

江苏“六大人才”高峰项目资助

江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目资助

多工况均质材料建筑墙体 热湿耦合传递理论及应用研究

黄建恩 吕恒林 冯 伟 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

江苏“六大人才”高峰项目资助

江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目资助

多工况均质材料建筑墙体 热湿耦合传递理论及应用研究

黄建恩 吕恒林 冯 伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以各向同性均质墙体材料构成的多工况多层建筑墙体为研究对象,系统阐述了基于理论模型—数值解法—热湿传递性能参数计算方法为一体的多工况建筑墙体热湿耦合传递理论,包括建筑墙体热湿耦合传递模型及数值解法、建筑墙体材料热湿传递性能参数试验测试、建筑墙体热湿耦合传递规律物理模型试验和数值模拟计算、建筑墙体热湿耦合传递理论、热湿耦合传递效应对建筑墙体热湿特性及能耗的影响以及基于热湿耦合传递效应的建筑墙体热工性能优化等内容。本书阐述的建筑墙体热湿耦合传递理论可为建筑墙体热湿传递过程及其结构优化理论分析、节能研究和应用提供理论和技术支持,同时可为屋面、楼板等非透明围护结构的节能设计提供借鉴和参考。

本书可供从事传热传质、建筑节能、建筑技术研究等领域的科研人员、工程技术人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

多工况均质材料建筑墙体热湿耦合传递理论及应用研究/黄建恩,吕恒林,冯伟著. — 徐州:中国矿业大学出版社,
2016.5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3094 - 2

I. ①多… II. ①黄… ②吕… ③冯… III. ①均质层—墙体结构—
建筑材料—热湿舒适性—研究 IV. ①TU111.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 098725 号

书 名 多工况均质材料建筑墙体热湿耦合传递理论及应用研究

著 者 黄建恩 吕恒林 冯 伟

责任编辑 崔永春 杨 洋

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 江苏淮阴新华印刷厂

开 本 880×1230 1/16 印张 9.25 字数 295 千字

版次印次 2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷

定 价 35.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前言

能源和气候变化问题是人类 21 世纪面临的巨大挑战,节能减排已引起各国政府的高度重视。建筑能耗大约占世界能源消费的 40%,排放的温室气体占与能源有关的总排放量的 33%,实现建筑领域节能减排具有十分重要的经济效益和社会效益。根据近 30 年来能源界的研究和实践,目前普遍认为建筑节能是各种节能途径中潜力最大、最为直接有效的方式,是缓解能源紧张、解决社会经济发展与能源供应不足这对矛盾的最有效措施之一。目前,我国建筑能耗占全国总能耗的 27%,而且随着城镇化和人民生活水平的提高还在快速增加,据预测,到 2020 年这一比例将达到 33%,成为制约可持续发展的重要因素,建筑节能已成为各级政府的重点工作之一。

建筑围护结构是构成建筑空间,抵御环境不利影响的构件。随着全球可持续发展和节能减排意识的不断增强,建筑围护结构再次成为人们关注的焦点。在建筑能耗中约有 60% 为采暖空调能耗,是建筑能耗中最大的部分,其中,围护结构的耗热量占建筑采暖空调能耗的 1/3 以上。合理设计和选择建筑围护结构类型和组成部分是减小采暖空调负荷的有效方法。随着人们对室内环境品质要求的不断提高和建筑节能工作的深入开展,潮湿问题日益受到人们的重视和关注。建筑墙体内部的湿累积甚至结冰会显著降低其热工性能,潮湿问题会导致节能建筑不节能、室内空气品质不高和建筑构配件工作性能的下降。认识其内部的热湿耦合传递规律是正确进行建筑能耗计算和墙体构造设计的基础,研究多工况建筑墙体的热湿耦合传递理论并应用于其热湿特性分析和热工性能优化设计具有十分重要的现实意义。基于多孔介质传热传质学、非平衡态热力学相关理论,综合运用理论分析,物理模型试验和数值模拟计算构建了多工况均质材料建筑墙体热湿耦合传递理论并进行了相关应用研究,丰富和发展了建筑墙体的热湿耦合传递理论。

本书是在江苏省“六大人才”高峰项目“寒冷地区高等学校建筑节能关键技术研究”、江苏省优势学科建设工程项目、江苏建筑节能与建造技术协同创新中心开放基金项目等的研究成果基础上撰写而成的,全书由黄建恩、吕恒林负责整体策划和组织,拟定大纲和审稿,冯伟参与了第 1 章、第 7 章部分内容的撰写工作,其余内容由黄建恩、吕恒林负责撰写。课题组周淑春副教授、丁北斗副教授、尹世平副教授、田国华老师、刘志勇老师、胡波老师、张见超老师等在本书撰写过程中给予的热情指导和帮助,课题组研究生闫加贺、张丙利、陈艳霞、周泰、周永阳、张胜旺、刘朋等在研究试验准备和开展中给予了极大的帮助,在此对他们的工作给予诚挚的感谢。

由于时间仓促,作者水平所限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

作者
2015 年 12 月

变量注释表

A	透湿杯盘口面积, m^2
A_0	试样的表面积, m^2
b	封装边缘的宽度, m
C_i	单位面积保温层施工综合费用, 元/ m^2
C_{ins}	单位面积外墙的保温费用, 元/ m^2
C_{ip}	保温材料价格, 元/ m^3
C_{m}	比湿容量, m^3/kg
C_{oac}	单位面积外墙引起的空调负荷的运行费用, 元/ m^2
C_{oH}	单位面积外墙引起的采暖负荷的运行费用, 元/ m^2
c	比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_e	电价, 元/ $(\text{kW} \cdot \text{h})$
C_{F}	采暖系统能源价格, 元/单位燃料
c_{m}	材料比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{p}	定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{pa}	湿空气的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{pi}	固态冰的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
c_{pl}	液态水的定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
D	水分渗透系数, $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$
D_{l}	液态水扩散系数, $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$
D_{m}	以质交换势为驱动势的水分扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{M})$
D_{T}	温度扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$
D_{v}	水蒸气扩散系数, $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$
$D_{\text{v dry}}$	干杯法测得水蒸气扩散系数, $\text{kg}/(\text{Pa} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$
D_{φ}	以相对湿度为驱动势的液态水扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
d	市场贴现率
EER	空调系统能效比
f	银行贷款利率;
G	初投资首付百分比
H	太阳高度角, $(^\circ)$
H_{w}	材料的比体积焓, J/m^3
h	对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
h_{ad}	吸附或解吸热, J/kg
h_{fg}	水的相变潜热, J/kg
h_{j}	各组分的比焓, J/kg
h_{jk}	水分 j 相和 k 相之间的相变潜热, J/kg
h_{md}	以含湿量为驱动势的表面对流传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

h_{mp}	以水蒸气分压力为驱动势的表面传质系数, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$
h_0	单位质量多孔介质的比焓, J/kg
I	冰阻抗系数
I_n	法线直射辐射强度, W/m^2
I_{nh}	水平面上的太阳直射辐射强度, W/m^2
I_{sh}	水平面上的太阳散射辐射强度, W/m^2
i	能源价格增长率
J_{correct}	修正后的总水分传递量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
J_j	质量流, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
J_{li}	液态水传递量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
J_q	热传导热流, W/m^2
J_{tot}	总水分传递量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
J_v	水蒸气传递量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
K_c	修正系数
k_b	墙体热桥部位的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_e	建筑物窗墙等效传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_{emax}	建筑物窗墙等效传热系数限值, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_m	外墙平均传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_{wall}	墙体主体部位的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
k_{win}	窗的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
LCC	全寿命周期费用, $\text{元}/\text{m}^2$
LCS	寿命周期内净现值, $\text{元}/\text{m}^2$
$LOCT$	地方标准时
l_a	空气层厚度, m
l_s	试样的厚度, m
M	质交换势, $^\circ\text{M}$
M_a	空气的相对分子质量, kg/kmol
M_s	年维修费用与初投资的比值
M_w	水的相对分子质量, kg/kmol
m_d	干燥状态试样的质量, kg
m_i	初始质量, kg
m_{moi}	多孔建筑材料内水分含量, kg
m_0	多孔建筑材料在干燥状态的质量, kg
m_s	墙体表面的吸湿率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
m_w	吸湿(放湿)平衡状态时的试样的质量, kg
m_τ	τ 时刻时试样的质量, kg
N_e	经济性分析年限, a
N_L	贷款期(年)限, a
$N_{\min}$	N_e 与 N_L 的较小值, a
n	计算日在一年中的日期序号
P	多孔材料中并联传递的体积分
P_0	标准大气压, Pa

P_1	现值因数
P_{1ac}	按空调能源价格增长率计算的现值因数
P_{1H}	按采暖能源价格增长率计算的现值因数
P_2	分析年限 N_e 内支出资金总额与初投资的比值
P_a	空气压力, Pa
P_c	毛细压力, Pa
P_g	多孔介质中湿空气的压力, Pa
P_l	液态水压力, Pa
P_N	能耗费用在经济性分析年限 N_e 内总支出的现值因数
P_s	饱和水蒸气压力, Pa
P_{sr}	弯曲液面的饱和水蒸气压, Pa
P_{surf}	墙体表面空气中水蒸气分压力, Pa
P_v	水蒸气分压力, Pa
P_{vis}	墙体内表面的水蒸气分压力, Pa
P_∞	墙体周围空气中水蒸气分压力, Pa
Q_c	单位面积外墙的年空调耗冷量, $\text{kW} \cdot \text{h}/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$
Q_H	单位面积外墙的年采暖耗热量, $\text{kJ}/(\text{a} \cdot \text{m}^2)$
q	导热热流量, W/m^2
q_c	单位面积墙体的空调负荷, W/m^2
q_F	单位面积的围护结构引起的耗热量, W/m^2
q_{fu}	能源低位发热量, $\text{kJ}/\text{单位燃料}$
R	通用气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
R_{air}	空气层阻力, $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})/\text{kg}$
R_m	水分传递过程总的阻力, $(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})/\text{kg}$
R_{re}	再售价与初投资的比值
R_{tw}	墙体主体部位除保温层以外的其他构造层的热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
R_{twb}	热桥部位除保温层以外的其他构造层的热阻, $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$
R_v	水蒸气的气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
r	弯曲液面的曲率半径, m
S	水力学直径, m
s_g	熵产率, $\text{J}/(\text{K} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^3)$
T	热力学温度, K
T_i	冻结温度, K
T_0	室内环境温度, K
T_m	材料热力学温度, K
T_0	标准大气压下自由水的相变温度, K
T_{out}	室外环境温度, K
T_{surf}	墙体表面温度, K
t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
u	材料的质量含湿量, $\text{kg}/\text{kg}_{(\text{干})}$
u_{cap}	毛细饱和含湿量, kg/kg
u_{eff}	有效含湿量, kg/kg

u_j	j 相水分的质量含湿量, kg/kg
u_{tran}	过渡含湿量, kg/kg
$u_{\tau, \text{tran}}$	多孔材料水蒸气和液态水传递特征开始改变时的转换点相对含湿量
V	蒸汽含量, kg/m ³
V_0	自然状态下的体积, m ³
W	多孔材料孔隙内空气含湿量, kg/kg _(干)
W_{sat}	多孔材料孔隙内饱和空气含湿量, kg/kg _(干)
WWR	窗墙比
w	体积含湿量, kg/m ³
x	空间坐标, 保温层厚度, m
α	太阳方位角, (°)
α_i	建筑材料内部第 i 组分所占有的体积比
β	壁面的倾斜角(壁面与水平面的夹角), (°)
γ	壁面的方位角, (°)
ΔC_{oac}	保温后单位面积外墙每年节约的空调费用, 元/m ²
ΔC_{oH}	保温后单位面积外墙每年节约的采暖费用, 元/m ²
ΔM_{τ}	τ 时刻单位面积的试样质量增量, kg/m ²
Δm	质量变化, kg
ΔP_v	试样两侧水蒸气分压力差, Pa
ΔQ_c	增加保温层后节约空调耗冷量, (kW · h)/(a · m ²)
ΔQ_H	增加保温层后节约采暖耗热量, kJ/(a · m ²)
$\Delta \tau$	时间变化, s
δ	太阳赤纬角, (°)
ϵ	空隙率
ζ	热传递并联部分所占的份额
η_1	采暖系统设备运行效率
η_2	采暖管网输送效率
Θ	温度梯度系数, kg/(m ³ · K)
θ	太阳光线与壁面法线的夹角, (°)
θ_i	冰的体积分数
λ	导热系数, W/(m · K)
λ^*	有效导热系数, W/(m · K)
λ_{ins}	保温材料的导热系数, W/(m · K)
μ_j	化学势, J/kg
ν	风速, m/s
ξ	材料等温吸放湿曲线的斜率
ρ	密度, kg/m ³
ρ_a	空气密度, kg/m ³
ρ_{ab}	墙体表面的吸收系数
ρ_{li}	液态水的密度, kg/m ³
ρ_m	材料密度, kg/m ³
ρ_0	干燥状态的密度, kg/m ³

变量注释表

ρ_r	地面反射率
ρ_w	试样至恒质后的密度, kg/m ³
ρ_v	水蒸气密度, kg/m ³
σ	水的表面张力, N/m
τ	时间, s
ψ	当地纬度, (°)
Ω	相变系数
ω	当地太阳时角, (°)
a	干空气
i	冰
in	墙体内部的环境
l	液态水
out	墙体外表面的环境
s	纯组分固体骨架
surf	墙体表面
v	水蒸气

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景、目的及意义	1
1.2 建筑墙体热湿耦合传递理论研究现状	3
1.3 热湿耦合传递效应对建筑墙体热湿特性和能耗的影响研究现状	11
1.4 建筑墙体热工性能优化研究现状	11
1.5 主要问题	14
1.6 研究内容	14
1.7 技术路线	15
2 建筑墙体热湿耦合传递模型及数值解法研究	17
2.1 研究方法	17
2.2 驱动势	17
2.3 水分传递过程	18
2.4 不同工况的热湿耦合传递模型	19
2.5 热湿耦合传递模型的有限容积离散化	23
2.6 边界条件中热质交换参数	27
2.7 冻结区热湿传递性能参数	29
2.8 数值模拟计算程序	30
2.9 本章小结	32
3 建筑墙体材料热湿传递性能参数试验	33
3.1 试验方案	33
3.2 表观密度	40
3.3 孔隙率	40
3.4 毛细饱和含湿量	41
3.5 水分特征曲线	42
3.6 水分渗透系数	44
3.7 有效导热系数	47
3.8 墙体材料的热湿传递性能参数	47
3.9 本章小结	48
4 建筑墙体热湿耦合传递规律物理模型试验	49
4.1 试验方案	49
4.2 非冻结超湿阶段工况热湿耦合传递规律	53
4.3 非冻结吸湿阶段工况热湿耦合传递规律	55
4.4 冻结工况热湿耦合传递规律	56
4.5 本章小结	57

5	建筑墙体热湿耦合传递规律数值模拟计算	59
5.1	计算方案	59
5.2	非冻结超湿阶段工况热湿耦合传递规律	62
5.3	非冻结吸湿阶段工况热湿耦合传递规律	64
5.4	冻结工况热湿耦合传递规律	66
5.5	本章小结	67
6	建筑墙体热湿耦合传递理论研究	69
6.1	数值模拟计算和物理模型试验结果综合分析	69
6.2	理论模型及数值解法	75
6.3	工况对热湿耦合传递过程的影响	78
6.4	热湿传递机制	79
6.5	热湿传递的耦合作用机理	80
6.6	本章小结	82
7	热湿耦合传递效应对建筑墙体热湿特性及能耗的影响	83
7.1	墙体基本构造及计算参数	83
7.2	墙体内部冻结状况	85
7.3	墙体内部温湿度变化规律	87
7.4	墙体内部冷凝风险评价	91
7.5	热湿耦合传递效应对建筑能耗的影响	94
7.6	墙体热湿特性的影响因素	97
7.7	本章小结	101
8	基于热湿耦合传递效应的建筑墙体热工性能优化	103
8.1	满足节能标准的热工性能参数	103
8.2	基于热湿耦合传递效应的建筑墙体热工性能优化模型	105
8.3	应用实例	107
8.4	本章小结	108
9	结论与展望	109
9.1	主要结论	109
9.2	研究展望	110
	参考文献	111
	附录 理论模型离散方程的 MATLAB 求解程序	121

1 绪 论

1.1 研究背景、目的及意义

1.1.1 背景

能源和气候变化问题是人类 21 世纪面临的最大挑战,节能减排已引起各国政府的高度重视。建筑能耗大约占世界能源消费的 40%^[1],排放的温室气体占与能源有关的总排放量的 33%^[2],实现建筑领域节能减排具有十分重要的经济效益和社会效益。根据近 30 年来能源界的研究和实践,目前普遍认为建筑节能是各种节能途径中潜力最大、最为直接有效的方式,是缓解能源紧张、解决社会经济发展与能源供应不足这对矛盾的最有效措施之一^[3]。目前,我国建筑能耗占全国总能耗的 27%^[4],而且随着城镇化和人民生活水平的提高还在快速增加,据预测,到 2020 年这一比例将达到 33%^[5],成为制约可持续发展的重要因素,建筑节能已成为各级政府的重点工作之一。

建筑围护结构是构成建筑空间,抵御环境不利影响的构件。随着全球可持续发展和节能减排意识的不断增强,建筑围护结构再次成为人们关注的焦点^[6,7]。在建筑能耗中约有 60% 为采暖空调能耗,是建筑能耗中最大的部分^[6],其中,围护结构的耗热量占建筑采暖空调能耗的 1/3 以上^[8]。合理设计和选择建筑围护结构类型和组成部分是减小采暖空调负荷的有效方法。随着人们对室内环境品质要求的不断提高和建筑节能工作的深入开展,潮湿问题日益受到人们的重视和关注。潮湿问题会导致节能建筑不节能、室内空气品质不高和建筑构配件工作性能的下降。

(1) 围护结构内部冷凝或受潮导致节能建筑不节能

建筑围护结构是典型的多层多孔结构,内部热湿传递具有复杂性、高度非线性和耦合性等特点,由于缺乏有效的求解模型和基础性数据,工程上一般简化为稳态条件下单纯的水蒸气渗透^[9],这与实际情况存在较大的差距。设计不良的墙体保温构造可能会导致墙内积聚水分,使保温性能下降、保温材料起鼓、冰冻和开裂,甚至造成部分保温层脱落^[10]。墙体内部产生凝结水甚至结冰从而使保温性能急剧下降是导致节能建筑不节能的重要因素之一^[11-15]。

湿传递对建筑能耗具有重要的影响,研究结果表明忽略湿传递会对建筑冷热负荷和建筑能耗的计算带来显著的误差^[16]。而目前国内现行的采暖空调负荷计算及大多数建筑能耗分析一般不考虑围护结构湿传递和湿累积的影响,这不仅会影响建筑能耗计算结果的准确性,而且会给采暖空调设备选择和经济合理运行带来相应的困难,进一步导致建筑能耗增加^[12,17-19]。

目前,我国的建筑节能设计标准中对墙体的性能要求也主要从热工性能方面做出相应的规定,严寒和寒冷地区规定了传热系数限值,夏热冬冷地区和夏热冬暖地区给出了传热系数和热惰性指标的限值^[20-22],并没有对围护结构的湿传递做出相应的规定;在现行的民用建筑热工设计规范中也仅仅从防潮角度对采暖建筑围护结构的防潮设计提出了要求^[23]。实际上建筑围护结构内部热湿传递同时存在,相互作用,相互耦合,只注重围护结构热工性能,而忽视湿传递性能将影响建筑物的正常使用,不利于建筑节能工作的深入开展。

(2) 潮湿是导致室内环境质量降低的重要因素

温度和湿度是影响人体热感觉的两个重要因素^[24]。除了创造良好的室内环境,还希望建筑是耐用和节能的,这三个功能需要优化设计,过分强调某一方面的功能会使其他方面变得低效率。由于节能房屋变得更严密,空气交换减少使得建筑物内部的湿度提高,将导致室内舒适度降低和居住者健康问题。

空气中水蒸气的控制是十分重要的,其原因是多方面的^[24-27],比如医学界普遍认为空气湿度低会增加呼吸道感染风险,这是由于低湿环境中鼻腔会缺少甚至没有黏液。鼻腔中的黏液层能捕获吸入空气中的粒子(包括尘粒携带的细菌和病毒),并能阻止他们进入肺部。当湿度低时,地面敷设物还会因为导电性能的下降而引起静电电击。高湿度会抑制皮肤表面汗液的蒸发,从而引起人体的不舒适。在通风不良的空间,湿度的不断增加会引起闷热和气味,如果情况得不到改善,由于真菌的增长还会产生霉味。如果有合适的湿度和养分,空气中真菌的孢子会在室内表面萌发和生长。适合孢子萌发和生长的湿度范围很宽,最适合的温度范围是 $0\sim 20\text{ }^{\circ}\text{C}$,一些真菌的孢子能够在相对湿度为 $0.8\sim 0.85$ 的范围内萌发,如果相对湿度长时间超过 0.7 ,这些孢子就会在空气中散播开来,通常情况下会产生一种霉味并且对健康产生危害,引起过敏和疾病,包括哮喘、鼻炎和结膜炎等。

因此,控制相对湿度对提高室内环境质量及舒适度具有十分重要的意义。掌握围护结构的热湿传递规律是实现室内空气湿度控制的关键和基础,开展围护结构热湿传递规律研究具有重要的现实意义。

(3) 潮湿导致围护结构的工作性能下降

空气中的水蒸气遇到低温表面就会凝结成水,甚至结冰,这种凝结或结冰发生在建筑围护结构上会导致许多严重问题^[28]。水分的存在主要产生如下问题^[26]:

- ① 金属的电化学腐蚀,如暖通空调设备、管道、结构构件、钢筋等;
- ② 材料的化学破坏和溶解,如石膏、天花板、外墙的木制构件;
- ③ 引起体积变化导致塌陷、结构破坏、断裂,寒冷地区混凝土、石块和砖石砌体的冻融破坏。

水分存在引起的建筑物使用问题十分普遍。据美国爱荷华州对334户家庭的一份调查,98%的住户反映至少一种潮湿问题^[29]。常见的潮湿问题主要有:窗户结露(62%),外墙涂料脱落(41%),窗框和窗台板变色(31%);墙体、天花板或橱柜发霉(23%),窗框或窗台板腐烂(20%);夏天潮湿或发霉(18%);墙体结霜或冷凝(13%),内墙涂料脱落(10%)。因此,为提高围护结构的工作性能,保证建筑物的使用安全,延长建筑物的使用寿命,必须清楚围护结构的热湿迁移规律,合理控制围护结构中的水分迁移。

建筑墙体材料是典型的吸湿性多孔介质材料,由固体骨架和含有水分(液态水分、蒸汽或者冰)和空气的微孔构成。建筑材料的吸湿特性用等温吸放湿曲线或水分特征曲线表示。水分特征曲线通常分为两个阶段,一般平衡相对湿度 $0.95\sim 0.98$ 以下为吸湿阶段,以上为超湿阶段。当墙体材料的含湿量较大,平衡相对湿度高于 $0.95\sim 0.98$ 时(此时的含湿量称为最大吸湿含湿量),墙体材料工作在超湿阶段;反之,则处于吸湿阶段。由于外界气候条件的多变性和墙体材料含湿量的不同,建筑墙体的工作状态和热湿特性具有明显的差异性,呈现多工况变化的特点。墙体内部温度低于孔隙内水分的冻结温度时,墙体内部的水分会结冰。固液相变和冰以及材料含湿量对墙体内部的热湿耦合传递具有重要的影响。为论述方便,本书将墙体内部存在冰或固液相变的墙体工作状态称为冻结工况(freezing condition),反之称为非冻结工况(non-freezing condition);将墙体材料内部所有点的含湿量均低于最大吸湿含湿量的工作状态称为吸湿阶段工况(condition of hygroscopic region),反之称为超湿阶段工况(condition of over-hygroscopic region)。

建筑墙体的热湿耦合传递关系到建筑的节能特性、室内空气环境和耐久性。建筑墙体热湿传递过程为多孔介质传热传质过程,多孔介质传热传质的理论研究已有近百年的历史,在探求迁移机理方面已先后发展了能量理论、液体扩散理论、毛细流动理论和蒸发凝结理论等,建立了一些数学模型,各个研究者所作的假设和着重点不同,导出的基本方程组也不尽相同,重要而又困难的是确定方程组中各热湿迁移的特征系数^[30-32]。在过去几十年里,针对建筑墙体热湿耦合传递国内外进行了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果,但墙体热湿传递具有高度复杂性、耦合性、非线性和多工况特点,目前建筑墙体热湿耦合传递理论以及基于热湿耦合传递效应的热工性能优化设计理论仍不够完善,尤其是冻结工况的热湿耦合传递理论研究成果较少,亟须加强相关理论及应用研究。本书重点研究多工况下建筑墙体的热湿耦合传递理论,揭示墙体内部的热湿传递规律,深入分析热湿耦合传递效应对墙体热湿特性及建筑能耗的影响,建立基于热湿耦合传递效应的墙体热工性能优化模型,为墙体的热湿特性分析及节能设计提供理论和技术支撑。

1.1.2 目的及意义

建筑墙体热湿传递对建筑的室内环境质量和空气品质、建筑物的整体能耗水平和耐久性具有十分重要的影响。但是由于湿传递的复杂性以及建筑材料湿传递基础数据的匮乏,给热湿耦合计算带来了巨大

的困难,现行的采暖空调负荷计算一般不考虑湿传递的影响,现行国家节能设计标准中对建筑热工的设计要求也未充分考虑湿传递的影响,建筑师们在设计建筑物围护结构过程中更多依赖经验,而非准确地计算热湿迁移对于围护结构的影响,以致许多建筑物在使用几年后便出现墙体表面剥蚀、渗漏、发霉甚至结构出现损坏的现象。因此,研究建筑围护结构热湿迁移特性并应用于建筑围护结构设计、使用和维护中的保温隔热、防潮等工程领域具有重要的现实意义和社会效益。

随着节能要求的不断提高,节能建筑墙体一般为带保温层的多层复合结构,热湿传递更加复杂,尽管国内外学者进行了大量的研究工作,但尚未形成统一的认识和完善的理论,尤其是针对冻结工况的热湿耦合传递,目前研究成果较少,亟须加强相关研究。本书旨在进一步研究不同工况下建筑墙体热湿耦合传递理论,建立非冻结和冻结工况热湿耦合传递模型,并通过物理模型试验和数值模拟计算研究墙体内部的热湿耦合传递规律,构建基于热湿耦合传递效应的热工性能优化设计方法,对建筑墙体热湿传递过程及其结构优化理论分析、节能研究和应用提供理论和技术支持,同时可为屋面、楼板等非透明围护结构的节能设计提供借鉴和参考。

据统计,“十二五”期间,全国城镇累计新建建筑面积达到 40 亿~50 亿平方米^[33]。要确保将这些建筑建成节能建筑,同时引导农村建筑按节能建筑标准设计和建造,完善建筑墙体热湿耦合传递理论,并应用于建筑墙体的保温隔热、防潮设计等工程领域,将极大促进整个建筑领域的节能工作,应用前景广阔。

1.2 建筑墙体热湿耦合传递理论研究现状

大多数建筑墙体材料属于多孔介质。关于多孔介质的定义与分类,随其研究目的、要求不同而有所差异^[34]。一般来说,多孔介质是指其内部含有众多孔隙的固体材料,如土壤、建筑材料、保温制品、化工填充床、煤炭与矿山堆、热管多孔芯、木材等。Bear^[35]给出了多孔介质比较完善的定义:多孔介质是含有固相的多相系,其他相可以是液相和(或)气相,固相部分称为固体骨架,其他部分称为空隙或孔隙;固相遍布整个多孔介质,具有较大的比面;孔隙中的许多空洞相互连通。孔隙的大小及分布是多孔介质的重要特征。多孔介质中相互连通的孔称为有效孔隙,那些互不连通的孔隙或虽有连通但流体很难流通的孔隙称为死端孔隙。流体可通过有效孔隙从多孔介质的一端渗透到另一端,故又称多孔介质为可渗透性材料(permeable material)。多孔介质根据其固体骨架材料的特征及孔隙结构的分布特征,可分为各向异性多孔介质和各向同性多孔介质。钟辉智博士^[36]用电扫描仪拍摄的几种建筑材料的孔隙分布如图 1-1 所示,不同的建筑材料内部孔隙分布具有较大的差异性。在自然界和大部分实际工程问题中,多孔介质一般是各向异性的。尽管如此,在对多孔介质进行理论分析时,为了简化模型,有时可对实际问题做各向同性的假设^[37]。

多孔建筑材料的结构特性通常可用比面、孔隙率、迂曲度、渗透率、水力传导系数(也称渗透系数)、饱和度等进行描述。

建筑墙体由多孔建筑材料构成,内部热湿传递属于典型的多孔介质传热传质过程。多孔介质中的热质迁移属于多相体系非连续介质的复杂过程^[32]。多孔介质的各相之间或各相内部存在温差、压力差、浓度差时,多孔介质内部就会有流动或传热传质过程发生。多孔介质动量、质量、能量传递问题涉及许多领域,是构成众多自然现象的基本过程^[34-38]。多孔结构中的传热过程因多孔介质的结构特点而十分复杂,传热过程主要包括固体骨架的导热,固体颗粒之间以及固体颗粒与孔隙中气体之间的辐射和流体的导热和对流^[39]。

多孔介质中的传质过程与普通传质过程相同,按传质机理区分,可以分为分子扩散和对流传质^[40]。分子扩散质量传递主要有菲克扩散、克努森扩散和过渡扩散。在工程应用过程中经常遇到的是菲克扩散。对流传质是孔隙中流体的宏观运动引起的质量传递,孔隙中流体的宏观运动是由毛细力、压力、重力等所引起的。对大部分实际多孔介质中传质过程来说,其传质模式是分子质扩散或是层流对流传质^[34]。

当两种或更多种分子迁移现象同时进行时,它们将相互叠加影响并引起新的效应。例如在非定温条件下物质扩散时,同时发生质迁移和导热过程。由此出现了新的迁移形式:热扩散(在温度梯度作用下的分子质迁移,C. Soret 效应)和扩散热传导(依靠化学势梯度引起的扩散而产生的热迁移,L. Dufour 效

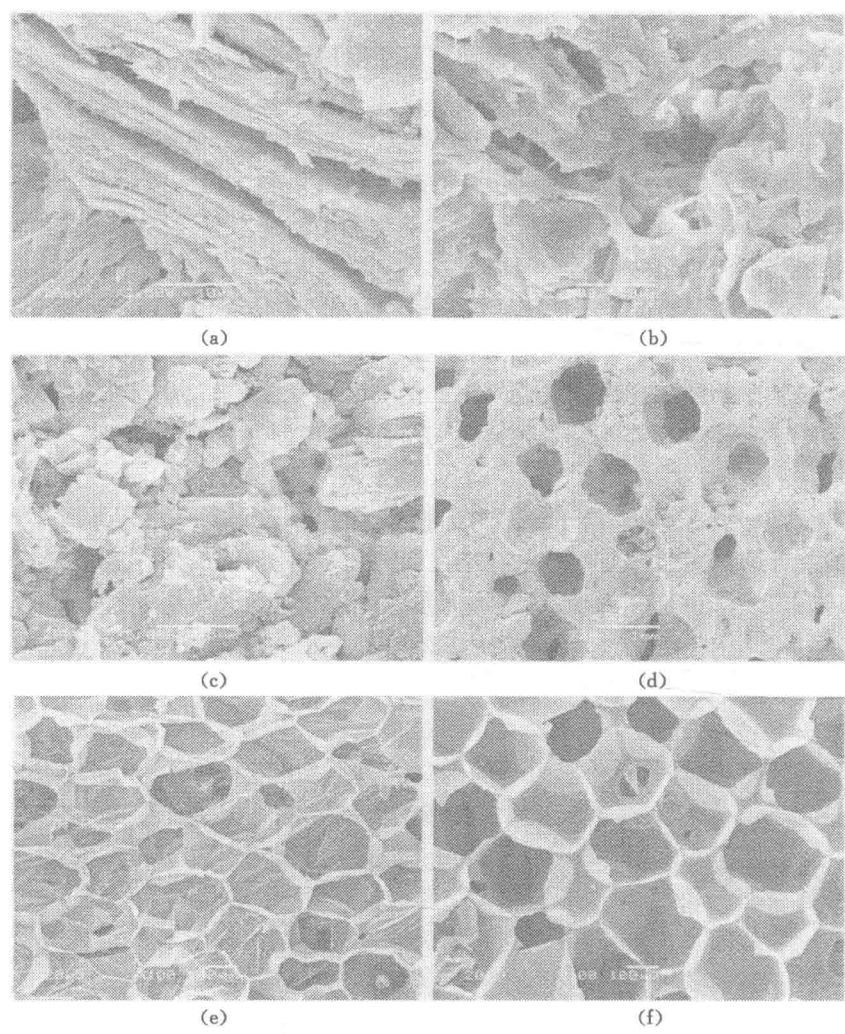


图 1-1 几种建筑材料的内部孔隙分布图

(a) 石头;(b) 砖块;(c) 石膏;(d) 加气混凝土;(e) XPS;(f) 聚氨酯

应)^[41]。通常热扩散系数要比普通扩散系数小得多,除非温度梯度非常大,否则由温度梯度所能维持的浓度梯度一般较小,热扩散效应并不明显^[42]。

建筑材料内部孔隙的水分根据其所处的外部环境可有多种形态,当温度高于多孔介质内部水分的冻结温度时,水分以气、液两相形态存在;当温度低于等于多孔介质内部水分的冻结温度时,部分水分冻结,水分以固、液、气三种形态存在。是否存在固液相变对墙体内部的热湿耦合传递将产生重要的影响,根据是否存在固态冰或固液相变将墙体内部的热湿耦合传递分为非冻结工况和冻结工况。几十年来,很多学者致力于建筑墙体的热湿传递问题研究,从早期的稳态蒸汽渗透理论到非稳态热湿耦合传递理论,建立和发展了很多理论模型,下面对热湿耦合传递的理论研究现状进行论述。

1.2.1 非冻结工况的热湿耦合传递模型

(1) 稳态蒸汽渗透模型

借助一维稳态热传导和 Glaser 提出的蒸汽渗透理论^[43],可以预测墙体任意位置的温度和水蒸气分压力,某处水蒸气分压力大于相应温度对应的饱和水蒸气压力,该处就会发生凝结现象。ASHRAE 和 Kieper 方法属于此类^[44]。Tenwolde 研究了一维稳态情况下多层墙体内的扩散和对流引起的水蒸气迁移现象^[45]。Aelenei 等针对潮湿气候区保温良好的建筑经常发生表面凝结的现象,在假设建筑围护结构传热过程为稳态传热且没有湿量通过建筑围护结构的情况下对建筑围护结构外表面发生的水蒸气凝结进行了分析,结果显示,热绝缘越小表面冷凝的风险越小,这与节能的要求正好相反^[46]。赵立华等^[10]假定通过墙内的热湿传递在一天内是室内外日平均温湿度作用下的稳态过程,第 2 天则产生一阶跃变化,将动态

过程简化为阶跃性变化的稳态过程对外保温墙体的传湿性能进行了研究。唐鸣放等采用一维稳态理论研究了空气渗透对水蒸气传递的影响,当空气渗透与蒸汽渗透方向相同时材料层偏潮湿,相反时偏干燥^[45,47]。桑国臣等考虑太阳辐射影响以冬至日不同朝向室外综合温度作为室外计算温度,对拉萨地区不同节能构造的围护结构在稳态条件下的传湿情况进行了计算和分析,指出不同朝向出现冷凝情况的差异性^[48]。唐响亮^[49]用稳态蒸汽渗透理论对夹芯墙体内部是否存在冷凝现象进行了分析。我国研究人员冯雅,张启恒、敖德学,沈显超、郑茂余,孔凡红、何金春等都曾运用稳态理论对围护结构的湿传递进行过分析或研究,这些成果丰富和发展了稳态理论模型^[50-53]。

一维稳态理论具有简单、便于应用的优点,我国现行民用建筑热工设计规范中建筑防潮设计采用该方法,欧美国家的工程实践中也主要采用该方法^[43],是目前实际工作中的主导理论。但由于热湿传递的动态性、复杂性,其精度受到限制,用其来指导节能和防潮设计会存在一定的误差,甚至出现节能建筑不节能的现象。

(2) 非稳态唯相理论模型

Philip and De Vries 模型和 Luikov 模型是 20 世纪 50 年代以后逐步建立和发展起来的热湿耦合传递模型,是被应用和接受的最著名的模型,采用温度和含湿量作为驱动势^[54,55],两者的主要区别在于 Luikov 模型采用质量含湿量(kg/kg), Philip and De Vries 模型采用体积含湿量(m^3/m^3)^[43]。然而,用这两个模型计算多孔介质中的热湿耦合传递存在三个方面的主要困难:① 在多层结构交界面上含湿量不连续;② 经典的 Luikov 模型中湿扩散系数和热扩散系数由两个驱动势决定,很难用试验进行测定;③ 方程具有高度耦合性,很难进行求解等。为此,一些研究者用其他的驱动势代替含湿量,例如 Pedersen 用毛细压力作为驱动势^[56],但毛细压力很难直接测量。Milly and Janssen 等采用多孔介质基质势代替含湿量作为驱动势改写了热湿耦合 Philip and De Vries 方程组^[55]。Qin 等^[57]在 Luikov 模型的基础上用蒸汽含量和温度作为驱动势建立了一维热湿传递模型。Belarbi 等^[55]用蒸汽含量(kg/m^3)和温度梯度作为驱动势修正了 Luikov 模型。用蒸汽含量作为驱动势的一个较大优势是传递系数对温度具有很大的相对独立性。经修正的二维模型如下:

$$\rho_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \rho C_m (\Omega h_{lv} + h_{ad}) \frac{\partial v}{\partial \tau} \quad (1-1)$$

$$\rho C_m \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\Theta D_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Theta D_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1-2)$$

式中 ρ ——材料密度, kg/m^3 ;

c_p ——定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

v ——蒸汽含量, kg/m^3 ;

λ ——导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

D ——水分渗透系数, m^2/s ;

h_{lv} ——相变潜热, J/kg ;

h_{ad} ——吸附或解吸热, J/kg ;

Ω ——相变系数;

Θ ——温度梯度系数,由温度梯度引起的热扩散系数和质扩散系数的比值, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

C_m ——比湿容量, $C_m = \frac{\partial u}{\partial \varphi \rho v(T)}$, m^3/kg ;

$\frac{\partial u}{\partial \varphi}$ ——吸附等温曲线的斜率;

u ——材料的含湿量, $\text{kg}/\text{kg}_{(\text{干})}$ 。

Chang 等^[58]在 Liukov 方程的基础上,假定物性为常数、多孔介质内的压力恒定且为常数,流体和多孔介质固体骨架处于局部热力学平衡,建立了以温度梯度和质交换势为驱动势的热量和质量传递方程,并首次用拉普拉斯变换结合函数变换的方法求解热湿耦合传递问题,控制方程为:

$$\rho_p x^{1-2n} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial}{\partial x} \left(x^{1-2n} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \rho C_m (\Omega h_{lv} + h_{ad}) x^{1-2n} \frac{\partial M}{\partial \tau} \quad (1-3)$$

$$\rho C_m x^{1-2n} \frac{\partial M}{\partial \tau} = D_m \frac{\partial}{\partial x} (x^{1-2n} \frac{\partial M}{\partial x}) + \Theta D_m \frac{\partial}{\partial x} (x^{1-2n} \frac{\partial T}{\partial x}) \quad (1-4)$$

式中 M ——质交换势, $^{\circ}M$;

D_m ——以质交换势为驱动势的水分扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}M)$;

x ——空间坐标, m ;

其余符号同前。

式(1-4)中, $n=1/2$, 适用于平板; $n=0$, 适用于中空的圆柱体; $n=-1/2$, 适用于中空的球体。

Maalouf^[59]等采用以温度和体积含湿量为热湿参数的热湿耦合模型研究了添加大麻的混凝土围护结构的热湿传递特性并用试验数据进行了验证, 但该模拟只针对法国夏季工况。Vasilyev^[60]采用 Fokin 模型对一个 3 层墙体的热湿传递情况进行了数值模拟, 数值模拟计算时室内温度取 20°C , 相对湿度 0.6, 室外条件采用莫斯科地区的气象参数。在模拟过程中并没有考虑固液相变。Fokin 模型是在俄罗斯得到广泛应用的一种模型, 采用温度和体积含水率(m^3/m^3 , %)为驱动势^[60]。Sotehi 等^[61]利用 Luikov 模型, 运用有限元法对软木轻质混凝土构成的建筑围护结构热湿传递进行了数值模拟研究。

刘莹^[62]以材料含湿量和温度为热湿耦合传递驱动势, 以 Luikov 模型为基础, 研究了半无限大土体的热湿耦合传递, 但在研究过程中水蒸气扩散系数和导热系数取为常数, 并且忽略了液态水的传递, 仅适用于含湿量较低的情况。

Philip and De Vries 模型和 Luikov 模型及其改进模型是被应用和接受的最著名的模型, 对解决墙体热湿耦合问题奠定了良好的基础, 但是由于方程中一些系数缺乏明确的物理意义, 存在测量和确定的困难, 一定程度上限制了其在实际工程中的推广应用。

(3) 体积平均理论模型

Whitaker 的多相系统输运理论为人们在多孔介质中应用连续介质力学方法来建立基本的守恒方程奠定了基础, Whitaker 模型的主要假设有^[63]: ① 局部热平衡; ② 达西定律有效; ③ 气相传递的主要机制为非克扩散和渗流作用; ④ 液相传递的主要机制为毛细流动; ⑤ 刚性多孔固体骨架。很多研究者在体积平均理论的基础上建立和提出了热湿耦合传递模型, 一些模型在建立过程中尽管没有明确说明是否应用了体积平均理论, 但在推导过程中都采用了 Whitaker 模型的条件^[63]。

Künzel^[64]忽略液体传递和蒸汽扩散相互作用影响, 蒸汽和液态水传递量分别以水蒸气压力和相对湿度为驱动势, 建立了一个热湿传递计算模型:

$$(\rho c + \frac{\partial H_w}{\partial t}) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \nabla \cdot (\lambda \nabla t) + h_{v1} \nabla \cdot [D_v \nabla (\varphi P_s)] \quad (1-5)$$

$$\frac{dw}{d\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial \tau} = \nabla \cdot (D_{\varphi} \nabla \varphi) + \nabla \cdot [D_v \nabla (\varphi P_s)] \quad (1-6)$$

式中 c ——比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

H_w ——材料的比体积焓, J/m^3 ;

D_v ——水蒸气扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$;

D_{φ} ——以相对湿度为驱动势的液态水扩散系数, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;

φ ——相对湿度;

w ——体积含湿量, kg/m^3 ;

t ——摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$;

P_s ——饱和水蒸气压力, Pa 。

Lü^[65]采用体积平均法建立了围护结构质传递和热量传递方程, 围护结构湿传递考虑水蒸气扩散和液态水的渗透, 水蒸气扩散以水蒸气分压力为驱动势, 液态水的渗透以毛细压力为驱动势, 并分别遵循非克定律和达西定律; 同时建立了一个室内空气的能量和水分传递方程, 与围护结构热湿传递方程联合求解, 并通过一个放置在实验室内的 $454 \text{ mm} \times 454 \text{ mm} \times 345 \text{ mm}$ ($W \times L \times H$) 试验模型测试, 验证了理论模型的有效性。Johannesson 等^[66]考虑吸附滞后效应, 建立了一个等温条件下的液态水和水蒸气两相水蒸气传递模型, 但是该模型没有考虑温度梯度的影响和液态水的凝固。

Ibrahim 等利用 WUFI® 热湿模拟软件对涂抹气凝胶保温涂层的外墙热湿性能进行了分析^[67]。该模