

國防大學理工學院國防科學研究所

博士學位論文

複合材料艙體結構抗爆性能研究

Study on the Blast Resistance of Composite Material
Chamber Structures

研 究 生：葉家維

指 導 教 授：陳幼良

共同指導教授：曾有志

中 華 民 國 一 一 五 年 六 月 十 六 日

國防大學理工學院博士學位論文

指導教授推薦書

國防科學研究所動力及系統工程組博士班 葉家維 君所提之論文

複合材料艙體結構抗爆性能研究

係由本人指導撰述，同意提付審查。

指導教授： 陳幼良 (簽名)

115 年 06 月 16 日

國防大學理工學院
學位論文考試委員會審定書

國防科學研究所動力及系統工程組博士班研究生 葉家維

君，所提論文

(中文題目) 複合材料艙體結構抗爆性能研究

(英文題目) Study on the Blast Resistance of Composite Material Chamber Structures

經本委員會審議，符合博士學位標準，特此證明。

博士學位論文考試委員會

委員

丁原智

邱金漢

朱聰浩

曾有志

蔡崇義

林盛志

陳幼良

指導教授

陳幼良

組長

林夏戎

所長

李彥宏

中華民國 1 1 5 年 0 6 月 1 6 日

誌謝

四年時光，說長不長，說短不短。回首求學歷程，從未將攻讀博士學位納入人生規劃的我，在種種機緣推動之下重返母校進修，從碩士至博士一路走來，內心充滿感恩與珍惜。

本論文得以順利完成，首先要感謝恩師 陳幼良教授。自碩士班以來所建立之默契，使研究過程得以充分溝通與交流。老師不僅於學術研究上給予嚴謹而紮實之指導，亦於生活與人生層面提供長期關懷與支持，使我得以兼顧學業與家庭，持續前行。亦感謝共同指導教授 曾有志教授於研究資源與學術訓練上的指導，特別是在國際期刊論文撰寫過程中，從初期摸索至最終成果發表，對於論文架構與核心論述之掌握獲益良多。誠摯感謝 沈柏成老師於數值模擬研究過程中所提供之協助與指引，使我在面臨研究瓶頸時得以釐清方向、穩定推進，並深化對各類數值方法與多尺度分析之理解。

此外，感謝學位口試委員邱銘漢博士、朱聖浩博士、丁原智博士及蔡營寬博士之寶貴建議與指正，使本論文內容更趨完善。

National Defense University

在修業歷程中，感謝游玉堂處長鼓勵我報考博士班，並感謝國科所李彥宏所長、林俊成主任，以及張大哥、廷朱姐、禾軒、系上毓雯助理、蕙君館長、品瑜館長等於行政與實務層面的協助，使修課、研究及口試相關作業得以順利完成。

於先進科研計畫執行期間，特別感謝國家中山科學研究院材電所佳詩學姐、沛筠，以及先進計畫室、中央大學與和成公司所組成之執行團隊。歷經多次爆炸測試與各項挑戰，最終順利完成三年期計畫，此為共同努力之成果與珍貴回憶。本論文研究期間，亦承蒙中科院相關計畫經費支持，以及財團法人國防工業發展基金會提供獎學金贊助，使研究工作得以穩定推進並

順利完成，對整體研究規劃與執行具有重要助益，謹致上誠摯感謝。

此次重返 SBL 實驗室，見證實驗室在多年努力下於軟硬體設備上的顯著提升，特別是彈道館之建置與完善，令人深感振奮。感謝盈志老師、博士班易全學長、子豪學長，以及碩士班勝豪學長、廉傑、凱楠、錫霖、嘉文、侑廷、毓豪、麒元、昕祐等，共同為實驗室奠定更穩固之基礎。

同時，感謝系統工程實驗室鄧世剛老師、博班同學建智、宛莖、子龍、彥德、廷宇、健平，以及所有一同求學之學弟妹們，在研究與學習歷程中的陪伴與支持，使整體求學生活更加充實而多元。

最後，特別感謝我的父母長期以來的關心與支持，讓我能無後顧之憂地專注於學業；並感謝我的太太秀秀，在生活中承擔家庭重任，陪伴我共同面對各項挑戰，亦感謝恩與愷兩位孩子帶來的支持與力量。謹將本論文成果，獻給所有曾經幫助與支持我的人。

國防大學

National Defense University

複合材料艙體結構抗爆性能研究

國防大學理工學院國防科學研究所動力及系統工程組博士學位論文

研究生：葉家維

指導教授：陳幼良

共同指導教授：曾有志

摘要

本研究聚焦於複合材料疊層結構與艙體結構在爆炸載荷作用下之抗爆行為，結合爆炸實驗與數值模擬，系統性探討材料配置、結構設計與尺度效應對結構變形反應與能量吸收機制之影響。

研究首先以複合材料疊層結構為對象，透過外爆實驗與流固耦合數值模擬，分析不同芯層材料與層間配置對爆震波傳遞、能量耗散與背板變形行為之影響，建立疊層結構抗爆性能之評估基礎。進一步延伸至複合材料艙體之內爆行為分析，設計多種艙體構型並進行爆炸實驗，量測各壁板之變形反應與破壞特徵，以評估複合材料疊層板配置與結構加強措施對艙體整體結構完整性之影響。

在數值分析方面，本研究分別建立疊層結構與艙體結構之數值模型，並透過實驗結果進行校正與驗證，確認模型對主要變形行為之預測可信度。其中，艙體結構模型進一步進行 SPH 粒子解析度收斂分析，以確立後續縮比分析之數值設定。接著，藉由數值模擬分析艙體於內爆載荷下之整體變形反應與主要變形機制。最後，運用爆炸縮比定理進行不同尺度之複合材料艙體數值分析，探討幾何尺度放大與板厚補償對艙體變形反應之影響，並建立適用於本研究參數範圍之側壁撓度比工程估算式。

研究結果顯示，於疊層結構中，多孔金屬芯層與聚脲層可透過異質界面反射、應力波衰減與材料變形吸能等機制，改善爆震能量傳遞與背板變形行為。艙體內爆分析則顯示，在高爆壓條件下，艙體變形受幾何尺度效應顯著影響，且其影響趨勢為降低艙體抗爆性能；相較之下，板厚放大可於一定爆壓範圍內抑制結構變形，但當爆炸能量持續增加時，其變形抑制效果將受限，無法持續抵銷載荷增強所造成之變形效應。整體而言，本研究所建立之實驗與數值分析架構，可作為複合材料疊層結構與艙體抗爆設計、尺度推估、輕量化防護模組評估與工程性能預測之參考依據。

關鍵詞：複合材料艙體、疊層結構、抗爆性能、內部爆炸、爆炸縮比定理、數值模擬



Study on the Blast Resistance of Composite Material Chamber Structures

Doctoral Dissertation, School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

Student: Chia-Wei Yeh

Advisor: Prof. Yu-Liang Chen

Co-advisor: Prof. Yu-Chih Tzeng

ABSTRACT

This study investigates the blast resistance of composite laminated structures and chamber structures under explosive loading through experiments and numerical simulations. The effects of material configuration, structural design, and scaling effects on deformation behavior and energy absorption mechanisms are systematically examined.

For composite laminated structures, external blast experiments and fluid-structure interaction simulations were conducted to evaluate the effects of core materials and interlayer configurations on blast wave transmission, energy dissipation, and backplate deformation. The study was then extended to the internal blast response of composite chamber structures, where different chamber configurations were experimentally tested to evaluate panel deformation, damage characteristics, and the effects of composite laminate arrangement and structural reinforcement.

Numerical models were developed for both laminated structures and chamber structures and were calibrated and validated using experimental results. For the chamber model, an SPH particle resolution convergence analysis was further performed to determine the numerical settings for scaling analysis. The

simulations were then used to analyze the overall deformation response and primary deformation mechanisms of the chamber under internal blast loading. Finally, blast scaling laws were applied to analyze composite chamber structures at different scales. The effects of geometric enlargement and thickness compensation on chamber deformation were examined, and an engineering estimation relation for the side-wall deflection ratio was established within the investigated parameter range.

The results show that metal foam cores and polyurea layers can improve blast energy transfer and backplate deformation behavior through interface reflection, stress-wave attenuation, and material deformation energy absorption. For chamber structures, geometric scale effects significantly increase deformation under high blast pressure, thereby reducing blast resistance. Increasing wall thickness can suppress structural deformation within a certain blast pressure range; however, as explosive energy further increases, its mitigation effect becomes limited and can no longer fully compensate for the deformation induced by increased loading. Overall, the experimental and numerical framework established in this study can serve as a reference for blast-resistant design, scaling estimation, lightweight protective module evaluation, and engineering performance prediction of composite laminated and chamber structures.

Keywords: Composite chamber structures, Laminated structures, Blast resistance, Internal explosion, Blast scaling laws, Numerical simulation

目錄

誌謝	i
摘要	iii
ABSTRACT	v
目錄	vii
表目錄	xi
圖目錄	xiii
符號表	xvi
1. 緒論	1
1.1 研究動機	1
1.2 研究目的	1
1.3 文獻回顧	2
1.3.1 多層複合材料結構	2
1.3.2 多孔金屬材料	3
1.3.3 聚脲高分子材料	6
1.3.4 爆炸問題分析	8
1.4 研究論文架構	11
2. 實驗方法	14
2.1 材料選擇與製備	14
2.1.1 面板材料選擇	14
2.1.2 多孔金屬材料製備與特性	14
2.1.3 聚脲材料機械性質與製備技術	16
2.2 實驗構型設計	18

2.2.1 三層疊層結構設計.....	18
2.2.2 五層疊層結構設計.....	19
2.2.3 疊層結構試片製作流程	20
2.2.4 複合材料艙體結構設計	21
2.2.5 艙體製作流程.....	24
2.3 實驗設置與輔助設備.....	27
3. 數值模擬.....	31
3.1 LS-DYNA 介紹	32
3.1.1 Lagrange 演算法	32
3.1.2 Euler 演算法.....	33
3.1.3 ALE 演算法.....	34
3.1.4 SPH 演算法.....	35
3.1.5 顯性積分與隱性積分	37
3.2 有限元模型與分析設定.....	38
3.2.1 FSI 分析數值模型.....	38
3.2.2 FSI 數值分析設定.....	38
3.2.3 SPH-FEM 分析數值模型.....	40
3.2.4 SPH 數值分析設定	41
3.2.5 SPH 離散與解析度	44
3.2.6 計算資源與求解時間	46
3.3 材料模型.....	47
3.3.1 炸藥.....	47
3.3.2 空氣.....	48
3.3.3 鋼板.....	49

3.3.4 聚脲材料.....	50
3.3.5 多孔金屬材料.....	51
3.3.6 高硬度裝甲鋼板.....	52
4. 結果與討論.....	54
4.1 三層疊層結構實驗結果.....	54
4.2 三層疊層結構數值模擬.....	56
4.2.1 數值模型.....	56
4.2.2 三層結構模型校正.....	60
4.2.3 實驗與模擬比較分析.....	62
4.2.4 不同芯層材料模擬結果.....	64
4.2.4.1 應力波理論.....	64
4.2.4.2 結構響應差異分析.....	65
4.2.5 不同爆炸效應下的結構反應.....	68
4.2.5.1 LX-14 載荷條件下的結構響應分析.....	68
4.2.5.2 TNT 載荷條件下的結構響應分析.....	69
4.2.5.3 LX-14 與 TNT 系列比較.....	71
4.3 五層疊層結構實驗結果.....	73
4.4 五層疊層結構數值模擬.....	74
4.4.1 數值模型.....	74
4.4.2 五層結構模型校正.....	76
4.4.3 三層與五層的比較分析.....	77
4.4.3.1 應力波傳播與反射耦合行為比較.....	77
4.4.3.2 應力分布與動態響應分析.....	79
4.4.3.3 結構變形與撓度歷程分析.....	83

4.4.3.4 吸能機制與能量分佈分析	85
4.4.4 五層疊層構型在爆炸載荷下之反應行為	87
4.5 複材艙體實驗結果	90
4.5.1 基準構型艙體 EC-0 實驗結果	90
4.5.2 艙體 EC-1 實驗結果	93
4.5.3 艙體 EC-2 與 EC-3 實驗結果	96
4.6 複材艙體數值模擬	102
4.6.1 數值模型	102
4.6.2 粒子解析度收斂與敏感性分析	104
4.6.3 數值模型校正	107
4.7 數值縮比分析與設計	109
4.7.1 縮比分析策略與參數定義	109
4.7.2 縮比分析構型設計	112
4.7.3 幾何縮比分析結果	116
4.7.4 板厚縮比分析結果	119
4.7.5 幾何縮比與板厚縮比比較	120
4.7.6 縮比效應與初步工程估算關係式	125
4.7.7 設計準則與工程建議	131
5. 結論與建議	132
5.1 結論	132
5.2 未來展望與建議	134
參考文獻	136
論文發表	149
自傳	151

表目錄

表 2.1	聚脲材料基本機械性質	18
表 2.2	三層疊層結構實驗構型	19
表 2.3	五層疊層結構實驗構型	19
表 2.4	內爆實驗艙體構型與疊層配置	24
表 3.1	代表性數值模型之求解時間	47
表 3.2	炸藥材料模型與狀態方程參數設定	48
表 3.3	空氣材料模型與狀態方程參數	49
表 3.4	鋼板材料模型參數	50
表 3.5	聚脲材料參數	51
表 3.6	多孔金屬材料參數	51
表 3.7	高強度鋼板材料參數	53
表 4.1	三層疊層結構爆炸測試各層損傷情形	55
表 4.2	不同厚度和芯材的三層疊層結構數值模型	59
表 4.3	疊層結構各層材料實驗與模擬比對分析結果	61
表 4.4	爆炸性能評估指標實驗與模擬結果對比	63
表 4.5	應力波透射係數計算所用材料參數	65
表 4.6	三層疊層結構的分層變形情況	67
表 4.7	不同芯層疊層結構數值模擬的 K_d 和 R_d 值	67
表 4.8	三層疊層結構於 LX-14 載荷作用下的數值模擬結果	69
表 4.9	三層疊層結構於 TNT 載荷作用下的數值模擬結果	70
表 4.10	不同炸藥質量與爆炸距離下五層疊層結構數值模型	75
表 4.11	五層與三層等效疊層結構各層材料之吸能分佈與 SEA 比較	87

表 4.12 艙體 EC-2 結構壁板變形實驗結果	101
表 4.13 艙體 EC-3 結構壁板變形實驗結果	101
表 4.14 敏感性分析之 SPH 離散參數設定	106
表 4.15 不同 SPH 粒子解析度之收斂與敏感性分析結果	106
表 4.16 艙體 EC-3 結構之數值模型驗證結果	108
表 4.17 不同炸藥當量縮比因子與炸藥數值模型參數.....	112
表 4.18 不同炸藥當量幾何縮比(SZ)系列尺寸規劃	114
表 4.19 不同炸藥當量板厚縮比(TH)系列尺寸規劃.....	115
表 4.20 幾何縮比系列各向撓度比分析結果.....	118
表 4.21 板厚縮比系列各向撓度比分析結果.....	120
表 4.22 幾何縮比系列各向單位重量撓度比分析結果.....	123
表 4.23 板厚縮比系列各向單位重量撓度比分析結果.....	124
表 4.24 內爆縮比相關研究之量化比較.....	130

國防大學

National Defense University

圖目錄

圖 1.1	研究架構圖	13
圖 2.1	多孔金屬的結構圖	15
圖 2.2	多孔金屬應力應變曲線	15
圖 2.3	聚脲機械性質測試試片	16
圖 2.4	聚脲材料真實應力應變曲線	17
圖 2.5	聚脲噴塗設備與製備過程	18
圖 2.6	疊層結構試片製作流程圖	20
圖 2.7	實驗艙體構型與各部位名稱示意圖	21
圖 2.8	複材疊層板製作流程圖	25
圖 2.9	艙體製作流程圖	26
圖 2.10	爆炸實驗設置	29
圖 2.11	炸藥與五層疊層結構實驗設置	29
圖 2.12	艙體內爆實驗設置示意圖	30
圖 2.13	三維掃描設備	30
圖 3.1	數值模擬流程圖	31
圖 3.2	三種數值描述方法的網格移動圖	35
圖 3.3	粒子支撐域與平滑核函數示意圖	36
圖 3.4	疊層結構四分之一有限元模型	38
圖 3.5	疊層結構邊界條件設定	40
圖 3.6	艙體結構四分之一有限元模型	41
圖 3.7	艙體 SPH 邊界條件設定	43
圖 3.8	平滑粒子流體動力學(SPH)粒子佈點與支撐域示意	46

圖 4.1	三層疊層結構爆炸測試結果.....	55
圖 4.2	三層疊層結構爆炸測試損傷與變形尺寸比較.....	56
圖 4.3	三層疊層結構數值模型.....	58
圖 4.4	結構芯層損壞實驗與模擬結果比較的局部放大圖.....	61
圖 4.5	損傷比例係數和背板變形率的實驗與模擬結果對比.....	63
圖 4.6	不同芯層疊層結構數值模擬的 K_d 與 R_d 值比較圖.....	68
圖 4.7	三層疊層結構在 LX-14 與 TNT 炸藥作用下之比較結果.....	72
圖 4.8	構型 E5-CA-01 實驗結果.....	74
圖 4.9	五層疊層構型四分之一模型.....	75
圖 4.10	實驗構型 E5-CA-01 與數值模型 N5-CA-04 結果比較.....	77
圖 4.11	爆震波作用於不同疊層結構的差異分析.....	79
圖 4.12	不同疊層結構的應力分布情形差異分析.....	81
圖 4.13	三層與五層疊層結構之應力歷程與應力分布比較.....	82
圖 4.14	三層與五層疊層結構面板中心變形速度與加速度比較.....	83
圖 4.15	三層與五層疊層結構前後面板中心撓度歷程比較.....	84
圖 4.16	接觸與非接觸爆炸條件下疊層結構各層能量吸收分佈比較.....	87
圖 4.17	不同炸藥當量載荷條件下爆震波傳播動態及結構響應.....	89
圖 4.18	爆炸過程中 N5-CA-03 結構背板中心速度變化歷程.....	90
圖 4.19	艙體 EC-0 爆炸實驗結果.....	92
圖 4.20	艙體 EC-0 爆炸實驗三維量測結果.....	93
圖 4.21	艙體 EC-1 爆炸實驗結果.....	95
圖 4.22	艙體 EC-1 爆炸實驗三維量測結果.....	95
圖 4.23	艙體 EC-2 爆炸實驗結果.....	99
圖 4.24	艙體 EC-3 爆炸實驗結果.....	100

圖 4.25 複材艙體數值模型與內爆受壓疊層結構示意圖	103
圖 4.26 不同 SPH 粒子間距下數值撓度與實驗結果之誤差比較	107
圖 4.27 艙體 EC-3 爆炸實驗與數值模擬對照圖	109
圖 4.28 幾何縮比(SZ)系列艙體幾何模型	114
圖 4.29 板厚縮比(TH)系列艙體幾何模型	115
圖 4.30 幾何縮比 SZ-5 構型代表性單元分析	118
圖 4.31 幾何縮比與板厚縮比下各向撓度比比較	121
圖 4.32 幾何縮比與板厚縮比下各向單位重量撓度比比較	124
圖 4.33 幾何縮比系列側壁無因次撓度比擬合曲線	126

國防大學

National Defense University

符號表

英文字母	英文名稱	中文說明
A	Proportional coefficient	經驗估算式比例係數
A_e	Element area	代表性單元面積
C	Wave speed	波速
D	Diameter	炸藥直徑
D_1	Face-sheet damage diameter	迎爆面板破壞直徑
D_2	Core damage diameter	芯層破壞直徑
D_3	Backplate indentation diameter	背板凹陷範圍直徑
D_p	Plate flexural rigidity	撓曲剛度
D_v	Top opening diameter	頂部開孔直徑
E	Young's modulus	楊氏係數(GPa)
$F(t)$	Force-time history	受力時間歷程
g	Gravitational acceleration	重力加速度
H	Equivalent total thickness	艙體壁板等效總厚度
H_0	Reference thickness	艙體基準構型之等效總厚度
h_1	Face-sheet damage depth	迎爆面板破壞深度
h_2	Core crushing depth	芯層壓潰深度
h_3	Backplate outward deflection	背板外鼓撓度
I	Impulse	衝量
K_d	Damage ratio coefficient	破壞比例係數
L	Length	炸藥長度

M	Mass	結構總質量
n	Charge amplification factor	炸藥當量放大倍數
p	Pressure	爆炸壓力
$p(t)$	Pressure–time history	壓力時間歷程
R	Stand-off distance	爆源至受壓構件距離
R_d	Backplate deformation ratio	背板變形率
s	Geometric scaling factor	幾何縮比因子
t_i	i^{th} layer thickness	疊層結構第 i 層厚度
t	Time	時間
W	TNT equivalent charge mass	TNT 當量炸藥量
W_o	Reference charge mass	基準 TNT 當量炸藥量
Z	Scaled distance	爆炸縮比距離
Z_o	Reference scaled distance	基準爆炸縮比距離

希臘符號

英文名稱

中文說明

α	Geometric scaling exponent	幾何縮比指數
β	Scaled-distance exponent	縮比距離指數
γ	Thickness compensation exponent	板厚補償指數
δ	Deflection	結構撓度
δ_x	Longitudinal deflection	前後壁撓度
δ_y	Bottom deflection	底板撓度
δ_z	Lateral deflection	側壁撓度
δ/H	Deflection ratio	撓度比
δ_z/H	Side-wall deflection ratio	側壁撓度比
ρ	Density	密度

計量單位	英文名稱	中文說明
g	gram	克
g/cm ²	gram per square centimeter	克／平方公分
g/cm ³	gram per cubic centimeter	克／立方公分
GPa	gigapascal	吉帕
kg	kilogram	公斤
kg ⁻¹	per kilogram	每公斤
kg/m ² ·s	kilogram per square meter-second	公斤／平方公尺秒
kg/m ³	kilogram per cubic meter	公斤／立方公尺
m	meter	公尺
m·kg ^{-1/3}	scaled distance unit	縮比距離單位
m/s	meter per second	公尺／秒
Mbar	megabar	兆巴
mm	millimeter	毫米
MPa	megapascal	兆帕
ms	millisecond	毫秒
N	newton	牛頓
s	second	秒
μs	microsecond	微秒