

均匀粒度分布的双壳相变储湿微胶囊制备

张浩^{*1,3}, 熊磊², 徐紫茹¹, 刘秀玉¹

(1. 安徽工业大学 建筑工程学院, 马鞍山 243032; 2. 广州特种承压设备检测研究院, 广州 510050;
3. 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), 马鞍山 243002)

摘要: 分别以正十八烷、甲基丙烯酸甲酯和壳聚糖作为核材料、内壳和外壳, 采用细乳液原位聚合及界面聚合法制备双壳相变储湿微胶囊。通过均匀设计与径向基函数神经网络结合, 考察因素(如乳化剂用量、助乳化剂用量、引发剂用量、超声乳化时间和搅拌速度)对双壳相变储湿微胶囊粒度分布的影响, 并且对最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊进行表征与测试。结果表明, 当扩展系数为 0.55 时, 径向基函数神经(Radial Basis Function, RBF)网络具有最佳的逼近效果。最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数: 乳化剂用量为 3.58wt%、助乳化剂用量为 0.53wt%、引发剂用量为 1.86wt%、超声乳化时间为 11.35 min, 搅拌速度为 632 r·min⁻¹。基于上述制备参数, d_{10} 为 3 352.0 nm、 d_{50} 为 4 474.9 nm, d_{90} 为 6 108.4 nm, $d_{90}-d_{10}$ 实测值为 2 756.4 nm, 实测值与预测值吻合较好, 相对误差为 2.69%。在相对湿度 35%~65% 的平衡含湿量为 0.0547~0.1259 g·g⁻¹, 相变温度为 28.87℃, 相变焓为 78.45 J·g⁻¹。

关键词: 激光粒度; RBF 神经网络; 双壳相变储湿微胶囊; 均匀粒度分布; 预测方法

中图分类号: TQ63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2017)11-2556-06

Preparation of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with uniform particle size distribution

ZHANG Hao^{*1,3}, XIONG Lei², XU Ziru¹, LIU Xiuyu¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China;
2. Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, Guangzhou 510050, China;
3. Key Laboratory of Metallurgical Emission Reduction & Resources Recycling
(Anhui University of Technology), Ministry of Education, Ma'anshan 243002, China)

Abstract: With n-octadecane, methyl methacrylate and chitosan as the core material, inner shell and outside shell respectively, the double-shell phase change and humidity storage micro-capsules were made by in-situ polymerization and emulsion interfacial polymerization method. Combining the uniform design and radial basis function neural network, the effect of parameters (i. e. emulsifier amount, co-emulsifier amount, initiator amount, phacoemulsification time and mixing speed) on particle size distribution of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules were investigated. In addition, the optimal uniform particle size distribution of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules were tested and characterized. The results show that radial basis function(RBF) neural network has the best approximation effect when "Spread" is 0.55. To obtain optimal uniform particle size distribution for double-shell phase change and humidity storage micro-capsules, the preparation parameters are identified as follows: emulsifier amount to be 3.58wt%, co-emulsifier amount to be 0.53wt%, initiator amount to be 1.86wt%, phacoemulsification time to be 11.35 min and mixing speed to be 632 r·min⁻¹. On the base of the above preparation parameters, d_{10} is 3 352.0 nm, d_{50} is 4 474.9 nm, d_{90} is 6 108.4 nm, and the measured value of $d_{90}-d_{10}$ is

收稿日期: 2016-11-29; 录用日期: 2016-12-26; 网络出版时间: 2017-01-12 11:00
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20170112.1100.006.html>
基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51206002); 广东省省级科技计划(2015A030401059); 高等学校优秀青年人才基金(2010SQRL034)
通讯作者: 张浩, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为环保型建筑节能材料 E-mail: fengxu19821018@163.com
引用格式: 张浩, 熊磊, 徐紫茹, 等. 均匀粒度分布的双壳相变储湿微胶囊制备[J]. 复合材料学报, 2017, 34(11): 2556-2561.
ZHANG Hao, XIONG Lei, XU Ziru, et al. Preparation of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with uniform particle size distribution[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(11): 2556-2561 (in Chinese).

2 756.4 nm. Therefore, the measured value agrees well with the predictive value (relative error is 2.69%). In the case of relative humidity between 35% and 65%, the equilibrium moisture content is obtained to be between $0.0547 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.1259 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$, phase transition temperature is 28.87°C and phase change enthalpy is $78.45 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1}$.

Keywords: laser particle size; radial basis function neural network; double-shell phase change and humidity storage micro-capsules; uniform particle size distribution; prediction method

相变储湿胶囊是一种新型的节能与环保材料,其通过利用核材的相变过程储存或释放大量热量,以达到维持温度恒定^[1-4],利用壳材的吸收或释放水分子,以达到调节相对湿度的目的^[5-8],从而降低室内温湿度波动,提高室内环境舒适度,实现真正建筑节能。

目前,对于相变储湿胶囊的研究多关注于如何制备出性能优异且工艺稳定、具有调温调湿功能的微纳胶囊^[9-10]。但是,相变储湿胶囊的综合调温调湿性能不仅与核/壳结构的材料性质相关,而且与其粒度分布密切相关^[11-12]。具有均匀粒度分布的相变储湿胶囊,不仅有利于保证相变储湿胶囊具有稳定的核壳比,提高其综合相变调湿性能;而且有利于保持相变储湿胶囊良好的形貌,提高其耐久性能。然而,对于如何提高相变储湿胶囊粒度分布均匀性的研究,尚未见相关公开报道。

为此本研究在双壳微纳米相变储湿胶囊制备研究成果的基础上^[13-15],以正十八烷为核材、甲基丙烯酸甲酯为内壳、壳聚糖为外壳,采用细乳液原位聚合法及界面聚合法制备双壳相变储湿微胶囊。通过均匀设计与径向基函数神经网络(Radial Basis Function, RBF)网络结合,考察乳化剂用量、助乳化剂用量、引发剂用量、超声乳化时间和搅拌速度对双壳相变储湿微胶囊粒度分布的影响,建立制备工艺与粒度分布的 RBF 粒度分布预测模型,获得最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数;利用激光粒度分析仪、扫描电子显微镜、动态水分吸附分析仪和差示扫描量热仪对双壳微纳米相变储湿胶囊进行分析,验证最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数,为数学模型在相变储湿胶囊制备和粒度分布预测领域应用提供一定的理论基础和技术支持。

1 实验材料与方法

1.1 试剂

正十八烷, AR, 天津市光复精细化工研究所; 苯乙烯, AR, 天津市福晨化学试剂厂; 甲基丙烯酸甲酯, AR, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 丙烯

酸丁酯, AR, 天津市福晨化学试剂厂; 丙烯酸, AR, 天津市福晨化学试剂厂; 十六烷, AR, 天津市福晨化学试剂厂; 十二烷基硫酸钠, AR, 天津市福晨化学试剂厂; 偶氮二异丁腈, AR, 上海山浦化工有限公司; 四乙烯五胺, AR, 天津市科密欧化学试剂开发中心; 二乙烯基苯, AR, 成都格雷西亚化学技术有限公司; 壳聚糖, AR, 西安热默尔生物科技有限公司; 无水乙醇, AR, 国药集团化学试剂有限公司; 实验用水均为去离子水。

1.2 实验方法

利用细乳液原位聚合法及界面聚合法,以壳核比为 1:1,将芯材正十八烷,主单体苯乙烯与甲基丙烯酸甲酯、助乳化剂十六烷、引发剂偶氮二异丁腈以及二乙烯基苯一起混合均匀,得到油相液;将一定量乳化剂十二烷基硫酸钠溶于去离子水中,搅拌 10 min,得到水相液;将油相液加入到水相液中,用电动搅拌机在一定的速度(400 水域)下预乳化 5 min,然后将得到的预乳液用功率 150 W 的超声波清洗仪在冰水浴保护下超声分散 10 min,形成均匀相细乳液;将细乳液转入到装有回流冷凝管、机械搅拌及温度计的四口烧瓶中,在一定的搅拌速度下用滴液漏斗缓慢滴加适量的 1% 乙酸的壳聚糖水溶液和四乙烯五胺,在 40°C 的温度下反应 4 h 完毕后,升温至 80°C 继续反应 4 h。反应完毕后自然冷却至室温,即得到双壳相变储湿微胶囊乳液;将制备的乳液减压抽滤,得到的滤饼用 100 mL 的 25% 无水乙醇洗涤一次,热水洗涤两次,真空干燥得到双壳相变储湿微胶囊。

1.3 性能测试及表征

粒度分布:采用德国 NANOPHOX 型激光粒度分析仪进行测试,测试范围为 $1 \sim 10\,000 \text{ nm}$,折射率为 1.421。

微观形貌:采用日本 JSM-6510LV 型扫描电子显微镜进行测试,工作电压为 $0 \sim 25 \text{ kV}$,分辨率为 1 nm 。

储湿调湿性能:采用英国 DVS Intrinsic 型动态水分吸附分析仪进行测试,测试温度为 25.0°C ,湿

度范围为 0%~80.0%，湿度准确度为±0.50% RH，气氛为 N₂，进气量为 120.0 mL/min。

相变调温性能：采用美国 TA2910 型差示扫描量热仪进行测试，升/降温速率为 5℃·min⁻¹，气氛为 N₂，进气速率为 50 mL·min⁻¹。

1.4 实验方案

在单因素实验基础上，以制备双壳相变储湿微胶囊的乳化剂(十二烷基硫酸钠)用量、助乳化剂(十六烷)用量、引发剂(偶氮二异丁腈)用量、超声乳化时间和搅拌速度作为考察因素，以双壳相变储湿微胶囊粒度分布范围作为指标，按 5 因素 5 水平设计实验方案，双壳相变储湿微胶囊的 U_{10}^* (10¹⁰) 实验因素及水平如表 1 所示。

1.5 数据处理方法

径向基函数神经(RBF)网络是一种新颖有效的前馈式神经网络，它具有最佳逼近和全局最优的性能，同时训练方法快速易行，不存在局部最优问题^[16]。RBF 网络主要包括输入层、隐含层和输出层，其中输入层由信号源结点组成；隐含层是隐单元数视所描述问题的需要而定，隐单元的变换函数是对中心点径向对称且衰减的非负非线性函数；输出层是对输入模式的作用作出响应^[17]。从输入空

间到隐含层空间的变换是非线性的，而从隐含层空间的输出层空间变换是线性的。各层神经元仅与相邻层神经元之间相互全连接，同层内神经元之间无连接，各层神经元之间无反馈连接，构成具有层次结构的前馈型神经网络系统。在 RBF 网络中，输入层至输出层之间的所有权值固定为 1，隐层 RBF 单元的中心及半径通常也预先确定，仅隐层至输出层之间的权值可调。RBF 网络的隐层执行一种固定不变的非线性变换，将输入空间映射到一个新的隐层空间，输出层在该新的空间中实现线性组合。显然由于输出单元的线性特性，其参数调节极为简单，且不存在局部极小问题。径向基神经网络中常用的径向基函数是高斯函数^[18]。

2 结果与讨论

2.1 均匀实验结果

依据表 1，按 5 因素 5 水平设计^[19-20]均匀实验方案，在不同的实验条件下分别进行 10 次实验。制备出的双壳相变储湿微胶囊采用德国 NANO-PHOX 型激光粒度分析仪进行测试，获得 d_{10} 、 d_{50} 和 d_{90} 的数值(见表 2)。

表 2 为双壳相变储湿微胶囊的均匀设计及粒度分布。可以看出，1[#]~10[#] 的双壳相变储湿微胶囊

表 1 双壳相变储湿微胶囊的 U_{10}^* (10¹⁰) 实验因素与水平

Table 1 Factors and levels of U_{10}^* (10 ¹⁰) experiments of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules						
Factor	Code	Level				
		1	2	3	4	5
Emulsifier amount/wt%	A	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
Co-emulsifier amount/wt%	B	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
Initiator amount/wt%	C	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
Phacoemulsification time/min	D	3.00	6.00	9.00	12.00	15.00
Mixing speed/(r·min ⁻¹)	E	250	500	750	1000	1250

Note: Double—Shell.

表 2 双壳相变储湿微胶囊的均匀设计及粒度分布

Table 2 Uniform design and particle size distribution of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules									
NO.	Factor					Particle size distribution/nm			
	A	B	C	D	E	d_{90}	d_{50}	d_{10}	$d_{90}-d_{10}$
1 [#]	1.00	0.30	1.50	12.00	1250	8333.3	4422.7	2468.3	5865.0
2 [#]	2.00	0.50	0.50	9.00	1250	7614.1	4671.2	2930.7	4683.4
3 [#]	3.00	0.20	2.00	3.00	1000	8226.6	4790.0	2888.2	5338.4
4 [#]	4.00	0.40	0.50	15.00	1000	12632.2	4559.8	1671.2	10961.0
5 [#]	5.00	0.60	2.00	12.00	750	8694.6	4376.9	2429.3	6265.3
6 [#]	1.00	0.20	1.00	6.00	750	8187.2	4591.4	2736.8	5450.4
7 [#]	2.00	0.40	2.50	3.00	500	8143.9	4264.8	2363.7	5780.2
8 [#]	3.00	0.60	1.00	15.00	500	6527.6	4364.3	2969.5	3558.1
9 [#]	4.00	0.30	2.50	9.00	250	6718.8	4604.9	3195.8	3523.0
10 [#]	5.00	0.50	1.50	6.00	250	9096.8	4537.1	2388.9	6707.9

Notes: d_{10} —When the cumulative 10% volume fraction of particle size; d_{50} —When the cumulative 50% volume fraction of particle size; d_{90} —When the cumulative 90% volume fraction of particle size; $d_{90}-d_{10}$ —Difference between cumulative 90% volume fraction of particle size and cumulative 10% volume fraction of particle size.

的 d_{50} 基本稳定在 4 264.8~4 790.0 nm 范围内，这是因为上述双壳相变储湿微胶囊均为固定壳核比 1 : 1，所以试样的中位径波动较小，从而说明对于双壳相变储湿微胶囊粒径大小影响最重要的是壳核比。进一步分析表 2 可以看出，1[#]~10[#] 的双壳相变储湿微胶囊粒度分布区间存在较大差异，这是由于乳化剂、助乳化剂用量、引发剂用量、超声乳化时间和搅拌速度对制备双壳相变储湿微胶囊的油相液、水相液、细乳液与乳液均有显著影响，将直接左右双壳相变储湿微胶囊粒度分布的均匀性，为了获得粒度分布均匀的双壳相变储湿微胶囊，还需要进行深入的探究。

2.2 RBF 网络模型

2.2.1 RBF 网络的训练

依据双壳相变储湿微胶囊的均匀设计及粒度分布，以双壳相变储湿微胶囊制备工艺中的乳化剂、助乳化剂用量、引发剂用量、超声乳化时间和搅拌速度以及双壳相变储湿微胶囊的粒度分布区间作为建模对象，引入 RBF 粒度分布预测模型。在 RBF 网络的训练及测试过程中，扩展系数 Spread 对精度的影响很大，当 Spread 选择不合适时，误差很大。取不同的 Spread 值计算 RBF 网络的预报精度确定最佳的 Spread，不同 Spread 对应的 RBF 网络逼近误差如表 3 所示。可以看出，Spread = 0.55 时，RBF 网络的逼近效果最好，因此，可将 Spread

的最佳值设定为 0.55。同时采用 Spread = 0.55 的 RBF 网络对双壳相变储湿微胶囊的最均匀粒度分布进行预测。

2.2.2 RBF 网络的预测与优选

为获得最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数，要根据所选水平的取值范围对 RBF 网络模型各因素利用逐项密集扫描技术采值，作为 RBF 网络模型的预测样本。利用计算机技术对 5 个因素(乳化剂、助乳化剂用量、引发剂用量、超声乳化时间和搅拌速度)依次取值，并且自动剔除不符合要求的数据，以符合要求的数据作为 RBF 网络的训练样本。将选取的预测样本直接输入 RBF 粒度分布预测模型进行预测，可得到预测样本，即双壳相变储湿微胶囊的粒度分布。从样本预测值中选取最均匀粒度分布，对应的参数即为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数(见表 4)。

表 4 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备参数、预测值与实测值。可以看出，利用 RBF 粒度分布预测模型，获得最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数:乳化剂(十二烷基硫酸钠)用量为 3.58wt%、助乳化剂(十六烷)用量为 0.53wt%、引发剂(偶氮二异丁腈)用量为 1.86wt%、超声乳化时间为 11.35 min，搅拌速度为 632 r·min⁻¹。依据 1.3 节的实验方法进行最均

表 3 不同“Spread”的径向基函数神经网络逼近误差

Table 3 Approximation error of radial basis function neural network corresponding to different “Spread”									
NO.	Measured value of $d_{90}-d_{10}/\text{nm}$	Spread=0.35		Spread=0.55		Spread=0.75		Spread=0.95	
		Predictive value of $d_{90}-d_{10}/\text{nm}$	Relative error/%	Predictive value of $d_{90}-d_{10}/\text{nm}$	Relative error/%	Predictive value of $d_{90}-d_{10}/\text{nm}$	Relative error/%	Predictive value of $d_{90}-d_{10}/\text{nm}$	Relative error/%
1 [#]	5865.0	6078.5	3.64	5895.4	0.52	5963.3	1.68	5695.4	-2.89
2 [#]	4683.4	4904.6	4.72	4634.2	0.05	4588.5	-2.03	4456.3	-4.85
3 [#]	5338.4	5478.6	2.63	5356.8	0.34	5467.3	2.41	5489.8	2.84
4 [#]	10961.0	10563.2	-3.63	10856.1	-0.96	11180.9	2.01	10667.2	-2.68
5 [#]	6265.3	5939.1	-5.21	6295.9	0.49	6152.5	-1.80	5958.5	-4.90
6 [#]	5450.4	5283.4	-3.06	5412.1	-0.71	5388.2	-1.14	5232.7	-3.99
7 [#]	5780.2	5631.3	-2.58	5827.3	0.82	5585.8	-3.36	6010.6	3.99
8 [#]	3558.1	3448.5	-3.08	3587.5	0.83	3614.2	1.58	3673.4	3.24
9 [#]	3523.0	3397.7	-3.56	3511.7	-0.32	3487.4	-1.01	3399.5	-3.51
10 [#]	6707.9	6889.6	2.71	5895.4	0.52	6648.5	-0.89	6845.1	2.05

表 4 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备参数、预测值与实测值

Table 4 Preparation parameters, predictive value and measured value of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with optimal uniform particle size distribution							
Factor					$d_{90}-d_{10}/\text{nm}$		Relative error/%
A	B	C	D	E	Predictive value	Measured value	
3.58	0.53	1.86	11.35	632	2830.5	2756.4	2.69

匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备，并且进行表征(见图 1、图 2 和表 5)。

图 1 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的 SEM 图像。可以看出，最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的表面光滑、致密、无明显缺陷，几乎所有胶囊外形呈现较好的球体，粒度分布均匀性较好。图 2 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的激光粒度分析(LPSA)曲线。可以看出，最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的 d_{10} 为 3 352.0 nm、 d_{50} 为 4 474.9 nm 和 d_{90} 为 6 108.4 nm，其 $d_{90}-d_{10}$ 实测值为 2 756.4 nm，

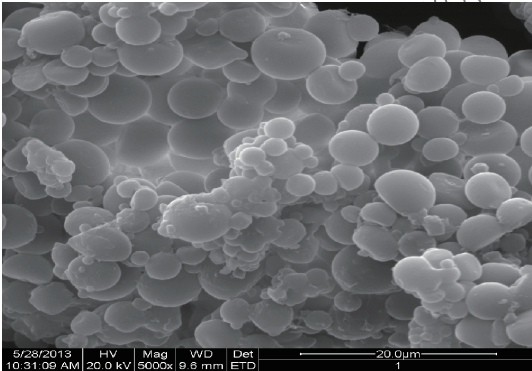


图 1 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的 SEM 图像
Fig.1 SEM image of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with optimal uniform particle size distribution

对比于 $d_{90}-d_{10}$ 预测值 2 830.5 nm，相对误差为 2.69%。表 5 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的性能。可以看出，最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊在相对湿度为 35%~65% 的条件下平衡含湿量为 0.0547~0.1259 g·g⁻¹，相变温度为 28.87℃，相变焓为 78.45 J·g⁻¹，说明最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊具有良好的储湿调湿性能与相变调湿性能。

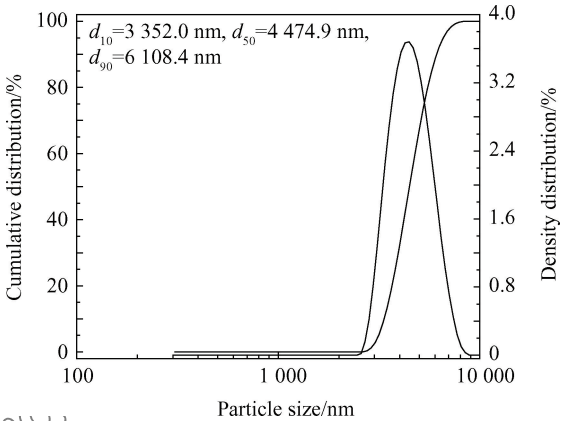


图 2 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的激光粒度分析(LPSA)曲线
Fig.2 Laser particle size analyzer(LPSA) curve of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with optimal uniform particle size distribution

表 5 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的性能

Table 5 Performance of double-shell phase change and humidity storage micro-capsules with optimal uniform particle size distribution

Humidity storage and controlling property		Phase change and temperature controlling property	
Relative humidity/%	Equilibrium moisture content/(g·g ⁻¹)	Phase transition temperature/℃	Phase change enthalpy/(J·g ⁻¹)
35—65	0.0547—0.1259	28.87	78.45

依据表 5，根据下列公式^[21-22]，计算出最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊中相变材料质量分数与相变材料包封效率：

$$X = \frac{H_w}{H_p} \times 100\%$$

$$Y = \frac{X}{W} \times 100\%$$

式中：X 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊中相变材料质量分数； H_w 和 H_p 分别为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的相变焓和纯相变材料的相变焓。Y 为相变材料包封效率；X 为最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊中相变材料质量分数；W 为相变材料投料质量分数。

根据上述公式计算出最均匀粒度分布双壳相变

储湿微胶囊中相变材料质量分数为 36.0%，相变材料包封效率为 69.6%。

3 结 论

- (1) 在径向基函数神经(RBF)网络的训练及测试过程中，扩展系数 Spread 对精度的影响很大，当 Spread=0.55 时，RBF 网络具有最佳的逼近效果。
- (2) 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的制备工艺参数：乳化剂(十二烷基硫酸钠)用量为 3.58wt%、助乳化剂(十六烷)用量为 0.53wt%、引发剂(偶氮二异丁腈)用量为 1.86wt%、超声乳化时间为 11.35 min，搅拌速度为 632 r/min。
- (3) 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊的 d_{10} 为 3 352.0 nm， d_{50} 为 4 474.9 nm， d_{90} 为 6 108.4 nm，

其 $d_{90}-d_{10}$ 实测值为 2 756.4 nm, 对比 $d_{90}-d_{10}$ 预测值 2 830.5 nm, 相对误差为 2.69%。

(4) 最均匀粒度分布双壳相变储湿微胶囊具有良好的储湿调湿性能与相变调温性能, 即在相对湿度为 35%~65% 条件下的平衡含湿量为 0.0547~0.1259 g·g⁻¹, 相变温度为 28.87℃, 相变焓为 78.45 J/g。

参考文献:

- [1] RAO Z H, WANG S F, ZHANG Z G. 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.
- [2] HUYNH C K. Building energy saving techniques and indoor air quality: A dilemma[J]. *International Journal of Ventilation*, 2010, 9(1): 93-98.
- [3] LI M, KAO H T, WU Z S, et al. Study on preparation and thermal property of binary fatty acid and the binary fatty acids/diatomite composite phase change materials[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(5): 1606-1612.
- [4] LI M, KAO H T, WU Z S. Study on preparation and thermal properties of binary fatty acid/diatomite shape-stabilized phase change materials[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2011, 95(8): 2412-2416.
- [5] ZHU N, MA Z J, WANG S W. Dynamic characteristics and energy performance of buildings using phase change materials: A review[J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50(12): 3169-3181.
- [6] SHARMA A, TYAGI V V, CHEN C R, et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(2): 318-345.
- [7] BAKER J. New technology and possible advances in energy storage[J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12): 4368-4373.
- [8] PACHECO R, ORDÓÑEZ J, MARTÍNEZ G. Energy efficient design of building: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3559-3573.
- [9] PARK S K, KIM J H J, NAM J W, et al. Development of anti-fungal mortar and concrete using zeolite and zeocarbon microcapsules[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2009, 31(7): 447-453.
- [10] BORREGUERO A M, CARMONA M, SANCHEZ M L, et al. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with an optimal core/coating mass ratio[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(10): 1164-1169.
- [11] 张秋香, 陈建华, 陆洪彬, 等. 细粒径石蜡微胶囊相变材料的制备与性能[J]. *高等学校化学学报*, 2014, 35(10): 2258-2264.
- [12] 张浩, 黄新杰, 宗志芳, 等. 细粒径 SiO₂ 基棕榈醇-棕榈酸-月桂酸微胶囊相变调湿材料的制备与性能[J]. *材料研究学报*, 2016, 30(6): 418-426.
- [13] 尚建丽, 张浩, 董莉, 等. 双壳微纳米相变胶囊制备影响因素的研究[J]. *材料研究学报*, 2015, 29(2): 135-142.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] AMJADY N, KEYNIA F. A new neural network approach to short term load forecasting of electrical power systems[J]. *Energies*, 2011, 4(3): 488-503.
- [17] NAWI N M, KHAN A, REHMAN M Z. A new levenberg marquardt based back propagation algorithm trained with cuckoo search[J]. *Procedia Technology*, 2013, 11: 18-23.
- [18] 贾明兴, 赵春晖, 王福利, 等. 基于 RBF 神经网络的非线性主元分析方法[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(3): 453-457.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] DALE P, RANDY T. Potential applications of phase change materials in concrete technology[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(7): 527-532.
- [22] 陈春明, 陈中华, 曾幸荣. 细乳液聚合合法制备正十二醇聚合物相变纳米胶囊及其性能研究[J]. *功能材料*, 2011, 42(11): 2112-2115.
- [23] ZHANG H, HUANG X J, ZONG Z F, et al. Preparation and properties of SiO₂ based hexadecanol-palmitic acid-lauric acid microencapsulated phase change and humidity controlling materials with fine particle size[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2016, 30(6): 418-426 (in Chinese).
- [24] SHANG J L, ZHANG H, DONG L, et al. Study of influential factors in double-shell phase change micro-nano capsules preparation[J]. *Chinese Journal of Materials Research*, 2015, 29(2): 135-142 (in Chinese).
- [25] 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 (in Chinese).
- [26] SHANG J L, LI Q M, WANG Z J. Preparation and thermal performance tests of microencapsulated gypsum-based phase change building material[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2012, 33(12): 2140-2144 (in Chinese).
- [27] HAN M, WANG Y N. A newton algorithm for nonlinear regression[J]. *Chinese Journal of Computers*, 2010, 33(5): 841-846 (in Chinese).
- [28] CHEN C M, CHEN Z H, ZENG X R. Synthesis and characterization of dodecanol/polymer phase change nanocapsules via miniemulsion polymerization[J]. *Journal of Functional Materials*, 2011, 42(11): 2112-2115 (in Chinese).