



# 基于多种传热方式的热传导实验课程设计

幸文婷, 戴勇峰

(华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘要:** 工程传热学是研究工程应用中热量传递规律的科学, 它以热力学第一定律和第二定律为基础, 利用一些实验规律来研究热量传递的速率, 实验环节对该学科至关重要。为加强学生对传热过程的理解, 掌握传热学理论的核心知识点, 开设了基于多种传热方式的热传导实验课程。课程内容包括轴向热传导实验、径向热传导实验、肋片热传导模拟实验以及气/液体热传导实验。应用实践表明, 该实验课程内容丰富, 综合性较强, 有效地提高了学生的动手能力和工程实践能力, 取得了良好的教学效果。

**关键词:** 工程传热学; 热传导; 实验课程; 教学效果

中图分类号: G642.423

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240065

## Experimental Course Design of Heat Conduction Based on Multiple Heat Transfer Modes

XING Wenting, DAI Yongfeng

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Engineering heat transfer is the science that studies the law of heat transfer in engineering applications. It is based on the first and second law of thermodynamics, uses some experimental rules to study the rate of heat transfer, so the experiment part is crucial to this discipline. In order to reinforce students' understanding of heat transfer process, grasp the core knowledge points of heat transfer theory, the experiment course of heat conduction based on multiple heat transfer modes is set up. This course content includes axial heat conduction experiment, radial heat conduction experiment, fin heat conduction simulation experiment and gas/liquid heat conduction experiment. The application practice shows that the experimental course has rich content and strong comprehensiveness. It effectively improves students' hands-on skills and project practical ability and achieves good teaching effect.

**Key words:** engineering heat transfer; heat conduction; experimental course; teaching effect

工程传热学是研究工程应用中热量传递规律的科学<sup>[1]</sup>。自然界和工程技术领域广泛存在各种形式的热量传递现象, 其规律在能源动力、机械制造、材料开发、建筑环境、航空航天、生物医学等领域得到广泛的应用<sup>[2]</sup>。学习研究热量的传递规律对改变人们的生活方式、提高能源利用效率、保证工业生产的安全可靠等都极为重要。作为研究热量及质量传递规律的基础学科和应用科学, 传热学课程的学习可以达到两个目的, 一是使学生具备分析工程传热与传质问题的基本能力, 二是为学生今后从事节能与储能技术、热工设备能效

优化及换热器选型设计等工作打下坚实的基础<sup>[3-4]</sup>。

传热学以热力学第一定律和第二定律为基础, 通常利用一些实验规律来研究热量传递的速率, 实验环节是研究传热过程不可或缺的手段, 实验教学无疑也是传热学课程教学的重要组成部分, 对学生工程实践和创新创业能力的发展具有导向作用<sup>[5-7]</sup>。为加强学生对传热过程的理解, 掌握传热学理论的核心知识点, 华中科技大学能源与动力工程实验教学中心开设了 4 课时的基于多种传热方式的热传导实验教学项目, 以期达到培养复合型卓越工程科技人才的目标。

收稿日期: 2024-02-22

基金项目: 面向国家双碳战略的能源动力类专业实践教学体系改革与实践项目(2022006)。

作者简介: 幸文婷, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程热物理与工程测试方向的实验教学及实验技术研究。E-mail: 14312585@qq.com

### 1 实验装置介绍

实验装置由基础试验台和 4 组实验模块组成。基础试验台为各实验模块提供安装框架，并为实验模块中的加热器(热源)提供电源，为散热器(冷源)提供冷却水系统。基础试验台如图 1 所示，各实验模块如图 2 所示。

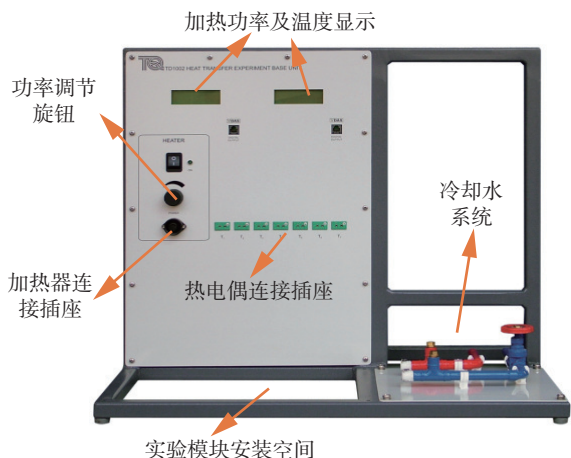


图 1 基础试验台

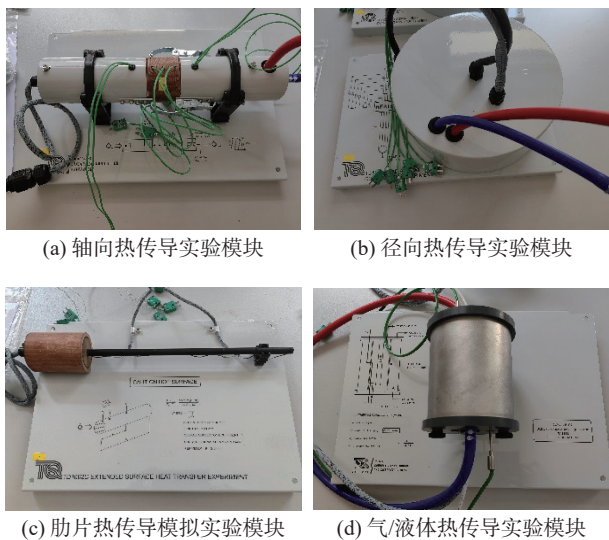


图 2 各实验模块图

### 2 实验步骤

4 个模块的实验内容均需在课堂上完成，因此学生在完成一个模块的实验后需将模块拆除安装下一个模块进行实验，详细实验步骤如下。

1) 关闭基础试验台加热器及电源开关，关闭冷却水系统供水阀，将已完成的实验模块拆除。

2) 安装新的实验模块到基础试验台，拧紧面板上的旋转螺钉将其固定。将试验台上的供回水

管与模块上的供回水管相连，检查系统是否有泄漏。将模块中的热电偶连接到基础试验台对应的热电偶插座上，将模块上的加热器电源接口接到试验台电源插座上。

3) 模块安装完毕后，根据各模块的实验内容设计相应的工况进行实验。

### 3 实验教学设计

#### 3.1 轴向热传导实验设计

轴向热传导实验主要研究热量沿着均匀圆形截面的实心圆棒传递的规律。圆棒的一端为加热器，一端为散热器(冷却水冷却)。沿圆棒轴向等间距分布的 7 个热电偶用来测量加热器和散热器之间的温度梯度。该模块的中间部分为可替换部件，可研究不同金属材料圆棒的热导率。为减小接触热阻，在中间可替换部件的两端均匀地涂上导热膏<sup>[8-9]</sup>。本系统共配置了 4 种不同材质的圆棒，分别是铜、黄铜、铝和不锈钢。为减少辐射和对流引起的散热损失，圆棒的四周包裹有保温隔热材料。详细的原理图如图 3 所示。

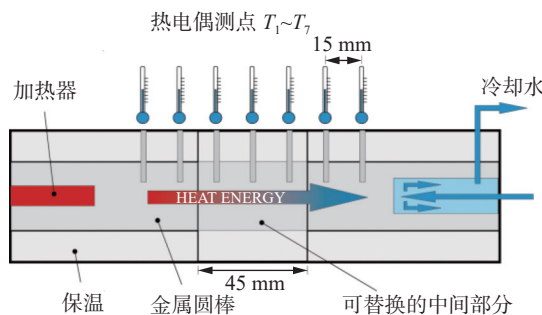


图 3 轴向热传导实验原理图

##### 3.1.1 不同材料的金属圆棒轴向热传导实验设计

除可替换的中间部分外，该模块中实心圆棒其他部分的材质为标准黄铜材料。当中间可替换部分材质不同时，可得出不同的实验结果。若中间部分材料为黄铜，则所有部件的材质相同，各测点温度值在同一条拟合直线附近；若中间材料为其他材料，则较低热导率的中间部分会产生较高的温度梯度，较高热导率的中间部分会产生较低的温度梯度，圆棒的整体热导率也会随之下降或增加。典型的实验结果如图 4 所示，该图为中间部分材料分别为黄铜和不锈钢时，7 个热电偶测点的温度分布情况。

从图 4 可以看出，中间替换部分插入不锈钢材料后，较大地降低了圆棒的整体热导率。

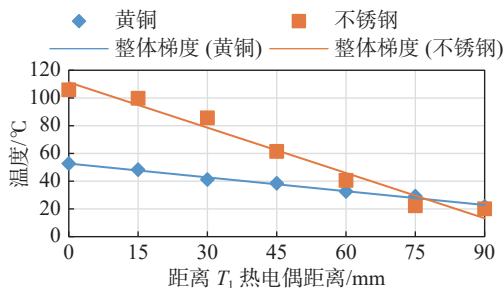


图4 表面温度随轴向距离变化图

### 3.1.2 散热损失对热导率的影响实验设计

测试材料的热导率采用式(1)进行计算:

$$\lambda = \frac{\Phi(1 - Q_{\text{loss}}\%)L}{A(T_3 - T_5)} \quad (1)$$

式中:  $\Phi$  为加热器功率, 单位 W;  $Q_{\text{loss}}$  为散热损失;  $L$  为  $T_3$  和  $T_5$  测点的距离, 单位 m;  $A$  为圆棒的横截面积, 单位  $\text{m}^2$ 。散热损失按标准测试样品的散热损失校准图, 如图 5 所示, 根据  $T_1$  点温度与环境温度的差值按图预估获得, 其值为包裹保温隔热材料后圆棒向周围环境的散热量占加热器功率的比值。

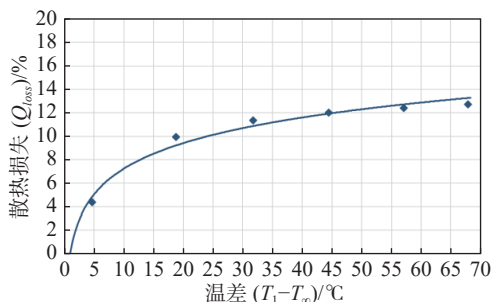


图5 散热损失校准图

实验时按有无散热损失分别计算材料的热导率, 然后进行分析。以铜材料为例, 当加热功率为 30 W 时, 考虑散热损失时热导率计算值为 430.7 W/(m·K), 不考虑散热损失时热导率计算值为 434.75 W/(m·K), 散热损失约占加热器总功率的 9.4%。

热导率的计算还可采用热阻算法, 通过测定整个圆棒的热阻和两端黄铜棒的热阻, 可计算出中间可替换部分的热阻, 进而算出热导率。

总热阻由式(2)计算得到:

$$R = \frac{T_1 - T_7}{\Phi(1 - Q_{\text{loss}}\%)} \quad (2)$$

两端黄铜棒的热阻由式(3)计算得到:

$$R_{\text{bz}} = \frac{L_{\text{bz}}}{A\lambda} \quad (3)$$

测试材料热阻由式(4)计算得到:

$$R_{\text{cs}} = R - 2R_{\text{bz}} \quad (4)$$

式中:  $R$ 、 $R_{\text{bz}}$ 、 $R_{\text{cs}}$  分别为总热阻、两端标准黄铜热阻及测试材料热阻, 单位 K/W;  $T_1$ 、 $T_7$  分别为测试点 1 点和 7 点的温度值, 单位 K;  $L_{\text{bz}}$  为两端黄铜棒的长度, 单位 m。

以中间可替换部分材料为不锈钢为例, 加热功率为 30 W, 采用热阻法进行计算, 考虑散热损失时热导率值为 18.7 W/(m·K), 不考虑散热损失时热导率值为 27.4 W/(m·K), 可见考虑散热损失后的计算方法提高了测试精度。

### 3.1.3 绝对测量法和相对测量法实验设计

绝对测量法即采用式(1)的计算方法, 测出热流量和温差后计算热导率。而相对法测量是将测试试样与标准材料放在一起, 只需测出测试材料和标准材料的温差, 利用已知标准材料的热导率计算测试材料的热导率, 由式(5)可得:

$$\lambda_{\text{cs}} = \lambda_{\text{bz}} \times \frac{\Delta T_{\text{bz}}}{\Delta T_{\text{cs}}} (1 - Q_{\text{loss}}\%) \quad (5)$$

式中:  $\lambda_{\text{bz}}$  为标准材料的热导率, 单位 W/(m·K);  $\Delta T_{\text{bz}}$  为为标准材料温升, 单位 K;  $\lambda_{\text{cs}}$  为测试材料的热导率, 单位 W/(m·K);  $\Delta T_{\text{cs}}$  为测试材料温升, 单位 K。

相对测量法中无需测量测试样品的热流量, 从而减少了功率测量误差, 测试精度相比绝对法有所提高。以测试材料铝合金为例, 典型的实验结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出, 相对测量法的相对误差在 4% 以内, 而绝对测量法的相对误差随加热功率的增加而增大, 这是因为随着加热功率的增加, 散热损失对测量结果的影响效果越显著。

### 3.1.4 热滞后实验设计

进行热滞后实验时, 需关闭冷却水系统。当圆棒的一端被加热时, 热量沿着圆棒轴向传递。热量从圆棒的热源端传递到最远端需要一定的时间, 即最远端的温度要延迟一段时间才会升高, 这个时间称为热滞后时间。如果没有热损失, 到达稳态后, 整个圆棒所有部分温度都相等。而在实际实验过程中, 由于辐射和对流换热损失, 最远端的温度永远小于最靠近热源端侧的温度值。以黄铜材料为例, 当加热功率为 20 W, 最末端的温度测点  $T_7$  距离最靠近热源端测点  $T_1$  距离为 90 mm, 热滞后时间约为 40 s。

表 1 相对测量法与绝对测量法实验结果

样品材料	$\phi/W$	相对测量法 $\lambda/$ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	绝对测量法 $\lambda/$ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	理论值 $\lambda/$ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	相对测量法 相对误差/%	绝对测量法 相对误差/%
铝合金	15	166.3	168.7	162.9	2.09	3.56
	20	167.9	174.3	163.4	2.75	6.67
	25	169.2	175.1	163.7	3.36	6.96
	30	169.8	177.4	164.2	3.41	8.03
	40	170.4	182.3	165.2	3.15	10.40
	50	172.3	184.9	166.7	3.36	10.90
	60	173.5	187.2	167.9	3.33	11.50

### 3.2 径向热传导实验设计

径向热传导实验主要研究热量从中心热源沿着尺寸均匀的金属圆盘径向方向传递的规律。圆盘的中心设有电加热器，外周布置有冷却水管。7个热电偶沿圆盘径向方向等间距分布，用于测量热源和冷源之间的温度梯度。圆盘四周包裹有保温隔热材料以减少散热损失。详细的原理图如图 6 所示。

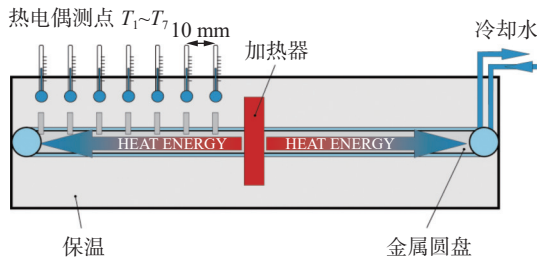


图 6 径向热传导实验原理图

材料的热导率由式(6)计算得到：

$$\lambda = \frac{\Phi \times \ln(r_7/r_1)}{2\pi L(T_1 - T_7)} \quad (6)$$

式中： $T_1$ 、 $T_7$ 分别为热电偶测点 1 和 7 的测量温度，单位 K； $r_1$ 、 $r_7$ 分别为热电偶测点 1 和 7 距离圆盘中心的径向距离，单位 m； $L$ 为圆盘厚度，单位 m。

此外，该金属圆盘材质为黄铜，利用已知黄铜材料的热导率，可逐步计算 $T_2 \sim T_7$ 的温度，将计算温度值与实际测量值进行比较，典型的实验结果如图 7 所示。

由图 7 可知，与轴向热传导不同，径向热传导温度梯度不再是一条直线，而是一条服从 $x^2$ 多项式分布的函数曲线。此外，温度计算值比测量值略高，表明该方法测出的热导率值比理论值偏低，主要原因有金属圆盘的尺寸公差、热电偶间距过小引起的圆盘材料损失、温度测量误差以及累计计算误差等。

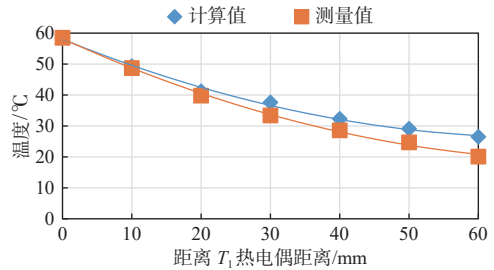


图 7 表面温度随径向距离变化图

### 3.3 肋片热传导模拟实验设计

肋片热传导模拟实验主要研究热量沿着水平放置的具有均匀圆形截面的黄铜棒传递的规律，用来模拟等截面圆形肋片的热传导，该过程同时伴随有自然对流和辐射换热。圆棒的一端布置有电加热器，加热器四周包裹有保温隔热材料以减少散热损失。沿圆棒轴向等间距布置 7 个热电偶用来测量圆棒表面的温度梯度。圆棒表面涂有黑色哑光涂层，可近似看作黑体。详细的原理图如图 8 所示。

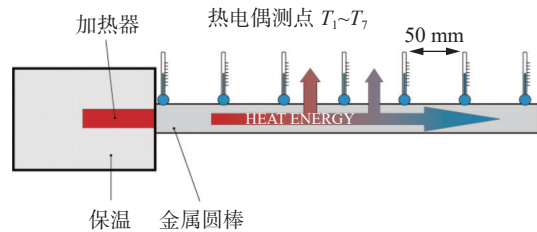


图 8 肋片热传导模拟实验原理图

本实验需计算如下参数。

#### 1) 表面传热系数

表面传热系数为自然对流表面传热系数和辐射表面传热系数之和，即：

$$h = h_r + h_c \quad (7)$$

式中： $h_r$ 为辐射表面传热系数，单位 W/(m<sup>2</sup>·K)； $h_c$ 为自然对流表面传热系数，单位 W/(m<sup>2</sup>·K)。 $h_r$ 和 $h_c$ 分别由式(8)和式(9)计算得到：

$$h_r = \varepsilon \sigma \frac{T_{\text{mean}}^4 - T_{\infty}^4}{T_{\text{mean}} - T_{\infty}} \quad (8)$$

$$h_c = 0.53 \times (G_r \cdot P_r)^{0.25} \times \frac{\lambda}{d} \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$ 为物体的发射率, 该模块圆棒表面涂有黑色哑光图层, 可近似看作黑体, 发射率计算时取1;  $\sigma$ 为斯特藩-玻尔兹曼常数,  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;  $T_{\text{mean}}$ 为圆棒的平均温度, 单位 K;  $T_{\infty}$ 为周围流体温度, 单位 K;  $P_r$ 为普朗特数;  $\lambda$ 为热导率, 单位  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , 其值通过查干空气的热物理性质表获得;  $d$ 为圆棒直径, 单位 m;  $G_r$ 为格拉晓夫数, 由式(10)计算得到:

$$G_r = \frac{g(\rho_{\infty} - \rho)d^3}{\rho\nu^2} \quad (10)$$

式中:  $g$ 为重力加速度, 单位  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\rho_{\infty}$ 为来流空气密度, 单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho$ 取圆棒平均温度下空气密度, 单位  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\nu$ 为运动黏度, 单位  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

#### 2) 计算沿圆棒轴向的温度分布

计算出表面传热系数后, 参考肋片的温度分布曲线计算圆棒轴向  $T_2 \sim T_7$  的温度值, 并与实际温度测量值进行比较。各点温度值由式(11)计算得到:

$$T_x = \frac{\cosh[m(x-L)]}{\cosh mL} (T_1 - T_{\infty}) + T_{\infty} \quad (11)$$

式中:  $T_x$ 为热电偶 2~7 点的温度值,  $T_{\infty}$ 为周围流体温度,  $x$ 为各测点距离的距离,  $L$ 为圆棒长度,  $m$ 由式(12)计算得到:

$$m = \sqrt{\frac{hP}{\lambda A_c}} \quad (12)$$

式中:  $h$ 为表面传热系数, 单位  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $P$ 为圆棒横截面周长, 单位 m;  $A_c$ 为圆棒横截面积, 单位  $\text{m}^2$ ;  $\lambda$ 为圆棒的热导率, 单位  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

#### 3) 计算通过圆棒传导的热量

通过计算圆棒传导的热量, 可与实际的电加热功率进行比较, 分析传导的热量和热损失的比例, 热量由式(13)计算得到:

$$\Phi = \sqrt{\lambda A_c h P} \times (T_1 - T_{\infty}) \tan h(mL) \quad (13)$$

肋片热传导模拟实验典型的实验结果如图9所示, 可以看出, 温度计算值与测量值能较好地吻合, 表明该实验适用于研究肋片的热传导规律。此外, 通过计算圆棒传导的热量, 可分析散热损失占总功率的比例。以加热器功率

9 W 为例, 计算的热量值约为 3.9 W 左右, 通过圆棒传递的热量还不到实际功率的一半, 这说明大部分热量没有通过圆棒而是损失到环境中。散热损失除包括对流换热和辐射换热损失, 还包括一些小的热损失, 如加热器的热损失, 通过铜电缆返回加热器的热损失, 加热原件和圆棒接头处的热阻损失, 以及热电偶的金属线导热损失等。

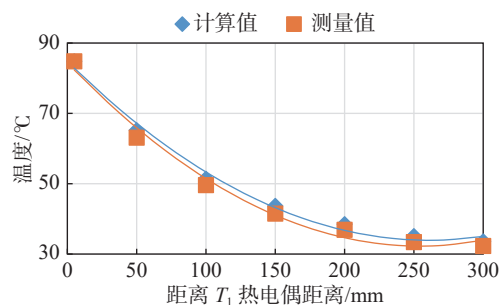


图9 表面温度随轴向距离变化图

### 3.4 气体/液体热传导实验设计

气体/液体热传导实验主要研究热量通过气/液体薄层传导的规律。该模块主体为一个圆柱体, 电加热器布置在圆柱体中心, 圆柱体周围是冷却水套。被测试气体或液体由注射器推入到加热器和冷却器之间的薄层间隙中, 在两端自密封的作用下, 气体或液体可填充间隙。实验原理图如图10所示。

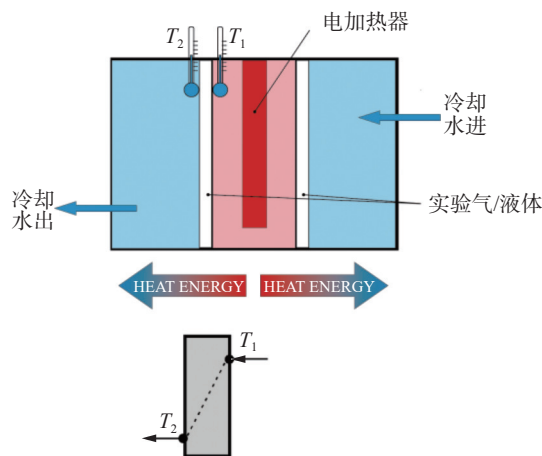


图10 气体/液体热传导实验原理图

气体/液体的热导率由式(14)计算得到:

$$\lambda = \frac{\Phi \Delta r}{A_s (T_1 - T_2)} \quad (14)$$

式中:  $\Delta r$ 为径向间隙, 单位 m;  $A_s$ 取内外径中心点处的表面积, 单位  $\text{m}^2$ 。

实验中气体选用空气进行测试,液体选用蓖麻油进行测试,典型的实验结果如表 2 所示。实验结果显示,测量值与理论值的相对误差均在 10% 以内,表明该实验具有较高的测试精度。

表 2 空气和蓖麻油热导率实验结果

样品材料	$\phi/W$	实验值 $\lambda/$ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	理论值 $\lambda/$ [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	测量相对 误差/%
空气	20	0.0274	0.0263	4.18
	40	0.0288	0.0271	6.27
	60	0.0302	0.0278	8.63
蓖麻油	50	0.1910	0.1800	6.11
	70	0.1950	0.1800	8.33
	90	0.1970	0.1800	9.44

#### 4 实验教学实践

实验台架投入使用后,完成了本科能源与动力、机械科学与工程、材料科学与工程及船舶与海洋工程 4 个院系共 35 个班的工程传热学实验教学任务。该课堂采用小班制教学,学生自由组队,每组 2~3 人。为了预留更多的时间让学生动手操作,课堂上老师仅介绍实验设备和注意事项,学生按实验指导书上操作步骤开展相关实验。老师提出实验任务,学生自行设计实验工况,认真思考,并与同组成员积极交流,在实验过程中发现并解决问题,其动手能力、团队协作能力和创新能力均得到了提升<sup>[10-12]</sup>。

#### 5 结束语

基于多种传热方式的热传导实验课程内容丰富、综合性强、测试精度高,学生普遍反映良好。该课程是指导学生深入掌握理论基础及学科规律的实践过程,而学生在掌握相关规律后,随着自主能动性的发挥,提出新的想法,进行创新性研究,这也正是复合型工科人才培养的要求<sup>[13]</sup>。实践表明,该实验课程切实提高了实验教学质量,满足高校本科实验教学需求<sup>[14-15]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 邬田华, 王晓墨, 许国良. 工程传热学[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2020.
- [2] 王湛, 辛公明, 陈岩, 等. “趣味传热学” 在线课程建设探索与实践[J]. 高等工程教育研究, 2023(S1): 93-94.
- [3] 胡刚刚, 杨志平. 面向创新人才培养的传热学综合实验平台建设与实践[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(10): 247-251.
- [4] 王秋旺. 节能与储能传递过程原理、技术与应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 53(10): 1763-1780.
- [5] 易美荣, 陈建锋, 许文虎, 等. 基于 PBL 模式的机构创新设计实验教学改革的研究[J]. 机械设计, 2023, 40(6): 153-160.
- [6] 金鑫, 李良军, 杜静, 等. 新工科背景下机械基础课程体系构建[J]. 机械设计, 2018, 35(S2): 114-118.
- [7] 王书亭, 李昕, 张芬, 等. 面向大工程观培养的智能制实践教学体系构建[J]. 机械工程学报, 2022, 58(18): 319-332.
- [8] 方健, 冯文创, 丁斌, 等. 导热和自然对流对石蜡定向熔化特性的影响[J]. 科学通报, 2021, 66(21): 2758-2765.
- [9] 朱红阳, 徐岫, 邵佳毅. 光学热带法测量固态材料热物性研究[J]. 热科学与技术, 2022, 21(5): 478-483.
- [10] 孟昭霞. 实验教学在学生创新能力培养中的作用[J]. 现代大学教育, 2018, 34(5): 92-97.
- [11] 刘艳玲. 《无机化学实验》课程教学改革的思考[J]. 教育理论与实践, 2022, 42(30): 62-64.
- [12] 万超, 于洋, 霍波. 新工科背景下力学跨学科课程的建设与探讨[J]. 力学与实践, 2022, 44(2): 379-384.
- [13] 许亚敏, 陆紫生, 王丽伟. 新工科背景下能源动力类实验教学改革及探索[J]. 高等工程教育研究, 2023(S1): 149-151.
- [14] 徐敏虹, 陈海锋, 郭玉华, 等. 自制实验设备促进学生实践创新能力培养[J]. 化学教育(中英文), 2021, 42(20): 58-62.
- [15] 管新蕾, 高云鹏, 王维, 等. 创新流体实验仪器, 探索创新型人才培养[J]. 力学与实践, 2021, 43(1): 135-138.

编辑 王燕