



Claudia Antonetti

Scuola Normale Superiore di Pisa

Anna Maria Raspolli Galletti

Dipartimento di Chimica e Chimica Industriale

Università di Pisa

Iginio Longo

Istituto per i processi chimici e fisici

CNR - Area di Ricerca di Pisa

longo@ipcf.cnr.it

UN INNOVATIVO METODO DI ATTIVAZIONE TERMICA A MICROONDE

Da alcuni anni l'attivazione termica di processi chimici o chimico-fisici mediante microonde è stata introdotta con successo nei laboratori di ricerca. In questo articolo vengono presentate le principali caratteristiche di un metodo

innovativo, con particolare riferimento all'efficienza, alla flessibilità, all'affidabilità ed all'economicità, descrivendo in modo semplice ed intuitivo lo stato dell'arte e gli sviluppi in atto.

Attualmente il sistema utilizzato nella stragrande maggioranza delle applicazioni della così detta chimica assistita dalle microonde ("microwave assisted chemistry") è il forno a microonde. Ne esistono diversi modelli commercialmente disponibili, che risultano utili in ricerca, nonostante intrinseche limitazioni e scarsa versatilità; per applicazioni su scala maggiore gli operatori devono ricorrere alla collaborazione di progettisti dotati non solo di competenze specifiche nella costruzione e nell'utilizzo di linee di trasmissione e di cavità risonanti a microonde, ma anche di conoscenze specifiche nell'ambito dell'interazione radiazione-materia per il corretto dimensionamento delle apparecchiature e per la scelta di soluzioni tagliate "su misura" per ciascun tipo di processo. Infatti il trasferimento di potenza

da un risonatore multimodale a microonde al materiale assorbente contenuto in un recipiente o in una tubazione (rigorosamente non metallica) avente dimensioni caratteristiche paragonabili alla lunghezza d'onda della radiazione utilizzata ($\lambda = 12,24$ cm a 2.450 MHz) non è facilmente realizzabile su scala industriale senza l'introduzione di dispositivi di misura e senza l'impiego di algoritmi di controllo specializzati, pena la rinuncia all'efficienza ed all'affidabilità dell'impianto.

Al contrario l'impiego di un applicatore isolato a immersione non solo semplificherebbe enormemente la progettazione, ma consentirebbe di raggiungere efficienze e capacità di controllo locale della temperatura in un processo, in modalità "batch" o in flusso continuo, fino ad oggi impensabili. Sull'utilizzo di applicatori di questo tipo si basa il metodo inventato, progettato ed utilizzato a Pisa.

Le “micronde fuori dal forno” mediante l’impiego di applicatori coassiali

La costruzione ed il principio di funzionamento di un’antenna a dipolo coassiale sono schematizzati in Fig. 1, che mostra la sezione assiale di un cavo coassiale comprendente il conduttore centrale CI, il dielettrico D ed il conduttore esterno CE. Ad un’estremità del cavo è stato tolto un tratto di conduttore esterno lungo un quarto di lunghezza d’onda della radiazione impiegata. L’onda elettromagnetica guidata dal cavo, giunta al punto F, detto in gergo “feed”, dà origine ad un sistema di onde quasi stazionarie (“OQS”) nelle immediate vicinanze della superficie esterna del cavo. Qui si concentra un’elevata densità di potenza reattiva, senza che abbia luogo irraggiamento. Nella zona di campo lontano, inizia l’irraggiamento e l’onda irraggiata (“OI”) si propaga prevalentemente in direzione radiale. Se il cavo è immerso in un mezzo assorbente la densità di potenza assorbita (“DPA”) ha un massimo in F, quindi decresce in direzione radiale ed è qui rappresentata pittoricamente da un ellissoide di rotazione.

I dipoli coassiali isolati sono noti da tempo e sono stati usati estensivamente come elementi radianti nei telefoni cellulari e l’assorbimento specifico nei materiali biologici della radiazione emessa è stato ampiamente studiato con modelli sperimentali e con simulazioni numeriche. La configurazione di dipolo asimmetrico a $\lambda/4$ come quella rappresentata in Fig. 1 consente operazioni a larga banda, e pertanto nelle applicazioni industriali che interessano i processi di attivazione termica dei materiali (allo stato liquido, semiliquido e nel plasma), questi dispositivi presentano un ottimo adattamento anche in presenza di variazioni della permittività dielettrica nel mezzo entro il quale sono immersi. Queste sono inevitabili al variare della temperatura o durante la formazione di nuove specie chimiche. Il fatto che l’ampiezza e la direzione dei campi elettromagnetici emessi nella zona di campo vicino e nella regione di irraggiamento siano calcolabili con grande precisione in funzione della geometria del cavo coassiale, della frequenza di lavoro, della potenza applicata e dei parametri dielettrici del mezzo, fa sì che il metodo che impiega questi applicatori si distingua nettamente da quello che utilizza i forni, sia per la capacità di controllo, sia per l’elevata riproducibilità dei risultati.

L’applicatore per impieghi chimici viene inserito in una guaina isolante GI, costruita con materiali inerti e trasparenti alle microonde, come ad esempio vetro borosilicato, plastica, politetrafluoroetilene, ceramica a base di allumina ecc., a seconda della temperatura di impiego, dell’inertezza chimica e della resistenza all’usura richieste.

Più precisamente i vantaggi offerti dal metodo sviluppato a Pisa sono molteplici:

1) la distribuzione della densità di potenza, cioè della potenza per unità di volume assorbita da un materiale nello spazio che circonda un applicatore, dipende dalla permittività del materiale stesso e questa grandezza, in generale, è nota o può essere facilmente misurata;

2) la temperatura locale può essere misurata con metodi tradizionali utilizzando termocoppie metalliche schermate, senza dovere necessariamente ricorrere ai sensori in fibra ottica;

3) la tecnologia consente di utilizzare applicatori integrati con il dispositivo, detto in gergo “choke”, che serve a bloccare l’onda che si propaga all’indietro verso la sorgente, realizzato anche in versione miniaturizzata [1];

4) il metodo consente di alimentare ciascun applicatore con modalità “a potenza costante”, oppure variando la potenza applicata in funzione dell’evoluzione del processo;

5) ciascun applicatore può essere dotato di un sensore di temperatura integrato, mediante il quale è possibile operare “a temperatura costante”;

6) il grado di maturità raggiunto dalla tecnologia dei circuiti a microonde è tale che le possibilità di controllo elettronico di ciascuna sorgente e di ciascun applicatore è praticamente illimitato.

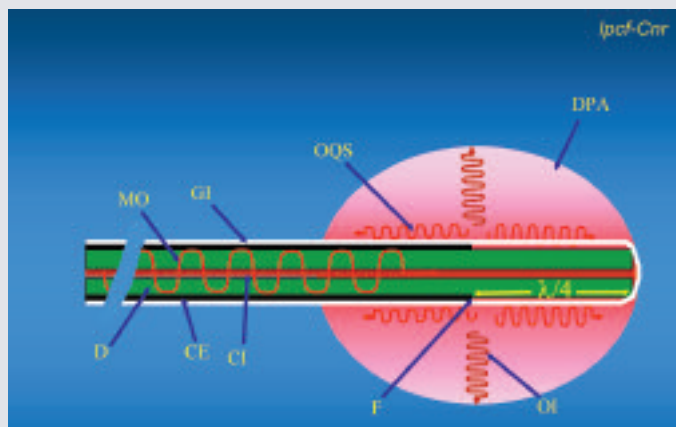


Fig. 1 - Principio di funzionamento di un applicatore coassiale

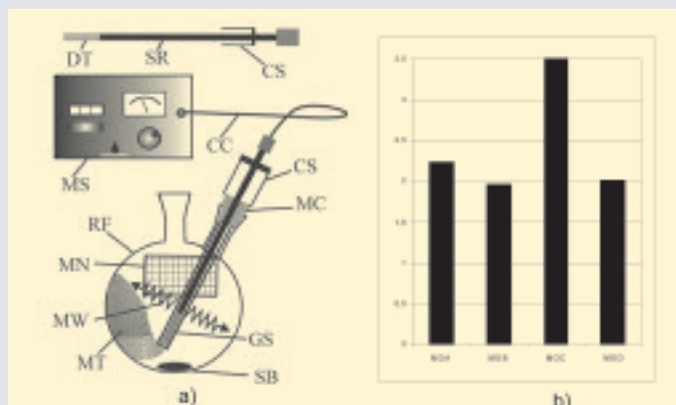


Fig. 2 - a) Apparato sperimentale per la produzione di nanoparticelle di ruthenio [CC: cavo coassiale; CS: sezione del “choke”; DT: punta dielettrica; GS: guaina di vetro; MC: cono maschio; MN: reticella metallica; MS: sorgente a microonde; MT: nastro magnetico; MW: radiazione a microonde; RF: pallone di vetro da 100 mL; SB: barretta magnetica; SR: applicatore coassiale semirigido; b) sono riportate le dimensioni in nm dei nanocatalizzatori a base di Ru, in funzione del metodo di preparazione adottato; tutti i campioni sono stati preparati usando una potenza media di 640 W per 150 s in glicol etilenico (MO A: Ru senza supporto; MO B: Ru/ γ -Al₂O₃, 0,5%; MO C: Ru/C 0,5%) o in alcol benzilico (MO D: Ru/ γ -Al₂O₃, 0,5%), usando polivinil pirrolidone (PVP) come agente stabilizzante

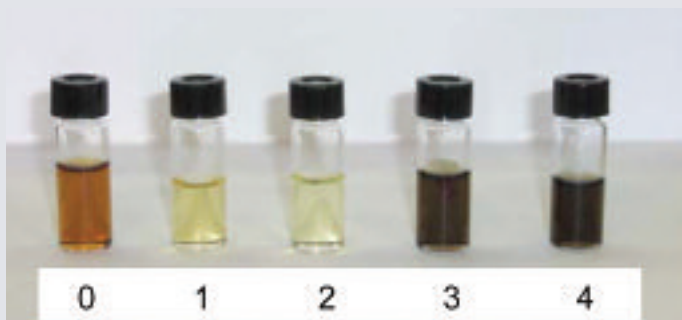


Fig. 3 - Soluzione di Ru(III) prima dell'irradiazione (0); dopo irradiazione per 30 s (1), 60 s (2), 90 s (3) e 120 s (4)

Alcune applicazioni

Le caratteristiche generali e alcuni schemi costruttivi di un reattore chimico a microonde (RCM) alimentato da un applicatore coassiale isolato sono state già riportate [2].

Un RCM realizzato con un comune pallone di vetro a più colli è stato usato recentemente [3] per l'estrazione di oli essenziali da piante officinali, mettendo in evidenza che a parità di risultati è possibile ottenere un consistente risparmio energetico rispetto all'impiego dei riscaldatori tradizionali a mantello elettrico.

Qui vengono riportati alcuni dei risultati ottenuti per la produzione di nanoparticelle e nanocatalizzatori metallici e per l'ottimizzazione di alcune reazioni di sintesi organica.

La Fig. 2a mostra l'apparecchiatura utilizzata per la produzione di nanoparticelle di rutenio mentre in Fig. 2b sono riportate le dimensioni ottenute di tali particelle in funzione delle condizioni sperimentali.

La Fig. 3 mostra come durante l'irraggiamento sia possibile notare la rapidissima variazione di colore della miscela. Questa possibilità è quanto mai utile per visualizzare la riduzione progressiva del Ru^{3+} a $\text{Ru}(0)$. Infatti il colore iniziale è arancio, quindi vira nel giallo ed alla fine del processo è bruno scuro.

A conferma della progressione temporale nella produzione di nanoparticelle di Ru e della riduzione del metallo, nel Grafico 1 sono riportati gli spettri di assorbimento UV-Vis della miscela MO 3 di $\text{RuCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, stabilizzata con PVP, prima e dopo irraggiamento a microonde.

Lo spettro di assorbimento dipendente dal tempo presenta una banda larga di assorbimento estesa tra 300 nm e 400 nm assegnabile alla presenza di ioni Ru^{3+} . Con il trascorrere del tempo la banda sparisce a motivo della riduzione graduale degli ioni da Ru^{3+} a Ru allo stato metallico. Dopo 120 s di irraggiamento i picchi dovuti alla banda di assorbimento ottico risonante degli elettroni superficiali delle nanoparticelle di Ru slittano ad energie maggiori. Inoltre un ulteriore irraggiamento non fornisce variazioni nello spettro, a dimostrare che gli ioni Ru^{3+} sono totalmente ridotti fino a formare nanoparticelle di rutenio $\text{Ru}(0)$. Le misure eseguite al microscopio TEM dimostrano che la distribuzione di dimensioni del campione MO 3 è quella riportata nel Grafico 2.

È interessante notare che le capacità catalizzatrici dei nanocatalizzatori ottenuti con il RCM nella idrogenazione del fenolo a cicloesano, messe a confronto con prodotti commerciali, hanno dimostrato i grandi vantaggi del nuovo metodo di preparazione non solo da un punto di vista pratico, ma anche per l'aumento di resa ottenibile [4].

Oltre che alla preparazione di catalizzatori nano particellari la tecnologia è stata applicata anche a reazioni di formazione di legame C-C usando la medesima apparecchiatura riportata in Fig. 2a riscaldando con microonde in continuo con potenza variabile nell'intervallo da 70 W a 100 W usando un applicatore del diametro di 3,5 mm. I risultati ottenuti nel processo di arilazione C-5 del 1-metil 1H-imidazolo con 4-bromoanisolo mediato da catalisi di palladio [5] (Schema 1) ed uso di microonde in situ sono mostrati in Tab. 1, dove per confronto è riportato il risultato ottenuto con riscaldamento tradizionale.

Come si può vedere la versatilità già in parte nota dell'uso della tecnica delle microonde è resa possibile anche in apparecchiature semplici da laboratorio.

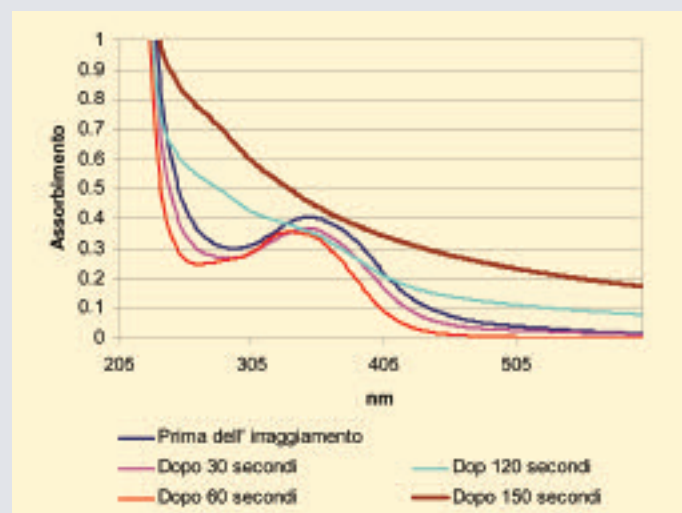


Grafico 1 - Spettro di assorbimento UV-Vis della miscela MO 3 di $\text{RuCl}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, stabilizzata con PVP, prima e dopo la riduzione mediante irraggiamento a microonde. Prima dell'irraggiamento (curva blu), dopo irraggiamento per 30 s (curva fucsia), dopo irraggiamento per 60 s (curva rossa); dopo irraggiamento per 120 s (curva celestina); dopo irraggiamento per 150 s (curva marrone)

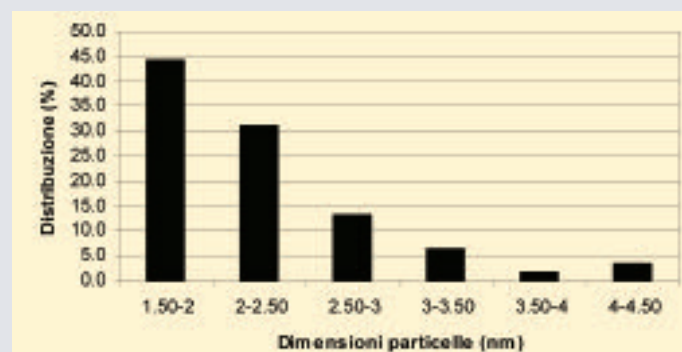
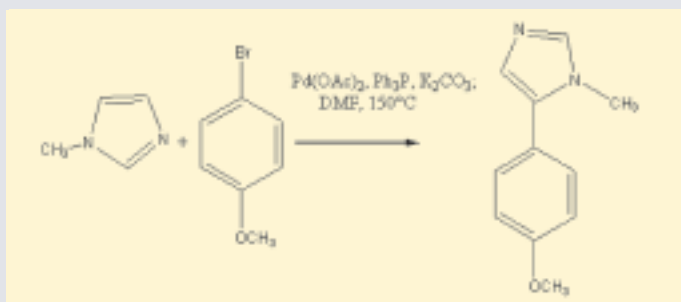


Grafico 2 - Distribuzione di dimensioni delle particelle del campione MO 3



Schema 1

Progettazione per lo sviluppo di scala

L'applicazione contemporanea di quattro applicatori che emettono più di 3 kW di potenza a microonde all'interno di un reattore metallico attraverso il quale scorre acqua ha dimostrato che il metodo possiede le caratteristiche necessarie e sufficienti per rompere la cosiddetta barriera di scala. Viene riportato in Fig. 4 lo schema costruttivo di un prototipo di RCM metallico.

Questo prototipo è stato impiegato per verificare la possibilità di impiegare simultaneo di numerosi applicatori di potenza posti in posizione contigua. L'acqua che fluisce nel tubo metallico RM della capacità di 2,5 L viene riscaldata con 4 applicatori, due dei quali aventi un diametro di 9 mm e due di 6,5 mm, ciascuno inserito nel pozzo di vetro PV. Con una potenza totale installata di 3,2 kW la temperatura della massa d'acqua in flusso continuo di 1 kg al minuto aumenta, a regime, di una quantità $\Delta T = T_2 - T_1 = 36^\circ\text{C}$.

Da questo test risulta che la potenza installabile è dell'ordine di 1 kW per ogni pollice di lunghezza del reattore. Sebbene questo risultato dipenda dalla capacità di assorbimento del materiale, tuttavia appare evidente che la strada per la progettazione di un impianto pilota è praticamente aperta. Gli applicatori isolati disposti come in Fig. 3 hanno un elevato coefficiente di disaccoppiamento in potenza. Due applicatori paralleli operanti in acqua a distanza di 7 cm uno dall'altro hanno un coefficiente di disaccoppiamento maggiore di 50 dB. Questo dimostra che è possibile installare in un impianto un numero qualsiasi di applicatori e quindi una potenza a microonde comunque elevata, ciascun applicatore potendo operare in modo indipendente dal suo più vicino e consentendo quindi un aumento considerevole delle capacità di controllo del processo.

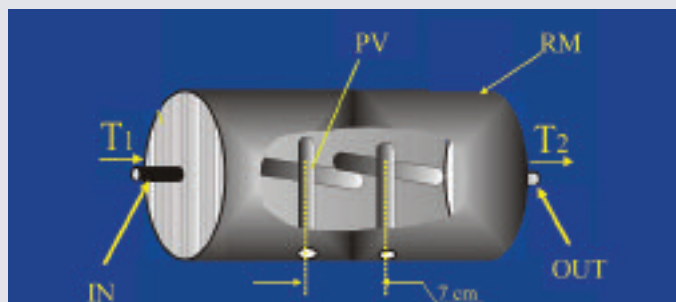


Fig. 4 - Reattore metallico sperimentale

Nel Diagramma 1 riportiamo schematicamente le possibili estensioni del metodo per applicazioni industriali. Lo scale-up e lo scale-out si ottengono in modo estremamente semplice ed economico, sia dal punto di vista progettuale che per i costi di investimento, che sulla base delle valutazioni da noi effettuate, appaiono decisamente contenuti.

La sicurezza del metodo

Quando la potenza applicata al RCM è modesta ed il mezzo entro il quale vengono emesse microonde assorbe totalmente questa potenza, è possibile usare un reattore ordinario di vetro sul banco, con tutte le sue connessioni inalterate. In generale una frazione della potenza emessa dall'applicatore si propaga all'indietro guidata da correnti che percorrono la superficie del conduttore esterno del cavo coassiale. Questa radiazione viene bloccata efficacemente dal "choke" CS (Fig. 2a). Questo dispositivo non è altro che un segmento di linea coassiale lungo $\lambda/4$ cortocircuitato ad un estremo, cosicché il campo a microonde al suo ingresso, dopo avere percorso un tratto lungo $\lambda/2$, si annulla per interferenza distruttiva. Quando la potenza applicata non è totalmente assorbita, o in generale quando si opera con recipienti non metallici, le emissioni residue possono essere facilmente bloccate, confinandole all'interno del reattore. Le norme di sicurezza indicate dalle commissioni internazionali e riguardanti l'esposizione degli operatori ai campi elettromagnetici dipendenti dal tempo, ad esempio, come in questo caso, le microonde a 2.450 MHz, stabiliscono che la radiazione residua emessa (*stray radiation*) dalle apparecchiature, misurata sulla loro superficie esterna, deve avere una densità di potenza inferiore a 1 mW/cm^2 . Tenendo conto di questo criterio il metodo proposto può essere applicato con assoluta confidenza

Tab. 1 - Arilazione C-5 del 1-metil 1H-imidazolo con 4-bromoanisolo mediato da Pd usando il riscaldamento a microonde in situ con potenza 220 W (condizioni di reazione: bromuro: 0,3 M; base: 0,3 M; Pd(OAc)₂: 1 mM)

Prova	1-metil-1H-imidazolo	Durata	Conversione (moli%)	Resa (moli%)
1	0,15 M	15 min.	40	n.d.
2	0,15 M	1 h	85	n.d.
3	0,15 M	2 h	87	65
Riscaldamento tradizionale in bagno ad olio a 140-160 °C	0,2 M	24 h	90	49

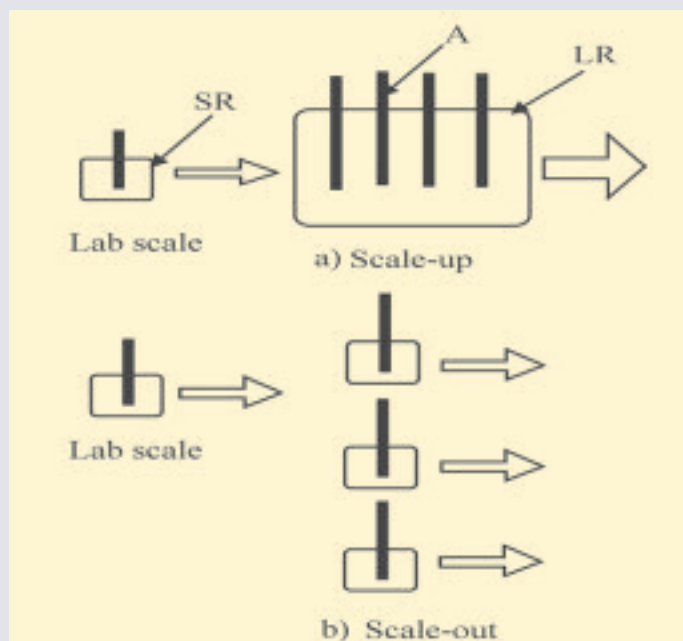


Diagramma 1 - Impiego del nuovo metodo per estensioni di tipo scale-up e scale-out. SR: reattore da laboratorio; A: applicatore a microonde a immersione; LR: reattore di grandi dimensioni. L'estensione di tipo scale-out, schematizzato in b), consente di modulare a piacere la quantità di materiale prodotto nell'unità di tempo mediante l'impiego di numerosi reattori di piccola taglia funzionanti in parallelo. Con il nuovo metodo questa estensione è immediata

quando siano soddisfatte le stesse condizioni che riguardano tutte le apparecchiature di potenza a microonde:

- nel caso di reattori metallici questi devono essere completamente chiusi; oppure possono avere tubi di ingresso o di uscita di diametro interno non superiore a 7 cm (per operazioni a 2.450 MHz);
- le aperture tubolari non devono essere attraversate assialmente da conduttori metallici, (perché in questo caso si configurano come una linea di trasmissione coassiale);
- nel caso di impiego di un RCM di vetro come quello comunemente utilizzato in laboratorio, possiamo lavorare in condizioni di sicu-

rezza anche con elevate densità di potenza applicata (di alcuni W/cm^2) semplicemente rivestendo il recipiente con continuità (fino al "choke") con uno di questi materiali: a) nastro adesivo metallico, b) foglio di alluminio, c) reticella metallica, d) vernice conduttiva avente una resistenza superficiale minore di 1 ohm;

- un accorgimento adottato frequentemente è quello di utilizzare la rete metallica per ricavare finestre di osservazione visuale;

- è raccomandato in ogni caso l'impiego di un tester a microonde per il controllo di eventuali emissioni.

Possibilità di sinergie con altre metodologie e ulteriori vantaggi

Il nuovo metodo consente di impiegare simultaneamente un applicatore a microonde ed un emettitore di ultrasuoni all'interno dello stesso reattore (Fig. 5 in alto) e anche utilizzare contemporaneamente un irraggiamento UV/Vis (Fig. 5 in basso).

Il reattore di vetro con gli applicatori a microonde A e ad ultrasuoni US è posto sulla piattaforma di un mescolatore a barretta magnetica e le potenze in gioco (US+MW) sono di alcune centinaia di W. La termocoppia TC, posizionata opportunamente, consente di effettuare misure di temperatura senza artefatti. Il disturbo che la barra metallica US provoca sulle modalità di emissione dell'applicatore a microonde A è trascurabile, mentre è forte la sovrapposizione degli effetti delle due sorgenti nel volume di liquido che circonda i due emettitori. La figura in basso mostra l'azione simultanea di radiazioni UV/Vis, microonde ed ultrasuoni. La lampada a microonde senza elettrodi L emette contemporaneamente radiazioni ottiche e potenza a microonde. Se a queste sorgenti si aggiunge un emettitore di ultrasuoni possiamo attivare i reagenti contemporaneamente con tre forme di energia: US, UV, MW.

Appare evidente nella figura il volume di liquido sottoposto a sonicazione. Per quanto riguarda la combinazione MW/US [9] essa apre la strada ad una metodologia che già si è dimostrata vincente per l'attivazione simultanea di materiali o di processi chimico-fisici mediante apparecchiature assai più complesse e costose [10]. In base a questo razionale il liquido viene sottoposto contemporaneamente a temperature e pressioni elevate (sonicazione) ed a campi elettromagnetici intensi continui o impulsati (a microonde), con possibilità di sincronizzazione risolta nel tempo fino al microsecondo, allo scopo di ottenere effetti nuovi e rese di processo fino ad oggi impensabili, sia a livello atomico-molecolare che nella produzione di nano-aggregati.

Il metodo proposto a Pisa viene utilizzato anche per la produzione di plasma e di sorgenti di radiazione UV/Visibile e ci si può facilmente render conto delle straordinarie possibilità di integrazione offerte da questa nuova tecnologia. Questo tipo di integrazione consente di costruire dispositivi ultra compatti per la produzione in flusso continuo di liquidi sterilizzati, per la mineralizzazione di inquinanti (coloranti orga-

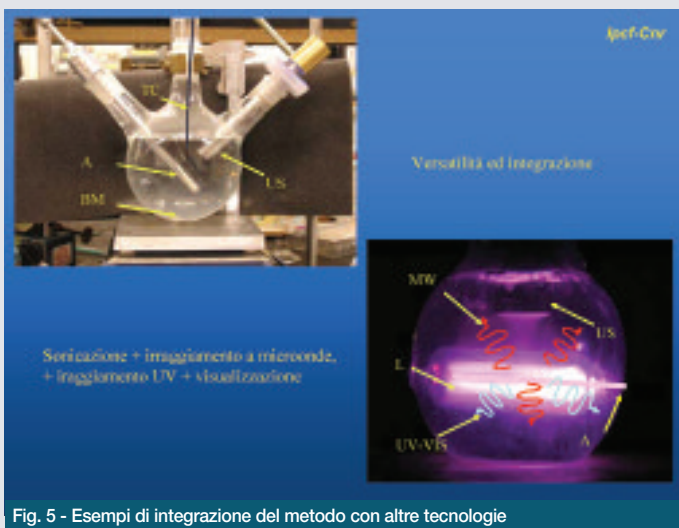


Fig. 5 - Esempi di integrazione del metodo con altre tecnologie

nici ecc.), per reazioni di fotocatalisi o per processi fotochimici nei quali l'applicazione simultanea e diretta di radiazioni UV e di microonde gioca un ruolo determinante.

La possibilità di applicare potenza a microonde direttamente all'interno di un recipiente metallico consente anche di accedere in modo semplice alla *microwave assisted chemistry* ad alte pressioni. I limiti sono quelli imposti dalla resistenza delle guaine. In una serie di esperimenti eseguiti con un reattore d'acciaio a pareti spesse foderato all'interno con uno strato di materiale termicamente isolante e contenente acqua si raggiungono le condizioni di temperatura e di pressione caratteristiche dei processi in autoclave (in acqua) con un guadagno nel tempo di riscaldamento di un ordine di grandezza rispetto al riscaldamento in bagno d'olio. Ciò è dovuto al fatto che il riscaldamento effettuato con il nuovo metodo in prima approssimazione non interessa le pareti del reattore, ma solo il liquido contenuto. Il risparmio di tempo e di consumo energetico sono anche in questo caso considerevoli e peculiari. Per inciso, il forno a microonde in queste applicazioni è completamente inutilizzabile. Va sottolineato che il consumo di energia elettrica dei generatori a microonde viene restituito in energia utile al riscaldamento a con una resa di circa il 70%. Questo dato è interessante se si considera il fatto che l'efficienza di conversione di microonde in calore, utilizzando un applicatore a immersione, è prossima alla massima ottenibile teoricamente.

Un argomento importante è quello della temperatura di esercizio degli applicatori coassiali. Questa può raggiungere i 250 °C nel caso di cavi costruiti con dielettrico a base di fluoropolimeri. Per temperature fino a 800 °C vi sono in commercio cavi coassiali a base di SiO₂ adeguati

per l'applicazione di alcune centinaia di W.

Il metodo proposto, grazie alla sua estrema flessibilità ed alla facilità di installazione, consente di eliminare la riprogettazione di un impianto esistente o, quantomeno, di ottenere un risparmio sostanziale di spesa nel caso di progettazione ex novo.

Conclusioni

Gli studi effettuati a Pisa dimostrano che questo metodo è vantaggioso ed innovativo e consente di erogare potenze di interesse industriale riscaldando in situ i reagenti con la massima efficienza, con modalità ampiamente indipendentemente dal recipiente ed in condizioni di assoluta sicurezza. Possono essere utilizzati reattori ordinari di vetro o di metallo, di geometria qualsiasi, ottenendo risultati accurati e riproducibili. La tecnologia sviluppata è economica, estremamente versatile, accessibile e facile da usare. I dispositivi sono di costruzione semplice e consentono a chimici e ad ingegneri di impianto di attivare e quindi di intensificare il processo senza dovere ricorrere all'uso di cavità risonanti monomodali o multimodali come i forni a microonde. I risultati preliminari finora ottenuti nella preparazione di nanocatalizzatori metallici, nelle sintesi organiche, nell'estrazione di oli essenziali e nella mineralizzazione di inquinanti ambientali consentono di affermare che il metodo costituisce un'innovazione utilizzabile nella stragrande maggioranza dei settori della chimica, per impieghi di interesse scientifico, industriale e civile. Il nuovo metodo consente di ridurre i costi di investimento e di manutenzione, aumentando la capacità di controllo del processo e fornendo risultati altamente riproducibili. La tecnologia ed i dispositivi costituiscono oggetto di domande di brevetto Italiano ed Internazionale.

Bibliografia

- [1] I. Longo *et al.*, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2003, **50**(1), 82.
- [2] I. Longo, A.S. Ricci, *J. Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 2007, **41**(1), 4.
- [3] G. Flamini *et al.*, *J. Chromatography A*, 2007, **1143**, 36.
- [4] A.M. Raspolli Galletti *et al.*, *Applied Catal. A: General*, inviato per la pubblicazione.
- [5] C. Antonetti *et al.*, "Le microonde: nuove tecnologie per le attività produttive", MISA, Salerno, 21-23 maggio 2008.
- [6] C. Antonetti *et al.*, Nanoparticles for European Industry II, Olympia Conference Centre, London (UK), 24-25 Oct. 2007.
- [7] I. Longo *et al.*, International Symposium HES-07 on Heating by Electromagnetic Sources, Padova, (Italy), 19-22 June 2007, 227.
- [8] R. Memoli *et al.*, Proc. of the International Meeting on Pharmaceutics, Biopharmaceutics and Pharmaceutical Technology, Norimberga, (Germany), March, 2004, 15.
- [9] V. Ragaini *et al.*, 10th Meeting of the European Society of Sonochemistry, Hamburg, 4-8 June 2006.
- [10] G.C. Cravotto, P. Cintas, *Chem. Eur. J.*, 2007, **13**, 1902.

ABSTRACT

An Innovative Method of Thermal Activation using Microwaves

A microwave insulated open end coaxial applicator is utilized for the first time for the thermal activation of chemical processes. The method enables to apply microwave power at 2,450 MHz, heating in situ the reacting materials with utmost efficiency. The safety conditions, the efficiency, the integration capability and the possibility of scaling-up of the method are discussed. The article presents also a few examples of the versatility of this new technology applied in the production of nano metal catalysts, useful for different catalysed reactions, and in organic synthesis.