

文章编号: 1005-4642(2025)07-0013-06

## 高精度测量冰的导热系数

张 倩, 李加乐, 宋一帆, 张玄启, 朱皓天, 高 博, 张俊武

(西安交通大学 物理学院, 陕西 西安 710049)

**摘 要:** 探究了冰面准一维传热融化过程的物理机制, 设计了测量冰的导热系数的方法. 该方法利用数值模拟将传热的冰块在一维方向无限微分切片, 数字化薄片的温度、位置、时间等要素, 将冰块视为结构体数组, 建立新的理论模型, 简化了传统传热模型复杂且难以计算的数学问题处理. 根据该理论模型自制了实验平台, 并验证了该系统可实现冰的导热系数的高精度测量, 实现了数字化、可视化的智能监测. 与常用的热线法相比, 该实验平台无需实时测温, 且结构简单易操作, 性能稳定可靠.

**关键词:** 冰; 导热系数; 融化; 高精度测量

**中图分类号:** O551.3

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.07.003

冰作为地球上分布最广泛的淡水资源形式之一, 其导热系数对于能量传递和物质流动等过程具有重要影响, 是研究极地气候和低温运动的重要参数. 例如, 通过快速测量南极冰芯的导热系数, 可分析冰层对大气热量的响应速度. 若导热系数升高, 可能表明冰层内部杂质(如尘埃、盐分)增多, 加速冰川融化. 因此, 快速准确地测量冰的导热系数可以帮助科学家建立更精准的冰盖热力学模型, 预测海平面的上升趋势. 当前, 已有测量冰导热系数的常规方法为: 以热流计法为代表的稳态传热法和以热线法为代表的非稳态传热法, 但是存在电路复杂、操作不便、成本高等问题<sup>[1-3]</sup>. 其中, 非稳态测量方法中的瞬时热流法通过给平面型待测材料的一面加持久稳定的热流, 测量另一面的温度随时间的变化得到待测物的热扩散系数, 再利用该物质的比热容和密度等数据计算出物质的导热系数, 局限是必须实时准确地测量温度<sup>[4]</sup>.

针对以上问题, 本文提出了基于冰面融化过程的一维传热模型, 通过冰块样品制备结合保温

层设计, 确保实验中的一维热流传热过程, 并在瞬时热流法的基础上利用冰块受热融化导致厚度改变的特性, 恒温加热冰块一面, 测量冰面厚度随时间变化, 进而推导出冰的导热系数, 有效避免了实时测量另一面的温度, 实现了数字化、可视化的智能监测.

### 1 设计原理

导热系数是描述物质导热能力强弱的重要参量, 对于一维热流, 可以认为导热系数  $\lambda$  满足<sup>[5]</sup>:

$$\frac{dQ}{d\tau} = -\lambda \frac{dT}{dx} S, \quad (1)$$

式中,  $S$  为截面积,  $\frac{dQ}{d\tau}$  为物质热流,  $\frac{dT}{dx}$  为温度梯度. 将功率恒定的电加热片覆盖在初始温度已知的方形冰块的端面上(高温端, 相对的一端为低温端), 并开始加热, 如图 1 所示.

高温端从电加热片吸热向低温端一维传热, 冰块升温融化后厚度减小. 测量不同时刻冰块融化相同长度所用的时间并计算时间差, 再利用冰

**收稿日期:** 2025-02-23; **修改日期:** 2025-04-27

**基金项目:** 2021 年第二批产学合作协同育人项目(No. 202102569006); 2022 年第二批产学合作协同育人项目(No. 221001616114323); 2022 年西安交通大学本科教学改革研究项目(No. 22BKJG56); 2022 年西安交通大学本科实验实践与创新创业教育教学改革研究专项(No. 22SJZX03); 2024 年西安交通大学课程思政专项研究项目(No. KCSZ202418)

**作者简介:** 张 倩(1983—), 女, 陕西西安人, 西安交通大学物理学院高级工程师, 硕士, 主要研究方向为物理实验教学及仪器研制. E-mail: springzhang@xjtu.edu.cn

**通信作者:** 高 博(1981—), 男, 陕西西安人, 西安交通大学物理学院教授, 博士, 主要研究方向为凝聚态磁性物理与物理实验教学. E-mail: gaob@xjtu.edu.cn

的导热系数与时间差之间的函数关系,即可推导出冰的导热系数.

非稳态传热过程中,温度分布随时间变化,本实验通过恒定热流作用下冰层融化位移的测量,将温度场分析转化为位移与时间关系,规避传统方法测温难的问题.

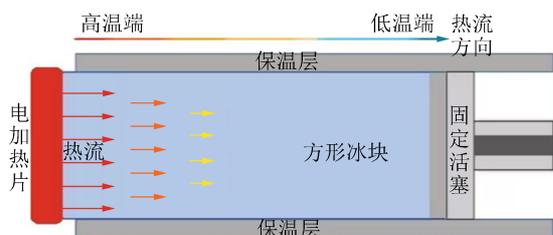


图1 冰块传热过程原理图

### 1.1 一维非稳态传热模型与微元离散化

初始温度为  $T_0$ 、底面积为  $S$  的无限厚冰块,在其一端放置功率恒定的电加热片.当不考虑冰块熔化的过程,对于直角坐标系下的三维情况,传热方程为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{d\Phi}{\rho c d\tau}, \quad (2)$$

式中,  $\tau$  为时间,  $a = \frac{\lambda}{\rho c}$  为热扩散率 ( $\rho$  为密度,  $c$  为比热容),  $\Phi$  为单位体积物质生成的热量.

若考虑常物性、无内热源的非稳态过程,则式(2)可简化为

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right). \quad (3)$$

将式(3)简化至一维坐标系下,有:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (4)$$

初始条件为

$$T(x, 0) = T_0, \quad (5)$$

边界条件为

$$\dot{Q} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{P}{2S}, \quad (6)$$

式中,  $\dot{Q}$  为热流密度,  $P$  为电加热片的功率.

实验中,需要考虑冰块融化传热方向的长度变化对传热过程的影响和冰块截面的边界条件.为此,结合理想模型原理和实际冰块融化一系列物理过程,建立了与之对应的物理模型,通过计算冰块在加热融化过程中所需的参数,进而得出冰的导热系数.

冰块主要经历2个物理过程:冰块与电加热片紧密接触吸收热量而熔化;冰块内部各冰层由于温度差进行的热传导.根据实验设计,可以确保热量流向为准一维.基于微元法沿热流法向将冰块切分为有限微元薄片,薄片内等温,相邻薄片之间存在温差,单个薄片厚度  $R_x = 0.2 \text{ mm}$  (冰块初始长度  $L = 10 \text{ cm}$ ,总切片数  $N = 500$ ).通过网格无关性验证,当  $R_x \leq 0.2 \text{ mm}$  时,模拟结果误差小于1%.在某个时刻,与电加热片接触的薄片从电加热片吸收热量并且通过热传导向低温端传递热量,当薄片的温度达到冰的熔点而且薄片吸收的热量等于薄片所需的熔化热时,认为此处薄片熔化.每个薄片被看作1个结构体,结构体中包含薄片的温度、位置和时间信息,冰块被看作由一系列结构体元素组合而成的结构体数组,如图2所示.该模型的核心为:将各薄片的物理温变融化过程转化为结构体数字运算,利用计算机模拟输出.

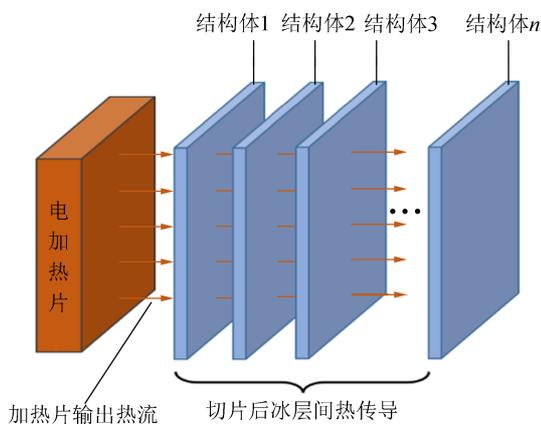


图2 冰块切片原理图

### 1.2 计算机模拟

根据式(1)计算各个薄片的热量交换,当吸收热量达到该层薄片融化所需热量时,认为该薄片已经融化,并输出该融化薄片的位置坐标和累计时间,初始温度  $T_0$ .通过保温箱预冷冰块至目标值(如  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ ),并用埋入式热电偶测量确认;将冰的熔化热标准值  $334 \text{ kJ/kg}$  作为已知物理常数输入模拟程序;导热系数  $\lambda$  为待测量,通过实验数据拟合推导得出.主程序流程如图3所示,整体算法流程分为:建立结构体,设定环境变量,传热过程模拟进行融化判断,输出结果.

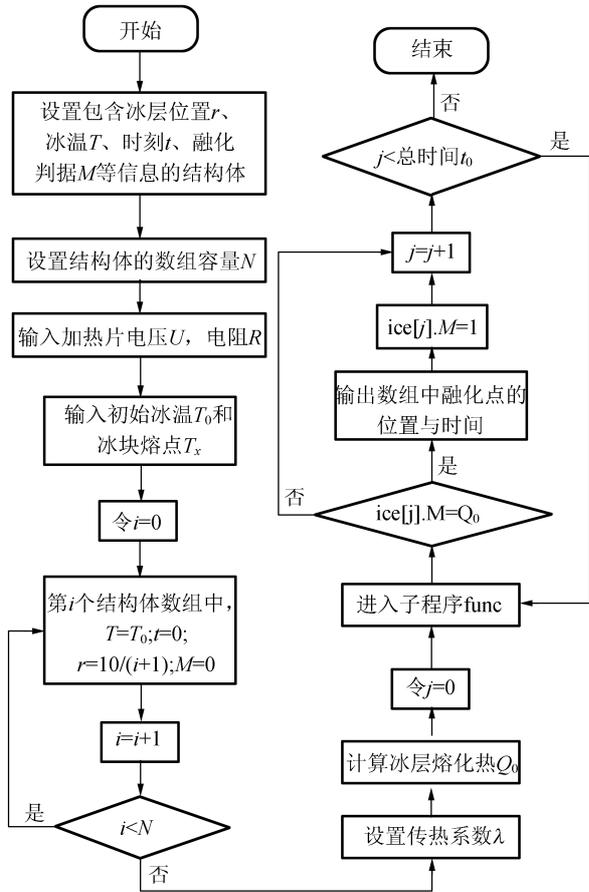


图 3 主程序流程图

1.3 时间微元  $t_x$  与导热系数  $\lambda$  的测量式

冰融化过程中,由于冰块内部传热的进行,定义时间差:

$$\Delta t = t_{01} - t_{12}, \quad (7)$$

其中,  $t_{01}$  为从 0 cm 处融化至 1 cm 处所用的时间,  $t_{12}$  为从 1 cm 处融化至 2 cm 处所用的时间. 在计算机的模拟过程中,将冰块视为多个薄片的集合,各薄片间的热量传递满足热传导公式(1),可得时间微元  $t_x$  传递的热量为

$$\Delta Q = -\lambda S t_x \frac{dT}{dx}. \quad (8)$$

合理地设置  $t_x$  对计算机模拟过程十分重要. 条件设置见表 1,热流可通过式(6)算得,对不同  $t_x$  的模拟计算结果见表 2.

表 1 参量设置

$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	$U / \text{V}$	$I / \text{A}$	$T_0 / \text{C}$	$S / \text{cm}^2$
2.0	10.0	1.0	-30	$2 \times 2$

表 2 计算结果

$t_x / \text{s}$	$t_{01} / \text{s}$	$t_{12} / \text{s}$	$\Delta t / \text{s}$
0.002	371.50	309.60	61.90
0.005	370.99	309.10	61.89
0.01	371.08	309.18	61.90
0.02	371.14	309.22	61.92
0.05	371.60	309.75	61.85
0.1	371.60	309.90	61.70
0.2	372.40	311.00	61.40
0.4	373.60	312.00	61.60

当  $t_x$  趋近于零时,  $\Delta t$  取值 61.90 s. 根据模拟计算精确度考量,选取  $t_x = 0.01$  s.  $\Delta t$  与导热系数  $\lambda$ 、冰块初始温度  $T_0$  和电加热片传递至冰块的热流  $\dot{Q}$  等物理量有关. 取  $T_0 = -30 \text{ C}$ ,  $\dot{Q} = 1.25 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ ,计算机模拟数据见表 3,拟合曲线见图 4.

表 3 导热系数  $\lambda$  与  $\Delta t$  关系

$\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1})$	$t_{01} / \text{s}$	$t_{12} / \text{s}$	$\Delta t / \text{s}$
0.5	323.58	295.66	27.91
1.0	340.06	300.64	39.42
2.0	371.03	309.15	61.88
3.0	396.82	316.18	80.64
4.0	419.85	322.12	97.73
5.0	441.08	326.96	114.12

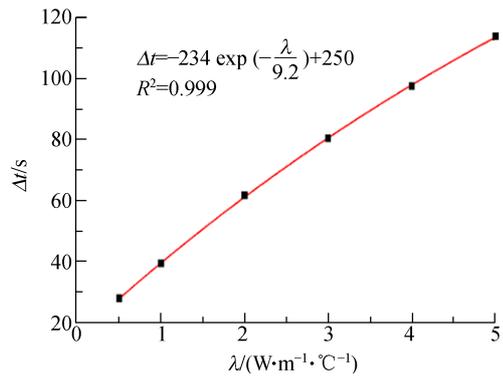


图 4  $\Delta t$  关于  $\lambda$  的拟合曲线

通过以上计算模拟传热过程,则对于任意初始条件的  $T_0$  和  $\dot{Q}$ ,通过分离变量法求解非稳态导热方程,结合边界条件,推导出温度分布随时间的指数衰减形式. 引入冰层融化时间差  $\Delta t$  和  $\lambda$  的关联,最终通过量纲分析得到:

$$\Delta t = -A \exp\left(-\frac{\lambda}{B}\right) + C, \quad (9)$$

其中  $A, B$  和  $C$  为  $T_0$  和  $\dot{Q}$  的函数. 实验过程用恒压源驱动加热片以确保  $\dot{Q}$  为定值, 则  $A, B$  和  $C$  可看作仅为  $T_0$  的函数, 表 4 为不同  $T_0$  对应的拟合结果. 拟合结果中的  $R^2 \geq 0.998$ , 说明曲线拟合合理.

表 4 拟合参数数据表

$T_0/^\circ\text{C}$	$A/\text{s}$	$B/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C})$	$C/\text{s}$	$R^2$
-10	43.44	5.98	48.18	0.999
-20	116.22	7.37	126.16	0.999
-30	234.88	9.22	250.40	0.998
-40	452.63	12.66	474.80	0.999
-50	756.68	15.60	784.76	0.999

对  $A, B$  和  $C$  进一步拟合, 得到:

$$\begin{cases} A = 84.32 \exp\left(-\frac{T_0}{21.60}\right) - 94.51, \\ B = 4.17 \exp\left(-\frac{T_0}{38.50}\right) + 0.44, \\ C = 94.08 \exp\left(-\frac{T_0}{22.24}\right) - 103.11. \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)进行转换, 得到  $\lambda$  的测量表达式为

$$\lambda = B[\ln A - \ln(C - \Delta t)]. \quad (11)$$

其中  $A, B$  和  $C$  取值如式(10)所示.

## 2 实验装置搭建与数字化测量

### 2.1 样品制备

根据准一维传热模型要求, 将去离子水倒入保温箱敞口冷冻, 经过一段时间后, 保温箱上方的水结出无气泡的冰, 用冰刀对圆柱样冰块(图 5)进行切割得到纯冰, 制出本实验所需的理想冰块 ( $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ ).



图 5 切割前圆柱样冰实物图

### 2.2 实验装置

实验装置设计采用对称结构, 如图 6 所示. 套筒固定冰块, 外层为透明的亚克力板材料, 保温

层材料由珍珠棉贴合铝箔而成, 保温层外等间隔排列温度传感器探头阵列, 用以标定冰块初始温度  $T_0$ . 活塞装置确保冰块在水平方向与电加热片紧密贴合, 活塞截面四周留有导流孔排出融化水, 减少二次传热影响. 激光测距仪用来测量冰块融化的长度. 实验操作中, 调节电加热片的加热功率  $P = 1.25 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ .

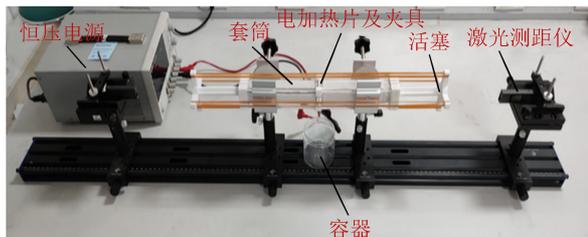


图 6 实验装置

### 2.3 实验设计与测量

设计以下实验步骤:

- 1) 设置实验参数:  $T_0 = -30^\circ\text{C}$ ,  $U = 5.000 \text{ V}$ ,  $I = 1.999 \text{ A}$ .
- 2) 调整支架, 安装激光测距仪器和冰块.
- 3) 打开恒压源同步计时, 每 60 s 记录测距仪读数  $L_{\text{读}}$  和融化长度  $L_{\text{熔}}$ , 测量 10 组以上数据, 结果见表 5.
- 4) 打开 Tracker 软件, 测量活塞移动 1 cm 和 2 cm 所用的时间  $t_{01}$  和  $t_{02}$ , 根据式(11)算出  $\lambda$ .

表 5 部分数据与处理

$L_{\text{读左}}/\text{m}$	$L_{\text{读右}}/\text{m}$	$L_{\text{熔左}}/\text{m}$	$L_{\text{熔右}}/\text{m}$	$\bar{L}_{\text{熔}}/\text{m}$	$t_{\text{熔}}/\text{s}$
0.181	0.164	0	0	0	0
0.188	0.166	0.002	0.002	0.002	120
0.185	0.167	0.004	0.003	0.004	180
0.188	0.169	0.007	0.005	0.006	240
0.190	0.171	0.009	0.007	0.008	300
0.192	0.173	0.011	0.009	0.010	360
0.193	0.174	0.012	0.010	0.011	420
0.195	0.176	0.014	0.012	0.013	480
0.197	0.178	0.016	0.014	0.015	540
0.199	0.179	0.018	0.015	0.017	600
0.201	0.181	0.020	0.017	0.019	660
0.203	0.183	0.022	0.019	0.021	720
0.205	0.185	0.024	0.021	0.023	780

实验中, 每 60 s 记录 1 次冰面位置, 得到融化长度, 将 240~1 000 s 内的数据点, 即融化长度

与所在时刻的对应关系进行描点作图,结果见图 7. 从图 7 可见,实测数据点始终在计算机模拟的  $\lambda=2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  和  $\lambda=3 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$  2 条曲线之间,说明冰的导热系数测量值介于 2~3 之间.

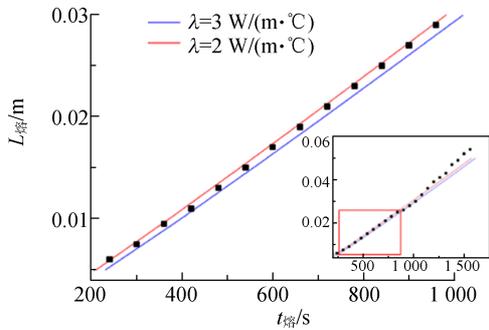


图 7 实验数据图像

### 2.4 Tracker 软件动态追踪测量

为解决实验中约 30 min 的连续测量问题,采用以 Tracker 动态追踪为主,激光测距仪为辅的方式进行测距,如图 8 所示. 这种方法弥补了激光测距仪测量数据无法快速记录的缺点,精度可达 0.1 mm.

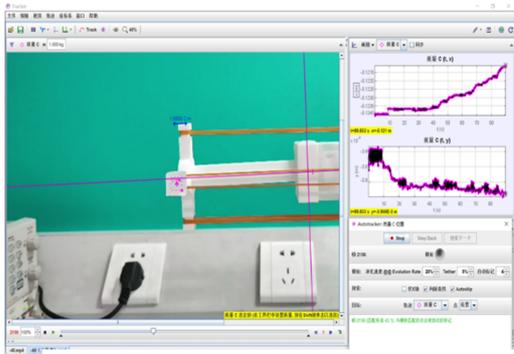


图 8 Tracker 追踪测距

### 3 数据处理

在  $T_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U = 5.000 \text{ V}$ ,  $\dot{Q} = 1.25 \times 10^4 \text{ W}/\text{m}^2$  的条件下,测得数据如表 6 所示. 计算可得  $\lambda = (2.41 \pm 0.05) \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ .

纯净冰在  $-40 \sim -20 \text{ }^\circ\text{C}$  的导热系数为  $2.4 \sim 2.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ <sup>[6]</sup>. 实验所测量的  $-30 \text{ }^\circ\text{C}$  纯冰的导热系数为  $2.41 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ,测量结果在此范围内,说明方案可行.

在实验过程中,冰样制备和环境干扰也会对结果造成一定影响. 通过制备无气泡纯冰样可充

分去除冰样本带来的测量误差,同时可通过严控实验条件尽量去除环境传热干扰,另外可通过设置  $T_0 = -50 \sim -30 \text{ }^\circ\text{C}$  充分减小冰导热系数的温度依赖性产生的误差,以此实现冰导热系数的精确测量.

表 6  $T_0 = -30 \text{ }^\circ\text{C}$  时的实验数据

$t_{01左}/\text{s}$	$t_{12左}/\text{s}$	$t_{01右}/\text{s}$	$t_{12右}/\text{s}$	$\Delta t/\text{s}$	$\lambda/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
366.15	300.08	372.17	303.23	67.50	2.370
373.25	302.17	376.85	302.66	72.14	2.442
373.88	304.22	369.32	298.34	70.32	2.424
369.96	302.65	369.57	300.21	68.34	2.384
367.76	299.75	372.69	302.72	68.99	2.415
371.56	297.45	369.58	299.74	71.98	2.442

### 4 结 论

本文设计并实现了基于冰面熔化过程的一维传热模型测量冰的导热系数,该方法以冰的熔点作为支撑,将测温过程转化为测距过程,微元分析法与计算机数组相结合,利用数组中元素间的运算模拟实验中各微元间的相互联系,将原本复杂且无法实现实测的理论表达式简化为利于实际测量的表达式,同时可为测量冰以及其他低熔点物质的导热系数提供新的思路. 该自制仪器原理简单,实验装置易于实现,适用于演示实验和大学物理实验教学.

### 参考文献:

- [1] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:123-130.
- [2] 李丽新,刘秋菊,刘圣春,等. 利用瞬态热线法测量固体导热系数[J]. 计量学报,2006(1):39-42.
- [3] 孙始财,于得津,刘昌岭,等. 冰生消过程体系导热系数动态变化特性[J]. 制冷学报,2018,39(4):69-74.
- [4] 吴清良,赖燕玲,顾海静,等. 导热系数测试方法的综述[J]. 佛山陶瓷,2011,21(12):20-22.
- [5] 任泽霏,蔡睿贤. 热工手册[M]. 北京:机械工业出版社,2002:20-80.
- [6] BONALES L J, RODRIGUEZ A C, SANZ P D. Thermal conductivity of ice prepared under different conditions [J]. International Journal of Food Properties, 2017,20(S1):610-619.

## High-precision measurement of ice thermal conductivity

ZHANG Qian, LI Jiale, SONG Yifan, ZHANG Xuanqi,  
ZHU Haotian, GAO Bo, ZHANG Junwu

(School of Physics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The physical mechanisms of the quasi-one-dimensional heat transfer process on the ice surface was explored. And a new method to measure the thermal conductivity of ice was designed, which realized the infinite differential slicing for the ice cube in one-dimensional direction over the process of melting by using numerical simulation. The new theoretical model was established by digitalizing the temperature of the thin slice, position, time and other elements, as well regarding the ice cubes as a series of structures array ice. This model simplifies mathematical problems of traditional ice heat transfer models that were complex and difficult to solve. According to the theoretical model, the experimental platform was constructed to realize high-precision measurement of the thermal conductivity of ice. And the intelligent monitoring could be achieved digitally and visally. Compared with the hot wire method, our experimental platform take many advantages, such as simple circuits and stable and reliable perform, and real-time temperature measurement would not be required.

**Key words:** ice; thermal conductivity; melting heat transfer; high-precision measurement

[编辑:龙玉梅]

(上接 12 页)

## Measuring solution concentration and sound velocity based on ultrasonic grating

GUO Yongli<sup>a</sup>, TONG Tong<sup>a</sup>, WANG Hongli<sup>a</sup>,  
CHANG Kaige<sup>a</sup>, ZHU Pengyu<sup>b</sup>, WANG Zhihui<sup>c</sup>

(a. School of Physics; b. School of Energy and Power Engineering;

c. Faculty of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper developed a solution concentration and sound velocity measurement device based on the ultrasonic grating. The device avoided measuring the distance between the ultrasonic grating and the light screen, and used a CCD camera to capture images and measure the stripe spacing. A set of supporting software integrating data calculation, data fitting, and data output was developed using Python to achieve rapid output of experimental results. This device was simple to manufacture, low in cost, easy to operate, and its principle was easily understood. The data processing results could also be digitally displayed. This device could also be used to study the effect of temperature on sound velocity.

**Key words:** solution concentration; sound velocity; ultrasonic grating

[编辑:龙玉梅]