



# 超重力强化精细化工反应流程再造技术原理及应用

初广文<sup>1,2</sup>, 徐涵卓<sup>1,2</sup>, 罗勇<sup>1,2</sup>, 张亮亮<sup>1,2</sup>, 孙宝昌<sup>1,2</sup>, 邹海魁<sup>1,2</sup>, 陈建峰<sup>1,2\*</sup>

1. 北京化工大学教育部超重力工程研究中心, 北京 100029

2. 北京化工大学有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029

\*通讯作者, E-mail: [chenjf@mail.buct.edu.cn](mailto:chenjf@mail.buct.edu.cn)

收稿日期: 2024-06-20; 接受日期: 2024-08-02; 网络版发表日期: 2024-09-25

国家重点研发计划(编号: 2021YFC3001102)资助项目

**摘要** 精细化工在高端制造、特种材料和人类健康等方面发挥着重要作用。然而, 精细化工反应物料大多具有毒性及易燃易爆性, 且已建成工艺通常采用间歇/半间歇操作, 自动化水平低, 存在生产安全隐患。针对已建成的精细化工工艺流程, 通过流程再造实现流程简化、工作物料体积减少、操作方式连续化及本质安全性提升等目标已成为研究热点。基于本课题组的研究工作, 本文提出采用超重力强化精细化工反应流程再造策略, 基于超重力强化传递速率使之与反应速率相匹配的技术原理, 发展了超重力连续化、短流程集成技术, 并以氧化、氟化、偶氮化、烷基化以及氯化等工艺为应用实例, 阐述了超重力强化反应流程再造的成效。

**关键词** 超重力, 精细化工, 流程再造, 本质安全性

## 1 引言

精细化工是化学工业的重要组成部分, 其产品广泛应用于医疗、日用化学品、燃料、涂料、农药等领域, 并在高端制造、特种材料等方面发挥了重要作用。然而, 精细化工涉及的工艺原料、产品、中间体、副产物及废弃物大多具有毒性, 有的兼具易燃易爆性。此外, 已建成的精细化工工艺通常为间歇/半间歇操作, 自动化水平低、缺失安全数据、存在生产安全隐患。氧化、氟化、偶氮化、烷基化及氯化等精细化工工艺被国家应急管理部列为“十八种”重点监管的危险化工工艺。针对此类危险工艺, 采用技术创新/工艺革新的方式提升化工过程本质安全性已成为研究热点。

近年来, 以“绿色、安全、高效、节能”为目标的过程强化技术逐渐成为化工过程发展新趋势<sup>[1-3]</sup>。过程强化技术可分为装备、工艺、材料强化3类<sup>[4]</sup>。其中, 利用转子高速旋转产生离心力场的超重力技术是过程强化领域的典型代表<sup>[5,6]</sup>。超重力技术可提供优异的相间传质特性及微观混合性能<sup>[7,8]</sup>, 该技术已被广泛应用于精馏<sup>[9-11]</sup>、纳米颗粒制备<sup>[12,13]</sup>、废气废水处理<sup>[14-16]</sup>和二氧化碳捕集<sup>[17,18]</sup>等领域。

本研究针对精细化工危险反应工艺特点, 结合超重力过程强化基本理念及技术发展现状, 提出了采用超重力强化传递/混合使之与反应过程匹配的新思路, 发展了超重力强化反应流程再造新技术, 并以氧化、氟化、偶氮化、烷基化及氯化等反应工艺为例, 阐述了超重力强化精细化工反应流程再造的成效。

**引用格式:** Chu GW, Xu HZ, Luo Y, Zhang LL, Sun BC, Zou HK, Chen JF. Higeer-intensified process reengineering in fine chemistry industry: principle and case studies. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 1959–1966, doi: [10.1360/SSC-2024-0134](https://doi.org/10.1360/SSC-2024-0134)

## 2 精细化工及生产安全现状

精细化工生产过程涉及众多复杂快速反应过程, 如氯化、磺化、氧化等。这类化学反应通常通过分子有效碰撞发生<sup>[19]</sup>, 其反应速率受反应场所即反应器内浓度、温度等参数影响, 反应器内物质温度、浓度时空分布均匀性对精细化工复杂快速反应过程选择性及收率提高至关重要<sup>[20]</sup>。然而, 受反应器传质及混合速率限制, 精细化工工艺放大过程存在放大效应, 即放大过程中因分子混合状态发生变化导致选择性降低, 从而引起高物耗、高能耗、高污染的问题, 甚至因分子混合状态发生变化导致局部浓度不均, 使反应器内存在“热点”、爆聚等安全风险, 这些问题在间歇/半间歇操作的反应器中体现得更为突出。针对上述问题, 国务院印发了《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》, 该意见要求加快实现危险化学品安全生产治理体系和治理能力现代化, 提出了加强源头治理新思路。从源头出发实现精细化工过程“本质安全化”, 是进一步推动危险工艺安全生产的有力保障。

## 3 本质安全提升途径

“本质安全”概念由英国特雷弗·克莱茨(Trevor Kletz)于1976年提出, 其思想是从过程的源头永久消除风险, 而不是单纯依靠控制系统、报警系统和连锁系统的使用等来降低事故发生的概率和事故后果的严重程度<sup>[21]</sup>。

### 3.1 本质安全与过程强化

随着对化工危险工艺安全要求的不断提升, 本质安全逐渐发展为通过优化材料、化学过程和工艺设计从本质上减少或消除客观危害, 通过全生命周期过程管理减少人为失误, 降低或消除事故风险。本质安全的基本原理可归纳为最小化(减少危险物质数量)、替代(用危险性小的物质替代)、缓和(缓和温度、压力等反应条件)以及简化(简化设计操作, 减少人为失误)。针对精细化工行业生产安全问题, 通过新技术/新工艺的研发进一步提升过程本质安全性已成为研究热点。

过程强化技术是指通过提高化工过程传递或反应速率, 实现传递速率与反应速率匹配、传热性能与产热速率匹配、停留时间与反应速率匹配、反应器形式

与反应类型匹配。过程强化基本理念在于显著减小反应器体积(降低持液量), 提升混合传质效率(无/减少溶剂), 大幅提高传递相界面积(降温、降压), 有助于实现连续化(缩短工艺流程, 便于自动控制)。过程强化的理念与本质安全基本原理中的最小化、替代、缓和、简化等要求具有很高的契合度。由此可以预见, 如果将过程强化技术应用于精细化工领域, 将有助于实现本质安全性的提升。

### 3.2 流程再造

随着科技进步, 对于已建成的精细化工工艺流程而言, 流程再造是提升其本质安全化水平的重要途径之一。所谓流程再造是指基于技术进步实现流程简化、工作物料体积减少、操作方式连续化等目标, 从而在源头上减少或消除危害, 提升本质安全化水平。事实上, 通过工艺流程简化以及操作方式连续化实现流程再造已有实际案例报道<sup>[22~24]</sup>。以甲基叔丁基醚(MTBE)生产为例, MTBE生产过程中分离段工艺通常包括C<sub>4</sub>脱除塔、水洗塔及甲醇分馏塔, 如图1所示, 设备流程及工艺复杂<sup>[24]</sup>。

图2为蒸馏与渗透气膜集成流程再造工艺。流程再造后, 采用1个集成工艺塔即可实现传统蒸馏-水洗工艺中3个塔的功效, 有效减少设备用量, 实现了简化流程的目的<sup>[24]</sup>。

除了上述案例之外, 基于过程强化技术的发展, 利用过程强化技术实现流程再造, 有望在源头上减少或消除危害, 提升本质安全化水平。本文以超重力技术作为过程强化技术典型代表, 阐述了超重力强化精细化工反应流程再造技术原理及应用实例。

## 4 超重力强化精细化工反应流程再造

精细化工快速复杂反应通常对核心反应器内传质/混合速率提出了更高的要求, 以匹配其反应速率。然而, 受地球重力场限制, 传统反应器装备存在分子混合慢、时空效率低等问题。源于宇航试验, 美国于1979年提出了超重力分离强化技术。陈建峰教授基于分子混合反应理论研究, 于1994年原创性地提出了超重力反应强化技术<sup>[5]</sup>。超重力反应器内可模拟形成超过重力加速度(通常为10~1000g)的环境, 由此突破传统反应器中地球重力场的限制, 成为强化传质/混合过

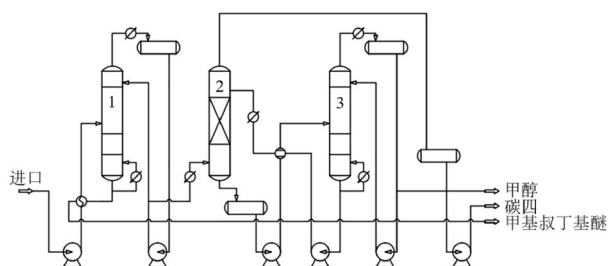


图 1 传统蒸馏-水洗工艺: 1-C<sub>4</sub>脱除塔; 2-水洗塔; 3-甲醇分馏塔

Figure 1 Diagram of conventional distillation and water washing process: 1-C<sub>4</sub> distillation column; 2-water scrubbing column; 3-methanol recovery column.

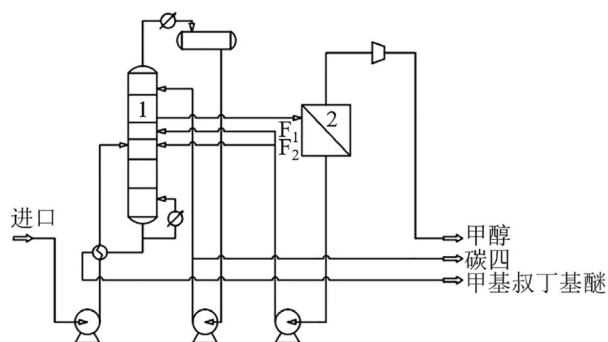


图 2 蒸馏与渗透气化膜集成流程再造工艺: 1-C<sub>4</sub>脱除塔; 2-渗透气化膜

Figure 2 Diagram of integrated process reengineering of distillation and pervaporation: 1-C<sub>4</sub> distillation column; 2-PVAP.

程的有效手段。

超重力技术的典型设备为旋转填充床, 气液逆流体系旋转填充床的工作原理如图3所示<sup>[13]</sup>。转子高速旋转将液相分散雾化, 提高相间接触面积和更新速率, 从而强化传质/混合过程, 进而能有效提升反应选择性/收率, 同时缩减反应器体积。

#### 4.1 超重力强化实现流程再造技术原理

超重力强化实现流程再造的技术原理在于强化传递速率使之与本征反应速率协调匹配, 从而解决快速复杂反应体系中传质/混合速率与反应不匹配, 引起产品收率和选择性变差, 导致运行不稳定及危险废弃物增多等问题。

面向最大限度地降低精细化工领域快速复杂反应体系的安全风险, 以传递过程强化为目标, 深入认知超重力反应器结构和操作参数与传质/混合强化效果之

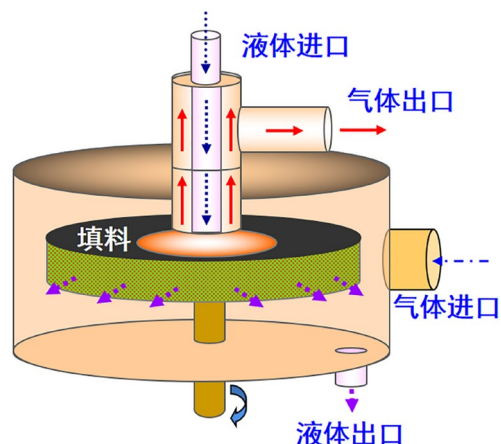


图 3 (网络版彩图)气液体系旋转填充床工作原理图

Figure 3 (Color online) Schematic of rotating packed bed for G-L system.

间的关系是首要解决的问题。结合科学实验<sup>[25,26]</sup>、理论模型<sup>[27,28]</sup>及模拟分析<sup>[29,30]</sup>等手段, 已形成超重力反应器内传质/混合性能评价及优化、成套化技术。面向气-液反应过程, 结合经典水脱氧<sup>[26]</sup>、臭氧-水<sup>[31,32]</sup>、二氧化碳-氢氧化钠<sup>[7,33]</sup>、二氧化硫-氢氧化钠<sup>[34]</sup>等体系获得传质参数, 指导超重力反应器内液体分布器形式优选<sup>[35,36]</sup>、填料结构优化<sup>[26,37]</sup>、内构件优化<sup>[15]</sup>。面向液-液反应过程, 采用碘化物-碘酸盐体系<sup>[38-40]</sup>、乙酰水杨酸-氢氧化钠模型反应体系评价混合性能<sup>[41]</sup>, 探究其与反应匹配关系。通过高速摄影技术<sup>[42,43]</sup>、光学探针技术<sup>[44]</sup>、数值模拟技术<sup>[29,30]</sup>并结合电导率仪、高效液相色谱等分析手段, 研究了液相中液体微元形态、电导率、物质组成等随操作参数的变化, 结合理论分析<sup>[45-47]</sup>, 阐明了超重力强化传质/混合与反应协调匹配机制。表1对比了超重力反应器与传统反应器的特征参数。对比研究表明, 超重力反应器内远高于常规塔/搅拌釜的离心加速度使其可以极大提升相间滑移速度, 同时减少液体微元尺寸, 反应器内分子级混合和传质速率快约100倍, 应用于“受混合/传质控制的精细化工快速复杂反应体系”的强化, 具有表观反应速度快、选择性高、放大效应小等优势。应用于部分强放热反应体系, 有助于缓减反应器内“热点”、爆聚等安全风险, 并可通过外循环或原位惰性溶剂蒸发和冷凝等方式及时将反应热移出, 从而控制反应工艺温度。

基于上述超重力技术特点和原理, 面向精细化工危险工艺, 发展了装备和工艺过程的组合/耦合手段,

表 1 超重力反应器与传统反应器特征参数对比

Table 1 Comparison of characteristic parameters between Higee and traditional reactors

| 对比项           | 常规塔/搅拌釜 | 超重力      |
|---------------|---------|----------|
| 重力加速度倍数       | 1       | 10~1000  |
| 液相速度/(m/s)    | 1~3     | 10~30    |
| 液滴/膜尺寸/mm     | ~1      | ~0.1     |
| 能量耗散速率/(W/kg) | 1~10    | 100~5000 |
| 传质单元高度/cm     | 10~100  | 2~8      |
| 分子级混合特征时间/ms  | 1~100   | 0.01~0.1 |
| 停留时间/s        | >10     | ~1       |

研发了连续化、短流程工业化集成技术<sup>[31,48]</sup>, 并应用于氧化、氟化、偶氮化、烷基化、氯化等危险工艺反应过程流程再造, 提升了过程安全化水平. 下面以几个典型的应用实例阐述流程再造的成效.

4.2 应用实例

4.2.1 氧化工艺

氧化反应是应用于精细化工行业中的一类重要反应, 其可以将石油化工原材料进一步转化为有用的产品<sup>[49]</sup>. 然而, 氧化反应工艺原料及产品通常具有燃爆危险性. 以氧化反应生产染料中间体亚硝酰硫酸为例, 其反应方程式为式(1)<sup>[50]</sup>. 传统工艺采用气相法多釜串联工艺, 由于该反应为强放热反应, 反应釜内存在局部温度过高导致亚硝酰硫酸分解问题, 分解排放的SO<sub>x</sub>及NO<sub>x</sub>等有毒尾气造成环境污染, 甚至产生安全事故.



利用超重力强化氧化反应流程再造技术进行技术改造, 表2展示了超重力强化氧化反应流程再造生产亚硝酰硫酸的成效. 采用超重力强化技术, 1条生产线即可达到原3条生产线的产能, 生产效率大幅提升, 反应器体积下降约95%, 并且流程再造后硝酸残值下降80%, 质量指标更加稳定, 反应工艺过程本质安全性得到了显著提升.

4.2.2 氟化工艺

氟化反应速度快且其反应物料、产品、中间体、副产物及废弃物大多具有毒性, 有的兼具易燃易爆危险性. 以含氟制冷剂三氟乙烷(R143a)的制造为例, 其

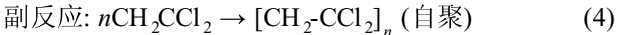
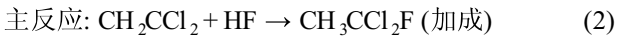
表 2 超重力强化氧化反应生产亚硝酰硫酸对比成效<sup>a)</sup>

Table 2 Higee intensified oxidation reaction to produce nitrosyl sulfuric acid<sup>a)</sup>

| 项目    | 技改前  | 技改后  | 成效     |
|-------|------|------|--------|
| 反应器体积 | 1.00 | 0.05 | 下降95%  |
| 单线产能  | 1    | 3    | 提升200% |
| 硝酸残值  | 1.0  | 0.2  | 下降80%  |

a) 表中数据以技改后6万吨/年产能计, 具体数据为相对值

主反应如式(2), (3)所示, 反应过程会发生如式(4)所示自聚副反应<sup>[51]</sup>.



R143a传统生产工艺采用釜式反应器进行, 因釜式反应器效率低, 生产过程中釜内积累大量高危氢氟酸, 本质安全问题突出. 同时, 副产物包裹导致催化剂失活, 需频繁停车更换催化剂, 导致氢氟酸泄漏风险增大. 除此之外, 自聚产生大量高沸副产物, 加上失活催化剂, 产生大量危险废弃物. 上述问题使得R143a生产过程存在严重安全隐患.

采用超重力技术对R143a生产过程进行流程再造, 取得的成效如表3所示. 相较于原反应釜工艺, 反应器体积下降了61.5%, 物料在核心装备中停留时间以及持液量均下降了61.1%, 单线产能提升了250%, 危险废弃物泄放量下降81%. 采用超重力强化流程再造实现了核心反应器小型化、操作方式连续化及危险废弃物减量化, 显著提升了氟化反应工艺过程本质安全性.

4.2.3 偶氮化工艺

偶氮化反应广泛用于染料及色素等原料的生产过程<sup>[52]</sup>. 传统偶氮化工艺采用间歇反应器, 产品质量波动大、能耗高、三废多. 以分散橙288生产装置为例, 传统多釜并联生产工艺, 流程复杂、控制水平较低. 采用超重力强化技术对传统工艺进行流程再造, 工业装置如图4所示. 流程再造后, 偶氮化反应器体积较釜式反应器降低98%, 生产过程物料存量下降了90%以上, 单位产品能耗和废水量均下降了20%以上, 实现了连续化操作, 从源头上提升工艺过程本质安全化水平. 超重力偶氮化反应器装备新技术已被列入工业和信息



表 3 超重力强化R143a生产装置流程再造成效<sup>a)</sup>

Table 3 Hige-intensified process reengineering for R143a production<sup>a)</sup>

| 项目       | 技改前   | 技改后   | 成效      |
|----------|-------|-------|---------|
| 反应器体积    | 1.000 | 0.385 | 下降61.5% |
| 持液量      | 1.000 | 0.389 | 下降61.1% |
| 单线产能     | 1.00  | 3.48  | 提升250%  |
| 危险废弃物泄放量 | 1.00  | 0.19  | 下降81%   |

a) 表中数据以技改后1万吨/年产能计, 具体数据为相对值



图 4 (网络版彩图)超重力强化分散橙288生产流程再造装置

Figure 4 (Color online) Hige-intensified process reengineering device for 288 orange production.

化部印发的《石化化工行业鼓励推广应用的技术和产品目录》。

#### 4.2.4 烷基化工艺

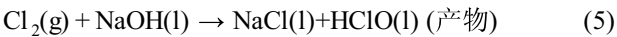
烷基化工艺是指将烷基基团引入到有机化合物中, 形成新的烷基化合物的工艺。在精细化工领域, 烷基化工艺主要用于生产表面活性剂、染料等精细化工产品。

以染料分散蓝291中间体3-(N,N-二烯丙基)氨基-4-甲氧基乙酰苯胺生产工艺为例<sup>[53]</sup>, 该产品生产过程原工艺采用反应釜, 且为间歇操作。采用超重力强化烷基化反应流程再造后装置如图5所示, 原间歇操作改为连续操作。同时, 采用1台超重力设备加3个反应

釜即可替代原工艺12个反应釜, 有效简化工艺流程。对于烷基化工艺, 超重力强化反应流程再造主要从操作方式连续化的角度提升了过程本质安全性。

#### 4.2.5 氯化工艺

除上述工艺之外, 氯化工艺同样也是精细化工行业重要工艺之一。以氯化反应生产次氯酸为例, 其主反应方程式如式(5)所示<sup>[54]</sup>, 氯气与氢氧化钠快速反应生成次氯酸。在生成所需产物后, 需对次氯酸快速解吸, 以防止次氯酸发生式(6)反应, 生成次氯酸钠。



采用超重力强化氯化反应流程再造, 原反应单元核心装备为塔式反应器, 直径为6 m, 高30 m, 原料处理量为100万吨/年; 采用超重力强化氯化反应流程再造后, 反应单元的核心装备为超重力反应器, 直径为3 m, 高3 m。如表4所示, 设备投资节省70%, 产率提高12.5%, 氯气循环量减少50%, 持液量降低90%。对于氯



图 5 (网络版彩图)超重力强化分散蓝291中间体生产流程再造装置

Figure 5 (Color online) Hige-intensified process reengineering device for disperse blue 291 intermediate production.

表 4 超重力强化次氯酸生产装置流程再造成效<sup>a)</sup>

Table 4 Hige-intensified process reengineering for HClO production

| 项目    | 技改前 | 技改后 | 成效      |
|-------|-----|-----|---------|
| 设备投资  | 1.0 | 0.3 | 节省70%   |
| 产率    | 0.8 | 0.9 | 提高12.5% |
| 氯气循环量 | 1.0 | 0.5 | 减少50%   |
| 持液量   | 1.0 | 0.1 | 降低90%   |

a) 表中数据以处理量100万吨/年计, 具体数据为相对值

化工艺, 采用超重力强化反应流程再造, 主要从核心反应器小型化的角度提升了工艺过程本质安全性。

## 5 总结

精细化工领域涉及众多重点监管的危险化工工艺, 针对此类危险工艺, 采用技术创新/工艺革新的方式提升本质安全性已成为研究热点。过程强化技术基本理念与本质安全的基本原理具有很高的契合度, 是精细化工本质安全性提升的有效途径。

超重力技术作为过程强化技术的典型代表之一, 具有高效传质/混合过程强化能力, 已成为提升精细化

工行业危险工艺本质安全性的有效手段。结合精细化工工艺本身特点, 针对性地研发新型反应器、优化内构件及填料结构, 发展基于超重力强化的连续化、短流程集成技术, 实现精细化工反应流程再造, 可有效实现核心反应器小型化、操作方式连续化、危险废弃物减量化, 能够显著提升过程本质安全性。

超重力强化精细化工反应流程再造该技术的发展与推广应用, 将为基于过程强化技术提升危险工艺的本质安全化水平提供示范, 为解决精细化工等领域中广泛涉及的反应强放热、易燃易爆隐患大、生产过程难以控制等难点和痛点问题, 提供切实可行的途径, 并为降低工业领域生产安全隐患提供有效技术支持。

## 参考文献

- 1 Górak A, Stankiewicz A. *Annu Rev Chem Biomol Eng*, 2011, 2: 431–451
- 2 Keil FJ. *Rev Chem Eng*, 2018, 34: 135–200
- 3 Sitter S, Chen Q, Grossmann IE. *Curr Opin Chem Eng*, 2019, 25: 87–94
- 4 Ouyang Y, Heynderickx GJ, Van Geem KM. *Chem Eng Process*, 2022, 181: 109164
- 5 Chu GW, Zou HK, Zeng XF, Wang JX, Chen JF. *J Beijing Univ Chem Technol*, 2018, 45: 33–39 (in Chinese) [初广文, 邹海魁, 曾晓飞, 王洁欣, 陈建峰. 北京化工大学学报(自然科学版), 2018, 45: 33–39]
- 6 Guo ZD, Su MJ, Liu HX, Li YJ, Qing YC, Luo Y, Chu GW, Chen JF. *Chem Ind Eng Prog*, 2018, 37: 1335–1346 (in Chinese) [郭正东, 苏梦军, 刘含笑, 李亚军, 庆轶朝, 罗勇, 初广文, 陈建峰. 化工进展, 2018, 37: 1335–1346]
- 7 Luo Y, Chu GW, Zou HK, Wang F, Xiang Y, Shao L, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2012, 51: 9164–9172
- 8 Yang HJ, Chu GW, Zhang JW, Shen ZG, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2005, 44: 7730–7737
- 9 Luo Y, Chu GW, Zou HK, Xiang Y, Shao L, Chen JF. *Chem Eng Process*, 2012, 52: 55–62
- 10 Chu GW, Gao X, Luo Y, Zou HK, Shao L, Chen JF. *Sep Purif Tech*, 2013, 102: 62–66
- 11 Agarwal L, Pavani V, Rao DP, Kaistha N. *Ind Eng Chem Res*, 2010, 49: 10046–10058
- 12 Chen B, Sun Q, Wang D, Zeng XF, Wang JX, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59: 2960–2967
- 13 Chen JF, Wang YH, Guo F, Wang XM, Zheng C. *Ind Eng Chem Res*, 2000, 39: 948–954
- 14 Wen ZN, Li YB, Xu HZ, Sun BC, Zou HK, Chu GW. *Sep Purif Tech*, 2022, 287: 120536
- 15 Liu ZH, Xu HZ, Li YB, Luo Y, Zhang LL, Chu GW. *Chem Eng J*, 2022, 430: 132671
- 16 Chu GW, Luo Y, Shan CY, Zou HK, Xiang Y, Shao L, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 15731–15737
- 17 Zhang LL, Wang JX, Liu ZP, Lu Y, Chu GW, Wang WC, Chen JF. *AIChE J*, 2013, 59: 2957–2965
- 18 Wen ZN, Xu HZ, Li YB, Zhang LL, Zou HK, Chu GW, Chen JF. *Sep Purif Tech*, 2023, 305: 122510
- 19 Wang Y, Dong Y, Zhang L, Chu G, Zou H, Sun B, Zeng X. *Sep Purif Tech*, 2021, 269: 118714
- 20 Ma SY, Xu HZ, Zhang LL, Sun BC, Zou HK, Luo Y, Chu GW. *CIESC J*, 2024, 75: 724–742 (in Chinese) [马韶阳, 徐涵卓, 张亮亮, 孙宝昌, 邹海魁, 罗勇, 初广文. 化工学报, 2024, 75: 724–742]
- 21 Hansson SO. *Process Saf Environ Protect*, 2010, 88: 168–172
- 22 Wiederkehr H. *Chem Eng Sci*, 1988, 43: 1783–1791
- 23 Di Miceli Raimondi N, Olivier-Maget N, Gabas N, Cabassud M, Gourdon C. *Chem Eng Res Des*, 2015, 94: 182–193
- 24 Chen HL, Qian ZH, Chen FQ, Song LM. *CIESC J*, 1999, 50: 851–855 (in Chinese) [陈欢林, 钱志海, 陈丰秋, 宋礼明. 化工学报, 1999, 50: 851–855]
- 25 Zheng XH, Chu GW, Kong DJ, Luo Y, Zhang JP, Zou HK, Zhang LL, Chen JF. *Chem Eng J*, 2016, 285: 236–242

- 26 Wen ZN, Wu W, Luo Y, Zhang LL, Sun BC, Chu GW. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59: 16043–16051
- 27 Sang L, Luo Y, Chu GW, Sun BC, Zhang LL, Chen JF. *AIChE J*, 2019, 65: e16595
- 28 Liu W, Chu GW, Luo Y, Liu YZ, Meng FY, Sun BC, Chen JF. *Chem Eng J*, 2019, 369: 600–610
- 29 Wen ZN, Li YB, Liu W, Luo Y, Zhang LL, Chu GW. *Chem Eng Sci*, 2022, 248: 117147
- 30 Wang Y, Li YB, Su MJ, Chu GW, Sun BC, Luo Y. *Chem Eng Sci*, 2021, 240: 116675
- 31 Liang C, Zhu YG, Sun BC, Chu GW, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2023, 62: 8444–8453
- 32 Gao HL, Wen ZN, Sun BC, Zou HK, Chu GW. *Chem Eng Process*, 2022, 176: 108946
- 33 Chu GW, Luo Y, Xing ZY, Sang L, Zou HK, Shao L, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2014, 53: 18580–18584
- 34 Su MJ, Luo Y, Chu GW, Liu W, Zheng XH, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2018, 57: 4743–4747
- 35 Yang K, Chu GW, Shao L, Luo Y, Chen JF. *Chem Eng J*, 2009, 153: 222–226
- 36 Li YB, Wen ZN, Xu HZ, Chu GW, Zhang LL, Chen JF. *Chem Eng Sci*, 2022, 260: 117854
- 37 Wen ZN, Li YB, Xu HZ, Xu YC, Sun BC, Zou HK, Chu GW. *Chem Eng J*, 2023, 451: 139094
- 38 Chu GW, Song YJ, Zhang WJ, Luo Y, Zou HK, Xiang Y, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2015, 54: 1697–1702
- 39 Chu GW, Song YH, Yang HJ, Chen JM, Chen H, Chen JF. *Chem Eng J*, 2007, 128: 191–196
- 40 Luo Y, Luo JZ, Yue XJ, Song YJ, Chu GW, Liu Y, Le Y, Chen JF. *Chem Eng J*, 2018, 331: 510–516
- 41 Zhang YD, Zhang LL, Xiong XY, Su YL, Chu GW, Chen JF. *Chem Eng Sci*, 2023, 280: 119102
- 42 Liu ZH, Xu HZ, Chen WC, Li YB, Zhang LL, Chu GW. *Chem Eng Sci*, 2022, 251: 117495
- 43 Xu YC, Li YB, Liu YZ, Luo Y, Chu GW, Zhang LL, Chen JF. *AIChE J*, 2019, 65: 16597
- 44 Xu HZ, Liu ZH, Li YB, Zhang LL, Chu GW, Chen JF. *Chem Eng Sci*, 2024, 293: 120054
- 45 Chen WC, Liu ZH, Chu GW, Zhang LL, Chen JF. *AIChE J*, 2023, 69: 18106
- 46 Liu W, Luo Y, Liu YZ, Chu GW. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59: 5114–5123
- 47 Liu W, Luo Y, Li YB, Chu GW. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59: 5124–5132
- 48 Zhu YG, Fei XF, Li YB, Sun BC, Chu GW, Chen JF. *Sep Purif Tech*, 2024, 333: 125918
- 49 Pei DY, Su MJ, Wang YY, Chu GW, Luo Y, Chen JF. *Chem Eng Process*, 2020, 149: 107842
- 50 Tang ZY, Wang LH, Liao HL, Zhang X, Zou HK, Luo Y, Chen JF. *Ind Eng Chem Res*, 2023, 62: 17194–17200
- 51 Ding Q, Li MY, Chen KF, Luo, MF. *Organo-Flurine Ind*, 2010, 4: 24–29 (in Chinese) [丁芹, 李明月, 陈科峰, 罗孟飞. 有机氟工业, 2010, 4: 24–29]
- 52 Shah HUR, Ahmad K, Naseem HA, Parveen S, Ashfaq M, Aziz T, Shaheen S, Babras A, Shahzad A. *J Mol Struct*, 2021, 1244: 131181
- 53 Li YH, Li JF. *Chem Ind Times*, 2006, 20: 30–32 (in Chinese) [李耀华, 李佳凤. 化工时刊, 2006, 20: 30–32]
- 54 Neumann K, Gladyszewski K, Groß K, Qammar H, Wenzel D, Górak A, Skiborowski M. *Chem Eng Res Des*, 2018, 134: 443–462

## Higee-intensified process reengineering in fine chemistry industry: principle and case studies

Guang-Wen Chu<sup>1,2</sup>, Han-Zhuo Xu<sup>1,2</sup>, Yong Luo<sup>1,2</sup>, Liang-Liang Zhang<sup>1,2</sup>, Bao-Chang Sun<sup>1,2</sup>, Hai-Kui Zou<sup>1,2</sup>, Jian-Feng Chen<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Research Center of the Ministry of Education for High Gravity Engineering and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

\*Corresponding author (email: [chenjf@mail.buct.edu.cn](mailto:chenjf@mail.buct.edu.cn))

**Abstract:** Fine chemicals have played an important role in fields such as advanced manufacturing, special materials, and human health. However, the materials involved in fine chemical reactions are mostly characterized by toxic, flammable and explosive. Moreover, the operation is usually in batch/semi-batch mode, which brings low level of automation and potential safety risks. For the established fine chemical processes, it has become a research hotspot to achieve the goals of simplifying the process, reducing the amount of working materials, converting into continuous operation mode, and improving inherent safety via process reengineering. Based on the researches of our group, a strategy of process reengineering for fine chemicals production via Higee technology was proposed. According to the principle that the Higee devices can intensify the transfer rate to match the reaction rate, the Higee-intensified integration technology featuring continuity and short process was developed. Case studies were carried out taking oxidation, fluorination, azotization, alkylation, chlorination and other processes as examples to clarify the effects of Higee-intensified process reengineering.

**Keywords:** Higee, fine chemistry industry, process reengineering, inherent safety

**doi:** [10.1360/SSC-2024-0134](https://doi.org/10.1360/SSC-2024-0134)