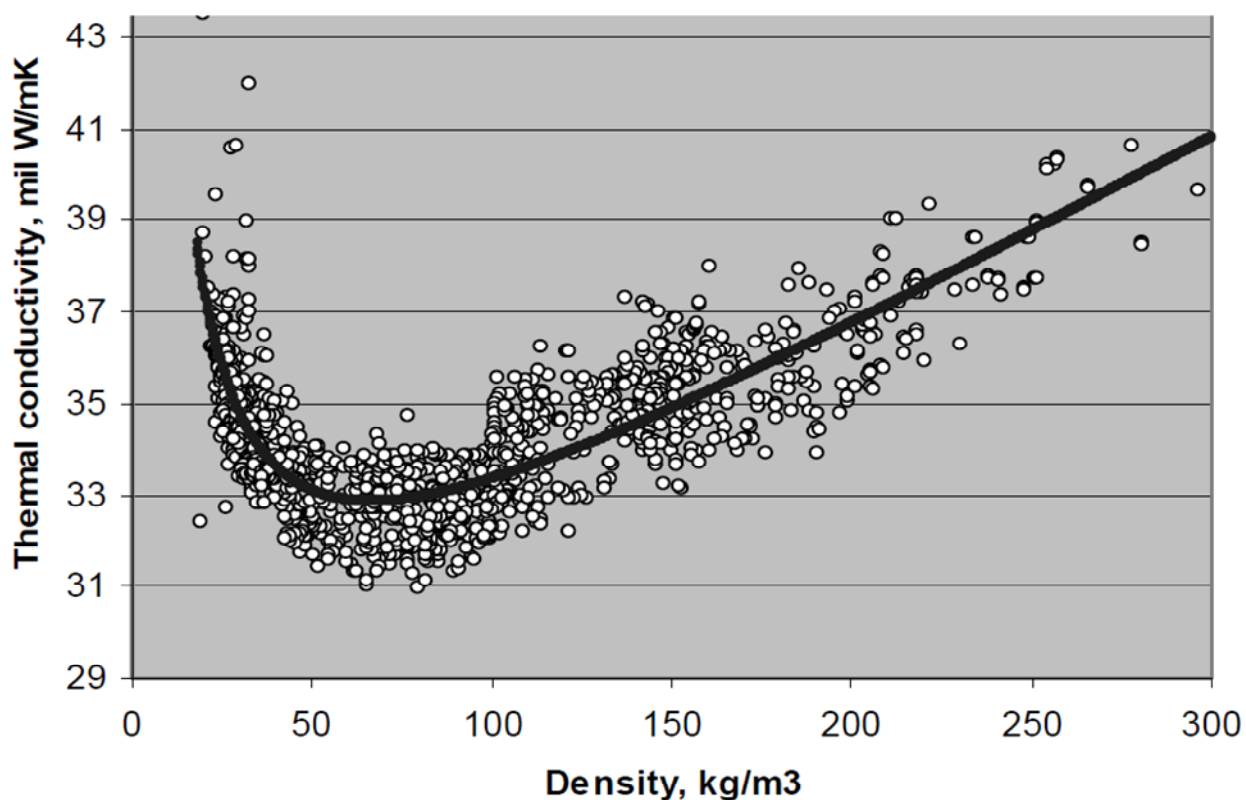


新型表征参数——根据密度和导热系数关系 评价材料的隔热性能

New Characterization Parameter: Evaluating the Thermal Insulation Performance of Materials According to the Relationship Between Density and Thermal Conductivity



摘要：针对低密度隔热材料在实际工程中的应用，介绍了两个新型表征参数，分别在固定厚度和固定热阻情况下，对低密度隔热材料进行评价、选材和优化。同时，还推荐采用瞬态法测量隔热材料的热扩散系数，可以在准确表征隔热性能的同时，还能简化测试设备及其造价。

关键词：隔热材料、导热系数、密度、热扩散系数、隔热因子、隔热效率

1. 问题的提出

在低密度隔热材料的实际工程应用中，往往存在着以下两方面的问题：

(1) 普遍认为隔热材料的密度越低，隔热性能越好，从而在保温板等行业内将密度视为影响保温板隔热性能的唯一因素和产品指标，但实际情况并非如此。

(2) 在隔热系统设计中，往往需要根据事先明确的隔热层热阻指标，来选择合理的隔热材料并进行优化。但根据热物理性能参数（如导热系数和密度）如何对隔热材料进行正确的优化选择，并没有一个简便和有效的方法。

本文将针对以上问题，介绍了两个新型表征参数，以便更直观、更具有物理意义和更简便的对隔热材料进行评价，来满足实际工程应用中隔热材料的选择和优化需要。

2. 新表征方式的提出

2.1. 密度因子 (λ/ρ)

隔热材料的导热系数与材料密度有很强的相关性，大多数隔热材料都为多孔材料，随着隔热材料孔隙率的提高或密度的降低，其导热系数变小，但导热系数并不是随着密度的减小而无限降低，如图 2-1 所示，当密度小于某个临界值后，由于孔隙率太高，空隙中的气体开始产生对流，辐射传热也相应加强，这时隔热材料的导热系数反而增大[1]。因此对于多孔材料隔热性能的评价，不仅只采用导热系数这个

参数，还要同时考虑密度的影响。

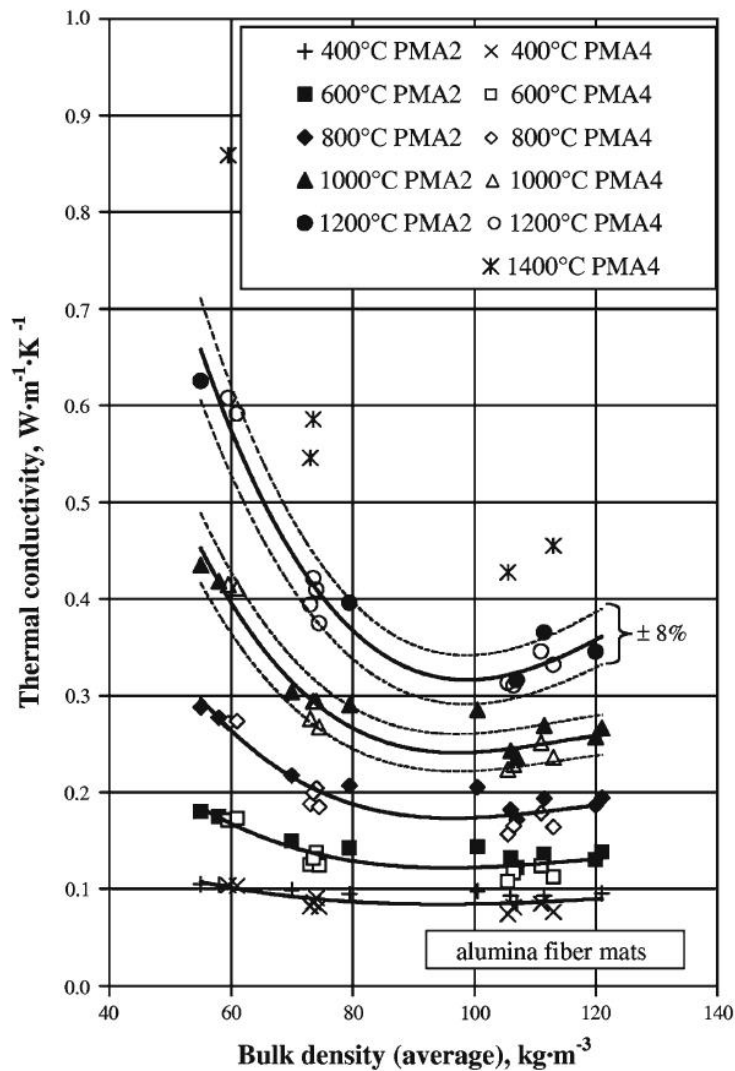


图 2-1 不同温度下采用不同稳态热流计法设备（PMA2 和 PMA4）测试不同密度氧化铝纤维毡导热系数的结果

在隔热材料的各个热物理性能参数之间，有以下关系存在：

$$\lambda = \alpha c \rho$$

$$\alpha c = \frac{\lambda}{\rho} = \frac{\lambda d}{\rho d} = \frac{d}{\rho R} \quad (1)$$

其中 λ (W/mK) 是导热系数， α (m^2/s) 是热扩散系数， ρ (kg/m^3) 是密度， c ($kJ/kg \cdot K$) 是比热容， R (m^2K/W) 是热阻， d (m) 是厚度。 λ/ρ 定义为密度因子。

由上式可以看出，密度因子的大小决定了材料的隔热能力，密度因子越小代表

隔热能力越强。其物理意义在于：在材料厚度固定情况下，密度与热阻乘积表征了材料的隔热能力，乘积越大，隔热能力越强。

密度因子应用的典型案例是评价不同类型膨胀聚苯乙烯（EPS）板[2]，四种牌号的 EPS 板热物理性能如图 2-2 所示。从图中可以看出，四种牌号 EPS 板的导热系数随着密度的增大而单调降低，密度越大反而导热系数越大。

	EPS 80	EPS 100	EPS 150	EPS 200
导热系数 λ (W/mK)	0.0409	0.0392	0.039	0.0378
密度 ρ (kg/m ³)	13.85	16.69	22.55	27.61
隔热因子 (λ/ρ)	0.0030	0.0023	0.0017	0.0014

图 2-2 四种牌号 EPS 板的热物理性能

将四种牌号 EPS 板的密度因子绘制成直方图，如图 2-3 所示，由此可见，密度更高的 EPS 150 和 200 板具有最好的隔热能力。

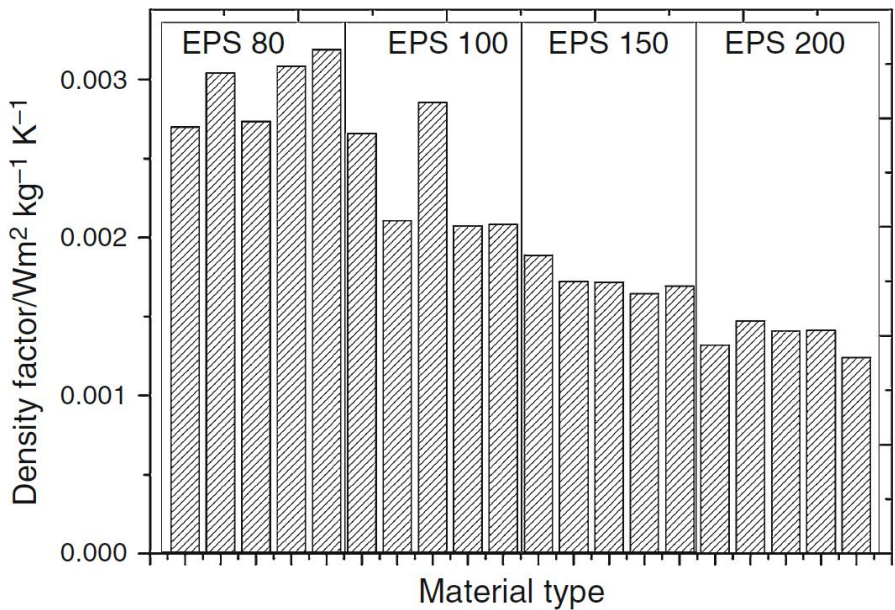


图 2-3 密度因子的直方图

另外，从上式中还可以看出，材料的隔热性能还可以通过直接测量热扩散系数进行表征，这在实际测试中有着十分重要的意义。因为导热系数的直接测量往往十分复杂，通常必须检测量热流量。此外在这种导热系数直接测试实验中，通常情况

下，加热器产生的一些热量不会流过样品，而是通过辐射损失掉。而在直接测量热扩散系数的方法中，大多采用瞬态法，只需测量温度随时间的变化，往往无需考虑辐射热损带来的影响，由此可以使得测试装置大大简化，这在高温下的测试中效果尤为明显。

2.2. 隔热效率 ($\rho\lambda$)

隔热的主要功能是限制热流，当热流密度为 q 的热流通过厚度为 d 、具有有效导热系数 λ （有效热阻 R ）的隔热层，那么贯穿整个厚度的温差为 ΔT ，它们之间的关系由傅里叶传热定律给出：

$$q = \frac{\lambda}{d} \Delta T; \quad R = \frac{d}{\lambda} = \frac{\Delta T}{q} \quad (2)$$

而单位面积上的质量，为：

$$\frac{m}{A} = \rho d \quad (3)$$

结合上述两个公式，得：

$$\frac{m}{A} = \rho \times \frac{\Delta T}{q} \times \lambda = \rho \lambda R \quad (4)$$

因此，上式的物理意义在于：对于给定的所需热阻 R ，单位面积所需的隔热质量与密度和导热系数的乘积成正比。即对于任何设计要求的热阻，最小化隔热效率参数 $\rho\lambda$ 可以最小化稳态传热中每单位面积所需的隔热质量。

隔热效率参数应用的典型案例是评价航天飞行器金属热防护系统用不同类型隔热材料的评价[3,4]，在 0.1Pa 的高真空下，测试研究了多种纤维隔热材料样品隔热效率参数作为温度的函数，如所示图 2-4。所提供的数据包括密度分别为 96、96、107、267 和 202.4 kg/m³ 的 Q-Fiber、Saffil、APA、ZFY 和 OFI 五种纤维类隔热材料。从图中可以看出，OFI 的隔热效率参数最低，对于特定的应用，其单位面积的质量要求更低。Q-Fiber 和 Saffil 有相似的性能。在高达 1000 K 的温度下，APA 的性能类似于 Saffil 和 Q-Fiber，但在较高温度下性能稍差。ZFY 在整个温度范围内具有最高的隔热效率参数，但具有更高的使用温度。Q-Fiber、Saffil、APA、ZFY 和 OFI

五种纤维类隔热材料长期使用的极限温度分别为 1370、1760、1760、2200 和 1600 K。

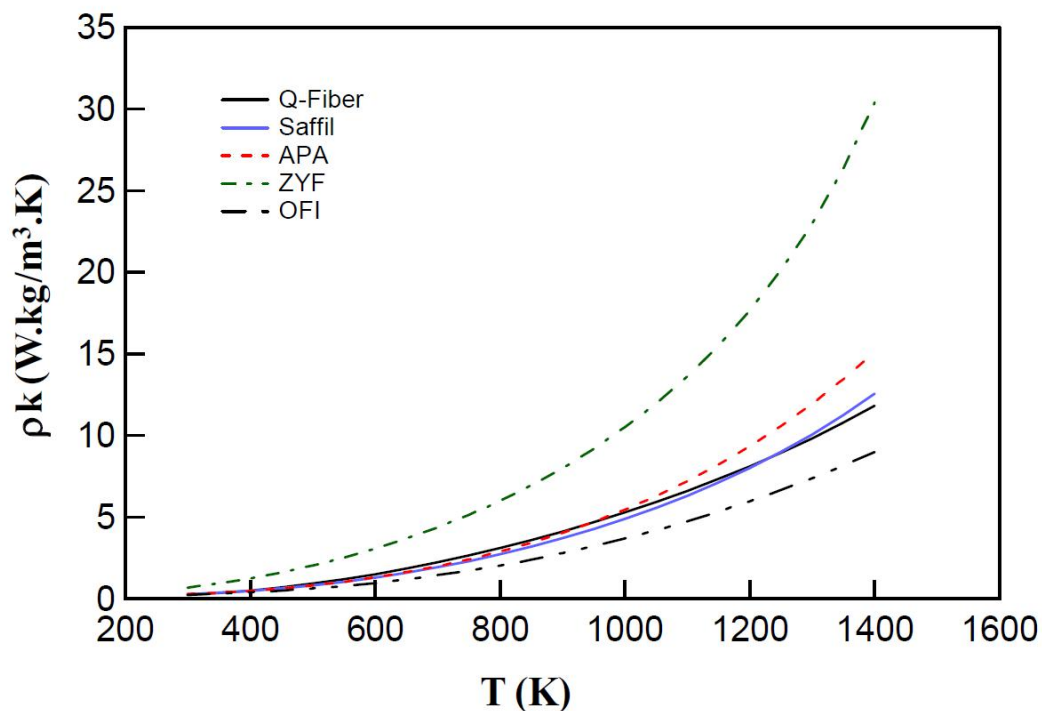


图 2-4 空气中 0.1Pa 压力下多种隔热材料隔热效率参数随温度变化的比较。

3. 结论

综上所述，针对低密度隔热材料在不同工程应用中的评价，引入了物理意义明确的两个实用参数，即：

(1) 在材料厚度固定情况下对材料隔热能力进行评价时，可以选择隔热因子参数，隔热因子越小，隔热能力越强。

(2) 在材料热阻固定情况下对材料隔热能力进行评价时，可以选择隔热效率参数，隔热效率参数越小，隔热效率越高。

(3) 采用直接测试隔热材料热扩散系数的瞬态法，可以忽略传热边界条件对测量的影响，简化测量装置，在高温下可以采用结构非常简单的设备来完成隔热材料热扩散系数的准确测量。

总之，上述介绍两个新型表征参数对于初步比较十分有用，但隔热材料在实际使用中会经历热流、气压和周围材料温度的变化，因此它们很少达到稳定状态，这

使得在复杂的瞬态环境中很难建立一个简单参数来精确比较材料的隔热性能。确定特定热系统中使用最有效的隔热材料是一项复杂的任务，不仅需要考虑隔热材料本身的瞬态热性能，还必须考虑与其他部件的相互热作用，以及在不降低性能情况下抵抗其他环境影响。然而，上述两个表征参数，至少可以在实际工程应用中粗略比较稳态条件下现有的各种隔热材料。

4. 参考文献

(1) Wulf R, Barth G, Gross U. Intercomparison of insulation thermal conductivities measured by various methods[J]. International journal of thermophysics, 2007, 28(5): 1679-1692.

(2) Lakatos Á. Thermal conductivity of insulations approached from a new aspect[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2018, 133 (1) : 329-335.

(3) Daryabeigi K, Cunnington G R, Knutson J R. Combined heat transfer in high-porosity high-temperature fibrous insulation: Theory and experimental validation[J]. Journal of thermophysics and heat transfer, 2011, 25(4): 536-546.

(4) Daryabeigi,K., "Effective Thermal Conductivity of High Temperature Insulations for Reusable Launch Vehicles," NASA TM-1999-208972, February 1999.

