

稻壳灰/硅藻土复合调湿材料研究

胡明玉^{1,2,3}, 蔡国俊^{1,2,3}, 付超^{1,2,3}, 刘章君^{1,2,3}

(1. 南昌大学 建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 江西省超低能耗建筑重点实验室, 江西 南昌 330031;
3. 江西省近零能耗建筑工程实验室, 江西 南昌 330031)

摘要: 稻壳灰具有超大比表面积和微孔结构, 且生态效应优于其它工业废弃物, 对其高效利用意义重大. 以稻壳灰和天然硅藻土为原材料, 掺以适量无机改性掺合料, 制备稻壳灰/硅藻土复合调湿材料. 通过试验研究稻壳灰/硅藻土复合调湿材料的调湿、强度和耐水性. 采用 XRD 分析探讨材料强度和耐水性的形成机理; 通过扫描电镜分析和材料吸附/解吸理论研究材料的调湿机理. 研究表明, 稻壳灰复合量为 9%~17% 时, 复合调湿材料吸、放湿速率分别达到 0.058 0~0.066 0 kg/(kg·d) 和 0.042 6~0.047 5 kg/(kg·d); 60 d 抗压强度为 6.01~6.50 MPa、软化系数达 0.71~0.76. 无机改性掺合料与稻壳灰、硅藻土中的 SiO₂ 和 Al₂O₃ 反应生成大量 C-S-H 凝胶和斜方钙沸石、菱沸石等新硅铝酸盐矿物, 使材料产生强度和耐水性; 复合调湿材料对空气中水分子的毛细孔道效应、表面化学及物理吸附作用, 使其具有优异的调湿性能.

关键词: 稻壳灰/硅藻土复合调湿材料; 吸放湿速率; 抗压强度; 耐水性

中图分类号: TU50

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0784-07

Study on rice husk ash/diatomite composite humidity-controlling material

HU Mingyu^{1,2,3}, CAI Guojun^{1,2,3}, FU Chao^{1,2,3}, LIU Zhangjun^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. Key Laboratory for Ultra-low Energy Buildings of Jiangxi Province, Nanchang 330031, China;
3. Engineering Lab for Nearly Zero Energy Buildings of Jiangxi Province, Nanchang 330031, China)

Abstract: Rice husk ash has super specific surface area and micro-porous structure, and its ecological effect is superior to other industrial wastes, which is of great significance for its efficient utilization. In this study, rice husk ash and natural diatomite were used as raw materials, and a proper amount of inorganic modified admixture was added to prepare rice husk ash/diatomite composite humidity-controlling material. The humidity-controlling performance, strength, and water resistance of rice husk ash/diatomite composite humidity-controlling material were studied through experiments. The formation mechanism of strength and water resistance of the material was discussed by XRD analysis, and the humidity-controlling mechanism of the material was studied by scanning electron microscopy and material adsorption/desorption theory. The results show that when the rice husk ash content is 9%~17%, the moisture absorption and desorption rates of the composite material reach 0.058 0~0.066 0 kg/(kg·d) and 0.042 6~0.047 5 kg/(kg·d), respectively; the compressive strength at 60 days is 6.01~6.50 MPa and the softening coefficient is 0.71~0.76. Inorganic modified admixture reacts with SiO₂, Al₂O₃ in diatomite and rice husk ash to form a large amount of C-S-H gel and new aluminosilicate minerals, such as Gismondine and Chabazite, which make the material produce strength and water resistance. It has excellent humidity-controlling performance.

Key words: rice husk ash/diatomite composite humidity-controlling material; moisture absorption and desorption rate; compressive strength; water resistance

近年来, 室内空气相对湿度已成为人们关注的重要问题. 适宜的室内湿度环境对人体健康、物品保存甚至建筑的耐久性具有重要意义. 研究表明, 适宜的室内空气相对湿度为 30%~60%^[1], 此时舒适度好、微生物少且有利于人体健康. 但

我国沿海和长江中下游地区全年大部分时间空气湿度在 70% 以上, 通常需采用空调或除湿机等设备除湿, 这会带来高能耗, 甚至因此导致室内新风量不足使污染物浓度增大, 引发“病态建筑综合症”, 不符合建筑节能和可持续发展需求^[2-4]. 因

收稿日期: 2019-02-21

修改稿日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51362021); 江西省水利厅科技项目(KT201331)

第一作者: 胡明玉(1958—), 女, 教授, 博士, 博士生导师. 主要从事生态环境材料和建筑结构材料方面的研究. E-mail: 892660685@qq.com

此, 利用调湿材料的吸放湿特性合理调控室内湿度, 对节约能源、提高室内环境的健康和舒适性具有重要意义。

调湿材料是指可利用自身的吸放湿特性调节室内空气相对湿度, 而无需机械设备和能源消耗的材料。无机多孔矿物材料孔结构发达、比表面积大、吸附能力强且安全无毒, 受到学者们的关注^[5]。周波等^[6]通过微波强化 NH_4Cl 溶液对沸石改性, 研究表明改性沸石基复合调湿材料的吸、放湿能力较天然沸石基调湿材料显著提高; GAO^[7]、李文彦^[8]、Gonzalez^[9]通过高温煅烧的方法, 利用炭类物质对沸石、硅藻土及海泡石改性, 制备出吸湿量分别为 20% 和 10.55% 的沸石/碳复合材料和竹炭/硅藻土复合调湿材料, 以及控湿能力较好的海泡石-活性炭球团; 胡志波等^[10]以硅藻土和重质碳酸钙为原材料, 采用焙烧法制备硅藻土/重质碳酸钙复合调湿材料, 制备的复合调湿材料生成了硅酸钙和氢氧化钙, 使其内部介孔含量增多, 易于形成毛细管凝聚, 在相对湿度为 70%、80% 和 90% 的恒温高湿度环境下 36h 吸湿量分别达到 7.213%、11.159% 和 14.701%。总体上看, 目前对无机矿物类调湿材料的研究多集中于硅藻土、沸石粉、海泡石和高岭土等无机矿物, 其中相当部分为非可再生资源, 不仅原料成本高, 且制备能耗大。因此, 如何有效利用现有资源制备低成本、低能耗且性能

优异的调湿材料意义重大。

稻壳灰是稻壳燃烧后的副产物, 主要矿物组成为无定型 SiO_2 , 且具有超大比表面积和微孔结构^[11]。欧阳东等^[12-13]曾对其进行 SEM 和 TEM 分析, 证实稻壳灰中含有大量由 SiO_2 凝胶粒子紧密粘聚而形成的微、纳米尺度孔隙, 使其具备用作调湿材料的微观结构基础。但目前对于稻壳灰的研究多集中于利用其反应活性提高混凝土的力学性能和耐久性, 而其丰富的孔结构和巨大比表面积的功能性优点尚未得到很好利用。本研究将稻壳灰与硅藻土进行复合, 经无机改性掺合料的作用制备复合调湿材料, 探索稻壳灰复合量等对调湿材料的调湿性能、强度和耐水性的影响规律, 并利用扫描电镜、X 射线衍射分析和材料吸附/解吸理论研究该复合调湿材料的湿度调节机理和强度、耐水性的形成机理。

1 实验内容

1.1 原材料准备

稻壳灰: 江西省新干县稻壳发电厂的副产物, 呈黑色粉末状, 粒级为 0.15~2.36 mm, 烧失量约 17%。主要成分为无定型 SiO_2 、少量 C 及未燃烧的有机物。

天然硅藻土: 取自江西省广昌县, 硅藻类型以圆盘藻为主, 占硅藻细胞个数的 95% 以上, 硅藻粒径为 8~12 μm , 主要化学成分见表 1。

表 1 天然硅藻土的化学组成
Tab. 1 Chemical composition of natural diatomite

Component	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	CaO	LOI	Total
Percentage/%	61.25	15.58	11.23	0.55	0.91	0.22	8.58	98.32

无机改性掺合料: 以江西新余某钢铁厂 95% 矿渣和 5% 硅粉配制而成, 呈白色粉末状, 细度为通过 0.08 mm 筛孔标准筛筛余 3.5%。主要矿物组成为 $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ 、MgO 以及少量 $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ 。

1.2 试验

1.2.1 材料制备

将天然硅藻土、稻壳灰 (Rice Husk Ash, RHA) 磨细至 180~220 目。根据本项目组前期研究结果, 无机改性掺合料 (Inorganic Modified Admixture, IMA) 合理掺量为 15%~25%^[14-15], 故本试验选择硅藻土与无机改性掺合料间的质量比为 3: 1。按不同稻壳灰用量, 根据表 2 配比进行材料制备。将原材料按配比混合均匀后装入试模抹压成型, 制成尺寸为 20 mm×20 mm×20 mm 的试

件。试件成型 24 h 后拆模, 并在常温、相对湿度为 40%~80% 的条件下养护。

表 2 原材料配比
Tab. 2 Raw material ratio

Sample	Diatomite (A/kg)	RHA (B/kg)	IMA (C/kg)	α /%	Water solid ratio
DG-0	75	0	25	0	0.21
DG-9	75	10	25	9	0.23
DG-17	75	20	25	17	0.25
DG-23	75	30	25	23	0.27
DG-29	75	40	25	29	0.29

注: $\alpha = B / (A + B + C) \times 100\%$

1.2.2 调湿性能试验

(1) 平衡含湿率

按 GB/T20312-2006《建筑材料及制品的湿热性能、吸湿性能的测定标准》中的干燥器法测定材料吸、放湿性能。在 5 个干燥器中分别盛放 MgCl_2 、 NaBr 、 NaCl 、 KCl 和 K_2SO_4 的饱和盐溶液, 其在 25 °C 下控制的空气相对湿度分别为 33.8%、61.2%、76.6%、85.9% 和 99.0%。

将试件干燥至恒重, 在 25 °C 温度下将试件依次放入相对湿度分别为 33.8%、61.2%、76.6%、85.9% 和 99.0% 的干燥器中吸湿, 达到吸湿平衡后再将试件依次放入相对湿度分别为 99.0%、85.9%、76.6%、61.2% 和 33.8% 的干燥器中放湿, 分别测定与环境达到湿平衡时试件的质量, 测定时间间隔为 $1\text{d} \pm 1\text{h}$ 。按式(1)计算材料的吸(放)湿含湿率 $u(\%)$ 。

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为吸(放)湿过程试件质量, kg, m_0 为干燥试件质量, kg。

(2) 吸放湿速率

将试件干燥至恒重, 在 25 °C 下将试件依次放入相对湿度分别为 33.8% 和 99.0% 的干燥器中吸湿, 按时间间隔 $1\text{d} \pm 1\text{h}$ 测定试件的质量。待试件达到吸湿平衡后再依次放入相对湿度为 99.0% 和 33.8% 的干燥器中放湿, 按上述时间间隔测定试件的质量, 直至与环境达到放湿平衡后停止测定。根据所测数据, 按式(2)、(3)计算材料的吸(放)湿率 $U(\%)$ 和吸(放)湿速率 $V(\text{kg}/\text{kg} \cdot \text{d})$ 。

$$U = u_1 - u_2, \quad (2)$$

式中: u_1 为吸湿后(放湿前)试件含湿率, u_2 为吸湿前(放湿后)试件含湿率。

$$V = \frac{m_1 - m_2}{m_0 \times t} \quad (3)$$

式中: m_1 为吸湿后(放湿前)试件质量, kg; m_2 为吸湿前(放湿后)试件质量, kg; m_0 为干燥试件质量, kg; t 为吸(放)湿时间, d。

1.2.3 抗压强度及耐水性试验

当试件养护到 14 d、21 d、28 d、42 d 和 60 d 时, 分别测定试件在干燥、吸水饱和状态下的抗压强度。根据所测数据, 按式(4)计算其软化系数 K 。

$$K = R_1 / R_0 \quad (4)$$

式中, R_0 和 R_1 分别为试件在干燥状态和吸水饱和状态下的抗压强度, MPa。

1.2.4 XRD 衍射及扫描电镜分析

采用 X 射线衍射及环境扫描电镜分析稻壳灰、天然硅藻土原材料和复合调湿材料的主要矿物组成、微观形貌及孔隙特征, 并根据分析结果及材料的吸/脱附理论研究复合调湿材料强度、耐水性的形成及调湿机理。

2 结果与讨论

2.1 平衡含湿率

所有试件在空气相对湿度分别为 33.8%、61.2%、76.6%、85.9% 和 99.0% 的环境下达到湿平衡时, 在 25 °C 下其吸、放湿平衡含湿率与环境相对湿度的关系见图 1。

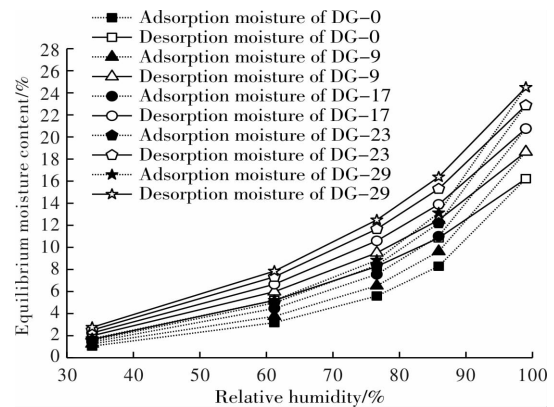


图 1 相对湿度与平衡含湿率的关系

Fig. 1 Relationship between relative humidity and equilibrium moisture content

由图 1 可知, 试件的平衡含湿率随空气相对湿度增加而提高, 且同一相对湿度条件下放湿平衡含湿率高于吸湿平衡含湿率。与无稻壳灰的 DG-0 组相比, 复合稻壳灰试件的吸、放湿平衡含湿率均有所提高, 且稻壳灰复合量越大, 平衡含湿率提高。在空气相对湿度分别为 33.8%、61.2%、76.6%、85.9% 和 99% 的条件下, 未复合稻壳灰组的吸、放湿平衡含湿率分别为 1.05% 和 1.67%、3.18% 和 5.2%、5.59% 和 8.27%、8.29% 和 10.85%、16.22%; 稻壳灰复合量为 17% 时在上述湿度环境下吸、放湿平衡含湿率分别为 1.42% 和 2.25%、4.47% 和 6.66%、7.56% 和 10.59%、1.01% 和 13.89%、20.76%; 将稻壳灰复合量提高至 29% 时, 吸、放湿平衡含湿率可分别达到 1.73% 和 2.76%、5.2% 和 7.85%、8.84% 和 12.49%、13.12% 和 16.38%、24.49%。稻壳灰复合量分别为 9%、17%、23% 和 29% 时, 材料的吸、放湿平衡含湿率比未复合稻壳灰组分别提高约 20%、40%、56% 和 65%。

2.2 吸放湿速率

各组试件在 33.8% 和 99% 相对湿度环境下达到湿平衡, 根据测定结果计算其在各时刻的含湿率和吸放湿速率, 结果显示各组材料均在吸湿第 1 天达到最大吸湿速率, 放湿第 1 天达到最大放湿速率, 7 d 后基本达到吸湿平衡, 而 22 d 后达到放湿平衡。分析各组数据并根据计算结果绘制出吸、放湿动力曲线和最大吸、放湿速率图, 见图 2 和图 3。

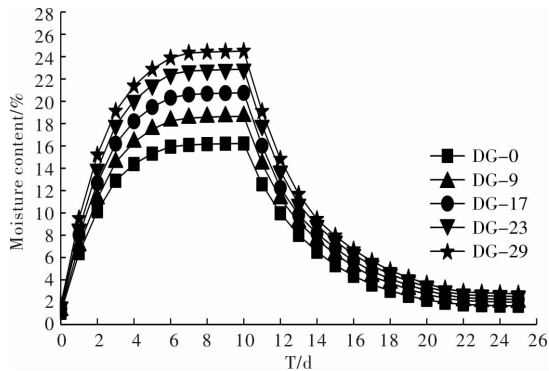


图 2 吸、放湿动力曲线

Fig. 2 Adsorption and desorption kinetic curves

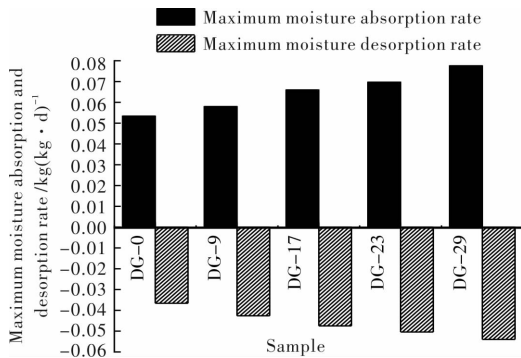


图 3 最大吸、放湿速率

Fig. 3 Maximum adsorption and desorption rates

分析图 2 可知, 未复合稻壳灰组的总吸、放湿率为 15.17% 和 14.55%, 复合量为 9%、17%、23% 和 29% 时总吸湿率分别达到 17.39%、19.34%、21.3% 和 22.76%; 总放湿率分别为 16.65%、18.51%、20.36% 和 21.73%。即随稻壳灰复合量增大, 吸、放湿率均提高。

由图 3 可知, 稻壳灰复合量分别为 9%、17%、23%、29% 时, 最大吸湿速率分别为 0.058 0 kg/(kg·d)、0.066 0 kg/(kg·d)、0.069 7 kg/(kg·d) 和 0.077 6 kg/(kg·d), 最大放湿速率分别为 0.042 6 kg/(kg·d)、0.047 5 kg/(kg·d)、0.050 4 kg/(kg·d) 和 0.054 0 kg/(kg·d)。总体上, 材料的吸湿速率大于放湿速率。稻壳灰复合量分别为 9%、17%、23% 和 29% 时材料的吸湿速

率比未复合稻壳灰组分别提高约 8.6%、23.6%、30.5% 和 45.3%, 放湿速率分别提高约 16.3%、29.7%、37.7% 和 47.5%。

2.3 强度及耐水性

采用 LD43.305 抗压抗折一体机测定每组试件在规定龄期下的干燥和吸水饱和状态下的抗压强度, 并计算其软化系数, 各指标与养护龄期的关系见图 4~图 5。

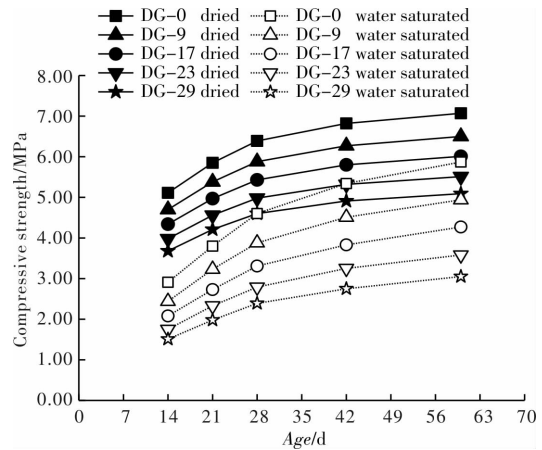


图 4 养护龄期与抗压强度的关系

Fig. 4 Relation between age and compressive strength

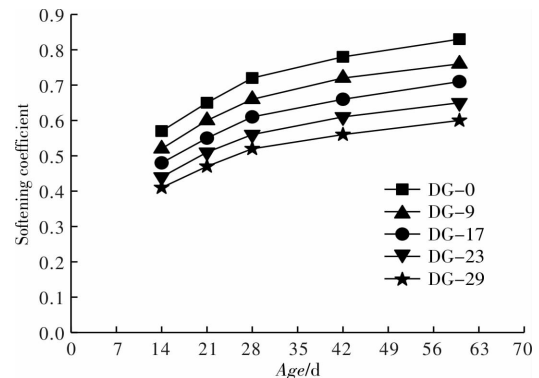


图 5 养护龄期与软化系数的关系

Fig. 5 Relation between age and softening coefficient

由图 4 可知, 复合调湿材料在各龄期抗压强度均低于未复合稻壳灰组, 且随稻壳灰复合量加大, 材料强度更低。未复合稻壳灰组材料在 14 d、21 d、28 d、42 d、60 d 龄期的抗压强度分别为 5.1 MPa、5.9 MPa、6.4 MPa、6.8 MPa 和 7.1 MPa; 复合 29% 稻壳灰的材料在上述龄期的抗压强度分别为 3.7 MPa、4.2 MPa、4.6 MPa、4.9 MPa 和 5.1 MPa。由图 5 可知, 未复合稻壳灰组材料在上述龄期的软化系数分别为 0.57、0.65、0.72、0.78 和 0.83; 稻壳灰复合量为 29% 时, 在上述龄期的软化系数分别为 0.41、0.47、0.52、0.56 和 0.6, 即复合稻壳灰后材料的软化系数均低于 DG-0 组, 且随稻壳灰复合量加大软化系数降低。

越明显. 总体上, 稻壳灰复合量在 9%~17% 时, 材料 60 d 抗压强度可达到 6 MPa 以上, 软化系数达到 0.71~0.76. 从图 4 和图 5 还可以看出, 随着龄期的延长, 材料吸水饱和状态抗压强度的增长速度较干燥状态下的抗压强度高, 故软化系数的增长速度比强度高, 且超过 60 d 龄期后, 软化系数和强度均有继续增大的趋势.

为探究稻壳灰/硅藻土复合调湿材料强度的形成机理, 对稻壳灰、硅藻土原材料及复合调湿材料进行 XRD 分析, 衍射图谱见图 6. 由图 6 可知, 稻壳灰、硅藻土的主要矿物组成为 Quartz(石英, SiO_2) 和 Merwinite(镁硅钙石, $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$), 且谱线存在非晶包, 应该为稻壳灰及硅藻土中的活性 SiO_2 所致. 稻壳灰/硅藻土复合调湿材料的主要矿物组成除上述物质外, 还存在 Gismondine(斜方钙沸石, $\text{Ca}_4\text{Al}_8(\text{SiO}_4)_8 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$) 和 Chabazite(菱沸石, $\text{CaAl}_2(\text{SiO}_4)_2\text{Cl}_2$) 等, 应该为稻壳灰、硅藻土与改性掺合料反应后生成的产物. 在材料的养护过程中, 无机改性掺合料中的 C_2S 先与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶, 提供碱性环境. 硅藻土和稻壳灰中的活性 SiO_2 及 Al_2O_3 等在碱性环境下与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及改性掺合料中的其它成分反应生成新的硅铝酸盐矿物. 因此, 经 C-S-H 胶结、新化学结合力的作用, 使材料产生强度和耐水性. 随养护龄期的延长, 由改性掺合料作用产生的反应会持续进行, 材料的强度和耐水性持续增大. 本试验采用的稻壳灰烧失量较高, 达到 17%. 因此一方面由于碳本身强度低, 吸水性高, 使材料制备时的水固比增大, 导致材料的强度和耐水性降低; 另一方面, 碳对水具有较强的吸附性, 对材料的调湿作用有利.

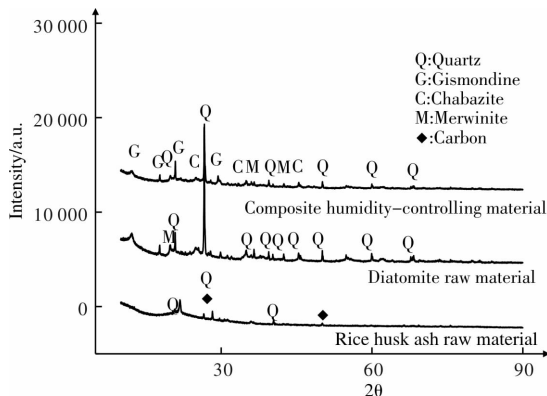


图 6 原材料和复合调湿材料 XRD 衍射图谱

Fig. 6 XRD diffraction pattern of raw materials and composite humidity-controlling material

2.4 微观结构及调湿机理分析

为研究稻壳灰/硅藻土复合调湿材料调节室内空气相对湿度的机理, 对稻壳灰、硅藻土原料和稻壳灰/硅藻土复合调湿材料进行扫描电镜分析, 见图 7~图 9.

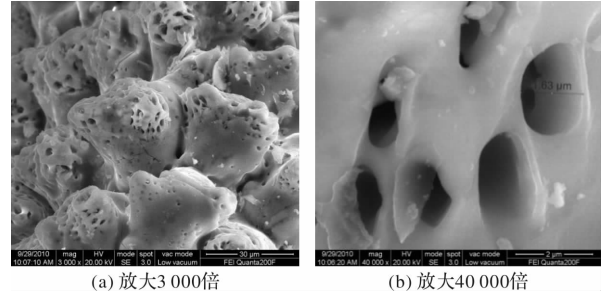


图 7 稻壳灰原料扫描电镜照片

Fig. 7 Scanning electron micrographs of rice husk ash raw material

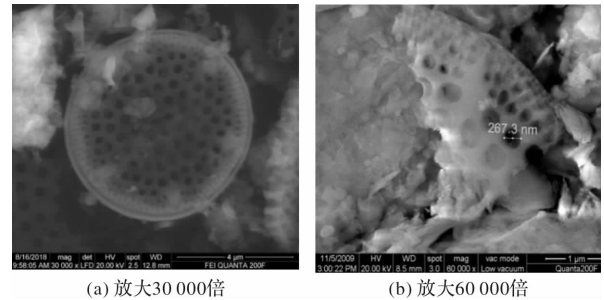


图 8 硅藻土原料扫描电镜照片

Fig. 8 Scanning electron micrographs of diatomite material

由图 7 和图 8 可知, 粒状稻壳灰颗粒呈堆积状态, 粒子间及表面存在大量孔隙, 放大至 40 000 倍后可观察到粒状粒子表面分布大量由 SiO_2 粒子紧密粘聚而形成的微、纳米级孔; 从硅藻土 SEM 照片可观察到圆盘藻表面的蜂窝状孔洞, 放大 60 000 倍后可见片状硅藻土表面分布大量直径为 250 nm 左右的微孔隙.

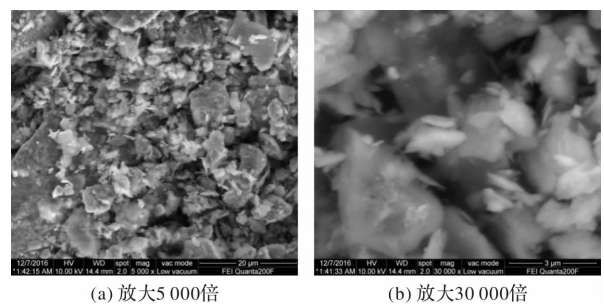


图 9 稻壳灰/硅藻土复合调湿材料扫描电镜照片

Fig. 9 Scanning electron micrographs of rice husk ash/diatomite composite humidity-controlling material

由图 9 稻壳灰/硅藻土复合调湿材料的 SEM 照片可见, 经试件制备过程的分散、挤压作用以

及与无机改性掺合料的反应,材料仍基本保持片状体结构.由此可知,稻壳灰表面含有大量微、纳米级蜂窝状孔洞,结合硅藻土中的蜂窝状孔隙,它们共同构成材料的微孔体系.材料中丰富的微孔结构具有较强的毛细孔道效应^[16],可随环境湿度的变化自动调节湿度;另一方面,稻壳灰和硅藻土均为生物成因的无机多孔矿物材料,且主要成分均为无定型 SiO_2 ,为硅氧四面体结构,呈独特的壳体结构,具有生物骨架中的大孔及 SiO_2 间隙构成的微孔.微孔内壁的表面羟基分布紧密,易形成缔合羟基,与水接触时会发生羟基化反应,产生化学吸附^[17-18].此外,稻壳灰中的碳质微粒可对水产生物理吸附作用,在范德华力和活性炭吸附的双重作用下增强材料对水分子的物理吸附作用.毛细孔道效应对水分子的吸附力与孔道数量及尺寸有关,由于稻壳灰的引入以及试件制作的分散挤压作用,使孔道数量增加、尺寸减小,产生的吸附力增强.物理吸附作用的水分子较易脱附,而化学吸附的水分子较难脱附,故总体上吸附易于脱附,材料的吸湿率及吸湿速率均高于放湿率和放湿速率.综合稻壳灰的主要成分及微观形貌,引入稻壳灰可增强材料对水分子的毛细孔道效应、表面化学及物理吸附作用.故随稻壳灰复合量加大,调湿效果越强.

3 结论

(1)稻壳灰/硅藻土复合调湿材料的平衡含湿率和吸、放湿速率均高于未复合稻壳灰的硅藻土调湿材料,吸湿速率高于放湿速率,且空气相对湿度越大吸湿率越高.这一特性对调节南方潮湿地区室内空气湿度较为有利.

(2)稻壳灰量对材料的强度和耐水性有一定的影响,但将稻壳灰复合量控制在 $9\% \sim 17\%$,材料 60 d 的抗压强度可大于 6 MPa,软化系数达到 $0.71 \sim 0.76$,具有良好的强度和耐水性.

(3)稻壳灰/硅藻土复合调湿材料基本保留了硅藻土片状体间的微空隙以及表面的蜂窝状孔洞.稻壳灰/硅藻土复合调湿材料同时依靠毛细孔道效应、表面物理及化学吸附,自动释放或吸附水分,调节室内相对湿度.

(4)硅藻土和稻壳灰中的 SiO_2 、 Al_2O_3 在碱性环境下可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及改性掺合料中的其它成分反应生成大量 C-S-H 凝胶和新的硅铝酸盐矿物.经 C-S-H 胶结、新的化学结合力作用,使材料产生强度和耐水性.

参考文献 References

- [1] WANG Jihui, REN Shuping, GUO Mengjie. Preparation and humidity controlling behaviors of sepiolite/polyacrylic acid (sodium) composite[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 423-430.
- [2] ZHANG Tao, LIU Xiaohua, JIANG Yi. Development of temperature and humidity independent control (THIC) air-conditioning systems in China: A review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29(1): 793-803.
- [3] RAO Zhonghao, WANG Shuangfeng, ZHANG Zhengguo. Energy saving latent heat storage and environmental friendly humidity-controlled materials for indoor climate[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(5): 3136-3145.
- [4] YANG Hailiang, PENG Zhiqin, ZHOU Yang, et al. Preparation and performances of a novel intelligent humidity control composite material [J]. Energy & Buildings, 2010, 43(3): 386-392.
- [5] ZHENG Jiayi, SHI Juan, MA Qiang, et al. Experimental study on humidity control performance of diatomite-based building materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114(5): 450-456.
- [6] 周波, 郑佳宜, 陈振乾. 微波辅助 NH_4Cl 改性沸石及其在调湿材料中的应用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(4): 835-839.
ZHOU Bo, ZHENG Jiayi, CHEN Zhenqian. Modification of natural zeolite by microwave assisted ammonium chloride and its application to humidity-controlling materials[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2013, 43(4): 835-839.
- [7] GAO N F, KUME S, WATARI K. Zeolite-carbon composites prepared from industrial wastes (I): Effects of processing parameters[J]. Materials Science & Building; Engineering A, 2005, 399(1): 216-221.
- [8] 李文彦, 杨辉, 郭兴忠, 等. 用竹炭和硅藻土为原料制备含炭建筑材料[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(1): 7-11.
LI Wenyan, YANG Hui, GUO Xingzhong, et al. Building decoration material containing charcoal prepared by using bamboo charcoal and diatomite as raw materials [J]. Journal of Materials Science & Engineering, 2011, 29(1): 7-11.
- [9] GONZÁLEZ J C, MOLINA-SABIO M, RODRÍGUEZ-Reinoso F. Sepiolite-based adsorbents as humidity controller[J]. Applied Clay Science, 2001, 20(3): 111-118.
- [10] 胡志波, 演阳, 郑水林, 等. 硅藻土/重质碳酸钙复合调湿材料的制备及表征[J]. 无机材料学报, 2016, 31

- (1):81-87.
- HU Zhibo, YAN Yang, ZHENG Shuilin, et al. Preparation and characterization of humidity control material based on diatomite/ground calcium carbonate composite[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2016, 31(1): 81-87.
- [11] 王亚丽, 彭司宇, 李楠, 等. 稻壳灰渣的特性及对氮氧化物还原性研究[J]. *硅酸盐通报*, 2018, 37(9): 2870-2874, 2882.
- WANG Yali, PENG Siyu, LI Nan, et al. Performance of rice husk ash and reduction of nitrogen oxides [J]. *Bulletin of The Chinese Ceramic Society*, 2018, 37(9): 2870-2874, 2882.
- [12] 欧阳东, 陈楷. 稻壳灰显微结构的研究[J]. *材料科学与工程学报*, 2003(5): 647-650.
- OUYANG Dong, CHEN Kai. Study on the microstructure of rice husk ash [J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2003(5): 647-650.
- [13] 欧阳东, 陈楷. 低温焚烧稻壳灰的显微结构及其化学活性[J]. *硅酸盐学报*, 2003(11): 1121-1124.
- OUYANG Dong, CHEN Kai. Microstructure and chemical activity of rice husk ash burned at low temperature[J]. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 2003(11): 1121-1124.
- [14] 胡明玉, 付超. 硅藻土调湿材料的性能及调湿机理研究[J]. *功能材料*, 2017, 48(4): 4007-4012.
- HU Mingyu, FU Chao. Study on properties and humidity control mechanism of diatomite humidity-controlling materials [J]. *Journal of Functional Materials*, 2017, 48(4): 4007-4012.
- [15] 胡明玉, 付超, 吴琼, 等. 海泡石黏土建筑调湿材料的性能及机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2018, 21(3): 408-413, 432.
- HU Mingyu, FU Chao, WU Qiong, et al. Properties of sepiolite clayas humidity-controlling building materials and its humidity controlling mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(3): 408-413, 432.
- [16] 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.
- LÜ Rongchao. Fundamental researches of sepiolite, diatomite and zeolite as humidity control building materials [D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2005.
- [17] 胡志波. 硅藻土及复合材料孔结构和表面特性与调湿性能研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2017.
- HU Zhibo. Study on pore structure and surface properties of diatomite and composite material and humidity control performance [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017.
- [18] KHRAISHEH MAM, AL-GHOUTI MA, ALLEN SJ, et al. Effect of OH and silanol groups in the removal of dyes from aqueous solution using diatomite [J]. *Water Research*, 2004, 39(5): 922-932.
- (编辑 吴海西 桂智刚)