現代天問啟示錄

國家月球探測工程邁向深空的進程中，離不開對月壤的深入研究，因月壤不僅是月球演化的「活化石」，更是未來人類登月駐留、搭建月球基地的重要物質基礎。然而，真實月壤極度珍貴，不能用於大規模破壞性實驗，而現有的模擬月壤與真實月壤往往差距甚遠，難以支撐探月任務的技術驗證。針對此重大挑戰，香港城市大學的科研團隊，突破性採用「從頭合成」的思路，透過更精準控制不同礦物的成分，成功製作出高仿真月壤，更被專業機構認證為「最接近真實月壤的材料」。在新技術下，未來若透過登月探測器獲得各種新款的月壤信息，一天之內就能合成對應的模擬月壤，以便開展具參考價值的地面測試，可望為中國人早日「在月球安家」築牢基礎。

●香港文匯報記者 劉沐藝



●呂堅(左)及李揚揚(右)。 香港文匯報記者郭木又 攝

合成高精度模擬月壤 為「登月安家」打基礎

城大團隊提新思路「照方配藥」可配合登月探測做地面測試

城大的「高仿真月壤：探月研究的重要基石」項目，由機械工程學系講座教授呂堅和材料科學及工程系教授李揚揚團隊負責，獲特區政府創新科技署「創新及科技支援計劃特別徵集（航天科技）」專項撥款600萬元進行。香港文匯報深入團隊實驗室進行專訪，為讀者揭開其研發背景及成果突破。

李揚揚介紹，現有模擬月壤製作簡單來說是「挖礦混合」模式。科學家對少量真實月壤做成分分析後，在地球上尋找成分相似的礦藏，開採礦石回來篩選、混合，盡量匹配真實月壤的成分，「篩選礦石是非常困難的工作，堪稱一門大學問。有時候需要在光學顯微鏡下手工挑選，因為有些礦物是共生的，很多時候還篩選不出理想的礦物，難以分離。所以現在市面上的模擬月壤，和真實月壤有一定差距。」

面對傳統方法的局限，團隊提出了「從頭合成」的新思路。李揚揚解釋：「按照真實月壤的標準成分，精確調配各種原料。比如某種成分需要0.5克，我們就精準添加0.5克，另一種需要3克，就添加3克，這樣能非常精確地匹配真實月壤的化學成分和礦物組成。」

她用中藥配藥作比喻，清晰區分了兩種技術路線：「傳統方法就像隨機挖礦配藥，月壤裏可能含有20種『藥材』，但挖回的礦石可能只含3種，還有5種完全缺失，成分無法精準調控；我們則是每一味『藥材』都單獨備好，要2克就給2克，要3克就給3克。」

呂堅補充，新方法能實現更高精度的模擬月壤製備，「直接合成可精準控制每種成分含量，精度更高、可變性更強，亦能度身訂製成分。」目前團隊研製的模擬月壤，已被內地大學夥伴以至專業月壤研究機構認證為「至今為止最接近真實月壤的材料」。

3D打印月壤磚建基地

未來應用方面，呂堅指向更宏大目標。他提到，月球表面像沙漠一樣，全是顆粒狀的月壤，日後人類如果要在月球上搭建基地、建造房屋，第一塊磚就是核心。其中一個關鍵設想，就是用類似吸塵器的設備，把月壤吸進來，調配後再3D打印成磚，再用機器人搬運，一塊一塊地建造基礎設施，進而搭建房屋。

呂堅說，透過團隊的高仿真月壤及製備方法，「科研人員可於地球上用模擬月壤調試好3D打印的工藝參數，再將3D打印機運到月球」，以便製作合適的月壤磚，推動登月後基地建設等進程。

此外，針對月球不同區域月壤成分的差異，此技術於後續探月任務更有顯著價值。呂堅指，如將來探測器於未知的月球地區登陸，也可現場對月壤進行光譜分析，將結果傳回地球後，團隊一天內就能合成對應該處的模擬月壤，然後用3D打印機測試出合適參數，再指令月球上的打印機按照這個參數操作，以靈活適配該區域的月壤打印建材。若沿用傳統方法，一旦發現成分不符，往往需要再等數年才能發射新設備。

相比之下，「從頭合成」讓模擬月壤可以按需精準配製，正好補上這一時間差，也讓月壤製備從「碰運氣」變成「可調控」。

「只有提高仿真度，地面測試才有效」

城大高仿真月壤的研究起點，源於團隊發現現有的商用模擬月壤，或部分單位自行調配的模擬月壤，與真實月壤成分差異過大，導致地面測試失去參考意義。李揚揚說，當時適逢創科署徵集航天科技項目提案，團隊遂申請經費，希望令模擬月壤能做到高度仿真，「只有這樣，地面測試才有效；否則就像『兵馬未動，糧草先行』卻備錯了糧草，後續任務肯定無法順利推進。」

「月球是太空探索的前哨站，離地球最近。但不可能把所有物資都運到月球上去試驗，必須就地取材——其中最關鍵的就是利用月壤。所以登月前必須在地球上用模擬月壤做好充分的技術驗證和人員培訓」，李揚揚說。

用於儀器及航天服等測試

對於月球探測工程而言，模擬月壤的應用場景十分廣泛，包括太空任務培訓、航天儀器測試、月球基地建設，以及月壤揚塵防控研究等。李揚揚還提到一個關鍵應用場景，由於月球上沒有大氣層和液態水，缺乏地球表面那樣的風化作用，所以月壤顆粒非常尖銳，不像地球土壤的顆粒那樣圓潤。「這種尖銳顆粒會嚴重損耗航天服，所以用模擬月壤測試航天服的防護性能也非常重要。」

目前，團隊已經能通過技術調控模擬月壤的物理性質和化學性質，後續還會繼續優化工藝，適配更多航天應用場景。

呂堅補充，模擬月壤還有一些潛在應用方向：「比如丹麥和英國科研人員，已嘗試將模擬月壤燒結後用於製造電子元件，雖然此類應用估計要十年、十五年以後才能落地，但展現了模擬月壤廣闊的應用前景。」

「月壤磚」在軌測試狀態良好

香港科學家探究模擬月壤材料的同時，內地科研人員亦積極鑽研「月壤磚」技術工藝。其中華中科技大學團隊利用模擬材料，以熱壓燒結、電磁感應燒結和微波燒結三種成形工藝製成的「月壤磚」，其抗壓強度是普通磚3倍以上，此前已於「天宮」空間站開展艙外暴露實驗，首批樣品完成一年的太空極端環境測試後，狀態依然良好，有望為人類未來真正建造「廣寒宮」奠定堅實基石。

「月壤磚」2024年11月隨「天舟八號」抵達「天宮」開始測試，期間承受較地球表面強200倍的太空輻射，經歷每日16次晝夜交替的極端溫差，並直面微隕石撞擊，成功取得力學、熱學以及抗輻射三大關鍵性能的驗證數據。首批「月壤磚」去年已隨神舟二十一號飛船順利返回地球，剩餘樣品將繼續在軌完成第二及第三年的暴露實驗，相關解析數據將用於推演「月壤磚」未來於月面環境下的長效服役行為。

●香港文匯報記者 楊盈盈

科研青年：獻力國家航天事業幹勁十足



●李弘坤展示高仿真月壤 香港文匯報記者郭木又 攝

「我們希望能在材料科學領域，為國家的航天事業盡一點力！」城大高仿真月壤團隊成員李弘坤，對航天研發充滿熱忱。博士師從李揚揚與呂堅的他，畢業後留校繼續博士後研究，現已成為城大研究助理教授，談及從材料科學角度參與航天研究的契機，他指是源於過去十多年香港科研融入國家航天大局愈見深入，在此背景下，團隊系統調研發現，一些研發中的材料可為國家航天工程，特別是地外星體資源利用等前沿領域提供重要理論支撐與產品方案。

研究過程中團隊遇過不少困難，李弘坤形容，強烈的使命感和對太空探索的熱情，始終是支持大家走下去的動力。李揚揚則提到，團隊中包括李弘坤等青年科研人員都滿懷使命感，「當得知項目服務國家航天事業、未來可望應用於月球探測工程時，大家都倍感振奮，幹勁十足。」

月壤歷來11次採樣 僅嫦六逾1.9千克取自月背

話你知

國家月球探測工程及載人登月任務持續推進，美國也積極透過阿爾忒彌斯計劃重返月球，新一輪登月競賽全面掀起。當前人類正朝建設月球基地的重要目標邁進，需要進行大量的科研實驗測試。真實月壤樣品彌足珍貴，因此造就了對模擬月壤特別是高仿真月壤的需求。

事實上，人類歷來共完成了11次月球採樣任務，共帶回約386公斤樣品。當中美國的阿波羅計劃在1969到1972年的6次登月中，共獲得約382公斤月球表面岩石、岩心、月壤和月塵樣品，部分用於測定化學成分、物理特性等實驗，亦有不少樣品被封存於約翰遜航天中心特製的設備中，以待科學條件更好時繼續展開研究；另美國亦曾先後向約135個國家贈送月球樣品。而前蘇聯的月球-16號、月球-20號和月球-24號無人探測器，亦曾於上世紀七十年代從月球共取回約330克月壤，又率先在樣品中發現包含大約0.1%的水分。

至於國家的嫦五嫦六則分別於2020年及2024年採回1,731克及1,935.3克月壤，是相隔數十年人類再次獲得月球樣品。而嫦六月壤，更是人類首次及迄今唯一從月球背面取得的樣品，對了解不同地點的月壤特質，及於月球就地取材建築有極重要價值。

為了降低航天運輸和維護成本，人類需通過月球資源原位開發及獲取建造材料。考慮「月壤磚」的材料特性及月面環境，世界各地科研人員提出了不同月面建築方案，涉及新穎結構設計、無人化施工、太空3D打印技術、月面與地穴勘測等。圖為參考我國科學家提出的3D打印建造方案生成的圖片。

香港文匯報AI製圖