

外保温复合墙体薄空气间层湿度对传热的影响

方 武, 鲁祥友

(安徽建筑大学 环境与能源工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要:研究了合肥地区某典型建筑外保温复合墙体的传热特性,采集了薄空气间层相对湿度和温度及复合墙体热流密度等数据。通过对实验数据的统计分析发现,薄空气间层的空气相对湿度与墙体热流密度的变化存在一定的相关性。对于此现象,分析了其传热机理,认为薄空气间层的空气相对湿度对复合墙体的传热是有影响的。

关键词:薄空气间层;相对湿度;传热

中图分类号:TU761.12 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-4824(2021)06-0112-05

关于外保温复合墙体的传热特性,国内已有文献对其进行了研究^[1],也有文献对此类墙体进行了热湿耦合的数值模拟^[2],但是针对复合墙体空气间层湿度变化对传热的影响还鲜有研究。笔者在合肥地区某建筑现场采集了大量的薄空气间层相对湿度和温度,复合墙体热流密度等数据。经统计分析发现,当空气间层湿度(下文均指相对湿度)变化时,复合墙体的传热也有相应的变化,并且两参数呈负相关特性。通常认为外保温复合墙体的保温层与建筑墙体之间的空气间层保温隔热作用,尤其当空气间层足够薄时,其对流传热弱化到可以忽略不计^[3],这时的传热只剩导热和辐射两种方式,由于空气的导热系数很小,所以辐射传热是薄空气间层的主要传热方式。对此,笔者认为既然辐射传热是空气间层的主要传热方式,那么湿度对传热的影响也一定是辐射传热的主要影响。

1 建筑复合墙体传热实验数据的采集

1.1 复合墙体构造

保温复合墙体的构造是在建筑墙体外加一层

由保温材料制成的保温板,也就是外保温结构,这样建筑墙体和保温板就构成了复合墙体(见图 1)。为了增强保温性能,在建筑墙体和保温板之间留一狭窄的空气间层,在夹层中沿着竖直方向每隔一段距离放置一根龙骨,龙骨和外墙之间的缝隙用密封胶填充,其作用是便于连接固定保温板,同时也能对夹层空气形成隔断,以弱化空气流动减少对流传热。本文实验选用合肥地区某建筑作为研究对象,建筑墙体主要由空心粘土砖构成,外抹水泥砂浆,内涂石灰层及装饰涂料,墙体厚度约为 280 mm。保温板由聚氨酯硬质泡沫作为主材,外表面为铝合金板,内表面为铝箔,总体厚度约为 40 mm。空气间层厚度约为 30 mm,上下两根龙骨距离约为 500 mm。

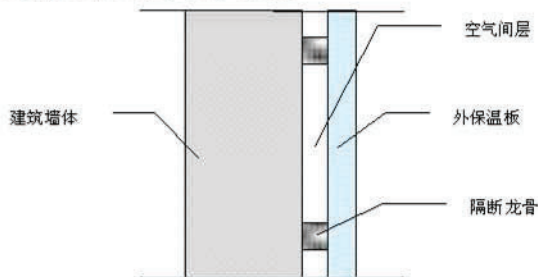


图 1 保温复合墙体构造示意

收稿日期:2021-09-05

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0755)

作者简介:方 武(1973-),男,安徽凤台人,安徽建筑大学环境与能源工程学院实验师,硕士。

鲁祥友(1973-),男,安徽灵璧人,安徽建筑大学环境与能源工程学院教授,博士。

1.2 实验数据的采集

整个复合墙体的厚度约为 350 mm, 墙体高 3.6 m, 宽 6.0 m, 高度和宽度都超过了厚度的 10 倍, 可以认为是一维平壁导热问题。因此, 整个检测采用围护结构现场检测方法^[4], 在垂直墙体方向上布置热流片测热流密度, 布置测温电偶测墙

体壁温及夹层温度, 测温探头和热流片均采用导热性能良好的导热硅胶粘接, 在空气间层内设置湿度探头来测量相对湿度的变化, 总共布置了 12 个测温点, 6 个相对湿度测点和 6 个热流密度测点, 即 6 组测点, 然后求取平均值, 图 2 和图 3 显示了测试传感器的安装^[5]。

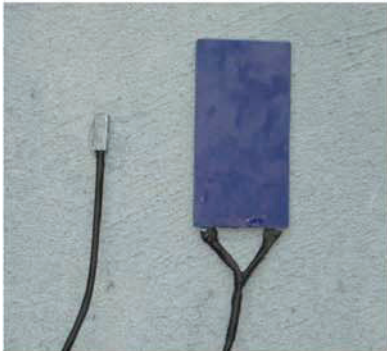


图 2 温度探头和热流片在外墙表面的安装
主要测试传感器技术参数如表 1 所示。



图 3 保温墙体外观及相对湿度和墙面温度探头

表 1 传感器技术参数

传感器种类	热流密度传感器	热电偶温度传感器	室外型温湿度传感器
主要技术参数	测量范围: 0~1800 W/m ² ; 热流系数: 23.26 W/m ² ·mV; 响应时间: 小于 1 S; 符合 GB/T50411、JGJ132 - 2010 等相关标准量	温度范围: -20~85 ℃; 温度分辨率: 0.1 ℃; 响应时间: 小于 1 S; 封装形式: 金属扁平; 符合 GB/T50411、JGJ132 - 2010 等相关标准量	精确度 ±0.1 ℃ at 25 ℃ / ±0.2 ℃ form - 30~70 ℃, ±2 % RH (10~90 %) / ± 4 % RH (0~10 % ; 90~ 100 %)

实验数据采集间隔时间为 30 min, 时间长度为 2019 年整年。由于实验仪器在室内外温差 10 ℃ 以上的条件下测试误差比较小, 这里选取 7、8 月份的夏季测试工况数据来分析空气间层湿度变化对复合墙体热流密度的影响。因为被测建筑夏季连续使用空调, 能满足室内外温差的测试要求, 而冬季没有采暖, 条件不如夏季, 春秋季室内外温差更小, 数据的可信度就更差了。

2 实验数据的统计分析

本文研究的目的是分析空气间层湿度对复合墙体传热的影响, 所以首先采用单因素方差分析来考察湿度对传热的影响, 利用回归分析得出湿度与传热的关系表达式, 然后再考虑其他因素对此传热过程的影响。

2.1 湿度的单因素统计分析

将同步采集的数据在 Excel 中进行方差和回归分析, 结果如表 2 和表 3 所示。

湿度的变化由 49% 变化到 85% (超出此范围的数据采集的太少, 舍去不用), 按 1% 变化进行分组, 总计 860 个数据。在方差分析 (见表 2) 中 F 检验的计算值 (F) 为 3.92, 临界值 (F_{crit}) 为 1.44, 显著性水平 (P-value) 远小于 0.01, 说明湿度的变化对热流密度的影响是显著的。在回归分析 (见表 3) 中拟合的线性方程截距 (Coefficients, Intercept) 为 31.56, 斜率 (Coefficients, 组) 为 -0.34, 说明热流密度随湿度的变化有负相关特性, 图 4 为回归分析得到的热流密度随湿度变化的关系曲线。回归方程的可信度检验, 相关系数检验值 (Multiple R) 为 0.84, 接近 1; 方差检验 F 值为 79.44, 远大于 1, 说明拟合的方程有较高的可信度^[6]。

表 2 湿度的单因素方差分析

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F _{crit}
组间	7461.02046	35	213.1720131	3.921722822	9.17384E-13	1.437365763
组内	44844.29901	825	54.35672607			
总计	52305.31947	860				

表 3 湿度的单因素回归分析

回归统计					
Multiple R	0.836824931				
R Square	0.700275965				
Adjusted R Square	0.691460552				
标准误差	2.423356816				
观测值	36				
方差检验					
	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	1	466.5104	466.510363	79.43768266	2.03992E-10
残差	34	199.6704	5.87265826		
总计	35	666.1807			
	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	
Intercept	31.559608	2.596296	12.1556271	6.29424E-14	
组	-0.343449987	0.038535	-8.912782	2.03992E-10	

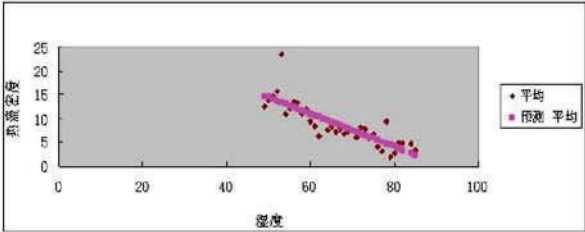


图 4 湿度对热流密度的回归拟合曲线

上述分析可知,湿度存在对传热的影响。然而,这只是对湿度的单因素分析,还不能排除其他因素的影响,即是否存在其他因素与湿度之间交互作用,综合影响了传热? 大平壁传热中温度是

影响传热的主要因素,在复合墙体的夹层空间内温度的变化可以引起湿度的变化,因此实验中我们同步采集了空气间层温度的数据。以下是对空气间层湿度、温度双重影响的传热进行统计分析。

5.2 温湿度的双因素统计分析

双因素分析目的是分离出温度因素对实验结果的影响,从而检验出湿度对传热影响的有效性。因此,首先对温湿度进行双因素回归分析,然后再对温度进行单因素回归分析,比较两次分析的结果,得出是否存在湿度影响传热的结论,Excel 中回归分析的结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 温湿度的双因素回归分析

回归统计					
Multiple R	0.518392				
R Square	0.26873				
Adjusted R Square	0.267026				
标准误差	6.676796				
观测值	861				
方差检验					
	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	2	14056.02	7028.011	157.6508	4.89E-59
残差	858	38249.3	44.5796		
总计	860	52305.32			
	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	
Intercept	-80.4812	8.051169	-9.99621	2.49E-22	
温度	2.364757	0.167019	14.1586	4.72E-41	
湿度	0.214425	0.048745	4.398947	1.22E-05	

表 5 温度的单因素的回归分析

回归统计					
Multiple R	0.502233				
R Square	0.252238				
Adjusted R Square	0.251367				
标准误差	6.747737				
观测值	861				
方差检验					
	df	SS	MS	F	Significance F
	df	SS	MS	F	Significance F
回归分析	1	13193.38	13193.38	289.7608	3.26E-56
残差	859	39111.94	45.53195		
总计	860	52305.32			
	Coefficients	标准误差	t Stat	P-value	
Intercept	-48.1928	3.343534	-14.4137	2.42E-42	
温度	1.790054	0.105159	17.02236	3.26E-56	

比较表 4 和表 5 的回归平方和看出,湿湿度的双因素回归平方和为 14056.02,仅有温度的单因素回归平方和为 13193.38,说明湿度因素的加入的确影响了传热,而且是独立于温度因素的。表 4 中拟合的线性方程温度项系数(Coefficients)为 2.36,湿度项系数(Coefficients)为 0.21;温度项偏回归系数 t 检验值(t Stat)为 14.16,湿度项偏回归系数 t 检验值(t Stat)为 4.40,说明温度比湿度更大地影响了传热。另外,湿度项回归系数在表 3 中是负值,加入温度因素以后成正值(见表 4),说明温度也影响了湿度的变化。

据以上分析可知,温度对传热的影响起主导作用,而湿度也独立地影响传热。

3 传热机理分析

通过以上统计分析可知,空气间层的湿度是独立影响复合保温墙体的传热的,并且两者呈现负相关的特性。湿度是如何影响传热的,下面从导热、对流及辐射三种基本传热方式上分别分析湿度影响传热的机理。

3.1 导热

空气间层的导热属于气体导热问题,气体导热机理是气体不规则热运动时相互碰撞的结果。空气湿度变化时,空气中水蒸气组分会有变化,则空气中水蒸气的气体分子数目也会变化,从而影响整个湿空气气体分子的数目,进而影响导热。然而气体的导热系数很小,干空气 20℃ 的导热系

数为 0.0259 W/(m·K),同样条件下的水蒸气为 0.0194 W/(m·K)^[7],即使湿度变化引起了湿空气气体分子数目的变化,这个变化对导热的影响也是微乎其微的。因此,湿度的变化对空气间层的导热影响很小,可以忽略。

3.2 对流

实验的复合墙体薄空气间层厚度约为 30 mm,上下两根龙骨距离约为 500 mm,厚度与高度的比值为 0.06,远小于无线大空间自然对流要求的下限值 0.3,所以是有限空间的自然对流问题,此时的对流传热与流体性质、两壁温差、空间位置、形状、尺寸比例的等多种因素的影响。实验中多数情况下空气间层两壁的温差都在 10℃ 以内,取上限 10℃,空气温度取均值 30℃,厚度 30 mm,结合其他常量计算出的格拉晓夫准则数仅为 3.98×10^{-11} ,远小于对流发生的下限值 2000,认为这种情况下的空气间层没有对流传热^[8]。Gallegos-Munoz Armando 用 CDF 数值模拟也说明了当空气间层厚度在 30 mm 以下时对流传热很小^[9]。实验中还采集了空气间层内部的空气流速,数值在 0 到 0.08 m/s 之间,风速很小,不足以产生气流流动。

既然薄空气间层内不具备对流换热的条件,那么湿度的变化也不会影响对流传热了。即使具备了对流换热的条件,由于湿度的变化并不引起流速的改变,所以也不会对对流传热产生影响的。

3.3 辐射

复合墙体薄空气间层的辐射传热属于无限大平行平板间的辐射传热问题。由斯蒂芬-玻尔兹曼定律可知,两壁的温差是形成辐射传热的主要因素,然而间层中的湿空气却不能视为透明体,它吸收了部分的辐射而形成了辐射传热热阻,从而影响了辐射传热。

常见的建筑材料在常温下的都是以长波辐射的方式进行热辐射,其发射率在0.8~0.96之间,波长范围在 $0.76\sim 100\ \mu\text{m}^{[10]}$,水蒸气对热辐射具有吸收能力的光带主要集中在波长 $2.55\sim 30\ \mu\text{m}$ 范围内^[11]。由此可以看出,建筑墙体发射的热射线是很容易被水蒸气吸收的。

当薄空气间层内的湿度变化时,其内的水蒸气含量也随之变化。此时从空气间层的高温壁面向低温壁面的辐射传热就会受到空气中水蒸气的影响,在温度不变的情况下,当湿度增加时,水蒸气含量增加,吸收辐射热增强,辐射传热减弱;反之则辐射传热增强。前述实验结果的湿度单因素统计分析也反映了湿度与传热的负相关特性,这主要是湿度对辐射传热造成了显著的影响。

4 结论

根据以上分析得出如下结论:复合保温墙体薄空气间层空气湿度的变化独立地影响着墙体的传热,两者呈现负相关变化,其影响机理主要是阻碍了辐射传热。由此可知,在具有外保温结构的建筑墙体传热计算中应当考虑空气间层湿度的影响。

需要说明的是,本文所分析的实验数据空气间层湿度变化范围在40%和90%之间,并未达到饱和,这和复合墙体良好的密封结构有关,也与复合墙体冷侧壁温没有低于间层空气露点温度有关。如果墙体结构出现渗漏造成雨雪水侵入间层,或者冬季极端低温下造成冷侧壁温低于间层

空气露点温度时,出现水蒸气凝结的相变情况,将使传热条件发生变化,则需要进一步的实验和分析研究。

[参 考 文 献]

- [1] 程海峰,高瑞凯,张虎,等.薄封闭空气间层对外墙保温系统热工性能的影响[J].建筑科学,2014,30(12):43-48.
- [2] 梁超峰,孙斌祥,刘琦,等.空气间层对聚苯复合外保温墙热湿耦合传递的影响[J].建筑材料学报:2012,15(6):803-808.
- [3] 章熙民,任泽霁,梅飞鸣.传热学[M].5版.北京:中国建筑工业出版社,2001:168.
- [4] 田斌守.建筑节能检测技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:197-204.
- [5] 中国建筑科学研究院.公共建筑节能检测标准:JGJ/T 177-2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2013:110,111.
- [7] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006:39.
- [8] 威尔蒂J R.工程传热学[M].任泽霁,罗隽庵,译.北京:人民教育出版社,1982:242.
- [9] ARMANDO G M, ARMANDO B B J, CHRISTIAN V C, et al. Analysis of the conjugate heat transfer in a multi-layer wall including an air layer[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(6): 599-604.
- [10] INCROPERA F P, DEWITT D P. Fundamentals of Heat Transfer[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1985:65.
- [11] SIEGEL R, HOWELL J O. Thermal radiation heat transfer[M]. 2nd ed. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1982:159.

(责任编辑:熊文涛)