



果蔬导热系数的实验研究

张哲*, 解传有, 张治权, 法静秀, 李昌宁, 计宏伟, 田津津, 许世龙
(天津商业大学 机械工程学院/天津市制冷技术重点实验室, 天津 300314)

摘要:利用 Hot Disk 测定了9种不同种类果蔬在不同低温条件下的导热系数,分析不同可溶性固形物(SSC)含量、含水率(MC)以及不同温度条件对果蔬导热系数的影响。研究发现,在不同温度条件下果蔬的导热系数呈现先下降后上升的趋势;SSC含量越高,导热系数越小,而MC含量越高,导热系数越大。通过研究不同影响因素对果蔬导热系数的影响,可以优化果蔬保鲜过程中的热管理,为成熟果蔬的储存和运输提供理论支撑。

关键词:导热系数;温度;可溶性固形物;含水率

中图分类号:TS255.3

文献标志码:A

文章编号:1674-4942(2023)02-0212-05

Experimental Study on Thermal Conductivity of Fruit and Vegetable

ZHANG Zhe*, XIE Chuanyou, ZHANG Zhiquan, FA Jingxiu, LI Changning,
JI Hongwei, TIAN Jinjin, XU Shilong

(Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Institute of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Hot Disk was used to measure the thermal conductivity of 9 kinds of fruits and vegetables under different low-temperature conditions, and the influences of different soluble solid content (SSC), moisture content (MC), and different temperature conditions on the thermal conductivity of fruits and vegetables were analyzed. The results showed that the thermal conductivity of fruits and vegetables decreased first and then increased under different temperature conditions. The higher the SSC content, the lower the thermal conductivity, while the higher the MC, the higher the thermal conductivity. By studying the influence of different factors on the thermal conductivity of fruits and vegetables, the thermal management in the process of fruit and vegetable preservation can be optimized and the theoretical support can be provided for the storage and transportation of mature fruits and vegetables.

Keywords: thermal conductivity; temperature; soluble solid content; moisture content

果蔬中含有丰富的营养元素,有助于提高人体免疫力^[1-2],因此日摄入果蔬量成为WHO衡量居民健康水平的重要指标^[3]。果蔬产业也逐步成为我国农村经济发展的主导产业^[4]。然而,我国健全的果蔬采后冷链尚未形成,每年贮存及运输过程中造成的经济损失约占行业总损失的30%^[5-6]。基于此,利用先进的技术,尽可能长时间地保持果蔬品质和特性已经成为食品冷藏领域中一项重点课题,其中导热系数是有助于提高果蔬保鲜水平的重要参数。

测量导热系数的方法包括稳态法和瞬态法^[7]。稳态法是根据材料内部温度分布再结合傅里叶定律变换的原理以计算出导热系数的大小。常用的稳态导热系数测量方法有3种:热流计法、防护热流计法、防护热板

收稿日期:2023-03-15

基金项目:国家自然科学基金项目(12172254);天津市自然科学基金项目(21YDTPJC00300),天津市研究生科研创新项目(2022SKY327)

*通信作者:张哲(1975—),天津人,教授,研究方向为食品冷链。Email:zhangzhe@tjcu.edu.cn

法^[8-9]。瞬态法是根据材料表面温度变化、热扩散系数、导热系数三者之间的关系,通过测量材料表面温度变化计算求得样品的导热系数^[10]。Lisowa等研究了温度、含水率(MC)和孔隙率对果蔬导热系数的影响^[11]。Sweat等通过实验测试发现了可溶性固形物(SSC)对果蔬导热系数的影响^[12],但实验时间较早,预测模型覆盖面较小,存在参考值偏差明显等问题。又由于果蔬材料的特性,所以本次实验采用实际测量的方法来获得其导热系数^[5]。

本文实验共选择了9种已达到成熟期且外表没有任何机械损伤的果蔬,并利用Hot Disk热常数分析仪测量9种果蔬在-50~20℃温度变化范围内的导热系数,讨论导热系数随温度的变化关系。对同种果蔬不同含水率(MC)、不同可溶性固形物(SSC)含量用Hot Disk对其导热系数进行测定,分析MC以及SSC含量对其导热系数的影响。

1 材料与方法

1.1 材料

将选取9种具有代表性的果蔬(红富士苹果、黄瓜、胡萝卜、皇冠梨、西洲蜜瓜、茄子、紫薯、土豆、冬瓜)作为本次实验的材料,且都为当季新鲜果实。果蔬都为成熟期且果蔬表面没有任何机械损坏,于采购当天进行实验。

1.2 实验设备

实验中测量的热物性参数为导热系数,由Hot Disk法测量求得。大量研究人员根据测试的不同要求,陆续研发各种板块,使得Hot Disk法在各类任何状态材料的导热系数测量中都能很好地进行应用^[13],其次利用Hot Disk法测导热系数可以大幅度减弱对流换热对测量的影响^[14]。Hot Disk的探头是由镍制作而成,它属于双螺旋结构的一类传感器^[15]。其原理是将一个可同时作为加热源和温度传感器的Hot Disk探头固定在两块固体样品之间,在试样和探头温度恒定后,根据温度变化曲线即可计算出被测样品的热物性参数^[16]。优势如下^[17]:(1)直接测量瞬态热传递,测试时间从几秒到几分钟不等,可以节省大量时间;(2)同静态法相比,接触热阻对它不会造成干扰;(3)优异的机械强度使它在测试过程中很难轻易地损坏;(4)不需要样品做特别的制备,只需样品表面相对地平整;(5)要测试的样品的长度和宽度不小于探针直径的两倍,并且厚度须大于探针的半径。

1.3 实验方法

选取成熟且表面无任何机械损坏的果蔬,洗净放置于室内24 h,使其内部达到温度均匀,将所测果蔬切成不小于2.5 cm的切片,放入恒温恒湿箱的内部。实验前,打开Hot Disk提前进行预热,将果蔬制作成大小分别为2、2、1.5 cm的长方体,再将其切成大小相同的2个长方体。把探头固定在样品架上,将果蔬分别放于探头的两侧,然后用自带的夹具进行稳固,果蔬需要紧紧地贴于探头两侧。设置Hot Disk的软件实验参数,开始进行实验,实验结束,对数据进行分析。

实验选取半径为3.189 mm的5465型探头。实验设定的温度为-50~20℃。中间每隔10℃测一次数据,由于-10℃到0℃会出现果蔬的冻结点,所以这中间间隔变为5℃,为了试验结果的准确性,每个温度都测量3次果蔬的导热系数,最终取3次的平均值作为结果。实验共测量了9种果蔬的导热系数,每种果蔬的实验间隔0.5 h。

2 结果与分析

2.1 温度对果蔬导热系数的影响

在食品科学研究中,导热系数是一个重要的热物理参数,在果蔬的热物性中占据关键地位。导热系数的变化受到多种因素的影响,包括果蔬的形状、结构、组成成分以及果实的均匀性等。文献中显示果蔬的导热系数主要与温度变化、其自身SSC含量以及MC有关。低温有利于果蔬储存,而温度过高时会对果蔬造成热损伤^[18-19],目前对果蔬导热系数的研究都比较粗略,且多集中于0℃以上导热系数的测定。本实验测试了9种不同种类果蔬在-50℃、-40℃、-30℃、-20℃、-10℃、-5℃、0℃、10℃、20℃时的导热系数,针对导热系数随温度的变化进行了具体的分析,并对同种果蔬不同温度时的导热系数进行了相关性分析。

图1-A表示出了红富士苹果、皇冠梨和西洲蜜瓜3种水果导热系数在不同温度下的变化。如图1-A所示,三者都呈现先下降后上升的变化趋势,且都在 -10°C 到 0°C 之间有较明显的变化,三者下降的峰形也基本相同,这是因为水和冰在冻结点的转化而造成的结果。水的导热系数随温度降低而减小;但当水变成冰之后,冰的导热系数远远超过了水,其导热系数却随温度的降低而变大。同时食品的孔隙率也是影响食品导热系数的又一主要因素,冻结过程可能会很大程度上改变食品的孔隙率。所以3种水果冻结后导热系数会有明显的改变。实验还发现由于皇冠梨和西洲蜜瓜的MC相近,变化结果趋于一致,红富士苹果由于MC相对较小,导热系数对温度的反应相对迟缓,整体数值也较其他2种偏低。皇冠梨导热系数从 $0.520\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 变化到了 $2.105\text{ W/m}\cdot\text{K}$,西洲蜜瓜从 $0.548\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 增加至 $2.347\text{ W/m}\cdot\text{K}$,两者的增加率分别为75.3%和76.7%。而红富士苹果的导热系数增加率最小,为64.8%。

图1-B表示出了黄瓜、胡萝卜、茄子、紫薯、土豆、冬瓜6种蔬菜导热系数在不同温度下的变化。如图1-B所示六者都呈现先下降后上升的变化趋势,且都在 -10°C 到 0°C 之间有明显的变化。这同样是由于水和冰在冻结点的转化而造成的结果,所以蔬菜的导热系数在冻结点以上时随温度的降低而下降,在冻结点以下,随温度的降低上升。同时也因为冻结之后的蔬菜孔隙率改变,所以导热系数变化明显。茄子的导热系数较其他5种蔬菜偏低是因为茄子的密度较小,而密度也是影响果蔬导热系数的一个重要因素。通过计算发现,在6种蔬菜中,导热系数增加率最大的是胡萝卜,增加了78.2%,而增加最小的是黄瓜,增加了58.2%。

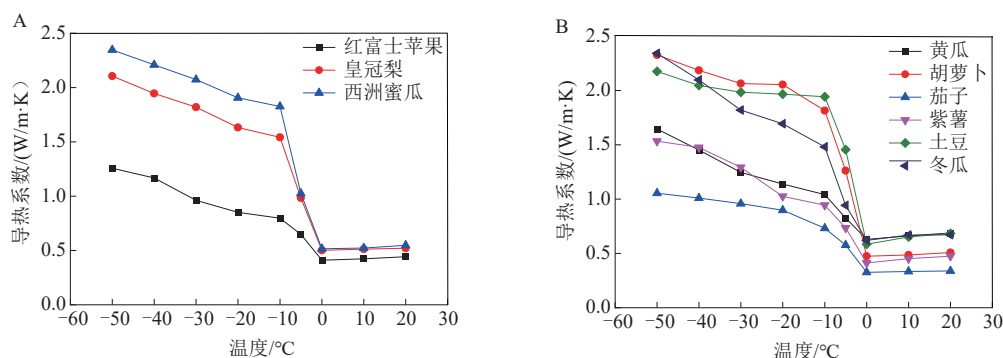


图1 3种水果和6种蔬菜导热系数随温度的变化曲线

Figure 1 Changes of thermal conductivity of 3 fruits and 6 vegetables in different temperature

2.2 SSC对果蔬导热系数的影响

果蔬SSC的含量是果蔬中所有的糖类和可溶性成分的含量,可以通过测量果蔬的SSC含量来判断其是否成熟,以便于进行采摘食用^[20]。实验以处于各个时期的茄子和红富士苹果为果蔬代表,分别测量出它们的SSC含量以及在不同温度下的导热系数,通过实验结果分析SSC含量对果蔬导热系数的影响。

不同成熟时期的红富士苹果SSC的含量也有差别。处于成熟期的苹果SSC含量相对最高,过于成熟时期次之,初果期的含量最低。这与还未成熟的苹果物质累积少,而消耗有机酸含量多有关,过于成熟期由于呼吸作用过于剧烈,所以SSC的含量又下降。图2-A显示的是3种不同时期SSC含量分别为10.2、12.4、13.5的红富士苹果在 -50°C 到 20°C 下导热系数的变化。从图2-A中可以看出,在同一温度下,随着苹果SSC含量的增加,其导热系数逐渐减小。对于MC相近的红富士苹果,SSC含量越少,其细胞内汁液的浓度就越低,导热系数也就越大。也就是说成熟时期苹果的导热系数最小,而初果期苹果的导热系数最大。3种时期苹果导热系数的变化率分别为63.9%、64.8%以及64.3%,整体的变化趋势比较平稳。

不同成熟时期的茄子SSC的含量同样存在差别。处于成熟期的茄子SSC含量相对最高,过于成熟时期次之,成熟初期的含量最低。这与还未成熟的茄子物质累积少,淀粉水解不高有关,过于成熟期由于呼吸作用过于剧烈,所以SSC的含量又下降。图2-B显示的是3种不同时期SSC分别为3.2、3.7、4.2的茄子在 -50°C 到 20°C 下导热系数的变化。从图中可以明显看到,在同一温度下,随着茄子SSC含量的增加,其导热系数逐渐减小。对于MC相近的茄子,SSC的含量越小,其细胞内汁液的浓度越低,导热系数也就越大。3种时期茄子

导热系数的变化率分别为67.9%、67.4%以及69.9%,整体的变化趋势比较平稳。

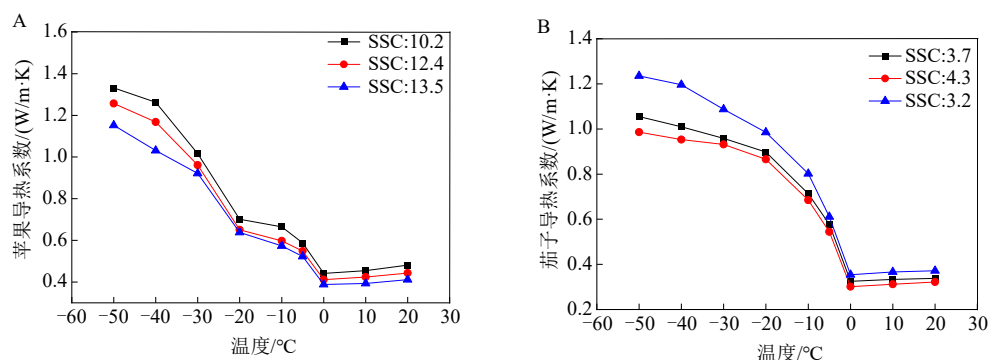


图2 不同SSC苹果和茄子导热系数随温度的变化曲线

Figure 2 Curves of thermal conductivity of apples and eggplants with different SSC with temperature

2.3 MC对果蔬导热系数的影响

MC直接影响着果蔬内部生化反应,整个食品系统在冻结之前是由固体材料及水分组成,MC对果蔬导热系数有明显影响。实验前期,把新鲜的茄子以及红富士苹果放入烘干箱内,设置好烘干时间,然后再放入恒温恒湿箱进行平衡,以得到不同MC的茄子与苹果。实验设定的温度和时间如下:烘干箱温度设置为50℃,烘干时间分别为6 h和10 h,然后放入恒温恒湿箱里平衡1 d,得到MC分别为62.13%和49.65%的茄子,新鲜茄子的MC为94.86%;同时得到MC分别为53.24%和28.39%的茄子,新鲜苹果的MC为86.57%。

图3-A所示为3种不同MC红富士苹果导热系数随温度变化的关系图。可以看出,如果温度不变,红富士苹果的导热系数随着MC的降低而减小,这是因为水或冰的导热系数比苹果中其它成分(如维生素、纤维素等)的导热系数大,所以MC越小,苹果的导热系数也越小。同时也可以发现在同一水分含量下,苹果的导热系数在冻结点时出现了突然的变化,冻结点以上随着温度的升高而增大,而在冻结点以下,随着温度的升高而降低。3种MC的苹果导热系数变化率分别为64.8%、63.2%以及62.5%。

图3-B所示为3种不同MC的茄子导热系数随温度变化的关系图。由图3-B可知,在同一温度下茄子的导热系数随着水分含量的增加而增大,这也是因为与茄子中其他成分相比,水的导热系数要更大,从而水分含量越大,茄子的导热系数也越大。3种MC的茄子导热系数变化率分别为67.9%、66.0%以及64.9%。

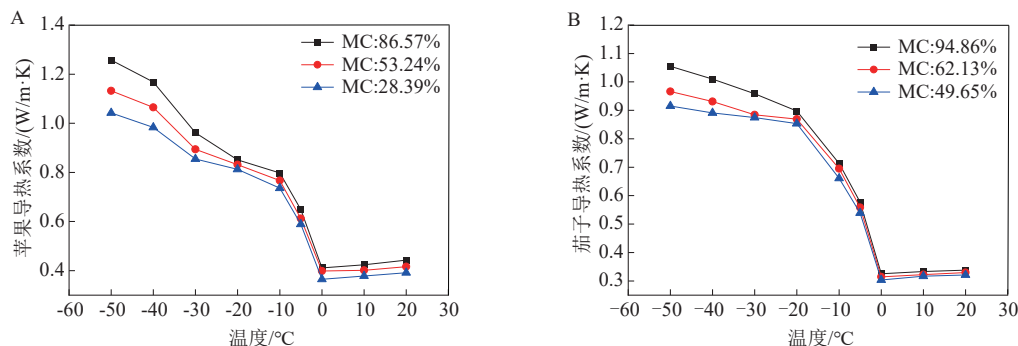


图3 不同MC苹果和茄子导热系数随温度的变化曲线

Figure 3 Curves of thermal conductivity of apples and eggplants with different MC with temperature

3 结论

实验研究了不同种类果蔬的导热系数,通过上述的实验发现:

(1)同种果蔬的导热系数在不同温度下并不相同,呈现出先下降后上升的变化趋势,在-10℃到0℃之

间有较明显的变化。

(2)同种果蔬,在相同的温度下,果蔬的SSC含量越高,其导热系数越小;随SSC含量增加,导热系数呈现出递减的趋势。

(3)同种果蔬,在相同的温度下,果蔬的MC越高,导热系数越大;随MC的增加,导热系数呈递增趋势。

参考文献:

- [1] 叶兴乾,任艳明,陈健乐,等.果蔬营养新功能:益生元[J].中国食品学报,2021,21(6):1-10.
- [2] MAINVIL L A, HORWATH C C, MCKENZIE J E, et al. Validation of brief instruments to measure adult fruit and vegetable consumption[J]. Appetite, 2011, 56(1): 111-117.
- [3] World Health Organization. Fruit and vegetables for health[R]. Kobe: World Health Organization, 2004.
- [4] 谭晶莹.果蔬冷藏工艺与品质衰变理论与实验研究[D].天津:天津大学,2007.
- [5] 张治权.果蔬导热系数影响因素及其内部温度场数值模拟研究[D].天津:天津商业大学,2019.
- [6] 周然.黄花梨运输振动损伤与冷藏品质变化的试验研究[D].上海:上海交通大学,2007.
- [7] 金鹏,陆铿,潘德辉,等.基于热线法的导热系数自动测试仪[J].现代科学仪器,2008(6):18-20.
- [8] 索亚运,李艳宁.防护热板法快速测量物质导热系数[J].纳米技术与精密工程,2017,15(3):193-198.
- [9] 楼希华,毛晓慧,余启贵,等.平板热流计法测定土体导热系数的研究[C]//中国建筑学会工程勘察分会2013年学术大会论文集.昆明:中国建筑学会,2013:230-236.
- [10] 赵顺凯.TPS法测量导热系数的研究[D].杭州:中国计量大学,2019.
- [11] LISOWA H, WUJEC M, LIS T. Influence of temperature and variety on the thermal properties of apples[J]. International Agrophysics, 2002, 16: 43-52.
- [12] SWEAT V E. Experimental values of thermal conductivity of selected fruits and vegetables[J]. Journal of Food Science, 1974, 39(6): 1080-1083.
- [13] 翟德怀.基于Hot Disk的薄板材料导热系数测量方法的研究[D].广州:华南理工大学,2015.
- [14] 王伟,陈奇良,周孝清,等.基于Hot-disk的液体导热系数测量装置实验研究[J].建筑节能,2016,44(5):84-87,108.
- [15] GUSTAFSSON S E. Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(3): 797-804.
- [16] 辛春锁,何小瓦.HOTDISK在低导热材料测试中的重复性分析[J].宇航计测技术,2013,33(2):36-41.
- [17] SULEIMAN B M, GUSTAFSSON S E, BÖRJESSON L. A practical cryogenic resistive sensor for thermal conductivity measurements [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1996, 57(1): 15-19.
- [18] 黄莎,李伟荣,王耀松,等.贮藏温度处理对采后浆果贮藏特性影响的研究进展[J].食品工业科技,2019,40(4):335-340.
- [19] 袁越锦,洪晨,徐英英,等.组合干燥方式下胡萝卜真空脉动蒸汽烫漂工艺优化[J].浙江农业学报,2022,34(1):163-172.
- [20] 王颀,李里特,丹阳,等.果品蔬菜冰点同可溶性固形物含量关系的研究[J].制冷学报,2005,26(1):14-18.