

填料表面润湿改性的研究进展

王盼盼¹, 陆平², 刘振^{1*}

(1. 河南科技大学化学化工学院, 河南 洛阳 471023;

2. 中国科学院过程工程研究所绿色过程与工程重点实验室, 北京 100190)

摘要:介绍了近年来填料表面润湿性能改性的相关研究。详细阐述了表面改性技术在填料中的应用,总结了润湿性能对填料内气液传质的作用机理,并对填料表面改性的未来发展趋势进行了展望,旨在进一步促进填料表面改性的工业化进程。

关键词:填料塔; 填料表面改性; 传质效率; 接触角

中图分类号: TK124

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0078-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.015

Research progress on surface wetting modification of packing

WANG Pan-pan¹, LU Ping², LIU Zhen^{1*}

(1. School of Chemistry & Chemical Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023,

China; 2. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: This paper introduces the relevant research on the modification of packing material surface wetting performance in recent years. It elaborates on the application of surface modification technology in packing materials, summarizes the mechanism of the effect of wetting performance on gas-liquid mass transfer within packing materials, and looks forward to the future development trend of packing material surface modification, aiming to further promote the industrialization process of packing material surface modification.

Key words: packed tower; surface modification of packing; mass transfer efficiency; contact angle

化工分离过程是石油化工、有机化工、制药工业等行业生产过程当中最重要的单元之一,而化工分离过程占化工生产过程中能耗的 40%~70%^[1]。填料塔作为化工分离工艺中的核心设备之一,被广泛应用于精馏、吸收等化工过程,并展现出操作便捷与灵活性高的显著特点,在化工生产过程中发挥着重要作用。现代工业迅猛的发展导致生产规模扩大,填料塔尺寸和能耗不断增大,操作成本的攀升,对企业的经济效益构成了压力。除此之外,随着全球能源危机的加剧和环保意识的提高,化工分离过程越来越注重节能减排,对填料塔技术提出一系列新的挑战^[2]。

填料塔的核心是填料,填料的传质效率决定了填料塔的分离效率,如何优化填料的设计,提升分离过程的效率,降低运行成本,是当前化工分离领域的重要研究课题。基于精馏和吸收等气液传质过程的基本原理,填料塔传质过程的强化主要围绕增强整体驱动力、提高传质系数和扩大气液传质面积^[3]等方面进行研究。当下用于提高填料塔分离效率的优

化设计主要有以下 3 个途径:填料塔结构的优化设计,液体分布器的优化设计,填料的优化设计。

(1) 填料塔结构的优化设计,例如旋转填料床(RPB)、隔板精馏塔(DWC)^[4]等,相较于传统精馏设备,旋转填料床的传质速率提高了 1~3 个数量级^[5]。

(2) 液体分布器的优化设计, Pavlenko 等^[6]对近年来塔内液体分布器的深度改进与创新设计进行总结。通过调整分布器结构,优化液体在填料层中的初始分布,从而最大化气液两相间的接触面积与接触时间,促进传质与反应过程的效率^[7]。

(3) 填料的优化设计,作为气液两相传质的主要区域,填料的性质对于扩大气液传质面积具有重要意义。诸多学者从填料的材质、结构以及表面性质等方面进行了深入的研究并取得了显著成果。

为了更好地契合现代化学工业对节能减排和成本效益的严苛要求,填料的开发与设计正面临着持续优化升级的挑战。在这一背景下,新型填料的研究与开发已不再局限于单一维度的材料创新,而是向多元化方向迈进。除了开发填料的高性能材

收稿日期: 2025-11-03; 修回日期: 2026-07-07

基金项目: 山东省重点研发计划重大科技创新工程(2024CXGC010405)

作者简介: 王盼盼(1999-),女,硕士,研究方向为化工分离过程,1772421717@qq.com; 刘振(1977-),男,博士,教授,研究方向为传质与分离,通讯联系人,liuz@haust.edu.cn。

料^[8],调整填料的几何构型也能有效提升填料的流体力学性能,促进气液两相间的传质效率,在减少能耗的同时,有效降低了设备投资与运营成本^[9]。近年来随着计算机技术的蓬勃发展,诸多学者将 CAD、CFD 等软件与 3D 打印技术应用到强化填料传质过程中,在开发优化填料结构的同时,模拟测试新型填料的性能以寻求最优参数^[10]。CFD 模拟与实验相结合,开发出多种综合性能优异的规整填料并且凭借卓越的性能,有效提升了化工生产效率与产品质量,充分满足了化工行业及市场的多样化需求,为行业发展提供了有力支撑^[11]。Kawas 等^[12]以 Mellapak250Y 规整填料为基础,修改部分几何参数,并利用 3D 打印技术制造出一种材质为聚酰胺和不锈钢的创新型规整填料。经过测试,新型规整填料具有较高的持液量和良好的传质效率。

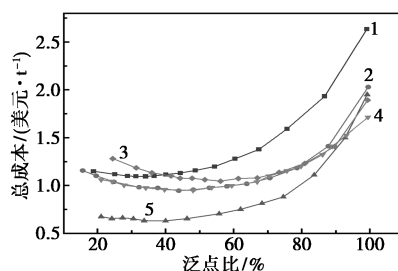
填料表面性质的优化成为近年来提高填料传质效率的新途径。填料表面润湿性能的改性可以直接影响气液两相传质接触面积的大小,在降低填料层高度、提高填料传质效率等方面具有显著优势和实践意义。介绍了近年来表面改性技术对填料润湿性的改进以及改性后填料传质性能的提升,总结了润湿性能对填料内气液传质的作用机理。最后对填料表面亲水改性的未来发展趋势进行了展望,旨在进一步促进填料表面改性的工业化进程。

1 表面改性技术

表面改性技术是采用特殊的物理或化学方法,使得基底的表面结构与性质发生改变,优化基底在润湿性能、防腐性能等方面表现,以提高材料的表面特性、增强材料的功能性、改善材料的耐久性、延长材料的寿命,从而实现材料整体效能和应用价值的提升。表面改性技术被广泛应用于金属防腐和耐磨^[13]、材料防雾和自清洁^[14]、太阳能电池等领域。

将表面改性技术应用于填料,主要目的是为填料表面赋能,旨在拓宽填料的应用范围,提高传质效率、延长使用寿命、减少结焦率。例如在反应精馏过程中,利用表面改性技术直接将催化剂附着在填料表面,与常规反应精馏过程中的捆扎包或夹层结构相比,改性后的填料在进行催化反应的同时,降低了传质阻力,增大了气液传质面积,提高了分离效率。Wang 等^[15]采用“蚀刻-改性填充-接枝共聚”的策略在陶瓷填料表面进行改性,将催化剂直接通过化学键负载在填料表面,生成的离子交换催化涂层稳定性高,表现出优异的催化性能。在化工分离方面,

Dong 等^[16]从经济角度分析了在化学吸附法捕碳过程中运用不同类型填料对填料塔的总成本影响。如图 1 所示,采用改性聚丙烯 250Y 填料的总成本相比于不锈钢下降了 33.6%。Wang 等^[17]在 SiC 填料表面分别接枝环氧亲水基团和全氟疏水基团。填料接枝环氧亲水基团后接触角降低,耐腐蚀性能显著提升。某炼化公司利用 CTS 表面改性技术对原油劣质化过程中的减压塔内的填料进行改性,增强了填料的抗结焦能力。改造后装置的总拔出率同比增加了 3.79%,结焦率明显降低,改造后年均增加了 13 991.43 万元的经济效益^[18]。



1—SUS304 125Y;2—SUS304 250Y;3—SUS304 500Y;
4—SUS304 250X;5—PP 250Y

图1 不锈钢和聚丙烯填料的填料塔的总成本

表面改性技术种类繁多且应用广泛,对近年来表面改性技术对填料表面亲水改性的研究进行了介绍,总结了亲水改性对填料内气液传质的作用机理。

2 化学刻蚀法

化学刻蚀法是一种利用碱性或酸性刻蚀液在基底表面进行刻蚀,刻蚀后基底表面粗糙度发生改变从而改变填料表面的润湿性能,包括化学氧化法和刻蚀-低表面能修饰法。

刻蚀氧化法是将刻蚀后的表面利用强氧化剂对金属填料表面进行氧化,在填料表面形成一层致密的氧化膜(图2)。耿皎^[19]利用重铬酸钾和硝酸的混合溶液对填料表面进行亲水改性,处理后不锈钢填料表面水接触角从 54.6°下降到 23.4°。改性后不锈钢填料的 HETP 相较于改性前最高下降了 45% 左右。由于氧化刻蚀液在金属表面形成一层氧化膜,改性后填料的抗腐蚀性能也大幅度增加。贾绍义等^[20]利用 3 种不同氧化的方法对金属填料进行亲水改性,改性后填料的传质性能最高提高了 11%。该方法常用水精馏领域,通过增加填料表面亲水性能从而提高氢同位素的分离效率。尹玉国等^[21]利用王水刻蚀氧化法处理三角螺旋不锈钢填料,增强亲水性能。赵思达^[22]利用刻蚀氧化法对填

料进行表面亲水改性,经过改性不锈钢填料和紫铜填料的接触角均下降到 0° ,在水精馏实验中表现出优异的性能。图 3 改性后填料的等板高度(HETP)相较于原填料从 3.5~5.8 cm 下降到 1.9~2.4 cm,极大地提高了精馏塔的传质效率,有利于水精馏过程中氙的分离。Zhang 等^[23]对直径为 3 mm 的铜制 Dixon 环进行亲水改性,改性后填料的传质效率提高了 74%左右,并结合 HOG 和 HETP 之间的关系,建立了测填料在不同接触角下传质性能的数学模型。Wang 等^[24]利用 NaOH 和 H_2O_2 在铜规整填料表面进行原位合成氧化铜或氢氧化铜涂层,并对比了 2 种涂层在耐摩擦实验、超声震荡实验、水力侵蚀实验中接触角和机械强度的变化,证明了实验生成的氧化铜涂层具有良好的结构稳定性和分离耐久性。

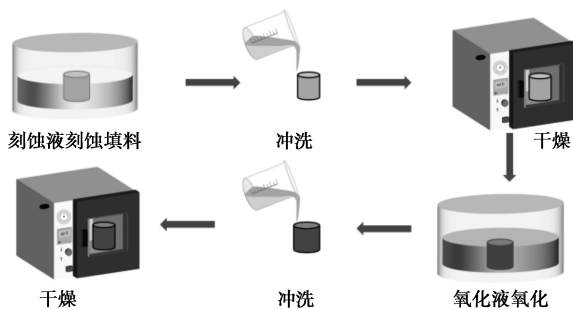


图 2 化学刻蚀法

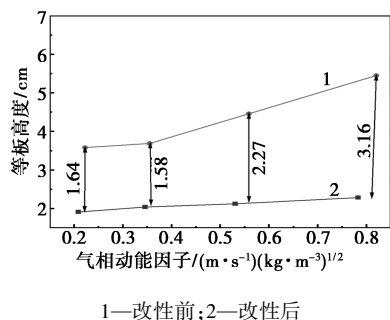


图 3 改性前后填料的传质性能

3 表面接枝法

Ding 等^[25]在不锈钢填料表面经过 3 次晶体生长后生成一层致密的 mof 层,制成一种具有超亲水性和超气排斥性能的金属-有机骨架(mof)改性界面。填料的润湿性对 LPCE 反应的催化性能有显著影响。在 LPCE 反应精馏过程中,改性后填料的超亲水性有助于氟化水的快速传输和相转移,而超气排斥性则避免了气泡黏附在填料表面,进一步增大了有效接触面积。在实际精馏测试中,相同操作条件下改性前后不锈钢的 HETP 下降了 45%~52%。

并通过 CFD 模拟,研究了 mof 改性界面在气液两相流动中的表现,揭示了润湿性能和液流速率对催化性能的影响。

4 共混改性

塑料填料具有耐腐蚀性能优异、耐冲击、不易碎、压降低等优势,但是由于塑料填料的润湿性能较差,限制了在化工分离过程中的应用。近年来,诸多学者采用共混改性技术^[26]对塑料填料进行改性,在增强表面润湿性能的同时加入其他助剂,从而提升塑料填料的耐温性、抗压性。

彭颖^[27]利用二氧化硅、滑石粉等有效改性剂对 PP 塑料填料进行共混改性,增大填料塔内传质接触面积的同时,减少了塑料填料对固废焚烧废气中二噁英的吸附。实验后填料经过加热,测得脱除的二噁英含量。其中,改性后填料的脱附量相较于未改性填料最高减少了 80.8%。李迎春^[28]对于聚丙烯填料进行共混改性,在增加填料亲水性的同时玻纤的加入改善了塑料填料的耐温性。经过测试改性后塑料板经过粗糙处理后,成膜率能达到 93% 以上,改性后填料的传质单元高度降低了 20% 以上。胡昔鸣等^[29]利用 PP-g-MAH 颗粒料与聚丙烯材料共混,从而提升塑料填料的亲水性能,使得制成的填料与传统不锈钢填料的性能相近,在实际生产应用中可代替传统不锈钢填料,从而降低生产成本。如表 1 所示,相比其他改性方法,共混改性对体系传质效率的提升幅度有限,存在较强应用局限。

表 1 填料表面改性的性能和局限性

表面改性方法	性能表现	局限性
化学刻蚀法	传质效率提升 24%~113%	改性污染较大,部分改性技术应用范围较窄
表面接枝法	传质效率提升 45%~52%	改性方法较复杂,难以大规模改性优化填料且改性成本较高
共混改性	传质效率提升 20% 以上	只适用于塑料填料的改性

5 结果与展望

综述了几种表面改性技术在优化填料表面亲水方面的应用。填料表面亲水改性旨在扩大液体在填料表面的润湿面积,增加气液接触场所,从而实现传质效率的提升。改性后填料的传质效率普遍提升了 10%~70%。这种在不改变原有设备的基础上提高

填料传质效率的方法被视为一种高效的优化填料塔分离效率的途径,并被广泛应用到水精馏、吸收、环境等领域。然而,从当前发展情况看,在以下几方面仍有待提升。

(1) 改性成本较高,部分表面改性技术使用的试剂价格昂贵,只适用于小试和中试,扩大生产会给企业造成经济负担。

(2) 改性污染较大,目前普遍采用的刻蚀氧化法,在改性过程中产生了大量酸性且氧化性较强的废水,与环保理念背道而驰。

(3) 改性应用范围较窄,改性后的填料只适用于特定物系的分离,难以实现大规模的应用。

(4) 改性的稳定性和耐久性较差,改性后填料使用寿命短,不符合企业的经济效益。

(5) 改性方法较复杂,难以大规模改性优化填料。

综上所述,这些因素均限制了填料表面亲水改性的工业化发展。未来有待开发绿色环保、低成本、简单高效的改性方法并结合纳米技术、智能材料等新兴技术进一步提升填料性能,在拓展新能源、生物技术、精细化工等新兴领域应用的同时,提升填料传质效率,降低生产成本。

参考文献

- [1] 周昕洁,于楠,孙仁金,等.低碳智慧化工发展现状、问题及对策[J].现代化工,2025,45(9):1-6.
- [2] 雷霆,刘婵,师亚丽,等.传统化工与新能源产业的协同路径探究[J].现代化工,2025,45(7):1-6.
- [3] Li H, Wu C, Hao Z, *et al.* Process intensification in vapor-liquid mass transfer: The state-of-the-art[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(6): 1236-1246.
- [4] 王洁鑫,韩帅帅,丁晖殿,等.双隔壁反应精馏塔的动态特性分析及控制研究[J].现代化工,2025,45(10):265-269,275.
- [5] Zhang W, Xie P, Li Y, *et al.* 3D CFD simulation of the liquid flow in a rotating packed bed with structured wire mesh packing[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 427: 130874.
- [6] Pavlenko A N, Pecherkin N I, Zhukov V E, *et al.* Overview of methods to control the liquid distribution in distillation columns with structured packing: Improving separation efficiency[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 132: 110092.
- [7] Singh R K, Bao J, Wang C, *et al.* Hydrodynamics of countercurrent flows in a structured packed column: Effects of initial wetting and dynamic contact angle[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 398: 125548.
- [8] 张洋,高鑫,严鹏,等.泡沫碳化硅填料孔内流体微观流动特性研究[J].现代化工,2021,41(9):192-196.
- [9] Zhi X, Hu S, Gu C, *et al.* Influence of structured packing geometric parameters on flow and mass transfer performance of liquid nitrogen and oxygen for cryogenic distillation[J]. Cryogenics, 2023, 130: 103647.
- [10] Blauth S, Stucke D, Ashour M A, *et al.* CFD-based shape optimization of structured packings for enhancing separation efficiency in distillation[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 302: 120803.
- [11] Jiang F, Chen C, Li P, *et al.* Hydrophilic wire gauze packing in a wet scrubber column with extremely low liquid spray density for air dewatering: Experiment and CFD analysis[J]. Chemical Engineering Science, 2025, 309: 121466.
- [12] Kawa B, Mizzi B, Dejean B, *et al.* Design and conception of an innovative packing for separation column-Part II: Design and characterization of a wire based packing[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2021, 169: 189-203.
- [13] 邝永亮,尹兴善,张月红,等.超疏水涂层的研究进展综述[J].现代化工,2025,45(10):62-66.
- [14] Kim T, Lee Y, Kim E, *et al.* Fouling-resistant surface modification of forward osmosis membranes using MoS₂-Ag nanofillers[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 38: 102844.
- [15] Wang Z, Shi J, Liu X, *et al.* Supported catalytic packing prepared from ceramic packing for reactive distillation of ethyl acetate[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, 50: 205-214.
- [16] Dong W, Fang M, Liu Z, *et al.* Study on chemical absorption absorber with polypropylene packing for Guohua Jinjie CCS demonstration project[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2022, 114: 103581.
- [17] Wang C, Liu H, Feng S, *et al.* Effect of Wettability Modification of Inert Fillers on the Properties of Epoxy Coatings: An Experimental and Theoretical Approach[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(34): 15133-15150.
- [18] 李果,张晓国,刘海春,等.减压塔内件材料表面改性工业应用实践[J].石油化工设备技术,2023,44(6):53-56.
- [19] 耿皎.不锈钢填料表面处理前后的性能[J].高校化学工程学报,2000,(4):382-386.
- [20] 贾绍义,高红,吴松海,等.金属丝网波纹填料表面处理对其性能的影响[J].化学工程,2001,(1):8-10.
- [21] 尹玉国,胡石林,吴栋,等.散堆不锈钢填料表面处理工艺研究[J].当代化工,2022,51(5):1098-1102.
- [22] 赵思达.填料的表面亲水改性及其对水精馏传质性能的影响研究[D].天津:天津大学,2020.
- [23] Zhang Z, Zhang Z, Zhang X, *et al.* Effect of hydrophilic properties of packings on mass transfer performance of water distillation[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 269: 118486.
- [24] Wang Z, Zou Z, Li S, *et al.* Study on hydrodynamic properties and physicochemical stability of regular packing coatings for water isotope separation[J]. Materials Today Communications, 2024, 39: 108938.
- [25] Ding W, Fu X, Hou J, *et al.* Superwetting metal-organic frameworks optimized interface for high-performance hydrogen-water isotopic exchange for tritiated water treatment[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(88): 34410-34419.
- [26] Qin Y, Dong L, Lu H, *et al.* Debromination process of Br-containing PS of E-wastes and reuse with virgin PS[J]. J Hazard Mater, 2022, 431: 128526.
- [27] 彭颖.固废焚烧系统湿法洗涤塔内二噁英迁移规律及填料改性研究[D].杭州:浙江大学,2023.
- [28] 李迎春.表面改性规整填料塔性能[D].上海:华东理工大学,2011.
- [29] 胡昔鸣,董文峰,王争荣,等.二氧化碳捕集塔内熔融共混亲水改性聚丙烯规整填料性能研究[J].发电技术,2025,46(2):296-303. ■