

# 提升管反应器催化剂流动优化技术研究

王 钰

中海油东方石化有限责任公司 海南 东方 572600

**【摘要】**：提升管反应器内，催化剂流动存在非均匀分布及颗粒聚团等问题，制约反应效率与装置稳定性。立足催化剂流动优化的核心需求，本文从设备结构、工艺参数、介质工况三方面系统开展流动调控研究，依托结构改良、参数匹配、工况稳定的优化思路，对进料段构造、导流构件布设、物料速率、反应负荷、介质流速及温度进行优化。流动均匀性获得明显改善，输送效率与反应器性能同步提升，可为工业提升管高效稳定运行提供技术支撑。

**【关键词】**：提升管反应器；催化剂流动；流动优化；气固两相流

DOI:10.12417/2811-0722.26.07.011

## 引言

提升管反应器作为石油炼制领域核心设备，内部催化剂流动状态直接关系反应效率及产品分布，非均匀流动、颗粒聚团这类问题长期制约装置效能提升。伴随炼化行业绿色低碳与高效化发展理念持续深入，催化剂流动精准调控正逐步成为研究重点，以流动优化为目标，从设备结构、工艺参数、介质工况多维度解析流动影响机制，搭建系统化调控方案解决聚团偏流、输送失衡等关键难题，为提升管反应器性能优化与工业应用提供理论参考与技术支撑。

## 1 提升管反应器催化剂流动相关研究基础

提升管反应器内催化剂流动呈现典型气固两相非均匀特征，以环-核分布为主体结构，壁面区域催化剂浓度可达 0.15 - 0.25，中心区域仅 0.03 - 0.08，且普遍存在颗粒聚团这类介尺度结构，聚团直径多在 5 - 20mm，构成影响流动与反应的核心基础特性，传统均匀流动假设模型难以精准描述该特征，基于能量最小多尺度（EMMS）的数值模拟方法却能有效捕捉聚团分布，其预测浓度分布与工业实测误差小于 8%<sup>[1]</sup>。催化剂流动与气固动量传递、相间接触效率高度相关，聚团存在可使气固接触效率降低 15% - 30%，大幅劣化两相接触效果，厘清催化剂流动规律、解析聚团形成机制，是优化提升管反应器性能、保障反应稳定性的核心研究前提。如图 1。

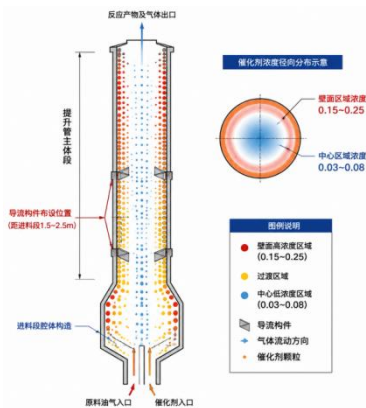


图 1 提升管反应器结构与催化剂径向分布示意图

## 2 提升管内催化剂流动运行影响因素探究

### 2.1 设备结构对催化剂流动状态的作用

提升管设备结构属于决定催化剂流动分布与聚团行为的关键因素，反应器直径、进料段构造、导流构件布设均直接调控气固两相的空间分布，提升管直径固定时壁面效应显著，易形成高浓度催化剂环区，浓度可达 0.15 - 0.25，中心稀相区浓度仅 0.03 - 0.08，径向分布不均度超 40%，进料段腔体若结构不合理会造成局部催化剂堆积，堆积区浓度可至 0.3 以上，加剧聚团生成，聚团直径多集中在 5 - 20mm，导流构件则通过分流与扰流作用打破壁面高密聚集区，使径向浓度差降至 20% 以内，聚团直径缩减 30% 以上，有效弱化环-核结构并提升催化剂流动均匀性。

### 2.2 工艺参数对催化剂输送效率的影响

工艺参数直接决定催化剂输送速率与气固相间动量传递效率，物料输送速率、循环通量、反应负荷均为关键调控指标，催化剂循环通量维持在 100 - 300kg/(m<sup>2</sup> · s) 区间时输送效率最优，低于 100kg/(m<sup>2</sup> · s) 易出现稀相输送不连续，高于 300kg/(m<sup>2</sup> · s) 则引发局部滞流、输送效率下降 15% - 20%，物料供给速率匹配性直接影响催化剂停留时间，速率偏差超过 10% 时轴向浓度梯度突变、输送稳定性降低，反应负荷波动超过 15% 会打破气固动量平衡，滑移速率波动幅度增大、相间曳力失衡、输送效率衰减 10% - 25%，需精准匹配参数以保障稳定输送、减少无效循环与能耗损耗，保证输送连续性 & 运行经济性。

### 2.3 介质工况对催化剂运动轨迹的作用

介质流速与温度等工况条件通过调控气固间相互作用力，直接改变催化剂运动轨迹及扩散特性，介质表观流速维持在 5 - 9m/s 时催化剂轨迹趋于均匀，流速低于 5m/s 则壁面回流加剧、贴壁运动占比超 60%，高于 9m/s 时中心气流裹挟作用过强、轨迹偏移度增大、径向扩散减弱且颗粒碰撞磨损加剧<sup>[2]</sup>。介质温度控制在 700 - 800K 区间可保持气固密度差稳定，催化剂运动轨迹波动幅度小于 15%，温度偏离该区间则气固密度差突变、相间曳力异常、轨迹紊乱度提升 30% 以上，壁面聚团概

率明显增加,进而直接影响催化剂分布与接触效率,降低反应稳定性及产品选择性。

### 3 提升管反应器催化剂流动优化调控路径

#### 3.1 改良反应器内部结构布局形式

(1) 优化进料段腔体构造: 进料段作为催化剂与油气初始混合的核心区域,腔体构造不合理容易引发局部涡流、催化剂团聚以及聚团生成,直接破坏提升管初始流场的均匀性,传统直筒式进料段常因射流冲击形成局部高压区,导致催化剂浓度在局部骤升至 0.25 - 0.30、聚团直径扩大至 15 - 20mm,油气与催化剂接触效率降低 20% - 25%。优化进料段腔体需采用渐扩式或异形过渡结构以缩小射流冲击范围、降低局部浓度偏差,使进料段径向催化剂浓度差控制在 12%以内,腔体内部增设微扰结构则可打散初始形成的小聚团,将聚团直径缩减至 5 - 10mm、避免聚团随流进入提升主体段,同时合理控制腔体高径比维持在 1.2 - 1.5 区间,平衡油气喷射速度与催化剂下落速率、减少局部滞流区,让催化剂均匀进入提升管,从源头削弱环-核分布的生成条件,为物料平稳流动筑牢基础。

(2) 调整导流构件布设位置: 导流构件属于打散壁面高浓度催化剂聚团、改善径向分布的关键结构,布设位置直接决定扰流效果与流场调控范围,构件过近进料段容易干扰初始混合并加剧局部涡流,过远则无法有效干预壁面聚团、壁面催化剂浓度仍维持在 0.18 - 0.25 且聚团聚集现象难以缓解。合理布设位置应距进料段 1.5 - 2.5m,避开初始混合区并精准作用于壁面聚团高发区域,通过分流扰流打破壁面致密催化剂层,将壁面浓度降至 0.08 - 0.12、径向浓度偏差控制在 15%以内,构件间距需匹配提升管管径并控制在 0.8 - 1.2 倍管径,避免间距过小增大流动阻力(压降增幅不超过 8%)或间距过大导致扰流失效,同时将构件布置于提升管中下部聚团富集区,可强化径向气流运动、增强气固湍动、减少催化剂贴壁停留时间,降低壁面聚团生成概率,使催化剂在径向实现均匀分布,提升整体流动稳定性与接触效率。

#### 3.2 合理调配现场实际运行工艺参数

(1) 调控物料输送供给速率: 物料输送供给速率直接决定催化剂循环通量与气固动量平衡,属于稳定催化剂流动、避免偏流及沉积的核心工艺指标,供给速率偏低时,催化剂循环通量低于  $100\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,气体携料能力不足,提升管下部容易形成催化剂堆积并让局部固含率可达 0.25 以上,轴向浓度梯度骤增、流动稳定性显著下降。速率过高时循环通量超过  $300\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,气固两相摩擦阻力陡增、催化剂输送阻力上升,颗粒碰撞加剧且磨损增大,同时容易引发上部稀相区催化剂稀释与分布不均,径向浓度偏差扩大至 35%以上。精准调控供给速率使催化剂循环通量稳定在  $150 - 250\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,可平衡气固携带能力与摩擦阻力,轴向固含率梯度控制在 0.03 - 0.05/m、

径向浓度偏差低于 20%,既避免底部堆积又防止上部稀疏,保障催化剂沿提升管均匀输送并维持稳定的流动循环状态,为气固接触提供良好条件。

(2) 匹配整体反应运行负荷: 反应运行负荷决定油气生成量、气固相互作用强度以及催化剂停留时间,负荷失衡会打破气固流动平衡并引发催化剂流动紊乱、输送效率下降,负荷过低时油气生成量不足、介质流速低于 6m/s,气体携带能力减弱、催化剂沉降速率提升,壁面回流加剧使贴壁催化剂浓度升至 0.20 - 0.25、聚团生成概率增加,催化剂停留时间延长容易导致局部积炭与活性下降。负荷过高时油气量激增、介质流速超过 9m/s,气流湍动过强使催化剂被过度裹挟、停留时间缩短 25%以上,油气与催化剂接触不充分,同时颗粒湍动加剧、碰撞损耗上升、径向分布紊乱度提升 30%<sup>[3]</sup>。合理匹配运行负荷并维持负荷波动幅度不超过 15%,可使介质流速稳定在 6 - 9m/s、催化剂停留时间控制在 2 - 3s,既避免低负荷沉降聚团又防止高负荷湍动紊乱,保障催化剂均匀分布与高效输送,兼顾流动稳定性与接触效率,从而提升反应器整体运行效能。

#### 3.3 调整反应体系内部介质运行条件

(1) 把控介质流通输送速度: 介质流通输送速度属于调控催化剂运动轨迹、抑制聚团生成以及平衡气固携带与沉降的核心参数,速度偏低时气体携带能力不足、催化剂沉降速率明显提升,壁面回流加剧使贴壁催化剂浓度可达 0.20 - 0.25 并形成致密环层,聚团直径扩大至 15 - 20mm、油气与催化剂接触效率下降 20% - 30%。速度过高则气流湍动过强、催化剂被过度裹挟,径向扩散受限使中心区域催化剂浓度低于 0.03、径向浓度偏差扩大至 40%以上,颗粒碰撞频率激增、磨损损耗加剧、运动轨迹紊乱度上升。合理把控介质流速维持在 6 - 9m/s,可平衡气固相互作用并有效打散 5 - 10mm 的小聚团,壁面浓度降至 0.08 - 0.12、径向浓度偏差控制在 15%以内,催化剂轨迹趋于规整、减少贴壁聚集与中心稀疏现象,保障气固均匀混合与稳定输送,为气固接触创造良好条件。

(2) 稳定体系内部环境温度: 体系内部温度直接影响介质物性、气固曳力以及催化剂运动特性,温度波动容易引发流场紊乱与聚团增多,属于维持催化剂稳定流动的关键工况条件,温度波动超过 50K 时介质黏度发生明显变化、气固曳力系数波动幅度达 25%,催化剂径向扩散能力偏差 18%、运动轨迹稳定性大幅下降。温度偏低时介质密度增大、携带能力减弱,催化剂沉降加剧并增加壁面聚团概率;温度偏高时介质膨胀、流速异常,湍动强度激增导致催化剂分布紊乱、停留时间不均<sup>[4]</sup>。将体系温度稳定在 700 - 800K 区间,可使介质物性保持稳定、气固曳力维持平衡,催化剂径向扩散均匀、轨迹偏折度控制在 10%以内,聚团直径稳定在 5 - 10mm,减少因温度波动引发的流动失衡与接触不均等问题,保障催化剂流动有序、反应稳定高效,从而提升反应器整体运行稳定性。

## 4 催化剂流动优化技术实际应用效能梳理

### 4.1 结构调整后催化剂整体流动状态改善

优化进料段腔体构造并精准布设导流构件后,提升管内催化剂流动均匀性获得系统性改善,渐扩式进料段可有效消除初始射流冲击造成的局部高压区,将进料段局部催化剂浓度从0.30降至0.15以内,从源头抑制15-20mm大颗粒聚团生成,初始聚团直径稳定控制在5-10mm。导流构件精准布设于中下部聚团高发区域,可直接打破壁面0.18-0.25的致密催化剂环层,使壁面浓度降至0.08-0.12、径向浓度偏差从40%以上缩减至15%以内,环-核流动结构被显著弱化。结构调整之后催化剂轴向浓度梯度稳定在0.03-0.05/m,无明显堆积或稀散区域,流动分布更加均匀,聚团生成频率降低30%以上、气固两相混合更为充分,为气固接触提供稳定均匀的环境,流动稳定性与可控性得到明显增强。

### 4.2 参数调配后催化剂输送运行效率提升

精准调控物料输送速率并匹配反应运行负荷后,催化剂输送连续性与效率获得全面提升,物料速率稳定在150-250kg/(m<sup>2</sup>·s)区间可平衡气固携带与摩擦阻力,避免速率过低造成的底部堆积(固含率超0.25)或速率过高引发的上部稀散及颗粒磨损加剧,催化剂输送效率稳定维持在85%-92%、循环通量波动幅度控制在10%以内,输送连续性明显增强。合理匹配反应负荷并将波动幅度控制在15%以内,可使介质流速稳定在6-9m/s、催化剂停留时间维持在2-3s,既避免低负荷下壁面回流加剧与积炭增多,又防止高负荷下接触不充分及磨损上升,输送损耗降低12%-20%。参数优化后催化剂输送过程

更加平稳,通量波动、颗粒磨损、无效循环等问题得到有效缓解,输送效率与经济性同步提升。

### 4.3 介质调控后反应器整体运行性能增强

精准把控介质流速并稳定体系温度之后,反应器流动稳定性、反应效率与运行周期实现协同提升,介质流速稳定在6-9m/s可平衡气固相互作用,既避免低流速(低于5m/s)造成的催化剂沉降与壁面聚团(直径超15mm),又防止高流速(高于9m/s)引发的湍动紊乱及径向扩散不足,气固接触效率提升20%-25%、油气转化更加充分<sup>[5]</sup>。体系温度稳定在700-800K可消除50K以上波动带来的介质物性突变与曳力失衡问题,催化剂轨迹偏折度控制在10%以内、聚团直径稳定在5-10mm,壁面焦炭生成量减少15%-20%、催化剂活性保持更久。介质调控之后反应器内流场更加稳定,油气转化率提升、焦炭产率降低、运行周期延长,整体运行性能与经济性明显增强,为长期高效低耗运行提供稳定保障。

## 5 结语

提升管反应器催化剂流动优化研究显示,设备结构、工艺参数及介质工况构成影响流动均匀性与输送效率的关键要素,优化进料段构造并合理布设导流构件可有效改善催化剂分布、弱化颗粒聚团,精准调控物料速率并匹配反应负荷能够提升催化剂输送稳定性,稳定介质流速与体系温度则可强化气固接触效率、降低焦炭生成。多维度调控能够明显改善流动状态、提升输送效率并增强反应器整体性能,为提升管高效稳定运行提供可靠技术支撑,助力装置提质增效。

### 参考文献:

- [1] 郭蓉,王智峰,侯凯军,等.催化裂化装置提升管反应器数值模拟研究进展[J].石化技术与应用,2025,43(03):249-255.
- [2] 崔凌云,王松江,李国智,等.提升管反应器油剂间传热传质及混合特性研究[J].现代化工,2024,44(S1):322-327+331.
- [3] 徐文杰.重油催化裂解提升管反应器内流动—反应数值模拟研究[D].中国石油大学(北京),2024.
- [4] 白许峰.含内构件提升管内气固流动及反应模拟[D].哈尔滨理工大学,2023.
- [5] 石孝刚,王成秀,高金森,等.提升管反应器介尺度结构影响规律的数值模拟研究[J].化工学报,2022,73(06):2708-2721.