

### 壹、前言

一般對極音速（Hypersonic）的定義，指以 5 馬赫（或 5 倍音速，Mach 5，約相當於時速 5,471 公里或 3,400 哩）以上速度飛行，<sup>1</sup> 最大速度可能達到 25 馬赫，此一領域涵蓋許多不同速度與應用範圍的飛行器及載具，以及不同的物理特性與運用。本章分三個方向探討目前極音速技術發展，一是極音速武器，二是極音速飛機，三是極音速的關鍵科技。

### 貳、極音速武器發展現況

極音速指以超過 5 馬赫速度在大氣中飛行。極音速的研究始於 1930 年代的德國，二次大戰之後，研究興趣轉向彈道飛彈及太空旅行。其實任何太空載具，包括彈道飛彈或是太空艙，在重返大氣層時，其速度都超過 25 馬赫，或時速 17,500 哩，因此從 1960 年代載人太空飛行開始以來，極音速飛行就已成爲現實，只是時間很短暫。<sup>2</sup>

極音速載具在本質上與重返大氣載具不同，主要差別在於載具或武器本身要在極音速情況維持長時間飛行，在飛行階段可以操控。極音速載具大約有以下數種類別：

\* 國防安全研究院中共政軍與作戰概念研究所副研究員。

1 Yasmin Tadjeh, "SPECIAL REPORT: Defense Department Accelerates Hypersonic Weapons Development," *National Defense Magazine*, July 11, 2019, <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2019/7/11/defense-department-accelerates-hypersonic-weapons-development>.

2 John T. Watts, Christian Trotti, and Mark J. Massa, "Primer on Hypersonic Weapons in the Indo-Pacific Region," *Atlantic Council*, August 17, 2020, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/primer-on-hypersonic-weapons-in-the-indo-pacific-region/>.

## 一、極音速滑翔飛行器（Hypersonic Glide Vehicle, HGV）

為一種彈道飛彈類型，又稱推進—滑翔式武器（Boost-glide weapon），彈頭具有特殊氣動力外型，與彈道飛彈同樣以火箭助升器推進至大氣層，但 HGV 的彈體脫離後在重返階段，彈體撞擊大氣層後仍可以極音速滑翔，並變換軌道，使飛彈防禦系統難以攔截。

## 二、極音速巡弋飛彈（Hypersonic Cruise Missile, HCM）

使用超音速燃燒衝壓發動機（scramjet，簡稱超燃衝壓發動機）等進氣式發動機推進，使載具或彈體本身達到極音速飛行。

## 三、極音速飛行器（Hypersonic Vehicle）

使用超音速燃燒衝壓發動機等進氣式發動機達到極音速的飛機，使用火箭雖也可達到極音速，如美國的 X-15 實驗機，但其火箭燃燒時間很短，無法持續飛行。目前使用超燃衝壓發動機概念的飛行器，也尚在實驗階段，距離載人飛行恐仍有一段距離。次軌道飛行器飛行高度約在 100 公里以上，X-15 實驗機也可推升至 100 公里高度。美國空軍未實現的 X-20 「動力倍增器」（Dyna-Soar）也是一種次軌道飛行器，後來中止發展。

目前民間公司也運用商用技術發展次軌道飛行，如「維珍銀河」的太空船 1 號（SpaceShipOne）。而使用超燃衝壓發動機的極音速飛行器也會在次軌道飛行。中共「中國航天科技集團」的次軌道運載飛行也在 2022 年 8 月首次試驗成功，其具備升力式外型，類似美國 DARPA 發展的 XS-1 或是維珍銀河公司的太空船 1 號。

## 四、砲射式（gun-launched）投射物

使用新技術發射超音速或極音速砲彈的火砲或電磁軌道砲，其砲彈

或投射物也會以極高速度飛行，但前者是以現有的 155 榴砲發射採用衝壓發動機的「超高速砲彈」(hypervelocity projectiles)，使砲彈離開砲管後仍會持續加速飛行，以增加射程；後者則以電磁方式將投射物加速至極音速，雖然這兩種武器的射程均較短，速度也僅達到極音速的最低標準，約 6 至 8 馬赫，但在未來發展防空及飛彈防禦系統，或反制對手的陸射及海射武器時，可成為一種低成本的選擇。<sup>3</sup>

## 五、彈道飛彈 (Ballistic Missile)

本身也屬極音速載具，當彈頭脫離助升火箭重返大氣層期間，也是以極音速飛行。俄羅斯發展多型空射極音速飛彈，即是將彈道飛彈直接掛載於大型機如 Tu-22M3、Tu-160 轟炸機，或是 MiG-31 這種大型戰機之上。

表 2-1 極音速載具種類及任務

運用	推進型式	射程／航程	速度	發射模式
傳統打擊武器	推進—滑翔	3,400 哩 +	20 馬赫	潛射、海上、陸上
地對地彈道飛彈	推進—滑翔	1,500 哩 +	20 馬赫	潛射、海上、陸上
打擊飛彈 (反艦等)	超燃衝壓 推進—滑翔	250-1,500 哩 +	8 馬赫 20 馬赫	潛射、海上、空中
攔截飛彈	超燃衝壓	250 哩	5-7 馬赫	海上、陸上
軌道砲等	砲射 (電磁或火藥)	100 哩	6-8 馬赫	海上、陸上
載人／偵察	有人飛行器	10,000 哩	5 馬赫	自力推進

資料來源：“Primer on Hypersonic Weapons in the Indo-Pacific Region,” *Atlantic Council*, August 17, 2020, <https://www.atlanticcouncil.org/in-depth-research-reports/report/primer-on-hypersonic-weapons-in-the-indo-pacific-region/>.

目前除美國、中國、俄羅斯都在發展極音速武器外，其他國家也有類似的發展計畫，對現有飛彈防禦系統造成挑戰，使極音速武器擴散成為國際秩序的新威脅。

<sup>3</sup> Ibid.

## 一、美國的發展計畫

在極音速技術上，仍屬美國最為先進，除飛行器外，在極音速武器或實驗載具上，美國航空太空總署（NASA）、國防部麾下的先進研究計畫署（DARPA），以及陸、海、空各軍種都有自己的發展計畫，主要發展方向有二，一是極音速滑翔載具，二是極音速進氣式武器（Hypersonic Air-breathing Weapon Concept, HAWC）。

### （一）極音速滑翔載具

通常由飛彈或火箭發射，「彈頭」本身不具推進器，重返階段以極音速滑翔。美國空軍目前有二種極音速武器，即 AGM-183 空射快速反應武器（Air-Launched Rapid Response Weapon, ARRW）與極音速攻擊巡弋飛彈（Hypersonic Attack Cruise Missile, HACM），分別採用極音速滑翔及極音速進氣推進兩種不同概念。2018 年時，美國空軍曾同時發展二種推進—滑翔武器，除 ARRW 外，另一種為「極音速傳統打擊武器」（Hypersonic Conventional Strike Weapon, HCSW），但因預算限制，2018 年決定放棄 HCSW，僅發展 ARRW，編號 AGM-183，並在 2018 年授予洛克德馬汀公司合約，原因是 HCSW 體積太大，ARRW 較小且先進，除轟炸機可攜帶 2 倍數量外，還可由 F-15 戰機攜掛。<sup>4</sup>

ARRW 使用一枚助推火箭，將彈體推至極音速。ARRW 經歷多次測試，但一直不順利，直到 2022 年 5 月完成首次成功測試，ARRW 飛彈助推器成功點火，使彈體達到 5 馬赫，<sup>5</sup> 7 月再度成功試射；<sup>6</sup> 12 月 9 日

<sup>4</sup> “Roper: The ARRW Hypersonic Missile Better Option for USAF,” *Air & Space Forces Magazine*, March 2, 2020, <https://www.airandspaceforces.com/arrw-beat-hcsw-because-its-smaller-better-for-usaf/>.

<sup>5</sup> “Air Force Conducts Successful Hypersonic Weapon Test,” *U.S. Air Force*, May 16, 2022, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3033416/air-force-conducts-successful-hypersonic-weapon-test/>.

<sup>6</sup> “Air Force Completes Another Successful Hypersonic Test,” *U.S. Air Force*, July 13, 2022, <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/3092249/air-force-completes-another-successful-hypersonic-test/>.

完成首次全功能測試，包括助推火箭及滑翔飛行器，<sup>7</sup> 測試過程均使用 B-52H 轟炸機掛載及發射。

不過因 ARRW 受到國會及外界質疑，而發展過程一直不順利，美國空軍在 2023 年 3 月決定不採購 AGM-183，但 ARRW 計畫並不算被取消，美國空軍仍會完成後續二次測試。而美國空軍將持續推動 HACM 計畫，這是一種進氣式極音速武器，體積更小，可由 F-15EX 攜帶，但這也給空軍及雷神更大的壓力，因為至少在公開項目上，這是目前空軍唯一發展中的極音速飛彈。<sup>8</sup>

另外，空軍早先取消的 HCSW，也是超音速滑翔載具的一種，陸軍及海軍的型式仍持續發展，被稱為「長程極音速武器」（Long-Range Hypersonic Weapon, LRHW）計畫，也是一種推進—滑翔飛彈，但射程達 2,770 公里（1,725 哩），使用兩級火箭推進，配備與海軍相同的「共通極音速滑翔」（Common Hypersonic Glide Body, C-HGB）彈體，預計可達 5 馬赫或更快速度，使其難以被飛彈攔截。陸軍的 LRHW 由陸軍發射車發射。

海軍的「傳統即時打擊」（Conventional Prompt Strike, CPS）則將配備在其朱瓦特級驅逐艦（Zumwalt-class destroyer, DDG 1000）上。<sup>9</sup>

## （二）極音速進氣式武器

美國 DARPA 過去發展的「極音速進氣式武器概念」（Hypersonic Air-breathing Weapon Concept, HAWC），為使用超燃衝壓發動機推動的極音速武器概念，超燃衝壓發動機屬衝壓發動機（ramjet）的一種，但超燃衝壓發動機的進氣在進入發動機時，仍保持超音速狀態，使載具能達到更

<sup>7</sup> “Air Force Conducts First ARRW Operational Prototype Missile Test,” *U.S. Air Force*, December 12, 2022, <https://www.eglin.af.mil/News/Article-Display/Article/3240613/air-force-conducts-first-arrw-operational-prototype-missile-test/>.

<sup>8</sup> “Air Force Pulls Plug On Much-Hyped Hypersonic Missile,” *The Drive*, March 30, 2023, <https://www.thedrive.com/the-war-zone/air-force-pulls-plug-on-much-hyped-hypersonic-missile>.

<sup>9</sup> “The U.S. Army’s Long-Range Hypersonic Weapon (LRHW),” *Congressional Research Service*, March 31, 2023, <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11991>.

高的飛行速度。

美國航空太空總署的極音速實驗機 X-43，即使用超燃衝壓概念，X-43A 曾在 2004 年 11 月一次實驗飛行時，達到 9.6 馬赫（時速接近 7,000 哩，相當於 11,265 公里）的速度紀錄，是目前速度最快的進氣式飛機，而有人進氣式飛機的紀錄保持者，仍是 SR-71，時速達 3.2 馬赫，<sup>10</sup> 載人飛機的最快速度則是 X-15 實驗機在 1967 年 10 月創下，達到 6.7 馬赫，但 X-15 使用的是火箭發動機。<sup>11</sup>

美國空軍與波音公司合作的 X-51「乘波者」（Wave Rider）極音速實驗機，是 X-43 的後續計畫，也使用超燃衝壓發動機，但機體使用特殊的乘波體外型，不具備機翼，乘波體設計使飛機可利用超音速飛行時產生震波，造成飛行的壓縮升力（Compression Lift），其基本概念雖簡單，但載具的設計則十分困難，機體需要極鋒利的前緣以減少阻力，但熱傳導問題則需鈍化機身，因此機身需要設計特殊的冷卻系統。<sup>12</sup> 過去運用壓縮升力概念的飛機，僅有美國空軍放棄的 XB-70 超音速轟炸機計畫。X-51 結合乘波體及超燃衝壓發動機，其設計至今仍屬十分先進，但僅完成四次試飛，僅在第四次試飛時維持 5.1 馬赫、6 分鐘的持續飛行。<sup>13</sup>

HAWC 計畫在 2023 年 1 月完成最後一次飛行測試，達到 5 馬赫飛行速度，高度超過 6 萬呎，飛行距離超過 300 哩。<sup>14</sup> DARPA 預計進入下一階段發展計畫，即「極音速進氣式武器概念後續計畫」（More Opportunities with HAWC, MOHAWC），另外，空軍的 HACM 也是 HAWC 的技術繼承者。

HACM 也採用超燃衝壓發動機概念。2020 年美國與澳洲合作發展的

<sup>10</sup> “X-43A,” *NASA*, <https://www.nasa.gov/missions/research/x43-main.html>.

<sup>11</sup> “X-15: Hypersonic Research at the Edge of Space,” *NASA*, February 24, 2000, <https://history.nasa.gov/x15/cover.html>.

<sup>12</sup> “Hypersonic Vehicle Design,” *Aerospaceweb*, <https://aerospaceweb.org/design/waverider/design.shtml>.

<sup>13</sup> “X-51A Waverider,” *U.S. Air Force*, <https://www.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Display/Article/104467/x-51a-waverider/>.

<sup>14</sup> “Hypersonic Scramjet Missile HAWC Successfully Tested for Last Time,” *Air & Space Forces Magazine*, January 30, 2023, <https://www.airandspaceforces.com/hypersonic-scrumjet-missile-hawc-successfully-tested-for-last-time/>.

「南十字綜合飛行研究實驗」(Southern Cross Integrated Flight Research Experiment, SCIFiRE)，發展極音速飛彈原型，洛馬與雷神公司在 2021 年分別獲得 15 個月合約，完成初步設計，該概念後來成為 HACM 的原型。洛馬與雷神也在 HAWC 計畫下合作，不過在 2022 年 9 月，雷神公司獲得 HACM 發展合約，發展可掛載在戰機上的進氣式極音速飛彈，超燃衝壓發動機則由諾斯洛普格魯門公司發展，預計在 2027 年開始生產。<sup>15</sup>

另外，美國空軍在 2022 年啟動「混亂計畫」(Project Mayhem)，授予雷度士(Leidos)一項合約，發展一種比 AGM-183 更大的進氣式極音速載具，可搭載各種感測器，執行打擊或情監偵任務，此一目的在打造 DARPA 的 HAWC 武器平台。<sup>16</sup>從 2021 年文件來看，該計畫目的在發展一種實驗平台，用於支持先進高速噴射發動機的發展，其完整計畫名稱從「可擴張極音速多任務進氣展示機」(Expendable Hypersonic Multi-Mission Air-Breathing Demonstrator)變成「極音速多任務情監偵及打擊」，另一過去名稱「多任務巡航者」也與該計畫相關。計畫詳細內容仍為保密，但似乎是一種更大型的 platform，而且是一種可重複使用、非「可消耗性」的平台。美國空軍先前已授予多項小型合約，被認為與該計畫的相關技術發展有關。先前報導指出，該計畫的最終產品為何，仍有待觀察。<sup>17</sup>

該計畫的極音速系統使用超燃衝壓發動機產生推力，以超過 5 馬赫速度進行長距離飛行，系統設計代理團隊(SDA)將發展一種大型 platform，其機身、推進系統、助升器、航電系統及子系統，都比目前發展的載具要大。<sup>18</sup>

<sup>15</sup> “Raytheon Wins Hypersonic Attack Cruise Missile Contract,” *Air & Space Force Magazine*, September 22, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/raytheon-wins-hypersonic-attack-cruise-missile-contract/>.

<sup>16</sup> “Leidos Wins Hypersonic Project ‘Mayhem’ Deal, Worth Up to \$334M,” *Air & Space Forces Magazine*, December 16, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/leidos-wins-hypersonic-project-mayhem-deal-worth-up-to-334m/>.

<sup>17</sup> “Hypersonic Strike Aircraft Capability Is Part of the Air Force’s Shadowy Project Mayhem,” *The Drive*, December 20, 2021, [https://www.thedrive.com/the-war-zone/43545/hypersonic-strike-aircraft-capability-is-part-of-air-forces-shadowy-project-mayhem?\\_trms=4463d33e0f3f7f8e.1688243510381](https://www.thedrive.com/the-war-zone/43545/hypersonic-strike-aircraft-capability-is-part-of-air-forces-shadowy-project-mayhem?_trms=4463d33e0f3f7f8e.1688243510381).

<sup>18</sup> “Kratos Receives Mayhem Hypersonic Missile Program Contract Award,” *Defence Blog*, January 19, 2023, <https://defence-blog.com/kratos-receives-mayhem-hypersonic-missile-program-contract-award/>.

## 二、中國與俄羅斯的發展

### （一）中共的極音速武器

中共在2019年10月1日首度展出東風17飛彈，彈頭採乘波體（Wave Rider）設計，使用一截火箭發動機推進，在重返大氣層時以打水漂式的「錢學森彈道」撞擊大氣層，其彈體具舉升體形狀，可藉壓縮升力及震波飛行，並控制飛行方向，非單純拋物線，軌跡難以推算，終端速度可能達20馬赫，東風17也可能用於打擊航空母艦等重要目標，對美國現有的陸基或海基飛彈防禦系統將構成嚴重挑戰。另外中國也可能將東風21D掛載於轟6轟炸機上，成為另一種空射式極音速飛彈。

東風17可能由過去曝光的WU-14極音速載具發展而來，由2014年開始實驗，使用高升阻比的乘波體外型，在高空層進行極音速滑翔飛行時，可修改飛行軌跡，進行空中機動，使其彈道無法預測，從而躲避反飛彈系統的攔截。另外外界也傳聞中國在發展極音速飛機，以及極音速發動機，然皆無確切訊息可證實其發展情況，也有報導指出，中國極音速飛機發展仍有技術門檻有待跨越，距成功研發極音速飛機為時尚早。<sup>19</sup>

### （二）俄羅斯的極音速武器

俄羅斯發展多型極音速武器，並聲稱其難以被美國的飛彈防禦系統攔截，然而俄羅斯雖對烏克蘭發動任意式的飛彈攻擊，但由於其情報及目標標定能力過於緩慢，未能跟上變化快速的戰場動態，並低估其實現戰爭目標所需的飛彈打擊規模，加上烏克蘭開始獲得西方先進防空飛彈，如愛國者飛彈、挪威先進防空飛彈系統（Norwegian Advanced Surface-to-Air Missile System, NASAMS）及「紅外線成像導引系統／尾部推力向量控制」飛彈（InfraRed Imaging System Tail/Thrust Vector-Controlled, IRIS-T）等，也有效攔截俄製飛彈。<sup>20</sup>

<sup>19</sup> 〈專家：中國高超音速飛機還面臨多個技術門檻〉，《人民網》，2015年9月21日，<http://politics.people.com.cn/n/2015/0921/c70731-27614425.html>。

<sup>20</sup> “The Failure of Russia’s Missile War in Ukraine,” *Defense News*, May 11, 2023, <https://www.defensenews.com/opinion/2023/05/11/the-failure-of-russias-missile-war-in-ukraine/>.



依據公開資料，俄目前擁有 4 種極音速飛彈，包括 9M720 伊斯坎德飛彈 (Iskander)、Kh-47M2「匕首」(Kinzhal) 飛彈、「先鋒」(Avangard) 飛彈、3M22「鋯石」(Zircon) 飛彈，和正處於研發階段的 Kh-95 新型遠程極音速飛彈。俄雖聲稱這些飛彈是極音速武器，但似乎都是彈道飛彈的衍生型，僅先鋒飛彈及發展中的 Kh-95 是使用極音速飛行器 (hypersonic glide vehicle, HGV) 概念的長程飛彈。

### 1. Kh-47M2「匕首」(Kinzhal) 飛彈

為一種空射型極音速飛彈，射程 2,000 公里，速度可達 10 馬赫，可攜帶傳統彈頭或核彈頭，在飛行時可進行閃避動作，避免遭飛彈攔截。匕首飛彈可由 Tu-22M 轟炸機或 MiG-31 戰機發射。匕首飛彈目的在嚇阻美國和北約軍艦對俄彈道飛彈系統的威脅，它可在發射後幾秒鐘內加速到極音速，並在飛行過程中隨時進行機動，以克服任何已知的西方防空或飛彈防禦系統，包括愛國者、終段高空區域防禦系統 (THAAD) 系統，或海軍的神盾作戰系統。此外，因其為空射式彈道導彈，可以從難預測的位置發射，可能對不具 360 度涵蓋角的扇形預警雷達造成壓力，例如愛國者系統的雷達，這能為俄羅斯提供極大戰略嚇阻力。<sup>21</sup>

### 2. 9K720 伊斯坎德飛彈 (Iskander)

北約賦予代號為 SS-26「石頭」(Stone)，為一種單級、固態燃料推進的戰術短程彈道飛彈，射程約 500 公里，由俄製通用運輸—裝置—發射車 (transporter-erector-launcher, TEL) 搭載，可進行道路機動，即時發射，機動性極佳。其飛行速度約為 5.9 馬赫，使用慣性導航、光學目標辨識，以及衛星定位導引。其飛行中仍維持彈道飛彈的飛行軌跡，但在最後階段進行規避機動並釋放誘餌以穿透飛彈防禦系統，在飛行過程中不會離開大氣層。

<sup>21</sup> “Kh-47M2 Kinzhal (‘Dagger’),” *Missile Defense Advocacy Alliance*, June 28, 2018, <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-threat-and-proliferation/todays-missile-threat/russia/kh-47m2-kinzhal-dagger/>.

伊斯坎德飛彈有三種次型，伊斯坎德 K 為次音速巡弋飛彈，伊斯坎德 M 為短程彈道飛彈，伊斯坎德 E 為出口型，射程限制在 280 公里。

### 3. 3M22「鋯石」(Zircon) 飛彈

北約代號為 SS-N033，也是一種極音速飛彈，配備在水面艦及潛艦上，速度可達 8 至 9 馬赫，射程約 1,000 至 2,000 公里。鋯石飛彈使用極音速衝壓發動機，為一種執行反艦任務的極音速巡弋飛彈，由 NPO 設計局的極音速實驗飛行載具發展而來。該飛彈有一截固體燃料助推器，將其加速至超音速後，啟動彈體中使用液態燃料的主發動機，加速至極音速。鋯石彈體約為戰斧巡弋飛彈的 2 倍，其 9 馬赫高速使其難以被艦艇的防空武器攔截，而其在大气層中高速飛行，彈體前方大气壓力會產生等離子雲 (plasma cloud)，具吸收電磁波能力，使其難被主動式雷達發現，但其彈體上的導引系統也會因此失效。其彈道軌跡的最後一段將在極短時間完成，艦上反制系統可能沒有足夠時間完成攔截程序，被認為對大型水面目標如航空母艦極具殺傷力。

2023 年 1 月，鋯石飛彈首度部署在 22350 型巡防艦首艦高希可夫號上，而基洛夫級巡洋艦也在進行現代化改造，以便配備鋯石飛彈，用於長程反艦任務。另外，勇壯級 (Udaloy) 驅逐艦、奧斯卡 (Oscar) 級潛艦、亞森 (Yasen) 級潛艦也在接受現代化改裝，將可配備鋯石飛彈。鋯石和「布拉姆斯 II」(BrahMos-II) 飛彈間可能有類似之處，似是鋯石飛彈的出口版本。

### 4. 「先鋒」(Avangard) 飛彈

先鋒飛彈採用極音速滑翔飛行器概念，其射程超過 6,000 公里，可攜帶核彈頭或傳統彈頭。其彈頭由彈道飛彈推進，舉升段採用 SS-19 飛彈的彈體，但未來會改用 R-28 薩馬特 (Sarmat) 飛彈。當飛彈被推升至 100 公里高度的軌道頂端，接著彈頭與彈體分離，穿透大气層進行巡航，據稱可以保持 20 馬赫的極音速，並進行機動，這將使其彈道不可預測，從而使攔截變得十分困難。目前尚無先鋒飛彈 HGV 的公開畫面，推測其可能

為短楔形，具有小型安定翼面。該型飛彈應已在 2019 年開始部署。<sup>22</sup>

### 5. Kh-95 新型遠程極音速飛彈

一種空射型戰略巡弋飛彈，與「匕首」及「鋸石」類似，可由 Tu-22M 或 MiG-31 等大型飛機攜帶並發射，其射程可能超過 1,000 公里，俄國防部長紹伊古（Sergei Shoigu）表示，這些極音速武器系統，將構成俄羅斯非核嚇阻力量的支柱。<sup>23</sup>

## 參、極音速飛機概念的推動

美國空軍認為，匿蹤技術有其限制，而偵測技術的發展將使匿蹤飛機更難以躲藏，但高飛行速度將使敵方難以攔截，從而恢復生存性。因此極音速科技在未來將能大幅提升作戰飛機的生存性。極音速飛機因飛行速度快，即使攜帶傳統武器，同樣也可快速達到目標區，即使目標移動，也能靈活反應，極音速飛機也較傳統飛機更易於躲避防空飛彈攻擊。另外，極音速飛機可以在任務結束後飛返基地，重複再使用，減少戰場消耗，美國國防部 2021 年研究發現，一枚極音速飛彈成本達 8,900 萬至 1 億美元之間，幾與一架 F-35 戰機相當，國會預算辦公室在 2023 年估算每枚成本僅 4,100 萬美元，但仍然很高，也限制其採購數字。<sup>24</sup>

過去美國空軍 SR-71「黑鳥」偵察機，最大速度達 3.3 馬赫，最大升限達 85,000 呎（24,285 公尺），已達到同溫層高度。SR-71 配備 2 具普惠 J58 渦輪噴射發動機，結合複雜的可變幾何軸對稱進氣道與旁通流系統，在飛行時，可移動的進氣錐可控制震波，變換旁通氣流量，使噴射發動機變成渦輪—衝壓發動機。在起飛及次音速飛行時，一部分空氣進入發動機

<sup>22</sup> “Avangard,” *Missile Threat*, July 31, 2021, <https://missilethreat.csis.org/missile/avangard/>.

<sup>23</sup> “X-95 Long-range Hypersonic Missile,” *Global Security*, <https://www.globalsecurity.org/wmd/world/russia/kh-95.htm>.

<sup>24</sup> “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

渦輪進行壓縮，成為核心氣流，另一部分空氣經由進氣錐及進氣道壓縮，成為旁通氣流，從渦輪周邊直接進入後燃器，與發動機共同產生推力；在 3 馬赫超音速巡航時，90% 推力來自旁通氣流，其中 60% 推力來自旁通氣流、30% 來自排氣，僅 10% 是來自噴射發動機。但在達到 3 馬赫的高速，需要複雜的結構改變發動機的進氣方式，飛行員必須持續監控進氣道的運作，甚至以手動操作，早期類比式電腦要分析量測到的進氣道壓力、飛行姿態等數據，以控制進氣錐位置，有時仍可能造成未預期的失速情況，後來改用數位電腦才改善。不過 SR-71 失事率仍然極高，但多發生在試飛、訓練時，從未在執行任務時遭擊落或失事。

若要提升至更高速度，例如 3 馬赫至 6 馬赫範圍，則需使用更先進的複合式渦輪—衝壓發動機。以目前公開的 SR-72 想像圖來看，渦輪噴射發動機要提供由起飛至 3 馬赫範圍的推力，雙模式衝壓發動機提供極音速飛行的動力，而渦輪噴射發動機與衝壓發動機使用同一個進氣道與排氣口，以減少阻力。

為加速發展極音速飛行能力，美國國防部也尋求民間技術發展極音速的技術展示機。美國國防部「國防創新小組」（Defense Innovation Unit, DIU）在 2022 年 9 月發布一項通知，尋求商業界對極音速測試飛行器的建議，即「極音速及高節奏機載測試能力」（Hypersonic and High-Cadence Airborne Testing Capabilities, HyCAT）。

由於中共、俄羅斯均在發展極音速科技，為免落於中俄發展之後，美國國防部已開始加速極音速科技的發展，除各軍種的極音速武器外，極音速載具及相關科技的發展也全力推動中。

美國有幾項極音速實驗飛行器計畫正在進行中。X-51「乘波者」（Wave Rider）是美國航空太空總署與波音公司共同開發的極音速實驗計畫，使用超燃衝壓發動機，在 2013 年曾達到 5.1 馬赫的最高速度紀錄。該項計畫為後來極音速技術的實際運用，包括飛彈及武器、偵察、運輸、進氣式太空系統的先導研究。

國防先進計畫署原也計畫發展極音速技術載具（Hypersonic Technology Vehicle, HTV）實驗計畫，計畫全名為「由美國大陸運用武力

及發射」(Force Application and Launch from CONTinental United States, FALCON)計畫，分為HTV-1、HTV-2、HTV-3等三個計畫，分別是低性能極音速滑翔機、高性能極音速滑翔機、可重複使用極音速滑翔機，後來衍生為HTV-3X黑雨燕(Blackswift)，由洛馬臭鼬工廠、波音、ATK等三家公司設計及發展，動力為渦輪發動機及衝壓發動機混合式動力，速度可達6馬赫，不過計畫在2009年取消。<sup>25</sup> HTV-2也曾進行二次測試，均未成功。

美國國防部國防創新部門(Defense Innovation Unit, DIU)從2015年起，已啟動極音速飛機計畫，被稱為「高節奏機載測試」(High-Cadence Airborne Testing, HyCAT)，預計發展可運用的極音速飛機，可在超過5馬赫的極音速情況下飛行，除機體和動力系統外，還包括酬載、導航、通訊、低成本製造材料和技術等。

HyCAT第二階段，將選擇可提供有效酬載及其他技術，以整合在極音速載具上，包括導航、通訊、製造技術及低成本材料等。<sup>26</sup>

美軍也嘗試引進民間新創公司開發極音速技術。2022年，美國海軍選擇雷度士(Leidos)旗下的「動力」(Dynamics)公司發展「多軍種先進能力極音速測試平台」(Multi-Service Advanced Capability Hypersonic Test Bed, MACH-TB)，為極音速飛行測試提供其他選項。由於風洞、測試載具等基礎設備限制，發展進度受限制，每年僅能進行幾次試驗，但MACH-TB則能將測試節奏提高至每週一次，以收集數據並提供給相關部門，用於評估其武器系統、需要的能力、哪些類型的技術等。<sup>27</sup>

2023年6月17日，火箭實驗室(Rocket Lab)的「極音速加速器次軌道電子火箭」(Hypersonic Accelerator Suborbital Test Electron, HASTE)

<sup>25</sup> “VIDEOS: DARPA Cancels Blackswift Hypersonic Test Bed,” *Flight Global*, October 14, 2008, <https://www.flightglobal.com/videos-darpa-cancels-blackswift-hypersonic-test-bed/83405.article>.

<sup>26</sup> “Defense Innovation Unit Eyes First Flight of Hypersonic Testbed,” *Defense News*, June 3, 2023, <https://www.defensenews.com/battlefield-tech/2023/06/02/defense-innovation-unit-eyes-first-flight-of-hypersonic-testbed/>.

<sup>27</sup> “Pentagon Test Bed to Ramp up Development of Hypersonics,” *Defense News*, November 8, 2022, <https://www.defensenews.com/pentagon/2022/11/08/pentagon-test-bed-to-ramp-up-development-of-hypersonics/>.

首次發射成功。HASTE 火箭源自該公司的「電子」(Electron) 火箭，但具有用於極音速有效酬載的末端，其客製化整流罩選項可適應不同的有效酬載，包括進氣式、彈道重返載具、助推—滑翔，以及太空應用等。藉「電子」火箭具世界上發射頻率最高的商用火箭特性，可提供真正的商業測試能力，並降低測試成本。<sup>28</sup>

另外，美國國防部也選擇澳洲極音速發射系統公司(Hypersonix Launch Systems)，在 HyCAT 計畫下發展「飛鏢 AE」，這是一種可在 5 至 7 馬赫飛行的載具，將裝置由氫燃料驅動的「斯巴達」(SPARTAN) 超燃衝壓發動機。飛鏢 AE 要先將飛行器速度提升至 5 馬赫，再由「斯巴達」發動機提供動力。飛鏢 AE 的發展可用於探索極音速飛行的條件、數據傳輸、機動性等，與現有極音速載具相比，因為其設計簡單，可動式零件很少，且以「積層製造」技術生產，並使用氫燃料，發動機為進氣式，它可以更經濟的成本獲取有價值的資訊。其發射的推進火箭即為火箭實驗室的電子火箭。<sup>29</sup> 飛鏢 AE 機體長 3 公尺，重 200 公斤，射程達 1,000 公里，速度達 7 馬赫，可由導引或非導引火箭發射，也可由空中發射，以降低發射成本。飛鏢 AE 預計 2024 年試飛。<sup>30</sup>

除新創公司的發展外，極音速載具另一項另人矚目的發展是洛馬公司的 SR-72，該計畫因為電影《捍衛戰士 2》而被炒熱。然而「SR-72」是否有實機存在仍然是謎。2013 年時，有報導指出，洛克希德馬汀公司旗下的「臭鼬工廠」正在發展 SR-71「黑鳥」偵察機的後繼機。與電影所想像的不同，SR-72 可能是一種無人駕駛的極音速飛機，可重複使用，擔任偵察、監視及打擊任務。SR-72 可配備洛馬發展的高速打擊武器，以 6 馬赫高速飛行，其起飛速度較 SR-71 為快，能提高快速反應能力。但其運用

<sup>28</sup> “Rocket Lab Debuts HASTE Rocket with First Successful Suborbital Launch from Virginia,” *Rocketlabusa*, June 17, 2023, <https://www.rocketlabusa.com/updates/rocket-lab-debuts-haste-rocket-with-first-successful-suborbital-launch-from-virginia/>.

<sup>29</sup> “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce Technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

<sup>30</sup> “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce-technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

的科技在 2013 年時仍不成熟，因此計畫延遲數年，不過現今所運用的科技，包括數位工程、極音速衝壓發動機科技等，已可運用於 SR-72 上。目前仍無具體時間表。洛馬公司 2018 年 2 月指出極音速技術正推動武器計畫發展，未來隨技術成熟，「可重複使用的載具」（reusable vehicle）終將實現。該年 11 月又表示，SR-72 原型將在 2025 年首度飛行，2030 年進入服役。<sup>31</sup>

另外，在 2022 年 12 月，由美國空軍實驗室推動「混亂計畫」（Project Mayhem），授予雷度士一項合約，計畫發展比 AGM-183 更大的進氣式極音速載具，能攜帶多種酬載，進行打擊或情、監、偵任務。<sup>32</sup> 目前尚不知混亂計畫的最終產物，但可能會是一種極音速載具。雖然該計畫的官方說法是「消耗性極音速多任務情報、監視、偵察和打擊」，但它並未被賦予單次自殺性任務，但其應該表示，空軍願意派遣無人機（UAV）執行高風險任務，並願意接受其較高風險的潛在損失。

2022 年 4 月新的招標說明中指出，混亂計畫重點在「提供更大型的進氣式極音速系統，能夠藉標準化有效酬載界面執行多項任務，提供重大的技術進步和未來能力」。標準化有效酬載界面將為同一極音速系統中的各種有效酬載整合創造多種機會。雷度士已開始運用數位工程及基於模型的系統工程，進行設計及發展，以及初始概念測試。整項計畫包括機體、推進系統、助推器、航電設備及載具子系統，預計 2028 年完成。<sup>33</sup>

---

<sup>31</sup> “Lockheed Martin’s Mysterious SR-72 Could Enter Service in the 2030s,” *National Interest*, December 3, 2021, <https://nationalinterest.org/blog/reboot/lockheed-martin%E2%80%99s-mysterious-sr-72-could-enter-service-2030s-197320>.

<sup>32</sup> “Leidos Wins Hypersonic Project ‘Mayhem’ Deal, Worth Up to \$334M,” *Air & Space Force Magazine*, December 16, 2022, <https://www.airandspaceforces.com/leidos-wins-hypersonic-project-mayhem-deal-worth-up-to-334m/>.

<sup>33</sup> “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

## 肆、極音速關鍵科技

極音速技術挑戰極高，面臨的關鍵技術領域挑戰包括：<sup>34</sup> 先進的飛行器設計，以實現高效能的極音速飛行、以碳氫化合物推進的超燃衝壓發動機、管理高溫及應力方法，極音速載具外殼需能應付在大氣層中高速飛行所產生的極端高溫，這與在大氣層內以低速飛行的巡弋飛彈，或是主要飛行階在大氣層之外的彈道飛彈不同；還需要保護彈體內攜帶的敏感電子儀器，並預測高溫華氏 3,000 度（攝氏 1,648 度）下的空氣動力學，這需要大量測試數據，但近年測試遭遇多次失敗，推遲這一領域的進展。

國防創新部門指出，HyCAT 後續階段為革命性技術（HyCAT II），旨在利用 HyCAT I 正在開發的模塊化有效酬載能力，支持相關環境中新型極音速技術的原型測試。這些感興趣的技術包括：低成本製造和材料、可選擇性導引、導航和控制系統及組件、推進系統，包括進氣式、火箭推進、聯合循環等，以及其他新穎、低成本、低訊號特徵的技術、通訊系統和組件，包括遙測和安全數據鏈路。<sup>35</sup>

製造聯合循環發動機被認為是一項重大的技術挑戰。進氣式的極音速推進系統，集點仍集中在超燃衝壓發動機上，傳統噴射發動機使用內部風扇葉片壓縮流導入空氣，空氣與燃料混合後再點燃，而超燃衝壓發動機則是使空氣以極高速度（通常為 3 馬赫或更高）進入發動機時產生自然壓縮，這使其可在極大範圍內實現持續的極音速飛行。由於超燃衝壓發動機通常無法在低於 3 馬赫速度下正常工作，因此該飛機可能需要聯合循環推進系統，結合傳統的高性能噴射發動機或衝壓發動機，以及超燃衝壓發動機，以傳統發動機起飛並加速至超音速，飛機達到 3 馬赫或更高速度時，超燃衝壓發動機將啟動並加速到極音速。傳統發動機則在任務結束時再次啟動，以利著陸。

<sup>34</sup> “Hypersonic Air-breathing Weapon Concept (HAWC),” *DARPA*, <https://www.darpa.mil/program/hypersonic-air-breathing-weapon-concept>.

<sup>35</sup> “DIU Asks Industry for Help Getting Hypersonic Test Jet Closer to Lift off,” *Breakingdefense*, January 24, 2023, <https://breakingdefense.com/2023/01/diu-asks-industry-for-help-getting-hypersonic-test-jet-closer-to-lift-off/>.



但整合傳統發動機和超燃衝壓發動機，面臨不阻礙超燃衝壓發動機氣流，以及將重量保持在可接受範圍內的困難。洛馬公司一直在研究這項技術，作為 SR-72 的一部分，該計畫早於「混亂計畫」，並且也希望用於開發極音速戰機概念。然而迄今為止，還沒有公司或機構公開承認，在設計聯合循環發動機方面取得成功。

為了實現預期的速度和航程目標，混亂計畫可能仍需採用超燃衝壓發動機作為主要推進系統。但赫姆士（Hermeus）公司正在開發一種能夠實現極音速的非超燃衝壓發動機推進系統。「嵌合體」（Chimera）是一種基於渦輪的聯合循環發動機（turbine-based combined cycle engine, TBCC），是一種渦輪噴射發動機和衝壓發動機的混合發動機。向衝壓發動機推進的過渡發生在 2 馬赫和 3 馬赫之間。Hermeus 希望通過嵌合式發動機實現 5 馬赫的持續速度，並將該技術應用於民用和軍用飛機。該公司計畫在「暗馬」（Darkhorse）無人機展示機上使用 TBCC，希望在 2025 年試飛。「暗馬」預計可達到 5 馬赫高速。<sup>36</sup>

飛鏢 AE 極音速系統則由單具斯巴達超燃衝壓發動機提供動力。這是由 Hypersonix 開發的第五代可重複使用氫動力超燃衝壓發動機。除了零二氧化碳排放外，清潔燃燒的氫燃料還使發動機能夠在飛行過程中多次開啟和關閉，這允許實現傳統火箭無法實現的非彈道式飛行軌跡。與整合到飛鏢 AE 機身中的控制面一起，可賦予飛鏢 AE 獨特的高速機動性。此外，與其他超燃衝壓發動機相比，氫燃料的航程更大。Hypersonix 於 2023 年 6 月獲得使用技術的美國專利。「斯巴達」的固定幾何形狀是其獨特的特徵，有助於其運用先進製造方法。該超燃衝壓發動機採用 Inconel 718 高溫合金製成，速度可達 7 馬赫。技術展示版本則採用高溫陶瓷基複合材料（HT CMC）生產，HT CMC 具有承受強烈加熱和快速冷卻重複循環的能力，使其成為可重複使用極音速飛行器的首選材料。在 Inconel 718 上使用 HT CMC，使發動機能夠承受最高速度為 12 馬赫時出現的高溫。<sup>37</sup>

<sup>36</sup> “Hypersonic Multitasker: USAF Project Mayhem Takes Shape,” *European Security & Defence*, August 1, 2023, <https://euro-sd.com/2023/08/articles/32901/hypersonic-multitasker-usaf-project-mayhem-takes-shape/>.

<sup>37</sup> “DART AE Hypersonic Vehicle, Australia,” *Airforce-technology*, August 30, 2023, <https://www.airforce-technology.com/projects/dart-ae-hypersonic-vehicle-australia/>.

## 伍、小結

目前極音速載具的主要發展領域仍在軍用部分，在極音速武器方面，雖然美國技術最為先進，然而中國及俄羅斯在飛彈的運用及部署上已取得領先，使美國亦急起直追。然而美國各軍種極音速武器發展計畫仍遭遇諸多困難，美國審計署也指出其發展計畫過程中的困境，目前這些極音速武器計畫，要達到初始戰力並開始部署，仍需一段時間。

在極音速載具方面，技術挑戰則更高，這包括機體結構、耐極高溫的材料、可持續使用的極音速發動機，不論是整合式渦輪發動機及超燃衝壓發動機，或是其他新式概念，另外尚包括可用的酬載、航電系統、極音速環境下的通訊、導航等相關技術，要實現實用化的極音速載具，不論是載人或是無人系統，仍需更多時間及資源投入，而目前在軍事的運用上，仍是驅動極音速科技發展最主要的動力。