

防護結構抗貫穿能力之研究方法

梁卓中¹ 吳炳文²

¹大葉大學 機械與自動化工程學系

²中山科學研究院 設施供應處

摘要

防護結構面臨貫穿威脅的來源除了傳統武器之輕兵器外，主要還有砲彈、炸彈、爆藥等發生爆炸後產生大量破片，這些破片會對結構產生撞擊(impact)、貫入(penetration)、貫穿(perforation)等破損。因此，如何評估防護結構之抗貫穿性能及如何提昇其抗貫穿能力乃為極其重要的工作，且為軍事科學家及學者專家積極研究之課題。本文將簡介半經驗法、解析、數值模擬與試驗等研究防護結構抗貫穿能力之常用方法。

1.前言

對於攻擊性武器和防護設施的發展，彼此是一種相生相剋的循環過程，任何一方新的進步必定引致另一方跟進突破。近百年來，撞擊與貫穿力學的研究雖然已有長足的發展，然而在這個複雜的學門裡，仍然有許多未知的領域等待探索，為歷來軍事科學家及兵器設計者所重視之課題。針對目前國際戰略趨勢，及核能武器的限制發展，近年來武器系統研發設計者無不盡其所能，為加強武器彈藥的威力積極地進行設計與研究，在傳統彈藥之研發如高爆戰防彈 (High explosive anti tank ; HEAT)、翼穩脫殼穿甲彈(Armour piercing fin stabilized discarding sabot ; APFSDS)及高壓爆震彈(High explosive squash head ; HESH)等，並且在武器系統之發展方向，亦逐漸朝向提昇武器彈藥終端效應的研究。另一方面亦積極建立有效的防護設施結構，軍事上諸如飛彈陣地、掩體結構、船艦重要設備隔艙壁結構如彈藥庫、生繫艙間(CIC、雷達與通訊)及重要管線 (通訊、指管、及電力線路與海水消防管路)，裝甲戰車殼體結構，飛彈發射箱結構，野戰防禦工事之隧道及交通壕、補給庫，海岸防禦工事之觀測所，空軍基地及機場設施之修護及勤務中心，一般航空器之飛鳥撞擊防護與太空載具或人造衛星之隕石撞擊防護等，民生工業交通工具如警車、保全用的車子，亦會考量槍砲彈之撞擊防護等。一般輕兵器使用之子彈或爆炸後產生大量破碎片可稱為投射體 (projectile) (如彈丸、彈片、碎片等)，投射體分類如圖 1(a)所示，投射體形狀如圖 1(b)所示。而被投射體撞擊的對象，其在功能上或結構上自成一體的最小物體稱為標靶 (target) (或稱靶板)，靶板分類如圖 2 所示。而防護結構遭受之貫穿威脅來源除了傳統武器之輕兵器外，主要還有砲彈、炸彈、爆藥等發生爆炸後產生大量破片(fragment)，這些破片會對防護結構體造成撞擊(impact)、貫入(penetration)、貫穿(perforation)、嵌入 (embed) 和跳彈 (ricochet) 等破損現象。

其中，貫入是指投射體在撞擊過程中，由於某些原因被阻止住而停留在靶內的現象；貫穿是指投射體穿透標靶的現象；而跳彈是指投射體對靶版的撞擊既沒有發生貫入，也沒有貫穿，而是發生偏轉，從靶版表面擦過而脫離靶版的現象[1]。對於武器彈藥和防護結構相關的文獻報告，世界各國大多視為機密資料，因而較難獲得，少部份有關結構撞擊與貫穿行為之分析研究，亦多屬於民生公共工程安全評估或僅為定性之討論。在研究撞擊和貫穿問題所涉及之學理比較複雜，而一般在貫穿力學研究的範圍可分為：(1)投射體撞擊靶體之破壞型態：一般材料承受投射體撞擊瞬間，靶材破壞基本型態為脆性破壞(brittle fracture)、延性穿孔成長(ductile hole growth)、表面碎裂、剪切沖塞(plugging)、徑向裂紋(radial fracture)、花瓣型破壞(petalling)和靶體背面剝離(spalling)等如圖 3[1]所示。(2)影響終端彈道的重要參數之相關性研究，如投射體質量、投射體形狀、撞擊速度、入射角(angle of obliquity)、攻角(angle of attack)和靶體厚度等參數[2-5]，其中撞擊速度分類如表 1 所示，材料受撞擊效應如表 2 所示[1]。而投射體撞擊靶體之入射角和攻角的定義如圖 4 所示。最近單層、多層及三明治防護結構對於不同形狀投射體及更寬廣速度撞擊之損壞防護，在軍事上和民生工業上之應用，已逐漸成為重要的課題。而多層結構型式有接觸型式及間隙型式如圖 5 所示及三明治防護結構如圖 6 所示，單層、多層及三明治結構之材料有金屬、純鋁、鋁合金、陶瓷、纖維強化塑膠、混凝土、鋼筋混凝土等材料。同時，在初步規劃設計階段能提供可行之貫穿分析工具乃是極其重要之工作。

在研究投射體貫入或貫穿破壞效應的分析中有三個研究方向：(1)應用數學解析方式引入適當地假設條件下，以理想化激震波傳遞或撞擊負荷，俾得以理論模式求解之，唯僅限於簡單問題之研究，無法應用於解決現實複雜的問題。(2)應用試驗方式藉選取終端彈道影響參數，以進行全尺寸或縮尺的試驗，由所得實驗結果，再經由統計迴歸方法分析，以求得所謂的經驗公式或圖表，或由此結果實際得知結構承受撞擊與貫入現象之動態反應。(3)應用數值分析法，即利用複雜的材料動態反應行為，由基本力學定律(如質量、動量、能量等三大守恆定律)，適當引入破壞判據(failure criteria)，藉有限元素或有限差分等數值方法並交由電腦計算，以求得數值結果。

2. 解析法

在解析法方面的研究，主要在尋求一合適的理論，當其假設與所研究問題之物理現象相符合時，則可藉其求解，但此法之限制乃為由微分方程所得之答案，可能無法藉其來完全模擬實際問題之物理現象。解析法之分析模型是根據彈靶系統相互作用的物理現象導出的各參數之間的一組關係式與經驗公式有些相似，但由於考慮了比較合理的簡化物理模型，從而引進較多的物理參數，在不喪失其簡易性的同時使關係式比經驗公式有所改進，使之更合理。為了簡化貫入或貫穿問題，常常使用一些限制性的假定。常用的假設有：彈丸為理想剛體；靶板為理想塑性狀態；靶板

按特定的模式發生破壞(如剪切沖塞、崩落(scabbing)、貫入、延性貫穿等)。建立分析模型的關鍵在於如何將複雜的穿甲問題抽象出合適的簡化模型。要求做到(1)對穿甲現象有較充分的認識；(2)掌握支配穿甲過程實質的主要物理量或參數；(3)提出適當的假設；(4)根據能量守恒、動量和質量守恒三大定律，將簡化的物理模型變成便於解析的數學模型(一維或二維的代數方程或微分方程)，由前述可見，因為分析模型有較強的理論根據，所以能夠對穿甲問題有較深的揭示，加深人們的認識，預報穿甲過程的結果有較高的可信度。但是，因為分析模型也是針對某種穿甲機構提出的，所以它的使用也受到一定範圍的限制；由於實際穿甲過程複雜多變，而分析模型往往是單一機構的，並且有時採用經驗參數或一些不易得到的材料參數，就使得分析模型預報結果有一定的誤差，這種誤差有時比經驗公式還大。

3. 試驗法

由於貫穿問題十分複雜，試驗研究乃是主要的、基本的研究手段，一般動態試驗材料應變率之反應如圖 7 所示。採用這種方法的主要目的為(1)建立經驗公式(包括彈靶材料性質、幾何形狀特徵和撞擊速度等彈道參數的基本關係)或(2)用來驗證和核對理論分析方法提供的預測值。有些試驗在貫入末期之量測，往往由於高幅應力波和塑性波前超前於彈丸頭部，會提前啟動信號使數據不準確，另外，亦由於靶內有孔也會帶來失真，這些問題於試驗時應特別留意。一般根據研究的需要，測試技術和設備也是不斷發展的，例如，發射高能量 X 光脈衝可看透鋼靶內一定的深度，從而獲得各種數據，這樣的設備和試驗將更有助於對貫穿現象和機制的理解，這方面的技術正在發展之中，而且必定可以得到廣範的應用。

在數值分析法研究方面，一般以微分方程、狀態方程式、組構關係和初始條件來求解問題，有三組性質不同的方程式或關係式可利用亦即(1)微分方程(質量、動量及能量守恒方程)之數學描述法、空間分割法(有限差分法與有限元素法)及時間積分法(隱性法與顯性法)；(2)反應材料在撞擊過程可能呈現的彈性、塑性、流體動力學狀態的組構方程；(3)用質量位移速度表示材料應變率的幾何關係式，即協調方程。將這些方程式在特定的幾何條件(靶板破壞模式)、邊界條件和初始條件下求解，是一個巨大的任務，往往使用各種龐大的計算程序在巨型計算機上進行。

4. 半經驗法

貫穿力學之研究涉及學理十分之複雜，如彈塑性力學、幾何非線性力學、接觸力學、撞擊力學以及狀態方程式等，對於複雜的問題，不易應用解析法求解，若要求得完整之解析解是十分困難，一般僅能求得近似解。而數值分析法涉及軟體之適用性及其範圍受限之因素，在分析模型之建立，材料性質之選定、破壞判據之決定、數值收斂準則、時間步幅大小之選用均因人而異，軟體之使用上往往無法令人覺得很有親和力，有些軟體開發對模型建立之功能特別強，但問題的解決並不適切，

材料動態本構模型和破壞準則之研究，並不是十分完備。因此，在碰撞及貫穿理論研究中，除近似解、數值分析外，半經驗法也是另一重要方法。因此，建立可行之簡易防護結構抗貫穿半經驗法評估模式，適用於初步規劃設計階段使用，則為一極為重要之工作[6-33]。

由於貫穿問題之研究涉及(1)投射體撞擊標靶破壞型態。(2)影響終端彈道的重要參數如彈頭形狀、速度、投射體質量、入射角。(3)投射體的形狀尺寸與標靶厚度。(4)投射體材料機械性能與標靶材料性能的相對值，決定了撞擊時標靶受到損壞的大小。(5)撞擊速度問題。(6)投射體命中標靶時速度方向與垂直靶版的法線間的入射角等因素。其學理十分複雜，因此，利用簡化之數學模式及理論、配合實驗數據、安全考量等因素，進行統計迴歸分析所建立之半經驗法，提供設計參考使用，則為一極為重要之工作。

多重線性迴歸分析法研究防護結構抗貫穿能力之文獻並不多，而且都偏向於貫入深度經驗公式之研究，採用統計理論探討殘餘速度的文獻幾乎很少，同時，依不同撞擊速度範圍來進行多重線性迴歸分析法研究防護結構抗貫穿能力的文獻更是寥寥無幾，因此，選定影響貫穿之重要參數後，依不同撞擊速度範圍，再利用多重線性迴歸分析法研究防護結構抗貫穿能力是值得探討之課題。

以統計理論中多重迴歸分析，藉由非線性模式變換成線性迴歸模式，處理貫穿試驗之實驗數據，其中，並採用最小平方法，求出迴歸變數之係數，建立簡易之防護結構抗貫穿半經驗法之評估模式，來預估在不同撞擊速度範圍貫穿防護結構後之殘餘速度。

過去由於儀器設備之簡易與人為擷取數據資料之誤差等主觀條件的限制，無法用實驗的方法獲得更多穿甲過程的數據，亦無適合的理論和計算工具來深入研究各種參數對穿甲過程的影響，因而往往在宏觀上根據試驗的初始條件和結果以及對發生該穿甲現象的理解，總結出有一定近似程度的經驗公式，來導引彈靶的設計工作。但由於目前計算分析工具及實驗設備之進步，經由理論推導之方式，在簡化之數學模式中適當選定終端彈道影響參數，推導出理論解後，再將所簡化之因素，配合大規模的實型試驗或縮尺試驗，及考量安全係數來予以修正，由所得結果，再經統計迴歸，以求得經驗公式或圖表(含列線圖)，此種半經驗法，在某種範圍具有相當之可靠度，雖然這種方法涉及的主要參數少，但使用起來直接、方便，所以一直延續到現在，仍然為工程技術人員所廣泛使用。

本文所述半經驗法之防護結構抗貫穿評估模式主要包括：(1)基本資料搜集：整理所有可能之參數如目標靶材料性質、靶厚度、目標靶幾何構型，參數分析以決定重要參數。(2)統計分析：非線性關係函數、多重線性迴歸模型分析、最小平方函數、線性迴歸模型中參數的估計。(3)貫穿分析：殘餘速度之預估模式建立及分析。整個貫穿評估程序之計算流程如圖 8 所示。

5. 結論

針對不同靶材如複合型靶板、多層靶板、多層靶板同一種組合但不同排列方式、多層靶板間每一層厚度變化對抗貫穿性質之影響等問題，搜集更多實驗數據，採用多重線性迴歸分析，建立各類問題之預估模式，均為未來值得研究之課題。而不同靶材像複合型靶板、三明治結構、多層靶板間每一層厚度變化、鋼筋混凝土，對抗貫穿性質之影響，其數值模擬，亦均為未來值得研究之課題。

參考文獻

1. Backman, M. E., and Goldsmith, W., "The Mechanics of Penetration of Projectiles into Targets," International Journal of Engineering Science, Vol.16, pp.1-99, 1978.
2. Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuk, L. B., and Curran, D. R., "Impact Dynamics," A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc., 1982.
3. 洪勝治, "貫穿力學在終端彈道之應用與彈頭設計," 貫穿力學研討會專輯, 中正理工學院軍事工程系, pp.4-1~4-63, 1988.
4. Sih, G. C., "Diagnostic Aspects of Armor Penetration and Protection," 八十三年度中正理工學院研討會-終端彈道學研討會資料集, 中正理工學院機械工程系, pp.1-200, 1994.
5. 趙國志編著 "穿甲工程力學," 兵器工業出版社, pp.1-96, 1992.
6. The Johns Hopkins University, "The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments; Empirical Relationships for Fragment Residual Velocity and Residual Weigh," Technical Report No.47, BAL, Project THOR, 1961.
7. Van Valkenburg, M. E., Clay, W. G., and Huth, J. H., "Impact Phenomena at High Speeds," Journal of Applied Physics, Vol.27, No.10, pp.1123-1135, 1956.
8. Baker, W. E., Kulesz, J. J., Westine, P. S., Cox, P. A., and Wilbeck, J. S., "A Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loading on Structures", Report No. DOE/TIC-11268, United States Department of Energy Albuquerque Operation Office, Amarillo Area Office Pantex Plant, Amarillo, Texas, 1980.
9. Baker, W. E., Cox, P. A., Westine, P. S., Kulesz, J. J., and Strehlow, R. A., "Explosion Hazards and Evaluation," Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.
10. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Structural Laboratory "Fundamentals of Protective Design for Conventional Weapon," U.S. Department of Commerce National Technical Information Service Springfield, VA 22161, 1984.
11. Kimsey, K. D., and Zukas, J. A., "Contact Surface Erosion for Hypervelocity Problems," U.S. Army Ballistic Research Laboratory Aberdeen Proving Ground, Maryland, Memorandum report BRL-MR-3495, pp.1-34, 1986.
12. Virostek, S. P., Dual, J., and Goldsmith, W., "Direct Force Measurement in Normal

- and Oblique Impact of Plates by Projectiles,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.6, No.4, pp.247-269, 1987.
13. Radin, J., and Goldsmith, W., “Normal projectile penetration and perforation of layered targets,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.7, No.2, pp.229-259, 1988.
 14. AD-A243 272, Army TM5-1300, Navy NAVFAC P-397, Air Force AFR88-72, Department of the Army, The Navy and the Air Force, “Structures To Resist the Effects of Accidental Explosion,” U.S. Department of Commerce National Technical Information Service Springfield, VA 22161,1990.
 15. Gupta, N. K., and Madhu, V., “ Normal and Oblique Impact of a Kinetic Energy Projectile on Mild Steel Plates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 12, No.3, pp.333-343, 1992.
 16. Bodt, B. A., and Grote, R. L., “Vulnerability analyses for the Command and control vehicle (C2V): A supporting penetration equation for aluminum-kevlar composites,” Army Research Laboratory, ARL-TR-583, 1994.
 17. Almohandes, A. A., Abdel-Kader, M. S., and Eleiche, A. M., “Experimental Investigation of the Ballistic Response of Steel-fiberglass Reinforced Polyester Laminated Plates,” *Composites Part B: Engineering*, Vol.27, No.5, pp. 447-458,1996.
 18. Gupta, N. K., and Madhu, V., “An Experimental Study of Normal and Oblique Impact of Hard-core Projectile on Single and Layered Plates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.19, No. 5-6, pp.395-414, 1997.
 19. Potti, S. V., and Sun, C. T., “Prediction of Impact Induced Penetration and Delamination in Thick Composite Laminates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.19, No.1, pp.31-48, 1997.
 20. Alekseev, A. S., Vedernikov, Y. A., Velichko, I. I., and Volkov, V. A., “The rocket conception of cumulative impact defense of the earth against dangerous space objects,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.20, No.1-5, pp.1-12 1997.
 21. Dinovitzer, A. S., Szymczak, M., and Erickson, D., “Fragmentation of targets during ballistic penetration events,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.21, No.4, pp.237-244, 1998.
 22. Piekutowski, A. J., Forrestal, M. J., Poormon, K. L., and Warren, T. L., “Penetration of 6061-T6511 Aluminum Targets by Ogive-nose Steel Projectiles with Striking Velocities between 0.5 and 3.0 km/s,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.23, pp.723-734, 1999.
 23. Nebolsine, P. E., Humer, N. D., Harmon, N. F., and Baker, J. R., “Statistical Analysis

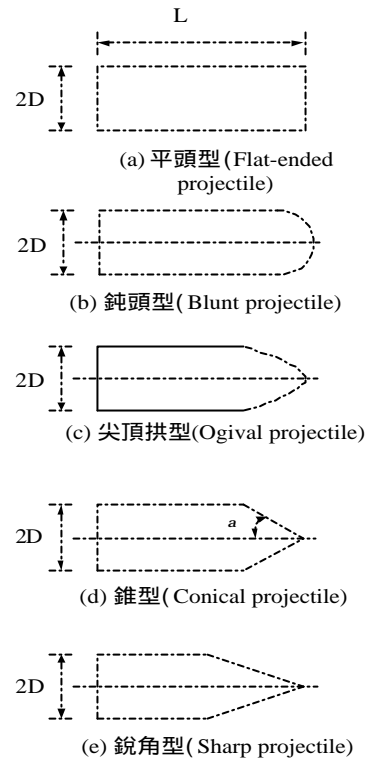
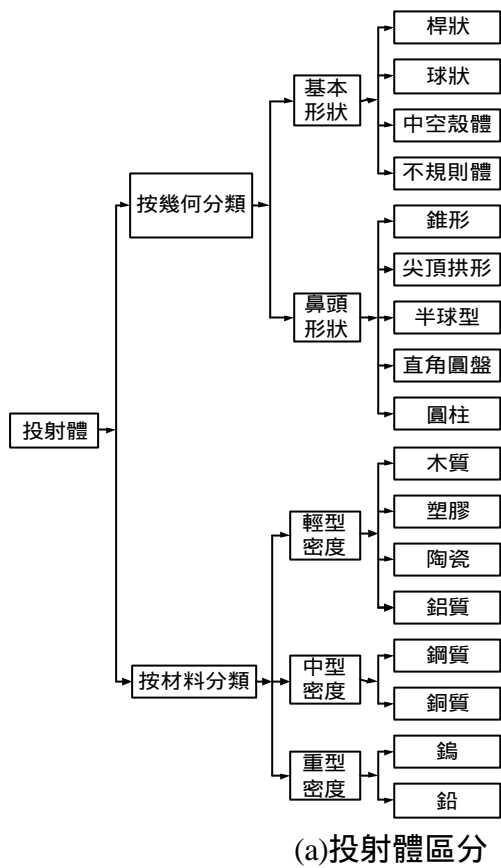
- of NRL 1964–1969 Hypervelocity Rod-Plate Impact Data and Comparison to Recent Data,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 23, No.1, Part 2, pp. 639-649, 1999.
24. 李雅榮, 徐堯, “船用複合夾心材衝擊特性之探討,” *中國造船暨輪機工程學刊*, 第十八卷第二期, pp.1-13, 1999.
 25. Borvik, T., Langseth, M., Hopperstad, O. S., and Malo, K. A., “Ballistic Penetration of Steel Plates,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol.22 pp.855-886, 1999.
 26. Zukas, J. A., “High velocity impact dynamics,” A Wiley-Interscience Publication John Wiley & Sons, Inc., 1990.
 27. Baker, W. E., Westine, P. S., and Dodge, F. T., “Similarity methods in engineering dynamics –Theory and practice of scale modeling revised edition,” *Fundamental studies in engineering 12*, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 1991.
 28. Recht, R. F., and Ipson, T. W., “Ballistic perforation dynamics,” *Transactions of the ASME: Journal of Applied Mechanics*, September, pp.384-390, 1963.
 29. Hohler, V., Langheim, H., and Stilp, A. J., “Ballistic limit tests,” Emst-Mach-Institute, E6/90, By order of the Chung Shan Institute of Science and Technology, Lung-Tan, Taiwan, R.O.C., EDV-No.275697, 1990.
 30. Goldsmith, W., and Finnegan, S. A., “Penetration and perforation processes in metal targets at and above ballistic velocities,” *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.13, pp.843-866, 1971.
 31. Li, K., and Goldsmith, W., “Perforation of steel and polycarbonate plates by tumbling projectiles,” *International Journal of Solids and Structures*, Vol.34, No. 35-36, pp.4581-4596, 1997.
 32. Yarin, A. L., Roisman, I. V., and Hohler, V., “Model for ballistic fragmentation and behind-armor debris,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No.2, pp.171-201, 2000.
 33. Cho-Chung Liang, Ming-Fang Yang and Pin-Wen WU (2001) “Optimum Design of Metallic Corrugated Core Sandwich Panels Subjected to Blast Loads”, *Ocean Engineering*, 28, pp825-861. SCI, EI.
 34. 吳炳文(2001), “防護結構抗貫穿能力之研究”, 國防大學中正理工學院國防科學研究所博士論文

表 1 撞擊速度區分與應用 [1]

項次	類別	應用與定義	速度範圍 m/s
1	最低速限(lowest velocity range)	係小於一般軍事武器，以自由落體方式的撞擊速度	0-25
2	次兵工速限(sub-ordnance velocity range)	一般於實驗室模擬撞擊速度	25-500
3	兵工速限 (ordnance velocity range)	一般軍事武器撞擊速度	500-1300
4	超兵工速限 (ultra-ordnance velocity range)	一般彈頭碎片或特殊用途的投射武器速度	1300-3000
5	極高速限(hyper velocity range)	錐形裝藥彈頭的噴流(Jets)或流星撞擊的速度	大於 3000

表 2 材料的衝擊響應[1]

log _e	撞擊速度 v_0 (m/s)	效應	加載方式
8	>12000	爆炸撞擊造成固體氣化	爆炸加速
7	3000~12000	流體動力學形態，材料可壓縮性不可忽略	爆炸加速
6			
5	1000~3000	材料呈流體性態，壓力接近或超過材料強度，密度是主要參數	常規火炮、輕氣炮
4	500~1000	材料呈黏性，強度仍起主要作用	常規火炮
3			
2	50~500	主要塑性變形	機械方法 壓縮空氣槍
1	<50	主要是彈性變形，某些局部有塑性變形	機械方法 壓縮空氣槍
0			
-1			



(b) 鼻頭型式

圖 1 投射體分類

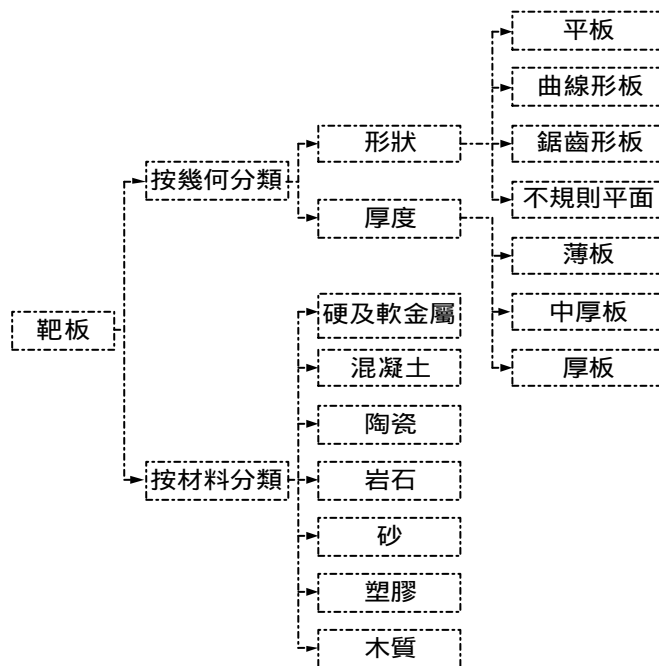
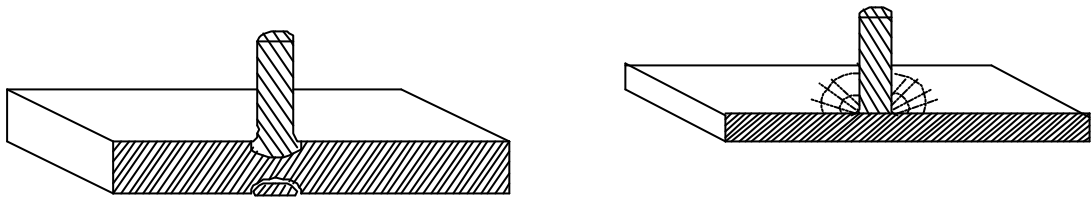
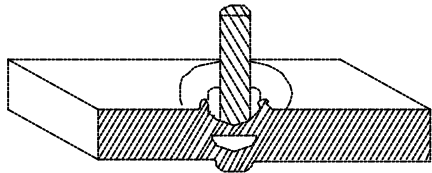


圖 2 靶板分類



(1) 初始應力波破壞 (Fracture due to initial stress wave)

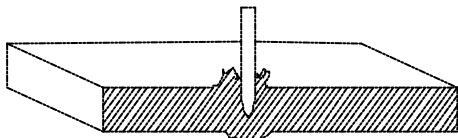
(5) 徑向破壞 (Radial fracture behind initial wave in a brittle target)



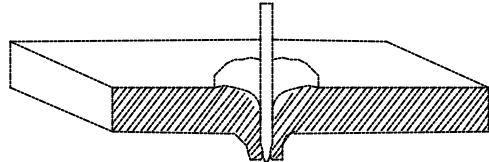
(2) 剝落破壞 (Spall failure)



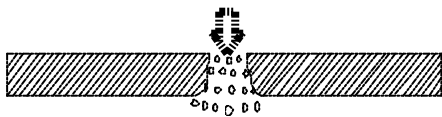
(6) 剪切衝塞 (Plugging)



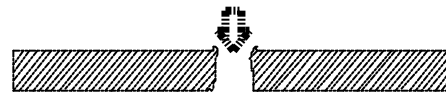
(3) 靶前花瓣型 (Petaling, frontal)



(7) 靶後花瓣型 (Petaling, rearward)



(4) 破碎 (Fragmentation)



(8) 延性擴孔 (Ductile hole enlargement)

圖 3 貫穿之破壞型態[1]

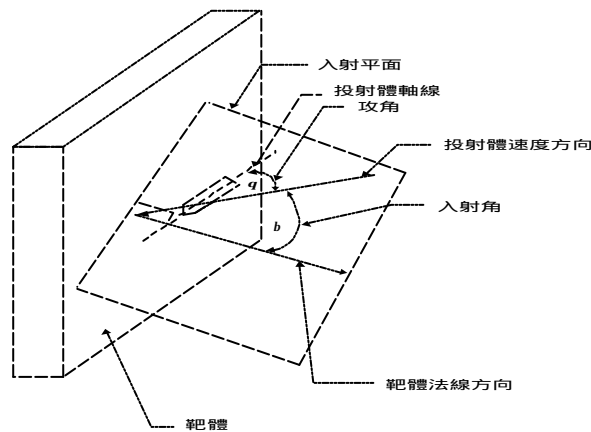
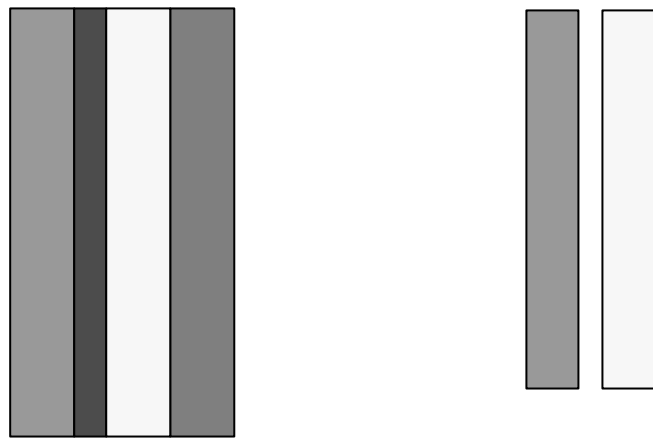









圖 4 投射體與靶板幾何關係示意圖



- | | | | | | |
|---|---|------|---|---|--------|
|  | : | 外層鋼板 |  | : | 主要裝甲結構 |
|  | : | 玻璃鋼板 |  | : | 間隙 |
|  | : | 陶瓷 |  | : | 次要裝甲結構 |
|  | : | 內層鋼板 | | | |

(a)接觸型靶板

(b)間隙型靶板

圖 5 多層防護結構型式

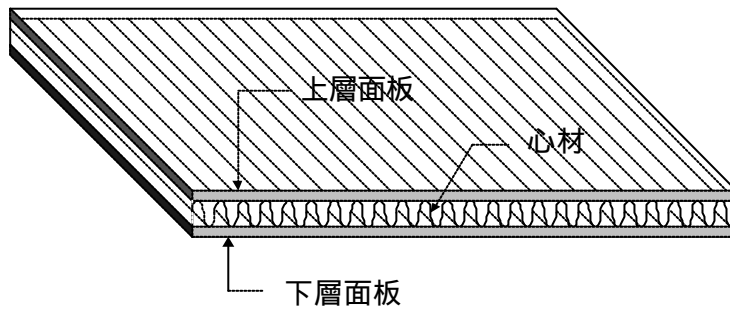


圖 6 三明治防護結構型式

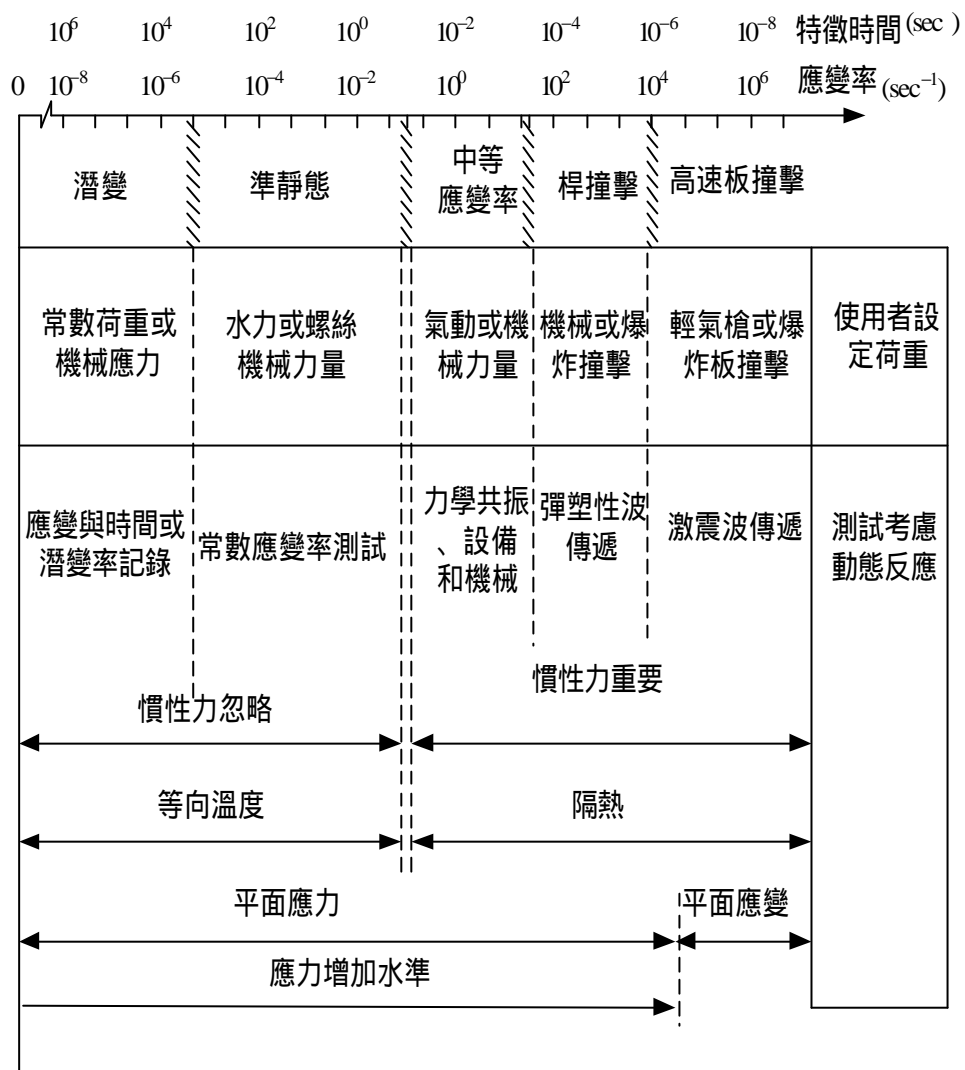


圖 7 動態機械試驗材料應變率之反應[2]

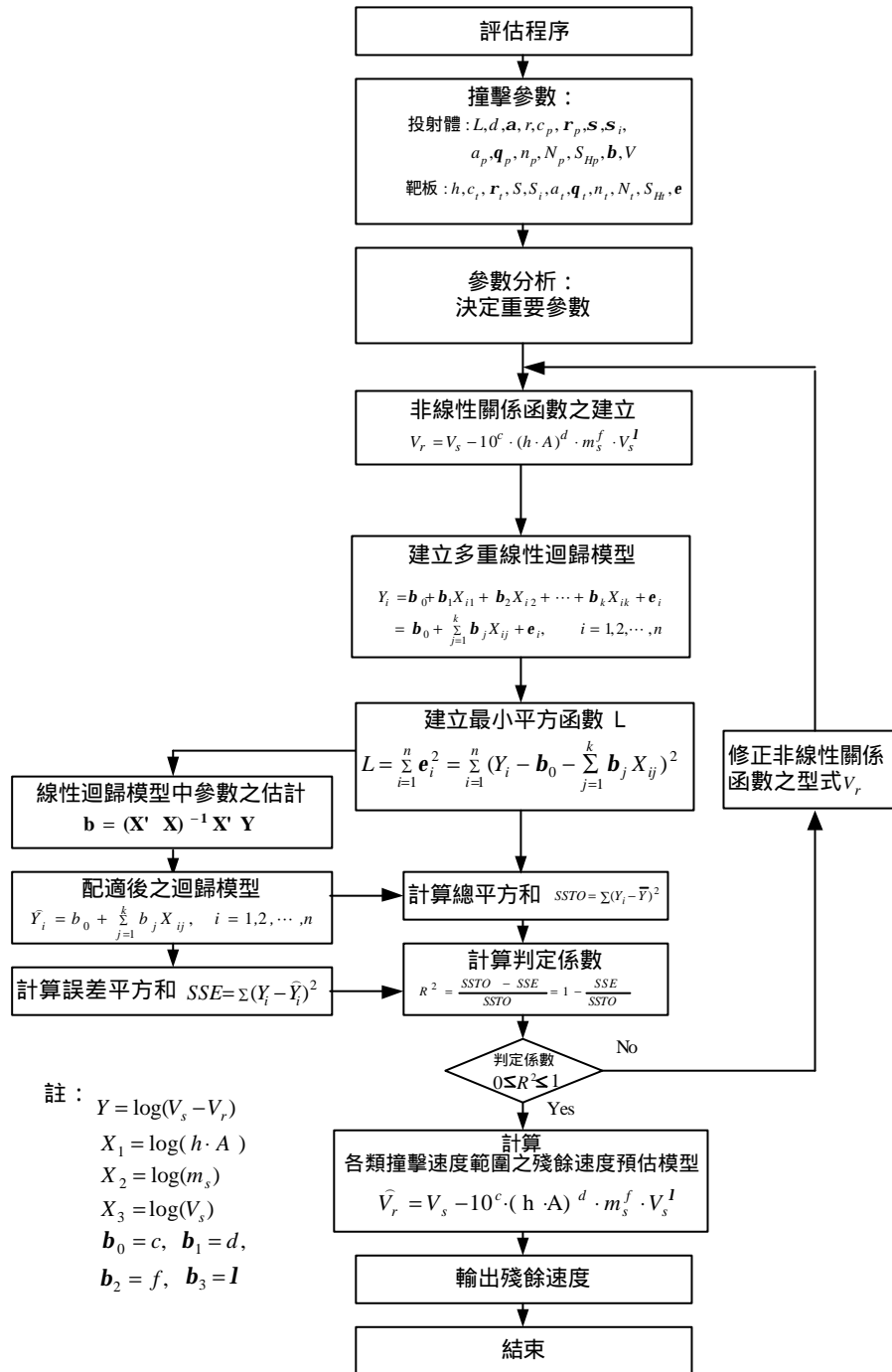


圖 8 多重線性迴歸半經驗評估程序[34]