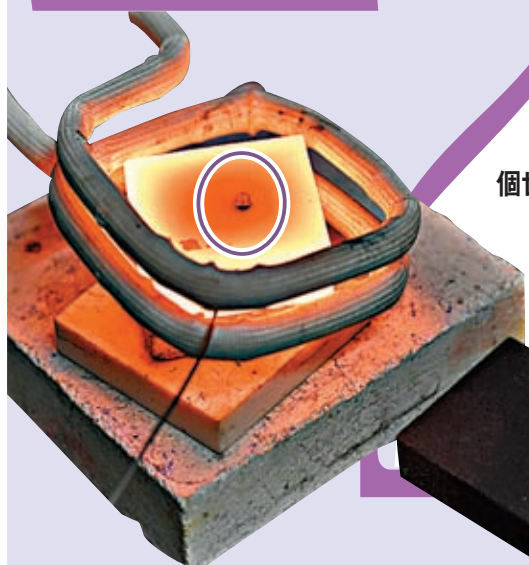


1756-2022 世紀謎團

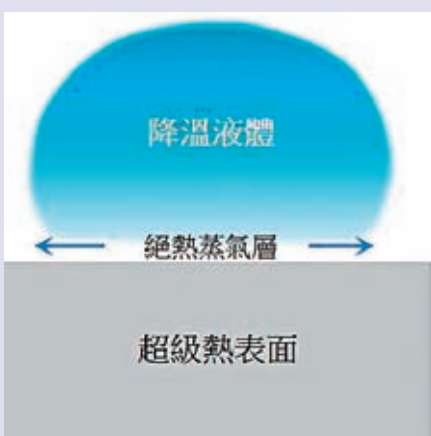
人類文明不斷進步，在過去千百年間，在不同科學領域上均取得重大突破。然而，在大自然無盡奧妙面前，縱使一代代科學家傾畢生之力，仍始終遺下不少難以完全解釋的謎題與現象，要待後來者在知識探索的跑道上接棒，帶來突破。

當前，全球迎來科技熱潮，佔地雖小但具備深厚科研實力的香港，近年先後有多名科研人員以其科學素養與創新靈感，成功拆解困擾科學界數以百年計的艱深問題，在科學發展的長河中創出驚人成就。香港文匯報帶領讀者跟隨香港科學家走進材料熱能、天文宇宙、流體介面的世界，了解他們如何發揮「香港智慧」，破解及進一步探索一個又一個世紀科學謎團。



▲受「萊頓弗羅斯特效應」的影響，燒紅了的超高溫表面上的水珠（紫圈示）被蒸氣層阻隔傳熱，完好無損地在表面懸浮滾動。

城大片段截圖



◆「萊頓弗羅斯特效應」基本原理

可取代氣體冷卻 有效避免核事故

結構熱裝甲的研發意義重大且影響深遠。王鑽開指出，隨著國家在晶片、核反應堆及航空航天飛行器等高精尖端設備的不斷發展，高效散熱成為這些高端設備是否能夠穩定發揮性能的重要因素。目前，由於「萊頓弗羅斯特效應」的緣故，航空及航天引擎、新一代核反應堆及超高溫器件等在超高溫下進行熱能冷卻，大多是採用了低效的氣體冷卻而非高效的液體冷卻。其團隊這次的技術突破，有望取代目前主流但是散熱效率低的氣體冷卻方式，將高效的液體冷卻應用於包括核反應堆等的設施，期望能夠避免核事故發生。

王鑽開形容，今次研究成果是表界面科學、流體動力學、熱能、材料科學、物理學、能源及工程學等跨領域的集成創新，打破固有傳熱設計思想和結構體系，成功從基本原理、設計和材料上進行顛覆性創新，除了發展出新型的超高溫超潤結核，能夠從根本上改變固、液、氣三相界面之間的交互作用，從而實現高效的能量轉換，更能徹底抑制「萊頓弗羅斯特效應」，「將超高溫環境下高效液體冷卻的不可能轉化為可能，是史無前例的成果。」

可裝配各種高精尖設備

除了方方正正的表面，王鑽開還提到，結構熱裝甲也可以被製成可變形、輕量及廣譜適用的柔性體系，能堅固裝配在各種形狀的高溫結構表面，例如柱面核燃料棒、國防武器、曲面航空及航天發動機高溫部件等高精尖設備，使它們在超高溫的環境下依然能實現液體的超潤現象，抑制「萊頓弗羅斯特效應」，從而逼近液冷換熱極限，同時在廣譜溫度區域仍然能夠發揮穩定、高效且可控的散熱性能，具有巨大實際應用價值。

熱裝甲散熱破百載難題

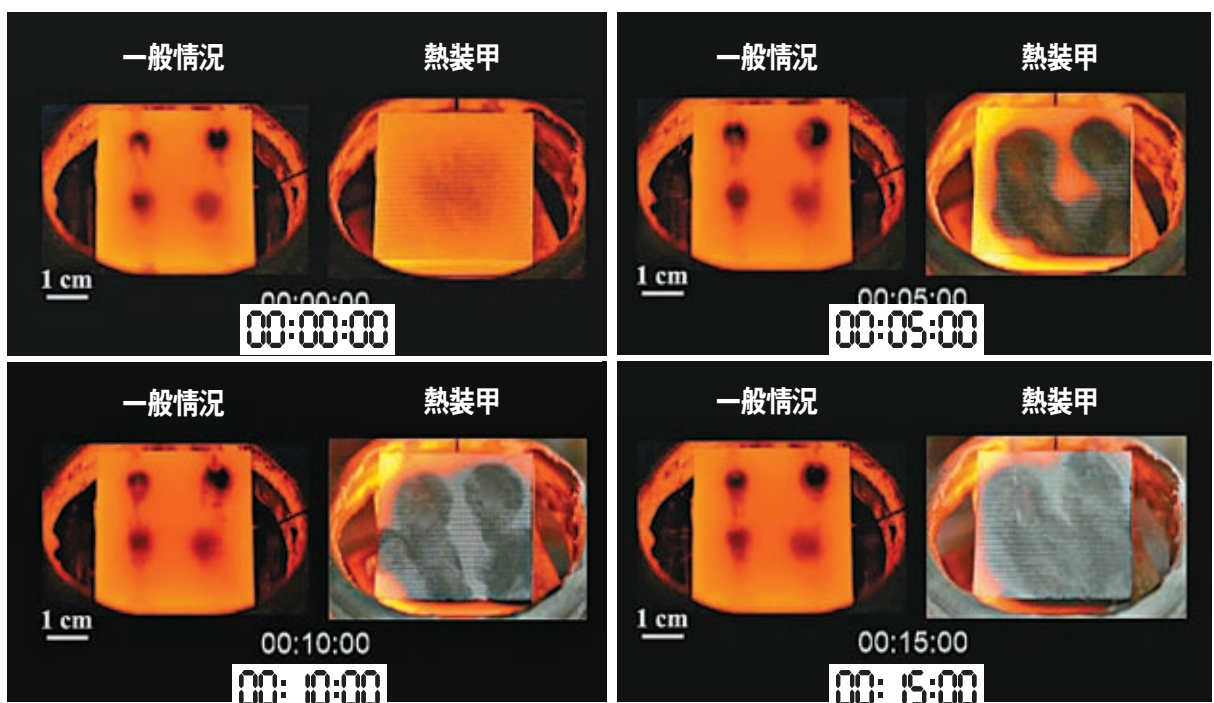
瞬間帶走熱能 液體冷卻應用溫度有效提升至逾千二度



◆王鑽開（左三）與研究團隊研發結構熱裝甲，破解因為「萊頓弗羅斯特效應」而帶來的液體冷卻失效難題。

有沒有想過，一滴未被蒸發掉的水珠，竟然可以成為引起核電廠爆炸的「元兇」？這是因為，當液體接觸到溫度遠超其沸點的固體表面時，會在瞬間出現「萊頓弗羅斯特效應（Leidenfrost Effect）」，阻礙水接觸高溫表面並大幅降低其冷卻效能，有機會導致核反應堆過熱從而產生爆炸。事實上，這個現象亦嚴重威脅各項涉及超高溫冷卻的工業生產流程。面對這個有逾260年歷史、切身卻又難纏的科學難題，香港理工大學協理副校長（研究及創新）及機械工程學系講座教授王鑽開領導的研究團隊，成功研發出結構熱裝甲，藉快速引導水分吸熱蒸發同時疏導排出蒸氣，有效將液體冷卻的應用溫度大幅提升至1,200°C以上，為需要在超高溫環境下進行高效液體冷卻的領域及行業帶來佳音。本集讓我們一窺究竟，了解其熱裝甲如何突破被視為「不可能」的界限，破解困擾物理學界逾兩世紀的科學謎題。

◆香港文匯報記者 鍾健文



◆研究團隊向1,000°C的超高溫表面持續滴水，受「萊頓弗羅斯特效應」影響，冷卻效能大幅下降；配備熱裝甲後，水滴能快速吸熱蒸發幫助降溫。各圖分別為開始滴水0秒、5秒、10秒及15秒情況。

《自然》片段截圖

水，是人類社會最重要的冷卻劑，一塊高溫燒紅了的鐵放進水中，「滋」一聲就會快速降溫。不過，有關的冷卻方式原來面對着重大局限。日常生活中，如把水珠滴在稍過其沸點（100°C）的滾燙熱鍋上，水珠會迅速沸騰及蒸發，但若熱鍋的溫度過高，遠超水的沸點，如達到350°C以上，剛滴下的水珠與熱鍋的超高溫表面之間會瞬間產生絕熱（thermal insulating）的蒸氣層，令水珠完好無損地在熱鍋表面懸浮並四處滾動，同時會因為阻斷固液接觸（liquid-solid contact）而顯著降低傳熱效能，甚至令液體對高溫表面的冷卻失效。

1756年，德國醫生約翰·戈特洛布·萊頓弗羅斯特首次詳細描述有關物理現象，亦因此而被稱為「萊頓弗羅斯特效應」。這個冷卻失效的問題，在過去266年來一直困擾科學界。今年，王鑽開團隊的創新發明，終於成功將之破解。

王鑽開在接受香港文匯報專訪時介紹，其團隊建構了一種由多層物料複合而成的結構熱裝甲（structured thermal armour），整體由貫穿和具高導熱性的鋼柱體支撐以作快速傳熱，而中層嵌有以納米二氧化矽纖維製成的超親水絕熱多孔薄膜，可以抵受1,200°C高溫，以快速吸收水分至鋼柱受熱蒸發，在底層由薄膜與鋼柱體構成的U型通道則用作

及時排出蒸氣。

他將熱裝甲散熱原理比喻為疏導交通：「這就像把人群集中起來，然後經地鐵送走，既能夠保障地面交通暢順（吸液體帶走熱能），又可以有效把人群（蒸氣）經地下管道傳送，完全解決了地面和地下的交通擠塞（傳熱散熱效能極低）問題。」

王鑽開進一步解釋，結構熱裝甲所使用的物料，彼此具有相反的熱學特性及多層級摺疊結構，巧妙地實現了無阻礙的快速熱傳導，透過蒸發將液體中的熱能散走，加上液體在極端高溫下也發生一般不會出現的超潤（superwetting）現象，可完全被薄膜所吸收，從而蒸發。

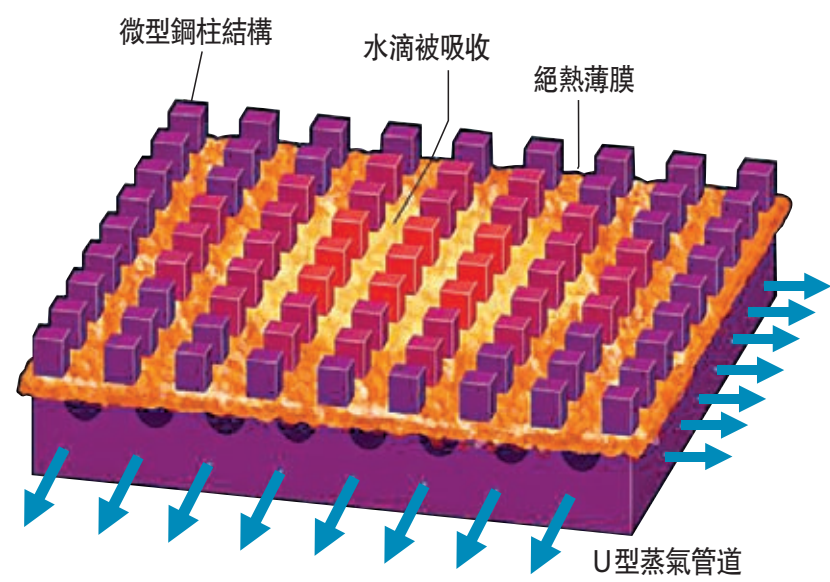
他續說，是次研究發現，即使在1,200°C極端高溫下（理論上沒有上限，取決於材料的耐熱極限），結構熱裝甲仍能完全抑制「萊頓弗羅斯特效應」，同時保持高效、可控的冷卻性能。

水珠蒸發僅需0.33秒

王鑽開的團隊又進行了對照實驗，把水珠分別滴在同樣達1,000°C的結構熱裝甲及無薄膜或無管道的結構樣本上，結果顯示，水珠落在既有薄膜又有管道的結構熱裝甲表面後，將完全被薄膜吸收並於0.33秒內蒸發，而水珠蒸發的所需時間比落在無薄膜或無管道的樣本表面上快約50倍，說明熱能可以迅速被帶走，讓表面極速冷卻。

王鑽開在今年11月加入理大，有關研究為他任職香港城市大學時完成，由他與法國和內地的學者共同領導，城大兩名研究人員為第一作者，今年較早時在權威學術期刊《自然》發表，廣受國際關注。

熱裝甲基本結構及運作原理



勿搞「大而全」 打造自己品牌

國家「十四五」規劃大力支持香港建設國際創新科技中心，王鑽開對此感受頗深。他直言，自己學歷和教育背景都很普通，在美國讀博士期間也曾多番遇到挫折，至今所獲得的成果已遠超自己的能力範圍，「但是能夠取得這些突破，都是因為在香港這片土地，是香港讓我成長起來的。」王鑽開說，自由與開放的學術風氣和人員交往，是香港創科發展優勢所在，例如無論是與內地和海外學術交流都很方便，有助激盪出創新思維。同時，香港的大學

為科研人員提供相當高且穩定的收入，讓他們可以靜下心來研究，「那樣的話就沒有太多煩惱或擔憂，也沒有經濟上的壓力，可以百分之百全心全意投入到科研。學術界之間的交流也不存在障礙，這（香港）是一個很好的地方。」他指出，雖然香港於土地甚至實驗設備等資源都相對較稀缺，但自己為例，這種緊湊亦可以成為動力：科研更多靠的是思想、想法，並不是說地大物博、有很多先進的設計就能夠有好的成果，「有時候如果設備太好，你可能會完全盲目地依

賴設備，相反，我們的實驗設備相對較簡單，令我們不得不強迫自己進入深層次思考，嘗試去解決一些極端問題、歷史性問題、深層次問題。」其團隊成功破解「萊頓弗羅斯特效應」謎題，正是最佳例證，「就是在香港這個地方，給予了我們這種可能。」王鑽開認為香港「麻雀雖小，五臟俱全」，在創科路上，不必強求涵蓋每個地方和環節，「要在個別領域和學科做到最頂級，千萬不要搞個『大而全』，不然就會失去香港真正的特色了。」最重要的是，把握住一些思想性

的創造，打造出屬於自己的品牌就可以了。對有志投身科研的年輕人，他笑言「一定要讀博士」，因為一旦進入科研的大門，所創造的知識就能夠「穿越時空」，不只是留在教科書裏，甚至幾十年後也會有人討論你的文章和研究。現在，香港的創科空間很大，學有所成的年輕人，無論是工作待遇和未來發展前景都十分好，希望愈來愈多的香港學生都懷有博士夢、創科夢，「只要你忍耐，比常人多堅持三五年，命運和生活就完全不一樣了。」