

萃取法磷酸二氢钾副产磷钾肥应用研究

周华波

(云南云天化红磷化工有限公司, 云南 开远 661699)

[摘要] 针对萃取法制备磷酸二氢钾工艺中副产磷钾肥的积压问题, 通过优化工艺参数及开发副产物综合利用技术, 提出以湿磷钾肥调浆生产低养分磷铵产品的解决方案。通过增设调浆工序、优化酸渣比和固含量控制, 成功将副产磷钾肥应用于60%磷酸一铵(MAP)和56%磷酸二铵(DAP)产品的工业化生产。技术改造后, 副产磷钾肥利用率显著提升, 2024年累计使用磷钾肥10 349 t, 新增经济效益712.43万元, 同时降低干燥能耗并改善生产环境。研究表明, 该技术有效解决了副产物资源化难题, 增强了企业市场竞争力, 为磷化工行业可持续发展提供了示范案例。

[关键词] 萃取法; 磷酸二氢钾; 副产磷钾肥; 综合利用; 调浆技术; 磷铵生产; 经济效益

[中图分类号] TQ444

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-4566(2025)08-0065-05

Research on application of potassium phosphorus fertilizer as a by-product of potassium dihydrogen phosphate by extraction method

ZHOU Huabo

(Yunnan Yuntianhua Red Phosphorus Chemical Co., Ltd., Kaiyuan 661699, China)

Abstract: In response to the problem of backlog of by-product phosphorus potassium fertilizers in the extraction method for preparing potassium dihydrogen phosphate, a solution is proposed to produce low nutrient ammonium phosphate products by adjusting wet phosphorus and potassium fertilizer slurry through optimizing process parameters and developing comprehensive utilization technology for by-products. By adding a slurry adjustment process, optimizing the acid slag ratio, and controlling the solid content, the by-product phosphorus potassium fertilizers have been successfully applied to the industrial production of 60% MAP and 56% DAP products. After technological transformation, the utilization rate of by-product phosphorus potassium fertilizers has significantly improved. By 2024, a total of 10 349 tons of phosphorus potassium fertilizers are used, with an additional economic benefit of 7.124 3 million RMB Yuan. At the same time, drying energy consumption is reduced and the production environment is improved. Research has shown that this technology effectively solves the problem of by-product resource utilization, enhances the market competitiveness of enterprises, and provides a demonstration case for the sustainable development of the phosphorus chemical industry.

Key words: extraction method; potassium dihydrogen phosphate; by-product phosphorus potassium fertilizers; comprehensive utilization; mixing technology; production of ammonium phosphate; economic benefits

0 引言

在全球农业现代化加速推进的过程中, 传统肥料面临着巨大挑战。传统单质氮肥、磷肥和钾肥等, 其养分释放与农作物生长周期难以精准匹配, 导致大量养分流失, 利用率低下。据统计, 我国氮肥利用率仅为30%~35%, 磷肥利用率为10%~25%, 钾肥利用率在35%~50%。长期过量使用传统肥料, 会使土壤酸化、板结, 土壤微生物群落失衡, 对土壤质量造成严重影响^[1]。而高效肥料能够根据农作物不同生长阶段的需求精准提供养分, 显

著提高肥料利用率。

磷酸二氢钾作为优质的二元复合肥, 具有不可替代的优势。其磷钾含量高, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 约为52%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 约为34%, 能同时为农作物提供磷和钾两种重要养分。它水溶性良好, 在20℃时每100g水中可溶解22.6g, 能被农作物迅速吸收利用, 吸收率高达80%~90%。无论采用叶面喷施、滴灌还是

[收稿日期] 2025-01-03

[作者简介] 周华波(1981-), 男, 云南永善人, 化工工艺高级工程师, 长期从事磷复肥生产及技术管理等工作。

冲施等施肥方式,都能取得良好效果。磷酸二氢钾适用范围广泛,几乎涵盖所有农作物。在粮食作物如水稻、小麦、玉米等生长过程中,能促进光合作用,增加干物质积累,提高产量和品质;在经济作物如棉花、烟草、茶叶等种植中,有助于提高抗逆性,增强对病虫害的抵抗力,改善农产品外观和内在品质;在花卉、果树等园艺作物栽培中,能促进花芽分化,增加花朵数量和色泽,提高果实甜度和口感^[2]。

萃取法制备磷酸二氢钾工艺凭借独特优势在众多制备工艺中脱颖而出。然而,在生产过程中不可避免会产生磷钾肥副产物,主要成分有 P_2O_5 、 K_2O 以及少量氮元素等。若不能妥善处理和利用,不仅造成资源浪费,还会增加企业环保压力和生产成本。如何实现磷钾肥副产物综合利用,已成为萃取法制备磷酸二氢钾工艺可持续发展的关键问题。

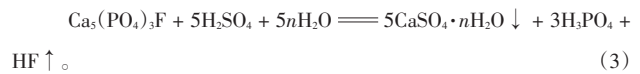
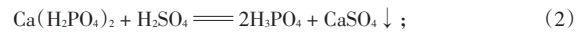
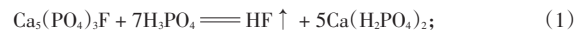
1 云南某公司磷酸二氢钾生产发展历程与面临的问题

云南某公司(以下简称公司)在磷酸二氢钾生产技术研发与创新方面成果显著。公司以湿法磷酸、液氨和氯化钾为原料,采用自主知识产权的萃取法磷酸二氢钾生产工艺生产^[3]。与传统中和法相比,该法能耗低,生产成本可降低15%~20%。通过精准控制萃取条件,能有效去除杂质,制备出纯度高达98%以上的产品。该法反应条件温和,一般在常温常压下进行,减少了对设备的腐蚀,延长了设备使用寿命。公司历经多年技术攻关和实践探索,成功实现从实验室研究到工业化大规模生产。2015年8月建成30 kt/a磷酸二氢钾装置,开启规模化生产新篇章。公司不断优化工艺和操作指标控制体系,提高萃取效率和产品纯度;优化反应条件,缩短反应时间,提高生产效率。经过4年多不懈努力,2020年该装置顺利通过72 h性能考核,产能达到2.2万 t/a,标志着公司在磷酸二氢钾生产技术上达到新高度。随着市场对磷酸二氢钾需求持续增长,2021年公司再建一套40 kt/a磷酸二氢钾装置,产能达到6.2万 t/a,进一步巩固了公司在行业内的领先地位。然而,随着生产规模扩大,副产磷钾肥也大幅度增加。受市场供需关系、价格波动等因素影响,副产磷钾肥出现积压,占用大量资金和仓储空间,影响公司资金周转和盈利能力。从公司可持续发展及长远战略角度出发,探索科学合理的湿磷钾肥综合利用已成为当务之急。

2 萃取法磷酸二氢钾生产工艺

2.1 湿法磷酸生产

湿法磷酸生产原理是利用无机酸(通常为硫酸)分解氟磷灰石($Ca_5(PO_4)_3F$),使磷硫酸与氟磷灰石反应,生成磷酸和硫酸钙沉淀,通过一系列过滤、浓缩等工序得到磷酸,反应方程式如下^[4]:



该反应是一个放热反应,反应过程中,硫酸根离子与磷矿中的钙离子结合生成硫酸钙沉淀,磷酸根离子则进入溶液形成磷酸。反应生成的硫酸钙水合物有3种不同的结晶形态,分别为二水物($n=2$,即 $CaSO_4 \cdot 2H_2O$)、半水物($n=0.5$,即 $CaSO_4 \cdot 0.5H_2O$)和无水物($n=0$,即 $CaSO_4$)。

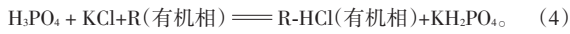
2.2 湿法磷酸净化

湿法磷酸中含有质量分数约3.8%的硫酸根,对后续磷酸二氢钾生产影响较大,需进一步脱除硫杂。公司采用化学沉淀法,利用矿浆脱出磷酸中的硫酸根,矿浆钙离子可与湿法磷酸中的硫酸根离子反应,生成硫酸钙沉淀。由于硫酸钙(如二水硫酸钙, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$)在磷酸溶液中溶解度相对较小,根据沉淀溶解平衡原理,向含硫酸根的磷酸溶液中加入含钙矿浆,可增加溶液中钙离子浓度,促使硫酸根离子与钙离子结合形成硫酸钙沉淀,降低磷酸中硫酸根含量^[5]。

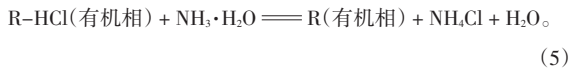
2.3 萃取法生产磷酸二氢钾和副产磷钾肥

萃取法是根据物质在不同溶剂中具有不同的溶解度特性,通过相际传递过程,选择性地使用某种溶剂进行制备的一种方法^[5]。磷酸与氯化钾溶液按物质的量之比为1:(1.1~1.2)进行混合,搅拌转速为200~300 r/min,反应时间为30~60 min,萃取温度控制在25~35℃。在萃取过程中,磷酸与氯化钾(KCl)在有机相(R)的作用下发生反应,生成磷酸二氢钾(KH_2PO_4)和氯化氢(HCl)及有机相的络合物($R-HCl$)^[6]。通过控制反应条件,使磷酸二氢钾进入水相,而氯化氢及有机相的络合物留在有机相,实现两者的分离。反萃过程中,气氨($NH_3 \cdot H_2O$)与有机相中的氯化氢及有机相的络合物反应,使有机相得到再生,同时生成氯化铵(NH_4Cl)和水。再生后的有机相可返回萃取工序循环利用。

萃取过程主要化学反应方程式:



反萃过程主要化学反应方程式为:



磷酸二氢钾生产工艺流程如图1所示。磷酸与氯化钾混合液萃取分相后所得的水相为磷酸二氢钾料液,经压滤机去除其中的固体杂质(磷钾肥),压滤后的滤液进入真空浓缩,通过降低压力,使滤液中的水分蒸发,浓缩后的料液再进入冷却结晶工序,控制冷却速度和结晶温度,使磷酸二氢钾从溶液中结晶析出,经离心机将磷酸二氢钾晶体与母液分离,分离出的晶体采用振动流化床干燥器进行流化干燥,去除晶体表面的水分,得到高纯度的磷酸二氢钾产品。压滤后的滤渣经过干燥制得磷钾肥副产品,萃取分相所得的有机相,采用气氨进行反萃。反萃过程中气氨与有机相中的杂质氯离子发生反应,使有机相得到再生,分相所得的萃取剂返回萃取工序,实现循环使用,反萃后所得的水相为氯化铵溶液,经过真空浓缩、冷却结晶、离心分离等工序,制得氯化铵副产品。

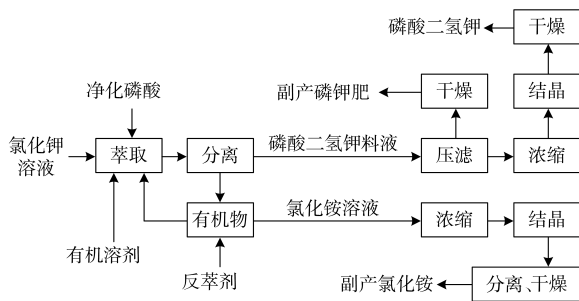


图1 磷酸二氢钾生产工艺流程

Fig. 1 Production process flow of potassium dihydrogen phosphate

3 副产磷钾肥使用技术研究

3.1 磷钾肥主要成分及对植物的作用

在萃取法制备磷酸二氢钾过程中,由于原料

复杂性和反应条件多样性,不可避免产生副产磷钾肥。对其成分深入分析是实现有效利用的前提。经精密检测分析,其主要成分如下: $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 为38%~40%, $w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})$ 为6%~8%, $w(\text{K}_2\text{O})$ 为5%~8%, $w(\text{H}_2\text{O})$ 为6%~10%。其中 P_2O_5 主要以枸溶性形式存在,在弱碱性条件下可逐步转化为水溶性磷被植物吸收利用。 K_2O 主要以水溶性形式存在,能迅速为植物提供钾营养。此外,副产磷钾肥中还含有少量氮元素,虽含量不高,但在植物生长发育中不可或缺。

3.2 试生产粉状58%MAP产品

磷铵生产中,为了控制产品水分,管式反应器内的反应温度一般控制在130~150℃^[7],以利用自身反应热将料浆中大部分水闪蒸掉,从而降低干燥工序的负荷。管式反应器内热量来源主要为磷酸和氨的放热反应,还有一部分为磷酸、液氨、气氨等原料所带入的热量。

未使用磷钾肥生产时,磷铵装置每槽酸可加入洗液10~15m³,装置A、B线负荷约12m³/h,喷粉塔出料正常,成品流动性较好,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 小于2.0%,各项指标均符合生产要求。使用磷钾肥时,因磷钾肥与氨反应热偏低,造成管式反应器内的反应温度降低了10~20℃,产品水分易升高,为控制产品水分,需要提高用酸比重,因此每槽酸可加入洗液量减至5~10m³,生产系统水平衡困难,装置A、B线负荷约10m³/h,相较于未使用时有所下降,喷粉塔出料基本正常,但粉仓积料严重,磨机运行易卡死,影响生产效率和设备维护成本,成品流动性一般,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 平均达到2.23%,较未使用时升高,产品出现结块现象。水分不合格,影响产品质量和市场销售。生产数据对比如下表1所示。

为了能使产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 控制在2.0%以内,需要增加进入喷粉塔的空气温度或者增加进入喷粉塔的空气风量。第一种方法,需要增加低压蒸汽的用量

表1 试生产粉状58%MAP产品

Table 1 Trial production of 58% MAP powder product

生产日期	项目	磷酸质量指标			产品质量指标					
		相对密度	$w(\text{固})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{N})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/\%$	$w(\text{总养分})/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})$
2022年8月1日至16日 (调浆前)	最高	1.640	14.08	43.26	10.00	49.87	43.05	59.71	1.88	0.863 6
	最低	1.632	11.95	42.16	9.60	48.95	41.99	58.71	1.17	0.854 8
	平均	1.636	13.00	42.74	9.77	49.57	42.66	59.33	1.60	0.860 6
2022年8月17日至31日 (调浆后)	最高	1.615	13.07	42.30	9.62	50.36	43.82	59.98	2.76	0.876 5
	最低	1.610	8.83	40.12	9.09	47.72	40.72	57.27	1.58	0.853 3
	平均	1.612	10.81	41.34	9.43	49.14	42.53	58.56	2.23	0.861 7

从而使喷粉塔的空气升到更高的温度,增加了低压蒸汽的用量,这种操作方法意在采用高温小风量的方式降低产品水分,但是因进入喷粉塔的风量偏小,物料水分反而不易带走,不利于干燥;第二种方法,需要调高流化床风机的电机频率,采用低温大风量的方式进行干燥,产品水分较易控制^[8],因此试生产时选择第二种操作方式,但流化床风机正常运行时频率在80%~85%,调整空间并不大,虽然将风机频率提高至100%,但产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 有时仍会超过2.0%,依然需要通过增加进入流化床空

气的温度方式来控制,产品质量控制不稳定。

3.3 试生产粉状60%MAP产品

未使用磷钾肥时,磷铵装置每槽酸可加入洗液15~20 m³,装置A、B线负荷约12 m³/h,喷粉塔出料正常,成品流动性较好,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 小于2.0%。使用磷钾肥时,磷铵装置每槽酸可加入洗液10~15 m³,用酸相对密度低,装置A、B线负荷10~12 m³/h,喷粉塔出料正常,成品流动一般,有轻微积料,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 接近2.0%。生产数据见表2所示。

表2 试生产粉状60%MAP产品

Table 2 Trial production of 60%MAP powder product

生产日期	项目	磷酸质量指标					产品质量指标			
		相对密度	$w(\text{固})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{N})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/\%$	$w(\text{总养分})/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})$
2022年9月1日至16日 (调浆前)	最高	1.646	11.89	44.13	10.50	50.82	44.91	60.93	2.04	0.884 3
	最低	1.612	8.11	42.33	10.02	49.68	43.92	59.95	1.18	0.880 1
	平均	1.630	9.66	43.04	10.19	50.21	44.31	60.41	1.59	0.882 2
2022年9月17日至30日 (调浆后)	最高	1.645	11.50	43.48	10.12	50.90	44.94	60.88	2.36	0.883 8
	最低	1.612	8.07	42.12	9.80	49.93	43.53	59.87	1.28	0.871 3
	平均	1.628	9.47	42.81	9.99	50.37	44.23	60.39	1.79	0.878 1

3.4 试生产粒状黄腐酸56%DAP产品

未使用磷钾肥时,磷铵装置喷浆量在16 m³/h左右,系统加硫酸15~20 kg/t,回收泵机封水2.1~2.6 m³/h,生产系统能够维持水平衡,造粒机出料及粒度正常,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 2.14%。使用磷钾肥时,磷

铵装置喷浆量在16 m³/h左右,系统加硫酸25~30 kg/t,回收泵机封水1.0~1.5 m³/h,生产系统勉强能够维持水平衡,造粒机出料正常,但粒度偏细,料浆相对密度能满足要求,产品 $w(\text{H}_2\text{O})$ 2.23%。生产数据如表3所示。

表3 试生产粒状黄腐酸56%DAP产品情况

Table 3 Trial production of granular humic acid 56% DAP product

生产日期	项目	磷酸质量指标					产品质量指标			
		相对密度	$w(\text{固})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	$w(\text{N})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/\%$	$w(\text{总养分})/\%$	$w(\text{H}_2\text{O})/\%$	$w(\text{P}_2\text{O}_5\text{水溶})/w(\text{P}_2\text{O}_5\text{有效})$
2022年10月1日至15日 (调浆前)	最高	1.681	16.77	43.52	16.28	41.46	35.75	57.46	2.54	0.866 9
	最低	1.632	12.94	41.66	15.86	39.50	34.14	55.51	1.80	0.855 8
	平均	1.664	16.01	42.78	16.04	40.47	34.97	56.51	2.14	0.864 0
2022年10月16日至30日 (调浆后)	最高	1.710	17.26	44.68	16.28	40.54	35.38	56.73	2.46	0.875 1
	最低	1.603	10.04	40.02	16.05	39.86	34.84	55.96	1.96	0.872 3
	平均	1.656	15.45	42.50	16.16	38.96	35.12	56.33	2.23	0.874 1

3.5 试生产结论

选择最难生产、难控制的58%MAP、粉状60%MAP和粒状黄腐酸56%DAP产品进行试生产。用磷酸与湿磷钾肥制成浆试生产58%MAP时,装置负荷低、易积料,水平衡难控制,产品易板结且水分不合格;生产60%MAP产品基本正常,产品质量合格;生产粒状黄腐酸56%DAP产品基本正常,产品

质量合格。经试生产总结论证,用磷酸与湿磷钾肥制成浆生产粉状60%MAP和粒状黄腐酸56%DAP产品是可行的。

4 技术改造

4.1 工艺设计

通过对搅拌技术的研究,在磷酸二氢钾装置压滤工序后增设调浆工序,增设调浆槽、输送泵和供

酸及渣浆管线。用 $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 40%~50%的磷酸与滤饼制成渣浆, $w(\text{固})$ 控制在25%~28%, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 在36%~38%, 用泵将渣浆输送至磷酸渣酸槽, 作为化肥装置生产低养分磷铵产品或复合肥用酸。保留装置原有烘干系统现有设备, 实现湿磷钾肥既可干燥又可制浆, 根据磷钾肥市场情况切换生产。

流程如图2所示。

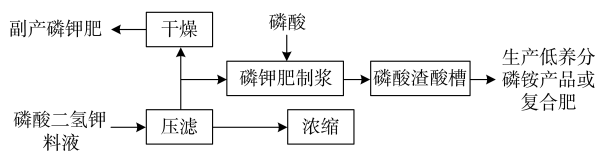


图2 磷酸二氢钾副产磷钾肥的应用工艺流程

Fig. 2 Application process flow of potassium dihydrogen phosphate by-product phosphorus potassium fertilizer

注:细线部分为原流程, 粗线部为技术改造后增加的流程。

4.2 改造内容

(1) 增设1个调浆槽($\phi 3\ 000\ \text{mm} \times 3\ 000\ \text{mm}$ 、材质: 316L)和搅拌桨, 调浆槽安装液位计。(2) 增设1台离心泵($q_v = 60\ \text{m}^3/\text{h}$, $H = 60\ \text{m}$), 频率调节。(3) 新配磷酸管和回浆管(DN125)。

该项目2023年6月立项, 8月开工建设, 10月建成投入使用。

5 经济效益

2024年公司应用磷钾肥调浆技术, 使用10 349 t磷钾肥进行调浆, 用于生产低养分60%MAP、56%DAP产品, 产品质量满足GB/T 10205—2009《磷酸一铵、磷酸二铵》标准要求。通过这一技术应用, 磷钾肥附加值提高了700多万元, 同时优化了工艺, 取消了磷钾肥干燥过程, 降低了能耗, 减少了扬尘, 改善了工厂现场环境。

6 结束语

开展磷钾肥综合利用研究, 将磷钾肥制浆生产低养分磷铵产品, 有效解决了磷酸二氢钾生产过程中副产磷钾肥的出路问题, 增加了经济效益。同时, 根据市场需求调整磷钾肥产量, 有助于稳定市场价格, 提高磷酸二氢钾产品的市场竞争力。未来, 应进一步提高湿法磷酸净化技术, 减少杂质的带入和产生, 拓展其应用领域, 以实现更大的经济效益和环境效益。

[参考文献]

[1] 孔昭友.科学施肥提高农产品品质[J].农业开发与装备, 2022(10):75-76.

[2] 郝海民, 程乐庆, 何部, 等.农作物超常量使用磷酸二氢钾技术探讨与应用[J].农家参谋·种业大观, 2011(2):31.

[3] 刘佳, 陆春宏, 曾波, 等.络合剂对磷酸二氢钾结晶除杂净化的作用[J].云南化工, 2019, 46(4):97-98.

LIU J, LU C H, ZENG B, et al. Effect of complexing agent on impurity removal and purification of potassium dihydrogen phosphate crystallization[J]. Yunnan Chemical Technology, 2019, 46(4):97-98.

[4] 吴佩芝.湿法磷酸[M].北京:化学工业出版社, 1987.

[5] 景绍慧, 李军, 李传义.湿法磷酸净化工艺研究现状及未来展望[J].生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(1):31-37.

JING S H, LI J, LI C Y. Research status and future prospects of WPA purification process [J]. Eco-Industry Science & Phosphorus-Fluorine Engineering, 2025, 40(1):31-37.

[6] 薛河南, 师永林.溶剂萃取法生产磷酸二氢钾技术[J].磷肥与复肥, 2023, 38(2):16-18.

XUE H N, SHI Y L. Production technology of potassium dihydrogen phosphate by solvent extraction [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023, 38(2):16-18.

[7] 化学工业部化肥司, 中国磷肥工业协会. 磷酸磷铵的生产工艺[M].成都:成都科技大学出版社, 1991.

[8] 国家医药管理局上海医药设计院.化工工艺设计手册:上册[M].北京:化学工业出版社, 1986.

(上接第58页)

application of middle and short chain polyhydroxyalkanoates [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(16):39-45.

[68] 陈心宇, 李梦怡, 陈国强. 聚羟基脂肪酸酯PHA代谢工程研究30年[J].生物工程学报, 2021, 37(5):1794-1811.

CHEN X Y, LI M Y, CHEN G Q, et al. Thirty years of metabolic engineering for biosynthesis of polyhydroxyalkanoates [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(5):1794-1811.

[69] 姚建, 苟敏, 汤岳琴.“绿色塑料”聚羟基脂肪酸酯生物合成研究进展[J].应用与环境生物学报, 2021, 27(6):1662-1671.

YAO J, GOU M, TANG Y Q. Research progress on biosynthesis of “green plastics”: polyhydroxyalkanoates [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(6):1662-1671.

[70] 陈国强, 谭丹.重编程微生物底盘用于PHA材料的定制化低成本生物合成[J].合成生物学, 2024, 5(5):1211-1226.

CHEN G Q, TAN D. Reprogramming microbial chassis for low-cost bioproduction of tailor-made polyhydroxyalkanoates [J]. Synthetic Biology Journal, 2024, 5(5):1211-1226.

[71] GU Y L, LI J Z, LI Y, et al. Pseudomonas Cyclic Lipopeptide Medpeptin: Biosynthesis and Modulation of Plant Immunity [J]. Engineering, 2023, 28(9):153-165.