

# 泡沫钻进流体循环用消泡器设计与数值模拟分析

王劲松<sup>1,2</sup>, 蒋建良<sup>2</sup>, 潘永坚<sup>2</sup>, 蔡国成<sup>2</sup>, 李高山<sup>2</sup>

(1. 深圳市土地投资开发中心, 广东 深圳 518000; 2. 浙江省工程勘察院, 浙江 宁波 315012)

**摘要:** 高效、经济、环保的消泡技术是泡沫钻进流体循环利用的基础。根据气体引射器原理, 设计了一种新型旋内喷式机械消泡装置, 以压缩空气为动力介质, 联合真空负压、冲击剪切、充气饱和及减速增压扩散 4 种作用方式快速消泡, 实现泡沫流体的循环利用。利用计算流体动力学软件 FLUENT 对消泡器内部速度和压力流场进行了数值模拟分析, 结果表明: 旋内喷式消泡器内部产生两个相邻重叠的真空负压区域, 能够对外界流体产生巨大的抽吸力, 抽吸量是入口压缩空气质量流的 1.6 倍左右; 当入口压缩空气的质量流为 0.1 kg/s 时, 消泡器中心最大负压值达到了 21 kPa; 在交汇式喷射孔的多股射流交汇碰撞点附近, 由于速度的提升, 形成了一个更大的负压区域, 对消泡产生积极作用。

**关键词:** 泡沫钻进; 流体循环; 消泡技术; 气体引射器; 旋内喷式消泡器

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2020)05-0053-07

## Structure design and numerical simulation of a mechanical foam breaker for foam drilling fluid recycling

WANG Jinsong<sup>1,2</sup>, JIANG Jianliang<sup>2</sup>, PAN Yongjian<sup>2</sup>, CAI Guocheng<sup>2</sup>, LI Gaoshan<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Land Investment and Development Center, Shenzhen Guangdong 518000, China;

2. Zhejiang Engineering Investigation Institute, Ningbo Zhejiang 315012, China)

**Abstract:** Efficient, economical and environment-friendly defoaming technology is the basis for achievement of foam drilling fluid recycling. A novel rotary and spray type of foam breaker was designed according to the gas ejector principle by which compressed air was used as the power medium combined with vacuum negative pressure, impact shear, aerated saturation and pressure diffusion for quick defoaming and foam fluid recycling. The computational fluid dynamics software FLUENT was employed to simulate the flow characteristics inside the foam breaker. The simulation results showed that the rotary and spray type of foam breaker generated two adjacent overlapping vacuum negative pressure areas inside and can produce great suction force on the outside flow with the suction amount about 1.6 times the compressed air at the inlet. The maximum negative pressure can reach 21kPa inside of the foam breaker when the mass flowrate of the compressed air flow at the inlet was 0.1kg/s, generating a larger area of negative pressure near the collision point of multiple jets from the converging nozzles due to jet speed boost which is conducive to defoaming.

**Key words:** foam drilling; fluid circulation; defoaming technology; gas ejector; rotary and spray type of foam breaker

### 1 概述

泡沫是由气体分散在含有少量发泡剂液体中, 形成的一种被液膜包裹起来的非均相分散体系<sup>[1]</sup>。均匀稳定的泡沫流体具有密度低、导热系数和热容量小、表面粘度和强度高、并且能够形成坚固致密的

蜂窝状结构等特点, 在钻探工程中常常作为一种特殊的钻井流体。泡沫钻进技术是一种先进的钻探技术方法, 属于一种欠平衡钻井技术, 我国在 20 世纪 80 年代开始泡沫钻进技术的研究和应用, 目前该项技术受到关注的程度也越来越高。

**收稿日期:** 2019-05-03; **修回日期:** 2020-03-25 **DOI:** 10.12143/j.tkgc.2020.05.009

**基金项目:** 宁波市自然科学基金项目“地热资源勘探开发多工艺泡沫气举反循环钻探关键技术研究”(编号: 2017A610318)

**作者简介:** 王劲松, 男, 汉族, 1986 年生, 工程师, 地质工程专业, 博士, 主要从事工程项目管理及复杂条件下钻探技术方面的研究工作, 广东省深圳市福田区新闻路 69 号 3 楼, swdwjs@163.com。

**引用格式:** 王劲松, 蒋建良, 潘永坚, 等. 泡沫钻进流体循环用消泡器设计与数值模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(5): 53-59.

WANG Jinsong, JIANG Jianliang, PAN Yongjian, et al. Structure design and numerical simulation of a mechanical foam breaker for foam drilling fluid recycling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(5): 53-59.

泡沫钻进技术凭借密度低、静夜压力小、泡沫表面粘度高、导热系数和热容量小、钻进过程中携岩能力强且上返流速较低、孔内清洁效果好等特点<sup>[2-6]</sup>能够有效克服地质条件复杂所造成的相关钻探难题,近年来在低压低渗地层的油气藏开发(如川东北地区的石油钻井)<sup>[7]</sup>、冻土区天然气水合物的勘探(漠河盆地冻土井工程施工)<sup>[6]</sup>及高温和超高温地热资源开采(如肯尼亚 OLKARI 地区的高温地热井)等领域得到了广泛的应用<sup>[8]</sup>,取得了显著成效。尤其对于目前国家所倡导“一带一路”建设过程中,解决西部干旱缺水地区的钻探难题具有重要意义。另外,“一带一路”的沿线城市及地区地热资源丰富,泡沫钻进技术在地热井钻井施工中,能够避免钻井液在出水层的漏失,提高地热井的出水量和出水温度,可以预见未来对泡沫钻进技术的需求将会越来越大。但从应用实践来看,泡沫钻进技术尚有大量的难题急需攻关,其中,消泡问题尤为突出,已成为制约泡沫钻进技术发展和推广应用的阻碍之一。

泡沫钻进采用的是均匀、稳定、高粘度的泡沫流体,当泡沫流体完成携岩任务上返到泥浆池后,由于泡沫的半衰期长、稳定性高,大量堆积在泥浆池内长时间不破裂,同时表面泡沫随风漂浮严重,干扰现场正常作业,并且对环保造成巨大压力,如图 1 所示。中石化在川东北地区的大湾 101 井和分 1 井,由于不能及时消泡,泥浆池很快堆满了泡沫而被迫转为常规泥浆钻井,大大延长了钻井周期<sup>[9-10]</sup>。此外,由于不能及时消泡,空气泡沫钻井流体仅能一次性使用,配制工作量大,表面活性剂材料消耗多,钻井成本高。如中石油长城钻井公司伊朗 TBK-2 井统计资料,二开  $\varnothing 660$  mm 井眼,进尺 378 m,配制基液量  $1799\text{ m}^3$ ,泡沫剂材料费用达到 60 万元,平均每米材料成本达到了 1588 元;四开  $\varnothing 311$  mm 井眼,采用硬胶泡沫进尺 166 m,平均每米的材料成本更是高达 2600 元<sup>[11]</sup>。

目前国内外常用的消泡方法是化学消泡,然而化学消泡剂的使用不但增加了成本,还会对泡沫基液造成污染,影响其再次发泡的效果,泡沫基液只能一次性使用且后续需处理大量的污水<sup>[12-13]</sup>。为此,近年来国内外学者进行了大量研究,提出了一些相关的机械物理消泡装置和方法,如辽河油田单正明等人研发的高速旋转离心式消泡器<sup>[14]</sup>,中国石油大学倪红坚等人提出的脉冲射流式消泡装置<sup>[15]</sup>,山东



图 1 泥浆池堆满泡沫

Fig.1 Mud pit filled up with foam

大学王萍、李英等提出的热力消泡装置<sup>[16]</sup>等。但是受诸多因素的制约,这些消泡装置要么结构复杂,加工安装精度要求较高,要么消泡工艺方式单一,消泡效率较低,难以满足现场的要求。因此,消泡器的结构和消泡效率有待于进一步完善和提高,研究和开发一种高效、经济、环保的消泡装置和消泡工艺方法成为泡沫钻进技术领域急需解决的问题。在前人的基础上<sup>[17-21]</sup>,根据多喷嘴引射器原理,设计了一种新型的旋内喷式机械消泡装置,并利用计算流体力学软件 FLUENT 对其内部流场进行了数值模拟分析,以消泡器内部速度和压力流场情况作为评价分析其实际消泡效果的依据之一。

## 2 旋内喷式机械消泡器结构设计

引射器是利用射流的紊动扩散作用,使不同压力的两股流体相互混合,并引发能量交换的流体机械和混合反应设备<sup>[22-23]</sup>,目前气体引射器已经广泛应用于机械和化工行业,在钻探工程中,也有根据引射器原理设计了相应的潜孔锤反循环钻头。图 2 所示为气体引射器结构及流体工作的示意图,主要由喷嘴、接收室、混合室和扩压室等 4 大部分组成。工作时高压喷射流体从喷嘴处高速喷出,在接收室附近产生一定负压区域,外界的流体在负压卷吸的作

用下进入混合室后发生能量和动量的交换,之后两股流体混合均衡,进入扩散室后速度变缓压力升高。

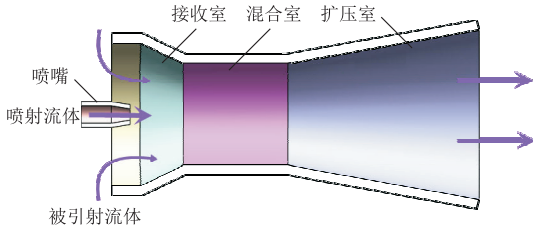


图 2 气体引射器结构及流体工作示意图

Fig.2 Structure and working schematic of the gas ejector

针对泡沫钻进技术中的消泡难题,根据气体引射器原理,在前人研究的基础上设计了一种新型的旋内喷式机械消泡装置,结构原理如图 3 所示。主要由泡沫接收管、进气腔体、喷射内管和扩散管等 4 部分组成。喷射内管作为旋内喷式消泡装置的核心部件,其壁面上分别均匀布置若干个螺旋式喷射孔和交汇式喷射孔。

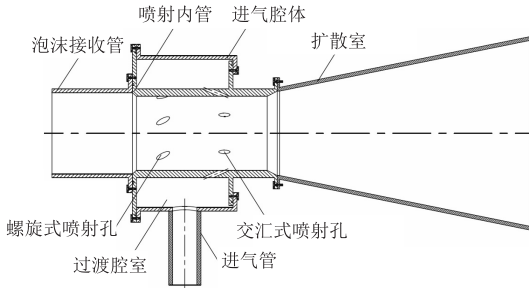


图 3 旋内喷式机械消泡器结构原理图

Fig.3 Structural principle of the rotary and spray type of foam breaker

旋内喷式消泡装置的工作原理过程如下:压缩空气从进气管进入过渡腔室,随后一部分气体经过喷射内管上的螺旋式喷射孔喷射进入管内,多股射流由于在管内受到内壁面的约束作用,气流在向右运动的同时沿着内壁面旋转运动,在管内中心通道附近形成局部的旋风式负压流场。携带岩粉屑的泡沫流体在旋流负压的抽吸作用下与压缩气体混合,泡沫在负压区域内由于内外压差而膨胀破裂,一级消泡后的混合流体继续向右运动。进入过渡腔室的另一部分压缩空气经过喷射内管上的交汇式喷射孔喷射进入管内,多股射流在前方交汇碰撞发生动量和能量的交换,并在喷孔附近再次形成局部的负压区域。经过前期消泡之后的残余泡沫流体在交汇点处受到多股气流的冲击剪切和负压作用而消泡。另一方面,由于大量压缩空气的混入,使原有的泡沫质

量增加,泡沫体系充气饱和后,液膜变薄,泡沫进而迅速破裂。经过 2 轮消泡后残留的饱和虚泡沫,在进入具有一定扩散角度的扩散室后,泡沫流体速度降低,动能转化成压能,液膜受到外部的压力而破裂扩散(即减速增压扩散作用),最终在扩散室的出口位置实现气液分离。

旋内喷式消泡装置是以压缩空气为动力介质,在消泡装置内部产生有益的流场,整个过程中联合了真空负压、冲击剪切、充气饱和及减速增压扩散四种作用方式快速消泡,保证钻进过程中上返的泡沫及时彻底的消除,实现泡沫流体的循环利用。因此,消泡器内部的流场情况很大程度上决定了实际的消泡效果。

### 3 旋内喷式机械消泡器内部流场模拟分析

由于消泡器内部通道内流体的流动形态复杂,多股射流交汇碰撞干涉,两级喷射孔喷射产生的流场也存在相互影响,难以用理论计算的方式真实地反映内部流场情况,而消泡器的内部速度和压力流场对消泡效果有着至关重要的影响。根据以往的经验分析,喷射流体交汇速度越大,对泡沫的冲击破碎效果越好,消泡器的内部负压值和负压区域越大,消泡效果也越明显<sup>[24-26]</sup>。因此,采用计算流体动力学(CFD)软件 FLUENT 对消泡器内部流场情况进行数值模拟分析,研究其内部速度和压力流场在不同位置上的变化情况。通过对比分析消泡器内部不同位置的速度和压力大小,以此来评价消泡器的实际消泡效果。

#### 3.1 流体通道几何模型

根据旋内喷式消泡器的结构特点,为了真实反映其内部流场情况,在 solidworks 软件中建立消泡器流体通道的三维几何模型如图 4 所示。其中,泡沫接收室长度为 100 mm,高压气体喷射室长度为 200 mm,扩散室长度为 200 mm、扩散角度为 15°。

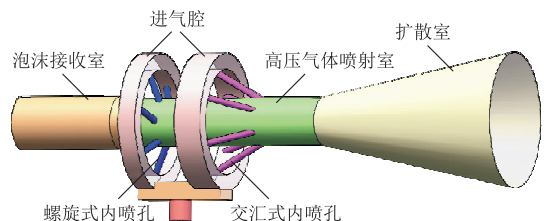


图 4 消泡器流体通道几何模型图

Fig.4 Fluid channel geometric model of the foam breaker

进气管通过过渡进气腔分别给两级喷射孔供气。喷射内管的壁面上分别均匀布置6个直径为6 mm的螺旋式喷射孔和交汇式喷射孔。其中螺旋式喷射孔与喷射内管的夹角为 $30^\circ$ ,偏转角为 $25^\circ$ ,交汇式内喷射孔与喷射内管的夹角为 $30^\circ$ 。

### 3.2 网格划分和边界条件

将上述消泡器流体通道的几何模型导入到 Gambit 软件中进行网格划分并设置相关的边界条件。数值分析时网格质量对求解速度和精度有重要的影响,如果网格精度不足会使分析结果产生较大误差,但网格太密又将使运算时间过长。为了更好地处理消泡器复杂的计算域及减少计算时间,对喷嘴附近的网格进行加密,其他计算区域均采用非结构化网格,网格单元总数量约为458766。

消泡器边界条件的设置如图5所示,在进气管入口处设置质量入口(Mass flow\_inlet)边界条件;消泡器的泡沫入口和出口均采用压力出口(Pressure\_outlet)边界条件,其它表面定义为 FLUENT 默认的无滑移壁面(Wall)边界条件, $u=v=w=0$ , $k=0$ , $\epsilon=0$ ,采用标准的壁面函数法来解决因粘性底层内的速度梯度与温度梯度大而需要布置很多节点的问题。通过单个进气管分别对两级喷射孔供气,入口压缩空气质量流为 $0.122\text{ kg/s}$ 。

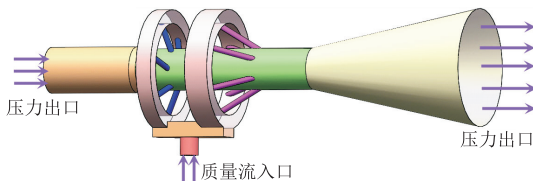


图5 数值模拟边界条件示意图

Fig.5 Boundary conditions for numerical simulation

### 3.3 求解参数设置

将上述定义好边界条件的网格模型导入 FLUENT 求解器中,进行参数的设置及求解控制。入口的压缩空气假设为理想气体,采用基于压力的耦合隐式求解器和 K-epsilon 湍流模型进行求解,对能量及湍流相应方程使用二阶精度迎风格式进行离散。求解过程中采用监测残差曲线的下降幅度和消泡器进出口的质量流变化曲线2种方式来对求解的收敛性进行判断。当残差曲线下降到设定的数量级或者消泡器进出口的质量流监测曲线基本趋于水平时,则意味着整个迭代求解过程已经收敛。如果求解过程中出现发散,可以适当调节亚松弛因子的值

或者重新修改网格,保证再次计算能够收敛。

## 3.4 CFD 数值模拟结果分析

### 3.4.1 速度云图

图6和图7为消泡器内部的速度场立体云图和剖面云图,压缩气体从螺旋式和交汇式喷射孔进入内管后,喷射流体的压力能转化为动能,两级喷射孔的喷嘴附近速度最大。图7的速度场剖面云图显示,由于多股喷射流体相互交汇碰撞混合,速度得到提升,对经过交汇点附近的泡沫产生冲击剪切作用,发生动量和能量的交换而使泡沫破裂。另外,由于大量压缩空气的混入,使原有的泡沫质量增加,泡沫体系充气饱和后,其流变性和失水性都会降低,液膜变薄,进而迅速破裂。

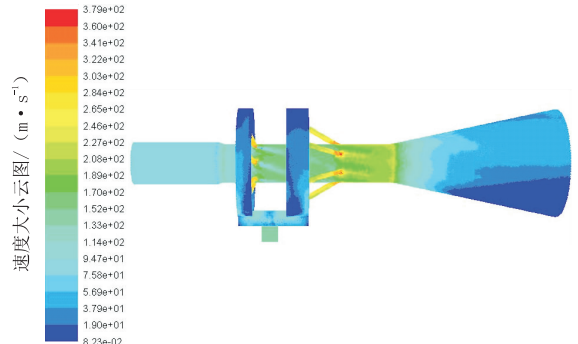


图6 消泡器内部速度场立体云图

Fig.6 Velocity field contour in the foam breaker

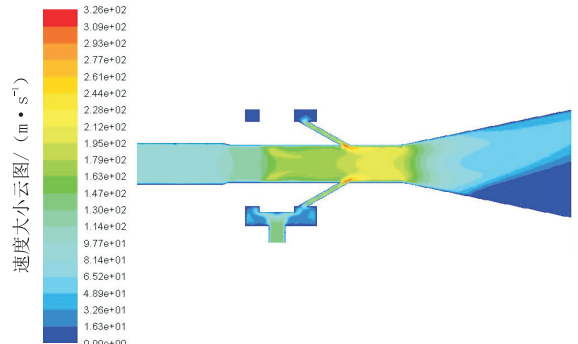


图7 消泡器内部速度场剖面云图

Fig.7 Velocity contour profile in the foam breaker

图8所示的泡沫入口处速度矢量图显示,当压缩空气进入消泡器内部开始工作时,由于高速喷射流体的卷吸作用,在泡沫入口处产生巨大的抽吸力,其周围的流体能够顺利地被抽吸进入消泡器。对消泡器进出口边界质量流进行监测,结果如表1所示,从表1中可以看出当进口处压缩空气的质量流流速为 $0.12200002\text{ kg/s}$ 时,消泡器对外界的抽吸量达到了 $0.20426793\text{ kg/s}$ ,是入口质量流的1.6倍左

右,这也从另一个方面表明旋内喷式消泡器的使用,对孔口密封性要求低,能很好地引导孔口返出的泡沫顺利进入消泡器。

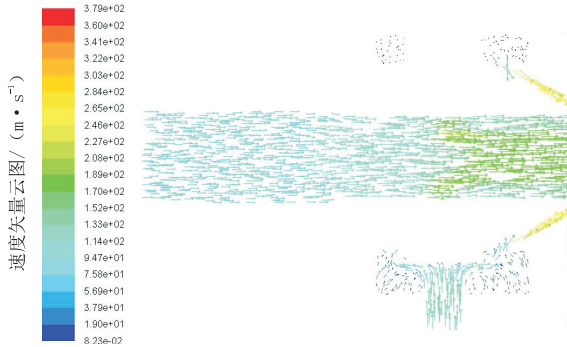


图 8 泡沫入口处速度矢量图

Fig.8 Velocity vector at the foam inlet

表 1 边界质量流计算结果

Table 1 Calculation results of boundary mass flow

	进出口边界名称	质量流流速/( $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ )
质量 流 监 测	空气进口(质量流入口)	0.12200002
	泡沫进口(压力出口)	0.20426793
	泡沫出口(压力出口)	-0.3262693
	进出口质量差值	$-1.3411045 \times 10^{-6}$

### 3.4.2 压力云图

图 9 和图 10 为消泡器内部压力场立体云图和剖面云图,从图中可以看出,喷射内管中产生一定的负压区域,靠近两级喷射孔的喷嘴附近负压值较大。在扩散室内,由于混合的喷射流体速度变缓,压力有所恢复。图 10 所示的压力剖面云图显示,在交汇式喷射孔的多股射流交汇碰撞点附近,由于速度的提升,形成了一个更大负压值的区域。当泡沫流体进入消泡器后,在喷射内管的负压范围内,由于内外压差作用而膨胀破裂。另外,在扩散室内由于混合流体的速度降低,动能转化成压能,液膜受到外部的压

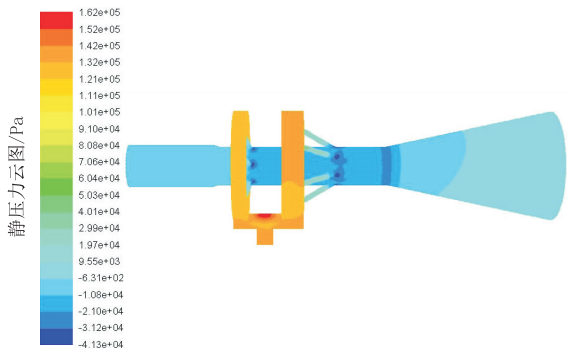


图 9 消泡器内部压力立体云图

Fig.9 Pressure contour in the foam breaker

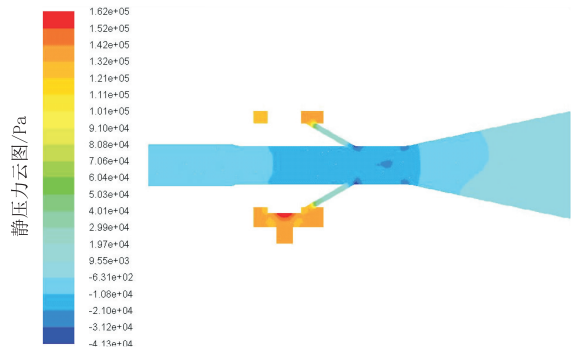


图 10 消泡器内部压力剖面云图

Fig.10 Pressure contour profile in the foam breaker

力而破裂扩散,残余的虚泡沫被消除,最终在扩散室的出口位置实现气液分离。

### 3.4.3 中心速度和压力变化对比曲线

消泡器内部中心线上速度和压力变化曲线结果如图 11 所示,其压力场随着流体速度的变化而变化。从消泡器的泡沫入口到出口位置,速度先增大后减小,而压力则是先下降后又回升到常压状态。由于创新设计了两级喷射孔,在消泡器的喷射内管段,速度出现两个相邻的波峰,即消泡器内的混合流体经过了两次连续加速和冲击破碎的过程。压力方面也出现了两个相邻的负压波谷,且后一级的负压值要比前一级的大,最大负压值达到 21 kPa 左右,这种相互重叠的负压区增大了消泡器的负压分布范围,延长泡沫在负压区停留的时间,避免了流速过高导致泡沫来不及破裂就已经流过负压区的现象。因此,新型旋内喷式机械消泡器的结构设计融合了多种作用方式联合消泡,在处理泡沫流体粘度高、流速大的工况下具有明显优势。

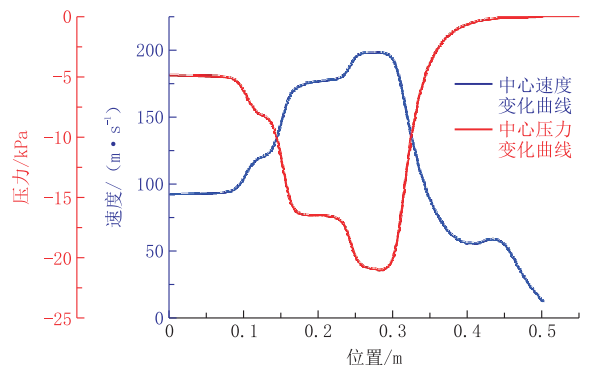


图 11 中心速度、压力变化对比曲线图

Fig.11 Velocity and pressure curves along the central line

## 4 结论

根据气体引射器原理,设计的一种新型旋内喷

式机械消泡装置,以压缩空气为动力介质,联合了真空负压、冲击剪切、充气饱和及减速增压扩散4种作用方式快速消泡,实现泡沫流体的循环利用。并且利用计算流体力学软件 FLUENT 对消泡器内部流场进行了数值模拟分析,主要结论如下:

(1)旋内喷式消泡器结构简单,加工安装方便,利用压缩空气作为动力介质,是一种单纯的气动力消泡方式。在一个装置上融合了多种作用方式联合消泡,整个过程对泡沫流体无任何污染,消泡后的泡沫基液能够循环利用。

(2)消泡器工作时,泡沫入口处的速度矢量图和进出口质量流计算结果显示,由于射流卷吸作用,泡沫入口处产生巨大的抽吸力,消泡器对外界的抽吸量是入口压缩空气质量流的1.6倍左右,能很好地引导孔口返出的泡沫顺利进入消泡器内进行充分的消泡。

(3)旋内喷式消泡器内部能够产生两个相邻重叠的负压区域,当入口压缩空气的质量流为0.122 kg/s时,消泡器内部产生的最大负压值达到21 kPa。

在今后地热井多工艺钻井技术中将泡沫钻进技术与气举反循环钻进技术相结合,形成一套新型泡沫气举反循环钻进的方式进行复杂地层条件下的地热井施工,弥补常规泥浆钻进技术的缺陷和不足。并且应用新型旋内喷式机械消泡装置对反循环上返出井口的泡沫流体进行消泡后再循环利用,丰富消泡技术工艺,获得更高的社会和经济效益。

## 参考文献(References):

- [1] 王劲松,曹品鲁,刘春鹏,等.泡沫钻井流体消泡技术研究进展[J].石油矿场机械,2013,42(3):21-26.  
WANG Jinsong, CAO Pinlu, LIU Chunpeng, et al. Research progress of defoaming technology in foam drilling fluid[J]. Oil Field Equipment, 2013,42(3):21-26.
- [2] 耿瑞伦,陈星庆,蒋荣庆,等.多工艺空气钻探[M].北京:地质出版社,1995.  
GENG Ruilun, CHEN Xingqing, JIANG Rongqing, et al. Multi-process air drilling[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [3] 万里平,孟英峰,李永杰,等.泡沫流体循环利用研究进展[J].钻采工艺,2010,33(1):76-79.  
WAN Liping, MENG Yingfeng, LI Yongjie, et al. The research progress of foam fluid recycling[J]. Drilling and Production Technology, 2010,33(1):76-79.
- [4] 刘德胜,李昭辉,刘绪礼.空气泡沫钻井液回收再利用技术[J].钻井液与完井液,2006,23(1):11-14.  
LIU Desheng, LI Zhaohui, LIU Xuli. Recovery and reuse of air-foam drilling fluid[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2006,23(1):11-14.
- [5] 张建,王艳丽,吴国强.空气泡沫钻进技术在复杂漏失地层中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(8):32-35.  
ZHANG Jian, WANG Yanli, WU Guoqiang. Application of air-foam drilling technology in complex leakage formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012,39(8):32-35.
- [6] 郭威,孙中瑾,孙友宏,等.低温泡沫钻进技术在漠河盆地冻土井工程的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(5):16-18.  
GUO Wei, SUN Zhongjin, SUN Youhong, et al. Experimental research on low temperature foam drilling technology in Mohe Basin permafrost[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(5):16-18.
- [7] 赵卫红.欠平衡泡沫钻井技术[J].天然气工业,1999,19(5):51-54.  
ZHAO Weihong. Underbalanced foam drilling technology[J]. Natural Gas Industry, 1999,19(5):51-54.
- [8] 赖晓晴,楼一珊,屈沅治,等.超高温地热井泡沫钻井流体技术[J].钻井液与完井液,2009,26(2):37-38.  
LAI Xiaqing, LOU Yishan, QU Yuanzhi, et al. Ultra high temperature geothermal well foam drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2009,26(2):37-38.
- [9] CAO Pinlu, ZHANG Jincheng, WU Xia, et al. Research and development on foam breaking and recycling technology in air-foam drilling[J]. Global Geology, 2009,12(4):204-209.
- [10] 曹品鲁,马文英,张兆国,等.可循环空气泡沫钻井技术在元坝10井的应用[J].石油钻探技术,2011,39(5):49-52.  
CAO Pinlu, MA Wenying, ZHANG Zhaoguo, et al. Application of recycling air-foam drilling technology in well Yuanba-10[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011,39(5):49-52.
- [11] 申威.空气/泡沫钻井技术在伊朗19+2项目中的应用[J].钻采工艺,2005,28(4):31-34.  
SHEN Wei. Application of air/foam drilling technique in 19+2 Project of Iran[J]. Drilling & Production Technology, 2005,28(4):31-34.
- [12] 王雅新,卢景峰,谢富强.钻井液用高效有机硅消泡剂的研制[J].天津化工,2011,25(4):37-38.  
WANG Yaxin, LU Jingfeng, XIE Fuqiang. Preparation of high efficiency organic silicon defoamer for drilling fluid[J]. Tianjin Chemical Industry, 2011,25(4):37-38.
- [13] 王卫东,邱正松,吕开河.钻井液用缓释复合消泡剂的研制与应用[J].油田化学,2008,25(1):1-4.  
WANG Weidong, QIU Zhengsong, LÜ Kaihe. A slow release combinational defoamer for water base drilling fluids: preparation and uses[J]. Oilfield Chemistry, 2008,25(1):1-4.
- [14] 单正明,邹文忠,欧绍祥,等.高速旋转式除泡器:中国,96225313.8[P].1997-01-08.  
SHAN Zhengming, ZOU Wenzhong, OU Shaoxiang, et al. High-speed rotary defoamer: China, 96225313.8[P]. 1997-01-08.
- [15] 倪红坚,王伟伟,艾尼瓦尔,等.自激振荡脉冲消泡机制分析与性能优化[J].中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(2):

- 120—124.
- NI Hongjian, WANG Chuanwei, ANWAR, et al. Mechanism analysis and performance optimization on self-excited oscillation pulse foam breaking device[J]. Journal of China University of Petroleum, 2012, 36(2): 120—124.
- [16] 王萍, 李英, 张斌, 等. 泡沫钻井用热辐射物理消泡装置研制[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(48): 66—68.
- WANG Ping, LI Ying, ZHANG Bin, et al. Study of thermal radiation foam-breaking apparatus in foam drilling[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(8): 66—68.
- [17] 张洪, 刘江华, 甄新平, 等. 金属微填料旋流消泡器的研发及在石油泡沫体系的消泡研究[J]. 现代化工, 2014, 34(8): 134—136, 138.
- ZHANG Hong, LIU Jianghua, ZHEN Xinping, et al. Metallic micro-filler swirling defoamer and its application in petroleum foam system[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(8): 134—136, 138.
- [18] 茹振修, 柴路修, 茹冕. 冶金工业废水处理中泡沫控制技术[J]. 河北冶金, 2012(4): 71—73.
- RU Zhenxiu, CHAI Luxiu, RU Mian. Foam control technique in metallurgical industry waste water treatment[J]. Hebei Metallurgy, 2012(4): 71—73.
- [19] 曹学文, 林宗虎, 黄庆宣, 等. 新型管柱式气液旋流分离器[J]. 天然气工业, 2002, 22(2): 71—75, 3.
- CAO Xuewen, LIN Zonghu, HUANG Qingxuan, et al. Novel gas-liquid cylindrical cyclone[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(2): 71—75, 3.
- [20] 王乐勤, 郝宗睿, 焦磊. 防爆型多管旋风除尘器内流分析及结构设计[J]. 流体机械, 2007, 35(11): 21—24.
- WANG Leqin, HAO Zongrui, JIAO Lei. Design of anti-explosion sulfur-dust multi cyclone[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(11): 21—24.
- [21] 亓欣, 匡亚莉. 选煤厂浓缩机消泡试验研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 19(2): 1—3, 33.
- QI Xin, KUANG Yali. Defoaming experiments of thickener[J]. Clean Coal Technology, 2012, 19(2): 1—3, 33.
- [22] 杨学涵. 国外泡沫钻进的消泡方法[J]. 国外地质勘探技术, 1990, 3(3): 1—7.
- YANG Xuehan. Abroad defoaming method of foam drilling[J]. Geological exploration technology abroad, 1990, 3(3): 1—7.
- [23] 赵承庆, 姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998: 74—77.
- ZHAO Chengqing, JIANG Yi. The kinetics of gas jet[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1998: 74—77.
- [24] CAO Pinlu, HU Zhengyi, CHEN Baoyi, et al. Experiment and application of an annular foam breaker for foam drilling fluid[J]. International Journal of Engineering, Transactions B: Applications, 2012, 25(1): 73—79.
- [25] WANG Jinsong, CAO Pinlu, YIN Kun. Numerical simulation and optimization design of a two-stage Laval annular mechanical foam breaker[J]. Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 2014, 6(6): 1572—1578.
- [26] WANG Jinsong, CAO Pinlu, YIN Kun. Structure Design of and Experimental Research on a Two-stage Laval Foam Breaker for Foam Fluid Recycling[J]. Journal of Environmental Biology, 2015, 36(3): 1—8.

(编辑 韩丽丽)