

借助基于Arduino的测量装置对冰导热系数的研究

潘帅成¹, 吴迪^{2*}, 蔡子硕¹, 高雅², 魏宏¹, 赵天驰³

¹沈阳航空航天大学, 航空宇航学院, 辽宁 沈阳

²沈阳航空航天大学, 理学院, 辽宁 沈阳

³沈阳航空航天大学, 国际工程师学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2023年4月20日; 录用日期: 2023年6月21日; 发布日期: 2023年6月28日

摘要

根据冰受热易融化的特性, 基于稳态平板法, 采用“冷传导”代替传统的“热传导”测量冰的导热系数。制作了基于Arduino的冰导热系数智能测量装置。该装置由温度控制系统、上铜盘恒温系统、数据收集系统等构成。数据可通过OLED屏幕实时显示, 操作者手动记录并处理数据。也可通过Arduino单片机传输给计算机, 计算机对数据进行处理, 得出冰的导热系数。采用自制的基于Arduino的冰导热系数测量装置, 研究了上铜盘的制冷温度、杂质种类和浓度以及冰的厚度对冰的导热系数的影响。

关键词

导热系数, 稳态法, Arduino, 冰

Researching the Thermal Conductivity of Ice by a Measurement Device Based on Arduino

Shuaicheng Pan¹, Di Wu^{2*}, Zishuo Cai¹, Ya Gao², Hong Wei¹, Tianchi Zhao³

¹College of Aerospace Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

²College of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

³International Engineering College, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: Apr. 20th, 2023; accepted: Jun. 21st, 2023; published: Jun. 28th, 2023

Abstract

Based on the characteristic of ice melting easily when heated, using the steady-state plate method,

*通讯作者。

文章引用: 潘帅成, 吴迪, 蔡子硕, 高雅, 魏宏, 赵天驰. 借助基于 Arduino 的测量装置对冰导热系数的研究[J]. 应用物理, 2023, 13(6): 291-298. DOI: 10.12677/app.2023.136033

the thermal conductivity of ice is measured using “cold conduction” instead of traditional “heat conduction”. We have developed an intelligent measurement device for ice thermal conductivity based on Arduino. The device consists of a temperature control system, a copper plate constant temperature system, a data collection system, etc. The data can be displayed in real-time through OLED screens, and the operator manually records and processes the data. It can also be transmitted to the computer through the Arduino microcontroller, making it easy for the computer to process the data and obtain the thermal conductivity of the ice. Using a self-made ice thermal conductivity measurement device based Arduino, the effects of the cooling temperature of the upper copper plate, the type and concentration of impurities, and the thickness of ice on the thermal conductivity of ice were studied.

Keywords

Thermal Conductivity, Steady-State Method, Arduino, Ice

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

导热系数是表征材料导热性能的一个重要参数，它不仅是评价材料热学特征的依据，也是材料在设计应用时的一个依据。大多数材料的导热系数都需要采用实验方法来测定。测量导热系数的方法主要为非稳态法和稳态法。一般地，对于热的良导体(也称良导热体)，采用非稳态法测量其导热系数；而对于热的不良导体(也称不良导热体)，则用稳态法测量。对导热性能差的材料或者隔热材料的导热系数的测定，稳态平板法[1] [2] [3] [4] [5]是最为理想而准确的方法之一。由于冰这种低温不良导热体受热容易融化，目前关于冰的导热系数的研究工作不多。本文从逆向思维出发，采用“冷传导”的方式测量冰导热系数，我们设计并制作了基于 Arduino 的冰导热系数智能测量装置，并且，我们测量和分析了上铜盘的制冷温度、不同杂质和冰的厚度对冰的导热系数的影响。

2. 实验原理

在物体内部垂直于导热方向取两个相距 1 米，面积为 1 平方米的平行平面，若两个平面的温度相差 1 K，则在 1 秒内从一个平面传导至另一个平面的热量就规定为该物质的导热系数。导热系数也称为“热导率”。

如果热量沿着 x 方向传导，那么在 x 轴上任一位置 dS 处取一个垂直截面，以 dT/dt 表示 x 处的温度梯度，以 dQ/dt 表示该处的传热速率(即单位时间内通过截面 dS 的热量)则：

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda \left(\frac{dT}{dt} \right)_{x_0} dS \quad (1)$$

式中 λ 为导热系数，单位：W/(m·K)。

在稳态平板法理论模型中热传导达到稳态时的条件：1) 加热铜盘温度 T_1 和散热铜盘温度 T_2 的值不随时间改变。2) 通过待测样品上表面的传热速率与散热铜盘向周围散热速率相等。得出：

$$\lambda = -\frac{mch}{\pi R^2 (T_{10} - T_{20})} \times \frac{\Delta T_2 (\text{稳态})}{\Delta t} \Bigg|_{T_2=T_{20}} \quad (2)$$

式中 $\left. \frac{\Delta T_2(\text{稳态})}{\Delta t} \right|_{T_2=T_{20}}$ 为下铜盘在稳态温度 T_{20} 向周围的散热速率, m 为下铜盘的质量, c 为下铜盘的比热容, h 为待测样品厚度, R 为待测样品半径, T_{10} 为上铜盘稳态温度, T_{20} 为下铜盘稳态温度。

如图 1 和图 2 所示, 在下铜盘散热过程中, 下铜盘的上表面并未暴露在空中, 故对散热速率公式修正:

$$\lambda = -\frac{mch}{\pi R^2 (T_{10} - T_{20})} \times \left. \frac{\Delta T_2(\text{自然})}{\Delta t} \right|_{T_2=T_{20}} \times \frac{D + 4H}{2D + 4H} \quad (3)$$

式中 D 为下铜盘直径, H 为下铜盘厚度, $\left. \frac{\Delta T_2(\text{自然})}{\Delta t} \right|_{T_2=T_{20}}$ 为下铜盘在空气中自然散热时在稳态温度点 T_{20} 的温度变化梯度即冷却率。

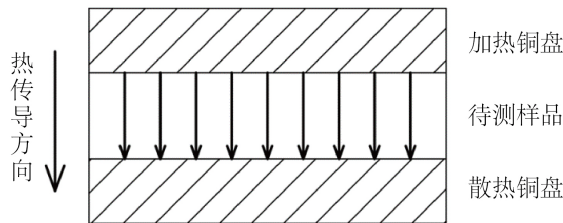


Figure 1. Schematic diagram of measuring thermal conductivity using steady-state flat plate method

图 1. 采用稳态平板法测导热系数的原理图

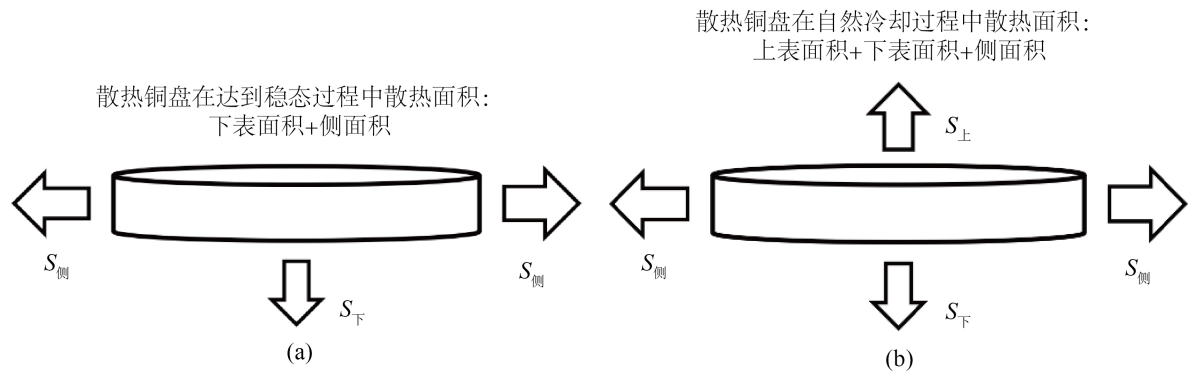


Figure 2. Schematic diagram of cooling method for heat dissipation copper plate

图 2. 散热铜盘冷却方式的示意图

在上述稳态平板法中, 热源由上铜盘即加热铜盘提供, 通过“热传导”方式, 将热量从上铜盘经过待测样品向下铜盘传导。根据冰这种低温不良导热体受热容易融化的特性, 本文从逆向思维出发, 确定了采用“冷传导”测量冰的导热系数的方法。首先对上铜盘制冷, 使上铜盘温度低于环境温度以及下铜盘的温度, 从而改变温度梯度的方向。该过程中, 上铜盘由发热变为吸热, 待测样品仍为传热物质, 下铜盘由吸热变为散热。将传统导热系数实验中的加热圆盘“传递高温”的过程转换为“传递低温”。

$(T_{10} - T_{20})$ 将由“热传导”的正值变成负值。 $\left. \frac{\Delta T_2(\text{自然})}{\Delta t} \right|_{T_2=T_{20}}$ 下铜盘的自然散热从自然降温变成自然升温,

温度变化梯度从负值变成正值。由于以上两个数值的正负性变化相互抵消,因此,公式(3)仍然适用于“冷传导”法测量冰的导热系数。

3. 实验装置

我们设计和制作的实验装置实物图如图 3 所示。由于冰受热易融化,同时采用稳态平板法测量冰的导热系数的时间较长,故需创造一个低温环境。这将有助于减缓冰的融化,因此,我们制作了由低温保温箱(图 3 中 1)、三核制冷系统(图 3 中 3)、保温毛毡(图 3 中 7)构成的环境温度控制系统。我们采用“冷传导”方式测量冰的导热系数,制作了由冷源(由帕尔贴半导体片、水冷散热片、水泵和水箱构成)以及温控器构成的上铜盘低温系统。由公式(3)可知,不仅需要测量上下铜盘的温度而且需要测量冰的厚度(即上下铜盘的距离),因此,需要准确的实时测温 and 测距系统。测量温度采用测温范围大,测量精度高,接线方便的 DS18B20 温度传感器。测量上下铜盘的距离即冰的厚度采用超声波测距传感器。通过编写程序代码,Arduino 单片机将从传感器获取的电信号转化成相应的温度和高度,将处理好的数据发送给与单片机直接相连的计算机,由计算机对数据进行显示并存储,便于计算机对数据进行处理,得到冰的导热系数。数据显示系统(图 3 中 10)与 Arduino 单片机相连,用于显示上下铜盘的温度、冰的高度和时间,以便操作者可以手动记录实验数据。

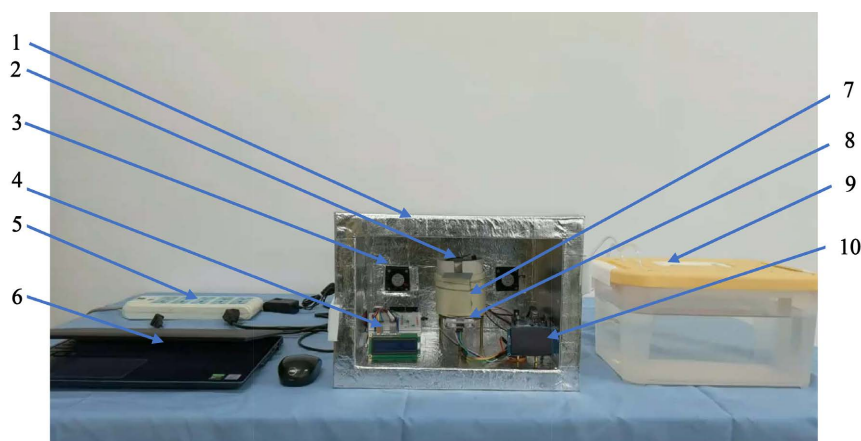


Figure 3. Overall real object diagram of the experimental device. Here, 1. Low temperature insulation box; 2. Upper copper plate constant temperature system; 3. Three core refrigeration system; 4. Self made thermometer; 5. Power socket; 6. The computer; 7. Ice bucket and insulation felt; 8. Ultrasonic distance measurement module; 9. Water tank; 10. Data Display System

图 3. 实验装置整体实物图。其中, 1. 低温保温箱; 2. 上铜盘恒温系统; 3. 三核制冷系统; 4. 自制温度计; 5. 电源插排; 6. 计算机; 7. 冰桶及保温毛毡; 8. 超声波测距模块; 9. 水箱; 10. 数据显示系统

4. 实验结果及分析

4.1. 测量纯冰的导热系数

根据连续 10 次读取的待测试样厚度数据,计算其平均值得到待测冰样品的厚度 h (即上下铜盘的距离)。在判断测量系统的“冷传导”达到稳态后,记录上下铜盘的稳态温度分别为 $T_{10} = -7.65^{\circ}\text{C}$, $T_{20} = 1.72^{\circ}\text{C}$; 然后,记录下铜盘在自然升温时的温度随时间变化的数据(如表 1 和图 4 所示)。

用 Origin 和 Excel 拟合得到下铜盘的自然升温曲线函数(如图 4 所示)为:

Table 1. Natural heating data of the lower copper plate in the thermal conductivity measurement experiment of pure ice. Here, the time unit is s, and the temperature unit is °C

表 1. 在纯冰的导热系数测量实验中，下铜盘的自然升温数据。其中，时间单位为 s，温度单位为 °C

| 时间 | 温度 | 时间 | 温度 | 时间 | 温度 | 时间 | 温度 | 时间 | 温度 | 时间 | 温度 | 时间 | 温度 |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|------|------|------|------|------|
| 1 | -9.97 | 183 | -5.10 | 365 | -2.23 | 547 | -0.54 | 729 | 0.90 | 911 | 1.90 | 1093 | 2.53 |
| 15 | -9.96 | 197 | -4.79 | 379 | -2.04 | 561 | -0.41 | 743 | 0.96 | 925 | 1.90 | 1107 | 2.59 |
| 29 | -9.29 | 211 | -4.48 | 393 | -1.91 | 575 | -0.29 | 757 | 1.09 | 939 | 1.96 | 1121 | 2.59 |
| 43 | -8.91 | 225 | -4.23 | 407 | -1.79 | 589 | -0.16 | 771 | 1.15 | 953 | 2.03 | 1135 | 2.65 |
| 57 | -8.54 | 239 | -3.98 | 421 | -1.66 | 603 | -0.04 | 785 | 1.21 | 967 | 2.09 | 1149 | 2.65 |
| 71 | -8.10 | 253 | -3.73 | 435 | -1.54 | 617 | 0.09 | 799 | 1.34 | 981 | 2.15 | 1163 | 2.71 |
| 85 | -7.73 | 267 | -3.48 | 449 | -1.41 | 631 | 0.21 | 813 | 1.40 | 995 | 2.15 | 1177 | 2.71 |
| 99 | -7.35 | 281 | -3.29 | 463 | -1.29 | 645 | 0.27 | 827 | 1.46 | 1009 | 2.21 | 1191 | 2.78 |
| 113 | -6.91 | 295 | -3.10 | 477 | -1.16 | 659 | 0.40 | 841 | 1.52 | 1023 | 2.28 | 1205 | 2.84 |
| 127 | -6.54 | 309 | -2.91 | 491 | -1.04 | 673 | 0.52 | 855 | 1.59 | 1037 | 2.34 | 1219 | 2.84 |
| 141 | -6.16 | 323 | -2.73 | 505 | -0.91 | 687 | 0.59 | 869 | 1.65 | 1051 | 2.40 | 1233 | 2.90 |
| 155 | -5.79 | 337 | -2.54 | 519 | -0.79 | 701 | 0.71 | 883 | 1.71 | 1065 | 2.40 | 1247 | 2.90 |
| 169 | -5.41 | 351 | -2.35 | 533 | -0.66 | 715 | 0.77 | 897 | 1.76 | 1079 | 2.46 | 1261 | 2.90 |

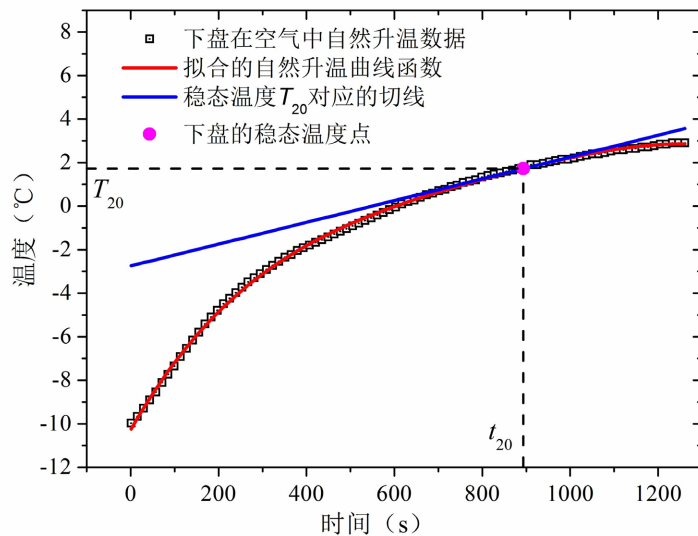


Figure 4. Natural heating curve and tangent of steady-state point T_{20} for the lower copper plate

图 4. 下铜盘自然升温曲线和稳态点 T_{20} 的切线

$$T = -1.093 \times 10^{-11} t^4 + 3.657 \times 10^{-8} t^3 - 4.857 \times 10^{-5} t^2 + 0.03542t - 10.27$$

上式对时间 t 求导，并且代入下铜盘稳态温度 T_{20} 所对应的时间点 t_{20} ，于是，得到下铜盘稳态点 T_{20}

的温度梯度 $\left. \frac{\Delta T_2(\text{自然})}{\Delta t} \right|_{T_2=T_{20}} = 0.0050 (\text{°C/s})$ 。

将表 2 的数据代入上述导热系数的计算公式(3)，从而得到待测冰样品的导热系数 λ 为 2.260 W/(m·K) 。

并且, 推导得到导热系数的相对不确定度为公式:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left[\left(\frac{\Delta m}{m} \right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h} \right)^2 + \left(\frac{2\Delta R}{R} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{10}}{T_{10} - T_{20}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T_{20}}{T_{10} - T_{20}} \right)^2 + \left(\frac{1}{D+4H} - \frac{1}{D+2H} \right)^2 (\Delta D)^2 + \left(\frac{4}{D+4H} - \frac{2}{D+2H} \right)^2 (\Delta H)^2 + \left[\frac{\Delta \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta t} \right)^2}{\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta t} \right)^2} \right]^{1/2} \right]$$

则导热系数的不确定度为:

$$\Delta\lambda = 2.64 \times 10^{-3} \lambda = 6.035 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \approx 0.006 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

于是得到, 待测冰的导热系数的完整表示如下:

$$\lambda = (2.260 \pm 0.006) \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

与公认纯冰导热系数 $2.200 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 相比, 我们的测量值相对误差如下:

$$\varepsilon = \frac{|2.260 - 2.200|}{2.200} \times 100\% = 2.7\%$$

从而证明我们的实验方法和自制实验装置能够满足精确测量待测样品的导热系数。

Table 2. Given and measured experimental device parameters

表 2. 给定和测量的实验装置参数

| 铜比热容[J/(kg·K)] | 铜盘质量(g) | 铜盘直径(mm) | 铜盘厚度(mm) |
|----------------|-----------|-------------|-------------|
| 385 | 118.1 | 75.02 | 3.04 |
| 冰样品半径(mm) | 冰样品厚度(mm) | 上铜盘稳态温度(°C) | 下铜盘稳态温度(°C) |
| 35.52 | 67.9 | -7.65 | 1.72 |

4.2. 探究上铜盘的制冷温度对导热系数测量的影响

将上铜盘的恒定制冷温度分别设置为 -10°C 和 -15°C , 然后, 分别测量纯冰的导热系数, 实验结果如表 3 所示。

Table 3. Measurement of thermal conductivity of ice under different cooling temperature conditions of upper copper plate

表 3. 在上铜盘的不同制冷温度条件下测量冰的导热系数

| 制冷温度(°C) | 纯冰[W/(m·K)] | 相对误差(%) | 达到稳态的时间(s) |
|----------|-------------|---------|------------|
| -10 | 2.260 | 2.7 | 2497 |
| -15 | 2.300 | 4.5 | 2877 |

由表 3 可知, 当上铜盘制冷温度分别为 -10°C 和 -15°C 时, 测量的纯冰导热系数的相对误差分别为 2.7% 和 4.5%, 因此, 上铜盘的制冷温度对准确测量冰的导热系数的准确性影响很小。这里, 纯冰的导热系数测量值可以记为二者的平均值 $2.280 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。并且, 由表 3 可知, 当其它条件相同时, 上铜盘温度越低,

系统的“冷传导”达到稳态的时间越长。

4.3. 探究 NaCl 盐和白砂糖等杂质对冰的导热系数的影响

这里，我们选取了 NaCl 盐和白砂糖两种杂质，分别制作了质量百分浓度为 0.398%、0.794%、1.186% 和 1.575% 的 NaCl 溶液和白砂糖溶液，并且将其冻制成冰。测量和计算含有不同种类和浓度杂质的冰的导热系数，如图 5 所示。

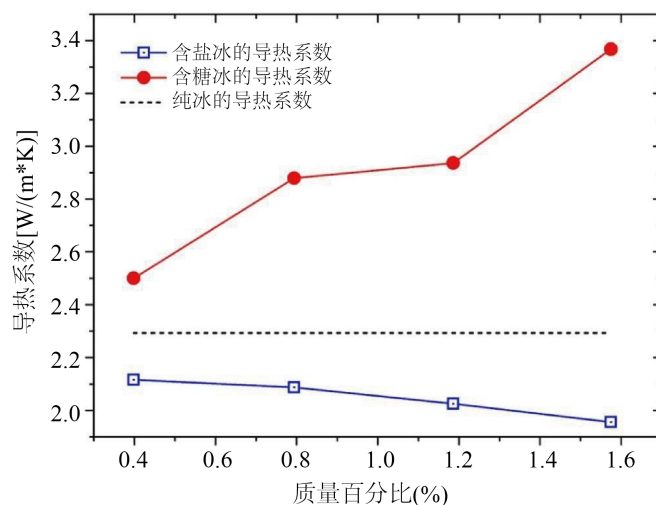


Figure 5. Comparison of thermal conductivity of pure icewith them of impurity ice with different mass percentages of NaCl Salt or white sugar
图 5. 含 NaCl 盐或白砂糖不同质量百分比的杂质冰的导热系数与纯冰的比较

由图 5 可知，一方面，NaCl 盐杂质的加入导致冰的导热系数变小，并且，随着 NaCl 盐质量百分比浓度增加，冰的导热系数逐渐降低。另一方面，白砂糖杂质的加入会导致冰的导热系数变大，并且，随着白砂糖质量百分比浓度增加，冰的导热系数会逐渐增大。

4.4. 探究冰的厚度对杂质冰的导热系数的影响

我们对含 NaCl 盐为 0.794%、1.186% 和 1.575% 三个不同质量百分比浓度的杂质冰，分别选取了两个不同厚度，并且，测量和计算了它们的导热系数，如表 4 所示。

Table 4. Thermal conductivity of ices with different thicknesses made by NaCl solution

表 4. 不同厚度的 NaCl 溶液制冰的导热系数

| 溶液质量百分浓度(%) | 试样厚度(cm) | 导热系数[W/(m·K)] |
|-------------|----------|---------------|
| 0.794 | 5.293 | 1.996 |
| 0.794 | 5.032 | 2.179 |
| 1.186 | 6.025 | 1.949 |
| 1.186 | 5.135 | 2.101 |
| 1.575 | 6.040 | 1.875 |
| 1.575 | 5.042 | 2.036 |

由表 4 数据, 可以看到, 对于含 NaCl 相同质量百分比浓度的杂质冰, 厚度越小, 导热系数越大。我们猜测是因为杂质的引入导致冰的密度分布变得不均匀。含 NaCl 盐的冰具有疏松多孔结构, NaCl 盐分子主要分布在冰的表面附近, 相同浓度下, 冰的厚度越小, 冰的中间层的密度和结构越接近于两侧表面层, 从而导致相同杂质和浓度的冰, 厚度越小, 导热系数越大。

5. 结论

根据冰受热易融化的特性, 基于稳态平板法, 我们推导和验证了可以采用“冷传导”方法测量冰的导热系数。在待测冰样品的导热系数测量中, 采用自制的测量装置, 结合我们推导的导热系数计算公式 (3), 计算得到冰的导热系数为 $2.260 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 与公认的纯冰的导热系数基本一致, 从而验证我们的实验方法和实验装置能够成功地测量和计算冰的导热系数。我们探究了上铜盘的制冷温度对冰导热系数测量精度的影响, 发现上铜盘的制冷温度数值对导热系数测量精度的影响很小, 但是, 当其它条件相同时, 上铜盘温度越低, 达到下铜盘稳态的时间越长。我们探究了两种杂质对冰的导热系数的影响, 发现随着 NaCl 的质量百分比浓度增加, 冰的导热系数会逐渐降低, 然而, 白砂糖杂质的加入会导致冰的导热系数变大, 并且, 随着白砂糖质量百分比浓度增加, 冰的导热系数会逐渐增大。我们还研究了冰的厚度对杂质冰的导热系数的影响, 发现当含有相同质量百分比浓度的 NaCl 时, 冰的厚度越小, 导热系数越大。在后续的实验中, 我们将继续研究其他种类的杂质对冰的导热系数会产生哪些影响。

致 谢

衷心地感谢沈阳航空航天大学理学院物理实验中心给予本文研究工作的支持。

基金项目

2022 年度辽宁省普通高等教育本科教学改革研究项目立项优质教学资源建设与共享项目: 在混合式实验教学中开展跨校修读的探索与实践。2022 年沈阳航空航天大学理学院教改项目: 线上和线下混合式实验教学模式的探索和建设。2023 年大学生创新创业训练计划项目: 基于单片机的多功能导热系数测量装置的设计与研究。

参考文献

- [1] 吴以治, 任大庆, 宋振明, 等. 测量导热系数实验的改进[J]. 物理实验, 2017, 37(10): 18-21
- [2] 李强, 王征. 对“不良导体导热系数测定”大学物理实验的改进和探索[J]. 科技信息(学术版), 2008(23): 94-95.
- [3] 王旭东, 蒋美萍. 稳态平板法测导热系数精度的研究[J]. 大学物理实验, 2011, 24(5): 97-99.
- [4] 王雪珍, 马春光, 谭伟石. 样品厚度对稳态法测定不良导体导热系数实验的影响[J]. 物理实验, 2011, 31(4): 24-27.
- [5] 安艳伟, 谢亮. 稳态平板法测液体导热系数的分析[J]. 大学物理, 2016, 35(5): 19-23.