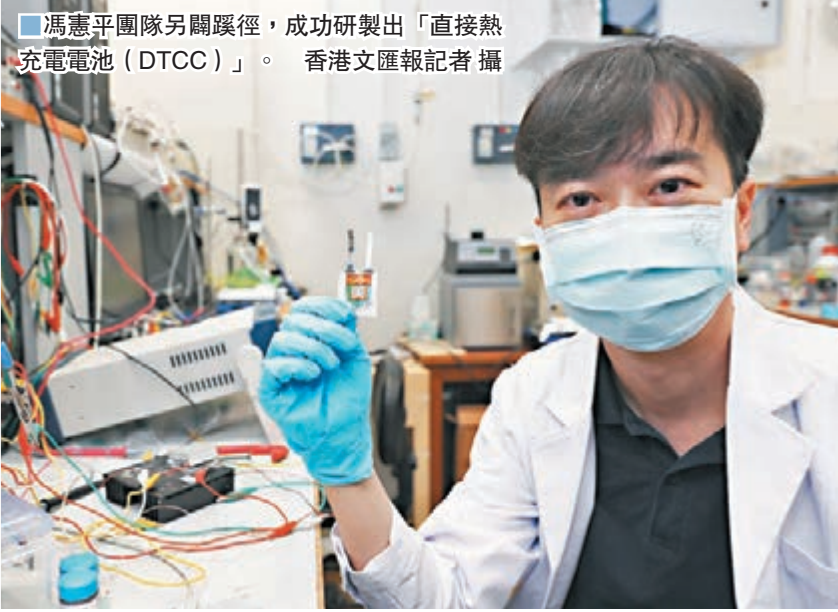


想創能

之天生我能必有用

人類社會相信每個人各有才華應盡展所長，而在能源世界，亦可以天生我「能」必有用。100°C以下的低溫廢熱，是機械、電器運作常見的副產品，亦是最難收集重用的能量形式，往往只能透過散熱丟棄，過程中更會引發環境問題。香港大學學者馮憲平的團隊，在熱電轉換的技術基礎上另闢蹊徑，以帶電荷的化學離子(ions)代替電子設計出新系統，並改用「溫度循環」的方式，成功研製出「直接熱充電電池(DTCC)」，每度溫差的發電效能比傳統熱電材料高出25倍。即使在室溫下，薄薄一片電池組的產電亦能驅動小型電子器材，將低溫廢熱化「廢」為「寶」，為未來可持續發展打開一扇窗。

■香港文匯報記者 郭虹宇、任智鵬



馮憲平團隊另闢蹊徑，成功研製出「直接熱充電電池(DTCC)」。

啫喱電解液 拓闊應用面

除了利用離子系統中溫度循環的DTCC將以低溫廢熱發電，轉廢為寶外，馮憲平團隊亦有參與優化溫差熱電轉換技術的研究，其中一個創新做法，就是將電解液做成像果凍一樣的啫喱狀，並將導電高分子摻雜在啫喱中，成功增強其導電性；當兩種方式共同使用時，將可進一步擴闊相關裝置的應用面。

馮憲平介紹指，常見的離子應用方式，均是液態系統，用電解液的方式，讓離子能在電解液中自由游動，不過相對來說，液體的導電性(conductivity)一般並不太高，限制了整個系統的發現效能。他們團隊最新參與製造出一種啫喱狀電解液，改變原有液體狀態，同時將導電高分子摻雜在啫喱中，從而增強其導電性；由於啫喱遇高溫會融化，該技術與DTCC同樣針對100°C以下的低溫廢熱回收，「希望做到既可以用溫度循環，又用溫差的方式，電化學和離子熱電雙管齊下，拓闊其應用面。」

■香港文匯報記者 郭虹宇

老師醞釀靈感 學生做出成績

馮憲平領導的DTCC項目約於五年前開始研發，但其實早在他於美國麻省理工學院(MIT)任博士後研究員時，已經醞釀相關靈感，始終未找到具體製作方法。直至約五年前他的兩名研究生，於材料探索方面有所突破，終於為現有的低溫廢熱發電成果奠基。他形容二人在研究上功不可沒，笑言大學老師縱可指導科研方向，惟若要做成成績「主要還是要靠學生」。

馮憲平於台灣讀大學及研究院時都是專攻電化學工程，亦曾於台積電工作，研發半導體芯片，及至2009年他在MIT時首次接觸熱電領域。當時其研究導師為熱電專家，讓他參與了不少相關研究，而其電化學工程背景也啟發了新靈感，研究以離子代替電子作熱電轉換，「我跟老閩(導師)商量，都覺得離子是一個方向，因為它的thermopower(熱電能)可以很大，只是不知道要怎樣將電流提升」，他表示，其中關鍵就是尋找適合材料製作電池系統，「當時一直有這個想法，但還是未有找到。」

及後他加入港大，到五年前其兩名研究生終於發現了可行材料，他們經過大量實驗，順利找到石墨烯和電解質的搭配，「石墨烯有非常多種，和不同電解質的搭配亦可有多種變化，而每一種物質都有自己特有的能階」，如何找到最優解，可歸功於二人的不懈努力，加上研究團隊持續完善系統設計，成功令電壓效率提高數十倍至5mV水平。

■香港文匯報記者 郭虹宇

廢熱化為寶 港大「溫度循環」創「直接熱充電電池」



馮憲平在白板上寫出科研算式並向記者介紹。

現有能源體系，從原始能源與燃料到最終應用，過程有逾七成能量未有成功轉化，主要以廢熱形式損失掉。例如發電廠燃煤推動發電機，整個環境都是數百度的高溫狀態，需要引大量的水幫助冷卻散熱，同時亦會嘗試將部分廢熱回收。相比起能量集中的高熱狀態，100°C以下的低溫廢熱(low-grade waste heat)更普遍存在於工業機械、汽車、電器中，佔廢熱總量達六成，而且由於溫差小，回收難度高得難以想像。

突破低溫廢熱發電技術瓶頸

港大機械工程系副教授馮憲平團隊，成功突破低溫廢熱發電的技術瓶頸研製出DTCC，並正逐步產業化開拓不同應用可能(見另稿)。

他介紹說，「廢熱有很多處理方式，比如將廢熱存起來，或廢熱轉電，當中熱電半導體大概五十年前已開始有很多人研究。」

熱電半導體利用熱電效應(Thermoelectric effect)，當兩端一邊加熱一邊冷卻，利用溫差方式，讓材料內部的電子來回移動，從而產生電壓，傳統的半導體熱電轉換器便是以此製成。不過馮憲平指，此技術每度溫差只能產生約200µV(微伏，即10萬分之一伏)電壓，需要數百度的高溫差環境才能有效產電，難以用於低溫廢熱。

此外，轉換器厚度亦有限制，太薄未能維持溫差，太厚則會因電阻問題加劇能量消耗減低成效，而且涉及稀有金屬，成本也相對較高。

放電時產氧化 冷卻後發生還原

為此他改變思路採用「離子電力系統」，以離子取代電子作為能量載體研製了DTCC，使用不對稱電極，以氧化石墨烯/鉑金作為陰極，以聚苯胺作為陽極，加上以鹽水為主，及大量鐵二價與鐵三價離子作為電解液，利用溫度循環，即是加熱冷卻、再加熱、再冷卻的方式運作。加熱時，「氧化石墨烯本身帶負電，就會去抓取在電解液中的帶正電的離子，一抓離子就會產生電容，電壓隨之上升，當電壓到達某個程度時開始放電。」

至於陰極的導電高分子，則會在電壓達到一定程度時，不斷氧化放電，「利用鐵離子的氧化還原作用，放電的時候產生氧化，冷卻下來後會自己發生還原，就像自身修復一樣。」

此發明成功將每度溫差產生電壓提升25倍至5mV以上，即使在30°C到90°C低溫差狀態亦能有效操作，熱電轉換效率亦達到5%以上，成為「可能改變遊戲規則的綠色能源」。

馮憲平並提到，離子系統於熱能發電尚存更龐大的潛能，由於電壓變化存在於多元的電極組合中，而非只限於材料內部，「世界上，電子只有一種，但離子有很多種」，此舉大大增加探索不同材料以進一步提升效能的可能性，亦讓離子熱電(ionic thermal electrics)成為近兩三年的新興熱門領域。

DTCC選用氧化石墨烯(GO)/鉑金(Pt)作為陰極(cathode)，以聚苯胺(PANI)作為陽極(anode)，加上以鹽水與鐵二價(Fe²⁺)與鐵三價(Fe³⁺)離子作為電解液。

DTCC於低溫廢熱發電的技術突破，帶來龐大應用轉化機會。過去三年間，馮憲平團隊就此申請多個專利，也成立了初創公司獲多個創業賽獎項獲表揚，並先後獲約800萬元

的初創資助與投資，計劃設廠大規模生產。團隊並成功就節冷氣、智能窗戶、體溫發電健康檢測等試驗項目獲得業界合作機會，至今創造250萬元營收。每個DTCC單元只1.5平方厘米大，應用時可將串聯成電池組，約掌心四分之一大小的薄片，便已有10個單元。馮憲平指，以每度溫差可產生5mV至10mV電壓計，串聯或堆疊10塊薄片，10度的溫差便有機會應付手機、藍牙、傳感器充電時(1V至5V)的要求，「(產品)做厚一點就可滿足需

要。」而實際上他與學生已就此創辦了初創公司，開展項目讓DTCC落地應用。自2017年起，公司已獲創科基金及科學園近300萬元資助，並籌募得約500萬元初創投資，於台灣設廠作大規模生產。馮憲平指，公司成功爭取得多個項目創造約250萬元收入，包括機電署的溫室實驗計劃，檢視太陽直射下廢熱發電效率及室內溫度變化，又與本地廠商合作節冷氣，將DTCC貼在冷氣壓縮機上產電。團隊並與台灣企業合作，將DTCC用於

智能窗戶，將日光窗框產生的溫度提升轉化為電，驅動窗戶變暗；另體溫電池則是團隊另一合作項目，DTCC將冬季時體溫與外界10度以上的溫差轉化，以為手環、健康檢測系統等裝置供電，可即時透過手機向家屬反饋，對嬰兒、老人身體數據監測特別有用，希望可於數年內上市。馮憲平提到，相比同類另置電池的人體健康監測器，DTCC技術除了更節環保成本較低外，成分也以鹽、水及鐵離子為主，較電池金屬電解液安全。

■香港文匯報記者 郭虹宇

DTCC vs 半導體熱電轉換器

Table comparing DTCC and traditional semiconductor thermoelectric converters across metrics like energy conversion efficiency, operating temperature, and cost.

■整理：香港文匯報記者 郭虹宇

DTCC落地應用 至今創250萬營收



DTCC貼身體上可用體溫為智能科技產品供電作醫療監測。