



航 太 科 技

太空返航技術之介紹

副教授 孫允平 空軍上校 張政仁 助理教授 梁燕祝

壹、前言

太空科技發展至今，有能力發展載人的太空載具的國家總共有三個：美國的太空梭Space Shuttle、蘇俄的Soyuz號、以及大陸的神舟號。但美國國家航空暨太空總署(NASA)於2011年中止太空梭計畫，數千名工程師和員工因此丟了飯碗；佛州布羅瓦郡的失業率從2011年4月的10.6%升至8月的11.7%，一年多以來，大多數人只好轉行屈就低薪職位，甚至部分員工還未找到工作，只得省吃儉用過生活。有企業指出，NASA員工的薪資要求太高，為何這些員工可以要求高薪，就是因為20多年來他們成就了美國的太空夢。美國政府或許迫於經濟壓力而中止太空梭計畫，但太空梭在人類探索太空的貢獻不容置疑，過去20多年來，太空梭來回地球一百多趟，人類的太空探險似乎是司空見慣的景象，但實際上要讓太空人平安返回地球是既危險又複雜的挑戰；太空梭從太空返航的過程是以25倍音速衝進大氣層，進入大氣層後要面對3000度高溫的挑戰，稍有閃失，只能化成一團火球結束旅程；這些在技術上都是非常困難的挑戰。本文主要介紹太空返航的技術，試圖以淺顯的方式介紹姿態控制，期讀者能瞭解這些複雜架構下的精髓。

貳、哥倫比亞號意外

2003年2月1日，哥倫比亞號於返航時在空中爆炸，這是數千個環節中發生一個致命錯誤所造成的悲劇。或許當年參與本案的工程師上媒體爆料而讓諸多過往的意外再度浮出檯面，但很多意外或失敗的例子並不是單一因素促成的，通常是經過一連串的原因造成最後的結果，工程上的設計、政治因素、管理與品管都可能是原因。該太空梭於1月16日在佛州卡納維拉角甘迺迪太空中心的39A發射台上第28次升空發射，如圖1所示；在歷經數月受訓後，迫不及待地想展開漫長的太空研究之旅的7名太空人，在指揮官瑞克哈斯班領導之下，準備出發。哥倫比亞號關鍵功能都是電腦操控，發射的程序是先啟動自動定序，然後助推器點火，在主引擎啟動後



，哥倫比亞號太空梭升空進行美國與跨國太空研究計畫。哥倫比亞號推進器以每秒燃燒7800磅燃料的速度，進入飛行軌道，距離地球表面近200哩(約320 km)的低軌道運行(暫置軌道parking orbit，因為萬有引力的關係，此時的衛星或太空梭會自動繞行地球，可以當作暫時停置軌道，等到一切就緒，再進行轉換軌道，霍曼變軌請參考文獻[1])，然後如圖2所示意地偏轉傾角至39度進入最終軌道(final orbit)。



圖1 哥倫比亞號太空梭(STS Columbia OV-102)

太空梭上的機組員包括指揮官瑞克哈斯班、駕駛員威利麥考、任務專家戴夫布朗、卡帕納喬拉和羅洛柯拉克、還有酬載指揮官麥克安德森、以色列太空署酬載專家伊蘭雷蒙等7人[如圖3]，他們在2週的太空旅程中，輪值兩班每天工作24小時，史無前例地進行80項實驗，涵蓋物理、生命和太空科學的研究。或許讀者好奇80項實驗到底都在做甚麼？從過去的太空新聞中，在生物科學的實驗裡看到蜘蛛被送到外太空後，因為不能適應無重力環境的關係，原本在太空中結的網雜亂無章，但是1週後，從太空站上傳回的影像顯示牠們有了驚人的進步，有隻蜘蛛結了1個對稱性的網，這一隻蜘蛛讓地面控制員高興好一陣子。牠可以這麼快適應太空環境，真的很令人驚訝。此外，在外太空要達到真空或無菌的條件比地面容易建置，可以製造更精純的藥品，在地面上高價的無菌真空室，在外太空就易如反掌，但要把設備儀器搬到外太空運費就貴了。同時無重力的環境，金屬結晶的對稱性優於地球重力場下

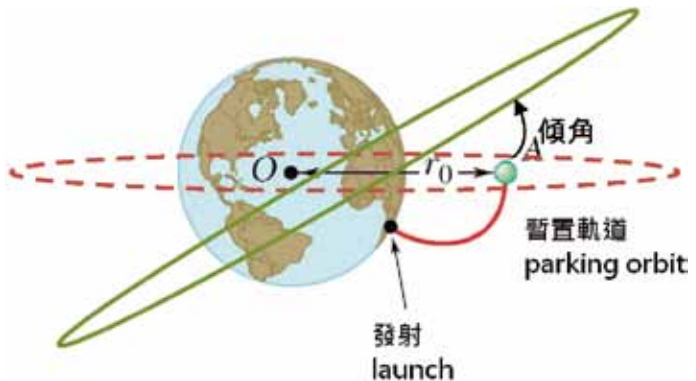


圖2 軌道傾角示意圖

空後，因為不能適應無重力環境的關係，原本在太空中結的網雜亂無章，但是1週後，從太空站上傳回的影像顯示牠們有了驚人的進步，有隻蜘蛛結了1個對稱性的網，這一隻蜘蛛讓地面控制員高興好一陣子。牠可以這麼快適應太空環境，真的很令人驚訝。此外，在外太空要達到真空或無菌的條件比地面容易建置，可以製造更精純的藥品，在地面上高價的無菌真空室，在外太空就易如反掌，但要把設備儀器搬到外太空運費就貴了。同時無重力的環境，金屬結晶的對稱性優於地球重力場下

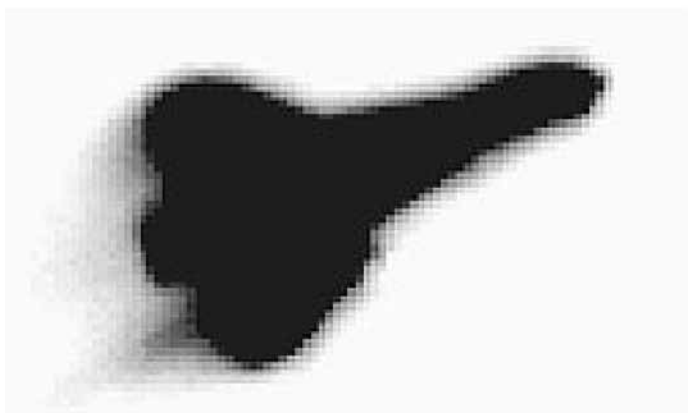


所製造的成品，假如所需的產品要求要這麼高的精度的話，在外太空實驗是最佳的場所。地球的自然資源除了空氣與水外，外圍保護的電離層是珍貴的防護罩，它可以隔離外太空輻射與電漿、太陽黑子等干擾，所以此類地球科學與太空物理的探討或對生物的危害程度分析，甚至於利用動物實驗模擬太空人暴露在外太空時的生理狀況，都是科學家正在進行的種種研究。



圖3 哥倫比亞號的機組員

哥倫比亞號的任務在回程以前都算空前的成功。2月1日上午，哥倫比亞號載著太空人返航，在太空梭飛越印度洋同時，休士頓的任務控制小組指示他們重返大氣層，哥倫比亞號在操控下自由下降返回地球，以1萬8千哩時速（約8km/s，開車時速28800km的感覺）衝向地球，在衝進地球



濃厚的大氣層時，太空梭整個表面包裹著炙熱氣體，溫度高達太陽表面溫度的三分之一（約攝氏2000度），沒人料想得到在短短幾分鐘之內，這股強大的自然力會奪走太空梭內的7條人命。

哥倫比亞號飛越了加州海岸時所有系統一切正常，距離在佛州甘迺迪太空中心著陸的時間不到25分鐘，此時突然出了差錯。影像上看到疑似碎片之物從太空梭上剝離，如圖4，任務控制小組並未察覺異狀，但幾分鐘之後，他們發現哥倫比亞號左側起落架感測器溫度太高，最後一次胎壓訊號沒收到，因此連絡太空梭上的指揮官瑞克哈斯班。但無回應一片死寂，發生了出人意表的事，哥倫比亞號在德州上空解體，沒有人生還。在當時，美國飽受恐怖分子威脅，眼看又可能要與伊拉克交戰，失去哥倫比亞號和7名太空人簡直是晴天霹靂，一開始還傳聞意外是因為有以色



列太空人是機組人員的關係。美國佛州參議員比爾尼爾森(前任太空人，是商業、科學與運輸委員會成員)，曾經痛苦地回憶道：「經過快17年，我還是一樣無助。看著電視上的挑戰者號影片，意外發生時我才剛回地球10天，挑戰者號就這樣落入大西洋裡，這次在事隔17年後，又看到哥倫比亞號在返航時解體」。

調查員在悲劇發生後立即出動，徒步循著哥倫比亞號飛行路徑徹底搜尋數千平方英哩，希望從散落地面的炙熱金屬碎片找到蛛絲馬跡，但尋找答案要費時數月，初步跡象顯示重返大氣層的惡劣條件，可能是導致災難的主要原因。其實，重返大氣層的問題很複雜，因為要在25800呎秒速(約7.86km/s)下脫離軌道，然後在著陸時要將速度降到零，需要很多極致的妥善安排。

參、太空返航

在過去，水星號(圖5)是美國的第一代載人飛船，總共進行了25次飛行任務，其中6次是載人飛行任務。「水星」飛船計畫始於1958年10月，結束於1963年5月，歷時4年8個月。雙子星號載人太空船(圖6)係由座艙和設備艙兩個艙段所組成，可乘載兩名太空人，主要目的是在地球軌道上進行機動飛行、會合和太空人試作太空漫步等活動，這是為了之後的阿波羅載人登月飛行計畫作準備。水星號、雙子星號與阿波羅號的太空艙都有降落傘，可以隨意降落在海面上，瞄準的目標很大，人類科技首次利用降落傘回航的就是蘇聯的蓋格林所搭乘的東方號Vostok，圖7為東方號回航的軌道，它的設計推力受到限制，且降落傘打開後無法操控方向，所以最大體積與最小表面積設計成圓球體。由於太空梭只能降落在跑道上，而且全世界沒多少跑道符合此類飛行的長度要求，所以設計條件更為嚴苛。

要把太空梭推上軌道，需要近400萬磅重的火箭燃料，速度要夠快才能抵消強大地心引力。維持在軌道的條件是時速要高達1萬8千哩，相當於每秒5哩(8 km/s)的極高速度；一旦進入軌道後，因為地球引力的關係，就會像月球繞地球般，不會減速自動環繞著地球飛行，引擎可以全部熄火。加滿燃料的太空梭所含



圖5 水星號



的能量和一個小型核子武器差不多，在每次的發射過程都能感受到駕馭這股力量是挑戰科技的極限。太空梭發射進入地球軌道需要2個條件：

- 一、高度條件：要抵達距離地表700哩(約1100km)的高空。
- 二、速度要夠快：才能留在軌道不落回地面。

太空梭重返大氣層時，太空梭不但要脫離這種速度的拘束，還要在毫無動力之下辦到，這是很大的挑戰，因此，脫離軌道的唯一方法就是將速度和能量都轉為阻力，好比划獨木舟時讓槳和船身垂直，就能感受到讓獨木舟瞬間減緩的力量，太空梭也會遇到同樣的阻力。但是，最大的差別在於太空梭是以音速25倍速度穿透大氣層，在這速度之下撞擊空氣分子會產生巨大摩擦力及過

熱的氣體，此時太空梭外圍的氣體溫度高達數千度，太空梭返回地球的過程就像一隻火鳳凰，外圍即為電漿(plasma)，這些火焰看起來很壯觀，但將近3千度的過熱氣體卻可能致命，如圖8。哥倫比亞號太空梭重返地球的意外是航太總署第一次的重返悲劇，但讓無動力太空梭以5哩秒速脫離軌道，並引導它繞過半個地球進入預定降落跑道，絕不只是稀鬆平常的例行公事。

太空返航必須在高速與高溫的環境下經過大氣層，發生災難的可能性很高，自人類進入太空以來就是令工程師和科學家苦惱不已的問題。在1970年代初期，阿波羅計畫最後一批太空人平安通過火焰包圍的大氣層，感覺難題似乎都已迎刃而解，人類因此也征服了月球。接下來航太總署工程師開始思索下個目標－『要建造可重複使用的太空船』，不但能做廣泛多元的應用，包括運載商業衛星、操作員、科學家與軍隊，還要耐得住反覆重返大氣層的惡劣環境。『太空梭』的基本要件就是



圖6 雙子星號

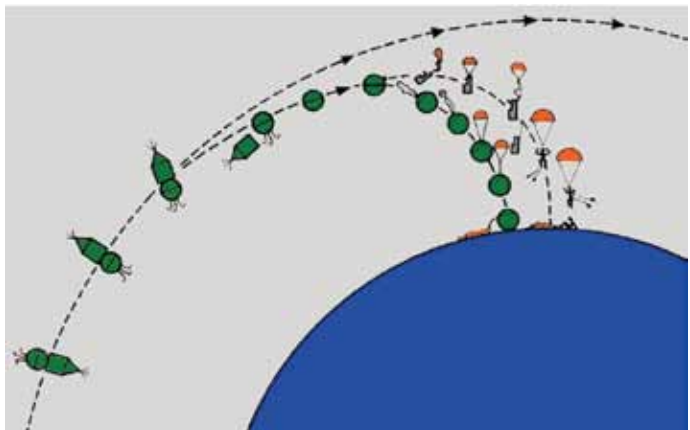


圖7 東方號回航降落傘拋落示意圖



：建造能運載大量貨物進入太空的載具，而且要能重複進行例行任務。到了1981年，經過近十年的政治爭議、設計難題和工程挫折之後，航太總署完成了約莫是DC-9噴射機的大小的太空船。這艘太空船最多能搭載10名太空人往返太空，貨物艙能容納6萬磅重的酬載，足以承載衛星，進行科學實驗，並作為國際太空站的建造平台。相較於阿波羅號的太空艙，只需瞄準廣大的海洋脫離



圖8 加州大學飛行動力與控制實驗室實驗畫面

軌道，太空梭要把酬載和太空人平安送回地球，必須精準的降落在設定的跑道上，因此脫離軌道的位置相對重要，進入大氣層後，太空梭要先滑行數千哩，然後降落在跑道上，三角形機翼是為了承受極音速的震波，還能提供必需的升力。

肆、姿態控制

太空梭返航時，是靠地心引力拉回大氣層，但要脫離軌道並開始朝地球降低高度，太空梭必須先減緩速度，但又不能一次減太多。要切換到軌道下半部和大氣層交會，只能每秒減速數百呎，這是原始速度的百分之一，就整體能量($E=mv^2/2$)而言只佔0.01%，雖然變化很小，但對於能否安全降落差別卻很大。這也是筆者學生在計算軌道速度時，往往數值上只取小數點以下一位，但為了增加設計的軌道與能量精確度，筆者要求取小數點以下三位。當太空梭脫離軌道與大氣層交會之後，就會撞擊許多空氣分子，產生大量摩擦力，導致速度在短時間減緩。以下為藉由姿態上的變化進行返航的過程：

- 一、在衝向大氣層之前，太空人要讓太空梭上下顛倒，讓機尾在前朝著軌道方向，其目的為增加到最大的阻力以減緩速度。此時為自由下降軌道，太空梭仍處於無重力狀態，但已越來越接近地球，若要讓太空梭就定位，需要靠深入大氣層時的氣動力才能飛行。
- 二、接著點燃太空梭軌道操控系統(Orbital Maneuvering System)，簡稱OMS火箭，每具引擎產生的6千磅推力，會減緩速度，讓太空梭脫離軌道。注意此時點燃OMS火箭的推力不是為了加速，而是要減速。這時已經進入回航的重要程序，



太空梭開始下降，時間緊迫完全沒有回頭路。錯過或延誤，就會造成回到地面低空時並不在你要的降落跑道，可能是深山懸崖邊（發生在1979年4月蘇聯的聯合33號與禮砲六號會合的任務。禮砲六號太空人發現聯合號發動機故障，噴焰的方向異常，這是歷經約2000次成功任務之後，聯合號主發動機第一次故障，最後以20.6G的速度回到地球並掛在阿爾泰山的懸崖邊樹梢上）或是結冰冷凍的湖或海裡（1976年十月聯合23號和禮砲五號自動接泊失敗後受命返航，下降時地面控制中心算錯發動機點火時間，造成著陸地點偏移，他們掉在結冰的坦吉茲湖上。雖然不論飛行員或太空人都進行過水上求生訓練，但太空人頭朝下在太空船裡等待，湖水溫度零下22度，出船艙絕對沒機會，但自我循環系統的氧氣因電力不多而供應量不足，所以機組人員決定在清醒時關閉電力系統，快意識不清時再啟動，整晚重複這些動作直到白天直升機救援隊因為無法吊起太空船，直接將太空船拖離湖面送到岸邊為止）。

- 三、當太空梭進入大氣層時，與落地跑道的角度不可太大也不可太小，而且為了要準確降落在跑道上，自動駕駛以38具小火箭操控方向，亦即所謂的噴氣操縱系統，這些火箭位於太空梭機頭和機尾，可以朝任何方向在瞬間點燃，操控太空梭只需要25磅的小推力，這和返回軌道時製造逆向推力以減速的OMS火箭6000磅推力差別很大。
- 四、一旦太空梭進入大氣層，距離降落地點就不到5千哩，但在著陸維持精確的軌道只是重返的挑戰之一，太空梭必須幾乎完全消除全部的速度，而且時間還得抓的很準確。
- 五、無動力的太空梭在進入大氣層，必須靠機翼產生足夠升力，才能滑行近5千哩到降落地點，而且還要機翼和機身產生足夠的阻力，才能從25馬赫降至數百哩時速，又不會因為角度太大而摩擦過熱，所以工程師利用風洞測試收集的資料，找到微妙的平衡點40度攻角附近，而且要控制在正負三度的誤差之內。圖9為太空梭進行風洞實驗，返航的攻角在28-38度時太空梭和空氣分子高速壓縮產生的電漿體流動與高溫現象。
- 六、太空梭一旦從飛行載具轉變成傳統的飛機，隨著空氣密度越來越高，機翼和方向舵開始發揮作用產生升力與阻力，和飛機一樣利用空氣來飛行，太空梭可藉此消除多餘的速度。此外，太空梭也可以開始高速蛇行轉彎（high speed S-turn），機頭仍然保持在40度攻角，太空梭分別向左右兩側傾斜蛇行，三角機翼下的空氣提供升力，讓太空梭偏離航線數百哩進行蛇行，如圖10所示，此時左翼會產生很大的阻力，極可能對左翼造成損傷。蛇行轉彎為了消耗能量，



因此利用飛行更遠距離換取降低能量的機會，才能抵達跑道。

七、結合了機翼、方向舵和噴氣操縱系統，太空梭繼續蛇行轉彎，繞著跑道的中央線前後傾斜，以極音速進行這些動作，同時維持精準的航道，需要格外警戒和不斷的修正。但實際的氣流並不像理想氣流一般兩側機翼都一樣的氣動力，就像飛機會遇到亂流一般，一定會有氣流不穩的情況，即為外擾，這是在姿態控制上最需要克服的最重要因素。此時，控制系統發揮它最大的功能，以每秒鐘40修正次進行軌道航行，計算阻力和速度、攻角和速度，只要太空梭脫離常軌分毫，系統就會調整襟翼或啟動噴氣操縱系統，重回正確航線；這是靠自動駕駛系統，無法人為操控的。

八、當太空梭回到200呎（約320km）高空的跑道上時，紀錄上手動飛行比自動駕駛飛行的狀況還好，所以有些階段是

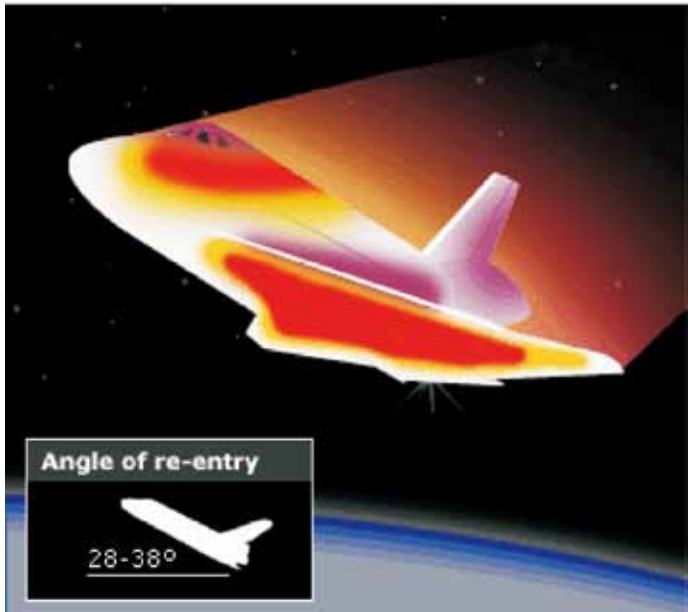


圖9 太空梭進行風洞實驗，返航的攻角28-38度

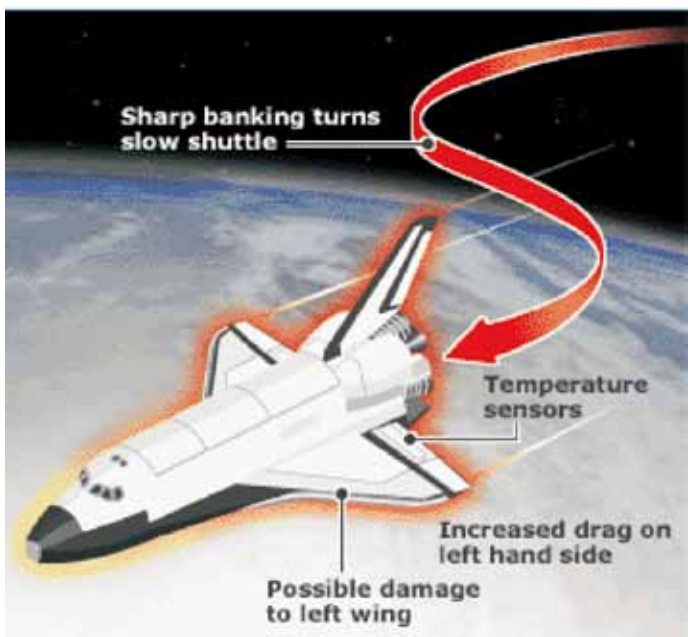


圖10 太空梭進行高速蛇行轉彎 (high speed S-turn)

電腦比人飛行的好，例如前一階段，因為要處理每秒40次的操控反應，只有電腦可以做得好，但有些階段是地面上的突發狀況反應，人類的經驗要比電腦處理的還好。



附帶一提的是，決定開始脫離軌道的時間點與位置，是一門精準的科學。太空梭抵達大氣層時，必須對準狹窄的重返走廊，才能降落在跑道上。若太空梭進入大氣層時太靠近跑道，角度太大會因摩擦生熱導致增溫過快，太空梭會因此解體，而且太空人也必須承受極大的G力，如圖11所示。若進入大氣層時角度太小，太空梭會飛掠過大氣層，就像

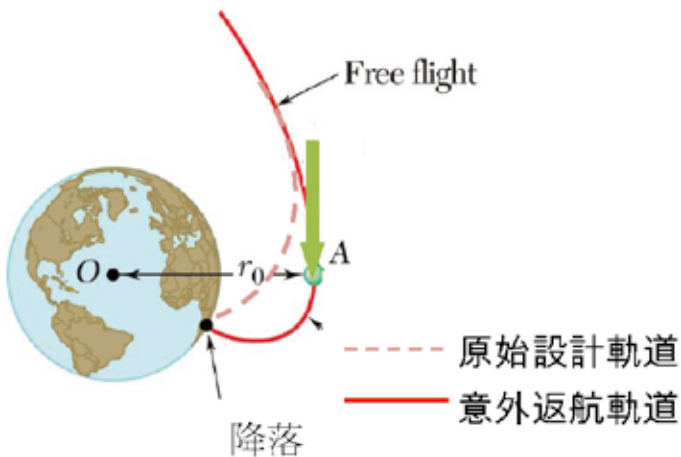


圖11 返航軌道的不同

用石頭打水漂一樣，飛盪到外太空。在進入大氣層的速度會快到產生震波；震波就像放大1萬倍的船頭波一樣；當太空梭以超音速前進時，因為撞擊氣體分子的速度快到氣體分子無法將訊息往前傳遞，導致氣體分子越靠越近，越擠越密，直到最後形成一道很強的震波。摩擦生熱可以分散空氣分子，只剩下帶電粒子的電漿，包裹住太空梭，部分區域的表面溫度可以高達近3千度，而且在太空梭上方數呎處的震波，溫度和太陽表面的溫度一樣，這股震波真的非常壯觀，想像著如此大的能量包圍著你，而你就坐在這快速飛行器內，穿透大氣層直奔地球表面。

伍、隔熱材料

前節所述，太空梭會經過極高溫的環境。它的基本結構體是由類似製造飛機的鋁合金材料所製成，曝露在高溫下非常危險，鋁只要加熱至幾百度就會變軟，超過1千度就會融化，為了保護太空梭和太空人，工程師要設法不讓高溫傳導進入內部結構，首要的任務是不讓震波所產生的高溫直接接觸太空梭，其次是良好的隔熱設計，要研發出能承受3千度高溫的隔熱系統，而且材質還要能重複使用，對材料科技是一大挑戰。

在太空計劃發展初期，水星號、雙子星號和阿波羅號的太空艙，都包裹一層以碳和塑膠為基底的燒蝕材料，在遇上高溫時，燒蝕材料會燃燒殆盡，揮發時產生的氣體，會散佈在大氣層，遠離太空艙，把重返大氣層的溫度帶走，燒蝕材料雖然好用，但只能使用一次，這種材質既昂貴又重。因為經費要儘量用在繞行地球上，投資在隔熱上的錢只要少花一分，就能增加酬載預算，因此重量要越輕越好。

建造太空梭隔熱的最佳材質是陶瓷，陶瓷是由巴西特產沙土取得的矽纖維製成



，將矽纖維混合水和其他材料，塑造成柔軟的塊狀物，擠出多餘水份之後，再經加熱程序固定混合物，最後成為一種透氣陶瓷材料，其內部充滿空隙與輕質耐熱矽纖維。每片磁磚都根據所要保護的太空梭部位，以機器切割出確切大小和形狀，然後以2300度高溫烘烤，磁磚能迅速散去表面的熱能，從火爐中取出後數秒就能直接用手拿。重返地球時為太



圖12 太空梭機鼻段的隔熱層

空梭表面隔熱的磁磚，要在頂面和側面加上黑色的玻璃溶液，黑色有助於散熱，這種塗液能避免電漿附著在磁磚表面，但磁磚很容易受損，保護一艘太空梭共需2萬多片磁磚，每片都要利用橡膠黏著劑以手工固定貼在太空梭表面上，這種黑色磁磚能保護太空梭耐熱2300度高溫，但太空梭有幾個部位溫度會更高，還要想辦法克服。

由於太空梭的最前端最接近震波，溫度會比太空梭其他部位更高，在機頭最前端和機翼前緣部位的溫度高達近3千度，磁磚曝露在如此的高溫下就會分解，工程師研發出簡稱RCC的無孔混合材料，全名為強化碳/碳複合材料，最大的特色是呈現灰色，這些更大、更堅固的材料，耐熱性更勝黑色磁磚，但缺點是比較重，不能用於整艘太空梭表面，否則無法飛離地面，所以僅限於重返時溫度最高的部位黏著此類高檔隔熱材料。在機翼前緣與機身鼻頭等關鍵部位，貼上半圓形強化碳/碳複合材料板，並以相同RCC製程的T型封條填補鑲板間的縫隙，外面的絕緣材料是最終防線，阻絕熱能進入鋁製機翼，隔熱系統在太空梭進入大氣層後不久就要挑戰極限，從高度40萬呎驟降到20萬呎之間，摩擦生熱達到最高點。圖12為太空梭機鼻段的陶瓷隔熱層，每一塊都有依外型曲度編號貼黏在指定位置上。

此次的哥倫比亞號意外就是在發射升空時，一個支架撞擊到機翼前端的隔熱材料，造成的小缺口讓太空梭在返航時無法保護太空梭本體，在高溫的電漿肆虐下釀成悲劇。最關鍵的情況是返航時需要做蛇行轉彎，在此高速與高溫下，機體已經有損毀，但又要扭轉機身，可以想像在那瞬間就走向不歸路，解體爆炸。

陸、總結



太空返航，雖然只佔太空科技的一部分，但從高速飛行返回地球，並精準的降落在跑道，所要面對的高溫環境、隔熱與姿態控制是科技與工程技術的極致實現。相較於過去的太空競賽，由納粹德國成功發射火箭開響第一砲，到蘇聯的連續創舉：第一個載83kg重的史波尼克衛星，第一個載運動物小狗萊卡到太空，這都是無法回航的技術；接著首次人類成功繞地球一圈的蘇聯蓋格林與美國阿波羅11號登月成功，都是安全返航的成功範例。太空梭在一連串的太空競賽下，以『重覆使用』的設計要求，期待圓滿達成任務，但因製造或品管所衍生的意外，在挑戰者號與哥倫比亞號都看到它失敗的身影，在美國NASA終止太空梭計畫的此時，還是可以從太空梭過去的技術突破中，看出它的輝煌時代。

柒、參考文獻

1. 梁燕祝，張政仁，孫允平，2010，“太空競賽下的犧牲者與太空科技之應用，”空軍軍官雙月刊，No. 155，Dec 5，2010，pp 31-48。（ISSN：1683-092X）。
2. 圖1來源：<http://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%93%A5%E5%80%AB%E6%AF%94%E4%BA%9E%E8%99%9F>
3. 圖3來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_Columbia_disaster
4. 圖4來源：http://en.wikipedia.org/wiki/Space_Shuttle_Columbia_disaster
5. 圖5來源：http://www.hudong.com/wiki/%E6%B0%B4%E6%98%9F%E5%8F%B7%E9%A3%9E%E8%88%B9?prd=so_1_doc
6. 圖6來源：<http://www.epochtimes.com/b5/12/3/15/n3540747.htm%E9%9B%99%E5%AD%90%E6%98%9F%E8%A8%88%E5%8A%83%E8%88%87%E6%B3%B0%E5%9D%A6%E4%BA%8C%E8%99%9F%E9%81%8B%E8%BC%89%E7%81%AB%E7%AE%AD>
7. 圖7來源：http://www.spacefacts.de/graph/drawing/large/english/vostok_reentry.htm
8. 圖8來源：<http://fdcg.eng.uci.edu/research/cev-entry-guidance/>
9. 圖9來源：<http://spaceresearchby.webs.com/apps/photos/photo?photoid=76223084>
10. 圖10來源：<http://spaceresearchby.webs.com/apps/photos/photo?photoid=76222588>
11. 圖12來源：<http://www.wallsave.com/wallpaper/800x532/space-shuttle-nose-ceramic-tiles-78803.html>

作者簡介

副教授 孫允平

學歷：國立成功大學航空太空工程研究所博士，現職：正修科技大學機械工程系副教授。

空軍上校 張政仁

空軍官校79年班、國立成功大學航空太空工程研究所博士，經歷：空軍官校一般教學部航空太空工程學系講師、副教授，現職：空軍官校一般教學部上校部主任。

助理教授 梁燕祝

學歷：國立成功大學航空太空工程研究所博士，經歷：成功大學航空太空工程研究所計算機室研究助理，亞洲航空公司專案經理，現職：空軍官校一般教學部航太系助理教授。