

加气混凝土外表面蒸发换热影响因素实验研究

李 宁, 孟庆林

(华南理工大学 亚热带建筑国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:在热湿气候风洞内,用正交实验研究了一定初始含水率下加气混凝土蒸发换热的影响因素。从对蒸发换热量影响的显著性和持久性来衡量,太阳辐射居首,其次是试件厚度,再者是风速,最后是温度,而相对湿度的影响较小,温度和相对湿度的交互作用亦不显著。太阳辐射、风速、温度及试件厚度对材料蒸发换热量影响最显著的水平分别为 400 W/m^2 、 1.5 m/s 、 30°C 、 100 mm 。其原因是太高的辐射和温度导致了材料表层温度过高,表面蒸发过快而“干化”,从而阻碍材料内部分向表层的迁移;而过高的风速和过厚的材料也对其自身蒸发换热产生负面影响。

关键词:蒸发;风洞;影响因素

中图分类号: TU111.2 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2011)04-0140-06

Experimental Analysis on Factors Influencing External Surface Evaporative Heat Transfer of Aerated Concret

LI Ning, MENG Qing-lin

(State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China)

Abstract: Experiment of aerated concrete evaporation under certain initial water content was carried out in the hot-humid climatic wind tunnel. By orthogonal experiment, the influencing factors of evaporative heat transfer are analyzed. Measured from the significant and persistent of impact, solar radiation is the greatest influencing factor, then followed by the sample thickness, air velocity is in the third order, and the last is ambient air temperature. Air relative humidity and the interaction with air temperature have no statistically significant influence. It is observed that the most dramatically significant level of infrared power, air velocity, air temperature and sample thickness on the evaporative heat transfer are 400 w/m^2 , 1.5 m/s , 30°C and 100mm respectively. This is because the increase in infrared power and air temperature may have caused a rapid increase in the temperature at sample surface, resulting in excess water loss of surface layer to desiccation and thus in retarding the interior moisture migrating up to the surface for further evaporation. And over-high air velocity and over-thick material may also have negative influence on evaporation.

Key words: evaporation; wind tunnels; influencing factors

在建筑热工领域,材料外表面换热系数对于建筑能耗模拟和建筑热环境的研究至关重要,各国学者用不同方法对其进行过理论和实验研究。

Jayamaha 分析了太阳辐射强度、风速和表面的环境温度差对换热系数的影响,指出实验期间测得的换热系数与风速直接相关而不遵循太阳辐射强度或温差

收稿日期: 2011-01-09

基金项目: 国家自然科学基金重大国际(地区)合作项目(50720165805)

作者简介: 李宁(1982-),女,博士生,主要研究建筑热环境与节能方向, (E-mail)lyj_study@126.com。

孟庆林(通讯作者),男,教授,博士生导师,主要从事建筑技术科学研究, (E-mail)mengqinglin@163.net。

模式^[1]。天津大学王波通过建立简易实验台模拟实际地面铺装的蒸发过程,探讨了孔隙率、材质及表面颜色对透水地砖蒸发强度及表面温度的影响^[2]。从所查找的文献中可以看出,大多数学者着眼于研究材料在干燥状态下外表面对流换热的规律,然而我们知道,在潮湿状态下,材料与周围环境之间不仅仅存在对流换热,同时还包含了辐射换热、蒸发换热等多种方式,这些换热过程都是依赖外表面特性和室外气象条件而变化的。陈启高、孟庆林、刘艳峰等进行了相关研究,发现潮湿表面换热系数明显大于干燥表面,蒸发换热对材料的影响不容小觑^[3]。

笔者认为,只有对蒸发换热的影响因素有所了解才能对其进行更深入地挖掘,然而类似的研究却只在土壤学和食品干燥领域有所发现。在土壤学方面,王冠丽,刘延玺等采用主成分分析法,得到与沙地土壤蒸发能力有关的11个主成分,并将影响因子分为3类:温度因素、湿度因素、风速因素,指出距地面高2.0 m处的气象因子对土壤蒸发能力的影响最为显著^[4]。刘浩,孙景生等指出在一定的条件下,温室白菜和萝卜棵间土壤蒸发与太阳辐射、气温和相对湿度均呈现指数关系^[5]。王修信等指出,半干旱地区草地水热通量受净辐射影响最大,其次是下垫面与气温之差、下垫面温度,再次是相对湿度(仅对潜热)和气温,而风速影响相对较弱^[6]。Kondo, Saigusa和Sato认为土壤蒸发在其较湿时对风速比较敏感,较干时则不敏感^[7]。问晓梅研究表明,半干旱地区土壤蒸发的形成及蒸发强度受外部气象因素及内部含水量的大小和分布的影响,地表温度和空气温度是影响蒸发量的重要因子,4—2 m相关湿度梯度的影响次之,5 cm土壤含水量和4—1 m空气温度差再次之,空气相对湿度和不同层风速对土壤蒸发量没有明显相关性^[8]。在食品干燥领域,王相友、丁莹等研究了红外辐射与对流联合干燥情况下,外在和内在各种因素对物料脱水的影响,得到辐射强度是影响物料干燥指标的最重要因素,辐射强度越大、辐射距离越近、物料厚度越小、物料的脱水速率就越大;物料初始含水率对干燥速率也有重要影响;对流介质温度变化,不会引起物料降水幅度、干燥速率的明显变化;但对流速度对其有一定影响^[9]。Nuriddinov等研究表明材料温度和干燥速率与材料对辐射能的吸收、干燥室的空气温度和相对湿度有

关,辐射干燥刺激了干燥率的自我控制(self-control)^[10]。Sharma等研究单层洋葱片降速干燥阶段的干燥特性,发现干燥率受辐射能量、空气温度流速的显著影响。当温度升高、流速增大、辐射增强时,干燥速率提高,干燥时间明显缩短^[11],同时,在红外辐射能量和空气温度一定时,提高空气流速反而会增加干燥时间^[12]。Hebbar等指出红外和对流联合干燥的相互增强效果导致蔬菜更高的传质率,水分蒸发时间比单纯对流干燥缩短了48%^[13]。H. Kocabiyik等人在一定红外辐射照度下干燥薄荷叶,发现风速的提高有利于增加干燥速率^[14]。A. I. Martynenk等人研究了影响人参干燥的物理和生理因素后指出,空气温度和根直径对干燥率常数的影响显著,而相对湿度影响微弱^[15]。

鉴于建筑领域鲜有对材料蒸发相关规律的研究,选取加气混凝土这类典型建筑多孔材料,运用风洞技术,从影响其蒸发的外在环境因素和内在因素着手,分析比较它们对材料蒸发换热的作用大小,以期发现一定的规律性。

1 实验概况

1.1 实验台简介

实验在华南理工大学建筑节能研究中心热气候风洞实验台进行。实验台是针对我国湿热地区城市化进程中热岛效应加剧、城市能耗持续增长等问题而专门构建的,用来对多孔建筑材料和环境铺装材料的热湿传递性质进行基础性研究。系统采用全自动电脑控制,通过对温度、相对湿度、风速、太阳辐射(即为环境4因素)相关模拟设备的调节控制,在风洞内部再现室外的气候条件,从而为研究提供便利。

热气候风洞实验台实现了对室外环境4因素小时间步长(min)周期性的全自动模拟与控制。其环境测控系统(EMCS)的主要功能就是对风洞内环境参数反馈数据的采集处理和对环境模拟设备的控制。其控制原理是:系统以PC机为核心,通过USB数据采集模块把环境4参数的模拟信号转换为数字信号并存入计算机,计算机对获取的数字信号进行处理得到控制量,再经过USB控制卡的模数转换,控制风洞内各环境参量的变化。环境测控系统硬件组成如图1所示。实验台各参数控制精度见表1。

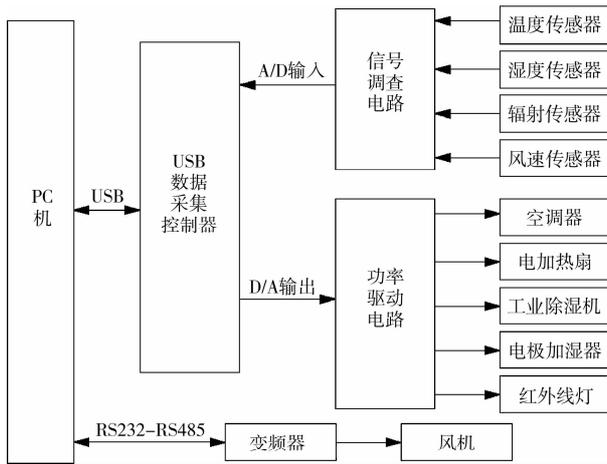


图 1 环境测控系统硬件组成

表 1 实验台各环境参数控制精度表

	控制精度	相对误差范围/%	标准偏差	扩展不确定度($k=2$)
空气温度	0.5 °C	-1.26~2.75	0~0.85 °C	0.10~0.98 °C
相对湿度	5 %	-3.24~4.02	0 %~6.82 %	1.02 %~7.94 %
辐射照度	10 W/m ²	-7.56~7.65	0~12.50 W/m ²	
风速	0.2 m/s		0.09~0.27 m/s	

注:1)以上误差和不确定度的评定均在标准实验状态下,根据不同时期实验得到的大量数据(每个参数共有 1 440 个数据,数据采集时间间隔为 2 min)计算统计得到。

2)由于环境测控系统自身的误差,低辐射时求得的相对误差值很大,如辐射控制值为 10 W/m² 时,若实际得到 15 W/m²,就会导致相对误差达到 50%,故表中给出的范围为控制值在 50 W/m² 以上的照度相对误差范围。同理,0.5 m/s 的风速指令值和 0.6 m/s 的反馈值将导致 20% 的相对误差,故,表中未给出。

3)风速和辐射的扩展不确定度空缺是由于风速刚刚完成闭环控制而二者均未在相关检测机构进行检测校准。

1.2 实验方法简介

选用正交试验设计,根据各因素水平的选取,采用混合水平表 L₁₈(3⁴×6¹)安排实验。详见表 2。为了避免实验因素外的其他因素对实验的影响,并避免实验受区组因素的影响,实验顺序依照随机化原则采用抽签方式决定。

表 2 正交试验因素水平一览表

因素	水平					
	1	2	3	4	5	6
A 温度/°C	25	30	35			
B 相对湿度/%	40	60	80			
C 风速/(m·s ⁻¹)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
D 太阳辐射/(W·m ⁻²)	0	400	800			
E 试件厚度/mm	50	100	150			

实验的数据均由专门软件采集记录,环境 4 因素的数据通过风洞环境测控系统的自开发软件在计算机实时记录并显示。试件蒸发量的测量用电子天平直接称取放在其上的试件及支架重量,重量的减少即为蒸发量。电子天平的精度为 0.01 g,其示值传输至计算机进行实时记录和显示。

试件选取加气混凝土砌块,切割成边长为 100 mm×100 mm 的 3 种试块。试件上表面温度用稳定性好、灵敏度高且价格低廉的 T 型铜-康铜热电偶采集,通过 DARWIN(Data Acquisition and Recording Windows)的输入/输出模块传送至 DC-100 主机,再通过配套软件将数据实时显示在计算机界面,并以 MS-EXCEL 文件格式存储于计算机。对于测温热电偶埋入方法:在试件中心划出深约 1 mm 的浅沟,埋入热电偶的温度测量端,再用同种材料的粉末和 AB 胶的混合物填平测试表面。

试件放入实验段测试前依据相关标准需经过一系列预处理过程,包括预烘干至恒重——侧面刷防水漆及风干——烘干——泡水至所需含水率——包塑料膜,以确保各试件状态统一具有可比性以及仅在上表面进行蒸发。由于实验台进入正式实验前,一般需要有一段稳定时间,待环境 4 参数均达到表 1 中控制精度要求并且天平及温度输出都稳定时方可进行实验。

2 实验数据分析

含水建筑材料在一定的环境条件下,最初期的蒸发对环境的降温效果最显著,所以选取材料蒸发的前 15 h 数据,研究材料在一定初始含水率范围内,随着蒸发的进行,逐时各因素(太阳辐射、风速、空气温度、相对湿度和试件厚度)对蒸发换热量的影响规律。正交试验结果表 3 所示。蒸发换热量为材料蒸发量与蒸发潜热之积,其中,蒸发潜热 L 为: $L=3.14 \times 10^6 - 2.341 \times 10^3 T_s$ (T_s 为试件表面温度,单位为开尔文)测试各工况不同厚度试件的初始含水率(干基)为:50 mm 厚:42.79%~57.40%;

100 mm厚:50.43%~56.97%;150 mm厚:41.57% ~47.39%。

表 3 加气混凝土试件含水蒸发的正交试验结果

试验号	A	B	C	D	E	逐时蒸发换热量/(W·m ⁻²)														
						第 1 h	第 2 h	第 3 h	第 4 h	第 5 h	第 6 h	第 7 h	第 8 h	第 9 h	第 10 h	第 11 h	第 12 h	第 13 h	第 14 h	第 15 h
						1	1	1	1	1	1	69.39	69.38	69.38	69.37	69.36	69.36	69.37	69.37	69.36
2	1	1	2	3	3	454.12	437.08	420.10	402.86	385.40	368.09	350.96	333.96	317.04	300.23	283.43	266.68	249.97	233.28	216.61
3	1	2	3	3	2	595.32	572.96	527.15	517.97	448.30	458.37	385.18	381.43	323.07	292.49	261.34	224.65	216.00	184.48	170.94
4	1	2	4	2	3	373.82	364.63	355.41	346.29	337.02	327.83	318.66	309.44	300.32	291.12	282.04	272.75	263.56	254.40	245.10
5	1	3	5	2	1	378.11	362.88	304.13	384.04	310.46	337.92	297.74	302.25	302.11	283.19	280.32	274.90	252.79	251.13	242.62
6	1	3	6	1	2	167.45	163.37	159.27	155.17	151.08	146.97	142.88	138.77	134.68	130.59	126.48	122.38	118.27	114.18	110.09
7	2	1	6	2	3	440.27	422.61	446.65	393.17	365.69	333.49	309.17	304.43	253.81	234.99	218.39	221.35	169.96	177.54	227.12
8	2	1	5	3	2	526.33	505.57	484.98	464.32	443.72	423.17	402.61	382.05	361.59	341.15	320.67	300.23	279.83	259.41	238.98
9	2	2	1	2	2	458.21	448.83	439.73	430.81	421.88	412.97	404.05	395.15	386.25	377.35	368.51	359.65	350.74	341.84	332.95
10	2	2	2	1	1	116.90	115.12	113.34	111.56	109.78	108.01	106.24	104.46	102.68	100.92	99.14	97.36	95.59	93.81	92.03
11	2	3	4	3	1	504.05	436.26	373.86	316.62	264.69	218.12	176.85	140.81	109.99	84.34	63.84	48.48	38.27	33.18	33.23
12	2	3	3	1	3	234.13	247.11	260.08	273.05	286.07	299.06	312.04	325.02	338.03	351.03	364.05	377.04	390.08	403.07	416.07
13	3	1	4	1	2	208.37	208.33	208.30	208.28	208.26	208.24	208.22	208.19	208.17	208.12	208.10	208.04	208.03	208.00	207.97
14	3	1	3	2	1	406.50	386.72	366.81	346.86	327.00	307.20	287.42	267.65	247.84	228.03	208.25	188.46	168.76	149.13	129.50
15	3	2	5	1	3	214.45	211.56	208.69	205.81	202.75	199.94	196.97	194.15	191.19	188.38	185.40	182.58	179.68	176.80	173.98
16	3	2	6	3	1	764.20	356.55	232.08	172.80	137.80	114.64	98.18	85.85	76.28	68.64	62.40	57.19	52.78	49.02	45.74
17	3	3	2	2	2	361.18	361.02	360.91	360.83	360.75	360.70	360.65	360.60	360.56	360.52	360.49	360.42	360.34	360.31	360.25
18	3	3	1	3	3	204.72	204.22	203.96	203.81	203.64	203.42	203.16	202.90	202.97	203.08	202.94	202.83	202.75	202.69	202.64

用 SPSS 统计分析软件进行数据分析,在主效应方差分析表中比较各因素的显著性 F 检验 sig. 值来判断他们对蒸发换热影响的显著程度, sig. 值 < 0.05 , 表明在 95% 的把握下此因素对结果影响显著;反之,此因素对结果有显著影响的把握性不大或没有显著影响。再从各因素不同水平上蒸发换热量平均值估计表中的 F 检验 sig. 值可以看出此因素在哪个水平上对结果影响较大。将 15 h 分析结果按各因素来分别分析,得到如下各因素对蒸发换热的影响规律。

2.1 温度

如图 2,不同温度的蒸发换热量平均值随时间推移而下降。在整个 15 h 的蒸发过程中,始终都是温度 2 水平(30℃)的蒸发换热量平均值最大,高温 3 水平(35℃)却一直较低,甚至低于低温 1 水平(25℃)的蒸发换热量平均值,且在蒸发的第 3~第 7 h 里,2 水平与 3 水平之间有显著差异。这说明并非温度越高,蒸发换热就越强烈,有时温度高,反而会抑制材料的蒸发换热。借鉴土壤学及食品干燥的相关理论,认为是太高的温度会造成材料表面的温度

也高,使得材料表面水分蒸发过快而“干化”,从而不利于内部水分向表面的进一步迁移,不利于蒸发;同时,在同一标准大气压下,在一定的温度范围内,温度越高,材料的蒸发潜热值就越小,因此蒸发换热量就会降低。

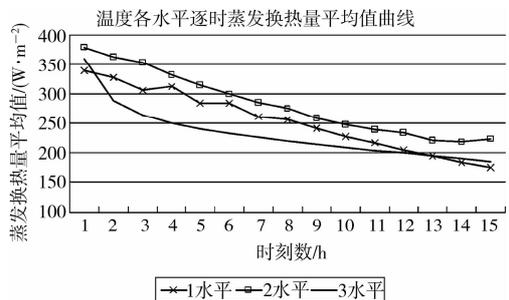


图 2 温度各水平逐时蒸发换热量平均值曲线

2.2 相对湿度

如图 3 所示,不同湿度下材料的蒸发换热量平均值随时间推移而减少。第 1~9 h,中、低湿的蒸发换热量平均值大;第 10~15 h,中、高湿的蒸发换热量平均值大,但在整个 15 h 的蒸发过程中,相对湿度 3 水平的差异均不显著,这说明相对湿度在一般环境下变

动时,其对材料蒸发换热量平均值的影响较小。这也与文献[8]的研究结论相一致。

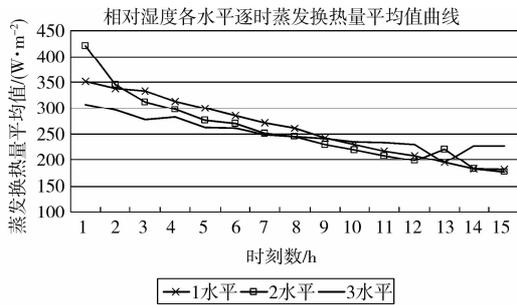


图 3 相对湿度各水平逐时蒸发换热量平均值曲线

2.3 太阳辐射

如图 4,1 水平(没有太阳辐射)在整个 15 h 的蒸发过程中,蒸发换热量平均值一直稳定保持在较低状态,而 2 水平(400 W/m^2)的蒸发换热量几乎一直处于最高位置,且明显高于 1 水平,在蒸发的前 6 个小时里,始终是 1 水平的 2 倍以上,之后差距略微缩小。3 水平(800 W/m^2)变化尤为剧烈,在蒸发的第 1 h,其蒸发换热量平均值达到 1 水平的 3 倍之多,但从第 2 h 开始便迅速降低,到第 12 h,两者差异所剩无几,之后便低于 1 水平,在第 15 h,仅为 1 水平的 0.8 倍。

以上说明,首先,太阳辐射对材料蒸发换热的的影响很显著,没有太阳辐射时,蒸发换热量明显小于有太阳辐射的情况。其次,辐射量越大越利于材料的蒸发换热这种说法只适合于材料蒸发的最初 1~2 h 里,之后便不再适用。究其原因,认为是由于高辐射造成材料表层温度过高蒸发过快而“干化”,从而阻碍内部水分向表层的迁移,影响了蒸发的继续进行。正如土壤学指出,只要上面有 1~2 mm 的干土层,就能使蒸发率显著降低。这与上文温度分析的道理类似,只是辐射对材料表面加热升温的作用远远大于温度的热传导作用,故辐射对材料蒸发换热的的影响远远大于温度,此结论与食品红外干燥的研究亦有相通性^[9]。

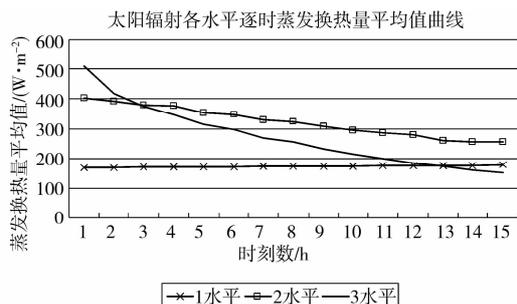


图 4 太阳辐射各水平逐时蒸发换热量平均值曲线

2.4 风速

从图 5 中可以看出,不同风速下材料的蒸发换热量平均值随时间推移而减少。3 水平风速(1.5 m/s)的材料蒸发换热量平均值几乎一直居于首位,且始终保持与低风速 1 水平(0.5 m/s)的显著差异。4 水平(2.0 m/s)和 6 水平(3.0 m/s)风速对蒸发换热的影响不如其他水平那样稳定,二者仅在最初几小时对蒸发换热有较为突出效果,之后便明显减弱,甚至对应的蒸发换热量平均值远远低于其他水平,尤以 6 水平最甚,而其他水平的蒸发换热量平均值随着时间推移均表现为较稳步下降。具体来看,在蒸发开始的第 1 h,风速最大,蒸发换热量平均值也最大,但不同风速对材料蒸发换热的影响并不显著。从第 2 h 开始,均为 3 水平(1.5 m/s)对蒸发换热的影响最大,其次是 5 水平(2.5 m/s),且最高风速 6 水平(3.0 m/s)的蒸发换热量平均值与 2 水平(1.0 m/s)相差无几,甚至低于 2 水平的值,并从第 4 h 开始几乎等同于或小于 1 水平(0.5 m/s)的值。第 12~第 15 h,所有不同风速对材料蒸发换热量的影响又变得不再显著起来。

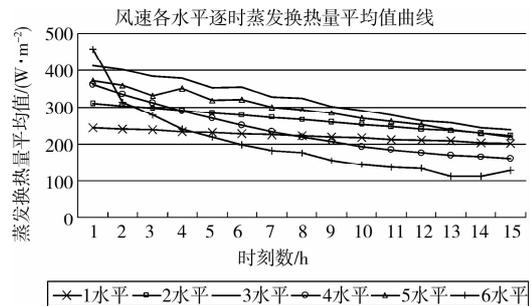


图 5 风速各水平逐时蒸发换热量平均值曲线

可见,较高风速有利于蒸发换热,但并非单纯的风速越高,材料的蒸发换热量就越大。风速过大对材料的蒸发换热也会产生负面影响。

2.5 试件厚度

从图 6 中可以看出,环境 4 因素各水平在不同试件厚度下的总体变化规律:

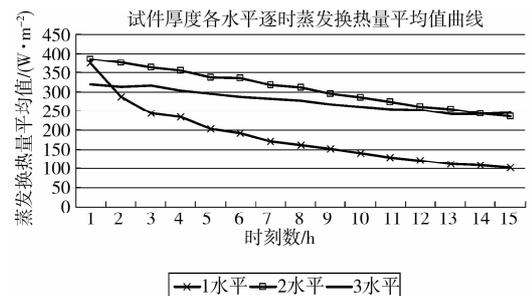


图 6 试件厚度各水平逐时蒸发换热量平均值曲线

2 水平(100 mm)对材料蒸发换热的的影响最显

著,1水平(50 mm)对其影响的变化最为剧烈,3水平(150 mm)却最为平稳。具体来说,2水平的蒸发换热量平均值总居于首位,在蒸发的第1 h,其值略大于1水平而两者均大过3水平。从第2 h开始,3水平与2水平的差距在逐渐缩小,而1水平与2水平的差距却明显拉大直至第5 h开始保持此差值直到结束。2水平的蒸发换热量平均值与1水平除开始2 h外均有显著甚至极显著差异。

总之,材料厚度薄,蒸发换热量势必很小;而厚度过厚在材料蒸发的相当长一段时间内,对其蒸发换热的影响也未必最显著。在食品加工领域,非稳态干燥动力学方程以及固体内水分扩散理论均表明:材料厚度与干燥速率成相反的比例关系。大量的实验及理论研究也得到:材料吸收的能量随着材料厚度的增厚而降低,其厚度影响着材料的降水幅度、干燥速率等指标。虽然建筑材料与用于干燥的食品加工材料性质有所差异,但鉴于其蒸发主要发生在材料表面较浅的区域,笔者认为,食品干燥理论对此还是有一定借鉴意义的。

3 结语

1)从对蒸发换热影响的显著性和持久性来衡量,太阳辐射对其影响最大,紧接着是试件厚度,其次是风速的影响,最后体现出的是温度的影响,而相对湿度大小对材料蒸发换热量平均值的影响较小。温度和相对湿度的交互作用不足以对蒸发换热产生明显显著影响。

2)分析得到,太阳辐射、风速、温度及试件厚度对材料蒸发换热量影响最显著的水平分别为:400 W/m²、1.5 m/s、30 °C、100 mm。

3)太阳辐射对材料蒸发换热的影响很显著,而辐射量越大对材料的蒸发换热影响越显著仅在蒸发的最初2 h适用,随后起主导作用的均为中档辐射量(400 W/m²);且并非温度越高,蒸发换热量平均值就越大;分析两者原因,认为是过高的辐射和过高的温度导致了材料表层温度过高,表面蒸发过快而“干化”,阻碍材料内部水分向表层的迁移而造成。

4)过高的风速对蒸发换热的有利影响仅在最初几小时较为显著,之后便明显减弱,甚至对应的蒸发换热量平均值远远低于其他水平,可见,风速过大对材料的蒸发换热也同样会产生负面影响。

5)100 mm厚加气混凝土试件的蒸发换热量平均值基本始终保持为最大,过厚的材料反而不利于其内部水分的蒸发。

6)下一步研究有必要将材料不同初始含水率的影响考虑在内。

参考文献:

- [1] JAYAMAHA S E G, WIJEYSUNDERA N E, CHOU S K. Measurement of the heat transfer coefficient for walls [J]. *Building and Environment*, 1996, 31(5): 399-407.
- [2] 王波, 霍亮, 高建明. 透水性地砖蒸发试验研究[J]. *四川建筑科学研究*, 2004, 30(3): 102-104
WANG BO, HUO LIANG, GAO JIAN-MING. Evaporating test researches of porous brick [J]. *Sichuan Building Science*, 2004, 30(3): 102-104.
- [3] 刘艳峰, 刘加平. 建筑外壁面换热系数分析[J]. *西安建筑科技大学学报*, 2008, 40(3): 407-412.
LIU YAN-FENG, LIU JIA-PING. Study of heat transfer coefficient at exterior building surface [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2008, 40(3): 407-412.
- [4] 王冠丽, 刘延玺, 孙铁军, 等. 基于主成分分析法的土壤蒸发能力影响因子研究[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36(11): 4369-4370, 4398.
WANG GUAN-LI, LIU YAN-XI, SUN TIE-JUN, et al. Research on the factors influencing soil evaporation ability based on principal component analysis [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(11): 4369-4370, 4398.
- [5] 刘浩, 孙景生, 段爱旺, 等. 日光温室萝卜棵间土壤蒸发规律试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(1): 176-180.
LIU HAO, XUN JING-SHENG, DUAN AI-WANG, et al. Experiment on soil evaporation of radish in sunlight greenhouse [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(1): 176-180.
- [6] 王修信, 刘馨, 陈声海, 等. 半干旱地区草地水热通量与环境因素及相关性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008, 16(5): 770-777.
WANG XIU-XIN, LIU XIN, CHEN SHENG-HAI, et al. Correlation analysis of water and heat fluxes with environmental variables over lawn in semi-arid area [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008, 16(5): 770-777.
- [7] KONDO J, SAIGUSA N, SATO T. A model and experimental study of evaporation from bare-soil surfaces. [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1992, 31(3): 304-312.
- [8] 问晓梅. 半干旱地区降露水和蒸发特征研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2009.

(下转第156页)

1997, 35(5):279-285.

- [10] KENGNE NOUMSI I M, AKOA A, BEMMO N, et al. Potentials of sludge drying beds vegetated with cyperus papyrus L. and echinochloa pyramidalis(LAM.) hitche. & chase for faecal sludge treatment in tropical regions [C]//Proceeding of 10th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Centro Cultural de Belém, September 23-29, 2006. Lisbon; MAOTDR, 2006.
- [11] COOPER P, WILLOUGHBY N, COOPER D. The use of reed-beds for sludge drying[J]. Water and Environment Journal, 2004, 18(2):85-89.
- [12] KOOTTATEP T, SURINKUL N, POLPRASERT C, et al. Treatment of septage in constructed wetlands in tropical climate Lessons learnt after seven years of operation[J]. Water Science & Technology, 2005, 51(9):119-126.

(编辑 王秀玲)

(上接第 145 页)

- [9] 丁莹. 萝卜远红外干燥的试验研究[D]. 淄博: 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 2009.
- [10] NURIDDINOV KHN, ZAKHIDOV R A, KLYCHEV SHI. Heat pattern in radiation-dried products [J]. Applied Solar Energy, 1994, 30(2):63-65.
- [11] SHARMA G P, VERMA R C, PATHARE P B. Thin-layer infrared radiation drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 67(3):361-366.
- [12] SHARMA G P, VERMA R C, PATHARE P. Mathematical modeling of infrared radiation thin layer drying of onion slices[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(3):282-286.
- [13] HEBBAR H U, VISHWANATHAN K H, RAMESH M N. Development of combined infrared and hot air dryer for vegetables[J]. Journal of Food Engineering, 2004, 65(4):557-563.
- [14] KOCABIYIK H, DEMIRTURK B S. Infrared radiation drying of mint leaves [J]. Journal of Tekirdag Agricultural Faculty, 2008, 5(3):239-246.
- [15] MARTYNENKO A I, BROWN R B, DAVIDSON V J. Physical and physiological factors of ginseng drying[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006, 22(4):571-576.

(编辑 胡玲)