

陈瑜,王世瑜,郭成超.不同条件下非水反应高聚物隧道隔热材料导热系数变化规律[J].湖南科技大学学报(自然科学版),  
2024,39(2):25-34. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.004

CHEN Y, WANG S Y, GUO C C. Variation Law of Thermal Conductivity of Nonaqueous Reactive Polymer Thermal Insulation  
Materials Under Different Conditions in Tunnel[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science  
Edition), 2024, 39(2): 25-34. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2024.02.004

# 不同条件下非水反应高聚物隧道隔热材料 导热系数变化规律

陈瑜<sup>1\*</sup>, 王世瑜<sup>1</sup>, 郭成超<sup>1,2</sup>

(1. 中山大学 土木工程学院, 广东 珠海 519082; 2. 南方工程检测修复技术研究院, 广东 惠州 516000)

**摘要:** 基于瞬态平面热源法, 利用 HOTDISK 仪器对不同条件(环境温度、材料密度及材料厚度)下高聚物导热系数的变化规律进行测试研究. 采用熵值法对影响高聚物导热系数的因素进行权重分析, 并与传统隔热材料进行对比, 验证高聚物材料的隔热性能. 结果表明: 高聚物导热系数随环境温度呈先增大后减小的变化趋势, 存在上升段(-40~10 °C, 20~90 °C)、平缓段(10~20 °C)及下降段(>90 °C); 高聚物导热系数随材料密度的增大而增大, 在环境温度较高时, 存在材料密度增大而导热系数减小的现象; 高聚物导热系数与材料厚度无关. 在影响高聚物导热系数的因素中, 环境温度的影响最大, 材料密度次之, 材料厚度最小. 高聚物材料具有优良的隔热性能, 可作为高地温隧道的隔热材料.

**关键词:** 非水反应高聚物; 导热系数; 隔热; 环境温度

**中图分类号:** U454 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2024)02-0025-10

## Variation Law of Thermal Conductivity of Nonaqueous Reactive Polymer Thermal Insulation Materials Under Different Conditions in Tunnel

CHEN Yu<sup>1</sup>, WANG Shiyu<sup>1</sup>, GUO Chengchao<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;

2. Southern Institute of Infrastructure Testing and Rehabilitation Technology, Huizhou 516000, China)

**Abstract:** The frequency of high geo-temperature phenomenon gets higher, with the increase in the long and deep-buried tunnels of the new construction in China. Setting low thermal conductivity materials as thermal insulation layer has become one of effective target methods. However, the existing materials on heat transfer performance cannot satisfy the needs. As a kind of material, which could be used in tunnel heat insulation, the thermal conductivity of non-water reacted two-component polymer has rarely reported in detail. The project is based on the technique of transient plane source, the variation of the thermal conductivity of polymers under different conditions (ambient temperature, density and thickness) are tested and studied by HOTDISK instrument. The factors of weight distribution are affecting the thermal conductivity of polymers, which are analyzed by entropy method and comparison with traditional thermal insulation materials to verify the thermal

收稿日期: 2021-04-14

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题资助项目(K2019G032; P2019G040); 广东省引进创新创业团队项目资助(2016ZT06N340)

\* 通信作者, E-mail: chenyu68@mail.sysu.edu.cn

insulation performance of polymer. The study reveals that the thermal conductivity of polymer firstly increases, and then decreases with temperatures. There are two rising sections ( $-40\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $20\sim 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), one flat section ( $10\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and one descending section ( $>90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). The thermal conductivity of polymer increases with the increase of density. There is a phenomenon, which the density increases and the thermal conductivity decreases at high temperature. The thermal conductivity of polymer is independent of thickness. Among the factors affecting the thermal conductivity of polymer, the temperature has the greatest influence, the density is the second, and the thickness is the smallest. Polymer has excellent thermal insulation properties and can be popularized and applied as a thermal insulation material for high geo-temperature tunnels.

**Keywords:** nonaqueous reactive polymer polymer; thermal conductivity; heat insulation; temperature

近年来,随着我国交通现代化建设工程的快速发展,受地下温泉等地质作用的影响,深埋隧道常伴有高地温现象,且埋深越大高地温现象越严重.如拉林铁路桑珠岭隧道最大埋深 1 347 m,最高地温可达  $89.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;大瑞铁路高黎贡山隧道最大埋深 1 155 m,最高地温可达  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .高地温问题不仅会恶化施工作业环境,而且容易引起隧道初支与二衬开裂,降低支护材料的力学性能及耐久性,因此,高地温引起隧道灾害的问题不容小觑<sup>[1-3]</sup>.如何降低高地温对隧道的影响成为学者们关注的重点,其中设置隔热层成为最有效的方式之一<sup>[4-6]</sup>,然而现有材料的导热系数不够低,制约着隧道隔热技术的发展.

导热系数是指在稳定的传热条件下,1 m 厚的材料,两侧表面的温差为 1 度(K,  $^{\circ}\text{C}$ ),在一定时间内,通过  $1\text{ m}^2$  面积传递的热量.导热系数反映了材料传递热量的能力,是评判材料隔热性能的重要指标,可以说导热系数决定材料的隔热性能.通常把导热系数较低的材料称为保温材料(我国国家标准规定,凡平均环境温度不高于  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  时导热系数不大于  $0.12\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  的材料称为保温材料),而把导热系数在  $0.05\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  以下的材料称为高效保温材料.测量导热系数的方法有保护热板法、热带法和平面瞬态热源法(TPS)等.GUSTAFSSON 等<sup>[7-8]</sup>最先提出热带法,通过表观初始阻值和热流的平方曲线粗略估算导热系数,并将热带法推广至 TPS 并验证其优越性.很多研究人员都采用 TPS 法测定材料的导热系数等关键指标<sup>[9-15]</sup>.影响导热系数宏观方面的因素主要有颗粒粒径<sup>[16]</sup>、孔隙率<sup>[17]</sup>和环境温度<sup>[18]</sup>,微观方面的因素主要包括含氢气氛及微观结构尺度<sup>[19]</sup>.除此之外,在进行导热系数测量时,也存在试验对导热系数的影响,如探头热容<sup>[20]</sup>、空气间隙<sup>[21]</sup>和热损失比率<sup>[22]</sup>等.目前,导热系数测试考虑的环境温度阈值小,仅为简单测量材料性质,无法全面地了解材料和为后期工程应用打下基础.

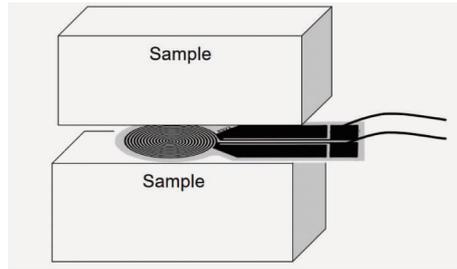
20 世纪 60 年代开始,化学隔热材料如聚氨酯材料由于其优越的防水性能被引入国内用于防水建筑涂料<sup>[23]</sup>.王复明等<sup>[24-26]</sup>将非水反应类聚氨酯材料<sup>[27-28]</sup>推广至堤坝、路基、管道和隧道等实际工程修复中,也有一些研究人员对聚氨酯材料的热学性能进行测试<sup>[29]</sup>,但所使用的材料基本不能应用于工程中,现有研究对于能够应用于高地温隧道隔热的非水反应双组份发泡聚氨酯材料(简称高聚物)的导热系数并没有进行详细的测试.

为了研究高聚物的隔热性能,本文采用平面瞬态热源法对高聚物材料的导热系数进行测定,利用熵值法对影响高聚物导热系数的因素进行权重分析,结合两者的结果并与传统隔热材料进行对比,验证高聚物的隔热性能,为高聚物材料在隧道中的推广应用提供参考.

## 1 高聚物隔热材料导热系数的平面瞬态热源法测试

### 1.1 试验原理

平面瞬态热源法<sup>[7, 30-31]</sup>可以快速测量试样的导热系数和热扩散率,其原理是向电热合金制成的金属片通以某种固定形式(阶跃式或脉冲式)的电流,金属片释放热量而成为热源,即平面热源,电流形式为阶跃式.使用该热源加热试样并测量出试样某点(试验中通常取试样某截面的中心点,该点相当于中心探测区)的过余环境温度-时间曲线,根据相应的数学模型和改进高斯-牛顿参数估计法同时测得试样的导热系数  $\lambda$  和热扩散率  $\alpha$ ,进一步得到体积热容  $C_v = \rho c = \lambda/\alpha$  ( $\rho$  为试样的材料密度,  $c$  为试样的比热容).平面瞬态热源法测试原理如图 1 所示.

图 1 平面瞬态热源法测试原理<sup>[8]</sup>

在恒定功率的作用下,探头的电阻随时间变化的公式为

$$R(t) = R_0(1 + k\Delta T);$$

$$\Delta T(\tau) = \frac{P_0}{\pi^{\frac{3}{2}} r \lambda} D(\tau).$$

式中: $t$  为测量时间; $R_0$  为探头初始电阻; $k$  为电阻环境温度系数; $\Delta T$  为探头表面平均温升; $P_0$  为恒定功率; $r$  为探头半径; $\lambda$  为样品导热系数; $D(\tau)$  为特征时间  $\tau$  的无量纲函数,  $\tau = \frac{\sqrt{\alpha t}}{r}$ .

记录探头表面平均温升  $\Delta T$ , 并与  $D(\tau)$  拟合得到一条直线,斜率为  $\frac{P_0}{\pi^{\frac{3}{2}} r \lambda}$ , 进而求得导热系数  $\lambda$ . 此

外,为了判断拟合数据的有效性,定义探测深度  $D = 2\sqrt{\alpha t}$ , mm. 拟合数据时应保证测量过程中产生的热量未传到样品边界外,即  $D < r$ .

## 1.2 试验装置

采用 Hot Disk 2500S 导热系数仪进行导热系数的测定,测试设备如图 2 所示.测试输出功率 25 mW,测试时间 320 s,探头型号为半径 9.868 mm 的 Kapton 8563.试验基于傅里叶导热定律,该定律指在导热过程中,单位时间内通过给定截面的导热量,正比于垂直于该截面方向上的环境温度变化率和截面面积,而热量传递的方向则与环境温度升高的方向相反,可以用来计算热量的传导量,从而计算得到导热系数.

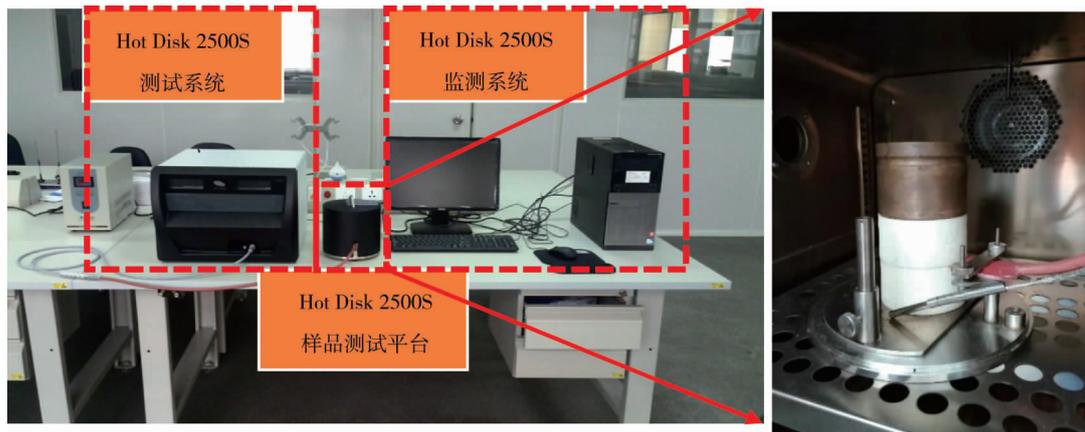


图 2 试验装置及样品放置

## 1.3 样品制备

采用的材料为非水反应类聚氨酯材料,非水反应类聚氨酯是由异氰酸酯和多元醇为基料反应生成的双组份发泡聚氨酯高聚物材料.根据 GB/T 32064—2015《建筑材料导热系数和热扩散系数瞬态平面热源测试法》,样品测试面的有效直径应不小于探头直径的 2 倍,块状样品的材料厚度宜大于所选探头直径,不得小于探头半径.由此得到试件规格如表 1 所示,其中每种材料密度样品制备 10 个,每种材料厚度样品制备 3 组,共计 120 个样品,实物如图 3 所示.LI 等<sup>[32]</sup>对高聚物进行了 SEM 成像,其微观结构如图 4 所示.

表1 试件规格

样品尺寸( $\Phi \times H$ )/(mm×mm)	理论材料密度/(g/cm <sup>3</sup> )	实测材料密度/(g/cm <sup>3</sup> )
79.8×20.0	0.05	0.07
	0.20	0.12
	0.30	0.24
	0.40	0.30
79.8×30.0	0.05	0.07
	0.20	0.12
	0.30	0.24
	0.40	0.30
79.8×40.0	0.05	0.07
	0.20	0.12
	0.30	0.24
	0.40	0.30

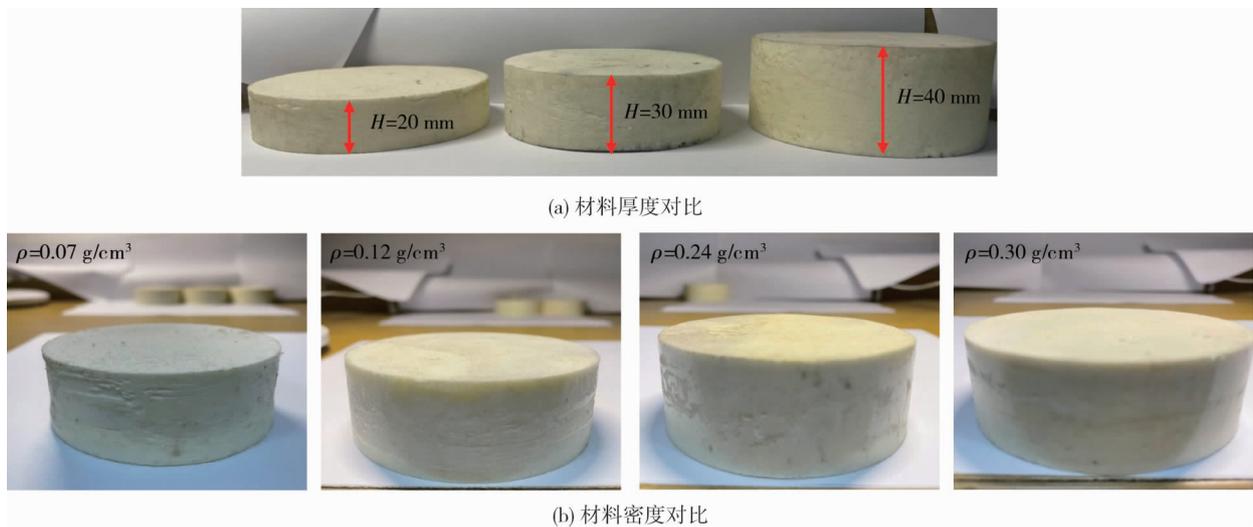
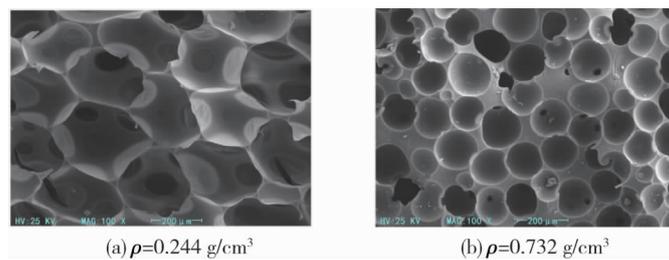


图3 高聚物样品的材料厚度和材料密度对比

图4 高聚物 SEM 图像<sup>[32]</sup>

## 2 不同因素对高聚物导热系数的影响

影响高聚物导热系数的因素有很多,如环境温度、含水率、孔隙率、材料密度及热流方向等.高聚物在细微观上为闭孔结构且孔径较小,这让高聚物材料具备优良的隔热保温性能,高聚物的闭孔结构使其具有极高的阻隔水蒸气性能和良好的不透水性,在进行样品制备时,由于孔隙率较难控制,因此,本文仅考虑环境温度、材料密度和材料厚度对高聚物导热系数的影响.

### 2.1 环境温度对高聚物导热系数的影响规律

在环境温度为 $-40 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,每隔 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 进行测定,每次测试时恢复至初始状态.相同试验条件下测试3次,每次间隔时间 $5 \text{ min}$ 左右.实测材料密度为 $0.07 \text{ g/cm}^3$ 的高聚物样品的导热系数如表2所示,不同环境

温度下不同材料密度高聚物的导热系数如图 5 所示。

表 2 不同环境温度下高聚物导热系数( $\rho=0.07 \text{ g/cm}^3$ )

单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值
-40	0.023 97	0.023 59	0.023 66	0.023 74
-30	0.024 19	0.024 08	0.024 06	0.024 11
-20	0.024 37	0.024 44	0.024 28	0.024 36
-10	0.024 82	0.024 88	0.024 72	0.024 81
0	0.024 83	0.024 87	0.024 75	0.024 82
10	0.025 09	0.025 00	0.024 75	0.024 95
20	0.025 33	0.025 35	0.025 14	0.025 27
30	0.026 28	0.026 24	0.026 07	0.026 19
40	0.027 63	0.027 56	0.027 18	0.027 46
50	0.029 33	0.029 25	0.029 11	0.029 23
60	0.030 40	0.030 32	0.030 10	0.030 27
70	0.031 29	0.031 20	0.030 96	0.031 15
80	0.032 08	0.032 00	0.031 77	0.031 95
90	0.033 16	0.033 00	0.032 78	0.032 98
100	0.031 66	0.032 61	0.032 90	0.032 39

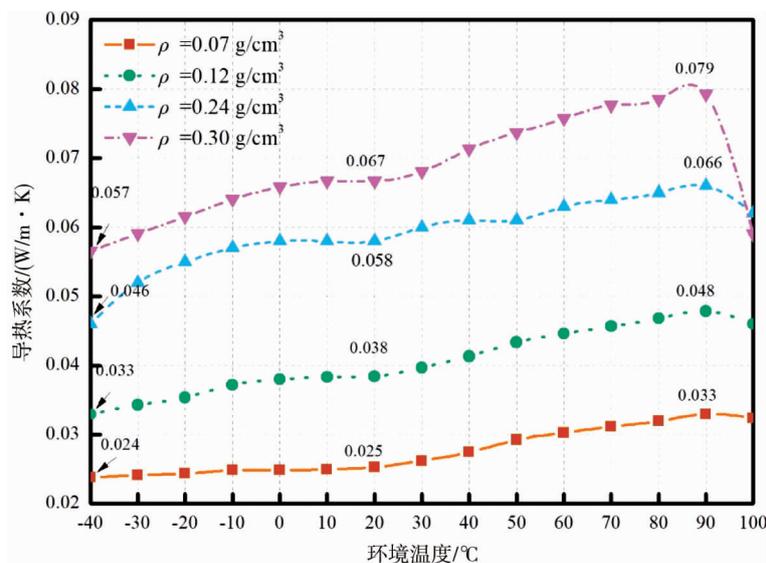


图 5 不同材料密度高聚物的导热系数随环境温度的变化规律

由图 5 可知:高聚物材料的导热系数随着环境温度的升高呈现先增大后减小的趋势,但在  $10 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内出现平缓段.将增大过程分为  $-40 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20 \sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  这 2 个阶段,后一阶段导热系数的增大速率是前一阶段的 1.02 倍.环境温度的升高会使泡孔内气体分子的无规则运动加剧,热交换加强,使得热流传递效率增加,导热系数随之增大.

在  $-40 \sim 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20 \sim 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  这 2 个阶段,随着环境温度的升高,高聚物材料泡孔内外出现环境温度差,气体及材料固体分子的热运动加速,导热系数升高,且环境温度越高,气体分子的无规则运动越剧烈,导热系数升高得越快.在  $10 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  平缓段及  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时,外部环境与高聚物材料泡孔内部形成热平衡,此时导热系数增长缓慢并在  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  达到极值(图 6). $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时出现导热系数下降的现象,此时环境温度过高,孔隙中的大量气体分子的无规则运动剧烈而损失掉一部分能量.制样过程中试样存在少量水分,这是由于  $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  时水分蒸发所导致.

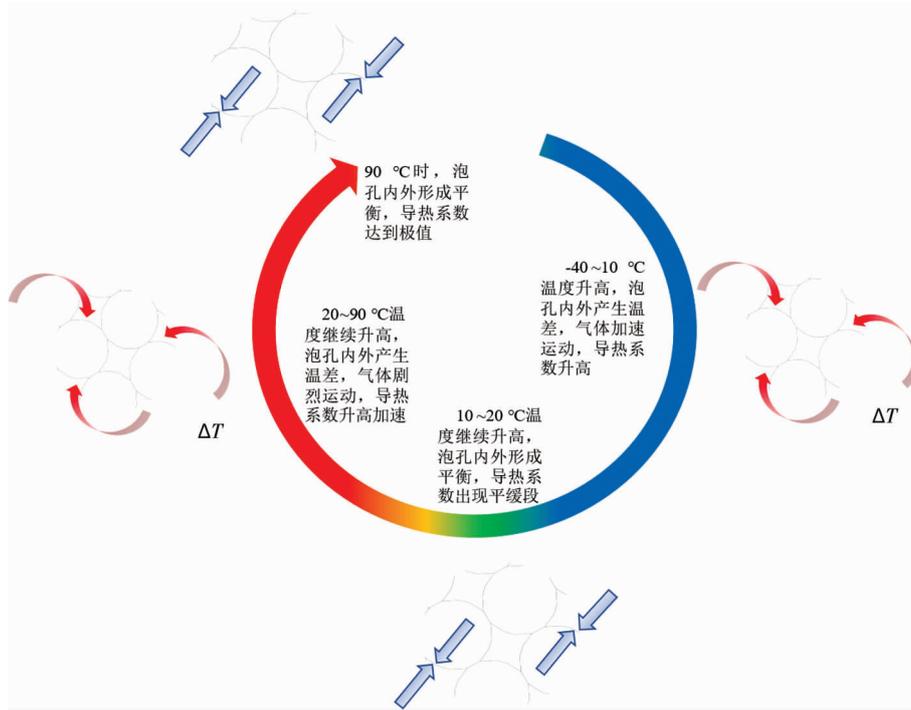


图6 环境温度对高聚物导热系数的影响

### 2.2 材料密度对高聚物导热系数的影响规律

试验前进行材料密度的测定,由于制样时采用喷涂技术,导致样品的实测材料密度与理论材料密度不符,但更能反映材料在实际工程中的使用性能,实测材料密度为 0.07, 0.12, 0.24, 0.30 g/cm<sup>3</sup>,分别对应的理论材料密度为 0.05, 0.20, 0.30, 0.40 g/cm<sup>3</sup>.根据 LI 等<sup>[32-33]</sup>对高聚物细微观结构的研究,在不同材料密度的情况下,高聚物细微观结构随材料密度的变化如图 7 所示.由图 7 可知:随着材料密度的增大,高聚物的材料密度越大,细微观结构越致密,其泡孔直径越小.不同材料密度高聚物的导热系数如表 3 所示.

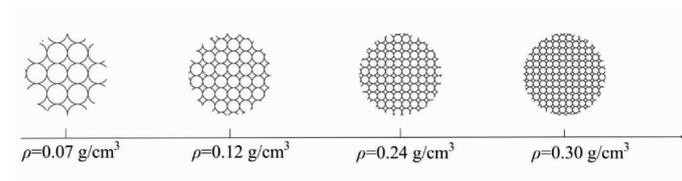


图7 高聚物细微观结构随材料密度的变化

表3 不同材料密度的高聚物导热系数( $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

单位:  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

实测材料密度/ $(\text{g}/\text{cm}^3)$	第1次	第2次	第3次	平均值
0.07	0.025 33	0.025 35	0.025 14	0.025 27
0.12	0.038 60	0.038 31	0.038 29	0.038 40
0.24	0.055 00	0.054 00	0.055 00	0.055 00
0.30	0.067 33	0.066 05	0.066 69	0.066 69

高聚物材料属于多孔闭孔材料,孔隙率、泡孔直径及孔隙中的空气量随着材料密度的增大呈现减小的趋势(图 7).空气的导热系数为  $0.023 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,材料密度较小时,高聚物的导热系数越接近空气的导热系数;当材料密度较大时,高聚物的孔隙率小,泡孔结构直径小,空气量少,热流在高聚物内部传递时受到的阻力较小,此时高聚物的导热系数增大.

在环境温度较低时,高聚物的导热系数随着材料密度的增大呈现增大的趋势,材料密度每增加  $1 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,导热系数增大  $0.170 9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .环境温度较高时,高聚物的导热系数随着材料密度的增大呈现

先增大后减小的趋势(图8).当环境温度为 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , $\rho>0.24\text{ g/cm}^3$ 时,气体间的对流换热强度增大,而高聚物的孔隙率小,泡孔直径小,空气量少,出现导热系数随着材料密度的增大而减小的情况.因此,不同环境温度工况下都存在一个建议的最佳材料密度,可使材料在该环境温度下发挥较好的性能.

### 2.3 材料厚度对高聚物导热系数的影响规律

在实际工程中,保温隔热材料往往会敷设不同的材料厚度.如隧道工程中保温层的材料厚度越大,则热量径向传递的路径越长.本文研究室温下3种不同材料厚度对高聚物导热系数的影响,结果如表4及图9所示.

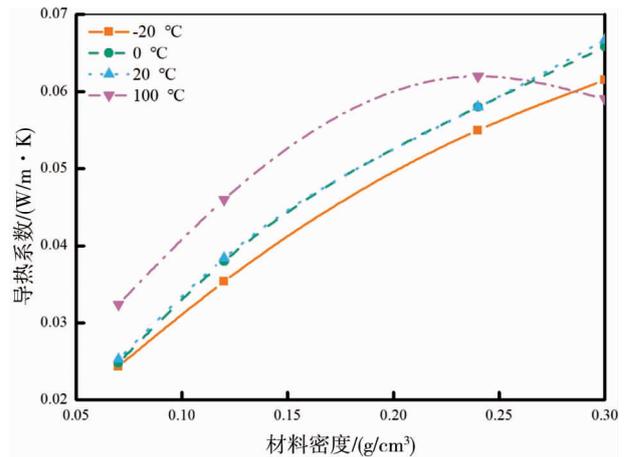


图8 高聚物的导热系数随不同材料密度的变化规律

表4 不同材料厚度高聚物的导热系数( $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\rho=0.07\text{ g/cm}^3$ ) 单位: $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$

材料厚度/mm	第1次	第2次	第3次	平均值
20	0.025 52	0.025 77	0.025 71	0.025 67
30	0.025 33	0.025 35	0.025 14	0.025 27
40	0.024 62	0.024 57	0.024 61	0.024 60

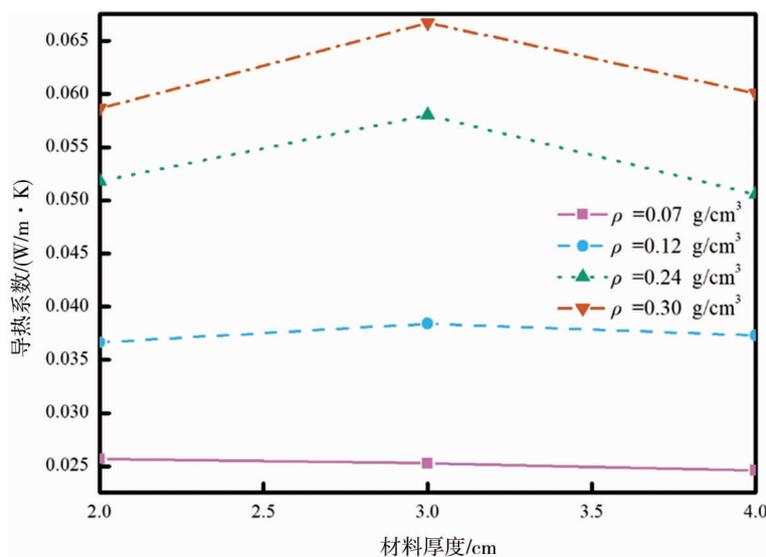


图9 不同材料厚度对导热系数的影响规律( $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

由图9可知:高聚物导热系数随材料厚度的增大基本不变.由于试验操作及制样过程的问题,同一材料密度不同材料厚度的高聚物材料的导热系数存在一定波动,属于正常现象.在选用高聚物作为隔热材料时,材料厚度的增加仅加长热流传递的路程,对材料本身的内部结构如孔隙率、泡孔结构大小等没有直接影响,因此,改变材料厚度无法影响高聚物材料本身的热学性能,导热系数与材料厚度无关.

## 3 基于熵值法的高聚物导热系数影响因素权重分析

熵值是一种物理计量单位,熵值大说明数据越混乱,携带的信息越少,效用值越小,因而权重也越小.熵值法则是结合熵值提供的信息值来确定权重的一种研究方法.

### 3.1 熵值法分析的基本步骤

1) 指标的归一化处理.因为每项指标的单位不同,进行熵值法分析各项影响因素权重前要先进行标准化处理,即把指标的绝对值转化为相对值.在进行标准化处理时,可将指标分为正向及负向,针对正向和负

向指标需采取不同的算法.

对于正向指标:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}.$$

式中: $z_{ij}$ 为归一化后第*i*个样本的第*j*个指标的数值( $i=1, \dots, n; j=1, \dots, m$ ).

对于负向指标:

$$z_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, \dots, x_{nj}\}}.$$

2) 计算第*j*项指标下第*i*个样本值占该指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n z_{ij}}.$$

3) 计算第*j*项指标的熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}).$$

式中: $k=1/\ln n > 0$ , 满足  $e_j \geq 0$ .

4) 计算信息熵冗余度(差异)、各项指标的权重及各样本得分:

$$d_j = 1 - e_j;$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j};$$

$$s_i = \sum_{j=1}^m w_j p_{ij}.$$

式中: $d_j$ 为信息熵冗余度; $w_j$ 为各项指标权重; $s_i$ 为各样本得分.

### 3.2 影响导热系数因素的熵值法分析

考虑环境温度、材料密度以及材料厚度3种因素对导热系数的影响,根据3.1节的相关公式,将试验所得数据利用SPSS软件进行计算,得到的权重结果如表5所示.

表5 熵值法计算权重结果

影响因素	信息熵值 $e_j$	信息熵冗余度 $d_j$	权重系数 $w_j/\%$
环境温度	0.953 4	0.046 6	59.56
材料密度	0.905 3	0.094 7	29.26
材料厚度	0.982 2	0.017 8	11.18

影响导热系数因素的权重配比如图10所示.由图10可知:环境温度对高聚物导热系数的影响最大,材料密度次之,材料厚度最小.当环境温度升高时,气体分子的运动增强,对于高聚物这类多孔材料来说,热传递加快,使得导热系数增加,导热性能增强.而材料密度增大时,高聚物材料的孔隙变小,孔隙率减小,孔隙中所含的空气变少,使得导热性能增强.熵值法的计算结果验证了试验结果,即环境温度和材料密度对高聚物导热系数的影响较大.随着西部大开发的进行,遇到的高地温隧道越来越多,如何采用合适的隔热层材料至关重要,高聚物材料

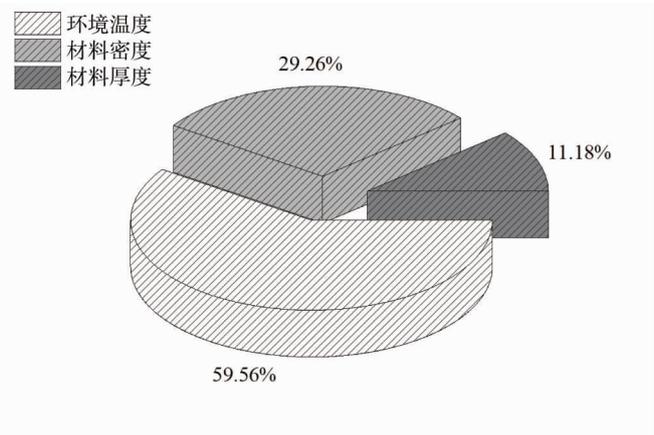


图10 影响导热系数因素的权重配比

作为一种隔热性能良好的材料,如何在隧道中发挥其作用需要进一步探讨,以便更好地服务国家交通战略开发.目前仅对环境温度、材料密度及材料厚度进行权重分析,在后续研究中,还会继续考虑湿度、孔隙率、热流方向等因素对高聚物导热系数的影响.

#### 4 非水反应双组份高聚物与传统隔热材料对比

我国过去修建的隧道多为里程短,埋深较浅,因此很少遇到高岩温现象.随着西部大开发战略的深入实施,深埋长大隧道的数量也不断增多,高温隧道热害逐渐成为隧道建设中不可避免的问题.在防治热害时,往往采用被动降温措施,即在隧道中采用隔热性能较好的材料来阻隔热量向衬砌传递.

隔热材料的选择对于隔热性能的影响至关重要,而衡量隔热材料隔热性能的指标就是导热系数,导热系数越低,其隔热性能越好.现今隧道工程中通常使用的隔热材料包括硅酸铝纤维、挤塑聚苯乙烯发泡材料、玻化微珠保温砂浆、EPS及聚碳酸酯.传统隧道隔热材料与高聚物的主要性能指标对比如表6所示.由表6可知:高聚物的导热系数比其余6种隔热材料都要低,且高聚物的加工过程比较独特,可以直接在现场进行喷涂.综合上述分析,高聚物作为一种优秀的隔热材料,能够应用于隧道隔热中.

表6 隔热材料性能指标

材料	密度/ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	导热系数/ ( $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )	体积吸水 率/%	使用温度 范围/ $^{\circ}\text{C}$	抗冻性	抗压强度/ $\text{MPa}$	燃烧性能
非水反应双组份 高聚物材料	45	0.018~0.024	$\leq 1$	-60~120	低温不脆化、 不收缩	$\geq 0.200$	B2级阻燃
膨胀性聚苯乙烯 泡沫塑料	40	0.041	$\leq 4$	-80~75	耐低温	$\geq 0.060$	使用温度不 高于75 $^{\circ}\text{C}$
福利凯保温板	50	0.026~0.033	$\leq 7$	-196~300	无变形、开裂、 发脆现象	$\geq 0.200$	A级不燃
酚醛泡沫塑料	50	0.030	$\leq 3.7$	-180~150		$\geq 0.250$	A级不燃
硬质聚氯乙烯 泡沫塑料	130	0.040	$\leq 4$	-30~400		0.150	不易燃烧
岩棉系列	61~200	$\leq 0.044$	$\leq 5$	$\leq 600$	无裂缝、无剥离	0.107	不易燃烧
干法硅酸铝纤维 材料	188	0.037	吸水率低	$\leq 1\ 000$	无变形、开裂、 发脆现象	0.500	A级不燃

#### 5 结论

1) 高聚物与其他传统隔热材料相比具有优越性,高聚物导热系数随着环境温度的升高呈现先增大后减小的趋势,存在平缓段(10~20 $^{\circ}\text{C}$ ),上升段(-40~10 $^{\circ}\text{C}$ ,20~90 $^{\circ}\text{C}$ )及下降段(>90 $^{\circ}\text{C}$ ).

2) 常温下,高聚物导热系数与材料密度呈正相关,但在不同环境温度下存在材料密度增大导热系数减小的情况,在选用高聚物材料时,要根据不同工况选择最佳的材料密度.

3) 影响高聚物导热系数最大的是环境温度,其次为材料密度,材料厚度对高聚物导热系数的影响则相对较小.

#### 参考文献:

- [1] 王明年,童建军,刘大刚,等.高岩温铁路隧道支护结构体系分级研究[J].土木工程学报,2015,48(11):119-125.
- [2] 王明年,王奇灵,胡云鹏,等.高地温隧道荷载模式及二次衬砌安全特性研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(11):1769-1780.
- [3] 薛翊国,孔凡猛,杨为民,等.川藏铁路沿线主要不良地质条件与工程地质问题[J].岩石力学与工程学报,2020,39(3):445-468.
- [4] 蒋爽,蒋涛,王树刚,等.隧道围岩温度分析及隔热层对衬砌温度的影响分析——以大瑞铁路高黎贡山隧道为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(2):195-201.

- [5] 邵珠山, 乔汝佳. 考虑隔热层的高岩温隧道温度场和应力场分布规律研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(5): 869-874.
- [6] 姚红志, 张晓旭, 董长松, 等. 多年冻土区公路隧道保温隔热层铺设方式及材料性能对比分析[J]. 中国公路学报, 2015, 28(12): 106-113.
- [7] GUSTAFSSON S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62: 797-804.
- [8] LOG T, GUSTAFSSON S E. Transient plane source (TPS) technique for measuring thermal transport properties of building materials[J]. Fire and Materials, 1995, 19(1): 43-49.
- [9] 肖红俊, 于帆, 张欣欣. 瞬态平面热源法测量材料导热系数[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(12): 1432-1436.
- [10] TOMAS J, ÖCHSNER A, MERKEL M. Experimental study on thermal properties of hollow sphere structures[J]. Defect and Diffusion Forum, 2021, 407: 185-191.
- [11] AL-AJLAN S A. Measurements of thermal properties of insulation materials by using transient plane source technique[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(17-18): 2184-2191.
- [12] ZHENG Q Y, KAUR S, DAMES C, et al. Analysis and improvement of the hot disk transient plane source method for low thermal conductivity materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 151: 119331.
- [13] ELKHOLY A, SADEK H, KEMPERS R. An improved transient plane source technique and methodology for measuring the thermal properties of anisotropic materials[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 135: 362-374.
- [14] ZHANG H, LI Y M, TAO W Q. Theoretical accuracy of anisotropic thermal conductivity determined by transient plane source method[J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 2017, 108: 1634-1644.
- [15] WANG H, IHMS D W, BRANDENBURG S D, et al. Thermal conductivity of thermal interface materials evaluated by a transient plane source method[J]. Journal of Electronic Materials, 2019, 48: 4697-4705.
- [16] YIN X, KOU G X, XU A X, et al. Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles on thermal conductivity of heat transfer oil [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(8): 2129-2135.
- [17] LI D L, DU J W, HE S, et al. Measurement and modeling of the effective thermal conductivity for porous methane hydrate samples[J]. Science China Chemistry, 2012, 55(3): 373-379.
- [18] 黎明才. 建筑工程材料导热系数测定方法及影响因素研究[J]. 广东建材, 2020, 36(2): 27-29.
- [19] 郭文元, 费名俭, 王辅臣. 多孔隔热材料临氢氛围微观传热模拟与导热系数[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2011, 37(6): 684-690.
- [20] 林永钢, 尚福强, 吴得卿, 等. 探头热容对瞬态平面热源法测量轻质保温材料导热影响研究[J]. 材料科学, 2020, 10(11): 858-864.
- [21] 江楠竹, 潘江, 王玉刚, 等. TPS法导热系数测量的仿真分析[J]. 中国测试, 2016, 42(6): 122-126.
- [22] WANG Y W, LI Y N. Influence of heat loss through probe electrical leads on thermal conductivity measurement with TPS method[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2018, 9(1): 9-15.
- [23] DALL A L, DIAS F, TRINDADE G, ORNAGHI H L, et al. UV-curable waterborne polyurethane coatings: A state-of-the-art and recent advances review [J]. Progress in Organic Coatings, 2021, 154: 106156.
- [24] 王复明, 范永丰, 郭成超. 非水反应类高聚物注浆渗漏水处治工程实践[J]. 水力发电学报, 2018, 37(10): 1-11.
- [25] 石明生, 王复明, 刘恒, 等. 堤坝高聚物定向劈裂注浆试验与有限元模拟[J]. 水利学报, 2016, 47(8): 1087-1092.
- [26] 边学成, 程翀, 王复明, 等. 高速铁路路基沉降高聚物注浆修复后动力性能及长期耐久性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 562-568.
- [27] 王钰轲, 王永帅, 刘琪, 等. 非水反应高聚物与土工材料的界面剪切特性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1): 115-120.
- [28] 王娟, 方宏远, 余自森, 等. 高聚物碎石混合料单轴受压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2019, 22(2): 320-326.
- [29] 李嘉, 陈硕, 张景伟, 等. 基于动态热机械分析的非水反应高聚物材料动态黏弹性[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(6): 1398-1409.
- [30] GUSTAFSSON S E, KARAWACKI E, CHOCHAN M A. Thermal transport studies of electrically conducting materials using the transient hot-strip technique[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 19(5): 727.
- [31] GUSTAFSSON S E, KARAWACKI E, KHAN M N. Transient hot-strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and fluids[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2001, 12(9): 1411.
- [32] LI M J, FANG H Y, DU M R, et al. The behavior of polymer-bentonite interface under shear stress[J]. Construction and Building Materials, 2020, 248: 118680.
- [33] WEI Y, WANG F M, GAO X, et al. Microstructure and fatigue performance of polyurethane grout materials under compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 04017101.