

文章编号:1674-2869(2026)03-0309-07

山梨醇的应用及其制备方法研究进展

李煜瑶¹, 李康婷¹, 宗苏豫¹, 吴迪¹, 刘巧伦², 王永正^{*2}

1. 南京财经大学食品科学与工程学院, 江苏 南京 210023;

2. 扬州博克莱生物医药科技有限公司, 江苏 扬州 211400

摘要:山梨醇广泛应用于医药、食品及日用品等领域,随着需求增长,其制备技术备受关注。系统综述了化学催化法、电解还原法和生物发酵法3种主流制备工艺。化学催化法仍为工业主流,目前亟待进行连续化工艺改进;电解还原法存在能耗高、转化率低等缺陷,需优化阴极材料以提高转化率;生物发酵法虽能在温和条件下获得高纯度产品,但成本效益低制约其工业化进程。综合分析表明,山梨醇的制备工艺技术升级改造是产品提质降本增效的必由之路,未来应不断拓展其在新兴领域的应用,助力行业可持续发展。

关键词:山梨醇;应用;制备方法;氢化工艺

中图分类号:TQ46

文献标志码:A

DOI: 10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202503007

Research progress on applications and preparation methods of sorbitol

LI Yuyao¹, LI Kangting¹, ZONG Suyu¹, WU Di¹, LIU Qiaolun², WANG Yongzheng^{*2}

1. College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing 210023, China;

2. Yangzhou Bestcatalyst Biomedical Technology Co., Yangzhou 211400, China

Abstract: Sorbitol is widely used in pharmaceuticals, foods, daily chemicals, and other fields. With the growing market of demand, its preparation technologies have attracted increasing research attention. In this study, we systematically reviewed three mainstream preparation processes: chemical catalysis, electrolytic reduction, and biological fermentation. Among them, chemical catalysis remains the dominant industrial method, yet it requires further optimization toward continuous processing. The electrolytic reduction method suffers from high energy consumption and low conversion efficiency, necessitating development of advanced cathode materials to improve conversion rates. The biological fermentation method enables the production of high-purity sorbitol under mild conditions; however, its high cost and low economic efficiency limits industrial scalability. Comprehensive analysis indicated that the upgrading and transformation of sorbitol preparation technologies are essential pathways to enhance product quality, reduce costs, and improve production efficiency. Future efforts should focus on expanding sorbitol applications in emerging fields to promote sustainable development of the industry.

Keywords: sorbitol; application; preparation method; hydrogenation process

山梨醇又名山梨糖醇,为白色吸湿性粉末或晶状粉末、片状或颗粒。其分子式为 $C_6H_{14}O_6$,相对分子质量为182.17,易溶于水,微溶于乙醇乙酸,是一种多元醇类化合物,用途广泛、精细度

高^[1]。山梨醇在自然界中广泛存在,是蔷薇科植物的主要光合产物,工业生产中主要以葡萄糖为原料进行制备。随着全球市场对健康、天然产品需求的增加,山梨醇作为一种易获取、可再生的资

收稿日期:2025-03-12

基金项目:江苏省高等学校大学生创新训练计划项目(202410327041Z);扬州市产业前瞻与关键核心技术项目(YZ2024039)

作者简介:李煜瑶,本科生。Email:2082837045@qq.com

*通信作者:王永正,博士,工程师。Email:bestcatalyst@126.com

引文格式:李煜瑶,李康婷,宗苏豫,等.山梨醇的应用及其制备方法研究进展[J]. 武汉工程大学学报,2026,48(3):309-315.

源,显现出越来越大的研究与应用价值^[2]。据测算,2023 年全球山梨糖醇市场销售额达 170 亿元人民币以上。中国作为全球山梨糖醇最大的市场和主要生产国之一,占有超 30% 的市场份额。这也使得我国以山梨醇及衍生品为主要原料的精细化工产业得以迅猛发展。而如何高效低廉地获取优质山梨醇及衍生品也成为相关企业和科研工作者最关心的问题。近年来,绿色化学工程与过程强化技术的融合,推动了化工生产向本质安全、低能耗和近零排放的范式转型,这也对山梨醇的制备提出了更高要求。本文拟通过综述山梨醇在不同领域中的应用及其制备方法,比较分析 3 类制备方法的优缺点,为高品质山梨醇获取和应用范围拓展提供了一定参考。

1 山梨醇的应用

山梨醇在不同应用领域的用途如表 1 所示。随着山梨醇用途的不断拓展和深化,其需求量激增,市场潜力巨大。从应用领域来看,全球山梨糖醇的消费中,医药和食品行业的消费需求最高,占全球总消费量的一半以上,其次是日用品行业,化工行业及其他领域的占比相对较低。

表 1 山梨醇在不同应用领域的用途
Table 1 Applications of sorbitol in different fields

应用领域	实践应用
医药和食品行业	利胆药,缓泻药,赋性剂,复合维生素等甜味剂,稳定剂,防腐剂,保湿剂等
日用品相关行业	牙膏抗冻剂,烟叶保存剂,补水保湿剂
化工行业	聚合交联剂,电池保护剂,火箭燃料

1.1 医药和食品行业

山梨醇具有多种生理功效,可用于药物生产。其中,结晶山梨醇可以直接压片^[3],用于制备利胆药、缓泻药、复合维生素剂等片状药剂;硬质结晶山梨醇大多用作药片的赋形剂^[4];针剂山梨醇对治疗水肿、青光眼等病症效果卓越,还常用作辅助材料来制备氨基酸输液^[5]。得益于山梨醇自身独特的分子结构,其在人体内的吸收速度比葡萄糖慢,代谢热量也更低。由于胰岛素不参与山梨醇在人体的代谢过程,食用山梨醇几乎不会影响自身血糖水平,符合糖尿病患者控制体重的要求^[6],故其常被作为功能食品原料和甜味剂,来提高糖尿病患者的生活质量和心情指数^[7]。此外,山梨醇的多羟基结构赋予其良好的水合能力,可降低食品水分活度并限制病原体生长,在保持产品品

质的同时延长保质期^[8]。

1.2 日用品相关行业

在牙膏配方中,山梨醇与传统的甘油相比具更好的亲水性和抗冻性,有效提升了牙膏的保湿抗冻品质^[9]。山梨醇还可部分或全部取代甘油,作为烟叶保存剂。通过控制环境湿度,确保烟叶保持良好的干燥状态。香烟中的甘油和乙二醇燃烧后的丙烯醛等有毒产物可能会导致呼吸系统疾病和皮肤病,还会引起肺癌。而山梨醇燃烧后的产物不含毒性,彻底阻断了因燃烧产物毒性带来的健康隐患,有效保护吸烟者的健康^[10]。山梨醇还是一种良好的化妆品添加剂,当被涂抹到皮肤上时,能够有效吸引周围水分子,锁水、补水、保湿。而山梨醇中的羟基大多以单键形式存在,不含双键和三键,化学稳定性较好,故作为保湿剂时几乎不会刺激皮肤,十分温和^[11]。

1.3 化工行业

山梨醇正在成为制备生物基聚氨酯的新原料,可有效减少开采石油对环境造成的破坏。在山梨醇加聚合成聚氨酯的反应中,与异氰酸酯基团反应性较高的 2 个伯羟基会与预聚物中的 $N=C=O$ 基团反应以延长聚合物链。而支链上的 4 个仲羟基的反应性远低于伯羟基,虽然基本不与异氰酸酯基反应,但可充当聚氨酯预聚物的交联剂,在聚合网络中产生更高的交联密度^[12]。这使得用山梨醇制得的聚氨酯比石油基多元酚制备的聚氨酯具有更高的机械强度和热稳定性。在铝电池中,在电解液中加入适量山梨醇可有效延长电池寿命,降低成本,保护环境^[13]。这是因为山梨醇中的羟基可与水分子结合形成氢键网络来降低水活性,有效抑制析氢反应的发生^[14]。此外,山梨醇还可代替石蜡,与一氧化二氮联用作为混合动力火箭发动机的燃料。与石蜡相比,高强度、高密度的山梨醇可有效增加燃料颗粒的直径和坚固程度,使其具有更低的最佳氧化剂-燃料比率和更高的回归率,有效降低了成本^[15]。

1.4 山梨醇衍生品及其应用

山梨醇衍生品是指以山梨醇为原料,通过化学反应或生物转化等方法制备的一系列具有特定结构和功能的化合物。这些衍生品通过引入不同的官能团来获得不同的化学性质和应用特性。常见的山梨醇衍生品有异山梨醇、异山梨酯、山梨醇螯合钙等衍生品。其中,异山梨醇作为一种环保可再生的资源,主要由山梨醇在液体酸催化剂作用下,经两步反应脱去两分子水制备^[16],可用作乳

化剂、抗氧化剂和杀虫剂等。具有手性的异山梨醇,还广泛用于纯对映体药物和保健品的合成。异山梨醇经酯化得到的异山梨酯是一种良好的有机溶剂、添加剂和表面活性剂^[17]。此外,其螯合产物——山梨醇螯合钙是可被农作物高效吸收的有机钙,可直接喷涂到叶片表面,大幅提升农作物对钙的吸收率,有效提高作物产量与品质^[18]。

2 山梨醇制备工艺

山梨醇的制备工艺可以大致分为化学催化法、电解还原法和生物发酵法。化学催化法是效率最高、应用最广泛、成本较为低廉的一种方法,但生产时间相对较长;电解还原法工艺流程较为简便,操作性好,但葡萄糖的转化利用率低且产生副产物占比相对较高;生物发酵法是一种绿色环保的制备方法,得到的山梨醇纯度较高,但对设备的要求高,生产成本也较高,不适合大规模生产。

2.1 化学催化法

目前,工业制备山梨醇普遍采用化学催化法,通常以葡萄糖为原料,其催化加氢制备山梨醇的反应路径如图1所示,常用的催化剂为镍基和钌基催化剂。具体流程为将葡萄糖等原料溶液投入放有催化剂的反应釜或连续化管道等容器中,再用氮气等惰性气体排空空气后输入氢气进行加氢催化,在催化期间要保持一定的温度、压力和pH,反应结束后再加工精制。

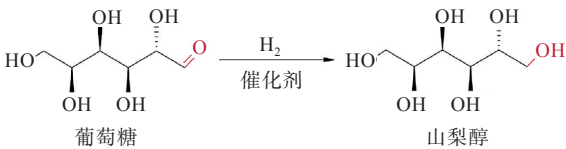


图1 葡萄糖催化加氢制备山梨醇的反应路径^[19]

Fig. 1 Reaction pathway for the preparation of sorbitol by catalytic hydrogenation of glucose^[19]

2.1.1 原材料 化学催化法制备山梨醇通常以葡萄糖、蔗糖、淀粉、纤维素等糖类物质为原料,其中以葡萄糖应用最为广泛。以蔗糖、淀粉和纤维素为原材料生产山梨醇时,通常需通过酶法或酸法将其转化成葡萄糖^[19]。因此,以葡萄糖作为原材料会整体降低工艺复杂度,特别适合高纯度产品生产。但更纯的葡萄糖料液也增加了原料获取难度。以蔗糖作为原料来源成本也较低,但转化率只有约70%^[20]。以淀粉制备山梨醇的步骤虽然繁琐,但产品的凝固点低,既避免了山梨醇结晶和防冻,还提高了收率^[21]。以纤维素为原料制备山梨醇的复杂度更高,往往需要用到独特的催化方法

(如水热液化法等),并采用均相生物催化剂(纤维素酶)和非均相化学催化剂进行复合催化等^[22]。有研究以废弃木薯渣为原料,水解加氢制备山梨醇^[23],具有原料易得,廉价且绿色环保的优势。

2.1.2 催化剂 在山梨醇生产中最常使用镍基催化剂(如雷尼镍),其兼具催化活性良好、成本低、沉降性好等特点^[24]。但镍易失活,还会浸出到反应液中形成螯合物,后续需净化提取^[25]。而失活过快需要频繁更换催化剂,也增加了操作难度和安全风险。钨改性雷尼镍催化剂具有比普通雷尼镍更高的比表面积^[26]。活性增强使得氢化反应的时间有效缩短,选择性提高,反应损失减少。其他活性金属(包括钴、铂、钨、铑和钌)也可用作催化剂。研究者发现铂、钨催化剂具有高活性和选择性,但成本较高,适合制备高值产品;铜催化剂成本低且环保,但活性和选择性较低;钌基催化剂具有高活性、高载量和少失活的优势,可有效替代镍基催化剂^[27]。Lazaridis等^[28]合成了质量分数为3% Ru/C用于D-葡萄糖加氢反应,在1.6 MPa、180℃、反应时间为3 h和1.0:2.3的催化剂/试剂比下,山梨醇产率为89%。但用炭作为载体时,经历高温、长时间反应时,催化剂失活严重,过高的钌负载量也大大提升了生产成本^[29]。研究者尝试选择其他载体,如多孔的沸石材料^[30],最具代表性的材料为高二氧化硅含量、可高效分散活性金属的ZSM-5。Guo等^[31]考察了质量分数为5.2% Ru/ZSM-5作为催化剂的催化效果,在4 MPa、120℃、反应时间为2 h和1.00:6.25的比例条件下,实现了99.6%的转化率和99.2%的产率。所制催化剂在连续套用5次后,仍具有良好的催化性能。也有研究者认为使用Ru/ZSM-5催化剂制备山梨醇会存在诸如甘露醇、5-羟甲基糠醛^[32]和乙酰丙酸等副产物,需要利用Box-Behnken设计优化工艺条件,提升催化效率^[29]。

2.1.3 工艺路线 化学催化法根据工艺设备和细节又可分为间歇法、半连续法和连续法。具体有釜式间歇工艺、外循环间歇半连续工艺、匈牙利管式连续工艺等^[33](见表2)。

釜式间歇工艺比较传统,是将葡萄糖水溶液送入氢化反应釜中并加入活化的催化剂,在pH 6~7、120~150℃、3~10 MPa压力下加氢,将获得的产物打入沉降罐,分离催化剂,再经离子交换和脱色处理得到液体山梨醇。该工艺简单成熟,设备投资少,操作控制可靠,但气体置换频繁,催化剂消耗高。研究者通过实验设计和响应面法优化其反

表 2 山梨醇制备工艺类型及其优缺点

Table 2 Types of sorbitol preparation processes and their advantages and disadvantages					
方法类型	氢化工艺	催化剂类型	优点		缺点
间歇法	釜式	镍基	工艺简单成熟,设备投资少,操作可靠		生产规模小,催化剂消耗高,产品质量低
半连续法	外循环间歇式	钨基	反应温和,产品质量好,催化剂消耗低		工艺成本高,糖液要求高,气体消耗多
连续法	管式	改性雷尼镍	自动化控制,产品质量高,反应条件温和		专用催化剂,开停车复杂,设备依赖进口

应条件^[34],也利用微反应器提高反应效率^[35]。外循环间歇半连续工艺是改进工艺,是将葡萄糖溶液经阴阳离子交换树脂处理后送入外循环高压釜,常使用钨催化剂,氮气置换后通氢气,在 120 ℃、3.0 MPa 条件下进行加氢反应,反应结束后收集山梨醇过程与釜式类似,但不需要进行脱色处理。与釜式间歇式工艺相比,该工艺反应釜容积大,单机生产能力强且钨催化剂失活后可再生。由于糖、醇精制系统完整,山梨醇质量也更好。但该工艺成本相对较高,对糖液质量要求也较高。连续法是目前山梨醇工业生产中较为常用的工艺。管式连续加氢工艺是将配制的质量分数为 50%~55% 葡萄糖溶液于储罐中,用多元改性雷尼镍作催化剂,在 pH 7~8、130~155 ℃、14~17 MPa 下利用高压泵将物料打入管式氢化反应系统中。反应完分离纯化山梨醇的步骤与釜式大致一致。与另外 2 种工艺相比,该工艺相较于上述两种方法来说反应温和,获得的山梨醇质量高,且自动化程度及安全可靠性高,适合大规模生产。但该工艺对催化剂的活性和强度要求较高,开停车过程较为复杂,故生产成本和操作难度较高。此外,还可能存在备品备件国产化的问题。

三种工艺在原料、催化剂和核心反应上均相同,但在操作方式、生产规模、催化剂类型和消耗、反应条件、产品质量、设备投资、气体消耗以及开停车等方面存在显著差异,需根据具体的生产需求和条件进行选择。此外,随着国家对于氢化等高危工艺的安全生产要求不断提升,连续氢化工艺未来有望占据更高的工艺比重。

2.2 电解还原法

电解还原法制备山梨醇,通常以葡萄糖或果糖为原料,在阴极侧发生还原反应得到山梨醇。电化学还原的装置如图 2 所示,由正极、负极和隔膜等部分组成。正极通常为石墨,负极通常为镍、汞等。李娟等^[19]对前期利用电解还原法制备山梨醇进行了综述,认为在电解还原过程中,电解 pH 值、阴极和隔膜材料、电解时间、电流密度以及原材料不同等多种因素均会影响葡萄糖或果糖的转化率。早期研究多使用汞或镍作为阴极,汞具有

高选择性(>90%),但存在重金属污染风险;镍可通过表面氧化层促进电子传递,但钝化会导致活性下降,因此对电极改性十分必要。Creus 等^[36]以铜丝为阴极,在弱碱性介质中,将电流控制在 20 mA 反应 10 h,果糖还原成山梨醇和甘露醇的转化率达 77%,异构化副反应大幅减少。首次实现了非贵金属阴极的果糖电催化,为山梨糖醇制备开辟了一条新颖的绿色途径。Ginoux 等^[37]使用改性镍电极在氢氧化钾溶液中以葡萄糖为反应物进行实验,发现将单金属/双金属颗粒引入镍电极会增强反应性能。但在高电位下会发生碳碳单键的断裂,产生副产物。Owobi-Andely 等^[38]研究开发的膜反应器可同时分离氧化与还原产物,减少副产物的形成,效率和产量更高。杨鹰等^[39]应用微通道反应器成功合成葡萄糖酸锌和山梨醇,反应时长仅需 2 h,山梨醇的收率达到 80%。师改琴等^[40]以石墨为阳极,金属镍为阴极,得到了山梨醇、草酸和甘露醇 3 种产物,提高了反应的附加值。该团队还通过将镍和其他金属阴极比较证明了金属镍为阴极的葡萄糖转化率显著高于铅和铂。

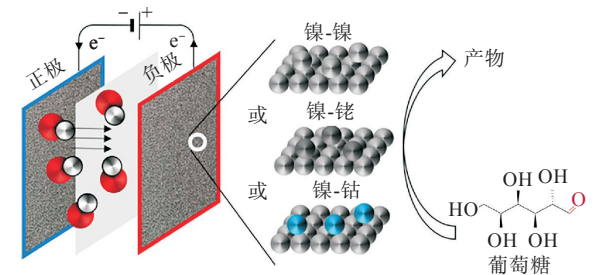


图 2 新型修饰镍电极上葡萄糖电化学转化为山梨醇^[34]
Fig. 2 Electrochemical conversion of glucose to sorbitol on a novel modified nickel electrode^[34]

相较于传统的催化加氢法,电解还原法的工艺流程较为简便,操作更可控,安全性更高,生产过程中废料排放更少,对环境的污染更小等。但电解还原法耗能更大,规模化生产难度高,葡萄糖的转化率比传统催化加氢法低,虽然改善阴极催化剂材料可获得较高的转化率,但对葡萄糖酸和山梨醇的选择性和法拉第效率仍相对较低。

3 总结和展望

虽然近些年来针对山梨醇的制备工艺及产物分离纯化的研究已有较大进展,但研究和探索的深度和广度十分有限,大多数的研究还停留在实验室规模,且山梨醇产品的纯化工艺不甚理想。催化加氢法是目前主流工业化生产方法,对催化剂的改进也做了持续的研究,但寿命长、低成本的催化剂开发仍任重道远;以生物质为原料制备山梨醇的新路线值得进一步的研究和探索,该路线的成功实现有助于可再生资源的绿色合成,减少环境污染。上述新工艺、新技术和新路线的研究将有效支撑精细化工高质量发展,带来巨大的社会和环保效益。

参考文献

- [1] 李明阳,黄强,李新杰,等. 固体山梨醇抗结块研究进展[J]. 中国食品添加剂,2025,36(1):177-183.
- [2] 向良玉,田保亮,唐国旗,等. 山梨醇的市场前景及其应用研究进展[J]. 合成树脂及塑料,2020,37(6): 64-68.
- [3] JUVONEN H, ANTIKAINEN O, LEMMENS M, et al. The effect of relative humidity and formulation variables on chewable xylitol-sorbitol tablets [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 601: 120573.
- [4] SAITO J, NADATANI N, SETOBUCHI M, et al. Potentially harmful excipients in neonatal medications: a multicenter nationwide observational study in Japan [J]. Journal of Pharmaceutical Health Care and Sciences, 2021, 7(1): 23.
- [5] WATANABE T, YOSHIKAWA T, TANAKA H, et al. Pharmacokinetic study of ^{14}C -radiolabeled p-boronophenylalanine (BPA) in sorbitol solution and the treatment outcome of BPA-based boron neutron capture therapy on a tumor-bearing mouse model [J]. European Journal of Drug Metabolism and Pharmacokinetics, 2023, 48(4): 443-453.
- [6] SUPENO M, PRATAMA A. The role of atom shadow on sorbitol molecules to heal diabetic diseases [J]. Oriental Journal of Chemistry, 2021, 37(6): 1366-1370.
- [7] SHANTHAMMA S, PRIYANKA S, PRIYANGA S, et al. Production of low glycemic index chocolates with natural sugar substitutes [J]. Journal of Culinary Science & Technology, 2023, 21(4): 620-645.
- [8] 陈娟,李颖,朱永军,等. 山梨醇的性质及其在食品中的应用研究进展[J]. 粮食与油脂,2018,31(8): 7-9.
- [9] 傅冬梅,王军. 我国山梨醇的生产工艺及特点[J]. 牙膏工业,2000,10(1):17-18.
- [10] SIMMS L, CLARKE A, PASCHKE T, et al. Assessment of priority tobacco additives per the requirements of the EU Tobacco Products Directive (2014/40/EU): part 1: background, approach, and summary of findings [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2019, 104: 84-97.
- [11] CHERIAN P, BERGFELD W F, BELSITO D V, et al. Safety assessment of mannitol, sorbitol, and xylitol as used in cosmetics [J]. International Journal of Toxicology, 2025, 44(1_suppl): 22S-43S.
- [12] XIANG J C, YANG S S, ZHANG J, et al. The preparation of sorbitol and its application in polyurethane: a review [J]. Polymer Bulletin, 2022, 79(4): 2667-2684.
- [13] 孙琼,杜海会,孙田将,等. 基于山梨醇添加剂电解质的可逆锌电化学[J]. 电化学(中英文), 2024, 30(7): 28-37.
- [14] LI L L, ZHU Y W, XIONG L P, et al. Influence of sorbitol as a green and inexpensive corrosion inhibitor for Al-air batteries: an experimental and theoretical study [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 152793.
- [15] DUMAS B, JOBIN O, KAPROLAT W, et al. Ignition delay and performance of sorbitol based hypergolic hybrid fuels [J]. Fuel, 2023, 349: 128417.
- [16] KIM G B, SEO J I, GYE M C, et al. Isosorbide, a versatile green chemical: elucidating its ADME properties for safe use [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 272: 116051.
- [17] CAITI M, TARANTINO G, HAMMOND C. Developing a continuous process for isosorbide production from renewable sources [J]. ChemCatChem, 2020, 12(24): 6393-6400.
- [18] LI T S, WEI Q Q, CUI Y Z, et al. Foliar application of organic sorbitol-chelated calcium promotes peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and changes phyllosphere bacterial community structure [J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 2024, 24(1): 561-571.
- [19] 李娟,曾诚,刘林,等. 山梨醇的制备工艺研究进展[J]. 精细与专用化学品,2013,21(2):33-36.
- [20] 周日尤,伍玉碧. 山梨醇的生产、应用与开发[J]. 牙膏工业,2000(3):32-35.
- [21] 徐三魁,王向宇,李利民. 山梨醇的生产技术研究开发进展[J]. 化工中间体,2007(12):21-24.
- [22] 张军,武书彬,李肇,等. 木质纤维素转化制备山梨醇的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报,2012,3(5):383-386.

[23] 李增勇. 生物质基糖类化合物高值化转化制备山梨醇的研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[24] CERINO P J, FLECHE G, GALLEZOT P, et al. Activity and stability of promoted raney-nickel catalysts in glucose hydrogenation [M]// Heterogeneous Catalysis and Fine Chemicals II, Proceedings of the 2nd International Symposium. Amsterdam: Elsevier, 1991: 231-236.

[25] CREZEE E, HOFFER B W, BERGER R J, et al. Three-phase hydrogenation of d-glucose over a carbon supported ruthenium catalyst: mass transfer and kinetics [J]. Applied Catalysis A: General, 2003, 251(1): 1-17.

[26] 徐雷金,孔令鸟,刘维,等. Raney-Ni 催化剂制备及在葡萄糖加氢合成山梨醇中的应用[J]. 化工生产与技术,2013,20(6):36-41,52.

[27] ZHANG X G, DURNDELL L J, ISAACS M A, et al. Platinum-catalyzed aqueous-phase hydrogenation of d-glucose to d-sorbitol [J]. ACS Catalysis, 2016, 6(11): 7409-7417.

[28] LAZARIDIS P A, KARAKOULIA S, DELIMITIS A, et al. D-Glucose hydrogenation/hydrogenolysis reactions on noble metal (Ru, Pt)/activated carbon supported catalysts [J]. Catalysis Today, 2015, 257: 281-290.

[29] ATHIKAPHAN P, JAITHAM K, SANEHAHA J, et al. Optimization of Ru/ZSM-5 catalyst for selective d-glucose hydrogenation to sorbitol: a box-behnken design approach [J]. Results in Engineering, 2024, 24: 103541.

[30] 陈丹,刘杰庆,夏品,等. 苯与甲醇分子在 ZSM-11 分子筛中扩散行为的模拟[J]. 武汉工程大学学报, 2022,44(2): 143-147,185.

[31] GUO X C, WANG X C, GUAN J, et al. Selective hydrogenation of D-glucose to D-sorbitol over Ru/ZSM-5 catalysts [J]. Chinese Journal of Catalysis, 2014, 35(5): 733-740.

[32] 许梓欣,高家俊,季凯,等. 氧化铈的制备及其催化葡萄糖制备 5-羟甲基糠醛[J]. 武汉工程大学学报,2022, 44(1):20-24.

[33] 孙然,刘超超,李海亮. 山梨醇的主要应用及生产工艺分析[J]. 中国高新技术企业,2008(9):99-100.

[34] MUSCI J J, CHIOSSO M E, SIRI G J, et al. Hydrogenation of glucose on a carbon-supported Ru catalyst: optimization of the reaction conditions [J]. Advances in Chemical Engineering and Science, 2023, 13(3): 224-240.

[35] HOMMES A, HEERES H J, YUE J. Catalytic transformation of biomass derivatives to value-added chemicals and fuels in continuous flow microreactors [J]. ChemCatChem, 2019, 11(19): 4671-4708.

[36] CREUS J, MIOLA M, PESCARMONA P P. Unravelling and overcoming the challenges in the electrocatalytic reduction of fructose to sorbitol [J]. Green Chemistry, 2023, 25(4): 1658-1671.

[37] GINOUX E, ACOSTA G, COGNET P, et al. Preliminary study of electrochemical conversion of glucose on novel modified nickel electrodes [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2024, 54(9): 2039-2049.

[38] OWOBI-ANDELY Y, FIATY K, LAURENT P, et al. Use of electrocatalytic membrane reactor for synthesis of sorbitol [J]. Catalysis Today, 2000, 56(1/2/3): 173-178.

[39] 杨鹰,周湘林,谭勇棋,等. 应用微通道反应器技术成对电合成葡萄糖酸锌和山梨醇[J]. 大学化学, 2023,38(4):160-168.

[40] 师改琴,李心怡,贺鹏祥,等. 葡萄糖双极电化制备草酸、山梨醇与甘露醇[J]. 化工管理,2021(32): 21-23.

[41] 朱建良,吴振兴. 生物法制备山梨醇的研究进展[J]. 化工时刊,2006,20(5):47-51.

[42] 安克红. 利用菊粉和木薯淀粉生产高浓度山梨醇和葡萄糖酸的生物技术[D]. 上海:华东理工大学, 2013.

[43] 黄志华,王宝光,王海燕,等. 生物法生产山梨醇的研究进展[J]. 三明学院学报,2007,24(4):441-446.

[44] CHUN U H, ROGERS P L. The simultaneous production of sorbitol from fructose and gluconic acid from glucose using an oxidoreductase of *Zymomonas mobilis* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1988, 29(1): 19-24.

[45] REHR B, WILHELM C, SAHM H. Production of sorbitol and gluconic acid by permeabilized cells of *Zymomonas mobilis* [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1991, 35(2): 144-148.

[46] LIU C J, DONG H W, ZHONG J J, et al. Sorbitol production using recombinant *Zymomonas mobilis* strain [J]. Journal of Biotechnology, 2010, 148(2/3): 105-112.

[47] 汪多仁. 一种新型山梨醇生产工艺及其应用的研究[J]. 发酵科技通讯,2021,51(1):45-51.

[48] 孙玥. 体外多酶催化淀粉生产山梨醇途径的构建与优化[D]. 天津:天津商业大学,2021.

[49] 刘登辉,胡闯,赵小斌,等. 一株高产纤维素酶菌株的分离及鉴定[J]. 武汉工程大学学报,2022,44(6): 653-657.

[50] 赵晶基. 浅析生物法生产山梨醇的研究进展[J]. 科技与企业,2015(18):251.