

Optimizing preparation of electrospun phase change and humidity storage fibers based on uniform design

Hao ZHANG^{1,2*}, Dayou ZHU¹, Xiuyu LIU¹

1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan, Anhui 243032, China

2. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction and Resources Recycling (Anhui University of Technology), Ministry of Education, Ma'anshan, Anhui 243002, China

Abstract: Phase change and humidity storage fibers was prepared with cellulose acetate as coating materials, polyethylene glycol 800 as phase change materials, N,N-dimethylacetamide and acetone as solvent by electrospinning method. The effects of every factor on comprehensive thermal and humidity properties of electrospun phase change and humidity storage fibers were studied based on uniform design and multivariate nonlinear regression. The results showed that primary and secondary sequence of factors on comprehensive thermal and humidity properties were content of polyethylene glycol 800>content of N,N-dimethylacetamide>content of cellulose acetate>reaction temperature>drying temperature. The optimization program were mass ratios of N,N-dimethylacetamide to acetone of 0.226, cellulose acetate to acetone of 0.1392 and polyethylene glycol 800 to acetone of 0.1624, reaction temperature 37.8°C and drying temperature 60.4°C.

Key words: electrospinning; phase change and humidity storage fibers; uniform design; thermal property; humidity property; optimized preparation

基于均匀设计优化制备静电纺丝相变储湿纤维

张浩^{1,2*}, 朱大有¹, 刘秀玉¹

1. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽 马鞍山 243032

2. 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学), 安徽 马鞍山 243002

摘 要:以醋酸纤维素为包裹材料、聚乙二醇 800 为相变材料、N,N-二甲基乙酰胺和丙酮为溶剂, 采用静电纺丝法制备相变储湿纤维, 基于均匀设计和多元非线性回归法研究了各因素对静电纺丝相变储湿纤维综合热、湿性能的影响。结果表明, 各因素对综合热、湿性能影响为: 聚乙二醇 800 用量>N,N-二甲基乙酰胺用量>醋酸纤维素用量>反应温度>干燥温度。优化制备方案: N,N-二甲基乙酰胺用量、醋酸纤维素用量、聚乙二醇 800 用量与丙酮的质量比分别为 0.226、0.1392 与 0.1624, 反应温度 37.8°C 和干燥温度 60.4°C。

关键词: 静电纺丝; 相变储湿纤维; 均匀设计; 热性能; 湿性能; 优化制备

中图分类号: TU522.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2018)04-0839-06

1 前言

能源的供应和需求在时间上具有很强的依赖性, 利用材料的被动调节能力将暂时不用的能量储存, 在需要

时释放, 可合理利用能量^[1,2]。借助微体积封装技术, 将作为载体基质的储湿调湿材料与作为填充物质的相变调湿材料复合形成具有相变储湿性能的新型包裹结构复合材料, 控制工作源或材料周围环境的温湿度, 可减

收稿: 2017-10-18, 修回: 2018-01-03, 网络发表: 2018-04-27, Received: 2017-10-18, Revised: 2018-01-03, Published online: 2018-04-27

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(编号: 2017M612051); 冶金减排与资源综合利用教育部重点实验室(安徽工业大学)资助项目(编号: KF17-08)

作者简介: 张浩(1982-), 男, 江苏省南京市人, 博士, 副教授, 从事冶金固废资源利用、环保型建筑节能材料研究, Tel: 18755512282, E-mail: fengxu19821018@163.com.

引用格式: 张浩, 朱大有, 刘秀玉. 基于均匀设计优化制备静电纺丝相变储湿纤维. 过程工程学报, 2018, 18(4): 839-844.

Zhang H, Zhu D Y, Liu X Y. Optimizing preparation of electrospun phase change and humidity storage fibers based on uniform design (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2018, 18(4): 839-844, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.217364.

轻能源供求在时间、空间和速度上的不匹配程度,实现能量转移,达到节能目的^[3-6].

尚建丽等^[7,8]以正十八烷为芯材、聚苯乙烯为内壳、甲基丙烯酸甲酯与壳聚糖接枝为外壳,制备了具有相变储湿性能的双壳微纳米相变胶囊,其相变温度为 31.7℃,相变焓为 218 J/g,相对湿度 11.3%~97.3%的平衡含湿量为 0.0093~0.1797 g/g. 张浩等^[9,10]以 SiO₂为载体材料、癸酸-棕榈酸为相变调温材料,采用溶胶-凝胶法制备了具有调温调湿性能的癸酸-棕榈酸/SiO₂相变储湿复合材料,其相变温度为 19.88~23.13℃,相变潜热为 38.55~42.56 J/g,相对湿度 40%~65%时的平衡含湿量为 0.1526~0.1992 g/g. 相变储湿复合材料的研究普遍关注颗粒状复合材料^[11,12],棒状复合材料的研究极少.

本工作以醋酸纤维素为包裹材料、聚乙二醇 800 为相变材料、N,N-二甲基乙酰胺和丙酮为溶剂,采用静电纺丝法制备相变储湿纤维,基于均匀设计和多元非线性回归方程研究 N,N-二甲基乙酰胺用量、醋酸纤维素用量、聚乙二醇 800 用量、反应温度及干燥温度对静电纺丝相变储湿纤维综合热、湿性能的影响,确定了优化制备模型和方案,制备了具有良好综合热、湿性能的静电纺丝相变储湿纤维,对改善室内环境舒适度和提高建筑节能具有重要的理论价值和现实意义.

2 实验

2.1 材料与试剂

聚乙二醇 800[HO(CH₂CH₂O)_nH, 分析纯,天津市光复精细化工研究所], N,N-二甲基乙酰胺[CH₃(ONCH₃)₂, 分析纯,天津市富宇精细化工有限公司], 丙酮(C₃H₆O, 分析纯,天津市百世化工有限公司), 酸纤维素(工业纯,美国 Sigma-Aldrich 公司), 其乙酰基含

量 39.8%, 羟基含量 3.5%.

2.2 实验设备与分析仪器

AUW120D 型精密电子天平(日本岛津公司), 85-2 型数显恒温磁力搅拌器(金坛岸头国瑞实验仪器厂), WZ-50C6 型微量注射泵(上海越磁电子科技有限公司), YTC8107-100 型电容分压器高压测量系统(湖北仪天成电力设备有限公司), DZ-2BCII 型真空恒温干燥箱(广州沪瑞明仪器有限公司), DVS Intrinsic 型动态水分吸附分析仪(DVS, 英国 SMS 公司), TA 2910 型差示扫描量热仪(DSC, 美国 TA 仪器公司), Quanta 200 型电子扫描电镜(SEM, 美国 FEI 公司), BRUKER UECIOR 22 型傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR, 德国 BRUKER 光谱仪器公司).

2.3 实验方法

2.3.1 静电纺丝相变储湿纤维的制备

以一定质量的 N,N-二甲基乙酰胺与 50 g 丙酮制备 N,N-二甲基乙酰胺-丙酮混合溶液,将一定质量的醋酸纤维素溶解在其中,加入一定质量的聚乙二醇 800,在一定温度下密封,高速搅拌 6 h,获得静电纺丝相变储湿纤维溶液.将溶液装入 5 mL 的玻璃注射器中,注射器一端与喷头相接,另一端则连接注射泵推动溶液以 0.40 mL/h 的速度流至喷头一端,喷头与高压静电发生器的阳极相连,使用与地相连的铝箔收集获得静电纺丝相变储湿纤维,收集间距为 20.0 cm,电压为 20.0 kV.将所得静电纺丝相变储湿纤维放入一定温度的真空干燥箱中烘干 24 h 除去残余溶剂.

2.3.2 静电纺丝相变储湿纤维的分析

用 DVS 测试静电纺丝相变储湿纤维的湿性能^[13],用 DSC 测试其热性能^[14],用 SEM 观察其微观形貌,用 FT-IR 分析其结构组成.

表 1 制备静电纺丝相变储湿纤维的均匀设计方案
Table 1 Uniform design scheme of preparation of electrospun phase change and humidity storage fibers

Sample	Factor			Reaction temperature, D/℃	Drying temperature, E/℃
	Mass ratio of N,N-dimethylacetamide to acetone, A	Mass ratio of cellulose acetate to acetone, B	Mass ratio of polyethylene glycol 800 to acetone, C		
1	0.1	0.1	0.12	35	80
2	0.2	0.12	0.12	40	60
3	0.3	0.12	0.12	45	80
4	0.4	0.14	0.14	30	60
5	0.1	0.16	0.14	40	80
6	0.2	0.16	0.14	45	60
7	0.3	0.10	0.16	30	90
8	0.4	0.10	0.16	35	70
9	0.1	0.12	0.16	45	90
10	0.2	0.14	0.18	30	70
11	0.3	0.14	0.18	35	90
12	0.4	0.16	0.18	40	70

3 结果与讨论

3.1 均匀实验结果

研究 N,N-二甲基乙酰胺用量(N,N-二甲基乙酰胺与丙酮的质量比, 因素 A)、醋酸纤维素用量(醋酸纤维素与丙酮的质量比, 因素 B)、聚乙二醇 800 用量(聚乙二醇 800 与丙酮的质量比, 因素 C)、反应温度(因素 D)及干燥温度(因素 E)对静电纺丝相变储湿纤维湿性能和热性能的影响. 根据文献^[15], 以五因素四水平的 U_{12}^* (12¹²)

均匀设计方案(表 1)制备静电纺丝相变储湿纤维, 其湿性能与热性能见表 2 和 3.

从表 2 可看出, 静电纺丝相变储湿纤维具有良好的湿性能, 在相对湿度 35%~95% 下的平衡含湿量为 0.3465~0.4910 g/g, 平衡含湿量样品 9>7>8>1>10>11>4>2>12>3>5>6. 从表 3 可看出, 静电纺丝相变储湿纤维的相变温度基本稳定在 20.83~29.35 ℃, 表明聚乙二醇 800 可稳定包裹于醋酸纤维中. 其相变潜热差异较大, 平均相变潜热样品 10>9>11>12>7>5>8>6>1>2>4>3.

表 2 静电纺丝相变储湿纤维的平衡含湿量
Table 2 Equilibrium moisture content of electrospun phase change and humidity storage fibers

Relative humidity/%	Equilibrium moisture content/(g/g)							
	Sample 1		Sample 2		Sample 3		Sample 4	
	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption
35	0.0266	0.0271	0.0267	0.0274	0.0268	0.0274	0.0292	0.0296
45	0.0598	0.0630	0.0593	0.0629	0.0418	0.0440	0.0579	0.0594
55	0.1351	0.1639	0.1231	0.1545	0.0901	0.1143	0.1119	0.1389
65	0.1396	0.1949	0.1254	0.1842	0.0945	0.1538	0.1500	0.2123
75	0.2236	0.2670	0.2189	0.2684	0.1802	0.2404	0.1911	0.2443
85	0.3989	0.4029	0.3637	0.3691	0.3501	0.3571	0.3105	0.3182
95	0.4672	0.4673	0.4216	0.4219	0.3997	0.4000	0.4241	0.4247
Difference value between RH35% and RH95%	0.4406	0.4402	0.3949	0.3945	0.3729	0.3726	0.3949	0.3951

Relative humidity/%	Equilibrium moisture content/(g/g)							
	Sample 5		Sample 6		Sample 7		Sample 8	
	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption
35	0.0198	0.0205	0.0187	0.0192	0.0180	0.0184	0.0162	0.0164
45	0.0391	0.0411	0.0448	0.0490	0.0511	0.0558	0.0432	0.0470
55	0.1096	0.1330	0.0981	0.1242	0.1387	0.1802	0.1407	0.1814
65	0.1296	0.1781	0.1245	0.1834	0.1689	0.2227	0.1433	0.2035
75	0.1709	0.2026	0.1640	0.1962	0.2676	0.3011	0.2569	0.3005
85	0.2578	0.2643	0.2665	0.2724	0.3916	0.4085	0.3757	0.3842
95	0.3797	0.3803	0.3654	0.3657	0.4775	0.4780	0.4685	0.4687
Difference value between RH35% and RH95%	0.3599	0.3598	0.3467	0.3465	0.4595	0.4596	0.4523	0.4523

Relative humidity/%	Equilibrium moisture content/(g/g)							
	Sample 9		Sample 10		Sample 11		Sample 12	
	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption	Absorption	Desorption
35	0.0283	0.0290	0.0196	0.0202	0.0195	0.0200	0.0167	0.0169
45	0.0463	0.0512	0.0432	0.0477	0.0449	0.0492	0.0358	0.0387
55	0.1244	0.1595	0.1088	0.1398	0.1023	0.1370	0.0995	0.1307
65	0.1566	0.2293	0.1487	0.2120	0.1522	0.2195	0.1492	0.2031
75	0.2220	0.2634	0.2242	0.2586	0.2219	0.2532	0.2007	0.2349
85	0.3927	0.4063	0.3396	0.3508	0.3367	0.3493	0.2999	0.3130
95	0.5193	0.5195	0.4569	0.4573	0.4510	0.4514	0.4059	0.4063
Difference value between RH35% and RH95%	0.4910	0.4905	0.4373	0.4371	0.4315	0.4314	0.3892	0.3894

表 3 静电纺丝相变储湿纤维的相变温度与相变潜热

Table 3 Phase change temperature and phase change latent heat of electrospun phase change and humidity storage fibers

Sample	Phase transition temperature/℃	Phase change latent heat/(J/g)	Average of phase change latent heat/(J/g)	Sample	Phase transition temperature/℃	Phase change latent heat/(J/g)	Average of phase change latent heat/(J/g)
1	20.96~29.31	37.04~41.03	39.04	7	20.92~28.84	41.79~46.29	44.04
2	21.04~28.79	33.95~37.61	35.78	8	21.05~29.18	39.27~43.50	41.39
3	21.18~28.86	31.74~35.17	33.46	9	21.36~29.35	47.24~52.33	49.79
4	21.35~29.27	33.59~37.16	35.38	10	21.47~29.23	48.25~53.45	50.85
5	21.21~28.95	40.74~45.13	42.94	11	20.83~29.07	45.27~50.15	47.71
6	21.07~29.13	38.03~42.12	40.08	12	21.28~28.96	42.15~46.69	44.42

3.2 优化制备模型分析

根据表 2 和 3,选取二次回归方程^[16,17]拟合因素 A~E 与目标值 F 的关系,建立模型,并对各因素及交互作用进行优化与评价.由于湿性能单位为 g/g,热性能单位为 J/g,不能直接进行代数计算,需进行归一化处理.静电纺丝相变储湿纤维的综合热、湿性能 F 计算见式(1):

$$F=F_1+F_2,$$
(1)

式中, F_1 为相对湿度 35%~95%的吸湿过程与放湿过程的

平均平衡含湿量(经归一化处理), F_2 为平均相变潜热(经归一化处理).

结果见表 4, F 的相关系数见表 5, 回归系数为各项变动引起的 F 变动量, 标准化系数为各项对 F 的影响程度.从表可看出, 均匀设计结果与二次回归模型吻合较好($R=0.9978$), 表明二次模型的回归效果良好.各因素对目标值 F 的影响程度为 $C>A>B>D>E$.

表 4 目标值 F
Table 4 Target values F

Sample	Equilibrium moisture content of difference value between RH35% and RH95%/(g/g)				Phase change latent heat/(J/g)		Target value,	
	Absorption	Desorption	Average value	F_1	Test value	Average value	F_2	F
1	0.4406	0.4402	0.4404	0.8973	37.04~41.03	39.04	0.7677	1.6650
2	0.3949	0.3945	0.3947	0.8042	33.95~37.61	35.78	0.7036	1.5078
3	0.3729	0.3726	0.3728	0.7596	31.74~35.17	33.46	0.6580	1.4176
4	0.3949	0.3951	0.3950	0.8048	33.59~37.16	35.38	0.6958	1.5006
5	0.3599	0.3598	0.3599	0.7333	40.74~45.13	42.94	0.8444	1.5777
6	0.3467	0.3465	0.3466	0.7062	38.03~42.12	40.08	0.7882	1.4944
7	0.4595	0.4596	0.4596	0.9364	41.79~46.29	44.04	0.8661	1.8025
8	0.4523	0.4523	0.4523	0.9216	39.27~43.50	41.39	0.8140	1.7356
9	0.4910	0.4905	0.4908	1.0000	47.24~52.33	49.79	0.9792	1.9792
10	0.4373	0.4371	0.4372	0.8908	48.25~53.45	50.85	1.0000	1.8908
11	0.4315	0.4314	0.4315	0.8792	45.27~50.15	47.71	0.9382	1.8174
12	0.3892	0.3894	0.3893	0.7932	42.15~46.69	44.42	0.8735	1.6667

表 5 F 的相关系数
Table 5 Correlation coefficient for F

Item	Regression coefficient	Standardized coefficient	R
Constant	1.7590	0.0000	0.9978
A	-0.7054	1.4157	
B	0.0651	0.7728	
C	0.8728	4.7505	
D	0.0000	0.0763	
E	0.0003	0.0000	
A ²	0.0122	0.9864	
B ²	-0.0171	0.5810	
C ²	-0.0035	6.9382	
D ²	0.0001	0.0066	
E ²	0.0000	0.0000	

根据表 5 中回归系数可得静电纺丝相变储湿纤维综合热、湿性能 F 的二次回归方程:

$$F=1.7590-35.27A+3.255B+43.64C+0.0000D+0.0003E+3.05A^2-4.275B^2-0.875C^2+0.025D^2+0.0000E^2.$$
(2)

表 6 优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维的湿性能和热性能
Table 6 Humidity property and thermal property of electrospun phase change and humidity storage fibers prepared under optimal conditions

Relative humidity/%	Equilibrium moisture content/(g/g)		Phase transition temperature/℃	Phase change latent heat/(J/g)
	Absorption	Desorption		
35	0.0262	0.0266	21.64~29.13	47.35~52.29
45	0.0438	0.0487		
55	0.1232	0.1571		
65	0.1542	0.2280		
75	0.2201	0.2593		
85	0.3888	0.4025		
95	0.5104	0.5105		
Difference value between RH35% and RH95%	0.4842	0.4839		

3.3 优化结果

采用 Gauss-Newton 算法^[18,19]求解式(2),得 $A=0.226$, $B=0.1392$, $C=0.1624$, $D=37.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $E=60.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时制备的静电纺丝相变储湿纤维的综合热、湿性能最好, $F=1.9879$.采用优化方案所制静电纺丝相变储湿纤维的湿性能和热性能见表 6.从表可看出, 优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维在相对湿度 35%~95%下的平衡含湿量为 0.4839~0.4842 g/g, 相变温度为 21.64~29.13 $^{\circ}\text{C}$, 相变潜热为 47.35~52.29 J/g, 平均平衡含湿量为 0.4841 g/g, $F_1=0.4841/0.4908=0.9863$, 湿性能良好, 平均相变潜热为 49.82 J/g, $F_2=49.82/50.85=0.9797$, 热性能良好, 综合热、湿性能 $F=F_1+F_2=0.9863+0.9797=1.9660$, 均大于表 4 中的目标值 F , 综合热、湿性能优良.与式(2)计算的目标值 $F=1.9897$ 的相对误差仅为-1.191%, 表明二次

回归方程准确, 可用于预测与优化静电纺丝相变储湿纤维的综合热、湿性能。

3.4 静电纺丝相变储湿纤维的表征

3.4.1 结构组成

醋酸纤维素、聚乙二醇 800 和优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维的红外光谱如图 1 所示。从图 1(a) 可看出, 醋酸纤维素在 3504.44, 2889.23, 1740.14 和 1222.69 cm^{-1} 附近出现 $-\text{OH}$ 收缩振动吸收峰和对称伸缩振动吸收峰、羰基的 $-\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰和酯基的 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰。从图 1(b) 可看出, 聚乙二醇 800 在 3448.71, 2883.71, 1103.88 和 1721.41 cm^{-1} 附近出现 $-\text{OH}$

收缩振动吸收峰、 $-\text{CH}_3$ 反对称伸缩振动吸收峰、醚的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸缩振动吸收峰和羰基的 $-\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰。从图 1(c) 可以看出, 优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维在 3464.68, 2884.05, 1742.20, 1230.10 和 1107.10 cm^{-1} 附近分别出现 $-\text{OH}$ 收缩振动吸收峰、 $-\text{CH}_3$ 反对称伸缩振动吸收峰、羰基 $-\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰、酯基的 $\text{C}-\text{O}$ 伸缩振动吸收峰和醚的 $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 伸缩振动吸收峰, 均为醋酸纤维素和聚乙二醇 800 的吸收峰, 表明已形成以醋酸纤维素为载体基质、聚乙二醇 800 为相变材料的静电纺丝相变储湿纤维。

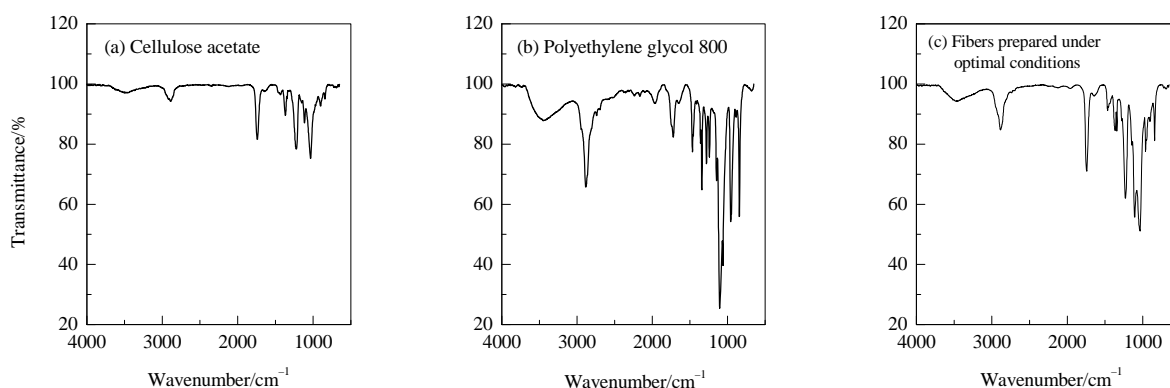


图 1 醋酸纤维素、聚乙二醇 800 和优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维的红外光谱

Fig.1 FT-IR spectra of cellulose acetate, polyethylene glycol 800 and electrospun phase change and humidity storage fibers prepared under optimal conditions

3.4.2 微观结构

优化条件下所制备静电纺丝相变储湿纤维的 SEM 照片如图 2 所示, 纤维表面光滑, 直径粗细均匀, 形貌整体呈均匀的棒状, 纤维较饱满且不透明, 表明醋酸纤维素对聚乙二醇 800 包裹良好。

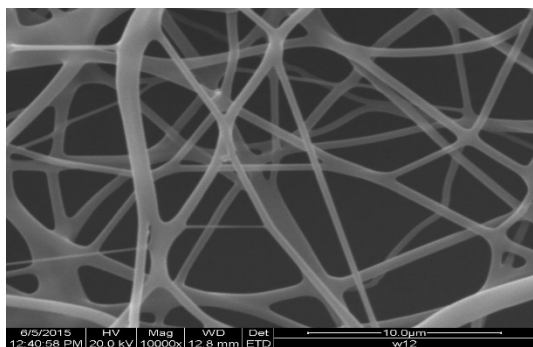


图 2 优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维的 SEM 照片

Fig.2 SEM image of electrospun phase change and humidity storage fibers prepared under optimal conditions

4 结 论

以醋酸纤维素为包裹材料、聚乙二醇 800 为相变材料、N,N-二甲基乙酰胺和丙酮为溶剂, 采用静电纺丝法制备相变储湿纤维, 基于均匀设计和多元非线性回归方程研究了 N,N-二甲基乙酰胺用量、醋酸纤维素用量、聚乙二醇 800 用量、反应温度及干燥温度对静电纺丝相变储湿纤维综合热、湿性能的影响, 得到如下结论:

(1) 各因素对静电纺丝相变储湿纤维综合热、湿性能的影响程度为聚乙二醇 800 用量 > N,N-二甲基乙酰胺用量 > 醋酸纤维素用量 > 反应温度 > 干燥温度。

(2) 静电纺丝相变储湿纤维的优化制备方案为 N,N-二甲基乙酰胺用量、醋酸纤维素用量、聚乙二醇 800 用量与丙酮的质量比分别为 0.226, 0.1392 和 0.1624, 反应温度 37.8 $^{\circ}\text{C}$ 和干燥温度 60.4 $^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 优化条件下所制静电纺丝相变储湿纤维的综合热、湿性能优良, 与二次回归方程计算结果的相对误差仅为 -1.191%, 二次回归方程选择准确, 可用于预测与优化静电纺丝相变储湿纤维的综合热、湿性能。

参考文献

- [1] Sharma A, Tyagi V V, Chen C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2009, 13(2): 318–345.
- [2] Pacheco R, Ordóñez J, Martínez G. Energy efficient design of building: a review [J]. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, 2012, 16(6): 3559–3573.
- [3] He F, Wang X D, Wu D Z. New approach for sol–gel synthesis of microencapsulated n-octadecane phase change material with silica wall using sodium silicate precursor [J]. *Energy*, 2014, 67(4): 223–233.
- [4] Li B X, Liu T X, Hu L Y, et al. Fabrication and properties of microencapsulated paraffin@SiO₂ phase change composite for thermal energy storage [J]. *ACS Sustainable Chemistry and Energy*, 2013, 1(3): 374–380.
- [5] 黄子硕, 于航, 张美玲. 建筑调湿材料吸放湿速度变化规律 [J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(2): 310–314.
- Huang Z S, Yu H, Zhang M L. Humidity-control materials and their humidity absorption and desorption rate variation [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, 42(2): 310–314.
- [6] Pal S, Hajj M R, Wong W P, et al. Thermal energy storage in porous materials with adsorption and desorption of moisture [J]. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2014, 69(2): 285–292.
- [7] 尚建丽, 李乔明, 王争军. 微胶囊相变储能石膏基建筑材料制备及性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2012, 33(12): 2140–2144.
- Shang J L, Li Q M, Wang Z J. Preparation and thermal performance tests of microencapsulated gypsum-based phase change building material [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(12): 2140–2144.
- [8] 尚建丽, 王思, 董莉. PAR/POL/SOD 复合微胶囊的制备及热湿性能研究 [J]. *功能材料*, 2013, 44(8): 1141–1144.
- Shang J L, Wang S, Dong L. Prepared of PAR/POL/SOD-composite-wall microencapsulated and research of energy storage and humidity-control performance [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(8): 1141–1144.
- [9] 尚建丽, 张浩, 熊磊, 等. 脂肪酸/SiO₂ 复合相变材料的制备及其结构影响因素的研究 [J]. *材料研究学报*, 2015, 29(10): 757–766.
- Shang J L, Zhang H, Xiong L, et al. Preparation and texture of phase change materials of fatty acid/SiO₂ composite [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(10): 757–766.
- [10] 张浩, 黄新杰, 刘秀玉, 等. 优化制备棕榈醇–棕榈酸–月桂酸/SiO₂ 复合相变调湿材料 [J]. *材料研究学报*, 2015, 29(9): 671–678.
- Zhang H, Huang X J, Liu X Y, et al. Optimization for preparation of phase change and humidity control composite materials of hexadecanol–palmitic acid–lauric acid/SiO₂ [J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(9): 671–678.
- [11] Zhang Y, Wang L J, Tang B T, et al. Form-stable phase change materials with high phase change enthalpy from the composite of paraffin and cross-linking phase change structure [J]. *Appl. Energy*, 2016, 184: 241–246.
- [12] Tang B T, Wang L J, Xu Y J, et al. Hexadecanol/phase change polyurethane composite as form-stable phase change material for thermal energy storage [J]. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 2016, 144: 1–6.
- [13] 李魁山, 张旭, 韩星, 等. 建筑材料等温吸放湿曲线性能实验研究 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(1): 81–84.
- Li K S, Zhang X, Han X, et al. Experimental research of isothermal sorption curve of building materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(1): 81–84.
- [14] 于永生, 井强山, 宋方方. 十六醇/十六酸/十二酸三元复合相变体系研究 [J]. *建筑材料学报*, 2013, 12(1): 97–101.
- Yu Y S, Jing Q S, Song F F. Study on the ternary phase change system of H/PA/LA [J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 12(1): 97–101.
- [15] 尚建丽, 张浩, 熊磊, 等. 基于均匀设计优化制备癸酸–棕榈酸/SiO₂ 复合相变材料 [J]. *材料工程*, 2015, 43(9): 94–102.
- Shang J L, Zhang H, Xiong L, et al. Optimized preparation of decanoic–palmitic acid/SiO₂ composite phase change materials based on uniform design [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2015, 43(9): 94–102.
- [16] 张浩. 基于RBF网络优化制备均匀粒度分布的微米级SiO₂基相变调湿复合材料 [J]. *材料工程*, 2017, 45(8): 24–29.
- Zhang H. Optimizing preparation of micron SiO₂-based phase change and humidity controlling composites with uniform particle size distribution based on RBF neural network [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(8): 24–29.
- [17] 张浩, 黄新杰, 宗志芳, 等. 基于吸附性能的生物基多孔活性炭制备方案的响应面法优化 [J]. *材料工程*, 2017, 45(6): 67–72.
- Zhang H, Huang X J, Zong Z F, et al. Optimization of preparation program for biomass based porous active carbon by response surface methodology based on adsorptive property [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45(6): 67–72.
- [18] 杨铎. 基于 Gauss–Newton 法的空间管形拟合算法的研究 [J]. *大连大学学报*, 2014, 35(3): 19–23.
- Yang D. Space tube-shaped fitting algorithm based on spatial Gauss–Newton method [J]. *Journal of Dalian University*, 2014, 35(3): 19–23.
- [19] 韩敏, 王亚楠. 求解非线性回归问题的 Newton 算法 [J]. *计算机学报*, 2010, 33(5): 841–846.
- Han M, Wang Y N. A Newton algorithm for nonlinear regression [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(5): 841–846.