

Materiali isolanti

Bibliografia:

**D.G. Gilmore, Spacecraft Thermal Control Handbook, Vol.1
The Aerospace Press, AIAA, 2002**

**P. Fortescue, J. Stark, G. Swinerd
Spacecraft systems engineering, Wiley, 2003**

**R. D. Karam
Satellite thermal control for systems engineers
AIAA, 1988**

Materiali isolanti

L'isolamento previene:

- A) la eccessiva dissipazione di calore da un componente,
- B) l'eccessivo riscaldamento da gas di scarico o flussi termici ambientali.

Gran parte dei velivoli spaziali (con esclusi i radiatori che dissipano i flussi termici generati internamente) sono coperti da MLI (multilayer insulation) isolamento multi strato o barriere per la radiazione monostrato, che sono più economiche, più leggere e forniscono minor isolamento di MLI

MLI proteggono i serbatoi e le linee del combustibile, motori e recipienti dewar criogenici.

Per applicazioni di isolamento in presenza di atmosfera terrestre si usano schiume, e materiali aerogel.

Isolamento multistrato MLI

MLI è un multistrato di film a bassa emissività. I film sono di Mylar (polietilene teraftalato PET) di spessore $6.3 \mu\text{m}$, con alluminio depositato su un lato.

I film sono distanziati, in modo che gli strati si tocchino solo in alcuni punti, e la conduzione tra gli strati sia minimizzata. Il materiale interposto è a bassa conduttività termica.

Un MLI più efficiente presenta Mylar metallizzato su entrambi i lati (con oro o alluminio) mentre i distanziatori a bassa conduttività sono di seta o Dacron.

Lo scambio termico attraverso MLI avviene per radiazione, conduzione nel solido e, in presenza di atmosfera, conduzione nel gas.

Lo scambio termico per radiazione viene minimizzato introducendo molte superfici riflettenti (metallizzate)

Lo scambio termico per conduzione nel solido viene minimizzato minimizzando il numero dei distanziatori ed il contatto tra gli strati.

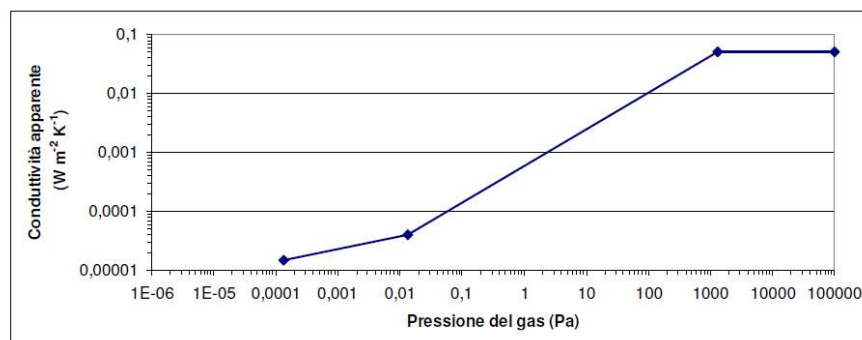
Lo scambio termico per conduzione nel gas viene minimizzato permettendo che il gas fuoriesca dal MLI dopo il lancio o usando l'isolamento in uno spazio evacuato (tra un serbatoio criogenico e una parete esterna)..

Siccome i meccanismi di scambio interagiscono non si potrebbe definire una conducibilità termica del sistema isolante.

Si parla di conducibilità termica apparente λ_{app} (K_{eff}) o di emissività effettiva ε^* , derivate da misure sperimentali di scambio termico a regime permanente.

Nei sistemi evacuati la conducibilità termica apparente dipende dalla pressione del gas:

- Comincia a scendere tra 1333 e 133 Pa (1-10 Torr)
- Diventa costante per pressioni inferiori a 0.0133 Pa, dove la conduzione nel gas diventa molto piccola. per pressioni inferiori a 0.0133 Pa o 0.00133 Pa ($10^{-4} - 10^{-5}$ Torr) rimangono solo conduzione nel solido e radiazione



Per sistemi con pressioni del gas $< 10^{-5}$ Torr, per N strati di emissività ε_1 e ε_2 sui lati opposti

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \left(\frac{1}{N+1} \right)$$

L'emissività effettiva si ricava praticamente da misure sperimentali con pressioni del gas $< 10^{-5}$ Torr, con T_{HOT} e T_{COLD} temperature in Kelvin, A area di scambio:

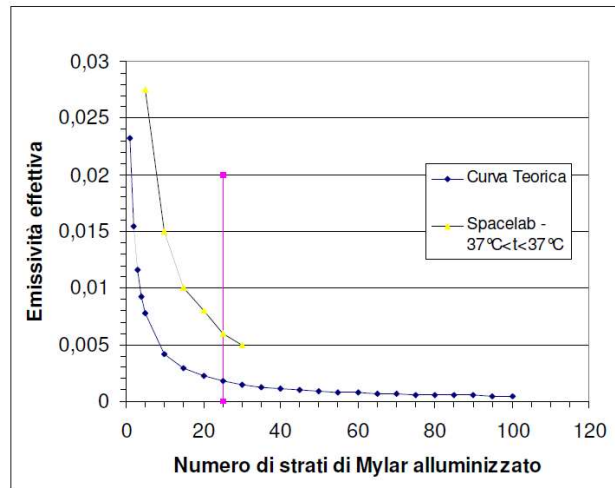
$$\varepsilon^* = \frac{q}{A\sigma(T_{HOT}^4 - T_{COLD}^4)}$$

In alternativa la conducibilità termica apparente e l'emissività effettiva sono legate dalla seguente equazione, dove l è lo spessore di MLI tra la parete calda e fredda

$$\varepsilon^* = \frac{\lambda_{app}(T_{HOT} - T_{COLD})}{l\sigma(T_{HOT}^4 - T_{COLD}^4)}$$

All'aumentare del numero di strati diminuisce il flusso termico per radiazione ma diventano dominanti i percorsi conduttivi nei solidi (distanziatori). Non conviene aumentare il numero di strati oltre 25.

In laboratorio si arriva ad emissività < 0.005 , ma la produzione industriale si attesta tra 0.015 e 0.030.



Teorica:

$$\epsilon_{\text{Mylar}}=0.4$$

$$\epsilon_{\text{Alluminio}}=0.05$$

Spacelab

$$\epsilon=0.05$$

con 30 strati

Per alcune applicazioni le temperature operative sono superiori alle temperature massime di esercizio dei materiali normalmente utilizzati

Per un campo di temperature 50-430 °C

Nella zona di alta temperatura: Kapton (Kapton nome Du Pont per una pellicola poliammide, stabile tra -269°C e 400°C, utilizzato per le tute degli astronauti, non molto resistente allo stress meccanico), alluminizzato con sbalzi

Nella zona di bassa temperatura: Mylar e Dacron.

materiale	Punto di fusione (°C)	Intervallo di lavoro (°C)
Film Kapton		-269 - +400
Film Mylar	250	-60 - +150
Fim Teflon	327	
Dacron	256	

Isolamento per atmosfera di Marte

MLI con CO₂ (10 Torr)

La convezione naturale è trascurabile se le superfici sono a distanza minore di 2.3 cm.

Unità elettronica con materassino MLI ad alcuni cm dalla superficie, mantenuto in posizione da distanziatori di Mylar

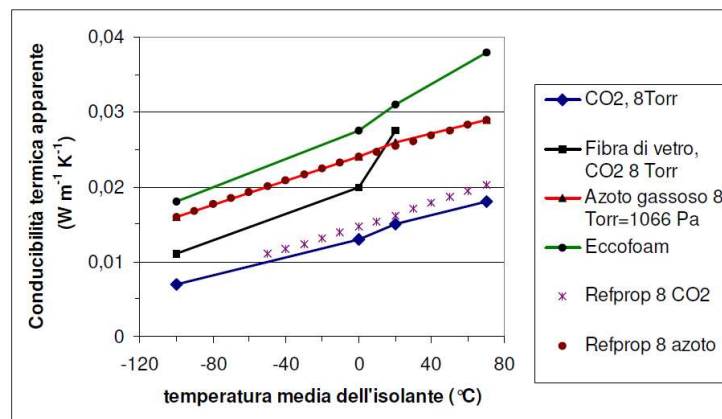
La conduzione attraverso i distanziatori è trascurabile

Lo scambio termico radiativo è minimizzato applicando finiture superficiali a bassa emissività

Rispetto a materassini e schiume lo scambio termico è ridotto del 38%, la massa del 60%, il costo del 33%, il tempo di fabbricazione del 75%.

Isolamento per applicazioni in presenza di atmosfera

Microlite AA fibra di vetro (densità 5-25 kg m⁻³) a celle aperte. Nelle celle rimane intrappolato il gas presente nell'atmosfera (Marte anidride carbonica 1066 Pa). La figura mostra la conduttività di Microlite AA fibra di vetro in atmosfera di Marte (8 Torr CO₂)



Schiume

Eccofoam, Basotect

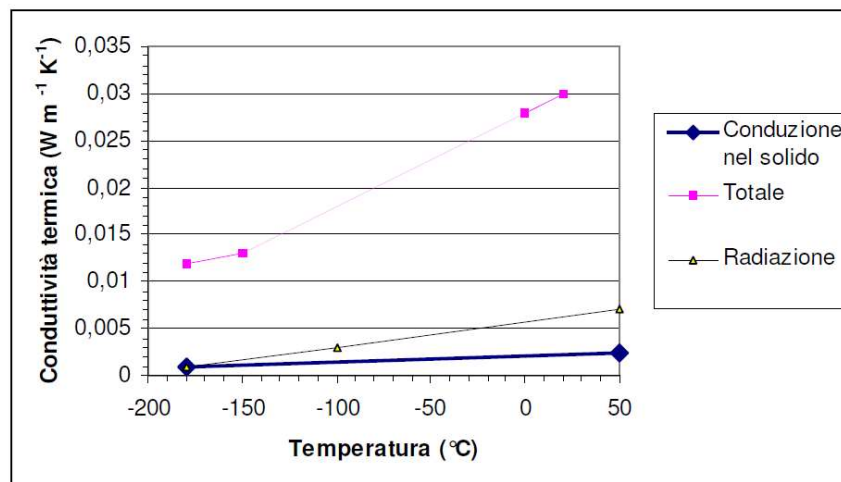
Densità 8-11 kg m⁻³

La conduttività termica dipende da: pressione, tipo di gas, dal fatto che siano schiume a celle aperte o chiuse

Le schiume a celle chiuse non si comportano bene a bassa pressione, perché del gas residuo è mantenuto nelle celle chiuse

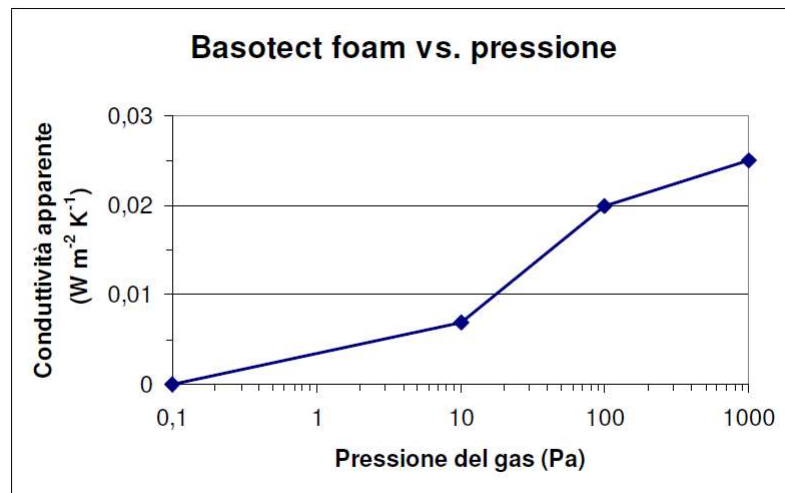
Basotect schiuma a celle aperte.

In figura si vedono i contributi di conduzione nel solido, radiazione, conduzione nel gas, che è il contributo più importante.



Basotect schiuma a celle aperte.

Al diminuire della pressione la conduttività dell'isolante diminuisce. La convezione naturale peggiora le caratteristiche dell'isolante



Convezione naturale nelle schiume

La convezione naturale è governata dal numero di Rayleigh, che è direttamente proporzionale al quadrato della pressione e inversamente proporzionale alla Temperatura elevata a 4.7

Gli effetti convettivi avvengono a bassa temperatura ed alta pressione, ad alto Ra

Per bloccare la convezione naturale: inserzione di alette nella schiuma per ridurre L, permettere la fuoriuscita dei gas quando la pressione cambia.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot L^3 \cdot \rho^2 \Delta t}{\mu^2} \cdot \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \Delta t}{T \cdot \mu^2} \cdot \frac{c_p \mu}{\lambda} = \frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \Delta t}{R^2 T^3 \cdot \mu} \cdot \frac{c_p}{\lambda} \approx \frac{g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \Delta t}{R^2 T^{4.7}} \cdot \frac{c_p}{\lambda}$$

Silica Aerogels

Si preparano aerogel di densità 3 kg m^{-3} , però deboli meccanicamente (densità $3\text{-}350 \text{ kg m}^{-3}$)

Superficie interna $600\text{-}1000 \text{ m}^2/\text{g}$

Diametro medio del poro 20 nm , simile al cammino medio della molecola azoto e ossigeno a temperature e pressioni standard.

Per aumentare il cammino medio della molecole si riduce la pressione del gas. Questo avviene a $p < 50 \text{ Torr}$. Questo vuoto può essere mantenuto infilando l'aerogel in una busta di plastica leggera (barriera alla diffusione del gas)

Conduttività del gas

$$\lambda_{\text{GAS,effettiva}} = \lambda_g \frac{L_{\text{RECIPIENTE}}}{L_{\text{RECIPIENTE}} + L_{\text{LIBEROCAMMINOMEDIO}}}$$

$$L_{\text{LIBEROCAMMINOMEDIO}} = G \frac{T}{p}$$

$$\lambda_g = \text{cost} \frac{T^{0.5}}{M^{0.5} \ell_{\text{molecola}}^2}$$

M massa molecolare del gas,
 G costante tipica del gas,
 ℓ_{molecola} dimensione della molecola,
 p pressione

Silica Aerogels

Aerogel è alquanto trasparente alla radiazione IR a lunghe lunghezze d'onda

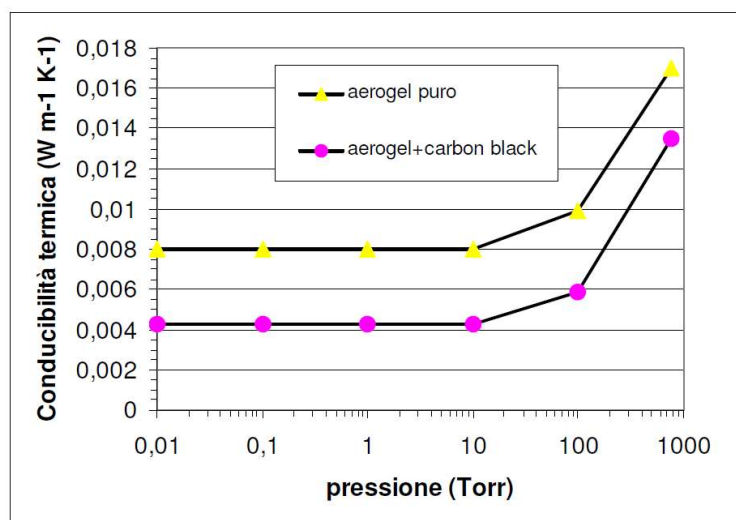
Per applicazioni a $t > 200^\circ\text{C}$ lo scambio radiativo cresce e diventa importante

Per ridurre la componente radiativa si aggiunge un componente che assorba o rifletta all'indietro la radiazione, ma non aumenti la densità del solido e la conduttività del solido e non interferisca con l'integrità meccanica dell'aerogel

Black carbon assorbe IR e a volte aumenta la resistenza meccanica dell'aerogel.

A pressione atmosferica la conduttività termica passa da 0.017 a $0.0135 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a bassa pressione dimezza.

La figura mostra l'effetto dell'aggiunta di un 9% (massa) di carbon black



I valori della figura cambiano per altri gas

Gli aerogel sono delicati; vanno inseriti in una struttura che aumenta il peso del sistema di isolamento:

Rover Sojourner (Marte) : scatola di materiale composito (struttura di fibra di vetro), conduttività dell'aerogel $0.0163 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$, a 10 Torr CO₂, 24°C, densità 20 kg m^{-3} .

Isolamento per applicazioni in presenza di atmosfera terrestre

MLI viene degradato

Si usano materassini, schiume, aerogel

Si intrappola il gas in volumi così piccoli da eliminare gli effetti convettivi

Conduzione nel solido e nel gas

Radiazione (assorbimento, emissione, riflessione, rifrazione nel solido)