

Ferruccio Trifirò

Professore Emerito Università di Bologna

ferruccio.trifiro@unibo.it

PRODUZIONE INDUSTRIALE DI MOF E LORO UTILIZZO

I MOF, materiali cristallini con pori di dimensioni nanometriche e con un'elevata area superficiale, sono di grande interesse anche in ambito industriale. La loro rilevanza industriale è ancora in una fase embrionale, ma in costante crescita e consolidamento, soprattutto da quando sono emerse strategie di sintesi che limitano o eliminano l'uso di solventi organici e permettono produzioni in continuo.

Nella conferenza di Stoccolma, in occasione del conferimento del Premio Nobel per la Chimica, Susumu Kitagawa ha citato la presenza di 55 start-up nel mondo nel periodo 2011-2025, dedite alla sintesi di MOF su larga scala per svariate applicazioni, soprattutto nei settori della purificazione, della cattura e del rilascio controllato di molecole di interesse energetico, ambientale e sanitario. Al momento sono disponibili molte analisi tecnico-economiche che prevedono per questi materiali un rapido sviluppo e un solido posizionamento nel panorama industriale del prossimo decennio [1].

In questo breve articolo si riportano alcune note su alcune delle principali industrie produttrici di MOF.

BASF e i MOF

La BASF (azienda tedesca) è stata la prima al mondo ad avviare su scala commerciale la produzione di MOF [2], in quantità di diverse centinaia di tonnellate all'anno, oltre a vendere su larga scala i più comuni leganti usati per la loro sintesi. Alcuni dei MOF prodotti sono utilizzati come assorbenti solidi per la cattura e la rimozione della CO₂ emessa da attività industriali.

Un esempio di successo è quello sviluppato dall'azienda canadese Svante, specializzata nella produzione di materiali adsorbenti per la decarbonizzazione delle attività industriali in diversi settori, tra cui la produzione di idrogeno, carta, cellulosa, cemento, acciaio, alluminio e vari prodotti chimici. Uno dei MOF utilizzati è il CALF-20 [3], a base di [Zn₂(1,2,4-triazolato)₂(ossalato)].

Framergy e i MOF

Framergy, azienda americana, ha utilizzato i MOF per purificare il metano presente nel gas naturale, intrappolando le altre paraffine tramite adsorbimento selettivo e ottenendo metano puro al 100%. La tecnologia sfrutta la loro struttura unica a "gabbia", con un'area superficiale ultra elevata e porosità permanente, per massimizzare la cattura delle altre componenti del gas naturale [4].

L'azienda ha impiegato grandi cristalli singoli del MOF AYRSORB F250 [5], una struttura metallorganica prodotta per reazione di gruppi Ti₈O₈(OH)₄ con acido amminotereftalico e leganti organici a base di acido azobenzenetetracarbossilico (ABTC). Utilizzando questo MOF, Framergy ha eliminato etano, propano e butano presenti nel gas naturale, per poi bruciare il metano per ottenere energia, producendo meno CO₂.

MOFapps e i MOF

MOFapps è un'azienda americana [6] che ha utilizzato i MOF per:

- sistemi di raffreddamento e deumidificazione, sostituendo materiali come gel di silice o zeoliti;
- rimozione diretta della CO₂ dall'atmosfera (DAC);
- raccolta dell'acqua dall'aria anche a valori di umidità molto bassi - una tecnologia potenzialmente salvavita, considerando che oltre 2 miliardi di persone soffrono per la carenza di acqua;
- eliminazione di gas tossici in ambienti civili e in presenza di armi chimiche.

L'azienda ha sviluppato un MOF speciale della famiglia UiO-66(Zr) ossia Zr₆O₄(OH)₄(CO₂)₁₂ [7], una struttura connessa con leganti a base di 1,4-benzenedicarbossilato (BDC). Questo MOF è utilizzato anche in medicina [8].

Mosaic Materials e i MOF

Mosaic Materials è un'azienda americana [9] che ha utilizzato i MOF per catturare la CO₂ da vari flussi di gas emessi da diverse tipologie di industrie,

oltre a occuparsi della cattura diretta della CO₂ dall'aria (DAC). L'azienda è stata recentemente acquisita da Baker Hughes [10].

Come adsorbente è stato utilizzato un MOF a base di diammine di Mg₂(dobpdc) [11], dove (dobpdc) è [4,4'-diossido-bifenile-3,3'-dicarbossilato], funzionalizzato con le seguenti ammine: *N,N'*-dimetiletilenediammina (m-2-m); tetraetilenepentammina (TEPA); poli(etileneimmina) (PEI).

MOF Technologies e i MOF

MOF Technologies (azienda inglese), acquisita da NUADA, ha sviluppato diversi utilizzi dei MOF [12], tra cui:

- tecnologie di adsorbimento a pressione variabile e sotto vuoto, abbinate a un filtro a base di MOF progettato per catturare e rimuovere la CO₂ prodotta da lavorazioni industriali, ideale per settori difficili da decarbonizzare come quello del cemento [13];
- cattura di gas tossici ed esplosivi in modo più efficiente;
- nuovi livelli di protezione respiratoria contro gas tossici;
- un impianto pilota per l'adsorbimento di CO₂ ottenuta in un impianto di produzione di biocombustibili da biomasse [14];
- abbattimento della CO₂ nella produzione di acciaio.

Strem Chemicals e i MOF

Strem Chemicals è un'azienda americana attiva nella produzione di MOF e dei relativi leganti [15], utilizzati principalmente per:

- l'immagazzinamento di idrogeno e metano;
- la deumidificazione e il trasporto di acqua potabile in zone remote [15].

Alcuni dei MOF utilizzati sono a base di [Fe₂M(μ₃-O)(CH₃COO)₆], dove M = Co²⁺, Ni²⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, denominati (Fe MOF), di cui ne sono stati sintetizzati 34 [16]; e [zinco-2-metilimidazolo], chiamato ZIF-8 [16], impiegato in un'ampia gamma di applicazioni: dallo stoccaggio e separazione di gas/liquidi, alla catalisi eterogenea per reazioni organiche, alla produzione di sensori elettrochimici e alla somministrazione di farmaci [17].

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Global Market for Metal-Organic Frameworks (MOFs) 2025-2035" Top 10 Companies in the Metal-Organic Frameworks (MOF) Industry (2025) <https://www.businesswire.com/news/home/20250506432808/en/Metal-Organic-Frameworks-MOFs-Global-Market-Report-2025-2035-with-Detailed-Profiles-of-45-Active-Companies-in-the-MOF-Space-Including-Start-ups-Established-Manufacturers-and-End-users---ResearchAndMarkets.com>
- [2] BASF commercially produces metal-organic frameworks for CO₂ capture in world first
- [3] A scalable metal-organic framework as a durable physisorbent for carbon dioxide capture
- [4] Framergy purifies methane from natural gas streams using MOFs and Coriolis mass flow meters
- [5] Framergy - AYRSORB T125
- [6] Applications - MOFapps - Application Services
- [7] Recent advancements in UiO-66(Zr) MOFs and their derivatives: Designing water-stable membranes for water applications
- [8] UiO-66 metal-organic frameworks in biomedicine: From structural tunability to bioimaging, photodiagnostics, and photodynamic cancer therapy
- [9] Mosaic Materials | C&EN Global Enterprise
- [10] Baker Hughes Acquires Mosaic Materials to Advance Next-Generation Carbon Dioxide Capture Technology
- [11] Amine-dependent CO₂ sorption on amine-impregnated Mg₂(dobpdc) MOF under humid conditions
- [12] MOF Technologies Rebrands to Nuada
- [13] MOF Technologies backed by industry leaders in drive to enable low-carbon cement - Renewable Carbon News
- [14] Nuada expands ultra efficient carbon capture to bioenergy
- [15] Chemical Manufacturer | Specialty Chemicals | High Purity
- [16] The Strem product line Metal Organic
- [17] Porous Zeolitic Imidazolate Frameworks (ZIFs)