

聚苯乙烯保温箱保温性能及速冻鲜食玉米保温包装效能特性研究

宋海燕¹, 成新新²

(1. 天津科技大学包装与印刷工程学院, 天津 300222) (2. 耐帆包装工程有限公司, 河北廊坊 065001)

摘要: 开发了一种最适合速冻鲜食玉米的保温包装形式, 以延长速冻鲜食玉米保温包装的保温时间。通过热线法研究了保温绝热材料模塑聚苯乙烯 (EPS)、挤塑聚苯乙烯 (XPS) 和硬质聚氨酯 (PU) 三种材料的密度和不同环境温度对材料导热系数的影响, 并通过单因素试验, 研究了保温箱厚度和蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比对 XPS 保温箱保温性能的影响。结果表明: 导热系数先随密度的增大而减小, 然后随密度的增大而增大; 随着环境温度的升高, 导热系数呈增大趋势, 但是不同材料受温度的影响程度不同; 随着厚度的增大, XPS 保温箱的保温性能逐渐增强, 当厚度大于 30 mm 时, 对保温效果的影响明显变大; 随着蓄冷剂与速冻鲜食玉米质量比的增大, 保温箱中心位置的保温时间呈现先增大后下降的趋势。在 23 °C/50% 环境条件下, 40 mm 厚 XPS 保温箱内蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比为 5:8 时, 速冻鲜食玉米的保温时间能够有效达到 36 h 以上。

关键词: 保温包装; 隔热材料; 挤塑聚苯乙烯; 导热系数; 玉米

文章编号: 1673-9078(2016)3-225-231

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.3.036

Thermal Insulation Efficiency of a Polystyrene Box for Thermal Insulation Packaging of Quick-Frozen Fresh Corn

SONG Hai-Yan¹, CHENG Xin-Xin²

(1.College of Packaging and Printing Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

(2.Nefab Packaging Engineering CO., Ltd, Langfang 065001, China)

Abstract: This study developed a suitable box for insulation packaging of quick-frozen fresh corn to prolong its thermal insulation period. The effects of the densities of molded polystyrene (EPS), extruded polystyrene (XPS), and rigid polyurethane (PU) and of environmental temperature on the coefficient of thermal conductivity by using hot-wire method were examined. In addition, the effects of the thickness of the insulation box and mass ratio of coolant and quick-frozen fresh corn on the thermal insulation efficiency of XPS insulation-packaging box were investigated. The results showed that thermal conductivity decreased with an increase in density and increased with an increase in environmental temperature. However, environmental temperature exerted different effects on different materials used for developing the insulation-packaging box. Thermal insulation efficiency of the XPS thermal insulation-packaging box gradually improved with an increase in its thickness. Thermal insulation-packaging box having a thickness of >30 mm showed significantly increased thermal insulation efficiency. However, an increase in the mass ratio of the coolant and quick-frozen fresh corn decreased the thermal insulation period at the center of the insulation box after an initial increase. Thermal insulation period of quick-frozen fresh corn in a 40-mm XPS thermal insulation-packaging box can be effectively extended to >36 hours by maintaining the temperature at 23 °C, humidity at 50%, and mass ratio of the coolant and quick-frozen fresh corn at 5:8.

Key words: thermal insulation packaging; heat-insulating material; extruded polystyrene; coefficient of thermal conductivity; corn

鲜食玉米是指在乳熟后期至蜡熟初期收获的马

收稿日期: 2015-03-04

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划项目 (2015BAD16B05); 天津市科技攻关计划项目 (06YFGPNC03400); 天津市应用基础及前沿技术研究计划 (13JCZJC30900), 天津食品安全低碳制造协同创新中心资助

作者简介: 宋海燕 (1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为食品包装; 成新新 (1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品包装

通讯作者: 宋海燕 (1977-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为食品包装

米^[1], 主要种类有甜玉米和糯玉米。鲜食玉米既鲜嫩又香甜, 不仅营养丰富, 所含营养成分 (如蛋白质、氨基酸、维生素及矿质元素等) 均高于普通玉米, 而且具备诸多医疗和保健功效, 鲜食玉米具有防治肥胖, 降低血压和血脂, 以及预防肠道疾病和癌症发生的功效^[2]。但是鲜食玉米生产季节性强, 其营养价值会随着放置时间的延长而不断下降, 因此, 需采用速冻的加工方法, 以保持其独特的香味和营养价值。

保温包装是指能够确保温度敏感性产品在贮藏、运输、销售直到消费者手中各个环节中始终处于合理的温度范围内,保护产品免受外界热力破坏,保证产品品质的一种特殊包装形式^[3]。对于速冻鲜食玉米来说,在运输过程中需要保证产品的温度保持在 0℃以下,否则,产品会由于温度变化而发生变质,造成严重的经济损失,因此,一般采用冷链运输,但是冷链运输的成本高,而且冷藏车消耗能源多,对空气的污染相对严重。若用普通运输车辆代替冷藏车,则需要采用独立的保温包装,来确保产品在运输过程中品质不变。

Bjorn Margeirsson 等^[4]研究对比了塑料瓦楞箱和发泡聚苯乙烯(EPS)保温箱对批量鲜鱼的保温效果。结果表明,EPS保温箱的保温效果远优于塑料瓦楞箱,并且EPS保温箱更适合用作批量产品的保温包装。Namasivayam 等^[5]研究了尺寸为包装冷冻海鲜的聚苯乙烯(EPS)泡沫箱的保温性能,其中,EPS泡沫箱的内尺寸为 550×375×120 mm,厚度不同(即热阻不同),结果发现,保温箱中心位置与角部位置的产品质量没有明显区别。Seung-Jin Choi 和 Gary Burgess (2007)^[6]运用数学公式计算多层材料总热阻,生热率等热力学参数,对影响保温效果的各因素进行综合评价,比如包装材料、产品与包装的几何尺寸、产品与包装的接触程度。S. P. Singh, Gary Burgess 和 Jay Singh (2008)^[7]介绍了各种保温材料、相变材料以及不同包装结构下保温效果的比较。A. R. East 和 N. J. Smale (2008)^[8]将混合遗传算法与传热模型相结合,为包装易腐物品用的保温箱提供一种快速优化的方法,在维持包装件内温度达到合理范围前提下使包装成本最小化。王益光等^[9]采用内径尺寸为 45×28×22 cm,厚度为 2.5 cm 的聚苯乙烯(EPS)泡沫箱,对杨梅进行不同夹冰量运输试验,结果表明:冰块和果实的比例不同,其致冷保鲜效果也会存在很大差异。汤元睿等^[10]研究了不同相变蓄冷剂对金枪鱼配送箱内鱼肉品质的影响,结果表明:添加相变蓄冷剂能够有效维持配送过程中金枪鱼排品质,且蓄冷材料的相变温度越低,金枪鱼肉品质维持的时间越长。

保温包装主要是由保温材料和蓄冷剂组合的形式来实现的。常用的保温材料有发泡聚苯乙烯(EPS/XPS),硬质聚氨酯(PU),以及某些可以隔绝或降低辐射的材料,如铝箔;常用的蓄冷剂为固体冰、凝胶和干冰。我国对保温包装的研究起步较晚,保温包装的很多技术都处于起步阶段,速冻产品厂家在选用保温包装形式时缺乏可靠的理论依据。本文以速冻鲜食玉米为研究对象确定了一种适合速冻鲜食玉米的

保温包装形式,以延长速冻鲜食玉米包装的保温时间,可为保温包装的结构设计提供参考依据,避免产生过度包装,减少资源浪费,使厂家和消费者的利益都能得到保障。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 保温材料种类及规格

以最常用的保温材料塑料泡沫板为研究对象,主要有模塑聚苯乙烯(EPS)泡沫板、挤塑聚苯乙烯(XPS)泡沫板和硬质聚氨酯(PU)泡沫板。这三种保温材料都是各向同性材料,可以根据国家标准 GB/T10297-1998《非金属固体材料导热系数的测定热线法》^[11]测试它们的导热系数,研究保温材料的导热系数与材料密度和环境温度的关系。样品密度及规格尺寸见表 1。

表 1 样品密度及规格尺寸

Table 1 Densities and dimensions of the materials

样品类别	长×宽×高/mm	密度/(kg/m ³)
EPS	120×80×40	12
		16
		20
		23
XPS	120×80×40	25
		29
		32
		34
		36
PU	120×80×40	30
		37
		42
		46

1.1.2 速冻鲜食玉米

试验中所用的速冻鲜食玉米,全部由张家口天勤农贸有限公司提供,所选玉米形态一致,大小均匀,单个玉米的平均质量约为 267.7 g。由于速冻鲜食玉米需要-18℃低温冷藏,研究过程中采用实验室的低温冷藏箱来储存速冻鲜食玉米。

1.1.3 保温箱及其规格

所用保温箱为 XPS 板材自制同一密度的泡沫保温箱,主要研究包装箱壁厚和蓄冷剂用量对保温箱保温效果的影响。试验中保温箱的规格如表 2 所示,图 1 为 XPS 保温箱的实物图。

1.1.4 蓄冷剂与产品的质量比

为了探究蓄冷剂用量对保温包装保温性能的影响,根据保温箱的内尺寸,在保温箱内容积允许的条件下,研究了五种蓄冷剂与产品的质量比。其中,蓄冷剂采用的是碎冰,装入 PE 自制袋压实,得到的密度仅略小于冰块的密度。表 1~3 为试验中冰与速冻鲜食玉米的质量比。

表 2 XPS 保温箱的规格

Table 2 Specifications of the XPS thermal insulation-packaging box

box			
厚度/mm	密度/(kg/m ³)	内尺寸/mm	外尺寸/mm
17	34	310×230×100	344×264×134
20	34	310×230×100	350×270×140
30	34	310×230×100	370×290×160
40	34	310×230×100	390×310×180
50	34	310×230×100	410×330×200

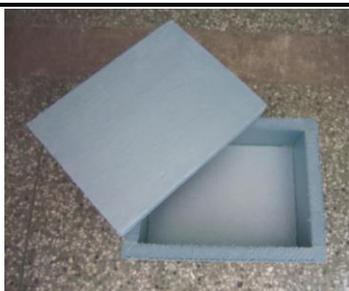


图 1 XPS 保温箱实物图

Fig.1 Image of an XPS thermal insulation-packaging box

表 3 冰与速冻鲜食玉米的质量比

Table 3 Mass ratio of ice and quick-frozen fresh corn

质量比	冰的质量/g	速冻鲜食玉米的质量/g
1:4	560	2240
3:8	840	2240
1:2	1120	2240
5:8	1400	2240
1:1	1680	1680

1.2 试验仪器与设备

TC3000 热线法导热系数仪,西安夏溪电子科技有限公司;SH045A 恒定湿热试验箱,上海实验仪器总厂;T301PDF 温度记录仪,百沃科技上海蔚景实业公司;ETHV-1000-70-3H 恒温恒湿试验箱,巨孚仪器工业股份有限公司;SIM-F140AY65 雪花制冰机,三洋电机(中国)有限公司;MDF-U339-C 低温箱,三洋电机(中国)有限公司;STP-2000 天平,上海花潮有限公司;T6T-50 台秤,天津市仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 材料导热系数的测试原理

导热系数 λ 是衡量物质导热能力的重要参数,其物理意义为:在稳态导热状态下,当材料厚度为1 m、两表面的温差为1 °C(1K)时,单位时间内通过1 m²的导热面积的热量,其单位为W/(m·°C)或W/(m K)。虽然影响导热系数的因素很多,但主要因素是温度和物质的种类^[12]。由于具备测量方法简单、环境要求不高、所需材料易找、测量变量单一等优点,热线法在工程技术和科学研究中得到了广泛的应用。因此,本文采用热线法来测定材料的导热系数。

热线法是测定均质材料导热系数的一种非稳态方法。其原理是将一根电阻丝(即所谓的“热线”)放置在均温的各向同性均质试样中,当热线(电阻丝)以恒定的功率发热时,热线及其附近试样的温度就会随时间升高。依据其温度与时间变化的关系,便可确定试样的导热系数。当热线的加热功率一定时,若被测材料的导热系数高,则生成的热量会较快的传递出去,热线的温升就小;反之,若材料导热系数小,生成的热量散发得会较慢,热线的温升就大。这样测得热线的温升就是加热功率和被测材料导热系数的函数,换言之,只要得到在一定加热功率下热线的温升变化,便可以通过函数关系式求得材料的导热系数^[13]。

根据热线法的测试原理,导热系数的计算公式如下:

$$\lambda = \frac{P}{4\pi L} \times \frac{1}{A} \quad (1)$$

式中 λ -导热系数, W/(m K); $A-\ln t \sim \theta$ 曲线线性区域的斜率, K; P -热线A、B段的加热功率, W; L -热线A、B间的长度, m。

1.3.2 热线法的测试方法

首先,根据国标GB/T 10297-1998规定制备试验样品,每组试样为两个尺寸为40 mm×80 mm×120 mm的互相叠合的长方体,且试样互相叠合的平面平整,以保证热线与试样及试样的两平面贴合良好;然后,将样品放入恒温恒湿箱内,并设定导热系数仪的相关参数;最后,分别测定环境温度为15 °C、25 °C、35 °C、45 °C条件下,不同密度试样的导热系数值。每组试验重复3次。

1.3.3 不同厚度保温箱的保温性能测试

首先,对温度记录仪在电脑上配置,并设置记录的参数,本实验设置的数据记录时间间隔为20 s,警告温度的上限设置为0 °C。然后,在室温下,将冷藏箱中的速冻鲜食玉米放入经24 h预处理过的保温箱内,使保温箱内装满12个速冻鲜食玉米,并将温度记录仪的测量探头置于保温箱的几何中心处,用胶带密封保温箱。最后,将密封好的保温箱放入温度为23 °C、

湿度为50%的恒温恒湿箱内，打开温度记录仪，开始测试。当记录仪温度达到上限0℃时结束试验。将温度记录仪与电脑连接，读取采集到的保温箱内温度数据，获得从初始温度到上限0℃的保温时间，计算温度升高的平均速率。

1.3.4 不同蓄冷剂用量保温箱的保温性能测试

以速冻鲜食玉米为对象，研究不同蓄冷剂用量对其XPS保温箱保温效果的影响。首先，利用碎冰机制碎冰，并称取相同质量的碎冰，分别装入两个自制的薄膜袋中，与一定质量的速冻鲜食玉米一起放入XPS保温箱，如图2所示；然后，将XPS保温箱放入-18℃的冷藏箱预处理24 h，预处理结束后，取出保温箱，将温度记录仪的探头放置在XPS保温箱的几何中心处，并迅速密封保温箱；最后，将密封好的XPS保温箱放入23℃/50%RH的恒温恒湿箱，打开温度记录仪，当温度记录仪的温度达到0℃时，关闭温度记录仪，试验结束。



图2 速冻鲜食玉米保温包装箱

Fig.2 A thermal insulation-packaging box for packaging quick-frozen fresh corn

1.3.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 进行平均值统计和方差分析。

2 结果与讨论

2.1 密度和温度对保温材料导热系数的影响

2.1.1 密度对保温材料导热系数的影响

由图3a至图3d可知，保温材料的密度过大或过小都会导致材料的导热系数增大。当XPS的密度为34 kg/m³时，其导热系数值最小，保温性能最好。PU的最小导热系数对应的材料密度随温度的不同而略有不同：当环境温度为15℃，材料密度为38~39 kg/m³时，其导热系数值最小，保温性能最好；当环境温度为25℃、35℃和45℃时，材料密度为40~41 kg/m³时，其导热系数值最小，保温性能最好。其主要原因是随着密度的增大，空气含气量和空气夹杂物尺寸减小了。在这种情况下通过材料的热流就由固体粒子的

热传导来引导，同时，空气对流就变得微不足道了。因此当材料的密度处于热传导和热对流都相对较强的时候，具有较低的导热系数。

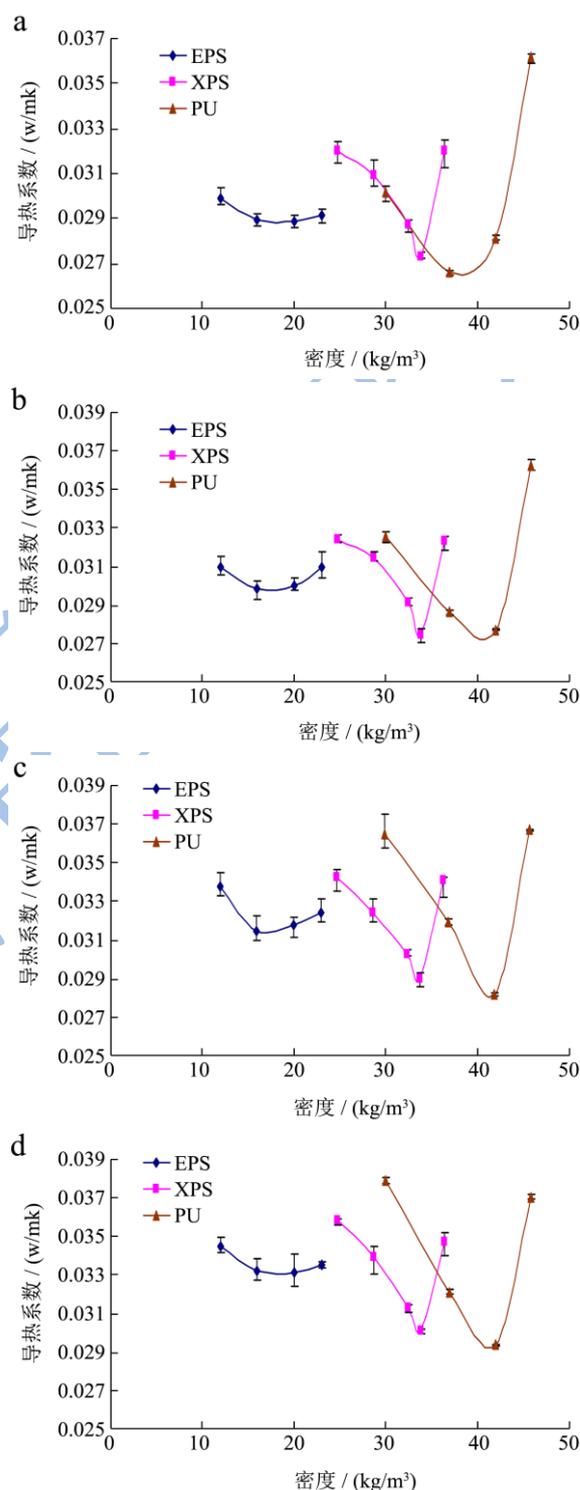


图3 不同温度条件下三种材料的导热系数-密度曲线

Fig.3 Thermal conductivity-density curves of the three materials at different temperatures

注：a. 15℃时三种材料的导热系数-密度曲线；b. 25℃ 时三种材料的导热系数-密度曲线；c. 35℃时三种材料的导热系数-密度曲线；d. 45℃时三种材料的导热系数-密度曲线。

此外,从图 3a 至图 3d 还可以看出,在 25 °C/50%RH 环境条件下, XPS 与 PU 的最低导热系数相差甚少,保温性能相当,但 PU 对应的密度较大,且其价格要高出 XPS 一倍多。所以,对较低成本的速冻产品,建议选择 XPS 作为保温材料。

2.1.2 环境温度对保温材料导热系数的影响

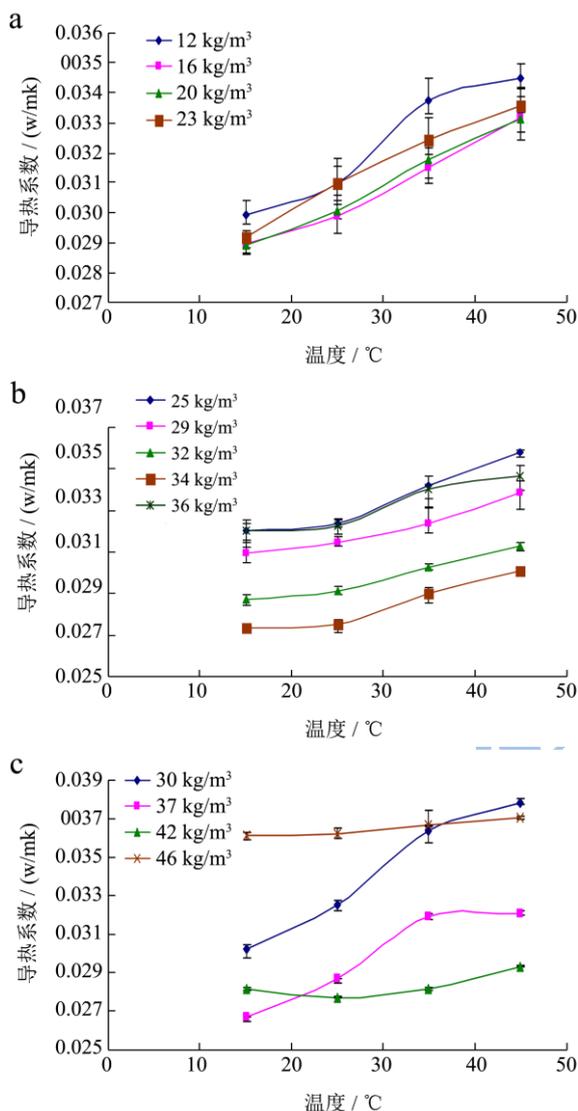


图 4 不同材料导热系数随温度的变化趋势

Fig.4 Trends in the variation of the thermal conductivities of the three materials with temperature

注: a. EPS 的导热系数随温度的变化趋势, b. XPS 的导热系数随温度的变化趋势, c. PU 的导热系数随温度的变化趋势。

由图 4a 至 4c 可知,三种保温材料的导热系数都随着环境温度的升高而增大。当密度分别为 16 kg/m³、20 kg/m³ 和 23 kg/m³ 时, EPS 的导热系数-温度曲线呈线性上升趋势,且斜率较小;而当密度为 12 kg/m³ 时, EPS 的导热系数-温度曲线呈非线性上升趋势,且整体的斜率较大。这表明,密度较小的 EPS 的导热系数更易受到温度影响而发生变化,即密

度较小的 EPS 的保温稳定性较差。

密度为 32 kg/m³、34 kg/m³ 和 36 kg/m³ 的 XPS 导热系数-温度曲线上升较为平缓,即斜率较低,受温度变化的影响较小,保温稳定性也最好;而密度为 25 kg/m³ 和 29 kg/m³ 的 XPS 导热系数-温度曲线斜率较大,保温稳定性较差。这表明,密度较大的 XPS 保温性能较好,其受温度的影响程度也较小,反之亦然。

密度为 30 kg/m³ 和 37 kg/m³ 的 PU 导热系数随温度的升高而增大,且变化趋势显著;密度为 42 kg/m³ 和 46 kg/m³ 的 PU 导热系数也随温度的升高而增大,但变化趋势不太显著。这表明,前者导热系数受温度的影响较大,而后者导热系数受温度的影响则很小。

通过对比, EPS 较 XPS 更易受温度影响,保温稳定性较差;而对 PU 来说,密度较小时受温度的影响较大,密度较大时则几乎不受温度影响,也即密度较大的 PU 保温稳定性更好。整体来看,密度较大的 PU 保温稳定性最好, XPS 略差, EPS 的保温稳定性最差。

2.2 厚度对 XPS 保温箱中心点温升速度的影响

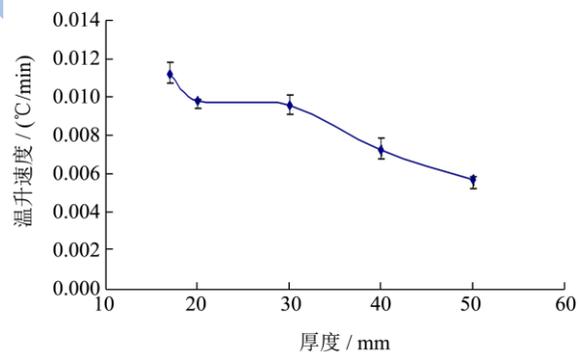


图 5 保温箱几何中心处温升速度-厚度曲线

Fig.5 Rate of temperature increase-thickness curve at the geometric center of thermal insulation-packaging box

图 5 为五种不同厚度保温箱内几何中心处温升速度的变化情况,由图 5 可知,随着厚度增大,温升速度逐渐变小。当保温箱厚度小于 30 mm 时,对流和辐射对保温箱的作用较大,厚度对保温效果的影响较小,因此,当厚度从 17 mm 增加至 30 mm 时,温升速度的变化较小,变化量仅为 0.0016 °C/min。当保温箱厚度大于 30 mm 时,对流和辐射对保温箱的作用很小,厚度对保温效果的影响明显变大,当厚度从 30 mm 增加至 50 mm 时,温升速度的变化量明显增大 (0.004 °C/min),是厚度从 17 mm 增加至 30 mm 时温升速度变化量的两倍多。为了避免对流成为运输过程

中的重要影响因素, 建议保温箱的厚度大于 30 mm。

2.3 质量比对 XPS 保温箱保温性能的影响

表 4 不同质量比时测试点处的初始温度与保温时间

Table 4 Initial temperature and thermal insulation period at the

test point with different mass ratios		
质量比	初始温度/°C	保温时间/min
1:4	-12	1456
3:8	-12	1816
1:2	-12	1959
5:8	-12	2315
1:1	-12	2218

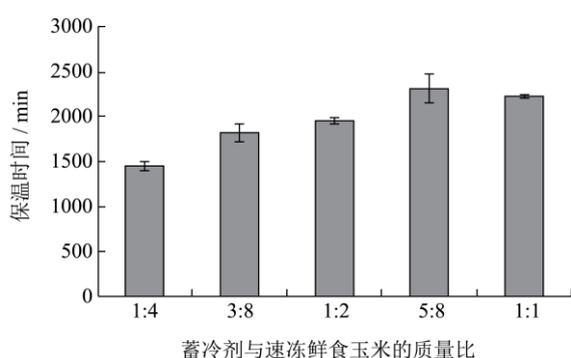


图 6 不同质量比时测试点处的保温时间

Fig.6 Thermal insulation period at the test point with different mass ratios

由表 4 和图 6 可知,随着蓄冷剂所占比例的增加, XPS 保温箱内几何中心处的保温时间先是逐渐增长, 然后略有下降。当蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比从 1:4 上升为 5:8 时, 测试点处的保温时间增加了 859 分钟, 即 14 h 19 min。当质量比为 5:8 时, 测试点处的保温时间最长, 为 38 h 35 min, 达到了厂家 36 h 保温时间的要求。然而, 当质量比达到 1:1 时, 测试点处的保温时间为 36 h 58 min, 较质量比为 5:8 时的保温时间缩短了 1 h 37 min。由此可见, 当蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比为 5:8 时, XPS 保温箱的保温效果最好。

3 结论

3.1 保温材料的导热系数先随密度的增大而减小, 然后随密度的增大而增大。当密度为 17~18 kg/m³ 时, EPS 的导热系数值最小, 即保温性能最好。在 25 °C/50%RH 环境条件下, XPS 与 PU 的最低导热系数相差甚少, 保温性能相当。

3.2 三种保温材料的导热系数都随着环境温度的升高而增大, 但是不同材料受温度的影响程度不同。密度较大的 PU 保温稳定性最好, XPS 保温稳定性略差,

EPS 的保温稳定性最差。通过保温性能对比, 以及性价比分析, 可选择密度为 34 kg/m³ 的 XPS 为速冻鲜食玉米的最佳保温材料。

3.3 随着厚度的增大, XPS 保温箱的保温性能逐渐增强。随着厚度的增大, XPS 保温箱的保温性能逐渐增强。当保温箱厚度小于 30 mm 时, 厚度对保温效果的影响较小; 当保温箱厚度大于 30 mm 时, 厚度对保温效果的影响明显变大。通过试验研究可知, 40 mm 厚的 XPS 保温箱足以使速冻鲜食玉米的保温时间达到厂家要求的 36 h, 因此选择厚度为 40 mm 的 XPS 保温箱作为速冻鲜食玉米的保温包装。

3.4 随着蓄冷剂与速冻鲜食玉米质量比的增大, 测试点的保温时间呈现先增大后下降的趋势。当蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比为 5:8 时, XPS 保温箱的保温性能最好。改善速冻鲜食玉米 XPS 保温箱的保温性能, 不能单纯增加蓄冷剂的用量, 蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比对 XPS 保温箱保温效果的影响是关键因素。

3.5 综上所述, 在 23 °C/50%环境条件下, 40 mm 厚 XPS 保温箱内蓄冷剂与速冻鲜食玉米的质量比为 5:8 时, 能够有效延长速冻鲜食玉米的保温时间, 达到 36 小时以上。

参考文献

- [1] 王岩松. 鲜食玉米种植及加工技术初探[J]. 农业科技与装备, 2012, 4: 1-2
WANG Yan-song. Discussion on the plantation of fresh corn and its processing technique [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012, 4: 1-2
- [2] 刘夫国, 牛丽影, 李大婧, 等. 鲜食玉米加工利用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(23): 375-379
LIU Fu-guo, NIU Li-ying, LI Da-jing, et al. Research progress in processing and utilization of fresh corn [J]. Food Science, 2012, 33(23): 375-379
- [3] 郭晓娟. 基于 ANSYS 的保温包装温度场数值模拟[D]. 无锡: 江南大学, 2011
GUO Xiao-juan. Analysis and simulation for insulating [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2011
- [4] Bjorn Margeirsson, Radovan Gospavic, Halldor Palsson, et al. Experimental and numerical modelling comparison of thermal performance of expanded polystyrene and corrugated plastic packaging for fresh fish [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34: 573-585
- [5] Namasivayam Navaranjan, Graham C. Fletcher, Graeme Summers, et al. Thermal insulation requirements and new

- cardboard packaging for chilled seafood exports [J]. Journal of Food Engineering, 2013, 119: 395-403
- [6] Seung-Jin Choi, Gary Burgess. Practical Mathematical model to predict the performance of insulating packages [J]. Packaging Technology Science, 2007, 20: 369-380
- [7] S P Singh, Gary Burgess, Jay Singh. Comparison of thermal insulated packaging boxes, bags and refrigerants for single-parcel shipments [J]. Packaging Technology Science, 2008, 21: 25-35
- [8] A R East, N J Smale. Combining a hybrid genetic algorithm and a heat transfer model to optimise an insulated box for use in the transport of perishables [J]. Vaccine, 2008, 26: 1322-1334
- [9] 王益光,林美士,杨小平,等.不同冰块与果实数量对杨梅运输贮藏的保鲜效果[J].中国南方果树,2003,2:38-44
WANG Yi-guang, LIN Mei-shi, YANG Xiao-ping, et al. The number of different ice and fruit fresh-keeping effect on the storage and transportation of red bayberry [J]. South China Fruits, 2003, 2: 38-44
- [10] 汤元睿,谢晶,徐慧文,等.相变蓄冷工艺在金枪鱼冷链物流中的应用研究[J].现代食品科技, 2015, 31(1): 173-178
TANG Yuan-wei, XIE Jing, XU Hui-wen, et al. Application of cold storage phase-change technology in cold chain logistics of tuna (*thunnus obesus*) [J]. Modern Food Science & Technology, 2015, 31(1): 173-178
- [11] GB/T10297-1998.非金属固体材料导热系数的测定热线法[S].北京:中国标准出版社,1998
GB/T 10297-1998. Determination of thermal conductivity of nonmetal solid materials by hot wire method [S]. Beijing: China Standard Press, 1998
- [12] 张兴中,黄文,刘国庆.热传递[M].北京:国防工业出版社,2011
ZHANG Xing-zhong, HUANG Wen, LIU Guo-qing. Heat transfer [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011
- [13] 范有明,宁练,时章明,等.热线法快速测量微粒导热系数的研究[J].工业计量,2006,16(6):1-3
FAN You-ming, NING Lian, SHI Zhang-ming, et al. Study on quick measurement of thermal conductivity of solid particles with hot wire method [J]. Industrial Measurement, 2006, 16(6): 1-3