



Claudio Della Volpe
UNITN, SCI
claudio.dellavolpe@unitn.it

UNA NUOVA OCCASIONE, NON SPRECHIAMOLA!

Questo numero de *La Chimica e l'Industria* è dedicato ai MOF, che potremmo definire come le strutture metallo-organiche che hanno vinto il premio Nobel per la Chimica del 2025. Il riconoscimento è andato a Susumu Kitagawa, Richard Robson and Omar Yaghi, che, con il loro lavoro, hanno portato allo sviluppo di una nuova classe di materiali con proprietà uniche. Potremmo anche chiamare i MOF *reticoli metallorganici*, materiali porosi composti di ioni o cluster coordinati a ligandi organici. Le loro applicazioni potenziali sono molteplici e ne vedrete illustrate alcune in questo numero o nella vasta letteratura internazionale. Giusto, dunque, dedicare un numero a questo tema.

Personalmente farei notare ai lettori anche un secondo tema di avanguardia, anch'esso molto recente e connesso, tanto che se cercate in letteratura trovate parecchi riferimenti appunto alla potenziale miscela di MOF e MXeni. Cosa sono gli Mxeni? Mentre i MOF sono quasi sempre strutture tridimensionali, (ma a dire il vero si possono pensare anche in due o perfino una dimensione) gli MXeni sono parenti stretti del grafene, dal quale mutuano il nome, i MXeni sono *“strutture lamellari con ampi spazi tra le lamelle (1 nm) che li rendono dei materiali bi-dimensionali con un ampio spettro di applicazione e adatti all'intercalazione di ioni. Basti pensare che*

nella grafite, materiale molto usato come elettrodo, lo spazio tra le lamelle è di circa 0,3 nm. Nel termine MXene, la M sta per metallo di transizione (Ti, V, Cr, Mo), X per carbonio (C) o azoto (N), mentre il suffisso -ene ricorda proprio la struttura del grafene. In pratica si possono definire come carburi o nitruri di metalli di transizione a struttura grafenica”. Ci sono gruppi italiani prestigiosi che ci lavorano come quello di UniMib (diretto da Riccardo Ruffo)

Come potete vedere dalla Fig. 1 l'idea è proprio di rimediare ad alcuni limiti dei MOF intrecciandoli strutturalmente con gli MXeni e introducendo dunque quelle proprietà prima di tutto di conducibilità, ma

anche di capacità, idrofilicità e infine di incremento della stabilità che mancano ai MOF.

Siamo dunque di fronte ad una fase enormemente innovativa della sintesi chimica; ma proprio per questo occorre fare molta attenzione, poiché in passato scoperte di questo tipo ci sono letteralmente “esplose in mano” procedendo su una strada che ha trascurato gli effetti ambientali legati sia alla produzione, che allo smaltimento che alla degradazione dei nuovi materiali.

Al momento i ‘Metal-Organic Frameworks’ (che è poi l'origine dell'acronimo MOF) offrono un enorme potenziale per attività complesse e necessarie: la cattura del carbonio, la separazione dei gas, il rilascio controllato di farmaci e la raccolta di acqua dall'atmosfera, etc., ma le loro applicazioni pratiche incontrano ostacoli dovuti alla scarsa stabilità idrolitica e termica, alle difficoltà di *scale-up* e lavorabilità, e agli elevati costi di produzione. Non ho dubbi che la maggior parte di queste difficoltà siano risolubili, il problema è: a quali condizioni? Facciamo qualche esempio. Consideriamo l'instabilità strutturale e ambientale.

Uno dei principali svantaggi di molti MOF risiede nell'elevata suscettibilità dei legami metallo-carbossilato all'umidità. In caso di esposizione prolungata ad acqua, acidi o variazioni di pH, questi

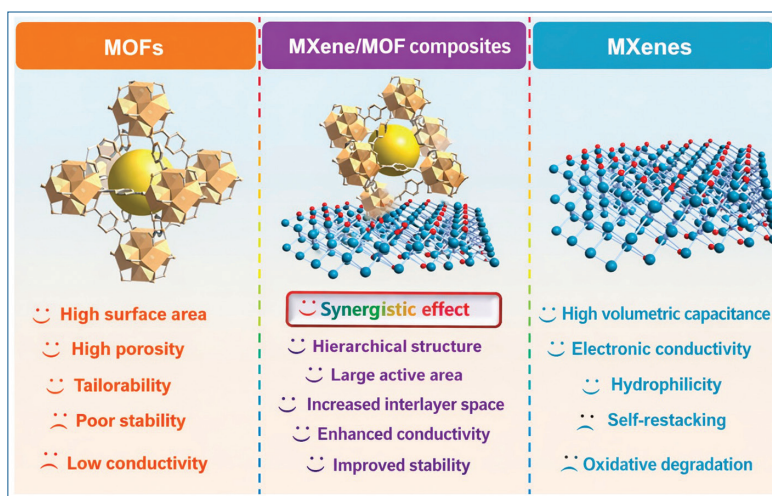


Fig. 1



materiali tendono a idrolizzarsi e a collassare. Nei processi industriali di depurazione dei gas (ad es. cattura di CO_2 da fumi umidi) o nella raccolta di acqua dall'atmosfera umida, i MOF non ottimizzati si degradano rapidamente, perdendo efficacia nel tempo. Ci sono colleghi che stanno sviluppando strutture altamente idrofobiche o formulando materiali compositi specifici per migliorarne la stabilità. Un altro aspetto critico è che i MOF vengono solitamente sintetizzati in laboratorio sotto forma di polveri microcristalline fini, che, però, risultano inadatte ai processi industriali reali poiché possono comportare rischi per la sicurezza (polveri volatili), causano cadute di pressione nelle colonne di trattamento gas e risultano difficili da riciclare. Inoltre, i cristalli di MOF sono tipicamente fragili e insolubili, il che rende difficile modellarli in componenti monolitici utilizzabili. In questo caso la soluzione potrebbe essere di trasformare i MOF in film, aerogel o macrostrutture 3D per integrarli in dispositivi pratici. E tutto ciò corrisponde poi a costi elevati e sfide nella sintesi, per cui, se è pur vero che i MOF siano “modulabili a livello molecolare”, la loro produzione su larga scala richiede condizioni specifiche difficili e costose da replicare. I costi elevati dei *linker* organici, la dipendenza da solventi tossici o volatili e la complessità delle configurazioni di reazione (come i metodi cosiddetti solvotermici ad alta temperatura) costituiscono barriere significative alla fattibilità industriale. Ed infine anche la riproducibilità tra i diversi lotti di produzione rappresenta una sfida importante durante lo *scale-up*. Tuttavia c'è un aspetto che sovrasta le altre problematiche e che spesso non è considerato nella sua giusta prospettiva per cui non vi si applicano abbastanza risorse: le loro criticità biomediche e di tossicità e la loro sorte nell'ambiente.

Questo fa sì che nell'ambito del rilascio di farmaci e delle terapie oncologiche, i MOF siano oggetto di forti critiche a causa della loro tossicità a lungo termine, che è ancora ignota.

Molte strutture fondamentali di MOF sono realizzate utilizzando metalli pesanti (ad es. zinco, cromo o

cadmio) che possono accumularsi nell'organismo o diffondersi in biosfera. Per ottenere una reale biocompatibilità, biodegradabilità e un'escrezione sicura *in vivo*, sono necessari rivestimenti delle nanoparticelle altamente specifici (e qua ripeto il *warning* ad usare sconsideratamente legami C-F che non sono facilmente degradabili).

Ci sono review, citate in fondo, che riassumono le strategie di mitigazione esistenti, tra cui la scelta di metalli biocompatibili, la stabilizzazione strutturale e i rivestimenti in materiale polimerico che provano a ridurre la citotossicità in condizioni controllate.

Nel complesso, la situazione attuale evidenzia l'urgente necessità di approfondimenti sui meccanismi d'azione, studi a lungo termine e interventi normativi volti a favorire lo sviluppo di un utilizzo e di una traslazione sicuri, responsabili e sostenibili dei MOF in ambito biomedico e industriale.

È una nuova occasione, non sprechiamola! Non facciamoci sorprendere da fenomeni prevedibili ma non studiati a sufficienza, non ripetiamo i medesimi errori fatti in altre occasioni e classi di composti, specie oggi a cinquant'anni da Seveso.

Consultati

- <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/23977914261426158>
- <https://www.mater.unimib.it/it/news/mxe-ni-nuovi-materiali-bi-dimensionali-batterie-litium-free>
- <https://www.wired.it/article/strutture-metallo-organiche-nobel-chimica-2025-cosa-sono-cosa-possiamo-farci/>
- https://www.sciopen.com/local/article_pdf/10.34133/energymatadv.0033.pdf
- <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/cr400005f>
- <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/sml.202309119>
- <https://pubs.rsc.org/qm/article/9/11/1650/864040/MOF-electrocatalysts-in-CO2-conversion-critical?silentauthchecked=true>