

Capitolo 15

Trasmissione del calore: modalità, equazioni e bilanci energetici

1

Obiettivi del capitolo

- L'obiettivo di questo capitolo è di gettare le basi comuni tra le modalità di scambio termico per conduzione (Capitolo 16), convezione (Capitolo 17) e irraggiamento (Capitolo 18)
- Verranno illustrati i concetti fondamentali e i principi che governano i processi di trasmissione del calore
- In seguito si illustrerà come risolvere i problemi relativi ai sistemi termici in ambito ingegneristico

2

Sommario

- Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni
- Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore
- Bilancio energetico superficiale

3

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

La trasmissione del calore è il trasferimento di energia che ha luogo a causa di una differenza di temperatura

Ci si riferisce ai vari tipi di processi di trasmissione del calore come modalità, che nel seguito saranno indicate come: conduzione, convezione e irraggiamento

4

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Conduzione

Il termine conduzione indica lo scambio di calore che ha luogo attraverso il mezzo in quiete, solido o fluido, quando è presente un gradiente di temperatura

Meccanismo: le attività atomiche e molecolare generano e sostengono gli scambi di energia che avvengono dalle molecole dotate di maggior energia a quelle dotate di minor energia, tramite interazioni tra le particelle.

In presenza di un gradiente di temperatura lo scambio di energia per conduzione avviene nel verso decrescente della temperatura.

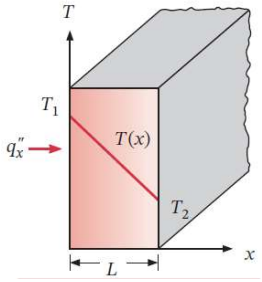
5

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Conduzione

Per la conduzione termica, l'equazione fondamentale è nota come legge di Fourier. Per una piastra piana monodimensionale, con una distribuzione di temperatura T(x), tale relazione è espressa come:

$$q_x'' = -\lambda \frac{dT}{dx}$$



$q_x''(\mathrm{W/m^2}) =$ il calore scambiato nell'unità di tempo nella direzione x per unità di superficie perpendicolare alla direzione di trasferimento

λ è la conduttività termica $(\mathrm{W/(m \cdot K)})$

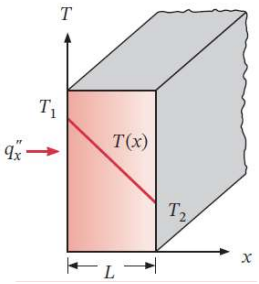
6

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Conduzione

In condizioni stazionarie e distribuzione di temperatura lineare, il gradiente di temperatura e il flusso termico possono essere espressi come:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \qquad q''_x = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{L}$$



Densità di flusso termico (o, più semplicemente flusso termico) ovvero la quantità di calore scambiata nell'unità di tempo per unità di superficie

$$q''_x = \lambda \frac{T_1 - T_2}{L} = \lambda \frac{\Delta T}{L}$$

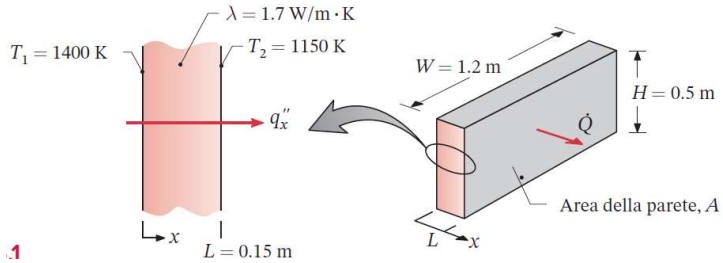
La potenza termica scambiata per conduzione (W), attraverso una superficie piana di area A

$$\dot{Q} = q''_x \cdot A$$

7

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Equazione del flusso di calore: legge di Fourier ESEMPIO



$$q''_x = \lambda \frac{\Delta T}{L} = 1.7 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \frac{250 \text{ K}}{015 \text{ m}} = 2833 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

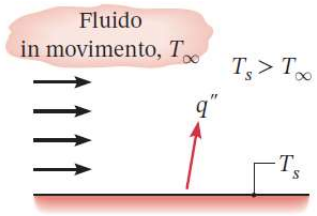
$$\dot{Q} = A q''_x = (HW) q''_x = (0.5 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}) 2833 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1700 \text{ W}$$

8

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Convezione

- Il termine convezione si riferisce allo scambio di calore che avviene tra una superficie e un fluido che si trovino a differente temperatura e in moto relativo l'uno rispetto all'altra.
- La modalità di scambio di calore per convezione è data da due meccanismi: movimenti molecolari casuali (conduzione), e trasporto di massa, ovvero moto macroscopico del fluido (advezione).



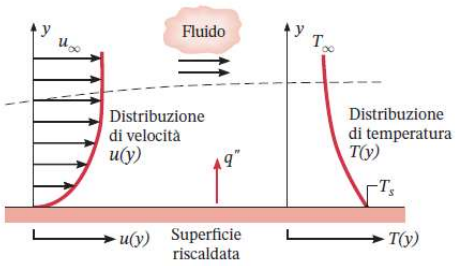
Convezione da una superficie a un fluido in movimento

9

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Convezione

- In caso di moto di un liquido su una superficie, gli effetti della viscosità sono importanti nello strato limite dinamico (di velocità) e, per un fluido newtoniano, gli sforzi di taglio dovuto all'attrito sono proporzionali al gradiente di velocità.
- Trattando la convezione si studierà lo strato limite termico, ossia la regione in cui è presente una distribuzione di temperatura, il cui valore varia da quella del flusso indisturbato T_∞ a quella della superficie T_s



10

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Convezione

- Convezione forzata: il flusso è causato da mezzi esterni, come un ventilatore, una pompa o il vento
- Convezione libera (o naturale): il moto è dato dalle forze di galleggiamento, che derivano da differenze di densità causate dalle variazioni di temperatura nel fluido
- Flusso esterno: è associato a corpi immersi in una corrente fluida, come nel caso di moto su piastre, cilindri e lamine
- Flussi interni: il moto è vincolato dalle superfici del condotto entro cui scorre il fluido

11

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Convezione

Indipendentemente dalla natura del processo di scambio di calore per convezione, nella prassi ingegneristica il flusso termico si esprime tramite un'equazione, nota come legge di Newton (a volte legge di Newton del raffreddamento o legge di Newton per la convezione)

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

q'' = flusso termico ed è proporzionale alla differenza tra le temperature del fluido T_∞ e della superficie T_s $(\mathrm{W/m^2})$

h = coefficiente di scambio termico per convezione $(\mathrm{W/m^2 \cdot K})$

12

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Convezione

Il coefficiente convettivo **non è** una proprietà termofisica del fluido termovettore. Esso è una comoda definizione e dipende dalle condizioni nello strato limite, il quale viene influenzato dalla geometria della superficie, dalla natura del moto del fluido e da una varietà di proprietà termodinamiche e di trasporto del fluido termovettore

Processo	h (W/m^2 · K)
Convezione naturale	
Gas	2-25
Liquidi	50-1000
Convezione forzata	
Gas	25-250
Liquidi	100-20.000

13

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

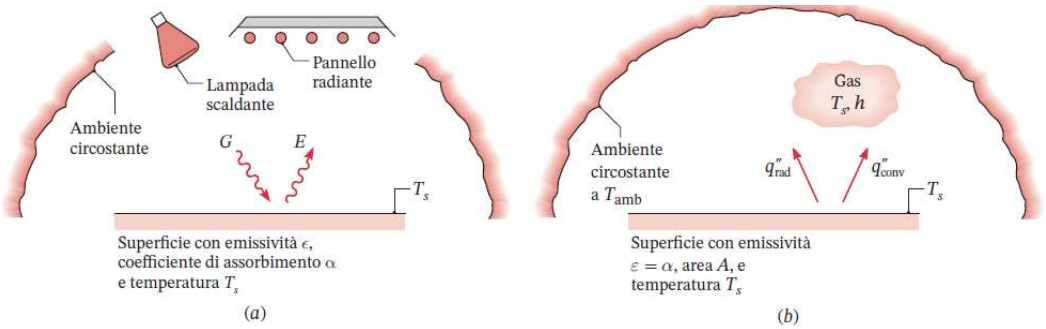
Irraggiamento

- Tutte le superfici a temperatura assoluta diversa da 0 K emettono energia sotto forma di onde elettromagnetiche. Perciò, in assenza di mezzi interposti, c'è sempre un trasferimento netto di calore per irraggiamento tra due superfici a diversa temperatura.
- L'irraggiamento termico è energia emessa dalla materia che si trova a una certa temperatura.

14

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Irraggiamento



Il potere emissivo della superficie E è il coefficiente con il quale l'energia è irradiata per unità di superficie.

15

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Irraggiamento

Limite massimo al potere emissivo che è dato dalla legge di Stefan-Boltzmann

$$E_n = \sigma T_s^4$$

$T_s =$ temperatura assoluta in K della superficie

$\sigma =$ costante di Stefan − Boltzmann $5.67 \times 10^{-8}\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K^4)}$

Una superficie che emette una tale quantità di energia è detta perfetto emettitore o corpo nero. Il flusso di calore emesso per irraggiamento da una superficie reale è inferiore rispetto a quello di un corpo nero alla stessa temperatura ed è dato da:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

$\varepsilon =$ emissività, valore compreso tra 0 e 1

16

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Irraggiamento

Il flusso termico per irraggiamento (W/m^2) che incide su una determinata superficie è detto irradianza G

Conoscendo una proprietà delle superfici detta coefficiente di assorbimento α, è possibile stabilire la quantità di energia assorbita nell'unità di tempo per unità di superficie, che è

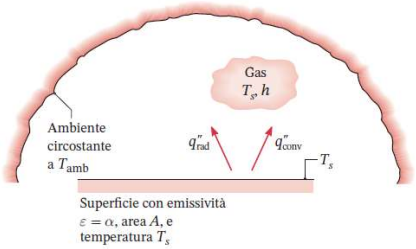
$$G_{ass} = \alpha G$$

$$0 \leq \alpha \leq 1$$

17

Modalità di trasmissione del calore: origini fisiche ed equazioni

Irraggiamento



Lo scambio radiativo tra una piccola superficie a T_s, e una più grande e isoterma che la circonda completamente a temperatura T_{amb} diversa da T_s, può essere approssimato come l'emissione da un corpo nero a T_{amb}, per cui:

$$G = \sigma T_{\text{amb}}^4 \qquad \text{Se } \alpha = \varepsilon \rightarrow \text{Corpo grigio}$$

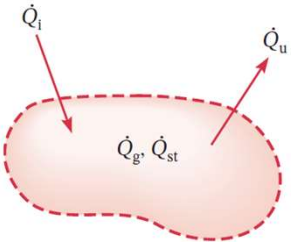
$$q''_{irr} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha G = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{\text{amb}}^4) \qquad \dot{Q} = h_{\text{irr}} A(T_s - T_{\text{amb}})$$

$h_{irr} = \varepsilon\sigma(T_s + T_{\text{amb}})\left(T_s^2 + T_{\text{amb}}^2\right)$ coefficiente di scambio termico per irraggiamento

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{irr} = hA(T_s - T_\infty) + \varepsilon\sigma\left(T_s^4 + T_{\text{amb}}^4\right)$$

18

Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore



$\dot{Q}_i$ = potenza termica entrante attraverso la superficie del sistema

$\dot{Q}_u$ = potenza termica uscente attraverso la superficie del sistema

$\dot{Q}_g$ = potenza termica generata all'interno del sistema

$\frac{dU}{dt}$ = energia interna immagazzinata nell'unità di tempo all'interno del sistema

Bilancio energetico nell'unità di tempo

$$\dot{Q}_i + \dot{Q}_g - \dot{Q}_u = \frac{dU}{dt}$$

Bilancio energetico in un intervallo di tempo

$$Q_i + Q_g - Q_u = \Delta U$$

19

Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Le potenze entrante e uscente sono fenomeni di superficie, cioè sono associati a processi di scambio termico che avvengono al contorno o sulla superficie del sistema (conduzione, convezione e/o irraggiamento)
La potenza termica generata tiene conto della conversione di energia meccanica in energia termica, incluso il passaggio di corrente attraverso una resistenza elettrica, o altri effetti (l'assorbimento elettromagnetico, reazioni chimiche e nucleari)

Ci si riferisce ai fenomeni che portano alla generazione di energia termica come fenomeni volumetrici

$$q'''_g(\mathrm{W/m^3}) = \frac{\dot{Q}_g(\mathrm{W})}{V\ (\mathrm{m^3})}$$

20

Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nel caso di un flusso di corrente elettrica attraverso una resistenza, la potenza generata è anche detta potenza elettrica dissipata e può essere espressa come:

$$\dot{Q}_g = I^2 R_e = I^2 R'_e L$$

I = corrente (A)
R_e = resistenza elettrica (Ω)
R'_e = resistenza elettrica per unità di lunghezza(Ω/m)
L = lunghezza del conduttore elettrico (m)

L'energia interna immagazzinata rappresenta l'energia interna accumulata nel sistema (o persa da esso) nell'unità di tempo.

21

Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nell'applicazione del primo principio della termodinamica, nell'unità o in un intervallo di tempo, ai problemi di trasmissione del calore, è opportuno seguire alcune regole:

- Va definito (ad es. marcandolo con una linea tratteggiata) il volume di controllo V_c più appropriato per il problema in esame.
- Tutti i processi di scambio energetico vanno individuati e rappresentati graficamente da frecce che si dipartono, nell'uno o nell'altro verso, dal volume V_c. A ciascuna freccia va associato un opportuno simbolo.
- L'equazione di conservazione dell'energia (I Principio) va quindi scritta, esplicitando in modo opportuno i vari termini attraverso le relative leggi di scambio termico.

22

Applicazione del primo principio alla trasmissione del calore

Nell'applicazione del Primo Principio, il volume di controllo può essere *finito* o *infinitesimo* (*differenziale*):

- Nel primo caso otterremo un'equazione che rappresenterà il *comportamento medio* del sistema racchiuso da V_c.
- Nel secondo caso si otterrà un'equazione differenziale in grado di fornire, qualora risolta, le condizioni in ciascun punto del sistema.

23

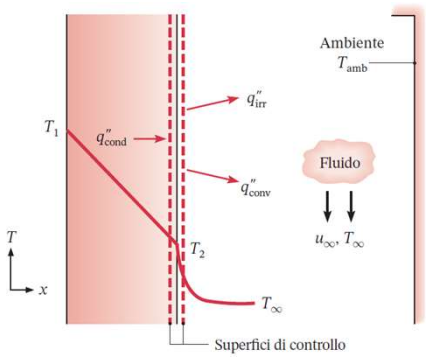
Metodologia di soluzione dei problemi di scambio termico

Fasi dell'approccio sistematico della soluzione dei problemi di trasmissione del calore:

1. Dati del problema.
2. Incognite.
3. Schema del problema.
4. Ipotesi semplificative.
5. Proprietà termofisiche dei materiali.
6. Analisi e soluzione.
7. Discussione ed osservazioni.

24

Bilancio energetico superficiale



Conservazione di energia alla superficie di un mezzo: In questo caso particolare, la superficie di controllo non include massa o volume, i termini relativi alla generazione e all'accumulo non sono più rilevanti ed si considerano solo i fenomeni di superficie:

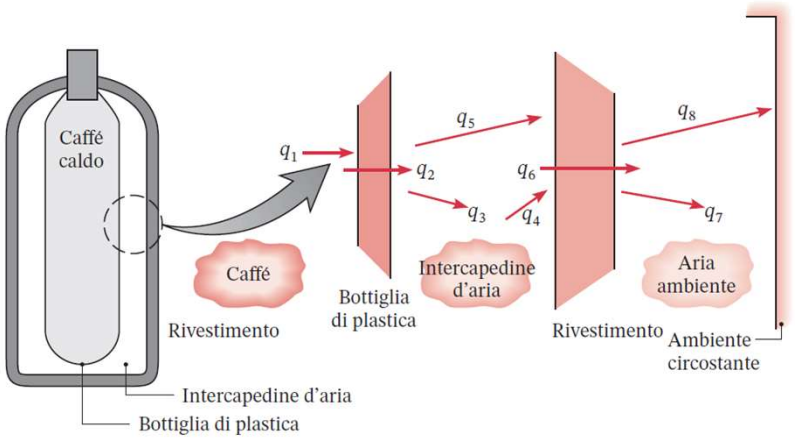
$\dot{Q}_i - \dot{Q}_u = 0 \rightarrow$ Bilancio energetico di superficie, valido sia in stazionario sia in transitorio

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{irr} = 0$$

25

Bilancio energetico superficiale

Identificare le modalità di scambio termico rilevanti



26