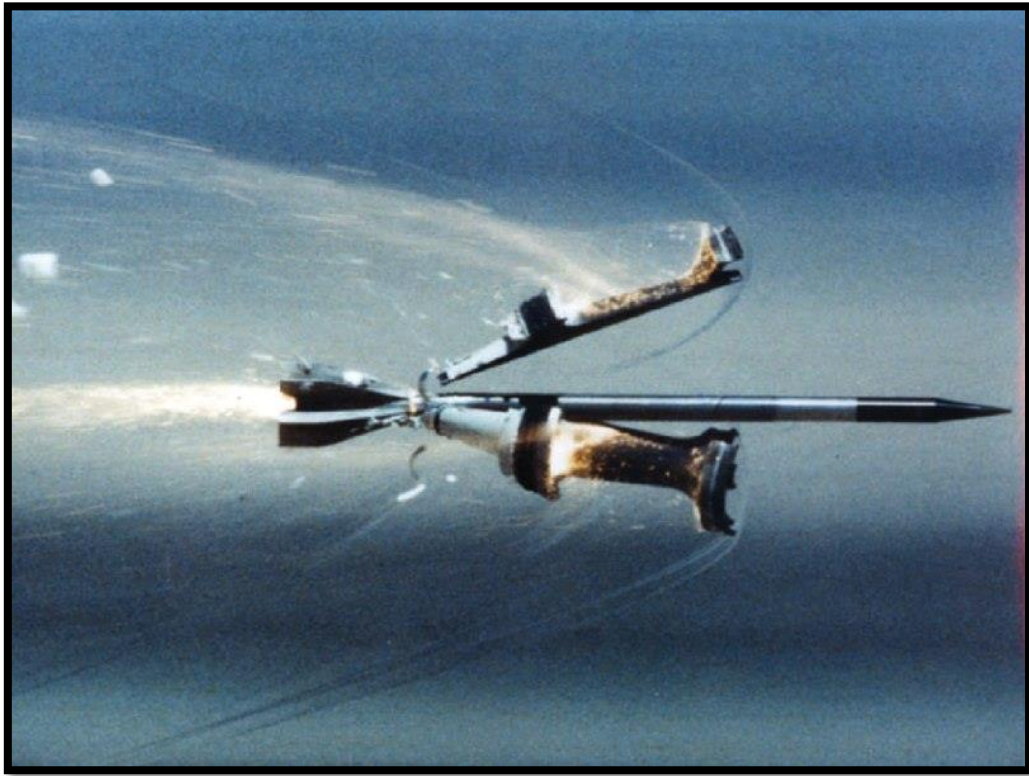




尾翼穩脫殼穿甲彈的最新科技：M829A4與分段式彈蕊 筆者/李思平



▲圖1、尾翼穩脫殼穿甲彈的原理雖然簡單，是利用一塊截面積小、高動能的高密度金屬去穿透目標裝甲，但要它能持續克服敵人日新月異的防護，則需要應用上最新的科技，讓它能在承受最小能量損失的情況下持續完成穿透。

壹、前言

尾翼穩脫殼穿甲彈是動能穿甲彈的一種，也是現代戰車最主要用於對抗戰車的彈種。凡談到近代動能穿甲彈的威名與應用，便自然無法脫離在1991年沙漠風暴行動中屠殺了大量T-55、T-72戰車的美軍M1A1艾布蘭戰車，它除了靠著訓練有素的戰車兵、先進射控與堅實裝甲外，那門M256 120mm/44倍徑滑膛砲與M829衰變鈾(DU)尾翼脫殼穿甲彈(APFSDS)也是極為重要的因素之一，儘管M829並非唯一的動能穿甲彈，但為了方便令讀者了解當代動能穿甲彈的革新與工程，本文特別挑出M829家族作為介紹的彈種。

值得注意的是，M829家族的穿透力與殺傷力仍在不斷成長中，其最新銳的M829A4是在2016年開始生產，並可以擊敗世界上任何美軍假想敵的戰車正面，而為了瞭解這款砲彈以及它如此致命的秘訣，下文便來探討尾翼穩脫殼穿甲彈的緣起、材質的改變、M829家族的介紹和M829A4的關鍵：分段式動能彈蕊(Segmented Kinetic Energy Penetrators)應用。

貳、脫殼與翼穩脫殼穿甲彈的緣起



▲圖2、脫殼穿甲彈(Armour-Piercing Discarding Sabot, APDS)的出現，讓砲彈的穿透力有飛躍性的提升。在此技術穩定之後，脫殼穿甲彈基本上取代了所有的全口徑穿甲彈，並成為現代普及之尾翼穩脫殼穿甲彈(Armour-Piercing Fin-Stabilized Discarding-Sabot, APFSDS)的技術基礎，此圖為M392 脫殼穿甲彈。

資料來源：<http://operacoesmilitaresguia.blogspot.com/2015/04/>、檢索日期：109年7月29日

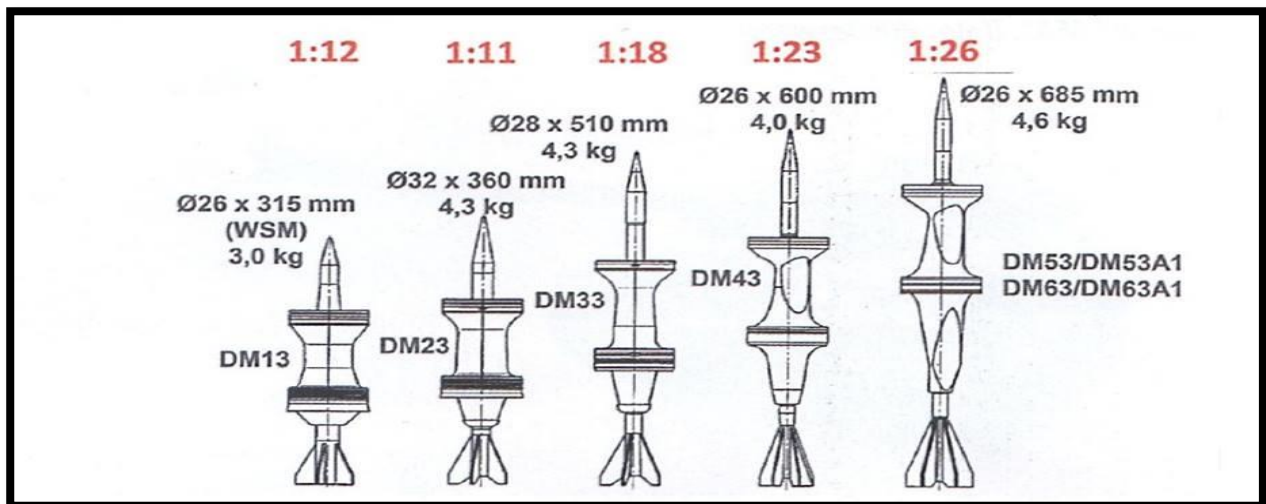
相較於以往的穿甲彈(包括常規穿甲彈、披帽穿甲彈、風帽披帽穿甲彈、高初速穿甲彈)，脫殼穿甲彈(Armour-Piercing Discarding Sabot, APDS)是動能穿甲彈發展中跨越性的里程碑，該彈種最早是由法國艾德嘉布蘭德(Edgar Brandt)公司在1940年前夕進行研發，並預計投入75mm速射砲和37mm火砲使用，但隨著法國戰敗，科學家撤退至英國於1941~1944年間繼續進行研發作業，最終在1944年中期研發出可應用於6磅砲、於1944年9月可應用於17磅砲的APDS。

APDS彈頭的構造為次口徑穿甲彈蕊以及套殼所組成，並能有效降低彈頭重量、降低風阻、增加命中目標時的衝擊初速、減少撞擊接觸面積以放大單位面積壓力，而APDS的穿透力也遠遠超越以往的穿甲彈。以17磅砲舉例，當採用風帽披帽穿甲彈(APCBC)時對1000m處的滾軋均質裝甲(RHA)的穿深可達161mm，但採用了APDS之後卻高達233mm，即便拉長至3000m處，當APCBC掉至107mm時，APDS仍然有162mm的穿深表現，足以貫穿二次大戰期間絕大部分的德軍戰車正面裝甲。



同時，較小的口徑也意味著傾斜裝甲更難將彈頭彈開，隨著長徑比的增加，槓桿與轉正效應就越為明顯，但由於APDS需要靠自旋穩定自身，長徑比無法超過1:7，因此穿透能力的提升依舊有相當的限制，為了更進一步的強化戰車砲的反裝甲能力，動能穿甲彈的發展開始轉往了至今仍是動能穿甲彈中最先進、複雜的產物：尾翼穩脫殼穿甲彈(Armour-Piercing Fin-Stabilized Discarding-Sabot, APFSDS)

APFSDS的組成與脫殼穿甲彈(APDS)類似，但是它並不靠旋膛產生的自旋穩定，而是靠彈蕊尾部的穩定翼進行空力穩定，相較於APDS，APFSDS的彈蕊有更小的口徑、更高的長徑比(可達1:12以上)以及更高的初速，這些優勢都讓APFSDS的長桿彈蕊在動能穿透表現上達到同口徑無人能及的地步。



▲圖3、本圖為德軍使用尾翼穩脫殼穿甲彈，但從這些砲彈的演進可以見到，尾翼穩脫殼穿甲彈可以輕易地提高長徑比，由1:12提高到1:26，而這在穿透裝甲效能的提升上有著極大優勢。

資料來源：<http://sturgeonshouse.ipbhost.com/topic/1086-tanks-guns-and-ammunition/page/4/>

檢索日期：109年7月29日

以美國發展和實裝APFSDS的歷史來看，在1978年採用M735這種美國首款APFSDS後，APDS在大口徑砲彈的發展便走入尾聲，與1970年代中期採用的105mm M728 APDS相較，M728的砲口初速為1426m/s，M735則提升至1501m/s，此外，M735可以在1000m處貫穿330mm RHA、2000m處貫穿300mm RHA，穿透力下降9%，而M728在1000m處可貫穿280mm RHA，但當拉長至2000m時只貫穿240mm RHA，下降率達14%，因此APFSDS不僅在穿深表現上有顯著優勢，長距離的穿透力保持性也較佳。

不過，光是改變形式並無法讓北約戰車在蘇聯戰車面前保持優勢，儘管M728可以輕易地貫穿T-55/54戰車，但對於新銳的T-64與T-72而言的作用卻不大，即便是T-72A的車首上正面裝甲，其等效厚度都能達到410mm RHA，因此在標準的接戰距離上，即便是M60A1配備了M735彈，其穿透效果仍然難以與T-72抗衡，因此美國陸軍體認到需要從材質的方向實施革新。

參、當鎢合金取代碳化鎢，當衰變鈾取代鎢合金



▲圖4、105mm M883與120mm M829A1是兩款首次參與實戰的衰變鈾尾翼穩穿甲彈，而它們在1991年伊拉克戰場上殲滅了極為大量的伊拉克美國陸軍戰車，包括外銷的T-72M1。

資料來源：US DoD、<http://dod.defense.gov>、檢索日期：109年7月29日

早在1950年代末期，主要用於動能穿甲彈的彈蕊材質從高碳鋼改為碳化鎢(Tungsten Carbide)，且在實際的驗證上，由於其碳化鎢的密度(約15.7g/cm³)¹比高碳鋼的密度(約7.81g/cm³)²，讓它具備有遠優於高碳鋼穿甲彈的穿透能力，但當多層次與複合裝甲於1960年代誕生後，基於碳化鎢韌性較低的特性，彈蕊在穿透過程中可能會提早瓦解，例如當彈蕊穿透過第一層裝甲後就前段剝落成多塊碎片，只剩下後段保持完整，但當穿透第二層後，剩餘部位也瓦解成碎片，以致於無法穿透第三層裝甲直達目標內，因此這迫使軍方必須研發全新的合金來解決碳化鎢韌度不足的問題。

¹ Tungsten vs Tungsten Carbide - What's the Difference?

<https://www.thomasnet.com/articles/metals-metal-products/tungsten-vs-tungsten-carbide/>

² J.R. Davis. 2001. Alloying: Understanding the Basics, Aluminum and Aluminum Alloys, 351.



英國軍方率先開發了更高密度的鎢合金(Tungsten Alloy)，其成分為93%鎢、7%黏結鎢合金(WA)，而新的鎢合金有高達17g/cm³的密度，比15.8g/cm³的碳化鎢更高。從1965至1972年間，美國美國陸軍曾進行152mm XM578彈與MBT-70戰車的平行開發計畫，XM578彈藥使用的鎢合金彈蕊密度略勝英國版本一籌，其成分為97.5%鎢、2.5%沾黏鎢合金，密度來到18.5g/cm³。³

在1960至1970年初期間，美國陸軍亦成功開發了一系列105mm砲彈(主要給M60和實驗中的XM1戰車使用)，使用的就是上述含97.5%鎢的鎢合金彈蕊，其XM735、XM774彈正是從XM578彈計畫演變而來，不過，儘管這些鎢合金穿甲彈足以達到美國陸軍當時的作戰需求，但美國陸軍仍希望更進一步提升穿甲彈的穿透性能，且裝甲科技的進步已經令鎢合金難以穿透，因此同時也開始進行應用衰變鈾(Depleted Uranium, DU)的研究。

在1970年代中期，最新世代的複合裝甲已經可以防止碳化鎢彈頭穿透，同時大幅削弱鎢合金彈頭的穿透效能，因此皮卡汀尼(Picatinny)兵工廠的工程師便開始思索如何將衰變鈾應用在彈蕊科技上。不過，早在1960年代初期，美國陸軍就已經對衰變鈾材質做過相關的測試，當時美國陸軍曾經測試一種包覆衰變鈾的四合金(UQuad)彈蕊，並應用在105mm、120mm翼穩脫殼穿甲彈(APSDS)上，但當初美國陸軍認為鎢穿甲彈仍較衰變鈾優異的原因有二，第一為衰變鈾仍在開發，合金在製造期間的不均勻性也是問題，第二為在對蘇聯戰車的穿透測試中，衰變鈾並未表現出顯著優勢。

但隨著裝甲科技在1970年代的進步，美國美國陸軍意識到鎢合金不再能提供優勢的穿透力，例如前文所提的T-72A正面裝甲已經難以被M735貫穿，同時空軍與海軍也在進行小口徑(20、25、30mm)的衰變鈾彈測試，並得出了衰變鈾彈的穿透力確實優於鎢合金的結論，同時還有穿甲過程中的自銳效應⁴，而這樣的結果也讓美國陸軍在1973年決定在105mm M68戰車砲上採用全新的彈藥以強化致命性，並將原型衰變鈾彈蕊初步應用於105mm口徑XM774衰變鈾穿甲彈計畫上，在與能源部西北太平洋國家實驗室合作之下，皮卡汀尼廠開發出了以特殊原料和熱處理的全新彈蕊材質：鈾/鈦合金彈蕊(U3/4Ti)⁵，而U3/4Ti的開發成功也象徵著美國陸軍的新一代穿甲彈時代的來臨。

³ XM578 152mm, APFSDS, <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/m578.htm>

⁴ <https://www.newscientist.com/article/dn4004-safe-alternative-to-depleted-uranium-revealed/>

⁵ M774 105mm, APFSDS-T <https://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/m774.htm>

在XM774彈藥計畫之中，美國陸軍在密集的測評後最終選定了衰變鈾混合重量3/4鈦合金(U3/4Ti)的彈蕊，這樣的比例可以讓衰變鈾核心不至於在猛烈加速時斷裂。早在1960年代期間，應用於XM578彈的鎢合金就必須用鋼皮包覆以避免在發射的高初速下斷裂，這無形降低了XM578的穿透效能，但全新的U-3/4Ti合金無疑克服了早期大口徑彈藥的強度限制⁶。

在鈾/鈦合金彈蕊應用於M774彈上的驗證成功後，美國陸軍主要的戰車砲動能穿甲彈開發便拋棄了鎢合金，而全面轉向研究衰變鈾的應用，其M774在1981年服役，而穿透力更強的M833與M900彈則相繼於1984年和1991年服役。相較於在2000m處僅可貫穿375mm RHA而無法有效對付T-72的M774，M833可以貫穿達440mm RHA，其穿深可以貫穿未加裝接觸1型反應裝甲(Kontakt 1 ERA)的T-72A，至於最後一款採用衰變鈾彈蕊的105mm彈；M900，則在2000m處有520mm RHA的穿深⁷，則能貫穿加裝接觸1型的T-72A，但仍無法貫穿T-72B。

儘管M833在測試與實戰中的表現都相當出色，例如1991年波灣戰爭中陸戰隊的M60A1，可以依靠較優的人員素質和M833在超過1,500公尺的地方貫穿T-72M(外銷版)的正面裝甲。不過，不論它並無法有效對付配備爆炸反應裝甲的T-72，更遑論後來更先進，配備了接觸5型(Kontakt 5) 爆炸反應裝甲(ERA)的T-72B。而隨著M1A1在1985年的服役，且配備了更大口徑的120mm滑膛砲，美軍開始將新銳穿甲彈的研發重心移到了120mm口徑上。

⁶ https://gulflink.health.mil/du_ii/du_ii_tabe.htm#TAB%20E_Development%20of%20DU%20Munitions

⁷ <http://echo501.tripod.com/Military/105ammo.htm>



▲圖5、接觸一型爆炸反應裝甲(Kontakt 1 ERA)是俄國第一款服役且非常普及的戰車保護裝備，其單個反應裝甲內有兩角度不同的反應片，分別由2mm鋼板 + 7mm鈍性炸藥 + 2mm鋼板⁸所組成。一旦砲彈或射流貫穿鋼板觸發鈍性炸藥，鋼板將往兩向飛出，藉此達到針對彈頭或射流斜切，導致噴流不連續或彈頭折斷的作用。

資料來源：<https://below-the-turret-ring.blogspot.com/2016/04/explosive-reactive-armor-some-history.html>、
檢索日期：109年7月29日

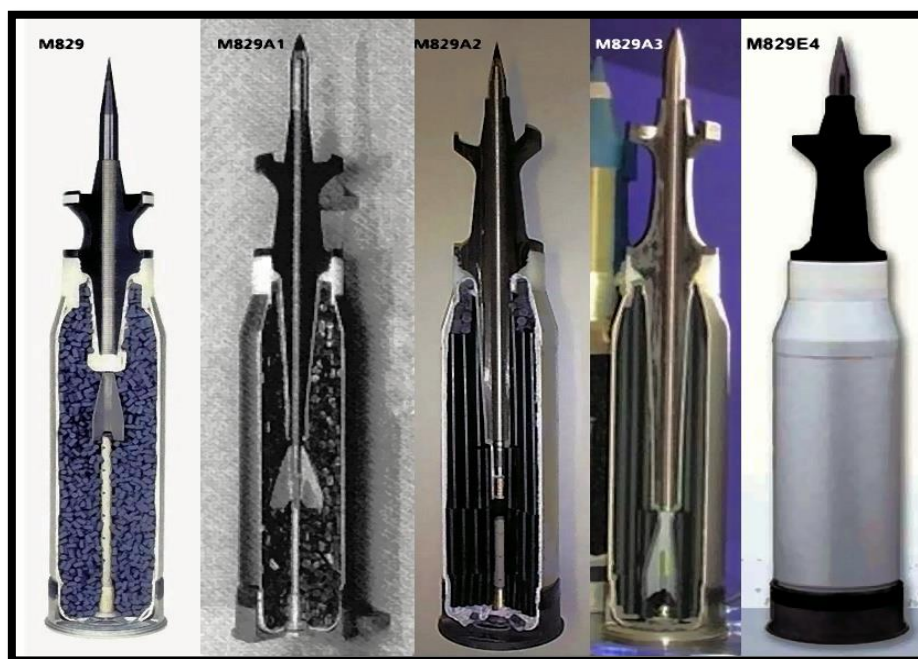


▲圖6、蘇聯在1960年代末、70年代末初相繼有配備複合裝甲的T-64A和T-72 Ural-1服役，這些新銳蘇聯主戰車的正面不僅免疫於老舊的APDS，甚至連當時美軍使用的105mm翼穩穿甲都略顯無力，因此美軍自然就將希望寄於120mm口徑的尾翼穩脫殼穿甲彈。

⁸ Explosive Reactive Armor - some history, some types

<https://below-the-turret-ring.blogspot.com/2016/04/explosive-reactive-armor-some-history.html>

肆、M829衰變鈾穿甲彈家族



▲圖7、被暱稱為「銀彈」的M829A1在1991年沙漠風暴中大放異彩，穿透力強到足以貫穿伊拉克T-72用來保護自己的半遮蔽陣地之土堤，接著再貫穿戰車裝甲。在這些年來，M829系列仍持續改進，而目前最新的成員已是M829A4(圖片中的E4為測試版)。

資料來源：Depleted Uranium And It's Health Physics、檢索日期：109年7月29日

M829系列衰變鈾翼穩脫殼穿甲彈(APFSDS)是近代戰車對戰中殲敵數最多，也是殺傷力最為驚人的動能穿甲彈，這款衰變鈾穿甲彈是專為M1戰車搭載的M256 120mm/44倍徑滑膛砲所開發，而德國因為環保因素，拒絕採用衰變鈾彈頭，而倘若要更進一步提升穿透力，就必須走向增加膛壓和砲管長度一途，而這也衍生出了後來的Rh-120/L55(55倍徑)滑膛砲，但相較於更改整個火砲系統，針對彈藥性能實施提升顯得更為經濟且容易。

自1984年以來，M829系列發展至今已有M829、A1、A2、A3以及2016年開始製造的A4等5代，而每一代的發展都具有相當的巧思和革新，其中又以有參與過波灣戰爭的M829A1的名聲最為響亮，而為了瞭解這款20世紀最知名的衰變鈾穿甲彈，就先從家族各成員的簡介瞭解起。



一、M829

M829最早於1985年配發給美國美國陸軍M1A1使用，採用可燃式彈殼，全彈重18.6公斤，內含一根27mm衰變鈾長桿彈蕊，其彈蕊長627mm，砲口初速為1,670m/s，使用的推進藥為總量8.1公斤的JA-2。該彈最大有效射程為3,000公尺，並能在2,000公尺處貫552mm RHA，足以對付1985年安裝接觸1型的T-72B(砲塔抗動能520~540mm RHA)⁹，但無法有效對付1988年安裝接觸5型的T-72B(砲塔抗動能達770~800mm RHA)¹⁰與T-80U(砲塔抗動能達780mm RHA)，因此改良勢在必行。

二、M829A1

暱稱為「銀彈」(Silver Bullet)的M829A1是家族中名聲最顯赫的成員，它在1989投入使用，並於1991年沙漠風暴行動時證明了自身的價值，M1A1艾布蘭戰車用這款強大的穿甲彈，在戰場上屠宰了伊拉克廣泛使用的中國製59式戰車與俄製T-72戰車。

M829A1全彈重20.9公斤、全長984mm，採用總重7.9公斤的JA-19推進藥以達到1,575m/s的砲口初速，其長桿彈蕊直徑從27mm縮小至22mm，彈蕊長684mm、重4.6公斤、含包殼後重9公斤，最大有效射程亦為3,000公尺。據推算，M829A1在零距離對RHA穿透力為670mm，可在1,000公尺處貫穿垂直安放之620mm RHA、在2,000公尺處貫穿570~610mm RHA，而即便到4,000公尺，據信依然能穿深達460mm RHA，仍可以輕易地貫穿所有第二代戰車的正面，例如T-62、M60甚至T-72M1等外銷第三代戰車。

不過，M829A1也並非全無缺點，它在遇上接觸五型時效能依然會大幅衰減，儘管穿透力較M829有顯著提升，但依然無法有效對付安裝接觸5型的T-72B、T-80U¹¹，而在1993年服役的T-90再搭配接觸5型後的砲塔甚至能抗800~830mm RHA，即便無接觸5型，純裝甲依舊有抗550~650mm RHA的表現，因此M829A1顯然在剛推出不久後就不具備絕對優勢，促使美國積極開發下一代穿甲彈；M829A2。

三、M829A2

M829A2於1994年進入美國美國陸軍服役，相較於A1，它具備了多個特色，包括更長的衰變鈾彈蕊以及更強的穿透力、更優的彈蕊製程、切割推進藥柱時採用特殊製程，並能同時混進小顆柱狀推進藥的同時，安放棒狀推進藥，綜合起來，M829A2的砲口初速達到1,680m/s，比A1多了約100m/s，但它產生的

⁹ Устьянцев Сергей Викторович Колмаков Дмитрий Геннадьевич Боевые машины Уралоагонзавода. Танк Т-72. 158. <http://www.army.lv/files/86.pdf>

¹⁰ <http://btvt.narod.ru/5/rogatka/rogatka.htm>

¹¹ <http://fofanov.armor.kiev.ua/Tanks/EQP/kontakt5.html>

膛壓卻比A1更小，而穿透力在2,000m上則來到730mm RHA。

值得注意的是，M829A2試圖以初速和穿透力突破接觸5型的防護，並減少爆炸反應裝甲(ERA)影響的時間，而M829A2確實能在兩公里的120mm砲標準戰車接戰距離上能貫穿所有未搭配ERA的俄製戰車，但實際效益仍然有限，安裝接觸5型後仍然能有效抵抗M829A2的攻擊。

四、M829A3

被美國裝甲兵稱為是「超級穿甲彈」(Super Sabot)的M829A3則是針對反制接觸五型ERA所開發，並於2003年開始生產。M829A3套殼改採碳纖維強化複合材料製成，全彈重22.3公斤、長892mm，其衰變鈾彈蕊重10公斤，直徑從22mm提升至25mm，彈蕊長約780mm(100mm彈帽+680mm蕊)，同時採用更具推進效率的8.1公斤RPG-380棒狀推進藥，可讓彈頭砲口初速達1,555m/s。

為了有效反制接觸5型，除了增加直徑令剛性強度提升67%外，M829A3的彈尖從減少風阻的空心彈帽改為實心鋼製彈帽，目的在於命中接觸5型時能提前引爆ERA內的惰性炸藥，接著爆炸波會順勢將連接處較弱的彈帽帶走，且由於APFSDS有長徑比極長帶來的槓桿效應優勢，再加上高初速時會發生彈尖受到衝擊甚至開始瓦解，後方的彈蕊仍然不受影響繼續前進，一直要過一段時間之後才會整根彈蕊受到影響，屆時彈蕊本身也撞進目標，因此彈尖所受到的衝擊對穿深表現而言並無太大影響。¹²

有趣的是，官方並沒有任何數據證實M829A3的穿深，但根據俄方的下一步動作，M829A3的穿深很可能已經威脅到了當時最新的爆炸反應裝甲，因為俄國在2006年就推出了一款號稱防禦效能為接觸5型2倍的遺跡爆炸反應裝甲(Relikt ERA)作為反制，而這款爆炸反應裝甲使用了全新的鈍性炸藥，增強了反應裝甲塊內金屬塊向外噴飛的速度，並讓動能彈和化學彈穿深降低50%¹³。

五、M829A4

M829A4是M829家族的第五代APFSDS，目的在於擊敗遺跡ERA，在2016年開始生產。其重大的改進有多重分段式彈蕊，其全新推進藥也讓它能在攝氏-32~63度的環境中維持均等初速。全新的先進可燃式彈殼類似先前的M829系列所採用的，甚至在彈底還有讓彈藥資料鏈(ADL)傳遞信號給M829A4的介面(但目前作用仍然不明)。¹⁴

¹² <https://below-the-turret-ring.blogspot.com/2016/02/m829a3-apfsds-penetration-power-common.html>

¹³ http://www.military-today.com/tanks/t90ms_tagil.htm

¹⁴ <https://www.dote.osd.mil/Portals/97/pub/reports/FY2015/army/2015m829a4.pdf?ver=2019-08-22-105950-793>



不過，除此之外目前M829A4的資料仍寥寥無幾，其穿深表現、彈道性能，甚至是能否對T-14阿瑪塔戰車上的孔雀石(Malachite)¹⁵雙層ERA和阿富汗石(Afghanit)主動防禦系統(APS)產生破防效果都是一團謎。

然而，目前可簡易整理出俄製戰車新防護思維，當雷達偵測到彈蕊迫近後，會先發射阿富汗石的攔截彈以削弱彈蕊的穿透力，這點俄方已在2016年中做過相關的攔截驗證¹⁶，並證實確實可以攔截衰變鈾APFSDS(沒解釋是否折斷或擦傷)，而當剩餘彈蕊接近後，再依靠雙層ERA消滅僅剩的穿透能力。不過，M829A4也掌握了對於被主動防禦系統攔截後，如何不過度減損穿深的技術。

此外，倘若T-14雷達故障或攔截彈發射器損壞，或者是剛好APS系統未開機，則M829A4是否能穿透由雙層ERA防護的T-14則相當令人玩味，而這也將主題帶到彈體科學的全新層面，也就是應用在M829A4之中的分段式動能彈蕊(Segmented Kinetic Energy Penetrators)設計。

伍、分段式動能彈蕊概念

此處引用了波蘭武裝科技軍事研究所(Military Institute of Armament Technology, MIAT)的一份論文¹⁷，這份論文是現今少數對外公布且提及分段式動能彈蕊的資料。在論文中，我們可見到透過分段式彈蕊增強對鋼板穿透效能的可行性，其結論是由方程式計算、電腦模擬、實際射擊檢驗而成。這種全新的概念被稱為是「賦能分段式穿透」(Forced Segmented Penetration)，實作方法為將兩塊獨立的鎢合金由一段鋼製螺套所結合，據論文內容所呈現，彈蕊在穿透過程中會對螺套造成軸向變形，進而縮短兩塊鎢合金之間的距離直到相接。這樣的效果能讓後段為減速的前段提供額外的動能，進而強化穿甲深度。

一、分段式動能彈蕊介紹

一枚APFSDS主要包含下列部件：桿狀彈蕊、套殼、穩定翼、彈帽。其彈蕊的能量主要來自推進藥點燃後，將動能傳遞至套殼再帶動彈蕊以增加初速。當彈頭離開砲管後，空氣阻力會迫使套殼脫離，並完全讓彈蕊、穩定翼、彈帽依靠剩餘動能和高初速於空中飛行至目標。其影響動能(Kinetic Energy, KE)彈蕊對金屬目標穿深的要素有幾個，包括了彈蕊的動態硬度與密度、目標材料、彈蕊每單位截面積之密度、撞擊初速、入射角、摩擦係數。

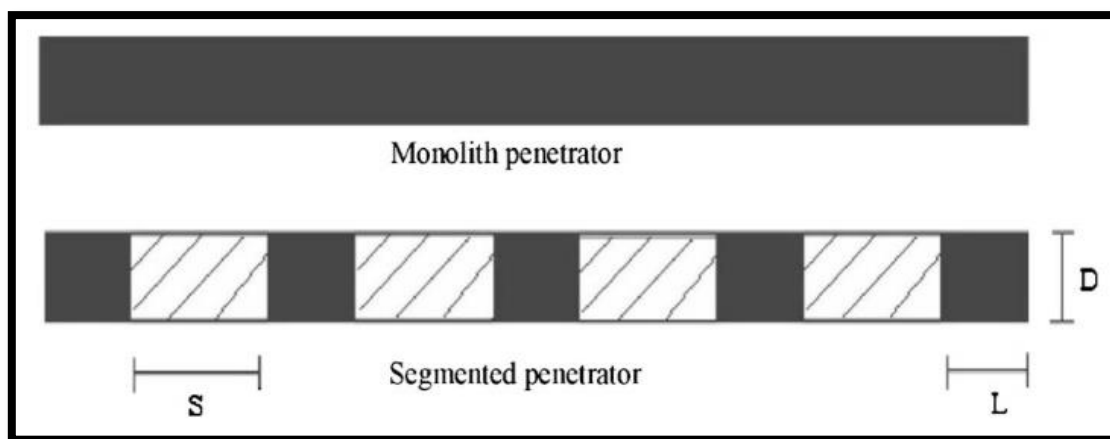
¹⁵ <https://tanknutdave.com/armata-t14-main-battle-tank/>

¹⁶

https://www.armyrecognition.com/weapons_defence_industry_military_technology_uk/analysis_russian_afganit_active_protection_system_is_able_to_intercept_uranium_tank_ammunition_tass_11012163.html

¹⁷ Mariusz Magier. The Conception of the Segmented Kinetic Energy Penetrators for Tank Guns.

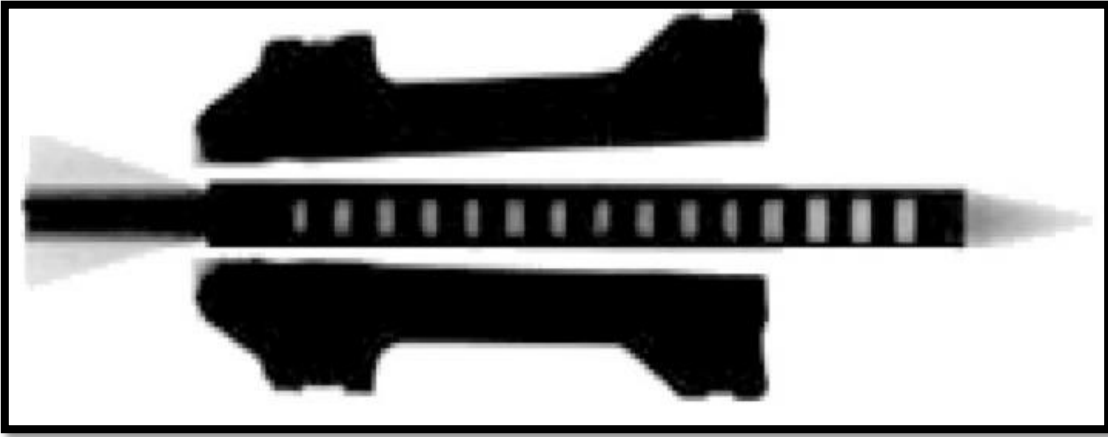
影響穿深最直接的要素在於彈蕊的單位密度以及衝擊初速，因此現行 APFSDS採用的都是鎢重合金(WHA，密度 $17,500\text{kg/m}^3$)或衰變鈾合金(DU，密度 $19,000\text{kg/m}^3$)以提升第一要素，但第二要素則與砲口初速相互連結，而砲口初速又與彈頭整體重量相干(最主要為彈蕊)，因此第一與第二要素對彼此有著相當的影響性，倘若彈蕊過重且未增加推進藥，則會拖慢第二要素以致動能/穿透力下降，因此增加彈蕊重量有相當的限制性。因為解決此發展困境的方式，就是採用分段式彈蕊，其概念最早可追溯回1990年代。



▲ 圖 8、與一體式彈蕊(Monolith penetrator)相較，分段式彈蕊(Segmented penetrator)的樣貌就是利用間隔空間(斜線圖)將彈蕊主材質區(黑色圖)隔開，而目前絕大部分的尾翼穩脫殼穿甲彈的彈蕊都是屬於一體式結構。

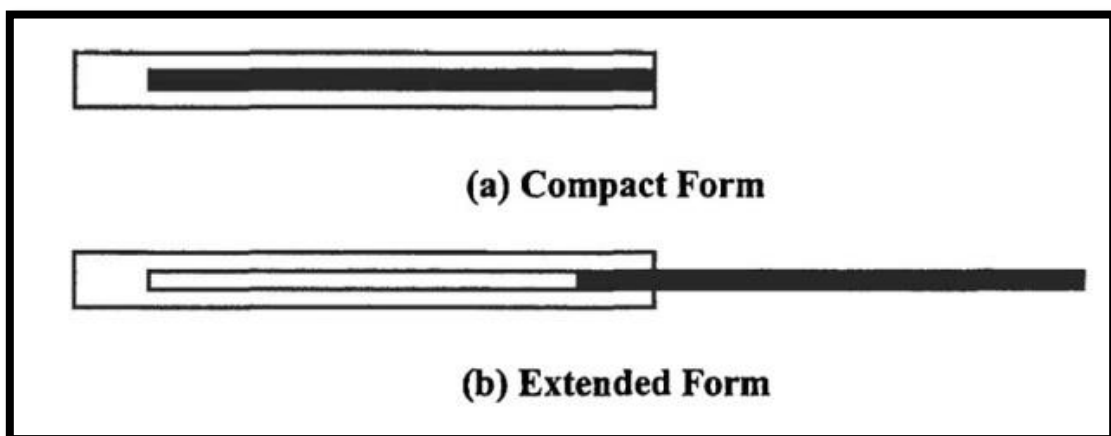
由於分段式彈蕊提供令人驚嘆的強化穿深效能，因此它也成為彈藥工程相當被關注的領域。一體化彈蕊基本上就只是一根用同樣材質製成的圓桿，分段式彈蕊則是由中間有其他材料間隔體的一根均質圓桿。基本上，若彈蕊的所有段塊都能在命中時撞擊同一點而不偏差，將能顯著地提升穿深，但若在撞擊時有所偏移而無法精確地撞在前塊的後端，穿深與戰術價值將急遽下降，因此在開發與應用上確有一定難度，下列為曾經做過但不盡成功的實驗案例。

在2000年代間，法-德研究所：聖路易士研究所(Institute of Saint-Louis, ISL)曾考慮以40mm次口徑分段式彈蕊(彈蕊小於40mm)進行試驗，在X光影像中，我們可以從清楚見到彈頭套殼解離的畫面，同時也能見到彈蕊是由高/低不同密度物件所組成，但試驗成果並無顯著效果。



▲圖9、分段式彈蕊的概念最早源於1990年代，該圖為德法在2000年代製造的40mm尾翼穩脫殼穿甲實驗彈，在脫殼過程中所拍攝的X光片，圖中淺色的部分是低密度材質，包括彈翼、風帽以及中間一格一格的套筒，而黑色則是高密度材質，包含了脫殼片以及實心的高密度彈蕊。可以見到，彈蕊中間有分布著淺色的段落，那些部位內部並不是實心，而是由低密度的空心套筒接合而成。

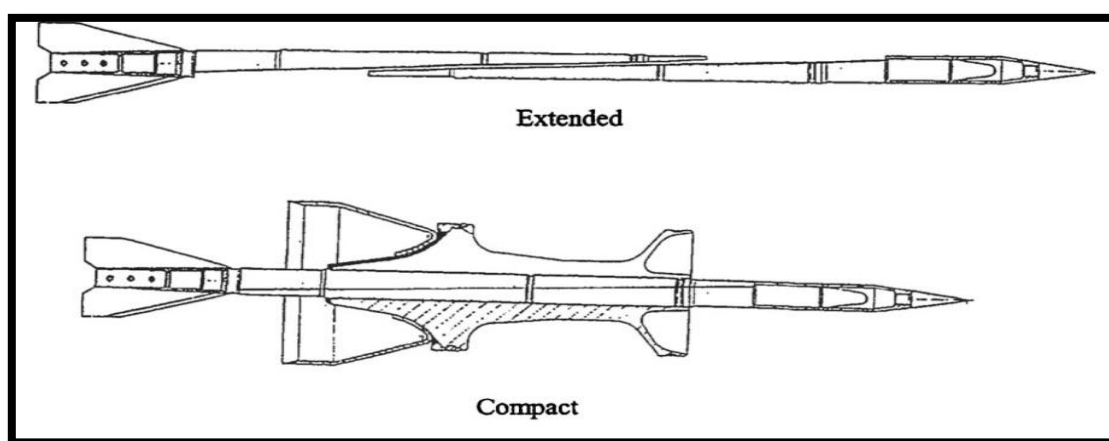
另一種被稱為是桿管(Rod-Tube)彈蕊也在同期投入實驗，當它從砲口離開後，在飛行過程中從收縮狀態轉變為延伸狀態，其彈蕊主要由直徑10.6mm的外蕊與5mm的內蕊所組成，收縮狀態時長46.5mm、伸展狀態時長87.05mm。據對桿管測試的結果顯示，相較於一體化彈蕊，它的理論穿透效能可以提高31~57%。而影響穿透力的要素包含了彈蕊在抵達目標前，彈桿與管間的作用/摩擦力，在高撞擊初速時(超過2500m/s)，穿透孔道(由彈桿Rod造成)變得寬闊且令後方彈管(Tube)能輕易地通過目標。



▲圖10、桿-管彈蕊是早期試驗的概念之一，一旦發射並脫殼後，空氣阻力便會把外蕊往後拖，使彈體展開，但因為阻力難以掌握，空力設計困難的緣故，常發生未展開完成的問題，因此失敗告終。

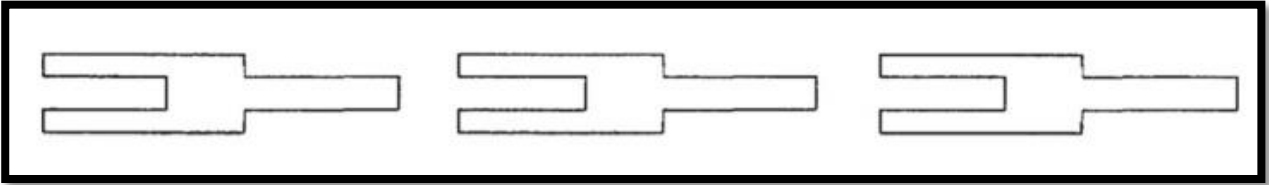
不幸的是，這些彈體在實際測試中遭遇到了若干工程上的困難，發射力量從套殼傳遞至彈蕊的力量往往導致彈管變形、卡住彈桿，而利用穩定翼產生空氣阻力以拉開套筒的動作，每一發的表現也不盡相同，且有時伸展程度不如預期，因此桿管概念在試驗不久後即遭放棄。

另外一個概念則是分桿(Split-Rod)彈蕊，其彈蕊會以對角線的方式延展並在半空中大幅增加總長，但這樣的構型也會讓彈蕊的空力、平衡條件出現問題，因此在克服這些問題以前都無法實用化。



▲圖11、這種分段式彈蕊的概念是讓尾翼的阻力拖著後半段，使整體彈蕊從一體(Compact)拉展為延長(Extended)，但它遭遇到容易展開不全且平衡難以控制的困難，且命中目標後容易有受力不均的問題，因此僅止於概念。

接下來的概念則是一串的單獨彈蕊組成的伸縮桿(Telescopic-Rod)彈蕊，概念為由三個小彈蕊組成一個彈頭，根據數據計算與實驗，該概念彈蕊在伸展後的效能比伸展後等長的一體化彈蕊優，例如當衝擊初速達到2500m/s時，其穿深會優於一體化彈蕊達33%。但是電腦模擬暴露出實際在飛行過程中延展所有分段彈蕊的困難性，且單獨段落也時常會遭遇空力不穩定的問題，進而產生前進軸線無法統一的毛病，最終導致穿透力急遽降低的現象。此外，分段式彈蕊也有用套殼包覆埋頭的分段式彈蕊，但在截至2010年為止，該極音速分段式彈蕊僅止於數據運算而無其他實驗結果。



▲圖12、這種分段式彈蕊的理念為發射後，每一塊彈蕊都有自己的阻力特性，進而達到分段的效果，但儘管看似可儲存更多的動能，卻因為每一個獨立區塊的空氣力學影響都不同，容易無法準確對其前一塊的尾部，對穿透力並無幫助，因此也是失敗概念。

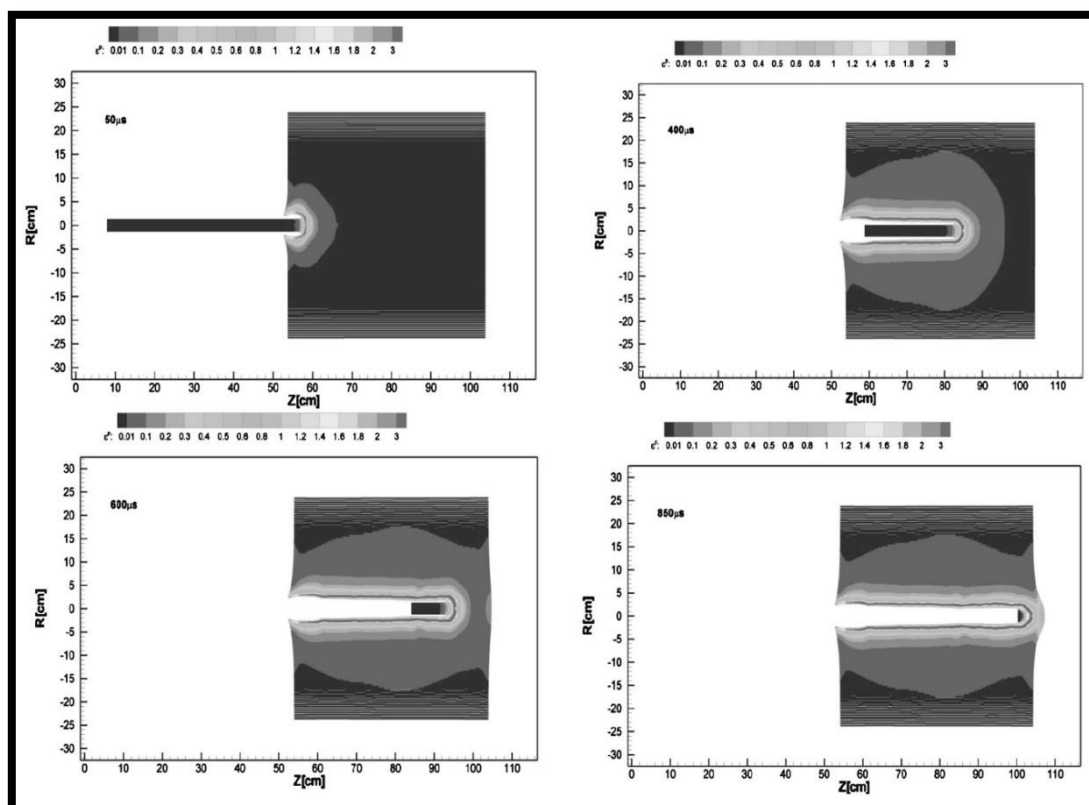
上述所有分段式彈蕊的概念，都有在半空中延展長度，且撞擊初速超過2500m/s的現象，但這種初速只有在實驗室的極音速、電磁槍才可能達到，因此要整合到初速約1600~1800m/s的戰鬥載具武器上顯然為不可行的。而在低衝擊初速的表現上，第一段彈蕊所創造的穿透孔道直徑將不足以使第二段彈蕊通過，導致嚴重減損穿透力，反之，在達到2500m/s的高衝擊初速時，第一段產生孔道直徑將能輕易讓第二段通過。

基於上述的困境與限制，波蘭的武裝科技軍事研究所(Military Institute of Armament Technology, MIAT)嘗試使用一段鋼製螺套將兩根鎢合金塊結合以進行試驗，在理論假設上，當前段鎢合金撞擊裝甲板並處於固定流體力學穿透過程時，鋼製螺套便會吸收前段傳來的衝擊波(原先將傳往後段)，而這股衝擊波也將讓螺套發生變形的現象。因此在理論上，是有可能在衝擊之後，令後段在初期未受太大影響的情況下，以利於後期持續穿透多層裝甲板。

此外，由於鋼製螺套發生軸向變形後，兩段鎢合金也會縮短距離，後段將會撞上減速的前段，賦予額外的動能，進而強化穿深，而這種由M. Magier博士發明的概念也被稱為「賦能分段式穿透」(Forced Segmented Penetration)。

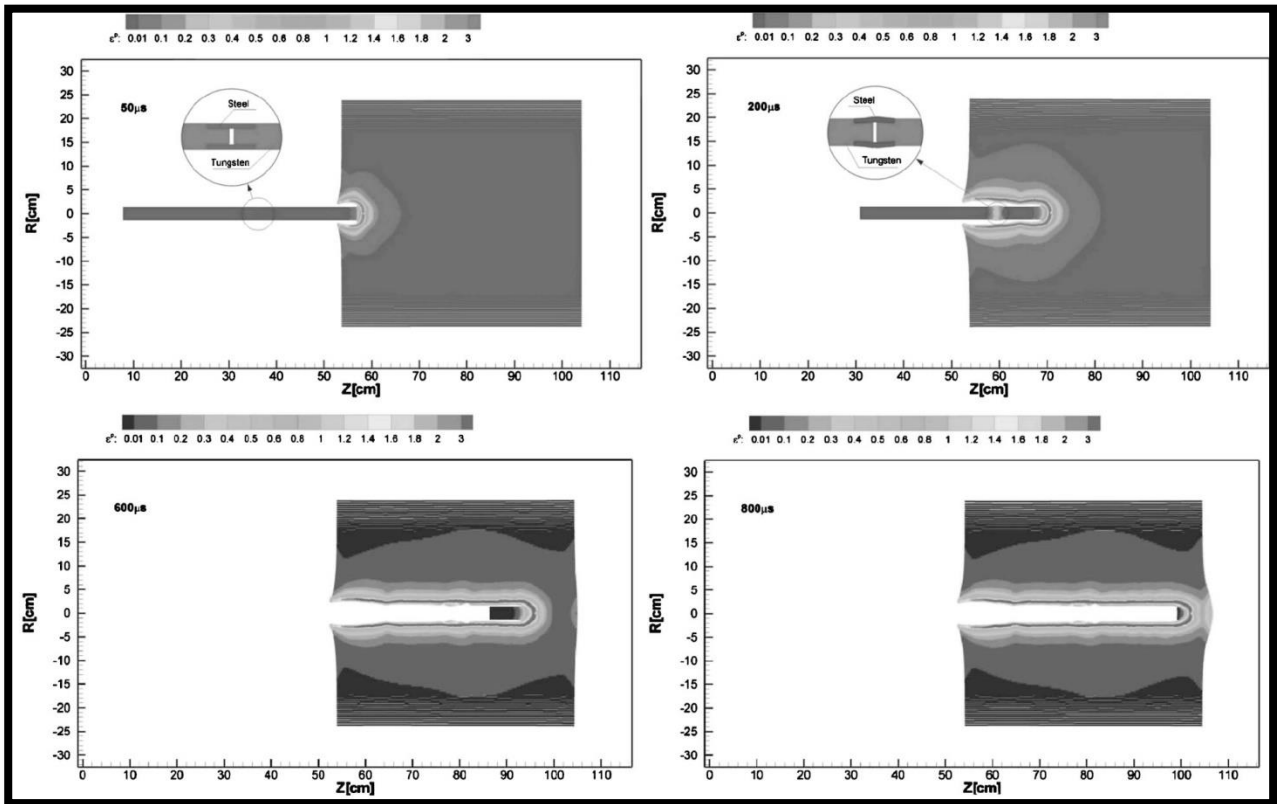
二、以電腦模擬使用一體化和分段式彈蕊對鋼板的穿透現象

科學家先使用數學物理模型和電腦運算出一體化、分段式彈蕊對裝甲目標的穿透效果，並以W1(一體式)、W2(分段式)作為代號。W1和W2的彈蕊長皆是53.45cm、直徑為2.44cm，但W2的彈蕊中段有一小段挖空，並以空心鋼製螺套替代，因此重量為3.55公斤，比W1少0.1公斤，而兩者模擬初速均為1550m/s



▲圖13、這是傳統一體式彈蕊W1電腦模擬穿透500mm厚均質裝甲(RHA)的過程，可以見到一體式彈蕊在穿透過程中部段的消耗彈蕊，最後在穿透約480mm後停止穿透。

在模擬中，W1可達到約480mm RHA的穿深，而重量較輕的W2理論上穿透力會降低，但實際上在模擬中卻達到了約480mm的穿深，與W1略同，並初步驗證分段式彈蕊構型並不會減損穿透力，因此可依此為基礎進行更進一步的研究和驗證。而在下一個階段，該構型將被製成120mm APFSDS-T實彈，並投入射擊檢驗之中。



▲圖14、W2採用了分段式彈蕊設計，可以從左上圖見到在彈蕊中央，兩個鎢彈蕊(Tungsten)中間有空隙，並使用鋼製螺套(Steel)連結，而在右上圖中則能見到，當彈蕊穿入裝甲約180mm後，鋼製套筒出現顯著變型，而主彈蕊的空間也大幅縮小。在最後左下與右下的模擬圖中，彈蕊的穿深與W1一樣停留在於480mm深，顯示分段式設計並不會降低穿深，因此值得繼續測試。

三、實彈檢驗電腦計算結果

在射擊測試之中，厚275mm的RHA靶以56度36分(56°36')斜放，等效約為512mm RHA，並以砲口初速1550m/s之分段式彈蕊120mm APFSDS-T進行射擊測試。其測試結果顯示該分段式彈蕊(W2)可以完全貫穿RHA靶，證實電腦所推算的無誤，甚至比電腦數據要高。至於W1推算出來的與W2相同，因此目前可以驗證，分段式彈蕊在實際上不會減損穿深。

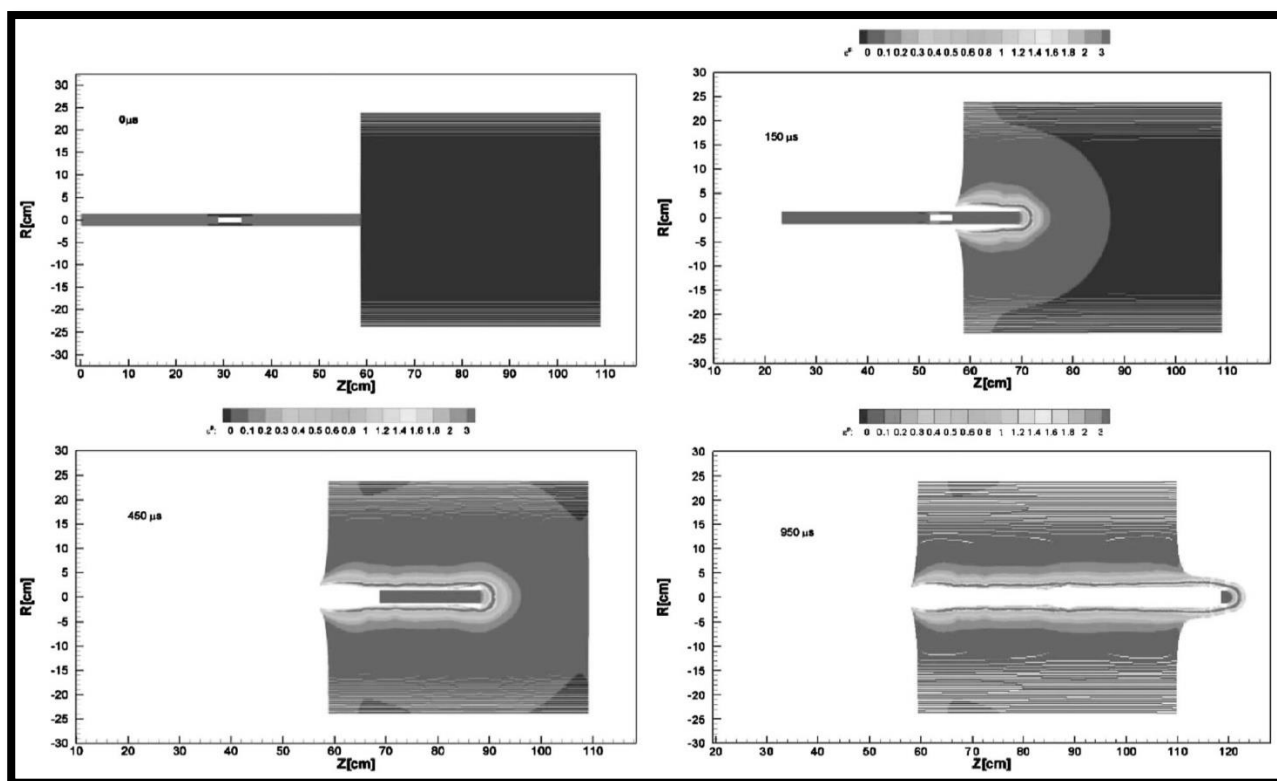
四、對鎢合金彈蕊雙截分段式穿透體的數據最佳化

根據數據模擬和射擊測試所做的驗證，目前已經可以得出相關的數學物理模型以及得出可在不增加分段式彈蕊重量的情況下，仍然增加穿深的一系列計算測試，而除了驗證可行的W2外，MIAT也做了W3、W4、W5等另外三種分段式彈蕊測試版本。

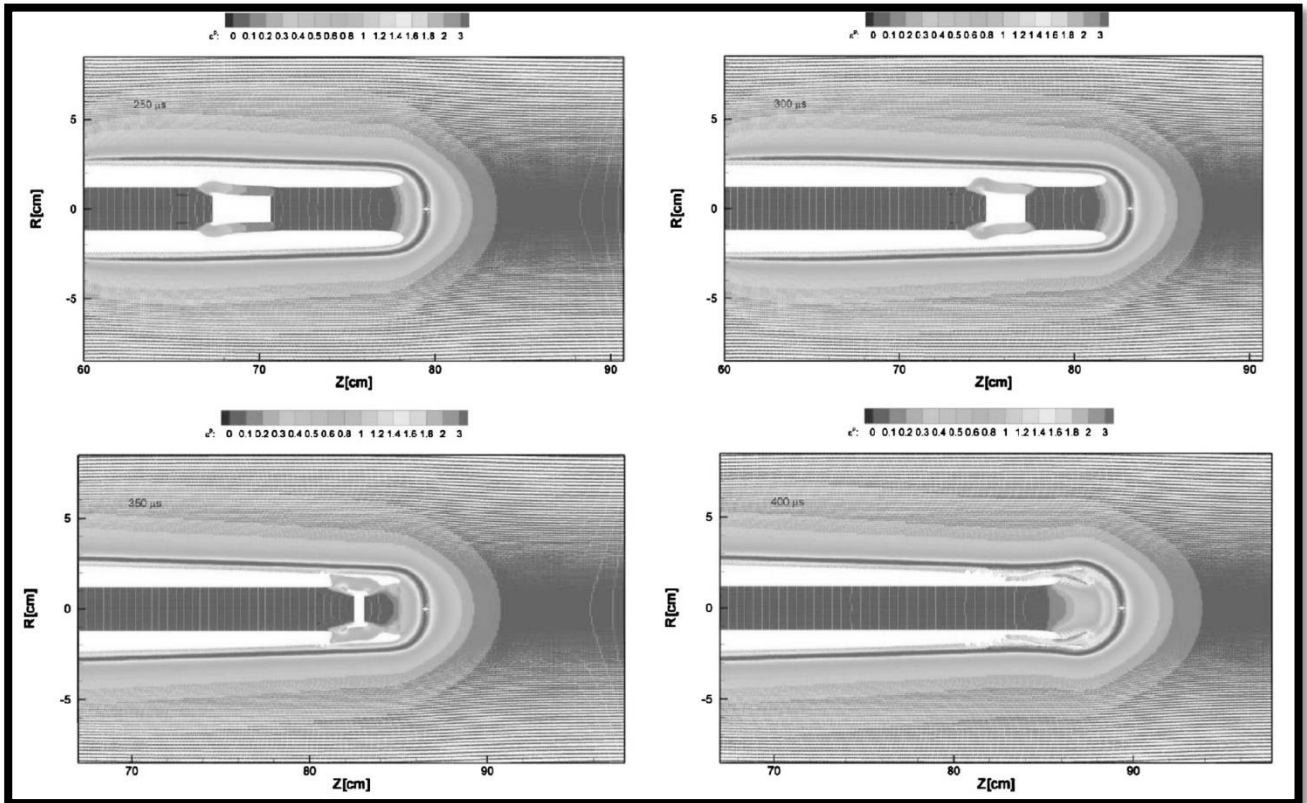
這三種版本的共通點，長度皆較W1、W2增加了5公分，而重量則與W1一樣都是3.65公斤，其餘則在於分段式的設計。W3的前段彈蕊較W1增加了5公分，但未與後段彈蕊保持距離，螺套則僅供固定未保持空心，而為了補償其重量，後段彈蕊尾部中心鑽空；W4則與W3類似，但後段彈尾縮小直徑；W5則是兩段彈蕊拉出5cm的間隔，並以鋼製螺套連接之。上開三種設計，在測試時的初速皆為1550m/s、長度58.45cm、直徑2.44cm、重量3.65公斤。

對於W3、W4，其穿深和W1(一體化)、W2(分段式)類似，因此這種分段方式並未增強穿透力，但W5卻相較於W1、W2增加了約10%，如果依照W1、W2模擬的480mm RHA計算，則W5的穿深表現預估計算增加10%則落在528mm RHA，而W5也呈現了賦能分段穿透的現象。歸功於以鋼製螺套區隔兩段以增加5cm的長度，W5彈蕊在電腦模擬中確保成功穿透500mm RHA以上，這種分段式穿透現象是前所未見的。

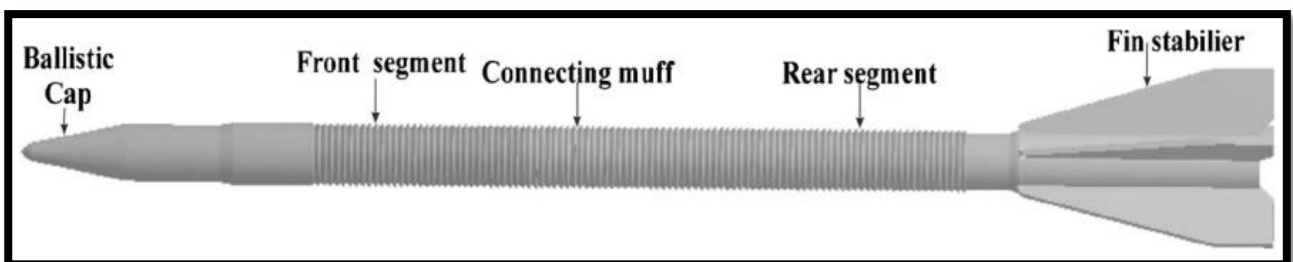
而從驗證成功的W5細節可見到連接兩段彈蕊的鋼製螺套產生軸線變形，進而讓後段彈蕊逼近再撞上前段的後方，使之達到「賦能分段式穿透」(Forced Segmented Penetration)的效果。



▲圖15、W5構型為兩段以螺套連接，重量與一體式彈蕊(W1)相同，但兩段透過螺套間隔5cm，在模擬中可完全穿透500mm RHA的標靶，其穿透效能較W1和W2提高10%，來到528mm，且實際可能更高。



▲圖16、W5鋼套饋壓過程，在前段(右邊)彈蕊與裝甲塊持續消耗時，鋼製螺套持續變型，代表前段減速的速度較後段(左邊)快，而當前段幾乎消耗殆盡時，螺套也幾乎壓扁，而後段則在初速降低程度較少的情況下再撞上前段後方，繼續完成穿透。這種設計能有效保存後段的動能，而不像一體式彈蕊一樣會整體降低初速，從而減少動能與穿透力。



▲圖17、在這張圖片中可以見到分段式彈蕊的外觀，最前方是風/彈帽(Ballistic Cap)、前彈蕊段(Front segment)、螺套(Connecting muff)、後彈蕊段(Rear segment)和最後用於穩定的尾翼(Fin stabilier)。在中間的部分，由於包有一層套筒的緣故，因此光從外觀是看不出來連接前後彈蕊的鋼製螺套。

伍、結論

- (一)分段式彈蕊(W2、W5構型)的穿透為一階段的過程，而在過程中僅受到彈坑和彈蕊極小的影響。這在對可穿透480mm RHA，初速為1550m/s的分段式彈蕊之數據分析中是可以見得的，而到實彈驗證時，則驗證可貫穿以56度36分斜放的275mm RHA(等效約512mm RHA)。基於上述驗證，兩段式彈蕊可被當作動能反戰車彈蕊，且不會減損穿深。
- (二)在最佳化階段，推估W3、W4構型的穿深表現類似W1(一體化)與W2(分段式)，但W5的穿深卻相較於W1、W2增加了約10%，主要歸功於增加了5cm長的鋼製螺套，並讓W5達成徹底貫穿500mm RHA的穿透力，而這種分段式穿透現象是前所未見的。

在2010年時，MIAT正在研究如何增強動能彈蕊對均質、複合裝甲的穿透力，基於理論上的假設，找出兩塊彈蕊間的最佳距離(鋼製螺套長度)將會是極為重要的，並讓穿透過程從一段式進展為多段式，而W5構型將會用以未來的研究。

從論文的結尾可見到，W5構型不僅測得較一體化彈蕊增加了10%的穿甲深度，甚至MIAT也將持續進展至多段式的發展，而自從M829A4採用了2010年時打算研發的分段式彈蕊後，也顯示了分段式設計的研發與驗證成功。

整體而言，M829A4的全新設計，除了針對均質裝甲和複合裝甲有穿深的提升外，其作為弱點的鋼製螺套，也可以扮演著彈蕊在接受橫切力道時，提前斷裂而避免應力傳遞至後續彈蕊的角色，讓穿透力不要過度衰減，而這也讓M829A4具備了反制爆炸反應裝甲以及主動防禦系統的良好能力。