

克維拉纖維 (Kevlar) 與火舞表演之關係: 材料科學的歷史演進與先進應用進展研究報告

sfd.tw 水手火舞社社長 / 材料科學研究員: Teemo

緒論: 克維拉纖維的誕生與高分子材料的劃時代革命

在現代合成纖維與高分子材料科學的漫長發展歷程中, 克維拉纖維 (Kevlar) 的發明無疑是一次徹底改變多個產業領域結構的劃時代革命。作為一種具備極高抗拉強度、卓越耐熱性與優異化學穩定性的對位芳香族聚醯胺纖維 (Para-aramid Synthetic Fiber), 克維拉不僅在軍事防護、航空航太與工業複合材料領域確立了不可動搖的地位, 更在文化與表演藝術領域—特別是火舞表演 (Fire Performance) 中, 扮演了推動技藝發展與確保表演者生命安全的關鍵角色¹。本研究報告旨在全面而深入地剖析克維拉纖維的化學與物理本質, 並以此為學理基礎, 詳盡探討其與火舞表演道具之間的技術共生關係。同時, 本報告將以美國 (United States) 與澳洲 (Australia) 兩國作為最主要的資訊來源與分析藍本, 延伸探討該材料在軍事防護、航太工程、汽車工業及極端環境中的最新應用進展。

要理解克維拉纖維的偉大成就, 必須追溯至其發明者—美國杜邦公司 (DuPont Chemical Company) 的傑出化學家史蒂芬妮·克沃勒克 (Stephanie Kwolek, 1923–2014) 的生平與研究軌跡³。克沃勒克出生於美國賓夕法尼亞州 (Pennsylvania) 的新肯辛頓 (New Kensington), 其父母皆為波蘭移民。在一個被美國鋁業公司 (Aluminum Company of America, Alcoa) 與海灣石油 (Gulf Oil) 等重工業廠房環繞的鄉村環境中成長, 她自幼便展現出對自然科學的濃厚興趣³。她的父親熱愛在花園進行科學實驗, 這促使她花費大量時間收集樹葉、種子與野草製作剪貼簿; 而身為優秀裁縫師的母親, 則賦予了她對紡織品與服裝面料的早期敏銳度³。

克沃勒克最初的職涯規劃是進入醫學院就讀。在從瑪格麗特·莫里森·卡內基學院 (Margaret Morrison Carnegie College, 現為卡內基梅隆大學的一部分) 取得化學理學學士學位後, 為了籌措醫學院的學費, 她於1946年加入了杜邦公司的紡織纖維實驗室 (Textile Fibers Laboratory)⁴。然而, 她在聚合物研究中所展現的卓越天賦與對化學的熱情, 最終使她放棄了醫學之路, 並憑藉優異的表現轉調至位於德拉瓦州 (Delaware) 的杜邦先驅研究實驗室 (Pioneering Research Laboratory)⁴。在長達四十年的前沿化學研究生涯中, 她專注於低溫聚合工藝 (Low-temperature Processes), 致力於創造能夠形成極高剛性與強度的長分子鏈石油基合成纖維⁴。

1964年, 在預期全球可能面臨汽油短缺 (Gasoline Shortage) 的宏觀經濟背景下, 杜邦公司的研究團隊開始致力於尋找一種能夠替代賽車輪胎中沉重鋼絲的輕量化、高強度新材料¹。1965年, 克沃勒克在測試新型合成聚合物時, 合成出了一種外觀呈現混濁狀、黏度極低且有別於傳統透明高分子溶液的液體³。這是一種向列型液晶聚合物 (Liquid Crystalline Polymers), 當這種溶液經過紡絲設備抽出並凝固後, 誕生了一種強度高達同等重量鋼鐵五倍的全新纖維¹。這項突破性的發現不僅促成了芳綸纖維 (Aramid Fiber) 新分支的誕生, 更開啟了先進複合材料的新紀元。1970年代初期, 這種被命名為克維拉 (Kevlar) 的材料首次被商業應用於賽車輪胎的強化; 隨後於1975年, 第一批採用克維拉材質的防彈背心 (Bulletproof Vests) 問世, 徹底改變了全球執法與軍事人

員的防護標準¹。

克沃勒克因這項拯救了成千上萬人生命的發明，獲得了科學界的至高榮譽。她是17項美國專利的獲得者或共同獲得者，其中包含使商業芳綸纖維成為可行的紡絲方法專利，以及5項用於創造克維拉原型的核心專利⁴。她於1994年入選美國國家發明家名人堂 (National Inventors Hall of Fame)，並陸續獲得了1996年國家技術獎章 (National Medal of Technology)、珀金獎章 (Perkin Medal) 以及1999年勒梅爾森-麻省理工學院終身成就獎 (Lemelson-MIT Lifetime Achievement Award)—這些對於女性科學家而言皆是極為罕見且崇高的榮譽⁴。

克維拉纖維的分子結構、液晶紡絲技術與熱物理性質

克維拉之所以能夠在極端的物理衝擊與高溫環境(例如火舞表演中的烈焰)中保持結構穩定，其根本原因在於其獨特的分子結構佈局與高度工程化的紡絲技術。深入探討其材料科學基礎，是理解其廣泛應用價值的先決條件。

化學組成與剛性分子鏈結構

克維拉的化學學名為聚對苯二甲醯對苯二胺 (Poly-para-phenylene terephthalamide, 簡稱 PPD-T)，其在國際純化學和應用化學聯合會 (IUPAC) 的系統命名為 Poly(azanediyl-1,4-phenyleneazanediylterephthaloyl)，化學式可表示為

$[-CO - C_6H_4 - CO - NH - C_6H_4 - NH-]_n$ ¹。該聚合物的合成起始點是透過對苯二胺 (Paraphenylene Diamine) 與對苯二甲醯氯 (Terephthaloyl Chloride) 在有機溶劑中進行縮聚反應 (Polycondensation) 所形成⁷。

在分子結構上，克維拉屬於芳香族聚醯胺 (Aromatic Polyamide) 家族。其最關鍵的結構特徵在於，分子主鏈上的醯胺鍵 (-CO-NH-) 與苯環 (Benzene Ring) 的連接位點皆位於「對位」 (Para-orientation) 上⁸。這種對位連接使得克維拉的分子鏈呈現極度剛硬的棒狀結構 (Rod-like Molecular Structures)，完全缺乏一般常規高分子(如尼龍或聚乙烯)所具有的柔性與鏈摺疊 (Chain Folding) 能力⁸。這種剛性骨架雖然賦予了材料極高的理論強度，但也使得其在常規溶劑中的溶解度極低，並無法透過傳統的熔融紡絲法進行加工，因為它在達到熔點前就會先發生熱降解⁷。

液晶紡絲工藝與微觀定向

為了解決加工難題，杜邦公司開發了獨特的液晶紡絲 (Liquid Crystalline Spinning) 解決方案。在生產過程中，聚合物被溶解於強酸(如濃硫酸)中。當溶液濃度達到一定臨界值時，這些剛性的棒狀高分子鏈會自發地平行排列，形成向列型的溶致液晶相 (Lyotropic Liquid-crystal Phase)⁸。

當這種液晶溶液在壓力驅動下通過紡絲孔 (Spinneret) 擠出時，會經歷強烈的剪切力 (Shear Forces)。在剪切場的作用下，原本在微觀區域內定向的分子疇 (Domains) 會被強制拉伸，並沿著擠出方向(即未來的纖維軸向)達到近乎完美的單向排列⁸。由於剛性分子鏈的鬆弛時間 (Relaxation Time) 極長，這種由剪切誘發的高度分子取向在溶液進入凝固浴 (Coagulation Bath) 固化為初生纖維時，幾乎被完整地保留下來⁸。

微觀上，克維拉纖維展現出高度的各向異性 (Anisotropic) 特徵。在沿著纖維軸向的縱向，極強的

共價鍵 (Covalent Bonding) 負責承受巨大的拉伸載荷, 這使得其具有極高的拉伸模量 (Tensile Modulus)¹⁰。而在橫向方向上, 相鄰的分子鏈則透過密集的氫鍵 (Hydrogen Bonding) 與范德華力 (van der Waals Forces) 結合, 形成如放射狀堆疊的氫鍵片層結構 (Radial Stacking of Hydrogen-Bonded Sheets)⁸。然而, 由於橫向僅依靠較弱的次級鍵支撐, 當纖維承受橫向壓縮應力時, 容易發生局部屈服 (Local Yielding)、彎折 (Buckling) 與纖維原纖化 (Fibrillation) 現象¹⁰。

近年來, 高分子材料學界對克維拉的紡絲技術進行了持續改良。例如, 研究人員透過將高分子量聚對苯二甲醯對苯二胺 (h-PPTA) 混入常規 PPTA 的硫酸紡絲原液中, 發現能顯著改善聚合物溶液的流變行為與可紡性, 並進一步提升了製備纖維的分子鏈取向度與機械性能¹²。此外, 科學家更成功透過液晶紡絲與溶膠-凝膠 (Sol-gel Transition) 工藝, 從溶解於二甲基亞砷 (DMSO) 中的克維拉奈米纖維 (Kevlar Nanofibers) 製造出具有不同結構取向的奈米級克維拉液晶 (NKLC) 氣凝膠纖維 (Aerogel Fibers), 為新興的隔熱與微型傳感應用打開了新的大門¹³。

物理強度與極端環境耐受性數據分析

克維拉的商業化產品中, 最主要用於工業與結構補強的分別為克維拉29 (Kevlar® 29) 與克維拉49 (Kevlar® 49)。以下透過數據整理, 精確展示其關鍵的物理與熱力學特性:

特性參數	克維拉 29 (Kevlar® 29)	克維拉 49 (Kevlar® 49)	比較對象 / 備註
纖維密度 (Density)	1.44 g/cm ³	1.44 g/cm ³	約為石棉密度的一半 ¹⁵
斷裂強度 (Breaking Strength)	76.0 lb (338 N)	59.3 lb (264 N)	五倍於同等重量鋼鐵 ¹⁵
拉伸模量 (Tensile Modulus)	10.2 × 10 ⁶ psi	16.3 × 10 ⁶ psi	顯著高於傳統合成纖維 ⁸
斷裂延伸率 (Elongation at Break)	3.6%	2.4%	反映其高剛性特質 ⁸
平衡含水率 (Equilibrium Moisture)	4.5% (Bone-dry basis)	3.5% (Bone-dry basis)	影響燃料吸收特性 ⁸
分解溫度 (Decomposition Temp.)	800–900°F (427–482°C)	800–900°F (427–482°C)	在空氣中的分解點 ⁸

從熱物理學角度分析，與尼龍 (熔點約490°F) 或高強度聚乙烯 (熔點約300°F) 等熱塑性塑料遇高溫會熔化的特性截然不同，克維拉具有「不熔滴」(No Molten Droplets) 的特質⁸。當暴露於明火中時，它不會產生高溫熔融滴落物，也不會釋放劇毒氣體。它會在溫度達到800–900°F時直接發生碳化與熱降解反應 (Thermal Decomposition)⁸。此外，克維拉具有罕見的負縱向熱膨脹係數

(Negative Longitudinal Coefficient of Thermal Expansion, 約為 -2.2 至 $-2.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$)，這意味著它在高溫下不僅不會如金屬或玻璃纖維般膨脹，反而會輕微收縮，從而確保了極端高溫下的尺寸穩定性⁸。

在化學抗性方面，克維拉對大多數常見化學品表現出卓越的惰性。在室溫下，它對於40%的醋酸、37%的鹽酸、丙酮、乙醇、機油以及沸水皆表現出極微弱甚至無影響的抵抗力⁸。然而，它並非無懈可擊。若長時間暴露於高溫下的強酸 (如10%煮沸的硫酸)、強鹼或次氯酸鈉 (Sodium Hypochlorite) 溶液中，其分子鏈仍會遭受水解破壞而嚴重降解⁸。作為一種有機芳香族聚合物，克維拉對紫外線 (UV Light) 亦相對敏感，長時間的光照會導致其發生光降解 (Photodegradation)，外觀由明黃色轉為黯淡，並伴隨機械強度的衰退。不過，克維拉具有「固有自屏蔽」(Intrinsically Self-screening) 效應，外層纖維變色後能形成一道保護屏障，有效阻擋紫外線進一步深入破壞束內或織物內層的核心纖維⁸。

火舞表演與克維拉纖維的技術共生：歷史與熱力學機制

火舞表演 (Fire Performance) 是一種將極具視覺震撼的明火元素與人類肢體藝術、雜耍 (Juggling)、棍術旋轉 (Baton Twirling)、波伊 (Poi Spinning) 以及吞火 (Fire Eating) 等技術深度結合的表演形式²。在現代火舞藝術的發展脈絡中，材料科學的介入——特別是克維拉纖維的普及——是一次將這項古老危險技藝轉化為現代流動藝術 (Flow Arts) 的決定性里程碑。

從致癌石棉到克維拉：火舞道具的材料演進史

火舞表演的起源可追溯至古代多個文明的儀式。在古印度與波里尼西亞文化中，操控火被視為淨化與控制自然元素的象徵；在中世紀歐洲，吞火者 (Fire Eaters) 成為了市集與馬戲團中不可或缺的奇觀¹⁶。然而，現代將火把作為動態舞蹈與雜耍道具的具體實踐，公認發生在1946年。當時一位名為費雷迪·雷圖里 (Freddie Letuli) 的薩摩亞裔刀舞者 (Samoan Knife Dancer)，在美國的一場共濟會大會 (Shriner's Convention) 上，靈機一動借鑒了印度吞火者的技巧，將包裹了耐火布料的刀刃浸泡於石腦油 (Naphtha Fuel) 中並點燃，從此誕生了第一把現代火刀¹⁷。

在1980年代中期之前，全球火舞道具所使用的燈蕊 (Wicks) 材料幾乎清一色依賴石棉 (Asbestos)¹⁷。石棉雖然具備極高的熔點與耐火極限，但其物理性質極為脆弱，每次道具掉落撞擊地面都會導致石棉纖維斷裂。為此，早期的道具製造商必須使用極細的金屬線將石棉緊緊纏繞加固¹⁸。更嚴峻的挑戰在於健康風險——石棉隨後被醫學界證實為致命的一級致癌物。在劇烈的揮舞與燃燒過程中，石棉會向空氣中釋放微小的致癌纖維，對表演者與觀眾的呼吸系統造成不可逆的傷害¹⁸。

1984年，總部位於美國的 Renegade Juggling 公司率先進行了材料革命，首次將杜邦公司的克維拉纖維引入火把道具的製造，徹底淘汰了致癌的石棉¹⁸。這項材料替換引發了整個表演藝術設備產業的骨牌效應。Renegade Juggling 創造了「克維拉燈蕊」(Kevlar Wick) 一詞，該詞彙迅速被業界廣泛採用並成為全球標準術語¹⁸。自此之後，由於克維拉卓越的耐磨耗性，燈蕊不再需要金屬

線進行加固,大幅降低了道具的重量並提升了安全性。這項材料的革新為1990年代末期如火人祭 (Burning Man Festival) 等大型戶外火焰藝術節的蓬勃發展,提供了最核心且安全的硬體基礎¹⁷。

火舞燈蕊的複合材料科學與編織工程

儘管業界統稱為「克維拉燈蕊」,但當代多數高階火舞道具所使用的織物,實際上並非100%的純克維拉,而是經過精密計算的複合材料與混紡織物¹⁸。純克維拉纖維雖然具有無可匹敵的耐磨性 (Abrasion Resistance) 與抗拉強度,但其本身的燃料吸收能力較弱,且其800–900°F的熱降解點在直接面對高達2200°F (約1204°C) 的去漬油 (白電油 / White Gas) 烈焰時,依然存在被快速燒毀的風險²²。

為了在「高吸水性」、「抗物理衝擊」與「耐極端高溫」這三個矛盾的物理需求間取得平衡,現代火舞燈蕊採用了複雜的複合結構:

1. **材料混紡策略 (Material Blends):** 市面上最廣泛使用的火舞標準材料被稱為 K1 混合物 (K1 Kevlar Blend)。這是一種由克維拉、諾梅克斯 (Nomex, 即間位芳綸, 耐熱極限約370°C) 以及玻璃纖維 (Fiberglass) 混紡而成的複合材料²¹。在這種複合紗線中,通常由玻璃纖維作為內芯 (Core), 而外層則由克維拉構成的鞘 (Sheath) 緊密包裹²³。設計邏輯在於:玻璃纖維的熔點極高 (超過2000°F), 遠高於克維拉的分解溫度, 這使得燈蕊即使在高溫下也能維持內部的物理骨架不崩塌;然而,玻璃纖維的耐磨性極差,若直接與地面摩擦會迅速粉碎成粉末²³。此時,外層極度堅韌的克維拉鞘便發揮了裝甲般的作用,它完美吸收了道具高速旋轉與掉落撞擊地面時的動能與磨擦力,保護了脆弱的玻璃纖維內芯²³。對於特殊應用 (如吞火火把), 製造商會提供更厚、吸水性更強的 K2 混合物,甚至在特定極端要求下提供昂貴但堅硬的純芳綸 (Puro) 產品²¹。
2. **織法設計與結構完整性 (Weave Patterns):** 燈蕊帶 (Flat Tape) 的編織工藝直接決定了道具的燃料容載量與使用壽命。業界主要依賴兩種編織技術:斜紋編織 (Twill Weave) 與十字編織 (Cross-weave)¹⁸。
 - **斜紋編織 (Twill Weave):** 被視為最優質的編織結構。其質地柔軟且具備高吸水性,非常適合用於需要複雜摺疊或立體編織造型的燈蕊 (如火流星使用的猴子拳結 Monkey Fist)。其最大工程優勢在於卓越的容錯率:即使其中一兩根紗線因為反覆的地面撞擊而磨斷,整塊斜紋布料依然能緊密咬合,不會發生災難性的解體¹⁸。
 - **十字編織 (Cross-weave):** 結構較為緊密且堅硬,這使得它具備更高的抗跌落耐磨性,非常適合用於長棍或火把末端的平捲式燈蕊 (Rolled Wicks)。然而其致命缺點在於,一旦十字網格中的某一根主纖維斷裂,很容易引發連鎖反應,導致周遭的纖維鬆脫散開¹⁸。
3. **紗線微觀工程與毛細現象 (Yarn Construction & Capillary Action):** 為了解決克維拉本身不吸水的問題,製造商如 Renegade 開發了多種紗線結構。其中,「纖維芯紡克維拉」(Fiber Core Spun Kevlar) 是最具代表性的技術。這種紗線利用極細的玻璃纖維芯作為骨幹,將克維拉紗以相對鬆散的結構纏繞其上。這種紡絲工藝使得紗線在巨觀下變得極為「蓬鬆」(Fluffy)¹⁸。在這些蓬鬆的纖維網絡之間,創造出了海量的微觀空隙。當燈蕊浸入燃料容器時,強大的毛細現象 (Capillary Action) 瞬間將大量液體燃料吸入並鎖在這些空隙中,大幅提升了燈蕊的燃料容載量 (Fuel Capacity)。這不僅確保了火舞者能擁有更長、更穩定的燃燒時間,更是在熱力學上保護纖維的關鍵機制¹⁸。

熱力學防護機制與熱降解反應的控制

當火舞者揮舞點燃的道具時，克維拉燈蕊正處於一個極端且動態的熱力學平衡系統中。雖然外部的去漬油（白電油 / White Gas）火焰溫度高達2200°F，但只要燈蕊內部仍浸潤著液體燃料，液體蒸發氣化時所需的氣化潛熱（Latent Heat of Vaporization）會不斷將表面的熱能帶走。這種被動冷卻效應使得克維拉纖維的實際承受溫度被強行壓制在其熱降解點（800–900°F）之下²³。

這解釋了為何火舞道具能夠被反覆點燃數百次而不致焚毀。然而，這個保護機制是存在極限的。當燃料即將耗盡、液體蒸發速率下降時，失去冷卻效應的燈蕊溫度會急遽攀升。一旦溫度跨越800–900°F的臨界點，克維拉分子鏈間的氫鍵與主鏈共價鍵便開始斷裂，引發不可逆的熱降解（Thermal Degradation）⁸。

在宏觀視覺上，這表現為黃色的克維拉纖維開始碳化並燒毀，逐漸暴露出內部白色的玻璃纖維芯。根據技術測試，使用去漬油 / 白電油（White Gas 或 Coleman's Liquid Camp Fuel）的標準火舞道具，通常在燃燒約4分鐘後便會開始進入破壞性的降解階段²³。這也是為何專業的火舞表演者絕不允許道具「悶燒」（Smouldering）的核心原因。當火焰逐漸微弱即將自然熄滅前，專業人員必須主動使用微濕的100%純棉毛巾（Cotton Towel）將其完全悶熄²³。這一關鍵動作能瞬間截斷高溫對克維拉的熱破壞，延長燈蕊的生命週期。一旦表面抗磨耗的黃色克維拉完全燒盡，殘留的白色玻璃纖維在下一高速撞擊地面時將會迅速瓦解粉碎，宣告該道具壽命的終結²³。

美國與澳洲的火舞安全規範與綠色永續發展

火舞表演本質上涉及對高危險性物理與化學反應的精確控制。在火舞社群極為活躍的美國與澳洲，針對火舞表演的風險管理已經演化出一套結合材料科學、消防法規與環境保護的嚴格綜合體系。

澳洲各州的消防安全法規與風險管理

在澳洲，尤其是在新南威爾斯州（NSW）、維多利亞州（VIC）與昆士蘭州（Queensland）等地，戶外表演受到極端氣候條件與市政廳規範的雙重制約。由於澳洲夏季頻繁面臨毀滅性的森林大火（Bushfires），各州消防單位在極端高溫與強風天氣下會頒布嚴格的「全面禁火令」（Total Fire Bans）²⁵。

在這些法規框架下，澳洲的專業火舞團隊被要求建立嚴密的風險管理架構。在承接大型市政活動前，表演者必須提交包含備案在內的「天氣/下雨計畫」（Rain Plan）或是因應極端氣候的「禁火令計畫」（Toban Plan）；這意味著當明火表演被依法禁止時，團隊必須具備以高流明 LED 道具無縫替代演出的技術與硬體儲備²⁶。

在表演場地（Fire Circle）的實體佈置上，安全指引強制要求必須使用 LED 燈條或明顯的繩索劃定安全參數，以防止未受過訓練的公眾與兒童誤入高危險區域²⁵。在燃料處理區（Dipping Station）的設置上，規範要求極為細緻：燃料浸泡站必須與表演區保持絕對的安全距離。若使用高閃點（High Flashpoint）燃料，安全距離至少為3公尺；若使用如去漬油等低閃點且極易揮發的燃料，安全距離則必須拉長至至少5公尺²⁵。所有的浸泡操作必須在配有安全密封蓋的金屬容器中進行。為避免旋轉過程中高溫燃料飛濺至觀眾或表演者自身（即所謂的 Overwicking 危害），在點火前必須透過用力甩動（Shake out）或離心旋轉（Spin-off）的方式，將燈蕊上過剩的燃料徹底清

除²⁴。

材料維護與服裝防火科學

道具的日常維護直接關乎表演安全。澳洲與美國的規範皆強烈建議在每次點燃前進行詳盡的五金件(鉚釘、快速扣、分離環)檢查。對於產生磨損、邊緣綻線散開的克維拉燈蕊，應使用剪刀將散亂的纖維修剪整齊，以防在高速旋轉中勾扯導致更大面積的解體²³。對於較輕微的磨損，表演者可使用專業的克維拉縫紉線進行加固縫合，或是塗抹白膠(如 Elmer's School Glue，嚴禁使用易燃的環氧樹脂)來封閉磨損處的纖維²³。此外，由於克維拉與玻璃纖維對紫外線與水分敏感，道具在非使用期間必須儲存於乾燥、通風且避開陽光直射的環境中，並在練習時使用厚襪子作為燈蕊保護套，以減少不必要的物理磨耗²³。

在表演服裝(Costumes)的選擇上，材料熱力學成為攸關生死的關鍵。由於聚酯纖維(Polyester)等合成塑料材料遇高溫會熔化並緊緊黏附於人體皮膚上，造成深度的災難性燒燙傷，澳洲安全指南嚴格禁止舞者穿著此類衣物²⁶。相反地，純天然材料如純棉(Cotton)、羊毛(Wool)、皮革(Leather)，或是軍規級的阻燃材料如諾梅克斯(Nomex)與克維拉編織服裝被強烈推薦，因為這些材料具有優異的熱穩定性與不熔滴特性，能在意外觸火時提供寶貴的反應時間²⁶。

針對一般蠟燭與明火周邊產品，美國材料與試驗協會(ASTM)近期亦更新了F2417蠟燭消防安全標準(2023年版)。該標準嚴格規範了蠟燭製作套件(Candle Making Kits)的材料安全，特別強調了燈蕊(Wick)設計的不當或偏離容器中心，可能導致局部高溫與嚴重的火災風險，這從側面印證了無論在工業表演或民生領域，燈蕊的物理穩定性與位置控制皆是防火安全的核心要素²⁸。

綠色火舞藝術與永續環保實踐

隨著全球氣候變遷與環保意識的覺醒，以消耗石化燃料為主的火舞表演也面臨著不可避免的轉型壓力。美國與澳洲的流動藝術社群正積極推動「永續火焰藝術」(Sustainable Fire Arts)的綠色實踐²⁹。

在此框架下，燃料的革新成為減碳的首要目標。傳統的煤油(Kerosene)、柴油或石腦油在燃燒時會產生大量的碳微粒、黑煙與有毒揮發性有機物(VOCs)，不僅危害表演者健康，也對環境造成負擔。環保實踐者開始倡導改用生物基燃料(Bio-based Fuels)，例如高純度乙醇(Ethanol)或經過處理的植物油(Vegetable Oil)²⁹。這些替代燃料不僅燃燒更為完全、排放的毒性氣體大幅減少，其來源也屬於可再生資源，高度符合循環經濟的理念。

此外，道具與服裝的生命週期管理也是綠色火舞的重要環節。除了推廣使用天然的大麻纖維(Hemp)或有機棉製作服裝以減少洗滌過程中微塑膠(Microplastics)的排放外，道具本身的永續性也受到重視²⁹。推廣使用可生物降解的材料(如竹子代替金屬管)製作道具握柄，並透過精確的燃料控制與極致的燈蕊維護，盡可能延長不可自然分解的克維拉燈蕊的使用壽命，皆是將碳足跡降至最低、確保這項震撼藝術能與地球環境共存的具體實踐²³。

克維拉在美國與澳洲的軍事與個人防護裝備應用進展

儘管克維拉在文化與表演領域帶來了顛覆性的影響，但其核心的商業價值與技術巔峰，無疑集中於軍事防護、航空航太與高性能載具製造。由於其極致的「強度重量比」(Strength-to-Weight Ratio)與卓越的能量吸收特性，克維拉成為了美國與澳洲國防工業鏈中不可或缺的战略級物資³⁰

。

彈道防護機制與澳洲分層身體裝甲系統 (TBAS)

自1975年首件克維拉防彈背心問世以來，複合防彈裝甲的概念被徹底改寫⁴。傳統的鋼板裝甲透過堅硬的表面強行阻擋子彈，代價是極大的重量與隨之而來的疲勞。克維拉的防彈機制則截然不同：當高速飛行的彈頭(Projectile)擊中克維拉織物時，其高強度的微觀纖維網絡能在毫秒級的極短時間內吸收彈頭的巨大動能，並將這股能量沿著纖維的軸向迅速分散至廣泛的複合矩陣中。這種能量耗散機制會迫使鉛蕊或銅披甲彈頭發生嚴重變形(通常呈現蘑菇狀擴張)，從而大幅增加其接觸面積並阻止其穿透防護層³³。

在澳洲，隸屬於國防工業供應鏈的澳洲國防服裝公司 (Australian Defence Apparel, ADA) 是全球個人防護裝備設計的領航者³⁴。在2011年，針對駐阿富汗作戰部隊所面臨的實戰需求，澳洲國防科技集團 (DST Group) 進行了深入的戰場人體工學與熱負荷 (Thermal Loading) 研究。研究指出，沉重的外部負重不僅會加速士兵疲勞，更會嚴重影響戰術動作的執行；具體而言，外部負重每增加 1 公斤，士兵在執行衝刺、跳躍或投擲手榴彈等關鍵任務時的效能便會平均下降 1%³⁶。

為解決舊款模組化作戰防彈系統 (MCBAS) 過於笨重且限制機動性的問題，ADA 協助澳洲國防軍 (ADF) 推出了革命性的「分層身體裝甲系統」(Tiered Body Armour System, TBAS)³⁷。該系統大量整合了包含克維拉在內的輕量化防彈材料，並結合了 Crye Precision 開發的多地形迷彩 (Multi-Cam) 技術³⁸。TBAS 的設計哲學在於允許指揮官根據任務的威脅等級，在「被動防護」(高防彈等級與大覆蓋面積)與「主動防護」(輕量化帶來的卓越士兵機動性)之間進行動態且模組化的調整配置³⁶。

執法單位的次世代防護創新: ENFORCR 與 DFNDR 系統

近年來，ADA 透過其內部的創新研發小組，針對執法單位面臨的高壓挑戰，推出了 ENFORCR® H.A.L.O. (Highly Adaptable, Load-Optimised) 戰術載具系統³⁵。這套裝甲系統憑藉其突破性的設計，榮獲了澳洲優良設計獎 (Australian Good Design Award) 以及 2025 年 NAUMD 創新安全獎³⁵。

ENFORCR H.A.L.O. 系統的成功在於其完美融合了材料科學與人因工程設計。該系統採用了模組化架構 (Modular Architecture)，結合輕量化的克維拉軟式防彈內蕊與硬質陶瓷裝甲板，在不犧牲防禦力的前提下達到了極致的低輪廓 (Low-profile) 隱蔽設計，確保警務人員在狹小空間內的戰術靈活性³⁹。更具巧思的是，該系統整合了微氣候調節墊 (Microclimate-Regulating Padding)，利用先進布料控制體溫，有效減輕了巡邏人員在長時間高溫勤務下的熱衰竭與物理疲勞風險³⁹。此外，ADA 也在布里斯本舉辦的陸軍展覽 (Land Forces Expo) 上，正式發表了新一代的 DFNDR® 軍用防彈與負重系統，並展示了整合動力外骨骼 (Exoskeleton) 與適應性偽裝技術 (Adaptive Camouflage) 的未來士兵概念，進一步推升了21世紀戰場的生存率⁴⁰。

航太工程、極端環境與高超音速領域之尖端進展

航太工業對於結構材料的「強度重量比」(Strength-to-Weight Ratio) 與抗極端環境衝擊能力有著最嚴苛的要求。在此領域，克維拉及其衍生複合材料被廣泛應用於對抗太空碎片、抵禦強烈輻射

以及承受火箭發射時的劇烈載荷³⁰。

國際太空站與微流星體防護

在低地球軌道 (LEO) 的惡劣環境中, 太空飛行器面臨著微流星體 (Meteoroids) 與人造太空垃圾 (Space Debris) 以超高速撞擊的毀滅性威脅。在由歐洲太空總署 (ESA) 建造、作為國際太空站 (ISS) 核心設施之一的哥倫布實驗艙 (Columbus Laboratory) 中, 義大利泰雷茲阿萊尼亞宇航公司 (TAS-I) 便將克維拉芳綸纖維與鋁合金、陶瓷材料深度整合, 構建了複雜的碎片屏蔽系統 (Debris Shielding Systems), 成功確保了太空人的生命安全⁴²。

此外, 在探索透過太空繩索 (Orbiting Tethers) 連接兩台軌道飛行器的前瞻計畫中, 美國太空總署 (NASA) 挑選了兩種化學結構相近的芳綸纖維作為核心載重與防護材料。該繩索的承載主幹是由極度強韌的克維拉 29 (Kevlar 29, 聚對苯二甲醯對苯二胺) 編織成圓柱形護套所構成; 而最外層的防護外套則採用了杜邦的諾梅克斯 (Nomex, 聚間苯二甲醯間苯二胺)⁴³。為了確保這些有機材料能夠在嚴苛的太空中存活, NASA 的研究團隊在商業灰化設備中模擬了由射頻放電產生的原子氧 (Atomic Oxygen) 強氧化環境, 並結合高功率氙弧燈 (Xenon-arc Lamp) 進行強烈紫外線輻射測試。透過質譜儀監測質量流失與紅外線光譜分析化學結構變化, 這些嚴格的數據為芳綸材料的太空耐用度提供了堅實的科學基礎⁴³。

澳洲本土太空產業的崛起與先進製造

澳洲太空總署 (Australian Space Agency) 正積極推動本土航太產業鏈的戰略升級, 目標是在未來十年內創造兩萬個就業機會, 並將民間太空經濟規模從 39 億澳元大幅推升至 120 億澳元⁴⁴。

為實現此願景, 澳洲本土先進製造企業 XTEK 發揮了關鍵的推動作用。2019年, XTEK 與澳洲太空總署簽署了戰略意向書, 宣佈將其原本應用於國防裝甲的輕量化複合材料技術轉向太空應用⁴⁴。XTEK 運用其獲得全球專利的 XTclave™ 複合材料成型技術, 結合克維拉等高性能纖維, 為新一代衛星結構 (Satellite Structures)、發射平台硬體 (Launcher Platform Hardware) 與部署系統提供解決方案⁴⁴。XTclave™ 技術不僅能生產出毫無孔隙的極致緻密複合元件, 更能透過澳洲本土的設計與測試平台, 針對火箭升空時複雜的應力負載 (Complex Load Cases) 進行精確的虛擬建模與硬體驗證, 確保零件能夠承受深空的極端摧殘⁴⁴。

與此同時, 澳洲的科技創新正全面開花結果。從 RSOC 的國家任務控制中心、Advanced Navigation 的 LUNA 登月雷射測速儀, 到 Conflux 的 3D 列印火箭引擎熱交換器, 澳洲正在建立全方位的太空自主研發能力⁴⁵。在軍事航太通訊領域, 澳洲波音國防公司 (Boeing Defence Australia, BDA) 作為澳洲國防軍 (ADF) 最重要的合作夥伴, 不僅負責維持 E-7A 楔尾鷹 (Wedgetail)、F/A-18F 超級大黃蜂 (Super Hornet)、EA-18G 咆哮者 (Growler) 與 C-17A 全球霸王 (Globemaster) 等先進軍機的機隊妥善率⁴⁶, 近期更研發出重量僅 3.3 公斤的微型快速戰術路由器 (Rapid Tactical Router, RAPTR)。相較於舊有高達八倍重量的整合戰場電信網絡 (I-BTN) 設備, RAPTR 的體積縮小至可放入背包的運輸箱中, 這類要求極致輕量化且需承受崎嶇地形強烈震動的軍用精密外殼與內部結構件, 亦高度依賴包含芳綸在內的複合材料保護, 大幅提升了單兵的部署靈活性與通訊安全性⁴⁸。

此外, 克維拉不僅用於硬體結構, 更被延伸應用於保護人體的未來太空衣開發。由澳洲 Human Aerospace 公司主導, 結合 RMIT 大學、NASA 與麻省理工學院 (MIT) 的跨國合作計畫, 正致力

於開發具備物理加壓功能的艙內活動緊身服 (IVA Skinsuit)⁵⁰。由於微重力環境會導致太空人每月流失高達 2% 的骨質密度並引發嚴重的肌肉萎縮，這款利用先進合成纖維編織技術製造的緊身太空衣，能精確模擬地球重力對人體骨骼與肌肉的物理負載。該技術已在國際太空站上成功進行了兩次實際部署與測試，成為抵抗太空骨質流失的關鍵醫學防護對策⁵⁰。

高超音速 (Hypersonics) 的極限挑戰

在更前沿的航空工程領域—高超音速 (Hypersonics) 載具的研發中，材料必須能夠承受突破大氣層時產生的劇烈熱摩擦。澳洲昆士蘭大學 (University of Queensland) 的研究團隊目前正與先進複合材料企業 ACS-A 合作，投入 150 萬美元開發能夠承受高達 8 馬赫 (Mach 8, 約每小時 9800 公里) 摩擦高溫的超高溫複合材料 (Ultra-high Temperature Composites) 及其對應的超音速燃燒衝壓發動機 (Scramjet) 結構⁵¹。

傳統的高性能飛機部件，例如機翼翼盒 (Wing Boxes)、控制面、引擎艙室 (Engine Nacelles) 與引擎防爆包覆環 (Containment Rings)，經常使用由克維拉或諾梅克斯構成的蜂巢核心結構 (Honeycomb Core Structures)⁵³。研究指出，相較於容易受電偶腐蝕 (Galvanic Corrosion) 影響且重量較重的傳統鋁製核心，芳綸蜂巢結構在提供更輕盈重量的同時，依然能維持驚人的抗扭轉強度⁵³。在高超音速載具的高溫環境挑戰中，克維拉及其衍生物結合先進陶瓷基體的複合應用潛力正被進一步挖掘，為未來的次軌道飛行器提供必要的熱屏蔽與結構補強解決方案⁵¹。

汽車工業、水上高性能載具與綜合經濟效益評估

克維拉最初的研發初衷—用以取代賽車輪胎中的沉重鋼絲—時至今日仍持續在汽車工業與高性能運輸載具中發揮著巨大的影響力¹。其高拉伸模量與防穿刺特性，使得車輛在大幅減輕簧下重量 (Unsprung Mass) 的同時，依然能維持極佳的高速操控性與破胎安全性³⁰。

在澳洲賽車運動的巔峰殿堂—超級房車錦標賽 (Supercars Championship) 領域，歷史悠久的老牌車隊 Garry Rogers Motorsport 便展現了將先進材料與數位製造結合的最佳範例⁵⁴。該車隊的工程師利用計算流體力學 (CFD) 軟體測試空氣動力學，並透過引進先進的工業級 3D 列印機，將碳纖維與克維拉複合材料直接應用於低產量、幾何極度複雜的定制空力套件與方向盤手柄的生產。這不僅取代了耗時昂貴的第三方 CNC 加工與傳統橡膠射出成型，更極大地縮短了零件從研發到上場比賽的週期，賦予了車隊在賽道與維修站中難以比擬的競爭優勢⁵⁴。

此外，由澳洲本土汽車製造商 Brabham Automotive 於阿德萊德 (Adelaide) 組裝生產的中置引擎賽道超跑 Brabham BT62，全車重量僅驚人的 972 公斤，卻能爆發出超過 700 匹的馬力⁵⁵。其極致的輕量化車體與極具侵略性的空氣動力外殼，亦高度仰賴大量包含碳纖維與芳綸在內的高級複合纖維網絡支撐⁵⁵。事實上，這種對輕量化的極致追求在澳洲早有淵源：早在 1981 年，由澳洲工程師 Trefry 與 Hadley 兄弟開發的 Triad 概念跑車原型，就已前衛地採用了克維拉車身外殼 (Kevlar-bodied) 設計，並獲得了傳奇賽車手傑克·布拉漢姆 (Jack Brabham) 的親自測試與讚賞，展現了澳洲汽車工業對新興複合材料的敏銳嗅覺⁵⁶。

在水上載具方面，克維拉優異的抗衝擊與吸震特性，為高速船舶帶來了顛覆性的改變。澳洲著名的雙體船製造商 Kevlacat Power Boats Australia，顧名思義，便是以克維拉增強型先進複合材料打造船體聞名⁵⁷。相比於傳統的純玻璃鋼 (Fiberglass)，克維拉層壓板在達到相同防護強度的前

提下, 重量可減少達 50%, 並且具備三倍於鋼鐵的抗反覆衝擊韌性¹⁵。這使得 Kevlacat 的船隻能夠配備馬力較小的引擎卻依然維持高速航行, 從而獲得最佳的燃油經濟性與拖曳便利性; 同時, 船體內部結合了多個密封艙與可選的發泡填充物, 達成了幾乎「永不沉沒」(Virtually Unsinkable) 的極致安全承諾⁵⁷。

在極限帆船競速領域, 自 1892 年起源於澳洲雪梨港 (Sydney Harbour) 的 18 呎帆船 (18ft Skiff) 級別, 被公認為全球速度最快、操作難度最高的非水翼單體帆船⁵⁸。為了承受龐大風帆 (順風球帆面積可達 73 平方公尺) 帶來的巨大張力, 並將長達 8.9 公尺的船體重量極限壓縮在 74 公斤以內, 現代 18 呎帆船的船體與桅杆結構廣泛採用了克維拉、碳纖維與 Divinycell 高密度泡沫芯材構成的三明治複合結構⁵⁸。造船工程師在施工中需克服克維拉在樹脂中極難打磨 (容易產生毛糙的纖維團) 的工藝挑戰, 利用其絕佳的抗拉伸特性與碳纖維的高剛性進行互補, 確保了船隻在全球頂尖賽事中的爆發力與抗扭轉剛性⁶⁰。而專注於澳洲本土市場的複合材料供應商 Ironbark Composites, 便扮演著為整個大洋洲至亞洲的賽車與賽船產業穩定供應這些特種芳綸與碳纖維樹脂的關鍵角色⁶¹。

在綜合經濟效益的評估上, 克維拉展現出了極高的性價比。根據航空工程領域的材料成本效能分析, 克維拉 49 (Kevlar 49) 被定位為中等成本區間的先進材料, 遠低於極度昂貴的硼纖維 (Boron Fiber, 硼纖維的實際成本高達圖表呈現的十倍)⁷。研究指出, 在許多嚴苛的航空應用場景中 (例如洛克希德 L-1011 客機的機翼與機身整流罩), 將硼纖維與克維拉 49 混合使用的聚酯複合材料, 能在「單位拉伸性能成本」上達到最佳化; 而硼纖維與克維拉 49 的聚醯亞胺複合材料, 則在「單位壓縮與彎曲性能成本」上提供了無可匹敵的最佳經濟表現⁷。這種在性能與製造成本之間取得完美平衡的能力, 正是克維拉能持續主導全球高階工業市場的商業核心。

結論

回顧克維拉纖維 (Kevlar) 自 1965 年以來的發展史, 從杜邦實驗室中史蒂芬妮·克沃勒克 (Stephanie Kwolek) 手中的一杯混濁液晶聚合物溶液, 到現今遍佈全球各個極端環境、拯救無數生命的高科技防護裝甲, 其演進軌跡完美詮釋了材料化學如何推動人類文明的多維度突破。

在火舞表演 (Fire Performance) 這一充滿視覺張力與高度危險性的次文化藝術中, 克維拉纖維的介入具有不可磨滅的歷史意義。它不僅徹底淘汰了致命的致癌物石棉, 保護了無數表演者與觀眾的健康, 其獨特的高磨耗裝甲特性與極致的耐熱分解溫度, 結合了玻璃纖維內芯的耐高溫骨架與特殊的毛細紡絲學, 催生了現代流動藝術 (Flow Arts) 繁複多變的雜耍技巧與大型火焰藝術節的興起。表演者對於燃料閃點的控制、潛熱蒸發效應的運用以及纖維熱降解臨界點的精準掌握, 實質上是一場以人體與烈焰為媒介的高分子熱力學展演。

與此同時, 美國與澳洲在克維拉先進工業應用上的持續深耕, 更彰顯了此材料無可取代的戰略地位。從保障澳洲執法人員與軍人生存率的 TBAS 與 ENFORCR H.A.L.O 戰術裝甲系統, 到探索宇宙深淵的 NASA 軌道繩索、XTEK 衛星複合結構件與 Human Aerospace 的抗骨質流失加壓太空衣, 乃至於追求物理極限的高超音速發動機、超級房車與克維拉極限雙體船; 聚對苯二甲醯對苯二胺 (Para-aramid) 堅韌的分子間氫鍵與剛性共價骨架, 不斷在物理學的邊界上支撐著人類對於速度、生存與未知的野心。

展望未來, 隨著納米技術 (Nanotechnology) 的介入、液晶紡絲工藝的精煉 (如奈米級克維拉氣凝膠的誕生), 以及對生物基替代燃料與永續循環經濟的重視, 克維拉複合材料必將在極端氣候防

護、深空探索、精密數位製造，以及更安全、更符合環保意識的絢麗火焰表演中，繼續延續其無堅不摧的傳奇。

引用的著作

1. Kevlar - Wikipedia, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://en.wikipedia.org/wiki/Kevlar>
2. Fire performance - Wikipedia, 檢索日期:4月 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Fire_performance
3. Stephanie L. Kwolek | Science History Institute, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/stephanie-l-kwolek/>
4. Stephanie L. Kwolek - National Women's Hall of Fame, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.womenofthehall.org/inductee/stephanie-l-kwolek/>
5. Innovative Lives: Stephanie Kwolek and Kevlar®, The Wonder Fiber | Lemelson, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://invention.si.edu/invention-stories/innovative-lives-stephanie-kwolek-and-kevlarr-wonder-fiber>
6. Stephanie Kwolek - American Chemical Society, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.acs.org/education/whatischemistry/women-scientists/stephanie-kwolek.html>
7. Use of KEVLAR® 49 in Aircraft Components - Canadian Center of Science and Education, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://ccsenet.org/journal/index.php/emr/article/download/0/0/36942/37275>
8. Kevlar® Aramid Fiber Technical Guide - DuPont, 檢索日期:4月 23, 2026, https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/safety/public/documents/en/Kevlar_Technical_Guide_0319.pdf
9. KEVLAR® PARA-ARAMID - FIBER-LINE®, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.fiber-line.com/uploads/pdf%20US/fl.us.datasheet-kevlar-para-aramid.pdf>
10. Kevlar — Michigan Materials Science and Engineering, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://mse.engin.umich.edu/internal/demos/kevlar>
11. Shear-enhanced liquid-crystal spinning of conjugated polymer fibers - Oxford Academic, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://academic.oup.com/nsr/advance-article/doi/10.1093/nsr/nwaf331/8233678>
12. Effect of High Molecular Weight PPTA on Liquid Crystalline Phase and Spinning Process of Aramid Fibers - MDPI, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/5/1206>
13. Nanoscale Kevlar Liquid Crystal Aerogel Fibers - PMC - NIH, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9527790/>
14. Nanoscale Kevlar Liquid Crystal Aerogel Fibers | ACS Nano - ACS Publications, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsnano.2c06591>
15. Functional properties and industrial USES of kevlar fibers - Nomex Felt, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://www.nomexfelt.com/list-news/functional-properties-kevlar-fibers/>
16. The Art of Fire Eating: Techniques and Safety | FireGuy, 檢索日期:4月 23, 2026, <https://fireguyshow.com/the-art-of-fire-eating-techniques-and-safety/>

17. Dancing With Fire | DrexFactor Poi, 檢索日期:4月 23, 2026,
https://drexfactor.com/weirdscience/2016/03/27/dancing_fire
18. How to Select and Use Kevlar Fire Wicks - Renegade Juggling, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://renegadejuggling.com/blogs/juggling-guides-tips/how-to-select-and-use-kevlar-fire-wicks>
19. Kevlar (100%) Flat Wick - Renegade Juggling, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://renegadejuggling.com/collections/kevlar-100-flat-wick>
20. All Fire Dance - Renegade Juggling, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://renegadejuggling.com/collections/all-fire-dance>
21. The Wonderful World of Wicks - Fire and Flow NZ, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://fireandflow.co.nz/blogs/resources/the-wonderful-world-of-wicks>
22. Kevlar: Structure, Properties, and Uses | PDF | Materials | Chemistry - Scribd, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://www.scribd.com/document/223304188/Kevlar>
23. The Science Behind Wicking - Dark Monk, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://dark-monk.com/Article/About-Kevlar-Wicking>
24. Fire Safety Guidelines - Threeworlds Australia, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://www.threeworlds.com.au/pages/fire-safety-guidelines>
25. Fire Safety by Jessy Spin, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://jessyspin.com/wp-content/uploads/A-Guide-to-Spinning-Fire-Safely-Fire-Safety-by-Jessy-Spin.pdf>
26. FIRE safety for dancers - TIPS AND RESOURCES - Ifritah, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://ifritah.com.au/fire-safety-for-dancers-tips-and-resources/>
27. Wick Care and Fire Safety Guide - Fire and Flow NZ, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://fireandflow.co.nz/pages/wick-care-fire-safety-guide>
28. Fire Safety for Candles standard, (ASTM F2417) was updated to 2023 version - SGS, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://www.sgs.com/en-au/news/2023/09/safeguards-11923-fire-safety-for-candles-standard-was-updated-to-2023-version>
29. Eco-Friendly Fire Performances: Green Practices - Hestia Fire Dance, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://hestiafiredance.com/eco-friendly-fire-performances-green-practices/>
30. Kevlar: History, Structure, Properties, and Applications - ERIC KIM, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://erickimphotography.com/kevlar-history-structure-properties-and-applications/>
31. Kevlar: The Future of Durable, Lightweight Armor Solutions - PatSnap Eureka, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://eureka.patsnap.com/report-kevlar-the-future-of-durable-lightweight-armor-solutions>
32. Common Applications of Kevlar - Smartech International, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://smartechonline.com/resources/what-is-kevlar-used-for/>
33. Kevlar's Impact on Modern Automotive Safety Features - PatSnap Eureka, 檢索日期:4月 23, 2026,
<https://eureka.patsnap.com/report-kevlar-s-impact-on-modern-automotive-safety-f>

[eatures](#)

34. Australian Defence Apparel - ADA Australia | Total Apparel Management, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ada.com.au/>
35. ENFORCR by Australian Defence Apparel, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://enforcr.ada.com.au/>
36. The effect of a tiered body armour system on soldier physical mobility, 檢索日期: 4月 23, 2026, https://ro.uow.edu.au/articles/report/The_effect_of_a_tiered_body_armour_system_on_soldier_physical_mobility/27701508
37. Tiered Body Armour System | DST - Defence Science and Technology, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.dst.defence.gov.au/projects/tiered-body-armour-system>
38. ADF Force Protection: 'Diggerworks' - out-thinking the enemy | ADM September 2011 - Australian Defence Magazine, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.australiandefence.com.au/archive/adf-force-protection-diggerworks-out-thinking-the-enemy-adm-september-2011>
39. The ENFORCR® H.A.L.O. Wins 2025 NAUMD Innovation Award for Safety - ADA, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ada.com.au/news/the-enforcr-h-a-l-o-wins-2025-naumd-innovation-award-for-safety/>
40. Australian Defence Apparel (ADA) Unveils DFNDR®: The Next Generation of Military Body Armour and Load Carriage Systems, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ada.com.au/news/australian-defence-apparel-ada-unveils-dfndr-the-next-generation-of-military-body-armour-and-load-carriage-systems/>
41. The future soldier reimagined through human-centred design. - ADA, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ada.com.au/news/the-future-soldier-reimagined-through-human-centred-design/>
42. SPACE ENVIRONMENT CHARACTERISATION OF KEVLAR : GOOD FOR BULLETS, DEBRIS AND RADIATION TOO, 檢索日期: 4月 23, 2026, http://esmat.esa.int/Materials_News/ISME09/pdf/3-Ground/S3%20-%20Destefanis.pdf
43. The effects of the space environment on two aramid materials - NASA Technical Reports Server (NTRS), 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19910004011>
44. Building the components of a vibrant space industry | Australian ..., 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.space.gov.au/news-and-media/building-components-vibrant-space-industry>
45. Industry Showcase: Case Studies | Australian Space Agency, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.space.gov.au/case-studies>
46. Boeing Defence Australia, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.boeing.com.au/about-boeing-in-australia/subsidiaries/boeing-defence-australia>
47. Boeing Defence Australia Receives Military Production Organisation Authority, 檢索日期: 4月 23, 2026,

- <https://www.boeing.com.au/news/2024/boeing-defence-australia-receives-military-production-organisation-authority>
48. Boeing Innovation Connects Aus Army Using Backpack-Sized Kit, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.boeing.com.au/news/2024/boeing-innovation-connects-australian-army-using-backpack-sized-kit>
 49. Boeing technology to power AIR6500 communications - Australia News Releases, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://lockheedmartinau.mediaroom.com/index.php?s=2429&item=122674>
 50. Spacesuits for preserving human health | Australian Space Agency, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.space.gov.au/news-and-media/spacesuits-preserving-human-health>
 51. Composite materials designed for hypersonic flight - The American Ceramic Society, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://ceramics.org/ceramic-tech-today/composite-materials-designed-for-hypersonic-flight/>
 52. Advanced Composite Structures Australia is investing in Ultra-High Temperature Composites manufacturing for Hypersonic and Space Structures - Advanced Composite Structures Australia | ACS-A | Melbourne, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://acs-aus.com/news/acs-australia-is-investing-in-ultra-high-temperature-composites-manufacturing-for-hypersonic-and-space-structures/>
 53. Aramid Fiber-Reinforced Plastics (AFRPs) in Aerospace: A Review of Recent Advancements and Future Perspectives - PMC, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12389889/>
 54. Garry Rogers Motorsport - Markforged, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://markforged.com/resources/case-studies/garry-rogers-motorsport>
 55. Brabham BT62 - Wikipedia, 檢索日期: 4月 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/Brabham_BT62
 56. Triad surfaces - Australian MUSCLE CAR Magazine, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.musclemag.com.au/feature/triad-surfaces-604660>
 57. Kevlacat: Home, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.kevlacat.com.au/>
 58. 18ft Skiff - Wikipedia, 檢索日期: 4月 23, 2026, https://en.wikipedia.org/wiki/18ft_Skiff
 59. Kevlar Hulls - General Yachting Discussion | YachtForums: We Know Big Boats!, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.yachtforums.com/threads/kevlar-hulls.33985/>
 60. Kevlar vs Fiber Glass - Boat Design Net, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.boatdesign.net/threads/kevlar-vs-fiber-glass.67397/>
 61. Racing car composite materials Australia - Ironbark Composites, 檢索日期: 4月 23, 2026, <https://www.ironbarkcomposites.com.au/industries/racing-cars>