01/03/2010

Processi e impianti industriali chimici

prof. Costantino Nicolella - DICCISM - 050/Nicolella -

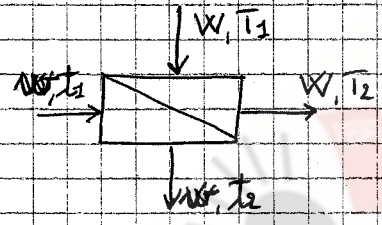
materiale didattico: Coulson-Richardson, "Chemical engineering", vol. I, II

Trabattoni, "Impianti chimici"

<u>propedeuticità/derivazione:</u>

Scambio termico

Consideriamo degli <u>scambiatori di calore</u>, in cui non si ha passaggio di fase, in cui un fluido caldo entra in contatto con uno freddo cui cede calore. Gli effetti desiderati che si possono ottenere in questo modo sono un riscaldamento del fluido freddo, oppure un raffreddamento del fluido caldo, o un recupero di calore dal fluido caldo.



W, w [kg/s]

MASTER COPY

Tel. 388/9837745

Nei primi due casi dovrà essere assegnato il valore della temperatura del fluido caldo e del fluido freddo; nel terzo il calore che deve essere scambiato. In tutti e tre i casi, comunque, si ha scambio di una certa quantità di calore.

$$Q = W_c c (T_2 - T_1) = w_c c (t_2 - t_1)$$

Vi sono due tipi di problemi che si possono presentare: uno è di <u>progetto</u> (note le portate e le temperature dei fluidi bisogna trovare l'area di scambio e quindi la configurazione), ed uno di <u>verifica</u> (nota l'apparecchiatura e le specifiche sui fluidi bisogna trovare il calore scambiabile e confrontarlo con quello richiesto).

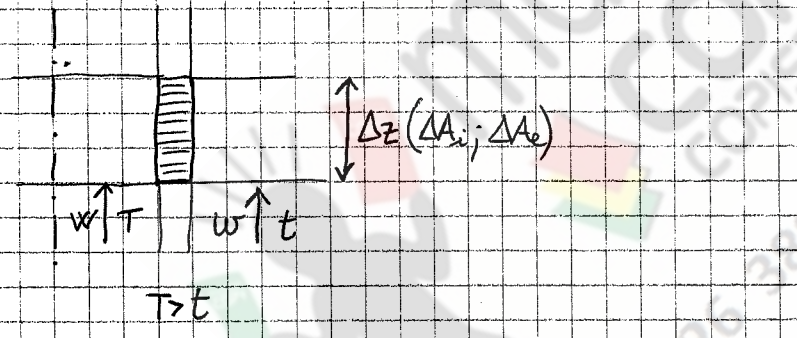
I <u>meccanismi di scambio termico</u> sono la convezione, la conduzione e l'<u>irraggiamento</u>: quest'ultimo non viene considerato perché si

prendono in esame fluidi con temperatura bassa, in assenza di fiamme, etc.

La <u>conduzione</u> avviene a livello molecolare ed è governata dalla legge di Fourier che lega il flusso termico alla temperatura dei due punti tra cui esso avviene.

$$q = -K \frac{\partial T}{\partial x} \qquad K: \underline{\text{conduttività termica}}$$

La <u>convezione</u> avviene invece soltanto nei fluidi (gas e liquidi) perché due porzioni macroscopiche di fluido si mescolano e danno una variazione di temperatura. Si parla di <u>convezione naturale</u> quando il mescolamento avviene solo per differenza di densità, in ogni altro caso si parla di <u>convezione forzata</u>



MASTER COPY

Tel. 388/9837745

Nel tubo scorre un fluido caldo che cede calore al fluido esterno: in generale le condizioni di convezione nei due settori sono diverse; la lunghezza di tubo considerata Δz identifica due aree, quella interna del tubo e quella esterna del tubo, chiamate ΔA_i e ΔA_e.

$$\Delta Q = \Delta A_i (T - t_{pi}) h_i = \Delta A_e (t_{pe} - t_e) h_e$$

I <u>coefficienti di scambio termico</u> h sono funzione, oltre che del fluido, delle caratteristiche termodinamiche e fluidodinamiche. Quello che si vuole conoscere è però il calore scambiato in tutta la apparecchiatura, conoscendo i dati del fluido ma non delle pareti, quindi bisogna eliminare la t_{pi} e t_{pe} dall'espressione

fp

Oltre alla convezione alle due estremità della parete, avviene anche conduzione all'interno della parete, ed il calore scambiato si trova come segue, considerando le condizioni al contorno.

$$\left.\begin{array}{l} Q = 2\pi r \Delta z K \dfrac{\partial T}{\partial r} \\ T(r_i) = t_{pi} \\ T(r_e) = t_{pe} \end{array}\right\} \quad \left.\begin{array}{l} T = C_1 \ln r + C_2 \rightarrow \dfrac{\partial T}{\partial r} = \dfrac{C_1}{r} \\ t_{pi} = C_1 \ln r_i + C_2 \\ t_{pe} = C_1 \ln r_e + C_2 \end{array}\right\} \; t_{pi} - t_{pe} = C_1 \ln\left(\frac{r_i}{r_e}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow C_1 = \frac{t_{pi} - t_{pe}}{\ln(r_i/r_e)} \rightarrow Q = 2\pi \cancel{r} \Delta z K \frac{C_1}{\cancel{r}} = \frac{2\pi K \Delta z \cdot (t_{pi} - t_{pe})}{\ln(r_i/r_e)}$$

$$\left.\begin{array}{ll} \text{conv. int.} & \Delta Q = \Delta A_i h_i (T - t_{pi}) \\ \text{cond.} & \Delta Q = \dfrac{2\pi K \Delta z}{\ln(r_i/r_e)} (t_{pi} - t_{pe}) \\ \text{conv. est.} & \Delta Q = \Delta A_e h_e (t_{pe} - t) \end{array}\right\} \quad (T - t) = \Delta Q \left[\left(\frac{1}{\Delta A_i h_i}\right) + \left(\frac{2\pi K \Delta z}{\ln(r_i/r_e)}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{\Delta A_e h_i}\right)\right] \rightarrow$$

MASTER COPY

Tel. 388/9837745

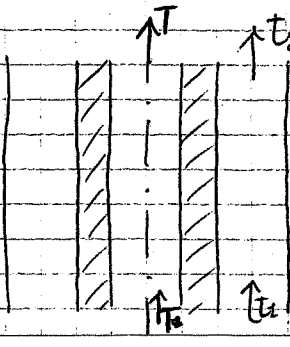
$$\rightarrow (T - t) = \frac{\Delta Q}{\Delta A_e} \left(\frac{1}{h \ln(r_i/r_e)} + \frac{r_e \ln(r_i/r_e)}{1 \quad K} + \frac{1}{h_e}\right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \Delta Q = \left(\frac{1}{h \ln(r_i/r_e)} + \frac{r_e \ln(r_i/r_e)}{K} + \frac{1}{h_e}\right)^{-1} \cdot \Delta A_e \cdot (T - t) = U \cdot \Delta A_e \cdot (T - t)$$

Il <u>coefficiente globale di scambio</u> U è composto da una sommatoria di "resistenze": in genere negli scambiatori che sono realizzati in acciaio la resistenza conduttiva è trascurabile rispetto alle altre; inoltre il valore di U è sempre più piccolo del più piccolo dei coefficienti di scambio h_i, K.

Bisogna passare dai valori di ΔQ ricavati per l'intervallo Δz al calore totale scambiato nello scambiatore: questo si fa integrando su tutta la lunghezza dello scambiatore.

$$\left.\begin{array}{l} T \text{ costante} \\ h_i \gg h_e \end{array}\right\} \; U \simeq h_e \; ; \; t_p \text{ costante}$$



$$\Delta Q = Wc \Delta T$$

$$\Delta Q = Wc \Delta t$$

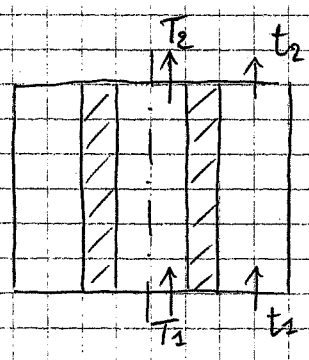
$$\left.\begin{aligned} dQ &= dA_e h_e (t_p - t) \\ dQ &= w c\, dt \end{aligned}\right\} \; w c\, dt = dA_e h_e (t_p - t) \longrightarrow \frac{dt}{t_p - t} = \frac{dA_e h_e}{wc} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow -\ln\left(\frac{t_p - t_2}{t_p - t_1}\right) = \frac{A_e h_e}{wc} \longrightarrow \frac{A_e h_e}{wc} = \ln\left(\frac{t_p - t_1}{t_p - t_2}\right) = \ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right) \longrightarrow$$

$$\longrightarrow Q = A h_e \left(\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln\left(\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}\right)}\right)$$

La differenza di temperatura che compare tra parentesi è un valore medio detto salto medio logaritmico o LMTD, e va utilizzata quando la differenza di temperatura tra i due fluidi non è costante lungo i tubi dello scambiatore.

03/03/2010



$$Q_s = A_s U \Delta T_{LN}$$

$$U = \left(\frac{1}{h_{ie}} + \frac{1}{h_e}\right)^{-1} \quad ; \quad h_{ie} = h_i \frac{r_i}{r_e}$$

$$\Delta T_{LN} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Le ipotesi semplificative fatte sono che i coefficienti h e la capacità termica c sono costanti al variare della temperatura: esiste una <u>temperatura calorica</u> alla quale si calcolano le proprietà dei fluidi in modo che il ΔT_{LN} rappresenti effettivamente lo scambio. Questa dimostrazione è stata elaborata da Kern ("Process heat transfer"), mentre il calcolo della temperatura calorica è il seguente.

fluido caldo $T_{cal} = T_2 + F_{cal}(T_1 - T_2)$

fluido freddo $t_{cal} = t_1 + F_{cal}(t_2 - t_1)$

con $F_{cal} = \dfrac{\left(\frac{1}{K_{cal}}\right) + \left(\frac{r}{r-1}\right)}{1 + \frac{\ln(K_{cal}+1)}{\ln r}} - \dfrac{1}{K_{cal}}$

con $K_{cal} = \dfrac{U_C - U_F}{U_F}$; $r = \dfrac{\Delta t_F}{\Delta t_C}$

dove U_C e U_F sono calcolati alle sezioni rispettivamente di entrata e di uscita del fluido caldo, sia in equicorrente che in controcorrente. Nel caso in cui i fluidi sono poco viscosi ($\mu \simeq 1$ mPa·s) come per l'acqua e gli oli leggeri, il salto medio logaritmico sia attorno a 10°C, si può approssimare la temperatura calorica come media tra le temperature del fluido caldo e di quello freddo nelle due sezioni.

$\mu \simeq 1$ mPa·s, $\Delta T_{LN} \simeq 10$°C $\Rightarrow$ $T_{cal} = \bar{T} = (T_1 + T_2)/2$, $t_{cal} = \bar{t} = (t_1 + t_2)/2$

Il calcolo del <u>coefficiente di scambio</u> U dipende dalle condizioni fluidodinamiche, dalle caratteristiche del fluido e del tubo.

$$Nu = \frac{h_i d_i}{k} \quad ; \quad Re = \frac{\rho v d_i}{\mu} \quad ; \quad Pr = \frac{\mu c_p}{k}$$