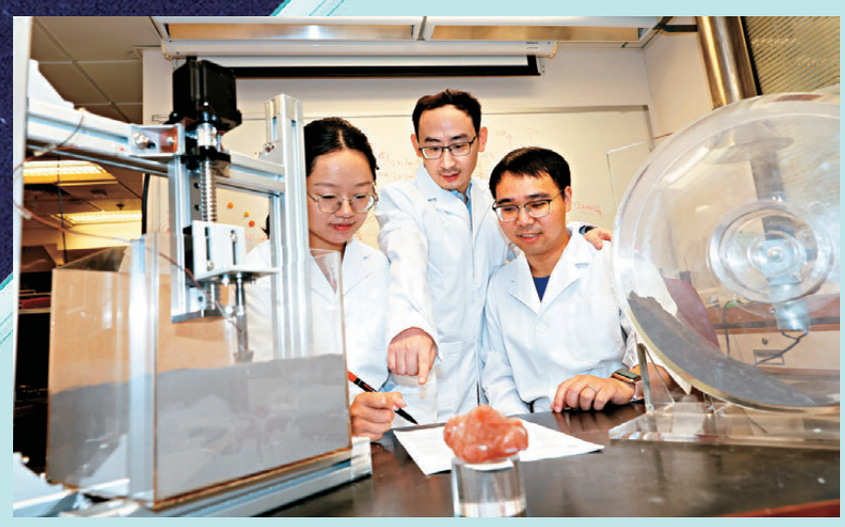
現代天問啟示錄

國家嫦娥五號及嫦娥六號探測器近年先後成功登月並採回了珍貴月壤樣品，香港理工大學研製的「表取採樣執行裝置」於過程中扮演了重要角色。在月壤返回地球後，香港科學家亦積極向國家航天局申請作進一步探索。這批太空「饋贈」究竟隱藏着怎樣的宇宙密碼？香港科研人員又如何以此助力國家深空探測戰略？來自理大的趙奇團隊，於去年國家探月工程第九批月球科研樣品借用發放中，分別獲批嫦五及嫦六月壤各100毫克進行實驗。他接受香港文匯報專訪，分享團隊正致力以微米級定電腦斷層（CT）掃描技術「透視」和比較月球正面和背面的「太空風化」密碼，並剖析香港在國家深空探測版圖中的戰略新坐標。他認為，香港高等院校在光譜分析、月球地質歷史、材料研究等領域位居世界前沿，可為月壤分析提供獨特細膩的視角。

●香港文匯報記者 楊盈盈



●趙奇（中）透露，團隊目前積極參與中國空間站的科研項目。 香港文匯報記者黃艾力 攝

微米級「透視」月壤 破譯月球地質密碼

理大團隊以微觀CT結合AI分析 深研「太空風化」

趙奇現為理大土木及環境工程學系副教授、深空探測研究中心管理委員會成員。他向記者介紹說，CT技術的最大優勢是無損檢測，只需用X光照射就能知道樣品內部月壤結構，解析度高達1微米，「就像醫院裏CT檢查能看清骨折裂縫一樣」，無須切開或打碎，對保護珍貴樣品非常有利。

分析隕石轟擊生成「膠結物」

透過將微觀CT掃描所獲的月壤資料於電腦中放大，結合人工智能（AI）分析，趙奇的團隊正建立詳盡的月壤微觀顆粒數據庫，同時亦特別關注微隕石撞擊所形成的「膠結物」。由於月球沒有大氣層，表面持續受到微小隕石的高速衝擊與太陽風的改造，經歷了深度的「太空風化」。當微隕石以極快速度轟擊月表時，會瞬間將月壤熔化並迅速凝結，從而生成膠結物。膠結物的特徵不僅能反映月球長期的受撞擊歷史，幫助評估月表環境的安全，更是調控月壤力學與導熱性能的關鍵因素。

一直專注於CT技術的趙奇，擅長分析岩石與土壤的微觀結構。其團隊此前在處理一組極難處理的珍貴月壤CT數據時，成功突破技術瓶頸，發表了迄今為止最大的月壤三維圖像數據（百萬顆粒級別）。憑藉在微觀CT研究上的這份硬實力，為他們此次成功獲批樣品打下堅實基礎。

「我在前往北京領取樣品的過程中非常激動，真的是夢想成真了！」憶起接過月壤的一刻，趙奇依然難掩喜悅。他強調，這份極其珍貴的第一手科學資料，不僅是團隊的榮耀，更充分體現了國家對香港科研實力的深度認可。

盼港成深空探測「戰略支點」

趙奇希望，未來香港能成為國家深空探測體系中不可或缺的「戰略支點」。他認為，香港可以聚焦行星科學、尖端探測載荷開發及AI數據分析等優勢學科領域，構建持續且穩定的科研輸出能力，深度參與後續任務。

同時，憑藉高度國際化的科研環境與學術網絡，香港能扮演聯通內地與國際的獨特門戶，將國家的探月成就推向國際主流學術舞台，開拓國際合作並藉此建立可持續人才培養機制，吸引更多青年學者投身航天科技。

月壤研究看似離普通人的生活較遠，但趙奇坦言，科研動力很多時源於好奇心與探索慾，這既是人類本能，也是一種情懷；對大眾而言，這些研究正不斷激發人們自古以來對月球的嚮往。

他進一步解釋，從宇宙角度來說，月球離地球很近，未來人類若要前往火星或更遠深空，月球將是至關重要的中轉站。如今科學家就月壤所做的每一項研究，不僅是在解開宇宙的歷史，更是為人類未來的深空探索奠基。

「有時候我仰望星空，心裏總會感嘆：人類真的是既渺小又偉大。在廣闊無垠的宇宙和億萬年的地質時光面前，我們每個人都是微小的塵埃；但我們竟然能飛越幾十萬公里的太空，從神話裏的『廣寒宮』帶回這些珍貴的月壤。」對趙奇和他的團隊而言，研究月壤不只是為了揭開月球的神秘面紗，更是在啟發人類對未來的想像力，不斷挑戰並推動科學的邊界。這小小的星辰饋贈，正照亮着香港科學家邁向浩瀚宇宙的下一步。

趙奇：月壤「既是資源，也是挑戰」

隨着探月工程不斷推進，在月球上建造基地、鋪設道路已不再是遙不可及的科幻情節；甚至已有人開始籌劃，未來某天月球或可成為住宿旅遊的選項。然而，要在真空、極端溫差與高輻射的月球表面大興土木，實現「月壤基建」，科學家們正面臨前所未有的考驗，「很多工作已經讓我們看到月壤基建是有希望的，但它距離真正成熟還很遠。」趙奇說。

趙奇表示，如果未來人類要長期駐紮月球，不可能依賴從地球運送材料，「就地取材」成為必然選項，要直接利用月壤來推動開發，製造月面建材如燒結磚、鋪面材料，甚至作為3D打印原料。

儘管前景可期，但他坦言，從工程角度看，月壤無疑「既是資源，也是挑戰」。

對機械設備形成威脅

由於月表長期處於真空、劇烈溫差與微隕石撞擊的極端環境，令月壤被塑造形成了尖銳顆粒、玻璃和膠結物，同時，輻射和太陽風使部分月壤礦物表面形成風化層與亞微米金屬鐵。這些微觀特徵，導致月壤顆粒異常鋒利且磨蝕性強，會對機械設備、密封及傳動部件造成明顯損耗。此外，月塵具有強烈黏附性與靜電效應，它不只是單純的「髒」，更極易侵入結構界面、附着於太陽能板與精密儀器上，嚴重威脅系統的長期運行。

加工充滿變數

除了物理破壞力，月壤在加工上也充滿變數。月壤並非均勻、標準化的工業粉末，不同地區、不同粒徑、不同玻璃相（glass phase）含量的月壤，其團聚狀態和風化程度皆有差異，這使得燒結、打印、壓實等工藝參數難以「一刀切」。

「也就是說，同樣叫月壤，不同地點、不同批次，工程表現可能差別很大。」趙奇解釋。

此外，材料的長期耐久性也是難關。「月球上的挑戰不是單純晝夜溫差，還有輻射、微隕石撞擊等。在真空與極端溫差下，材料容易出現脆化、熱裂或疲勞。」

由於月球重力僅為地球六分之一，表面月壤極度鬆散，航天員活動、月球車或着陸器起降都會引發巨大擾動，加上極端的溫差會導致月壤材料反覆熱脹冷縮而變形，引發地基沉降、路面開裂的風險，「就像地球上一樣，月球建築也會隨時間沉降。不過月球地基的變形機制與地球並不相同，我們需要透過實驗室測量相關參數，估計每年會沉降多少，並在設計時考慮進去。」趙奇說，月表部分地區還潛藏月震、隕石撞擊、滑坡等地質災害風險，進一步增加了基建的難度。



◀圖為3D打印嫦娥五號玄武岩碎屑，是3D打印月壤顆粒。 香港文匯報記者黃艾力 攝



●理大此前展示首次借用的嫦娥五號採集月壤樣品證書（左）、探測器模型（中）、月壤樣品（右）。 資料圖片

「泥土」可為深空探測提供數據支撐

月球表面看似不起眼的灰土，實則是記錄太陽系演化歷史的天然檔案。對嫦五嫦六先後採得月球正背面月壤，讓中國科學家終於擁有了屬於自己的「星際鑰匙」，趙奇深感自豪，直言這些來自幾十萬公里外的樣品，不僅顛覆了人類過去對月球演化歷史的認知，也為未來深空探測藍圖提供了關鍵的科學支撐。

從月球帶回的「泥土」，為何如此令科學家着迷？趙奇解釋，受限於月球表面的設備條件，人類在太空只能進行初步觀測，唯有將樣品帶回地球，才能動用最高精度的儀器，精確判定月球年齡、量化太空風化的影響、測量水與揮發物含量，甚至測試月壤能否轉化為3D打印原料，為未來的月面建設提供關鍵的基礎數據。

趙奇強調，嫦五嫦六的月壤在科學家眼中極具突破性。基於早年美國和前蘇聯的樣品，科學界普遍認為月球火山活動在約30億年前已明顯衰退，然而從嫦五帶回的「年輕」樣品，一舉將月球火山活躍的歷史延伸至約20億年前，大幅刷新了既有認知。嫦六樣品更是人類首次從月背採集，其地質背景與已有的截然不同，相關研究可為解答「月球正面與背面演化是否一致」提供關鍵數據。

他表示，只要將月球正、背面的樣品進行對比，並結合美蘇過去在不同地質年代採集的數據，科學家或終能完整拼湊出月球過去幾十億年來的演化歷史。

月表乾燥竟含「水」？ 科學家析三重來源

月壤雖名為「壤」，但與地球土壤有本質區別。趙奇解釋，地球土壤是由水、空氣和生物等活動共同參與風化形成，而月壤則是月球岩石在缺乏水、空氣與生物參與的極端環境下，經受億萬年隕石撞擊、太陽風轟擊及劇烈溫差變化後，形成的尖銳粉末。它本質上是月球表面一層非常細的岩石碎屑層，記錄着漫長的「太空風暴」歷史。

趙奇表示，月壤裏是否有水是近年熱門討論課題，甚至有人以為月壤是濕的，但那並不準確，因月球表面一直非常乾燥，沒有能讓液態水穩定存在的環境。

事實是，月壤中的「水」來源複雜，一是太陽風注入的氫，與月壤中的氧結合後，在顆粒表面形成羥基（OH）甚至水分子（H_2O）；二是月球內部物質帶出的揮發分（低沸點化學元素和化合物）信號，保存在火山玻璃珠或礦物中；三是外來物質如彗星或含水隕石的撞擊。「因此，科研人員討論的『水』，其實是在探究到底是水分子、羥基，還是含有過量氫的其他物質。」

月球南極或藏珍貴水冰

「研究這些水分子和羥基的來源、賦存狀態及演化機制，關乎未來人類能否在月球上直接提取維持生存所需的資源。」趙奇透露，嫦五樣品來自典型的「月海」玄武岩區，而嫦六採樣點位於月球背面南極—艾特肯盆地的玄武岩質區域，而未來國家前往月球南極的探月任務，將探測月球「高地」材料。

他表示，月球南極存在永久陰影區，溫度極低，已有多種觀測證據表明，其中可能保存了珍貴的水冰，但是其含量、分布、賦存狀態和可利用性仍需原位探測確認。



●理大科研團隊研製的「表取採樣執行裝置」，曾完成在月球背面表土採樣任務。 香港文匯報記者黃艾力 攝

●2024年，嫦娥六號順利完成在月球背面南極-艾特肯盆地的智能快速採樣。理大科研團隊研製的「表取採樣執行裝置」，為國家完成史上首次在月球背面表土採樣。 資料圖片