

MRU 系统中循环加热器的数值模拟研究

胡 凯¹ 吴 巍¹ 邹 迪² 杨宝安² 朱晓丽³ 刘宗园¹

1. 中国海洋石油集团有限公司天津化工研究设计院有限公司, 天津 300131;
2. 安洁行方流体管理技术有限公司, 四川 成都 610207;
3. 中国石油大学(华东)石大山能新能源学院, 山东 青岛 266555

摘 要:为了解决乙二醇回收(MEG Reclamation Unit, MRU)系统中传统换热器存在的换热效率不高、体积大占空间、易结垢等问题,分别针对全焊接板式换热器、螺旋板式换热器的内部液固两相流开展数值模拟研究,重点关注换热器内盐颗粒的运动与分布规律,并对可能发生的颗粒沉积甚至堵塞换热器的状况进行预测。模拟研究结果显示:全焊接板式换热器内由于凹槽(肋片)和凸台构成的波纹结构产生扰流作用,MEG 循环液和盐颗粒在板对流通道内的流场分布不均匀;螺旋板式换热器内流道光滑,无扰流结构和局部流通面积的突变,盐颗粒在其中的运动分布状态均匀,有利于随 MEG 贫液排出换热器;螺旋板式换热器作为 MRU 系统循环加热器的效果更好。研究结果可对 MRU 系统循环加热器的选型和参数设计提供理论参考。

关键词:MRU 系统;全焊接板式换热器;螺旋板式换热器;盐颗粒运动与分布

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.005

Numerical simulation of recirculation heater in MRU system

HU Kai¹, WU Wei¹, ZOU Di², YANG Baoan², ZHU Xiaoli³, LIU Zongyuan¹

1. Tianjin Chemical Research and Design Institute Co., Ltd of CNOOC, Tianjin, 300131, China;
2. Anjie Fluid Management Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610207, China;
3. China University of Petroleum(East China), Qingdao, Shandong, 266555, China

Abstract: This research studies the problems of the traditional heat exchanger of MRU system that has low heat exchange efficiency, occupies large plot size and is prone to scaling. The liquid-solid two-phase flow in detachable all-welded plate heat exchanger and spiral plate heat exchanger was numerically simulated, focusing on the movement and distribution of salt particles in the heat exchanger, and the possible particle deposition and even blockage of the heat exchanger were predicted. The simulation results show that the distribution of MEG circulating fluid and salt particles in counter current flow passage of the all-welded plate heat exchanger is uneven due to the disturbance caused by grooves (rib) and corrugated boss-type structure. The flow field in the spiral plate heat exchanger is smooth without the turbulent flow and the sudden change in localized flow area. The salt particle movement is in uniform distribution, which facilitates the discharge of lean MEG from heat exchanger. It is concluded that spiral plate heat exchanger

收稿日期:2022-04-14

基金项目:中国海洋石油集团有限公司天津化工研究设计院有限公司“MRU 预处理单元的技术开发及工艺流程模拟项目”(TJYW004-2021)

作者简介:胡 凯(1988-),男,山东济南人,工程师,硕士,主要从事化工过程装备技术开发工作。E-mail:93725571@qq.com

is more suitable and effective in MRU system. The results can provide reference for selection and parameter design of recirculation heater in MRU system.

Keywords: MRU system; Detachable all-welded plate heat exchanger; Spiral type heat exchanger; Movement and distribution of salt particles

0 前言

乙二醇回收(MEG Reclamation Unit, MRU)系统是保证天然气安全高效开采与输送的核心装备之一,专门用于接收来自于生产工艺系统(三相分离器)中的富乙二醇溶液,经分离再生后生成技术指标(含盐量、浓度、pH值等)合格的贫乙二醇溶液,并将其输送至井口注入点循环使用。循环加热器又称换热器,专门用于不同温度乙二醇溶液的热量交换和传递,是MRU系统中重要的设备之一。本文借助数值模拟的手段,分别研究全焊接板式及螺旋板式换热器内盐颗粒的运动与分布规律,并对可能发生的颗粒沉积甚至堵塞换热器的状况进行预测^[1-3],从而为MRU系统循环加热器的选型和结构设计 with 优化提供指导。

1 数值建模

全焊接板式换热器属于一种新型紧凑式换热器,结构见图1^[4]。全焊接板式换热器内冷热流体由上往下交替流入板间通道进行换热,且冷流体与热流体的总体流动方向互相垂直,使它们之间的换热进行得更加充分。板片结构是由规则排布的凹槽(肋片)和凸台构成,有利于增强换热介质的扰动,并增大换热面积^[5-7]。螺旋板式换热器包含2个同心螺旋流道的圆形单元,结构见图2^[8]。冷热流体中的一股从螺旋板式换热器的中心进入并流向外围,另一股从设备外围进入并向中心流动,从而实现冷热流体的逆流流动^[9-11]。

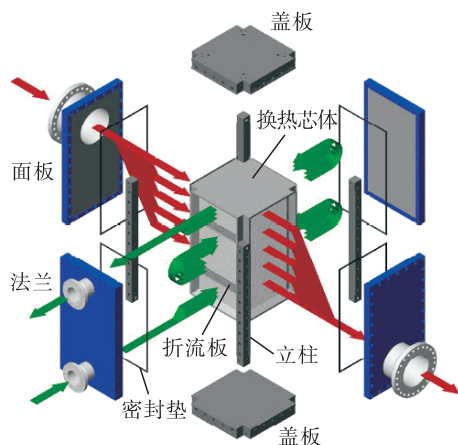


图1 全焊接板式换热器示意图

Fig.1 Schematic diagram of detachable all-welded plate heat exchanger

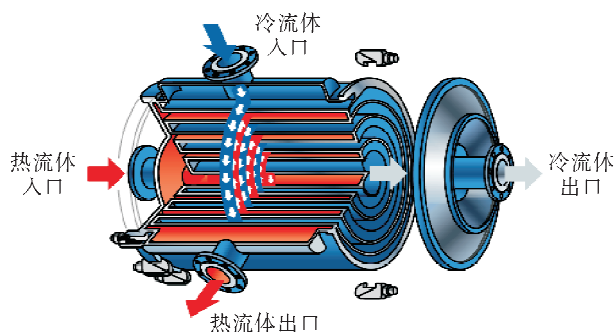


图2 螺旋板式换热器示意图

Fig.2 Schematic diagram of spiral type heat exchanger

全焊接板式换热器和螺旋板式换热器相比于传统类型的换热器具有换热效率高、结构紧凑等突出优势^[12-15]。然而,海上MRU系统的塔釜循环液中含有一定浓度的固体盐颗粒,由于换热板之间流道狭窄,盐颗粒分布状态与可能发生的沉积堵塞换热器的状况需要重点考虑。

板片结构对全焊接板式换热器的传热和流阻特性有显著的影响,板片结构的参数决定了换热器的综合性能^[16-19]。因此,在不影响数值模拟计算精度及模拟结果的可靠性基础上,适当简化数值计算模型,节约计算成本,本文即针对两组板片组成的循环液的流动与分布开展数值模拟研究,属于典型的液固两相流问题^[20-23]。

板对几何结构建模、边界条件设置以及网格划分见图3。数值模拟MP-PIC方法,以商用软件BarracudaTM为计算平台,该方法具有颗粒处理量上的优势,将一定

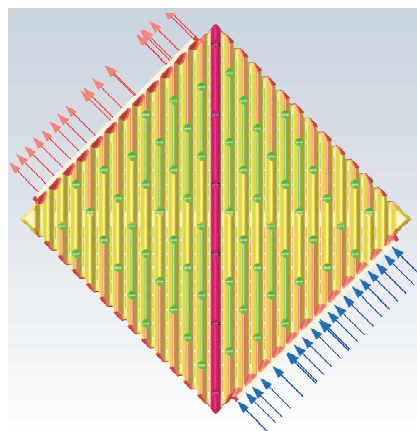


图3 全焊接板式换热器板对数值建模图

Fig.3 Numerical modeling of all-welded plate heat exchanger plate pair

数量具有相同性质的颗粒进行打包处理,计算过程中追踪每个计算颗粒的运动,从而极大地减少了需要追踪的颗粒数。在数值求解过程中,将流体信息从欧拉网格插值到单个颗粒,并将欧拉网格内所有颗粒信息的统计平均值传回欧拉网格,从而实现连续流体相和离散颗粒相的耦合。

螺旋板式换热器见图 4。其中,97% MEG 循环液对应冷流体通道,从设备外围通道(B1)进入,中心通道(B2)流出。根据图 4 尺寸,对冷流体通道进行几何建模、边界条件设置以及网格划分。

相关螺旋板式换热器循环加热器操作条件和介质物性参数设置见表 1。数值模拟针对 MEG 循环液不同含盐质量含量(0.18%、5%、10%、15%)工况开展。将盐颗粒粒径导入计算程序,所拟合得到的盐颗粒粒径累计含量分布曲线见图 5。

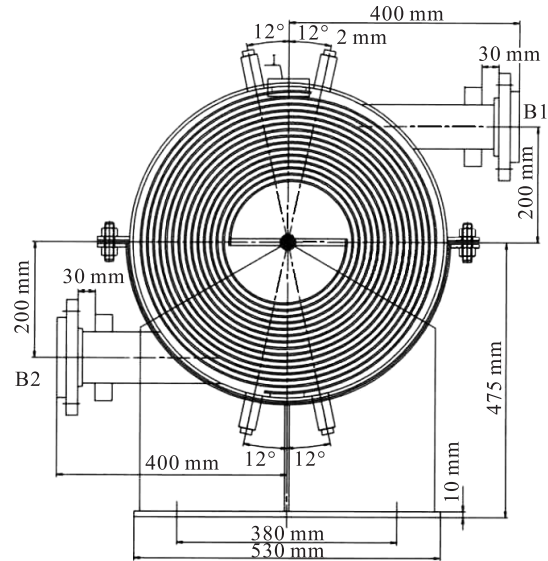


图 4 螺旋板式换热器数值建模图

Fig.4 Numerical modeling of spiral type heat exchanger

表 1 循环加热器操作条件及物性参数表

Tab.1 Operating conditions and physical parameters of recirculation heater

物性参数	热流体侧	冷流体侧
流体名称	热媒	97% 乙二醇
总质量流量 /(kg · h ⁻¹)	17 000	14 939.82
气相分率	0(进口) /0(出口)	0(进口) /0(出口)
液体流量 /(kg · h ⁻¹)	17 000(进口) /17 000(出口)	14 939.82(进口) /14 939.82(出口)
气体流量 /(kg · h ⁻¹)	0(进口) /0(出口)	0(进口) /0(出口)
单台流量 /(kg · h ⁻¹)	17 000.00	14 939.82
入口压力 /MPa	0.4	0.2
温度 /℃	220(进口) /190(出口)	128(进口) /出口:145
密度 /(kg · m ⁻³)	820(进口) /820(出口)	991.73(进口) /971.39(出口)
比热 /(kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	2.34(进口) /2.34(出口)	2.832(进口) /2.91(出口)
导热系数 /(W · m ⁻¹ · K ⁻¹)	0.105(进口) /0.105(出口)	0.441(进口) /0.441(出口)
动力黏度 /mPa · s	0.583(进口) /0.583(出口)	0.900(进口) /0.668(出口)

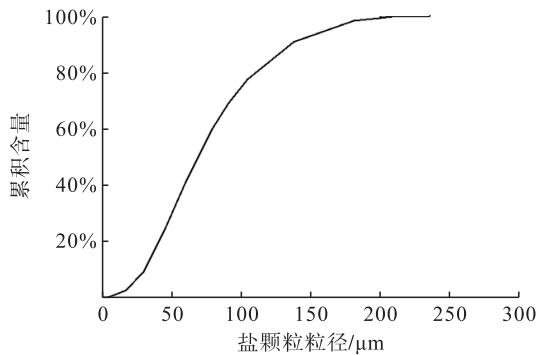


图 5 盐颗粒粒径累计含量分布曲线图

Fig.5 Cumulative content distribution curve of Salt particle size

2 数值模拟结果

2.1 全焊接板式换热器流场特性

2.1.1 流场与压力分布

通过数值模拟,可获得板对间压力分布、速度矢量分布以及盐颗粒浓度分布。以固含率 0.18% 和 15% 的含盐 MEG 进料为例,将数值模拟结果进行展示和分析。分析结果显示:板对入口至出口压力逐渐降低,压降产生的主要原因包括流道凹凸结构造成的沿程压力损失、局部压力损失以及颗粒阻力。固含率 0.18% 和固含率 15% 两种进料工况对比发现,在 MEG 循环液流量一致的情况下,固含率 15% 时的板对压降明显高于固含率

0.18% 时的板对压降,说明盐颗粒浓度高造成的阻力损失大,与实际经验一致。

固含率 0.18% 和固含率 15% 对两种进料条件下板间速度矢量分布进行模拟,结果显示:由于凹槽(肋片)和凸台的存在,破坏了壁面稳定的边界层,对流体产生扰动,在扰流结构附近出现局部速度最大值。固含率 0.18% 和固含率 15% 工况下速度矢量分布一致,固含率 0.18% 的低含盐量工况下流体速度数值略高于固含率 15% 的高含盐量工况的流体速度。

对两种进料条件下板间的颗粒分布进行模拟,结果显示:固含率 0.18% 时,盐颗粒在凹槽内的沉积现象不明显;固含率 15% 时,凹槽内盐颗粒浓度明显高于板面其余位置,出现盐颗粒浓度聚集区。分析来看,流体在凹槽处流通面积增大,流速降低,盐颗粒容易与液体发生分离,在重力作用下向凹槽内沉积。

2.1.2 盐颗粒运动与分布

除连续相流场特性外,基于连续—离散相耦合的数值模拟方法还可提供盐颗粒在板对流域内的时空分布状况。随固含率的升高,板对间颗粒数量和体积分数明

显增加;颗粒在板面上并非均匀分布,而是随着板面的凹凸结构呈现“束状”分布;固含率 15% 时,板面上出现局部盐颗粒浓度聚集区。

在不同的固含率条件下,盐颗粒速度分布特征基本一致,即沿上、下相互交叉的冷热流体板面结构,速度数值发生有规律的波动,这反映了扰流、旋涡和二次流有关。

2.2 螺旋板式换热器流场特性

2.2.1 流场与压力分布

图 6 为螺旋板式换热器内含盐 MEG 贫液(冷流体)通道内的压力与速度矢量分布,对应的盐颗粒固含率为 15%。由图 6 可知,含盐 MEG 贫液从设备外围通道进入螺旋板式换热器至中心通道流出过程中,压力逐层降低,在出口处压力达到最低值。速度分布规律为:入口管道与螺旋板的连接处,由于流通面积骤减,液体速度显著增大;在螺旋板主体空间内,由于管道流通面积一致,液体速度数值基本保持不变;在螺旋板中心出口位置,由于流通面积增大,液体速度有所降低,含盐 MEG 循环液最终从中心管道排出。

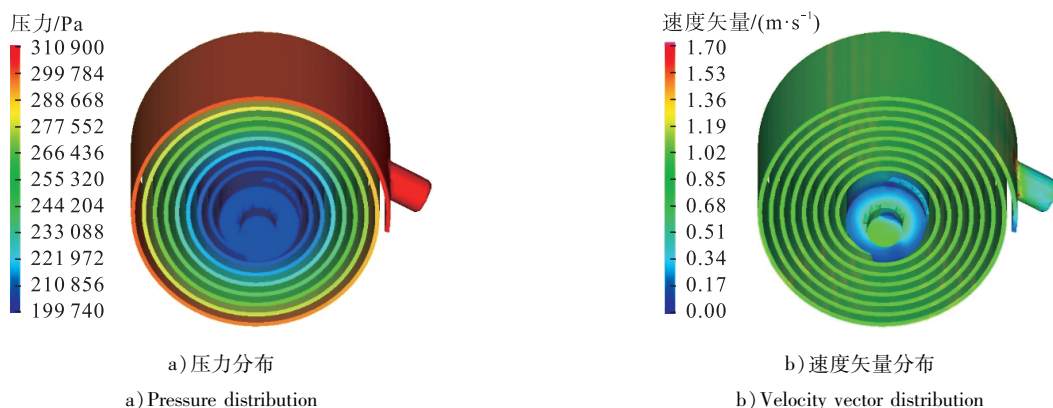


图 6 螺旋板式换热器内压力与速度矢量分布图

Fig. 6 Distribution of pressure and velocity vector in spiral type heat exchanger

2.2.2 盐颗粒运动与分布

模拟螺旋板式换热器内瞬态盐颗粒运动与分布,包括体积分数分布、速度分布、粒径分布以及盐颗粒在螺旋板式换热器内的停留时间,对应固含率 15%。由于螺旋板式换热器内流道光滑,无扰流结构和局部流通面积的突变,因此盐颗粒在其中的运动分布状态较为均匀。盐颗粒速度分布与 MEG 循环液的速度分布特征一致,即在入口管道与螺旋板的连接处速度达到最大值,螺旋板主体空间内速度数值基本保持不变,中心出口处速度降低。

图 6 结果显示,在螺旋板主体流道内,不同粒径的盐颗粒掺混较为均匀,未出现明显的盐颗粒粒径分层现

象。分析该现象的原因为:一方面盐颗粒在螺旋板内旋流运动,在离心力作用下盐颗粒倾向于沿流道外侧运动;另一方面,在重力作用下盐颗粒向下运动。两种原因作用的影响基本相当,因此盐颗粒表现出较为均匀的空间位置、速度和盐颗粒粒径分布状态。在流量 14 939.82 kg/h 与固含率 15% 条件下,盐颗粒从螺旋板入口至出口的停留时间约 20 s。

2.3 盐颗粒质量流量分析

进一步对两种结构换热器进出口盐颗粒质量流量随时间的变化进行统计。0.18%、0.5%、10%、15% 不同固含率条件下,全焊接板式换热器板对进出口、螺旋板式换热器 MEG 进出口的盐颗粒质量流量变化曲线见图 7~8。

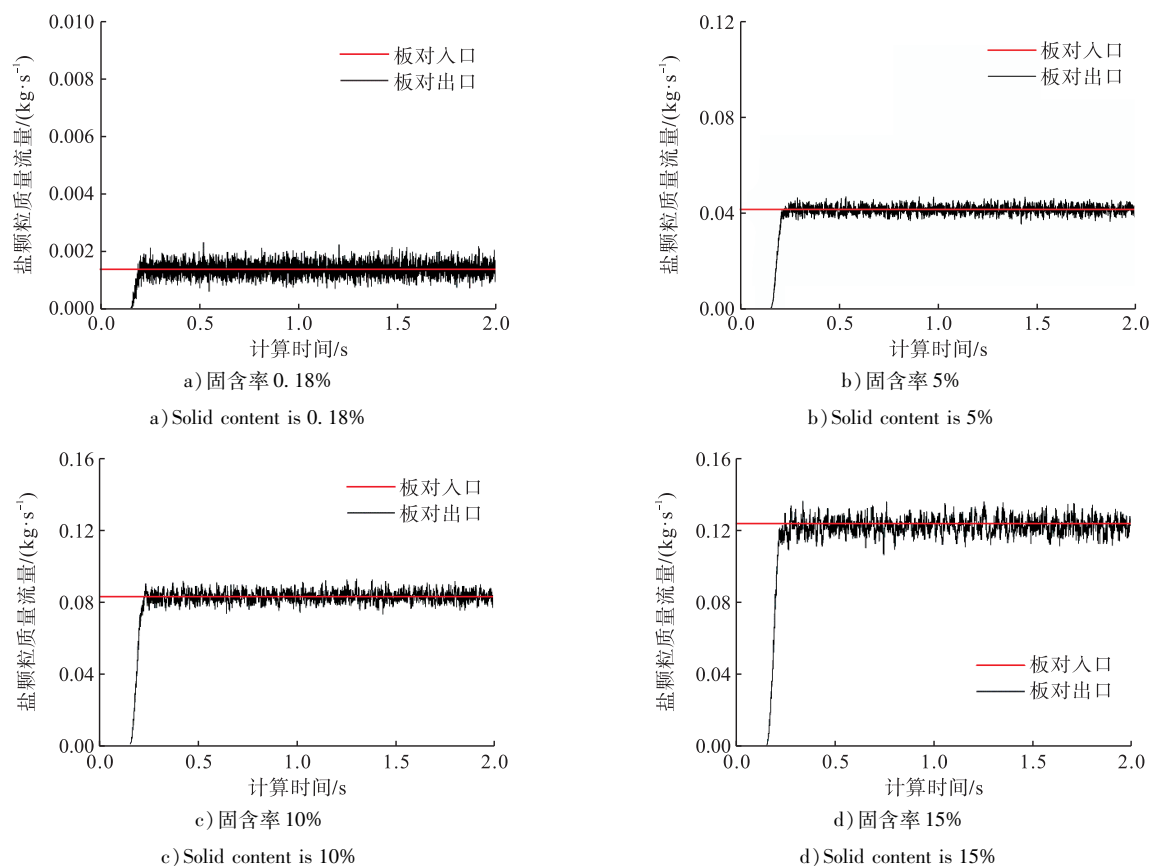


图 7 不同固含率条件下全焊接板式换热器板对进出口盐颗粒质量流量变化曲线图

Fig. 7 Mass flow curves of salt particles between inlet and outlet of all-welded plate heat exchanger under different solid content conditions

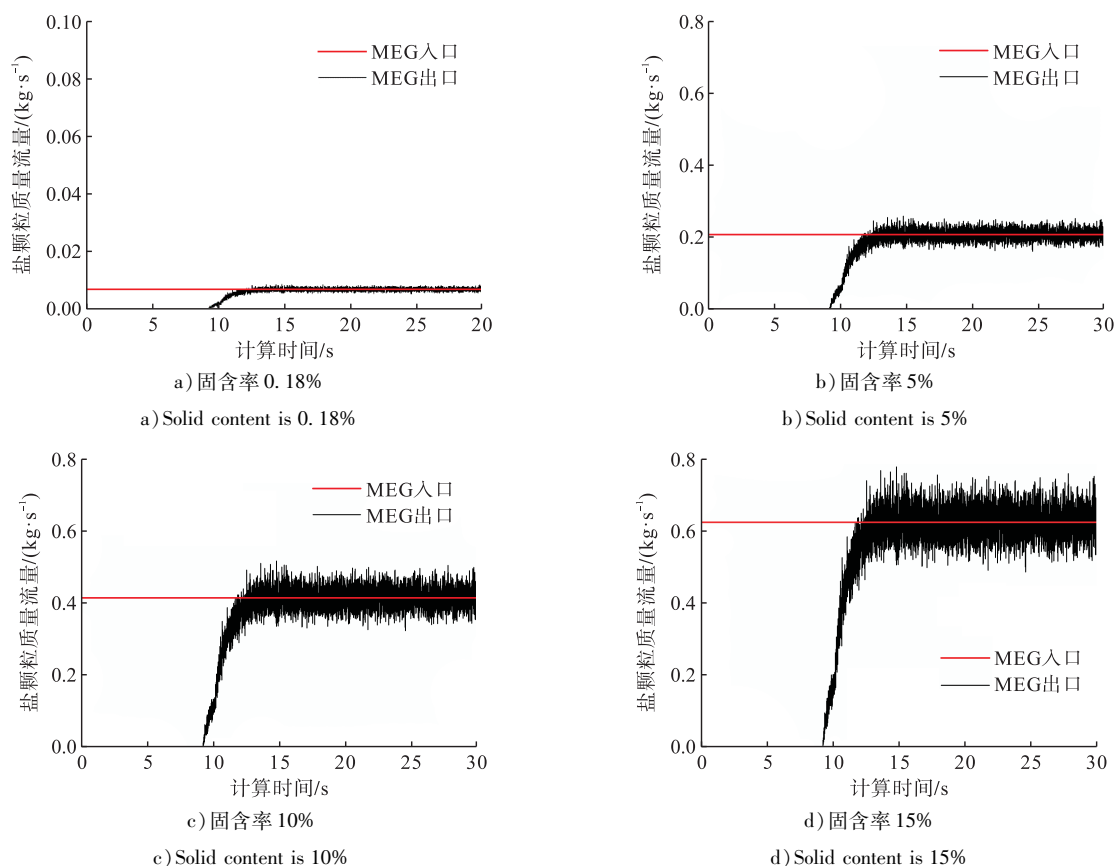


图 8 不同固含率条件下螺旋板式换热器 MEG 进出口盐颗粒质量流量变化曲线图

Fig. 8 Mass flow curves of salt particles in inlet and outlet of spiral type heat exchanger under different solid content conditions

由于全焊接板式换热器每个流程包含 5 个板对,因此单板对间 MEG 贫液流量为系统总流量的 1/5。由图 7 可以看出,自初始时刻至约计算时间 0.2 s 时,板对出口开始监测到盐颗粒流出,随后,出口盐颗粒质量流量增加,进而基本保持稳定的动态波动。将 0.5~2 s 时间段内取平均,得到四种固含率工况下板对出口盐颗粒质量流量分别为 0.001 39 kg/s、0.041 5 kg/s、0.082 9 kg/s、0.124 kg/s,计算得到板对进出口盐颗粒质量比分别为 100%、100%、99.88%、99.60%。由此可见,在 MEG 循环液固含率高于 10% 时,出口盐颗粒质量流量相对于进口有一定的损耗,说明部分盐颗粒在板对内沉积。盐颗粒若不能及时排出,将会随着时间的增长在换热器板对间沉积,由于板式换热器流道狭窄,盐颗粒沉积使得流道进一步变窄,最终可能导致堵塞流道,造成非常严重的后果。

表 2 不同结构和操作工况下盐颗粒分离效率表

Tab.2 Salt particle separation efficiency under different structure and operating conditions

循环液固含率	焊接板对进盐量/(kg·s ⁻¹)	焊接板对出盐量/(kg·s ⁻¹)	螺旋板出入口盐颗粒质量比	螺旋板进盐量/(kg·s ⁻¹)	螺旋板出盐量/(kg·s ⁻¹)	焊接板对出入口盐颗粒质量比
0.18%	0.001 390	0.001 39	100%	0.006 944	0.006 944	100%
5%	0.041 500	0.041 50	100%	0.207 500	0.207 500	100%
10%	0.083 000	0.082 90	100%	0.415 000	0.415 000	99.88%
15%	0.124 500	0.124 00	100%	0.622 400	0.622 400	99.60%

3 结论

1)以连续相与离散相耦合的方式,建立了全焊接板式换热器单板对、螺旋板式换热器内 MEG 贫液—盐颗粒的液固流动数值模型,获得了以上两种换热器内流场分布和盐颗粒运动分布的特征。

2)全焊接板式换热器板片结构复杂,凹槽(肋片)和凸台对流体产生扰动,盐颗粒在板对内的分布不均匀,特别是在固含率 15% 条件下容易在凹槽内沉积,加之两层板片之间流道狭窄,有局部堵塞换热器的可能。

3)螺旋板式换热器内流道光滑,无扰流结构和局部流通面积的突变,盐颗粒分布状态均匀,不利于悬浮盐颗粒在换热器内的沉积。由于 MRU 系统脱盐工艺中盐含量较高,为防止换热器堵塞,螺旋板式换热器更适合作为 MRU 脱盐工艺的循环加热器。

参考文献:

[1] 袁洪琳. 板式换热器的流道结构优化研究[D]. 郑州:郑州大学,2021.
YUAN Honglin. Research on optimization of flow channel structure of plate heat exchanger [D]. Zhengzhou:

根据图 8 中盐颗粒质量流量曲线,取 20~30 s 内的平均值,得到四种固含率工况下螺旋板式换热器出口盐颗粒质量流量分别为 0.006 944 kg/s、0.207 500 kg/s、0.415 000 kg/s、0.622 400 kg/s,计算得到 MEG 进出口盐颗粒质量比均能达到 100%。由此可见,螺旋板式换热器流道光滑,盐颗粒具有较好的随流性,分布均匀不容易发生盐颗粒的沉积。

将不同固含率条件下,两种换热器进出口盐颗粒质量流量与效率计算结果汇总,见表 2。全焊接板式换热器在固含率 10% 以上时,出口与入口盐颗粒质量比低于 100%,反映了部分盐颗粒在板对内的沉积;螺旋板式换热器即使在固含率高达 15% 时,出口与入口盐颗粒质量比也能达到 100%,说明了盐颗粒不易在换热器内部沉积。

Zhengzhou University, 2021.
[2] 陈浩. 基于脉动流强化换热的船用板式换热器性能优化研究[D]. 镇江:江苏科技大学,2021.
CHEN Hao. Research on Optimization of marine plate heat exchanger based on pulsating flow enhanced heat transfer [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2021.
[3] 刘雨. 斜波纹板式换热器强化传热研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
LIU Yu. Research on enhanced heat transfer of inclined corrugated plate heat exchanger [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
[4] 何志伟. 全焊接板式换热器的设计与研究[D]. 上海:上海交通大学,2014.
HE Zhiwei. Design and study on fully welded plate heat exchanger [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
[5] 王传伟,贾文广,梁晓明,等. 基于正交试验的凸台型全焊接板式换热器优化[J]. 机械制造,2020,58(3):85-89.
WANG Chuanwei, JIA Wenguang, LIANG Xiaoming, et al. Optimization of boss-type fully-welded heat exchanger based on orthogonal test [J]. Machinery, 2020, 58 (3): 85-89.
[6] 王继政. 螺旋板式换热器结构优化及传热特性的研究[J]. 中国设备工程,2022(4):130-131.

- WANG Jizheng. Study on structure optimization and heat transfer characteristics of spiral plate heat exchanger [J]. China Plant Engineering, 2022 (4): 130-131.
- [7] 程友良, 韩健, 杨星辉. 螺旋板式换热器结构优化及传热特性研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 102-110.
- CHENG Youliang, HAN Jian, YANG Xinghui. Research on heat transfer characteristics and structural optimization of spiral plate heat exchanger [J]. Journal of North China Electric Power University (Nature Science Version), 2016, 43(6): 102-110.
- [8] 李闯. 基于流动和传热特性对螺旋板式换热器多目标优化研究[D]. 上海: 东华大学, 2017.
- LI Chuang. Multi-objective optimization of spiral plate heat exchanger based on flow and heat transfer characteristics [D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [9] 汤涛. 焊接板式换热器流动和传热性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- TANG Yi. Research on the fluid flow and heat transfer performance of welded plate heat exchanger [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [10] 赵娜. 板式换热器的腐蚀分析与控制策略[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(9): 143-144.
- ZHAO Na. Corrosion analysis and control strategy of plate heat exchanger [J]. Total Corrosion Control, 2021, 35(9): 143-144.
- [11] 朱睿颖, 马喜振. 板式换热器直通道内流动传热特性研究[J]. 河南科技, 2021, 40(25): 45-47.
- ZHU Ruiying, MA Xizhen. Research on flow and heat transfer characteristics in the straight channel of plate heat exchanger [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2021, 40(25): 45-47.
- [12] 王雪莹, 何梦琪, 陈兴鹏, 等. 板式换热器的结构设计和优化研究[J]. 机电信息, 2021, 13(22): 57-59.
- WANG Xueying, HE Mengqi, CHEN Xingpeng, et al. Study on design and optimization of structure of plate heat exchanger [J]. Mechanical and Electrical Information, 2021, 13(22): 57-59.
- [13] 康家琦. 板式换热器板片深度测量方法研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- TANG Jiaqi. Study on measuring method of plate depth of plate heat exchanger [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2021.
- [14] 毛松苗, 王未. 板式换热器换热能力测试方法研究[J]. 电信工程技术与标准化, 2021, 34(5): 18-20.
- MAO Songmiao, WANG Wei. Research on the test method of heat exchange capacity of plate heat exchanger [J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2021, 34(5): 18-20.
- [15] 雒宝明. 板式换热器流动与传热数值分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2021.
- LUO Baoming. Numerical analysis of flow and heat transfer in plate heat exchanger [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2021.
- [16] 程晓峰, 张耀, 万兴. 板式换热器的结构设计与优化[J]. 节能, 2020, 39(9): 81-84.
- CHENG Xiaofeng, ZHANG Yao, WAN Xing. Design and optimization of structure of plate heat exchanger [J]. Energy Conservation, 2020, 39(9): 81-84.
- [17] VIKRANT V, JOHAN P, NIELS D. Numerical investigation on the effect of pressure on fluidization in a 3D fluidized bed [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(44): 17487-17498.
- [18] 陈倩. 微通道板式换热器动态特性分析[J]. 汽车电器, 2022, 22(3): 38-41.
- CHEN Qian. Dynamic characteristics analysis of micro-channel plate heat exchanger [J]. Auto Electric Parts, 2022, 22(3): 38-41.
- [19] 王继政. 螺旋板式换热器结构优化及传热特性的研究[J]. 中国设备工程, 2022(4): 130-131.
- WANG Jizheng. Study on structure optimization and heat transfer characteristics of spiral plate heat exchanger [J]. China Plant Engineering, 2022(4): 130-131.
- [20] 王军, 侯宇, 林小龙, 等. 基于板式换热器的脉动流强化换热实验研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2022, 22(2): 116-119.
- WANG Jun, HOU Yu, LIN Xiaolong, et al. Experimental research on enhanced heat transfer of pulsating flow based on plate heat exchanger [J]. Automation & Instrumentation, 2022, 22(2): 116-119.
- [21] 何坤云, 尹华伟, 李向钊, 等. 板式换热器的强化换热方法[J]. 化学工程与装备, 2021, (12): 5-6.
- HE Kunyun, YIN Huawei, LI Xiangzhao, et al. Enhanced heat transfer method of plate heat exchanger [J]. Chemical Engineering and Equipment, 2021, (12): 5-6.
- [22] 潘其文, 贾赞强, 杜兴云. 板式换热器结构原理与检修方法[J]. 设备管理与维修, 2021, 24(19): 61-62.
- PAN Qiwen, JIA Yunqiang, DU Xingyun. Structure principle and maintenance method of plate heat exchanger [J]. Plant Maintenance Engineering, 2021, 24(19): 61-62.
- [23] 张明辉, 徐哲, 段天应, 等. 印刷板式换热器流道结构优化研究[J]. 化工管理, 2021, 21(28): 155-158.
- ZHANG Minghui, XU Zhe, DUAN Tianying, et al. Research on optimization of channel structure of printed circuit heat exchanger [J]. Chemical Enterprise Management, 2021, 21(28): 155-158.