

草酰胺的制备及研究进展

杨翠杰^{1,2,3}, 王庆印^{1*}, 孙俊茹³, 温自强³, 王兵³, 王公应^{1,2}, 李晨⁴

(1. 中国科学院成都有机化学研究所, 四川 成都 610229; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 河北工业职业技术大学环境与化学工程学院, 河北 石家庄 050091;
4. 中国科学院成都有机化学有限公司, 四川 成都 610229)

摘要:综述了草酰胺的合成方法,包括氢氰酸法、热解法、CO偶联DMO氨解法、酯氨交换法及其他合成法,并对草酰胺的研究进展进行了详细阐述。同时,简要介绍了草酰胺在农业、医药、化工领域方面的应用。通过对现有研究分析,指出了当前草酰胺制备方法中存在的问题,并提出CO偶联DMO氨解法最具有工业化潜力。最后,对草酰胺的未来发展进行展望,旨在为相关领域的研究人员提供参考。

关键词:草酰胺;合成方法;发展前景

中图分类号:TQ323.41

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0055-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.010

Preparation and research progress of oxamide

YANG Cui-jie^{1,2,3}, WANG Qing-yin^{1*}, SUN Jun-ru³, WEN Zi-qiang³, WANG Bing³,
WANG Gong-ying^{1,2}, LI Chen⁴

(1.Chengdu Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610229, China;
2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.School of Environment and Chemical
Engineering, Hebei Vocational University of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China;
4.Chengdu Organic Chemistry Co., Ltd., Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610229, China)

Abstract:This paper reviews the synthesis methods of oxamide, including the hydrogen cyanide method, pyrolysis method, CO coupling DMO aminolysis method, ester-ammonia exchange method, and other synthesis methods, and elaborates in detail on the research progress of oxamide. Meanwhile, it briefly introduces the applications of oxamide in the fields of agriculture, medicine, and chemical industry. By analyzing the existing research, the problems in the current preparation methods of oxamide are pointed out, and the CO coupling DMO ammonolysis method is considered to have the most potential for industrialization. Finally, the future development of oxamide is prospected, aiming to provide references for researchers in relevant fields.

Key words:oxamide; synthesis methods; industry development prospects

草酰胺(oxamide),又名乙二酰二胺,由2个酰胺基($-\text{CONH}_2$)通过一个草酰基($-\text{CO}-\text{CO}-$)连接,形成了一个具有 $\pi-\pi$ 共轭的稳定体系。在空气中不吸潮、不结块、无毒、易贮存,微溶于水,不溶于乙醇、乙醚等溶剂,具有一定的生物降解性,可逐渐分解为氨态氮和二氧化碳,对环境友好。因此,草酰胺在农牧业中可作为缓释氮肥,在火箭推进剂中可作为降速剂,在硝化纤维制品中可作为稳定剂,在衬层配方中可作为增链增黏剂,在药物合成中作为中间体、抑制剂、结构修饰剂等。草酰胺在农业、医药、化工和材料等领域具有较广阔的应用前景。为此,研究者们对草酰胺的合成方法开展了一些列探究。目前,开发高效、环保、安全的合成方法已成为研究

热点。本文中对近年来草酰胺的合成方法进行系统性的梳理,比较了各方法的优缺点,归纳总结了草酰胺的研究现状及应用领域,为工业生产提供了理论基础。并且针对目前CO偶联DMO氨解法中不同的工艺现状进行了总结,为促进CO偶联DMO氨解法制备草酰胺的工业化进程提供了资料支撑。

1 草酰胺的合成方法与现状

通过查询现有资料^[1-6],草酰胺的合成方法主要有以下几种。

1.1 氢氰酸法

该路线主要以HCN为原料合成草酰胺,目前分为4种方法,分别为德古萨(Degussa)法、相模法、旭

收稿日期:2025-07-03;修回日期:2026-03-17

基金项目:四川省重点研发项目(2025YFHZ0053)

作者简介:杨翠杰(1987-),女,博士生,研究方向为绿色催化工艺,ycj4453@163.com;王庆印(1978-),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为绿色化工、催化剂制备等,通讯联系人,qingyinwang@cioc.ac.cn。

化成法、赫希斯特(Hoechst)法。前 3 种方法为两步反应,即 HCN 经过催化氧化生成乙腈,乙腈再水解制得草酰胺,反应式如式(1)、(2)。后者为一步反应,即 HCN 直接氧化生成草酰胺,反应式如式(3)。

两步法反应式:

乙腈



草酰胺



一步法反应式:

草酰胺



Degussa 法,第一步以 H_2O_2 为氧化剂, $\text{Cu}(\text{SO}_4)_2$ 和 $\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ 为催化剂, HCN 经氧化催化得到中间体乙腈、水,分离,乙腈的收率为 95%;第二步,乙腈在盐酸和冰醋酸的混合液中发生水解反应,草酰胺收率为 95%。此法中, H_2O_2 为消耗品,还需分离中间体乙腈,且无机酸水解液易腐蚀设备,成本高。相模法,由日本相模中央化学研究所研发而成,以 NO_2 为氧化剂, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 为催化剂,共同作用生成中间体乙腈、 NO 、水,分离,乙腈收率为 97%。第二步,乙腈在酸性溶液中水解得到草酰胺,收率为 98%。此法使用氮氧化物作氧化剂,分离得到的 NO 经氧气氧化生成 NO_2 ,可循环使用,原子利用率高,解决了 H_2O_2 为消耗品的问题,但需增加一个单独的气体回路,操作烦琐。旭化成法,第一步以空气为氧化剂, CuCl 为催化剂,氧化催化生成乙腈,收率为 94%。第二步同相模法,用空气作氧化剂,成本低,但关于草酰胺的收率未有详细报道。Hoechst 法,在常压下,以 CuNO_3 的稀醋酸溶液为催化剂,分子氧为氧化剂,反应温度 $50 \sim 80^\circ\text{C}$,使 HCN 一步氧化成草酰胺,选择性达 99%以上。该工艺先将催化剂溶液装入反应器,然后从底部通入 HCN 和 O_2 ,直接得到产物草酰胺,且沉淀在反应器底部。接着,将生料转入离心机,分离得到液体催化剂,再转回反应器中,可循环使用。最后,将离心得到的草酰胺固体经多次水洗,且洗涤水倒入反应器中,以便保证催化剂溶液全部回收,得到草酰胺纯度为 99.5%。此法解决了两步法中存在需分离中间体、增加 NO 氧化的单独管路、操作烦琐等问题。Hoechst 公司已建成月产 10 t 的中试装置生产草酰胺,但后续未有报道。

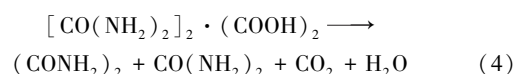
上述方法,虽然用的氧化剂、催化剂和工艺有所不同,其中以 Hoechst 法较先进,但都是以 HCN 为

原料。HCN 毒性较大、易燃易爆、易挥发,对环境的影响较大,且价格较高限制了工业化生产。尽管过去曾有学者提出过从氰化物制备草酰胺的方案,但由于初始成本高以及氰化物水解为草酰胺的工艺效率低下,这些方案并未得到商业化应用。

1.2 热解法

1.2.1 草酸尿素热解法

在温度 185°C , P_2O_5 为催化剂,草酸尿素可分解成草酰胺、尿素、 CO_2 和 H_2O ,草酰胺的收率为 62%。反应式如下:



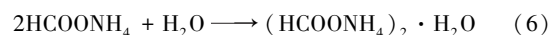
1.2.2 草酸铵热解法

将水合草酸铵加热脱水生成草酸铵,继续在温度 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ 及含磷催化剂存在下脱水得到草酰胺,收率为 30%~60%,较低。卓泽凡等^[7]借鉴传统小氮肥企业采用的合成氨-碳酸氢铵联合生产工艺,将其应用在草酰胺制备工艺上。参照 CO 与 NaOH 制甲酸钠,用 NH_4OH 代替 NaOH ,硫酸作为催化剂,将 CO 与 NH_4OH 在压力 1.8 MPa、温度 180°C 时反应制得甲酸铵。然后,甲酸铵在压力 1.8 MPa、温度 $65 \sim 95^\circ\text{C}$ 时,经双聚制得一水聚甲酸铵,继续脱水、脱氢得草酸二铵。最后,在压力 1.8 MPa、温度 $180 \sim 200^\circ\text{C}$ 时,草酸二铵脱水生成草酰胺。反应式如下。

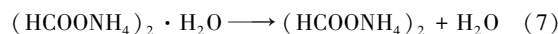
(1) 甲酸钠:



(2) 一水双聚甲酸铵:



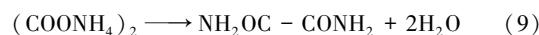
(3) 双聚甲酸铵:



(4) 草酸二铵:



(5) 草酰胺:



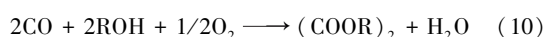
上述方法将草酸铵或草酸尿素热解生成草酰胺,即使借鉴氮肥工艺甲酸钠法生产草酸,依然存在能耗高、污染环境、生产成本高的问题,而且也无法改变小氮肥企业产品结构单一,缺乏竞争力的严峻形势。

1.3 CO 偶联 DMO 氨解法

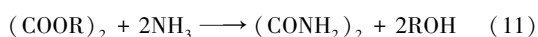
该工艺路线主要分 2 步: CO 、醇及 O_2 合成草酸二酯(DMO),DMO 氨解合成草酰胺(OA)。此反应中关键是 DMO 的合成,该步骤可分为 CO 液相法和

CO气相法。其中,CO液相法制备DMO是1966年美国石油公司在研究铂金属液相催化羰基化反应时发现的。宇部兴产公司在前人研究基础上,针对液相法中存在草酸酯生成速率低、反应压力高、催化剂易流失等问题^[8-9],在反应体系中引入亚硝酸酯的工艺,成功实现了CO和亚硝酸酯气相法生产草酸二酯,从而使该法实现了工业化生产。1978年,日本宇部兴产公司开发成功CO偶联草酸二酯水解制草酸路线后,1981年建成年产600t的草酰胺工厂,为草酰胺生产开发了一种反应条件温和、成本低的工艺方法。反应式如下。

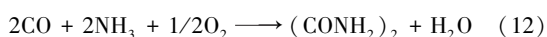
草酸酯:



草酰胺:



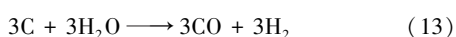
由(10)+(11)式得:



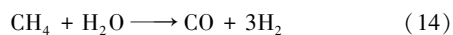
1.3.1 气液合成法

陈贻盾^[10]提出了一种合成草酰胺的连续工艺,将煤(或天然气)经水煤气变换制合成气(CO+H₂),再经变压吸附或深冷分离得到CO和H₂,空气经变压吸附分离得到N₂。然后,N₂和H₂催化合成氨,CO与亚硝酸酯催化合成草酸酯和NO,此时放空气中的NO回收,与O₂、醇类反应生成亚硝酸酯,NO实现循环利用。最后,草酸酯的醇溶液与液态氨或气态氨反应生成草酰胺,反应温度1~100℃,压力0.05~1.0MPa,反应时间1~15h,收率≥98%,纯度达98%。反应式如下:

煤制合成气



天然气制合成气



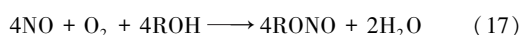
合成氨反应



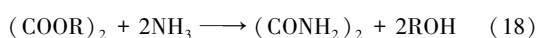
合成草酸酯反应



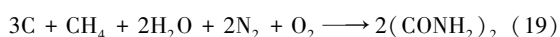
尾气NO回收再生



草酸酯与氨制草酰胺



由式(13)+(14)+(15)+(16)+(17)+(18)得到合成草酰胺的净反应式(19):



此法侧重点全部使用工业原料,来源广泛,工艺连续,具有极大的优越性、实用性,采用气体分离技

术,提取合成氨所需合成气,取代现有氮肥工业中所需的水煤气变换工艺,有效减少了CO₂气体大量的产生和排放,减少高温、高压合成尿素所需设备投资和高能耗,可使现有合成氨和氮肥工业的生产工艺和产品结构得以调整、优化。李扬等^[11]采用黄磷尾气和氨为原料,先将黄磷尾气净化提纯制得CO,CO与亚硝酸烷基酯反应生成DMO,DMO氨解生成草酰胺,产品纯度≥99%。该工艺不仅实现了废气利用,也拓宽了含CO的原料来源,如焦炉煤气、转炉煤气、电石炉尾气等。但上述专利中DMO氨解均采用气液相间歇反应,存在能否实现连续稳定运行的问题。

1.3.2 气相合成法

吴晓金等^[12]介绍了一种连续气相合成草酰胺的方法,将液氨、DMO先气化,气化后的氨气和DMO在流化床反应器内混合并发生反应,生成草酰胺,转化率>99%,产品纯度>98.5%。该发明采用流化床反应器代替原有的间歇式反应釜实现草酰胺的连续生产,但在1.0~1.3MPa的操作压力条件下,DMO气体易冷凝成液体,造成氨解速度减慢,易堵塞除尘器。贾金洁等^[13]通过改善气化后DMO的再分布及优化工艺参数,提升了传质传热效率,降低了DMO液化堵管的问题。张蒙恩等^[14]提供了一种草酰胺用连续生产装置,将产物釜的上部设为氨解反应区、下部为液相区,液相的下料口通过卸料阀与草酰胺过滤装置相连,过滤装置的固相出口与粗品草酰胺储罐相连,实现了固相产物与反应物的连续分离,解决了氨解反应速度快、固相产物易析出阻碍传质传热、堵塞管道的问题,但是氨解反应依然存在反应时间长、能耗高的问题。

1.3.3 液相合成法

王保明等^[15]公开了一种液相法制备草酰胺的方法,采用DMO、甲醇和液氨混合进行氨解反应,并提供氨解产物物流。此工艺条件温和、低温低压、甲醇与氨可以循环利用,节能环保。但是,氨解温度和压力应与液氨温度和压力相匹配,否则液氨进料后会发生气化,反应变为气液两项,而且氨解反应速度较快,放热剧烈,产物草酰胺快速析出,可能会阻碍传热、堵塞设备,影响工艺连续化,若反应温度低,则使原料转化率和产物选择性降低。杨晋平等^[16]公开了一种用于制备连续高效的草酰胺装置和方法,通过优化甲醇配比,使草酰胺甲醇溶液更有利于草酰胺的输送,防止设备堵塞;设置汽包,回收反应放出热量;采用闪蒸工艺,降低设备造价。石磊等^[17]

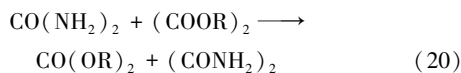
在近室温条件下,以碱性可溶盐水溶液为催化剂,将 DMO、甲醇与催化剂混合均匀后通入反应精馏设备与氨气逆流接触合成草酰胺。碱性催化剂的活性中心具有极强供电子能力,在氨解反应中能够提高反应活化能,加快反应速率,缩短反应时间,提高草酰胺收率。但是,加入催化剂,需要额外设计耐碱的生产设备,由此带来设备和工艺成本的增加。

综上所述,随着合成气制乙二醇技术的发展,由 CO 偶联合成 DMO 的技术已成熟,解决了 DMO 氨解生产草酰胺的原料问题,成本大幅下降,为草酰胺的工业化奠定了基础。目前,西南化工研究设计院有限公司已成功开发工业排放气合成乙二醇技术,同时进行了草酸酯氨化合成草酰胺清洁生产工艺的实验研究。2018 年,通辽金煤化工有限公司建成世界首条年产 1 000 t 煤制草酰胺生产线,采用姚远根的专利技术,该项目填补了草酰胺工业化生产的行业空白。河南省中原大化集团正在建设 1 万 t/a 草酰胺项目、新疆望京龙新材料有限公司拟建 50 万 t/a 草酰胺项目,两者均采用上海戊正工程技术有限公司的合成气制草酰胺技术。因此,开发合成气 CO 经 DMO 氨解路线成为最具发展潜力的方法。

1.4 酯氨交换法

1.4.1 联产草酰胺和 MC

姚元根等^[18]公开了一种酯氨交换法联产草酰胺和氨基甲酸酯(MC)的工艺方法。该方法采用尿素、DMO、甲醇为原料,按比例加入高压反应釜中,通入 N₂ 置换掉釜内的空气并增压至 0.1~2 MPa,在 50~80℃ 温度下搅拌直至原料混合均匀,于 100~150℃ 温度下搅拌反应 5~20 h,收集反应后混合物,采用蒸馏、过滤、冷凝、萃取等工艺进行分离,得到 OA 的单程收率范围在 48%~100%,MC 的收率范围在 60%~100%。具体反应如下:



Shang 等^[19]探究了 ZnO-CaO 复合催化剂对酯氨交换法联产草酰胺和 MC 收率的影响。结果表明,ZnO-CaO 协同作用产生的强碱性位点有助于增强催化剂到反应物的电子转移,促进了 DMO 的氨解过程。通过共沉淀法制备一系列不同 Zn/Ca 摩尔比的催化剂,得出在 Zn/Ca=0.25 时 OA 最佳收率为 97.6%,但由于尿素的分解,MC 的收率为 7.5%。同时,指出尿素和 DMO 合成 OA 路径,如图 1 所示。

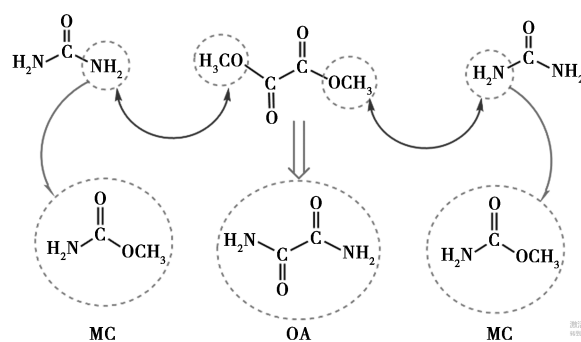
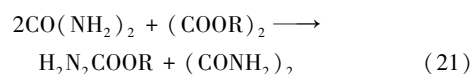


图 1 尿素和 DMO 合成草酰胺的路径

1.4.2 联产草酰胺和 DMC

姚元根等^[20]在上述工艺中引入 Cu 基催化剂,公开了一种酯氨交换法联产草酰胺和碳酸二甲酯(DMC)的工艺方法。该方法采用尿素、DMO、甲醇为原料,按比例加入高压反应釜中,通入 N₂ 置换掉釜内的空气并增压至 1~5 MPa,在 70℃ 下搅拌 1 h,于 150~190℃ 搅拌反应 5~10 h,收集反应后混合物,采用过滤、酸化、蒸馏、过滤、洗涤等工艺进行产物和催化剂的分离,OA 的最高收率 97.9%,同时 DMC 的收率 35%~55%。具体反应如下:

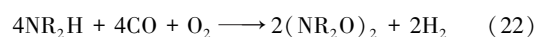


上述方法均用尿素代替 NH₃ 参与反应,使所有反应物均处于液相中,强化了反应物之间的相互接触,有利于反应正向进行。联产得到 OA、MC/DMC,实现了尿素的氨基和 DMO 的甲氧基高效重组,避免 CO 偶联 DMO 氨解法中甲醇的生成及过量氨气的低效流失,提高了反应的原子经济性,而且副产物也是一种高附加值化学品。但是,此法未从微观机理进行深入研究,存在反应时间长、催化剂不稳定、副产物较多、后处理较为困难等问题。

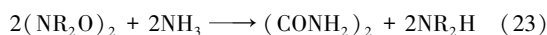
1.5 其他合成法

李跃辉等^[21]以 CO、O₂ 及胺类化合物为原料,将反应溶剂和钨系催化剂加入反应釜中,接着按比例先后通入 CO 及 O₂,反应压力 0.1~5.5 MPa,温度 50~80℃,时间 12 h,通过 CO 与胺的氧化羰化反应制得中间体草酰胺衍生物,单程收率 60%~99%;将草酰胺衍生物、反应溶剂和铜系催化剂按比例加入反应釜中,接着通入 N₂ 置换掉釜中的空气,在反应压力 0.1~3 MPa,温度为 100~160℃,搅拌反应,草酰胺衍生物氨解制得草酰胺,单程收率为 52%~96%,反应式如下。

合成草酰胺衍生物:



草酰胺衍生物氨解:



此法中胺类化合物可循环利用,无其他副产物,联产得到的草酰胺衍生物可以用于医药、农药、合成配体、食品添加剂等领域,但原料来源受限,技术尚不成熟,催化剂寿命有待验证,仅限于实验室研究。

2 草酰胺的应用

2.1 在农业领域应用

草酰胺作为一种含氮量较高的化合物,在潮湿土壤中受微生物作用和自身的水解作用,逐步释放出 NH_3 和 CO_2 ,可作为缓释氮肥应用。早在 20 世纪 70 年代,日本农业技术研究所、日本相模中央研究所就用氢氰酸合成的草酰胺进行水稻和麦类的肥效试验,得出草酰胺氮肥具有以上优点。此外,Hoechst 公司也于同期进行了试验,证明草酰胺在作物的整个生长期能稳定提供适于作物生长的养分,肯定它是一种优良缓效的氮肥。近年来,我国也陆续开展了草酰胺缓释应用效果研究,如李丽等^[22]报道缓释肥对弱筋小麦产量及品质影响,卜东升等^[23]对新疆南疆滴灌棉田进行试验,邓仕俊^[24]在江苏常熟水稻上的应用示范试验等,再次证明草酰胺应用于作物生产综合优势明显,是值得大力应用推广的缓释肥。

2.2 在化工领域应用

草酰胺在化工领域用作合成原料和溶剂,可以合成其他有机化合物,如草酰胺树脂、草酰胺酯等^[25],这些化合物在涂料、胶黏剂、纺织助剂等领域有广泛的应用。例如,将草酰胺与其他生物基单体进行缩聚反应,可以制备出具有优良力学性能和生物降解性的聚酰胺材料;将草酰胺与聚二甲基硅氧烷(PDMS)结合,可以制备出具有优异机械性能和热稳定性的热塑性弹性体;将草酰胺与多种金属离子形成配位化合物,可用于制备新型磁性材料和高效的催化剂;通过研究草酰胺配合物的热分解动力学,可以开发出具有特定热分解特性的材料,用于高温环境下的应用等。

2.3 在医药领域应用

草酰胺的分子结构中含有酰胺键,然而酰胺键在生命体构建过程中扮演着极为重要的角色,是合成多肽和蛋白质的重要原料^[26]。据报道,酰胺键在 2/3 的候选药物中被发现;另有报道称,1/4 已经市场化的药物中也含有酰胺键。因此,草酰胺在医药领域具有重要的应用。通过将草酰胺基团与氨基酸

分子进行缩合反应,可构建多肽链和蛋白质结构。草酰胺作为一种有效的缩合剂,被广泛应用于药物合成和生物技术领域。可以用于合成多种具有生物活性的多肽药物,如抗癌药物、抗生素等。此外,草酰胺及其衍生物也可作为中间体、抑制剂、催化剂和结构修饰剂等,在药物合成中发挥重要作用,为人类健康事业做出巨大贡献。

3 结语与展望

草酰胺的应用十分广泛,尤其是在农业、医药、化工等领域,具有巨大的发展价值。本文中总结草酰胺多种合成方法,从工艺先进、流程简单、成本低、环保安全以及行业发展现状等方面综合分析得出:HCN 法毒性大,成本高;热解法能耗高,收率低,即使利用小氮肥工艺生产草酰胺,但产品结构单一,中小型企业缺乏行业竞争力,违背了氮肥企业趋于大型化、集中化的发展趋势;酯氨交换法,采用尿素代替 NH_3 ,解决尿素产能过剩问题,实现氨基和甲氧基的高效重组,同时开发高附加值产品草酰胺,提升副产物氨基甲酸甲酯、碳酸二甲酯的价值,但技术尚未成熟,报道较少;其他法,如 N_2 和 CO 直接合成法、酰胺衍生物氨解法,均处于实验室研究阶段; CO 偶联 DMO 氨解法,以煤炭(或天然气)为原料制备合成气(H_2/CO),再经 CO 气相偶联制 DMO,控制 DMO 氨解制备高附加值的煤基化学品,符合我国富煤、贫油的特殊能源国情。在煤制乙二醇产能过剩的背景下,该法不仅解决了草酰胺的原料来源问题,而且大幅降低草酰胺的生产成本。所以,采用这条工艺路线合成草酰胺,优化了氮肥企业产品结构,可有效化解行业目前面临的产能过剩状况,拓展了合成氨下游产品,解决市场上下游结构失调问题,有助于改善企业经济效益,推动企业革新。因此,应加大 CO 偶联 DMO 氨解法的研发和制造力度,大力推广和建设年产百万吨级以上的草酰胺项目,满足市场需要,从而极大促进和推动绿色化工行业的发展。

参考文献

- [1] 谷豹,刘刚,尹科科,等.草酸二甲酯的合成及应用研究进展[J].应用化工,2023,52(4):1248-1252.
- [2] 梁双双,程洋,马嘉,等.煤制乙二醇装置转型生产草酰胺的机会分析[J].化学工业,2021,39(4):92-96.
- [3] 王晓晨.新型煤基乙醇酸甲酯合成技术与应用研究进展[J].现代化工,2024,44(S1):52-58.
- [4] Wang X.Challenges and outlook for catalytic direct amidation reactions[J].Nature Catalysis,2019,2(2):98-102.

(下转第 65 页)

- 究[D].南京:东南大学,2022.
- [3] 任雪宇.ZSM-5的孔道和活性位构筑及其催化褐煤挥发分制芳烃机理研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [4] 胡俊利,王高杰.不同汽油馏分加工路线选择[J].广州化工,2023,51(16):27-30.
- [5] 王培民.C₉/C₁₀工业加氢B型催化剂与对比剂失活研究[J].当代化工,2023,52(3):638-643.
- [6] 倪婉萍.铈/镓改性ZSM-5催化甲醇制芳烃[D].大连:大连理工大学,2022.
- [7] 易天立,王琦,桂薇.催化裂解制低碳烯烃工艺及催化剂研究进展[J].石化技术与应用,2024,42(4):306-313.
- [8] 高鹏.CO₂加氢制芳烃的金属改性UiO-66/HZSM-5串联催化剂的构筑[D].兰州:西北师范大学,2023.
- [9] 焦佳鹏,田海峰,何环环,等.CO/CO₂加氢制芳烃的研究进展[J].化工进展,2021,40(1):205-220.
- [10] 焦春学.In基催化材料在CO₂加氢制芳烃反应中的性能研究[D].兰州:西北师范大学,2024.
- [11] Wei C C, Zhang W N, Yang K, *et al.* An efficient way to use CO₂ as chemical feedstock by coupling with alkanes[J]. Chinese Journal of Catalysis, 2023, 47: 138-149.
- [12] 万震,王绍庆,李志合,等.HZSM-5分子筛催化木质素热解制芳烃研究进展[J].化工进展,2024,43(S1):517-532.
- [13] 韩娅婷.稻壳壳为模板制备多级孔ZSM-5及其甲醇制芳烃性能研究[D].太原:太原理工大学,2023.
- [14] 熊建云.蛋壳基氧化钙与HZSM-5双级催化热解玉米芯制备芳烃的研究[D].南昌:南昌大学,2024.
- [15] 周欢.多级孔ZSM-5分子筛催化生物质热解制备芳烃研究[D].杭州:浙江大学,2022.
- [16] 王丽丽.甲醇制芳烃工艺经济性分析[J].山西化工,2021,41(4):99-101.
- [17] 赵英龙,刘民,李俊杰,等.晶种导向合成不同厚度Zn-ZSM-5用于甲醇制芳烃反应[J].石油学报:石油加工,2021,37(2):269-280.
- [18] 孙翠娟,李玉平,王艳悦,等.ZSM-5/SAPO-34复合分子筛的合成及甲醇制烯烃催化性能[J].天然气化工:C1化学与化工,2015,40(2):1-4,9.
- [19] 惠燕.包覆型ZSM-5构筑及其甲醇制芳烃反应性能[D].太原:太原理工大学,2022.
- [20] 李晗.甲醇制芳烃反应过程中ZSM-5催化剂的结构演变及性能优化[D].太原:太原理工大学,2021.
- [21] 杨凡,徐瑞,贾显枝,等.甲醇芳构化技术研究进展[J].天然气化工:C1化学与化工,2021,46(4):14-20,26.
- [22] 陈诗瑶,申峻,王玉高,等.甲醇制芳烃的工艺流程模拟及换热网络优化[J].洁净煤技术,2022,28(1):129-137.
- [23] 马东.合成气经含氧中间体路线直接制芳烃Zr/H-ZSM5双功能催化剂研究[D].济南:齐鲁工业大学,2023.
- [24] 汤兴蕾.金属氧化物/沸石分子筛双功能催化剂上合成气催化转化制芳烃的研究[D].厦门:厦门大学,2022.
- [25] 刘大鹏.合成气直接催化转化制芳烃[D].无锡:江南大学,2018.
- [26] 杨成,张成华,许健,等.氧化锆催化合成气直接转化制芳烃[J].燃料化学学报,2016,44(7):837-844.
- [27] 周伟.接力催化在合成气直接制芳烃及C²⁺含氧化合物中的应用研究[D].厦门:厦门大学,2021.
- [28] 张保连,刘畅,刘苏,等.ZnCr₂O₄/ZSM-5@Silicalite-1优化CO₂一步法加氢制芳烃反应选择性[J].无机化学学报,2023,39(12):2339-2348.
- [29] Zhao B, Zhai P, Wang P F, *et al.* Direct transformation of syngas to aromatics over Na-Zn-Fe₃C₂ and hierarchical HZSM-5 tandem catalysts[J]. Chem, 2017, 3(2):323-333. ■
-
- (上接第59页)
- [5] 李玉龙,谢洪燕,苏海涛,等.草酰胺生产工艺技术研究进展[J].山东化工,2022,51(20):80-82.
- [6] 王庆.草酸二甲酯高值衍生品合成研究[D].沈阳:沈阳化工大学,2023.
- [7] 卓泽凡,刘长有.一种利用合成氨-联产碳酸氢铵工艺生产草酰胺的方法:CN 2019106101780[P].2019-09-24.
- [8] Uchiumi S, Ataka K, Matsuzaki T. Oxidative reactions by a palladium alkyl nitrite system[J]. Journal of Organometallic Chemistry, 1999, 576(1):279-289.
- [9] Tomohik Y, Yukio I, Genji I, *et al.* Process for producing oxamide: US 6348626B1[P].2002-02-19.
- [10] 陈贻盾.一种合成草酰胺连续工艺:CN 102267921A[P].2011-12-07.
- [11] 李扬,朱小学,王科.一种黄磷尾气经净化连续合成草酰胺的装置和方法:CN 104610087B[P].2017-01-18.
- [12] 吴晓金,吴维果,毛洪堂,等.一种连续气相合成草酰胺的方法:CN 103288666B[P].2015-07-15.
- [13] 贾金洁,周伟,沈林.一种连续生成草酰胺的方法:CN 110862331B[P].2021-05-11.
- [14] 张蒙恩,李庆华,张伟利.一种草酰胺用连续生产装置:CN 216192002U[P].2022-04-05.
- [15] 王保明,李玉江,张辉平,等.一种草酸二甲酯制备草酰胺的方法:CN 111153823B[P].2023-05-26.
- [16] 杨晋平,韩涛,王保明,等.一种用于连续高效制备草酰胺的装置及方法:CN 115715962A[P].2023-02-28.
- [17] 石磊,宋晓玲,周军,等.一种温和条件下高纯草酰胺高效的生产方法:CN 116396179A[P].2023-07-07.
- [18] 姚元根,乔路阳,周张锋.一种酯氨交换法联产草酰胺和氨基甲酸酯的工艺方法:CN 105367439A[P].2016-03-02.
- [19] Shang B B, Qiao L Y, Zhang F Z, *et al.* Modified basicity from ZnO-CaO synergy for the synthesis of oxamide[J]. Chemistry Select, 2022, 7:e202203211.
- [20] 姚元根,乔路阳,周张锋.一种联产碳酸二甲酯和草酰胺的工艺方法:CN 106674013B[P].2019-06-18.
- [21] 李跃辉,常宇钰.一种草酰胺的制备方法:CN 110041218B[P].2022-04-05.
- [22] 李丽,贾文欣,徐昊,等.缓释肥类型及其运筹方式对弱筋小麦产量及品质的影响[J].麦类作物学报,2024,44(6):758-769.
- [23] 卜东升,王立军,张涛,等.缓释氮肥草酰胺对新疆南疆滴灌棉田养分和产量的影响[J].中国棉花,2014,41(12):17-19.
- [24] 邓仕俊.缓释肥在水稻生产上应用试验示范[J].上海农业科技,2023,(5):119-121.
- [25] 康传宏,周久娜,郭继香.超分子量聚丙烯酰胺的合成方法综述[J].应用化工,2022,51(11):3310-3313.
- [26] Zhu Y Y, Niu Y, Niu Y N, *et al.* Recent advances in the synthesis and applications of phosphoramides[J]. Organic & Biomolecular Chemistry, 2021, 19(47):10296-10313. ■