

文章编号: 1671-6612 (2023) 01-001-09

调湿材料及其应用于辐射供冷防结露中的 研究现状与展望

隋学敏 张展鹏 杜泽政 韩 兵 宇森锋

(长安大学建筑工程学院 西安 710061)

【摘要】 对国内外有关调湿材料和辐射供冷系统防结露的研究进行了综述, 侧重阐述了调湿材料的制备、调湿材料调湿性能的评价指标、调湿材料的应用效果以及辐射供冷系统的防结露措施。调湿材料是一种具有广泛发展前景的被动式调湿技术, 目前对调湿材料和辐射供冷系统的协同研究较少, 指出了该方向目前所存在的问题, 对其未来的研究趋向进行了展望。

【关键词】 调湿材料; 辐射供冷; 防结露; 研究现状; 展望

中图分类号 TU831 文献标识码 A

Research Status and Prospect of Humidity-Control Materials and its Application in Anti-Condensation of Radiant Cooling

Sui Xuemin Zhang Zhanpeng Du Zezheng Han Bing Yu Senfeng

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an, 710061)

【Abstract】 Domestic and foreign literature on humidity-control materials and anti-condensation of radiant cooling systems are reviewed. The preparation of humidity control materials, the evaluation index of humidity control performance and the application effect of humidity control materials, and the anti-condensation measures of radiant cooling systems are emphatically expounded. Humidity control material is a passive humidity control technology with broad development prospects. At present, there are few attention on the synergistic research of humidity control materials and radiant cooling systems. The existing problems in this research field are pointed out, and its future research trend is prospected.

【Keywords】 humidity-control materials; radiant cooling; anti-condensation; research status; prospect

0 引言

建筑能耗是我国能源消耗的三大巨头之一, 约占全国总能耗的三分之一^[1], 其中空调系统能耗占建筑能耗的 70%左右^[2], 降低空调系统能耗势在必行。空调系统按其末端换热方式分为辐射空调系统和对流式空调系统。相比对流式空调系统, 辐射系统因其可实现温湿度独立控制、无吹风感、噪音小、能耗小、运行成本低等优点受到广泛关注。然而,

辐射空调系统因存在结露问题制约了其推广和应用。

当前主流的解决辐射供冷系统结露问题的方法是将辐射供冷系统和不同形式的新风系统进行耦合, 通过新风系统消除室内的湿负荷, 从而防止辐射供冷系统发生结露。然而, 不同形式的新风系统都是通过主动除湿方式除去室内的湿负荷, 这无疑增加了系统的能耗。因此, 可考虑通过被动除湿

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51308049); 陕西省重点研发计划项目 (2022SF-385); 陕西省住房城乡建设科技计划项目 (2015-K72)

作者(通讯作者)简介: 隋学敏(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事辐射供冷与建筑节能研究, E-mail: suixuemin@163.com
收稿日期: 2022-09-26

方式除去辐射供冷房间室内湿负荷,从而降低除湿能耗。

当前常用的湿度控制方式有冷却除湿、液体除湿、固体吸附除湿^[3]。然而近年来,各种新型材料的不断涌现,增加了湿度控制的方式,如利用调湿材料控制室内湿度。调湿材料是指不借助任何人造能源和机械设备,依靠自身的吸放湿性能,感应所控空间的空气湿度变化,在低湿度时放湿,在高湿度时吸湿,从而自动调节空气相对湿度的材料^[4]。显然,调湿材料是一种被动调节室内湿度的技术,可考虑将其和辐射供冷系统结合,既可降低系统结露风险,又能降低除湿能耗。

基于上述背景,本文对调湿材料及辐射供冷系统防结露的研究现状进行了综述,对将调湿材料控湿技术应用于辐射供冷领域进行了展望。

1 调湿材料的研究

1.1 调湿材料的调湿原理

调湿材料的调湿原理以图 1 的吸放湿曲线来说明。当空气相对湿度超过人类居住适宜的相对湿度上限(ϕ_2 等于 60%时),调湿材料吸收空气中的水分,其平衡含湿量急剧增加,阻止空气相对湿度增加;当空气相对湿度低于人类居住适宜的相对湿度下限(ϕ_1 等于 40%时),调湿材料放出其内部的水分加湿空气,材料的平衡含湿量迅速降低,阻止

空气相对湿度下降。只要材料的含湿量处于材料的最大平衡含湿量 U_2 和最小平衡含湿量 U_1 之间,室内空气相对湿度就自动维持在 40%~60%范围。

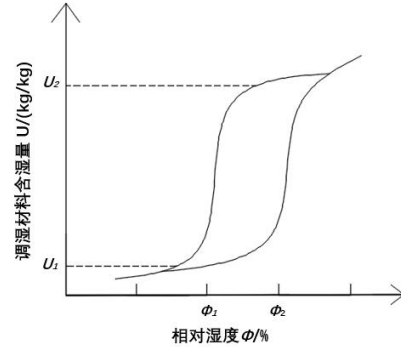


图 1 调湿材料的平衡吸放湿曲线^[5]

Fig.1 Balanced adsorption-desorption curves of humidity control materials^[5]

1.2 调湿材料的分类及其合成

1.2.1 调湿材料的分类

近年来,随着国内外学者对调湿材料的不断研究,调湿材料的品种越来越多,其分类方式也越来越多,可以根据调湿材料的调湿机理、调湿基材的种类、调湿基材的制备方法对调湿材料进行分类。根据调湿基材的制备方法可将调湿材料分为天然调湿材料和人工合成调湿材料,而人工合成调湿材料又包括无机调湿材料、有机调湿材料及复合调湿材料。各类调湿材料的优缺点如表 1 所示。

表 1 各类调湿材料的优缺点

Table 1 Advantages and disadvantages of various humidifying materials

调湿材料类别		调湿基材	优点	缺点
大类	小类			
天然调湿材料	——	木炭、木材、竹炭	成本低	湿容量小、吸放湿速度慢
人工合成调湿材料	无机调湿材料	硅藻土、海泡石、沸石、高岭土、蒙脱土	吸放湿速度快	湿容量小
	有机调湿材料	具有三维铰链网状结构的吸水树脂	湿容量大吸湿速度快	放湿速度慢
	复合调湿材料	无机-无机调湿基材、无机-有机调湿基材、无机-生物质调湿基材、有机-生物质调湿基材	吸放湿量大吸放湿速度快	成本高

1.2.2 调湿材料的合成

近年来,国内外学者以不同的调湿基材和常用建筑材料为原材料,并加以辅助材料,合成了大量

的调湿材料;同时,对所制调湿材料的调湿性能进行测试,以探究性能较好调湿材料的合成方法,故而有必要对调湿材料的合成方法进行总结。人工合

成的调湿材料包括无机调湿材料、有机调湿材料以及复合调湿材料,本节分别对不同类型调湿材料的合成方法进行综述与总结。

(1) 无机调湿材料的合成

无机调湿材料是以无机矿物为调湿基材、以常用建筑材料为主要辅助材料,通过一定的制备工艺合成的。为了得到性能较好的无机调湿材料,国内外学者对无机调湿材料的合成工艺及材料配比进行了大量的研究。郑佳宜等^[6]首先研究了硅藻土用于制作调湿材料的最佳煅烧时间以及煅烧温度,然后以硅藻土为调湿原材料,以水泥、石膏、粉煤灰、杨树木粉为辅助材料制成硅藻土基调湿材料,并测试其调湿性能,以探究各组分最佳配比。闫杰等^[7]以石膏、水泥和石灰为胶结材料,以吸附性能好的植物纤维、活性炭和高岭土为调湿材料,制作了无机调湿建筑材料,并对其进行实验以探究各组分最佳配比。李景润等^[8]通过细度处理、煅烧处理、酸处理等方法对硅藻页岩进行提纯,并通过实验对其所制无机调湿材料的调湿性能进行测试以确定硅藻页岩的最佳提纯工艺。王羽等^[9]以硅藻土作为硅质材料、生石灰为钙质材料,以石膏、水泥、纤维、硅灰石等为辅助材料,水热合成硅藻土调湿板材,通过实验探究了制作调湿板材的最佳工艺和最佳原材料配比。Sagae等^[10]以沸石替代不同量的沙子,制作了沸石基调湿材料以探究沸石的合理用量。Zhou等^[11]以天然矿物沸石、水泥、粉煤灰、杨树纤维素、防霉抗菌物质为原材料,将其按不同的比例混合以探究各组分的用量对调湿材料调湿性能的影响。Chen等^[12]以硅藻土为基材、玻璃粉作为胶结材料、抛光石粉和粉煤灰为掺和材料,制备了硅藻土基调湿板材,通过实验研究了各掺合料的用量和焙烧温度对硅藻土基调湿板材调湿性能的影响,以确定制备硅藻土基调湿板材的最佳原料配比和最佳工艺条件。Yang等^[13]通过实验研究了四种硅藻土基调湿材料的平衡吸放湿量、等温吸放湿速率、循环吸放湿性能,以探究硅藻土基调湿材料的制作工艺。Gonzalez等^[14]以活性炭、海泡石和其他辅助材料为原材料,制备了海泡石-活性炭颗粒,并通过实验对所制调湿颗粒的调湿性能进行测试以确定各材料的合理用量。吕荣超等^[15]将海泡石、硅藻土、沸石三种无机矿物材料分别和白水泥以不同比例的混合,制成多种板状无机调湿材料并

探究其调湿性能,以确定各材料的最佳配比。

上述学者对无机调湿材料合成工艺及其材料配比的研究表明:①制备无机调湿材料时,常用的无机矿物材料包括硅藻土、沸石、海泡石、高岭土、蒙脱土,常用的辅助材料包括水泥、沙子、纤维等;②制备无机调湿材料的过程如下:首先对一种或多种无机矿物调湿原材料进行细度处理、煅烧处理、酸处理等,之后将其和水泥、沙子等建筑材料混合制成具备调湿功能的调湿砂浆、调湿板材等,最后对所制调湿材料的调湿性能进行实验探究,以确定高性能调湿材料的最佳制备工艺和最佳材料配比。

(2) 有机调湿材料的合成

有机调湿材料常由具有三维交联网状结构的超强吸水性树脂如淀粉、聚丙烯酸、聚丙烯酸钠、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇、丙烯腈等构成,相比于无机调湿材料,有机调湿材料的主要特点是湿容量大。近年来,为了开发高湿容量调湿材料,有关有机调湿材料的研究越来越多。例如,杨海亮等^[16]以聚丙烯酸钠、丙烯酰胺、过硫酸钾、氯化铝等为原料,采用二次致孔法制备了多孔树脂,并通过实验探究了氯化铝的用量对多孔树脂调湿性能的影响,以确定氯化铝的合理用量。曹嘉洌等^[17]以壳聚糖、丙烯酸、过硫酸钾、碳酸钾、乙酸钾、无水硫酸钠为原料制备了壳聚糖基调湿材料,并通过实验探究了制备壳聚糖基调湿材料时各材料的最佳用量范围。刘川文等^[18]以聚乙烯醇、顺丁烯二酸酐、甲苯、丙酮等为原料制备了吸附性树脂,并通过实验探究了其调湿性能。Zhang等^[19]以丙烯酸酯和其他材料为原材料,制备了无皂乳液,并探究了材料的对比对乳液性能的影响。

(3) 复合调湿材料的合成

由表1总结可知,无机调湿材料具有吸放湿速度快、湿容量小的特点,而有机调湿材料具有湿容量大、放湿速度慢的特点,可以发现单一调湿材料难以同时满足高湿容量、吸放湿速度快的要求。针对这一问题,近年来,越来越多的学者将不同类型的调湿材料进行复合,以制备具有湿容量大、吸放湿速度快的多功能复合调湿材料。例如,姜洪义等^[20]以丙烯酸、丙烯酰胺、沸石、高岭土为原料制备了湿容量大、吸放湿速度快的复合调湿材料。黄季宜等^[21]以高分子树脂和无机材料为原材料制备了

复合调湿剂,其调湿时间大大减少。Park 等^[22]以生物炭、沸石、水泥、沙子为原料制备了生物炭复合调湿材料。王颖娟等^[23]以木质纤维、膨胀珍珠岩、海泡石、可再生分散性乳胶粉、聚丙烯纤维、水泥为原材料,配制了兼具调湿保温功能多功能砂浆。刘永超等^[24]以海泡石粉、木质纤维、膨胀珍珠岩和水泥为原料,制成兼具保温调湿功能的复合砂浆。Chen 等^[25]以甲基三乙氧基硅烷为相变原料,以海泡石和沸石为吸湿材料,制备了一种新型相变调湿材料。He 等^[26]以石膏、沸石、膨胀蛭石和贝壳粉为基质,将相变微胶囊以不同的质量和各种基质混合,制备出一系列具有独特基质的复合相变调湿材料。张浩等^[27]对相变材料和调湿材料进行复合,制备相变调湿复合材料。Ren 等^[28]以钛酸四丁酯溶液、无水乙醇溶液、硝酸银溶液、硝酸溶液、甲醛溶液为原材料,合成了负载银掺杂二氧化钛的竹炭颗粒,之后将水泥、硅藻土和竹炭颗粒以不同的比例混合,制备了兼具吸湿和除甲醛性能的多功能水泥基砂浆。

综上所述,当前学者对复合调湿材料的研究主要集中于两方面:①将无机调湿材料和有机调湿材料复合或将多种无机调湿材料复合以制备湿容量大、吸放湿速度快的复合调湿材料;②将功能不同的无机材料或有机材料和调湿材料复合,以制备多功能调湿材料,如将相变材料和调湿材料复合以制备调湿调湿材料、将保温材料 and 调湿材料进行复合以制备保温调湿材料。

1.2.3 总结

调湿材料研究领域,调湿材料的合成是国内外学者关注较多的重要研究点。当前国内外学者合成的调湿材料主要为三类,分别是无机调湿材料、有机调湿材料以及复合调湿材料。无机调湿材料的研究集中于确定高性能无机调湿材料的最佳制备工艺和最佳材料配比,有机调湿材料的研究集中于确定高湿容量有机调湿材料的最佳材料配比,复合调湿材料的研究集中于制备湿容量大、吸放湿速度快同时兼具多功能的复合调湿材料。

1.3 调湿材料调湿性能的评价

当前主要采用材料吸放湿量的大小和吸放湿速度对调湿材料的调湿性能进行评价,前者反应材料的吸放湿能力,后者反应材料响应湿度变化的快慢^[29]。在此基础上,先后有多种评价指标被不同的

学者提出,如表 2 所示。

牧福美他等^[30]在仅考虑湿传递的基础上提出了采用水蒸气扩散系数 D 和最大平衡含湿量 U_{\max} 作为调湿材料调湿性能的评价指标。池田哲朗等^[31]考虑了温度对传湿的影响,对处于静态热平衡的调湿材料,提出了使用最大平衡含湿量以及平衡含湿量对温度和湿度的变化率作为调湿材料调湿性能的评价指标。小野公平^[32]、大釜敏正^[33]、冉茂宇^[29]等在实验的基础上,对动态过程中调湿材料调湿性能的评价指标进行了研究,并分别提出了不同的观点。小野公平等^[32]提出把密闭空间中温度波动引起的材料单位表面积吸放湿量 F 作为调湿材料调湿性能的评价指标,但是实验发现 F 与温度波动的幅度和周期有关,故而 F 不是材料的特有属性。在小野公平实验的基础上,大釜敏正等^[33]发现封闭空间中绝对湿度的对数和平衡温度有近似线性关系,进一步提出采用 B 指标来衡量材料的调湿能力。冉茂宇等^[29]从热力学两相平衡的角度出发,对 B 指标进行了理论验证,指出 B 指标反映了材料与水分的结合能力,其值取决于结合能的大小;随后通过引入波动温度,在 B 指标的基础上提出了采用 BT 指标来评价调湿材料的调湿性能。 BT 指标是基于所调节的目标温度和波动温度而得到的,较 B 值更为合理准确。Rode 等^[34]从调湿材料的吸放湿对周围环境的影响入手,提出了湿缓冲值 (MBV) 的概念并给出了其计算关联式。谢昊岩等^[35]通过分析指出湿传递只能在材料的孔内进行,材料的固相基体无法进行湿传递,在此基础上对湿缓冲值 (MBV) 的关联式进行了修正,修正结果显示所有材料湿缓冲值的相对误差有了明显的减小。石诚楠等^[36]以现有调湿材料评价标准及相关模型为基础,在湿缓冲理论背景下考虑了实际应用因素 (如室内的换气次数、调湿材料面积与房间体积比以及室内湿源等),提出了实际应用当中调湿材料湿缓冲性能的量化评价指标 MBE_a 和 MBE_d ,其中 MBE_a 表示吸湿效果指标, MBE_d 表示放湿效果指标,且 MBE_a 和 MBE_d 的数值越大,则表明使用调湿材料后室内湿度的变化值越小。

总结上述文献,调湿材料调湿性能的评价指标也是国内外学者关注较多的研究点之一。早期首先被提出的是没有考虑温度影响的静态评价指标,接着在密闭空间实验的基础上,研究者们给出了考虑

温度时的静态评价指标, 最后结合实际应用效果提出了新的动态评价指标, 即湿缓冲值 (MBV) 这一评价指标, 同时 MBV 评价指标也是当前应用最广的评价指标。

1.4 调湿材料应用效果研究

为了探究调湿材料的实际应用效果, 许多学者对应用调湿材料的房间进行了仿真研究, 以确定调

湿材料对室内热湿环境及供冷供热能耗的影响, 常用的研究方法有数值计算和软件模拟。采用数值计算时, 常用的数值模型有有效湿渗透厚度模型、空间湿容模型和体积平均模型; 采用软件模拟时, 常用的模拟软件有 TRNSYS、Energyplus、Comsol、WUFI 等。

表 2 现有调湿材料的评价指标

Table 2 Evaluation indicators of existing humidifying materials

研究者	评价指标	评价指标原理	指标分类	指标不足
牧福美他 ^[30]	水蒸气扩散系数、平衡含湿量	水蒸气扩散系数表征材料湿传递速度; 平衡含湿量表征材料湿容量的大小	静态评价指标	无法反应温度对湿度传递的影响
池田哲朗 ^[31]	平衡吸放湿曲线	通过平衡含湿量表征材料的吸放湿能力; 通过平衡含湿量对温度和湿度的变化率表征材料的吸放湿速度	静态评价指标	只能表征空气温度或湿度缓慢变化的情况
小野公平 ^[32]	单位表面积吸放湿量	通过温度变化引起的材料单位表面积吸放湿量来表征材料的调湿能力	静态评价指标	单位面积的吸放湿量不是材料的固有属性, 它受实验条件、材料用量以及材料厚度的影响
大釜敏正 ^[33]	B 指标	在参考温度为零摄氏度时提出的, B 值大小的反应材料与水的结合能力, 通过 B 值来表征材料的调湿能力	静态评价指标	只适用于外界温度缓慢变化和所调节目标温度为 0℃ 的情况
冉茂宇 ^[29]	BT 指标	在 B 指标的基础上, 通过引入波动温度而提出的, BT 值反应材料与水的结合能力。通过 BT 值来表征材料的调湿能力	静态评价指标	仅适用于外界温度缓慢变化的情况
Rode 等 ^[34]	MBV 指标	环境湿度周期性变化条件下, 通过材料单位面积的吸放湿量来表征材料的调湿能力	应用效果评价指标	适用于环境湿度周期性变化条件

1.4.1 基于数值计算的调湿材料应用效果研究

目前, 有许多学者自建模型采用数值计算研究了调湿材料的实际应用效果及其对供冷、供热能耗的影响。例如, Osanyintola 等^[37]建立了热湿传递的体积平均模型, 并探究了房间仅有通风的情况下, 应用调湿材料对供冷、供热能耗的影响, 研究表明与不应用调湿材料的工况相比, 应用调湿材料后室内冬季供热能耗降低高达 5%, 夏季供冷能耗降低高达 30%。郑佳宜等^[6]采用有效湿渗透厚度模型计算了室内周期性湿负荷作用下, 调湿材料对封闭空

间和自然通风空间的湿度调节能力, 结果表明调湿材料可以将室内相对湿度控制在 50% 左右。Qin 等^[38]对恒温通风空间建立了室内湿平衡模型, 探究了调湿材料在不同气候区的湿度控制能力, 模拟结果表明调湿材料只要能适当再生, 就能有效抑制室内湿度的波动, 并在大多数气候条件下保持室内相对湿度在理想范围内。

1.4.2 基于软件模拟的调湿材料应用效果研究

除自建模型进行数值计算之外, 亦有诸多学者采用商业软件对调湿材料的实际应用效果进行了

探究 Park 等^[22]将生物炭调湿材料应用于装有空调系统的房间后,采用 WUFI 软件对调湿材料的应用效果进行模拟研究,模拟结果表明与普通墙体材料相比,含生物炭调湿材料的墙体其含水量较低,室内的除湿/加湿量降低,有节能的潜力。刘永超等^[24]使用 Comsol 软件对调湿层使用不同材料的墙体的吸放湿过程进行模拟分析,结果表明调湿墙体的湿交换量明显大于普通墙体。Fořt 等^[39]用不同量的硅藻土基相变调湿材料替代墙体内表面抹灰层中不同量的石膏,然后采用 HMS 软件作为仿真工具,同时以有限元软件 SIFEL 为主要求解器,对新型墙体的节能潜力进行研究,研究表明添加调湿相变材料后墙体的节能量在 6%到 12%之间,具体节能量与建筑所属气候区有关。Li 等^[40]使用 Energyplus 软件研究了室内木制家具的湿容性对室内湿度的影响,结果表明室内家具的湿容性对室内相对湿度的影响只有 2%左右,但家具的蓄热能力,却增加了 10%左右的显热负荷。Yu 等^[41]使用 Energyplus 软件模拟研究了调湿材料对建筑能耗的影响,结果表明调湿材料的使用可使空调能耗降低 12%左右。Fraine 等^[42]使用 Comsol 软件研究不同材料对墙体热湿传递性能的影响,模拟结果表明,采用相变调湿材料替代 EPS,可以节省约 50%的能耗。Künzel 等^[43]采用 WUFI 软件模拟了有调湿材料和无调湿材料时室内的温湿度,模拟结果表明两房间的温度几乎没有差别,但两房间的湿度却有很大的差别,说明了围护结构的水分缓冲效应对室内的相对湿度有很大影响。

综上所述,国内外研究者对调湿材料在建筑中的应用效果进行了较为广泛的研究,调湿材料一般应用在墙体中做成调湿墙体。诸多数值计算和软件模拟结果均表明使用调湿材料可以减缓室内相对湿度的波动,将相对湿度控制在合理的范围内;同时使用调湿材料可以降低峰值冷负荷、减少建筑供热、供冷能耗,供热最大节能可达 10%左右,供冷最大节能可达 30%左右。但目前的研究主要集中于自然通风房间以及以送风空调为代表的常规空调房间,对于应用于辐射供冷房间的效果鲜少被关注。

1.5 总结

总结 1.1~1.4 节可见国内外学者对调湿材料控湿技术已进行了大量的研究,主要集中于三方面,分别为:探究高性能调湿材料的合成工艺;寻

求合理的评价方法对调湿材料的调湿性能进行评价;探究调湿材料对室内热湿环境及房间供热、供冷能耗的影响。大量的应用效果研究表明,无论是自然通风房间,还是具有对流式空调系统的房间,均可获得较好的调湿效果。

2 调湿材料应用于辐射供冷防结露中的研究

2.1 现有防结露技术综述

在提倡节能减排的今天,辐射供冷系统因其具有能耗低、舒适性好、噪声低、占用室内空间小等优点而受到广泛关注。然而,结露问题的存在阻碍了该系统的推广应用。结露问题是目前制约该系统推广应用的重大弊端,为解决这一问题,国内外学者对辐射供冷防结露技术进行了大量研究。该领域已有大量的相关文献,现有防结露技术主要集中于四方面:(1)添加通风除湿系统及优化气流组织形式。采用独立新风系统承担湿负荷是最常见的防结露措施^[44-48],在此基础上,有研究者进一步提出优化气流组织,如采用贴附射流的形式在冷表面形成干燥空气层以降低冷辐射板结露风险^[49-52];(2)基于辐射供冷末端控制的防结露措施,如调节辐射末端的供水温度、供水流量等^[53-57],以避免辐射末端表面温度低于周围空气露点温度;(3)基于辐射末端结构改造优化的防结露措施,如构造“疏导结露”的辐射末端装置以排除冷凝水^[58,59],在金属辐射板中加入空气层使得板面温度更加均匀以避免冷表面出现条状低温区^[60],以及将除湿装置与辐射板集成的方式以降低冷板周围空气的湿度^[61,62];(4)基于辐射末端表面采用特殊材料处理的防结露措施,如辐射板表面采用疏水材料以抑制结露产生^[63-65]、采用高红外透射材料对辐射末端表面处理提高冷表面温度但又不影响辐射末端的辐射换热能力^[66-68]。

2.2 调湿材料和辐射供冷的协同研究

综合第 1.4 节所述,可以发现,调湿材料是一种具有广泛发展前景的被动式调湿技术。然而,在辐射供冷防结露领域,将调湿材料和辐射供冷系统结合进行的协同研究,鲜有文章报道。目前的文献中仅有谢昊岩^[35]和王颖娟^[23]做了模拟研究。谢昊岩^[35]等基于 TRNSYS 软件模拟研究了辐射换热对吸湿材料的湿缓冲性能的影响,结果表明辐射换热对

调湿材料性能的影响很小。王颖娟^[23]等采用 CFD 模拟研究了调湿保温砂浆对装有空气载能辐射空调房间的热湿环境的影响。结果表明围护结构内表面采用调湿保温砂浆的房间,其空调区的相对湿度比普通房间低 10%左右,同时,调湿房间辐射板处空气的最低温度和房间的露点温度差值更大,有更好的防结露特性。

上述研究结果表明,将调湿材料应用于辐射供冷房间后,调湿材料依然具有较好的吸放湿量和吸放湿速度,同时可将室内湿度维持在合理的范围内。从模拟结果来看,效果良好,具有发展应用的前景。但目前对调湿材料和辐射供冷的协同研究缺乏大量的实验研究,其应用效果有待进一步研究与论证。

3 结论与展望

结露问题是目前阻碍辐射供冷系统应用推广的最大问题,目前主要通过添加通风除湿系统、对辐射末端进行供水温度/流量控制调节、改进辐射板的结构及材料来解决辐射供冷系统的结露问题。然而,现有方法主要通过主动除湿的手段来解决辐射系统结露问题,这无疑增加了系统的能耗。

调湿材料是一种具有广泛发展前景的被动式调湿技术。已有诸多研究者对调湿材料控湿技术进行了大量的研究,包括调湿材料的调湿机理、高性能调湿材料的合成方法、调湿材料调湿性能的准确评价以及调湿材料实际应用效果的实验与模拟研究。该领域研究方法相对成熟,高性能调湿材料的制备已有诸多方法与工艺。大量的应用效果研究表明,无论是自然通风房间,还是具有对流式空调系统的房间,均可获得较好的调湿效果。因此,可进一步借鉴研究思路,将其应用于辐射供冷领域。

通过调湿材料控制室内湿度,不仅可降低辐射供冷系统的结露风险,又可降低空调系统的除湿能耗。但是当前鲜有学者将辐射供冷系统和调湿材料结合起来进行协同研究,仅有的该方向的个例研究也限于模拟仿真,未来还需对该方向进一步展开理论和实验研究,通过大量实验探究房间应用调湿材料对辐射末端结露风险的影响,以及短期及长期的应用效果等,以进一步论证采用调湿材料解决辐射供冷系统结露问题的可行性。

参考文献:

- [1] 孟力,龙海珊,陈弈冰.公共建筑能耗研究分析[J].智能建筑电气技术,2021,15(5):35-37.
- [2] 张泽宾.辐射供冷研究现状与发展前景[J].内燃机与配件,2018,(4):246-248.
- [3] 崔少云,宋媛,李志勇.除湿技术研究综述与展望[J].机械管理开发,2021,36(10):288-291.
- [4] 西藤一郎,宫野秋彦,田中正考.屋内湿度变化と壁体材料[J].日本建築學會研究報告,1949,(3):157-161.
- [5] 冉茂宇.日本对调湿材料的研究及应用[J].材料导报,2002,(11):42-44.
- [6] 郑佳宜.硅藻土基调湿材料内热湿迁移过程及其在建筑中的应用研究[D].南京:东南大学,2015.
- [7] 闫杰,马斌齐,岳鹏.调湿建筑材料调湿性能试验研究[J].建筑科学,2009,25(6):61-64.
- [8] 李景润.硅藻页岩内墙涂料调湿及净化甲醛性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [9] 王羽.硅藻土基调湿板材的制备与性能研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2016.
- [10] Sagae A, Wami H, Arai Y, et al. Study on a new humidity controlling material using zeolite for building[M]. Studies in Surface Science and Catalysis. Elsevier, 1994,83:251-260.
- [11] Zhou B, Chen Z. Experimental study on the hygrothermal performance of zeolite-based humidity control building materials[J]. Int J Heat & Tech, 2016, 34(3):407-414.
- [12] Chen Y W, Gao T T, Xiao-Dan W U. Study on Preparation and Performance of Diatomite-based Plate[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018.
- [13] Yang H, Wen Q, Zhang X, et al. Experiment study on the humidity control performance and indoor environment control of diatom ooze[J]. Ferroelectrics, 2018,527(1):59-69.
- [14] Gonzalez J C, Molina-Sabio M, Rodriguez-Reinoso F. Sepiolite-based adsorbents as humidity controller[J]. Applied Clay Science, 2001,20(3):111-118.
- [15] 吕荣超.海泡石、硅藻土、沸石、作为调湿建筑材料的基础研究[D].北京:中国建筑材料科学研究院,2005.
- [16] 杨海亮,彭志勤,周旻,等.二次致孔法制备 CMC-g-PAM/PAAS 多孔树脂及其调湿性能[J].化工学报,2010,61(12):3302-3308.

- [17] 曹嘉浏,罗曦芸,张文清,等.壳聚糖基调湿材料的制备及性能[J].化工新型材料,2009,37(3):94-96.
- [18] 刘川文,黄红军,李志广,等.聚乙烯醇吸附性树脂的制备及其吸湿放湿性能研究[J].科学技术与工程,2007,(2):242-244.
- [19] Zhang S F, He Y F, Wang R M, et al. Preparation of emulsifier-free acrylate cross-linkable copolymer emulsion and application in coatings for controlling indoor humidity[J]. Iranian Polymer Journal, 2013,22(6): 447-456.
- [20] 姜洪义,王一萍,吴海亮.有机调湿材料的探索研究[J].武汉理工大学学报,2007,(3):6-8.
- [21] 黄季宜,金招芬.调湿建材调节室内湿度的可行性分析[J].暖通空调,2002,(1):105-106.
- [22] Park J H, Kim Y U, Jeon J, et al. Analysis of biochar-mortar composite as a humidity control material to improve the building energy and hygrothermal performance[J]. Science of the Total Environment, 2021,775:145552.
- [23] 王颖娟.调湿保温砂浆与空气载能辐射空调协同运行研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [24] 刘永超.基于复合调湿保温砂浆的外墙体综合热湿性能研究[D].长沙:湖南大学,2019.
- [25] Chen Z, Qin M. Preparation and hygrothermal properties of composite phase change humidity control materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,98:1150-1157.
- [26] He X, Zhang H, Qiu L, et al. Hygrothermal performance of temperature-humidity controlling materials with different compositions[J]. Energy and Buildings, 2021,236:110792.
- [27] 张浩.建筑相变储湿材料的制备、热湿性能及应用模拟研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
- [28] Ren Q, Zeng Z, Xie M, et al. Cement-based composite with humidity adsorption and formaldehyde removal functions as an indoor wall material[J]. Construction and Building Materials, 2020,247:118610.
- [29] 冉茂宇.封闭空间调湿材料新的调湿特性指标及其理论基础[J].华侨大学学报(自然科学版),2003(1):64-69.
- [30] 牧福美他.内装材料与湿度调节ハウスクリマ研究[A].日本建筑学会主编.ノ-ト:第6集.福冈:秀巧社印刷株式会社,1980.45-49
- [31] 池田哲朗.调湿材料与湿度调节[J].石膏と石灰,1992, 240:69-73.
- [32] 小野公平.ミュ-ジライトの調湿特性--特に初期応答性について[J].旭硝子研究報告,1983,33(1):65-75.
- [33] 大釜敏正.壁装と調湿[M].东京:(株)彰国社出版社,1997:114-127.
- [34] Rode C, Peuhkuri R H, Mortensen L H, et al. Moisture buffering of building materials[M]. Technical University of Denmark, Department of Civil Engineering, 2005.
- [35] 谢昊岩.调湿材料湿缓存能力评价及其在辐射空调房间中的应用研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [36] 石诚楠,张会波,吉野博.调湿材料应用于全室空间的调湿性能评价方法[J].建筑科学,2019,35(10):157-162.
- [37] Osanyintola O F, Simonson C J. Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact[J]. Energy and Buildings, 2006,38(10):1270-1282.
- [38] Qin M, Hou P, Wu Z, et al. Precise humidity control materials for autonomous regulation of indoor moisture[J]. Building and Environment, 2020,169: 106581.
- [39] Fořt J, Šál J, Kočí J, et al. Energy Efficiency of Novel Interior Surface Layer with Improved Thermal Characteristics and Its Effect on Hygrothermal Performance of Contemporary Building Envelopes[J]. Energies, 2020,13(8):1-17.
- [40] Li Z, Chen W, Deng S, et al. The characteristics of space cooling load and indoor humidity control for residences in the subtropics[J]. Building and environment, 2006,41(9):1137-1147.
- [41] Yu S, Cui Y, Feng G. Research on Performance of Humidity-controlling Materials Based on E+[J]. Procedia Engineering, 2016,146:318-326.
- [42] Fraïne Y, Seladji C, Aït-Mokhtar A. Effect of microencapsulation phase change material and diatomite composite filling on hygrothermal performance of sintered hollow bricks[J]. Building and Environment, 2019,154:145-154.
- [43] Künzel H M, Holm A, Zirkelbach D, et al. Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope[J]. Solar energy, 2005,78(4):554-561.
- [44] Karlsson H. Embedded water-based surface heating part

- 2: experimental validation[J]. *Journal of Building Physics*, 2010,34(2):143-162.
- [45] 杨江涛,赵蕾.顶板辐射供冷空调房间结露的防控研究[J].*建筑热能通风空调*,2019,38(10):10-13.
- [46] Zarrella A, De Carli M, Peretti C. Radiant floor cooling coupled with dehumidification systems in residential buildings: A simulation-based analysis[J]. *Energy conversion and management*, 2014,85:254-263.
- [47] 马玉奇,刘学来,李永安,等.冷却顶板结露问题分析[J].*山东建筑大学学报*,2007,(6):537-540.
- [48] Li G, She C, Wu N, et al. The solution and simulation of the condensation problem of the capillary network system in the Children's Hospital of Shenyang in summer[J]. *Procedia Engineering*, 2015,121:1215-1221.
- [49] 钱佳炜,李念平,苏林,等.贴附射流作用下辐射冷顶板加置换通风空调系统评价分析[J].*建筑科学*,2015,31(6):86-89.
- [50] 赵建会,朱彬,崔保天,等.新型复合空调系统的结露情况及舒适性数值模拟[J].*科学技术与工程*,2020,20(27):11031-11037.
- [51] 于志浩,金梧凤,刘艳超.毛细管网吊顶辐射空调与新风耦合的性能研究[J].*绿色科技*,2013,(11):253-258.
- [52] Kang Z, Peng X, Cheng X, et al. Analysis of condensation and thermal comfort of two kinds of compound radiant cooling air conditioning systems based on displacement ventilation[J]. *Procedia Engineering*, 2017,205:1529-1534.
- [53] Song D, Kim T, Song S, et al. Performance evaluation of a radiant floor cooling system integrated with dehumidified ventilation[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008,28(11-12):1299-1311.
- [54] Wang S, Morimoto M, Soeda H, et al. Evaluating the low exergy of chilled water in a radiant cooling system[J]. *Energy and Buildings*, 2008,40(10):1856-1865.
- [55] Lim J H, Jo J H, Kim Y Y, et al. Application of the control methods for radiant floor cooling system in residential buildings[J]. *Building and Environment*, 2006,41(1):60-73.
- [56] 裴凤,陈华,吴爱侠,等.毛细管网辐射供冷空调系统形式介绍[J].*发电与空调*,2012,33(2):35-38,80.
- [57] 朱备,翟晓强,尹亚领,等.毛细管辐射供冷的换热及结露特性的实验研究[J].*制冷技术*,2013,33(4):5-10.
- [58] 李逸姝,魏健健,徐象国,等.新型辐射供冷末端装置性能的数值模拟[J].*制冷技术*,2017,37(6):55-61.
- [59] 孔祥雷,张小松,路诗奎.辐射供冷空调结露问题的研究现状及其对策[J].*建筑热能通风空调*,2008,(1):20-23.
- [60] 张顺波.含空气层冷辐射板的改进分析及其防结露控制[D].长沙:湖南大学,2015.
- [61] Wu Y, Sun H, Duan M, et al. Dehumidification-adjustable cooling of radiant cooling terminals based on a flat heat pipe[J]. *Building and Environment*, 2021, 194:107716.
- [62] Amini M, Maddahian R, Saemi S. Numerical investigation of a new method to control the condensation problem in ceiling radiant cooling panels[J]. *Journal of Building Engineering*, 2020,32: 101707.
- [63] Tang H, Zhang T, Liu X, et al. Theoretical and experimental study of departure duration of condensate droplets from radiant cooling ceiling surfaces[J]. *Building and Environment*, 2017,114:445-454.
- [64] Huzayyin A, El-Batsh H, Nada S, et al. Experimental and numerical investigation of a condensation repellent radiant cooling panel system[J]. *JES. Journal of Engineering Sciences*, 2012,40(4):1075-1089.
- [65] 郑晓光.有机物吸附对表面特性影响及抑制冷辐射板结露性能研究[D].广州:广州大学,2021.
- [66] 王晋生,龙惟定,董涛,等.置换通风加冷却顶板系统避免结露和下降气流的方法[J].*暖通空调*,2009,39(1):27-32.
- [67] Teitelbaum E, Rysanek A, Pantelic J, et al. Revisiting radiant cooling: condensation-free heat rejection using infrared-transparent enclosures of chilled panels[J]. *Architectural Science Review*, 2019,62(2):152-159.
- [68] Du K, Wu H, Huang G, et al. Condensation-free radiant cooling with double-skin infrared-transparent membranes[J]. *Building and Environment*, 2021,193: 107660.