



本刊取得美國麻省理工學院Technology Review期刊圖文授權  
Technology Review,  
Published by MIT.  
TECHNOLOGY REVIEW  
internet URL: www.  
technologyreview.com

MIT  
Technology  
Review

# 2021年

## 十大突破性技術 (上)

今年是本刊公布年度十大突破性技術的第20年，此次名單中，有的技術已經開始改變你我的生活，有的技術還有幾年才會成熟，都讓人得以一瞥未來的世界。

翻譯／連育德

### 信使RNA疫苗

撰文／雷嘉拉多 (Antonio Regalado)

插畫／SELMAN DESIGN

一項創新的治療技術成了新冠疫苗的幕後功臣，未來更可望翻轉醫學。

#### 獲選原因：

全球已有200多萬人死於新冠肺炎，mRNA疫苗的效力約95%。

#### 重要參與者：

- BioNTech
- GreenLight Biosciences
- 莫德納
- 輝瑞
- Strand Therapeutics

#### 成熟期：現在

**為**了鼓勵民眾施打新冠疫苗，賓州大學去年12月推出一支兩名研究人員接種疫苗的宣傳影片，一位是卡莉科 (Katalin Karikó)，一位是魏斯曼 (Drew Weissman)，拜他們的科學研究之賜，近期才有兩款疫苗取得授權。這兩款需要低溫保存的疫苗，由脂肪分子與基因指令組成，採用先前未經驗證的信使RNA (messenger RNA；mRNA) 技術，一年內就完成研發與測試工作，全都要歸功於兩人這20年來的發現。

新冠肺炎疫情造成全球200多萬人喪命，魏斯曼幾個童年玩伴也不幸病逝。到目前為止，美國正式開打的新冠疫苗有兩款，其藥廠分別是位於麻州劍橋的莫德納 (Moderna Therapeutics)，以及位於德國美茵茲市 (Mainz) 與輝瑞 (Pfizer) 合作研發的BioNTech，兩家藥廠都以魏斯曼的發現為基礎研發出疫苗 (魏斯曼的實驗室由BioNTech資助，卡莉科目前在該公司服務)。

傳統疫苗使用活病毒、死病毒或病毒的部分外殼，訓練人體免疫系統，但這兩款新型疫苗不一樣，以信使RNA為技術。信使RNA是壽命短暫的「中間人」分子，在人體細胞中將基因複製到適當位置，引導蛋白質的合成。

疫苗附加在人體細胞的資訊來自於新冠病毒本身，藉此向棘狀蛋白質（棘蛋白）下指令進入細胞。棘蛋白本身不會造成人體生病，反而能誘發強烈的免疫反應，根據2020年12月的大型研究指出，其效力足以防範約95%的新冠肺炎病例。

這個突破性的疫苗技術除了有機會終結疫情外，亦讓各界看到，信使RNA可能有助於創新藥品研發。研究人員認為，透過這項技術將暫時性的指令帶入細胞，在不久的將來能夠研發出各類疫苗，有的可以抵抗麻疹與瘧疾，有的可以增加流感抵抗力，有的是新冠疫苗的改良版，以防新冠病毒持續出現變異株。

但研究人員看到的願景不只局限在疫苗，這項技術有機會降低基因療法的成本，治療癌症、鐮形血球貧血症，甚至是HIV病毒。

新冠疫苗能夠研發成功，魏斯曼並不詫異，認為這是他畢生的研究工作有了好結果，「我們研究這個技術已經超過20年。我們一直以來都知道RNA會成為重要的治療工具，」他說。

## 天時地利

儘管累積了20年的研究基礎，信使RNA技術直到去年才運用於市售藥品。

2019年12月，中國大陸武漢市爆出一種可怕的傳染性肺炎，中國政府的審查機構起初企圖隱瞞疫情，但最終紙包不住火，上海有名科學家在2020年1月10日透過澳洲的聯繫人，將病毒的基因密碼公布在網路。病毒這時已隨著搭機民眾迅速蔓延，香港與泰國陸續傳出病例。然而，基因資訊傳播得更快，不久便傳到BioNTech的德國總公司與莫德納的劍橋總公司。

莫德納身為專攻信使RNA領域的生技公司，48小時內便設計出疫苗藍圖，比美國通報第一起病例還早了11天。6週內，莫德納已經做出冷卻劑量，準備進行動物測試。



跟多數生技藥品不同的是，RNA並非在發酵槽或活細胞裡製造得出，而是在裝滿化學物與酵素的塑膠袋中生成。由於市場之前並沒有信使RNA藥物，因此沒有工廠與供應鏈可以求助支援。

2019年12月，莫德納疫苗獲得美國食品藥物管理局（FDA）授權前夕，執行長班塞爾（Stephane Bancel）接受採訪，說他對疫苗有信心，但擔心產能不足。莫德納承諾在2021年生產高達10億劑疫苗，他說感覺就像福特當年推出第一輛T型車後，卻被告知全世界需要10億輛。

班塞爾認為，新冠病毒在信使RNA技術才剛成熟的時候出現，是「歷史的異常現象」。換句話說，是我們走運。

## 人體生物反應器

科學家首次使用合成信使RNA在動物體內生產蛋白質，是在1990年，實驗雖然成功，但不久便出現嚴重問題，老鼠注射後開始生病。魏斯曼說：「老鼠的皮毛變皺，體重下降，也不再跑來跑去了，」如果注射大劑量，老鼠幾個小時後便會死掉。「我們很快就發現信使RNA沒辦法使用，」他說。

問題出在發炎。數10億年來，細菌、植物與哺乳動物經過不斷進化，可以發現病毒的遺傳物質，對它做出反應。魏斯曼與卡莉科的下一步是找出細胞如何辨別外來RNA，這個階段又花了「好幾年」。

他們後來發現，細胞充滿了感應分子，能夠分辨出哪個是你的RNA，哪個是病毒的RNA。感應分子一旦發現病毒基因，會發動大量稱為「細胞激素」



(Cytokine) 的免疫分子，擋住病毒的入侵，同時讓人體學習如何因應。魏斯曼說：「抗體要一個星期才會反應，這期間讓你能夠活命的關鍵是這些感應分子，」但細胞激素太多卻可能致命。

靈機一動之下，兩人使用化學修飾過後的組成單元 (Building Block) 製造RNA，避免免疫反應，結果證實可行。不久，劍橋有幾個創業家以魏斯曼的科學發現為基礎，著手成立莫德納。

但疫苗並非他們的研發重點。莫德納在2010年成立之初，原本冀望不走生技業的主流路線，而是改以RNA技術取代注射蛋白質，也就是說，建立起RNA藍圖，讓患者的細胞自行製造藥物。「我們當時在想，可以把人體變成生物反應器嗎？」莫德納的共同創辦人暨董事長艾菲洋 (Noubar Afeyan) 說。他亦執掌旗艦先鋒創投 (Flagship

Pioneering)，專門投資生技新創公司。

如果做得到這點，莫德納輕易就能列出20到30種，甚至40種值得取代的藥物。只不過，莫德納一直無法將信使RNA傳送到正確的人體細胞，又不會有太多副作用。此外，RNA藥品必須反覆施打，才能取代暢銷生技藥 (如每月定期注射凝血因子)，但莫德納的科學家發現，反覆施打會有問題。艾菲洋說：「我們發現第一次有效、第二次效果降低、第三次更低。當時就有這個問題，現在也是如此。」

莫德納於是調整方向。哪一種藥可以只施打一次，但還是有很大的效果？答案再明顯不過：疫苗。有了疫苗，起初的蛋白質供給量就足夠訓練免疫系統，效果可以持續好幾年，甚至一輩子。

此外，RNA分子很脆弱，暴露在外只能存活幾分

鐘，如何把RNA分子包裝起來也是一大問題。魏斯曼說他測試過40種不同載體，包括水滴、糖、鮭魚精子的蛋白質等等，好比愛迪生為了發明電燈，找遍適合的燈絲，「有人發表過的東西，我們幾乎都試過了。」其中，由不同脂肪分子製造而成的奈米粒子最有發展潛力，但這項發明在當時是商業機密，至今還有專利糾紛尚未解決。魏斯曼努力了5年，直到2014年才拿到技術。

結果一試很滿意。「效果比我們之前測試過的東西都好。藥品應該有的標準都有了，效力高，又沒有不良副作用。」他說。到了2017年，魏斯曼的實驗室已經能夠使用信使RNA，幫老鼠與猴子打疫苗抵抗茲卡病毒 (Zika)。莫德納的進展也不遑多讓，迅速發表新款信使RNA流感疫苗的初期人體測試結果，不久亦啟動一系列疾病的臨床實驗 (包括茲卡病毒)。

研究主軸轉向疫苗，對莫德納不無缺點。麻省理工學院金融工程實驗室 (Laboratory for Financial Engineering) 教授羅聞全說，多數疫苗都是賠錢生意，因為許多疫苗的售價「只有潛在經濟價值的一小部分」。各國政府不惜花10萬美元買一款癌症藥，為病患增加1個月的壽命，卻只願意花5美元買一款能永久抵抗傳染病的疫苗。茲卡病毒或伊波拉病毒這類新興傳染病的爆發情況時好時壞，倘若研發相關疫苗，羅聞全估計平均報酬率是負66%，「疫苗的經濟模式有缺陷，」他說。

但是換個角度來看，疫苗的研發能見度更高。羅聞全的團隊分析成千上萬個臨床試驗後，發現疫苗研發計畫常有正面結果。在稱為「第二階段臨床實驗」的效力測試中，約有4成的候選疫苗測試成功，是癌症藥品的10倍。

信使RNA疫苗得以有更高的成功率，則是純屬巧合。握有關鍵指令的奈米粒子被注射到手臂後，似乎會鎖定樹突細胞 (Dendritic Cell)，這類細胞的功用正好是訓練免疫系統



拜魏斯曼的RNA技術之賜，  
新冠疫苗成功問世。



生技製藥公司Lonza的瑞士廠（上圖）與新罕布夏廠協助生產莫德納疫苗。

辨識病毒。此外，不知為何，奈米粒子會導致免疫系統處於警戒狀態。這樣的效果稱為「疫苗佐劑」，並不在原訂計劃之內。「我們不敢相信會有這種效果，」魏斯曼說。

拜疫苗之賜，莫德納有機會推動大量新產品。由於每款疫苗都採用同樣的奈米粒子載體，因此可以迅速重新設計，就跟軟體的道理一樣。莫德納甚至申請專利，稱這項技術為「信使RNA作業系統」，「我們為一款疫苗製造信使RNA的方式，也適用於另一款。信使RNA是資訊分子，因此我們的新冠疫苗、茲卡疫苗與流感疫苗都一樣，只差在核苷酸的順序不同，」班塞爾說。

## 效力達95%

2020年3月，新冠疫苗研發工作陸續啟動，但有人對信使RNA有疑慮，說這項技術尚未經過證實。就連本刊當時也指出，疫苗至少需要18個月才能研發成功，但實際結果比預期早了整整9個月。「有時候研發工作很費時，單純是自己嚇自己，」艾菲洋說：「這樣的想法會影響科學團隊，心想不能做太快！」

到了去年12月，莫德納與BioNTech的疫苗已經證實有效，當月亦取得美國授權。

但速度之所以破紀錄，不只是因為這是全新技術而已，疫情嚴峻也是原因。在新冠肺炎感染人數太多的情況下，疫苗研究工作得以快速累積證據。

信使RNA疫苗是否真的比較好？答案無疑是肯定的。這兩款疫苗固然有一些副作用，但效力高達約95%（也就是100人當中能避免95人受到感染），不僅目前尚無其他新冠疫苗能及，效果也遠高於流感疫苗。阿斯特捷利康（AstraZeneca）藥廠的疫苗使用感冒病毒改造而成，效力為70%，而中國製疫苗使用不活化新冠病毒，效力只有50%，但能避免患者出現重大病症。

「這項技術可能從此改變製造疫苗的方式，」研發相關技術的公司Translate Bio執行長雷諾德（Ron Renaud）說。

信使RNA疫苗的效力佳，又能輕易重新設計，因此研究人員已經著手研發其他疫苗，抵抗HIV病毒、疱疹、嬰兒呼吸道病毒與瘧疾等目前尚無疫苗的疾病。正在研發當中的還有「通用」流感疫苗，以及魏斯曼所謂的「泛冠狀病毒」疫苗，後者可以提供基本保護力，抵抗成千上萬種同一類的病原體——冠狀病毒，不僅造成此次新冠肺炎疫情，亦是多年前SARS，甚至可能是史上其他疫情的元兇。

「我們應該假設未來會冒出更多冠狀病毒，」魏斯曼說：「與其全世界封城一年研發新疫苗，我們應該備妥隨時能打的疫苗。」

去年春天，班塞爾開始呼籲美國政府出資打造信使RNA的大型製造中心。根據他的構想，超大型工廠「可供企業在和平時期使用」，在下次爆發疫情時又可以迅速調整，生產疫苗。他說這樣就算出現最壞的情境也不怕，亦即新型病毒的擴散速度跟新冠病毒一樣，但致死率卻跟伊波拉病毒一樣高達50%。「有些政府願意花幾10億美元在核武軍備，希望永遠都用不到，」班塞爾在去年4月指出：「同樣的道理，我們也應該做好公衛準備，不讓類似的疫情再次發生。」

同月下旬，為了配合即將推出的「神速行動」（Operation Warp Speed；疫苗生產計畫），美國政府欽點莫德納擔任疫苗國家隊的隊長，建造這樣的



製造中心。美國政府投資近5億美元，協助莫德納研發疫苗並擴大產能。

## 疫苗之外

有了新冠疫苗後，有些研究人員預計莫德納與BioNTech將重拾原訂研究計劃，以信使RNA技術治療常見疾病（如心臟病與癌症）或罕見遺傳病，但這方面能否成功仍未可知。

「儘管合成信使RNA原則上可以運用於很多療法，但實務上，要將充足劑量的信使RNA送到人體正確位置，對很多疾病都是一大考驗，甚至可能根本無法達成，」生技創業家華倫（Luigi Warren，他的博士後研究是莫德納成軍的基礎）說。

除了疫苗之外，信使RNA還有一個應用面，只要短期治療，效果可能維持好幾年，甚至一輩子。

2019年底，新冠肺炎尚未爆發之前，美國國家衛生研究院（National Institutes of Health）與蓋茲基金會（The Bill and Melinda Gates Foundation）公布將斥資2億美元研發低成本基因療法，未來將用於撒哈拉沙漠以南非洲，主要鎖定當地盛行的HIV病毒與鐮形血球貧血症。

屬於尖端技術的基因療法如何做到平價又易於使用，兩家單位並未多加說明，但魏斯曼說，這項計畫可能需要採用信使RNA，在基因編輯工具（如CRISPR）加入指令，永久改變基因組。魏斯曼說，不妨把他們的計畫想成是大規模疫苗接種，不同的是採用基因編輯技術修正遺傳病。

現階段的基因治療既複雜又昂貴，歐美自2017年以來核准了幾類技術，其中一種技術以治療失明症為主，由病毒將新基因帶入視網膜，每隻眼睛的治療費用藥價42.5萬美元。

新創企業Intellia Therapeutics正在測試一種新療法，將CRISPR包裝在RNA當中，摻入奈米粒子，希望藉此治療一種遺傳性肝病，也就是讓基因剪刀出現在人體細胞，剪掉問題基因後逐漸消失。該公司在2020年首度將藥品測試在病人身上。

Intellia選擇治療肝病，並非偶然。脂質奈米粒子經過點滴注射入血液後，最後往往會全數進入肝臟，亦即

人體的代謝器官。「如果要治療肝病，這樣當然很好，但碰到其他疾病就沒輒了，」魏斯曼說。

不過魏斯曼表示，他已經知道如何讓奈米粒子鎖定特定部位，例如不斷製造紅血球和免疫細胞的骨髓。能做到這點相當難能可貴，魏斯曼自然不肯透露細節，「等申請到專利再說。」

他打算使用這項技術，將新指令送到負責幫人體造血的骨髓，藉此治療鐮形血球貧血症。他目前也跟其他研究人員合作，計畫以猴子為實驗對象，看T細胞（免疫細胞）能否經過改造，尋找HIV病毒後加以消滅，達到徹底治癒的目標。

也就是說，信使RNA的脂質奈米粒子可能變成一種大規模編輯基因組的方式，且成本低廉。倘若點滴藥劑可以改造血液系統，對公共衛生的益處預計不亞於疫苗。鐮形血球貧血症的患者壽命比一般人少好幾10年，貧窮地區的患者更可能來不及長大，這個遺傳病好發於赤道非洲、巴西與美國的黑人族群。HIV病毒也是揮之不去的人類苦難，患有或死於HIV病毒的人口約有三分之二來自於非洲。

莫德納與BioNTech的新冠 vaccine 每劑售價20到40美元。如果基因改造療法的價格也是如此呢？魏斯曼說：「只要打一針就能修正鐮狀細胞。我們認為這是顛覆傳統的新療法。」

信使RNA的潛在商機龐大，莫德納與BioNTech至少就有5人現在已經成為億萬富翁，班塞爾也在其中。魏斯曼並不在這5人之列，但他可望拿到專利權利金。他說自己比較喜歡待在學術圈，不會有人叫他研究哪個領域或不要研究哪個領域。他一直在尋找下一個科學大挑戰，「這不是說新冠疫苗是舊聞了，只是大家已經確定疫苗有用，」他說，信使RNA的「前途不可限量」。

# GPT-3 語言模型

撰文／海文 (Will Douglas Heaven)

攝影／Sierra&Lenny

OpenAI的語言人工智慧精準掌握語言能力，讓全球驚豔不已，但這一切都是錯覺嗎？



自從DeepMind的AlphaGo或IBM的西洋棋電腦「深藍」之後，最能引發大家想像空間的人工智慧，非GPT-3莫屬。

GPT-3由位於舊金山的研究實驗室OpenAI打造而成，是一個「大型語言模型」，它的運算法使用深度學習技術，從成千上萬本書籍和網路內容學習，將單字和詞語串連起來篇章。在2020年問世時，GPT-3將人類書寫文字模仿得維妙維肖，被很多人視為是機器智慧 (Machine Intelligence) 的里程碑。

舉個實例 (註：原文為英文)：

研究團隊前進至今無人探索過的安地斯山脈山谷，赫然發現，這處化外之境竟然棲息著一群獨角獸。更讓研究團隊驚訝的是，獨角獸還說著一口標準英文，滿頭鬃髮整理得漂漂亮亮，看上去還化了妝。

「我們很震驚會發現獨角獸，」人類學家莫利斯 (Daniel St. Maurice) 說：「從來沒有見過這種生物。大家都聽過獨角獸的傳說，但從沒有想過牠們真的存在。」

研究人員初抵山谷時，獨角獸看到人類雖然驚嚇，卻也難掩興奮之情，歡迎研究人員的到來，還說已經等待人類很久了。

從這段文字可見，GPT-3可以造出複雜句子，讀起來跟真人文字沒有兩樣，段落內容涵蓋文化典故，寫到科學家有何反應的部分亦有可信度。機器能夠如此使用語言是重大進展，因為語言是理解人類世界的關鍵所在，人類靠它互相溝通、分享想法、說明觀念。人工智慧若能精通語言，過程中將可進一步了解人類世界。

大型語言模型也有許多實用面：可以改善聊天機器人的技術，讓對話更流暢；在人工文字的提示下，可以針對各種主題產生文章和故事；可以總結一段文字或針對段落回答問題。目前雖然只有受到邀請的人才能使用GPT-3，但已經有幾10個應用程式開始使用這項技術，包括一款會生成新創企業構想的工具，以及背景設在地牢、以人工智慧撰寫腳本的冒險遊戲。

GPT-3並非唯一在2020年登場的大型語言模型，微軟、Google與臉書都陸續公布自家技術，但GPT-3是其中最佳的通用型人工智慧，還給人什麼都能寫的印象，例如同人小說、哲學論辯，甚至是程式碼也沒問題。去年夏天，大家開始自行測試GPT-3的功力，社群媒體冒出成千上萬則實例，內容展現出它的文字多樣性。甚至有人在爭論GPT-3是不是第一個通用型人工智慧。

## 獲選原因：

以大型電腦模型學習自然語言，有助於提升人工智慧對人類世界的了解與互動。

## 重要參與者：

- OpenAI
- Google
- 臉書

## 成熟期：現在



答案是否定的。儘管GPT-3能夠產生高度可信的文字段落，但技術原理並不新，而是證實規模才是王道。為了打造GPT-3，OpenAI採用的技術與運算法跟上一代的GPT-2大同小異，但大幅擴大了神經網絡與訓練工具。GPT-3用了1,750億個參數（網絡在訓練過程可以調整的數值），遠遠高於GPT-2的15億個，訓練的數據量亦多出許多。

在GPT-2之前，使用深度學習技術訓練語言模型通常分兩個階段：先是以通用型數據集訓練，讓模型對語言建立基礎了解，再以具有特定任務的數據集訓練，例如理解或翻譯。GPT-2讓大家看到，只要在更大的模型丟進更多例子，各個主題都能有好結果，因此OpenAI在研發GPT-3時加大規模，推出有史以來最大的語言模型。

但這些讓大家眼睛為之一亮的輸出結果往往事先挑選過。實際上，一旦段落字數超過幾百個字，GPT-3經常會有重複文字或自相矛盾的現象。GPT-3犯下的愚蠢錯誤，往往因為它的妙筆生花而被掩蓋了，通常需要試過幾次，才能出現不見破綻的文字。

GPT-3也讓人無法忽視人工智慧日益嚴重的問題。它的龐大耗能對氣候不啻是壞消息。丹麥哥本哈根大學的研究人員預估，如果訓練GPT-3的資料中心完全採用化石燃料電力，過程所形成的碳足跡大約等於開車往返月球一趟。此外，訓練成本高昂，只有深口袋的實驗室才負擔得起——部分專家預估，訓練GPT-3至少要1,000萬美元。

OpenAI指出，GPT-3的訓練過程消耗幾千個petaflop/s-day的運算能力（petaflop/s-day是指每秒執行1,000千兆次浮點神經網絡運算的單日能耗單位），反觀GPT-2只消耗幾10個petaflop/s-day。

另一個問題是，GPT-3吸收了網路大多數的假消息和

偏見資訊，也能應要求複製。研發團隊在論文中描述這項技術時寫道：「以網路訓練模型，會出現網路規模般的偏見。」

GPT-3為機器產生的文字添加「人味」，反而讓讀者更容易相信。也因此，有些人認為GPT-3和所有人工智慧語言模型都應該附上安全警告，提醒使用者正在跟軟體對談，而不是真人。

幾個月前，有人在Reddit網站推出一款由GPT-3驅動的聊天機器人，發表了幾百則評論，也與數10個用戶進行互動，過了幾天才公布真實身分。雖然內容大致無害，但聊天機器人也回覆過幾則提到自殺念頭的言論，提供「個人」建議讓對方參考，說到自己有父母的支持。

儘管GPT-3有這些問題，但看在以規模至上的人眼中，還是一大技術突破，顯示出，運算能力與數據量是發展關鍵，兩者未來預計會愈來愈多。GPT-4會是什麼模樣？聊天機器人預計更會出口成章、更懂得產生內容連貫的長篇段落、更加精通天南地北的對話主題。

然而，想要了解世界、與世界互動，語言只是一個途徑，下一代的語言模型會納入其他技能，圖像辨識便是其一。OpenAI正在朝這個方向訓練GPT-3，採用的人工智慧能以語言了解圖像，以圖像了解語言。

想知道目前深度學習技術的進展，看GPT-3就對了，人工智慧最好與最壞的一面都縮影在裡頭。

## 鋰金屬電池

撰文／坦波（James Temple）

攝影／溫特梅爾（Winni Wintermeyer）

新型電池可望問世，讓電動車跟汽油車一樣便利又平價。

### 獲選原因：

礙於電池性能的限制，環保的電動車先前遲遲無法普及，電動飛機也幾乎淪為空想。

### 重要參與者：

· QuantumScape · 三星先進技術研究院  
· Solid Power · 24M

### 成熟期：2025年

縱使電動車的討論度居高不下，又承載了各界期望，但它終究只占美國新車銷售量約2%而已，全球比重也只高出一點。

對許多消費者而言，電動車價格太貴、續航力有限、充電又遠遠不如到加油站加油快速方便。種種限制都跟鋰離子電池脫不了關係，電動車的鋰離子電池又貴又重，耗電快速，更傷腦筋的是，還使用液態電解質，撞擊時容易起火。

想讓電動車的競爭力趕上汽油車，勢必要有突破性的電池技術克服這些缺點，至少QuantumScape公司執行長辛格（Jagdeep Singh）是這麼認為。這家位於矽谷的新創企業聲稱已經研發出新技術，解決了困擾研究人員近半個世紀的化學難題，也就是說：如何使用鋰（元素週期表上最輕的金屬）增加儲存在電池的能量，又不會造成常見的起火風險或犧牲性能。該公司指出能達到這點，是因為他們研發出易燃液態電解質的固態版。

德國龍頭車廠福斯汽車（VW）對此印象深刻，已經砸下幾億美元投資QuantumScape，並同意成立合資企業進行量產，2025年前旗下電動車與電動卡車將採用這款新電池。

## 充電快，續航力久

在傳統的鋰離子電池中，陽極大多由石墨製成。石墨由碳元素組成，能夠輕易吸收和釋放透過電解液穿梭於陰陽極的帶電鋰離子。荷電粒子流動產生電流，讓電池可以幫產品充電。但石墨單純只是鋰離子的載體，鋰離子處在一層一層碳原子當中，彷彿架子上的包裹。石墨本身無法儲存能量，也無法製造電流。



換成是鋰金屬電池，陽極即是由鋰製造，所以陽極的每個原子幾乎都能製造電流。理論上，跟同重量、同體積的石墨陽極相比，鋰金屬陽極能夠儲存的能量多出一半。

然而，研究鋰金屬電池、並擔任QuantumScape顧問的卡內基美隆大學（Carnegie Mellon）副教授魏茲瓦納森（Venkat Viswanathan）說，鋰金屬的活性高，經常接觸液態電解質會誘發反應，導致電池老化或起火。另一個問題是，隨著鋰離子來回流動，電池會形成所謂「枝晶」（Dendrite）的針狀結構，造成電池短路或著火。

經過10年低調耕耘的QuantumScape，在2020年11月掛牌上市，目前對於部分關鍵細節仍舊保留，不願說明旗下的固態電解質電池如何解決這些問題。但看起來，新型電池的性能相當優異。

這家新創企業在12月舉辦線上說明會，展示實驗室的單層極板電池原型，秀出一連串圖表說明它在15分鐘就能充電超過8成、續航力達幾10萬哩、在零下溫度也能運作正常。該公司預計新電池能將電動車的續航力提升逾8成，亦即原本目前充電一次能跑250哩的車，未來可望跑450哩。

「QuantumScape讓我很驚豔，」任職於橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory），曾率先研究固態電解質的電池研究員達德妮（Nancy Dudney）說：「第一印象很好，」但也補上一句：「其他電池技術也曾經是這樣。」

確實，電池領域不乏類似案例，新創企業打著突破性技術的大旗，最後卻無疾而終。此外，QuantumScape未來還面臨重大關卡，尤其是必須將原型電池轉換成能夠低成本生產的商品。

做到了，該公司就有機會翻轉電動車市場。一旦成本降低、續航力增加、充電跟到加油站加油一樣方便，市場需求將會擴大，不再局限於有錢在家裝設充電樁的人，消費者也不必擔心出遠門開到一半會沒電。

隨著能量密度提高與充電速度加快，其他交通工具也更有機會電動化，包括長途卡車運輸或甚至是短程空運。（額外的好處是，手機與筆電充一次電就能持續使用好幾天。）





## 電池的誕生

鋰金屬電池的故事始於1970年代早期，與當今鋰離子電池的發展息息相關。

當時爆發石油危機，加上市場冒出石油產量可能觸頂的隱憂，各界突然對電動車感到興趣，成為汽車產業誕生以來首見。正如科學作家傅萊奇（Seth Fletcher）在著作《瓶中閃電》（Bottled Lightning）寫道，到了1972年，美國汽車（American Motors）、克萊斯勒、福特、通用汽車、豐田、福斯等大車廠紛紛投入電動車研發。此外，包括奇異（GE）、陶氏化學（Dow Chemical）、埃克森（Exxon）在內的大型工業實驗室，也在研發更好的電池化學技術。

當時的電池多為鉛酸電池，續航力與速度遠遠不及燃氣引擎。1969年，通用汽車推出電動概念車512號，標榜最高時速約30哩，續航力達47哩。

1972年，埃克森的研究部聘用名為威廷漢（Stan Whittingham）的年輕化學家，看中他在史丹佛大學的博士後研究。他當時正在研發能讓離子輕易流進流出的晶體材料。威廷漢任職埃克森後，與同事開始實驗一種

有發展潛力的多孔材料「二硫化鈦」，準備用於陰極。陽極的材料則是金屬鋰，這是一種活性高、能夠輕易釋放電子的材料。兩者搭配的效果出乎意料得好。

研究團隊在1973年申請專利，1976年在《科學》期刊發表具有里程碑意義的論文，1977年在車展展示大型版電池。

到了1980年代初，石油危機已經落幕。埃克森管理層易主，決定放棄每年市場規模潛力未達1億美元的業務，於是收掉電動車與電池部門。「他們說這塊市場太小，不值得參與，」威廷漢說。

## 鋰離子電池崛起

鋰金屬電池當時的性能已遠高於鉛酸電池，但也有埃克森研究團隊一直無法克服的缺點，包括容易在實驗

室裡起火。

其他研究人員也想把鋰金屬電池商用化，同樣面臨類似問題。1980年代，位於加拿大卑詩省的莫力能源（Moli Energy；現為能元科技）研發出2.2V的鋰金屬電池，用於筆電與手機。但根據加拿大電力自主（Electric Autonomy Canada）媒體公司報導，日本在1989年發生民眾因為手機著火而燒傷的事故，經調查後認定是電池所致，成千上萬支手機於是遭到回收，該公司也進入破產接管程序。

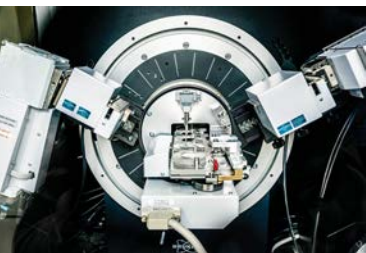
同一時期，其他公司則以威廷漢的研究成果為基礎繼續努力。現為奧斯丁德州大學教授的古德納（John Goodenough）捨棄二硫化鈦，改採氧化鈷研發能夠儲存更多能量的陰極。名城大學教授吉野彰（Akira Yoshino）將陽極的純鋰換成焦炭，仍舊可以儲存大量鋰離子，卻降低了起火風險。最後，索尼的研究人員整合這些技術，在1992年研發出第一款商用鋰離子電池。威廷漢、古德納與吉野彰的努力帶動電池技術突破，在2019年共同榮獲諾貝爾化學獎肯定。

如今，鋰離子電池已是筆電、手機與電動車的電源主流，但也因為當時空前成功，扼殺了後來幾年鋰金屬技術的商用研發。所幸，有些人從未忘懷鋰金屬的發展潛力，看好它有更優異的儲能效率。標準的液態電解質形同易燃溶劑，如果能以固態電解質取代，對他們而言更是值得探究的方向。

2000年前後，橡樹嶺國家實驗室的團隊採用固態鋰金屬技術，研發出一款薄膜電池（類似用於智慧卡與心率調節器等小型電子產品的電池）。馬里蘭大學的電池專家艾伯特斯（Paul Albertus）指出，薄膜電池礙於製程、大小與形狀的限制，只能用於體積大於手錶的應用面。但這項研發成果證實鋰金屬電池實際可行。

## 前浪死在沙灘上

到了2000年代晚期，新創企業紛紛再度看上這項技術，但是事實證明，這條研發之路不好走。



QuantumScape的電池陰極來自這條生產線。下圖為X光繞射儀，用於檢查電池零組件。

有幾家公司已經關門大吉。德商博世（Bosch）收購成立於2007年的Seeo，後來中斷其電池研發業務。法商Bolloré在2011年推出藍車（Bluecar）共享計畫，成為全球第一家使用固態鋰金屬電池於汽車的業者，但高分子電解質只適用於較高的溫度，因此在乘用車的用途有限。

反觀其他幾家企業近年有所進展。最值得一提的是，QuantumScape去年12月說明會後兩天，位於卡羅拉多州，成立於2012年的Solid Power宣布，已準備好測試量產22層鋰金屬電池，續航力預計超過目前的電動車電池。

今年1月，美國能源部的先進能源計畫署（ARPAE）公布，將提供900萬美元資金給電池公司24M與卡內基美隆大學的魏茲瓦納森，協助研發進階鋰金屬電池，計畫用於每公斤儲能量與輸出功率都是關鍵的電動飛機。

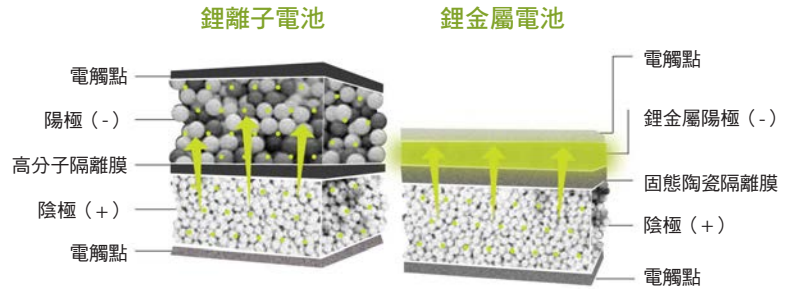
## 成立QuantumScape

對每家研發鋰金屬電池的公司來說，難就難在找出適合的電解質材料，避免起火與枝晶現象，同時又能讓離子輕易流通，而且不會降低電池性能。QuantumScape聲稱這些都做到了。

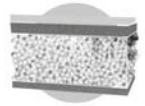
該公司成立於2009年，辛格當時在與人共同創辦的網通公司英飛朗（Infinera）擔任執行長，正準備卸任，於是找上史丹佛大學博士後研究員荷姆（Tim Holme）與其指導教授普林茲（Friedrich Prinz），希望借重他們對新型電池材料的研究為基礎，成立一家公司。

三人隔年共同創辦QuantumScape，旨在研發高能量密度、高輸出功率的電池。他們原本希望研發出一款採用全新技術的「全電子電池」（All-Electron Battery），但後來發現難度比預期更高。

該公司那時已經從凱鵬華盈（Kleiner Perkins）與科斯拉創投（Khosla Ventures）等



在鋰離子電池中，鋰離子在電池充放電時穿梭於陰陽極之間。在QuantumScape的電池中，離子穿過隔離膜，在隔離膜和電觸點形成平面層，充電時會產生陽極，電力耗盡時沒有陽極（如右圖）。



創投公司籌得數千萬美元，所以還有足夠資金低調轉換路線，改為追求鋰金屬技術的夢想。

辛格說，公司花了5年尋找最適合做成固態電解質的材料，又花了5年時間研究出正確的組成比重與製程，成功避免缺陷和枝晶。公司只願意透露電解質的材料是陶瓷。

## 技術成熟了嗎？

到目前為止，QuantumScape測試的都是單層極板電池，若要應用於汽車，必須生產出有好幾10層的電池，好比從一張紙牌疊成一副紙牌。該公司還必須設法降低生產成本，才能抗衡已經主導市場數10年的鋰離子電池技術。

這是一項龐大的工程考驗。「他們的路才走到一半。150個人花了3億美元和10年時間研發，現在做出了這張紙牌，」馬里蘭大學的艾伯特斯說：「還有一段很長的距離要走，才能產出成千上萬公噸的電池，難度真的很高。」幾位接受我訪談的電池研究人員都認為，QuantumScape應該無法及時拉大產能和完成安全測試，趕在4年後推出汽車電池。

但考量該公司的成果，加上其他新創企業也傳出捷報，電池產業大多數人確實認為，鋰金屬電池長達幾10年的技術瓶頸有機會解決，本刊因此將它列為2021年十大突破性技術。可以確定的是，自從威廷漢在埃克森開始研發這項技術以來，至今雖然已有長足進展，但未來幾年還有待加油。■