

聚氨酯软泡沫塑料隔热性能分析研究

张建可

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 讨论了聚氨酯软泡沫塑料的隔热机理和导热系数计算模型, 对影响隔热性能的因素, 如温度、密度、挤压、吸水率、环境压力等进行了分析。在这些不同影响因素下对聚氨酯软泡沫塑料的隔热性能进行了测试, 得到了聚氨酯软泡沫塑料在各影响因素下的热导率关系曲线。在试验的基础上, 总结归纳了聚氨酯软泡沫塑料隔热性能的普遍性规律。为聚氨酯软泡沫塑料的隔热应用提供了参考依据。

关键词: 聚氨酯软泡沫塑料; 隔热性能; 导热系数; 计算模型; 机理; 影响因素

中图分类号: TB322;TB61+1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2006)03-0180-05

ANALYSES AND STUDY FOR PROPERTY OF THERMAL INSULATION OF SOFT POLYURETHANE FOAM

ZHANG Jian-ke

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The mechanism of transmit heat and the calculation model of the thermal conductivity of the soft polyurethane foam have been discussed and the affect factors of the thermal conductivity. Temperature, density, and squeeze, absorb water the rate, environment pressure etc, have been analyzed. On these influence of affect factors of thermal conductivity, the thermal conductivity of the soft polyurethane foam has been measured and the relation curve of thermal conductivity have been given. On the basis of the measured, the general relations of thermal conductivity of the soft polyurethane foam have been setup. The reference of design for the application of thermal insulation has been provided.

Key words soft polyurethane foam; thermal insulation property; thermal conductivity ;calculated model; mechanism; affect factor

1 引 言

聚氨酯软泡沫塑料除具有较好的隔热性能外, 还具有使用方便、易切割改变形状、质量轻、稳定性好等一系列优点, 因而在航天器及其他各领域得到广泛应用。软泡沫塑料隔热性能受各种因素的影响。所处的环境条件对其热导率影响也很大, 对整个材料的隔热性能起着主要作用。在空间应用中, 由于航天器中软泡沫塑料使用的部位不同, 所处的环境条件不同, 其隔热性能变化较大。因此, 研究环境条件对软泡沫塑料热导率的影响就显得尤为重要。同硬质聚氨酯泡沫塑料类似, 聚氨酯软泡沫塑料的导热系数由下式各部分传热贡献组成^[1]

$$\lambda_z = \lambda_r + \lambda_g + \lambda_s + \lambda_c \quad (1)$$

式中 λ_r 为辐射传热对聚氨酯软泡沫塑料的传热贡献; λ_g 为泡孔中气体对聚氨酯软泡沫塑料的传热贡献;

收稿日期: 2005-12-06.

作者简介: 张建可(1954-), 男, 河北省深州市人, 高级工程师, 从事材料研制与材料低温性能测试研究。

λ_s 为聚氨酯塑料固体材料对聚氨酯软泡沫塑料的传热贡献; λ_c 为气体对流传热。在泡沫塑料中, 这几部分的比例不同。在聚氨酯软泡沫塑料中, 由于泡沫材料开孔率很高 (约为 60%~80%), 所以泡孔中空气的对流传热和气体传热应为主要考虑的方面。

2 机理分析与计算

软质聚氨酯泡沫塑料的简易结构模型如图 1 所示。

根据这个简易结构模型, 聚氨酯泡沫塑料的传热分析主要考虑 2 个方向: 垂直于泡孔生长方向和沿泡孔生长方向。因为对流传热是所有传热途径中对隔热性能影响最大的, 所以在这些泡孔中是否存在对流传热是讨论隔热性能的一个关键问题。

2.1 对流传热是否发生的判断

Jeffrey 提出了是否有对流发生的一个判据^[2]

$$L = \frac{\rho \times c \times g \times \alpha (\theta_1 - \theta_2) d^3}{\lambda \times \gamma} \quad (2)$$

式中 L 为 Jeffrey 判据, 当 $L < 1709$ 时不发生对流, $L > 1709$ 时发生对流; ρ 为气体密度, 常温时 $\rho = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$; c 为气体比热容, 常温时 $c = 1.006 \text{ J/g} \cdot \text{K}$; α 为气体膨胀系数, 约 10^{-3} 数量级; d 为流层厚度, 即在垂直泡沫生长方向上, 泡沫塑料的泡孔近似为球形孔 (见图 1(a)), 其孔直径为 0.05 cm 左右, 在沿泡孔生长方向, 泡沫塑料的泡孔近似为直通长形孔 (见图 1(b)), 其孔直径仍为 0.05 cm 左右; $\theta_1 - \theta_2$ 为流层温差, (试样厚度为 1 cm, 温差近似为 10 °C, 设泡孔均匀排布, 根据上述泡孔直径计算, 1 cm 试样内有 20 个泡孔, 泡孔两边温差约 0.5 °C); g 为重力加速度, $g = 980 \text{ cm/s}^2$; λ 为空气热导率, 20 °C 时 $\lambda = 2.4 \times 10^{-4} \text{ W/cm} \cdot \text{K}$; γ 为气体扩散系数, 约 $10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

将以上数据代入式 (2), 计算结果 $L \approx 10^{-5}$ 。根据 Jeffrey 判据, $L < 1709$, 则在垂直泡沫生长方向无对流产生。

如果是在泡孔的生长方向上, 根据结构简图图 1(b), 流层厚度设为泡孔直径, 即 $d = 0.05 \text{ cm}$, 流层温差 $\theta_1 - \theta_2 = 10$ °C。将数据代入式 (2), 计算结果 $L \approx 10^{-4}$ 。根据 Jeffrey 判据, $L < 1709$, 则在泡孔的生长方向仍无对流产生。

由计算证明, 泡孔直径小于 0.05 cm 时, 在软质聚氨酯泡沫塑料中无对流发生。

2.2 泡沫塑料导热系数的分析计算

根据模型分析, 先估算厚度为 1.00 cm, 沿泡孔生长方向的聚氨酯软泡沫塑料导热系数。

泡沫塑料中, 泡孔中的气体导热系数按下式计算^[3-7]

$$\lambda_g = C_v \times v \times \rho \times L \times 1/3 \quad (3)$$

式中 C_v 为气体定容比热容, 常温时 $C_v = 1.006 \text{ J/g} \cdot \text{K}$; ρ 为气体密度, 常温时 $\rho = 1.293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$; v 为气体平均速度, 室温环境下, $v = 4.63 \times 10^4 \text{ cm/s}$; L 为气体平均自由程, 室温环境下, $L = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}$, 当压力为大气压时 $L = 6.6 \times 10^{-6} \text{ cm}$ 。

辐射传热贡献按下式计算^[1]

$$\lambda_r = 4 \times \sigma \times \varepsilon \times T^3 \times d(2 - \varepsilon) \quad (4)$$

式中 σ 为 Stefan-Boltzman 常数 $5.67 \times 10^{-8} \text{ J/(m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K}^4)$; ε 为发射率, 泡沫塑料为 0.85; d 为辐射传热途径, 根据图 2, 对于开孔泡沫, 沿泡孔生长方向, 传热途径设为试样厚度 1.00 cm, 而对于闭孔泡沫, 传热途径设为泡孔直径 $5 \times 10^{-2} \text{ cm}$; T 为温度 293 K。

根据分析, 当泡孔直径即 $d < 0.05 \text{ cm}$ 时, 没有对流换热发生, 软质聚氨酯泡沫塑料的开孔率约为 80%,

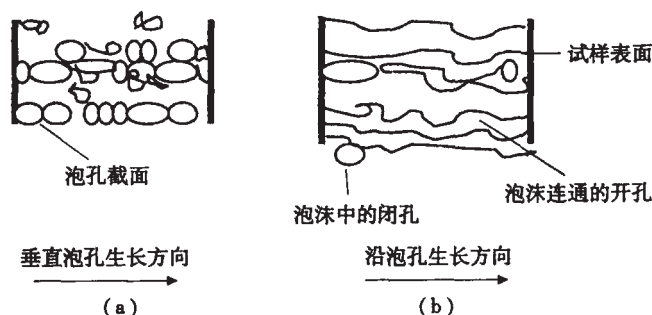


图 1 软质聚氨酯泡沫塑料的简易结构模型

闭孔率为 20%, 其开孔和闭孔中主要为气体传热和辐射传热。在大气压环境下, 泡沫塑料开孔中气体压力与外界环境压力相通为环境大气压; 而闭孔中气体压力随泡沫塑料制成后时间变化气体相互渗透, 逐渐与外界压力相同。为简化计算, 可以近似认为在大气环境压力下, 开孔和闭孔中气体压力相同。固体泡沫塑料孔壁材料的导热系数在常温下约为 $0.30 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ [2], 而泡沫塑料基体材料仅占泡沫塑料总体积的 3%。辐射换热计算中, 计算开孔和闭孔辐射换热所不同的是辐射传热途径 d 不同。综合上述分析, 泡沫塑料导热系数的计算如下

$$\lambda_z = 20\%(\lambda_{g1} + \lambda_{r1}) + 80\%(\lambda_{g2} + \lambda_{r2}) + 3\% \lambda_s \tag{5}$$

式中 λ_{r1} 为闭孔中辐射传热贡献, $d=5 \times 10^{-2} \text{ cm}$; λ_{r2} 为开孔中辐射传热贡献, $d=1.00 \text{ cm}$; λ_{g1} 为闭孔中气体传热贡献; λ_{g2} 为开孔中气体传热贡献。

将以上计算数据代入式 (5)

$$\begin{aligned} \lambda_z &= (20\%+80\%) \times 0.01325 + 80\% \times 0.04217 + 20\% \times 0.00210 + 3\% \times 0.30 \\ &= 0.01325 + 0.03370 + 0.00042 + 0.00900 = 0.05600 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \end{aligned}$$

以上的模型较粗略, 计算结果有一定的偏差, 实测为 $0.044 \sim 0.080 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 两者相差 25%。

根据结构简图 (a) 分析, 在垂直泡沫生长方向泡沫导热系数中, 主要是辐射传热途径有所变化, 开孔率和闭孔率的比例不同, 显然要小于平行泡沫生长方向的辐射传热途径。因此, 垂直泡沫生长方向泡沫导热系数小于平行泡沫生长方向的导热系数。因篇幅所限, 这里暂不计算。

3 聚氨酯软泡沫塑料导热系数的影响因素

3.1 对流传热对导热系数的影响

计算分析表明, 只要泡孔足够小(直径约 0.05 cm), 在软质聚氨酯泡沫塑料中不会发生对流传热。因此, 在选用聚氨酯软泡沫塑料时, 要考虑泡沫塑料的平均孔径, 防止在使用时发生对流传热。

3.2 温度对导热系数的影响

在泡沫塑料中, 辐射传热占主要地位。当温度变化时, 软质聚氨酯泡沫塑料的导热系数急剧变化, 如图 2 所示。从图 2 的测试结果看出, 该曲线的斜率远大于硬质泡沫塑料的导热系数曲线斜率。主要是因为, 软泡沫塑料的开孔率高, 辐射传热与温度成三次方比例, 受温度影响较大, 这一点与硬质泡沫塑料区别较大。在进行软泡沫塑料导热系数测试时发现, 微小的加热功率改变会明显变化泡沫塑料的导热系数, 由此证明了辐射传热在软泡沫塑料中的重要作用。所以, 提高泡沫塑料闭孔率, 缩小小泡孔直径, 减小泡沫塑料的各向异性, 改变直线的辐射传热途径, 将会降低泡沫塑料的导热系数。

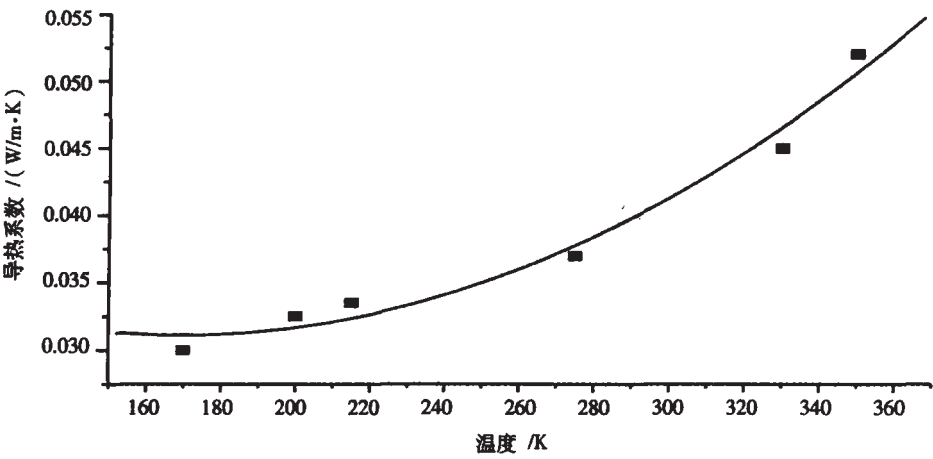


图 2 软泡沫塑料导热系数与温度关系曲线(泡沫塑料密度为 20 kg/m^3)

3.3 吸水率对导热系数的影响

软泡沫塑料开孔率高, 因此极易吸水。水是热的良导体, 泡沫吸水后, 泡孔被水充满, 导热系数急剧上升。

图 3 是软泡沫塑料导热系数与吸水率关系曲线。因此, 防止软泡沫塑料吸水是航天器中使用时必须注意的, 采用防水密封层是主要的措施之一。

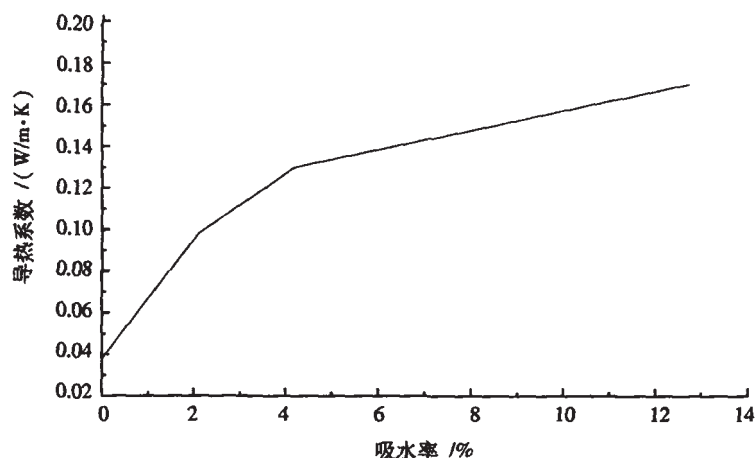


图 3 软质聚氨酯泡沫塑料导热系数与吸水率曲线

3.4 泡沫塑料挤压对导热系数的影响

在隔热应用中, 泡沫塑料也被广泛用于形状比较复杂器件的隔热, 在使用中经常受到挤压。测试表明, 当泡沫塑料被挤压 20% 时, 软泡沫塑料的导热系数基本不变。这是因为泡沫塑料被压缩后, 泡孔缩小, 有些泡孔孔壁甚至相贴, 泡沫的固体传热大大增加。但同时, 泡沫塑料被挤压后, 辐射传热途径改变、缩短, 泡沫的辐射传热大大减少, 两者相抵, 变化比例基本相同时, 软泡沫塑料的导热系数基本不变。

3.5 密度对导热系数的影响

软泡沫塑料导热系数与密度关系见图 4 所示。曲线分析, 在所测试的软泡沫塑料密度范围(9~19 kg/m³) 内, 随着密度增加, 软泡沫塑料的热导率有所减少。在有效载荷允许的情况下, 适当提高泡沫塑料密度, 有利于提高隔热性能。但其上限有待进一步试验确定。

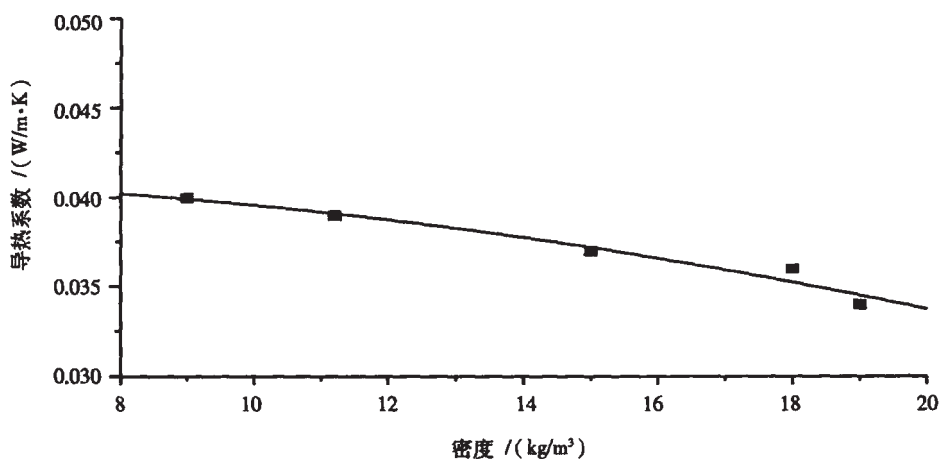


图 4 软泡沫塑料导热系数与密度关系曲线（常温下测试）

3.6 环境压力对导热系数的影响

从前面的模型分析已经看到, 环境压力直接影响软泡沫塑料泡孔中的传热, 特别是开孔中的传热。采用测试硬质聚氨酯泡沫塑料的方法^[57-59], 对聚氨酯软泡沫塑料的导热系数进行了测试, 即采用一维稳态热流的双试样平板法测试。试样厚度为 1.00 cm。图 5 是常温下测试的聚氨酯软泡沫塑料导热系数与环境气体压力关系的曲线。

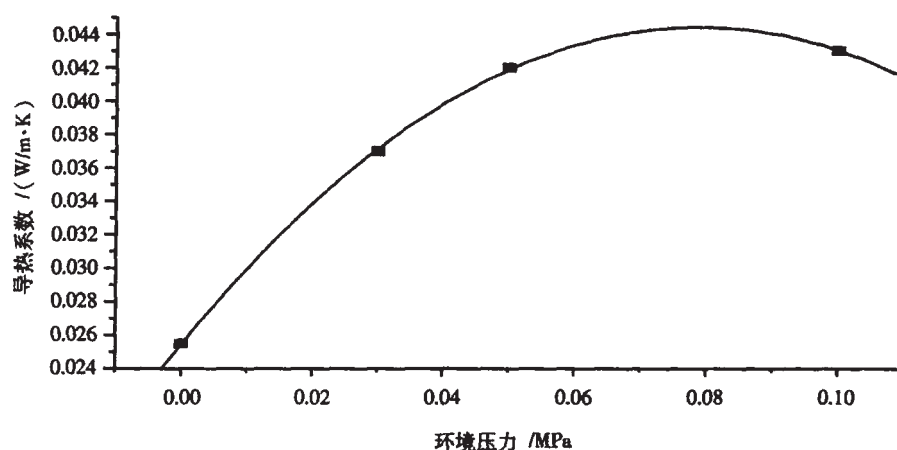


图 5 常温下聚氨酯软泡沫塑料的导热系数与环境压力关系曲线

环境压力从大气压即 0.1 MPa 趋于真空, 聚氨酯软泡沫塑料的常温导热系数从 0.044 8 W/m·K 变化到 0.025 6 W/m·K, 减少了 43%。这一比例, 正好接近传统认为的在泡沫塑料中气体传热占的比例 45%。根据理论分析, 环境压力趋于真空达到 10^{-3} Pa 时, 气体分子的传热进入残余气体传热, 气体传热大大减小, 可达到忽略的程度。此时, 软泡沫塑料的热导率只有辐射传热和固体传热两项组成。最简单的估算, 将室温导热系数值减去气体传热部分的数值, 就可得到高真空下的软泡沫塑料热导率。

测试曲线表明, 当环境压力从大气压力减小时, 在 0.05 MPa 以上, 导热系数变化较缓慢, 压力再减小时, 导热系数变化较快。说明软泡沫塑料导热系数受环境气体压力影响的敏感区在 0.05 MPa 以下。这是因为泡沫中气体的热导率在常压附近, 受环境气体压力的影响不大^[3]。在高真空环境中, 对多孔泡沫塑料来说, 可以充分发挥其隔热性能, 得到较好的隔热效果。在大气环境中, 要考虑防水等措施, 以免降低隔热性能。

4 结 论

- (1) 在选择隔热用聚氨酯软泡沫塑料时, 泡孔直径要小于 0.10~0.05 cm, 防止发生对流传热。
- (2) 在载荷允许的情况下适当提高泡沫塑料密度, 选择合适的密度使泡沫塑料有较好的隔热性能。
- (3) 根据用途选择合适的开孔、闭孔比例。在空间压力环境使用的软泡沫塑料可以考虑有较高的开孔; 在较高气压环境中, 则要考虑较高的闭孔, 因为环境压力不会对泡沫塑料导热系数有好的影响。
- (4) 通过合理的参数选择, 可对不同环境气体压力下的聚氨酯软泡沫塑料热导率进行估算, 以减小设计的盲目性。

参考文献:

- [1] CUNNINGHAM A, SPARROW D J. Rigid Polyurethane Foam[J]. What Makes It the Effective Insulation Cellular Polymers, 1986; 5:337.
- [2] 钱志屏. 硬质聚氨酯泡沫塑料的隔热性能研究[J]. 聚氨酯工业, 1982,(2): 13.
- [3] 陈国邦. 林理和. 低温绝热与传热[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1989.
- [4] 达道安. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [5] 张建可, 冀勇夫. 软质聚氨酯泡沫塑料隔热性能研究[J]. 聚氨酯工业, 2000,(3): 24.
- [6] 陈丕瑾. 真空技术的科学基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.
- [7] 张建可, 冀勇夫. 低温贮箱聚氨酯泡沫塑料分层绝热模型与机理分析[J]. 低温工程, 1995(2): 25.
- [8] GB/T 3399- 82, 塑料导热系数试验方法——护热平板法[S]. 1982.
- [9] 张建可, 冀勇夫. 碳纤维面板蜂窝夹层结构低温热导率测试研究[J]. 真空与低温, 2003, 9(1): 35.