

化工反应设备传热效率提升策略探析

王永宝

山东裕龙石化有限公司 山东 烟台 265704

摘要：传热效率对化工反应设备的性能与能耗有着关键影响。设备结构与材质的局限、污垢沉积及操作参数不合理等问题，制约着传热效率提升。通过优化设备结构与材质，采用耐腐蚀、导热性好的材料；加强污垢预防与清理，运用在线监测和清洗技术；精准控制操作参数，优化工艺流程；应用强化传热技术，如新型传热元件等，可有效提升传热效率，降低生产成本，增强化工生产的安全性与稳定性。

关键词：化工反应设备；传热效率；提升策略

引言

在化工生产过程中，反应设备的传热效率直接关系到反应速率、产品质量和能源消耗。随着化工产业的高速发展，对设备传热性能的要求日益严苛。然而，当前化工反应设备存在结构设计欠妥、材质传热性能不足、污垢影响显著以及操作参数控制不当等问题，严重阻碍传热效率提升。本文聚焦这些现状，深入探讨化工反应设备传热效率提升策略，旨在为化工生产的高效运行提供理论与实践指导。

1 化工反应设备传热效率概述

化工反应设备传热效率是影响化工生产过程能耗、反应速率和产品质量的核心参数，其本质是热量通过设备传热面在冷热流体间的传递能力。在化工生产中，各类化学反应伴随着吸热或放热过程，有效控制反应体系的温度不仅是维持反应动力学稳定的关键，更是保障反应选择性和转化率的必要条件。传热效率的高低直接决定了反应热能否及时移除或补充，进而影响整个生产系统的稳定性与经济性。化工反应设备的传热过程涉及传导、对流和辐射三种基本方式，实际工况中往往是多种传热方式的耦合作用。以夹套式反应器为例，内部反应物料与夹套中冷却介质之间的热量传递，既包含物料与器壁的对流传热，也涉及器壁本身的热传导，以及冷却介质在夹套中的强制对流换热。设备的传热效率由传热系数、传热面积和传热温差三个关键因素共同决定。传热系数综合反映了流体物性、流动状态、传热面粗糙度等因素对传热阻力的影响；传热面积则通过优化设备结构设计，如采用螺旋折流板换热器、翅片管等强化元件得以拓展；传热温差的合理控制需平衡工艺要求与设备材料耐温性能，避免因温差过大导致的热应力破坏。随着化工过程向大型化、精细化方向发展，对传热效率的要求不断提升。新型高效传热材料的研发，如纳米流

体、高导热复合材料，可显著改善流体的传热性能；数值模拟技术的应用使传热过程的优化设计从经验试错转向基于计算流体力学（CFD）的精准调控，通过模拟流场、温度场分布，优化设备结构与操作参数。强化传热技术的创新，如微通道反应器、振荡流反应器等新型设备的应用，通过减小传热距离、增强流体湍动，大幅提升单位体积的传热效率，为化工过程的高效运行提供了技术支撑。

2 化工反应设备传热效率现状分析

2.1 设备结构与材质的局限性

化工反应设备的结构形式与材质特性构成了传热过程的基础框架，其固有属性对传热效率产生深远影响。传统列管式换热器采用直管排列结构，虽制造工艺成熟，但管程内流体流动易形成层流边界层，限制了对流传热系数的提升，特别是在处理高黏度物料时，层流状态下的传热阻力显著增加，导致热量传递效率低下。夹套式反应器由于夹套空间有限，冷却介质在其中的流动通道较为单一，难以形成高效湍流，使得夹套与反应物料间的传热系数普遍较低，当反应体系需快速移除大量反应热时，该结构的局限性尤为突出。设备材质的导热性能直接决定热传导过程的效率。碳钢等常规金属材料虽具有良好的机械强度和成本优势，但其导热系数相对有限，在高温高压工况下，金属材料的热膨胀系数与反应物料、冷却介质的不匹配，易导致设备产生热应力，引发局部变形甚至泄漏，破坏传热的稳定性。即使是导热性能优良的不锈钢材料，在强腐蚀性介质环境中，表面会形成钝化膜，这层膜虽能保护金属基体，但也显著增加了热阻，降低了传热效率。设备结构设计中若未充分考虑流体流动特性，如未合理设置折流板间距、导流装置，会导致流体在设备内出现流动死区或短路现象，造成局部传热不均，使整体传热效率无法达到预期目标^[1]。

2.2 污垢沉积与结垢问题

在化工反应过程中,污垢沉积与结垢是影响传热效率的重要因素,其形成过程复杂且具有累积效应。反应物料中的不溶性杂质、未完全反应的固体颗粒,以及在高温下发生聚合、结晶的产物,会在传热表面逐渐沉积,形成污垢层。这些污垢层犹如隔热层,其热导率远低于金属传热壁面,极大增加了传热热阻。以石化行业的常减压蒸馏装置为例,原油中的无机盐、胶质和沥青质等成分在换热器表面沉积,随着运行时间延长,污垢层不断增厚,导致传热系数逐年下降,设备运行能耗显著增加。结垢现象在涉及相变传热或有结晶反应的设备中尤为突出。当反应体系存在过饱和溶液时,溶质会在传热壁面优先结晶析出,形成致密的结垢层。如在蒸发结晶器中,随着溶剂的不断蒸发,溶液浓度升高,溶质在管壁表面结晶生长,不仅降低了传热效率,还可能堵塞流道,影响流体的正常流动。微生物污垢也是不容忽视的问题,在含有机物的反应体系中,微生物在适宜的温度、湿度和营养条件下迅速繁殖,其代谢产物与物料中的杂质相互作用,在传热表面形成黏性生物膜,进一步加剧了传热恶化。污垢和结垢一旦形成,难以通过常规的清洗方法完全去除,频繁的机械清洗还可能损伤传热表面,形成新的粗糙结构,加速污垢的再次沉积,形成恶性循环,严重制约设备的长期稳定运行和传热效率提升。

2.3 操作参数与工艺控制不合理

操作参数与工艺控制的精准度直接关系到化工反应设备的传热效率。反应温度和压力的波动会改变物料的物理性参数,进而影响传热过程。在温度过高或过低的情况下,物料的黏度、导热系数和比热容等发生变化,导致对流传热系数改变。如在聚合反应中,温度波动会使聚合物的分子量分布发生变化,高黏度的聚合物在反应器内流动阻力增大,传热性能下降。压力变化可能引起物料相变,若不能及时调整冷却或加热负荷,会造成传热不匹配,导致局部过热或过冷,影响反应的进行和传热效率。流量控制不当也是影响传热效率的关键因素。无论是反应物料还是传热介质,流量不足会使流体在设备内的流速降低,难以形成湍流状态,削弱对流传热效果;流量过大则可能增加流体阻力,导致能耗上升,且在某些情况下会引起设备振动,影响设备寿命。工艺控制中的冷热流体进出口温度设计不合理,未充分利用逆流、错流等高效传热方式,使得传热温差未能得到有效利用。例如,在换热器设计中,若冷热流体采用并流方式,其平均传热温差远低于逆流方式,造成热量传递的

不充分。操作参数与工艺控制的不合理还体现在缺乏实时监测和动态调整机制,无法根据反应进程和物料特性的变化及时优化操作条件,导致传热效率难以达到最佳水平,影响整个化工生产过程的经济性和稳定性^[2]。

3 提升化工反应设备传热效率的策略

3.1 优化设备结构与材质

(1) 设备结构优化主要通过革新流道设计强化传热。采用螺旋折流板换热器替换传统平直折流板,使流体呈螺旋流动,破坏层流边界层,增强湍流,将对流传热系数提升30%以上;微通道反应器利用微米级流道缩短传热距离,降低热阻,其单位体积传热面积是常规设备数十倍,适用于强放热反应。管壳式换热器通过变管径、变截面设计,改变流体流速与流态,避免流动死区,提升传热均匀性。(2) 新型材质应用推动传热性能突破。纳米流体在基础流体中添加纳米级颗粒,借布朗运动增强分子碰撞,使导热系数提升10%-30%,尤其适用于高温工况;高导热复合材料将碳纳米管、石墨烯等与基体复合,形成各向异性导热壁面材料,兼顾机械强度与导热性。在强腐蚀环境下,陶瓷涂层、碳化硅等耐腐蚀高导热材料,可保障高效传热与设备耐久性。(3) 结构与材质协同优化是提升传热效率的关键。例如翅片管结构搭配铝镁合金,既能增加传热面积又降低壁面热阻;大型塔式反应设备设置内置导流筒和分布器,配合耐腐蚀钛合金,优化气液分布,保障长期稳定运行与高效传热。设计阶段借助计算流体力学(CFD)模拟不同组合下的流场与温度场,为优化方案提供数据支持。

3.2 加强污垢预防与清理

(1) 污垢预防需从工艺源头控制。在物料预处理阶段,通过精密过滤、离心分离等手段去除不溶性杂质,减少污垢沉积的物质基础;对于易结晶体系,采用添加晶种或控制过饱和度的方法,使晶体在反应釜主体溶液中生长而非在传热壁面析出。在流体输送过程中,合理设计流速,避免因流速过低导致颗粒沉降,对高黏度物料采用脉冲流或振荡流输送,破坏污垢的沉积条件。(2) 表面改性技术可有效抑制污垢附着。通过在传热表面涂覆超疏水或超亲水涂层,改变表面润湿性,使污垢难以附着;利用表面纳米结构化处理,形成微米-纳米复合粗糙度,降低污垢与壁面的附着力,使污垢在流体冲刷下更易脱落。对于生物污垢,采用含银或铜离子的抗菌涂层,抑制微生物生长和生物膜形成,延长设备清洁周期。(3) 在线清理与智能监测技术提升污垢处理效率。超声波除垢技术通过高频振动使污垢层产生疲劳破坏,实现连续在线清理;电磁除垢利用交变电磁场改变

水中离子的结晶习性,防止无机盐结垢。安装在线污垢监测传感器,实时测量传热系数和壁面温度,通过机器学习算法预测污垢生长趋势,当污垢达到阈值时自动启动清洗程序,避免过度清洗对设备的损伤,同时维持设备高效传热性能^[3]。

3.3 精准控制操作参数与优化工艺

(1) 操作参数的精准调控基于对传热过程的深度理解。通过构建反应体系传热数学模型,结合物料物性参数变化规律,实现温度、压力、流量的动态优化。在聚合反应中,借助在线黏度监测实时调节反应温度与搅拌转速,保障物料流动和传热均匀;气液两相反应中,依压力变化精准控制气相进料,稳定气液接触面积以确保传热效率。采用自适应控制算法,依设备运行状态自动调节参数,降低人为干预波动。(2) 工艺优化侧重于传热方式的合理选择和流程整合。在换热器设计中优先采用逆流操作,使冷热流体间始终保持较大的平均传热温差;对于多股流体的换热过程,采用错流-逆流组合流程,充分利用不同流型的优势。在工艺流程中设置中间换热环节,将反应热及时回收利用,降低后续冷却负荷。通过优化反应路径,减少副反应产生的热量,从源头降低传热系统的负荷压力。(3) 实时监测与数据驱动的策略是提升传热效率的重要手段。在设备关键部位安装高精度温度、压力和流量传感器,采集实时运行数据并传输至控制系统。利用大数据分析和人工智能技术,挖掘操作参数与传热效率之间的潜在关联,建立优化模型并生成最优操作方案。通过虚拟仿真技术对不同操作场景进行模拟验证,提前预判参数调整对传热过程的影响,实现操作参数与工艺控制的精准优化。

3.4 强化传热技术的应用

(1) 机械强化技术通过改变流体力学状态提升传热效率。旋转管换热器利用转轴带动管束旋转,产生离心力和剪切力,强化管内流体的湍流程度,使传热系数提高40%-60%;振荡流反应器通过活塞的往复运动产生周期性压力波动,增强流体混合与传质传热,特别适用于

传质受限的反应体系。在静态混合器中设置特殊结构元件,促使流体在流动过程中不断改变方向和速度,破坏边界层并增加流体间的接触面积,实现传热强化。(2) 物理场强化技术为传热过程引入新的驱动力。电磁场强化传热利用交变电场或磁场作用于导电或磁性流体,产生洛伦兹力或磁化效应,改变流体的流动特性和传热机制;超声波强化传热通过空化效应在流体中产生微小气泡,气泡的形成与破裂过程促进流体混合并增强对流传热。在微重力环境下,利用表面张力驱动流体流动,消除自然对流引起的传热不均匀性,实现高效传热。(3) 复合强化技术集成多种手段发挥协同效应。将微通道结构与纳米流体结合,减小传热距离、提升流体导热性,使单位体积传热量大幅提升;管壳式换热器中同时采用螺旋折流板和表面涂层技术,增强湍流、抑制污垢。开发多尺度强化传热设备,融合宏观与微观强化,构建全链条体系,为化工反应设备高效运行提供保障^[4]。

结语

综上所述,化工反应设备传热效率的提升是一个系统工程,需从设备结构与材质、污垢处理、操作参数控制以及强化传热技术应用等多方面协同发力。通过优化创新,可显著改善设备传热性能,降低能耗与成本。未来,随着新材料、新技术的不断涌现,化工反应设备传热效率提升仍有广阔的探索空间,持续推动化工行业向绿色、高效方向发展。

参考文献

- [1]李雯雯,刘相革,刘志远.化工生产中反应设备温度控制与维护措施[J].化纤与纺织技术,2025,54(2):119-121.
- [2]左孝为,周丽,何鑫.校企协同共建精细化工反应工程与设备课程的思考[J].化工管理,2025(8):28-31.
- [3]刘广宇.化工设备维护及检修措施分析[J].造纸装备及材料,2024,53(6):42-44.
- [4]鲍子健.换热器在石油化工中的传热效率提升[J].石油石化物资采购,2024(18):64-66.