

技术综述和对比测试：  
Application Note 003



## 建筑材料保温砂浆：导热系数测试方法 对比及其应用注意事项

Comparison of Thermal Conductivity Test Methods for  
Thermal Insulating Mortars and Application Considerations



上海依阳实业有限公司  
[www.eyoungindustry.com](http://www.eyoungindustry.com)

摘要：本文介绍了葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人 2018 年发表的研究工作来说明隔热砂浆导热系数测试方法选择和正确使用的重要性，讨论和指出了测试中存在的问题，并提出了更合理的测试方法和测试过程建议，以期实现更有效和准确的砂浆材料热物理性能测试。

关键词：导热系数、隔热砂浆、稳态法、瞬态法、气凝胶

## 1. 概述

为了满足建筑物对室内舒适性和能源效率要求日益增长的需求，已经开发出各种具有良好热性能的新型材料，例如结合了轻质骨料和纳米材料的隔热砂浆，以及添加了相变微胶囊的同时具有隔热和蓄热功能的隔热砂浆。

评价这些隔热砂浆隔热性能的重要物理性能参数是导热系数，而隔热砂浆导热系数会受到砂浆温度、硬化状态、干燥状态和水分含量的影响，同时还有多种测试方法可以用来测量砂浆的导热系数，这使得隔热砂浆导热系数的测试评价非常混乱，很多测试结果千差万别。为了评估各种因素对砂浆导热系数的影响以及各种测试方法在砂浆导热系数测试中的准确性，我们特别选取了葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人在 2018 年发表的研究工作[1]来说明测试方法选择和正确使用的重要性。

葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人针对添加了发泡聚苯乙烯颗粒和二氧化硅气凝胶的隔热砂浆，在其硬化状态（固化 28 天）、干燥状态和不同水分含量条件下，测试了砂浆的导热系数。测试方法分别采用了两种稳态法和两种瞬态法。为了对这些测试方法进行比较，将所有测试结果都转换 23°C 下的导热系数。

本文将对 Gomes 等人的对比测试工作进行简要介绍，讨论和指出测试中存在的问题，并提出了更合理的测试方法和测试过程建议，以期实现更有效和准确的砂浆材料热物理性能测试。

## 2. 隔热砂浆以及样品制作

在该测试对比研究中评估了两种隔热砂浆：

- (1) 具有发泡聚苯乙烯颗粒 (EPS) ( $A^{\text{EPS}}$ ) 的工业隔热砂浆；
- (2) 在先前的工业隔热砂浆中掺入二氧化硅气凝胶 (Ag) 配方 ( $A^{\text{EPS+Ag}}$ )。

砂浆  $A^{\text{EPS}}$  是市售的保温砂浆，由矿物粘合剂（水泥和石灰）和轻质骨料（100% 的 EPS 颗粒，直径小于 3 mm）组成。此外，它还含有颜料、流变剂、树脂、空气夹带剂和疏水剂。另一种研究的砂浆配方  $A^{\text{EPS+Ag}}$  是在  $A^{\text{EPS}}$  砂浆中加入二氧化硅气凝胶，质量百分比为 100%，即二氧化硅气凝胶质量与工业砂浆总质量的比值。

这种二氧化硅气凝胶具有非常低的导热系数 (0.018~0.020 W/mK)，堆积密度范围为  $60\sim 100\text{ kg/m}^3$ ，并且是无定形半透明的，不具有反应性且具有良好的耐火性。

图 2-1 示出了混合后的砂浆  $A^{\text{EPS+Ag}}$ ，以及用于不同后续试验测量方法的各种模具（立方体，板材和圆柱形）。



$A^{\text{EPS+Ag}}$  隔热砂浆

各种模具

图 2-1 隔热砂浆及其模具

在生产两种砂浆之后，固化过程包括：(1) 将样品放入聚乙烯袋中 7 天，进行湿固化；(2) 从袋子中取出样品；(3) 根据 ISO 1015-11 干燥固化 21 天。该程序在环境条件受控的室内进行：空气温度为  $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度为 50%。

### 3. 测试方法

在这项研究中， $A^{\text{EPS}}$  和  $A^{\text{EPS+Ag}}$  的导热系数采用了稳态和瞬态两类方法：

(1) 两种稳态方法——热流计法 (HFM)，两种不同的设备，编号为 1 和 2，以及 Lee 盘法。

(2) 两种瞬态方法——改进型瞬态平面源法 (MTPS) 和瞬态热线法 (TLS)。

表 3-1 显示了每种砂浆配方和试验评估的样品数量。

表 3-1 被测样品数量和形状尺寸

测试方法	样品形状	样品尺寸 (mm)	$A^{\text{EPS}}$ 数量	$A^{\text{EPS+Ag}}$ 数量	样品总数
MTPS	圆柱体	直径 72, 高度 30	3	3	6
TLS	圆柱体	直径 67, 高度 130	3	3	6
HFM1	正方形平板	300×300×27	3	1	4
HFM2	矩形立方体	40×40×40	3	2	5
Lee Disk	圆柱体	直径 45, 高度 7	1	1	2
总数			13	10	23

#### 3.1. 导热系数稳态测试方法

稳态法导热系数测量是在已知厚度的样品上建立稳定的温度梯度，并测量从一侧到另一侧的热流。这些方法被认为是导热系数测量中最准确的方法，但另一方面，可能有一些缺点，例如在样品上达到稳态温度梯度需要很长时间，在某些情况下，

需要校准样品，导致测量耗时很高。

在 Gomes 等人的研究中，根据 EN ISO 8301 应用了热流计法[2]。对于这些测试，选择两种设备，一种是来自 Holometrix 的 Rapid K (HFM1) 和 Senff 等人描述的热流计法测量装置 (HFM2) [3]，并使用不同尺寸的样品。在热流计方法中，样品位于两个等温加热板，热板和冷板的中间，一旦通过应用一维的傅里叶定律得到稳态，则可根据公式 (1) 确定导热系数。图 3-1 是该方法的示意图，图 3-2 表示该测试装置。

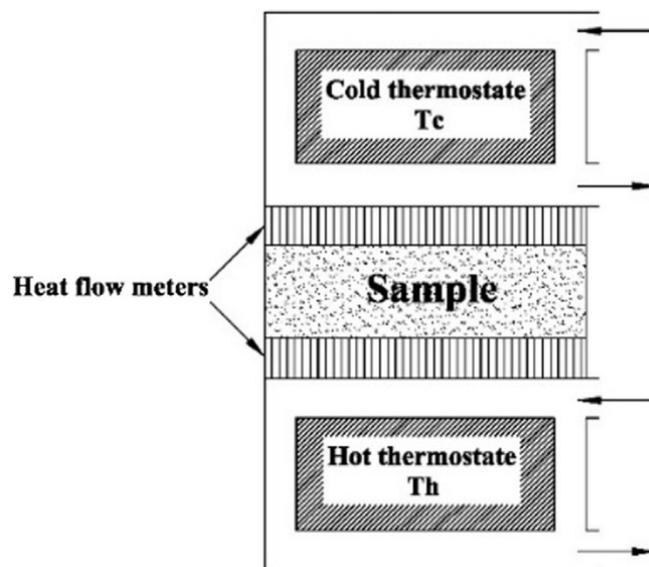


图 3-1 热流计法测量原理图



图 3-2 热流计法导热仪

在 Gomes 等人的研究中，还采用了一种 Lee 式圆盘稳态测试方法，这种方法的测试仪器如图 3-3 所示。



图 3-3 Lee 式热盘稳态法测量装置

### 3.2. 导热系数瞬态测试方法

瞬态方法是动态方法，是对由源发送的电热脉冲响应的测量，通过对所定义时间间隔测量的温度的数学模型进行计算。这些方法具有一些优点，例如测试过程简单快速，可同时测量不同热性能参数以及无需校准样品，但只有当样品与环境达到热平衡时才能发挥作用。

在 Gomes 等人的研究中，使用了改进型瞬态平面源 (MTPS) 和瞬态热线法 (TLS)，使用 Applied Precision 公司的设备 ISOMET 2114，分别使用平面和线源探针[4]。这些测量符合 ASTM D5334[5]、ASTM D5930[6]和 EN ISO 22007-2[7]标准。所有测试均在  $20 \pm 3^\circ\text{C}$  的平均参考温度下进行。图 3-4 和图 3-5 显示了用两种探头对样品的测量。

必须指出的是，使用 MTPS 测量时，将样品置于隔热材料板上以防止样品和工作台之间的热传导。通过 TLS 测量样品时用针头探针进行穿孔，使探针 (100 mm) 完全穿透到样品中并与砂浆完全接触。



图 3-4 改进型瞬态平面热源法装置 ISOMET



图 3-5 瞬态热线法装置 ISOMET

## 4. 导热系数测试方法的对比分析

在 Gomes 等人的研究中采用五种不同的设备来评估隔热砂浆的导热系数, 每种都具有鲜明的特征和方法。

通过稳态方法 (HFM1, HFM2 和 Lee 式圆盘) 评估导热系数需要很长时间才

能达到测试样品的稳态温度梯度。此外,在某些情况下,需要进行初始校准测量(使用具有已知导热系数的样品),从而为该过程增加了更多时间。由于所选择的稳态测量程序中的步骤数量增加,这些方法也比采用的瞬态方法更依赖于操作员,例如,操作员的数据记录直到达到稳定状态(HFM1, HFM2 和 Lee 式圆盘)和/或设备和样品操作(Lee 式圆盘)。

HFM1 方法需要最大的样品,在研究工作中,由于材料的稀缺性,并不总是可以生产。然而,它是许多已发表研究中使用的标准方法,允许与其他类型的材料直接比较。

HFM2 方法需要比 HFM1 更小的样品,更容易生产,并且具有更高的测量范围,但其准确性和再现性很差,限制了其与其他方法测量结果的比较。

另一方面, Lee 式圆盘法非常耗时,在测量过程中需要遵循许多步骤,这会导致相关错误的增加。尽管 Lee 式圆盘法的精度和重现性值很差,但它所用的样品尺寸最小。如果材料数量有限制,这种方法在开发新产品时非常有利。

通过瞬态方法(MTPS 和 TLS)评估导热系数比稳态方法花费的时间少得多,并且由于操作简单,并且测量程序的步骤减少,因此也不易发生操作错误。这两种方法都具有特定的准确性和可重复性。

MTPS 方法需要比 TLS 和 HFM 更小的样本。但是,作为限制因素,它的阈值下限测量范围为 0.04 W/mK,高于砂浆的某些导热系数值。

TLS 方法是样本大小要求方面的排列第二的方法,样品尺寸要求仅次于 HFM1 方法,但它更快更容易操作,阈值下限测量范围为 0.015 W/mK,这使得它非常有效评估低导热系数新型隔热砂浆的方法。

表 4-1 显示了所研究的导热率方法的定性比较分析。可以得出结论,在创新型隔热砂浆的开发的初始阶段,由于需要小样品, Lee 式圆盘是一种有趣的评估方法。对于第二个开发阶段,它可以使用 HFM2 或 MTPS 和 TLS 方法,后者更快,更容

易并且具有已知的准确性和再现性。HFM1 方法仅适用于最终发展阶段，当有材料可用时，可以将获得的结果与其他研究进行比较。

表 4-1 不同测试方法比较

测试方法	样品尺寸 (mm)	量程 (W/mK)	精度	重复性	测试时间	操作性
MTPS	直径 72 高度 30	0.04~0.3	5%+0.001 <i>W / mK</i>	3%+0.001 <i>W / mK</i>	快	简单
TLS	直径 67 高度 130	0.015~0.05	5%+0.001 <i>W / mK</i>	3%+0.001 <i>W / mK</i>	快	简单
HFM1	300×300×27	0.015~0.43	±5%	±1%	慢	中等
HFM2	40×40×40	0.02~0.8	未知	未知	慢	中等
Lee's Disk	直径 45 高度 7	未知	未知	未知	超慢	复杂

所有方法的导热系数均有显著变化， $A^{\text{EPS}}$  为 0.056 (平均值)  $\pm 0.008$  W/mK， $A^{\text{EPS+Ag}}$  为 0.034 (平均值)  $\pm 0.007$  W/mK (28 天固化，转化温度为 23°C)，其对应于  $A^{\text{EPS}}$  高达 14% 的偏差和  $A^{\text{EPS+Ag}}$  21% 的偏差。因此，导热系数测量方法的影响在新型隔热砂浆研究中至关重要。

## 5. 结论

在 Gomes 等人的研究中，主要关注两种隔热砂浆 (EPS 和 EPS+二氧化硅气凝胶) 的导热性，采用了四种不同的测量方法——两种稳态方法和两种瞬态方法——使用了 5 种不同的设备和样品几何形状进行了测试。此外，还讨论了引入气凝胶和水分含量的影响。

与 EPS 基砂浆相比，以质量百分比为 100% 的工业砂浆引入二氧化硅气凝胶降低了砂浆的导热系数高达 55%，对于干堆积密度观察到相同的趋势。

两种隔热砂浆对水分含量具有高度敏感性，具有指数趋势，这在掺入气凝胶后并未明显受到影响。值得一提的是，研究砂浆的脆性本身可能会误导水分含量带来的影响。

考虑到用于分析砂浆导热系数的所有方法及其不同的操作温度，所有结果都转换为 23°C，由此可以直接比较所有方法的测试结果。观察到所有方法测试结果之间存在显著差异，在 28 天固化以及转化温度为 23°C 时，EPS 基砂浆高达 14% ( $0.056 \pm 0.008$  W/mK)，EPS+气凝胶砂浆高达 21% ( $0.034 \pm 0.007$  W/mK)，而且通常用稳态法比用瞬态法得到更低的导热系数值。

每种方法的适用性以及它们之间的差异严格与设备的特性（量程、准确性和再现性）、样品大小、测试时间和操作的简便性（设备操作员的依赖性和测量过程中的复杂性）相关。

结果还表明，瞬态方法（MTPS 和 TLS）适用于小样品，与稳态方法（HFM1，HFM2 和 Lee 的磁盘）相比，需要更少的测试时间、操作员依赖性和测量程序的复杂性。然而，标准中提到了稳态方法可以用来与其他公布的结果进行比较，特别是当新型材料的数量较多而不受限制时。

研究还证实，EPS 基砂浆导热系数的所有测量结果均高于工业砂浆制造商的标称值 ( $0.042$  W/mK)。但是，制造商的技术文件缺乏关于测试条件的信息（例如测试温度或转换程序、水分含量、方法/设备的准确度、样品大小和测量范围），这使得测量结果很难进行比较。

通过此项研究所获得的结果，强调了对于具有低导热系数值材料的评估，指定导热系数测试条件和选择测试方法的重要性，否则材料性能和测试条件的变化规律很容易被测试方法和测试仪器的误差所掩盖。

## 6. 评述

通过上述对葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人研究工作的介绍,可以详细了解保温砂浆从样品制备、处理、测试方法选择和导热系数测试的全过程,了解不同测试方法进行比对的具体步骤,对认识和掌握保温砂浆热物理性能的测试评价技术很有帮助。但他们的研究工作还存在一些不足,研究还停留在实验室检测的探索阶段,特别是在测试技术方面还需要进一步开展更深入的工作以真正满足新型保温砂浆的研制和生产需要。存在的不足和还需开展的工作主要体现在以下几个方面:

(1) 在多种测试方法对比测试过程中,通常会采用标准参考材料来进行对比测试,通过热物理性能稳定的标准参考材料来最大限度降低样品性能波动的影响,真正实现对测试方法自身测量精度的考核和对比。而在葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人所进行的多种测试方法对比测试中,并未采用导热系数为  $0.03 \text{ W/mK}$  附近的相应标准参考材料,如 ASTM SRM 1450d,所以他们的对比测试误差中很大一部分是自制保温砂浆样品带来的影响,并不能对各种测试方法做出非常客观的评价。

(2) 葡萄牙里斯本大学 Gomes 等人研究工作中所采用的测试方法没有问题,尽管论文发表时间为 2018 年,但文中所采用的测试设备普遍都比较陈旧,测量精度也相应的较差。以文中所提到的 EPS 基砂浆高达  $14\% (0.056 \pm 0.008 \text{ W/mK})$ , EPS+气凝胶砂浆高达  $21\% (0.034 \pm 0.007 \text{ W/mK})$  的测试误差,在实际工程应用中对保温砂浆进行导热系数测试,就显着测量太差,这往往会造成实际建筑材料成本的无法准确控制,或实际隔热效果无法达到设计效果。以近些年来的导热系数测试技术发展水平,采用标准化的瞬态平面热源法(TPS)导热系数测试仪器完全可以在测量范围和精度方面满足要求,而且样品尺寸也非常小。

(3) 综上所述,针对保温砂浆类材料导热系数等热物理性能参数的测试,稳态法保留热流计法,而瞬态法则建议采用精度更高的瞬态平面热源法。

## 7. 参考文献

[1] Gomes, M. Glória, et al. "Thermal conductivity measurement of thermal insulating mortars with EPS and silica aerogel by steady-state and transient methods." *Construction and Building Materials* 172 (2018): 696-705.

[2] ISO 8301 – Thermal insulation – determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus.

[3] L. Senff, G. Ascensão, D. Hotza, V.M. Ferreira, J.A. Labrincha, Assessment of the single and combined effect of superabsorbent particles and porogenic agents in nanotitania-containing mortars, *Energy Build.* 127 (2016) 980–990.

[4] Applied Precision Ltd., Isomet 2114 Thermal properties analyzer user's guide, Version 120712, USA, n.d.

[5] American Society for Testing and Materials, ASTM D5334 – standard test method for determination of thermal conductivity of soil and soft rock by thermal needle probe procedure.

[6] American Society for Testing and Materials, ASTM D5930 – Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique.

[7] ISO 22007-2 – Plastics – Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity – Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method, Switzerland, 2015.