

Trasmissione del calore

1. Principi fondamentali

Esistono 3 modalità di scambio di calore:

1. Conduzione all'interno di un mezzo (solido, liquido o gassoso): fenomeno microscopico
2. Convezione: richiede un mezzo fluido e riguarda il trasporto di calore riguardo a moti di massa macroscopici, quindi aggregati di particelle con velocità media non nulla.
3. Irraggiamento termico: fenomeni elettromagnetici, non richiede la presenza di un mezzo, può avvenire anche nel vuoto.

Ci focalizzeremo sempre su problemi di tipo stazionario, poiché l'ipotesi di stazionarietà ci permette di eseguire semplificazioni algebriche.

1.1 Conduzione

La conduzione avviene su scala microscopica: le particelle di un dato elemento hanno una certa energia cinetica che corrisponde al moto caotico.

Se diverse zone di corpo hanno diverse temperatura, le particelle in quelle corrispondenti zone avranno energia cinetica diversa: il differenziale di energia tende ad "equilibrarsi".

Macroscopicamente tutto questo si traduce nel trasferimento di calore dalle zone a più alta temperatura verso quelle a più bassa.

Lo studio che faremo sarà **solo macroscopico**.

\dot{Q} (Q puntato) indica la quantità di potenza termica trasmessa data una differenza di temperatura.

Stabilito questo modello possiamo formulare un'osservazione sperimentale: la potenza termica attraverso una superficie è proporzionale:

- direttamente alla differenza di temperatura tra le superfici delimitanti lo strato
- direttamente all'area della superficie normale alla direzione di trasmissione
- inversamente allo spessore della superficie

$$\dot{Q}_t \propto A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

La superficie si assume normale poiché la si considera **adiabatica**. Avendo un materiale omogeneo si può dimostrare che la potenza termica trasmessa sarà perpendicolare al piano parallelo alla superficie principale della lastra che si considera. Il problema è dunque monodimensionale.

Si specifica dunque una costante di proporzionalità, che permette di rispettare le dimensioni fisiche delle grandezze in gioco.

$$\dot{Q}_t = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

Lambda identifica il coefficiente di conduttività termica, che specifica una proprietà fisica del materiale stesso. È necessariamente espressa in W/(m * °C), oppure in W/(m * K), poiché sarà sempre associata ad una differenza di temperatura.

N.B: **conduttività** fa riferimento solo a quella termica, **conducibilità** corrisponde a quella elettrica. Non utilizzare erroneamente il termine **conducibilità**.

La conduttività termica dei materiali è molto diversificata, poiché cambiano le modalità di attuazione dei fenomeni fisici che avvengono a livello microscopico. La conduttività termica delle sostanze ordinarie varia da 0.0x W/m * °C a >1000W/m * °C.

1.1.1 Conduttività dei gas

I materiali meno conduttivi in assoluto sono i **gas** (conduttività tra [0.0x, 0.x]).

Questa caratteristica è dovuta a fenomeni di **diffusione termica**, dovuta ai moti traslazionali delle particelle del gas. Poiché i gas sono sostanze che non hanno né volume né forma, la distanza tra una particella e l'altra è molto alta, pertanto le probabilità di interazione fra particelle (e.g. scambio di calore) è molto meno frequente che in sostanze liquide o solide. Una regione di gas più calda tende a spostarsi verso le zone più fredde e inoltre possiede più particelle. Le particelle a più alta energia, nell'unità di tempo, percorrono una distanza maggiore o hanno una interazione più frequente con quelle a più bassa energia. Il risultato cumulativo è che l'energia si trasferisce dalle zone a più alto differenziale di energia a quelle a più bassa energia, raggiungendo quindi l'equilibrio (diffusione termica).

I singoli gas hanno diverse capacità di conduzione: i gas che conducono di più sono i gas a **molecola piccola, in senso di peso**, (idrogeno ed elio). I gas a **molecola pesante**, invece, conducono meno. L'aria ha una conduttività termica **standard** 0.026 W/m * K. Poiché l'aria è un composto di gas, la sua conduttività è la risultante di una "media" dei gas che la compongono.

Si può dimostrare che per i gas vale l'effetto Knudsen, ovvero valgono tre proprietà alle quali la conduttività è proporzionale:

- cammino libero medio: distanza che una molecola riesce a percorrere prima di interagire con un'altra molecola.
- densità molecolare volumica (n_v): dipende dal numero di molecole nell'unità di volume.
- velocità molecolare: inversamente proporzionale alla massa molecolare, poiché a parità di energia interna, a scala microscopica, quindi di temperatura a scala macroscopica, particelle con massa molecolare maggiore avranno una velocità media minore.

All'aumentare di queste tre quantità, aumenta la conduttività.

$$\lambda \propto \bar{v} \cdot n_v \cdot L_m$$

I gas a molecola piccola hanno una velocità più alta rispetto a quelli a molecola pesante. Notare che la conduttività termica dei gas aumenta con la temperatura, poiché aumenta, con la temperatura, l'energia cinetica delle molecole e quindi la velocità delle particelle. Di contro, i gas hanno una conduttività termica che non viene quasi mai influenzata dalla pressione. Se aumenta il numero di particelle (aumenta la pressione), diminuisce la distanza fra particelle, pertanto, nonostante si sia innalzata la densità molecolare, cala il cammino libero medio; i due effetti si bilanciano e la conduttività complessiva non cambia.

1.1.2 Materiali isolanti

I materiali come fibre, legno, schiume sono materiali categorizzabili come **isolanti**. Per ottenere un effetto isolante, bisogna riuscire a "fermare" il moto del gas. Questo è ciò che succede nei materiali isolanti.

In questi materiali, la dispersione di particelle in un volume gassoso tale che la frazione di vuoto (volumica) occupata dal gas è altissima (fino al 99% del volume disponibile).

I materiali isolanti sono sostanzialmente dei gas **intrappolati in una matrice solida**.

La conduttività termica di un isolante non è intrinseca del materiale di cui è composto l'isolante, bensì è un risultato efficace che un materiale non isolante dovrebbe avere per produrre lo stesso effetto.

La matrice solida è comunque una struttura più conduttiva rispetto a quella dei gas.

Più è alta la frazione di vuoto occupata dal gas (>95%), più il materiale sarà isolante, pertanto condurrà di meno.

Esempi di isolanti fibrosi sono capelli, tessuti, peli...

Gli isolanti fibrosi generano una matrice permeabile all'aria nella quale l'aderenza che esiste fra le molecole di aria e le superfici delle fibre produce degli effetti viscosi che inibiscono i moti di tipo convettivo all'interno della massa fibrosa. Il risultato è che la massa fibrosa presenta una conduttività termica **apparente** che è un po' più alta di quella del gas che va a inibire. Il problema degli isolanti fibrosi è la frazione di vuoto: non è molto alta.

Nei materiali porosi, invece, si possono distinguere materiali **spugnosi** e a **porosità chiusa**. Nei primi i pori sono distinguibili, nei secondi no.

I migliori isolanti sono porosi a porosità chiusa: le schiume (polistirene e poliuretano, per fare due esempi). Si possono ottenere materiali che posseggono il 99% di frazione volumica occupata che hanno buone proprietà meccaniche. Inoltre se la matrice viene caricata con sostanze di ostacolo all'irraggiamento termico (polistirolo caricato con nerofumo, ad esempio) la conduttività termica si abbassa ancora.

I migliori isolanti di uso comune sono materiali porosi i cui pori si sviluppano da un materiale **precursore** che viene "drogato" con un materiale che fa gonfiare la matrice per occupare ancora più frazione volumica.

Gli isolanti a più bassa conduttività termica sono materiali speciali, realizzati sfruttando l'effetto Knudsen. Si ottiene una conduttività termica bassissima **abbattendo uno dei termini Knudsen** e lasciando gli altri inalterati. Si può fare in due modi:

- isolanti ad alto vuoto: abbasso moltissimo la pressione e, poiché il cammino libero medio trova un limite superiore, la densità volumica media continua a calare (ipoteticamente all'infinito).
- aerogel: riduco il cammino libero medio con pori di dimensione sub-micrometrica.

1.1.3 Liquidi

I processi termici all'interno dei liquidi, la completezza delle informazioni non è totale. Il trasporto è sempre legato alla mozione di particelle. Il problema di analisi si pone quando le altre particelle si legano ad altre (sempre, nei liquidi) creando legami secondari.

La più bassa conduttività la posseggono liquidi composti da catena lunga con un numero elevato di legami secondari che ostacolano la diffusione del calore.

I liquidi più conduttivi sono i **metalli fusi**.

1.1.4 Solidi

1. Solidi non metallici

Si parla di trasmissione **fononica**: le oscillazioni degli atomi intorno alla loro posizione media si propagano come le onde sonore.

Nei solidi non metalli fenomeni diffusivi spariscono, poiché il materiale è organizzato tramite un reticolo cristallino **fisso**.

Nei solidi non metallici, gli atomi oscillando intorno alla loro posizione media. Queste oscillazioni si propagano attraverso i legami interatomici: più i legami sono forti e maggiore sarà la facilità con la quale gli atomi possono spostarsi. Materiali composti (che presentano legami secondari) hanno conduttività termiche più basse per via della maggiore difficoltà di spostamento degli atomi.

Gli ossidi hanno legami forti e pertanto conducono molto, mentre le gomme sono l'esatto opposto.

2. Leghe metalliche

Si parla di trasmissione **elettronica**, che si sovrappone a quella **fononica**: la nube elettronica degli elettroni all'interno dei metalli è ad altissima conduttività. Questa nube elettronica è responsabile sia della conduzione termica che quella elettrica. Per molti metalli sussiste la legge di Wiedemann-Franz, ovvero una relazione di proporzionalità tra la conducibilità elettrica e la conduttività termica.

Nei metalli puri la conduzione di tipo elettronico dipende dal materiale (oro, argento, rame...) e col materiale, ovviamente, varia anche il costo.

In generale i metalli puri presentano un problema: sono estremamente fragili e difficili da lavorare. Se devo realizzare un artefatto in rame devo farlo tramite determinati processi industriali che permettono la modellazione del rame. I materiali metallici vengono spesso usati come **leghe**, ovvero vengono "mischiati" assieme ad altri metalli in modo tale da conferire proprietà più "lavorabili". Mischiando due materiali ottengo una lega con conduttività minore di entrambi i materiali usati, poiché i legami atomici che vengono a

crearsi (ionico e covalente) vanno a sottrarre elettroni alla nube elettronica. Realizzando una lega si ottiene un materiale che ha meno elettroni disponibili nella nube elettronica utilizzabili per condurre. I metalli meno conducibili sono gli **acciai**.

3. Solidi non metallici cristallini

Sono i migliori conduttori in assoluto, poiché la conduzione di tipo fononico diventa estremamente efficiente se la struttura del reticolo è molto regolare (il reticolo cristallino è il più regolare di tutti). Infatti il diamante puro ha una struttura cristallina estremamente regolare e può condurre ben oltre i 2000 W/mK. Un'altra caratteristica è quella di non presentare una conduttività elettrica, pertanto sono efficaci quando bisogna sottrarre calore ad un dispositivo elettrico. Questi solidi vengono usati in moltissime applicazioni nelle quali servono elevate conduttività del calore e conduttività termica nulla. I processori vengono ricoperti con strati di carbonio sottilissimo per poter condurre il calore all'esterno del processore stesso.