

# 空气反循环钻探探头空间流场分析及其影响因素研究

殷雷, 马鹏程, 李楠

普欧(上海)自动化有限公司, 上海

收稿日期: 2024年7月16日; 录用日期: 2024年8月19日; 发布日期: 2024年8月29日

## 摘要

空气反循环技术因其具有上返流量可调、安全等特点, 在海洋钻探中有巨大的应用前景。但在海洋环境中, 受喷射孔导流作用以及孔底复杂狭窄空腔影响, 能否顺利实现气路反循环效应是该技术能否实现应用的关键, 因此对空气反循环钻探探头空间气体流场分析是十分必要的。本文基于计算流体力学理论, 借助FLUENT软件, 对探头周围空间气体流场进行数值模拟, 分析空气入口数量、出射孔数量、空气入口与引射孔的相对位置以及引射孔数量等因素对空气反循环钻探探头性能的影响, 研究结果显示, 空气入口数为2, 出射孔数量为4, 空气入口与引射孔交错排列, 引射孔数量为4的方案下引射效果最优。上述结论为进一步研究各参数之间的耦合关系对引射效果的影响打下基础。

## 关键词

空气反循环, 深海钻探, 流体力学, 引射效果影响

## Study on Space Flow Field Analysis and Influencing Factors of Air Reverse Circulation Drilling Probe

Lei Yin, Pengcheng Ma, Nan Li

OPU (Shanghai) Automation Co., Ltd., Shanghai

Received: Jul. 16<sup>th</sup>, 2024; accepted: Aug. 19<sup>th</sup>, 2024; published: Aug. 29<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

Air reverse circulation technology has great application prospects in offshore drilling because of its features such as adjustable upflow rate and safety. However, in the Marine environment, due to

the effect of jet hole diversion and the complex narrow cavity at the bottom of the hole, whether the air path can successfully achieve reverse circulation is the key to the successful design, so it is very necessary to analyze the space flow field of the air reverse circulation drilling probe. Based on the theory of computational fluid dynamics and FLUENT software, this paper numerically simulates the spatial flow field around the probe, and analyzes the effects of factors such as the number of air intakes, the number of perforations, the relative positions of air intakes and perforations, and the number of perforations on the performance of the probe for air reverse circulation drilling. The research results show that the number of air intakes is 2 and the number of perforations is 4. The air inlet and injection holes are staggered, and the injection effect is the best when the number of injection holes is 4. The above research lays a foundation for further study of the coupling relationship between the parameters.

## Keywords

Air Reverse Circulation, Deep-Sea Drilling, Hydrodynamics, Ejection Effect

Copyright © 2024 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/>



Open Access

## 1. 引言

在海洋钻探中,一般采用传统的无隔水管泥浆回收钻井技术,其主要依靠水下泵将海底井口泥浆举升至甲板面,该技术对水下泵的举升能力及可靠性要求极高,由此限制了无隔水管泥浆回收钻井技术的应用[1]。为了解决这一问题,研究者们借鉴陆地空气反循环钻井原理,利用空气反循环作用用于部分或完全替代水下泵[2]。空气反循环技术及相关设备性能能够满足无隔水管泥浆回收的使用要求,具有上返流量可调、安全等特点,有较高的研究应用价值[3]。

尽管空气反循环技术能够有效提升海洋钻探工程勘探效率,但在海洋环境中,受喷射孔导流作用以及孔底复杂狭窄空腔影响,气路能否顺利实现反循环是设计成功的关键,因此对空气反循环钻探探头空间流场分析是十分必要的。

本文基于计算流体动力学理论,借助 FLUENT 软件,对探头周围空间流场进行数值模拟,分析空气入口数量、出射孔数量、空气入口与引射孔的相对位置以及引射孔数量等因素对空气反循环钻探探头引射性能的影响,并确定适宜的范围,为后续研究提供支撑。

## 2. 空气反循环钻探工作原理

空气循环钻探是把压缩空气作为钻孔冲洗介质或兼作孔底碎岩动力的钻探方法,在一定条件下可以代替清水或泥浆钻探,故又称为“无水钻探”[4][5]。

根据压缩空气循环路径的不同,空气循环钻探可以分为正循环、反循环两种方式。正循环钻探采用普通钻杆,压缩空气由钻杆内部进入孔底,然后携带岩屑从钻杆与井壁的空隙返回地面,如图 1(a)所示。而反循环钻探采用双壁钻杆,压缩空气由双壁钻杆内外管间的空隙到达孔底,而后携带岩屑经双壁钻杆的中心通道返回地面,如图 1(b)所示。

## 3. 空气反循环钻探探头空间气体流场分析

空气反循环潜孔钻头顺利实现钻孔过程的关键,就在于顺利形成空气反循环过程,从而实现钻孔、

跟管与排屑等功能。选取探头底部气体流场为研究对象，通过建立相应的计算模型，对流场环境进行合理的假设，设定初始条件及边界条件、计算参数等，对探头底部气体流场速度及压力等特征进行分析。

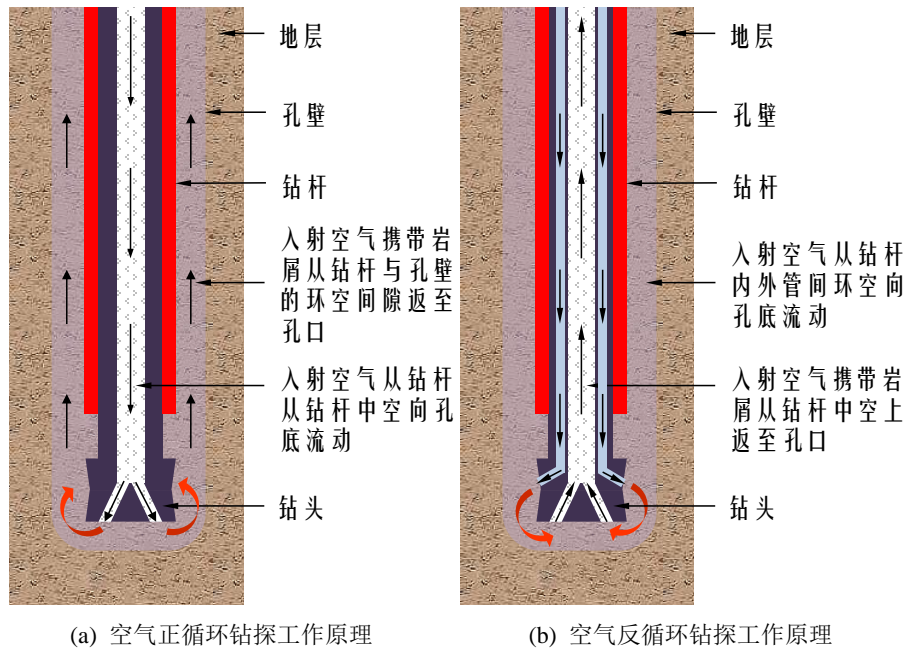


Figure 1. The principle of air circulation drilling  
图 1. 空气循环钻探工作原理

### 3.1. 基本理论

探头底部气体流场数值模拟的控制方程包括质量连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程[6]。连续性方程：

$$\frac{\partial \rho_c}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v}) = 0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial (\rho_c \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu_c \nabla \vec{v}) \tag{2}$$

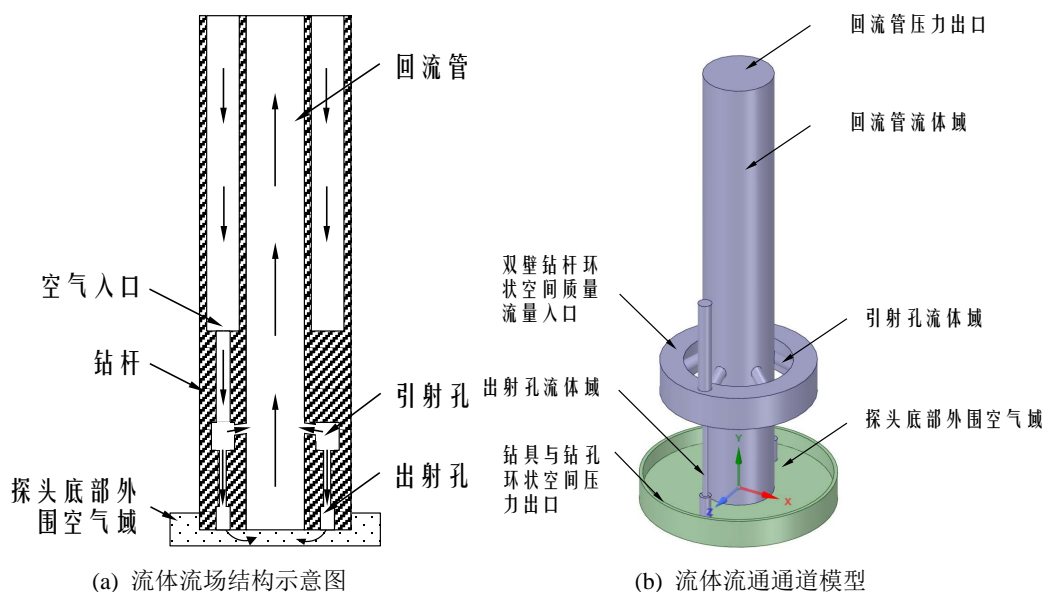
能量方程：

$$\frac{\partial (\rho_c c_{pc} T_c)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_c c_{pc} \vec{v} T_c) = \nabla \cdot (k_c \nabla T_c) \tag{3}$$

其中， $\rho_c$  是流体的密度， $\vec{v}$  为流体的速度矢量， $\mu_c$  为流体的动粘度， $c_{pc}$  为流体的比热。

### 3.2. 空气反循环钻探探头流场三维模型建立

空气反循环扩孔探头孔底气体流场如图 2(a)所示，转杆本体中分布了回流管、引射孔、空气入口以及出射孔。空气由空气入口进入杆内，分别流向了出射孔和引射孔，出射孔的空气直吹样本表层同时，引射孔中排出的高速气流在局部产生负压，压力梯度和气体本身的动能携带大量空气和岩屑经由回流管流出。根据气体流场结构，忽略结构倒角影响，件建立流体流通通道模型如图 2(b)所示。



**Figure 2.** The gas flow field of air reverse circulation drilling  
**图 2.** 空气反循环钻探探头气体流场

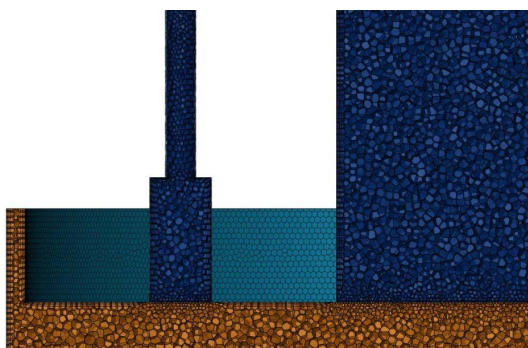
### 3.3. 基本假设

为了简单而不失准确性，本文只对空气反循环探头的引射性能进行仿真，不考虑固体区域，并做如下假设与简化：

- 1) 假设反循环探头内气体流动是湍流可压缩流动；
- 2) 假设反循环探头内气体流场是绝热系统，即流场为恒温状态；
- 3) 假设反循环探头内气体流体为理想空气；
- 4) 假设反循环探头内气体的流动为稳态；
- 5) 假设壁面视为绝热壁面，不考虑换热以及高速摩擦生热。

### 3.4. 边界条件

设定双壁钻杆环空间隙为压缩空气质量流量入口，探头与孔壁之间的外环空气顶端出口与探头中心通道顶端出口为压力出口。为了保证计算速度与精度，网格类型设置为多面体单元，边界层使用 3 层棱柱，空气入口、引射孔、出射孔处进行了网格加密，平均体网格数量为 2,028,319 个，具体见图 3 所示。



**Figure 3.** Model meshing  
**图 3.** 模型网格划分

### 3.5. 初始条件和计算参数

将处理好的模型导入流体力学分析软件 **Fluent** 中, 假设空压机工作条件为  $9 \text{ m}^3/\text{min}$ , 设定双壁钻杆环间隙为压缩空气质量流量入口, 质量流量参数为  $720 \text{ kg/hr}$ , 流体模型采用标准湍流模型  $k-\varepsilon$  模型, 压力-速度耦合使用 **SIMPLE** 方法, 二阶求解精度, 动量方程亚松弛因子为  $0.5$ 。

设置初始条件及计算参数见表 1 所示。

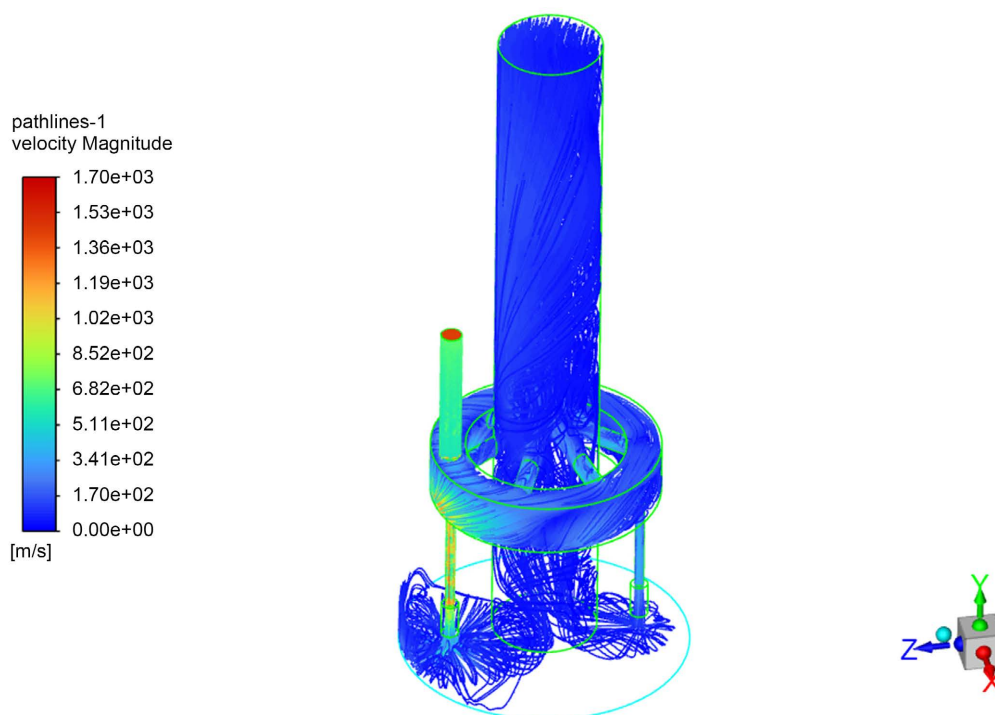
**Table 1.** The initial conditions and calculation parameters

**表 1.** 初始条件及计算参数

条件	参数	数值	单位
空气流量入口	流量	720	kg/hr
	数量	1	个
引射孔	数量	6	个
出射孔	出射孔数量	2	个
空气入口与引射孔的相对位置	位置特征	交错	/
回流管压力出口	压强	0	MPa

### 3.6. 数值计算结果分析

孔底流场数值模拟主要针对气体流动轨迹与速度以及流场的压力进行分析, 气体流动轨迹如图 4 所示, 由图 4 可以看出, 气体流动轨迹明显可以实现反循环过程。气体通过探头底部, 最终进入探头中心通道, 实现上返过程。



**Figure 4.** The track line of gas velocity

**图 4.** 探头气体速度轨迹线

数值模拟后，探头底部流场静压情况如图 5 所示。从图 5 中可以看出，流场中压力最高处出现在气体入口，即探头底部与回流管底部，在个大气压以上。然后在引射孔处，使空气与探头底部抽吸上来的岩屑颗粒混合，并在压力差作用下，流进探头中心通道。沿着回流管往上，压力逐渐降低。在压降作用下，气体携带者流入中心通道的岩屑颗粒向上运动，最终返回地表。

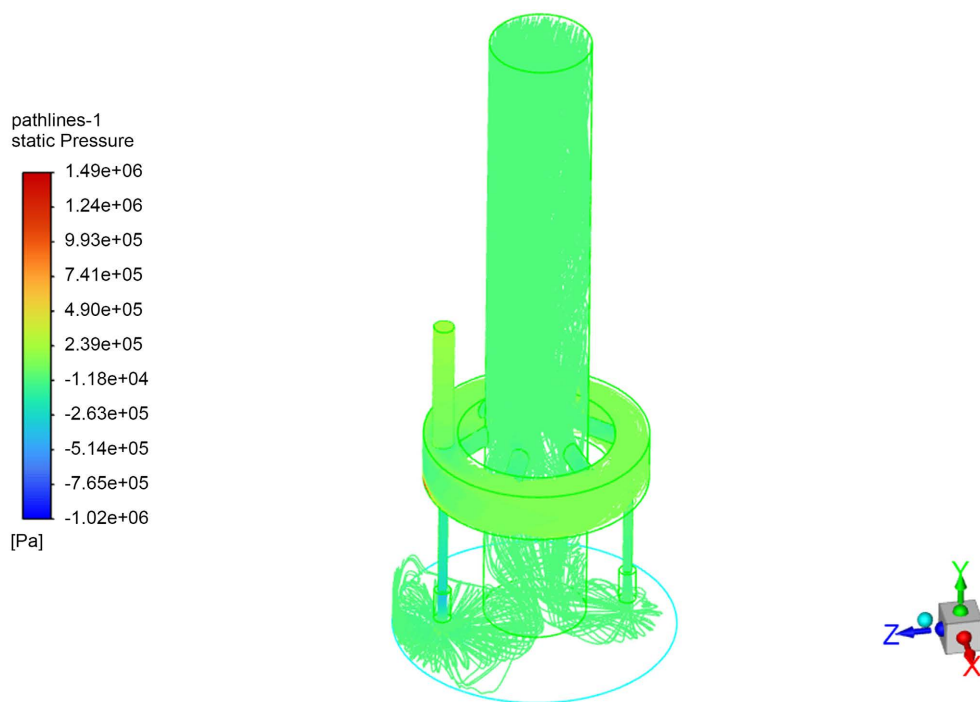


Figure 5. The static pressure diagram on probe flow field  
图 5. 探头气体流场静压图

#### 4. 空气反循环钻探探头空间流场影响因素分析

如表 2 所示，本文从空气入口数量、出射孔数量、空气入口与引射孔的相对位置以及引射孔数量这 4 个维度对空气反循环探头的空气性能进行评价。

Table 2. The parameter table

表 2. 方案参数设计

方案编号	空气入口数量	出射孔数量	空气入口与引射孔的相对位置	引射孔数量
0	1	2	交错	6
1	1	2	重合	6
1.1	1	3	交错	6
2	1	4	交错	6
2.1	1	3	交错	6
3	2	4	交错	6
4	2	4	交错	4

表 3 列出了空气反循环钻探探头的评价指标与计算结果。其中，“环境回流量”、“管内回流量”直接反映系统的引射能力，数值越大代表引射能力越强；“出口回流负压”代表环装出口处的静压，该

数值从侧面反映的系统的引射能力，绝对值越大代表引射能力越强；“管内回流负压”反映系统吸取岩屑的能力，数值越大越好，代表反吸的岩屑量越大，系统效率越高；“底喷口速度”和“回流管速度”反映了高压空气对岩壁的吹蚀能力，数值越大代表性越强；“入口总压”用于衡量对压力源的能力需求，数值越小代表系统功耗越低，本文主要着眼于系统引射能力，系统功耗仅做辅助参考。

**Table 3.** The result of numerical calculation

**表 3.** 数值计算结果

方案编号	环境回流量 kg/s	管内回流量 kg/s	出口回流负压(静) Pa	管内回流负压 Pa	底喷口速度 m/s	回流管速度 m/s	入口总压 Pa
0	0.116	-0.316	-2316.921	-4072.727	70.979	59.477	1.544E+06
1	0.049	-0.249	-1161.250	-4185.031	227.688	51.157	1.506E+06
1.1	0.096	-0.296	-1580.437	-3509.325	85.208	55.973	1.519E+06
2	0.089	-0.289	-1377.439	-3505.811	84.517	56.597	1.511E+06
2.1	0.099	-0.299	-1706.013	-3811.909	83.786	57.993	1.519E+06
3	0.092	-0.292	-1475.283	-3676.681	84.601	59.239	4.688E+05
4	0.128	-0.328	-2845.139	-8589.700	159.662	88.735	6.758E+05

#### 4.1. 空气入口数量影响

如表 4 所示，方案 2 的空气入口数为 1，方案 3 的空气入口数为 2，其余参数均相同。

从回流流量的角度看，方案 3 的引射效果要好于方案 2，其他关键位置的静压和喷口速度等指标基本一致，从系统功耗的角度看，空气入口数量增加以后有助于降低系统总压，从 1.5E6 Pa 降低至 4.68E5 Pa。故空气入口数量为 2 更优。

**Table 4.** The effect of the number of air inlets on performance

**表 4.** 空气入口数量对性能的影响

方案编号	环境回流量 kg/s	管内回流量 kg/s	出口回流负压(静) Pa	管内回流负压 Pa	底喷口速度 m/s	回流管速度 m/s	入口总压 Pa
2	0.089	-0.289	-1377.439	-3505.811	84.517	56.597	1.511E+06
3	0.092	-0.292	-1475.283	-3676.681	84.601	59.239	4.688E+05

#### 4.2. 出射孔数量影响

如表 5 所示，当出射孔数量增加时，引射流量大约减少了 0.1 倍，岩屑的吸收量减少 0.04 倍，其余性能变化不大。此时，如图 6 所示，当出射孔为 4 时，吹蚀面积更大，更有效的激起岩屑被吸入。故，出射孔数量为 4 时，引射岩屑的性能更强。

**Table 5.** The effect of number of perforations on performance

**表 5.** 出射孔数量对性能的影响

方案编号	环境回流量 kg/s	管内回流量 kg/s	出口回流负压(静) Pa	管内回流负压 Pa	底喷口速度 m/s	回流管速度 m/s	入口总压 Pa
2	0.089	-0.289	-1377.439	-3505.811	84.517	56.597	1.511E+06
2.1	0.099	-0.299	-1706.013	-3811.909	83.786	57.993	1.519E+06

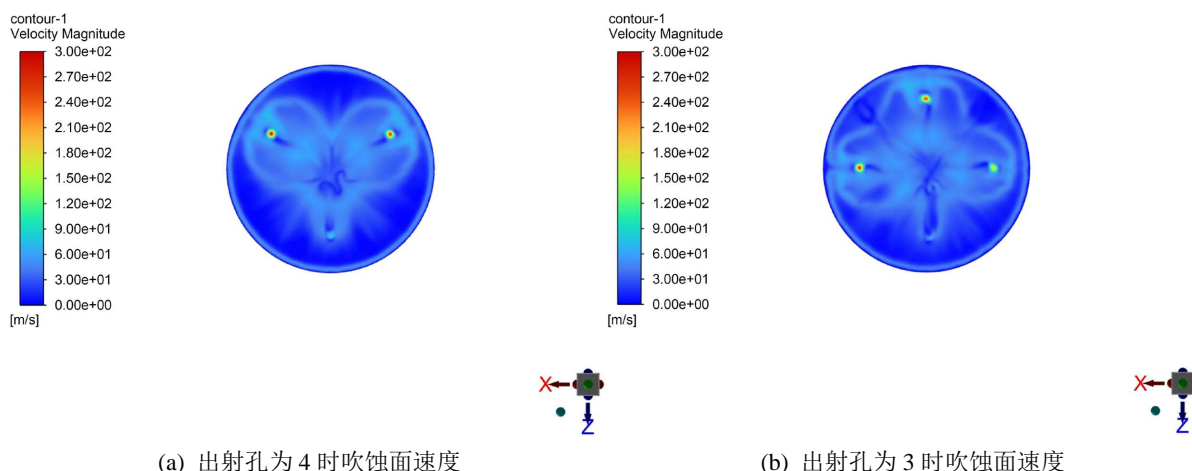


Figure 6. The comparison of blown area  
图 6. 吹蚀面积对比

### 4.3. 空气入口与引射管的相对位置

如表 6 所示，保持其他参数一致时，空气入口与引射孔的相对位置处于交错状态时，虽然底喷口速度更低，吹蚀能力下降，但其引射能力发生了明显变化，交错方案的引射能力相比重合方案在环境回流量上增加了 2.36 倍，对岩屑的抽吸回流量增加了 1.27 倍，故空气入口与引射孔的相对位置处于交错状态时能获得更加优异的性能。

Table 6. The effect of relative position of air inlet and ejector tube on performance  
表 6. 空气入口与引射管的相对位置对性能的影响

方案编号	环境回流量 kg/s	管内回流量 kg/s	出口回流负压(静) Pa	管内回流负压 Pa	底喷口速度 m/s	回流管速度 m/s	入口总压 Pa
0	0.116	-0.316	-2316.921	-4072.727	70.979	59.477	1.544E+06
1	0.049	-0.249	-1161.250	-4185.031	227.688	51.157	1.506E+06

### 4.4. 引射孔数量影响

如表 7 所示，对比方案 3 和方案 4，引射孔从 6 降低为 4 时，环境回流量增加了 1.39 倍，岩屑回流量增加了 1.12 倍，同时，底喷口速度和回流管速度也得到了明显提升，较少的引射孔能带来显著的引射能力和吹蚀能力提升。故引射孔为 4 更优。

Table 7. The effect of number of perforations on performance  
表 7. 引射孔数量对性能的影响

方案编号	环境回流量 kg/s	管内回流量 kg/s	出口回流负压(静) Pa	管内回流负压 Pa	底喷口速度 m/s	回流管速度 m/s	入口总压 Pa
3	0.092	-0.292	-1475.283	-3676.681	84.601	59.239	4.688E+05
4	0.128	-0.328	-2845.139	-8589.700	159.662	88.735	6.758E+05

综上，方案 4 中下引射效果最优，如图 7 所示，即空气入口数为 2，出射孔数量为 4，空气入口与引射孔交错排列，引射孔数量为 4。



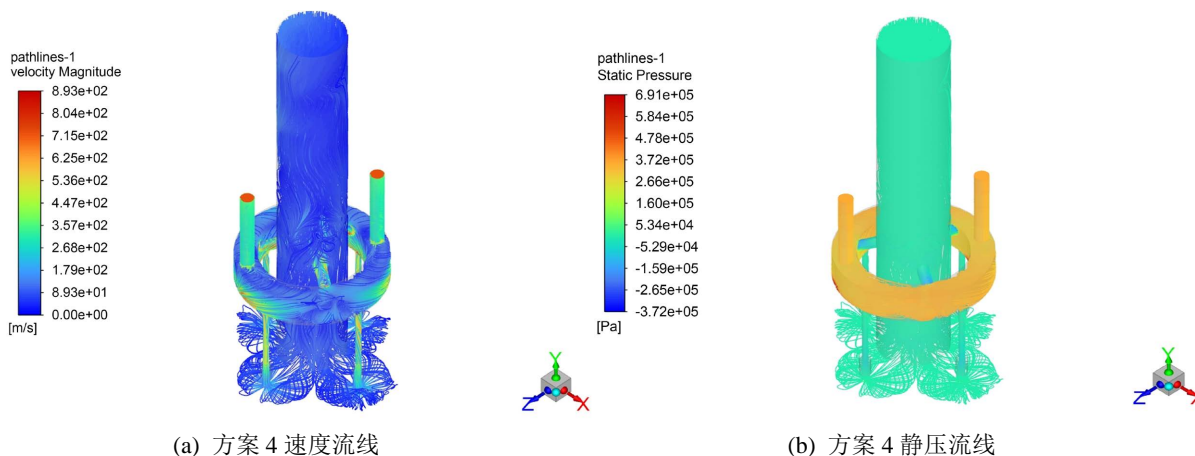


Figure 7. The gas flow field for option 4  
图 7. 方案 4 气体流场

## 5. 结论

本文基于计算流体动力学理论,借助 FLUENT 软件,对探头周围空间流场进行数值模拟,分析空气入口数量、出射孔数量、空气入口与引射孔的相对位置以及引射孔数量等因素对空气反循环钻探探头性能的影响,并确定适宜的范围。研究结果显示,方案 4 中下引射效果最优。对于后续的研究,将需继续探究气入口数量、出射孔数量、空气入口与引射孔的相对位置以及引射孔数量等各参数之间的耦合关系。

## 基金项目

2023 年广东省海洋经济发展(海洋六大产业)专项资金项目(粤自然资合【2023】31 号)

## 参考文献

- [1] 陈国明,殷志明,许亮斌,蒋世全.深水双梯度钻井技术研究进展[J].石油勘探与开发,2007(2):246-251.
- [2] 陈浩文,于彦江,王艳丽,等.气举技术应用于深海无隔水管泥浆回收钻井工艺可行性分析[J].钻探工程,2022,49(2):9-15.
- [3] 俱养社,马峰良.空气反循环连续取样钻探技术浅析[J].陕西煤炭,2021,40(6):154-157+183.
- [4] 聂淼.工程地质施工钻探技术的应用分析[J].世界有色金属,2018(14):287+289.
- [5] 苏敬达.空气反循环钻探技术在矿山勘查中的应用[J].钻探工程,2021,48(12):38-42.
- [6] 孙立岩.黏性颗粒动力学及气固两相流动数值模拟[D]:[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.