

乳酸的分离纯化工艺研究进展

孙雨萌¹, 王俊彤^{1,2,3}, 姜彩霞^{2,4}, 刘晓兰⁵, 郑喜群^{1,2,4*}, 田强⁶

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆163319;

2.粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心, 黑龙江大庆163319;

3.黑龙江省农产品加工与质量安全重点实验室, 黑龙江大庆163319;

4.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆163319;

5.齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江齐齐哈尔161006;

6.京粮龙江生物工程有限公司, 黑龙江绥化151600)

摘要:系统综述了发酵液中乳酸分离纯化技术的研究进展,重点分析了蒸馏法、萃取法、膜分离法及吸附法在该过程中的优势与局限性。旨在为乳酸分离纯化技术的进一步发展提供理论参考。

关键词:乳酸;分离纯化;工艺流程

中图分类号:TQ028.4

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)06-0058-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.06.011

Research progress on the separation and purification process of lactic acid

SUN Yu-meng¹, WANG Jun-tong^{1,2,3}, JIANG Cai-xia^{2,4}, LIU Xiao-lan⁵,

ZHENG Xi-qun^{1,2,4*}, TIAN Qiang⁶

(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2.Engineering Research Center of Processing and Utilization of Grain By-products and Utilization of Ministry of Education, Daqing 163319, China; 3.Key Laboratory of Agri-products Processing and Quality Safety of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China; 4.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 5.College of Food and Biological Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 6.Jingliang Longjiang Bioengineering Co., Ltd., Suihua 151600, China)

Abstract:This article provides a comprehensive overview of recent advancements in lactic acid separation and purification technologies from fermentation broth.It particularly examines the strengths and drawbacks of commonly used techniques,such as distillation, extraction, membrane separation, and adsorption.The objective is to offer theoretical insights and support for the future improvement and innovation of lactic acid purification methods.

Key words:lactic acid; separation and purification; process flow

乳酸(lactic acid, LA)是一种重要的有机酸,又名2-羟基丙酸,分子式为 $C_3H_6O_3$,分子结构中含有1个羟基和1个羧基,根据其旋光性可分为L-乳酸、D-乳酸,以及外消旋体DL-乳酸。其中,光学纯L-乳酸和D-乳酸具有更高应用价值^[1]。由于人体内存在L-乳酸脱氢酶,能够高效代谢L-乳酸而不产生副作用,因此,在医药、化妆品、食品及化工等领域得到了广泛应用。

L-乳酸存在于生物体内,是糖酵解途径的重要代谢产物,参与动物肌肉组织的能量供给过程,同时也是酸奶、奶酪、啤酒等发酵食品的天然组成成分。在食品工业领域,乳酸可作为防腐剂、调味剂和酸度

调节剂等;在化妆品领域,因具有保湿、去角质、抗衰老等功效,常被用于护肤品配方;在医药领域,乳酸可应用于药物制剂的制备和消毒杀菌剂的生产;而在化工行业,主要用于聚乳酸的合成。聚乳酸由乳酸分子脱水缩合而成,是一种可生物降解的无毒环保型材料,在人体内可水解代谢而排出^[2],降解为水和二氧化碳仅需数月,具有优异的环保特性,被视为传统石油基塑料的理想替代物。随着全球范围内对可降解材料需求的持续增长,L-乳酸($\geq 99\%$)作为聚乳酸的主要前体物质,预计年需求量将达到196万t^[1]。

目前,乳酸的生产方法主要包括化学合成法和

收稿日期:2025-08-13;修回日期:2026-04-13

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX02B14)

作者简介:孙雨萌(2002-),女,硕士生;郑喜群(1963-),男,博士,教授,研究方向为食品科学与工程,通讯联系人,zhengxiqun@126.com。

生物发酵法。化学合成法通常需要高温和昂贵的金属催化剂,且主要依赖石油基化工原料,生产成本低且环境友好性差^[3]。相比之下,生物发酵法是将特定的菌株接种到富含淀粉的可再生资源中,通过微生物发酵生产乳酸,具有能耗低、污染小等优势^[3]。生物发酵法的经济性主要受原料成本和分离纯化成本2方面制约。近年来,为降低原材料成本并提高可持续性,研究人员致力于开发农业废弃物(如甘蔗渣、玉米秸秆、谷物秸秆等)作为发酵底物,这不仅减少了资源浪费,还促进了绿色生物制造的发展。

在生物发酵制备乳酸的过程中,体系内会伴随产生蛋白质、菌体、无机盐及残余糖类等多种杂质,而乳酸的分离纯化成本约占生产总成本的50%。因此,开发高效、低成本分离纯化技术至关重要。目前,乳酸的纯化技术主要包括蒸馏法、萃取法、膜分离法及吸附法,各种技术各具优势,但也存在一定局限性。本文中系统综述了近年来乳酸分离纯化的研究进展,对比分析了不同方法的技术特点、适用性及发展趋势,以期为乳酸生产工艺的优化提供理论参考。

1 蒸馏法

1.1 分子蒸馏

分子蒸馏又叫做短程蒸馏,是基于乳酸混合物的运动平均自由程不同,在高真空、远低于乳酸沸点的条件下将其分离,不同分子受热溢出液面后,乳酸分子的自由程大,更容易到达冷凝板,沿冷凝板流出;杂质的自由程小,无法到达冷凝板,在气相中饱和并返回液相,从而得到高纯度乳酸,工作原理如图1所示。与常规蒸馏法相比,分子蒸馏法操作温度低、受热时间短、分离效率高、无化学反应,因此可保护物料不受污染。目前分子蒸馏已广泛应用于食品、医药、化工、石油等各个行业,且已实现工业化。

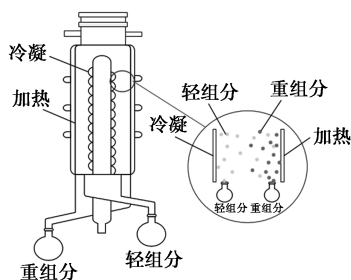


图1 分子蒸馏示意图

分子蒸馏法提纯乳酸工艺中,目前应用较为广泛的为刮膜式分子蒸馏设备和离心式分子蒸馏设

备。近年来,研究人员在操作压力、温度、进料速度等关键工艺参数方面进行了系统优化。研究发现,设备真空度与产品纯度呈正相关。崔洋等^[4]对提高刮膜式分子蒸馏设备的真空度进行研究,对比不同的真空机组工作情况,最终确定采用一级水环真空泵、一级罗茨真空泵和一级蒸气真空泵三泵联用的方法将系统真空度提升至10 Pa,同时保证了经济性。在此真空度条件下,设置冷凝温度为30℃,蒸发温度为55~60℃,刮膜器转子转速为125~135 r/min,经过5次连续蒸馏操作,乳酸收率可达96%,纯度达到97%。该技术方案有效解决了分子蒸馏过程中高真空难以维持的难题。

目前,分子蒸馏技术在乳酸提纯领域的应用已日趋成熟。工业规模的相关研究表明,以80%~85%的粗L-乳酸为原料,经薄膜蒸发器浓缩及二、三级分子蒸馏器蒸馏后,可分别获得含量为100%的聚合级L-乳酸、含量大于99%的食品级L-乳酸以及饲料级乳酸,其中聚合级乳酸和食品级乳酸的总收率超过86%,较传统工艺提高了15%^[5]。另有研究报道,采用刮板蒸发器、二级短程蒸馏器蒸馏及炭柱脱色装置对粗L-乳酸进行精制纯化,所得材料级100%L-乳酸和食品级100%L-乳酸的总收率同样超过86%^[6]。这些研究成果不仅证实了分子蒸馏技术在高纯度乳酸制备中的有效性,也为工业化生产提供了可靠的技术方案。

未来可通过设备升级实现乳酸的高效分离纯化,可采用耐高温、耐酸性材料制作关键部件,以增强分子蒸馏设备的密封性能,同时优化真空管道设计并采用真空泵组合联用方式,提升高真空稳定性,从而应对分子蒸馏对高真空环境的需求及高浓度乳酸的腐蚀影响;此外,可以通过在分子蒸馏前引入预处理工艺提高进料纯度,以减少蒸馏级数,在提升分离效率的同时降低成本,推动乳酸纯化工艺的优化升级。

1.2 反应精馏

反应精馏工艺是一种将化学反应与精馏分离过程耦合的高效分离技术,核心在于使酯化水解反应在精馏塔内同步进行。在该工艺中,乳酸与醇类物质发生酯化反应生成沸点显著低于乳酸的乳酸酯,随后通过蒸馏过程实现产物的高效分离,最终水解得到乳酸和醇的混合物。研究表明,反应精馏技术具有多重优势,不仅能提高反应转化率和反应速率,还能减少副产物的生成,同时在降低工艺能耗和成本方面表现出显著效果^[7]。

窦欣宇等^[8]创新性地将隔壁精馏与反应精馏技术耦合,开发了一种反应精馏隔壁塔分离乳酸的工艺,通过 Aspen Plus 模拟与遗传算法优化,在最优工艺条件下,乳酸收率可达到 96.9%,同时降低了分离成本和二氧化碳排放量,具有良好的经济性和环保性。姚洪^[9]则设计了一种具有塔顶循环特征的新型反应精馏系统,该系统由浓缩塔、酯化塔、水解塔、甲醇回收塔组成,并采用了阳离子交换树脂 ZGC108 作为乳酸与甲醇酯化反应的催化剂。Aspen Plus 模拟结果表明,这种外部循环式的酯化反应精馏塔与水解塔的组合设计不仅具有更低的能耗,且有助于促进酯化反应的高效进行,经工艺优化后,可获得质量分数高达 90% 的乳酸产品。目前,我国已成功研发新型双隔壁反应蒸馏塔,能耗显著降低,未来可进一步探索将该设备应用于乳酸提取过程,为乳酸的高效分离提供新的技术路径。

2 萃取法

2.1 物理萃取

物理萃取系统由互不相溶的水相和有机相构成,分离原理基于乳酸在两相中的溶解度不同,使乳酸从水相转移至有机相,随后通过反萃取操作实现乳酸的回收,在该过程中,溶质对两相的亲合力通常以分配系数作为衡量指标。

Alao 等^[10]研究了烷酮类溶剂碳链长度对乳酸萃取效率的影响。通过对比分析己酮、辛酮和壬酮对发酵液中乳酸的萃取性能,发现乳酸的分配系数随着分离溶剂碳原子数的增加而增加。这一现象归因于溶剂分子中烃链增长导致疏水性增强,从而提高了对乳酸的萃取效率。后续研究中,Alao 等^[10]进一步考察了长链烷基乙酸酯(乙酸己酯、乙酸庚酯和乙酸辛酯)对乳酸的萃取性能。研究结果表明,乙酸辛酯因最长的碳链结构和最低的水溶性,表现出最高的乳酸分配系数和萃取效率。这项研究证明了长链烷基乙酸酯在发酵液中萃取乳酸的适用性,且萃取效果与溶剂分子碳原子数呈正相关。Gugel 等^[11]使用双水相萃取和活性炭吸附的方式从发酵橄榄叶培养基中回收乳酸,双水相萃取是由 2 种互不相溶的水溶性成分组成,通过待提取物质在两相中的分配差异实现分离,这种提取技术条件温和,可将稀溶液中的生物分子浓缩成更小的体积,此萃取系统由乙醇和硫酸铵组成,能够直接从发酵培养基进行乳酸提取,无需生物物质分离,可以缩短加工时间并提高竞争力,最终产品纯度可达到 90%,为乳酸

的工业化回收提供了具有竞争力的解决方案。

2.2 反应萃取

反应萃取是乳酸回收和纯化的关键技术之一,其原理基于乳酸与萃取剂之间的可逆化学反应,生成可溶于有机相的配合物^[3]。分离完成后,可通过调节温度等条件实现配合物解离,从而高效回收乳酸。反应萃取具有能耗低、选择性高、产品纯度和收率高等优点^[3]。在优化反应萃取工艺的研究中,盐析辅助法展现出独特价值。Baral 等^[12]发现硫酸铵的加入能提升磷酸三丁酯-乙酸乙酯体系的萃取效率,机理在于无机盐通过降低乳酸在水相中的溶解度促进其向有机相转移,从而提高萃取效率。实验数据表明,添加 60% (w/v) 硫酸铵可使乳酸提取率提升 36.17%,最优条件下总提取率达 85%。这一发现得到 Pau 等^[13]研究的佐证,他们采用类似体系从食物垃圾发酵液中回收有机酸,在 40% (w/v) 硫酸铵条件下获得 65% 的回收率。值得注意的是,乙酸乙酯的引入在保持萃取性能的同时,有效降低了溶剂毒性和成本,为工业化应用提供了更优选择。

随着环保要求的日益严格,传统有机溶剂的替代研究成为该领域的新方向之一。植物油因无毒、可生物降解和经济性优势受到广泛关注,相关研究为反应萃取技术的绿色化转型提供了新思路。Erdas 等^[14]比较了 8 种植物油作为三正辛胺稀释剂的性能,发现红花油的萃取效率略低于传统稀释剂 1-辛醇,但显著优于其他植物油,表现出良好的应用潜力。Kanbur 等^[15]进一步研究了不同植物油作为稀释剂对乳酸提取过程的影响,在三正辛胺-米糠油体系中获得最优分配系数,但同时也发现负载因子随三正辛胺浓度增加而降低的现象,这为工艺优化提供了重要依据。此外,尽管植物油在环境友好性方面具有明显优势,但萃取效率与传统溶剂仍存在差距,这需要通过进一步的设计优化及工艺参数调整等途径加以改进,以实现工业化应用的突破。

2.3 与吸附技术联用

萃取技术与吸附技术相结合可显著提升乳酸回收效率。Zhou 等^[16]利用离子液体(ILs)对吸附材料进行改性,实现了将离子液体萃取与树脂吸附联用,即通过将弱碱性阴离子交换树脂 335 浸泡于 1-丁基-3-甲基-咪唑-六氟磷酸盐的离子液体中,制备成一种新型复合树脂 IL-335。结果显示,改性后的 IL-335 树脂最大吸附容量达到 605 mg/g,较未处理树脂提升 52.97%。更重要的是,该材料表现出优异的循环使用性能,至少可重复使用 6 次而保持稳

定吸附能力,显示出良好的工业应用前景。

传统有机溶剂多具有毒性且对环境存在危害,因此开发低毒性、可生物降解的萃取剂一直是研究热点,安全无毒、绿色环保的植物油在此背景下受到广泛关注。未来需进一步推动萃取技术与其他工艺联用,设计萃取与树脂吸附、膜分离、蒸馏等技术的集成工艺。目前已有研究将膜萃取技术应用于有机酸的回收,可尝试将其拓展至乳酸提取过程,以促进集成系统在乳酸分离领域的实际应用。

3 膜分离法

3.1 膜过滤

膜过滤技术是利用膜对不同物质的选择透过性,在膜两侧给予一定推动力,使发酵液中不同成分分离,从而提纯乳酸。在工业中,一些传统的分离技术已经被膜技术所取代。在海水淡化中,多数工厂的生产工艺已从热法转向膜法。膜分离技术在纯化乳酸方面也有着非常广阔的应用前景,与其他技术相比,膜分离技术有较低的化学消耗、产品污染和能耗,是一种经济和环保的方法。采用膜过滤技术纯化乳酸主要包括微滤、超滤及纳滤。

微滤和超滤是一种基于筛分效应的膜分离技术,可去除一些大分子(如蛋白质、细菌等),同时允许小分子(如水、无机盐)透过。纳滤是一种结合筛分与电荷效应的精密分离技术,可截留 200~1 000 Da 的小分子(如糖、2 价离子)。常用的卷式膜分离过程如图 2 所示。Guo 等^[17]使用 50 kDa 的聚醚砜膜 PES-50 对预微滤后的餐厨垃圾发酵液进行了超滤,实现 93.6% 的乳酸回收率,色度、浊度、蛋白质和总糖去除率分别为 54.3%、89.8%、71.7% 和 58.5%。郭佩等^[18]采用 DK1812 型纳滤膜对秸秆发酵液中的糖和乳酸进行了三级纳滤分离,在 pH 为 2、压力为 2 MPa、温度为 25℃ 的条件下,乳酸的含量可达到 99.7%。

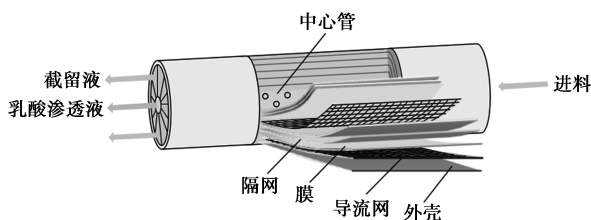


图 2 卷式膜分离乳酸示意图

单一膜技术应用中,超滤截留精度有限,难以去除小分子污染物,纳滤虽能有效分离小分子杂质,但纳滤膜易受大分子杂质污染,因此,通常将超滤与纳

滤联用,构成多级纯化系统。王博轩^[19]采用微滤、超滤、纳滤对发酵液进行纯化,微滤可以去除 98% 的菌体,US020 超滤膜可以去除 87.78% 的蛋白质,与聚醚砜材质的膜相比,聚砜材质的超滤膜在性能和耐用性方面更佳,NF270 纳滤膜具有很好的脱色除盐效果。

膜过滤法具有高效、节能、环保等优势,能够对成分复杂的溶液实现高效分离,具有广阔的应用前景。然而,当前膜污染的问题仍有待解决。未来可围绕膜材料的创新性研发开展研究,开发具有高选择性与抗污染性的膜材料,以延长膜的使用寿命,在降低成本的同时保持甚至提高分离效率。

3.2 电渗析

电渗析法通过阳离子交换膜与阴离子交换膜对离子的选择透过特性,在直流电场驱动下,促使溶液中的离子发生定向迁移,进而实现物质的分离与提纯。双极膜电渗析的核心机制在于双极膜在电场作用下将水分子解离产生 H^+ 和 OH^- ,结合阴阳离子交换膜完成盐类到酸和碱的转化^[20]。Wang 等^[21]研究了双极膜电渗析结合单价选择性阴离子交换膜纯化乳酸,并比较了两室和三室结构的纯化效果,单价选择膜的使用显著提高了乳酸产品纯度,与两室结构相比,三室结构能耗更低,2 种结构均可产生纯度高于 95% 的乳酸。Papadopoulou 等^[22]将微滤、纳滤、单极和双极电渗析 4 种膜分离技术联用处理发酵液,设计了 2 种纯化工艺,并优化了 pH,对比纳滤、双极电渗析组合工艺和单极、双极电渗析组合工艺,后者虽能耗较高,但乳酸回收率也更高,因此推荐采用单极、双极电渗析组合工艺。若采用纳滤法,则需对不同性能的纳滤膜开展筛选实验。

电渗析的应用主要受到膜污染、高能耗及高设备维护成本的限制,仍需开展深入研究以探索解决方案,此外,由于操作过程中存在水的渗透作用,导致所得产品的最高浓度受到限制,若需进一步提升产品纯度,需与蒸馏等工艺相结合。

4 吸附法

4.1 活性炭

活性炭吸附法因优异的吸附性能和经济效益,在乳酸纯化过程中展现出重要应用价值。作为一种多孔材料,活性炭具有高比表面积和丰富的官能团,能够有效吸附发酵液中的色素、蛋白质等杂质^[23]。粉末活性炭具有过滤速度快、吸附效果好、脱色能力强的特点,且来源广泛,成本低廉,适用于低 pH 条

件下的乳酸吸附,同时无需使用强酸或强碱进行再生处理^[24]。

研究者在工艺优化方面取得了一定的进展, Taniguchi 等^[24]将活性炭直接加入发酵体系,实现了乳酸的原位吸附,使葡萄糖转化率提升至 88.0%。该方法通过生物乙醇解吸,乳酸提取率接近 100%,且活性炭可重复使用,展现出良好的工业化潜力。欧阳佳琪等^[23]采用多级纯化策略,先在 80℃ 下用活性炭(0.02 g/mL)处理 4 h 去除杂质,再结合离子交换树脂(150 r/min, 4 h)进行深度纯化,最终获得纯度达 97.25%的乳酸产品。活性炭吸附法在乳酸纯化中具有操作简便、成本低廉和环境友好等特点,因此适合作为初步处理发酵液。

4.2 离子交换树脂

离子交换树脂是分离乳酸的常用吸附剂,通过电荷相互作用实现目标物质的分离。根据骨架类型,可分为大孔型和凝胶型树脂;而根据树脂所连接的离子基团,则可分为强酸性、弱酸性阳离子交换树脂及强碱性、弱碱性阴离子交换树脂。采用离子交换树脂分离乳酸过程如图 3 所示。此方法有操作简单、成本低、产量高、选择性高、污染小的优势。

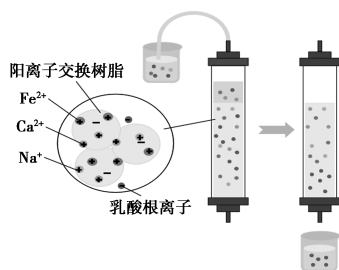


图 3 离子交换树脂纯化乳酸示意图

Pradhan 等^[25]的研究表明,弱碱性阴离子交换树脂在 pH 低于乳酸的 pKa(3.86)时能够有效吸附乳酸,而强碱性阴离子交换树脂在 pH 高于该 pKa 时吸附效果更优,因此更适用于从发酵液中原位分离乳酸。随后 Ahmad 等^[26]的研究得到了一致结果,在初始 pH 为 3 时,弱碱性阴离子交换树脂 Amberlite IRA-67 对乳酸的吸附效率最高,阴离子交换树脂对乳酸的吸附能力取决于乳酸与树脂官能团之间的强相互作用,随后进一步使用强酸性阳离子交换树脂 Amberlite IR-120 对乳酸纯化,在最优化条件下得到了 94.6% 的光学纯度和 91% 的收率。Oliveira 等^[27]经过筛选采用同样的树脂对甘蔗汁发酵液中的乳酸进行分离,并比较了树脂在填充柱和搅拌罐中的纯化效果。结果表明,在机械搅拌罐中的纯化效果较好,乳酸的回收率达到了 95%。舒

怡^[28]设计了一种连续离子交换系统,采用强酸阳离子树脂 AMBERLITE™ FPC23UPS H 及弱碱阴离子树脂 AMBERLITE™ FPA55 对乳酸进行纯化,与传统间歇式固定床相比,连续离子交换系统可显著降低酸、碱及水的消耗量,为其在乳酸纯化领域的应用提供了数据参考。

Rahimi 等^[29]制作了一种锆金属有机框架微珠 Zr-UiO-66 纯化乳酸,UiO-66 是一种锆基金属有机框架,具有热稳定性和化学稳定性高、比表面积大、孔径可调的特点,Zr-UiO-66 能够在各种 pH 条件下保持结构完整性,并且可以通过设计引入特定的官能团,以提高对乳酸的选择性和吸附能力,其高孔隙率和可定制表面化学成分组成的特性有助于乳酸的高效分离纯化,在 pH 为 6.5、温度为 298 K、初始乳酸浓度为 15 mg/L、吸附剂用量为 0.625 g、加工时间 4 h 条件下,乳酸回收率高达 98.8%,经过 7 次吸附解吸循环后,吸附效率仍保持在 90% 以上。这种方法为乳酸纯化用吸附剂的材料创新提供了新思路。

5 总结和展望

随着乳酸在各个行业的广泛应用,对乳酸的需求量呈现出日益增长的趋势。乳酸的分离与纯化工艺已成为限制其生产的重要问题之一,越来越受到人们的重视。本文中综述了近年来乳酸从发酵液中分离与纯化的研究进展。各类工艺均具备独特优势,同时也存在一定的局限性,单一方法难以获得高纯度的乳酸。目前已有研究采用多种方式对乳酸进行纯化,多种工艺耦合集成是一个必然的发展方向,未来的研究方向可能集中在优化设备结构,探索更多新型萃取剂、膜材料及吸附剂,推动自动化、连续化、智能化系统的设计,开发出低成本、低能耗、高效率、可持续发展的新技术。

参考文献

- [1] Huang S, Xue Y, Yu B, et al. A review of the recent developments in the bioproduction of polylactic acid and its precursors optically pure lactic acids[J]. *Molecules*, 2021, 26(21): 6446.
- [2] 李鑫榕, 梁诗滢, 胥菲菲, 等. 新型生物可降解材料聚乳酸的研究进展[J]. *广州化工*, 2024, 52(22): 10-12.
- [3] 王诗桥, 隋建才, 邢涛, 等. 乳酸合成技术研究进展[J]. *山东化工*, 2024, 53(21): 113-115.
- [4] 崔洋, 顾永华, 王新, 等. 分子蒸馏纯化乳酸的真空系统和工艺优化[J]. *河南科学*, 2022, 40(6): 886-891.
- [5] 吉峰久业生物科技(天津)有限公司. L-乳酸成品 100% 含量的工业大生产提取工艺: CN 115322088A[P]. 2022-11-11.

- [6] 欧尚元(天津)有限公司.一种粗L-乳酸的精制纯化方法及其纯化装置:CN 114605254A[P].2022-06-10.
- [7] 窦欣宇.隔壁塔双向反应精馏耦合提纯乳酸工艺研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [8] 窦欣宇,刘沙,姚洪,等.反应精馏隔壁塔提纯乳酸工艺研究[J].现代化工,2024,44(3):225-229.
- [9] 姚洪.催化精馏酯化-水解提纯乳酸工艺研究[D].天津:天津科技大学,2023.
- [10] Alao A I, Afolabi T J, Agarry S E. Extraction of lactic acid from fermentation broth using long-chain alkanones[J]. Journal of Chemical & Engineering Data, 2023, 68(3): 642-653.
- [11] Gugel I, Marchetti F, Costa S, et al. Efficient downstream processing of second-generation lactic acid from lignocellulosic waste using aqueous two-phase extraction[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2025, 12(1): 20.
- [12] Baral P, Pundir A, Kurmi A, et al. Salting-out assisted solvent extraction of L(+) lactic acid obtained after fermentation of sugarcane bagasse hydrolysate[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 269: 118788.
- [13] Pau S, Oliva A, Tan L C, et al. Recovery of organic acids from lactic acid-enriched fermentation broth via salting-out assisted solvent extraction[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2024, 187: 376-384.
- [14] Erdas A, Marti M E. Eco-friendly approach for the recovery of lactic acid by complex extraction[J]. ACS Omega, 2024, 9(15): 16959-16968.
- [15] Kanbur M, Yetisen M, Uslu H. Unlocking potential: Vegetable oil effects on lactic acid extraction[J]. Chemical Engineering & Technology, 2025, 48(5): e70007.
- [16] Zhou X, Huang L, He W, et al. Extractive adsorption of lactic acid from fermentation broth on a novel ion exchange resin impregnated by the [Bmim]PF₆ ionic liquid[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2023, 11(45): 16063-16073.
- [17] Guo Y, Li C, Zhao H, et al. The performance of ultrafiltration process to further refine lactic acid from the pre-microfiltered broth of kitchen waste fermentation[J]. Membranes, 2023, 13(3): 330.
- [18] 郭佩,赵黎明,刘鲁杰,等.利用纳滤膜技术分离秸秆发酵液中糖和乳酸的研究[J].膜科学与技术,2023,43(3):104-115.
- [19] 王博轩.发酵液中L-乳酸的分离与纯化[D].北京:北京化工大学,2019.
- [20] 何飞宇,封玲,朱铭,等.电渗析选择性分离与回收工业废水有价物质研究进展[J].工业水处理,2025,45(9):10-18.
- [21] Wang Q, Chen G Q, Lin L, et al. Purification of organic acids using electrodialysis with bipolar membranes (EDBM) combined with monovalent anion selective membranes[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 279: 119739.
- [22] Papadopoulou E, González M C, Reif D, et al. Separation of lactic acid from fermented residual resources using membrane technology[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 110881.
- [23] 欧阳佳琪,张璐,董同力嘎,等.基于活性炭吸附与离子交换树脂法的玉米发酵液乳酸纯化工艺优化研究[J].包装工程,2025,46(11):11-20.
- [24] Taniguchi S, Onishi T, Ishida N, et al. Waste-reducing and energy-saving lactic acid production using activated carbon[J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2025, 23: 100790.
- [25] Pradhan N, Rene E R, Lens P N L, et al. Adsorption behaviour of lactic acid on granular activated carbon and anionic resins; thermodynamics, isotherms and kinetic studies[J]. Energies, 2017, 10(5): 665.
- [26] Ahmad A, Othman I, Taher Hanifa, et al. Lactic acid recovery from date pulp waste fermentation broth by ions exchange resins[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 22: 101438.
- [27] Oliveira P Z D, Vandenberghe L P D S, Soccol C R. Lactic acid production using sugarcane juice as an alternative substrate and purification through ion-exchange resins[J]. Fermentation, 2023, 9(10): 879.
- [28] 舒怡.乳酸纯化连续离交系统及工艺优化研究[J].科学技术创新,2023,(21):1-4.
- [29] Rahimi M S, Esfahanian M. Adsorption and the subsequent desorption of lactic acid molecules on zirconium metal-organic frameworks: An innovative and efficient approach for the recovery of the produced lactic acid from fermentation broth[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2025, 103(8): 3940-3954. ■

(上接第57页)

- [22] Song T W, Zuo L J, Zuo M, et al. Breaking trade-off between particle size and ordering degree of intermetallic catalysts for fuel cells[J]. Journal of Catalysis, 2023, 419: 19-25.
- [23] Liu S, Qi W, Liu J, et al. Modulating electronic structure to improve the solar to hydrogen efficiency of cobalt nitride with lattice doping[J]. ACS Catalysis, 2023, 13(4): 2214-2222.
- [24] Song Y, Wang H, Ren H, et al. Selective etching induced Fe₃O₄ cubes with orderly aligned porous structure for the effective lithium-ion storage and bisphenol A degradation[J]. Separation and Purification Technology, 2024, 334: 126054.
- [25] Kim S I, Lim S, Son M, et al. Highly active and stable bimetallic ordered catalysts for oxygen reduction reaction improvement in polymer exchange membrane fuel cells[J]. Applied Surface Science, 2024, 656: 159620.
- [26] Zhu H, Cai Y, Wang F, et al. Scalable preparation of the chemically ordered Pt-Fe-Au nanocatalysts with high catalytic reactivity and stability for oxygen reduction reactions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(26): 22156-22166.
- [27] Bruna A D, Martins L C, Paulino T M A, et al. Uniform composition of sol-gel synthetic aluminosilicate precursor as a key factor for the production of geopolymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(8): 04023265.
- [28] Zhi H, Dong B, Guo X, et al. Ultra-thin order-disorder CeO₂ nanobelts as the non-carbon support of the PtCu catalyst towards methanol oxidation and oxygen reduction reactions[J]. RSC Sustainability, 2024, 2(11): 3456-3463.
- [29] Li X, Liu Y, Zhang J J, et al. No annealing synthesis of ordered intermetallic PdCu nanocatalysts for boosting formic acid oxidation[J]. Chemistry of Materials, 2022, 34(3): 1385-1391. ■