

高分子干燥剂的研究进展

王勇,刘静*,张亚茹,黄青丹,曾炼

(广州供电局有限公司电力试验研究院,广东广州510410)

摘要:高分子干燥剂是一种吸水性能好、保水能力强的功能高分子材料,被广泛应用于农业、医疗、工业、个人卫生品、建筑等众多领域。综述了高分子干燥剂的结构特征、吸水方式、吸水理论,分析了影响各类干燥剂吸水效果的因素,总结了各类高分子干燥剂的特点和不足,提出高分子干燥剂的研究建议和发展趋势。

关键词:高分子干燥剂;吸水理论;应用前景

中图分类号:TH3

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2019)S-0099-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2019.S.021

Advances in polymer desiccant

WANG Yong, LIU Jing*, ZHANG Ya-ru, HUANG Qing-dan, ZENG Lian

(Power Testing & Research Institute, Guangzhou Power Supply Bureau Limited Company, Guangzhou 510410, China)

Abstract: Polymer desiccant is a kind of functional polymer materials with good water absorption performance and strong water retention capacity. It is widely used in many fields such as agriculture, medical care, industry, personal hygiene products, construction, etc. This paper summarizes the structural characteristics, water absorption way and water absorption theory of polymer desiccant, analyzes the factors affecting the water absorption effect of various polymer desiccants, and summarizes the characteristics and deficiencies of various types of polymer desiccants. The research recommendations and development trends of polymer desiccants are suggested.

Key words: polymer desiccant; water absorption theory; application prospect

相对湿度是指一定温度条件下,空气中水蒸气含量与同体积气体中水蒸气饱和含量的百分比。适宜的湿度有利于日常生活,但在一些特殊领域,过高的相对湿度就是一种很不利的因素,如钢铁生锈、空气结露导致电力系统短路,冷库结霜导致冷藏性能降低,食品受潮变质并且产生异味、细菌滋生等。因此,保持适当的空气湿度对于这些领域就显得尤为重要,而干燥剂作为使用方便、性能稳定、再生能力强的干燥手段越来越受到人们的关注^[1]。

高分子干燥剂是指具有亲水基团、能大量吸收水分发生溶胀、又能保持水分不外流的功能性高分子材料,如聚磷酸铵等^[2]。一般能吸收超过自身质量数百倍甚至上千倍的水分,即使在外界压力下也不会逸出,高分子干燥剂因其超高的吸水性能和优异的保水性能,在农业保水、卫生用品、食品保鲜和建筑防潮涂料等^[3-4]领域应用广泛,但也存在原料成本较高、耐盐性差、在环境中难以降解等不足^[5-6]。本文对高分子干燥剂的结构特征、除湿机理进行了详细阐述,对于组成不同的高分子干燥剂

进行分类分析,对影响吸水的因素进行探讨,并对其未来的发展做出展望。

1 高分子干燥剂结构特征

高分子干燥剂具有轻度交联的三维网络结构,其主链多由饱和的碳-碳键组成,不溶于水。按照侧链是否包含电解质离子,可将其分为聚电解质高分子和非离子型高分子两类。聚电解质高分子是一种带有离子基团的聚合物,如聚丙烯酸钠;非离子型高分子侧链常带有—COOH、—OH等亲水基团,如聚乙烯醇。侧链上的电解质离子及—COOH等亲水基团使其具有与水结合的能力而不溶于有机溶剂。三维网络结构使其吸水后具有储水能力。因此,高分子干燥剂具有良好的吸水性和保水性能。

2 高分子干燥剂吸水理论

2.1 吸水机理

高分子干燥剂吸水机理与其化学结构密切相关。吸水前,高分子链相互靠拢缠在一起,彼此交联

收稿日期:2019-04-17;修回日期:2019-07-10

基金项目:环境友好新型绝缘气体理化、绝缘性能及工程示范技术研究(1期)-课题3广州电网新型绝缘气体应用可行性研究(GZJKJXM20170330)

作者简介:王勇(1967-),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为高压电技术、电力系统,2373964661@qq.com;刘静(1986-),女,本科,高级工程师,研究方向为电力化学,通讯联系人,63208151@qq.com。

成网状结构。与水接触时,水分子通过毛细作用及扩散作用渗透到分子中,链上的离子基团在水中电离。由于链上同离子之间的静电斥力而使高分子链伸展溶胀,此外,高分子本身的交联网状结构及氢键作用,又限制了它的无限膨胀。由于聚合物内外离子浓度的差别,从而产生一定的渗透压,导致水分不断向内部渗入,直至内外渗透压达到平衡^[7],如图 1 所示。另一方面,若聚合物支链上的电解质离子被亲水基团取代,则这些亲水基团与极性水分子之间形成强烈的氢键,使得水分子不断渗入聚合物网状结构之中,表现为聚合物吸水溶胀,这是非离子高分子吸水的机理^[8]。

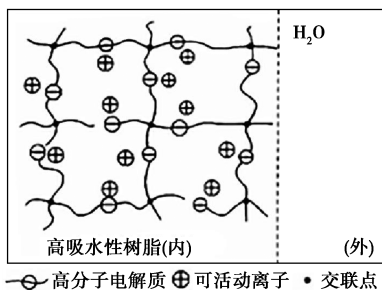


图 1 离子型树脂吸水机理示意图

2.2 吸水方式

Nakamura 等^[9]运用 DSC、NMR 法分析高分子凝胶(2/3/4-羟基苯乙烯)中水的结合状态发现,高分子干燥剂对于水的吸附主要为三维空间网络的物理吸附,吸收的水分中,大多为未与高分子侧链成键的自由水。另有实验证实,聚丙烯酸水凝胶中吸入的水只有部分与分子链存在直接相互作用,其余则是与分子相互作用的水产生作用,由于高吸水树脂分子链的高度扩展,所以大量的水可以存在于交联网络之中^[10]。

Velada 等^[11]对丙烯酸和 N-异丙基丙烯酰胺共聚吸水树脂的吸水膨胀进行了研究,认为在 pH=1 的强酸性溶液中,聚丙烯酸片段和聚 N-异丙基丙烯酰胺片段的膨胀和收缩临界转变温度不同,吸水膨胀比在纯水中小得多,并且随着酸性共聚单体的增多,膨胀比随之减小;而在纯水和 pH=12 的碱性溶液中,其膨胀和收缩则不受温度变化的影响。这说明,该高分子材料不适宜在酸性环境中作为干燥剂使用。

2.3 吸水模型

当高分子干燥剂吸水后变成富有弹性的水凝胶时,具有一定的保水功能。这一现象说明其吸水机理不同于一般的液体扩散。Flory^[12]从液体的拟晶

格模型出发,用统计热力学方法研究高分子吸水膨胀的过程,提出式(1)。

$$Q^{5/3} = \{ [i/(2V_u S^{1/2})]^2 + (1/2 - X_1)/V_1 \} / (V_c/V_0) \quad (1)$$

式中:Q 为高分子的吸水率;V_c/V₀ 为交联密度;V_u 为结构单元体积, dm³; i/V_u 为分子中固定电荷的密度, C/m; S 为外部溶液电解质的离子强度, mol/kg; (1/2 - X₁)/V₁ 为高分子对水的亲和力。

随着交联密度增加,聚合物网络结构形成,吸水率也随之提高。当交联度增加到一定程度后,聚合物网络中交联点间的链变短,网络间的空隙变小,吸水能力则会下降。分子中亲水基团与水分子之间亲和力[式(1)分子中第二项]变大,与之形成氢键的水分子越多,吸水能力越强。聚合物上电荷的密度提高,材料内外渗透压[式(1)分子中第一项]增大,干燥剂的吸水倍率也会明显提高。利用气相色谱法可以估算聚合物网络的相对交联密度,能够更好地与理论预测进行比较^[13]。

非离子型高分子吸水材料没有渗透压的影响,忽略式(1)分子中的第一项,因此其吸水能力比离子型高分子弱。在盐溶液中,由于电荷屏蔽效应,溶液中的离子改变了聚电解质分子内外的相互作用,更重要的是凝胶外部离子浓度升高,内部的渗透压降低,因此导致高分子干燥剂膨胀大幅减少,吸水量下降。

2.4 吸水动力学

高分子干燥剂吸湿过程属于非稳态条件下的扩散过程,其动力学模型符合 Fick 第二定律^[14],见式(2)。

$$dM/dt = D [(d^2 M) / (dZ^2)] \quad (2)$$

式中:D 为扩散系数, m/s; M 为吸湿率; t 为吸湿时间, s; Z 为材料厚度, m。

这种吸湿过程中,干燥剂的吸水量最先随着时间成平方次增长,随后逐渐变缓趋于平衡。随着研究的不断深入,人们发现也有部分聚合物吸水过程不符合 Fick 定律,而是一个多阶段过程。基于 Voigt 的黏弹性模型, Parvathy 等^[15]发现,接枝木薯淀粉的水吸附过程遵循二级动力学,并且吸水性与溶胀速率成正比。但是当样品处于盐溶液中,其溶胀速率是不规则的。

3 高分子干燥剂的分类

高分子干燥剂种类繁多,以来源分类,可以分为天然高分子及合成高分子。如淀粉类、纤维素类均为天然高分子;合成高分子,如聚丙烯酸、聚丙烯酰

胺等。

3.1 天然高分子干燥剂

3.1.1 淀粉类

淀粉常用作工业上燃料级乙醇的干燥剂。不同的淀粉种类和孔径大小使得材料比表面积不同,其吸水能力也各异^[16-17]。CaCl₂ 或 MgCl₂ 混合的淀粉基复合干燥剂吸水率高达硅胶的 9 倍^[18]。具有不同直链/支链交联比例的淀粉基干燥剂^[19], 不仅对于溶剂有一定的选择性, 还大大提高了淀粉干燥剂的吸水性能。淀粉类干燥剂的吸水量可达自身质量的千倍以上, 但是接枝、交联合成过程对其吸水率影响较大。未来应着眼于控制交联剂用量或改变接枝率, 以开发具有特定吸水率的目标聚合物。

3.1.2 纤维素类

纤维素分子结构含有大量羟基, 可以与水分子形成氢键, 起到吸水除湿作用。木棉纤维-聚丙烯酸钠(PNaA/PKF)拥有更稳定的三维网络结构, 并且在 pH = 2 时会出现过“溶胀平衡现象”(见图 2)^[20], 证实了存在于聚合物网络中带电基团之间的离子排斥可以通过改变外部 pH 来调节, 推动了吸水动力学的进一步研究。新型类仙人掌根启发材料(CRIM)在未经复杂处理的条件下即表现出高效的吸水 and 保水能力, 并且 CRIM 吸水引起的体积变化很小, 保证了其结构的高度稳定性^[21]。纤维素类干燥剂比普通干燥剂体积更小、形状更多变、吸潮率更高, 可作为包装材料, 但是其选择性较低, 容易与一些有机物产生氢键, 发生吸附。利用磺化增加其亲水性或采用化学方法增强其疏油性, 已经成为有效的改性手段^[22-23]。

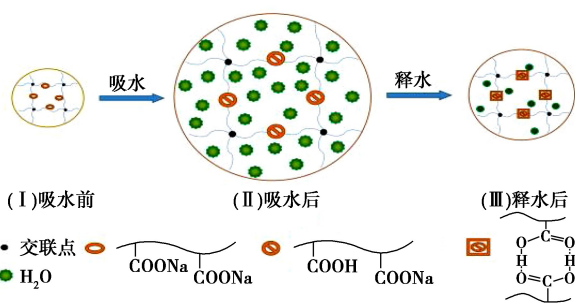


图 2 在 pH=2 溶液中具有过冲效应的溶胀过程

3.1.3 其他生物糖类

自然界还有一些高分子糖类物质因为含有多种亲水基团, 也有吸水、除湿的作用, 可以作为干燥剂使用。 α -甲壳质分子间具有很强的氢键作用力, 分子排列紧密, 难以改性应用。从鱿鱼软骨中提取出

的 β -甲壳质, 分子间作用力较弱, 吸水过程平稳, 吸水总量比同等条件下的硅胶高出 32.74%^[24]。 β -甲壳质干燥剂不仅吸水能力强、易脱水可再生, 而且具备优异的抗静电能力, 可用于精密电子和光学仪器的零配件包装。

3.2 合成高分子干燥剂

3.2.1 聚丙烯酸系列

聚丙烯酸是一种带有—COOR 的高吸水材料, 最先由美国农业局用于农业保水^[25], 其吸水量为自身重量的 1 000 倍, 超出聚丙烯酰胺 75 倍^[26], 因此也被称为超级吸水树脂(SAP)。相比于天然吸水材料, 它拥有更好的耐热性和耐腐蚀性。Yang 等^[27]将聚丙烯酸钠浸入 LiCl 溶液中获得复合 SAP, 对空气中水分的吸收量比未处理的 SAP 高出 2 倍。此外, 80℃ 的可再生温度和近千次的循环使用次数凸显了该复合 SAP 的巨大应用潜力。人们尝试用多种材料制备复合型聚合物以达到更好的吸附效果。丙烯酸接枝木薯淀粉再交联 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺, 制得新的吸水凝胶^[28], 改变交联剂的含量, 确定该材料的最佳吸水量为 114 g H₂O/g。除了具有良好的初始吸水能力之外, 该材料在剧烈抽吸下仍然保持高达 63 g H₂O/g 的吸水量。交联剂的用量决定了聚合物网络空间的大小, 这是影响材料吸水率的主要因素, 交联剂链的长短、链上官能团的种类对聚合物吸水性能也有一定的影响。

3.2.2 聚丙烯腈系列

聚丙烯腈是一种疏水性合成纤维, 但是通过改性处理, 往往能够吸收大气中一定量的水分和其他成分。物理改性的方法可以改变纤维本身的一些结构特征, 如粗糙的表面亲水性更好; 纤维直径越小, 保水效果越好, 但效果有限。化学改性可以通过改变分子结构、亲水官能团含量等, 得到更好的亲水性能。魏居杰^[29]用碱法水解聚丙烯腈, 将—CN 转变为—CONH₂、—COOH 基团, 其吸水性明显提高, 另外水解时间和温度、加入醇的量等也会影响吸水效果。除了化学反应, 接枝、共混同样也是有效的化学改性方法。Bagley 等^[30]将淀粉-聚丙烯腈接枝共聚物分散于水中制得凝胶, 其吸水量达自身重量的数百倍。瓜尔胶接枝丙烯腈后进行碱水解, 所得阴离子瓜尔胶的吸水率高达 300 g/g^[31]。与常规聚丙烯腈纤维相比, 聚丙烯腈亲水纤维具有吸湿性和保水率高、吸水速度快、密度低、抗污性好、色泽浅等优势, 特别适合作毛巾、尿布和床上用品。

3.2.3 聚乙烯醇系列

日本最早利用聚乙烯醇交联技术制得有机磷酸酯(GP)高分子吸水树脂。木塑复合材料可由低密度聚乙烯和处理过的锯末进行复合制备,发现不同的碱性溶液处理锯末后所得到的复合材料干燥程度不同,这为复合干燥剂的发展提供了新的思路^[32]。Yao 等^[33]利用静电纺丝技术制备了一种聚乙烯醇-LiCl 纳米纤维,新开发的干燥膜不仅体积大、吸湿量大,且吸湿速度快、稳定性好、再生温度低。郭丽梅等^[34]利用水溶液聚合法将聚丙烯酸及 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸(AMPS)加入到聚乙烯醇溶液中形成具有稳定互穿网络结构的聚合物树脂,AMPS 的磺酸基在盐溶液中不会形成电荷屏蔽效应,所以该产物具有较高的耐盐性,在盐溶液中仍可以大量吸水,其吸水倍率为 19.9 g/g,相比市场常见医用材料的 7~8 g/g 高出很多。因为聚乙烯醇遇水后易产生凝胶化现象,所以这种低毒性、吸水量高的高分子材料备受医药行业青睐。

3.2.4 其他聚合高分子

超级树状干燥聚合物(SDP)比硅胶吸水能力强 2~3 倍,且除湿范围广(5%~70%)^[35]。并且 SDP 的吸附容量是相对湿度的函数,不依赖于温度。在 67%相对湿度下,最大吸附容量达到 128%。最重要的是,经过 40 000 次重复再生,其吸附容量不变。无机干燥剂拥有其他聚合物所不具备的优异的耐久性,能够替代多种工业干燥剂。一些离子型高分子吸水材料也可以用于不同相对湿度条件,比如烷基磺酸铵盐在相对湿度较低的条件可以吸附气溶胶中的水分,改变其水/溶剂比可以有效改变吸湿的相对湿度范围^[36]。

合成高分子材料具有高吸水性、高保水性、高增稠性 3 大功能,既具有盐类物质的吸水性,也有凝胶材料的保水性,在石油、暖通、空调等行业具有广阔的应用前景。但是由于聚合分子种类的多样性,导致不同种类高吸水材料的影响因素也较多,还需要研究者更努力地去探究。

4 高分子干燥剂的发展新趋势

目前,高分子干燥剂已由单一的吸水性向多功能型、智能型方向逐渐转变。Nandakumar 等^[37]研发出高分子网状交联 ZnO。这种新型水凝胶不仅能够有效去除空气中的水分以提高舒适性,而且还有许多额外功能,如可以涂敷在玻璃上遮阳散热、充当隐私遮屏,抑或是吸水后具备导电性用作紧急电池

等。并且所有这些特性都是吸水后该材料所固有的,并不需外部电源驱动。

由于多种合成高分子干燥剂都难以被土壤中的微生物分解或者降解时间很长,所以开发可再生、可生物降解的环境友好型高分子干燥剂也是未来的发展方向。Narayanan 等^[38]利用壳聚糖、EDTA 和尿素之间的反应合成了一种超吸水材料 CHEDUR,其不仅拥有快速吸水的能力,并且由于主体为壳聚糖,对环境友好,容易生物降解。研究人员也尝试通过改变复合聚合物的处理方法、形状等来改变吸附效果,采用可生物降解聚合物和非生物降解吸水聚合物接枝、共混的方法已经开始广泛被国内外研究报道,但是该方法得到的高分子材料难以完全生物降解。所以,通过化学改性提高可降解生物材料聚合物的吸水性能或增强其生物可降解能力值得持续关注。

5 结语

随着高分子干燥剂在各领域应用的不断扩展,对其功能性也提出了更高的要求。研究重点集中在加快吸附效率、增大吸水量、提高吸水后的稳定性、增强吸附作用的选择性、增加可再生使用次数、减小对环境的污染等,但这种综合优化很难通过设计制备一种结构性质都完美的物质来实现。通过对吸水机理和吸水性能影响因素的研究,人们希望能够从物质结构和合成工艺方法、条件上获得更多的启示。多种材料复合、化学改性、新型结构材料必定是未来高分子干燥剂的发展趋势。此外,可再生和绿色可降解高分子干燥剂也是工农业生产中非常重要的发展方向,随着生物、物理、化学技术的不断交叉与发展,这类材料定会得到更加广泛的开发和应用。

参考文献

- [1] Vivekh P, Kumja M, Bui D T, *et al.* Recent developments in solid desiccant coated heat exchangers—A review[J]. *Applied Energy*, 2018, 229: 778–803.
- [2] Sangerlaub S, Kueckpınar E, Kiese S, *et al.* Desiccant films made of low-density polyethylene with dispersed calcium oxide: Water vapor absorption, permeation and mechanical properties [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(16): 47460–47470.
- [3] Yang Y, Rana D, Lan C Q, *et al.* Development of membrane-based desiccant fiber for vacuum desiccant cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(24): 15778–15787.
- [4] Caldas L, Andaloro A, Calafiore G, *et al.* Water harvesting from fog using building envelopes: Part I [J]. *Water and Environment Journal*, 2018, 32(4): 493–499.

- [5] 赵婧,梁飞,苗艳青,等.耐盐性可降解淀粉高吸水树脂的制备及其性能[J].应用化工,2017,46(3):508-512.
- [6] 李娟,沈士军,刘晓燕,等.吸水树脂改性研究进展[J].合成树脂及塑料,2011,28(3):78-82.
- [7] Narayanan A, Kartik R, Sangeetha E, *et al.* Super water absorbing polymeric gel from chitosan, citric acid and urea: Synthesis and mechanism of water absorption[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 191:152-160.
- [8] Devi L U, Bhagawan S S, Nair K C M, *et al.* Water absorption behavior of PALF/GF hybrid polyester composites[J]. Polymer Composites, 2011, 32(3):335-346.
- [9] Nakamura K, Hatakeyama T, Hatakeyama H. Effect of substituent groups on hydrogen bonding of polyhydroxystyrene derivatives[J]. Polymer Journal, 1983, 15:361-366.
- [10] Ulrich K, Centeno S A, Arslanoglu J, *et al.* Absorption and diffusion measurements of water in acrylic paint films by single-sided NMR[J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 71(3):283-289.
- [11] Velada J L, Liu Y, Huglin M B. Effect of pH on the swelling behaviour of hydrogels based on *N*-isopropylacrylamide with acidic comonomers[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 1998, 199(6):1127-1134.
- [12] Flory P J. Principles of polymer chemistry[M]. Cornell University Press, 1953.
- [13] Price G J, Siow K S, Guillet J E. Use of gas chromatography to determine the degree of crosslinking of a polymer network[J]. Macromolecules, 1989, 22(7):3116-3119.
- [14] Shi S Q. Diffusion model based on Fick's second law for the moisture absorption process in wood fiber-based composites: Is it suitable or not? [J]. Wood Science and Technology, 2007, 41(8):645-658.
- [15] Parvathy P C, Jyothi A N. Water sorption kinetics of superabsorbent hydrogels of saponified cassava starch-graft-poly(acrylamide) [J]. Starch-Stärke, 2012, 64(10):803-812.
- [16] Qiao D, Yu L, Bao X, *et al.* Understanding the microstructure and absorption rate of starch-based superabsorbent polymers prepared under high starch concentration[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 175:141-148.
- [17] Kim Y, Hendrickson R, Mosier N, *et al.* Cassava starch pearls as a desiccant for drying ethanol[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011, 50(14):8678-8685.
- [18] 何贤培. 淀粉基复合凝胶干燥剂的制备与性能分析[J]. 化学工程师, 2016, 30(10):63-64.
- [19] Dehabadi L, Wilson L D. NMR investigation of the fractionation of water-ethanol mixtures with starch and its cross-linked forms[J]. Energy & Fuels, 2016, 30(7):5684-5692.
- [20] Shi X, Wang W, Zheng Y, *et al.* Utilization of hollow kapok fiber for the fabrication of a pH-sensitive superabsorbent composite with improved gel strength and swelling properties [J]. RSC Advances, 2014, 4(92):50478-50485.
- [21] Kim H, Kim J, Lee S J. Fast and efficient water absorption material inspired by cactus root[J]. ACS Macro Letters, 2018, 7(3):387-394.
- [22] Thiangtham S, Runt J, Manuspiya H. Sulfonation of dialdehyde cellulose extracted from sugarcane bagasse for synergistically enhanced water solubility[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 208:314-322.
- [23] Fu S, Tian C, Lucia L A. Water sorption and barrier properties of cellulose nanocomposites [M]. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017.
- [24] 周莉, 吴奕光, 刘波, 等. 从鲑鱼软骨提取 β -甲壳质及其结构表征与应用性能[J]. 精细化工, 2003, 20(1):8-10.
- [25] Yu J, Shainberg I, Yan Y L, *et al.* Superabsorbents and semiarid soil properties affecting water absorption[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(6):2305-2313.
- [26] Zhang X, Wang X, Li L, *et al.* A novel polyacrylamide-based superabsorbent with temperature switch for steam breakthrough blockage [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(24):42067-42073.
- [27] Yang Y, Rana D, Lan C Q. Development of solid super desiccants based on a polymeric superabsorbent hydrogel composite[J]. RSC Advances, 2015, 5(73):59583-59590.
- [28] Witono J R, Noordergraaf I W, Heeres H J, *et al.* Water absorption, retention and the swelling characteristics of cassava starch grafted with polyacrylic acid [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 103:325-332.
- [29] 魏居杰. 废弃聚丙烯腈吸水改性研究[D]. 上海: 东华大学, 2011.
- [30] Bagley E B, Taylor N W. Starch-polyacrylonitrile copolymers. properties of hydrogels[J]. Product R&D, 1975, 14(2):105-107.
- [31] Thimma R T, Reddy N S, Tammishetti S. Synthesis and characterization of guar gum-graft-polyacrylonitrile [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2003, 14(10):663-668.
- [32] Kamel S, Adel A M, El-Sakhawy M, *et al.* Mechanical properties and water absorption of low-density polyethylene/sawdust composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 107(2):1337-1342.
- [33] Yao Y, Dai L, Jiang F, *et al.* Kinetic modeling of novel solid desiccant based on PVA-LiCl electrospun nanofibrous membrane [J]. Polymer Testing, 2017, 64:183-193.
- [34] 郭丽梅, 康雪. 耐盐型 AA/AMPS/PVA 吸水树脂研究[J]. 精细石油化工, 2012, 29(4):21-25.
- [35] Lee J, Lee D Y. Sorption characteristics of a novel polymeric desiccant[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(7):1940-1949.
- [36] Chu Y, Sauerwein M, Chan C K. Hygroscopic and phase transition properties of alkyl aminium sulfates at low relative humidities [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, 17(30):19789-19796.
- [37] Nandakumar D K, Ravi S K, Zhang Y, *et al.* A super hygroscopic hydrogel for harnessing ambient humidity for energy conservation and harvesting [J]. Energy & Environmental Science, 2018, 11(8):2179-2187.
- [38] Narayanan A, Dhamodharan R. Super water-absorbing new material from chitosan, EDTA and urea [J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 134:337-343. ■