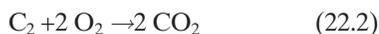


## Capitolo 22

Il calore, fonte di energia per tutte le motrici termiche, si ottiene bruciando i *combustibili* (composti del carbonio e idrogeno) che hanno la proprietà di combinarsi con l'ossigeno dell'aria (*combustione*) sviluppando notevoli quantità di calore; i combustibili, in base allo stato fisico, sono i seguenti.

- **Combustibili solidi** (legno, carboni fossili, coke e agglomerati carboniosi): si contraddistinguono per la percentuale di *sostanze volatili* (vapori di idrocarburi che si separano dalla parte solida sotto l'azione del calore). Frequentemente si usano degli agglomerati carboniosi che hanno una pezzatura uniforme, sono esenti o quasi da ceneri o impurità e hanno una forma geometrica che permette uno stivaggio con minimo spreco di spazio.
- **Combustibili liquidi** (miscele di idrocarburi): rispetto a quelli solidi, presentano il vantaggio di un minor costo dei trasporti, facilità di deposito, assenza o quasi di ceneri e sostanze corrosive. Dal petrolio greggio si ottengono: **benzine** di varia densità; **oli medi** (kerosene, petrolio ecc.), gasolio (o nafta leggera), **oli combustibili** (nafte) di diverso peso specifico il cui impiego è diffuso nelle caldaie a vapore, **alcol etilico e metilico**.
- **Combustibili gassosi** (metano, gas d'aria o d'acqua, gas misto).
- **Combustibili polverizzati**: il processo di combustione è tanto più perfetto quanto maggiore è l'intimo contatto del combustibile con l'ossigeno che con esso reagisce e cioè quanto maggiore è la superficie di scambio. La polverizzazione aumenta notevolmente tale superficie e riduce la quantità di aria necessaria per la combustione e consente di utilizzare combustibili di scarso pregio (torbe o ligniti). Sono convenienti solo nel caso in cui l'impianto di polverizzazione venga installato direttamente nel luogo di utilizzo del combustibile.

Dalla chimica è noto che:



Bruciando il carbonio puro con ossigeno abbondante, si otterrà la combustione completa di esso con produzione di  $CO_2$ ; se l'ossigeno è carente, la combustione è incompleta, si otterrà CO. Ambedue le reazioni sono esotermiche (sviluppano calore) ma il calore prodotto nella prima reazione è minore di quello sviluppato nella seconda. Definiremo **potere calorifico** di una sostanza (kJ/kg), la quantità di calore sviluppata dalla combustione completa di 1 kg di essa. Nel caso dell'idrogeno:



la misurazione pratica del potere calorifico può essere effettuata secondo due diverse modalità:

- **si valuta la quantità di calore posseduta dai prodotti della combustione dopo aver fatto condensare il**

**vapore d'acqua prodotto;**

- **si valuta il calore posseduto dai prodotti della combustione senza far condensare il vapore prodotto.**

Dovremo distinguere per l'idrogeno, e per tutti i composti chimici che lo contengono:

- il **potere calorifico superiore** ( $P_{cs}$ ): tiene conto del calore di condensazione del vapore d'acqua;
- il **potere calorifico inferiore** ( $P_{ci}$ ): non tiene conto del calore di condensazione del vapore d'acqua.

Per i valori del potere calorifico si fa affidamento su dati ricavati da prove di laboratorio o su tabelle e non su formule che conducono a risultati approssimati.

Qualsiasi sostanza combustibile potrà bruciare solo se c'è **aria per la combustione** in modo che ciascuno dei suoi componenti possa usufruire dell'aliquota necessaria per soddisfare le relazioni chimiche. Per quanto riguarda il carbonio, **la reazione chimica (22.2) è possibile solo se 12 parti di carbonio si combinano con almeno 32 parti di ossigeno** e quindi per bruciare 1 kg di carbonio occorrono 2,67 kg di ossigeno mentre per l'idrogeno ne occorrono 8 kg di ossigeno e 1 kg di zolfo. Supponendo che il combustibile contenga carbonio, idrogeno, zolfo, umidità, ossigeno, ceneri e scorie incombustibili, 1 kg di esso richiede, per bruciare completamente, una quantità teorica di ossigeno:

$$O_t + \frac{8}{3} C + 8H + S - O \quad (22.9)$$

Poiché l'ossigeno presente nell'aria nella proporzione è in media del 23%, la **quantità teorica di aria**  $A_t$  necessaria a bruciare 1 kg di combustibile è:

$$A_t = \frac{100}{23} \cdot \left( \frac{8}{3} C + 8H + S - O \right) \quad (22.10)$$

Nella pratica, soltanto una parte dell'aria insufflata nel focolare partecipa alla reazione; occorre aggiungere alla quantità teorica un **eccesso d'aria e**:

$$A_p = A_t + e \cdot A_t = A_t \cdot (1 + e) \quad (22.11)$$

in cui  $A_p$  è **detta aria pratica**;  $e$  dipende dal: tipo del generatore e di focolare, natura del combustibile impiegato, sistema di tiraggio, grado di pezzatura del combustibile (se solido) o sua temperatura (se liquido), grado di combustione del generatore, tipo di regolazione (manuale o automatica).

Per quanto riguarda gli impianti a vapore la combustione avviene in una parte della caldaia denominata **focolare**; si distinguono in focolari per combustibili solidi, liquidi, polverizzati o gassosi.

Il **tiraggio** di una caldaia è l'operazione mediante la quale viene inviata nel focolare la quantità di aria sufficiente ad assicurare la combustione.

1. **Tiraggio naturale**: se prodotto dalla depressione origi-

nata dalla differenza di temperatura esistente fra i fumi caldi uscenti dal camino e l'aria dell'ambiente; è caratteristico delle vecchie caldaie alimentate a combustibile solido. La colonna di fumi caldi, essendo più leggera dell'aria ambiente, viene spinta verso l'alto nel camino (legge di Archimede) da una forza  $F$  uguale alla differenza fra il peso della colonna di aria a temperatura ambiente e il peso della colonna effettiva dei fumi. Indicando con  $H$  la differenza di quota fra lo sbocco e la base del camino, con  $\rho_f$  la densità media dei fumi caldi e con  $\rho_a$  la densità dell'aria, la pressione (effettiva) esercitata sulla colonna gassosa è:

$$p = H \cdot g \cdot (\rho_a \cdot \rho_f) \quad (22.13)$$

La **quantità di aria aspirata è tanto maggiore quanto maggiore è l'altezza  $H$  del camino** e quanto più sensibile è la **differenza fra le densità dell'aria e dei fumi**. Si può aumentare il tiraggio solo aumentando l'altezza  $H$  del camino (la riduzione di  $\rho_f$  comporta una notevole perdita di calore in quanto la densità diminuisce con l'aumentare della temperatura). Gli svantaggi sono:

- o camino molto alto, ingombrante e costoso;
- o perdita notevole di calore allo scarico;
- o basso valore della depressione ottenibile;
- o regolazione difettosa dell'aria aspirata;
- o impossibilità di impiegare combustibili liquidi o gassosi che richiedono un forte flusso di aria;
- o impossibilità di preriscaldare l'aria comburente.

**2. Tiraggio artificiale:** se ottenuto con apparecchi meccanici. Si realizza insufflando aria entro il focolare mediante un ventilatore (**tiraggio soffiato o forzato**) oppure aspirando, con un ventilatore posto entro il camino, i fumi prodotti, che a loro volta richiamano l'aria dall'esterno attraverso il focolare (**tiraggio aspirato**). In quest'ultimo caso il ventilatore è sottoposto a notevole usura che può essere ridotta sistemando l'organo soffiante esternamente al camino (**tiraggio indotto**), dal quale esso preleva una piccola parte dei prodotti della combustione, inviandoli, a discreta pressione, entro una strozzatura del camino stesso, in modo che esercitino una efficace azione di risucchio sulla restante massa gassosa. In altri termini, il camino assume la forma di un cono Venturi, nella cui sezione di minima area, i fumi acquistano una forte velocità provocando così la depressione necessaria. **Con il tiraggio soffiato, entro la camera di combustione regna una pressione superiore a quella atmosferica;** in caso di apertura della portella di caricamento, si possono verificare pericolosi ritorni di fiamma verso l'esterno. Il sistema di tiraggio aspirato, che invece crea nella camera di combustione una leggera depressione rispetto all'ambiente esterno, è più costoso per via dell'usura del macchinario aspirante.

**3. Tiraggio equilibrato:** è il sistema di tiraggio che riunisce i lati positivi dei due sistemi precedenti e viene realizzato con due ventilatori (uno aspirante posto alla base del camino e uno che soffia aria entro la camera di combustione in modo che non si possano creare forti rientrate di aria.

**4. Tiraggio a locali chiusi:** (impiegato in marina): l'aria viene soffiata entro il locale (che è mantenuto chiuso ermeticamente) e penetra entro le portelle del cenerario mantenendo in leggera pressione sia la camera di combustione che tutto l'ambiente.

Bruciando 1 kg di combustibile in un focolare ideale che non dia origine ad alcuna perdita, si dovrebbe ottenere una quantità di calore  $q_t$  pari al potere calorifico inferiore  $P_{ci}$  del combustibile impiegato; tale quantità di calore dovrebbe venire integralmente utilizzata per la vaporizzazione del liquido. Bisogna, però, tener conto delle seguenti perdite:

- **perdite per carbonio incombusto:** una parte minuta del combustibile solido cade nel cenerario attraverso gli interstizi della griglia senza bruciare o una parte di combustibile liquido viene disperso entro la camera di combustione;
- **perdita al camino per calore latente:** se è scarsa la quantità di aria comburente, la reazione del carbonio è incompleta e l'ossido sfugge attraverso il camino invece di ossidarsi ulteriormente e sviluppare altro calore;
- **perdita per calore sensibile:** rappresenta la perdita di maggior entità nel processo di combustione; i fumi, uscenti dal camino alla temperatura  $t_u$ , asportano una parte di calore  $q_p$ :

$$q_p = M_f \cdot c_{fm} \cdot (t_u - t_0) \quad (22.16)$$

dove  $M_f$  è la massa di fumi sviluppata nella combustione di 1 kg di combustibile,  $t_0$  è la temperatura dell'aria ambiente,  $c_{fm}$  il calore specifico medio dei fumi nell'intervallo  $t_u \div t_0$ .

Si deduce che 1 kg di combustibile produce *effettivamente* un calore  $q_e$  minore di  $P_{ci}$ :

$$q_e = \varepsilon \cdot P_{ci} \quad (22.14)$$

dove  $\varepsilon$  ( $<1$ ) è il rendimento del focolare ( $q_e / P_{ci}$ ). Il calore espresso dalla (22.14) non viene utilizzata integralmente nella caldaia a causa della perdita per calore; indicando con  $n$  un opportuno coefficiente di dispersione, il calore realmente utilizzato  $q_u$  è:

$$q_u = (1 - n) \cdot [\varepsilon \cdot P_{ci} - M_f \cdot c_{fm} \cdot (t_u - t_0)] \quad (22.19)$$

Poiché il processo di combustione viene sfruttato per la produzione del vapore d'acqua di una caldaia, si può ritenere che **il rendimento della combustione coincida con quello della caldaia stessa:**

$$\eta_c = \frac{(1 - n) \cdot [\varepsilon \cdot P_{ci} - M_f \cdot c_{fm} \cdot (t_u - t_0)]}{P_{ci}} \quad (22.20)$$

Quindi, il rendimento di una caldaia aumenta se:

- **si aumenta il valore di  $\varepsilon$**  adottando combustibili liquidi gassosi o polverizzati;
- **si riduce il coefficiente di dispersione  $n$**  rivestendo opportunamente la caldaia;
- **si riduce la perdita al camino inserendo** opportuni recuperatori di calore e mantenendo l'eccesso di aria e nei limiti dello stretto necessario.