



水泥， 堅固難催的氣候課題

水泥是一場氣候夢魘，
但有家企業要使用電力改變現狀。

撰文／柯朗哈（Casey Crownhart）

攝影／歐康納（Bob O'Connor）

翻譯／連育德

以不同模具製作的賽伯朗固化水泥。



非碳酸鹽礦物。



賽布朗的矽酸鹽（上）與石灰（下），這是賽布朗水泥的兩大活性成分。



水泥隱身於日常生活，建造道路、大樓、水壩、地下室地板等等，都會用到它，但這些無所不在的灰色板塊，卻掩藏著氣候危機。水泥生產占全球二氧化碳排放量的7%以上，高於航空、航運、垃圾掩埋場等產業。

不論形式，人類製造水泥已有數千年歷史。古羅馬人把火山灰、碎石灰與海水混在一起，打造出引水道與萬神殿等代表性建築。現代版的硬水泥（亦即與水作用後會逐漸硬化）可追溯到

19世紀初，原料取得方便，製作起來簡單又便宜。發展至今，水泥已是全球最普及的建材之一，每年產量約40億噸。

水泥產業是一個多面向的氣候難題。水泥製



程的能源密集度高，傳統水泥窯的內部溫度比火山爆發的熔岩更高，因此通常需要燃燒煤炭等化石燃料。製程還必須產生特定的化學反應，將磨碎的礦物轉換成水泥，過程會釋放出二氧化碳，也就是大氣中最常見的溫室氣體。

這場氣候浩劫的解方，可能就在賽布朗系統公司（Sublime Systems）的管路裡。這家新創企業由兩名麻省理工學院電池科學家所成立，他們正在研發全新的水泥製程，不在超高溫的水泥窯把碎石加熱，而是將碎石放在水中通電，觸發化學反應，藉此形成水泥的主要成分。

幾年前，賽布朗只能批次生產手掌大小的水泥，如今已經成立試點工廠，年產能約100噸，雖然遠遠不及年產量動輒百萬噸的傳統水泥廠，但形同跨出重要的第一步，證明電化學也有能耐生產這種在全球舉足輕重的建材。

賽布朗計畫在2030年前成立規模完整的水泥廠，年產能達百萬噸。然而，傳統大規模水泥廠的興建與裝備成本高達10億美元以上，賽布朗若想跟既有業者競爭，必須迅速擴產，同時進一步籌資來推動成長力道。零利率時代不再，加深各行各業的籌資難度，但對水泥業者更是如此。此外，營建業是高風險、低毛利的產業，賽布朗還得先說服建商採用這種新型水泥。

水

泥產業每年碳排放量高達26億噸，要減碳必須解決水泥的兩個溫室氣體來源，也就是高溫與化學反應。

在現行製程中，石灰石、矽砂與黏土經過混合後研磨，經旋窯以攝氏1,500度的高溫鍛燒。高溫產生化學反應，將石灰石轉化為石灰，再跟矽砂與黏土的二氧化矽結合。這些化學反應很複雜，但最終的產物通常是一些矽、鈣與氧化物的混合物，讓水泥加入水與砂石後能夠硬化成混凝土，形成堅固的建材。

除了水之外，人類（以重量計）使用最多的

建材就是混凝土。水泥是混凝土的黏著劑，占體積約1成。

分析水泥製程的溫室氣體排放量，約4成來自於產生高溫的化石燃料。這是重工業的通病；非營利研究組織氣候工作基金會（ClimateWorks）的產業小組主管黛爾（Rebecca Dell）說，化石燃料的成本低，已經深植於工業製程。然而，隨著低成本的再生能源逐漸併入電網，愈來愈多工業領域也有機會改採電力。

以電窯生產水泥不再遙不可及，包括西麥斯（Cemex）在內的幾家大廠正在測試這項技術，以期降低高溫產生的碳排。電窯如果以再生能源發電，或許有助於降低水泥的氣候衝擊。

即便如此，水泥製程的其他碳排來源仍舊無解，約6成碳排並非來自高溫，而是將原料轉化成建材的化學反應。

多數水泥源自於石灰石，這是一種含有鈣、氧與碳的沉積岩，在水泥窯經化學反應後變成石灰，過程中會去除二氧化碳，通常釋放於大氣。二氧化碳占石灰石質量約一半，因此碳排加起來也很可觀。也就是說，水泥產業若要完全減碳，可能需要徹底改造。賽布朗從中看到機會。

「水泥這麼有意思，卻被大家忽略了。」賽布朗共同創辦人與執行長艾莉絲（Leah Ellis）說。她語速飛快，彷彿在趕時間，帶著加拿大口音滔滔不絕。她說明著複雜的水泥化學，粉紅鏡框下的雙眼炯炯有神。

艾莉絲原本並沒有打算走建材這一行。在加拿大長大的她，研究所的指導教授正是著名的電池技術先驅達恩（Jeff Dahn）。她後來到麻省理工學院攻讀博士，這次的指導教授是蔣業明，不但在電池研究同樣舉足輕重，更有多次創業經驗。蔣業明成立過幾家能源儲存公司，包括A123 Systems、24M與Form Energy等，目前與艾莉絲同為賽伯朗的共同創辦人。

艾莉絲剛到麻省理工學院，蔣業明便建議她一個不一樣的研究題材。她還記得被蔣業明叫



麻省理工學院教授蔣業明與賽布朗系統公司執行長艾莉絲，兩人在2020年共同創辦公司。

到辦公室，竟然問她是否覺得研究電池很無趣。

「我以為他是要套我的話。」她說：「畢竟他是有名的電池科學家。」但蔣業明有個構想，希望採用電化學這項電池化學技術，創新水泥製程。

他認為，不必燃燒化石燃料為水泥窯加溫，使用電力也可能觸發生產水泥所需的化學反應。

研究團隊後來發現可以使用電解裝置做到。電解裝置利用電力引發化學反應，通常用於將水

分解成氫氣和氧氣。但電解裝置也能產生其他化學反應，例如酸與鹼，可能握有新型水泥製程的關鍵。

到了2019年，艾莉絲與幾名研究同仁研發出新技術，有機會實現蔣業明的初步構想。他們發現可以用電解裝置在槽中形成酸鹼值梯度，溶解的石灰石在酸性端，熟石灰在另一端。石灰接著與活性二氧化矽結合，形成與傳統水泥一樣的化合物。

後續再經過一些技術研發與產業分析，兩人決定以這項研究為基礎創辦公司，由艾莉絲掌舵。蔣業明說：「研究沒多久後，我就意識到這個構想可行，也有人可以推動。」

艾莉絲與實驗室夥伴在麻省理工學院的實驗初期，用這項技術生產的原料，只夠做出一個模具的水泥，如今

賽伯朗經營4年，試點工廠上路營運，等於是跨出重要的一步。賽布朗的工程主任考伯特（Mike Corbett）說，生產線在2022年底啟動，產能規模是實驗室的20倍。

來到公司總部的試點工廠，空間龐大，牆面從左到右排列著不鏽鋼槽。在廠房一側的鋼槽放進磨碎的岩石，另一側的鋼槽則輸出熟石灰，亦即賽布朗水泥的主要成分之一。



經過多次試驗的最終成果就在旁邊，幾個5加侖的桶子堆放在鐵架上。考伯特和一位同事打開其中一個蓋子，裡頭裝滿熟石灰，外觀彷彿白色的粉筆粉末，有點結塊，就像小蘇打粉在盒子裡放太久一樣。

這些桶子的熟石灰還不夠蓋東西，工廠即使產能全開，也要一星期的量才能供應一輛混凝土車。以美國一般獨戶住宅為例，灌注地基需要3、4輛卡車的水泥。

賽布朗選擇將原料出貨到潛在夥伴、測試水泥砌塊、協助設計下一個水泥廠，又以後者為重要，因為新廠的規模將比目前大出許多，最終證實賽伯朗的製程適用於水泥產業。

力 求綠化水泥製程的企業，並非賽伯朗一家。曾任職於非營利研究機構洛磯山研究中心（Rocky Mountain Institute）產業小組、現為氣候必行基金會（Climate Imperative Foundation）倡議主任的拉莉特（Radhika Lalit）說，水泥產業的初期減碳工作聚焦在生產效率，例如加入一種稱為輔助膠結材料的填料，能夠與水泥中的活性成分產生反應，有助於減少總排放量，而不影響混凝土的特性。

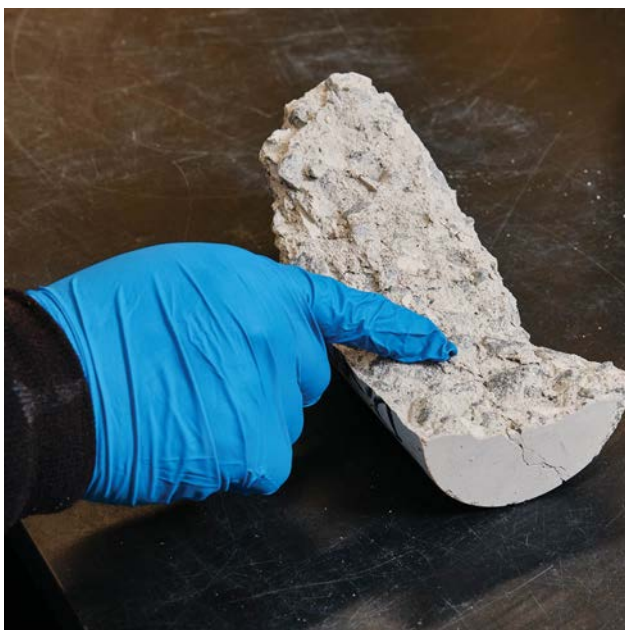
但拉莉特指出，這個做法有侷限，填料加太多會開始降低水泥的強度與壽命。

水泥還能加入其他材料來降低氣候衝擊。比方說，加拿大公司解碳科技（CarbonCure Technologies）研發出一種新技術，能將二氧化碳注入水泥混合物。該公司指出，二氧化碳與水泥混合物作用，產生碳礦化，把二氧化碳鎖在水泥裡而不會釋放到大氣，又能增加強度。解碳科技公司正在與赫倫碳科技（Heirloom Carbon Technologies）等碳移除公司合作，展示如何以混凝土長期儲存二氧化碳。

但無論是降低原料使用量或加入填料，減碳成效終究有限，不可能無止盡靠提升效率來達到



賽布朗的員工從設備拿下活性二氧化矽，這是研發製程的一環。



賽布朗的員工操作圓柱型混凝土，測試水泥的抗壓強度。

試行工廠即使產能全開，
也要一星期的量
才能供應一輛混凝土車。

零碳排。拉莉特說，基於這個原因，許多水泥大廠希望在既有工廠添加碳捕捉與封存廠，在廢氣排放到大氣前捕捉二氧化碳，有助於工廠減少碳排，讓水泥產業不必完全被取代。

在既有的基礎設施增建碳捕捉技術，能夠延長傳統設備的壽命，對近年新蓋的水泥廠是一大福音，因為水泥廠的營運時間往往長達30到50年。但碳捕捉對重工業是否真的有效，尚未完全證實；拉莉特說，現行技術常常無法捕捉全數碳排，而少數既有的大型碳捕捉廠也面臨工期延宕。

根據洛磯山研究中心的數據，為了順利達到淨零目標，水泥產業必須在2030年前，在33到45座既有水泥廠增設碳捕捉設施。第一座工業規模等級、附加於水泥廠的碳捕捉設施預計今年上路。

碳捕捉系統的成本預計不斐，去除一噸二氧化碳的成本高達120美元，艾莉絲說這大約是目前水泥最終成本的1倍。

也是因為成本考量，賽布朗與多家新創企業不走碳捕捉路線，而是希望以非傳統的方式降低水泥碳足跡。

位於加州的布林斯通（Brimstone）是另一家資金雄厚的新創企業，以所謂的負碳排製程生產水泥。照公司執行長芬克（Cody Finke）的說法，這個製程最終從大氣吸附的二氧化碳高於排放量。

製程分為兩大部分。首先，布林斯通不採石灰石，用的是稱為矽酸鹽的礦物，芬克說矽酸鹽不含二氧化碳，因此水泥製程不會產生碳排。此外，矽酸鹽的廢棄物包括一種含鎂的原料，作用有如海綿，能夠吸收空氣的二氧化碳，進行碳礦化。

布林斯通的製程還是會產生碳排，主要是高溫所致，但芬克說，碳排能夠被碳礦化過程抵銷，尤其該公司又計畫使用電窯。該公司指出，如果電窯以一般美國電網供電，則原料的



賽布朗總部內的設備。該公司正在設計下一個廠房，產能預計更高。

減碳量最終會高於碳排量，每噸水泥大約高出130公斤。

儘管有能源需求也會產生碳排，但布林斯通堅持高溫製程，因為它用的是水泥產業的主流化學配方。一般人所知的水泥通常就是所謂的波特蘭水泥，它的歷史可追溯到19世紀初，能夠生產品質穩定又強固的混凝土。但問題是，過程需要超高溫，因為這種水泥的重要成分之一是矽酸三鈣，必須在攝氏1,250度以上的高溫才能形成。

賽布朗原本也計畫生產波特蘭水泥。「考量水泥的成本低，我們覺得應該生產市場已經在用

的水泥種類。」蔣業明說。但礙於製程的高溫需求，賽布朗擴大產能時不得不重新思考：「這個發明已經存在200年，我們卻想要創新。」

研究團隊決定另闢蹊徑，找到其他方法達到理想的化學鍵，強度媲美以波特蘭水泥生產的混凝土。賽布朗的原料不用矽酸三鈣，而是使用石灰與活性二氧化矽，跟水作用後產生最終原料。

選擇採取哪種水泥化學，乍看之下可能是小問題，但對營建業這樣的重大產業，卻可能是關鍵，決定了哪些新創企業能夠拿到大單與客戶，哪些企業又會消失匿跡。「大家對新型水泥會抱

「水泥可能是最難經營的新創企業類型之一， 不只是有技術難度，資本密集度也很高……而且不光鮮亮麗。」

持問號，我覺得情有可原。」艾莉絲說完立刻更正自己：「但它也不能算是新型水泥。」

艾莉絲認為，賽布朗的水泥跟波特蘭水泥一樣堅固耐用，甚至有過之而無不及。但氣候必行基金會的拉莉特說，研發人員一開始有可能卻步，不肯放棄已知的原料。

如何大規模生產水泥、用於大型建案，是賽布

朗的重大考驗之一。現代水泥廠的年產能通常超過100萬噸，賽布朗的試點廠只有100噸左右。差不多是「給螞蟻用的水泥廠」，艾莉絲說。

賽布朗把目標放在迅速擴大產能，下一個階段是要成立展示性質的商用級水泥廠，年產能達幾萬噸，預計在2026年初開始生產。「這樣的規模就能在水泥產業有能見度。」艾莉絲說。

再之後會有規模完整的商用水泥廠，年產能達100萬噸，跟一般水泥產一樣。賽布朗仍在規劃設廠地點，但希望在2028年正式啟用。

對於未來的挑戰，賽布朗兩位創辦人並無不切實際的想像。

「水泥可能是最難經營的新創企業類型之一。」艾莉絲說：「不只是有技術難度，資本密集度也很高。產能規模要很大，而且又不光鮮亮麗……大家都會用到水泥，但不會放在眼裡。」

然而，如果能解決這個看不見的問題，就有機會翻轉全世界。水泥是撐起人類社會的鷹架，儘管創新製程不乏龐大考驗，卻攸關未來營建業的減碳成績單。■



賽布朗一名員工將水泥裝袋，準備出貨給客戶。

克朗哈（Casey Crownhart）是《麻省理工科技評論》的氣候記者。

Copyright©2024, Technology Review.
All Rights Reserved.