

膜结晶技术的研究进展

欧雪娇,张春桃*,李雪伟,王海蓉

(武汉科技大学化学工程与技术学院,煤炭转化与新型炭材料湖北省重点实验室,湖北 武汉 430081)

摘要:综述了膜结晶技术的发展现状、过程原理及其应用领域,展望了未来膜结晶技术的发展前景,结果表明,膜结晶技术应用广泛、发展前景远大,尤其是在废水零排放、有机药物以及生物大分子结晶等领域。

关键词:膜结晶;废水零排放;生物大分子结晶

中图分类号:TQ028.8

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)08-0014-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2016.08.004

Advances in membrane crystallization technology

OU Xue-jiao, ZHANG Chun-tao*, LI Xue-wei, WANG Hai-rong

(Department of Chemical Engineering and Technology, Wuhan University of Science and Technology, Hubei Province Key Laboratory of Coal Conversion and New Carbon Materials, Wuhan 430081, China)

Abstract: The development status, process principles and application fields of membrane crystallization are reviewed. The development prospects of membrane crystallization technology in future are also discussed. It indicates that membrane crystallization technology has a great wide industrial application and development prospects, especially in the Zero Liquid Discharge (ZLD) of industrial wastewater and biomacromolecules crystallization.

Key words: membrane crystallization; zero liquid discharge (ZLD); biomacromolecules crystallization

膜结晶(MCr)是一种耦合膜蒸馏与结晶的新型分离技术^[1],利用膜蒸馏脱除结晶母液中的溶剂,使之达到过饱和而析出晶体。较之蒸发结晶,膜结晶利用膜的渗透蒸发浓缩结晶母液,过饱和度的产生过程无相变,能耗较低;而且,膜结晶还具有促进异相成核的作用,能有效缩短结晶诱导期(induction period)、控制晶体成核与生长以及调控结晶产品粒度等优点。因此,膜结晶广泛应用于无机盐分子精制、废水中盐的回收、海水淡化以及生物大分子的结晶过程。

1 膜结晶技术

1.1 膜结晶的基本原理

Curcio等^[2]最早提出了经典的膜结晶概念,即膜蒸馏耦合结晶,用于替代传统的高能耗蒸发结晶过程;通过对膜结晶的不断研究和探索,Profio等^[3]提出了新型的溶析膜结晶(antisolvent membrane crystallization)技术,可用于替代传统的溶析结晶过程;根据溶析剂透过膜的方式不同,溶析膜结晶又可以分为溶剂透过膜孔渗透蒸发的溶析膜结晶和溶析

剂透过膜孔加入的溶析膜结晶^[4],如表1所示。

表1 膜结晶的分类及异同

	经典膜结晶	溶析膜结晶	
		溶剂透过膜孔渗透蒸发	溶析剂透过膜孔加入
过饱和度产生原理	溶剂蒸汽分压	溶解度不同	溶解度不同
过饱和度实现过程	溶剂渗透蒸发	溶剂渗透蒸发	溶剂不渗透蒸发
膜孔内过程传递	质量和热量传递	质量传递	质量传递

膜结晶原理如图1^[4]所示。(a)经典膜结晶中,结晶母液中的溶剂通过膜的渗透蒸发,使溶液浓缩达到过饱和并在膜表面的诱导作用下结晶;(b)溶剂透过膜孔渗透蒸发的溶析膜结晶过程,溶析剂、溶剂以及溶质混溶,溶剂通过膜的渗透蒸发到另一侧,而溶析剂不通过或者通过膜的速率低于溶剂,使得溶析剂的体积分数逐渐增大,溶质在溶析剂-溶剂二元体系中的溶解度降低,达到溶析结晶的目的;(c)溶析剂透过膜孔加入的溶析膜结晶,溶析剂通过膜的渗透蒸发从膜的另一侧加入至结晶母液一侧,随着溶析剂逐渐渗透蒸发至结晶母液一侧,溶质

收稿日期:2015-12-14;修回日期:2016-06-08

基金项目:湖北省教育厅科学技术研究计划重点项目(D20151101)

作者简介:欧雪娇(1991-),女,硕士生;张春桃(1978-),男,博士,副教授,主要从事工业结晶技术方面研究,通讯联系人,027-68862338, zhangchuntao@wust.edu.cn。

在溶剂-溶剂二元体系中的溶解度逐渐降低,达到过饱和并析出晶体。

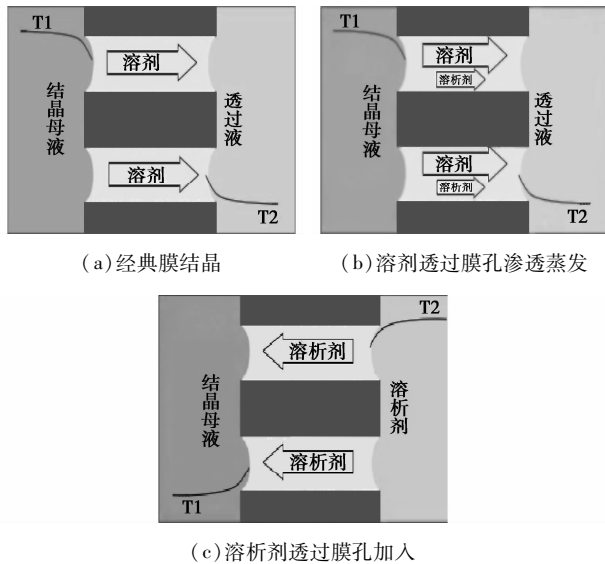


图1 膜结晶原理

1.2 膜结晶过程的膜材料

膜结晶技术的必要条件包括产生过饱和度的驱动力与疏水性纤维微孔膜^[5]。膜结晶技术要求膜具有较好的疏水性、膜孔径 $0.1 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 、高密度孔分布、高渗透性等特性。常用于膜结晶的膜主要是聚偏氟乙烯膜(PVDF)、聚丙烯膜(PP)和聚四氟乙烯膜(PTFE)。PTFE膜在疏水性、抗氧化性及化学稳定性上优于其他2种膜,PVDF膜次之,PP膜相对较差,但PP膜价格低廉,市场广阔。

膜材料是支撑膜结晶技术发展的必要条件,用于膜结晶的膜材料从最初单一的PTFE、PVDF和PP发展到用其他物质对膜材料表面进行修饰的复合膜。对高浓度海水的直接接触式膜蒸馏-结晶模拟研究中^[6]发现,修饰的超疏水性膜(PVDF-FTCS膜、PVDF-PDTS膜)在高浓度下抵制污垢的能力比未修饰的膜更强。而在膜结晶技术用于海水淡化的过程设计及其可行性研究中^[7]发现,聚四氟乙烯膜比膜表面用聚醚砜涂覆过的聚四氟乙烯膜能够更好地防止浓缩液的渗漏。由此可见,寻找适当的物质对膜表面进行修饰以达到提高膜表面性能的目的,具有重要的理论意义和实践价值,应用前景广阔。

2 膜结晶过程

2.1 膜结晶过程与蒸发结晶的异同

膜结晶器一般由膜蒸馏操作系统和结晶器组合而成,Raymond等^[7]强调经膜蒸馏操作后的物料,再

经冷却结晶而产生过饱和度的结晶过程不属于膜结晶范畴;即膜结晶过程所需过饱和度在膜蒸馏的膜组件中产生,而溶质结晶过程单独在结晶器中完成。传统蒸发结晶过程的溶剂蒸发和溶质结晶在同一设备(蒸发结晶器)中同步进行,蒸发结晶器中料液表面和料液主体存在温度差,导致结晶产品的粒度分布不均一;而膜结晶过程中过饱和度的产生与溶质的结晶分别在2个不同的设备中完成,结晶器内母液浓度均一,不存在温度梯度,因而结晶产品的粒度分布(CSD)均一,晶体质量更高^[8]。

2.2 膜结晶过程的影响因素

膜结晶过程能耗低、晶体产品质量好,但膜结晶过程中膜表面的浓差(或温度)极化、晶体在膜表面的析出以及膜污染等现象也是制约膜结晶工业应用与推广的关键因素。极化现象导致溶剂蒸汽分压下降,抑制了传质推动力,降低结晶效率。温度极化使膜表面温度降低,加剧膜表面与溶液主体的温度差,膜表面的溶液率先达到过饱和而析出晶体,堵塞膜孔;而且浓差极化还会使膜表面溶液浓度增大,加剧膜表面与溶液主体的浓度差,使得膜表面溶液率先达到过饱和,导致晶体在膜表面析出并沉积,形成致密的膜垢。因此,温度极化和浓度极化能显著地促进膜表面成核现象的发生。减少极化现象最直接的方式是提高流体流速以增加膜表面的湍动程度^[9],但是过高的流速又会对后续结晶过程产生影响。

倪伟^[10]在KCl的膜结晶实验中发现,在临近结晶开始时或者结晶时,膜通量加速下降,猜测是晶粒随母液进入膜组件并堵塞膜孔造成的;而Ding等^[11]对传统中药的膜结晶研究表明,膜表面产生污垢时膜通量陡降,所以膜通量骤降也可能是膜表面沉积污垢造成的。Meng等^[12]对高浓度海水的膜结晶研究表明,未修饰的疏水性膜和修饰过的高疏水性膜上都有有机物污垢,活性的有机物污垢对膜的疏水性有较大的影响,并逐渐使料液润湿膜孔(膜孔润湿是膜蒸馏过程中最严重的膜污染^[13]);而盐类污垢对膜的疏水性影响不明显,不易造成膜孔润湿。因此,膜表面疏水性的进一步优化要求膜表面最大程度不产生污垢,提高原料液流速和温度可以有效抑制污垢的生长。

2.3 膜结晶过程动力学

Profio等^[14]在溶酶菌的膜结晶动力学研究中,通过浊度测定结晶诱导期,并以此对早期成核动力学和晶体生长速率进行研究,如式(1)、式(2)所示;

研究表明,结晶母液中蛋白质或沉淀剂的溶解活性与脱洗液中盐的浓度有关,共同影响气相分压梯度(推动力);并且离子强度也影响蛋白质的溶解度。因此这 2 方面交互影响膜结晶系统的动力学参数。

单位体积的成核率 B :

$$B = (1/V)(\Delta N/\Delta t) \quad (1)$$

式中, Δt 为时间间隔; ΔN 为 Δt 时间内产生的晶体数; V 为体积。

微粒生长半径随时间的关系:

$$r(t) = r_{\max} - (r_{\max} - r_0)e^{-k(t-t_0)} \quad (2)$$

式中, k 为动力学常数; r_{\max} 为晶体的最终当量半径; r_0 为 t_0 时刻的晶体半径。

3 膜结晶的发展应用

3.1 膜结晶技术的产生

膜结晶技术的研究报道最早追溯到 2001 年,意大利的 Curcio 等^[2]首次将直接接触式膜蒸馏用于浓缩 NaCl 溶液,制备了变异系数($C. V.$)为 42.3% 的 NaCl 晶体,优于传统结晶分离技术制备的 NaCl 晶体($C. V.$ 约为 50%)。2001 年,第三届意大利和韩国的《膜与膜过程研讨会》上, Curcio 等^[15]初步探讨了膜结晶法结晶卵清蛋白。随后,膜结晶的应用迅速拓展到无机盐精制、废水中盐的回收、海水淡化、有机物膜结晶以及生物大分子等领域。

3.2 无机盐溶液膜结晶

3.2.1 无机盐分子的精制

无机盐分子的精制是膜结晶研究的开端,不仅制备了优于传统结晶分离技术的无机盐晶体,而且奠定了膜结晶研究的理论基础,对膜结晶技术在其他领域的应用研究有指导作用。Tun 等^[16]应用膜结晶技术对 NaCl、Na₂SO₄ 溶液的膜通量及其晶形进行研究,结果表明,当过饱和度增加到一定程度或者发生极化作用时,膜表面析出晶体堵塞膜孔,膜通量迅速下降。因此要控制适当的过饱和度,并尽量减少极化现象发生。

3.2.2 海水淡化

为了在海水淡化中实现最大化的水回收率以及过程效率强化,膜结晶在海水淡化技术中脱颖而出。常用于海水淡化的膜分离(反渗透、电渗析等)技术有高能耗和增加地表水的含盐度等缺点,膜结晶是优于反渗透的环境友好型海水淡化技术,是解决饮用水高度缺乏地区最经济有效的海水淡化方案。意大利的膜技术研究所(TM-CNR)、布拉布利亚大

学,韩国汉阳大学和沙特阿拉伯的阿卜杜勒阿齐兹大学针对缺水严重的现状和传统海水淡化技术的缺陷,联合提出了膜结晶技术海水淡化方案,能得到更多的淡水、消耗更低的能量并能回收矿物质^[17]。Pantoja 等^[18]利用质量和能量衡算方程、气液平衡方程、介稳区等仿真设计了膜结晶用于海水淡化的分层仿真数学模型(包括初始设计规范、产品规格、工艺流程图设计、膜蒸馏模块设计和结晶器设计),并以石化厂排放的近海水域的污水做了个案分析。

3.2.3 废水中盐的回收

相较于传统的蒸发结晶回收工业废水中的盐,膜结晶不仅操作能耗更低、产品质量更高,而且盐回收效率也高。Curcio 等^[19]先用纳滤预富集镍-氢电池废液,再用膜结晶回收其中的无水芒硝,产品质量高,粒度分布均一(变异系数 $C. V. < 0.3$),结晶时间短(< 1 h),操作温度低(50°C)。Luis 等^[20]和 Ye 等^[21-22]先后应用膜结晶技术从碱液封存烟道气(预燃捕捉法脱除的 CO₂ 和 H₂)中的高浓度 CO₂ 所得的 Na₂CO₃ 溶液中回收 Na₂CO₃ 晶体。Li 等^[9]也先用反渗透技术预浓缩用 NaOH 溶液吸收烟道气(化石燃料脱硫或者其他工业过程)中 SO₂ 的所得液,再用膜结晶技术回收其中的 Na₂SO₄ 晶体, Na₂SO₄ 的回收率高达 95.9%。

3.2.4 工业废水零排放

废水零排放(zero liquid discharge, ZLD)工艺是 20 世纪末美国电力研究中心首次提出并推广的工业废水处理新技术。废水零排放是指不向环境中排出任何废液(除蒸发和风吹外),各工序排出的废水可重复使用,废水中的污染物及盐类经浓缩结晶后,回收利用为有价值的化工原料^[23]。传统的用于废水处理的反渗透(RO)工艺存在环境二次污染的问题,造成经济成本偏高。膜结晶技术使废水零排放成为可能,且不存在处理二次污染的问题,经预处理过的工业废水通过膜结晶系统渗透蒸发而得的冷凝水可以用作工业循环水或锅炉用水等,且回收结晶析出的工业盐。Chen 等^[24]对连续膜结晶应用于盐水零排放的研究中,通过正交试验主要对结晶母液侧与渗透液侧的物料流率和温度进行了优化研究并回收 NaCl 晶体。结果表明,物料流率是影响膜结晶操作的主要因素,且最佳操作参数是,结晶母液侧和渗透液侧物料的流率和温度分别为 0.64 L/min、338 K 和 0.35 L/min、303 K。

3.3 有机物膜结晶

有机物膜结晶主要应用于有机药物领域。传统

蒸发结晶操作温度高,有机药物对温度敏感,而膜结晶的操作工艺更加温和,且基于膜材料的发展,疏水性膜材料应用于亲水性溶液,亲水性膜材料应用于疏水性溶液,因此膜结晶技术适用于药物结晶。Profio等^[25]用溶析膜结晶技术从水-乙醇混合溶剂中直接制备出抗癫痫药酰胺咪嗪-邻磺酰苯甲酰亚胺共晶体,结晶母液初始浓度与操作温度较传统结晶过程更低。此应用实现了共晶体作为活性医药成分(active pharmaceutical ingredients, APIs)的可能,提供了可替代活性医药成分(APIs)物化特性的高纯共晶体制药新配方,且共晶体活性医药成分与自由活性医药成分及其盐相比,晶型选择更多,保质期、溶出度、药效等方面的性能都有所提高。Chen等^[26]用溶析膜结晶从含有可溶聚合物(聚丙烯树脂RL100)的灰黄霉素丙酮溶液中直接结晶出覆膜药物微粒,是优于传统冷却覆膜工艺的可连续覆膜新工艺。

3.4 生物大分子膜结晶

测定蛋白质结构和空间构型的XRD技术对其晶体粒度有一定的要求,而生物大分子一般不容易结晶,很难长大到满足其测试所需的要求。膜结晶过程中,溶质结晶与膜材料性质(多孔性、疏水性等)有直接关系,活性的疏水性微孔膜表面作为异相成核的物理层,并与溶质分子相互作用,随着膜表面粗糙度的增加,成核能垒降低(异相成核的动力学常数比均相成核大几个数量级),能有效促进不易结晶体系(例如生物大分子)的成核与晶体生长,或者促使特殊分子相互作用而形成多晶型晶体^[4]。生物大分子膜结晶,从研究溶酶菌、卵清蛋白开始,主要研究了蛋白质高品质晶体及其多晶型控制,发展到对药物分子的研究。Zhang等^[27]在溶酶菌的膜结晶过程发现,NaCl、NaSCN、柠檬酸钠、PEG600、PEG4000和PEG6000等作为沉淀剂都对溶酶菌的膜结晶有促进作用;而且,加入NaCl和NaSCN时得到的高品质溶酶菌晶体,可满足其晶体结构的XRD测试要求。马润宇等^[28]分别采用动态膜结晶和静态渗透膜结晶过程制备了粒度较大的木瓜蛋白酶晶体和粒度大且均匀的牛血清白蛋白V完美晶体。

膜结晶不仅可以制备高品质蛋白质晶体,而且能有效控制蛋白质分子多晶型,有一定的经济价值。Profio等^[29]在脉冲输入式电场环境下,利用膜结晶技术研究了甘氨酸多晶型化;开创了多晶型控制新方向。Martínez等^[30]用膜结晶技术从1-(5-溴-2-

糠偶酰基)-2-溴-2-硝基乙烷药物大分子合成和纯化的废液中,回收了1-(5-溴-2-糠偶酰基)-2-溴-2-硝基乙烷大分子化合物,晶系是四方晶系和正交晶系,与商业产品类似。

4 前景展望

膜结晶是很有前景的新型结晶分离技术,在生物大分子结晶、有机药物、海水淡化以及废水零排放等领域前景广阔。目前,我国膜结晶已有一定的研究成果和技术储备,但对膜结晶的应用研究相对于国外发展较为缓慢;因此,我国应该大力发展膜结晶技术,特别是膜结晶在工业废水中盐的回收和生物大分子领域的应用,对工业液废处理和制药工业的发展有着积极的推动作用。膜结晶过程也存在极化现象、膜孔堵塞和膜污染等限制因素,研究发展膜表面性能较好的复合膜以及对膜结晶过程其他控制因素进行优化是膜结晶技术亟待攻克的技术难题。此外,溶析膜结晶理论上适用于有机疏水性(使用亲水性膜)溶液,加大溶析膜结晶在其他高科技领域应用,例如,应用溶析膜结晶技术研究制备有机半导体单晶,具有重大的战略意义和经济效益。

参考文献

- [1] 马润宇,王艳辉,涂感良.膜结晶技术研究进展及应用前景[J].膜科学与技术,2003,(4):145-150.
- [2] Curcio Efrem, Criscuoli Alessandra, Drioli Enrico. Membrane crystallizers[J]. Ind Eng Chem Res, 2001, 40:2679-2684.
- [3] Di Profio G, Stabile C, Caridi A, et al. Antisolvent membrane crystallization of pharmaceutical compounds[J]. J Pharm Sci, 2009, 98:4902-4913.
- [4] Drioli Enrico, Gianluca Di Profio, Efrem Curcio. Progress in membrane crystallization[J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2012, 1(2):178-182.
- [5] 魏可贵.蛋白质溶液的膜结晶[D].北京:北京化工大学,2007.
- [6] Suwan Meng, Yun Ye, Jaleh Mansouria, et al. Fouling and crystallisation behaviour of superhydrophobic nano-composite pvdf membranes in direct contact membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2014, 463:102-112.
- [7] Raymond Creusen, Jolanda van Medevoort, Mark Roelands, et al. Integrated membrane distillation-crystallization: Process design and cost estimations for seawater treatment and fluxes of single salt solutions[J]. Desalination, 2013, 323:8-16.
- [8] 贾志谦.膜科学与技术基础[M].北京:化学工业出版社,2012.
- [9] Li Wenqi, Bart Van der Bruggena, Patricia Luis. Integration of reverse osmosis and membrane crystallization for sodium sulphate recovery[J]. Chemical Engineering and Processing, 2014, 85:57-68.

- [10] 倪伟. 膜结晶技术用于制备无机盐晶体的基础研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2007.
- [11] Ding Zhongwei, Liu Liying, Liu Zhe, *et al.* Fouling resistance in concentrating tem extract by direct contact membrane distillation [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 362: 317 - 325.
- [12] Meng Suwan, Ye Yun, Jaleh Mansouria, *et al.* Crystallization behavior of salts during membrane distillation with hydrophobic and superhydrophobic capillary membranes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, 473: 165 - 176.
- [13] 阎建民, 贡延滨, 马润宇. 膜蒸馏过程中的膜污染研究[J]. *膜科学与技术*, 2001, (3): 21 - 23, 32.
- [14] Gianluca Di Profio, Efrem Curcio, Alberto Cassetta, *et al.* Membrane crystallization of lysozyme; Kinetic aspects [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2003, 257: 359 - 369.
- [15] Curcio E, Criscuoli A, Drioli E. Proc of 3rd Italy-Korea workshop on membranes and membrane processes [C]. Cetraro: 2001.
- [16] Tun C M, Fane A G, Matheickal J T, *et al.* Membrane distillation crystallization of concentrated salt-flux and crystal formation [J]. *Membrane Science*, 2005, 257: 144 - 155.
- [17] Quist-Jensen C A, Macedonio F, Drioli E. Membrane crystallization for salts recovery from brine—an experimental and theoretical analysis [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2016, 57 (16): 7593 - 7603.
- [18] Carlos E Pantoja, Yuri N Nariyoshi, Marcelo M Seckler. Membrane distillation crystallization applied to brine desalination; A hierarchical design procedure [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2015, 54: 2776 - 2793.
- [19] Efrem Curcio, Xiaosheng Ji, Abdul Matin Quazi, *et al.* Hybrid nanofiltration-membrane crystallization system for the treatment of sulfate wastes [J]. *Journal of Membrane Science*, 2010, 360: 493 - 498.
- [20] Luis P, Van Aubel D, Van der Bruggen B. Technical viability and exergy analysis of membrane crystallization; Closing the loop of CO₂ sequestration [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2013, 12: 450 - 459.
- [21] Ye Wenyuan, Lin Jiuyang, Henrik Takker Madsen, *et al.* Enhanced performance of a biomimetic membrane for Na₂CO₃ crystallization in the scenario of CO₂ capture [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 498: 75 - 85.
- [22] Ye Wenyuan, Wu Jianhui, Ye Fan, *et al.* Potential of osmotic membrane crystallization using dense membranes for Na₂CO₃ production in a CO₂ capture scenario [J]. *Cryst Growth Des*, 2015, 15: 695 - 705.
- [23] Jolanun B, Kaewkam C, Bauoon O, *et al.* Turned windrow composting of cow manure as appropriate technology for zero discharge of mulberry pulp wastewater [J]. *Environmental Technology*, 2014, 35 (16): 2104 - 2114.
- [24] Chen Guizi, Lu Yinghong, William B Krantz, *et al.* Fane optimization of operating conditions for a continuous membranedistillation crystallization process with zero salty water discharge [J]. *Journal of Membrane Science*, 2014, 450: 1 - 11.
- [25] Gianluca Di Profio, Valentina Grosso, Antonella Caridi, *et al.* Direct production of carbamazepine-saccharin cocrystals from water/ethanol solvent mixtures by membrane-based crystallization technology [J]. 2011, 13: 5670 - 5673.
- [26] Chen Dengyue, Dhananjay Singh, Kamalesh K Sirkar. Continuous synthesis of polymer-coated drug particles by porous hollow fiber membrane-based antisolvent crystallization [J]. *Langmuir*, 2015, 31: 432 - 441.
- [27] Zhang Xinmiao, Peng Zhang, Kegui Wei, *et al.* The study of continuous membrane crystallization on lysozyme [J]. *Desalination*, 2008, 219(1/2/3): 101 - 117.
- [28] 马润宇, 刘丽英, 丁忠伟. 牛血清白蛋白 V 的渗透膜结晶研究 [J]. *膜科学与技术*, 2011, (3): 251 - 255.
- [29] Gianluca Di Profio, Mika T Reijonen, Rocco Caliendo, *et al.* Insights into the polymorphism of glycine; Membrane crystallization in an electric field [J]. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, 15: 9271 - 9280.
- [30] Brito Martínez M, Jullok N, Rodríguez Negrín Z, *et al.* Membrane crystallization for the recovery of a pharmaceutical compound from waste streams [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2014, 92: 264 - 272. ■

陶氏推出全新富耐™反渗透系列产品

随着前端水价和后端减排成本的上升,工业水处理用户承受着巨大的压力。提高用水效率是行业明确的发展方向,但许多废水回用系统目前面临处理水质难度更大、因而处理成本更高昂的挑战。为了缓解此类高难度废水处理的问题,陶氏水处理及过程解决方案业务部在其反渗透膜及纳滤膜产品单元引入全新的陶氏 FILMTEC™富耐™产品线(以下简称“陶氏富耐”)。陶氏富耐™产品系列专为应对高难度废水处理挑战而定制,为工业用户提供 1 种兼顾回收率和运行成本的废水管理方式。2016 年 6 月 15—17 日,陶氏在上海国际水展首次发布了富耐系列产品。

陶氏富耐产品系列由 4 款膜产品组成,每款产品各有特色和优势,可满足不同市场——如化石燃料发电、化工和石化、钢铁冶金和纺织——最具挑战性的用水需求。该产品系列包括:①陶氏 FILMTEC™富耐™ CR100 反渗透膜元件:特别针对废水回用中突出的生物污染问题设计。减少由生物污染引起的清洁频率,降幅高达 50%,且节省能耗达 10%。②陶氏 FILMTEC™富耐™ XC70、XC80 和 XC-N 膜元件:适用于希望最小化废液排放、降低运行费用和实现近零排放的工厂。它们将帮助用户最大程度地提高近零排放中的水回收率,并减少运营开支。(单红儿)