖 3.3 所示。

Aspect Ratio 為檢查四面體之網格質量，定義 $Aspect\ Ratio = \frac{\text{實際四面體體積}}{(\text{外接圓半徑})^3} / \frac{\text{理想四面體體積}}{(\text{外接圓半徑})^3}$ 。Aspect Ratio=1 代表為理想四面體，而 Aspect Ratio=0 則代表此四面體體積為 0，如圖 3.4 所示。

```
Mesh Quality:
Orthogonal Quality ranges from 0 to 1, where values close to 0 correspond to low quality.
Minimum Orthogonal Quality = 1.61759e-01
Maximum Aspect Ratio = 2.47917e+01
```

圖 3.1 FLUENT 軟體檢查網格

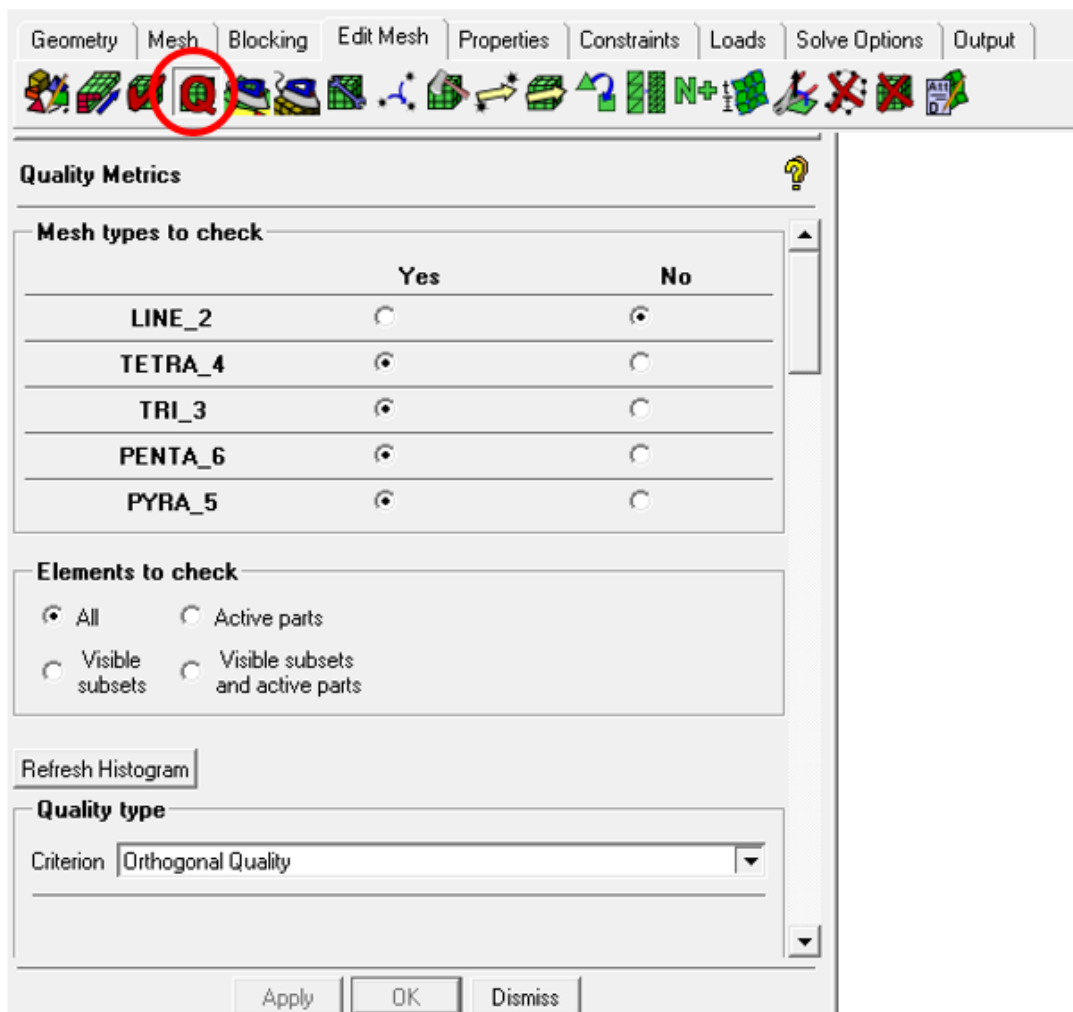


圖 3.2 ICEM 檢查網格面板

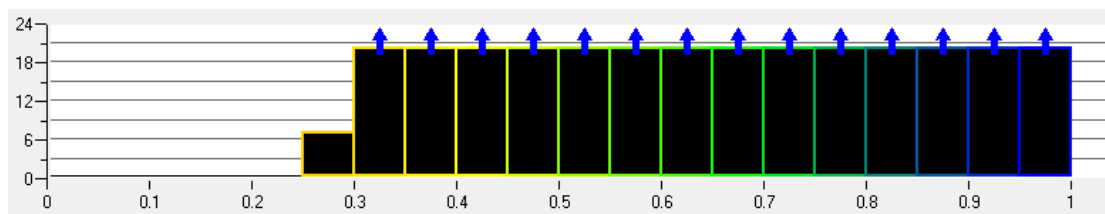


圖 3.3 ICEM 網格檢查結果顯示

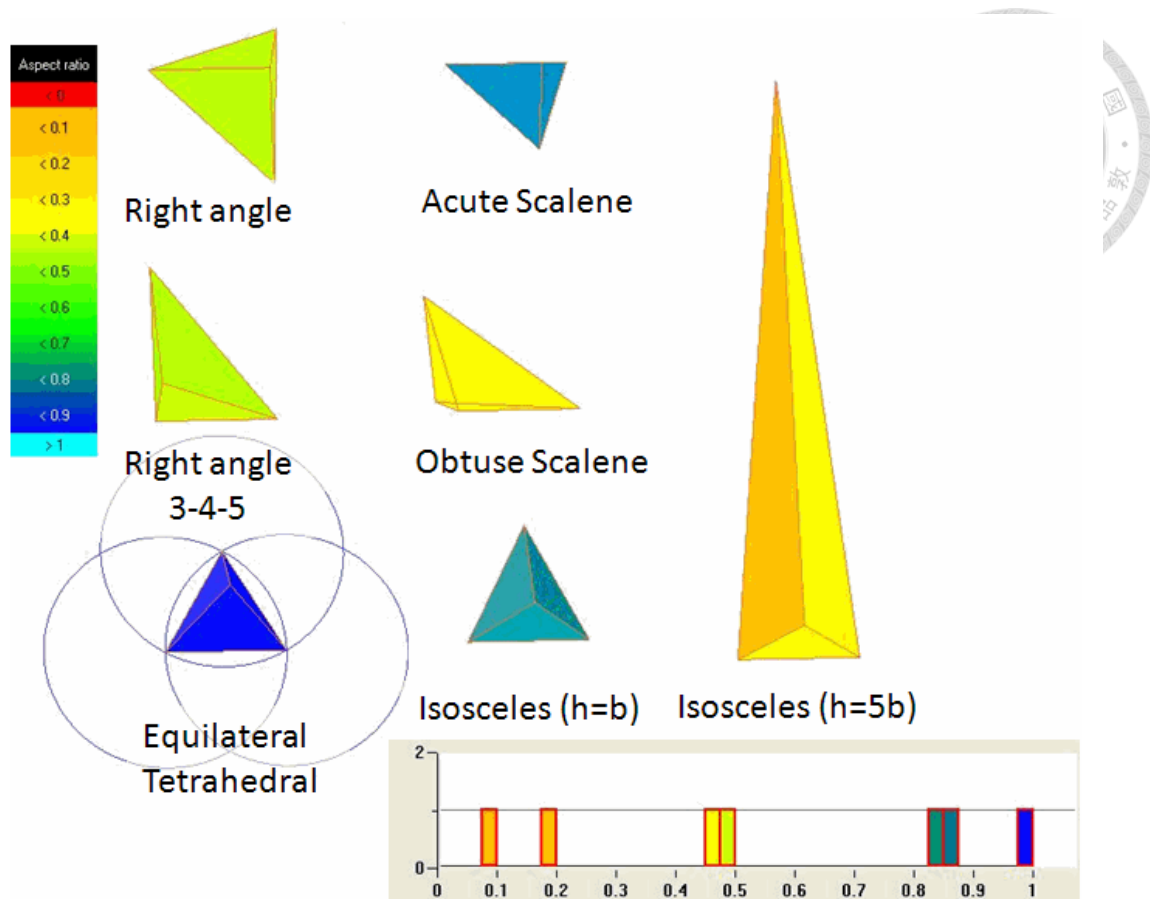


圖 3.4 ICEM 之 Aspect ratio 相對四面體示意圖

3.1.1 模具模型建立

圖 3.5 為本論文研究使用的模具，模具材料為 SS400 鋼材，總重量 890 kg，尺寸長度 3124 mm、寬度 1270 mm 與高度 267 mm，肋條部份由兩種厚度所組成，分別是 9.5 mm 與 6.5 mm，模面厚度最大值為 11.5 mm，而最小值為 5.8 mm。

而模具在熱壓爐內的擺放位置也非常重要，不同的擺放位置將會造成模具完全不同的加熱效果，而本組模具放置在模具重心與進風口相距 2250 mm 以及高度 620 mm 的架子上面，熱壓爐的架子設計上為了讓熱風順利通過，架子上面有非常多的孔洞設計，如圖 3.6，造成

了在建網格上增加許多困難度，故本章模擬先忽略了放置模具的架子對於模具加熱的影響，詳細的模具擺放位置如圖 3.7。模具採用實體元素劃分網格，總網格數目為 888,696 個，模型如圖 3.8 所示。

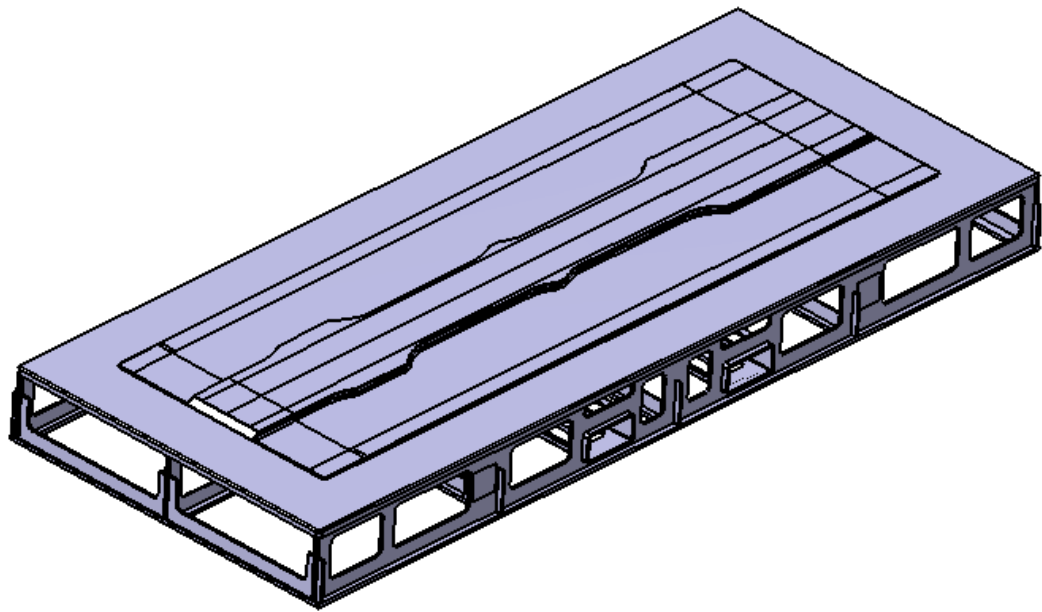


圖 3.5 本論文之模具

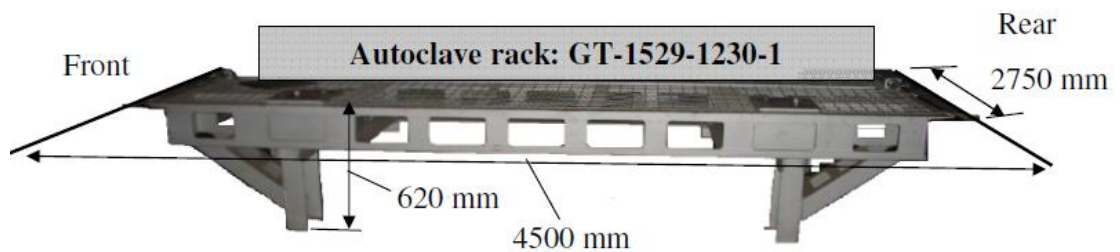


圖 3.6 熱壓爐架子

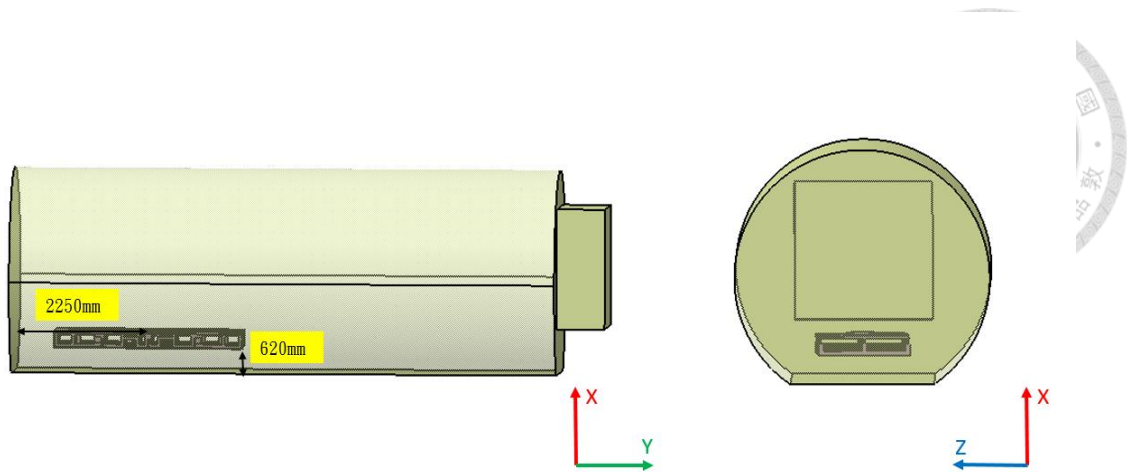


圖 3.7 模具於爐內之位置

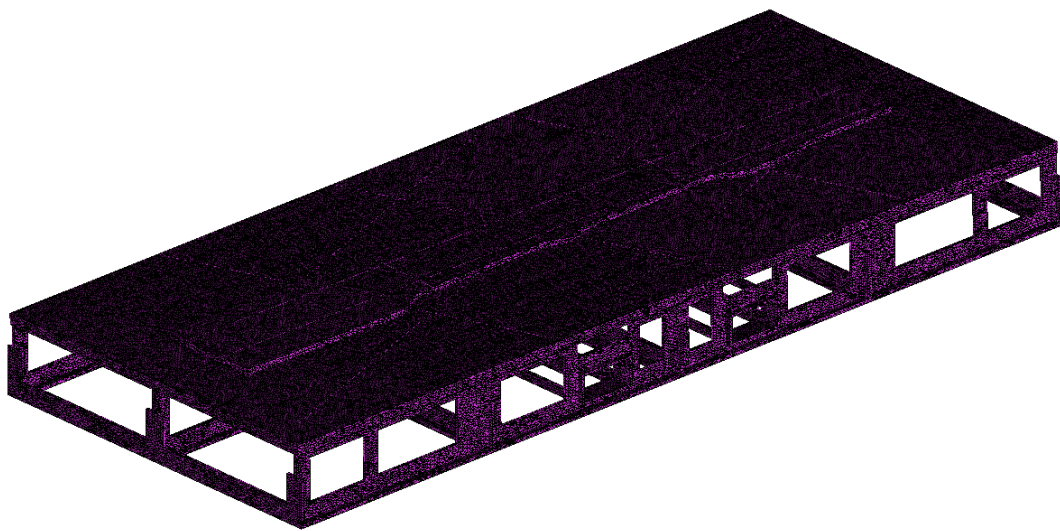


圖 3.8 模具分析模型

3.1.2 初始熱壓爐分析模型建立

如圖 3.9，本論文之熱壓爐製造商為 OLMAR，尺寸長度約 9000 mm、寬與高各約 3600 mm，其中通風口形狀為門字型，另外放置模具平台下方也是通風口，通風口通道寬度為 150 mm，出風口形狀則

為正方形，可提供最大壓力 1000 kPa(150 psi)與最大溫度 315 °C(600 °F)，其中可測量 60 個熱電偶升溫情形與 60 個壓力管線可安裝於模具上的真空閥。

由於熱壓爐內部風扇、加熱器以及通風口內部有安裝許多管線，造成了建立完整熱壓爐模型上需要花費大量時間，為了不使模擬求解時間過長，本論文初步建立單一圓柱狀結構為初始熱壓爐模型，如圖 3.10 所示。使用 Tetra 進行流體網格建立，並將流體靠近模具之區域建立 Prism 邊界層網格，如圖 3.11 所示，同時也加密了靠近模具之流體網格，目的為了防止模具附近的流場變化較其他區域大造成發散，如圖 3.12，最後流體網格數為 2,748,704 個，如圖 3.13。

Autoclave specifications	
Autoclave designation	(32013993)
Dimension	3660 mm(D) 9144mm(L)
Manufacture	Olmar
Pressure(psi)	150
Temp.(°F)	600
T/C	60
Vacuum Source	60
Type	Electrical
Certified Temperature Range	240/375°F +10/-5°F at 100psi



圖 3.9 合作廠商提供之 OLMAR 熱壓爐規格

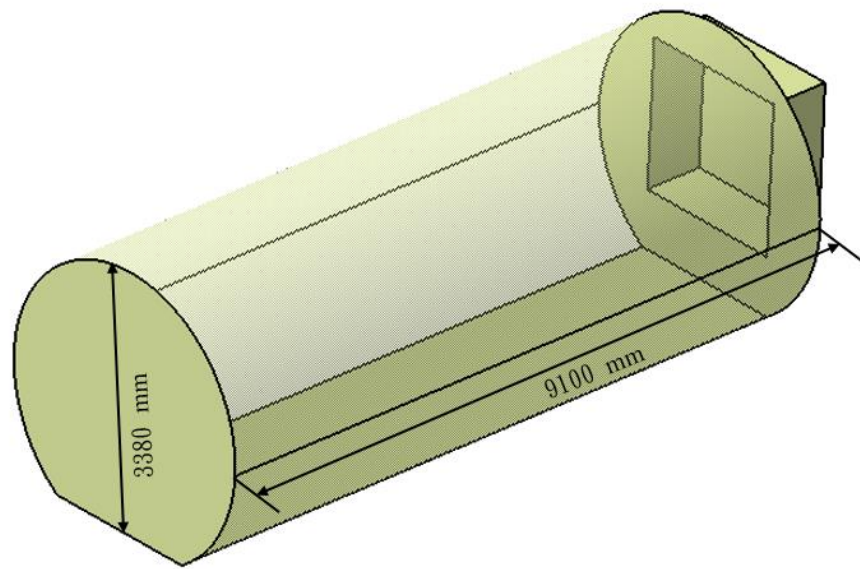


圖 3.10 熱壓爐初始模型

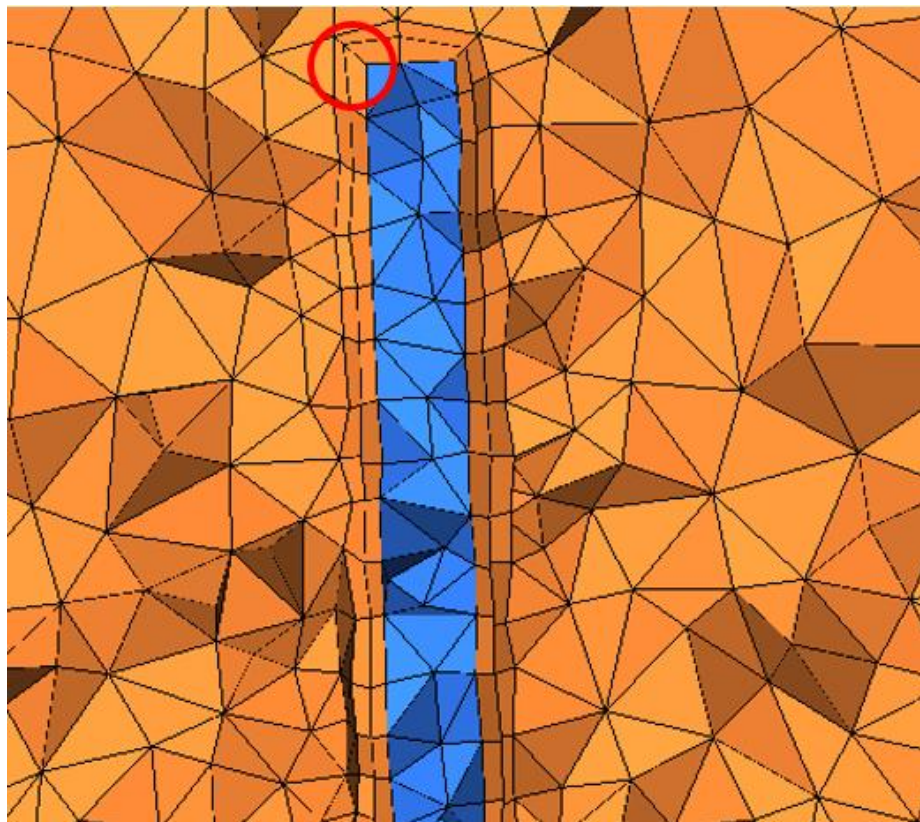


圖 3.11 邊界層網格

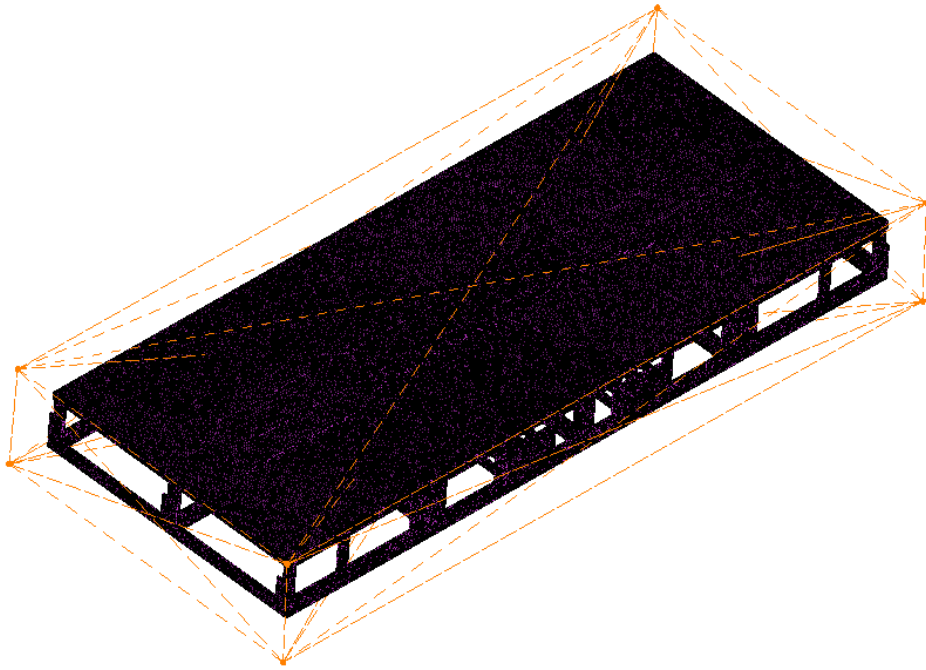


圖 3.12 流體網格加密

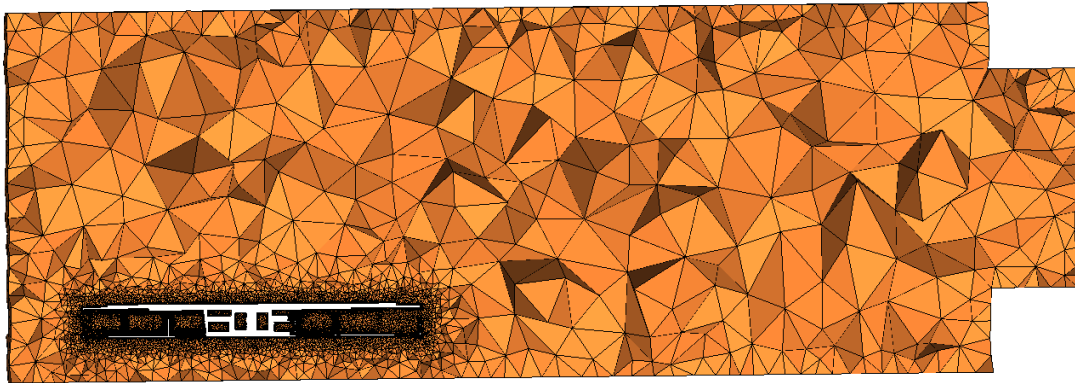


圖 3.13 流體區域網格



3.1.3 模擬時間探討

由於熱壓爐製程中是隨著成化曲線進行製造，而成化曲線中有加熱、保溫與降溫三個階段，換句話說熱壓爐內部狀態隨著時間改變會有非常大的差異，所以熱壓爐製程在 FLUENT 分析中屬於暫態分析，由於熱壓爐成型通常需要花費數幾個小時才能完成，且模具與熱壓爐尺寸非常巨大，若要完整模擬熱壓爐成型流程，在硬體達到極限狀態下仍需要花費 10 天以上，而在複合材料熱壓爐成型經驗上來說，通常零件無法通過的主要原因為前面升溫階段無法平均加熱模具與複材，所以為了加快分析時間，後續模擬僅分析到第 165 分鐘，也就是升溫階段結束到了保溫階段。此外設定每一步要跑多少時間是非常重要的參數，設定一步太少會導致分析時間過長，而設定太多則會導致分析過程中產生發散。

在 Time Step 設定時，軟體內有用來計算合適大小的 Time Step 之公式，但由於熱壓爐內部流速非常複雜，以至於無法套用公式，一般來說越小的 Time Step 對於模擬收斂是越有幫助。本論文採用試誤法進行探討，由圖 3.14 比較最快升溫點與最慢升溫點實驗值與模擬值，可以看出當步長由 100 s 減少至 5 s 時，模擬結果(圖中虛線)有越來越接近實線也就是實驗值的部份，雖然步長為 20 s 時最快升溫點已經逼近實驗值，但是最慢升溫點還是有一定誤差，故後續模擬將以步長為 5 s 進行設定，步長與模擬時間的關係可參考表 3-1。

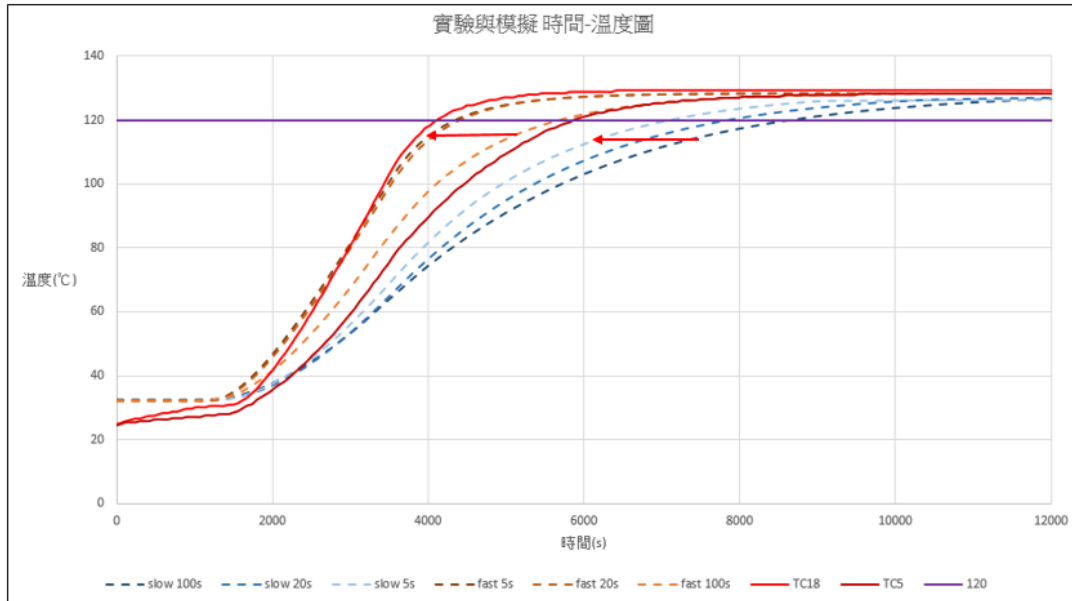


圖 3.14 模擬與實驗之溫度-時間圖

表 3-1 步長設定之影響

Time step	實驗最快點之溫度誤差	模擬計算時間
100 s	17%	1 天
20 s	4%	2 天
5 s	3%	4 天

3.1.4 第一版熱壓爐邊界條件

熱壓爐成形過程中，採用廠商建議平均流速為 2m/s 之熱風由進口端沿著+ Y 方向穩定吹入，同時假設進口端每個位置溫度相同，而進口端熱風溫度會隨時間變化之溫度曲線，此邊界條件為第一版本，如圖 3.15，爐體內部維持一定壓力進行熱壓成形，如圖 3.16 所示。

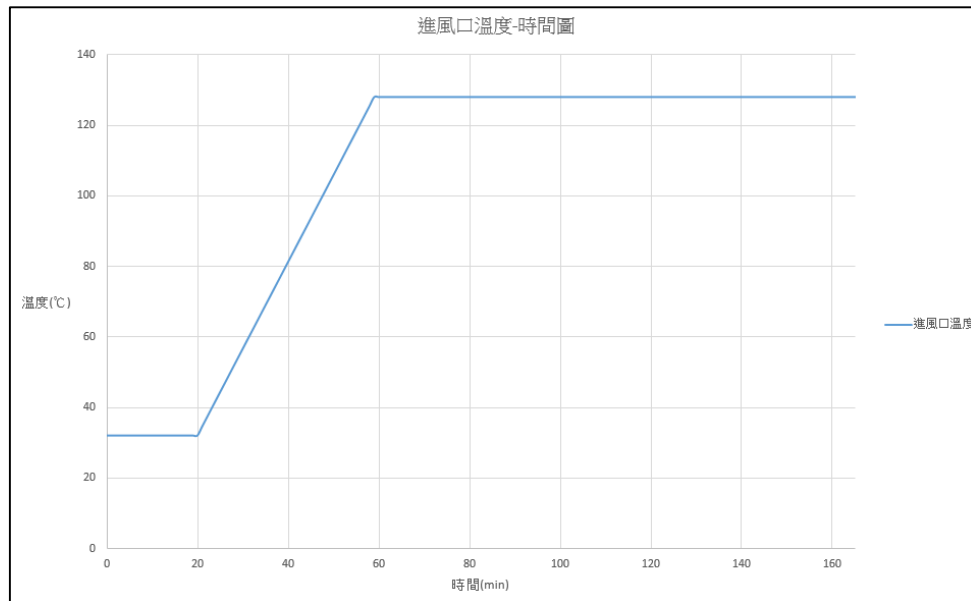


圖 3.15 施加進風口之溫度-時間圖

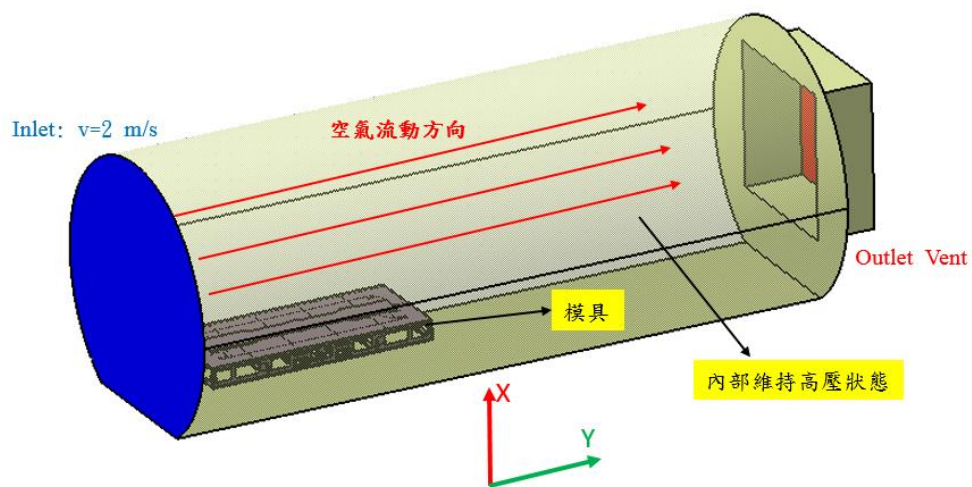


圖 3.16 第一版邊界條件示意圖

3.2 第一版模擬結果與實驗驗證



本小節將在模擬中檢視模具前段、中段與後段以及左邊、中間和右邊共 9 個測量點所對應之實驗測量點，而在模具中段之中間測量點實驗只有複材測量點，故模擬中先以同樣位置之模具測量點代替進行比較，比較的測量點有 TC 16、TC 17 與 TC 18 位於模面上靠近進風口側，TC 21、TC 5 與 TC 22 位於模具中段部分，離進風口最遠測量點為 TC 25、TC 27 與 TC 26，測量點詳細位置如圖 3.17 所示。

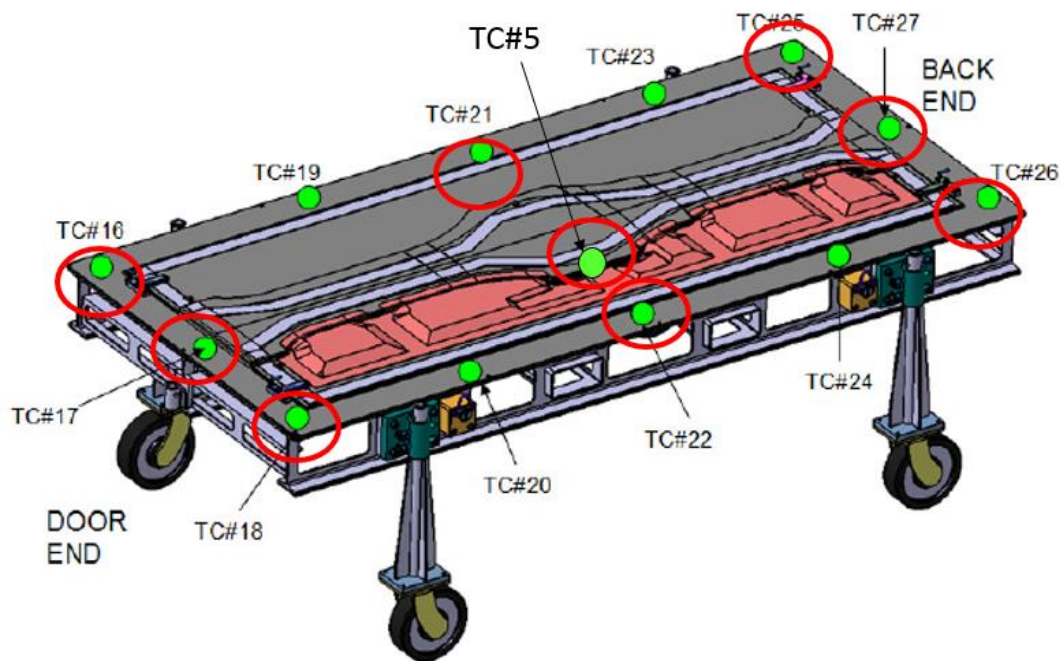


圖 3.17 模擬與實驗比較之測量點位置

首先查看模擬第 70 分鐘(實驗中最快到達成化溫度時間)模具的升溫狀況，模具表面溫度分布有離進風口越遠溫度越低的狀態，另外模具表面凸起的部份相對低溫，而 TC18 溫度介於 108~113 °C，並沒有達到成化溫度，如圖 3.18。接著查看模擬第 101 分鐘(實驗中最慢到達成化溫度時間)模具的升溫情形，模具最低溫發生在模面凸起部份的尾端，另外此時的 TC18 已經超過了成化溫度 120 °C，但是模擬中的 TC5 確只有 100 °C 左右的溫度，並沒有像實驗值一樣已經到達成化溫度，如圖 3.19。由圖 3.20 比較可以發現模擬中模面前段與中段預測中間測量點為最慢點，與實驗有著相同的結果，但是整體來說模擬中測量點有離進風口時間誤差越來越大的趨勢。

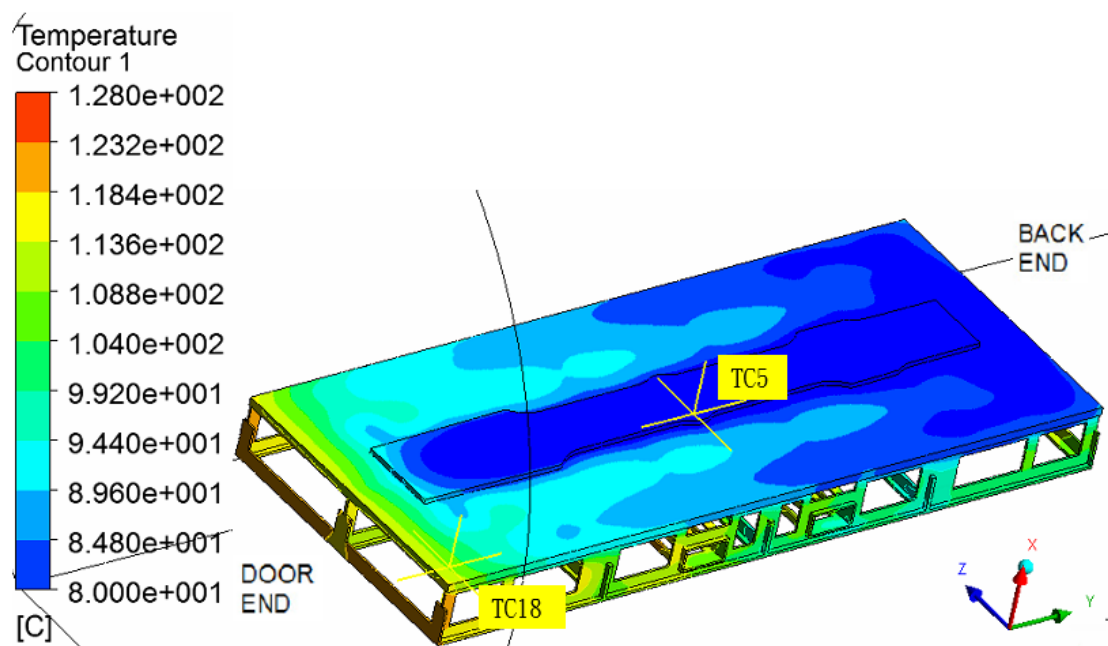


圖 3.18 第一版之第 70 分鐘模具溫度分布圖

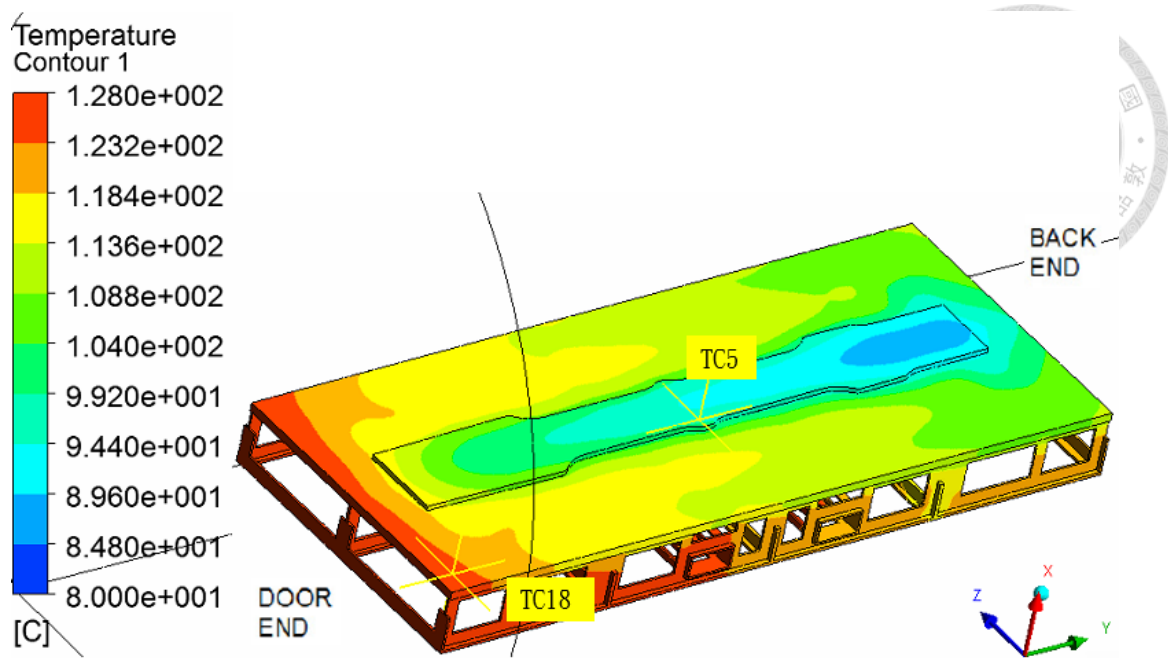
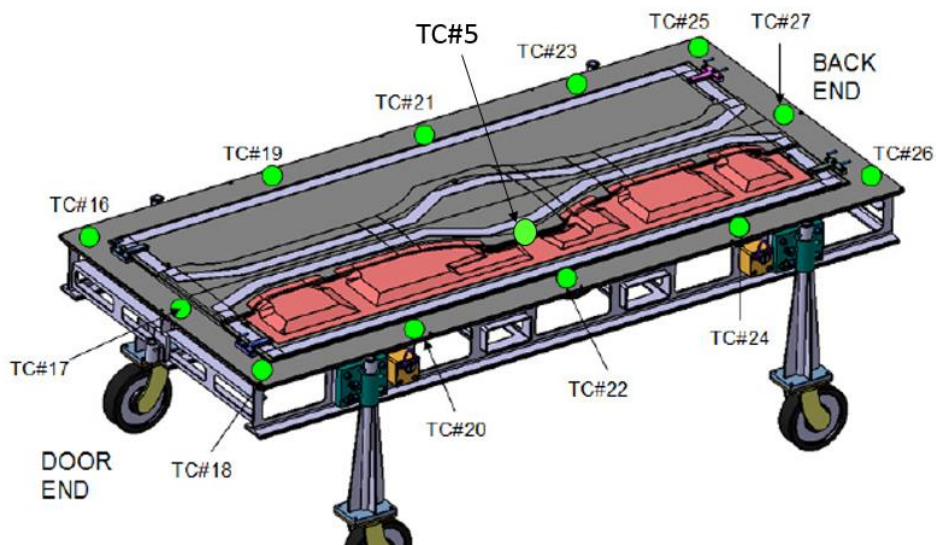


圖 3.19 第一版之第 101 分鐘模具溫度分布圖



前段	實驗	模擬	中段	實驗	模擬	後段	實驗	模擬
TC16	73分	86分	TC21	84分	120分	TC25	85分	132分
TC17	77分	91分	TC5	105分	157分	TC27	84分	133分
TC18	70分	85分	TC22	86分	120分	TC26	85分	140分

圖 3.20 第一版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較

3.3 進風口邊界條件探討

由前面模擬結果發現，模具升溫情形為離進風口越遠溫度越低之趨勢，同樣模擬結果到達時間之誤差也有遠離進風口誤差越大趨勢，由前段 20% 擴大至 65%。本小節將根據文獻中得到的實驗測量結果，採用進風口劃分方式進行改善，圖 3.21 為引用瑞典 Luleå University of Technology 所測量出的熱壓爐內部流速圖，他們將可移動式平台設為基準點，可以發現靠近平台與頂端這兩個部份流速非常的小，另外也可以看出流速最快的部份不是在爐體正中央，而最快的流速是 2.2 m/s 也大於熱壓爐廠商所給予的平均流速 1.4 m/s。然而本論文爐體高度為 3600 mm，故將此組實驗數據所劃分的高度等比例放大 1.5 倍，分為四個部份由低到高分別分別給予 0.3 m/s、2.2 m/s、1 m/s 和 0.3 m/s 之流速於模擬邊界條件，此進風口改良之邊界條件為第二版，如圖 3.22 所示。

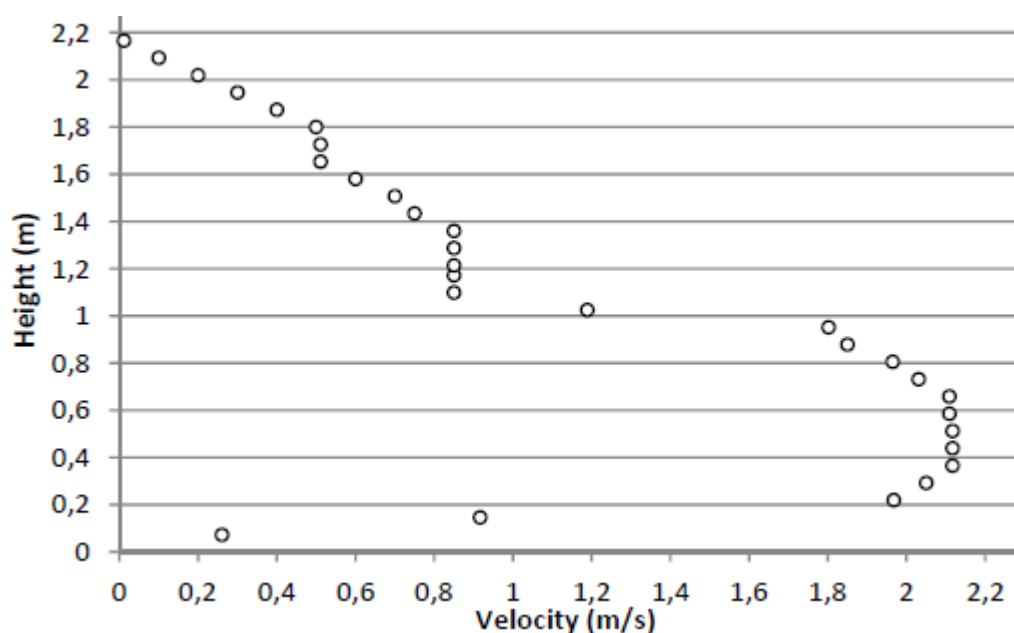


圖 3.21 不同高度所測得之流速值[16]

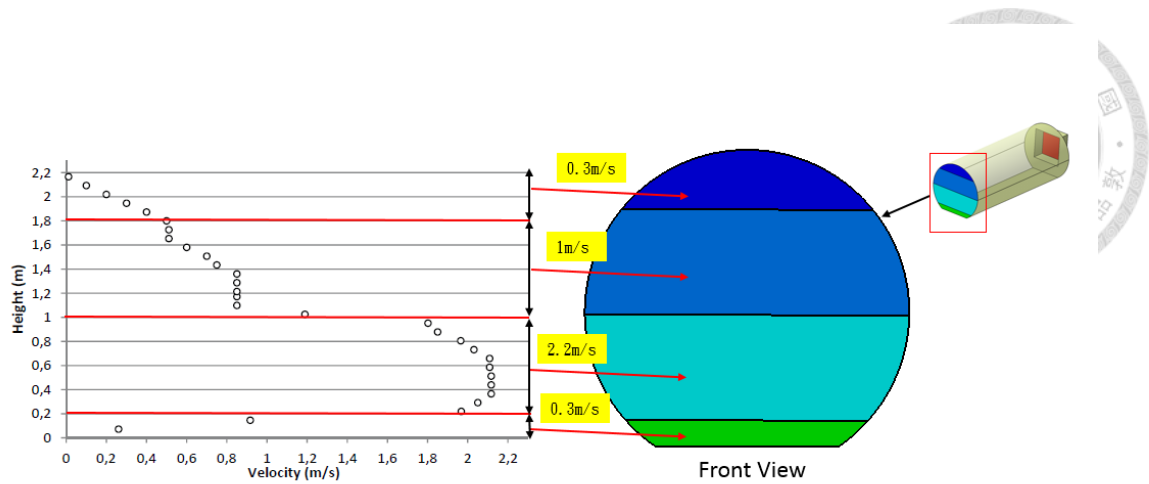


圖 3.22 進風口隨高度變化之模擬設定

3.4 第二版模擬結果與實驗驗證

本模擬為改變進風口流速設定方式，希望透過代入熱壓爐內流速實驗測量值，能夠使模擬更符合實際爐體內部加熱情形。模擬結果顯示第 70 分鐘與第 101 分鐘時的溫度分布情形與前面模擬都相同，都是離進風口越遠溫度越低，且到達成化時間之誤差有越來越大的趨勢，改變的效果不大，甚至加熱效果較第一版差，原因可能為不同爐體所得到的實驗測量數據差異會很大，如圖 3.23 和圖 3.24 所示。

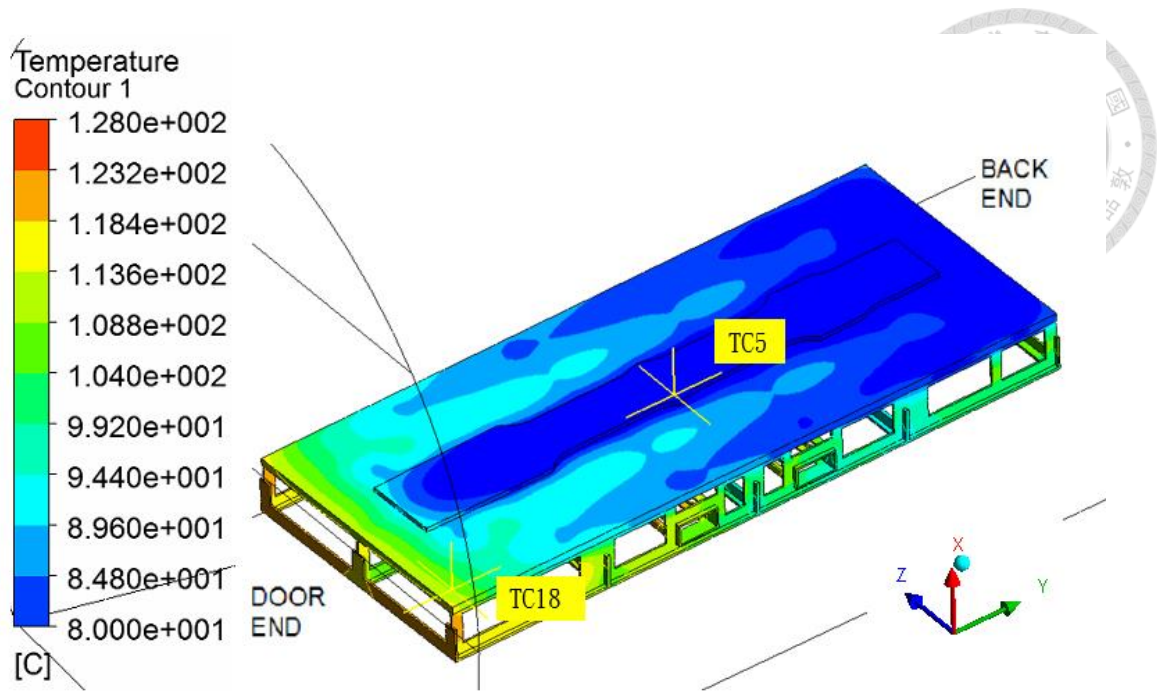


圖 3.23 第二版之第 70 分鐘模具溫度分布圖

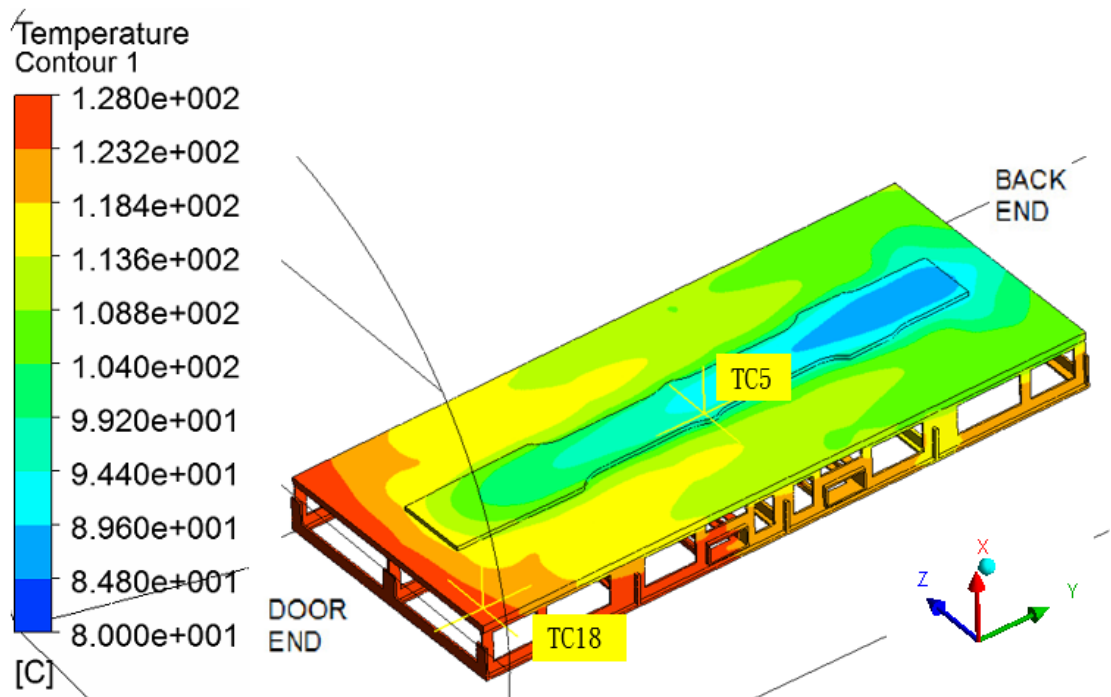


圖 3.24 第二版之第 101 分鐘模具溫度分布圖

3.5 小結

本章節所建立之初始熱壓爐模型與兩組進風口邊界條件都無法改善離進風口端越遠的測量點，有到達成化溫度時間之誤差越來越大之現象，但實驗中卻顯示模具模面中後段幾乎是同時間到達成化溫度，造成了此組熱壓爐分析模型無法預測實際模具模面升溫情形。最後在 OLMAR 熱壓爐廠商的網站找到了他們所展示的空爐模擬後處理結果，可以發現廠商所建立的熱壓爐模型有包含風扇、加熱器與通風道，而空爐模擬結果顯示爐體內部流場呈現非常混亂的狀態，如圖 3.25 所示。使用後處理將第一版與第二版爐體內部流場進行輸出，發現了兩組模擬結果流場在任何時間都呈現平穩的一直線狀態由進風口端流出至出風口端，第二版邊界條件僅改變了熱壓爐內部流速隨高低有產生變化，如圖 3.26 與圖 3.27 所示，透過與原廠相互比較，本章節建立的熱壓爐模型與進風口邊界條件無法完整模擬實際熱壓爐作動之情況。

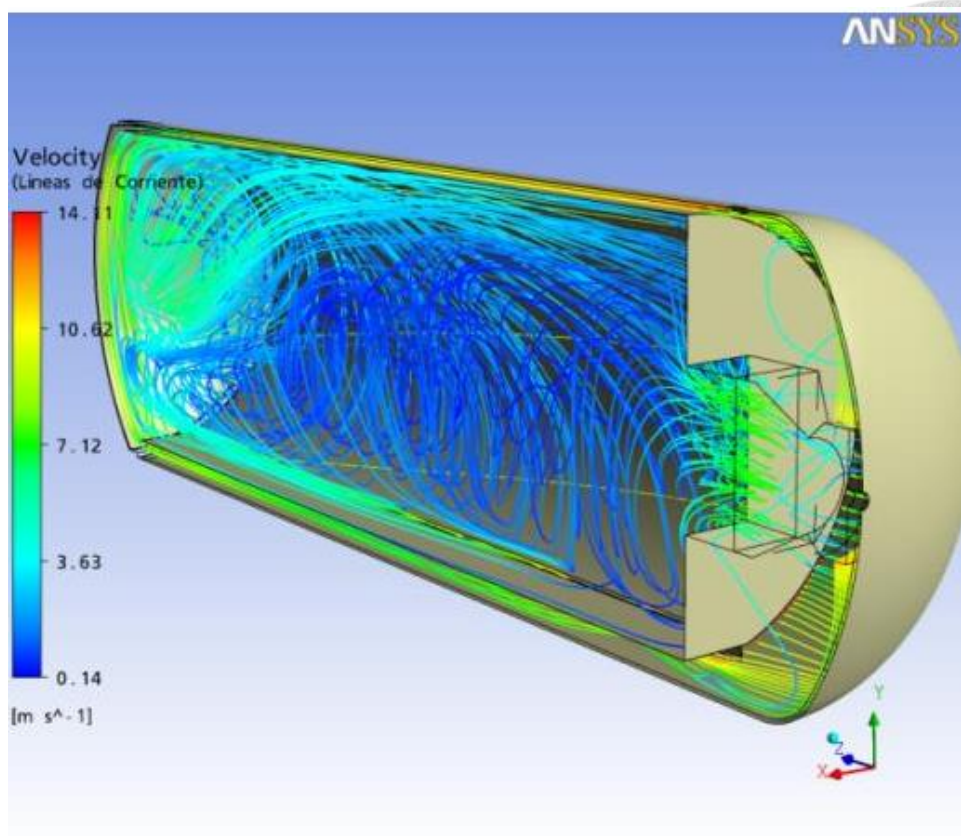


圖 3.25 OLMAR 熱壓爐廠商之 CFD 分析結果

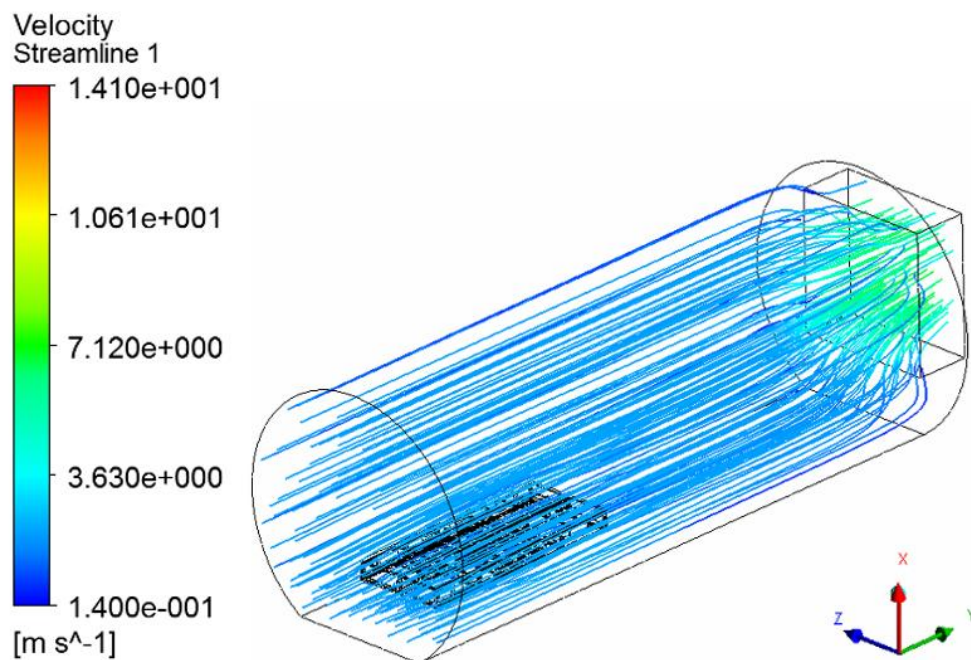


圖 3.26 第一版之流速圖

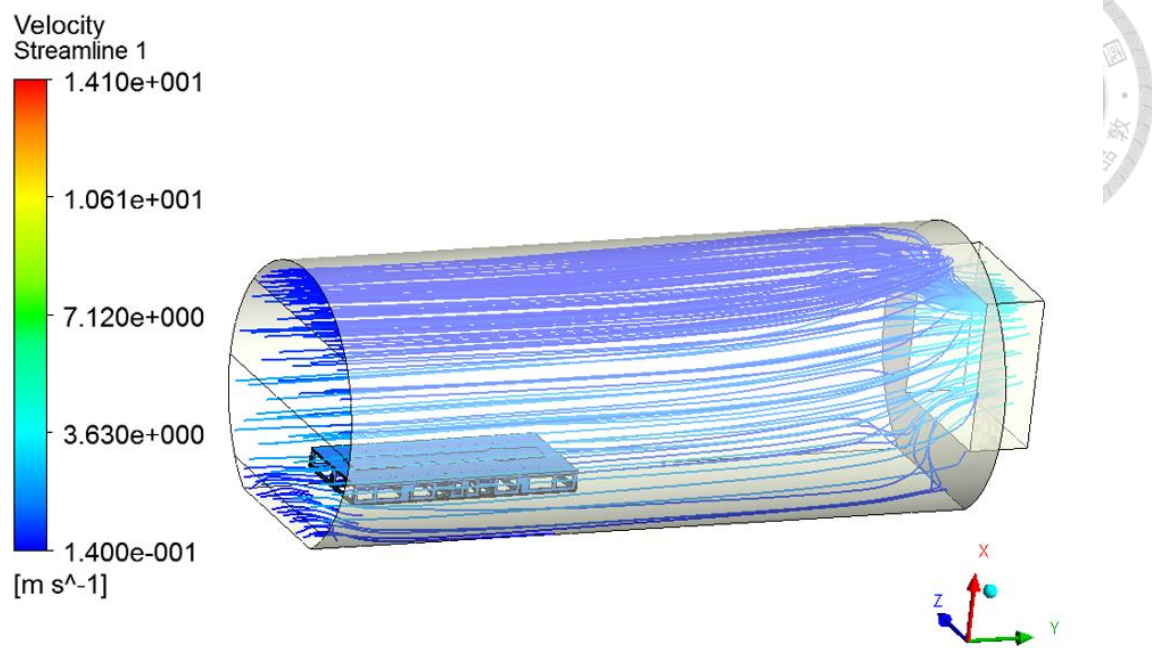


圖 3.27 第二版之流速圖



第四章 改良熱壓爐模型與邊界條件建立

在第三章初步建立之熱壓爐模型與邊界條件無法完整描述熱壓爐成型中爐子運轉情形，故在本章節將進行熱壓爐模型改良與建立新的邊界條件進行模擬，主要改良方法為參考熱壓爐廠商提供之結果圖，將改良的熱壓爐模型與邊界條件進行加熱單一模具不含複材之 CAE 熱傳分析，再與實驗值進行比較。

4.1 改良熱壓爐模型建立

根據廠商提供模擬結果圖可以發現，熱風經由爐門反射後吹入爐內就已經有非常混亂的流場，且風速方向也不是每個區域都往+Y 方向，也就是說前面模擬假設進風口區域熱風沿+Y 方向穩定吹入是錯誤的假設，因此在改良初始熱壓爐模型時，需要將爐門的部份加入至模型中，而爐門內部根據設計需求可設計不同的曲面造型，如圖 4.1 所示，同時發現原廠熱壓爐模型中忽略了通風道內部配置管線，也就是沒有阻礙流體流動的物體在裡面，所以可以假設通風口每個區域都可吹出相同速度且穩定的熱風，因此改良熱壓爐模型將進風口的位置改變至通風口，如圖 4.2。

在網格建立方面，由於在爐門附近流場變化較大，流體網格加密需要多增加在爐門與通風口之間的流體區域，如圖 4.3 所示，最後建立完成的流體網格有 3,595,187 個，如圖 4.4 所示



圖 4.1 爐門內部曲面造型

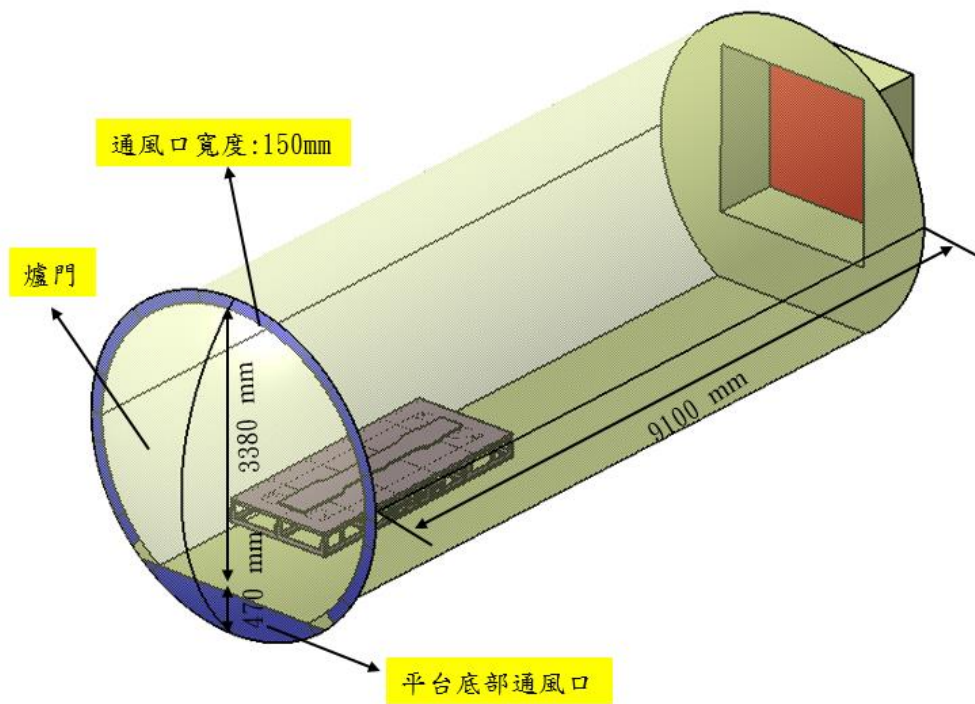


圖 4.2 改良熱壓爐模型

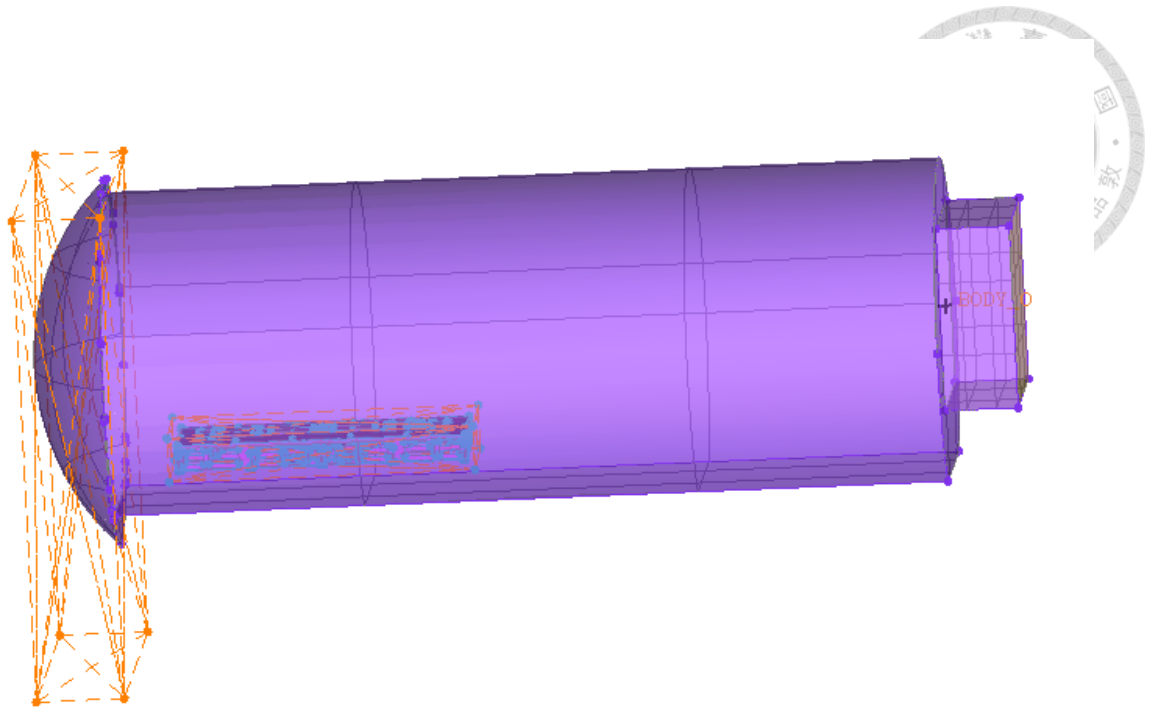


圖 4.3 流體網格加密區域

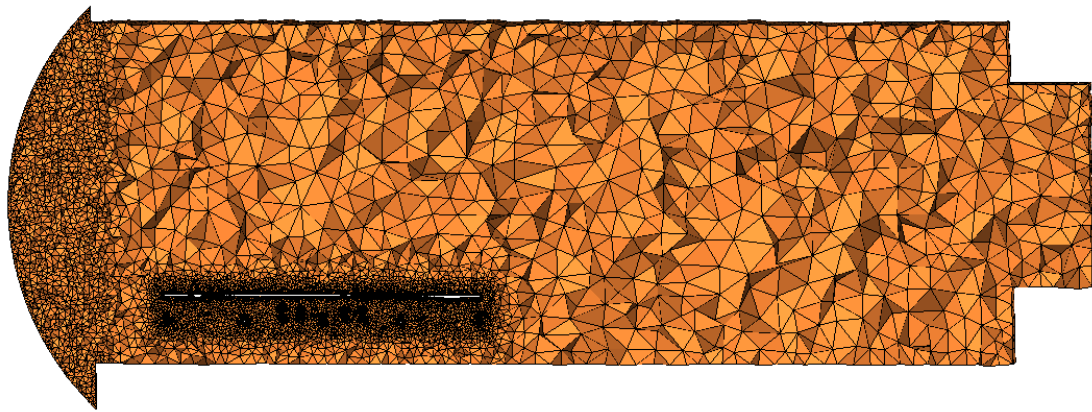


圖 4.4 改良熱壓爐之流體網格



4.2 改良熱壓爐邊界條件

由於前面改良模型建立時，進風口的邊界條件改變了，因此在通風口流速需要另外計算，在關閉爐門的情形下，假設爐體內部體積不變，熱風由原始進風口流入的量等於熱風從通風口流出的量，也就是套用了(式 4.1)公式進行運算，最後計算出通風口流速為 6.7m/s，沿著 - Y 方向吹出通風口後經由爐門反射至放置模具區域，其他邊界條件與前面設定相同，假設每個通風口區域之熱風溫度相同，且在通風口施加相同的溫度曲線，內部同樣維持相同壓力條件下進行模擬，此組邊界條件為第三版本，如圖 4.5 所示。

$$Q = V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (\text{式 4.1})$$

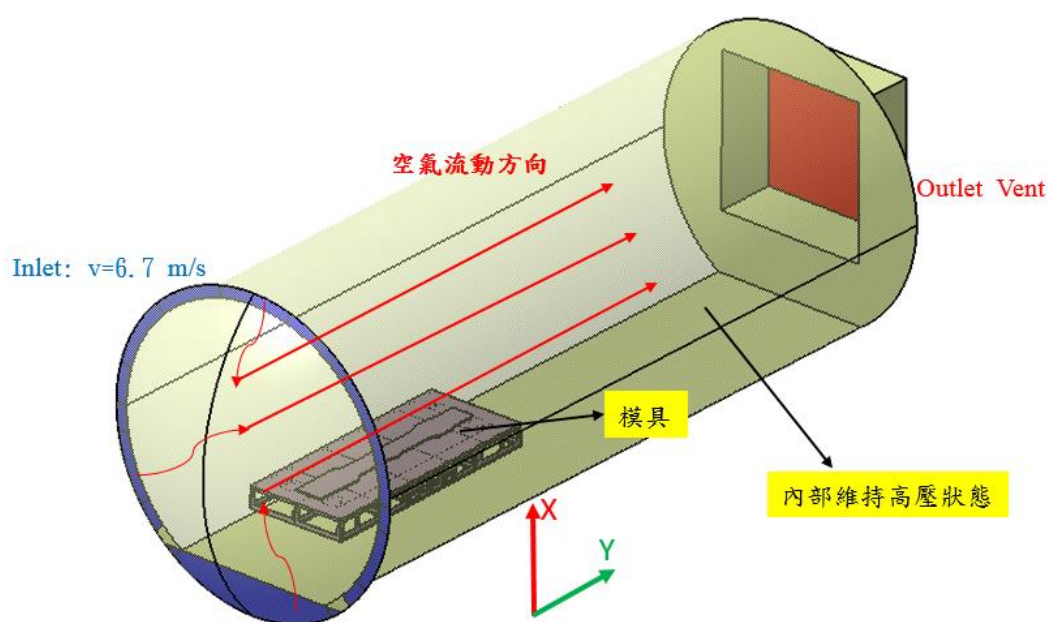


圖 4.5 第三版邊界條件示意圖



4.3 第三版熱壓爐空爐狀態模擬

在進行單一模具熱壓爐成型之 CAE 熱傳分析前，先使用前面小節所討論的改良熱壓爐模型與邊界條件進行空爐狀態的模擬，圖 4.6 為模擬後處理輸出之空爐流場，可以發現與原廠結果類似，從通風口吹出熱風經過爐門後，靠近底部平台的部份呈現漩渦狀的往出風口流去，而靠近頂部的部份則是呈現平滑曲線往出風口流去，因此這種改良熱壓爐模型與邊界條件設定是可以模擬實際爐子作動情形。

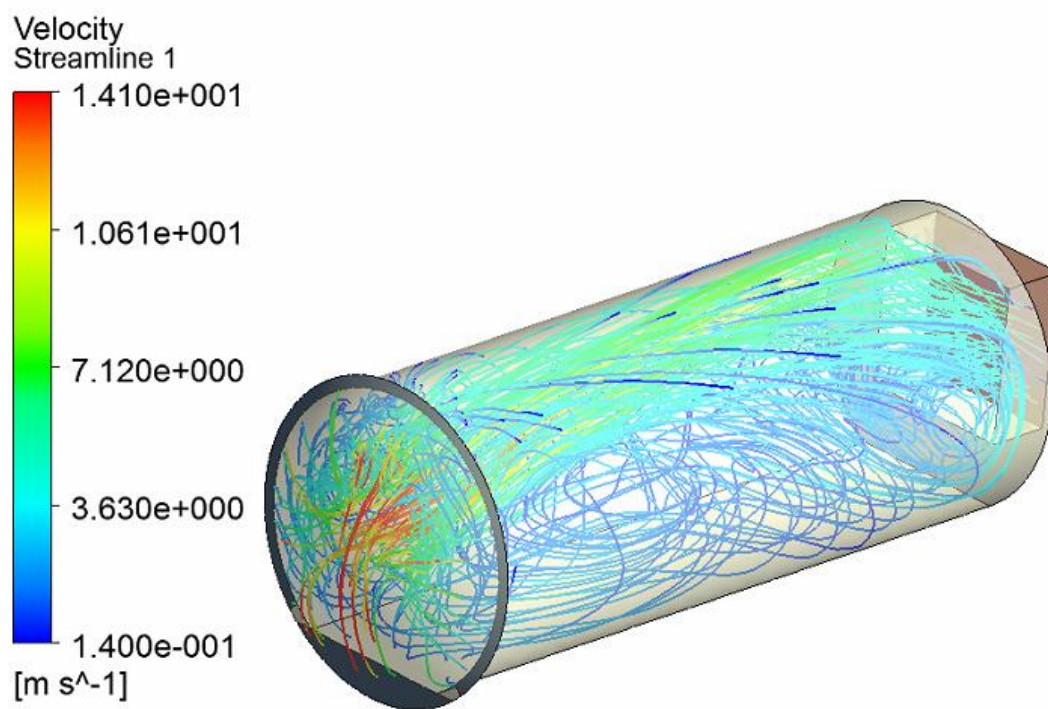


圖 4.6 第三版空爐流場情形



4.4 第三版模擬結果與實驗驗證

同樣也查看模擬第 70 分鐘與第 101 分鐘之模具升溫狀況，第 70 分鐘時模具表面溫度隨著進風口距離越遠溫度越高的趨勢，結果與第一版和第二版的溫度分布結果呈現的狀態完全相反，但相同之處是模面表面凸起處相對其他區域低溫，此時 TC18 測量點溫度介在 99~104 °C 之間，並沒有達到成化溫度，如圖 4.7。在模擬第 101 分鐘，模具最低溫發生在靠近爐門端的模具表面凸起處，將第一版與第三版相互比較，第三版的最低溫度相對較高，也就是說第三版這組分析模型的加熱效果較佳，如圖 4.8。圖 4.9 觀察得到模擬中顯示了測量點到達成化溫度的時間將隨著離爐門的距離越遠而越快到達，同時也發現了第三版模具測量點最快與最慢到達成化溫度時間差為 33 分鐘是小於第一版的 55 分鐘，但是模面升溫狀況與實驗比較卻產生了完全相反結果。最後查看爐內流場情形，爐體內部流場較第一版與第二版混亂許多，另外爐體內部有越靠近頂部風速越快之趨勢，如圖 4.10。

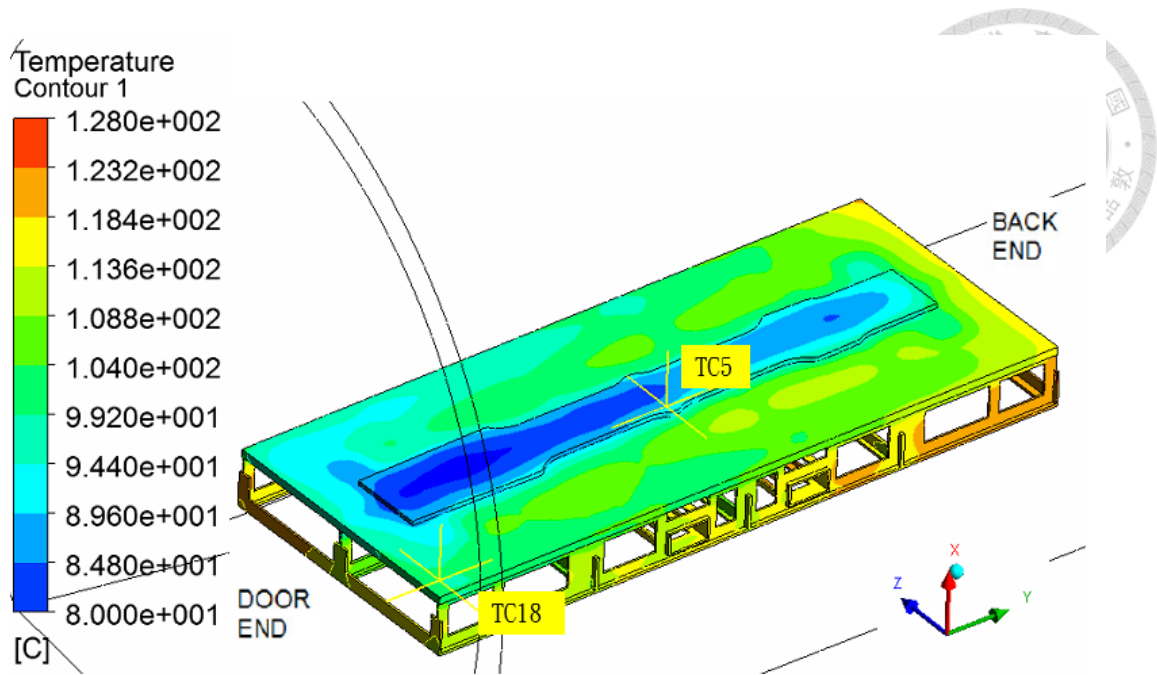


圖 4.7 第三版第 70 分鐘模具溫度分布圖

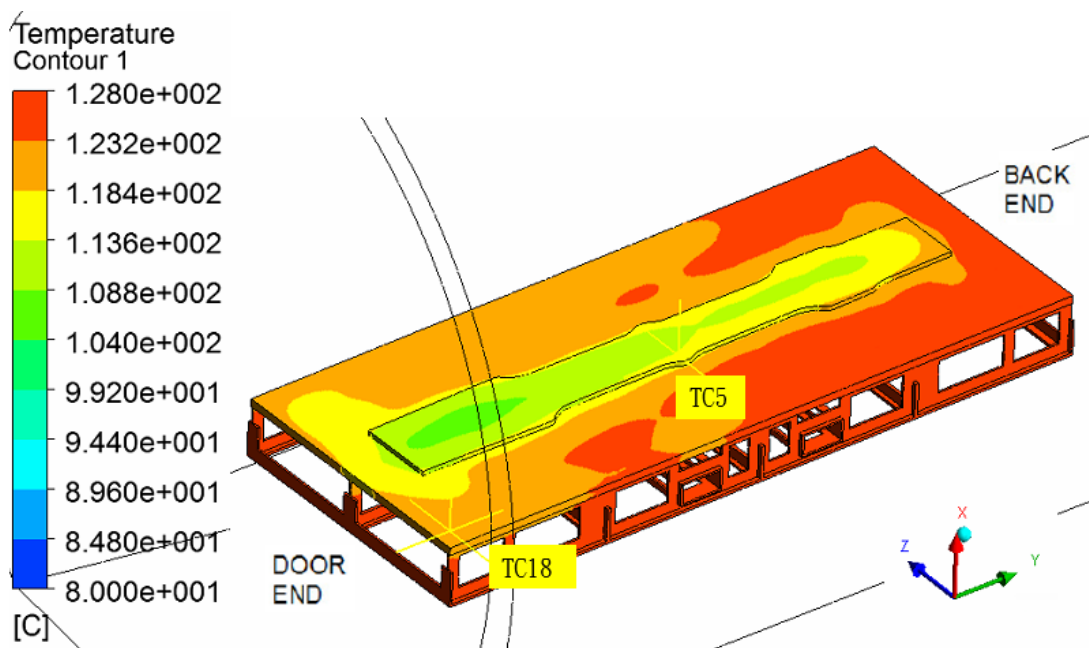
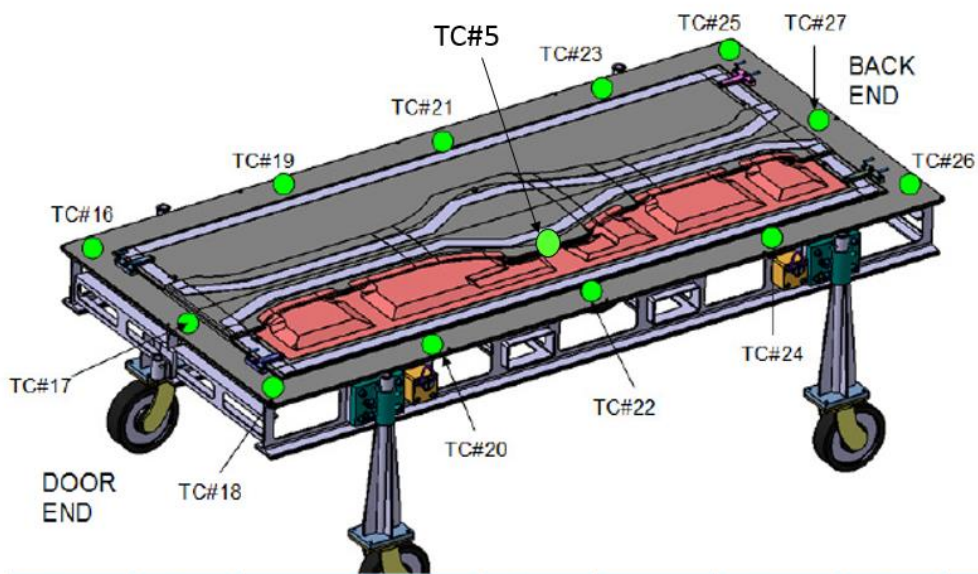


圖 4.8 第三版第 101 分鐘模具溫度分布圖



前段	實驗	模擬	中段	實驗	模擬	後段	實驗	模擬
TC16	73分	103分	TC21	84分	97分	TC25	85分	78分
TC17	77分	111分	TC5	105分	111分	TC27	84分	79分
TC18	70分	99分	TC22	86分	92分	TC26	85分	81分

圖 4.9 第三版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較

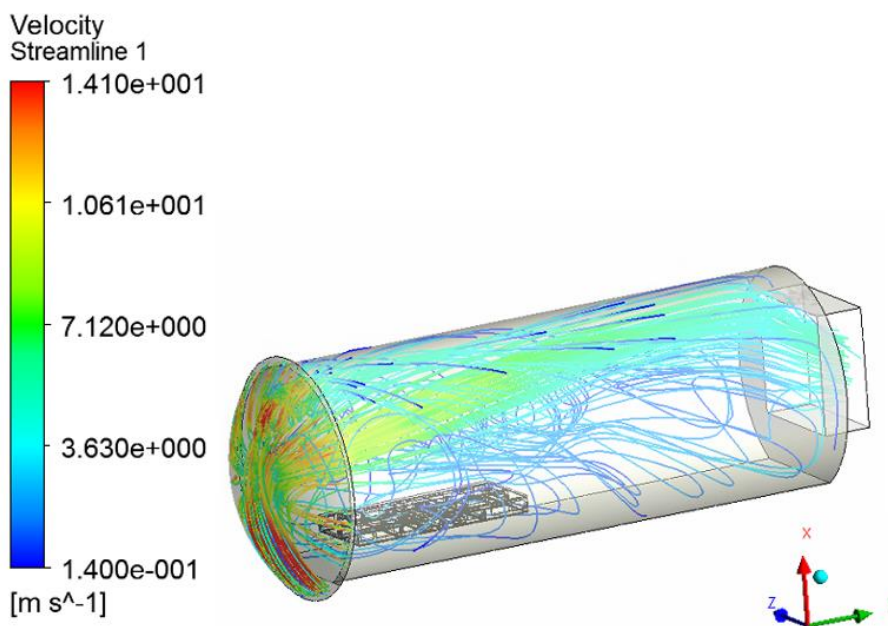


圖 4.10 第三版爐內流場情形



4.5 通風口邊界條件探討

由第三版空爐分析時結果顯示的爐內流場，較接近原廠模擬中的爐內部流場情形，但是在進行模具加熱 CAE 熱傳分析時卻發生了與實驗結果截然不同的升溫情形，也就是說考慮了爐門對於爐內流場的改變有很大的幫助，但是在進風口邊界條件仍然需要進行探討。前面進風口假設在忽略內部管子情形下，通風口每個區域將吹出穩定且相同流速的熱風，考慮到熱壓爐後方風扇的影響與通風道內部管路將會影響每個區域的通風道內部流體的流動，故需要進行每個區域通風口進行流速量測實驗，希望能透過更符合實際熱壓爐從通風口吹出之流速，使後續進行模具加熱 CAE 熱傳分析模擬能更真實的反應實際模具加熱情形。

圖 4.11 為合作廠商協助量測之本研究熱壓爐內部通風口之流速測量結果，其中的測量結果是等待熱壓爐體開始運轉至穩定狀態後才開始進行測量，結果發現從通風口吹出的流速差異非常的大，最大為 8.9m/s 而最小為 3.5m/s，通風口流速最低的位置為有管路的位置，驗證了管路對熱風流動有很大影響，同時也可以看出大致上通風口左右兩側的流速差異不會太大，故模擬中採取左右對稱並且取左右兩個所測得之流速最大值，然而此組熱壓爐之通風口為一弧形，並且平台底部也是通風道，故分別由上到下將通風道劃分為七個區域帶入模擬中，七個流速值分別為 8.3 m/s、8.3 m/s、8.9 m/s、7.7 m/s、3.5 m/s、6.5 m/s 與 5.5 m/s，此組邊界條件為第四版本，詳細的劃分方式如圖 4.12 所示。

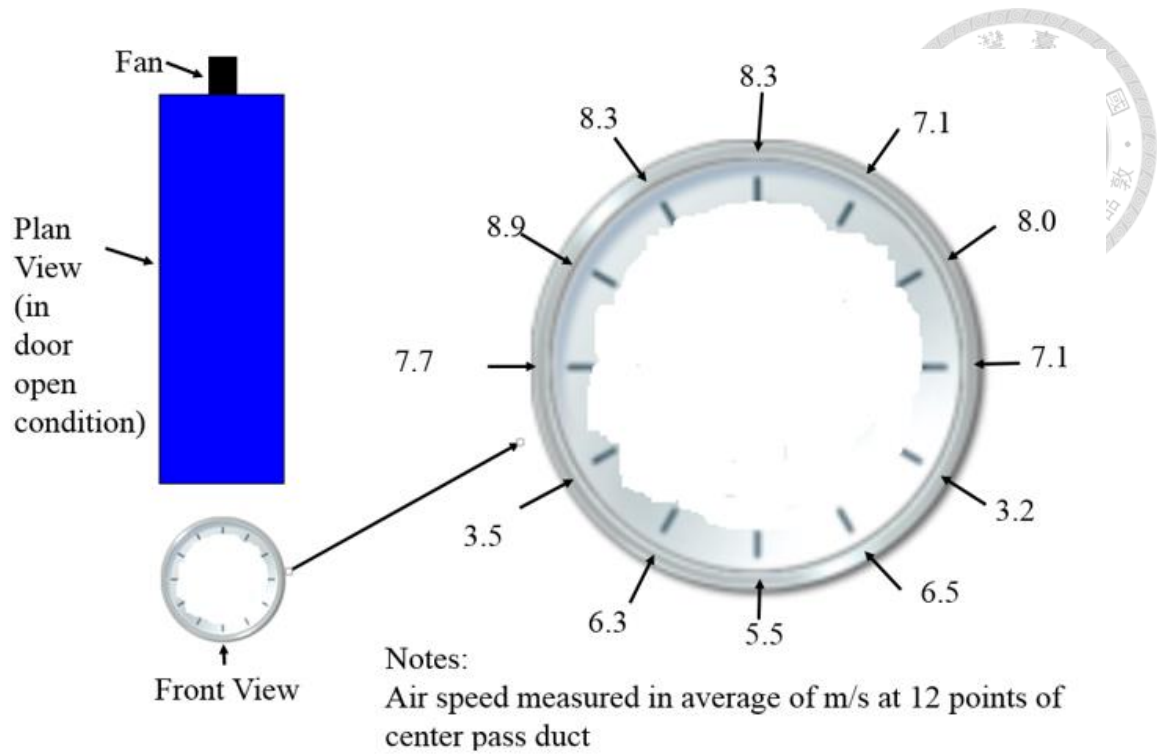


圖 4.11 廠商協助測量熱壓爐通風口之流速結果

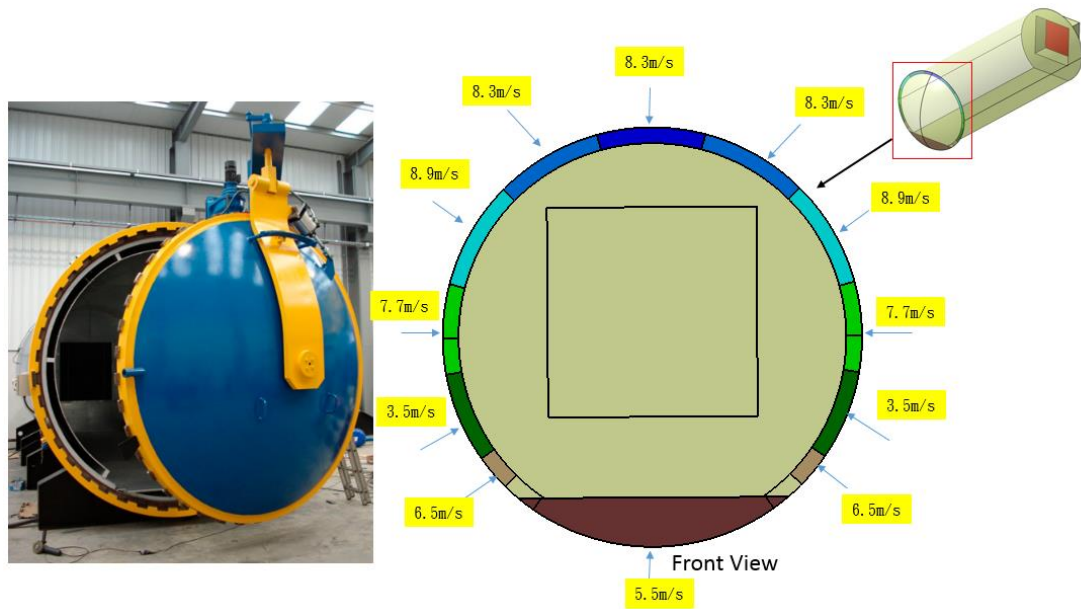


圖 4.12 進風口劃分與模擬設定

4.6 第四版模擬結果與實驗驗證



第四版將 CASE C 的進風口進行劃分並帶入真實實驗數據進行模擬，在模擬第 70 分鐘模具模面呈現離進風口越遠越低溫的狀態，而最低溫發生在模具表面凸起處中間部份，如圖 4.13。第 101 分鐘模具模面大致上都已到達成化溫度，最低溫發生在模具模面凸起處的尾端部份，整體來說第四版加熱效果都較其他好，如圖 4.14。圖 4.15 可看出到達成化溫度時間隨著測量點離爐門距離越遠時間越長，且模面凸起出升溫效果較不好，第四版模具測量點最快與最慢到達成化溫度時間差為 14 分鐘，為四個分析中最接近實驗值之模具測量點時間差 15 分鐘，另外第四版模擬模具前段模面測量點與實驗值相同，都在 70 分鐘左右到達成化溫度，而模面中段與後段模面測量點也都與實驗值在 80 分鐘左右到達成化溫度。最後也查看爐體內流場情形，第四版與第三版同樣造成熱壓爐內混亂流場，但是第四版卻顯示了距離底部平台越低風速有越快的趨勢，與第三版結果完全相反，圖 4.16 所示。

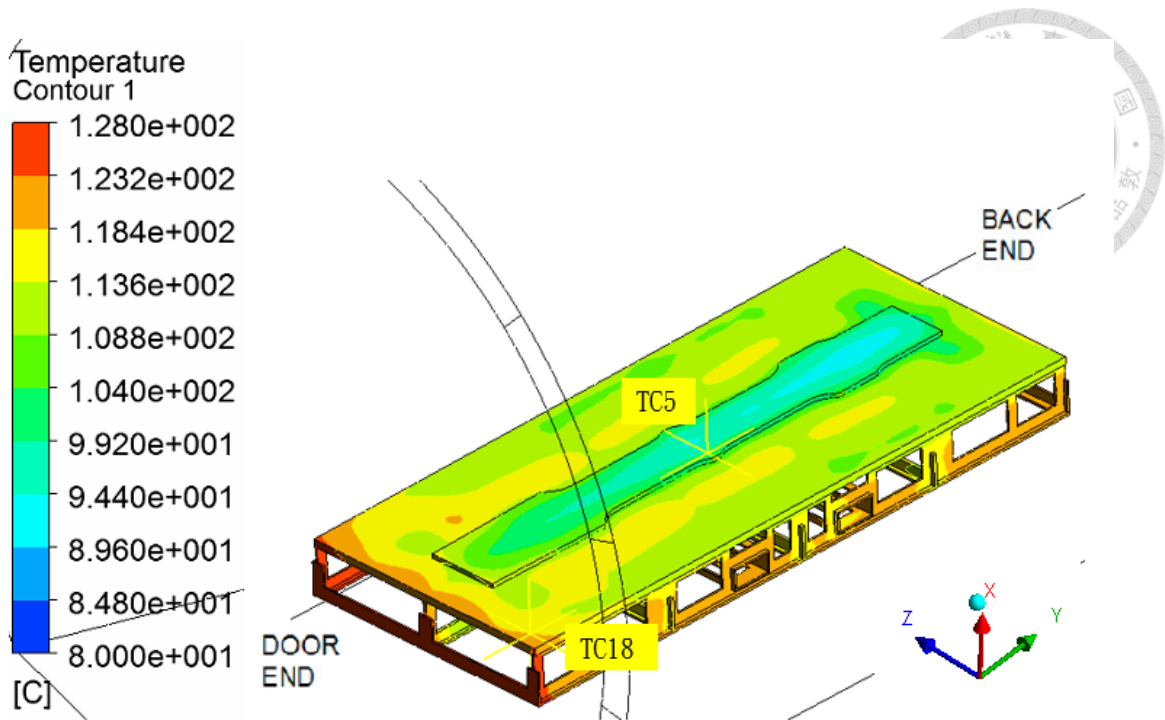


圖 4.13 第四版第 70 分鐘模具溫度分布圖

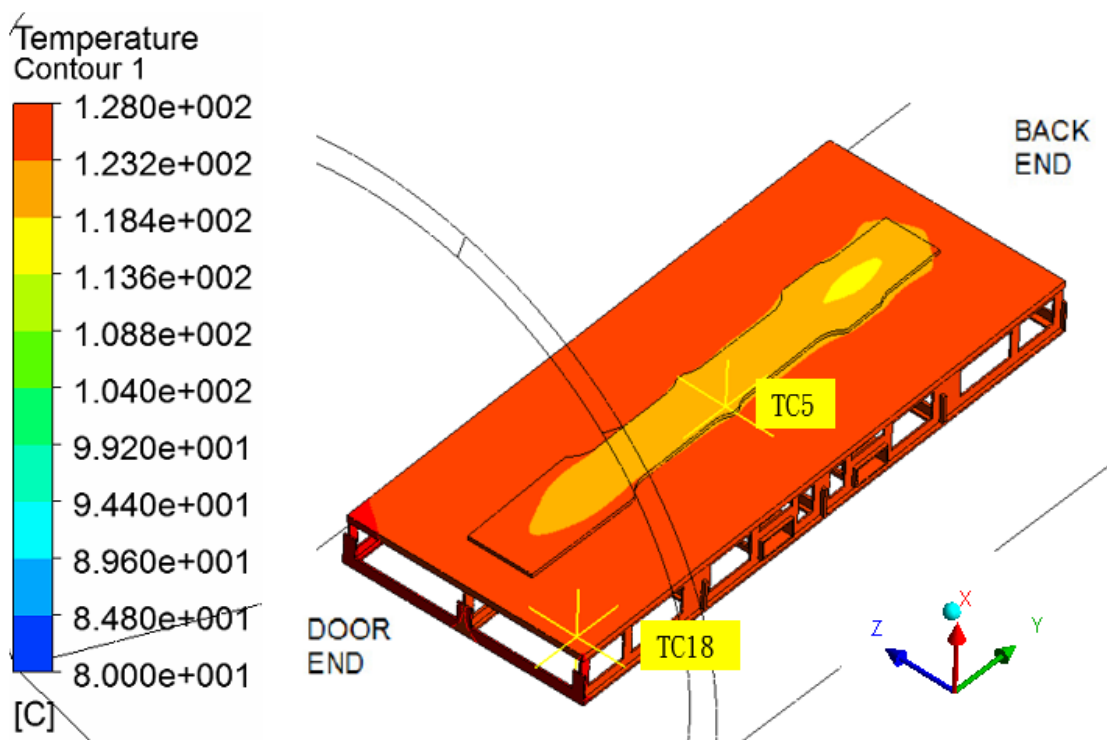
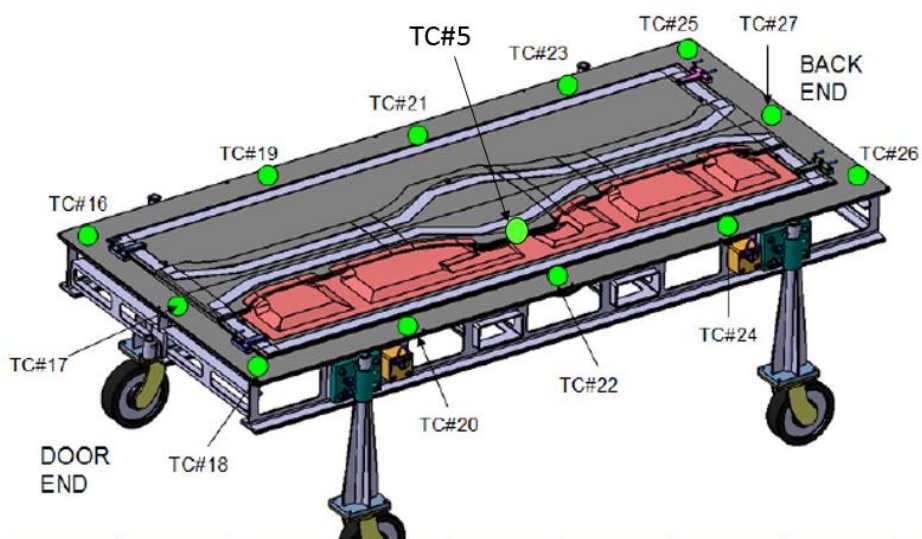


圖 4.14 第四版第 101 分鐘模具溫度分布圖



前段	實驗	模擬	中段	實驗	模擬	後段	實驗	模擬
TC16	73分	70分	TC21	84分	83分	TC25	85分	82分
TC17	77分	74分	TC5	105分	98分	TC27	84分	81分
TC18	70分	73分	TC22	86分	83分	TC26	85分	84分

圖 4.15 第四版實驗與模擬測量點到達成化溫度時間比較

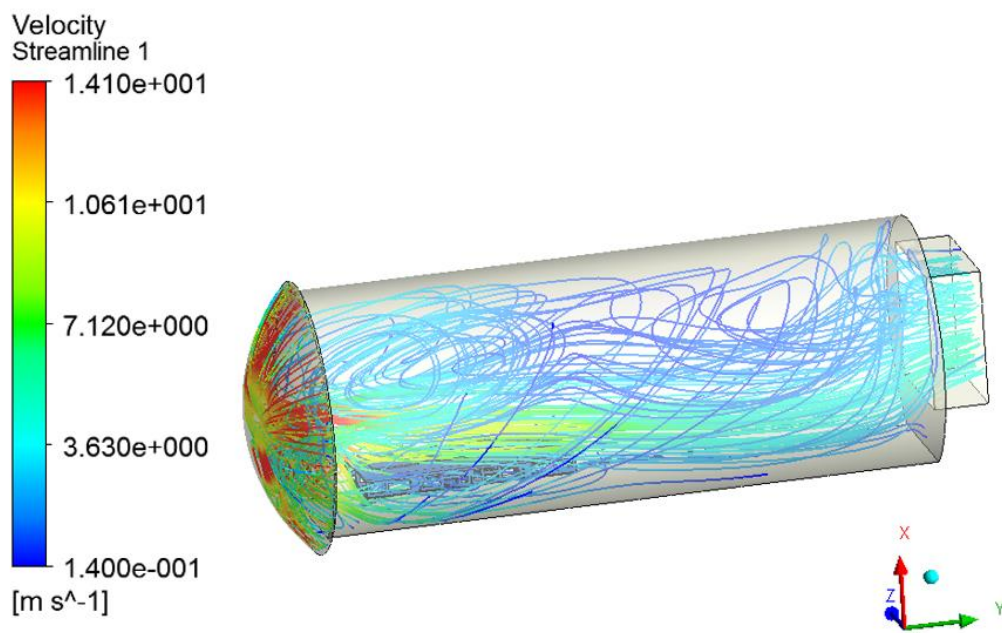


圖 4.16 第四版爐內流場情形



4.7 小結

第三版與第四版採用了改良熱壓爐模型，已經成功的使爐內流場產生較混亂的情形，雖然在流速結果當中，第三版的流速圖較接近熱壓爐原廠提供的流速圖，但是在進行加熱單一模具時卻是第四版較能模擬實際模面升溫狀況，也就是說第四版的分析模型與進風口邊界採用實驗測量流速較能描述實際熱壓爐的真實情形。將第三版的流場與第四版的流場分別取爐體中央 XY 截面進行比較，發現兩種分析結果產生了完全相反的結果，第三版從通風口吹出的熱風經過爐門後有整體往爐頂的方向吹，但是第四版卻是整體往平台的方向吹，另外也可以證實在初始熱壓爐模型中進風口每個區域以相同流速沿著 +Y 方向吹是完全錯誤的假設，從模具整體的升溫狀況也可以發現，爐體內部流場的情形對於模具升溫的影響是非常明顯。

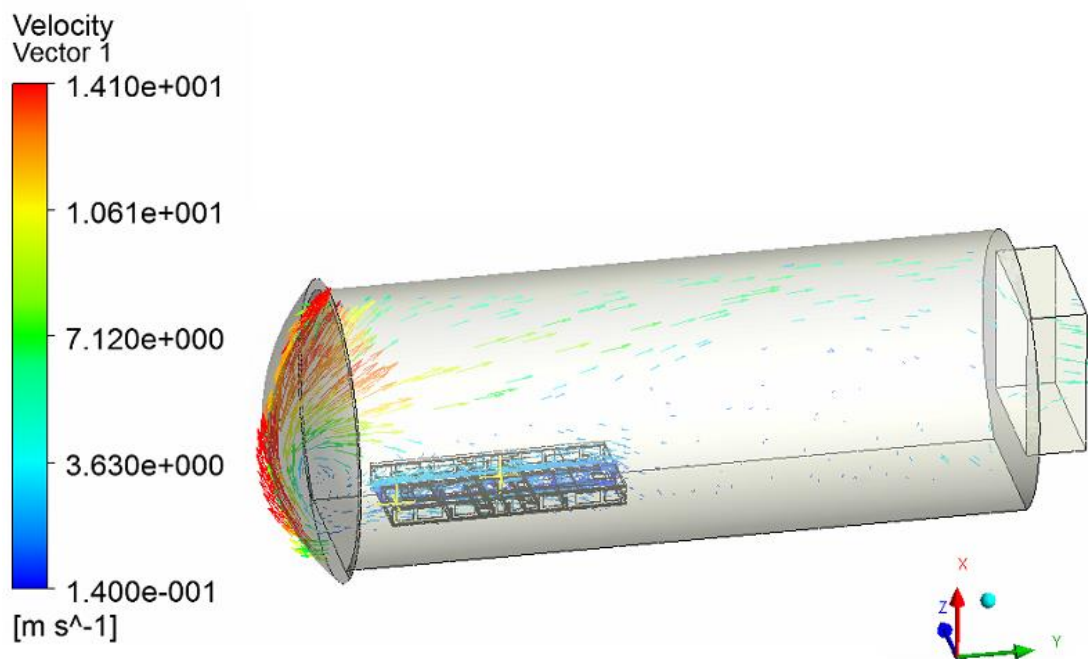


圖 4.17 第三版爐體中央 XY 截面流場情形

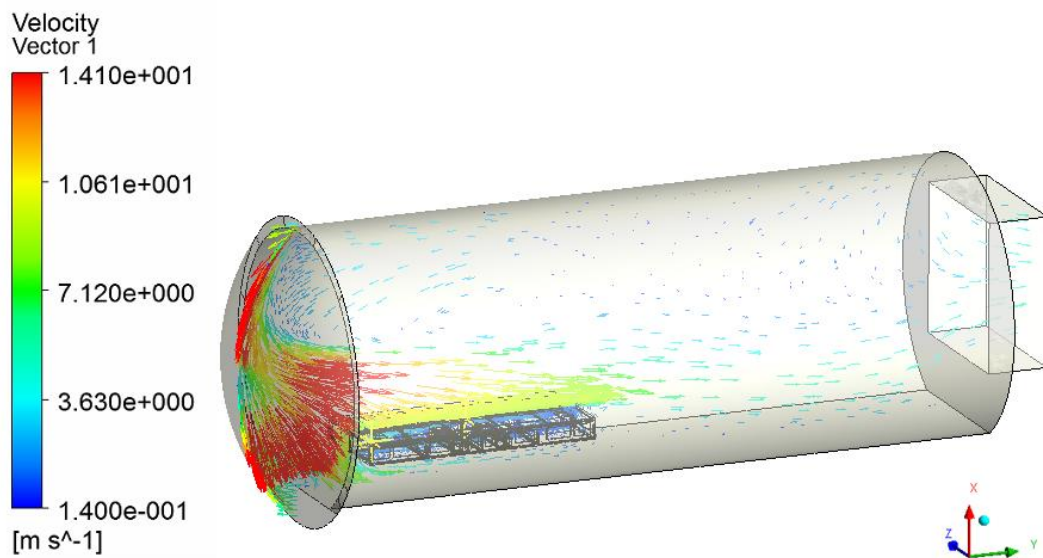


圖 4.18 第四版爐體中央 XY 截面流場情形



第五章 熱壓爐加熱單一模具與複合材料之分析

在前面章節已經討論出最合適的熱壓爐模型與邊界條件將要套入至本章節中，但是第四章探討的測量點都只有選擇位於模具模面上的位置，而前面 4.3 節所提到的其他位於複合材料之測量點將於此章節進行探討。由於複合材料組成複雜且形狀也相對模具複雜，造成在網格劃分上與材料參數給予的困難，因此本章節將提出等效複合材料模型進行模擬，同時介紹等效熱傳係數的計算，實驗驗證將根據模具測量點、複合材料測量點和蜂巢內測量點共三種位置進行探討。

5.1 等效複合材料模型建立

複合材料零件組成複雜，造成了不同區域的幾何形狀複雜與厚度差異很大，且部份區域還增加了蜂巢來強化零件強度，蜂巢內部又被分割成許多六邊型所構成的空心結構，如圖 5.1 所示，使得複合材料模型在建立網格需要花費大量的時間，同時也使得不同區域的材料性質差異極大。故在本小節將建立等效複合材料模型，以及探討複合材料等效材料參數的建立，目的在於為了快速進行模擬的建立與分析，也希望能夠將其他複合材料零件依照此流程完成加入複合材料之熱傳模擬分析。



圖 5.1 蜂巢結構

5.1.1 複合材料介紹

如同前面 2.1.3 節所敘述，工程師根據廠商需求進行預浸布疊貼，依據設計需求，使用纖維方向 0/90/45 度不同之排列角度設計「疊層順序」，以達到高強度及減重之設計目標，最後封袋完成的複合材料結構包含導氣布、隔離袋、複合纖維、片膠、蜂巢結構等元件，如圖 5.2 所示。圖 5.3 為本研究使用的複合材料，尺寸長度 2340 mm 與寬度 330 mm，而複合材料表面凸起處為內部有使用蜂巢結構，導致厚度範圍差異很大，厚度在 3 mm~21.69 mm 之間，其中使用了碳纖維與玻璃纖維兩種預浸布所組合而成。

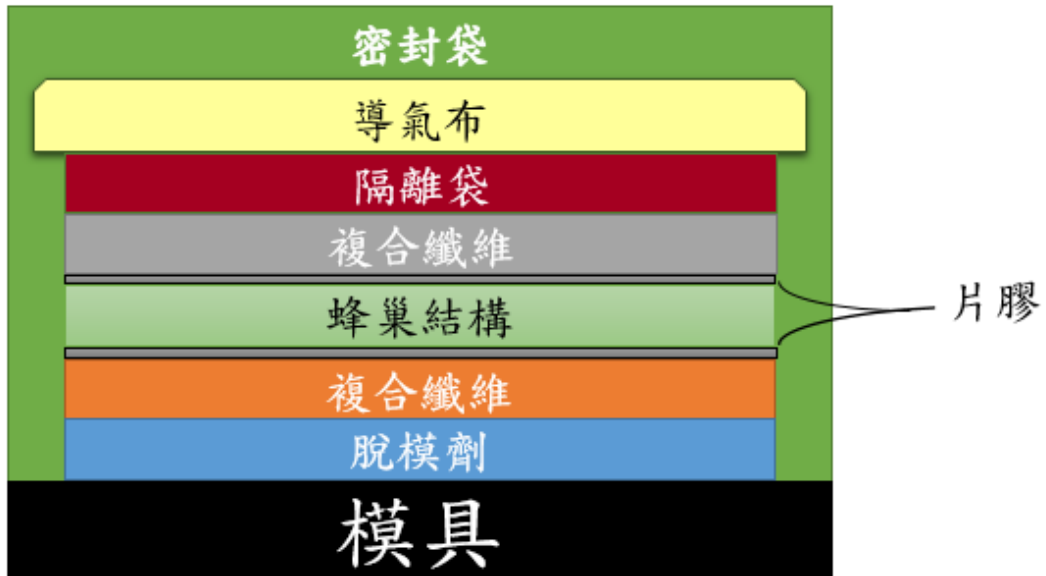


圖 5.2 複合材料組成圖

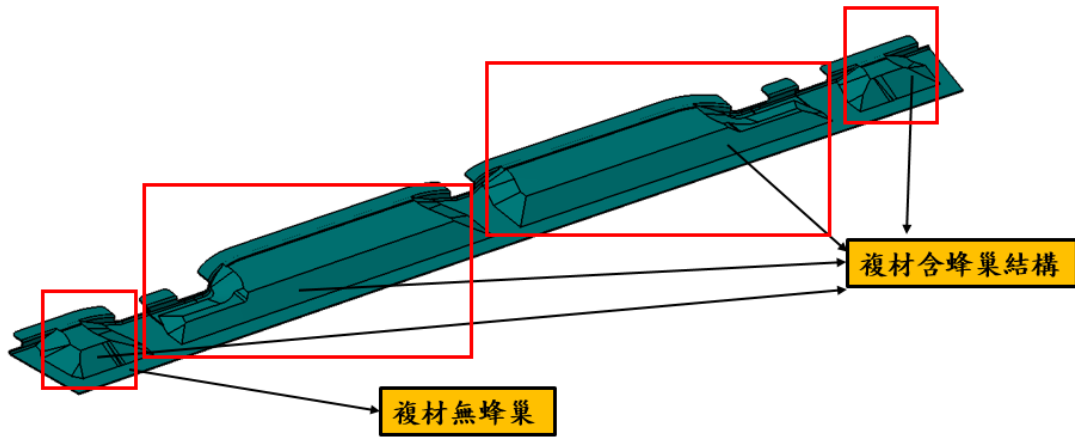


圖 5.3 本論文之複合材料模型



5.1.2 複合材料模型建立

前面 5.1.1 節提到複合材料厚度範圍差異極大，尤其是有蜂巢結構的關係使得厚度增厚，使得複合材料在有蜂巢結構與沒有蜂巢結構的材料性質有明顯的差異，所以本小節建立了 3mm 等厚複合材料模型，同時也將含有蜂巢結構的區域劃分出來，分別給予兩種不同的材料性質於模擬中，圖 5.4 所示。以上兩種詳細的材料性質將在下一個小節進行討論。

複合材料模型與模具模型建立網格方法相同，採用實體元素四面體網格進行劃分，最後劃分完成複材網格數量為 60,187 個，如圖 5.5 所示

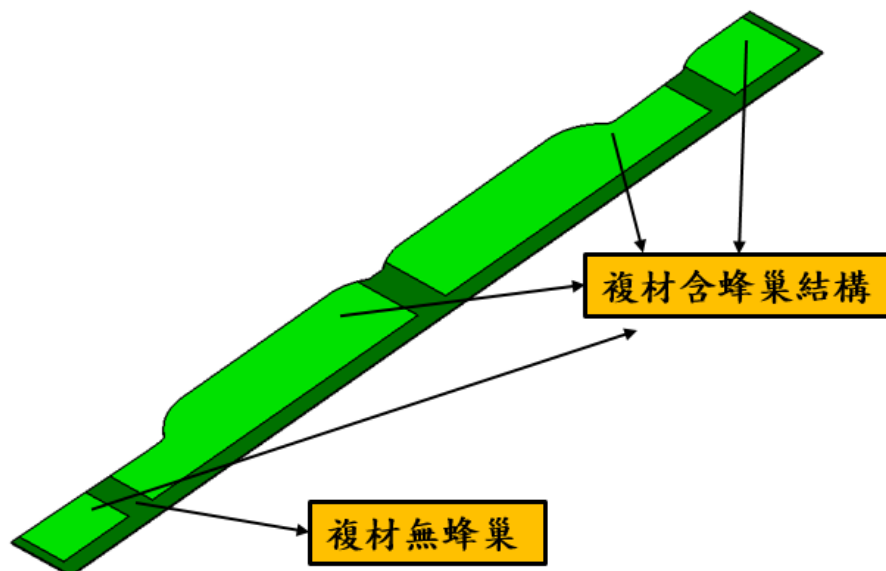


圖 5.4 等厚複合材料與含有蜂巢結構模型

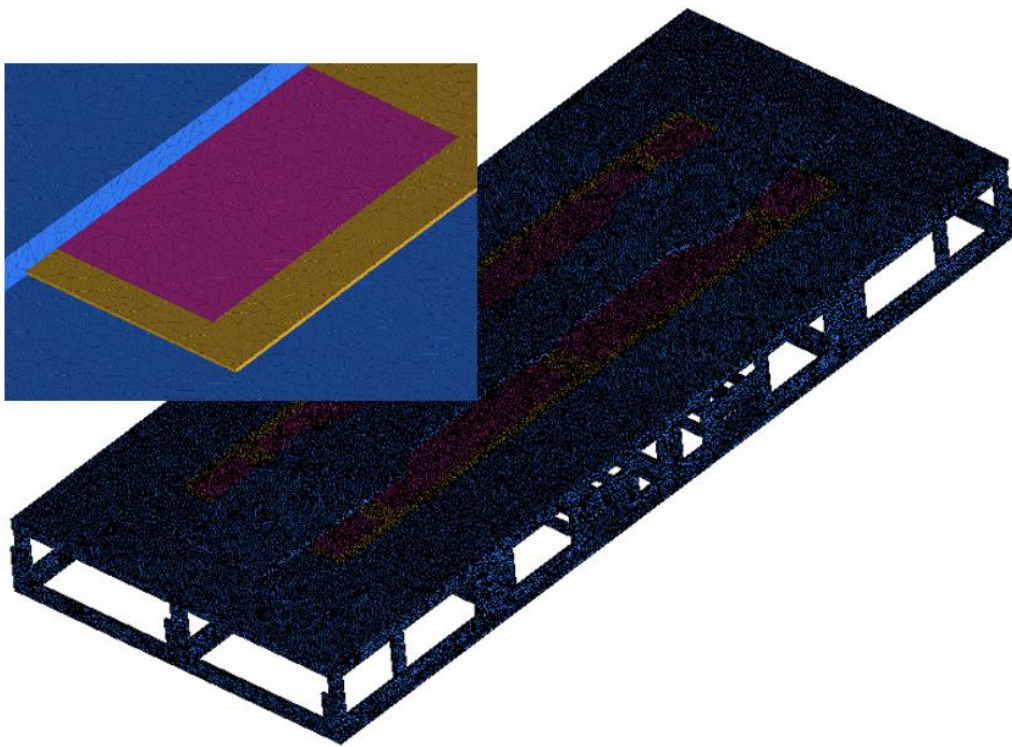


圖 5.5 等厚複合材料網格示意圖

5.2 複合材料等效熱傳係數建立

本節將針對 5.1.2 節所提出的等厚模型進行等效材料參數之建立，熱傳分析中固體材料參數有熱傳導係數、比熱和密度，所以將分別針對這三種參數進行等效複合材料進行討論，另外由於複材厚度太薄導質在平面方向不易量測熱傳導係數，故本模擬先假設平面與厚度方向熱傳導係數相同。



5.2.1 等效熱傳導係數

熱傳導係數量測法依其原理可分為穩態法(steady state method)以及瞬態法(transient state method)兩類，而工研院在實驗所有待測材料皆採用穩態法之熱傳導係數量測方式。穩態熱傳導係數量測法是將一維傅立葉熱傳導方程式直接應用。基本原理為建立一個穩定的溫度場，直接利用熱流量或溫差與試體厚度的關係來求得待測物的熱傳導係數。

實驗測量裝置為介面材料熱阻與熱傳導係數量測裝置(TIM tester)，設備裝置如圖 5.6。此裝置依據 ASTM D 5470-06 標準，用於量測材料垂直方向的熱阻及等效熱傳導係數 K 值測試，此裝置之量測範圍在熱阻抗大於 $0.01 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$ 但熱傳導係數需小於 $20 \text{ W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ，需準備之試片面積為 $25.4 \text{ mm}\times 25.4 \text{ mm}$ ，厚度不得超過 5 mm ，如圖 5.7，具有不同壓力及加熱功率的熱阻測試，可施加力於試片 $4\text{-}50 \text{ kgf}$ ，可控制材料之受熱面溫度或冷卻面溫度，分析材料於不同溫度下之熱阻，可精準確認試片之厚度：硬質試片厚度外部量測；軟質試片厚度藉由三組位移量測單元量測，精度為 $5 \text{ }\mu\text{m}$ ，解析度 $1 \text{ }\mu\text{m}$ 。

圖 5.8 為實驗裝置細部圖，待測試片置於粉紅色處，裝置下方為熱源而上方為冷卻源，冷熱源為經由校正之銅質 meter bar，利用冷熱源之溫度控制使待測試片上下方產生溫度梯度，使熱傳導現象發生於待測試片之垂直方向，上下方之銅質 meter bar 中都各埋了三組溫度感測器(thermocouple)，試片上下接觸面的溫度藉由此三組溫度感測

器所測得之數值進行內差而得，熱通量可經由銅質 meter bar 產生之溫差藉由一維傅立葉熱傳導方程式計算而得，公式如(式 5.1)，其中 Q 為熱通量，K 為 meter bar 之熱傳導係數，t 為兩溫度感測器之距離，理論上熱源之熱通量應等於冷源之熱通量($Q_h=Q_c$)，但因為實驗誤差的考量，用於計算待測試片之熱傳導係數之熱通量會取熱源與冷源熱通量之平均值，得到熱通量及待測試片上下接觸面之溫度差即可以一維傅立葉熱傳導方程式計算出待測物之熱阻，再經由換算可得待測試片之熱傳導係數。

$$Q = kA \frac{(T_h - T_c)}{t} \quad (\text{式 5.1})$$



圖 5.6 工研院提供之介面材料熱阻與熱傳導係數量測裝置

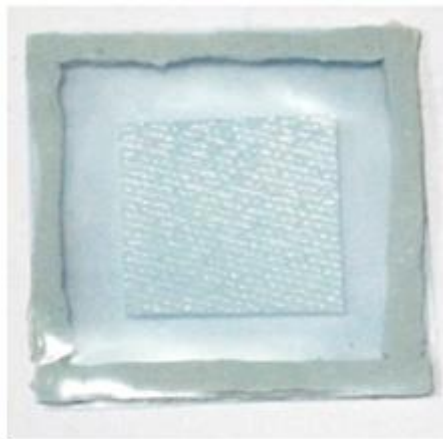
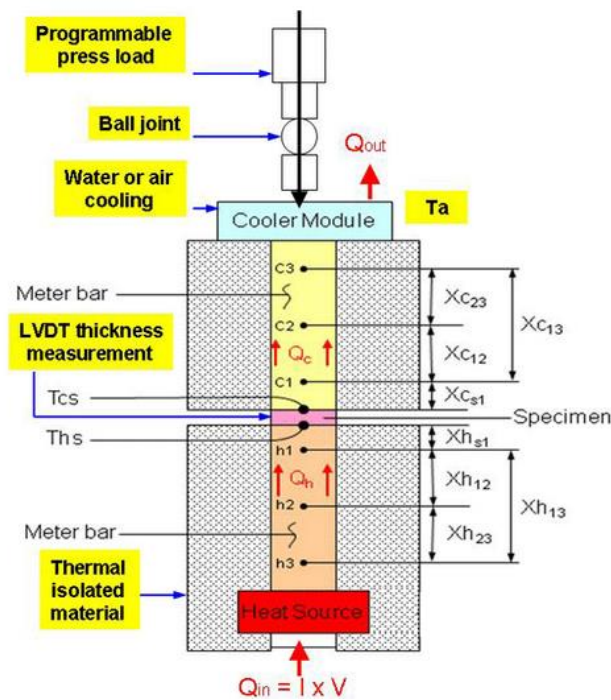


圖 5.7 工研院所使用的量測試片

**Thermal Interface Material (TIM) Tester Schematic Drawing
According to ASTM D 5470-06 Standard**



(1) Heat Flux Calculation

$$Q_h = K_m A \frac{T_{h3} - T_{h1}}{X_{h13}} \quad Q = \frac{Q_c + Q_h}{2}$$

$$Q_c = K_m A \frac{T_{c1} - T_{c3}}{X_{c13}}$$

K_m : Meter bar material thermal conductivity

(2) Interface Temperature T_{hs} & T_{cs}

$$T_{hs} = T_{h1} - \frac{X_{h31}}{X_{h13}} (T_{h3} - T_{h1})$$

$$T_{cs} = T_{c1} + \frac{X_{c31}}{X_{c13}} (T_{c1} - T_{c3})$$

(3) Thermal Resistance ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)

$$R = \frac{T_{hs} - T_{hc}}{Q}$$

(4) Thermal Conductivity ($\text{W}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m})$)

$$K = \frac{1}{A} \times \frac{t}{R}$$

t : Specimen thickness (mm)

圖 5.8 工研院量測裝置細部圖及實驗原理說明

表 5-1 為組成複合材料之所有會用到的材料在厚度方向測量結果，可以發現整體熱傳導能力都不是很好，其中蜂巢與導氣布傳熱能力更是不好。最後將所有測量材料可應用在實際疊貼完成複合材料時，可根據所使用的預浸布的材料與疊貼層數，以及有無蜂巢結構等，使用 model A 或 model B 兩種模型進行等效複合材料熱傳導係數建立，即可將最終計算之複合材料等效熱傳導係數代入模擬中，如圖 5.9 與圖 5.10。最後計算結果，複合材料不含蜂巢結構為 0.29 W/m·K，而包含蜂巢結構則為 0.104 W/m·K，但是由於在模擬中建立模型厚度僅 3 mm 與實際測量厚度不同，實際實驗值公式由(式 5.2)測得，其中 t 為代測試片厚度， Q 為熱通量， T_H 為試片靠近加熱端之介面溫度， T_C 則為試片靠近冷卻端之介面溫度， A 為試片面積，所

以根據公式厚度不同部分進行厚度參數修正，最後修正複合材料等效熱傳導係數分別為，0.148 W/m·K 與 0.0143 W/m·K，如圖 5.11。



$$\text{實驗值}K = \frac{t * Q}{(T_H - T_C) * A} \quad (\text{式 } 5.2)$$

表 5-1 工研院實驗量測結果

材料	熱傳導係數(W/m·K)
玻纖	0.45
碳纖	0.61
蜂巢	0.09
密封袋	0.23
導氣布	0.04
隔離袋	0.3
片膠	0.21
面膠	0.21

複合模型等效熱傳導係數計算-model A						
						$I = \frac{t}{K}$
材料	熱傳導係數 K (W/M*K)	規格厚度 (mm)	層數	厚度修正 因子	修正厚度 t (mm)	各材料熱阻抗值 I (K*CM^2/W)
密封袋	0.23	0.05	1	1	0.050	2.174
導氣布	0.04	2.5	1	0.2	0.500	125.000
隔離袋	0.30	0.025	1	1	0.025	0.833
複合材料(請選擇)	0.00	#N/A	1	0.9	#N/A	#N/A
總厚度					#N/A	
串聯熱阻抗相加						#N/A
理論值 $K_{等校} = \frac{t_{total}}{I_{total}}$						
等效熱傳導係數(W/M*K)	#N/A					

圖 5.9 工研院提供 model A 複合材料等效熱傳導係數計算

複合模型等效熱傳導係數計算-model B						
						$I = \frac{t}{K}$
材料	熱傳導係數 K (W/M*K)	規格厚度 (mm)	層數	厚度修正 因子	修正厚度 t (mm)	各材料熱阻抗值 I (K*CM^2/W)
密封袋	0.23	0.05	1	1	0.050	2.174
導氣布	0.04	2.5	1	0.2	0.500	125.000
隔離袋	0.30	0.025	1	1	0.025	0.833
複合材料(請選擇)	0.00	#N/A	1	0.9	#N/A	#N/A
膠體	0.21	0.03	1	1	0.030	1.429
牛角蜂巢 T=0.750" AMS3714_OX3/16 -3.0	0.09	19.1	1	1	19.100	2195.402
膠體	0.21	0.03	1	1	0.030	1.429
複合材料(請選擇)	#N/A	0.25	1	0.9	0.225	#N/A
總厚度					#N/A	
串聯熱阻抗相加						#N/A
理論值 $K_{等校} = \frac{t_{total}}{I_{total}}$						
等效熱傳導係數(W/M*K)	#N/A					

圖 5.10 工研院提供 model B 複合材料等效熱傳導係數計算

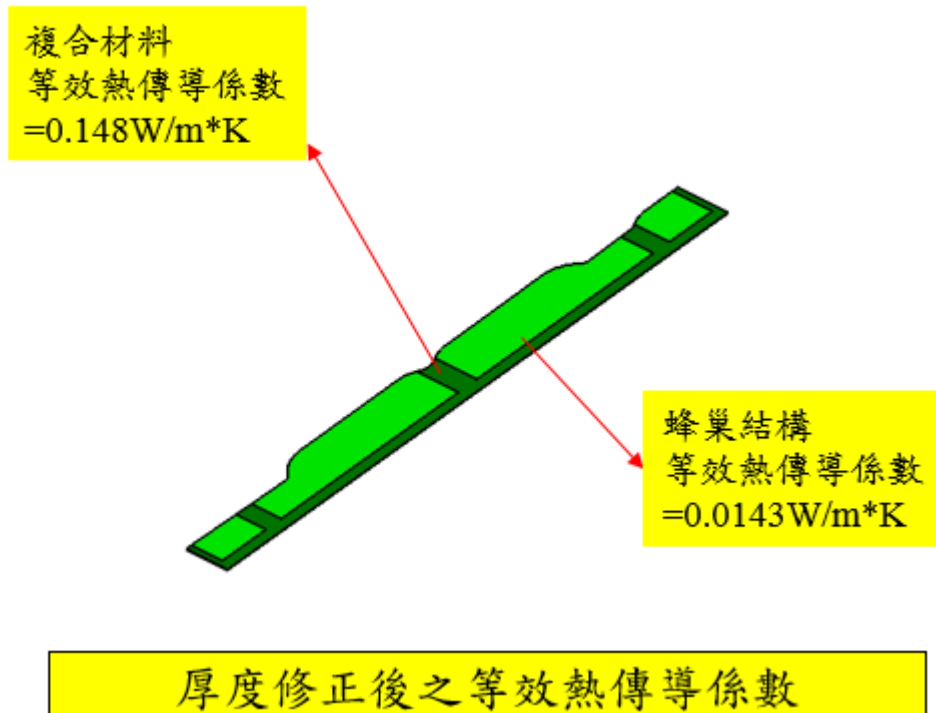


圖 5.11 厚度修正之複合材料等效熱傳導係數

5.2.2 等效密度

由於複合材料是由許多材料組合而成，所以複合材料屬於混合物，故將套用混合物密度公式如(式 5.3)，而表 5-2 為每種材料密度與厚度，假設每一個材料使用在複合材料的截面積都一樣，只有在厚度方向不同，以方便進行混合物密度運算，計算結果為複合材料不包含蜂巢結構之等效密度 1.757 g/cm^3 ，而複合材料包含蜂巢結構為 0.565 g/cm^3 。

$$\rho = \frac{\rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 + \cdots + \rho_n V_n}{V_1 + V_2 + \cdots + V_n} \quad (\text{式 } 5.3)$$



表 5-2 材料密度與厚度

材料	密度(g/cm ³)	材料厚度(mm)
玻纖	2.5	0.13
碳纖	1.79	0.25
蜂巢	0.02	19.1
密封袋	1.14	0.05
導氣布與隔離袋	0.74	2.525
片膠	1.21	0.03
面膠	1.21	0.03

5.2.3 等效比熱

複合材料之等效比熱計算方式與等效密度相似，同樣使用混合物之比熱公式計算如(式 5.4)，將表 5-3 材料之比熱代入公式計算，得到複合材料不包含蜂巢結構等效比熱為 841.21 J/kg·K，而複合材料包含蜂巢結構為 866.18 J/kg·K。

$$s = \frac{m_1 s_1 + m_2 s_2 + \cdots + m_n s_n}{m_1 + m_2 + \cdots + m_n} \quad (\text{式 } 5.4)$$



表 5-3 材料比熱

材料	比熱(J/kg·K)	材料厚度(mm)
玻纖	920	0.13
碳纖	712	0.25
蜂巢	1700	19.1
密封袋	1670	0.05
導氣布與隔離袋	800	2.525
片膠	1740	0.03
面膠	1740	0.03

5.3 模具與複合材料熱傳分析結果討論與實驗驗證

本小節將前面所探討的複合材料等效熱傳係數套用至等效模型中，本節邊界條件與前面模擬之熱壓爐成型模具熱傳分析相同，模具擺放在相同位置，並在模具上加了複合材料模型進行分析，如圖 5.12，同樣也只分析到熱壓爐製程第 165 分鐘，而在模具加上等效複合材料熱傳分析中有幾個假設：

- a. 模擬中忽略了複合材料成化後所產生的放熱反應。
- b. 模擬中假設複合材料之熱傳性質為均勻等向性。
- c. 模擬中假設複合材料之材料性質為定值，換句話說就是材料性質不會隨溫度改變。

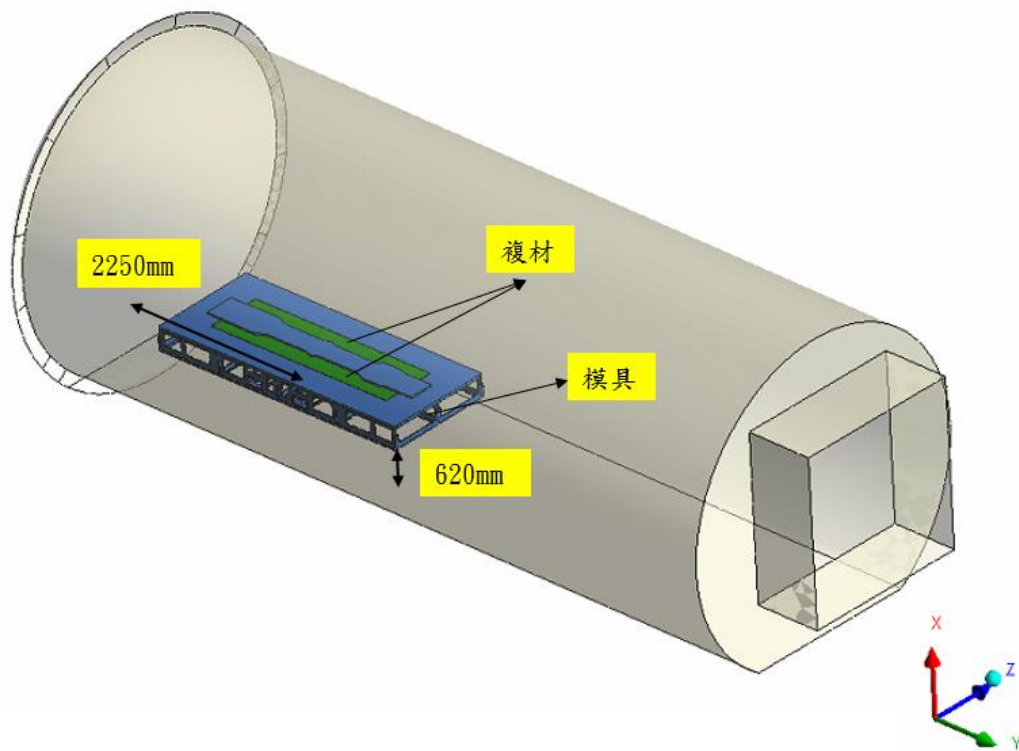


圖 5.12 模具與複材之爐內位置

實驗驗證部份，同樣考率相同位置模具測量點，另外複合材料內部安裝測量點位置不同，將分別討論靠近熱風處與靠近模具處之測量點。首先介紹靠近熱風處測量點，前段位置為 TC 1 與 TC 2，中段位置為 TC 5 與 TC 6，後段位置則是 TC 3 與 TC 4，如圖 5.13 所示。而靠近模具處測量點，前段位置為 TC 9-1 與 TC 10-1，後段位置為 TC 9 與 TC 10，最後是蜂巢測量點前中後依序是 TC 11、TC 13 與 TC 15 共三點，詳細位置如圖 5.14 所示。

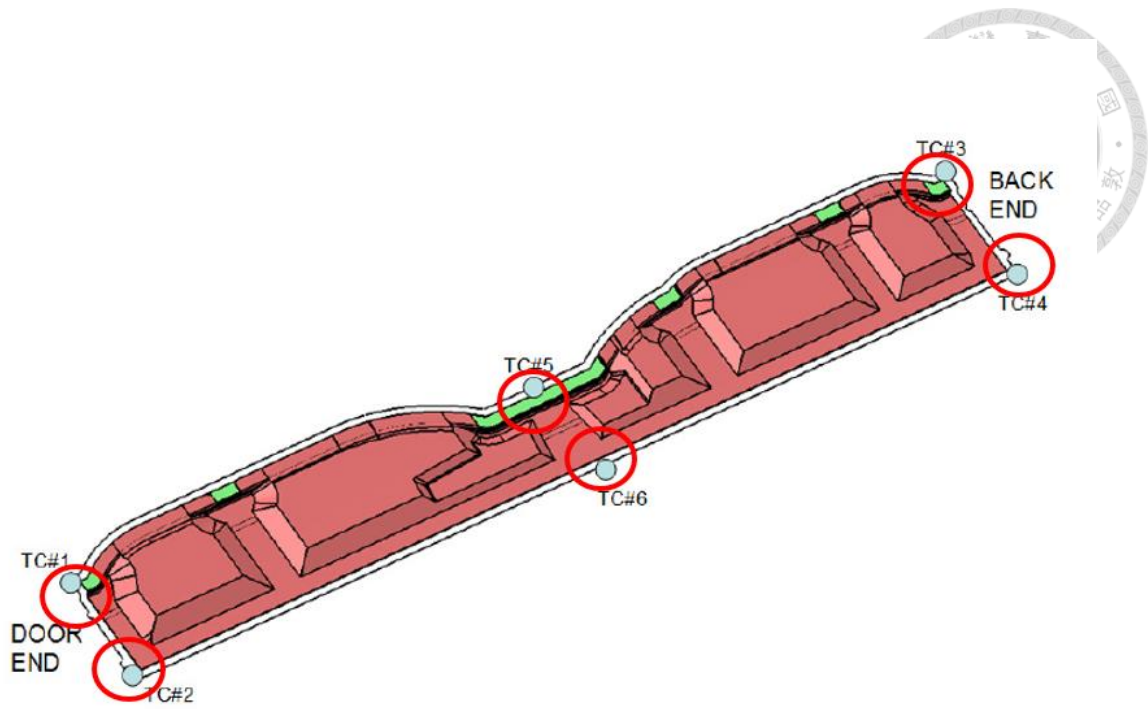


圖 5.13 靠近熱風處之複合材料測量點

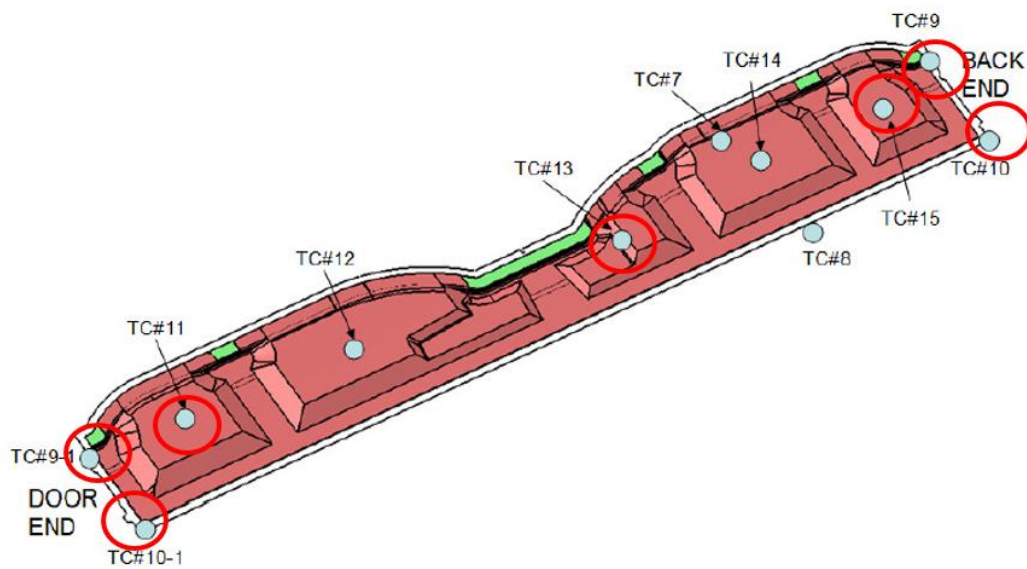



圖 5.14 靠近模具處之複合材料測量點與蜂巢測量點



製程在第 70 分鐘時，模具模面凸起處以及複合材料包含蜂巢結構的部份相對低溫，最低溫發生在模面凸起處後方和複合材料之中間部分的蜂巢結構中，而第 101 分鐘整體溫度分布呈現靠近模具凸起處相對低溫，最低溫的位置與第 70 分鐘時的位置相似，如圖 5.15 和圖 5.16 所示。最快到達成化溫度的測量點比較，模擬較實驗晚了 8 分鐘到達成化溫度，而最慢到達成化溫度測量點的部份，模擬也同樣較實驗慢，時間差為 16 分鐘，如圖 5.17 與圖 5.18。

模具測量點部份，加入複材模型後使得整體模具到達成化溫度時間變慢，但是與前面分析同樣都是模具靠近爐門處的模具前段測量點最快到達成化溫度，到達時間約 80 分鐘左右，中後段測量點到達成化溫度時間差異不大，約在 90 分鐘左右抵達，如圖 5.19 所示。接著是複材內部測量點部份，可以發現當測量點位置在靠近模具凸起處時，模擬預測到達的成化時間的誤差都比較大，另外模擬結果也發現了雖然複材模型厚度僅 3mm，但是在厚度方向的測量點位置到達成化時間的差異還是非常大，如前段 TC 2 在第 83 分鐘到達，而 TC 10-1 則是在第 88 分鐘到達。後段 TC 4 在第 83 分鐘抵達，而 TC 10 則是晚了 9 分鐘到達，如圖 5.20 與圖 5.21 所示。

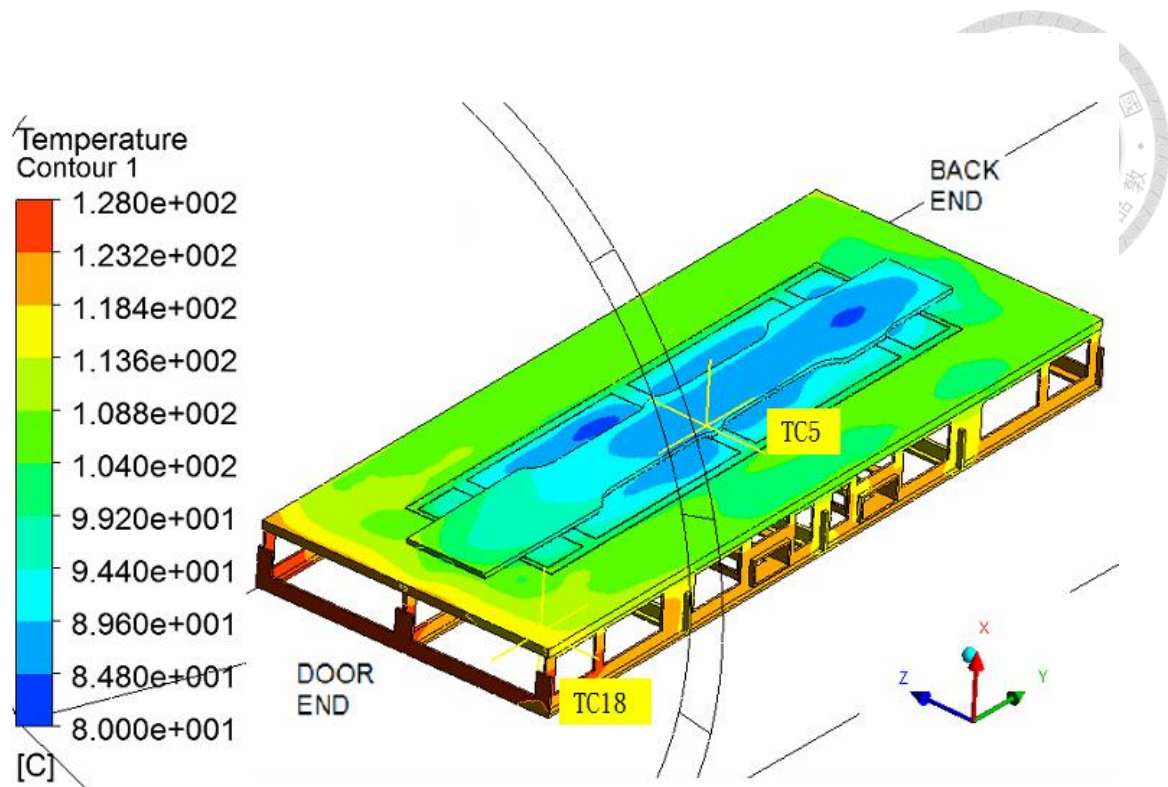


圖 5.15 第 70 分鐘有蜂巢之複合材料與模具升溫狀況

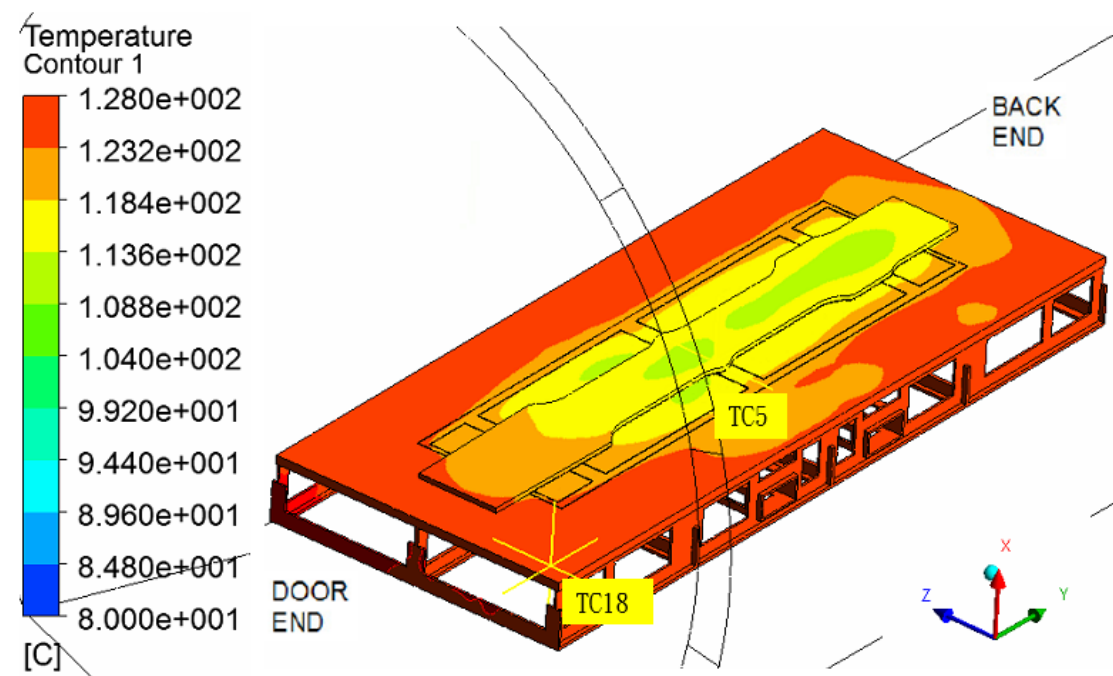


圖 5.16 第 101 分鐘有蜂巢之複合材料與模具升溫狀況

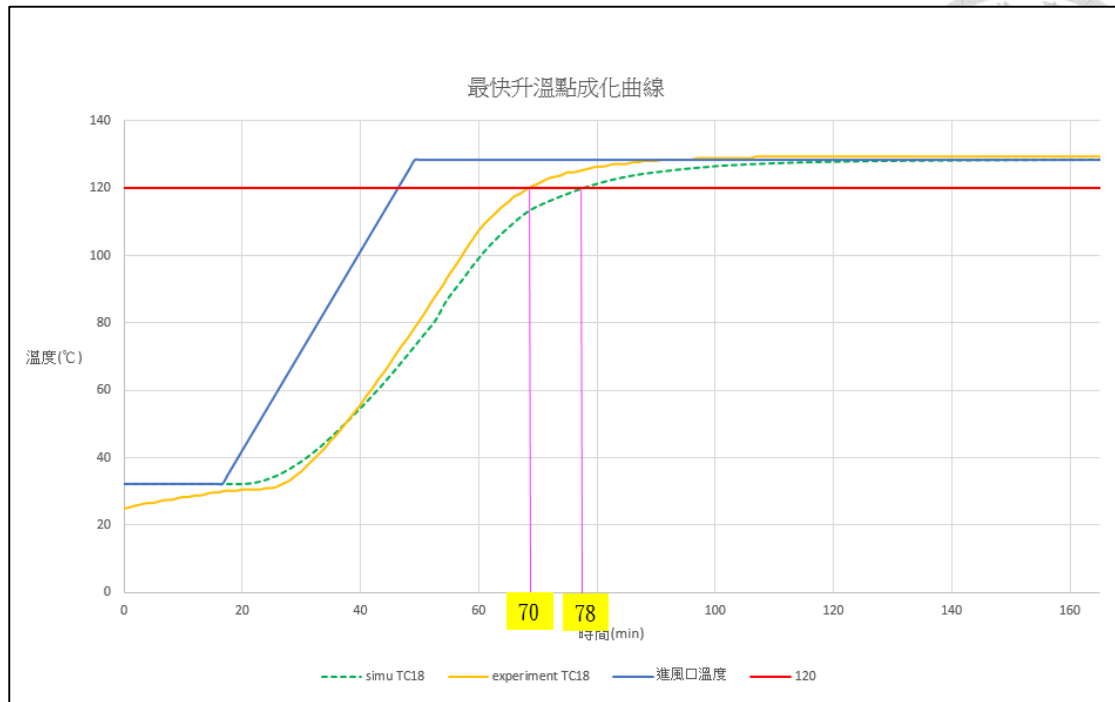


圖 5.17 有蜂巢之複合材料最快升溫點成化曲線圖

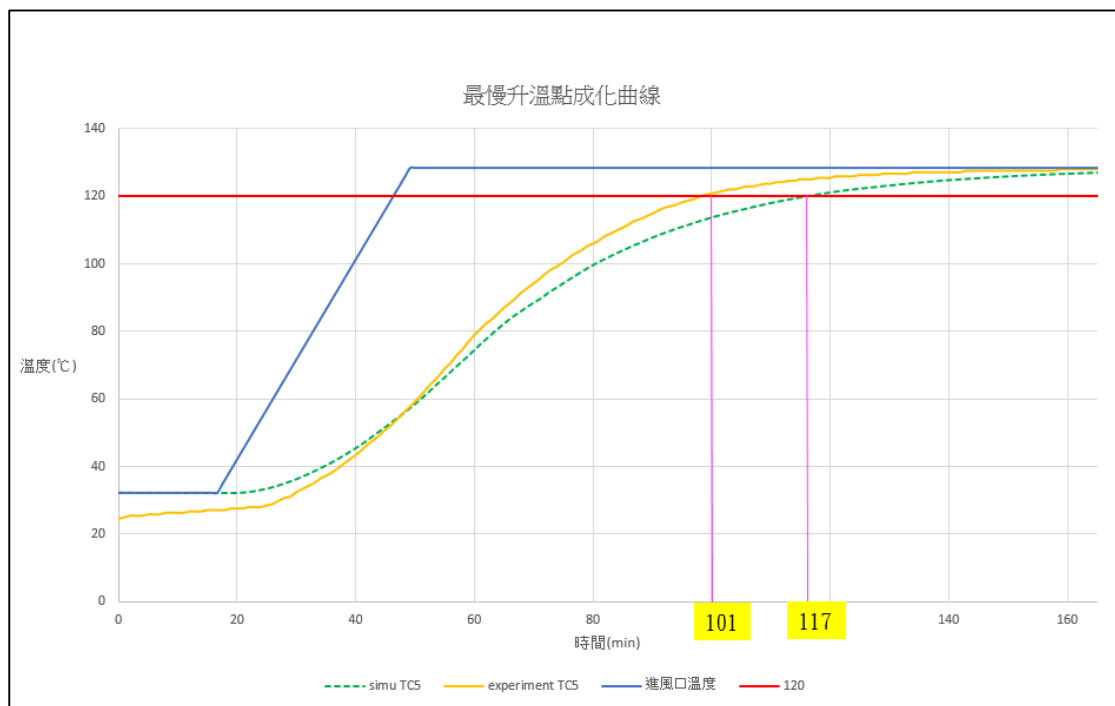
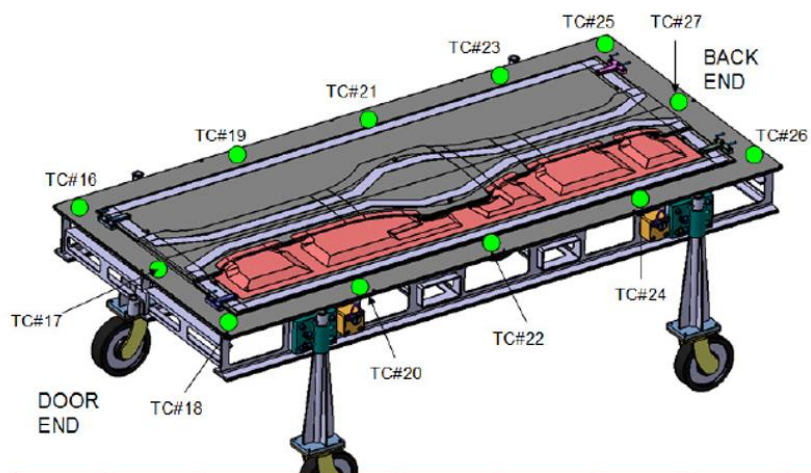
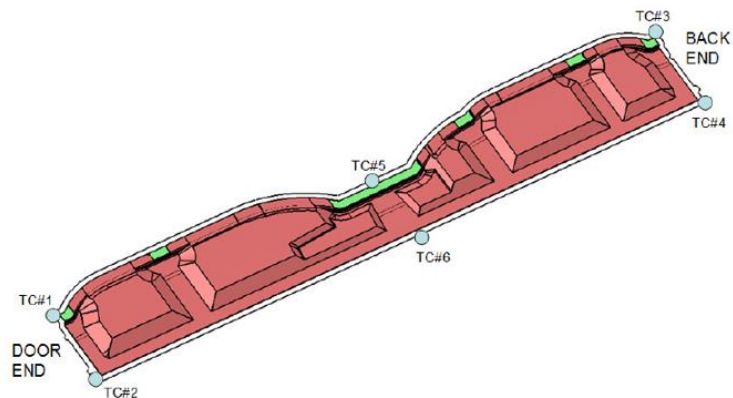


圖 5.18 有蜂巢之複合材料最慢升溫點成化曲線圖



前段	實驗	模擬	中段	實驗	模擬	後段	實驗	模擬
TC16	73分	77分	TC21	84分	87分	TC25	85分	88分
TC17	77分	81分				TC27	84分	89分
TC18	70分	78分	TC22	86分	93分	TC26	85分	93分

圖 5.19 模具測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較



前段	實驗	模擬	中段	實驗	模擬	後段	實驗	模擬
TC1	76分	94分	TC5	101分	117分	TC3	87分	114分
TC2	72分	83分	TC6	82分	86分	TC4	88分	83分

圖 5.20 複材測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較

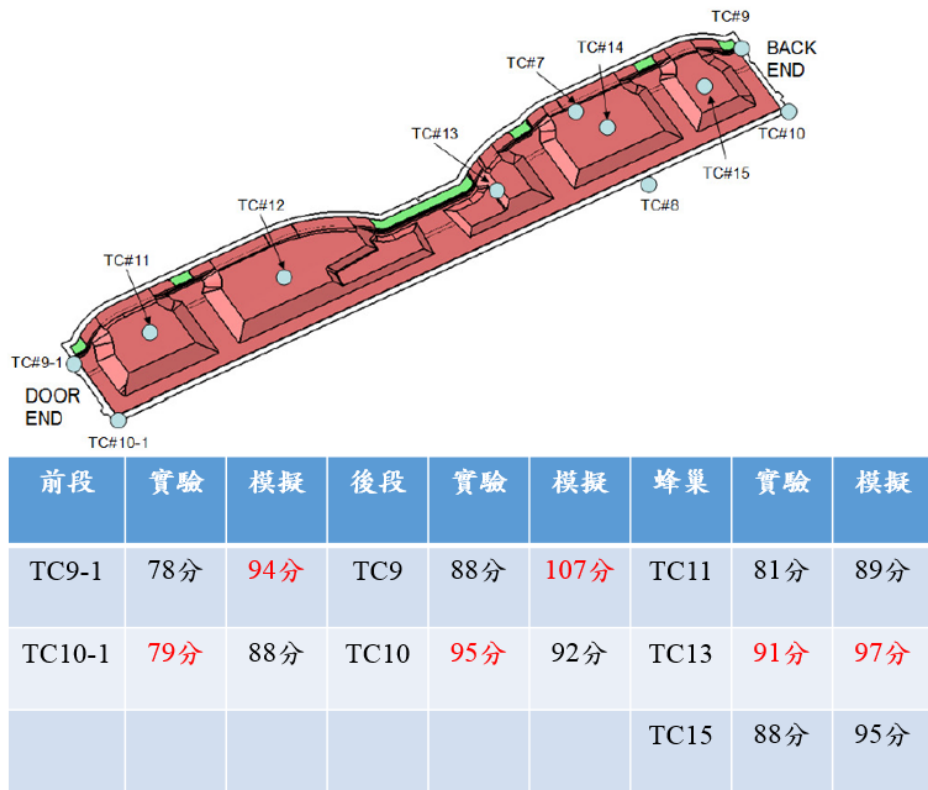


圖 5.21 複材與蜂巢測量點到達成化溫度時間之實驗與模擬比較

5.4 小結

整體來說本論文已經成功建立了模具加上等厚複合材料模型之熱壓爐成型的熱傳分析方法，等厚複合材料模型在建立網格與等效材料參數的建立可以節省非常多的時間，但是在整體測量點到達成化時間的預測上還是有非常大的誤差，平均時間誤差為 10%，由於前面探討發現了熱壓爐內部流場情形對於複材與模具整體加熱效果影響非常明顯，若是需要得到更準確的分析模型，必須將放置模具的熱壓爐架子以及將樹脂到達成化溫度放熱反應所產生的熱量計算至模擬中。



第六章 結論

本論文首先對熱壓爐製程之整體流程進行了解，從複合材料進行疊貼前的預浸材準備、模具準備、熱壓爐體、成化過程以及最後零件驗收標準等進行完整的介紹，由於航太工業對於零件品質要求相當嚴格，為了使零件達到標準往往需要花費大量時間與人力不斷的反覆進爐測試，故本論文目標為建立熱壓爐製程之分析流程，希望透過 CAE 分析結果，藉此輔助進行模具底部肋條設計與模具擺放位置預測，以達到模具與複材加熱均勻性與減少進爐測試次數之目的。

首先針對初始熱壓爐模型與邊界條件進行單一模具不包含複材之熱壓爐成型熱傳 CAE 模擬，模擬結果卻發現了模具模面到達成化溫度時間有離進風口越遠時間越久之趨勢，這個結果與實驗結果不同。接著進行了進風口邊界條件修正，將文獻中所測量的爐體內流速隨高度變化之數值代入模擬設定，但是對於模擬結果改善幫助不大，最後從 OLMAR 原廠的官方網站提供了完整的熱壓爐模型在空爐狀態時，爐體內部流場狀態之後處理圖檔，發現初始熱壓爐模型並無法完整描述真實熱壓爐內部流場分布情形。

本論文參考官方網站上所提供的結果圖檔進行熱壓爐模型改良，將爐門結構加入至原始的熱壓爐模型中，同時也將進風口位置改為通風口處，在忽略通風口內部管線的影響，假設進風口每個區域都有相同流速情形下進行空爐分析，模擬結果發現流場與原廠提供的結果相似，接著同樣進行了單一模具不包含複材之熱壓爐成型熱傳分析，模擬結果發現測量點反而距離爐門越近，到達的成化時間越慢的

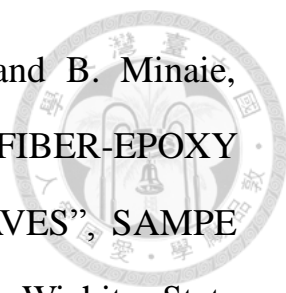
現象。最後請廠商協助測量通風口吹出流速發現不同區域的流速差異非常大，將量測流速代入進風口後，使得模擬結果中模具測量點到達成化溫度的時間與實驗結果有著相同的趨勢。

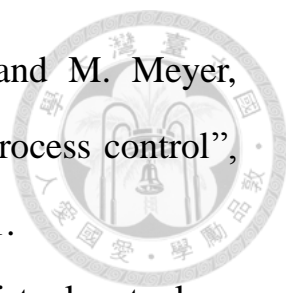
本論文在複合材料模型建立方面提出了等厚模型建立方式，根據複合材料的組成，建立了等效複合材料之熱傳分析會用到的等效密度、等效比熱和等效熱傳導共三種關鍵參數，將建立的等效材料參數套用至等厚複合材料模型進行單一模具與複合材料熱壓爐成型之 CAE 熱傳分析，而模擬結果分別針對模具、複合材料與蜂巢結構之測量點的位置進行驗證與比較，整體來說測量點位置在模面凸起處的附近，所預測到達成化溫度的時間都較不準確，此外熱壓爐內部流場情形對於模具與複材加熱效果影響非常大，為了使模擬更準確仍然需要加入放置模具的架子以及將樹脂成化反應所產生的熱量考量至模擬中。



參考文獻

- [1] M. P. Heisler, "Temperature charts for induction and constant temperature heating", Transactions of the ASME, Vol. 69, pp. 227-235, 1947.
- [2] A. C. Loos, and G.S. Springer, "Curing of epoxy matrix composites", Journal of composite materials, Vol. 17, pp. 135-169, 1983.
- [3] T. A. Bogetti, and J. W. Jr. Gillespie, "Two-dimensional cure simulation of thick thermosetting composites", Journal of composite materials, Vol. 25, pp. 239-273, 1991.
- [4] H. C. Park, and S. W. Lee, "Cure simulation of thick composite structures using the finite element method", Journal of composite materials, Vol. 35, pp. 188-201, 2001.
- [5] M. Duval, "Investigation and modelling of the heat transfer process in carbon fibre/epoxy composite tools", PhD thesis, Carleton University, Canada, 2005.
- [6] D. C. Blest, B. R. Duffy, S. McKee, and A. K. Zulkifle, "Curing simulation of thermoset composites", Composites Part A: applied science and manufacturing, Vol. 30, pp. 1289-1309, 1999.
- [7] J. S. Kim, and D. G. Lee, "Development of an autoclave cure cycle with cooling and reheating steps for thick thermoset composite laminates", Journal of composite materials, Vol. 31, pp. 2264-2282, 1997.

- 
- [8] R. Joven, R. Das, A. Ahmed, P. Roozbehjavan, and B. Minaie, “THERMAL PROPERTIES OF CARBON FIBER-EPOXY COMPOSITES WITH DIFFERENT FABRIC WEAVES”, SAMPE International Symposium Proceedings Conference, Wichita State University, January 2012.
- [9] V. K. Pillai, A. N. Beris, and P. S. Dhurjati, “Implementation of model-based optimal temperature profiles for autoclave curing of composites using a knowledge-based system”, Industrial & engineering chemistry research, Vol. 33, pp. 2443-2452, 1994.
- [10] V. Antonucci, M. Giordano, S. Inserraimparato, and L. Nicolais, “Analysis of heat transfer in autoclave technology”, Polymer composites, Vol. 22, pp. 613-620, 2001.
- [11] A. R. Upadhya, G. N. Dayananda, G. M. Kamalakannan, J. Ramaswamy Setty, and J. Christopher Daniel, “Autoclaves for aerospace applications: Issues and challenges”, International Journal of Aerospace Engineering, 2011.
- [12] G. N. Xie, J. Liu, W. H. Zang, G. Lorenzini, and C. Biserni, “Simulation and improvement of temperature distributions of a framed mould during the autoclave composite curing process”, Journal of Engineering Thermophysics, Vol. 22, pp. 43-61, 2013.
- [13] A. Maffezzoli, and A. Grieco, “Optimization of parts placement in autoclave processing of composites”, Applied Composite Materials, Vol. 20, pp. 233-248, 2013.

- 
- [14] N. Liebers, H. Ucan, M. Kühn, M. Kleineberg, and M. Meyer, “Masterbox: new concept for a dynamic autoclave process control”, CEAS Aeronautical Journal, Vol. 2, pp. 223-230, 2011.
- [15] F. Dumont, W. Fröhlingsdorf, and C. Weimer, “Virtual autoclave implementation for improved composite part quality and productivity”, CEAS Aeronautical Journal, Vol. 4, pp. 277-289, 2013.
- [16] N. E. J. Kluge, T. S. Lundström, A. L. Ljung, L.G. Westerberg, and T. Nyman, “An experimental study of temperature distribution in an autoclave”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016.
- [17] N.E.J. Kluge, T.S. Lundström, L.G. Westerberg, and T. Nyman, “Modelling heat transfer inside an autoclave: Effect of radiation”, Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2016.
- [18] S. V. Hoa, “Principles of the Manufacturing of Composite Materials”, DEStech Publications, Inc., 2009.
- [19] R. Di Sante, “Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications”, Sensors, Vol. 15, pp. 18666-18713, 2015.
- [20] 黃茂益, 「複合材料之民生應用」, 新新季刊, 42 卷第二期, 頁 87-95, 2014。
- [21] 莊達平、王正煥, 「武器用結構複合材料介紹」, 新新季刊, 42 卷第二期, 頁 24-37, 2014。
- [22] 章俊文、陳浩明, 「大型無人飛機(先進複合材料結構)的開發與中國大陸及美國相關發展」, 空軍學術雙月刊, 628 期, 頁 99-109, 2012。

- 
- [23] 雷震台，「台灣航空產業發展現況及未來展望」，中華民國航空太空學會會刊，44 卷第一期，2014。
- [24] 複合材料製造技術。
<http://met.ctu.edu.tw/ezfiles/15/1015/img/913/155376568.pdf>
- [25] 歷年航空產業產值，經濟部航空產業發展推動小組。
<http://www.casid.org.tw/Page.aspx?ID=9e2d07e8-9f61-4e7a-8485-63b5dcd16dda>
- [26] 漢翔公司先進複材中心。<http://www.aidc.com.tw/tw/list/10/01/09>
- [27] Eric Schwartz, “Aircraft and Technology Drivers for 21st Century Air Transportation Systems”, Boeing Company, 2006.