

# 胺改性分子筛吸附 CO<sub>2</sub> 的研究

魏 炜, 陈俊营, 刘凤霞, 许晓飞, 刘志军\*

(大连理工大学流体与粉体工程研究设计所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**利用浸渍法,以聚乙烯亚胺(PEI)为胺基功能化材料对 13X 分子筛进行功能化改进;在 PEI 中添加 Span80 或 PEG200 对 13X 分子筛进一步优化,以提高分子筛对 CO<sub>2</sub> 的吸附性能。利用 XRD 和 FT-IR 证明了 PEI 和 Span80/PEG200 的成功附着。Span80 和 PEG200 的加入显著改善了吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的吸附性能,增加的最大 CO<sub>2</sub> 吸附比例分别为 21.97%、16.74%。改性后分子筛在 70℃ 时对 CO<sub>2</sub> 吸附具有较高水平,为吸附剂在碳捕集领域的应用打下了基础。

**关键词:**CO<sub>2</sub> 吸附;胺改性;浸渍法;13X 分子筛;聚乙烯亚胺

中图分类号:TQ424

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2023)S2-0228-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.S2.045

## Study on adsorption of CO<sub>2</sub> on amine modified molecular sieve

WEI Wei, CHEN Jun-ying, LIU Feng-xia, XU Xiao-fei, LIU Zhi-jun\*

(R&D Institute of Fluid and Powder Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Polyethylene imine (PEI) is used as amino functional material to modify 13X molecular sieve through an immersion method. Furthermore, Span80 or PEG200 is added into PEI to further optimize 13X molecular sieve to improve its adsorption performance for CO<sub>2</sub>. The successful adhesion between PEI and Span80 or PEG200 is proved by means of XRD and FT-IR. It is found that the addition of Span80 or PEG200 significantly improves the adsorption performance of the molecular sieve for CO<sub>2</sub>, with the maximum increased CO<sub>2</sub> adsorption ratio of 21.97% and 16.74%, respectively. The modified molecular sieve has a high level of adsorption to CO<sub>2</sub> at 70°C, laying a foundation for the application of the modified molecular sieve in the field of carbon capture in the future.

**Key words:** CO<sub>2</sub> adsorption; amine modification; immersion method; 13X molecular sieve; polyethylene imine

CO<sub>2</sub> 作为主要的温室气体,随着化石燃料的大量使用,其在大气中的含量增加,被认为是全球气候变暖的重要原因<sup>[1]</sup>。为了保护环境,在第 75 届联合国大会上我国正式提出“双碳”目标。为了实现这一目标,一方面需要减少 CO<sub>2</sub> 的排放量;另一方面需要对 CO<sub>2</sub> 进行回收再利用。CO<sub>2</sub> 捕集封存和利用技术(CCUS)是降低 CO<sub>2</sub> 排放的有效手段<sup>[2]</sup>。常见的碳捕集方法主要有溶剂吸收法<sup>[3]</sup>、吸附法<sup>[4]</sup>、膜分离法<sup>[5]</sup>、低温冷凝法<sup>[6]</sup>等。其中,吸附法由于能耗低、对设备腐蚀性小等优点,是一种良好的、新型的、有潜力的碳捕集技术<sup>[7]</sup>。吸附法捕集 CO<sub>2</sub> 的关键是确定一种具有高吸附量、高选择性和高化学稳定性的吸附剂<sup>[8]</sup>。常见的 CO<sub>2</sub> 吸附剂主要有活性炭<sup>[9]</sup>、分子筛<sup>[10]</sup>、金属有机骨架<sup>[11]</sup>、多孔聚合物<sup>[12]</sup>等。分子筛因其吸附能力好、比表面积高、来源广和成本低等优点被认为是优良的 CO<sub>2</sub> 吸附剂。

常见的分子筛主要有 13X、MCM-41、SBA-15、

ZSM-5 等。由于分子筛比表面积大、对 CO<sub>2</sub> 有良好的物理吸附效果,但仅依靠物理吸附存在吸附量低、吸附选择性差等问题<sup>[13]</sup>。对分子筛改性,使其进行物理吸附的同时增加化学吸附,以强化对 CO<sub>2</sub> 的吸附。利用胺基功能化方法对分子筛进行修饰是行之有效的方法之一,该方法通过对分子筛负载胺,使胺基基团分散在分子筛中,并利用胺基与 CO<sub>2</sub> 的弱化学反应,强化分子筛对 CO<sub>2</sub> 的吸附性能。Maurin 等<sup>[14]</sup>研究了 13X、低硅 NaX、NaY 和脱铝 NaY 等沸石的 CO<sub>2</sub> 吸附量,在低压情况下,13X 和 NaY 被认为是较合适的吸附剂。Jadhav 等<sup>[15]</sup>通过浸渍法用单乙醇胺(MEA)对 13X 沸石进行了修饰,在 30℃ 时,吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的吸附能力比未修饰的沸石提高了约 1.6 倍,而在 120℃ 时效率提高了 3.5 倍。Chen 等<sup>[16]</sup>以二甲基甲氧基[3(三甲氧基硅基)丙基]氯化铵为介孔生成剂制备了介孔 13X 分子筛,并采用聚乙烯亚胺(PEI)对其进行修饰,与普通

收稿日期:2023-04-11;修回日期:2023-07-08

作者简介:魏炜(1978-),女,博士,副教授,主要从事二氧化碳捕集利用与封存、超临界流体和新型材料研究, hjweiwei@dlut.edu.cn;刘志军(1969-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为二氧化碳捕集利用与封存、储能科学与技术研究,通讯联系人, liuzj@dlut.edu.cn。

13X分子筛相比,修饰后的介孔13X分子筛对CO<sub>2</sub>捕获能力更强。Wang等<sup>[17]</sup>先将3-氨丙基三甲氧基硅烷(APTS)接枝到MCM-41上,再对其进行四乙烯五胺(TEPA)浸渍,制得的30% APTS和40% TEPA修饰的MCM-41的最大CO<sub>2</sub>吸附量为3.50 mmol/g。Wang等<sup>[18]</sup>以稻壳灰(RHA)为原料合成介孔ZSM-5分子筛,并对其进行PEI浸渍改性,在120℃时30%的PEI改性的ZSM-5分子筛的CO<sub>2</sub>吸附量最大为1.96 mmol/g。因此,胺基功能化方法在提高分子筛对CO<sub>2</sub>吸附能力上有显著效果。

但是,在胺基功能化过程中,由于胺基等活性基团的引入,占据了分子筛内部孔道的位置,导致孔道变窄甚至堵塞,阻碍了CO<sub>2</sub>在分子筛内部孔道的扩散,使得物理和化学吸附效果均有下降。为解决这一问题,有些学者提出在胺基功能化过程中加入动力学改性剂,以提高CO<sub>2</sub>扩散性能。Miles等<sup>[19]</sup>在PEI浸渍改性SBA-15过程中添加聚乙二醇(PEG),PEG的加入缓解了PEI分子之间、PEI分子与载体间的团聚,从而提高了链内CO<sub>2</sub>吸附事件的概率,并降低了CO<sub>2</sub>诱导PEI交联的程度,提高了胺效率,强化了吸附动力学并提高了CO<sub>2</sub>吸附量。Wang等<sup>[20]</sup>在PEI浸渍改性中添加不同种类的表面活性剂,促进了CO<sub>2</sub>在体系内的扩散,提高对CO<sub>2</sub>吸附量。然而,目前针对胺基功能化分子筛的扩散动力学性能提高的研究相关报道很少,尚缺乏系统的理论和实验研究。

笔者以商用13X分子筛为吸附剂载体、PEI为胺基功能化材料、Span80或PEG200为动力学改性剂,利用13X分子筛进行PEI/Span80和PEI/PEG200改性,对改性后的分子筛进行CO<sub>2</sub>吸附测试,并对修饰后的分子筛进行了结构分析和吸附性能评价。

## 1 材料与试剂

13X分子筛(商用分子筛)、聚乙烯亚胺(分析纯,PEI)、Span80(分析纯)、聚乙二醇(分析纯,PEG200)、甲醇,阿拉丁试剂公司生产。

## 2 实验方法

### 2.1 吸附剂改性

采用浸渍法改性13X分子筛。将一定量的PEI、甲醇放入烧杯中,室温下搅拌混合均匀;再按

一定比例向其中添加13X分子筛,在室温下搅拌充分混合;随后,对混合物进行减压蒸馏去除甲醇,混合物干燥后得到13X-PEI分子筛,记为13X-PEI- $x$ ,其中 $x$ 为PEI在吸附剂中的质量分数。

为解决CO<sub>2</sub>在体系内扩散动力学问题,通过添加Span80或PEG200来提高扩散性,增加胺基利用率。将一定量的PEI、甲醇、Span80或PEG200放入烧杯中,室温下搅拌混合均匀。按比例向其中添加13X分子筛,室温下充分混合;再对混合物进行减压蒸馏去除甲醇,混合物干燥后得到13X-PEI-Span80或者13X-PEI-PEG200分子筛,记为13X-PEI-Span80/PEG200- $x-y$ ,其中 $y$ 为Span80或PEG200在吸附剂中的质量分数。

### 2.2 分子筛测试

利用布鲁克X射线衍射仪(XRD)测试吸附剂的结构。利用Nicolet 6700型傅里叶红外光谱仪(FT-IR)对胺改性效果进行测试,波数范围为4 000~400 cm<sup>-1</sup>。利用JSM-7610F Plus场发射扫描电镜(SEM)进行吸附剂形貌测试。

### 2.3 CO<sub>2</sub>吸附测试

利用称重法进行CO<sub>2</sub>吸附测试。将测试的吸附剂填充在U型管中并置于恒温槽中。测试前先进行脱附实验,即恒温槽温度保持为120℃,向U型管内通入N<sub>2</sub>至吸附剂质量不再变化。开启CO<sub>2</sub>吸附实验,恒温槽温度保持在70℃,通入CO<sub>2</sub>气体,每隔10 min对其进行称重,直至质量不再变化即完成吸附。

## 3 结果与分析

### 3.1 分子筛形貌分析

13X作为使用广泛、价格低廉的分子筛,其对多种气体具有优良的吸附效果。为进一步改善吸附选择性和CO<sub>2</sub>吸附量,对13X进行胺基功能化,并对13X-PEI进行动力学改性。13X及改性13X-PEI的SEM图见图1。从图1(b)中可以看出,由于PEI拥有较高的聚合度和分子质量,相比于13X分子筛,胺基功能化后的13X分子筛团聚现象严重,严重的团聚影响了功能化分子筛对CO<sub>2</sub>吸附效果。从图1(d)中可以看出,经PEG200动力学改性后,13X分子筛团聚现象明显缓解,对CO<sub>2</sub>的扩散起到促进作用,增加了胺基利用率,加强了对CO<sub>2</sub>的吸附效果。

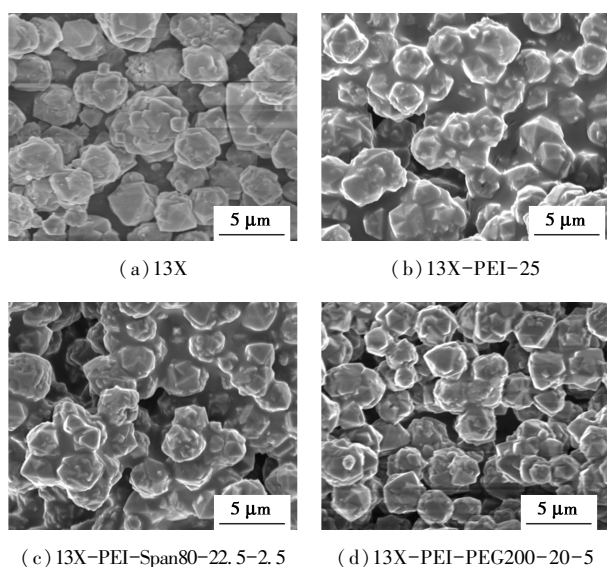
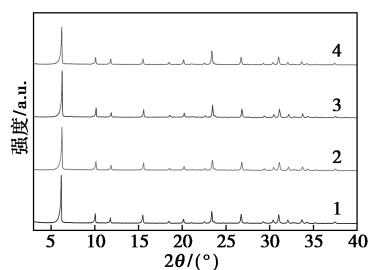


图 1 13X 及改性 13X-PEI 的 SEM 图

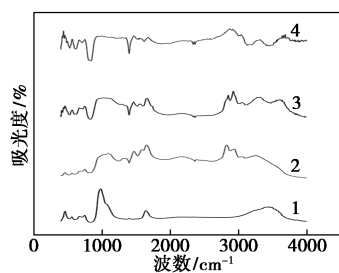
13X、13X-PEI-25、13X-PEI-Span80-22.5-2.5、13X-PEI-PEG200-20-5 的 X 射线衍射图如图 2 所示。从图 2 中可以看出,修饰后的 13X 分子筛除部分峰值略有降低,峰型基本没有变化。因此,PEI、Span80 和 PEG200 的引入并未对 13X 的骨架结构产生破坏。



1—13X; 2—13X-PEI-25; 3—13X-PEI-Span80-22.5-2.5; 4—13X-PEI-PEG200-20-5

图 2 13X 及改性 13X-PEI 的 X 射线衍射图

13X、13X-PEI-25、13X-PEI-Span80-22.5-2.5、13X-PEI-PEG200-20-5 的红外光谱图如图 3



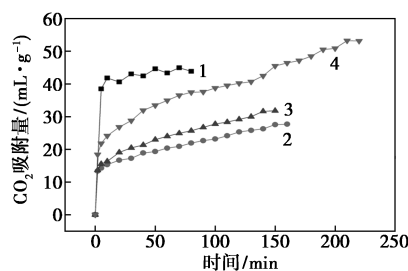
1—13X; 2—13X-PEI-25; 3—13X-PEI-Span80-22.5-2.5; 4—13X-PEI-PEG200-20-5

图 3 13X 及改性 13X-PEI 的红外光谱图

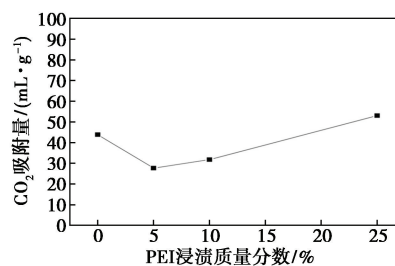
所示。从图 3 中可以看出,相比于 13X 分子筛,13X-PEI 分子筛增加了  $1\ 500\ \text{cm}^{-1}$  左右及  $3\ 000\ \text{cm}^{-1}$  左右的 2 个峰,说明 PEI 通过浸渍法成功改性至 13X 分子筛上;而加入了 PEG200/Span80 后,增加了  $3\ 600\ \text{cm}^{-1}$  附近的峰,说明分子筛中导入了羟基,证实了 PEG200/Span80 二者材料的成功附着。

### 3.2 CO<sub>2</sub> 吸附

在 70℃ 下,经 PEI 修饰后的 13X 分子筛对 CO<sub>2</sub> 吸附效果如图 4 所示。从图 4 中可以看出,13X 分子筛因其较大的比表面积,对 CO<sub>2</sub> 有良好的物理吸附效果,PEI 的添加使得 13X 分子筛表面积降低,当 PEI 质量分数较低时,修饰后的 13X 对 CO<sub>2</sub> 的化学吸附量不足以弥补表面积降低而损失的物理吸附量,此时对 CO<sub>2</sub> 吸附效果下降。随着 PEI 质量分数的增加,PEI 对 CO<sub>2</sub> 的化学吸附量增加,成为 CO<sub>2</sub> 吸附的主体,其对 CO<sub>2</sub> 的吸附量超过 13X 分子筛。



1—13X; 2—13X-PEI-5; 3—13X-PEI-10; 4—13X-PEI-25  
(a) CO<sub>2</sub> 吸附曲线

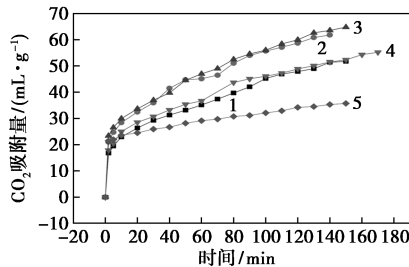


(b) 最大吸附量曲线

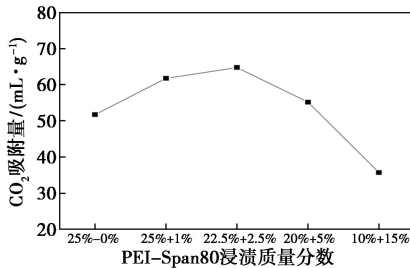
图 4 70℃ 下 13X-PEI-x 的 CO<sub>2</sub> 吸附曲线和最大吸附量曲线

虽然修饰后的 13X-PEI-25 分子筛对 CO<sub>2</sub> 的吸附量超过 13X 分子筛,但其增加的 CO<sub>2</sub> 吸附量并不显著,表面活性剂的添加能够促进 CO<sub>2</sub> 在吸附剂中的扩散,有效增加吸附剂中的活性位点,提高了胺基利用率,从而增加吸附剂对 CO<sub>2</sub> 的吸附性能<sup>[20]</sup>。因此,采用 Span80 作改性剂对修饰后的 13X-PEI-25 分子筛改性,得到 13X-PEI-Span80 分子筛,70℃ 下,该分子筛对 CO<sub>2</sub> 的吸附数据如图 5 所示。从图 5 中可以看出,维持总改性剂质量分数为 25%,改变

PEI与Span80之间的比例,得到CO<sub>2</sub>吸附最优的改性质量分数为PEI 22.5%、Span80 2.5%,此时,CO<sub>2</sub>吸附量可达64.78 mL/g,相比于13X-PEI-25分子筛,增加了21.97%。



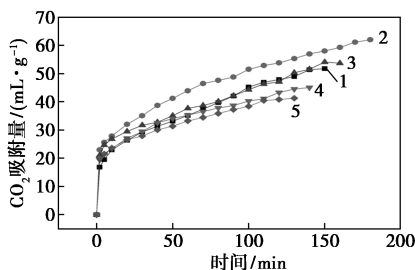
1—13X-PEI-Span80-25-0; 2—13X-PEI-Span80-24-1;  
3—13X-PEI-Span80-22.5-2.5; 4—13X-PEI-Span80-20-5;  
5—13X-PEI-Span80-10-15  
(a) CO<sub>2</sub> 吸附曲线



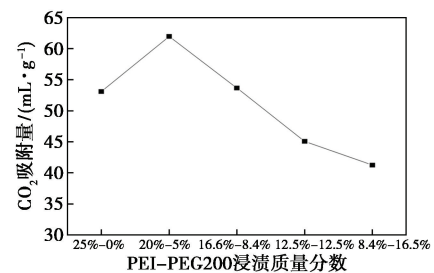
(b) 最大吸附量曲线

图5 13X-PEI-Span80的CO<sub>2</sub>吸附曲线和最大吸附量曲线

除了表面活性剂能够增强CO<sub>2</sub>在分子筛中的扩散性,PEG200由于能够有效抑制PEI的粘结性,增加了PEI的胺基利用率,导致CO<sub>2</sub>吸附能力的加强<sup>[19]</sup>。70℃下,保持总改性剂质量分数为25%,改变PEI与PEG200之间的比例,得到实验数据如图6所示。从图6中可以看出,PEI改性质量分数为20%、PEG200改性质量分数为5%时,制得13X-PEI-PEG200分子筛对CO<sub>2</sub>的最大吸附量为



1—13X-PEI-PEG200-25-0; 2—13X-PEI-PEG200-20-5;  
3—13X-PEI-PEG200-16.6-8.4; 4—13X-PEI-PEG200-12.5-12.5; 5—13X-PEI-PEG200-8.4-16.6  
(a) CO<sub>2</sub> 吸附曲线



(b) 最大吸附量曲线

图6 13X-PEI-PEG200的CO<sub>2</sub>吸附曲线和最大吸附量曲线

61.99 mL/g,相比于13X-PEI-25分子筛,增加了16.74%。由于总改性比例一定,适量增加PEG200的质量分数,能够促进CO<sub>2</sub>在胺基功能化分子筛中的扩散,吸收量增加;但是随着PEG200质量分数的增加,PEI的质量分数相对降低,使得附着在分子筛表面的胺基集团数量减少,影响了对CO<sub>2</sub>的吸附量。因此,当PEI改性质量分数为20%、PEG200改性质量分数为5%时,CO<sub>2</sub>吸附性能最优。

## 4 结论

采用浸渍法制备了胺基功能化分子筛13X-PEI,当PEI添加质量分数为25%时,得到较好的吸附效果,但是团聚现象较为严重。通过加入改性剂Span80和PEG200,有效地促进了CO<sub>2</sub>在胺基功能化分子筛中的扩散性。当PEI质量分数为22.5%、Span80质量分数为2.5%时,CO<sub>2</sub>吸附量可达64.78 mL/g;当PEI质量分数为20%、PEG200质量分数为5%时,CO<sub>2</sub>吸附量可达61.99 mL/g。因此,改性后的13X胺基功能化分子筛对CO<sub>2</sub>具有优异的吸附性能。

## 参考文献

- [1] Pardakhti M, Jafari T, Tobin Z, *et al.* Trends in solid adsorbent materials development for CO<sub>2</sub> capture [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(38): 34533-34559.
- [2] Olajire A A. Synthesis of bare and functionalized porous adsorbent materials for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 2017, 7: 399-459.
- [3] Ramazani R, Samsami A, Jahanmiri A, *et al.* Characterization of monoethanolamine potassium lysinate blend solution as a new chemical absorbent for CO<sub>2</sub> capture [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 51: 29-35.
- [4] Ghadirian E, Abbasian J, Arastoopour H. Three-dimensional CFD simulation of an MgO-based sorbent regeneration reactor in a carbon capture process [J]. *Powder Technology*, 2017, 318: 314-320.

- [5] Chew T L, Ahmad A L, Bhatia S. Ordered mesoporous silica (OMS) as an adsorbent and membrane for separation of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2010, 153 (1/2): 43-57.
- [6] Ool Z L, Tan P Y, Tan L S, *et al.* Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion; A perspective review [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2020, 28(5): 1357-1367.
- [7] Choi S, Drese J, Jones C. Adsorbent materials for carbon dioxide capture from large anthropogenic point sources [J]. *ChemSusChem*, 2009, 2: 796-854.
- [8] 穆园园. 丙烯酸胺包覆丙烯酸酯合成 CO<sub>2</sub> 吸附材料与性能研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2019.
- [9] Creamer A E, Gao B, Wang S. Carbon dioxide capture using various metal oxyhydroxide-biochar composites [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 826-832.
- [10] 徐晓亮, 赵兴祥, 孙林兵, 等. CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub> 在不同硅铝比 β 沸石上的吸附分离性能 [J]. *化工进展*, 2009, 28(12): 2116-2121.
- [11] 朱晨明, 王保登, 张中正, 等. 金属-有机骨架复合材料的制备及其二氧化碳吸附性能 [J]. *化工进展*, 2016, 35(9): 2875-2884.
- [12] 杭咏平, 李金昊, 代钢, 等. 多孔固体吸附剂的 CO<sub>2</sub> 吸附性能研究 [J]. *应用化工*, 2020, 49(11): 2877-2881.
- [13] 胡小夫, 沈建永, 王桦, 等. 氨基修饰多孔固体吸附剂吸附 CO<sub>2</sub> 的研究进展 [J]. *华电技术*, 2020, 42(10): 36-40.
- [14] Maurin G, Lewellyn P L, Bell R G. Adsorption mechanism of carbon dioxide in faujasites; Grand canonical monte carlo simulations and microcalorimetry measurements [J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 2005, 109, (33): 16084-16091.
- [15] Chen C, Kim S S, Cho W S, *et al.* Polyethylenimine-incorporated zeolite 13X with mesoporosity for post-combustion CO<sub>2</sub> capture [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 332: 167-171.
- [16] Jadhav P D, Chatti R V, Biniwale R B, *et al.* Monoethanol amine modified zeolite 13X for CO<sub>2</sub> adsorption at different temperatures [J]. *Energy Fuels*, 2007, 21: 3555-3559.
- [17] Wang X, Chen L L, Guo Q J. Development of hybrid amine-functionalized MCM-41 sorbents for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 260: 573-581.
- [18] Wang Y S, Du T, Qiu Z Y, *et al.* CO<sub>2</sub> adsorption on polyethylenimine-modified ZSM-5 zeolite synthesized from rice husk ash [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, 207: 105-113.
- [19] Miles A S, Tan S, Christopher W J. Role of additives in composite PEI/Oxide CO<sub>2</sub> adsorbents; Enhancement in the amine efficiency of supported PEI by PEG in CO<sub>2</sub> capture from simulated ambient air [J]. *ACS Appl Mater Inter*, 2015, 7: 24748-24759.
- [20] Wang J T, Long D H, Zhou H H, *et al.* Surfactant promoted solid amine sorbents for CO<sub>2</sub> capture [J]. *Energy Environ Sci*, 2012, (5): 5742. ■

(上接第 227 页)

从图 6 中可以看出, 经过 11 周的存放后, 薄膜的透光率仍高于 90%, 随着时间的推移, 薄膜的透光率减小(从 92.5% 到 89.5%), 降低率为 3.2%。结果表明, 在热封温度为 155℃ 条件下的 BOPP 薄膜展现出了良好的透光特性。

### 3 结论

对 BOPP 薄膜的热封温度、透光率及其表面形貌结构进行了研究, 得出了以下结论: 随着热封温度的升高, 薄膜的透光率得到提升, 因为表面形貌由最初的均匀整齐慢慢变成以沟壑填充、成块分布的形貌特点; 当热封温度超过 155℃ 后, 薄膜的透光率降低, 因为此时的形貌分布杂乱, 吸收光强导致透光率减小; 在长期实效性方面, 热封温度为 155℃ 条件下的薄膜透光率的降低率低至 3.2%。因此, BOPP 薄膜的最佳热封温度为 155℃。

### 参考文献

- [1] 尹燕平. 双向拉伸塑料薄膜 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
- [2] 陈广忠. BOPP 烟用薄膜的性能及应用 [J]. *塑料包装*, 2003, 13(3): 15-17.
- [3] 孔庆佳. 双向拉伸聚丙烯薄膜工业现状与前景 [J]. *江西化工*, 1998, (3): 4-8.
- [4] 涂志刚, 吴增青. BOPP 薄膜性能的时效性研究 [C]. 福州: 中国包装联合会塑料包装委员会第七届第一次年会暨塑料包装新技术研讨会, 2006: 65-71.
- [5] 涂志刚, 熊立贵, 陈利伟, 等. 添加剂对 BOPP 薄膜光学性能的影响 [J]. *包装工程*, 2020, 41(13): 139-144.
- [6] 姜巍. BOPP 光学膜专用料 PPH-FA03-S 的开发及应用 [J]. *齐鲁石油化工*, 2020, 48(1): 16-20.
- [7] 朱丽静. 溶胶-凝胶法制备 BOPP 基阻隔性包装复合薄膜及其性能研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2010.
- [8] 唐荣坡. 国产双向拉伸聚丙烯薄膜 (BOPP) 生产线开发成功的经验总结 [J]. *塑料包装*, 2003, 13(1): 6-8.
- [9] 夏晋威, 张龙, 董浩, 等. 透明 BOPP 薄膜耐磨性能与材料成分关系的实验方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(6): 1324-1330.
- [10] 陈岳. 外部环境对烟用 BOPP 薄膜物理性能检测的影响 [J]. *塑料工业*, 2011, 39(8): 2-3.
- [11] 储松潮, 常庆阳, 吴建章, 等. 耐高温 BOPP 电容薄膜的开发和应用 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2018, 39(1): 62-64.
- [12] 高新, 冯叶飞. BOPP 电容器薄膜市场现状与展望 [J]. *塑料包装*, 2015, 25(3): 6-8.
- [13] 王润霄. 热封型 BOPP 薄膜结构性能及其影响因素的研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2008.
- [14] 黎勇, 霍云芳. 防粘连剂在 BOPP 薄膜中的应用技术 [J]. *塑料包装*, 2006, 16(2): 38-41.
- [15] 严国锋. BOPP 高透明膜的关键技术性能研究 [D]. 无锡: 江南大学, 2009. ■