

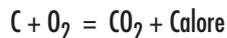
PRINCIPI FONDAMENTALI DELLA COMBUSTIONE

CAPITOLO 1

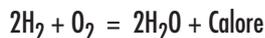
DEFINIZIONE DELLA COMBUSTIONE

La combustione è la rapida ossidazione di un combustibile. La reazione è accompagnata da quel fenomeno fisico visibile che è denominato "fiamma" e dalla produzione di quella energia che è denominata "calore".

Il carbonio si combina con l'ossigeno per formare anidride carbonica, un gas non tossico, e libera calore secondo la seguente formula:



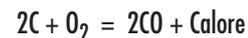
Analogamente l'idrogeno si combina con l'ossigeno per formare vapore d'acqua, con conseguente produzione di calore, secondo la formula seguente:



È importante rilevare che il combustibile e l'ossigeno si combinano in proporzioni ben definite e fisse. Le quantità di ossigeno e di combustibile nella miscela sono in proporzioni perfette o "stechiometriche" quando queste permettono una completa ossidazione del combustibile senza residui di ossigeno.

Se avessimo eccesso di combustibile oppure insufficienza di ossigeno diremmo che la miscela è ricca e che la fiamma è riducente e tende ad essere lunga, gialla e fumosa. Tale tipo di combustione è anche definita "combinazione incompleta" perché, sebbene alcune delle particelle del combustibile vengano completamente ossidate dall'ossigeno, altre invece non ne ricevono a sufficienza e ne consegue che la

combustione di queste è parziale. Come indica la seguente formula di reazione, la combustione parziale o incompleta del carbonio è accompagnata dalla formazione di ossido di carbonio, un gas fortemente tossico:



La quantità di calore che qui si produce è inferiore a quella che accompagna la combustione completa.

Una combustione incompleta o riducente è a volte richiesta in speciali trattamenti termici industriali, ma in qualsiasi altra circostanza tali condizioni debbono essere evitate.

Se viceversa fornissimo alla miscela ossigeno in eccesso, diremmo che la miscela è povera e che la combustione è ossidante. Come risultato avremmo una fiamma molto corta di colore tendente al blu.

Come meglio spiegheremo più avanti, il gas ossidante normalmente impiegato è l'aria, cioè una miscela di ossigeno ed azoto.

Quando si impiega "aria in eccesso", cioè una quantità di ossigeno superiore a quella stechiometrica, avviene che tutto l'azoto e la parte di ossigeno che non si combina con il combustibile non partecipano alla reazione di ossidazione.

Naturalmente essi assorbono una certa quantità del calore prodotto durante la combustione di modo che l'energia calorifica risultante rimane distribuita in un maggior volume di gas ed il livello termico è inferiore (minore temperatura di fiamma).

COMBUSTIBILI GASSOSI COMMERCIALI

Questi gas hanno caratteristiche variabili che dipendono dalla quantità di ciascun elemento chimico. Diamo alcune caratteristiche fonda-

mentali medie, dei gas più comunemente usati.

TIPO DI GAS	PRINCIPALI COSTITUENTI	POTERE CALORIFICO INFERIORE - kCal/m ³	DENSITÀ	VELOCITÀ DI PROPAGAZIONE DELLA FIAMMA - m/s
Gas di città	CO + H ₂	4.000 ÷ 4.500	0,56	3
Gas miscelato	CO + H ₂ + CH ₄ o altri	4.500 ÷ 6.000	0,60	1,5
Gas naturale	CH ₄	8.500	0,64	0,6
Miscela propano/aria	C ₃ H ₈ + aria	6.000	1,20	0,7
Propano	C ₃ H ₈	22.000	1,52	0,7
Butano	C ₄ H ₁₀	28.000	2,00	0,7
Miscela propano/butano	C ₃ H ₈ + C ₄ H ₁₀	26.000	1,75	0,7

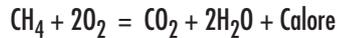


Headquarters
Esa S.r.l.
Via E. Fermi 40 I-24035 Curno (BG) - Italy
Tel. +39.035.6227411 - Fax +39.035.6227499
esa@esacombustion.it - www.esapyronics.com

International Sales
Pyronics International S.A./N.V.
Zoning Ind., 4ème rue B-6040 Jumet - Belgium
Tel +32.71.256970 - Fax +32.71.256979
marketing@pyronics.be

STECIOMETRIA DELLA COMBUSTIONE DEI GAS

Per semplicità, nella seguente discussione, abbiamo assunto che il gas naturale contenga unicamente metano (CH_4). Il metano brucia secondo la seguente reazione:

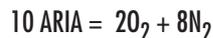


cioè:

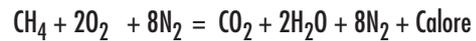
Metano + Ossigeno = Anidride Carbonica + Vapore d'acqua + Calore

Dato che i reagenti ed i prodotti della reazione sono tutti allo stato gassoso, possiamo dire che un metro cubo di metano (gas naturale) richiede due metri cubi di ossigeno per la combustione completa e che produrrà nella combustione un metro cubo di anidride carbonica e due metri cubi di vapore d'acqua.

La reazione dell'ossigeno puro e del metano è utilizzata soltanto in alcuni speciali impieghi industriali ed esattamente quando si voglia ottenere una elevata temperatura di fiamma: ad esempio nei cannelli per taglio. Tuttavia, la maggioranza delle applicazioni industriali di combustione utilizza l'aria come sorgente comburente anziché l'ossigeno puro. Per semplicità di calcolo possiamo considerare l'aria come composta di 20% di ossigeno e di 80% di azoto. Pertanto dato che per ogni metro cubo di metano avremo bisogno di 10 m³ di aria, si avrà:



La reazione di combustione del metano e dell'aria può pertanto essere scritta così:



Nella chimica della combustione, le molecole di azoto sono inerti e pertanto non hanno alcuna funzione. Purtroppo esse assorbono un po' del calore prodotto.

Concludendo si può dire che per bruciare completamente un metro cubo di gas naturale sono necessari 10 m³ di aria.

La combustione del propano è viceversa regolata dalla seguente reazione:



Ciò conferma che 1 m³ di propano richiede 25 m³ di aria per la sua completa combustione.

Dalle reazioni del metano e del propano appena illustrate, possiamo facilmente dedurre che per liberare calore pari a 8.500 kCal utilizzando 1 m³ di gas naturale (il cui potere calorifico inferiore è pari appunto a 8500 kCal/m³) occorrono 10 m³ di aria, mentre per liberare 21.000 kCal, usando 1 m³ di propano occorrono 25 m³ di aria.

Facendo i dovuti rapporti possiamo osservare che sia per il metano che per il propano è valida la legge secondo cui ogni 1000 kCal liberate sono necessari circa 1,18 Normal volumi di aria comburente. Entro certi limiti possiamo dire che ogni gas combustibile commerciale risponde a questa legge; anzi possiamo dire che in linea di massima essa è valida non soltanto per i combustibili gassosi ma anche per quelli solidi e liquidi.

QUANTITÀ DI ARIA RICHIESTA NELLA COMBUSTIONE INDUSTRIALE

Tutti i sistemi di combustione ed in particolar modo quelli industriali, sono limitati nella loro potenzialità termica dalla quantità di aria comburente che sono in grado di miscelare al gas. Pertanto la massima portata di gas di un sistema di combustione è determinata dalla massima quantità di aria che lo stesso sistema è in grado di trattare.

Nei cataloghi dei costruttori di bruciatori è di solito riportata la capacità dei bruciatori in kCal/h (migliaia di Calorie/ora) erogate. Ciò nonostante agli effetti della progettazione di un sistema di combustione e della selezione dei bruciatori o dei miscelatori necessari a tale sistema, non ci si basa soltanto sulla potenzialità termica e quindi sulla portata di gas del sistema ma anche e soprattutto sulle quantità di aria primaria e secondaria necessaria alla combustione e sulla capacità del sistema di trattare tali quantità.

Avendo stabilito che la quantità di aria necessaria alla combustione è di 1,18 Nm³ per ogni 1.000 kCal prodotte, indipendentemente dal

tipo di gas impiegato, si avrà che ogni sistema di combustione industriale su tale principio dimensionato, potrà essere considerato "Universale" se è in grado di operare con qualsiasi tipo di combustibile gassoso.

In altre parole, stabilita la quantità di aria necessaria per ottenere in un sistema una buona combustione ad una determinata potenzialità termica, si potrà usare in quel sistema qualsiasi tipo di combustibile gassoso commerciale per produrre la stessa quantità di calore in perfette condizioni di combustione. L'unica modifica richiesta nel passare da un tipo di combustibile ad un altro a parità di portata termica è quella relativa alla quantità di gas necessaria, tenuto conto del potere calorifico per metro cubo di ciascun gas.

Ad un sistema di combustione avente una potenzialità termica di 100.000 kCal/h si debbono fornire 118 Nm³/h di aria per ottenere una combustione perfetta.

Una minore quantità di aria metterebbe il sistema in condizioni di combustione riducente: se si aumentasse la portata del combustibile in modo da erogare 120.000 kCal/h, e ciò può essere facilmente realizzato aumentando il diametro dell'ugello iniettore del bruciatore, si otterrebbero delle condizioni di combustione imperfette se con-

temporaneamente non si aumentasse in proporzione anche la quantità di aria nella miscela. L'unico modo per ottenere sempre perfette condizioni di combustione, volendo aumentare la capacità termica di un sistema di combustione, è di aumentare contemporaneamente la portata di gas e la portata di aria.

ARIA PRIMARIA

La maggior parte dei sistemi di combustione sono in grado di miscelare al gas combustibile una quantità di aria inferiore a quella teorica richiesta per la combustione prima che la combustione stessa avvenga. La rimanenza dell'aria richiesta per bruciare totalmente il combustibile è miscelata dopo il punto di accensione. La quantità di aria miscelata con il gas prima del momento dell'accensione è chiamata "aria primaria". L'aria miscelata dopo il punto di accensione è chiamata "aria secondaria". La quantità di aria primaria nella miscela è normalmente espressa in percentuale dell'aria totale teorica richiesta per la combustione; ciò comunemente si chiama "aerazione".

Per esempio un sistema di combustione operante con un gas naturale

all'80% di aria primaria vuol dire che tale sistema è in grado di miscelare 8 m³ di aria per ogni metro cubo di gas naturale prima che avvenga la combustione. La rimanente quantità di aria necessaria alla combustione, e cioè gli altri 2 m³ per ogni metro cubo di gas naturale, saranno introdotti dopo l'accensione come "aria secondaria".

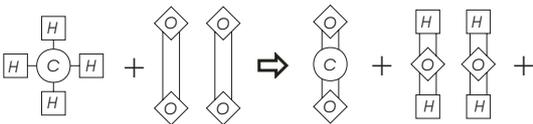
Molte delle caratteristiche della fiamma sono determinate dalla quantità di aria primaria che un sistema di combustione è capace di trattare. Quanto minore è la percentuale di aria primaria fornita e tanto più soffice sarà la fiamma. Così dicasi della lunghezza della fiamma che è tanto maggiore quanto minore è la quantità di aria primaria fornita.

MECCANICA DELLA COMBUSTIONE

Le equazioni chimiche indicate precedentemente, relative alla combustione del gas naturale, stabiliscono le quantità di aria e di gas naturale necessarie per ottenere la combustione teorica, nonché la quantità di prodotti della combustione che ne derivano, ma non indicano tuttavia come la reazione procede chimicamente e fisicamente.

Le molecole gassose sono in uno stato di costante movimento. La velocità di movimento delle singole molecole è direttamente proporzionale alla loro temperatura: aumentando la temperatura aumenterà anche il movimento delle molecole e viceversa diminuendo la temperatura diminuirà il loro movimento.

In una miscela perfetta di ossigeno e gas naturale o metano ci saranno sempre due molecole di ossigeno per ogni molecola di metano. Il metano contiene quattro atomi di idrogeno legati da una valenza chimica all'atomo di carbonio; le molecole di ossigeno contengono due atomi di ossigeno legati tra loro da due valenze.



FM001101

Perché la combustione avvenga, è naturalmente necessario che gli atomi d'idrogeno si separino da quelli di carbonio e che gli atomi di ossigeno si sgancino dai legami che li tengono tra loro uniti di modo

che essi siano liberi di combinarsi con il carbonio e l'idrogeno.

Lo sganciamento degli atomi dell'idrogeno, del carbonio e dell'ossigeno è il risultato della collisione delle molecole tra loro. Alla normale temperatura ambientale tale collisione è talmente debole che gli atomi non riescono a sganciarsi.

Aumentando la temperatura di una miscela di metano e di ossigeno avviene che il calore fornito ai componenti della miscela agisce sulle molecole, aumentandone la velocità di movimento. Raggiunta la temperatura di circa 650 °C le molecole hanno ricevuto una quantità di energia sufficiente perché l'urto tra loro provochi lo sganciamento degli atomi.

Al di sotto di questa temperatura l'ossidazione delle molecole del metano è impossibile mentre oltre la barriera dei 650 °C gli atomi di carbonio e di idrogeno che si trovano liberi diventano avidi di ossigeno; la combustione ha allora inizio. La reazione chimica di ossidazione degli atomi di idrogeno e carbonio ha come effetto fisico la produzione di fiamma e di calore. Quest'ultimo può essere utilizzato per processi termici.

Quando si sia innescata la reazione di combustione, cioè quando una certa quantità di molecole di ossigeno e di metano abbiano raggiunto la temperatura di 650 °C, avviene che il calore prodotto da questa reazione si irradia uniformemente in tutte le direzioni. Tale calore è sufficiente ad innalzare la temperatura delle molecole circostanti di

metano e di ossigeno oltre la temperatura di scissione degli atomi, di modo che questi a loro volta cominciano a reagire ed a produrre altro calore. La combustione è una reazione a catena che da un gruppo di molecole viene trasmessa a quello prossimo. La velocità con cui questa reazione si trasmette da una molecola all'altra determina la "velocità di propagazione della fiamma" di una miscela. La quantità di calore liberata dalla combustione di una miscela di ossigeno puro e gas naturale è sufficiente per fare raggiungere alla fiamma una temperatura di circa 2850 °C.

Come abbiamo detto, nei processi industriali di combustione, salvo alcuni casi molto particolari, l'ossigeno viene fornito dall'aria dell'atmosfera.

Durante la reazione di combustione l'azoto contenuto nell'aria assorbe una certa quantità del calore prodotto dalla combustione stessa. Questo fenomeno evidentemente ha come conseguenza l'effetto di rallentare il processo di passaggio a catena del calore da una molecola all'altra e pertanto di diminuire la velocità di propagazione della fiamma. L'azoto è un "diluente" della reazione di combustione.

La massima temperatura teorica ottenibile nella fiamma prodotta dalla combustione di metano e aria è di circa 1930 °C; in realtà la massima temperatura ottenibile in un forno industriale alimentato con metano ed aria è di circa 1800 °C. Il calore irraggiato dalla fiamma ed altre perdite impediscono di raggiungere la massima temperatura teorica di combustione.

Temperature di combustione più alte possono essere raggiunte arricchendo l'aria comburente con ossigeno. Ciò ha come effetto di ridurre in proporzione la quantità di azoto presente nella reazione e di conseguenza l'effetto diluente.

Temperature di fiamma più elevate possono essere inoltre ottenute preriscaldando l'aria comburente oppure l'aria ed il gas combustibile contemporaneamente in modo da risparmiare una certa quantità di energia calorifica necessaria per innalzare la temperatura delle molecole al valore di accensione. Per esempio, preriscaldando una miscela di aria e gas naturale alla temperatura di 260 °C, si può ottenere un incremento della temperatura della fiamma di circa 100 °C.

COMBUSTIONE INCOMPLETA - SPEGNIMENTO DELLA FIAMMA

Ricerche scientifiche della meccanica della combustione hanno dimostrato che il processo chimico della combustione passa attraverso prodotti intermedi prima di arrivare a quelli finali di massima ossidazione consistenti in anidride carbonica e vapore d'acqua. I principali prodotti intermedi della combustione sono l'ossido di carbonio e le aldeidi.

Durante la reazione a catena, dovuta alla collisione delle molecole, che permette l'ossidazione degli atomi con la conseguente produzione di calore, si formano questi prodotti intermedi della combustione; rapidamente essi vengono poi a loro volta trasformati da una ulteriore ossidazione via via che giungono in contatto con l'ossigeno, in molecole di anidride carbonica e vapore d'acqua.

Una volta innescata, la reazione di combustione deve essere mantenuta ad una temperatura superiore a quella minima di accensione. Se in un momento qualsiasi, nella massa della fiamma, la miscela in fase di combustione viene raffreddata ad un valore di temperatura inferiore a quello di accensione, il processo di combustione viene arrestato e la fiamma si spegne.

Immergendo nella massa di una miscela in fase di combustione un qualsiasi mezzo raffreddante o refrigerante accade che quest'ultimo sottrae al processo di combustione una certa quantità di calore di reazione. Se il mezzo raffreddante assorbe calore in misura suffi-

cientemente grande da impedire alle molecole dei componenti della reazione a contatto tra loro di raggiungere la temperatura di accensione, la combustione si arresta del tutto o comunque nei punti di contatto con il mezzo raffreddante. Ciò accadrebbe anche se il combustibile ed il comburente fossero tra loro in rapporto stechiometrico. In pratica i pericoli della combustione incompleta o dello spegnimento della fiamma sono presenti soltanto in applicazioni industriali a basse temperature: ad esempio in impianti di combustione con aria di ricircolo; quest'ultima può agire sulla fiamma come mezzo refrigerante. Lunghe fiamme non protette che siano lambite da una forte corrente di aria fredda, possono essere disturbate da quest'ultima soprattutto sulla superficie esterna. Anche se nella parte centrale della fiamma la combustione procede ad una temperatura di 1000÷1700 °C, può accadere che la miscela lambente l'aria fredda all'esterno, sfugga completamente incombusta.

L'incompleta combustione provocata da un mezzo refrigerante può arrestare la reazione tra combustibile e comburente alle fasi intermedie. In queste condizioni è facile, per chi ha un certo "naso", rilevare il caratteristico odore pungente delle aldeidi.

Quando si verificano queste anormali condizioni di combustione è bene intervenire, ricercarne le cause ed eliminarle immediatamente.

VELOCITA' DI PROPAGAZIONE DELLA FIAMMA

Le miscele aerate al 100% e cioè aventi in sé tutto l'ossigeno necessario per completare la combustione, già prima di arrivare al punto in cui inizia la reazione di combustione, hanno la massima velocità di propagazione della fiamma e pertanto realizzano le fiamme più corte a parità di portata di gas. Miscele ricche, che cioè necessitano di una certa quantità di aria secondaria per potere completare la combustione, daranno viceversa luogo a fiamme più lunghe in quanto

l'aria secondaria richiede un certo tempo per potersi miscelare con il gas combustibile.

La velocità di propagazione della fiamma è proporzionale alla quantità di aria premiscelata.

In determinate condizioni la velocità di propagazione della fiamma aumenta con l'aumentare della rapidità con cui si effettua la miscelazione tra aria e gas.