# 基于旋流文丘里管 - 泡沫发生器内流场模拟 分析及结构优选

### 李乾鹏,王长建

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年5月25日; 录用日期: 2025年6月18日; 发布日期: 2025年6月25日

### 摘要

本文针对油田冲砂洗井工艺中泡沫发生器发泡效率低、井下消泡严重的问题,结合气液两相流动机理, 开展泡沫发生器结构优化与内部流场数值模拟研究。在现有的泡沫发生器结构基础上,新增旋流文丘里 管结构,并在螺旋搅拌式泡沫发生器内部结构中设置正、逆旋区域。通过内部流场的数值模拟,对比分 析内部流场的气相分布、速度分布、迹线分布及内部压力变化情况,系统地分析多级挡板扰流式、螺旋 挡板式、螺旋搅拌式3种内部结构不同的泡沫发生器的发泡性能。模拟结果表明:螺旋搅拌式泡沫发生器 的发泡性能最好,比螺旋挡板式混合效果提升2%左右。

### 关键词

泡沫发生器,气液两相流,结构优选,数值模拟,发泡性能

## Simulation Analysis and Structural Optimization of the Flow Field in the Swirl Venturi-Foam Generator

#### **Qianpeng Li, Changjian Wang**

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: May 25<sup>th</sup>, 2025; accepted: Jun. 18<sup>th</sup> 2025; published: Jun. 25<sup>th</sup>, 2025

### Abstract

Aiming at the problems of low foaming efficiency and severe downhole defoaming in the sand

flushing and well washing process of oil fields, this paper combines the gas-liquid two-phase flow mechanism to carry out the optimization of foam generator structure and numerical simulation of internal flow field. On the basis of the existing foam generator structure, a swirl venturi tube structure is added, and positive and reverse swirl areas are set in the internal structure of the spiral stirring foam generator. Through the numerical simulation of the internal flow field, the gas phase distribution, velocity distribution, trace distribution and internal pressure change of the internal flow field are compared and analyzed, and the foaming performance of three foam generators with different internal structures, namely multi-stage baffle turbulence type, spiral baffle type and spiral stirring type, is systematically analyzed. The simulation results show that the spiral stirring foam generator has the best foaming performance, which is about 2% higher than the spiral baffle type mixing effect.

### **Keywords**

Foam Generator, Gas-Liquid Two-Phase Flow, Structure Optimization, Numerical Simulation, Foaming Performance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

### 1. 引言

在全球化石能源结构中,石油和天然气的开采与利用占据着举足轻重的地位。随着石油工业的快速 发展,大部分油气田的开采已进入中后期阶段,面临着一系列新的挑战。油田开采出现了低压、稠油(沥 青质和胶质含量较高、粘度较大的原油)等现象,而这些现象占油田开采困难的绝大部分,还在持续增长, 上述油田在开采过程中油层出砂现象频发,严重制约了油田的高效采出[1]。因此需要进行冲砂洗井来保 证油田的正常开采,常规油井冲砂作业采用清水作为媒介[2]。但随着油井和地层开采,漏失大和地层水 敏等原因,洗井效率低下,降低油井产液效率[3]。

针对上述问题,泡沫流体冲砂洗井应运而生,泡沫流体具有密度低、粘度大、携砂能力强的特点[4] [5]。泡沫发生器是制备均匀致密泡沫的重要设备,其结构设计是否合理对其发泡效果至关重要[6]。在泡 沫发生器的设计过程中,应考虑以下四方面的因素:

- 1) 使气液两相流体在发生器内部呈高速、紊态流动。
- 2) 尽量使得液体分散形成薄膜状,以增大气液接触面积。
- 3) 通过保证一定的机械搅拌作用,使得泡沫的粒径更均匀。
- 4) 通过剪切挤压的作用让大泡沫变成小泡沫,从而使得到的泡沫更致密细小。

因此,优化泡沫发生器结构,提高冲砂效率,对于提高上述困难油田的开发效率具有重要的现实意 义。我国油田用泡沫发生器的结构形式多种多样,但大部分为地面发泡器。典型的地面泡沫发生器结构 形式有涡轮式、螺旋式、同心管式、孔隙式和挡板式[7]。但是传统的泡沫发生器发泡倍率低或容易堵塞。 近年来,出现了很多新型的泡沫发生器结构,如张承武提出对冲式泡沫发生器[8],采用多级对冲射流实 现气液混合流体的高速对撞,达到角向交错、径向穿插、周向搅混和内外迂回的功效,具有扰动强度大, 混合程度高,结构磨损小等特点,适合现场大排量的施工要求;LuC针对现有压缩空气泡沫系统FER9 较低并难以兼顾射程的问题,在同心管式泡沫发生器的基础上设计了一种新型 CAFS 泡沫发生器——气 液同轴泡沫发生器[9],该泡沫发生器在液量为12.4 m<sup>3</sup>/h 时达到最佳发泡性能,其特点是泡沫膨胀率(FER) 高且输出动量大。当液体流量超过12.4 m<sup>3</sup>/h 时,增大供气量可进一步提升发泡效果;而发泡室直径对性 能的影响呈非线性关系,需通过实验确定最优直径值以实现最佳性能;张维薇[10]提出多级挡板扰流式泡 沫发生器,并得出在挡板角度为90°时发泡性能最好,气相体积分布在46%~52%波动,由于只有平面二 维的扰流,导致气相分布不均;刘承婷[11]在螺旋式泡沫发生器的基础上进一步结合了挡板式独特的性 能,设计了螺旋挡板式泡沫发生器,从内部螺距及气液比角度对其发泡性能分析,但发生器内部没有使 液相受到剪切作用的元件,无法通过剪切作用让大气泡破碎成小气泡。本文在现有的泡沫发生结构的基 础上初选三种结构比较简单,不易发生堵塞并发泡性能较好的三种泡沫发生器结构并分别对其进行一定 的结构优化[12]。基于计算流体力学(CFD)方法,应用 fluent 软件对优化过后的结构进行三维数值模拟, 系统对比分析不同结构的内流场流动特性,结合出口截面气液掺混效率的具体数据,优选出发泡性能最 好的泡沫发生器结构。

### 2. 结构设计与网格划分

#### 2.1. 物理模型的建立与流体域抽取

根据所选的三种高效的泡沫发生器结构,并结合相关研究文献最终优化得出的结构以及尺寸参数, 分别建立其相应的三维模型,根据三维模型得出流体域模型流体域模型如图 1~3 所示。



**Figure 1.** Schematic diagram of the internal flow field with multi-stage baffle spoilers 图 1. 多级挡板扰流式内流场示意图



**Figure 2.** Schematic diagram of the internal flow field of the spiral baffle 图 2. 螺旋挡板式内流场示意图



Figure 3. Schematic diagram of spiral stirring internal flow field 图 3. 螺旋搅拌式内流场示意图

三种流体域模型外部结构均相同,均为四个与流体域表面相切的四个液相入口,两个对称设计的气相入口,液相入口为12.5 mm,气相入口为10 mm,流体域长度为780 mm,最大外径为80 mm。基于气液分相入口设计,通过扩散段形成的低压区实现气体高效引入。多级挡板扰流式泡沫发生器结构由前端旋流文丘里管,混合腔、以及六块等距的挡板组成,采用气液分相入口,加强发泡基液与气体的掺混效果,提高发泡效率;螺旋挡板式泡沫发生器结构由前端旋流文丘里管、焊接在固定杆上的变螺距导流片、八块等间距的半圆形挡板组成;螺旋搅拌式泡沫发生器结构由前端文丘里管、焊接在同一根固定杆上的变螺距导流片和螺旋状布置的搅拌叶片、混合腔组成。其中螺旋搅拌式泡沫发生器中变螺距导流片共三圈,长度为75 mm,最大螺距为45 mm,最小螺距为5 mm;搅拌叶片共10 对,间距均为10 mm,升角呈7.5°左右。各模型具体尺寸见下表1~3。

### Table 1. Structural parameters of multi-stage baffle flow-around 表 1. 多级挡板绕流式结构参数

左端面外径 mm	挡板间距 mm	出口直径 mm	喉道长度 mm	扩散角(°)	喉道直径 mm	板间间距 mm	挡板个数	挡板半径 mm
50	50	15	6	16.26	15	50	6	25

### Table 2. Spiral baffle structure parameters 表 2. 螺旋挡板式结构参数

左端面外径 mm	最大与最小螺距 mm	圈数	固定杆长度 mm	固定杆直径 mm	挡板间距 mm	挡板个数	挡板半径 mm
50	45, 5	3	300	10		8	25

 Table 3. Spiral stirring structural parameters

 表 3. 螺旋搅拌式结构参数

最大与最小 螺距 mm	圈数	固定杆长 度 mm	固定杆直 径 mm	叶片对数	叶片宽度 mm	叶片升角 (°)	叶片间距 mm	相邻叶片 夹角(°)
45, 25	3	300	10	10	10	7.5	10	90

### 2.2. 流体域模型网格划分

由于模型的结构复杂,使用结构化网格的划分方法比较困难,同时计算量较大,需要保证模拟的结

果更精确的同时减小计算量,缩小网格划分对结果的误差,本文拟采用 fluent meshing 采用六面体对三种 泡沫发生器流体域进行非结构化网格划分,同时对网格的质量以及数量进行调整,通过对比分析进出口 压差变化来进行网格无关性验证,结果表明当三种模型的网格数量分别达到 823,647、934,462、1,018,475 时,进出口压差基本保持不变,即网格质量满足后续的模拟分析要求。

### 3. 边界条件及计算模型的选择

发泡基液为起泡剂、稳泡剂、水、以及其他试剂混合而成,其中起泡剂的浓度为 3%左右,泡沫由发 泡基液与气体充分混合形成。本文采用气液两相流混合模型对泡沫发生器内部进行内部流场的模拟分析, 由于发泡剂浓度较小,此处用液态水代替泡沫基液模拟,但物质属性仍使用混合基液的物质属性[13]。设 定水为主相,空气为次相。气液两相物质属性如表 4。

	~	
相	密度(kg/m³)	粘度(kg/(m·s))
水	1020	0.0016
空气	1.225	1.7894

 Table 4. Material property setting parameters

 表 4. 物质属性设置参数

利用 CFD 软件 Fluent 对流体域模型进行求解,在求解器中设置为三维空间、双精度求解。求解器设置为压力基,采用绝对速度公式、稳态时间求解器。考虑重力加速度对发泡结果的影响,设置重力加速度为 9.8 m/s<sup>2</sup>,方向为 Y 轴负方向。多相流模型选择 Mixture 模型进行模拟,气液两相均为速度入口,液体速度为 1 m/s,气体速度为 3.25 m/s。湍流计算模型采用标准 k-*e* 湍流模型,使用标准壁面函数(SWF)进行近壁面处理,无滑移边界条件。利用 SIMPLEC 算法进行速度压力耦合,选择有限体积法对控制方程进行离散,压力采用 PRESTO!的方式,动量、湍流动能、湍流耗散率均采用 Second Order Upwind 格式进行离散,体积分数使用 QUICK 方法,解决方案控制的亚松驰因子均设为默认,收敛精度设为 10-6。采用混合初始化,设置迭代次数为 10,000 次,通过以上设置进行数值模拟计算。

### 4. 数值模拟结果对比分析

泡沫发生器发泡性能的评价指标包含了其内部流场的混合相迹线分布、速度场分布、静压分布、以 及气相体积分数分布等。而其高效率发泡的要求又在于结果设计是否能够使气液两相混合均匀,以下内 容将对比分析数值模拟得到的数据。

### 4.1. 迹线分布

迹线分布是流体在泡沫发生器内部流场中最直观的反应,可以更直接、具体地观察到流体的流动掺混 情况。泡沫发生器迹线分布如图所示。以下三个迹线分布图可以观察到,液体从旋流文丘里管进入内部流 场之后呈螺旋状运动,旋流效应显著增强了液体的湍流,增加了液体与气体接触面积的不稳定性[14]。以 上三种泡沫发生器均采用旋流文丘里管进行优化,对比传统文丘里管,其湍流强度、湍流动能均有所提升。 从多级挡板扰流式的迹线分布图 4(a)可以看出,气液混合相在经过挡板之后产生了明显的涡旋,但内部的 迹线相对较少,在挡板间横截面迹线图可以了解到,在挡板间无横向涡旋。证明流体的流动产生了曲折回 路扰流,并且只有波浪形的平面二维扰流,并无交错穿插的流动状态;从螺旋挡板式的迹线图中可以观察 到,混相液体在前端旋流文丘里管的作用下已经产生了稳定的旋流,经过变螺距导流片之后由于螺距变小 的原因形成了高速螺旋流,螺旋流在经过挡板时,由于挡板的阻碍作用,流体只能在挡板间呈曲折式的流 动,但是在挡板后面出现了较大的涡旋,其中的流线数量较多并且有交错穿插的状态,在变螺距导流片之 后与挡板产生了碰撞扰动,说明大部分的流体可以通过这些涡旋实现掺混融合,在板间横截面和中分面迹 线图可以看出横向出现了较大的涡旋但是数量较少,流体的掺混效果较弱;从螺旋搅拌式迹线分布图 4(c) 可以得出变螺距导流片起加速作用,变螺距导流片后形成的高速螺旋流为下一步叶片的搅拌作用提供了更 强的螺旋动力。由于搅拌浆片带有 7.5°的升角并且呈螺旋状布置。高速螺旋流经过搅拌浆片时会被进一步 地剪切分流,在流体域中气液两相交叉穿错式地流动。由其中分面与横截面迹线分布图(图 5)可以观察到, 稳定的螺旋流在搅拌浆片的剪切作用下形成多股不规则的涡旋流动,这些涡旋造成混相液体的不稳定性, 可以加速气液混合,提高混合效率。并且在其混合腔至出口的后半段,混相液体仍是大体沿着流体域轴线 方向呈弱螺旋流动,使其在均匀混合的状态下避免强螺旋流造成气液分离。



Figure 5. Comparison of facets and cross sections 图 5. 中分面和横截面对比图

### 4.2. 速度分布

泡沫产生的核心要素为泡沫流体受到的剪切搅拌强度的大小,而剪切搅拌强度的大小又是由速度分布所决定的。为使更直观的观察到泡沫发生器内部流场的速度分布,在此笔者取其中分面的分布云图,如图 6 所示。液体在旋流经过文丘里管喉管的时候由于尺寸的骤减,速度变大,起到加速作用,但由于扩散端存在紊流扩散的作用,导致混合相的流速降低。从图 6(a)多级挡板扰流式泡沫发生器的速度分布云图可以看出混相流体继续经过挡板时,由于挡板的阻碍作用,使得在混合腔的后半段速度减小,并且

速度减小的范围较大。喉管与挡板开口向都有尺寸减小的现象,导致流速变大,因此在这两个位置的湍流强度也会较高,但是从云图可以看出速度分布极其不均匀,高速部分整体呈蛇形分布,只有平面二维的扰动,表明气液两相在内流场的掺混效果并不好,不利于气液两相充分混合产生泡沫。螺旋挡板式的速度分布如图 6(b)所示,在经过变螺距导流片后形成高速螺旋流,并且由于螺距由大变小,导致流场被进一步压缩,使得扩散段减小的速度由变大,保证了其经过挡板时的流速,改善了挡板式混相流体的速度损失问题。同时对比多级挡板扰流式结构,挡板后的低速区范围也缩减,在挡板间形成了较强的涡旋,速度分布也更为均匀,表明气液两相的掺混效果较好。图 6(c)表示的为螺旋搅拌式泡沫发生器的速度分布云图,从云图可以看出在变螺距导流片及之前的速度分布基本上与螺旋挡板式前端一致,均起到加速以及螺旋扰动效果。在搅拌叶片分布区域呈对称式分布,又由于搅拌叶片呈螺旋状等间距排布,使得混相液体被剪切的更均匀,分流作用更明显,以至于产生更多小尺度涡旋,在混合腔内的速度分布非常均匀有利于泡沫的输送。螺旋搅拌式的搅拌叶片面积相对于挡板面积较小,对液体的阻碍作用也减小,可有效防止在液体内部的速度损失,保证泡沫的输出速度。



**Figure 6.** Comparison of velocity distribution of foam generator 图 6. 泡沫发生器速度分布对比云图

### 4.3. 静压分布

泡沫发生器内部的压力变化是发泡性能考察的重要因素,其出口压力决定了管道输送中的进口压力。 泡沫发生器内部流场中分面静压分布如图 7 所示。在旋流文丘里管收缩段的静压值最大,由于液相相对 于内壁面切向进入,导致旋流中心的静压值远小于近壁面的静压值,在喉管与收缩段流速较高,因此这 部分的静压值相对较小,更利于液体进入混合腔。在旋流文丘里管的扩散段,由于内径的突然变大,速 度降低,此处的静压随之升高,根据伯努利原理,对三种泡沫发生器的出口都进行优化,设置成收缩段 的结构,保证此处由于尺寸的变小导致的压力增大,使得出口动能增加,速度增大,与速度云图刚好对 应。从图 7(a)可以观察到多级扰流挡板式泡沫发生器静压整体呈下降的趋势,在第五块挡板时产生明显 变化。从图 7(b)与图 7(c)可以看出,在变螺距导流片处的压力变化都是相似的,在挡板处部分的压力明显 小于变螺距导流片处的压力,但是由于搅拌叶片的尺寸小于挡板,所以其压力损失也更小,并且搅拌叶 片呈螺旋式等间距分布,所以压力分布相对于前两者更均匀。



**Figure 7.** Comparison of static pressure distribution of foam generator 图 7. 泡沫发生器静压分布对比云图

### 4.4. 气相体积分布

发泡器内部流场内气液两相体积分数的分布均匀性,是衡量该装置发泡性能的核心评价指标。因此洗 取泡沫发生器内流场的中分面以及出口截面沿 y 轴位置的气相体积分数分布来分析整个流场的状态。泡沫 发生器气相体积分数如图 8 所示,从多级挡板扰流式的云图可以看出其整体的混合不均匀,气液掺混不理 想,在第一块挡板的位置还存在大气泡,气液两相存在明显的交界面。气相伴随着液相做平面二维的扰流, 整体呈波浪式流动,在第四块挡板后部区域还存在气相接近于零的地方,与混相液体的速度云图大致相同, 但是由于受到挡板的曲折扰流,在混合腔后半部分可以看出气液两相的混合效果得到了加强,当时仍存在 较明显的气液分界面,从图 8(b)可以观察到,在变螺距导流片处存在少量大气泡,经过变螺距导流片的加 速作用之后,其湍流强度也随之增强,后处接挡板,增加了其扰流碰撞的机会,并且在挡板之间存在较大 的涡旋,使得气液间的混合效果得到加强,在其混合腔后半部分只有较小的气液分界面,但是呈波浪形的 分布,表明挡板的扰动效果仍然在作用,使得掺混效果减弱,螺旋挡板式的分布均匀性相对于多级挡板扰 流式提升较多。螺旋搅拌式的云图可以看出,在变螺距导流片处由于与螺旋挡板式的前端结构相同,所以 其气相分布也大致相似,存在分布不均的情况。由于螺旋状布置的搅拌叶片,使得气液两相的混合效果逐 渐增强,在第五对搅拌叶片处趋于均匀,后五对叶片可以起到将大泡沫剪切细化形成小泡沫的作用,更利 于致密泡沫的产生,这与速度场的分析一致,在变螺距导流片处末端处湍流强度变大,在第三对搅拌叶片 处达到最大,迹线分布也显示在前三对产生的小涡旋较多,即扩散与掺混效果好,后半部分的气相分布均 匀,并且与出口位置的气相分布保持一致。以上的分析恰恰验证了迹线分布与速度分布的准确性。





(c) 螺旋搅拌式

如图 9 所示,多级挡板扰流式的混合效果最差,整体波动幅度很大,差值达到 32%左右,螺旋挡板 式与螺旋搅拌式均存在少量波动,但是螺旋搅拌式整体比螺旋挡板式混合效果高 2%左右,表明螺旋搅拌 式的混合效果最好。



**Figure 9.** Comparison of gas volume fraction at the outlet section 图 9. 出口截面气相体积分数对比图

### 5. 结论

基于计算流体力学(CFD)技术,本研究三种不同结构的泡沫发生器内部流场,对其开展了三维数值模 拟研究。通过构建 Mixture 多相流模型与 Realizable k-*ε* 湍流模型,系统分析了流场特性参数,包括迹线 分布、速度矢量分布、压力分布规律及气相体积分数分布特征。结果表明:

1) 数值模拟显示,螺旋搅拌式泡沫发生器通过变螺距导流片与螺旋叶片的协同作用,形成多尺度涡旋 流动,使气相体积分数分布均匀性较螺旋挡板式提高约 2%,出口截面气液分界面不明显,发泡效率最优。

2)多级挡板扰流式存在混合局限性:平面二维扰流特性导致气液分界面明显,气相体积分数波动达
 32%,混合均匀性最差,表明单纯挡板结构难以实现高分散效率,需结合动态剪切元件优化。

3) 螺旋挡板式在挡板间形成交错穿插的涡流流动,对混合效果有一定的提升,减少了低速区的范围, 使得速度分布更均匀,压力损失相对于多级挡板扰流式的较少,整体的发泡性能优于多级挡板扰流式,

**Figure 8.** Distribution cloud diagram of gas phase volume fraction in foam generator 图 8. 泡沫发生器气相体积分数分布云图

但这两种泡沫发生器内部流场都无较强的轴向与径向的速度分量,使得整体产生的涡旋较少。

4) 旋流文丘里管的创新设计使得通过文丘里管区域的液相整体的湍流强度变大,在扩散段的时候使液体的稳定性变差,更有利于气液两相的混合。螺旋搅拌式结构的性能优势源于其剪切作用与湍流强化机制。其中变螺距导流片通过螺距从 45 mm 减少为 5 mm 对螺距进行压缩,使流体加速,并形成速度梯度,显著提升湍流动能,促进气液交界面失稳。等距的螺旋叶片升角设计诱导产生轴向与径向速度分量,形成多尺度涡旋,同时采用正、逆旋的分区设置,使得涡旋进一步增加,最终使气泡破碎效率增加。因此其气相体积分布更均匀,且出口截面泡沫致密细小,发泡效率最高。

5) 设计螺旋搅拌式泡沫发生器,并进行数值模拟仿真理论分析,由于螺旋搅拌式泡沫发生器需组装 至整体的氮气泡沫发生撬上,并未进行相关实验,后续应进行现场实验,验证发泡效果,并对结构进行 进一步的优化。

### 参考文献

- [1] 赵永军. 稠油油井出砂规律研究与应用[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(9): 278.
- [2] 陈大钧,等.油气田应用化学[M].北京:石油工业出版社,2006.
- [3] 李兆敏. 泡沫流体在油气开采中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- [4] 刘伟, 董胜祥, 曹子龙. 泡沫洗井工艺的研究及应用[J]. 钻采工艺, 2002, 25(2): 53-56.
- [5] 李治龙, 钱武鼎. 我国油田泡沫流体应用综述[J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(6): 88-94.
- [6] 张江涛, 汤文斌, 成晓伟. 基于 Mixture 模型泡沫发生器气液两相流数值模拟[J]. 液压气动与密封, 2021, 41(9): 34-37.
- [7] 申瑞臣. 泡沫发生器结构设计综述[J]. 石油机械, 1993, 21(5): 52-55.
- [8] 张承武,武月荣,万向辉,等.对冲式泡沫发生器的流体建模与有限元仿真[C]//陕西省石油学会,西安石油大学, 北京振威展览有限公司.2023国际石油石化技术会议(2023IPPTC)论文集.川庆钻探工程有限公司钻采工程技术 研究院;低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,2023:1-7.
- [9] Lu, C., Zhong, X., Chen, M., et al. (2024) Study on Gas-Liquid Coaxial Jet Foam Generator and Its Foaming Characteristics. ACS Omega, 9, 31646-31656. <u>https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01862</u>
- [10] 张维薇. 多级挡板扰流泡沫发生器流场分析及实验研究[D]: [硕士学位论文]. 东北石油大学, 2019.
- [11] 刘承婷, 张维薇, 刘钢, 等. 螺旋挡板式泡沫发生器的设计及内部流动特性研究[J]. 数学的实践与认识, 2018, 48(8): 120-127.
- [12] Chen, J. (2018) Property Experiments on the Foam Generator and Its Influencing Factors during Down-the-Hole Drilling. Process Safety and Environmental Protection, 114, 169-178. <u>https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.08.047</u>
- [13] 闫月娟,曹宇航,桑小娜,等. 井下泡沫发生器内流场数值模拟及结构优选[J]. 化工机械, 2021, 48(1): 89-93+118.
- [14] Wang, X., Shuai, Y., Zhou, X., et al. (2020) Performance Comparison of Swirl-Venturi Bubble Generator and Conventional Venturi Bubble Generator. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 154, Article 108022. <u>https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.108022</u>