

# 基于 PDMS 的甲醇制芳烃数字工厂设计

张 鸿<sup>1</sup>, 郑洁茹<sup>1</sup>, 王俊文<sup>1</sup>, 张 侃<sup>2</sup>, 张 玮<sup>1\*</sup>

(1. 太原理工大学化学工程与技术学院, 山西 太原 030024;

2. 中国科学院山西煤炭化学研究所, 山西 太原 030002)

**摘要:**针对甲醇制芳烃工艺,采用 PDMS 软件对车间进行三维数字化设计,建立土建、设备及管道模型,并检查数据及碰撞错误,提高设计效率,为该项目数字化交付奠定基础,同时为化工数字化发展提供借鉴。

**关键词:**甲醇制芳烃;数字化交付;PDMS

中图分类号:TQ211

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2022)10-0228-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.10.044

## Design of digital plant for methanol to aromatics based on PDMS

ZHANG Hong<sup>1</sup>, ZHENG Jie-ru<sup>1</sup>, WANG Jun-wen<sup>1</sup>, ZHANG Kan<sup>2</sup>, ZHANG Wei<sup>1\*</sup>

(1.College of Chemical Engineering and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2.Institute of Coal Chemistry of Chinese Academy of Sciences, Taiyuan 030002, China)

**Abstract:**PDMS software is utilized to carry out three-dimensional digital design on the workshop in view of methanol to aromatics process, and civil engineering, equipment and pipeline models are established. The data and collision errors are checked, and design efficiency is improved, which lays the foundation for digital delivery of the project, and provides reference for digital development of the chemical industry.

**Key words:** methanol to aromatics; digital delivery; PDMS

我国传统化工行业提质增效、转型发展的有效途径和必由之路是坚持工业化和信息化深度融合,积极推进数字化、网络化及智能化制造与化工产业的深度融合<sup>[1]</sup>。在汽车、机械、造船等离散行业信息化发展较早,取得了较好的效益的背景下,当前国内化工行业面临更严峻的挑战:市场环境的波动、优等品的生产、工厂设计要求的提高、环保及安全问题突出等,国家针对化工行业制定了更为严格的规章制度,使得企业必须提高设计、生产及管理效率,提升自身信息化程度,向高质量发展阶段迈进<sup>[2]</sup>。

化学工业的发展经过机械化、电气化的发展历程后目前处于数字化发展新阶段,实现全面数字化转型升级是“两化融合”的基础<sup>[3]</sup>,数字化工厂建设成为发展主旋律,包含数字化交付、动态运营数据及数字化平台 3 部分。数字化交付是以工厂对象为核心,对工程项目建设阶段产生的静态信息进行数字化创建直至移交的工作过程<sup>[4]</sup>,交付物由三维模型、智能 P&ID、文档、关联关系组成;运营数据指工厂生产过程中的动态信息,来源于现场采集及监控系统;数字化平台承载并管理工程项目的数字化内容,与工厂生产、市场销售相连接,覆盖工厂全生命

周期<sup>[5]</sup>。创建数字化工厂的源头和核心技术是建立物理工厂的三维模型<sup>[6]</sup>,三维工厂作为化工数字化交付的重要组成部分与实际工厂互为映射,实现工厂信息可视化,提高工厂管理效率与数字化水平。

三维工厂模型创建过程分为生产工艺或需求、车间二维模型、工厂三维模型及模型验证 4 步,物理工厂的建设宜保持同步。生产工艺或需求阶段应明确企业发展目标,制定发展方案,确定工艺路线,评估项目可行性等,为工厂建设规划蓝图;二维模型阶段完成二维设计,根据工艺参数计算设备尺寸,按照布置要求完成车间布置;三维模型阶段将车间二维平面整合设计为工厂三维模型,包括土建结构、管道布置、公用工程及安全防护等内容;模型验证阶段进行模型的检查并修正,可通过物理工厂不断验证数字化模型,而模型同时指导物理工厂的建设<sup>[7]</sup>。

煤基甲醇制芳烃工艺作为非石油路线生产 BTX 的新方法,其发展能够开拓煤化工下游路线,提高甲醇附加值,缓解我国石油对外依存度高的现状。本文中利用 PDMS 软件对该工艺车间进行数字化三维设计,建立结构、设备及管道模型,后续可以此为基础完成数字化交付,建设数字化工厂。

收稿日期:2021-11-30;修回日期:2022-07-24

基金项目:山西省重点研发计划项目(201903D121027)

作者简介:张鸿(1999-),男,硕士生;张玮(1973-),女,博士,教授,研究方向为机器学习建模,通讯联系人,zhangwei01@tyut.edu.cn。

## 1 生产工艺或需求

甲醇制芳烃(methanol to aromatics)是利用煤基甲醇生产以 BTX 为主的芳烃。甲醇市场呈现出产能过剩的局面,而芳烃则供不应求;在我国“富煤贫油少气”的背景下利用煤基甲醇生产芳烃产品的路线能够缓解芳烃生产原料不足的问题,降低生产成本<sup>[8]</sup>,同时以非石油产品生产芳烃改善了我国石油对外依存度高的现状<sup>[9]</sup>。

中科院山西煤化所等单位开发出固定床甲醇制芳烃技术,后续经优化开发出第二代工艺,本文中工艺采用其开发的百吨级固定床绝热反应器两段法 MTA 流程,设计车间三维模型,为后续工艺开发及工业装置数字化建设奠定基础。

甲醇制芳烃(MTA)两段法工艺反应过程可分为 3 步:甲醇脱水生成二甲醚;二甲醚生成低碳烃及低碳烃经环化、芳构化等步骤得到以芳烃为主的烃类产品,同时生成部分  $C_3 \sim C_4$  烃,经分离后可作为液化石油气(LPG)使用;生成的少量甲烷、乙烷可作为生产过程的燃料使用<sup>[10]</sup>。其中第三步反应机理较为成熟;第一步中二甲醚生成机理尚不明确,以 Knozinger 等<sup>[11]</sup>提出的酸碱协同催化及 Kubelkova 等<sup>[12]</sup>提出的酸催化机理为主;低碳烃生成理论研究集中在起始碳键的形成机理上,相关假设包括卡宾、炔池等几十种机理。

该工艺流程如图 1 所示,甲醇储存于储罐中,首先通过甲醇蒸发器气化,与 DME 反应器产物换热后在  $250 \sim 300^\circ\text{C}$  下进入 DME 反应器,在 DME 催化剂的作用下甲醇脱水合成二甲醚。

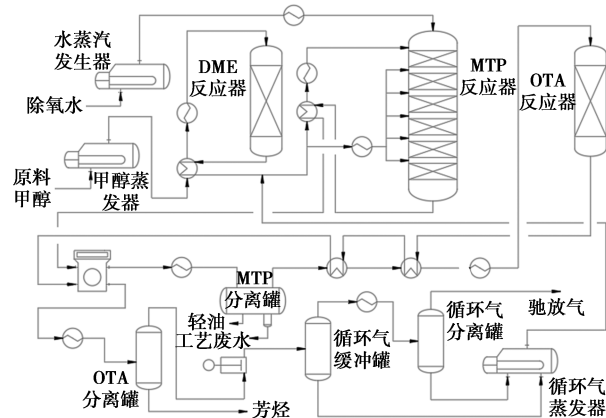


图 1 MTA 工艺流程

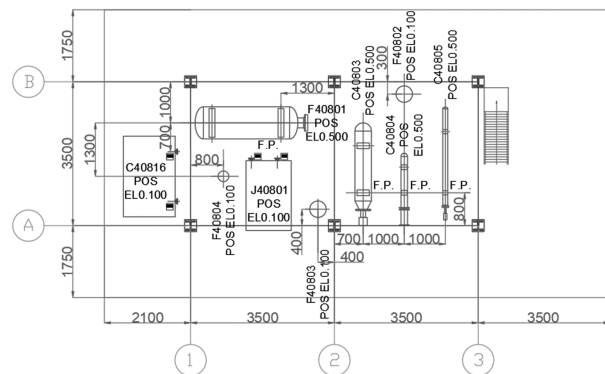
二甲醚与甲醇气换热后与循环气混合,经换热器或 MTP 侧线预热器分 6 路进入 MTP 反应器,同时水经蒸发器气化后按 1:1 摩尔比进入 MTP 反应

器,二甲醚反应得到以烯烃为主,部分烷烃、干气和液相烃的混合物。

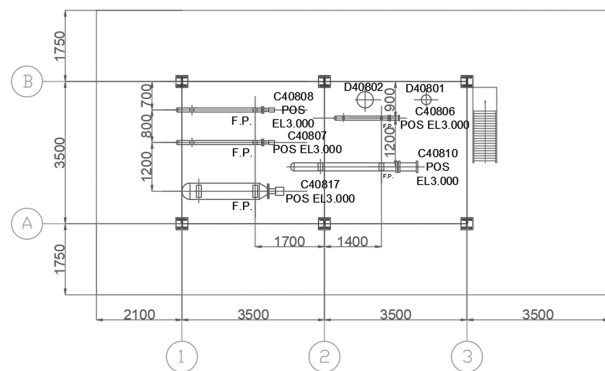
混合物换热、空冷、水冷后,在气液分离器实现气体产物与液体产物、轻质油与工艺水的分离,液体部分为产物水和液态烃的混合物,气体部分经三级预热器后达到约  $400^\circ\text{C}$ ,进入 OTA 反应器,在此反应器内,在 OTA 催化剂的作用下,烯烃链增长、环化、芳构化合成芳烃。OTA 产品经两级换热、空冷、水冷后进入气液分离器进行气液分离,液体部分主要是芳烃,气体主要为氢气、 $C_1 \sim C_4$  烷烃,气体经过循环压缩、制冷分离后氢气、甲烷等轻组分作为驰放气离开系统,液相 LPG 加热气化作为循环气分别与 DME 反应器产物及 MTP 分离器气相产物混合,重新进入反应器参与反应过程。

## 2 车间二维模型

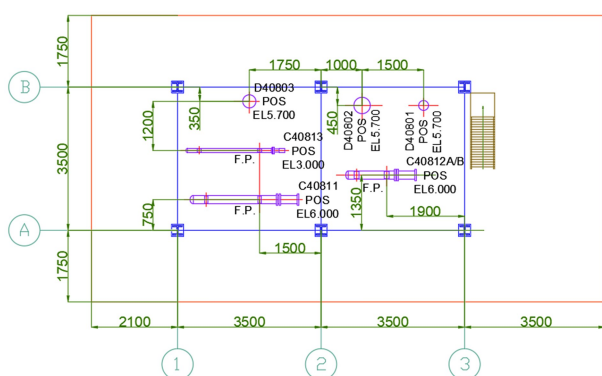
该阶段主要根据工艺参数进行设备部分的设计,按照相关设计标准及工艺参数计算得出。车间布置应满足生产、安装及检修、土建、安全等要求,确定各个设备、通道系统的位置及车间结构尺寸,车间布置如图 2 所示。设计方案中,一层布置制冷模块,压缩机、立式及卧式分离罐、换热器等设备;二层为电加热器及 4 台换热器;三层布置 3 座反应塔及 3 台换热器;四层则为空冷器、换热器等。



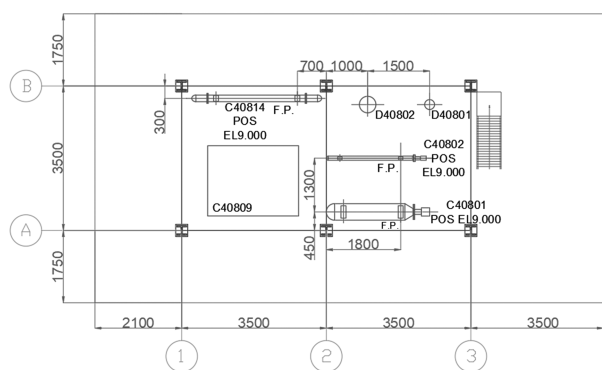
(a) EL±0.000 平面



(b) EL±2.500 平面



(c) EL±5.500 平面



(d) EL±8.500 平面

图 2 MTA 车间布置图

### 3 工厂三维模型

PDMS (plant design management system) 由 AVEVA 公司发布, 作为一款三维工厂设计软件, 具备可视化特点, 相比传统的二维工厂设计方式, 工程师能够更加直观、高效地设计, 同时避免产生较多错误。软件以数据为核心, 拥有独立的数据库, 采用树状结构, 数据库含有独立的规范标准及元件参数, 建模过程可直接调用, 且库中元素命名需唯一且区分大小写。软件可分为 Design 模块、IsoDraft 模块、Paragon 模块、Lexicon 模块等内容, 添加多种工程设计规范及元件库, 并内置数据一致性及碰撞检查等检查方式, 修改数据或碰撞错误。因此该软件能实现全比例三维建模, 管道、电缆、暖通等多专业实时协同设计, 及开放设计环境等功能<sup>[13]</sup>。

#### 3.1 元件库与等级库的建立

元件库与等级库用于存放用户新建的管道元件及等级。PDMS 数据库自带部分标准如 ANSI 等, 在设计过程中若需采用国内标准或数据库所没有的管道材质, 可在 Paragon 模块中新建立所需元件、等级或螺栓数据等, 如不同压力或材质的阀门、法兰、弯头等, 包含其重量、应力。若数据库含有设计者所

需元件则可直接调用。

#### 3.2 土建建模

结构模型的建立参考车间布置图及现场车间结构参数进行 1:1 建模, 通过 Structure 功能按照钢结构、各层平台、楼梯、平台附件 (踢板、角柱等) 的顺序搭建车间整体结构。

在 Beams&Columns 子模块数据库中自带各类标准及多种型钢等级, 通过常规钢结构模板选择型钢种类及等级, 并输入钢结构参数得到初始模型, 确保杆件处理连接状态, 对杆件进行新增、弯曲, 使其与实际工厂对应。在 Panels&Plates 子模块中通过输入各点绝对值坐标的方式为各层添加平台, 并做修剪以避免钢结构杆件碰撞。在 ASL Modeller 子模块中以各平台为基础添加角柱、踢板、楼梯等部件。该模块模型中车间分为 4 层, 每层长 7 000 mm, 宽 3 500 mm, 支撑件为 5 根横梁及 6 根立柱, 并配有楼梯、梯板等结构。

#### 3.3 设备建模

PDMS 提供 4 种设备建模方式: 由数十种基本几何体通过搭积木方法建模的基本体方式、标准设备模板方式、参数化设备方式及读取宏文件方式。参数化建模需输入数据库中的设备模板参数, 如立式容器、换热器、泵等设备, 在对简单标准设备建模时较为高效; 对于复杂非标设备建模通常采取基本体建模, 利用数据库提供的圆柱、圆台、四面体等三维几何体自由搭建设备, 需要各基本体间的位置避免碰撞。该项目设备模型按照工程文件设备一览表及车间布置图建立, 并输入对应工艺参数, 采用以上 2 种方式建模, 反应器、换热器、储罐、空冷器等设备采用参数化建模, 而釜式重沸器、压缩机等设备采用基本体建模; 管嘴需自行选择等级及公称直径、长度, 修正位置避免与设备碰撞。

#### 3.4 管道建模

布管工作是工程设计中最耗时、最复杂的工作之一, 需要考虑各模块间的空间利用及工艺要求, 会出现各种问题, 而管道模块作为 PDMS 强大功能之一能够减轻工程师工作量, 提高设计效率。管道数据结构中每条管道 (Pipe) 由分支 (Branch) 组成, 且分支之间应有连接关系; 分支由管件组成, 定义分支头尾后管件在数据库中排列顺序即为实际管道中的排列顺序。管道创建先设置管道名称、管径、保温等级、温度及压力参数等信息, 创建分支并选择头尾所在点, 通常为管嘴或三通阀的 P-Point 点; 按照流向顺序添加管件, 调整相互位置避免数据一致性检查

错误,直管段由模型编辑器自动生成;创建完成也可修改管件类型或参数。管道穿过结构或设备需穿孔避免元件间碰撞。

管道模型以 P&ID 图为基础建立,而管道走向应满足安全要求,便于管理,给维修预留足够空间并尽量美观整洁。图 3 为管道的数据库结构,由 2 条分支组成,主要管件为法兰、垫片、阀门、弯头、三通阀,MTP 轻组分流向为由右向左。全车间管道模型共包括 43 条管道,介质包含氮气、循环冷却水、工艺介质、火炬气在内的多种物质。

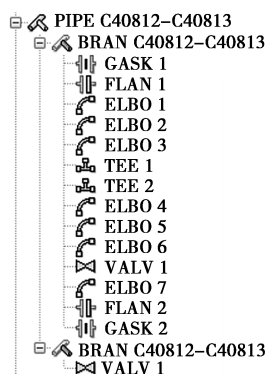


图 3 C40812~C40813 管道数据库结构

#### 4 模型检查

初始模型完成后需进行检查,包括与图纸参数是否一致、管道排布是否符合要求、元件间是否有碰撞等问题,保证模型正确。

参照图纸的检查能够避免设计人员粗心等主观因素导致的错误,主要内容为结构等级及参数对照、设备命名和尺寸及管嘴位置、管道的材质及管径等模型信息。管道排布的检查依照管道图纸与现场进行。数据一致性检查自动检查当前元素可能的数据错误,如连接件管径是否一致,最小直管段长度是否符合要求,连接形式是否一致等,可设置检查缺省值并出具报告,列出每个元素的错误代号及错误信息,若无错误则尾部出现无错误信息;数据一致性检查能够反映设计过程中存在的问题,帮助设计人员快速解决。模型管道数据一致性检查结果无一致性错误。

碰撞检查是 PDMS 较强大的功能之一,帮助设计者快速检查元件间的空间冲突问题。基本元件带有 OBST 属性,表示空间占有,值为 0、1、2,分别表示无占有、元件预留空间等、元件本身空间;碰撞类型分为 HH(Hard/Hard)、HS(Hard/Soft)等,或从尺寸上可分为 Clash、Touch、Clearance 3 种;软件检查前

设计者可根据不同项目要求设置缺省值。同样的,碰撞检查也可以报告形式输出,管道及结构等模型的碰撞检查报告中无元件碰撞。修改后模型如图 4 所示。

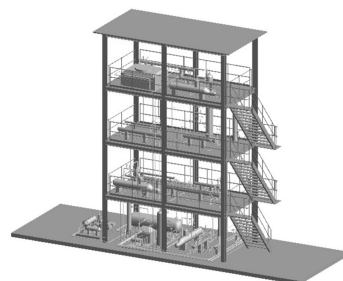


图 4 MTA 车间三维模型

#### 5 结语

随着我国工业化发展逐渐加快,2018 年住建部发布石化数字化交付标准,化工数字化转型成为了行业必然选择。工厂三维模型作为数字化交付重要组成之一与实际工厂相对应,可与智能 P&ID、文档等相关联,以数字化平台为基础建设数字化工厂。PDMS 作为以数据为核心的功能强大的三维设计软件应用广泛,较传统设计方式能极大地提高设计效率。固定床绝热反应器二段式甲醇制芳烃工艺以煤基甲醇制取 BTX 产品,副产 LPG、燃气等,能够缓解目前我国甲醇“供过于求”的现状,发展出一条甲醇高附加值产业链,且弥补芳烃产量的不足,符合我国能源发展要求。依托 MTA 工艺,利用 PDMS 三维设计软件对车间土建、设备及管道模型进行了完整的数字化三维工厂设计,后续可以此为基础在 AVEVA 数字化交付平台上完善相关文档、绘制智能 P&ID 图等,完成该项目的数字化交付,并为化工项目数字化建设提供借鉴。

#### 参考文献

- [1] 钱锋,杜文莉,钟伟民,等.石油和化工行业智能优化制造若干问题及挑战[J].自动化学报,2017,43(6):893-901.
- [2] 余勤锋.石化工程企业设计集成系统的构建[J].现代化工,2015,35(8):6-10.
- [3] 吴青.新常态下的炼化企业数字化转型——从数字炼化走向智慧炼化[J].化工进展,2018,37(6):2140-2146.
- [4] GB/T 51296—2018.石油化工工程数字化交付标准[S].
- [5] 吴青.炼化企业数字化工厂建设及其关键技术研究[J].无机盐工业,2018,50(2):1-7.
- [6] 田锋,段海波,杨振亚,等.数字孪生体技术白皮书[Z].北京:安世亚太科技股份有限公司,2019:16.

(下转第 236 页)

从表 7 可以看出, COTOC 工艺加工石蜡基原油和中间基原油, 化学品(乙烯+丙烯+芳烃)收率均可达到 73% 以上。相对于石蜡基原油, 中间基原油的乙烯、丙烯收率较低, 芳烃收率较高。产品中乙烯选择性较高, 在干气中占比达到质量分数 55% 以上。采用  $C_4$  烯烃回炼、 $C_3 \sim C_4$  烷烃脱氢等技术, 可以将液化气中的丙烷、丁烷和丁烯全部转化为乙烯和丙烯等高附加值产品。总体而言, COTOC 工艺丙烯收率显著高于乙烯, 是以多产丙烯为主的原油直接裂解制化学品技术。

COTOC 工艺氢气和甲烷产率较高。氢气既是化工原料也是能源载体, 本身具有较高附加值。目前, 甲烷制烯烃和芳烃技术快速发展, 已经到了从实验室走向产业化的阶段, 随着甲烷转化制化学品技术的进一步发展和成熟, COTOC 工艺与甲烷转化技术耦合, 将进一步提高本工艺的化学品收率至 80% 左右。

### 3.5 工业放大的技术重点

COTOC 工艺还未进行工业应用, 尚有以下工程化问题需要在进一步的工作中进行合理解决。

(1) COTOC 工艺重油提升管采用常规催化裂化的操作条件, 轻油提升管采用催化裂解的操作条件, 两者在反应温度、反应深度、剂油比、蒸汽用量等方面都有较大区别, 在同一套反应-再生装置内, 实现 2 种工艺的耦合, 要合理控制再生器与不同反应器之间的压差, 优化压力控制系统, 实现催化剂在两器之间的良好流化和输送。

(2) 轻油提升管加工原料包括原油轻馏分、催化汽油、混合丁烯、汽油抽余油和柴油抽余油, 需要合理布局进料喷嘴, 优化各股进料流量, 充分发挥双提升管装置灵活多效的优势, 实现各原料的充分催化裂解。

(3) 为降低投资, COTOC 工艺采用 1 套气体分离系统。气体分离装置的设计, 既要考虑装置大型化的问题, 还需优化气体分离系统的工艺流程, 降低

工艺能耗。

(4) COTOC 工艺气体产率高, 为了降低气体分离系统负荷, 需要改进再生催化剂汽提系统, 尽可能降低再生催化剂携带进入反应系统的烟气量。

## 4 结论

原油直接裂解制化学品技术(COTOC)利用双提升管灵活多效的优势将原油最大化转化为高附加值化学品, 原油制化学品转化率可达到 70% 左右。同时, 该技术具有原料适应性强、工艺流程短、操作灵活、反应苛刻度和整体能耗较低等特点, 与传统的炼化一体化技术(化学品收率 50% 左右)相比, 具有更高的化学品产率和显著的成本优势, 在目前炼油产业结构调整的背景下, 商业化前景巨大。

### 参考文献

- [1] Corma Avelino, Corresa E, Mathieu Y, *et al.* Crude oil to chemicals: Light olefins from crude oil [J]. *Catalysis Science & Technology*, 2017, 7(1): 12-46.
- [2] 中国石化原油直接制化学品技术取得突破性进展[J]. *石油炼制与化工*, 2021, 52(7): 100.
- [3] 李春义, 喀山·巴沙尔, 王国玮, 等. 一种原油催化裂解制低碳烯烃和芳烃的方法; CN201811189551.1[P]. 2019-02-22.
- [4] 孟凡东, 王龙延, 郝希仁. 降低催化裂化汽油烯烃技术——FDFCC 工艺[J]. *石油炼制与化工*, 2004, 35(8): 6-10.
- [5] 陈曼桥, 孟凡东. 增产丙烯和生产清洁汽油新技术—FDFCC-III 工艺[J]. *石油炼制与化工*, 2008, 39(9): 1-4.
- [6] Sun Shiyuan, Meng Fandong, Yan Hongfei. Coker gasoline as a hydrogen donor for FCC[J]. *Petroleum Science and Technology*, 2019, 37(4): 396-401.
- [7] Sun Shiyuan, Meng Fandong, Yan Hongfei, *et al.* Research on HICO entering the secondary riser of FDFCC unit to improve light aromatics production[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 178: 857-862.
- [8] Sun Shiyuan, Meng Fandong. Processing of secondary cracking light cycle oil by combined process [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2020: 1-7. ■
- [9] 贾艳明. HZSM-5 分子筛催化剂上甲醇转化制芳烃反应性能及机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
- [10] Jiapeng G, Ning Z, Lin S, *et al.* Modular based flexible digital twin for factory design [J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10(3): 1189-1200.
- [11] Knozinger H, Kochloeff K, Meye W. Kinetics of the bimolecular ether formation from alcohols over alumina[J]. *Journal of Catalysis*, 1973, 28(1): 69-75.
- [12] Kubelkova L, Novakova J, Nedomova K. Reactivity of surface species on zeolites in methanol conversion[J]. *Journal of Catalysis*, 1990, 124(2): 441-450.
- [13] 刘锡文, 韩旭, 赵河立, 等. PDMS 软件在海水淡化工程中的应用[J]. *计算机应用与软件*, 2013, 30(7): 104-107. ■

(上接第 231 页)