

深化反循环连续取芯（样）钻进 机理研究与试验台建立

郝树青¹, 殷 琨²

- (1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
2. 吉林大学建设工程学院, 长春 130026)

摘要: 钻头在反循环形成过程中起着重要作用。然而, 由于钻头结构的不合理, 在应用过程中依然存在反循环形成质量不好或反循环难以形成等问题, 故应深化反循环连续取芯(样)钻进机理的研究, 以指导钻头的结构改进及参数优化设计。本研究在原有钻头结构基础上新增一级引射装置, 利用引射原理在钻头中心孔道内再次形成负压区, 使岩芯(样)得到加速, 更顺利地排出孔外。运用 CFD (computational fluid dynamics) 技术对影响反循环形成效果的引射孔的倾角、孔径、孔数及孔的分布方式等参数进行研究, 得出结论: 当引射孔倾角为 45°、孔径为 7 mm、6 孔均布时, 在引射孔内部所形成的负压值最大, 对反循环形成更有利。建立了模拟钻进试验台, 设计加工了带有不同倾角、孔径、孔数及分布方式引射孔的引射管, 在试验台上试验, 并将试验结果与数值模拟结论对照, 二者相吻合。本文为深化反循环连续取芯(样)钻进机理的研究提供了理论依据与试验平台。

关键词: 地质工程; 反循环; 仿真分析; 试验台; 钻头改进

中图分类号: TE242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-2850(2008)00-0682-5

Deepen the reverse circulation continuously sampling drilling principle study and the test plat construction

HAO Shuqing¹, YIN Kun²

- (1. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai* 200092;
2. *College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun* 130026)

Abstract: Bit plays an important role in reverse circulation drilling. However, owing the unsuitable bit construction, there are some problems in reverse circulation. For example, the quality of drilling is not good, or can't format the drilling. So it needs to deepen the drilling principle to study the bit development and parameters optimization. The authors added a new injector instrument in the bit, using the inject principle to get the minus pressure section, accelerating the core and sample, and making it upward to the surface more smoothly. In the paper, the authors have designed and optimized the injector hole's obliquity, diameters, numbers and distribution of the holes based on CFD (computational fluid dynamics) technology. The conclusion was that when the obliquity is 45 degree, the diameter is 7 mm, 6 holes distributed equably in the wall of the tube, the negative pressure is biggest and it does the benefit for the reverse circulation drilling. The injector tubes with different degrees, diameters, distributions and numbers are tested in test plat constructed. The two conclusions anastomose each other. The paper provided a theory and test plat to help deepen the reverse circulation drilling principle.

Key words: geology engineering; reverse circulation; emulator analysis; experiment testplat; bit betterment

基金项目: 吉林省科技厅科技发展引导项目 (200405033)

作者简介: 郝树青 (1975—), 女, 博士后, 主要研究方向: 多工艺钻进技术、隧道及地下工程

通信联系人: 殷琨, 教授, 主要研究方向: 多工艺钻进技术, E-mail: yinkun@mail.jlu.edu.cn

0 引言

反循环即钻孔过程中流体介质（液、气、泡沫等）携钻头刻取的岩芯、岩屑（粉）及孔内物质在钻具的保护下沿其中心通道排至地表。流体介质反循环减弱了对孔壁的冲刷与扰动，利于孔壁稳定，又以高流速增强了携带能力，使孔内排渣干净，同时可实现连续取芯，并可直接用于钻孔采矿。

反循环的形成主要依靠反循环钻头的结构设计，钻头的结构设计应用了多喷嘴引射器的工作原理。进入喷嘴的高速射流，对周围流体产生卷吸作用，从而实现反循环。因此应深化反循环形成机理的理论研究以指导反循环钻头的结构及参数设计。

为使反循环形成效果更有利，本次研究将在原来钻头体结构基础上新增一级引射装置，如图 1 中 11 所示，在中心孔道内再次形成负压区，使岩芯（样）在上下压力差的作用下，得到加速，更顺利地排出孔外。以下是对该引射结构开孔方式进行研究的过程。

1 模拟试验台的建立

为深入研究钻进中反循环连续取芯（样）时岩芯（样）在钻杆内孔中的输运过程、运动参数、运动状态及与气源参数间的相互关系，研究气体形成射流时周围压力场的变化，设计建立了模拟试验台。

该模拟试验台及试验中配用的仪器、设备包括：ZVFC-6/8 型空压机 1 台，LWQ-50 型气体涡轮流量送变器 1 台，频率仪 1 台，瞬态波形存储器 1 台，微型电子计算机 1 台，WYJ-30 型直流稳压电源 1 台，光电三极管若干个，及透明有机玻璃管等。

试验台的重要零件是岩芯容纳器，为便于直接观察试验中岩芯的运动过程，试验器大部分采用有机玻璃制成。在另一侧面装有顶岩丝堵，试验中用以固定岩芯。容纳器中装有一组可更换的阀心，用于岩芯上返试验，如图 1 所示，圆周方向加工出不同直径、不同倾斜角度的引射孔，用于研究引射孔对周围压力场的影响。

1.1 该模拟试验台可研究的问题

- 1) 岩芯（样）反循环输送中临界风速及其运动形态，岩芯与岩屑运动速度及关系；
- 2) 输运通道中排气孔喷射速度与喷射角度对岩芯（样）运输的影响；
- 3) 排气孔喷射气流速度与负压的关系；
- 4) 孔底反循环的形成机理；
- 5) 引射结构孔径、孔数、角度及分布情况的合理性；
- 6) 取芯及携粉能力。

1.2 基于新试验器的试验内容及方案

- 1) 考察引射结构对取芯能力的影响；
- 2) 考察喷射孔径对取芯能力的影响；
- 3) 考察进风量、风压对取芯能力的影响；

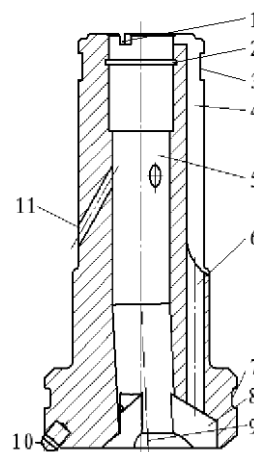


图 1 新型反循环钻头结构图

Fig. 1 Structure of new type reverse circulation bit
1—卸压槽；2—密封槽；3—卡槽；4—花键；5—中心通道；6—喷射孔；7—密封环槽；8—渐扩槽；9—偏心孔；10—柱齿；11—引射孔
1—discharge groove; 2—airproof groove; 3—block groove; 4—bond; 5—the center passage; 6—the bottom holes; 7—airproof ring groove; 8—diffuse groove; 9—core deflection hole; 10—alloy columniation tooth; 11—injector hole

- 4) 考察取芯、携芯能力;
- 5) 观察孔底压力分布情况;
- 6) 更换孔底装置, 考察喷射钻进能力。

1.3 试验器结构

通过对试验器所要完成功能的仔细分析和研究, 确定试验器的结构, 如图2所示。

各零部件的测试功能如下:

为观察岩芯上返情况以及引射结构对取芯和携粉能力的影响, 试验器大部分用有机玻璃制成, 采用摄像头拍摄记录岩芯上返情况, 以便观察分析。排渣管头部接 PVC 排渣管, 管侧接测压接头 B, 连入压力表, 精确测量排气压力, 为模拟分析提供拟合数据。为研究引射结构对取芯和携粉能力的影响, 加工多组具有不同直径、倾角与分布位置的引射装置, 分别对不同引射装置的取芯能力进行试验研究。

为减少更换试验中的引射结构对反循环造成的影响, 钻头模型采用分体结构, 如图3所示, 由连接座、钻头体模型和手柄组成。在连接座和钻头体模型中间设计有进气环槽, 由进气罩进入的气体经连接座的八个孔在进气环槽内汇合后进入钻头体模型。

转动手柄可以控制钻头体模型的转动精度, 钻头底部圆周上有三个均布渐扩槽, 在60°范围内手动控制钻头转角, 便可模拟钻头旋转一周的情形, 随后通过试验过程考察钻头在孔底旋转时对孔底流场的影响情况。

根据反循环钻头的工作原理, 由喷射孔喷出的气流由于卷吸作用在孔底形成负压区, 为测得孔底负压分布情况, 在钻头体模型下部安装孔底测压装置, 它由孔底测压座套和测压接头组成。由于测压接头在测压座套上按同心圆分布, 所以当测压接头都连接上真空表后, 随着钻头体模型的转动就可以通过外接真空表读数, 经过整理分析得出孔底压力分布情况。

还可通过测压接头向孔底输送烟气、墨水, 来观察气体流动的流线。

为测试引射结构和喷射结构对取芯能力的影响, 按空压机型号和实验室情况, 岩芯选用酚醛树脂制作。并在岩芯上连接测力塞, 以精确测量压力值。

2 模拟仿真

运用 CFD 技术对反循环形成机理进行研究, 并对影响反循环形成效果的引射孔倾角、孔径和分布位置进行分析, 将为钻头体结构改进提供有力的依据。对于倾角的研究, 在引射结构侧壁上均布六个直径均为 5 mm 的不同倾角的孔, 对孔径的研究, 在引射结构侧壁上均布六个倾角为 45°的不同孔径的

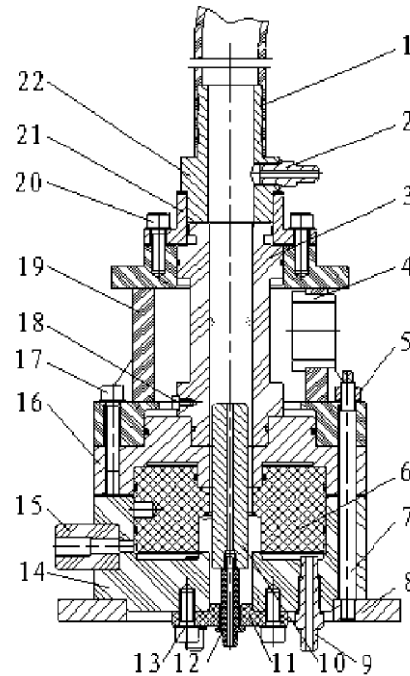


图2 反循环钻头试验器结构图
Fig.2 Structure of reverse circulation bit experimental apparatus

- 1—排渣管; 2—测压接头 B; 3—引射管; 4—进气接头; 5—六角螺母; 6—钻头体模型; 7—双头螺柱; 8—座板; 9—测压接头 A; 10—测力塞; 11—岩芯座; 12—测力杆; 13、17、18、20—内六角螺钉; 14—孔底测压座套; 15—侧接头; 16—连接座; 19—进气室; 21—压盖; 22—排渣接头
- 1—slag-off joint; 2—piezometer joint; 3—lead spurt organ; 4—gas-in joint; 5—hex nut; 6—bit body model; 7—double-end bolt; 8—base plate; 9—piezometer joint; 10—test force plug; 11—core seat; 12—test force pole; 13, 17, 18, 20—inner hexagon nut; 14—bottom of hole piezometric seating; 15—side joint; 16—joint seat; 19—enter gas cover; 21—press cover; 22—slag-off joint

孔，通过对均布两孔、三孔、五孔、六孔以及不对称分布的孔进行分析，得出孔的分布方式对压力分布的影响规律。根据不同的研究要求，通过 Solidworks 软件建立引射结构内部流场简化模型导入 GAMBIT，生成四面体网格，并在引射器接收管、混合管和扩压管内壁面生成附面层网格，喷嘴附近网格被加密，在计算中对网格自适应，最终网格数大约为320 000。

采用 K-epsilon 模型进行计算，对所有壁面取标准壁面函数，对能量及湍流相应方程使用二阶精度迎风格式离散。引射流入口采用压力入口边界、质量入口边界，在出口处采用压力出口，气体密度为理想气体。全场进口压力为 2.8 MPa，进风量 6 m³/min，进口质量流量为 0.122 5 kg/s。

通过分析得到以下结论：当引射孔倾角为 45°时，在引射结构周围均布六个同直径的 5 mm 孔所得负压最大；当引射孔直径为 7 mm 时，而引射孔中心线与钻头轴线上夹角呈 45°时内部流场压力最大；当引射孔直径均为 7 mm 且倾角均为 45°时，周边均布六个孔所得负压最大。从仿真分布可以简略得到如下结论：当引射孔设计为直径 7 mm、倾角 45°的六个均布孔时，负压最大，更有利于反循环形成。如图 4 中所示，左图是建立的引射结构网格图，右图是计算 7 mm 直径、45°倾角时所形成的引射孔内部压力。

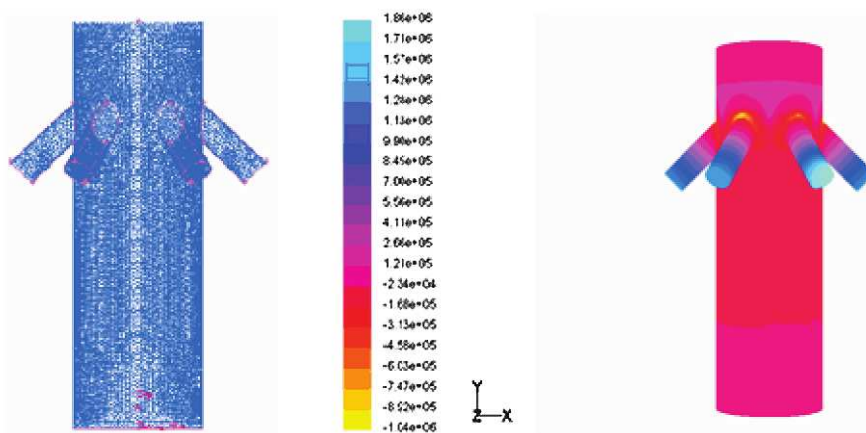


图 4 引射结构网格图与引射孔内部压力云图
Fig. 4 The mesh figure and the pressure distribution nephogram of the injector hole

3 试验研究

为与仿真分析的结果进行拟合，并验证试验器的效果，对引射孔倾角、孔径以及孔的分布等参数进行实验室研究，设计加工了带有不同倾角、不同孔径、不同分布位置孔的引射装置，并在试验台上进行验证。结果同样体现出，当引射孔为 7 mm，倾角为 45°，且六孔均布时引射结构内部压力最大。图 5 为加工设计的引射装置，表 1 为实验室得到的关于倾角的一组数据，从数据中可以看出当引射孔向上倾斜与引射装置中性轴线夹角为 45°时所得压力最大。与仿真结果基本吻合^[1]。



图 5 引射器照片
Fig. 5 Photograph of lead spurt instrument

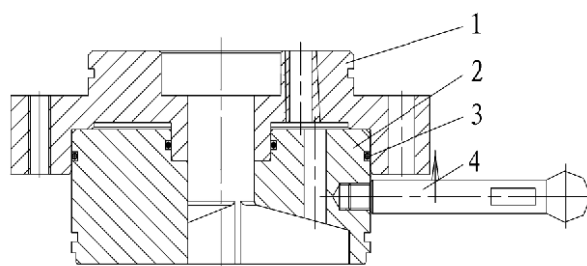


图 3 钻头模型结构图
Fig. 3 Structure of bit model
1—连接座；2—钻头体模型；3—密封圈；4—手柄
1—joint seat；2—bit body model；
3—airproof ring；4—bit body mod

表1 不同倾角引射孔下形成负压值/MPa
Tab.1 The negative pressure in diverse obliquity injector hole/MPa

长度/m	30°	45°	60°	长度/m	30°	45°	60°
4	0	-0.000 20	正压	15	-0.023 93	-0.104 31	-0.020 20
5	0	-0.000 49	正压	16	-0.028 37	-0.105 31	-0.020 89
6	0	-0.000 32	正压	17	-0.035 20	-0.114 41	-0.021 93
7	0	-0.004 15	正压	18	-0.046 57	-0.124 51	-0.042 21
8	-0.004 80	-0.006 47	-0.000 83	19	-0.106 86	-0.134 12	-0.059 59
9	-0.005 12	-0.008 62	-0.001 44	20	-0.117 55	-0.144 22	-0.060 00
10	-0.006 51	-0.009 91	-0.002 44	21	-0.119 16	-0.156 47	-0.050 50
11	-0.007 31	-0.010 22	-0.002 47	22	-0.097 74	-0.119 93	-0.049 88
12	-0.008 22	-0.011 16	-0.010 44	23	-0.081 76	-0.111 41	-0.045 88
13	-0.012 84	-0.094 31	-0.010 90	24	-0.009 71	-0.107 45	-0.043 64
14	-0.013 84	-0.094 55	-0.020 00				

4 钻头改进与野外试验

仿真分析与实验室研究的结果表明,在多喷嘴结构的基础上,再加一级引射装置作为内喷射孔,风量一定,内喷孔的直径选为7 mm,内喷孔中性线向上与钻头体中性轴线夹角为45°,六孔均布,此时反循环效果最好^[2]。

运用改进后的贯通式潜孔锤实施反循环连续取样钻进技术,在洛阳栾川钼矿矿区共完成勘探孔66个,累计进尺2 500 m以上,探明多处采空区,为安全生产提供了重要资料。实施反循环钻进,更有利于岩样的收集,岩样进入旋流取样器后,落入取样槽内,隔一定时间移动样槽,可使岩样按顺序排列,便于观察地层的变化情况。岩芯采取率98%,取样率100%,最高时效达7.68 m/h,台月效率达1 049.6 m。

5 结论

本文围绕“反循环”形成机理进行了深入的研究,建立了试验台,反复进行实验室模拟试验、仿真分析与理论研究、野外实际钻进试验,较深入地探讨了反循环机制的形成机理,指导并成功研究了反循环连续取芯(样)钻头,取得了这一技术的又一进展,结论如下:

- 1) 建立了反循环试验台,为方便研究反循环形成机理提供条件;
- 2) 运用CFD仿真技术对反循环形成机理进行研究,找出影响反循环形成效果的引射结构参数较优值,为钻头体改进提供依据;
- 3) 运用试验台进行室内模拟试验,所得结论与仿真结果基本吻合,说明所建立试验台的有效性;
- 4) 通过仿真分析与实验室研究所得结论,即当引射孔倾角为45°,孔径为7 mm,六孔均布的情况下,在钻头体底部形成负压是最大的,且更利于反循环形成;
- 5) 运用研究结论制得的钻头体运用于野外钻进实验,取得了较满意的效果。

[参考文献] (References)

- [1] 郝树青,殷琨,王清岩,等.反循环钻头引射孔倾角的仿真分析[J].煤田地质与勘探,2006,34(4):77~79.
HAO S Q, YIN K, WANG Q Y, et al. Emulation of reverse circulation bit injector obliquity[J]. Coal Geology & Exploration, 2006, 34(4): 77~79. (in Chinese)
- [2] 王茂森,殷琨,陈宝义.复杂地层钻进中贯通式潜孔锤的应用及反循环钻头的改进[J].煤田地质与勘探,2005,33(5):79~80. (in Chinese)
WANG M S, YIN K, CHEN B Y. Application of hollow-through DTH to completed strata and improvement of reverse-circulation drilling bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(5): 79~80. (in Chinese)