

## SOMMARIO

<b>LEZIONE 22. COMBUSTIONE DELLA SINGOLA GOCCIA.....</b>	<b>317</b>
<i>LE VARIABILI DI SHVAB-ZEL 'DOVICH.....</i>	<i>317</i>
<i>LA COMBUSTIONE SUBCRITICA .....</i>	<i>318</i>
<i>LA COMBUSTIONE TRANSCRITICA E SUPERCRITICA.....</i>	<i>322</i>
<i>COMBUSTIONE DI EMULSIONI E COMBUSTIBILI BIFASE.....</i>	<i>323</i>
<i>RIFERIMENTI E NOTE .....</i>	<i>324</i>
<i>TESTI CONSIGLIATI .....</i>	<i>324</i>

**A. Cavaliere**

**A. D'Alessio**

**M. de Joannon**

## lezione 22. combustione della singola goccia

### Le variabili di Shvab-Zel'dovich

Le leggi di vaporizzazione della singola goccia sono state ricavate per mezzo dell'integrazione delle equazioni di conservazione. Nel caso di una goccia in regime di combustione si può seguire lo stesso tipo di procedimento utilizzando delle variabili conservative, ottenute come combinazione delle variabili primitive, per cui vanno scritti anche i termini di generazione.

A tal fine si assume che la composizione chimica della fase gassosa sia solo di tre componenti (il combustibile, l'ossidante ed un generico prodotto di combustione) e che la reazione di ossidazione avvenga solo in condizioni stechiometriche, per cui é possibile scrivere la seguente equazione stechiometrica in termini ponderali



per cui i termini di generazione sono legati dalle seguenti relazioni

$$-\dot{\rho}_F = -\frac{\dot{\rho}_{Ox}}{s} = \frac{\dot{\rho}_P}{s+1} = \frac{(\rho \dot{h}_s)}{\Delta H^c} \quad (7.34)$$

dove  $\Delta H^c$  è il potere calorifico (inferiore) del combustibile ed "s" è il rapporto stechiometrico ponderale dei due reagenti . Pertanto con opportune combinazioni delle variabili é possibile ottenere delle equazioni di conservazione. Per esempio dai due bilanci relativi al combustibile e all'ossidante si ottiene

$$B(Y_F) = \dot{\rho}_F \quad (7.35)$$

$$B(Y_{Ox}) = \dot{\rho}_{Ox} \quad (7.36)$$

è possibile, moltiplicando su ambo i lati della prima equazione per s, ottenere:

$$sB(Y_F) = B(sY_F) = s\dot{\rho}_F \quad (7.37)$$

sottraendo quindi membro a membro la 7.37 dalla 7.36 si ottiene in virtù dell'eq. 7.34:

$$B(Y_{Ox} - sY_F) = 0 \quad (7.38)$$

sotto l'ipotesi di uguale diffusività del combustibile e dell'ossidante.

Si è così costruita una variabile conservativa

$$\beta_{O,F} = Y_{Ox} - sY_F \quad (7.39)$$

Con analogo ragionamento si possono definire le seguenti variabili:

$$\beta_{h,F} = h_s + \Delta H^c Y_F \quad (7.40)$$

$$\beta_{h,Ox} = h_s + \frac{1}{s} \Delta H^c Y_{Ox} \quad (7.41)$$

Tutte queste variabili vengono dette variabili di Shvab-Zel'dovich

**La combustione subcritica**

Per ognuna di queste variabili è possibile scrivere una equazione di conservazione con conosciute condizioni al contorno e si può dunque procedere ad una integrazione identica a quella eseguita nel caso evaporativo.

Il risultato finale è identico e le equazioni 7.17, 7.18 sono ancora valide con nuovi valori di B così definiti:

$$B_{h,F} = \frac{c_p (T_\infty - T_s) + (Y_{F_\infty} - Y_{F_s}) \Delta H^c}{\Lambda + c_L (T_s - T_o) + (Y_{F_s} - Y_{F_o}) \Delta H^c} \quad (7.42)$$

$$B_{h,Ox} = \frac{c_p (T_\infty - T_s) + \frac{1}{s} (Y_{Ox_\infty} - Y_{Ox_s}) \Delta H^c}{\Lambda + c_L (T_s - T_o) + \frac{1}{s} (Y_{Ox_s} - Y_{Ox_o}) \Delta H^c} \quad (7.43)$$

$$B_{F,Ox} = \frac{s(Y_{F_\infty} - Y_{F_s}) - (Y_{Ox_\infty} - Y_{Ox_s})}{s(Y_{F_s} - Y_{F_o}) - (Y_{Ox_s} - Y_{Ox_o})} \quad (7.44)$$

La seconda espressione offre la possibilità di valutare il parametro B in maniera semplice; infatti si può fissare in molte condizioni di interesse pratico  $Y_{Ox_\infty} = 1$ ,  $Y_{Ox_s} = Y_{Ox_o} = 0$ . Infatti l'ossidante è il solo componente ad essere presente all'infinito, mentre non può essere presente sulla superficie ed all'interno della goccia in quanto tutto l'ossidante è supposto consumarsi completamente all'interno della fiamma a diffusione, localizzata a sua volta, concentricamente, all'esterno della superficie della goccia. Inoltre si può ipotizzare che la temperatura della superficie della goccia sia uguale alla temperatura di ebollizione del combustibile ( $T_s = T_b$ ). Pertanto il parametro di trasferimento  $B_{h,Ox}$  che compare nell'eq.7.43 può essere riscritto come

$$B_{h,Ox} = \frac{c_p (T_\infty - T_s) + \frac{1}{s} \Delta H^c}{\Lambda + c_L (T_s - T_o)} \quad (7.45)$$

A titolo di esempio consideriamo il caso di una goccia in regime di combustione in un ambiente di aria a temperatura di 300 °C. Per un combustibile con temperatura di ebollizione di 300 °C, un calore latente di vaporizzazione di 200 KcalKg<sup>-1</sup>, un calore di combustione di 10.000 KcalKg<sup>-1</sup> ed un rapporto stechiometrico di 15 si ottiene:

$$B_{h,ox} = \frac{1}{15} \frac{10.000}{200 + 300} \cong 1.3$$

e cioè un valore di  $\ln(B+1)$  di circa 1 per cui è determinata una velocità di vaporizzazione simile a quella ottenuta senza combustione.

Questo regime di combustione quasi stazionaria viene difficilmente raggiunto perchè l'ignizione della goccia, anche sotto l'ipotesi di goccia isolata e a simmetria sferica, avviene con un certo ritardo rispetto al tempo in cui viene per la prima volta esposta ad un ambiente ad alta temperatura.

Questo aspetto è bene dimostrato dall'articolo di Sang-Chun Rah et al (1986).

Nel diagramma di fig. 7.12 gli autori riportano i ritardi all'ignizione di una goccia di olio (Gulf Coast #6) contro la concentrazione di ossigeno dell'ambiente riscaldato a due temperature (T=1000K e 2000K).

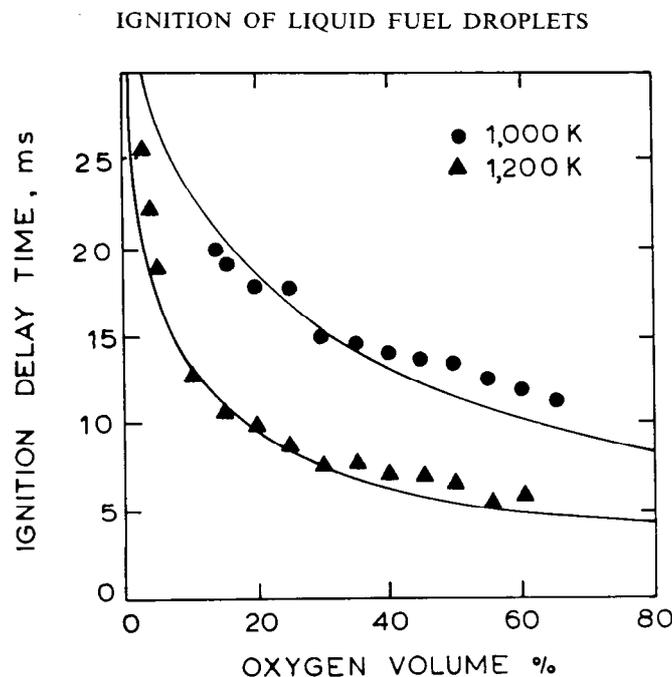


Fig. 7.12 Ritardi di ignizione di una goccia isolata di olio Gulf coast #6 contro la concentrazione di ossigeno per due temperature ambiente di 1000K e 2000K (Sang-Chun Rah, A.F. Sarofim e Janos M. Beer "Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets", Part II: "Ignition Studies", su Comb. Sci. Tech., 49, 169, 1986).

I dati sperimentali riportati, con pallini e triangoli pieni, correlati con un modello basato sulla teoria termica dell'ignizione, mostrano che i ritardi crescono al diminuire della concentrazione di ossigeno e della temperatura ambiente. Ciò significa che per bassi valori della concentrazione di ossigeno gran parte della goccia è vaporizzata prima di ignirsi e quindi i processi di vaporizzazione e combustione debbono considerarsi in serie.

L'ignizione (ed analogamente l'estinzione) è un processo controllato dalla competizione tra il rilascio di calore, che per una miscela a bassa temperatura si realizza in un tempo relativamente lungo, e la dispersione del calore, che nell'interno di punti di ristagno può realizzarsi in tempi relativamente brevi.

Nel caso della goccia in presenza di un campo convettivo, la linea di corrente, disposta su una retta passante per il centro della goccia, subisce una rapida deviazione in vicinanza dell'interfaccia liquido-gas, per cui il flusso si apre generando un punto di ristagno. Nell'interno di questo si stabilizza una fiamma solo nel caso in cui il "tempo chimico" (tempo caratteristico delle reazioni di ignizione) sia più breve del tempo di permanenza della miscela in questo intorno. Al di sopra di una certa velocità questa condizione non è verificata per cui la fiamma è costretta a spostarsi più a valle dove i tempi di permanenza crescono.

Aumentando ancora la velocità, i primi nuclei di ignizione si spostano nella scia della goccia e la combustione avviene in condizioni di quasi premiscelazione. La velocità, per cui ciò avviene, viene detta di estinzione; essa si abbassa sempre più al diminuire della concentrazione di ossigeno. Queste affermazioni trovano conferme in modelli analitici e numerici nonché in esperimenti in campi diffusivi nell'intorno di punti di ristagno.

L'esempio riportato in fig. 7.13 è relativo ad un esperimento realizzato per indagare l'estinzione di fiamma su un mezzo poroso cilindrico imbevuto con un combustibile liquido (simile ad uno stoppino di candela) in cui veniva misurata la velocità relativa gas-liquido, per cui la fiamma veniva trascinata lontana dall'interfaccia liquido-gas (velocità di estinzione) a diverse concentrazioni di ossigeno. Al diminuire della concentrazione di ossigeno, la velocità di estinzione diminuisce, indipendentemente dal tipo di diluente usato per ottenere concentrazioni di ossigeno inferiori di quella atmosferica (azoto ed anidride carbonica).

Al di sotto di concentrazioni comprese tra il 14÷16%, per l'azoto, e 17÷18% per l'anidride carbonica l'autore dell'articolo (A. Sjögren: "Soot formation by combustion of an atomized fuel") osservava che la velocità di estinzione andava a zero.

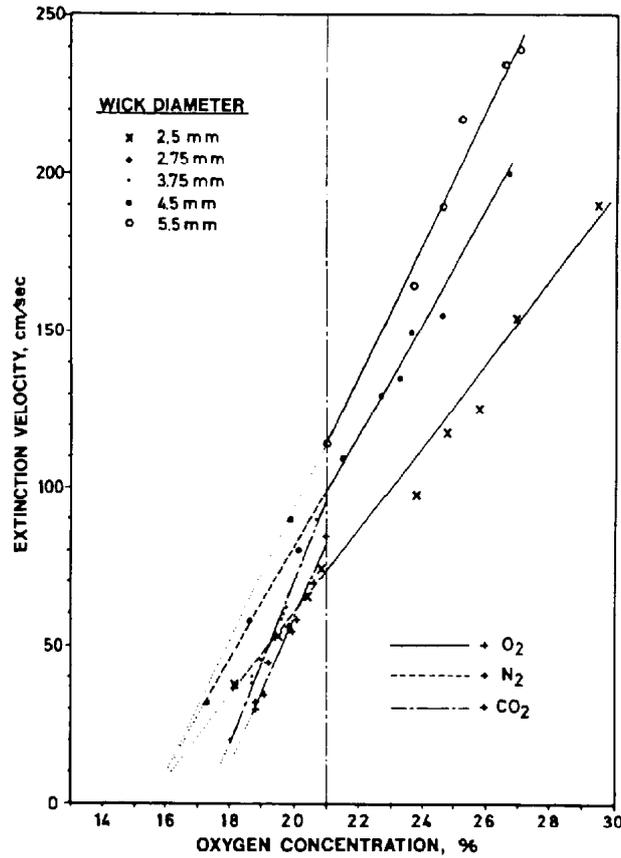


Fig. 7.13 Velocità di estinzione contro concentrazione di ossigeno (A. Sjogren: "Soot formation by combustion of an atomized fuel").

La rilevanza di queste osservazioni sulla velocità di estinzione risiede nel fatto che per valori più bassi di questa velocità una fiamma a diffusione si stabilizza nell'intorno della goccia mentre per valori più alti la fiamma si allontana dalla goccia. In figura 7.14 sono riportati schematicamente questi due regimi detti di "fiamma ad involuppo" e "fiamma di scia".

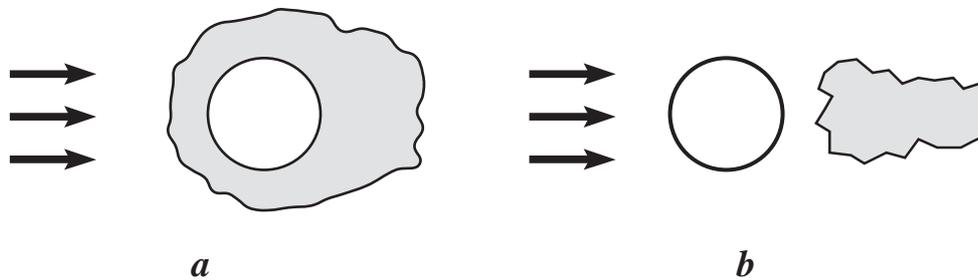


Fig. 7.14 Rappresentazione schematica di "fiamme ad involuppo" e "fiamme di scia".

Nel primo caso i vapori che alimentano la zona, in cui avviene il rilascio di calore, subiscono un processo di pirolisi ad alta temperatura; mentre nel secondo caso i vapori si

premiscelano con l'aria prima dell'ignizione, per cui la loro ossidazione è competitiva con il processo di pirolisi.

Le implicazioni della presenza di zone pirolitiche ad alta temperatura saranno trattate in un'altra lezione; è comprensibile, comunque, che nel caso della fiamma ad involuppo si sia rilevata sperimentalmente una maggiore formazione di fuliggine rispetto al regime con fiamma di scia.

### ***La combustione transcritica e supercritica***

Considerazioni analoghe a quelle fatte per il processo di evaporazione possono essere fatte nel caso in cui il combustibile vaporizzato si ossidi. In particolare anche in quest'ultimo caso è utile analizzare i profili temporali delle dimensioni e della temperatura della goccia nonché il comportamento della costante di velocità di combustione al variare delle condizioni termodinamiche dell'ambiente in cui la gocciolina è immersa. E' da tener presente però che per gocce in regime di combustione è necessario considerare la solubilità degli inerti presenti nella fase gas iniziale e dei prodotti di combustione, tralasciando la presenza dell'ossidante.

Come detto precedentemente, anche nel caso in cui la goccia si trovi in regime di combustione, in condizioni subcritiche è possibile assumere l'ipotesi di quasi stazionarietà del processo. E' stato dimostrato che per le paraffine tale ipotesi è valida per  $P_r$  inferiore a 2.5 (Givler S.D., Abraham J., 1996). Per  $P_r$  superiori a tale valore la goccia in regime di combustione può raggiungere lo stato critico della miscela esistente sulla sua superficie. Nel caso delle paraffine la  $P_r$ , in corrispondenza della quale ciò si verifica, varia leggermente al variare del combustibile. In particolare essa decresce al decrescere del peso molecolare del combustibile stesso. Per pressioni relative inferiori a 2.5 le gocce possono raggiungere lo stato critico, la condizione di equilibrio (ovvero  $T = T_{wb}$ ) o nessuno dei due stati in dipendenza dal combustibile utilizzato (Givler S.D., Abraham J., 1996).

Anche per la combustione si può parlare di una velocità di consumo della goccia, espressa in termini di variazioni temporali del diametro della stessa. Pertanto, anche in questo caso si può definire una costante della velocità di combustione  $\beta_c$ . Essa è strettamente collegata ai valori di pressione esistenti nell'ambiente in cui è immersa la goccia. In particolare per  $P_r$  inferiori a 0.3 la  $T_c$  sembra aumentare all'aumentare di  $P_r$  con una legge di potenza (Kadota T. et al., 1981). L'incremento di  $\beta_c$  al crescere di  $P_r$  è ancora più marcato quando  $0.3 < P_r < 1.0$ . In prossimità del punto critico del combustibile la  $\beta_c$  raggiunge un massimo per poi decrescere per  $P_r > 1.0$  (Givler S.D., Abraham J., 1996). Tale dipendenza di  $\beta_c$  da  $P_r$  è più complessa di quanto non risulti quella di  $\beta_v$  da  $P_r$ . Ciò fa presupporre

che i meccanismi controllanti i processi di evaporazione e combustione, almeno in condizioni supercritiche, siano differenti.

E' da sottolineare che in regime di combustione sembra che la temperatura ambientale esistente prima dell'inizio della reazione di combustione non abbia una grande influenza sulle condizioni raggiunte dalla goccia durante il processo di combustione stesso (Umemura A., 1986). Maggiore significato assume, invece, la temperatura di fiamma. Tale affermazione è supportata dalla constatazione che, all'aumentare della frazione molare della specie ossidante nella fase gas, e quindi in presenza di temperature di fiamma più elevate, l'incremento della temperatura della goccia diviene più rapido (Givler S.D., Abraham J., 1996).

Non esistono in letteratura studi sistematici che permettano di individuare, come nel caso della evaporazione, campi del piano  $P_r$ - $T_r$  in cui si verificano differenti regimi di combustione. In particolare, negli studi effettuati sulla combustione delle gocce ad alta pressione difficilmente viene isolata su tale piano la zona di transizione tra regime di combustione subcritica e supercritica. In linea di principio è possibile, comunque, ipotizzare quali siano i meccanismi controllanti il processo in esame analizzando la dipendenza del tempo di combustione della goccia ( $t_c$ ), definito come il tempo che intercorre tra l'ignizione della goccia e il flame burnout, dai valori della pressione ambiente. Prima che la goccia raggiunga le condizioni critiche della miscela esistente sulla sua superficie,  $t_c$  diminuisce al crescere della pressione raggiungendo un valore minimo in corrispondenza del valore di  $P_r$  per il quale la goccia è in condizioni critiche. In questo campo di  $P_r$  il processo in esame sembra essere controllato dal processo di evaporazione, ovvero dall'equilibrio di fasi liquido/gas. Per valori superiori di  $P_r$ ,  $t_c$  cresce al crescere di  $P_r$ .

In regime di evaporazione la zona di transizione è caratterizzata, rispetto alla zona di evaporazione subcritica, dalla perdita dei vincoli imposti dall'equilibrio liquido/gas sulla forza spingente, che può così divenire significativamente più alta. Nel caso della goccia in regime di combustione, pur esistendo teoricamente, tale vincolo non è stringente. Infatti il salto di concentrazione, che rappresenta la forza spingente, si mantiene sempre sufficientemente elevato poichè il combustibile evaporato viene ossidato.

### ***Combustione di emulsioni e combustibili bifase***

**Riferimenti e note**

- Givler S.D. e Abraham J., "Supercritical droplet vaporization and combustion studies" , *Prog. Energy Sci.*, **22**, 1-28, 1996.
- Kadota T., Hiroyasu H., "Combustion of fuel droplet in supercritital gaseous environments", 18<sup>th</sup> Int. Symp. On Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 275-282, 1981.
- Sang-Chun Rah, A.F. Sarofim e Janos M. Beer 'Ignition and Combustion of Liquid Fuel Droplets, Part II: Ignition Studies" su *Comb. Sci. Tech.* **49**, 169, 1986.
- A. Sjogren: "Soot formation by combustion of an atomized fuel" *Fourteenth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, Pittsburgh,,919 (1973
- Umemura A., Supercritical liquid droplet fuel combustion, 21<sup>h</sup> Int. Symp. On Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 463-471, 1986.

**Testi consigliati**

- W. Sirignano "Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays" Cambridge University Press 1999
- A. Williams "Combustion of Liquid Fuel Sprays", Butterworths, London, 1990