

基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法

徐海良, 周永兴, 徐 聪, 赵宏强

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘 要: 为了提高硬质地层中扩孔气动冲击器的排屑性能, 基于岩屑颗粒在排屑流场中的临界流速原则, 运用计算流体力学理论和 Fluent 仿真软件, 研究了一种与排屑性能相关的扩孔气动冲击器设计方法, 并将该设计方法在反向扩孔气动冲击器上进行应用。得到设计前后冲击器排屑流场内气相速度分布规律, 岩屑颗粒速度及轨迹变化情况和环路内岩屑颗粒浓度分布情况。研究结果表明: 反向扩孔气动冲击器排屑流场环路内岩屑颗粒临界流速为 6.02 m/s, 采用该设计方法能够有效地增加反向扩孔气动冲击器的排屑性能, 使得排屑流场环路内气流速度增加到 10 m/s 左右, 岩屑颗粒在排屑流场的停留时间减短, 流场内颗粒浓度分布范围由 0 ~ 100 kg/m³ 下降到 0 ~ 4 kg/m³。

关 键 词: 扩孔气动冲击器; 排屑性能; 设计方法; 气固两相流; 数值模拟

中图分类号: TD 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)06-0844-06

Design Method of Reaming Pneumatic Impactors Based on Its Cuttings Removal Performance

XU Hai-liang, ZHOU Yong-xing, XU Cong, ZHAO Hong-qiang

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China.

Corresponding author: XU Hai-liang, professor, E-mail: csu_xhliang@163.com)

Abstract: In order to improve the cuttings removal performance of reaming pneumatic impactors in hard layers, the computational fluid mechanics theory and Fluent simulation software were employed to find out a design method based on the critical velocity principle of cutting particles, which is related to the cuttings removal performance of reaming pneumatic impactors and then it was applied to the back-reaming pneumatic impactor. The speed distribution regularities of gas phase, the change of cutting particles' velocity and trajectory, and the concentration distribution of cutting particles in the flow field of the back-reaming pneumatic impactor were obtained. The results showed that the cutting particles' critical velocity of the back-reaming pneumatic impactor in the cuttings flow field is 6.02 m/s. The design method related to cuttings removal performance can effectively strengthen the cuttings removal performance of the back-reaming pneumatic impactor, and the velocity of gas phase increases to 10 m/s in the flow field. The time when cutting particles remain in the flow field is shortened, and the value of particle concentration distribution range in the flow field decreases from 0 ~ 100 kg/m³ to 0 ~ 4 kg/m³.

Key words: reaming pneumatic impactor; cuttings removal performance; design method; gas-solid two phase flow; numerical simulation

非开挖是对地下管线、光缆、电缆和管道进行更新、修复和铺设时,采用不开挖或者微开挖的方法进行施工的一种技术^[1-2],具有不破坏地面建筑、施工效率高、环境污染小等优点,近年来被广泛应用于地下工程的施工中^[3-4]。目前,对于泥沙

等软质地层,非开挖技术发展较为成熟,而对于硬质地层,由于技术难度较大,发展较为缓慢。为解决这个难题设计了专用的扩孔气动冲击器^[5],通过试验取得了较好的成绩,同时也发现一些问题,如扩孔气动冲击器排屑性能无法满足设计要求。

通过分析发现目前水平定向钻机用扩孔气动冲击器的设计,主要是以入口压力为基础,利用空气动力学和热力学理论,建立冲击器各气腔内气体状态变化数学模型,通过数学计算软件进行求解计算,模拟冲击器工作过程各气腔内气体状态变化情况,从而得到冲击器的各项性能指数,最后以性能作为优化指标,改变其结构参数进行优化设计,完成扩孔气动冲击器的设计^[6-8]. 这样设计出的扩孔气动冲击器,在扩孔施工时冲击性能能够达到设计要求,但是经常出现排屑堵塞、卡钻等现象.

本文提出一种新的扩孔气动冲击器设计方法:基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法. 该方法是在岩屑颗粒能够在排屑流场中输运的临界空气流速的基础上,计算冲击器的尾气流量,然后对其结构参数进行设计和优化.

1 基于排屑性能的冲击器设计方法

基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法的思路是:在进行冲击器结构设计前,先得出扩孔气动冲击器完成排屑所需要的尾气流量,以此为基础再进行冲击器结构设计和优化. 该设计方法的目的是在保证岩屑颗粒能够顺利排出孔外的前提下,进行冲击器的结构设计.

考虑排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法的具体步骤为

- 1) 计算岩屑的临界速度. 按照消耗空气动力最少时所需的空气流速计算.
- 2) 根据不同类型冲击器,建立排屑流场模型.
- 3) 对排屑流场模型进行网格划分.
- 4) 确定湍流模型和边界条件. 选择合适的湍流模型,并确定出口边界条件和壁面边界条件.
- 5) 选取不同的入口压力对单相空气在排屑流场中的流动运用 **Fluent** 仿真软件进行数值模拟. 得到不同入口压力下的气相速度流场分布.
- 6) 按照临界速度原则,选取对应的速度场分布,从而确定排屑流场入口压力和其对应的入口气相质量流量,即冲击器尾气的排量.
- 7) 根据选取的入口气相质量流量,在设计钻进速度下对其排屑流场气固两相流进行数值模拟,分析流场的压力、气流速度和岩屑浓度等情况.
- 8) 根据扩孔气动冲击器的尾气排量,重新设计扩孔气动冲击器的结构参数.

2 设计方法在反向扩孔气动冲击器上的应用

2.1 反向扩孔气动冲击器介绍

反向扩孔气动冲击器是一种专门针对岩石、卵砾石等硬质地层进行扩孔作业的气动设备,其结构如图 1 所示,它主要由缸体、钻头、内活塞、内活塞杆、活塞和后封头等零部件组成. 其工作原理为:空气压缩机提供高压气体,推动其活塞作高速往复运动,并与冲击器钻头发生碰撞,将能量传递到钻头,破碎岩石实现扩孔作业.

反向扩孔气动冲击器的主要结构参数和系统参数如表 1 所示.

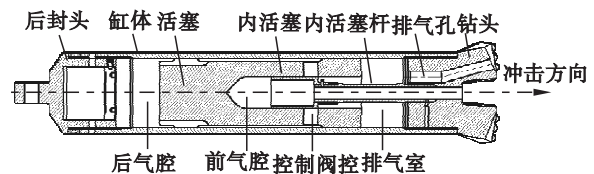


图 1 反向扩孔气动冲击器结构图
Fig. 1 Structure of the reverse reaming pneumatic impactor

表 1 反向扩孔气动冲击器技术参数
Table 1 Technical parameters of the reverse reaming pneumatic impactor

型号	扩孔直径 mm	长度 mm	冲击频率 Hz	耗气量 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	压力 MPa
HKC180	180	1 500	6	1.2	0.8

2.2 反向扩孔气动冲击器设计步骤

2.2.1 计算岩屑的临界速度

临界空气流速原则是指冲击器扩孔钻进速度一定,即进入排屑流场的岩屑流量一定,使得岩屑颗粒在排屑流场环空通路中消耗动力最少时的气流速度. 水平定向钻机非开挖施工时,铺设的管路一般为水平管路,因此排屑环形通路也为水平管路,水平管路岩屑颗粒输送的临界风速计算公式^[9]:

$$v_k = \left[\frac{mv_n g D}{\left(\frac{v_s}{v_a} \right) \left(\lambda_a + \lambda_s m \frac{v_s}{v_a} \right)} \right]^{\frac{1}{3}}. \quad (1)$$

其中: v_k 为管路空气临界风速; m 为混合比; v_n 为颗粒群悬浮速度; g 为重力加速度; D 为管路当量直径; v_s 为颗粒速度; v_a 为气流速度; λ_s, λ_a 为阻力系数.

v_n 的计算公式为

$$v_n = v_0 (1 - \varphi_0)^\beta. \quad (2)$$

其中: v_0 为颗粒的自由悬浮速度; φ_0 为颗粒体积与空气体积之比; β 为实验指数.

v_0 计算公式为

$$v_0 = 5.45 \sqrt{\frac{d_s(\rho_s - \rho)}{\rho}}. \quad (3)$$

其中: d_s 为颗粒直径; ρ_s 为颗粒密度; ρ 为空气密度.

颗粒在水平管内稳定后速度为

$$v_s = \frac{v_a}{1 + \sqrt{\frac{\lambda_s v_n^2}{2gD}}}. \quad (4)$$

对于不同扩孔直径的气动冲击器,可以根据上述公式计算得到该类型气动冲击器扩孔施工时,使得岩屑颗粒输运消耗动力最少时所需要提供的排屑流场中的空气流速.

按照反向扩孔气动冲击器扩孔钻进速度为 4.2 m/h,空气密度为 1.29 kg/m³,岩屑颗粒直径 5 mm,扩孔直径为 180 mm,钻杆直径 100 mm 计算,得到环路内岩屑的临界速度为 6.02 m/s.

2.2.2 建立排屑流场模型

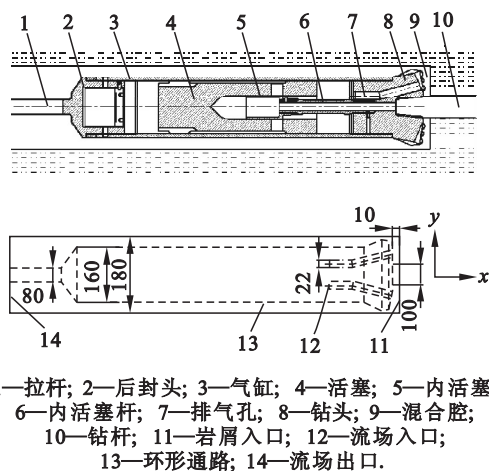
反向扩孔气动冲击器的扩孔直径为 180 mm,缸体外径 160 mm,长度 1 500 mm,钻头上开有 3 个直径为 22 mm 均布的排气孔.扩孔施工时,钻杆穿过导向孔与其相连接,由于导向孔与钻杆直径较为接近,两者间隙较小,加之扩孔产生的较大岩屑无法排出孔外,在钻头前方聚集并反复破碎,部分岩屑将堵塞钻杆前方导向孔与钻杆形成的狭小间隙,因此仿真时,假设钻头前方流场封闭.

图 2 所示为反向扩孔气动冲击器的排屑流场示意图.排屑原理为:空气推动冲击器工作后由排气孔从钻头底部流出,在其正对的近岩壁面形成高压区,压差作用下产生径向外的推力,岩屑在推力作用下运动,在混合腔内与空气混合发生能量交换,携带岩屑颗粒的气流遇到岩石壁面后,反向进入到冲击器缸体与岩石孔壁形成的环形通路,然后随着排屑流场进入到拉杆与岩石壁面的较大环路中,最后排出孔外.流场入口为钻头上的 3 个的排气孔,混合腔为钻头表面与孔路底部岩石形成的高度为 10 mm,内径 100 mm,外径 180 mm 的圆柱,冲击器缸体部分环形通路内径 160 mm,外径 180 mm,拉杆部分环形通路内径 80 mm,外径 180 mm.

2.2.3 进行网格划分

反向扩孔气动冲击器的排屑流场较为复杂,考虑到计算成本和结果的准确性,使用混合网格方式对排屑流场进行网格划分.对于岩石壁面与

气缸和钻杆形成的环形通路,通过 ICEM 分块进行结构网格的划分;排气孔、混合腔由于形状较为复杂,运用 ICEM 的自动生成网格功能进行非结构网格的划分,最终网格数量接近 93 万.



1—拉杆; 2—后封头; 3—气缸; 4—活塞; 5—内活塞; 6—内活塞杆; 7—排气孔; 8—钻头; 9—混合腔; 10—钻杆; 11—岩屑入口; 12—流场入口; 13—环形通路; 14—流场出口.

图 2 反向扩孔气动冲击器及排屑流场

Fig. 2 Reverse reaming pneumatic impactor and cuttings flow field

2.2.4 确定湍流模型和边界条件

气动冲击器排屑流场仿真为复杂的三维湍流数值问题,流场内的空气速度、压力等会出现随机脉动.对湍流流动数值模拟,主要有直接求解和非直接求解两种方法.直接求解方法是直接求解瞬时 N-S 方程,这种方法求得的结果较为准确,但是对计算机性能要求较高,运算资源消耗大,对于低雷诺数的简单流动可以采取直接求解.气动冲击器排屑流场这类工程实际问题,流动情况复杂,无法采用此方法计算,而且本文不对湍流瞬时物理性质进行深入研究^[10],主要预测气动冲击器排屑流场湍流的平均速度场和平均浓度分布情况,因此可以采用非直接数值求解方法^[11].该方法不考虑湍流的脉动情况,只求时均流场的控制方程,降低了运算难度.

仿真分析运用目前较为广泛使用的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,气固两相方程求解采用离散相 DPM 模型,仿真时流场的边界条件设置如表 2 所示.

2.2.5 排屑流场入口压力参数设计

设定不同的入口压力,对反向扩孔气动冲击器排屑流场气固两相流进行数值模拟,对比不同的气相压力下流场速度分布.针对反向扩孔气动冲击器,根据分析的实际情况^[12],选用 0.11 ~ 0.18 MPa 之间的入口压力,分析得到不同入口压力时排屑流场出口速度分布.由于反向扩孔气动冲击器扩孔施工时,尾气在排屑流场出口时已达

到稳定状态. 取不同入口压力时,排屑流场出口截面各网格节点的空气沿 x 轴负方向的流速值在 z 轴投影位置上的分布情况,如图 3 所示.

2.2.6 选取对应的速度场分布

根据临界空气流速原则,通过计算得到反向扩孔气动冲击器排屑流场携岩时的临界空气流速为 6.02 m/s. 对比分析得到入口压力为 0.13 MPa 时,在环形排屑通路内稳定的气流最小速度能够达到 6.02 m/s. 排屑流场入口压力为 0.13 MPa,

此时仿真对应的入口气相质量流量为 0.28 kg/s.

表 2 反向扩孔气动冲击器排屑流场边界条件
Table 2 Boundary conditions of the cuttings flow field of the reverse reaming pneumatic impactor

边界名称	边界类型	参数
气相入口边界	mass flow inlet	0.02 kg/s
出口边界	pressure outlet	0.10 MPa
固相入口边界	surface inject	0.05 kg/s

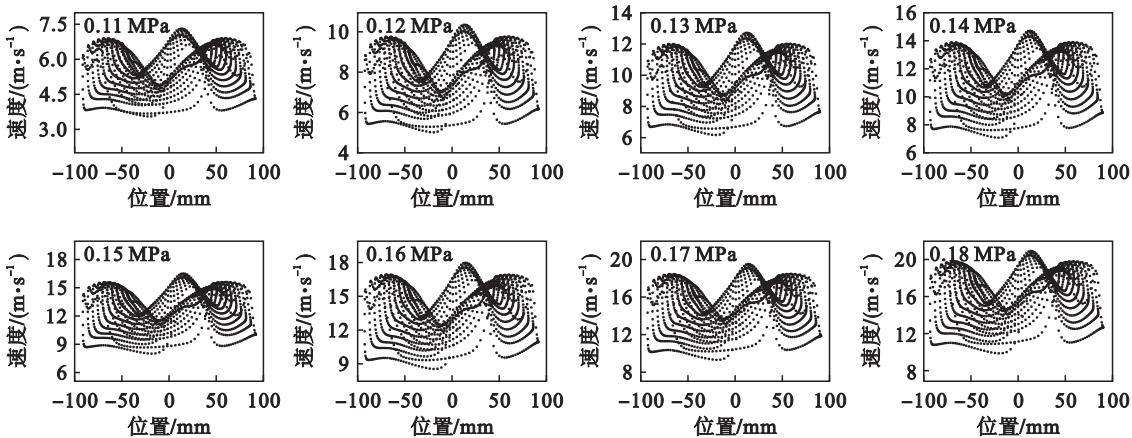


图 3 排屑流场出口截面速度分布曲线
Fig. 3 Velocity distribution curves of the outlet section in the cuttings flow field

2.2.7 结果分析

选取的气相质量流量为 0.28 kg/s,对反向扩孔气动冲击器在钻进速度为 4.2 m/h,即进入排屑流场的岩屑流量为 0.05 kg/s 时的排屑流场进行气固两相流的仿真,得到排屑流场气固两相流场分布规律.

2.2.8 重新设计其结构参数

结合反向扩孔气动冲击器结构设计方法,在保证冲击器的排气流量不低于 0.28 kg/s 的条件下,进行冲击器的结构设计,使冲击器在满足冲击器的扩孔性能前提下,同时符合冲击器排屑要求.

冲击器排屑性能设计时得到的气相速度分布,图 4b 为使用基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法得到的气相速度分布(下同).

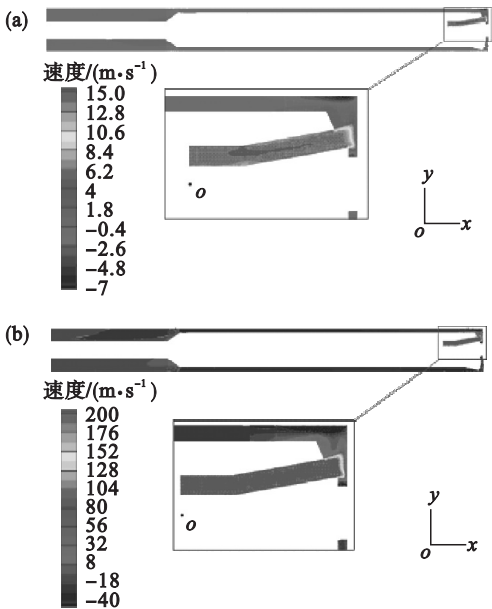


图 4 排屑流场气相速度分布云图
Fig. 4 Gas phase velocity distribution contours of the cuttings flow field
(a)—原始分布;(b)—采用本文方法.

3 设计方法对排屑流场分布的影响

通过对比分析采用基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法前后及反向扩孔气动冲击器排屑流场分布规律变化情况,可以清晰得出该方法对反向扩孔气动冲击器排屑性能的影响情况.

3.1 气相分布规律的影响

反向扩孔气动冲击器扩孔排屑流场呈环形对称分布,取其中中心竖直处 $z=0$ 的截面即能够充分反映流场内部气相特性. 图 4 所示为 $z=0$ 截面处气相沿 x 轴方向的速度分布云图,图 4a 为未考虑

由分布云图可知,图 4a 速度分布范围较小,集中在 $-7 \sim 15 \text{ m/s}$ 之间,环路内的气流速度集中在 2.6 m/s ,速度较小,携带岩屑的能力差.图 4b 气相流速分布范围较大,集中在 $-40 \sim 200 \text{ m/s}$ 的范围内,环路内气流速度能够保持在 10 m/s 左右,该速度达到并超过了岩屑颗粒在环路中输运的临界速度,理论上,岩屑颗粒能够在环路内自由悬浮前进,颗粒不会发生沉积,即反向扩孔气动冲击器非开挖扩孔施工时,能够保证岩屑颗粒顺利排出孔路,不会造成堵塞现象.

3.2 固相分布规律的影响

图 5 为岩屑颗粒轨迹在排屑流场中的分布云图.由图可知,颗粒质量流量为 0.05 kg/s 条件下,图 5b 中岩屑颗粒轨迹明显更加流畅,在排屑流场中分布均匀,受到重力的影响较小.图 5a 中颗粒轨迹主要集中在环形通路底部,颗粒在流场中跳跃前进,容易造成环路的堵塞.

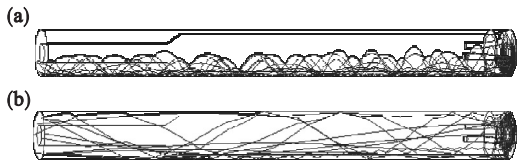


图 5 岩屑颗粒轨迹分布图
Fig. 5 Trajectory distribution of cuttings
(a)—原始分布;(b)—采用本文方法.

图 6 所示为排屑流场环路不同 x 位置截面上颗粒浓度分布云图.由图可知,考虑排屑性能进行冲击器设计后,岩屑在环路内部分布浓度急剧下降,分布十分均匀.图 6a 中岩屑颗粒在管路底部分布较为集中,颗粒浓度分布受重力影响明显,越靠近流场底部,颗粒浓度越高.图 6b 中岩屑颗粒在环路截面中分布,受到重力影响微小,颗粒均匀分布在环路内,集中在 $0 \sim 4 \text{ kg/m}^3$ 范围内.通过仿真分析,可以得出采用基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法,能够改善环路内岩屑颗粒浓度分布均匀程度,明显提高冲击器的排屑性能.

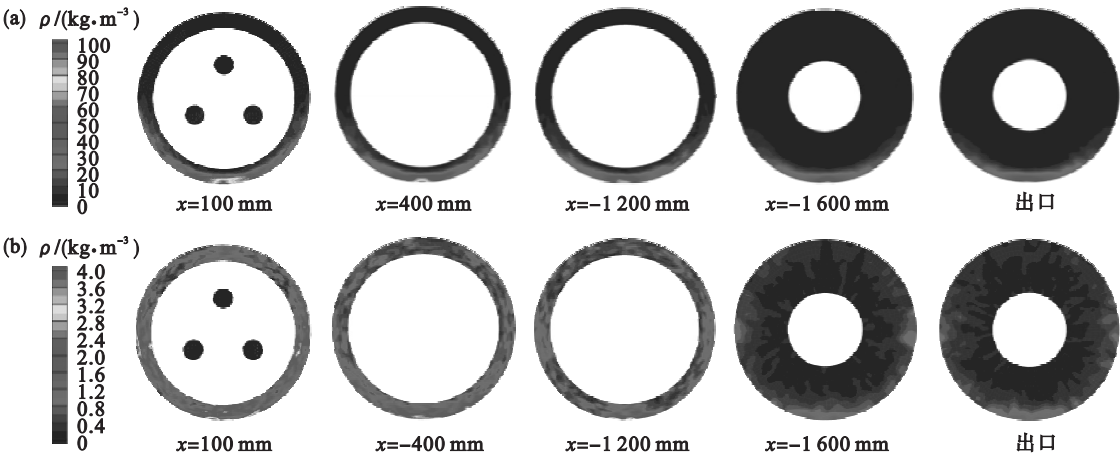


图 6 不同 x 位置截面上颗粒浓度分布云图
Fig. 6 Particles concentration distribution contours at different x positions
(a)—原始分布;(b)—采用本文方法.

图 7 所示为两种情况下,排屑流场内相同位置的某一岩屑颗粒运动速度随时间的变化曲线.

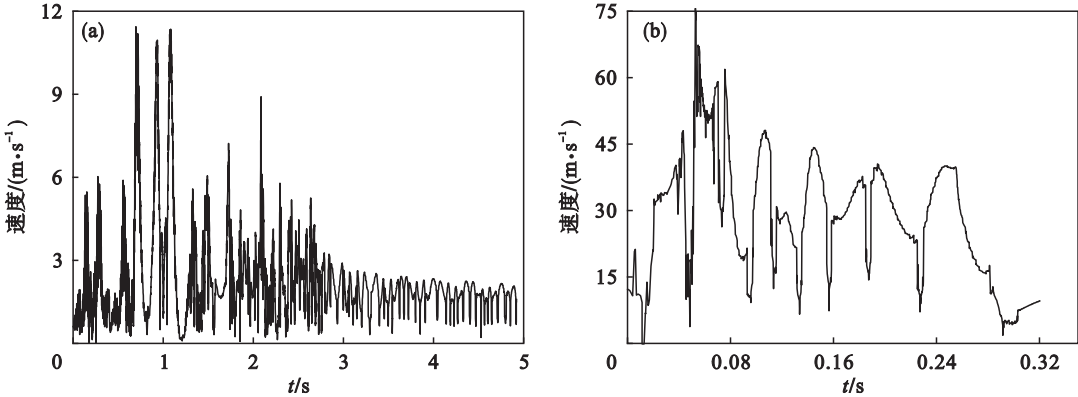


图 7 岩屑颗粒运动速度随时间变化曲线
Fig. 7 Curve of velocity with time of cuttings particle
(a)—原始分布;(b)—采用本文方法.

由图可知,颗粒在排屑流场中运动与排屑流场不断发生碰撞并前进,(a)中颗粒撞击流场壁面的次数远多于(b)中的撞击次数;同时(a)情况下岩屑颗粒在排屑流场的停留时间较长,达到5 s;而(b)情况下,该颗粒只在排屑流场中停留0.32 s;另外,该岩屑颗粒在(a)中的速度明显低于(b)中的速度,(a)中最大速度接近12 m/s,在环路内岩屑颗粒速度接近2 m/s,而(b)中颗粒最大速度接近75 m/s,在环路中的速度在5 m/s以上.较大的颗粒速度和较少的碰撞能够保证岩屑在流场中集聚情况的减少,有利于岩屑颗粒排出流场.

4 结 论

1) 基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法具体步骤为:a)计算临界流速;b)建立排屑流场模型;c)进行网格划分;d)设定仿真参数;e)选取入口压力进行仿真;f)得出冲击器排气流量;g)进行仿真验证;h)进行冲击器结构设计.

2) 反向扩孔气动冲击器排屑流场环路内岩屑颗粒临界流速为6.02 m/s.为保证排屑流场内气流速达到该临界流速,其入口压力应达到0.13 MPa,此时仿真对应的排屑流场入口气相质量流量为0.28 kg/s.

3) 采用基于排屑性能的扩孔气动冲击器设计方法能够有效地增强冲击器排屑性能;有效地改善流场内岩屑颗粒轨迹分布情况,使岩屑颗粒轨迹更加流畅,在排屑流场中分布均匀,受到重力的影响较小;同时极大降低排屑流场内岩屑颗粒浓度分布均匀程度,使得颗粒浓度分布范围由0~100 kg/m³下降到0~4 kg/m³.

参考文献:

[1] Stidger R W. Technology: trenchless technology provides environmental advantages[J]. *Gas Utility Manager*,2002,47(1):18-19.

[2] Zwierzchowska A. The optimum choice of trenchless pipe laying technologies[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2006,6(6):696-699.

[3] Ariaratnam S T, Chan W, Choi D. Utilization of trenchless construction methods in mainland China to sustain urban infrastructure[J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*,2006,11(3):134-141.

[4] Li J, Zhou M, Si Y N, et al. Trenchless repair technology and application of urban sewer system[J]. *Applied Mechanics and Materials*,2014,470:992-997.

[5] 徐海良,赵宏强.一种反向冲击的气动冲击器:CN101666211[P].2010-03-10.
(Xu Hai-liang, Zhao Hong-qiang. Pneumatic impact device with reverse impact:CN101666211[P].2010-03-10.)

[6] Liu G H, Song T Y, Li J. Analysis on cutting carrying capacity of gas in gas drilling for horizontal well[J]. *Petroleum Drilling Techniques*,2009,37(5):26-29.

[7] Wang K, Pan H, Liu Z. Numerical simulation on dense phase pneumatic conveying diversion characteristics in branch pipeline[J]. *Science and Technology*,2013,27(3):303-308.

[8] 徐海良,李峰,赵宏强,等.反向扩孔气动冲击器的计算机仿真与优化研究[J].*振动与冲击*,2015,34(12):101-107.
(Xu Hai-liang, Li Feng, Zhao Hong-qiang, et al. Optimization and simulation of reverse counterboring pneumatic impactor[J]. *Journal of Vibration and Shock*,2015,34(12):101-107.)

[9] 杨伦,谢一华.气力输送工程[M].北京:机械工业出版社,2006.
(Yang Lun, Xie Yi-hua. Pneumatic conveying engineering[M]. Beijing: Machinery Industry Press,2006.)

[10] 张兆顺,崔桂香,许春晓.湍流理论与模拟[M].北京:清华大学出版社,2006.
(Zhang Zhao-shun, Cui Gui-xiang, Xu Chun-xiao. Turbulence theory and simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2006.)

[11] 王雄,李德波,罗坤.圆孔射流近场湍流特性DNS与RANS模拟的对比研究[J].*能源工程*,2010,30(5):1-6.
(Wang Xiong, Li De-bo, Luo Kun. Comparison of DNS and RANS calculations of the round jet flow in the near field region[J]. *Energy Engineering*,2010,30(5):1-6.)

[12] Xu H L, Li W, Zhao H Q, et al. Cuttings carrying characteristics of back-reaming pneumatic impactor exhaust during drilling operation[J]. *Petroleum Exploration and Development*,2016,43(1):131-137.