

# 隔热材料性能的影响因素

洛阳船舶材料研究所 张霞

## 摘要

隔热材料的隔热性能的优劣决定着保温节能效果的优劣和成本的高低。本文从不同角度介绍了隔热材料的类型,综合了隔热材料的有关隔热理论,根据理论分析了隔热材料内部的传热过程,讨论了隔热材料的微观结构及使用环境对隔热性能的影响,并概括了提高隔热性能的有效途径。

关键词:有效导热系数 辐射 孔隙率

## 1 前言

近年来,造船业、建筑业及冷冻冷藏行业发展迅速,对于隔热材料的需求日益增长,因而涌现了一系列各具特色的隔热材料。

使用隔热材料能够有效减少热损失,节约燃料,同时可以改善劳动环境,保证安全生产,提高工效。选用合适的隔热材料隔热后,其中95%左右的热量可以免于损失<sup>[1]</sup>。所以隔热材料性能的优劣决定了保温效果的优劣及保温成本的高低,而隔热材料的隔热性能受材料内部构造及环境因素的影响,因此提高隔热性能的关键在于材料的内部构造及使用环境。

## 2 隔热材料的类型

隔热材料按其内部组织和构造的差异,可分为以下三类。

(1)多孔纤维质隔热材料:由无机纤维制成的单一纤维毡或纤维布或者几种纤维复合而成的毡布。具有导热系数低、耐高温性能好的特点。常见的有超细玻璃棉、石棉、

矿岩棉等。

(2)多孔质颗粒类隔热材料:常见的有膨胀蛭石、膨胀珍珠岩等材料。

(3)发泡类隔热材料:包括有机类、无机类及有机无机混合类三种。无机类常见的有泡沫玻璃、泡沫水泥等。有机类的如聚氨酯泡沫、聚乙烯泡沫、酚醛泡沫及聚酰亚胺泡沫等。此类泡沫具有低密度、耐水、低导热系数等优点,广泛应用于保温领域。混合型多孔质泡沫材料是由空心玻璃微球或陶瓷微球与树脂复合热压而成的闭孔泡沫材料<sup>[2]</sup>。

隔热材料就其使用范围而言,可以分为用于航空航天器的高温隔热材料;用于船舶舱室、建筑物以及容器保温等隔热系统的常温隔热材料;以及用于冷藏、液化天然气管道保温的低温隔热材料。

## 3 影响隔热性能的因素

具体衡量隔热性能的尺度是材料的导热系数,导热系数的大小反映了材料隔热性能的优劣。影响材料导热系数的因素有材料本身因素及使用环境等。首先是材料组分及宏观结构,对于多孔质材料而言,材

料种类、密度及泡孔结构都是影响导热系数的因素。其次材料的使用温度、压力是影响导热系数的另一部分因素。而所有这些因素对导热系数的影响都与材料内部传热过程有关。

3.1 隔热材料内部的传热过程

凡是有温差存在的地方必然存在着热量的传递。隔热材料的作用就是减弱热量交换的程度并阻止热量的传递。一般隔热材料是由固体颗粒、空隙、纤维等组成，所以整体材料的导热过程由固相之间的传热、固相和气相之间的传热、空隙中气相之间的对流、气泡膜之间的辐射等四部分组成。材料的有效导热系数应为这四部分对

导热系数贡献的总和。当材料在高温下使用时，辐射是影响导热系数的主要因素。而常温使用时，辐射则转化为次要因素。多孔质隔热材料之所以具有良好的隔热性能与较低的导热系数，是由于材料中包含有大量气体的缘故。气体的导热系数远小于固体的导热系数，表1列出的是常见的几种气体的导热系数。气体含量大，则增加了空隙中气相之间的对流，相反，则对流换热减少。多孔质隔热材料的结构多是呈闭口气孔，据实验测试表明，酚醛泡沫的闭口气孔率高达80%以上，因此空隙间气相之间的对流对有效导热系数的贡献成为次要因素。

表1 气体导热系数与温度的关系

温度(K)		200	250	300	400	500	600	800
导热系数 (W/m·K)	空气	0.0181	0.0223	0.0261	0.0323	0.0395	0.0456	0.0569
	二氧化碳	0.0095	0.0129	0.0136	0.0244	0.0323	0.0403	0.0560
	氟利昂11			0.0078	0.0119			
	氟利昂13		0.0091	0.0121	0.0185	0.0248		

文献[3]指出，固相和气相对有效导热系数的贡献可以用下式表示：

$$K_1 = PK_g + (1 - P)K_s \quad (1)$$

式中， $K_s$ —在平均使用温度下固相导热系数，W/(m·K)

$K_g$ —在平均使用温度下气相导热系数，W/(m·K)

$P$ —材料的孔隙率，(%)

$K_1$ —固相和气相对有效导热系数的贡献，W/(m·K)

由(1)式可得出，材料孔隙率增大，即材料中气体含量增加，相应固体含量减少，则固相和气相有效导热系数减小，材料隔热性能提高。

根据斯蒂芬·玻尔兹曼定律式(2)及

傅立叶定律式(3)可以计算辐射对有效导热系数的贡献。

$$q = \sigma \cdot T^4 \quad (2)$$

$$q = -K_2 \cdot \frac{dt}{dx} \quad (3)$$

式中， $q$ —热流密度，W/m<sup>2</sup>

$K_2$ —辐射对有效导热系数的贡献，W/(m·K)

$\sigma$ —玻尔兹曼常数，

$$566.88 \times 10^{-10} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$T$ —材料使用的平均热力学温度，(K)

$\frac{dt}{dx}$ — $x$ 方向上的温度梯度，

负号表示热量传递方向与温度升高方向相反。

由(2)、(3)式可以推出： $K_2$ 正比于 $T^3$ ，

即辐射对有效导热系数的贡献与材料使用的热力学温度的三次方成正比。因此材料在高温下使用时辐射对导热系数的影响是占主导地位的。

隔热材料的有效导热系数是固相和气相传热及辐射传热两部分的叠加。根据多项研究表明,多孔质隔热材料的有效导热系数可以足够精确地用简单的非耦合模型的关系式表示如下<sup>[4]</sup>:

$$K_e = (1-P)K_s + PK_g + 4d\sigma\bar{T}^3 \quad (4)$$

式中,  $K_e$ —材料的有效导热系数,

$W/(m \cdot K)$

$d$ —材料的孔径,  $m$

$\bar{T}$ —材料使用的平均热力学温度,  $K$

$P, K_s, K_g, \sigma$  与上同。

由(4)式可知,多孔质隔热材料的有效导热系数与材料的孔率、固相和气相的导热系数以及材料使用的热力学平均温度有直接关系,隔热材料在使用过程出现的间接影响都可根据上述理论很好地解释。

### 3.2 材料导热系数的影响因素

#### 3.2.1 使用时间与导热系数的关系

根据(4)式,材料泡孔径  $d$  增加,则导热系数增大。从微观上看,如果材料的泡孔壁破裂或材料的闭口泡孔率减少,则意味着材料的微观泡孔径增大,从而使材料的隔热性能降低。隔热材料使用的时间越长,则材料的老化程度越高,泡孔壁破裂程度的提高,导致导热系数的增大。据实验测定,酚醛泡沫材料在放置五个月以后,导热系数增大约  $0.0058W/(m \cdot K)$ 。

#### 3.2.2 使用程度与导热系数的关系

根据(4)式,随温度升高,辐射相导热系数增大,而固相和气相的导热系数随温度的变化则没有直接反映。对于绝大多数固体材料而言下式成立:<sup>[5]</sup>

$$K_s = K_{s,0}(1 + \alpha t) \quad (5)$$

式中,  $K_s$ —固体材料在  $t^\circ C$  下的导热系数,

$W/(m \cdot K)$

$K_{s,0}$ —固体在  $0^\circ C$  下的导热系数,

$W/(m \cdot K)$

$\alpha$ —温度系数,  $1/^\circ C$

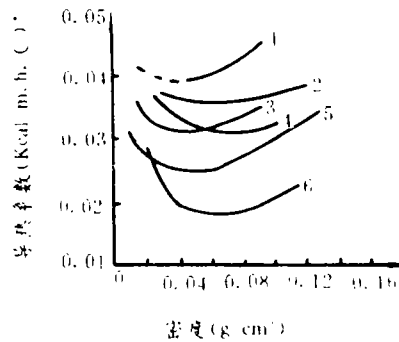
对于多数非金属材料  $\alpha > 0$

对于多数金属材料  $\alpha < 0$

由此可见,固相导热系数随温度升高而增大。而气相导热系数随温度的变化可由表1充分地反映出来。综上所述,使用温度升高,材料导热系数增大,从而导致隔热性能降低。经实验测试了隔热材料的导热系数与温度的关系,如表2所示。

表2 隔热材料导热系数与温度的关系

温度( $^\circ C$ )	导热系数( $W/m \cdot K$ )	
	酚醛泡沫	聚氨酯泡沫
27.40	0.03300	
37.40		0.02739
58.22		0.02861
85.09	0.03708	



\*  $1 \text{ kcal}/m \cdot h \cdot ^\circ C = 1.163W/(m \cdot K)$

\*\*  $1 \text{ g}/cm^3 = 1 \times 10^{-3}kg/m^3$

1—聚乙烯泡沫( $30^\circ C$ )

2—硬质聚氯乙烯泡沫( $40^\circ C$ )

3—聚苯乙烯泡沫( $30^\circ C$ )

4—水发性硬质聚氨酯泡沫( $40^\circ C$ )

5—酚醛泡沫( $20^\circ C$ )

6—氟利昂发泡硬质聚氨酯泡沫( $40^\circ C$ )

附图 导热系数与密度的关系

### 3.2.3 材料的表观密度与导热系数之间的关系

由于气相导热系数远小于固相导热系数,故多孔隔热材料中包含的气相比比例增大,固相比比例减小,可以降低整体材料的导热系数。但若气相比比例过高,相应增大了材料的泡孔径,也会造成导热系数的增大。由此可见,必然存在一个最佳密度,使隔热材料在一定的使用温度下,具有最小的导热系数。附图体现了这种推论<sup>[5]</sup>。

### 3.2.4 材料的含水量与导热系数的关系

材料中含水量的增加必然减少气孔中气体的含量,而相同温度下,液体水的导热系数远大于气体。以空气为例,300K温度下,水的导热系数为 $0.613\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,而空气仅为 $0.0261\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,水的导热系数几乎是空气的24倍,同时水蒸发会吸收大量的热,也将导致材料导热系数大幅度上升。根据附图中曲线4、6,水发性硬质聚氨酯泡沫与氟利昂发泡硬质聚氨酯泡沫在相同的温度下导热系数的差异充分地说明含水量的增大,会降低隔热材料的隔热性能。

## 4 提高隔热性能的途径

虽然隔热材料内部传热过程非常复

杂,许多微观机理尚了解不全,但我们可以通过有关理论,定性分析隔热材料隔热性能的影响因素,为提高多孔质隔热材料的性能提供一定理论基础。

综合上述影响因素,要提高材料的隔热性能,就材料自身因素而言,必须降低材料的泡孔径,提高闭口泡孔率及降低材料自身的含水量,同时还必须选择适当的使用温度及最佳密度,才能达到最佳的隔热效果,以最少的投资,获得最好的隔热效果,从而达到保温节能的最终目的。

### 参考文献

- 1 夏雅兰. 隔热技术. 机械工业出版社, 1991:1
- 2 Straub P, Gagliani J. Rigid Closed-cell polyimide foams for aircraft application and foam-in-place technology. NASA. Contract Rep. 1983
- 3 Speil S. Low Density Thermal Insulation for Aerospace Applications. Appl. Materials Research. 1964
- 4 罗森诺 W M. 传热学基础手册. 科学出版社, 1992:340-341
- 5 陈敏恒等. 化工原理(上). 化学工业出版社, 1985:208-209
- 6 藤田仙之. 断热材の話(前编). 日本造船学会志第707号, 1988:27-38

## 下期要目介绍

- ▲ 16Mnq 钢用于焊接桥梁的防断运用性研究(续)
- ▲ 磁共振成像超导磁体杜瓦容器研制
- ▲ 铝合金焊接船及其发展
- ▲ 铸造式临界流速喷嘴
- ▲ 梯度功能材料的设计
- ▲ 二硅化钼基复合材料的发展动向
- ▲ 石油化工设备硫腐蚀与渗铝防护
- ▲ 时效硬化型舰船结构钢的研究动向与进展