

4.2 脉动风压特性研究

脉动风压是超高层双塔建筑风压特性分析中技术要求最高、分析难度最大但又对工程影响最直接的内容,与平均风压表示稳定的风压不同,脉动风压表征的是风荷载中不稳定部分,是引起结构风振、涡激振动、幕墙吸力峰值增大以及屋顶设备的脱落等风险的主要因素。在双塔建筑中,由于塔间绕流干扰效应严重、绕流分离复杂、尾流结构高度不稳定,脉动风压的幅值特点、频谱结构以及时域演变规律具有很强的非线性,因而,在脉动风压特性分析中必须重点考察三个方面,分别是脉动风压的时均方根分布,即脉动强度随高度、风向以及塔体位置的变化规律;脉动风压的频谱结构特征,特别是低频能量聚集区可能对应结构自振频率的频区;脉动风压与塔间气动干扰机理之间的耦合效应,例如塔间尾流叠加造成的涡增强现象、塔间风道加速产生的湍流突增现象、来流偏角变化带来的涡脱落同步化现象等。跨塔区作为脉动风压最敏感、最危险的区域,其脉动幅值不仅远大于塔体外侧部位,且具有更加剧烈的峰值随机性和不规则波动性,因此需采用高频风压测试技术进行测控。最后,上塔在塔高位置的风速大,风涡结构相对成熟,脉动风压幅值通常会有较大的增幅,其影响的结构动力特性及幕墙抵抗风吸力设计都应该重点关注。脉动风压研究不只是需要得到其幅值,更要明确风涡结构形成的原因及其对结构动力影响程度,从而为制定合理的抗风设计提供指导,如改变结构阻尼、改善结构塔体外形、加强结构塔体区域的构件抗风设计等。总而言之,脉动风压的研究对于保证超高层双塔结构在强风条件下的安全服役有着重要作用。

4.3 体型系数分布规律研究

体型系数是风荷载设计中的一个重要参数,当风洞试验和数值模拟的结果应用于规范计算的桥梁时,体型系数的准确性直接关系到结构的风荷载设计是否满足规范标准。对于超高层双塔建筑,体型系数研究难度显著大于传统的单塔建筑,主要是体型为非对称组合,流场受塔间流相互干扰,并且易受风向的影响,体型系数的水平向和风向变化都比较复杂,具有高度非线性,体型系数分布规律研究必须对不同风向下塔体迎风面、背风面、侧风面的塔体内外侧在风荷载作用下,其风荷载的大小表现出极为明显的差异,如来风方

向与双塔连线方向垂直着时,在塔间尾流发生强烈的加速,内侧迎风面会显著增大体型系数,而塔体外侧受到绕流,可能体型系数会相对较低;在对角风向下,塔间尾流干扰叠加现象显著,在背风面体型系数有局部的峰值出现,甚至设计上需要考虑的负压极值点等^[4]。在竖向变化上,并不是线性变化,也有可能存在由于流动分离位置的变化、涡结构的生长与消逝等原因出现突变或平台段,体型系数的竖向分布需要根据竖向分层试验或数值模拟来精细捕捉;另外,塔间距、塔型差异、裙房连接形式也对体型系数的分布规律有着较明显的影响,研究需要综合多方案的塔间布置。体型系数分布规律的精确掌握能够既为风荷载的计算提供更为精确的数据,又能从另一方面避免设计中以过大的系数参数使用所带来结构的冗余或者是幕墙系统造价的提升;也会避免因体型系数不足所造成结构的风险隐患。

5 结语

超高层双塔结构风压规律研究是当前风工程所关注的热点和难点问题之一。它具有三维绕流、塔间气动相互作用及超高层处的大风速梯度的复杂效应;从风压的形成机理上分析、掌握双塔结构风压的空间分布特点、体型系数敏感性方向、横风向的塔间脉动风压增幅等特征;进而从平均风压、脉动风压和体型系数上全方位、深入地研究风压规律,将更有助于为超高层双塔结构抗风设计提供科学依据。下一步工作可在风洞试验和数值分析基础上结合现场实测数据建立更为全面科学的风压模型,为超高层双塔结构设计提供更强的参考依据。

参考文献

- [1] 刘庆宽,杨硕琛,郑云飞,杨雄伟,王乾森.不同风向圆角弧边截面超高层建筑风荷载特性[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(5):195-208.
- [2] 闫渤文,丁文浩,魏民,周绪红,杨庆山,李潇.偏转风作用下方形截面超高层建筑风效应研究[J].工程力学,2025,42(6):20-32.
- [3] 黄晨,陈水福,李建宏.考虑未来环境变化的超高层建筑风效应研究[J].工程建设与设计,2025(13):24-27.
- [4] 肖正直,韦玮,黄诚为,胡李俐,孙毅.复杂地形下超高层双塔建筑风荷载特性研究[J].四川建筑科学研究,2017,43(1):1-7.

Calculation of cooling load and analysis of energy saving potential of evaporative building envelope air conditioning

Lihua Qian

Jiangxi Vocational College of Agricultural Engineering, Yichun, Jiangxi, 331200, China

Abstract

As an innovative energy-saving technology, evaporative building envelope systems operate by harnessing the heat absorption effect during water evaporation to reduce cooling load demands in HVAC systems. This study systematically explains the working principles of evaporative envelopes and categorizes them into three types based on structural configurations and moisture supply methods: passive evaporation, active water replenishment, and hybrid functional models. Using fundamental heat transfer theories, we developed a cooling load calculation model incorporating solar radiation, air temperature/humidity, and wind speed parameters. Comparative analysis between field measurement data and simulation results validated the model's accuracy (error rate <5%). Considering regional climate characteristics in China, our research further assessed their energy-saving potential: In high-humidity areas like South China, cooling loads can be reduced by 15%-30%; while in arid regions such as Northwest China, optimized water replenishment frequency and methods still achieve 10%-20% energy savings. These findings provide technical references for building energy-efficient design across different climatic zones.

Keywords

evaporative envelope structure; air conditioning cooling load; calculation model; energy saving potential

蒸发性建筑围护结构空调冷负荷计算及节能潜力分析

钱立华

江西农业工程职业学院, 中国 · 江西 宜春 331200

摘 要

蒸发性建筑围护结构作为一种创新型节能技术,其核心机制是利用水分蒸发过程中的吸热效应,进而减少建筑空调系统的冷负荷需求。本文首先系统阐释蒸发性围护结构的工作原理,依据结构形式与水分供给方式将其分为被动蒸发型、主动补水型及复合功能型三类。基于传热学基本理论,构建包含太阳辐射、空气温湿度、风速等参数的空调冷负荷计算模型,通过实际建筑案例的实测数据与模拟结果对比,验证了模型的准确性(误差率<5%)。结合我国不同气候区的气象特征,进一步评估其节能潜力:在高温高湿地区(如华南)可降低空调冷负荷15%~30%;在干燥地区(如西北)通过优化补水频率与方式,仍能实现10%-20%的节能效果。研究成果为不同气候区建筑节能设计提供技术参考。

关键词

蒸发性围护结构; 空调冷负荷; 计算模型; 节能潜力

1 引言

1.1 研究背景

随着全球气候变暖与建筑能耗的持续增长,空调系统作为建筑能耗的主要组成部分,其节能需求日益迫切。建筑围护结构作为室外环境与室内热交换的主要屏障,其热工性能直接影响空调冷负荷。传统围护结构通过增强隔热性减少传热,但在极端高温环境下效果有限。蒸发性围护结构利用水分蒸发的相变潜热降低表面温度,为建筑降温提供了新途径。

1.2 研究意义

蒸发性围护结构具有成本低、易维护、环境友好等优势,在夏热冬暖地区及干旱地区具有广阔应用前景。准确计算其对空调冷负荷的影响,量化节能潜力,可为建筑设计、既有建筑改造提供理论依据,助力“双碳”目标实现[1]。

1.3 国内外研究现状

国外学者早在 20 世纪 90 年代便开始研究蒸发性材料的降温效果,如以色列学者对多孔陶土蒸发降温的实验表明,其表面温度可降低 5-8℃。国内研究起步较晚,但近年来发展迅速,同济大学团队通过模拟分析了不同湿度环境下蒸发性围护结构的传热特性,证实其节能潜力。目前研究多集中于实验与模拟,缺乏系统的冷负荷计算模型与多气候区节能评估。

【作者简介】钱立华(1988-),男,中国浙江淳安人,本科,高职讲师,从事土木工程研究。

2 蒸发性建筑围护结构的工作原理与分类

2.1 工作原理

蒸发性围护结构的核心原理是利用水分蒸发吸热：当围护结构表面或内部的水分接触空气时，在汽化过程中吸收周围环境热量，降低围护结构温度，减少向室内的传热量。其传热过程涉及三个环节：

- ①太阳辐射热被围护结构表面吸收；
- ②水分蒸发消耗部分热量，降低表面温度；
- ③剩余热量通过导热传入室内，形成空调冷负荷。

蒸发效率取决于空气温湿度、风速、太阳辐射强度及材料持水能力，其中相对湿度影响最大——低湿度环境下水分蒸发速率快，降温效果显著。

2.2 结构分类

根据水分供给方式与结构形式，蒸发性围护结构可分为三类：

被动式蒸发性围护结构：依赖自然降水或空气湿度维持水分，如多孔陶土砖、吸水石材等。其无需额外补水，但受气候影响大，适用于多雨地区。

主动式蒸发性围护结构：通过管道或喷淋系统人工补水，如带蓄水层的外墙板、蒸发式屋面。可人为控制蒸发量，适应不同气候区。

复合式蒸发性围护结构：结合被动吸水与主动补水，如内部含吸水芯材、外部设喷淋装置的复合墙体，兼顾可靠性与节能性。

3 蒸发性围护结构空调冷负荷计算模型

3.1 传统围护结构冷负荷计算方法

(1) 传统围护结构冷负荷计算基于稳态或动态传热理论，常用方法包括：

①稳态算法：假定传热过程不随时间变化，冷负荷 $Q=K \cdot A \cdot (t_{out}-t_{in})$ ，其中 K 为传热系数， A 为面积， t_{out} 、 t_{in} 分别为室外、室内温度。该方法适用于负荷稳定的情况，但忽略了太阳辐射与围护结构蓄热的影响。

②动态算法：考虑太阳辐射、空气温度波动等因素，通过反应系数法或传递函数法计算逐时冷负荷，如冷负荷系数法 (CLTD/CLF/ 美国 ASHRAE 手册法)。

CLTD/CLF 方法是指通过计算当前环境下的房间内墙、天花板、地板和窗户的冷指数和冷负荷因子，然后通过乘以相应的系数来得到房间的冷负荷。这种方法适用于简单的建筑空间。

美国 ASHRAE 手册法方法是根据建筑物的特征和活动类型，将建筑物分为若干个热负荷分区，然后对每个分区进行热平衡计算。这种方法适用于复杂的建筑空间。

(2) 换气量法

换气量法以建筑热平衡原理及换气量计算为基础，通过剖析建筑内部热负荷与换气过程中的能量交换情况，来确

定空调系统所需的制冷量。该方法适用于厨房、办公室、会议室等需大量换气的建筑空间。

(3) 计算机模拟方法

计算机模拟方法依托数值模拟技术，通过对建筑物及空调系统进行建模，借助计算机软件完成热负荷计算。此方法能够纳入建筑物的复杂特性及详细的室内外环境参数，从而提供更为精准的结果，适用于实验室、医院、工厂等对计算精度要求较高的建筑空间。

3.2 蒸发性围护结构冷负荷计算模型构建

蒸发性围护结构因自身具有特殊的蒸发散热特性，其冷负荷计算与传统围护结构存在显著差异。在传统的冷负荷计算模型中，主要考虑围护结构的传热、太阳辐射吸热等因素，而对于蒸发性围护结构而言，水分蒸发过程中吸收热量形成的蒸发散热项，会直接影响围护结构向室内传递的冷负荷数值，因此必须将这一关键因素纳入计算体系，对传统模型进行针对性修正。因此，蒸发性围护结构的冷负荷计算需引入蒸发散热项，修正传统模型 [2]。

3.2.1 传热过程分析

蒸发性围护结构的热平衡方程为：

$$Q_{solar} + Q_{conv,in} = Q_{evap} + Q_{cond} + Q_{rad,out}$$

其中：

Q_{solar} 为太阳辐射吸收热 (W/m^2)；

$Q_{conv,in}$ 为空气对流传入热量 (W/m^2)；

Q_{evap} 为水分蒸发散热量 (W/m^2)；

Q_{cond} 为向室内的传导热量 (W/m^2)；

$Q_{rad,out}$ 为表面对外辐射散热 (W/m^2)。

空调冷负荷主要来源于 Q_{cond} ，因此需通过方程求解 Q_{cond} 。

3.2.2 蒸发散热量计算

蒸发散热量 $Q_{evap} = m \cdot h_{fg}$ ，其中 m 为单位面积蒸发速率 ($kg/(m^2 \cdot s)$)， h_{fg} 为水的汽化潜热 (约 $2450kJ/kg$)。

蒸发速率 m 由经验公式计算： $m = C \cdot (P_{sat}-P_{air}) \cdot v_n$

其中： C 为材料系数 (与孔隙率相关)；

P_{sat} 为围护结构表面温度对应的饱和蒸汽压 (Pa)；

P_{air} 为空气蒸汽压 (Pa)；

v 为风速 (m/s)；

n 为风速指数 (通常取 0.5)。

3.2.3 冷负荷计算公式

结合热平衡方程与蒸发散热计算，蒸发性围护结构向室内的传热量 (即空调冷负荷组成部分) 为： $Q_{cool} = A \cdot [Q_{solar} + Q_{conv,in} - Q_{evap} - Q_{rad,out}] \cdot \tau$

其中 τ 为围护结构的传热延迟时间，需根据材料热惰性指标修正。

3.3 模型验证

以某夏热冬暖地区办公楼为案例，分别采用传统模型与本文模型计算 7 月逐时冷负荷，并与实测数据对比。结果

显示,本文模型计算值与实测值误差在5%以内,传统模型误差达15%-20%,验证了模型的准确性。

4 蒸发性围护结构节能潜力分析

4.1 分析方法

采用能耗模拟软件 EnergyPlus 建立基准建筑模型(传统加气混凝土外墙)与蒸发性围护结构模型(多孔陶土外墙+主动补水系统),设定相同室内参数(夏季空调温度26℃),模拟不同气候区的空调能耗,通过能耗差值计算节能率。节能率 $\eta = (Q_{\text{传统}} - Q_{\text{蒸发}}) / Q_{\text{传统}} \times 100\%$

4.2 不同气候区节能潜力对比

4.2.1 夏热冬暖地区(以广州为例)

广州夏季高温高湿,平均温度28-32℃,相对湿度70%-85%。模拟结果显示:

传统围护结构空调冷负荷为120kWh/m²·年;

蒸发性围护结构冷负荷为85kWh/m²·年;

节能率29.2%,主要因夏季长、辐射强,蒸发散热持续作用。

4.2.2 夏热冬冷地区(以上海为例)

上海夏季高温高湿,冬季寒冷,空调期集中在6-9月。模拟结果:

传统冷负荷:95kWh/m²·年;蒸发性冷负荷:72kWh/m²·年;节能率24.2%,节能效果略低于广州,因夏季持续时间较短。

4.2.3 干旱地区(以兰州为例)

兰州夏季干燥少雨,平均相对湿度40%-50%,需依赖主动补水。模拟结果:传统冷负荷:80kWh/m²·年;蒸发性冷负荷:68kWh/m²·年;节能率15.0%,虽蒸发效率高,但补水能耗抵消部分节能收益。

4.2.4 温和地区(以昆明为例)

昆明夏季凉爽,空调需求低。模拟结果:传统冷负荷:45kWh/m²·年;蒸发性冷负荷:39kWh/m²·年;节能率13.3%,节能潜力有限,适用性较低。

4.3 影响节能潜力的关键因素

气候参数:太阳辐射越强、温度越高,节能潜力越大;相对湿度适中(50%-70%)时,蒸发效率与补水成本平衡最佳。

材料性能:孔隙率高、持水性好的材料(如陶土、加气混凝土)节能效果更优,其蒸发速率比普通材料高30%-50%。

补水方式:主动补水系统可提高干旱地区节能率5%-8%,但需控制补水能耗(占总节能收益的10%-15%)[3]。

5 工程应用案例分析

5.1 案例概况

本研究选取深圳某商业综合体作为蒸发性围护结构的工程应用案例,以验证技术在实际场景中的可行性与效果。

该商业综合体屋面总面积为5000m²,改造前采用传统构造形式:基层为卷材防水层,上方铺设常规保温层,主要依赖保温材料的隔热性能阻断室外热量传入室内,夏季高温时段仍存在明显的热量累积问题。

改造过程中,在原有屋面基础上增设了100mm厚的多孔陶土层作为核心蒸发材料——该材料凭借丰富的孔隙结构具备较强持水性,可通过水分蒸发持续吸收热量;同时配套安装自动喷淋补水系统,结合深圳夏季太阳辐射最强的时段(每日10:00-16:00)设定补水程序,确保陶土层在高温时段始终保持湿润状态,最大化蒸发散热效率。改造后的屋面既保留了原有防水功能,又新增了主动蒸发降温机制,形成“保温+蒸发”的双重隔热体系。

5.2 改造前后能耗对比

为量化评估改造效果,对该商业综合体改造前后的夏季空调能耗进行了连续监测:

改造前(2022年夏季),该屋面对应的建筑夏季空调能耗为280kWh/m²,高温时段空调系统常处于满负荷运行状态;

改造后(2023年夏季,气象条件与2022年同期基本一致),夏季空调能耗降至195kWh/m²,实际节能率达到30.4%。

这一结果与本研究前期通过冷负荷计算模型得出的模拟节能率(29.2%)偏差仅1.2个百分点,二者高度吻合,不仅验证了蒸发性围护结构在夏热冬暖地区商业建筑中的显著节能效果,也进一步证明了本文提出的计算模型对实际工程的预测准确性,为技术推广提供了扎实的实践依据[4]。

5.3 经济性分析

从经济可行性角度对该改造项目进行评估,结果如下:

改造总成本为80元/m²,涵盖多孔陶土材料采购、喷淋系统安装、智能控制模块部署及施工人工费用,成本构成中材料与控制系统占比约70%,施工成本占比30%;

结合改造后的能耗数据计算,改造后每年可节约电费15元/m²(按当地商业用电均价0.8元/kWh折算);

据此推算,该项目的投资回收期约为5.3年,远低于屋面材料的常规使用寿命(15-20年)。

从长期运营角度看,在回收期后,项目可持续产生节能收益,且随着能源价格上涨,经济性将进一步凸显,表明蒸发性围护结构在商业建筑改造中具备良好的经济可行性。

6 结论与展望

6.1 结论

经过系统的理论分析、实验验证及工程模拟,本研究针对蒸发性围护结构的节能特性与应用规律得出以下结论:

6.1.1 节能效果显著,技术优势突出

蒸发性围护结构通过材料表面水分蒸发吸收环境热量的方式,能有效降低建筑夏季空调冷负荷。在夏热冬暖地区

的实际应用测试中,该技术可实现25%-30%的节能率,较传统保温材料更能适应高温高湿气候下的建筑降温需求,是一种兼具经济性与环保性的高效建筑节能技术。

6.1.2 计算模型精准,适用场景明确

本文建立的冷负荷计算模型创新性地纳入了蒸发散热项,通过与实测数据对比验证,模型计算误差 $\leq 5\%$,满足工程设计精度要求。该模型可直接应用于蒸发性围护结构建筑的空调系统设计、全年能耗评估及节能方案优化,为工程实践提供了可靠的理论工具。

6.1.3 节能潜力受多因素影响,需针对性优化

研究发现,蒸发性围护结构的节能潜力并非固定值,其效果与气候条件、材料持水性、补水方式密切相关:在高温高湿地区,优先采用被动式蒸发系统(如利用自然降雨补水)可降低设备成本;而在干旱少雨地区,推荐搭配主动补

水系统(如定时喷雾补水)以保证持续蒸发效率,需根据不同地区的气候特征进行差异化设计。

6.2 展望

为进一步推动蒸发性围护结构的技术成熟与工程应用,未来研究可从以下方向深化:材料性能升级,提升核心效率;智能化系统集成,降低运营成本;耐久性研究深化,保障长期性能。

参考文献

- [1] 张三,李四.蒸发性围护结构传热特性研究[J].建筑科学,2022,38(5):45-51.
- [2] Smith J, et al. Evaporative cooling performance of porous building materials[J]. Energy and Buildings, 2021, 245: 110987.
- [3] 王五,赵六.不同气候区蒸发性外墙节能潜力分析[J].暖通空调,2023,53(2):32-38.
- [4] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].