

RICERCA

Diversi ricercatori sono impegnati a svolgere simulazioni numeriche di tipo multifisico per la progettazione e l'ottimizzazione dei componenti dei bruciatori e della camera di combustione responsabili del corretto ricircolo interno dei gas combusti. Di seguito, la simulazione numerica di reattori 'flameless' a basso impatto ambientale, ottimizzata grazie all'utilizzo del software Comsol Multiphysic



Combustione sotto controllo

La combustione è generalmente associata alla presenza di una fiamma, come è noto da nozioni scolastiche, i processi di ossidazione di alcuni materiali possono avvenire anche in sua assenza. Questo è il caso, ad esempio, del ferro che arrugginisce. Prendendo spunto da fenomeni di questo genere, diversi ricercatori sono impegnati nello studio di processi di ossidazione rapida in assenza di fiamma visibile. Il principale vantaggio legato a questo tipo di applicazione risiede nell'opportunità di operare

processi di combustione con basse emissioni di agenti nocivi per l'ambiente, in particolare di ossidi di azoto (NOx). In forni operanti secondo tale principio funzionale il combustibile e il comburente vengono diluiti con i prodotti di combustione all'interno della camera. Questa procedura è di fondamentale importanza per il corretto funzionamento del processo. Diversi ricercatori sono dunque impegnati a svolgere simulazioni numeriche di tipo multifisico per la progettazione e l'ottimizzazione dei compo-

nenti dei bruciatori e della camera di combustione responsabili del corretto ricircolo interno dei gas combusti. Di seguito, un esempio di simulazione realizzata mediante il software Multiphysics di Comsol.

NOx, sinonimo di Nocivo

La riduzione di emissioni di NOx ha assunto grande importanza in un mondo ecologicamente consapevole. I NOx contribuiscono alla formazione di ozono, ma possono anche causare malattie cardiovascolari e respiratorie

e danni in altre parti del corpo. Inoltre, contribuiscono al riscaldamento globale e insieme al biossido di zolfo sono una delle cause principali delle piogge acide e possono danneggiare il suolo. La produzione di NOx durante la combustione è tipicamente dovuta all'instaurarsi di elevati gradienti termici all'interno della camera di combustione. Nelle fornaci tradizionali la combustione avviene tipicamente per temperature comprese tra 900 e 2.200 °C e la differenza di temperatura tra la radice della fiamma e le zone più pe-

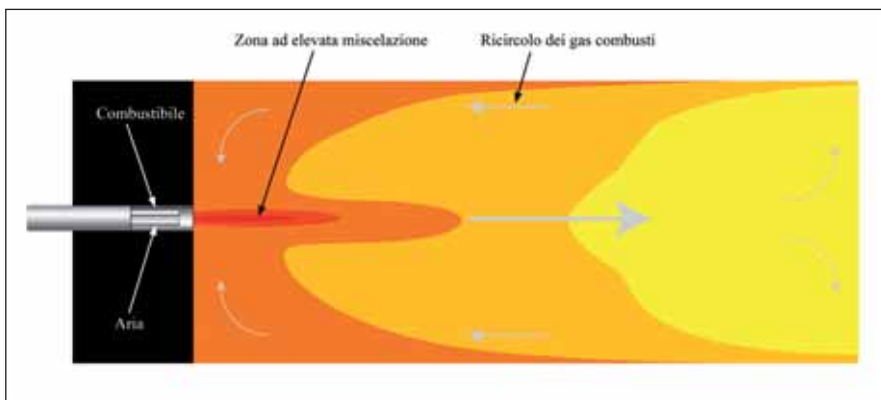
Principio funzionale

Nella combustione 'flameless' l'aria e il combustibile in alimentazione al reattore sono miscelati con i prodotti di combustione che sono ad alta temperatura fornendo quindi l'energia necessaria ad avviare e mantenere attivo il processo di ossidazione all'interno della camera. La luminescenza della fiamma non si vede perché la reazione non avviene in una zona specifica, ma è diffusa nell'intero volume della camera. Ciò nonostante, la zona di ingresso dei fluidi reagenti è comunque

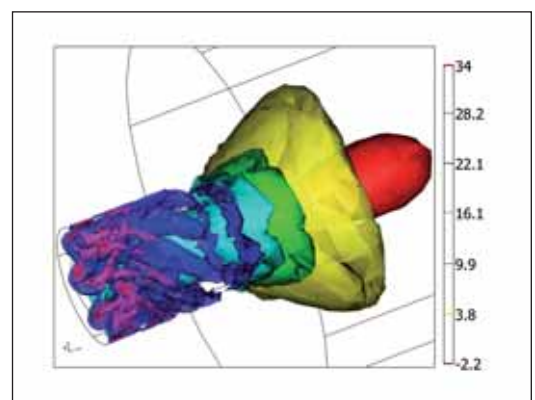
al suolo. La zona di ricircolo, etichettata tramite l'acronimo RFZ (Reverse Flow Zone), induce il gas combusto presente in camera a fluire verso la radice del getto, favorendone dunque la miscelazione con i fluidi in ingresso.

Geometria semplice, aerodinamica complessa

Seppure la geometria di un bruciatore dotato di 'swirler' non risulti eccessivamente complicata, l'aerodinamica risultante è spesso molto complessa a causa dell'alto livello di turbolenza



Principio funzionale del reattore a combustione 'flameless'. Il ricircolo dei gas combusti assicura la combustione in assenza di fiamma e riduce il livello delle emissioni di NOx.



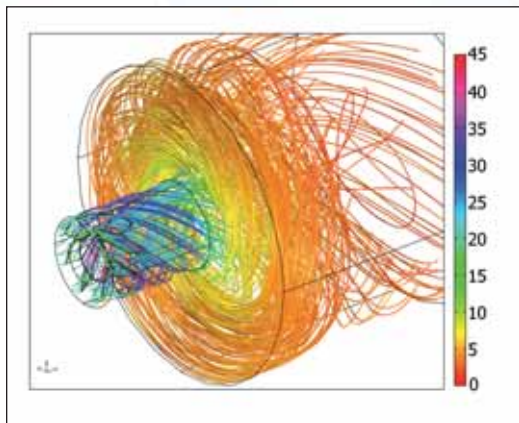
Rappresentazione della velocità assiale. Il 'bulbo' nella zona centrale corrisponde alla zona di ricircolo (RFZ).

riferiche della camera può raggiungere valori dell'ordine di 400-500 °C. D'altra parte, in una fornace flameless possono raggiungersi anche i 1.700 °C, ma in questo caso la temperatura è approssimativamente costante in ogni punto della camera, così da non avere punti caldi e conseguentemente la produzione di NOx è notevolmente attenuata. Per quanto le ridotte emissioni di NOx siano la motivazione principale per lo sviluppo di applicazioni a combustione senza fiamma, anche altri benefici possono essere associati a questo tipo di processo, quali l'uniformità del campo termico e quindi il ridotto stress di tipo meccanico sui vari componenti e il conseguente aumento di affidabilità del sistema, la riduzione del rumore associato al processo, l'opportunità di utilizzare svariati tipi di combustibile anche non di particolare pregio.

caratterizzata da tassi di reazione leggermente più elevati rispetto alle zone più periferiche. È di fondamentale importanza che il combustibile e l'aria siano iniettati in modo tale da generare un ricircolo uniforme all'interno della camera. Questo è spesso realizzato utilizzando un bruciatore dotato di 'swirler', ovvero un deviatore di flusso pallettato: l'aria in transito attraverso i vani tra una paletta e l'altra è costretta ad assumere un moto elicoidale. Dato questo tipo di moto, come fanno i gas combusti ad essere ricircolati verso la zona di ingresso dei fluidi di alimentazione? Il campo di moto elicoidale determina, per velocità di immissione sufficientemente elevate, una zona di bassa pressione in corrispondenza alla parte centrale del getto. Il fenomeno, in analogia e su scala differente, riproduce l'effetto generato da un uragano

del fluido in moto. C'è da sottolineare il fatto che il fenomeno in oggetto, data la sua natura, non può essere riprodotto tramite un approccio simulativo di tipo 2D, ma necessita l'implementazione di modelli 3D a causa del moto elicoidale. Il primo passo per l'implementazione del modello numerico è stato l'importazione nell'ambiente Comsol Multiphysics della geometria di riferimento per lo swirler assiale. Essa, costruita preliminarmente tramite un modellatore solido tridimensionale e salvata in un file di tipo Iges, è stata importata tramite il CAD Import Module di Comsol Multiphysics. Sono state quindi generate due porzioni rappresentative del reattore di combustione, la prima caratterizzante il condotto di alimentazione, la seconda relativa alla camera cilindrica vera e propria. Tutte le geometrie sono

state quindi discretizzate utilizzando una mesh di tipo non strutturato e costituita da elementi tetraedrici, ad inaffittimento più elevato in prossimità dello swirler, ovvero nella porzione del dominio di calcolo maggiormente di interesse ai fini del risultato. L'implementazione del modello ha quindi poi riguardato la fluidodinamica del sistema di iniezione. L'aerodinamica di un getto turbolento di tipo swirling combina le caratteristiche di un moto rotazionale con gli effetti di turbolenza caratteristici del moto in vena libera che si incontrano nel deflusso di un getto e nella propagazione di onde in



Moto elicoidale (m/s) impartito al fluido in ingresso al fine di favorire il ricircolo interno.

mezzi fluidi. Per queste ragioni è stato impiegato il CFD Module di Comsol Multiphysics usando tra i vari modelli di turbolenza disponibili quello di tipo $k-\epsilon$. Il passo successivo ha riguardato l'implementazione del processo ossidativo tramite le equazioni di diffusione e trasporto in cui un opportuno termine sorgente permette la modellazione della cinetica chimica delle reazioni che avvengono nel reattore. Il valore più elevato del tasso di reazione è stato riscontrato in prossimità della terminazione dei canali di immissione, zona in cui i reagenti vengono in contatto tra loro dando inizio al processo di combustione diffusiva. È stato notato come l'ossidante sia

presente a concentrazioni non trascurabili lungo l'intero sviluppo della camera di combustione.

Comportamento termico

Il comportamento termico del sistema è stato simulato usando l'HeatTransfer Module dove un termine di generazione interna di calore è stato correlato all'entalpia di formazione delle specie chimiche e alla loro concentrazione. Data la temperatura elevata dei gas presenti all'interno del reattore, e data la loro struttura triatomica, essi assumono caratteristiche radiative non trascurabili a fini del bilancio termico del sistema. Questi effetti sono stati inclusi nel modello tramite l'implementazione di opportuni termini radiativi, disponibili nel modulo citato. Al fine di definire l'apporto radiativo fornito dal mezzo fluido, esso è stato considerato come un mezzo otticamente spesso (ovvero un mezzo in cui un fotone può percorrere solo una breve distanza prima di essere assorbito). L'adozione di tale ipotesi è stata supportata dalla verifica preliminare dei criteri di applicabilità nel caso specifico. In un mezzo otticamente spesso è possibile esprimere il contributo radiativo, in seno al mezzo stesso, tramite l'adozione di una conducibilità globale equivalente, che tiene in conto sia gli effetti dovuti alla reale conduzione nel mezzo che l'apporto radiativo. I risultati di questo modello non lineare, ottenuti con il solutore Umfpack, evidenziano, così come atteso, una distribuzione termica pressoché costante all'interno del reattore.

Dentro la fornace

Impiegando le potenzialità di post-processing di Comsol Multiphysics è stato possibile analizzare il comportamento termo-chimico e fluidodinamico all'interno del reattore in grande dettaglio. Il fluido in immissione al reattore accelera transitando attraverso

so lo 'swirler' per poi espandersi all'interno della camera di combustione. La rappresentazione delle linee di corrente mostra chiaramente la struttura elicoidale del campo di moto. Come già accennato, nella zona centrale del getto il gradiente di pressione determina la zona di ricircolo primaria (RFZ). Da notare che l'isosuperficie a forma di 'bulbo', nella zona centrale del getto, è caratterizzata da un valore negativo di velocità assiale. Ciò evidenzia l'instaurarsi di una RFZ che favorisce il ricircolo dei gas in camera verso il dispositivo d'immissione. Le analisi condotte tramite Comsol Multiphysics hanno evidenziato, per lo swirler oggetto di studio, l'instaurarsi della RFZ e quindi un comportamento funzionale che riflette quello di un dispositivo di questo genere. Anche la distribuzione termica ottenuta dalle simulazioni risulta in buon accordo con dati sperimentali di riferimento, evidenziando la rispondenza e l'affidabilità del modello. Relativamente alla produzione di NOx richiamiamo il concetto secondo cui il loro meccanismo di formazione è incentivato dalla presenza di elevati gradienti termici all'interno della fornace. Dato il comportamento pressoché isoterma del reattore può dunque desumersi che la formazione di NOx è essere sensibilmente ridotta tramite questo tipo di processo. Dopo aver validato il modello, la sua flessibilità ci consentirà di simulare numerose altre condizioni operative di funzionamento. L'estensione delle simulazioni ad altri fluidi o a diverse velocità di immissione sono solo alcune delle possibili applicazioni.

G. Cammarata è professore ordinario di Fisica Tecnica Industriale presso l'Università degli Studi di Catania.

G. Petrone è ricercatore a contratto presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Meccanica dell'Università degli Studi di Catania.