Agitazione e miscelazione
Un passaggio necessario per le formulazioni

di Franco Magelli

La complessità dei sistemi con cui si opera nei processi di formulazione richiede la conoscenza dei meccanismi della miscelazione, delle tecnologie disponibili e delle possibili opzioni tecnologiche. Vengono passate sinteticamente in rassegna le problematiche più significative dell'agitazione di sistemi liquidi e sono menzionati i principali parametri che definiscono quantitativamente tali processi. Si accenna anche ai vari metodi d'approccio sviluppati, utilizzabili per tali analisi.

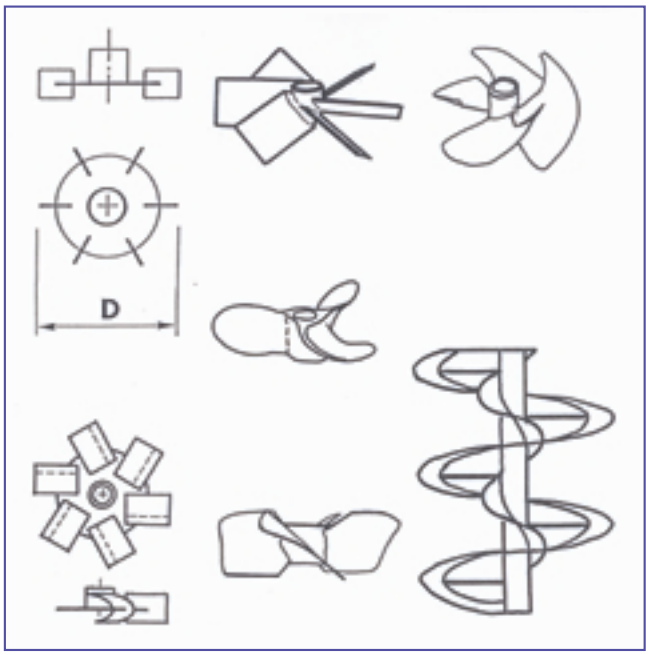

Figura 1 - Alcuni tipi di agitatori: turbina Rushton, a pale concave, a pale inclinate (PBT), elica marina, 'hydrofoil' a pale larghe (due tipi), agitatore ad elica e vite senza fine

Una fase importante nei processi di formulazione è quella della miscelazione meccanica di componenti e composti. Se tale operazione è relativamente semplice in apparati di piccola scala quando si abbia a che fare con fluidi newtoniani, essa presenta difficoltà crescenti all'aumentare della potenzialità, specialmente in presenza di sistemi multifase e/o quando il fluido abbia caratteristiche reologiche complesse. In questa breve nota vengono passati in rassegna alcuni aspetti di tale operazione nell'industria di processo. Non viene considerata la miscelazione di polveri, né vengono toccati i problemi di chimica fisica delle interfasi sebbene questi abbiano un ruolo cruciale nel definire il comportamento dei sistemi multifase.

Tipi di agitatori

I vari tipi di agitatori meccanici usati nell'industria di processo (alcuni sono schematizzati in Figura 1) possono essere classificati come segue: gli agitatori cosiddetti veloci (caratterizzati da un rapporto D/T tra il diametro dell'agitatore e quello del contenitore pari a 0,2-0,5; sono a loro volta classificabili in radiali, assiali o misti a seconda della direzione del flusso generato rispetto all'albero) e quelli cosiddetti lenti (usualmente caratterizzati da D/T≈1: le azioni esplicate sono quelle del rimescolamento della massa fluida e soprattutto del rinnovo del film liquido alla parete del contenitore; possono essere distinti in tangenziali puri ed elicoidali e sono tipicamente impiegati per il trattamento di liquidi viscosi e/o non newtoniani). A queste categorie possono essere ricondotti altri tipi di agitatori, quali i turboagitatori (indicati per la realizzazione di emulsioni) e quelli oscillanti; l'agitazione a jet sommerso è assimilabile all'uso di agitatori assiali. Gli agitatori veloci di tipo radiale utilizzano l'energia assorbita in parte per realizzare la circolazione del liquido ed in parte per produrre turbolenza; la prima funzione è invece prevalente per gli agitatori assiali (soprattutto per quelli con pale a sagoma ottimizzata, i cosiddetti "hydrofoil").
Gli agitatori lenti sono caratterizzati da pura circolazione. Turbolenza e circolazione sono diversamente efficaci ai fini della realizzazione degli specifici processi elementari. Si possono infatti schematicamente individuare processi la cui prestazione dipende dall'intensità del moto medio del fluido ("flow sensitive": scambio termico, blending, sospensione di solidi, ecc.) e processi dipendenti dalla turbolenza locale ("shear sensitive": dispersione di gas in un liquido o di un liquido in un altro liquido, scambio di materia tra fasi, reazione chimica ecc.). Talvolta entrambe le funzioni citate sono importanti (e, quindi, tra loro in conflitto) per la realizzazione del processo.
Gli apparati in cui si effettua il processo di miscelazione sono di solito cilindrici ad asse verticale, dotati di fondo bombato ed usualmente di frangivortice (salvo che per gli agitatori lenti). Sono anche impiegati apparati a ricircolazione, apparati quasi-sferici o toroidali, reattori a sezione quadrangolare, o altro. In essi sono inseriti agitatori singoli o multipli o misti, di solito in asse, più raramente con ingresso laterale o in posizione eccentrica.
Viene solo citata, qui, la categoria dei miscelatori statici: introdotti da pochi decenni, essi sono costituiti da brevi condotti in cui vi sono deflettori del flusso ripetuti, la cui presenza consente di realizzare molti degli obiettivi tipici degli agitatori dinamici.

I principali parametri dell'agitazione

I principali parametri (globali) usati per la caratterizzazione di un miscelatore sono i seguenti: velocità del bordo della giran-

F. Magelli, DICMA - Dipartimento di Ingegneria Chimica, Mineraria e delle Tecnologie Ambientali - Università di Bologna.
franco.magelli@mail.ing.unibo.it

te ("tip speed"), potenza dissipata e coppia, capacità volumetrica di pompaggio dell'agitatore ("pumping capacity"), portata di circolazione (ossia, portata complessiva di fluido circolante nell'apparato), tempo di miscelazione ("mixing time", definito come il tempo necessario perché un tracciatore sia disperso nell'intero apparato, con assegnato grado di omogeneità). Le caratteristiche di un miscelatore vengono innanzitutto definite con riferimento al sistema monofasico: si ricavano correlazioni dei parametri sopra citati in forma adimensionale in funzione del regime di moto (individuato dal numero di Reynolds rotazionale). In Figura 2 è riportato come esempio l'andamento della potenza adimensionale per tre tipi di agitatori; in modo simile vengono forniti dati relativi al tempo di miscelazione adimensionale, alla capacità di pompaggio adimensionale, ai coefficienti di scambio termico. Variazioni modeste dei parametri geometrici degli agitatori possono avere riflessi anche significativi sul valore delle grandezze citate.

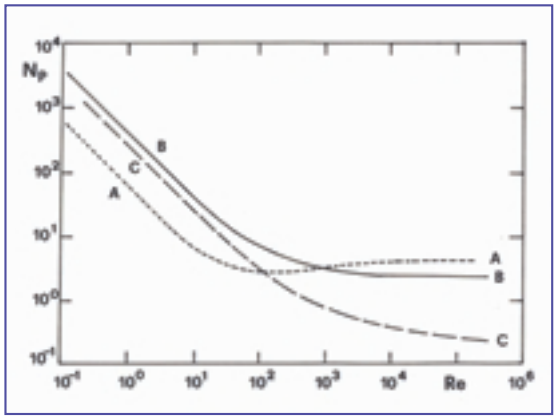

Figura 2 - Curve di potenza per alcuni agitatori: A, turbina Rushton; B, turboagitatore (a denti di sega); C, agitatore a nastro elicoidale

Per i sistemi bifasici vengono definite condizioni di agitazione minima per il processo desiderato, funzione delle condizioni operative e delle proprietà del sistema: velocità minima dell'agitatore per evitare condizioni di ingolfamento della girante (sistemi gas-liquido), per realizzare la cosiddetta sospensione completa del solido dal fondo dell'apparato (sistemi solido-liquido), per realizzare la dispersione completa di liquidi immiscibili ecc. Il comportamento dei sistemi viene usualmente riferito, per semplicità, a quello del liquido monofasico; i sistemi sono caratterizzati anche in termini di *hold-up* e di coefficienti di scambio di materia. Si osserva, ad esempio, che gli agitatori di nuovo disegno per la dispersione di gas sviluppati nell'ultimo decennio sono caratterizzati da potenza assorbita poco dipendente dalle condizioni operative, caratteristica che ne rende più flessibile l'impiego. Naturalmente, sia la fenomenologia sia le correlazioni tra i parametri divengono più complesse quando si considerano sistemi propriamente multifasici (in realtà, i comportamenti per molte situazioni di tal tipo sono appena esplorati). Lo studio dei sistemi non newtoniani è complicato dal fatto che la viscosità apparente assume valori spazialmente differenti. Secondo un approccio semplice e consolidato questi sistemi possono essere descritti utilizzando un appropriato valore medio di tale parametro, da sostituire alla viscosità dinamica nelle varie correlazioni.

Modalità di approccio ai problemi di agitazione e miscelazione

Processi di miscelazione sono realizzati fin dall'antichità e per secoli dispositivi di agitazione sono stati usati in numerosi settori, con risultati del tutto soddisfacenti, seppure su base empirica. In alcune xilografie del trattato "De Re Metallica" di G. Agricola (edizione italiana del 1563) sono riconoscibili agitatori di configurazione simile a quelli odierni. La necessità di un approccio razionale emerge con l'incremento della potenzialità dei processi e con la necessità di rispettare ben definite specifiche. Sul finire degli anni Cinquanta del secolo scorso, Henry Rushton pose le basi per tale studio razionale: tra l'altro propose l'impiego generalizzato di un agitatore radiale di geometria definita, di compromesso rispetto ai vari possibili processi-obiettivo ("shear sensitive" e "flow sensitive"), ed introdusse il concetto e gli strumenti dello *scale-up* nel campo dell'agitazione.

Lo studio del processo viene rivolto all'individuazione sperimentale - in apparati di geometria per lo più simile, di diversa scala - di condizioni di accettabilità del risultato ed alla loro estrapolazione alla scala industriale. Le indagini sono estese ad agitatori differenti dalla turbina Rushton, più efficaci in specifiche situazioni. I risultati di una tumultuosa stagione progettuale si traducono anche in sintetiche "regole di *scale-up*" ed in "scale di intensità dell'agitazione", utile guida per i tecnici meno esperti. Circa trent'anni or sono comincia a svilupparsi la "scienza dell'agitazione": l'esame globale del comportamento del sistema agitatore-recipiente è sempre più integrato dall'analisi locale, inizia lo studio della fluidodinamica di dettaglio degli agitatori, si affermano valutazioni di efficienza energetica, il comportamento fluidodinamico dell'apparato viene interpretato alla luce di semplici modelli (che consentono, ad esempio, di descrivere lo stato di miscelazione del sistema), la correlazione dei parametri comincia ad essere effettuata non solo seguendo le regole dell'analisi dimensionale ma anche applicando teorie mediate dalla meccanica dei fluidi (si citano, tra tutte, le teorie della turbolenza). Tali sviluppi sono stati resi possibili dalla maturazione di uno spirito scientifico nel settore, dall'impiego di strumenti tipici dell'ingegneria di processo e dalla disponibilità di strumentazione via via più sofisticata.

La frontiera odierna consiste nell'applicare e sviluppare gli strumenti della fluidodinamica numerica (CFD), nei suoi vari aspetti, allo studio dei sistemi agitati: la prospettiva, non appena essi saranno sufficientemente affinati ed affidabili, è di diminuire drasticamente il ricorso alla sperimentazione in impianto pilota, mirandone maggiormente gli obiettivi. Ottima aderenza tra dati sperimentali e risultati delle simulazioni sono già possibili per descrivere il campo di moto in sistemi monofasici, la distribuzione di solido, aspetti riguardanti i sistemi gas-liquido.

Non si può non menzionare, da ultimo, il ruolo fondamentale della miscelazione dei reagenti sulla resa e la distribuzione dei prodotti nel caso di reazioni chimiche, soprattutto nei processi interessati da reazioni multiple e veloci. Il legame tra stato di moto (soprattutto in regime turbolento) e cinetica chimica risulta particolarmente complesso, ma sono già stati testati modelli dei meccanismi microscopici di miscelazione e reazione che consentono predizioni affidabili.

Bibliografia

[1] Mixing in the Process Industries, 2ª Ed., N. Harnby *et al.* (Eds.), Butterworths Heinemann, 1997.

[2] J. Baldyga, J.R. Bourne, Turbulent Mixing and Chemical Reaction, Wiley, 1999.

[3] Handbook of Industrial Mixing, E.L. Paul *et al.* (Eds.), in corso di pubblicazione, 2003.