

Experimental study of turbulence-flame front interactions by means of PIV-LIF technique.

Troiani G., Marrocco M.
Enea C.R. Casaccia, via Anguillarese 301, Rome Italy.

Abstract

Interaction between turbulence and flame front is of practical importance to control the efficiency of combustion dynamics.

It is experimentally accepted that such interaction is characterized by turbulent velocity fluctuations being proportional to the enhancement of mean consumption rate, hence to the turbulent burning velocity, but, conversely, velocity gradients can also extinguish the flame front (flame quenching).

To investigate this issue, we combined two laser techniques, one for the measurement of velocity fields (PIV) and the other for the determination of concentration fields of intermediate species (LIF from OH radical).

This allowed us to superimpose the velocity field onto the position of the laminar flame front, deduced from the OH concentration distribution. The flame front surface revealed a high degree of wrinkling caused by turbulence and it was found that large scale structures had the capability of isolating portions of reacting flow (islands), even if no local quenching was detected.

This experimental approach serves also the purpose of measuring the turbulent burning velocity that necessitates the knowledge of the flame surface extension evaluated by means of fractal geometry concepts.

Future developments include the analysis of the interactions of the small scales of turbulence with the laminar flame thickness extension at high Karlovitz numbers.

Introduzione

In quasi tutte le applicazioni pratiche della combustione come, motori a combustione interna, turbine a gas, caldaie e forni, le reazioni chimiche prendono luogo in condizioni di flusso turbolento. In flussi turbolenti, il mescolamento tra combustibile ed ossidante aumenta drasticamente con conseguente crescita del rilascio di calore e quindi dell'efficienza. Alla luce di quanto detto appare evidente come sia fondamentale uno studio teorico e sperimentale di flussi reagenti turbolenti condotto sia su apparecchiature da laboratorio che industriali.

Il lavoro presentato è stato quello di sviluppare una tecnica di diagnostica laser che permettesse di studiare le interazioni tra la chimica e la fluidodinamica del processo di combustione.

Lo studio ha riguardato fiamme premiscelate turbolente. L'interesse rivolto verso questo tipo di fiamme è ad oggi notevole dato che, rispetto alle tipiche fiamme diffusive, presentano una maggiore efficienza di combustione accompagnata da una minor emissione di inquinanti soprattutto per quanto riguarda i composti azotati NOx.

Nonostante tali evidenti vantaggi, l'adozione della combustione premiscelata nei combustori turbolenti presenta comunque alcune difficoltà, che derivano principalmente dall'esistenza dei limiti di infiammabilità superiore (per miscele ricche) ed inferiore (per miscele povere) che limitano la capacità di una fiamma premiscelata di autosostenersi. Vi sono, infatti, rapporti di miscela per i quali la fiamma non riesce a propagarsi nel verso della miscela reagente anche dopo un'ignizione forzata come ad esempio una scintilla. Per avere una combustione stabile è pertanto necessario stare all'interno dei detti limiti.

Esistono altri fenomeni di instabilità di fiamma come il ritorno di fiamma (flash-back) e il distacco di fiamma (blow-off o lift-off).

Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale consiste di due distinte catene di misura connesse fra di loro: il sistema per la Laser Induced Fluorescence per la misura della concentrazione del radicale OH e quello per la Particle Image Velocimetry per la misura del campo fluidodinamico (figura 1):

XIV AIVELA Annual Meeting
Rome, 6-7 November 2006

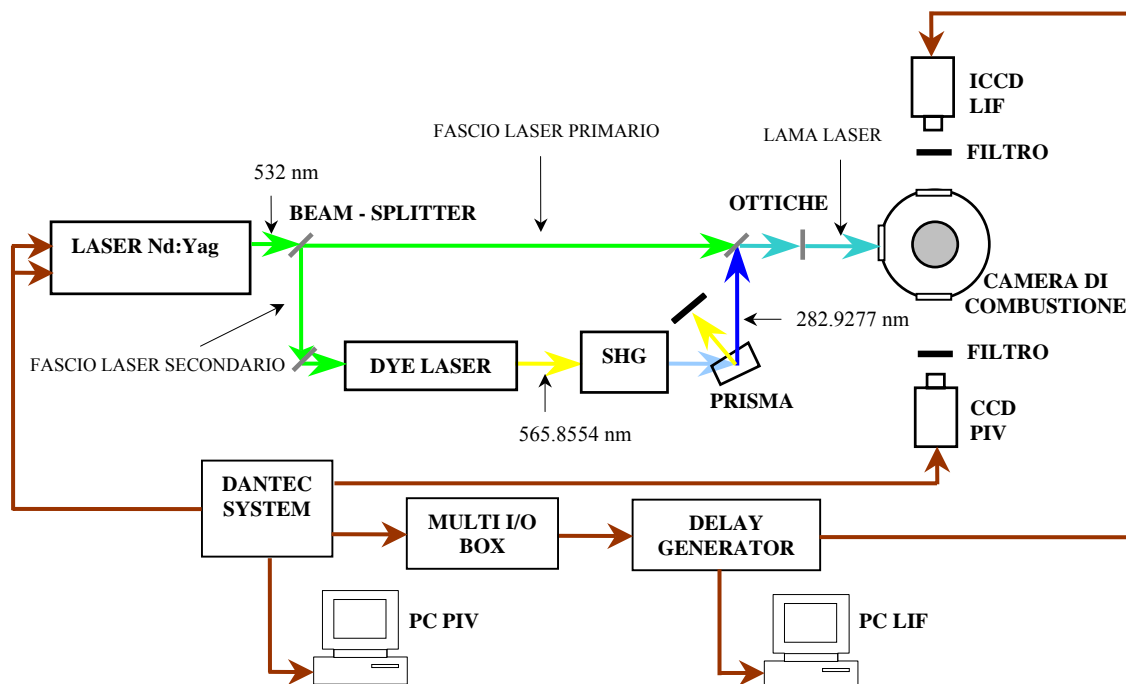


Figura 1 - Apparato sperimentale complessivo

La sorgente laser è un Nd:Yag che genera un impulso ad una lunghezza d'onda pari a 532 nm. Questo fascio laser passa attraverso un beam-splitter, che devia parte del fascio laser nella direzione del laser a coloranti (fascio laser secondario) e lascia passare la restante parte nella direzione della camera di combustione (fascio laser primario).

Il fascio laser secondario, passando attraverso il laser a coloranti (Dye Laser), subisce una modifica della propria lunghezza d'onda da 532 a 565.8 nm. Questa variazione si riscontra in maniera evidente anche nel colore dell'emissione luminosa che dal verde passa al giallo.

Dopo aver subito questa variazione il fascio secondario viene indirizzato verso il cristallino del SHG (secondary Harmonic Generator); attraversandolo, parte del raggio dimezza la propria lunghezza d'onda portandosi a 282.9 nm (nelle frequenze dell'ultravioletto), mentre la restante parte rimane invariata. In uscita dal SHG si sovrappongono, quindi, sullo stesso cammino ottico un'armonica a 565.8 nm ed una a 282.9 nm.

Dato che l'armonica in grado di provocare l'eccitazione dell'OH e quindi la sua fluorescenza è quella che si trova nelle frequenze dell'ultravioletto, si rende necessario separare questo doppio fascio laser, in modo da poter utilizzare il segnale con la lunghezza d'onda desiderata. Il doppio fascio laser viene quindi indirizzato verso un prisma che ha la capacità di separare raggi con lunghezze d'onda diverse in base alla differenza esistente tra gli angoli di diffrazione dei raggi stessi. Si generano così due segnali laser distinti: il raggio di luce gialla viene terminato contro un pannello nero; il raggio ultravioletto, quindi invisibile all'occhio umano, viene indirizzato verso la camera di combustione.

Poiché anche il fascio laser primario è indirizzato verso la camera di combustione, i due fasci laser, quello primario e quello secondario vengono sovrapposti in modo da far sì che le tecniche PIV e LIF rispettivamente indagano la stessa regione di spazio. Una volta che il raggio verde (utilizzato per la PIV) e il raggio UV risultano sovrapposti, una lente piana cilindrica li espande in due lame laser anch'esse sovrapposte.

Questo metodo è il miglior modo per poter illuminare e quindi analizzare una sezione del getto combusto: tramite la PIV si ricaverà l'andamento del campo fluidodinamico; tramite la LIF e quindi la rilevazione della concentrazione degli OH, si ricaverà il fronte di fiamma.

La figura 2 mostra il profilo di temperature e concentrazione del radicale OH ottenuto tramite una simulazione monodimensionale. Attraverso il fronte di fiamma la temperatura subisce un brusco innalzamento. Lo spessore termico del fronte di fiamma è individuato dalla relazione

XIV AIVELA Annual Meeting
Rome, 6-7 November 2006

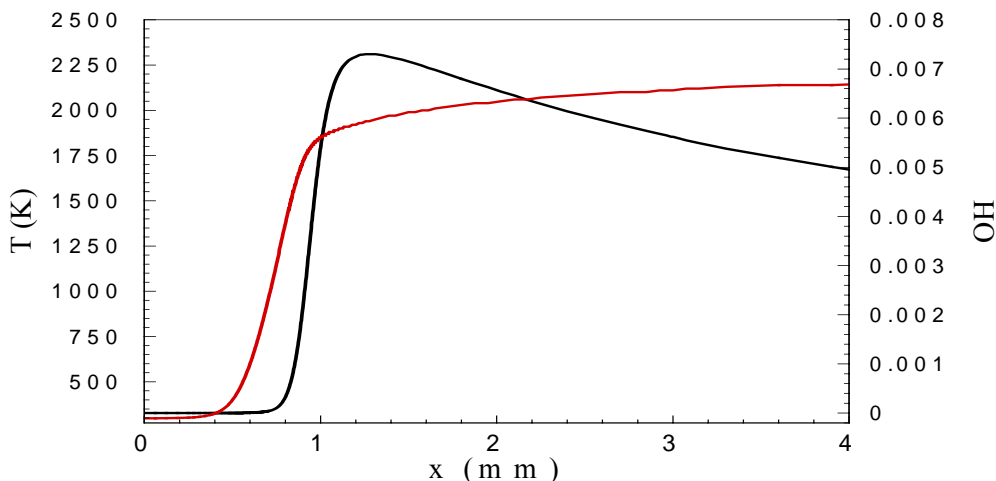


Figura 2 Profilo di concentrazione del radicale OH attraverso il fronte di fiamma, linea nera. Profilo di temperatura linea rossa.

$$\delta_{th} = \frac{\Delta T}{\nabla T_{Max}}$$

L'andamento della concentrazione del radicale OH è qualitativamente simile a quello della temperatura, anche se la posizione del gradiente massimo non coincide. La posizione del fronte di fiamma può essere assunta come quella in cui si ha il gradiente massimo di temperatura. Il dato disponibile sperimentalmente però, è la concentrazione degli OH. L'errore che si commette associando la posizione del fronte di fiamma con la posizione del gradiente massimo di OH è comunque minore dello spessore termico del fronte di fiamma. Risulta quindi una buona approssimazione la determinazione della posizione del fronte di fiamma attraverso la distribuzione di concentrazione del radicale OH.

Quando il segnale laser viene trasformato in una lama di luce per mezzo di una lente piano cilindrica, la potenza relativa al segnale viene ridistribuita sul piano della lama. Tuttavia, questa ridistribuzione non avviene in maniera uniforme e ciò comporta che porzioni distinte di spazio siano illuminate con diverse intensità. Nel processo LIF ciò significa eccitare in maniera dissimile i radicali OH che si trovano in due zone distinte della fiamma. Un'eccitazione non uniforme provoca una fluorescenza che non rispecchia la reale distribuzione degli OH nel volume di misura, quanto piuttosto l'intensità del segnale che l'ha provocata: maggiore è l'intensità del segnale e maggiore è la fluorescenza indotta.

La determinazione del pattern di potenza permette allora la normalizzazione dei dati acquisiti in modo che essi rispecchino la reale distribuzione della fluorescenza: più il pattern di potenza mostra che in un punto l'intensità della luce incidente è bassa, più si impone un guadagno elevato al valore dell'intensità della luce emessa e rilevata dalla telecamera LIF (ICCD).

Per determinare l'andamento del pattern di potenza si è utilizzata la stessa telecamera LIF. In particolare, si è inserito nella camera di combustione un piano rigido bianco e si è fatto in modo che fosse posizionato in corrispondenza del volume di prova e ruotato di 45° rispetto alla lama ultravioletta e alla telecamera ICCD. Così facendo si è rilevata l'intensità luminosa con cui la lama risulta incidere sul piano rigido; i dati così acquisiti sono stati processati al fine di determinare una matrice di normalizzazione.

Le immagini LIF oltre a subire il processo di normalizzazione appena descritto, devono essere sottoposte anche alla sottrazione del valore di background, vale a dire del valore dell'intensità luminosa rilevato nelle zone buie delle immagini. Queste zone, che corrispondono alle regioni completamente prive di radicali OH, e che quindi dovrebbero essere caratterizzate da un valore nullo del segnale di fluorescenza, risultano invece avere un valore mediamente costante. Per fare in modo che le zone buie mostrino effettivamente la totale assenza dei radicali OH e che quindi presentino un'intensità nulla per il segnale di fluorescenza occorre sottrarre a tutto il campo di un'immagine il valore di

XIV AIVELA Annual Meeting Rome, 6-7 November 2006

background. Dopo aver eseguito questa operazione, per aver un campo di intensità che andasse da 0 a 1 i dati sono stati ulteriormente normalizzati dividendoli per il valore massimo.

Oltre alle operazioni di normalizzazione e sottrazione del background, si è effettuato un ulteriore processamento dati. Ad ogni immagine LIF si sono applicate due operazioni di convoluzione consecutive con un filtro gaussiano. Questo tipo di operatore ha permesso di rimuovere parte del rumore presente nel segnale sotto forma di fluttuazioni dei dati e di ottenere andamenti più regolari del campo di concentrazione. Questa operazione è una sorta di filtro medio, che però invece di dare lo stesso peso ai valori che prendono parte alla media, utilizza una funzione peso bidimensionale che deriva dai valori di una funzione gaussiana. L'equazione che definisce la gaussiana è

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}$$

dove σ rappresenta la deviazione standard. Nel caso in esame, questa tecnica è stata utilizzata scegliendo una funzione peso che lavora su campi di 5x5 pixels, con una deviazione standard σ pari a 0.7. Le immagini che verranno mostrate in seguito sono state sottoposte a tutti i trattamenti descritti (normalizzazione, sottrazione background, filtro gaussiano).

Analisi dati

Il bruciatore analizzato è realizzato con un becco Bunsen anulare alimentato con una miscela di aria-metano. La fiamma è ancorata all'uscita del bruciatore per mezzo di una zona di ricircolo creata da un corpo tozzo, vedi schema figura 3. Nella zona di ricircolo vengono intrappolati gas combusti ad elevata temperatura che a loro volta riscaldano la miscela fresca favorendone l'accensione. Senza tale zona la fiamma non potrebbe restare ancorata al bruciatore, almeno non per

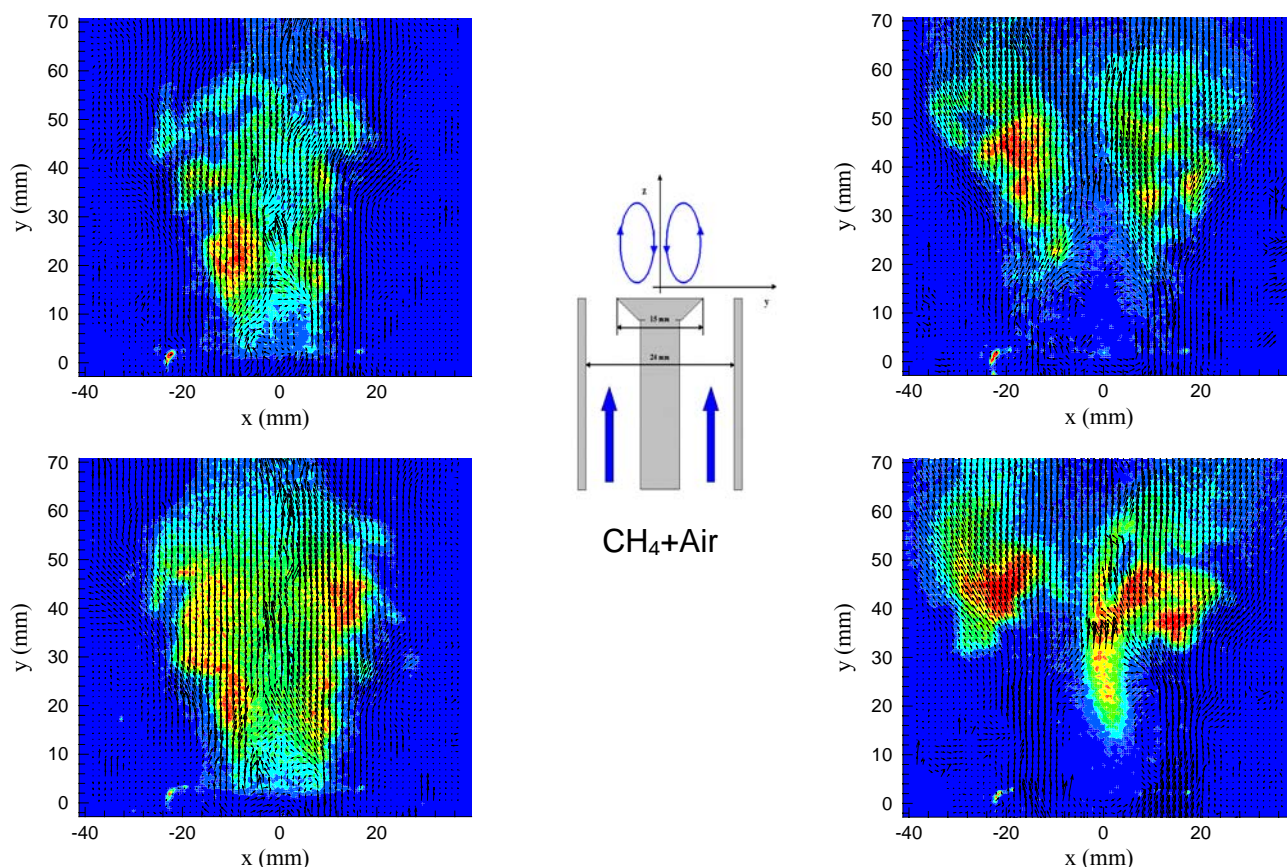


Figura 3 Campo vettoriale di velocità sovrapposto alla distribuzione di concentrazione del radicale OH. Sinistra-alto: rapporto di equivalenza 0.67. Sinistra-basso: rapporto di equivalenza 0.80. Destra-alto: rapporto di equivalenza 1.03. Destra-basso: rapporto di equivalenza 1.12. Al centro: schema costruttivo del getto, si nota la presenza del corpo tozzo capace di creare una zona di ricircolo per l'ancoraggio della fiamma.

XIV AIVELA Annual Meeting Rome, 6-7 November 2006

queste velocità medie, che sono dell'ordine dei 4-6 m/s.

Sono state analizzate sperimentalmente quattro fiamme a differenti rapporti di equivalenza.

La variazione del rapporto di equivalenza si è ottenuta variando la sola portata del metano, così da lasciare sostanzialmente inalterata la portata complessiva della miscela e quindi le caratteristiche fluidodinamiche del getto. In tal modo la struttura della turbolenza del getto isoterma rimane invariata per le quattro configurazioni esaminate. Come si vedrà in seguito le differenze topologiche delle quattro fiamme realizzate dipendono solamente dalle differenti velocità di combustione laminari, dipendenti esclusivamente dal rapporto di equivalenza stabilito.

Una volta ottenute le mappe di concentrazione del radicale OH e quella del campo di velocità, si è proceduto ad una sovrapposizione delle due immagini. Nella figura 3 sono riportate le immagini sovrapposte PIV/LIF per le quattro fiamme.

Al variare del rapporto di equivalenza le quattro fiamme interagiscono col getto isoterma in modo diverso, in particolare varia il punto di ancoraggio della fiamma, che si sposta sempre più a valle all'aumentare della portata di metano.

In tutte e quattro i casi la combustione avviene dall'esterno del getto verso il suo asse. La presenza dei prodotti di combustione sull'asse di simmetria del getto modifica il campo fluidodinamico del flusso isoterma. Infatti all'aumentare del rapporto di equivalenza si ha un aumento delle temperature di combustione con conseguente maggiore espansione. L'effetto dell'espansione termica è evidente nella fiamma con rapporto di equivalenza pari a 1.03, dove la fiamma è allontanata dall'asse del getto, creando sostanzialmente un mantello cilindrico reagente. Nella figura 4 è riportato un ingrandimento di una zona del fronte di fiamma.

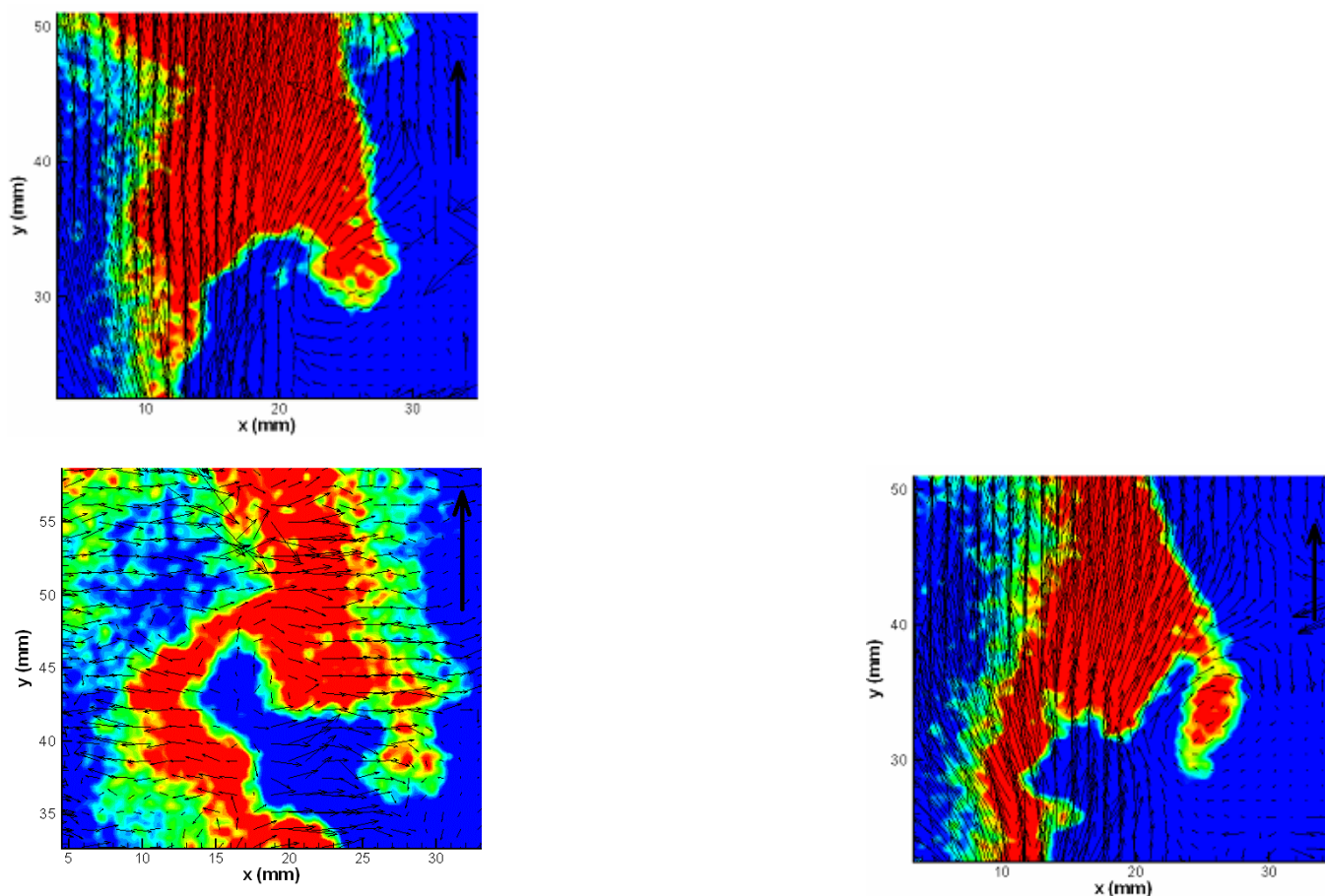


Figura 4 Analisi locale dell'interazione del fronte di fiamma con il campo turbolento

Nella foto in alto a sinistra è evidente la presenza di una struttura vorticoso che comincia ad isolare una porzione di fronte reagente, nella foto in basso a destra invece la separazione di una isola reagente è quasi avvenuta del tutto.

XIV AIVELA Annual Meeting
Rome, 6-7 November 2006

Il pannello in basso a destra evidenzia invece l'assottigliamento del fronte di fiamma ad opera di uno shear-layer localizzato. Per gradienti di velocità maggiori si può arrivare al quenching, cioè ad una estinzione localizzata.

Nelle figure 3 e 4 inoltre è possibile notare il corrugamento del fronte di fiamma ad opera delle fluttuazioni del campo fluidodinamica. Tale corrugamento avviene su diverse scale, da quelle paragonabili alle dimensioni del diametro del getto fino ad arrivare a quelle più fini dell'ordine dello spessore del fronte di fiamma, figura 4.

Qualora le scale della turbolenza fossero maggiori dello spessore del fronte di fiamma, esso manterrebbe intatte le sue caratteristiche diffusivo/laminari, venendo solamente corrugato dal campo fluidodinamico.

Tale corrugamento risulta in un aumento della superficie attiva del fronte di fiamma, aumentando di fatto la velocità di combustione. Infatti, considerando lo schema di figura 5, una portata di miscela combustibile costante e sfruttando l'equazione di continuità si ottiene

$$\frac{S_T}{S_L} = \frac{A_T}{A} \propto \frac{u'}{S_L}$$

dove S_T e S_L sono le velocità di combustione turbolenta e laminare, mentre A_T e A_L rappresentano la superficie convoluta del fronte di fiamma laminare e la superficie media spazzata dal fronte di fiamma turbolento.

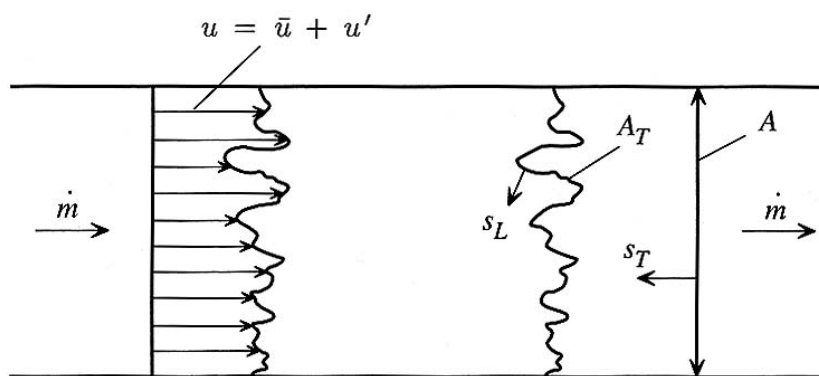


Figura 5 Schema fronte di fiamma turbolento

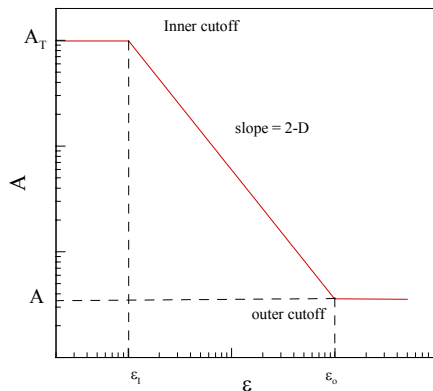
Secondo tale schema la velocità di combustione turbolenta aumenta con l'aumentare della superficie convoluta del fronte di fiamma laminare, che a sua volta può essere considerata proporzionale alle fluttuazioni di velocità (Damkohler 1940). L'aumento della superficie convoluta con le fluttuazioni turbolente è oggetto di studio, in particolare la geometria del fronte di fiamma sembra mostrare delle caratteristiche proprie della geometria frattale.

Un oggetto è detto frattale di dimensione D qualora la misura della sua superficie aumenti al diminuire delle dimensioni dello strumento con cui si misura la superficie. Se la superficie varia secondo una legge esponenziale con esponente costante, allora l'oggetto misurato è un frattale di dimensione D (figura 6, sinistra).

La misura della concentrazione del radicale OH e quindi la conoscenza della posizione del fronte di fiamma, permette la misura della dimensione frattale del fronte.

Risultati preliminari mostrano che la dimensione frattale resta invariata nelle quattro configurazioni esaminate. In particolare resta invariata al variare del rapporto u'/S_L . Questo risultato conferma misure effettuate in precedenza (Gulder 2000) ma è in contrasto con quanto riportato da altri autori i quali sostengono che la dimensione frattale di un fronte di fiamma dovrebbe tendere, per alti valori di u'/S_L , a quella delle isosuperfici di scalari passivi ($D = 2.37$, Sreenivasan et al. 1986).

In quest'ottica la velocità turbolenta di combustione viene a dipendere dalle fluttuazioni di velocità turbolente, dalla dimensione frattale del fronte, e dalle scale fisiche del fronte, minima e massima, entro cui lo scaling frattale ha luogo, figura 6. La dipendenza dalle fluttuazioni turbolente è importante perché stabilisce quanto siano separate le scale della



$$\frac{S_T}{S_L} = \left\{ f\left(\frac{u'}{S_L}\right) \cdot A_T^{0.25} \cdot Re^{0.75} \right\}^{D-2}$$

Figura 6 Scaling frattale del fronte di fiamma. Dipendenza della velocità fronte di fiamma dai parametri della fiamma e dal campo fluidodinamica (Gouldin 1987).

turbolenza da quelle del fronte di fiamma e, in caso, quanto la turbolenza interagisca con la struttura interna del fronte. (Ronney et al. 1992, Poinso et al. 1991).

L'equazione riportata nella figura 6 rappresenta un modello per il calcolo della velocità di combustione turbolenta normalizzata con quella laminare (Gouldin 1987). La funzione $f(u'/S_L)$ tiene conto dell'interazione delle piccole scale della turbolenza col fronte di fiamma, A_T è una costante da determinare e il numero di Reynolds invece tiene conto del rapporto fra la macro e micro scala turbolenta secondo la relazione $Re = A_T (L/\eta)^{(3/4)}$.

Sviluppi futuri

L'utilizzo combinato PIV/LIF ha quindi permesso di evidenziare l'interazione mutua fra fronte di fiamma e campo fluidodinamico turbolento.

Attraverso la visualizzazione del fronte di fiamma istantaneo è possibile misurare la sua estensione e da qui risalire alla velocità turbolenta di combustione. I primi risultati, sebbene preliminari, sono incoraggianti.

In futuro sarà possibile:

- Misurare le dimensioni frattali a differenti valori di intensità turbolenta.
- Misurare direttamente le velocità di combustione turbolente
- Misurare l'estensione dello scaling frattale delle superfici regenti.
- Studiare l'interazione delle piccole scale della turbolenza all'interno dello spessore del fronte di fiamma.
- Stabilire nuovi modelli per la predizione delle velocità turbolente di combustione.

Bibliografia

- [1] Sreenivasan, K.R., Meneveau, C., "Fractal Facets of Turbulence", Journal of Fluid Mech., **173**, 357-386, 1986.
- [2] Gulder, O.L. et al., "Flame front surface characteristics in turbulent premixed propane/air combustion", Comb. And Flame, **120**, 407-416, 2000.
- [3] Ronney, P. D., Yakhot, V., "Flame broadening effects on premixed turbulent flame speed", Comb. science and tech., **86**, 31-43, 1992.
- [4] Poinso, T., Veynante, D., Candel, S., "Quenching processes and premixed turbulent combustion diagrams", Journal of Fluid Mech., **228**, 561-606, 1991.
- [5] Gouldin, F., "An application of fractals to modeling premixed turbulent flames", Comb. and Flame, **68**, 249-266, 1987.