

信息技术应用

重力式油水分离器内聚结构件 分离性能的实验与模拟研究

梁 龙¹, 张旺宁², 白志山^{1*}, 杨晓勇¹, 罗会清¹, 张 斌¹
(1. 华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237;
2. 长庆油田分公司工程技术管理部, 陕西 西安 710021)

摘要:为考察聚结构件对重力式油水分离器分离性能的影响,在理论分析的基础上,对错搭波纹板进行实验与模拟研究,并从油滴粒径在波纹板前后的变化、分离器分离效率、波纹板内流场和油滴浓度分布等方面进行对比研究。实验结果表明,板高较小时,水相出口处大油滴所占份额较低,油水分离效率较好,但会增加波纹板填料堵塞的风险;在波纹板上开孔能有效提高油水分离效果,缩短油滴停留时间;进口流量越大,分离效果越差。采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与离散相模型对错搭波纹板进行数值模拟研究,结果表明,小孔可促进板内流场分布均匀,并为板间质量交换提供通道,使聚结之后的大油滴通过小孔浮升到上层波纹板,缩短油滴浮升距离;开孔波纹板后油滴浓度分布区域集中,具有较好的分离效果。

关键词:油滴粒径;波纹板;分离效率;数值模拟;油滴浓度

中图分类号:TE992.2

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2018)11-0211-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2018.11.046

Experimental and simulation study on separation performance of coalescing structural parts within oil-water gravity separator

LIANG Long¹, ZHANG Wang-ning², BAI Zhi-shan^{1*}, YANG Xiao-yong¹,
LUO Hui-qing¹, ZHANG Bin¹

(1. School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 2. PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to investigate the effect of internal coalescing structural parts on the separation performance of oil-water gravity separator, the experiments and simulation studies are performed on mismatched corrugated plate based on theoretical analysis. Comparison studies are carried out for the particle size distribution changes before and after the corrugated plate, separation efficiency, the flow field inside the corrugated plate and the distribution of oil droplet concentration. The experimental results show that with a small plate height, large oil droplets occupy a low share in the water phase at the outlet and there is a good separation efficiency between oil and water, but it will increase the risk of blockage of corrugated plate packing. Opening holes on corrugated plates can effectively improve the separation effect between oil and water and shorten the residence time of oil droplets. The greater the inlet flow, the worse the separation effect. The RNG $k-\varepsilon$ model and the discrete phase model are used to perform numerical simulation on mismatched corrugated plate. The simulation results show that smaller hole can promote the uniformity of the flow field in the plate and provide the channel for the mass exchange between the plates, so that the large oil droplets after coalescence can be floated through small holes to the upper ripple plate to shorten the floating lift distance of oil droplets. The concentration distribution of oil droplets is concentrated after opening corrugated plates, meaning better separation effect.

Key words: diameter of oil droplet; corrugated plate; separation efficiency; numerical simulation; oil droplet concentration

波纹板聚结分离器的最早应用出现在美国,从诞生之初就受到了行业研究人员与工程技术人员的广泛关注^[1]。波纹板聚结分离器将重力沉降与聚

结技术 2 种分离方式有效地结合起来,优势明显,大量研究人员利用数值模拟的方法对波纹板进行了研究^[1-6]。流体在波纹板内的流动比较复杂^[7],研究

收稿日期:2018-04-12;修回日期:2018-09-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB748500);国家自然科学基金项目(51578239)

作者简介:梁龙(1990-),男,硕士生;白志山(1979-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为非均相分离与传递、旋转流场的流体力学行为,通讯联系人,021-64253731,baizs@ecust.edu.cn。

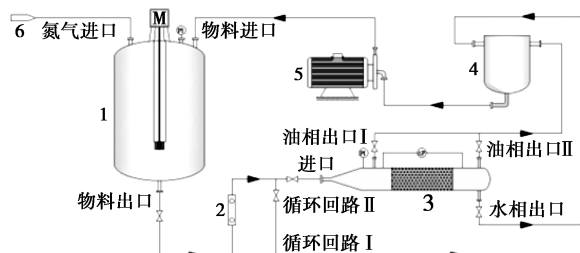
表明,这种复杂的流动非常有利于液滴的相互碰撞并提高分离效率^[8]。不同的波纹板结构参数如板间距、波纹板折角和折板峰高等都会对其内部流动及两相分离效率产生很大影响^[9]。不同板型如平板、蛇形板、错搭波纹板等也会对波纹板的内部流场及分离效率产生影响^[2,10-11],开孔波纹板比错搭波纹板具有更高的分离效率^[12-13]。错搭波纹板的板间距会随着折板峰高变化而变化,板间距越小,分离效率越高,但过小的板间距会增大波纹板内的沿程压降^[14]。波纹板结构参数同样会影响分散相的分布^[15-16]。亲油性波纹板应用在油水分离方面具有更高的分离效率,同时流量越小,分散相在波纹板内的停留时间越长,分离效率越高^[17-20]。

但是目前对开孔波纹板内小孔对波纹板内部流场和油滴分布状态影响的报道较少。本文中通过实验和模拟方法对不同板型的错搭波纹板分离性能及内部流场进行研究,为油水分离器的结构设计和波纹板聚结原件选型提供一定参考依据。

1 实验研究

1.1 实验装置

本文中采用的实验流程如图 1 所示。所采用的聚结填料为错搭波纹板,聚结材料为亲油性材料。实验对 5 种板型的波纹板进行对比研究,各板型倾角均为 45°,其余参数如表 1 所示。实验介质为水和柴油,介质物性如表 2 所示。实验中油水分离器材质为不锈钢材料,密封性良好。



1—高剪切乳化釜;2—浮子流量计;3—油水重力分离器;
4—储液罐;5—隔膜计量泵;6—氮气瓶

图 1 实验装置流程

表 1 实验中波纹板型参数

板型	板高/mm	板长/mm	比表面积/(m ² ·m ⁻³)	开孔率/%
SY1	4	400	700	无孔
SY2	6	400	470	无孔
SY3	8	400	350	无孔
SY4	10	400	280	无孔
SY5	8	400	350	10%

表 2 实验介质参数

物料	密度 ρ / (kg·m ⁻³)	黏度 μ / (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)	表面张力 σ / (N·m ⁻¹)
水	998	1.003×10 ⁻³	7.28×10 ⁻²
柴油	850	4.37	2.68×10 ⁻²

1.2 实验方法

对乳化釜转速与油滴粒径分布关系进行研究,当乳化时间为 60 min,乳化釜在 1 500 r/min 以下转速工作时,发现乳化液表面出现浮油;乳化釜在 1 500 r/min 转速工作时,乳化液表面浮油消失,油相以油滴的形式分散在乳化液中。继续提高乳化釜转速对油滴分布形式无影响。因此,实验中乳化釜转速设定为 1 500 r/min。

利用荧光显微镜对进口与水相出口处所取样品中油滴分布进行观察并拍照,采用 image-pro plus 软件对所得照片中油滴粒径分布进行分析,采用红外分光测油仪对进出口含油量进行测定。

1.3 实验结果及分析

1.3.1 不同板型对油滴粒径分布的影响

进口流量为 420 L/h 时,4 种板型填料下,进口与水相出口油滴粒径分布如图 2 所示。进口处油滴粒径峰值在 6 μm 处;在 4 种板型后的水相出口处,油滴粒径分布更加集中在 6 μm 处;粒径 20 μm 以上的油滴数目百分比也较进口处降低。油水乳状液进入分离器后,油滴会吸附在波纹板表面而聚结长大成较大油滴,大粒径油滴更容易浮升到分离器顶部实现分离,因此水相出口处油滴粒径分布更加集

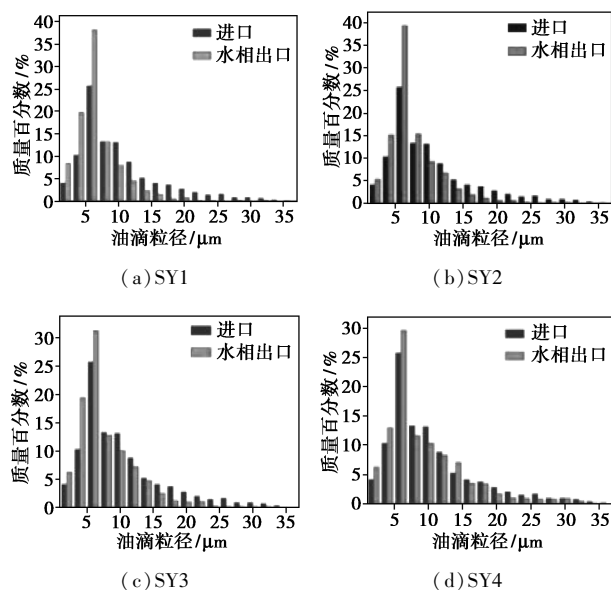


图 2 不同板型下,进口与水相出口油滴粒径分布

中于 6 μm 处。错搭波纹板中,板高较小的波纹板内油滴浮升距离短,更容易捕捉油滴,因此随着板高的减小,粒径 20 μm 以上油滴数目所占份额逐渐降低,如表 3 所示。

表 3 水相出口处粒径 20 μm 以上的油滴数量百分比 %

板型	SY1	SY2	SY3	SY4
油滴粒径大于 20 μm 数量百分比	2.16	2.29	3.72	6.83

1.3.2 油水分离效率的影响因素

图 3 为 4 种不同板型的油水分离效率。由图 3 可知,分离效率随着板高的增加而逐渐降低,这与文献[14]所描述的趋势一致。板高较小时,错搭波纹板的板间距较小,波纹板可以吸附粒径更小的油滴在其表面聚结长大。虽然减少板间距可以实现较高的分离效率,但小的板间距会使聚结区域压力损失升高,增大聚结填料堵塞的风险,在实验中观察到 SY1 型波纹板填料内出现大量絮状物堵塞填料,而 SY2 型出现较少,SY3 与 SY4 型更少,说明板间距并非越小越好,4 种板型中最佳板型为 SY2。

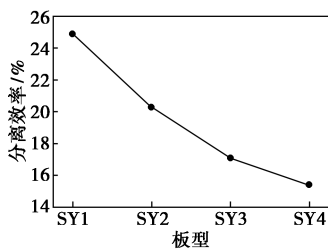
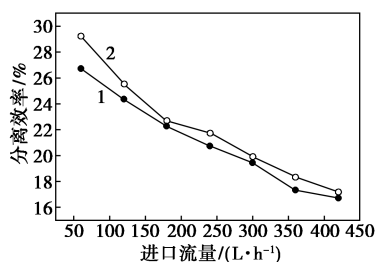


图 3 油水分离效率随板高变化

SY3 与 SY5 2 种板型分离效率随进口流量变化如图 4 所示。在进口流量较低的情况下,油水乳液在分离器内停留时间长,有利于小油滴浮升到波纹板表面实现聚结。进口流量较高时,乳状液在分离器内停留时间短,分离效率下降。在波纹板上开孔,可促进油滴通过小孔浮升到分离器上层,缩短油滴浮升距离,提高分离效率,这与文献[12]所得到的结果一致。



1—SY3;2—SY5

图 4 油水分离效率随进口流量的变化

2 模拟研究

选取 SY3 和 SY5 型波纹板进行模拟计算。一般认为,错搭波纹板填料内部雷诺数在 135 以上时,流动即处于湍流状态^[7]。经过计算,进口流量为 420 L/h 时波纹板内雷诺数为 140,内部流动状态为湍流。

2.1 几何模型

SY5 型波纹板为开孔波纹板,为简化计算模型,假定开孔位置均位于波纹板折角处,小孔直径为 4 mm,如图 5 所示,两板之间的流道以两板交界面为界分为上流道和下流道。

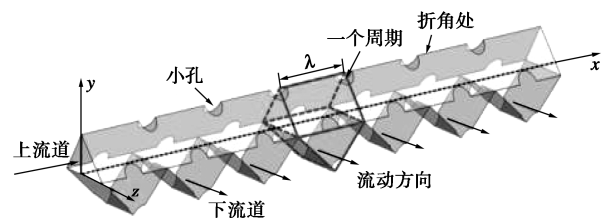


图 5 波纹板填料内 1 个完整流道

2.2 控制方程

流体视为不可压缩液体,不考虑热量交换,由 Navier-Stokes 可知:

质量守恒方程:

$$\text{div}(U) = 0 \tag{1}$$

动量守恒方程:

X 方向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho u)/\partial t + \text{div}(\rho u u) = \\ - \partial p/\partial x + \partial \tau_{xx}/\partial x + \partial \tau_{yx}/\partial y + \partial \tau_{zx}/\partial z + F_x \end{aligned} \tag{2}$$

Y 方向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho v)/\partial t + \text{div}(\rho v u) = \\ - \partial p/\partial y + \partial \tau_{xy}/\partial x + \partial \tau_{yy}/\partial y + \partial \tau_{zy}/\partial z + F_y \end{aligned} \tag{3}$$

Z 方向:

$$\begin{aligned} \partial(\rho w)/\partial t + \text{div}(\rho w u) = \\ - \partial p/\partial z + \partial \tau_{xz}/\partial x + \partial \tau_{yz}/\partial y + \partial \tau_{zz}/\partial z + F_z \end{aligned} \tag{4}$$

式中, p 是微元体上的压力; τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等是因分子黏性作用而产生的作用在微元体表面上的黏性应力 τ 的分量; F_x 、 F_y 、 F_z 是微元体上的体积力。

2.3 模型选择及边界条件

本文中选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型封闭湍流方程,并采用离散相模型对油滴运动进行追踪。

进口采用速度入口条件,设置进口速度 0.31 m/s (流量 420 L/h),速度方向为进口截面的法线方向。

分离器壁面、入口整流段及波纹板均采用无滑移壁面条件。

油相出口与水相出口采用自由流出边界条件,根据进口含油量 0.5% 的实验条件,设置油相出口流量占进口流量比例为 0.005,水相出口流量占进口流量比例为 0.995。

在离散相模型中,设置进口与水相出口边界条件为逃逸;整流段壁面边界条件为反弹;分离器壁面与油相出口为捕捉。

2.4 网格划分

波纹管段划分非结构网格,其他部位划分结构网格。经过网格无关性验证,SY3 型波纹管分离器内网格数量为 3 450 万;在 SY5 型波纹板的开孔处进行网格自适应加密,网格数量为 3 610 万。

2.5 模拟结果分析与讨论

2.5.1 波纹管填料内速度云图对比

图 6 所取截面为波纹管填料内小孔附近的横截面。对比两图发现,在 SY5 型波纹管填料内流场分布较均匀,并且小孔处具有较大速度,说明小孔处有流体流过,并会对填料内流场的分布产生影响。

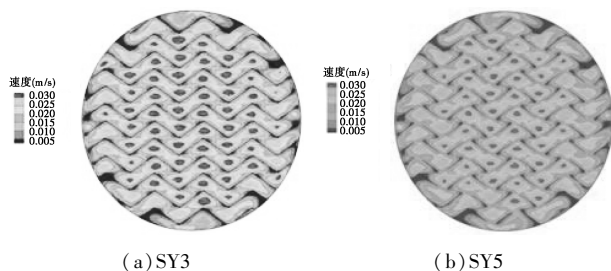


图 6 波纹管填料内小孔处横截面上速度云图

取填料中间部位一个完整流道进行研究,图 7 为 $Z=0$ mm 截面上的速度云图,流场分布情况与文献[7]中结果基本相似。对比图 7 中 2 种板型的内部流场可以发现 SY5 型波纹管内部流场的高速流动区域较少,流动平缓,流场分布比较均匀;SY5 型波纹管的小孔处具有较高的速度。

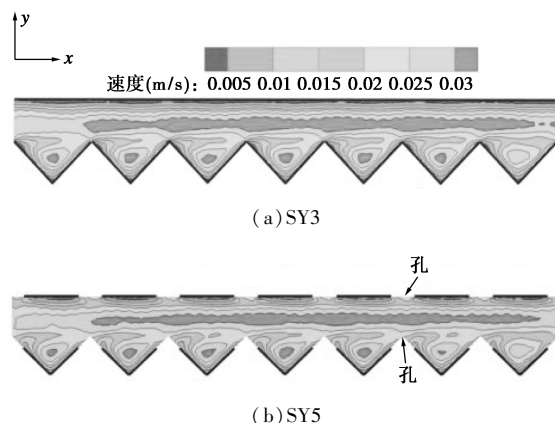


图 7 $Z=0$ mm 平面上速度云图(m/s)

2.5.2 波纹管内速度矢量图对比

图 8 为 $X=54$ mm 截面上二维速度矢量图。从图 8 中可以看出,SY3 型波纹管流道内速度在截面上分布不均匀,在截面顶角的近壁面处速度为零。SY5 型波纹管流道内速度在截面上分布较均匀,在小孔处具有较大的速度,并且小孔可以改变附近流体流动方向,使处于流道上部的流体向小孔处汇聚。

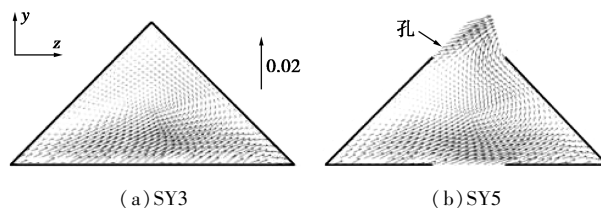


图 8 $X=54$ mm 截面上二维速度矢量图

2.5.3 波纹管内油滴浓度分布对比

图 9 为波纹管内流道油滴浓度分布图。如图 9 所示,油滴浓度分布集中在上流道的顶部,说明波纹管对油滴的聚合具有积极作用。图 9 中,对比 SY3 与 SY5 2 种板型的油滴浓度分布规律可知,在流道内,SY5 型波纹管内的油滴高浓度区域少于 SY3 型波纹管内油滴高浓度区域。出现上述差别的原因在于开孔波纹管内,大量油滴可以通过小孔浮升到上层流道,使得停留在本流道内的油滴数量减少,出现低的油滴浓度。

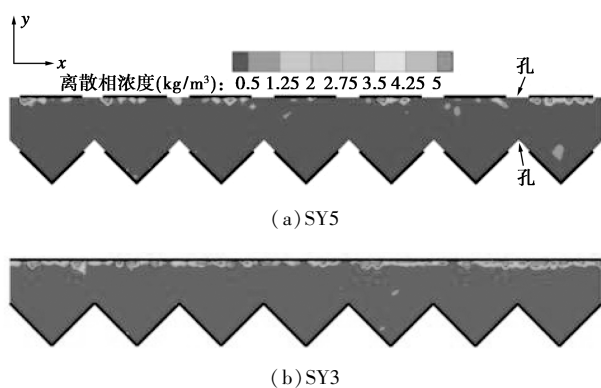


图 9 $Z=0$ mm 平面上油滴浓度分布(kg/m^3)

图 10 为距波纹管末端 10 cm 的分离器横截面上油滴浓度分布图。图 10 中对比可以发现,SY5 型波纹管后的油滴分布区域集中,SY3 型波纹管后的油滴分布区域分散。SY5 型波纹管内的油滴在板内可通过小孔浮升到上层;而在 SY3 型波纹管内,油滴在聚结填料内不能跨层浮升,导致下层波纹管流道内的油滴一直处于分离器底层,限制了油滴的浮升。由此可知,开孔波纹管比无孔波纹管对油水分离具有更好的效果。

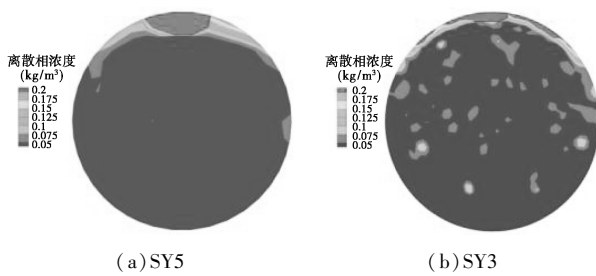


图 10 波纹板段后 10 cm 横截面处油滴浓度分布 (kg/m^3)

3 结论

(1) 油滴吸附在聚结材料表面,形成油膜,沿波纹板表面移动、脱落、浮升至分离器上部实现两相分离。波纹板板高减少,水相出口中大油滴数目份额随之降低,油水分离效率随之升高。板高一定时,油水分离效率随进口流量增大而降低,在波纹板上开孔亦可以增大油水分离效率。

(2) 采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型对无孔波纹板(SY3型)与开孔波纹板(SY5型)内部流场进行对比研究,SY5型波纹板内小孔对附近流场产生影响,使附近流体向小孔处汇聚,在小孔处具有较大的速度。

(3) 采用 DPM 模型对无孔波纹板(SY3型)与开孔波纹板(SY5型)内油滴浓度分布规律进行对比研究,发现 SY5 型波纹板流道内具有较少的油滴高浓度范围,且波纹板后的油滴分布比较集中,而 SY3 型波纹板后的油滴分布分散;波纹板内小孔可为油滴浮升提供便捷通道,缩短油滴浮升时间,提高分离效率。

本文中建立的计算模型只对 2 种波纹板型号的流体力学性能进行了研究,但是利用本文中建立的计算模型,通过改变物理模型的相关尺寸参数,可以考察不同开孔率、不同板高及不同板倾角的波纹板型内部流动情况,相比于实验方法更加经济和省时。

参考文献

- [1] Han Yunrui, He Limin, Luo Xiaoming. A review of the recent advances in design of corrugated plate packs applied for oil-water separation[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2017, 53: 37-50.
- [2] Ehsan Tavakoli, Reza Hosseini. Numerical analysis of 3D cross flow between corrugated parallel plates in evaporative coolers[J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(2): 884-892.
- [3] Li Zhenxing, Gao Yangyan. Numerical study of turbulent flow and heat transfer in cross-corrugated triangular ducts with delta-shaped baffles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108: 658-670.
- [4] 孙凤丹. 波纹板表面流体流动特性的数值模拟[J]. 现代化工, 2012, 32(1): 90-93.
- [5] 曾菁, 高鑫, 李洪, 等. 泡沫碳化硅波纹规整填料的流体力学及传质性能[J]. 现代化工, 2012, 32(10): 70-73.
- [6] 陈江波, 刘春江. 计算流体力学方法模拟规整填料塔内流体流动行为的研究进展[J]. 石油化工, 2007, 36(9): 961-965.
- [7] 刘春江, 黄莹, 李莹珂, 等. 规整填料特征单元内混合过程的计算流体力学[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2006, 39(10): 1162-1168.
- [8] 张海涛. 波纹板聚结器流动特性的数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [9] Wang G, He L, Lu Y. Study on oil-water separating behavior of gravity separator[J]. Shiyou Xuebao/Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(6): 112-115.
- [10] 张敬革, 王雷, 聂凡, 等. 波纹板填料的流体力学性能[J]. 化工进展, 2012, 31(11): 2411-2414, 2441.
- [11] 张杰. 油水重力分离过程两相流动数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.
- [12] 孙治谦, 金有海, 王振波, 等. 聚结构件结构对重力分离器油水分离性能的影响[J]. 化工学报, 2010, (9): 2386-2392.
- [13] Yayla S, Ibrahim S S, Olcay A B. Numerical investigation of coalescing plate system to understand the separation of water and oil in water treatment plant of petroleum industry[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2017, 11(1): 184-192.
- [14] Zhang Luhong, Xiao Hong, Zhang Haitao. Optimal design of a novel oil-water separator for raw oil produced from ASP flooding[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 59(3/4): 213-218.
- [15] Ivanenko A Yu, Yablokova M A, Petrov S I. Simulation of the separation of emulsified oil products from water in an apparatus with sinusoidal-profiled oleophilic plates[J]. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2010, 44(5): 729-741.
- [16] 董润仁, 计建炳, 徐崇嗣. 液体初始分布对金属波纹板填料液体分布的影响[J]. 石油化工, 1990, (2): 88-93.
- [17] Wang Xiaojing, Yan Yangyang, Xu Zhongzheng. Application experiment and numerical simulation analysis of oil-water separator with two-oriented corrugated coalescence plate[J]. Journal of Dispersion Science and Technology, 2016, 38(10): 1509-1515.
- [18] Spielman L A, Su Y P. Coalescence of oil-in-water Suspensions by flow through porous media[J]. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals, 1977, 16(2): 272-282.
- [19] Zheng Ling, Du Yingsheng. Corrugated board coalescing oil-water separating technology[J]. Oil-Gasfield Surface Engineering, 1994, (2): 1-3, 21-77.
- [20] Krasniński A. Separation of oil-in-water emulsions using polymer coalescence structures[J]. Environment Protection Engineering, 2016, 42(2): 19-39. ■