



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20140105

真空状态下沸石分子筛吸附干燥紫薯浆液的实验研究

卢晓江, 朱明甜, 赵晓杰, 张书涛
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 为探究真空条件下沸石分子筛的干燥性能, 将沸石分子筛加入真空干燥系统中形成真空-吸附联合干燥系统. 以紫薯浆液为物料, 进行真空干燥与真空-吸附干燥的对比实验; 同时, 针对干燥温度和布料厚度分别进行单因素实验. 结果表明: 沸石分子筛的吸附作用可以提高真空干燥的干燥效率. 干燥温度低于 45 °C 时, 温度升高后沸石分子筛吸附性增强; 干燥温度高于 45 °C 时, 温度升高后沸石分子筛吸附性减弱. 布料厚度越小, 沸石分子筛吸附干燥速率越快.

关键词: 沸石分子筛; 吸附; 真空; 干燥; 紫薯

中图分类号: TQ028.6⁺73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2015)03-0067-05

Adsorption Drying Mashed Purple Potatoes with Zeolite under the Vacuum Condition

LU Xiaojiang, ZHU Mingtian, ZHAO Xiaojie, ZHANG Shutao

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: For the purpose of exploring the characteristics of zeolite in drying purple potatoes under the vacuum condition, zeolite was used in the vacuum drying system to form a new kind of drying system which is called vacuum-adsorption drying system, and the purple potato was used as the raw material during the drying experiment. During the research, the comparison between vacuum drying and vacuum-adsorption drying was studied. The experiment also focused on the drying temperature and material thickness. The results show that the adsorption performance of zeolite can improve the drying efficiency of vacuum drying and the quality of dried products. When the drying temperature is below 45 °C, the higher the temperature, the stronger the zeolite molecular sieve adsorption characteristics; when the drying temperature is higher than 45 °C, the higher the temperature, the weaker the zeolite molecular sieve adsorption characteristics. The thinner the thickness of the material is, the faster the drying rate is.

Key words: zeolite; adsorption; vacuum; drying; purple potato

沸石分子筛^[1]是一种含水架状结构的多孔硅铝酸盐矿物质, 独特的晶体结构使其具有大量均匀的微孔. 与其他多孔物质相比, 沸石分子筛具有较大的比表面积 (400 ~ 800 m²/g), 仅次于活性炭. 但活性炭的吸附力完全是色散力, 而沸石分子筛的强吸附力是由色散力和静电力的共同作用产生, 这决定了沸石分子筛在干燥领域中的优势. 沸石分子筛不仅色散力很大, 还有较大的静电力, 这是因为孔穴中含有阳离子, 骨架氧含有负电荷, 这样就在阳离子的周围形成强大的电场, 正是由于这种静电力的关系, 使得沸石

分子筛对极性、不饱和及易极化分子具有优先的选择吸附作用. 水分子是极性最强的分子, 它能与硅铝格架形成氢键, 因此, 沸石分子筛有强烈的吸水性^[2-4], 其吸水量是硅胶和氧化铝的 5 ~ 6 倍. 沸石分子筛在高温下也有较高的吸水量, 例如 100 °C 时其吸水量可以达到 13%, 200 °C 时其吸水量仍有 4%. 沸石分子筛在高速气流中也有较高的吸水量, 如当气体线速度为 0.5 m/s 时, 沸石分子筛的绝热吸水量可以达到 16.7%^[5]. 因此, 沸石分子筛常被作为一种高效吸附剂用于吸附干燥中. 沸石分子筛吸附干燥与传统干

收稿日期: 2014-07-07; 修回日期: 2015-01-26

作者简介: 卢晓江 (1960—), 男, 江苏仪征人, 教授, xiaojianglu@tust.edu.cn.

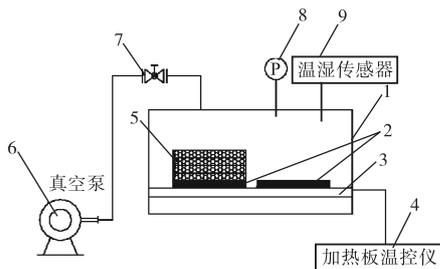
燥方法相比具有能源消耗低、干燥效率高、干燥品质好等优点^[6-8]。

沸石分子筛多用于常压吸附干燥或加压吸附干燥过程中^[9-10],对于真空状态下沸石分子筛的干燥性能鲜有研究。真空干燥的优势主要在于:在负压状态下水的沸点降低,较低温度下就可以蒸发出大量水分,从而达到干燥目的。因此,真空干燥可以实现低温干燥,常被用来干燥热敏性物料。另外,由于真空干燥的整个干燥过程处于缺氧状态,避免了被干燥物料在干燥过程中氧化和变质,保证了被干燥物料的品质。然而,真空干燥往往因为能耗较高、干燥效率低及真空度难以维持等原因,其应用受到限制。而吸附干燥是通过物理吸附作用吸附水分,通过降低空气的露点温度来获得利于干燥进行的环境条件^[11-13],并且有利于真空度的保持。所以,沸石分子筛的吸附性能有利于改善真空干燥效果,适用于干燥热敏性物料^[14-15]。本研究将沸石分子筛加入真空干燥系统中形成真空-吸附联合干燥系统,以真空状态下沸石分子筛的干燥性能为主要研究内容进行了实验研究。

1 材料与方法

1.1 实验装置与仪器

本实验装置是在真空干燥实验装置的基础上,通过在干燥物料上放置盛有沸石分子筛的筛盘改造而成的,实验装置示意图见图1。



1. 真空筒体; 2. 被干燥物料; 3. 电加热板; 4. 加热板温控仪;
5. 沸石分子筛盘; 6. 水环真空泵; 7. 进气阀; 8. 压力传感器;
9. 温湿传感器

图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schema of the experiment device

实验装置主要由真空筒体、电加热板、水环真空泵、沸石分子筛盘和传感器组成。其中,水环真空泵为真空筒体提供真空环境,其真空度最高可以达到绝对压力 3 kPa;电加热板为被干燥物料提供热源,其温度可通过温控仪在 30~150 °C 实现无级调节;沸石分子筛在干燥过程中吸收物料的部分水分,起到吸附

干燥的作用;压力传感器实时监测真空干燥箱内的压力变化,温湿传感器实时监测真空干燥箱内的环境湿度和温度变化。实验时,被干燥物料均匀分布在带有空隙的布料垫片上,然后放置在电加热板上的沸石分子筛盘下进行干燥。

实验用到的其他仪器有水分测定仪、打浆机、称重天平、蒸煮锅,主要用于实验材料的准备及实验过程中数据的测量。

1.2 实验物料的处理方法

干燥实验选用进口越南紫薯。干燥得到的最终产品是紫薯粉,所以先对紫薯进行预处理,得到紫薯浆,用于干燥实验。预处理步骤如下:将新鲜紫薯清洗并削皮,切成 3~5 mm 的薄片。将紫薯薄片放入电蒸锅里蒸煮 5~7 min,然后自然冷却。因为紫薯中含有的花青素极易被氧化,所以要将紫薯进行蒸熟处理,这样也可以使紫薯保持良好的色泽和味道。将冷却后的紫薯放入打浆机中,与水按照体积比 3:2 混合,打成浆状。

1.3 沸石分子筛的吸附特性参数及用量

实验选用上海沸石分子筛有限公司生产的 4 A 球形沸石分子筛,其性能指标见表 1。

表1 沸石分子筛的出厂参数

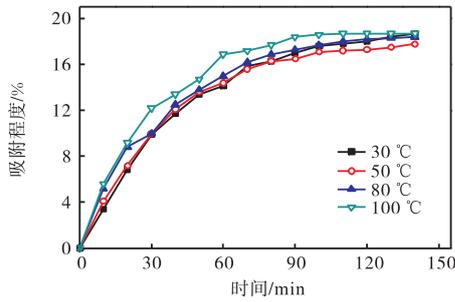
Tab. 1 Factory parameters of zeolite

参数	数值
直径	3~5 mm
堆积密度	>0.7 kg/L
压碎强度	≥70 N
磨损率	≤0.5%
最大吸附热	4 200 kJ/kg 水
平衡水容量	≥21%
包装含水量	≤1.5%

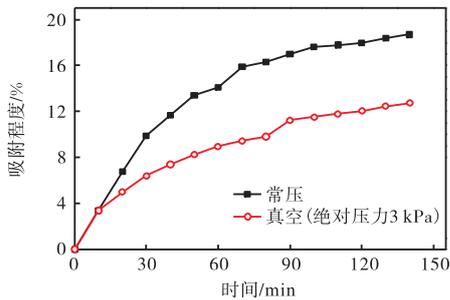
在空气相对湿度为 100% 的条件下进行实验,测定 4 A 沸石分子筛在不同温度 (30、50、80、100 °C)、不同压力 (常压、3 kPa) 下的吸附特性数据,见图 2。沸石分子筛的吸附能力用吸附程度衡量,吸附程度指沸石分子筛所吸附水分的质量与新鲜沸石分子筛 (未吸水的沸石分子筛) 的质量的比值,用百分数形式表示,数值越大表示沸石分子筛的吸附能力越强。

根据实验布料所用紫薯浆的质量、初始湿基含水率和 4 A 沸石分子筛吸附特性曲线,计算所需沸石分子筛的用量 (假定沸石分子筛可以将物料所含水分全部吸附)。物料的初始湿基含水率为 75%,每组布料质量约为 140~160 g,真空条件下沸石分子筛的饱和和吸附程度约为 12.8%,计算得需沸石分子筛 800~

950 g. 因此,本实验采用 1 000 g 沸石分子筛.



(a) 不同温度下的吸附特性曲线



(b) 不同压力下的吸附特性曲线

图 2 4 A 沸石分子筛吸附特性曲线
Fig. 2 Adsorption curves of 4 A zeolite

1.4 实验方法

根据每组实验要求对实验装置的加热板进行温度设定. 取适量紫薯浆, 平均分成两份, 分别布于两块质量相同的加热垫片上. 保证两组实验的布料厚度、布料面积相同, 并记录物料的原始质量. 待加热板升至设定温度后, 将两组物料同时放入实验装置的加热板上, 在其中一组的上方加沸石分子筛吸附床层 (1 000 g 沸石分子筛, 分为 4 层, 放入填料筛中, 为防止沸石污染物料, 筛盘中增加一层透气防尘膜), 沸石分子筛盘与紫薯物料间保持微小间距 (约 1 cm, 可认为沸石分子筛与物料紧密接触), 另外一组不加. 快速关闭真空筒体, 并开启真空泵, 保证干燥过程在真空状态下进行, 同时开始记录时间. 每隔一段时间将两组物料同时取出, 测量物料的质量, 然后快速放回实验装置中, 再次快速开启真空泵, 保证测量环节对物料干燥的影响最小. 直至两组物料的质量都不再变动后, 停止干燥实验.

1.5 实验指标的计算方法

实验物料的湿基含水率根据式 (1) 计算.

$$X_t = \frac{m_t - m_c}{m_t} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m_t 为物料干燥 t 时刻的质量, kg; m_c 为物料的绝干质量, kg.

两组物料在某时刻的质量差值根据式 (2) 计算. 质量差值越大说明沸石对干燥过程影响越大, 反之则影响越小.

$$\Delta m = m_2 - m_1 \quad (2)$$

式中: m_1 和 m_2 分别为同一时刻真空-吸附干燥和真空干燥两组实验物料的质量, g.

2 结果与分析

2.1 沸石分子筛对真空干燥过程的影响

在实验温度为 35 °C、真空度为 3 kPa、布料厚度为 1 mm 的条件下, 两组物料的干燥曲线见图 3. 由图 3 可知: 真空-吸附干燥的含水率曲线的平均斜率要大于真空干燥, 即真空-吸附干燥的干燥速率快; 在干燥结束时, 真空-吸附干燥的含水率降至 5% 左右, 而真空干燥的含水率仅降至 35% 左右. 可见, 沸石分子筛可以提高真空干燥的干燥速率, 大幅度地降低被干燥物料的含水率, 提高物料的干燥品质.

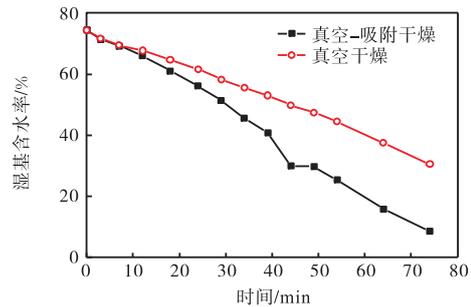


图 3 真空-吸附干燥与真空干燥的干燥曲线

Fig. 3 Drying curve of vacuum-adsorption drying and vacuum drying

2.2 温度对沸石分子筛干燥性能的影响

在真空度为 3 kPa、布料厚度为 1 mm 的条件下, 采用不同温度 (35、45、55、65 °C) 进行干燥实验, 真空-吸附干燥与真空干燥过程中物料质量差值的变化曲线见图 4. 由图 4 可知: 不同干燥温度下物料的质量差值都呈现先增加后下降的趋势; 其中, 45 °C 时的曲线最高, 65 °C 时的曲线最低, 35 °C 和 55 °C 时的曲线极值点数值相近, 55 °C 时的曲线的递减阶段较 35 °C 时的曲线先出现. 可见, 温度对沸石分子筛吸附动力的影响是非单调的. 这是因为影响沸石分子筛吸附动力的因素主要是温度和压力. 温度升高, 沸石分子筛内部结构中的水脱附动力增强, 变得容易脱附, 从而吸附作用减弱; 压力升高, 吸附动力增强, 吸附作用增强. 但是, 温度和压力是两个相互影响的因

素. 温度增高时, 整个环境的水汽分压增大. 在一定温度范围内, 压力增大对沸石分子筛吸附的促进作用大于温度升高对沸石分子筛吸附的抑制作用, 整体上就会表现出温度对沸石分子筛吸附的促进作用. 但是一旦超过这个温度范围的临界点, 压力增大对沸石分子筛吸附的促进作用就会小于温度升高对沸石分子筛吸附的抑制作用, 整体上便会表现出温度对沸石分子筛吸附的抑制作用. 所以当温度设定为临界点温度时, 沸石分子筛吸附性能对真空-吸附干燥的影响作用会达到最大. 由图 4 可知, 本次实验的最佳温度为 45 °C.

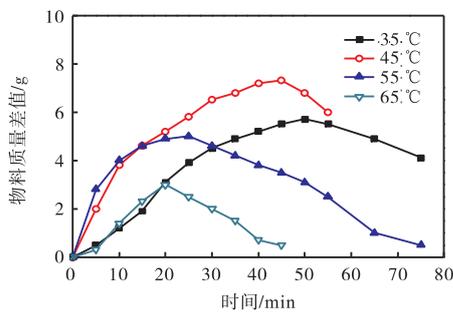


图 4 不同温度条件下物料的质量差值变化曲线
Fig. 4 Changes of material weight under different temperature

2.3 布料厚度对沸石分子筛干燥性能的影响

在实验温度为 45 °C、真空度为 3 kPa 的条件下, 采用不同的布料厚度(1、2、3 mm)进行干燥实验, 真空-吸附干燥的干燥曲线见图 5, 真空-吸附干燥与真空干燥间物料湿基含水率差值变化曲线见图 6.

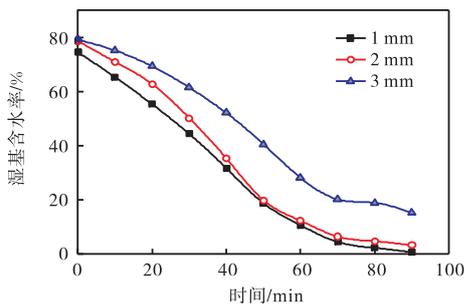


图 5 不同布料厚度时物料的干燥曲线
Fig. 5 Drying curve of the material with different thickness of fabric

由图 5 可知: 对于真空-吸附干燥, 干燥曲线的平均斜率在布料厚度为 3 mm 时最小, 布料厚度为 1 mm 时最大. 可见, 布料厚度越大时干燥速率越慢. 这是因为布料厚度为单一变量时, 随着布料厚度的增加干燥传质阻力增大, 从而阻碍干燥过程的进行.

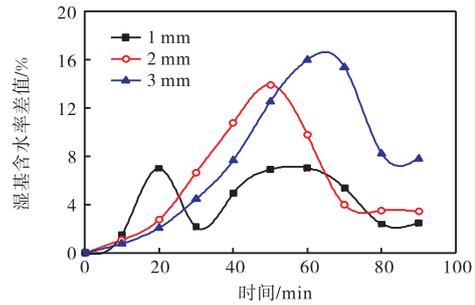


图 6 不同布料厚度时的物料湿基含水率差值变化曲线
Fig. 6 Changing curve of material moisture content with different thickness of fabric

由图 6 可知: 两组物料的湿基含水率差值在布料厚度为 3 mm 时最大, 布料厚度为 1 mm 时最小, 布料厚度为 2 mm 时的湿基含水率差值也远远高于 1 mm 的, 略低于 3 mm 的. 可见, 布料厚度越大时, 沸石分子筛吸附特性对提高真空干燥速率的作用越明显. 分析其原因是: 在干燥过程中, 物料表面传递出来的水分快速被沸石分子筛吸附, 降低了物料表面湿度, 形成了物料内部与外部间的湿度差, 从而加快物料内部水分向外传递, 提高干燥速率. 当布料厚度较小时, 物料中水分的传质阻力小, 不管有无沸石分子筛吸附, 水分都容易从物料中脱附出来, 所以此时沸石分子筛的吸附性能对干燥过程的影响不明显. 但是, 随着布料厚度的增大, 水分传质阻力增大, 干燥速率缓慢, 沸石分子筛的吸附优异性就会突显出来.

3 结论

(1) 在同等条件下, 真空-吸附干燥的干燥速率高于真空干燥的干燥速率. 本实验中, 在温度为 35 °C、真空度为 3 kPa、布料厚度为 1 mm 时, 真空-吸附干燥紫薯物料的最终含水率为 5%, 大大低于真空干燥紫薯物料的最终含水率(35%), 充分说明了真空-吸附干燥的干燥优势.

(2) 在本实验条件下, 当干燥温度低于 45 °C 时, 温度升高有利于提高沸石分子筛的吸附作用; 当干燥温度高于 45 °C 时, 温度升高则会抑制沸石分子筛的吸附作用. 真空-吸附干燥的干燥速率随着布料厚度的减小而逐渐加快.

参考文献:

[1] 高文远, 王茹, 周龙琴. 钠型斜发沸石对高钙苦卤中钾离子的吸附研究[J]. 化学研究与应用, 2009, 21(2): 239-242.

- [2] 高俊敏,郑泽根,王琰,等. 沸石在水处理中的应用[J]. 重庆建筑大学学报,2001,23(1):114-117.
- [3] 王春蓉. 沸石分子筛的性能与应用研究[J]. 化学与粘合,2010,32(4):76-78.
- [4] 朱伟东,钟依均,张富民,等. 沸石分子筛吸附和扩散:研究现状存在问题和展望[J]. 浙江师范大学学报:自然科学版,2010,33(4):369-376.
- [5] 盛志华. 沸石的应用研究[J]. 中南冶金地质,1996(1):98-107.
- [6] Djaeni M, Bartels P, Sanders J, et al. Process integration for food drying with air dehumidified by zeolites[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(1):225-239.
- [7] Djaeni M, van Boxtel A J B. PhD thesis summary: Energy efficient multistage zeolite drying for heat-sensitive products[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(5):721-722.
- [8] Djaeni M, Bartels P V, van Asselt C J, et al. Assessment of a two-stage zeolite dryer for energy-efficient drying[J]. *Drying Technology*, 2009, 27(11):1205-1216.
- [9] 杨华明,邱冠周. 分子筛的研究现状与发展前景[J]. 矿产综合利用,1996(5):24-28.
- [10] Davis M E, Lobo R F. Zeolite and molecular sieve synthesis[J]. *Chemistry of Materials*, 1992, 4(4):756-768.
- [11] Djaeni M, Bartels P, Sanders J, et al. Multistage zeolite drying for energy-efficient drying[J]. *Drying Technology*, 2007, 25(6):1053-1067.
- [12] 姚虎卿. 气体吸附干燥技术及其应用[J]. 江苏化工,1988(1):28-31.
- [13] 王宝和. 干燥动力学研究综述[J]. 干燥技术与设备,2009,7(1):51-56.
- [14] Djaeni M, van Boxtel A J B, 王娟. 新型高效沸石吸附食品干燥器的开发[J]. 干燥技术与设备,2013,11(1):7-13.
- [15] Djaeni M, van Asselt C J, Bartels P V, et al. Low temperature drying with air dehumidified by zeolite for food products: Energy efficiency aspect analysis[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2011, 7(6):4-1-4-25.

责任编辑:常涛

(上接第66页)

- [8] 孙泽沾,孙姣,秦莉,等. 壳聚糖季铵盐用于止咳定喘口服液原药水提液絮凝工艺研究[J]. 中国中药杂志,2012,37(9):1212-1218.
- [9] 于乐,李桂水,任博平,等. 壳聚糖对蒲地蓝中药水提液絮凝除杂的研究[C]//2013年第十一届全国非均相分离学术交流会论文集. 北京:中国化工学会化学工程专业委员会非均相分离专业组,2013:99-109.
- [10] 齐希光,郭群峰,李秀芬. 超滤操作条件对超滤膜清洗效率的影响[J]. 膜科学与技术,2006,26(1):47-49.

责任编辑:常涛