

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0765-06

巷道底板锚索孔钻进粉渣运移特征及现场试验

张辉^{1,2,3}, 程利兴², 常建超²

(1. 河南省高等学校深部矿井建设重点学科开放实验室, 河南 焦作 454000; 2. 河南理工大学
能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 3. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作 454000)

摘要 针对煤矿巷道底板锚索孔钻进困难的问题, 分析了正反循环钻进过程中粉渣运移特征, 得出“钻渣三区”的相互作用是制约底板锚索孔快速钻进的根本原因, 并提出了泵吸反循环钻进可以有效防止“钻渣三区”的形成。利用固液流体力学原理, 推导了冲洗液沿程水力损失及钻渣液上返流速的力学公式。根据现场实际, 得出底板锚索孔泵吸反循环钻进时钻孔深度、泵的真空度及钻渣液的上返速度与钻渣体积含量之间的关系, 结果表明泵吸反循环对底板锚索孔的快速钻进是可行的。研制了一套泵吸反循环钻进系统, 实现了底板锚索孔钻进与排渣同时作业。现场试验表明, 钻进深度5.6 m的底板锚索孔有效钻进时间可以控制在30 min内, 解决了底板锚索孔深孔钻进的难题, 净化了作业环境。

关键词 底板锚索孔; 泵吸反循环; 水力损失; 钻渣

中图分类号 TD 353 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.011

Study on migration characteristic of boring mud in roadway floor anchor wire hole and its field test

ZHANG Hui^{1,2,3}, CHENG Lixing², CHANG Jianchao²

(1. Henan Province Colleges and Universities Deep Mine Construction Key Discipline Open Laboratory, Jiaozuo, Henan 454000, China; 2. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China; 3. Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety, Henan Province, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract To solve the problem of drilling anchor holes into the roadway floor, migration characteristics of the reverse circulation drilling process of boring mud have been analyzed. The analysis has shown that the interaction of boring mud three-field is the primary cause of restricting floor anchor wire hole quickly drilling, and pump suction reverse circulation drilling that can be effectively prevented by boring mud three-field forming has been put forward. Using principles of solid-liquid fluid mechanics, mechanical formula of flushing fluid along hydraulic loss and slag drilling fluid return velocity has been successfully deduced. According to the field practice, the relationship between floor anchor wire hole pump suction reverse circulation drilling depth and drilling pump on vacuum degree and slag drilling fluid return velocity, and drilling slag volume content has been obtained. The result has shown that pump suction reverse circulation faster penetration of floor anchor hole is feasible. A set of pump suction reverse circulation drilling system has been developed, and floor anchor wire hole drilling and slag discharge operation at the same time have been realized. Field test has shown that effective time of

收稿日期: 2014-11-19

基金项目: 河南理工大学博士基金项目(B2014-055); 国家自然科学基金面上项目(51274087); 国家自然科学基金项目(51104055)

作者简介: 张辉(1983—), 男, 河南省商丘市人, 博士, 讲师, 硕士生导师, 从事巷道矿压及围岩控制方面的研究。

E-mail: caikuangzhang@163.com

Tel: 15239172096

drilling depth of 5.6 m floor anchor wire hole can be controlled within 30 min. The difficult problem of floor anchor wire hole deep hole drilling has been solved, and the work environment has been purified.

Key words floor anchor wire hole; pump suction reverse circulation; hydraulic loss; boring mud

深井巷道围岩大变形主要表现为强烈的底鼓现象,底鼓量占顶底板移近量的 $2/3 \sim 3/4$ ^[1-2]。研究表明^[3-4]:深井巷道顶底板和两帮围岩是一个相互作用的有机统一体,底鼓的产生加剧了巷道围岩整体破坏的进程,是导致深部巷道围岩整体失稳的关键。深井高应力巷道中,底鼓的类型表现为应力型,底板锚索加固由于其加固范围大、可以施加高预紧力及锚索注浆等特点,不仅是治理底鼓最行之有效的有效的手段,而且对巷道围岩整体的稳定性起着重要的作用^[5-7]。目前国内外研究^[8-11]对底板锚固孔的施工均采用坑道钻机正循环钻进,高压风或高压水冲洗钻孔,虽然实施有效的钻进,但底板积水或巷道内布满粉尘造成作业环境恶化;更重要的是,锚索孔深度大,采用坑道钻机正循环钻进时,在钻深超过 3.0 m 后经常出现卡钻、抱钻、钻渣排不出去等现象,很难实施快速钻进成孔,成为制约底板锚索孔快速钻进的关键。因此,有必要弄清楚底板锚索孔深孔钻进时钻渣运移规律,为底板锚索孔施工技术研究提供重要的理论依据。

1 底板锚索孔深孔钻进排渣特性分析

1.1 底板锚索孔正循环钻进排渣特性分析

目前煤矿底板锚索孔多采用正循环水力和风力排渣 2 种钻进方式^[12-15],排渣系统的排渣动力并不来自于钻机的动力,而来自于外在冲洗液的动力。如图 1 所示为正循环冲洗液排渣系统示意图。

冲洗液从钻杆中心通道沿冲洗液路线进入孔底,冲洗孔底钻渣、冷却钻头,然后将冲洗液携带的钻渣沿钻杆与钻孔之间的环形间隙排渣路线排出孔外,实现冲洗液正循环排渣钻进。

在冲洗液的作用下,钻渣颗粒在环形空间钻渣将形成 3 个区域,即钻渣上返区、钻渣聚集区和钻渣挤压区,如图 1 所示。底板锚索孔钻进时,这 3 个区域是动态的、依次逐步形成的,并将最终同时存在。钻渣上返区受冲洗液压力及钻渣颗粒作用,直接影响钻渣聚集区的形成;钻渣聚集区反过来制约着钻渣上返区流体压力和通过该区的钻渣颗粒大小;钻渣聚集区一旦形成,钻渣将快速聚积,如果再继续钻进,将快速形成钻渣挤压区;当钻渣挤压区达到一定程度时,钻杆将被钻渣挤压区的钻渣

抱死。在钻进过程中,不断提钻或增大冲洗液压力,一定程度上破坏了钻渣聚集区的形成,短时间内缓解了钻渣挤压区的形成,使得钻进可以得到持续;但不断提钻,挤压区的钻渣将重新回落孔底,造成钻头对钻渣反复破碎,一定程度上有利于钻渣的排出,但大大降低了钻进的速度;而增到冲洗压力一定程度上需要加大供压设备,但使孔壁破坏严重,而且造成巷道作业环境恶化。

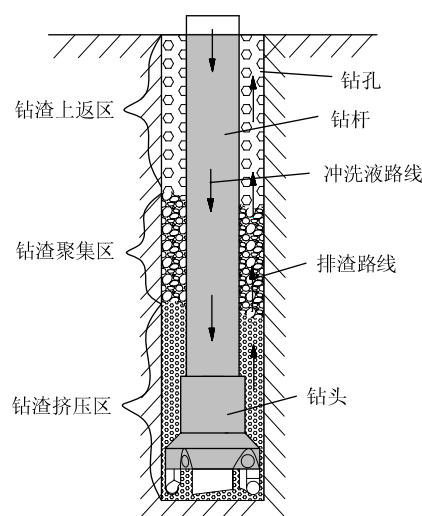


图 1 底板锚索孔钻进冲洗液正循环排渣示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of flush fluid normal cycle de-slugging in floor anchoring hole drilling

很大程度上来说,避免钻渣三区的相互作用是加快钻孔速度的关键。但是,由于钻进机具自身的局限性,工人对机具的操作难以预测钻渣聚集区的形成,导致底板锚索孔钻进速度极慢,无法满足巷道底板锚固技术发展的需要。

1.2 底板锚索孔泵吸反循环排渣特征分析

由于底板锚索孔正循环钻进排渣存在无法克服钻渣三区相互制约作用的局限性,使得底板锚索孔正循环钻进在现场难以推广应用。反循环钻进可分为压送反循环和泵吸反循环 2 种钻进方法。其中压送反循环钻进是利用高压泵将冲洗液通过钻杆中心通道送入孔底,携带钻渣的冲洗液从钻杆与孔壁之间的孔隙排出,排出的冲洗液滞留在巷道内,使得巷道底板作业环境恶化;若采用双壁钻杆实施压送反循环钻进,冲洗液通过双壁钻杆的环形孔隙压入孔底,但由于孔壁与钻杆之间的密封问题很难

解决,使得携带钻渣的冲洗液不仅从双壁钻杆的中心通道排出孔外,而且大部分冲洗液从钻杆与孔壁之间的空隙排出,无法形成压送反循环钻进。

泵吸反循环钻进^[16]是借助于泵的抽吸力,将孔底的钻渣抽出孔外,实现底板锚索孔钻进与排渣同时进行,如图2所示。

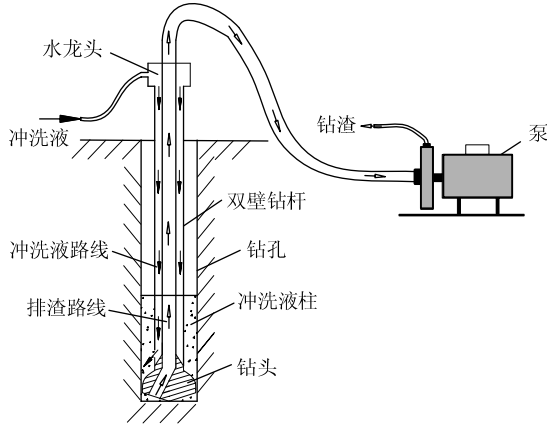


图2 底板泵吸反循环排渣结构示意图

Fig.2 Slagging diagrammatic sketch of pump suction reverse circulation

图2中,进行底板锚索孔钻进时,冲洗液经水龙头进入双壁钻杆环形空隙,由钻头进入孔底,冲洗孔底、冷却钻头。在泵的抽吸力作用下,携带钻渣的冲洗液通过双壁钻杆的中心通道排出孔外。受大气压的作用,泵的抽吸力可达到6~7 m水柱。因此,在底板锚索孔钻进与排渣同时进行,当钻进0~6 m深度范围的钻孔时,冲洗液连同钻渣在钻头附近直接被泵的抽吸力吸出孔外,避免了正循环钻进时钻渣三区的形成,而且避免了冲洗液对钻孔孔壁的侵蚀;当钻进深度大于6 m时,孔底会形成冲洗液-钻渣混合液柱,随着钻进深度的不断增大,该段高度不断增大,但随着冲洗液不断注入,并不影响携带钻渣的冲洗液在泵的作用下连续排出,理论上解决了底板锚索孔钻进的排渣难题。

2 底板锚索孔泵吸反循环钻进理论分析

2.1 冲洗液的沿程水力损失

冲洗液整个过程的沿程水力损失主要分为冲洗液进入孔底的沿程水力损失 $\Sigma\Delta p_{\text{外}}$ 和冲洗液在泵的抽吸力作用下通过内管的水力损失 $\Sigma\Delta p_{\text{内}}$ 。

冲洗液进入孔底的沿程水力损失为

$$\Delta p = \Sigma\Delta p_{\text{外}} + \Sigma\Delta p_{\text{钻头}} = \gamma\lambda_1 \frac{\Sigma l}{d_1 - d_2} \frac{V^2}{2g} + n\gamma\xi_1 \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

冲洗液携带钻渣通过双壁钻杆内管的沿程水

力损失为

$$\Sigma\Delta p_{\text{内}} = \gamma\lambda_2 \frac{\Sigma l}{d} \frac{V_a^2}{2g} \quad (2)$$

式中: d_1 为双壁钻杆外管内径, m; d_2 为双壁钻杆内管外径, m; d 为双壁钻杆内管内径, m; ξ_1 为钻头出水孔的局部阻力系数, $\xi_1=0.6$; γ 为流体容重, N/m^3 ; l 为每根钻杆的长度, m; $V^2/2g$ 为速度水头, m; V 为钻杆内流体平均速度, m/s; n 为钻头出水孔个数; V_a 为孔壁与钻杆环空流体平均速度, m/s; λ_1, λ_2 为沿程阻力系数。

2.2 钻渣上返速度 u_s

由泵吸反循环的平衡条件得出

$$\frac{S}{u_s} \cdot \left(\frac{D}{60d} \right)^2 = \frac{\gamma_m - \gamma_a}{\gamma_s - \gamma_a} \quad (3)$$

式中: D 为钻孔直径, m; S 为钻速, m/h; $\gamma_m, \gamma_s, \gamma_a$ 分别为钻渣液、钻渣、冲洗液容重, kN/m^3 ; u_s 为钻渣上升速度, m/s。

令 $\psi = (\gamma_m - \gamma_a)/(\gamma_s - \gamma_a)$, 为泵吸反循环钻进钻渣液中钻渣的体积含量, 则由式(3)得出钻速为

$$S = \psi \left(\frac{60d}{D} \right)^2 u_s \quad (4)$$

根据泵吸反循环钻进单位长度总的流量有

$$Q_m = Q_s + Q_a \quad (5)$$

式中: Q_m 为钻渣液流量, $Q_m = (\pi/4)d^2 u_m$, m^3/s ; Q_s 为钻渣流量, $Q_s = (\pi/4)D^2(S/3600)$, m^3/s ; Q_a 为冲洗液流量, $Q_a = (\pi/4)\{d^2 - [D^2 S/3600 u_s]\} u_a$, m^3/s ; u_m, u_a 分别为钻渣液流、冲洗液的上返流速, m/s。

则将上述参数代入式(4), (5)得

$$u_s = u_m - \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_s - \gamma_a} u_g \quad (6)$$

式中 u_g 为钻渣在冲洗液中悬浮速度, m/s。

2.3 钻渣的悬浮速度 u_g

根据 B.A. 乌斯宾斯基固体颗粒在流体中的悬浮修正公式, 在泵吸反循环钻进条件下, 最大悬浮速度为

$$u_g = 2.73 \sqrt{\frac{d(\gamma_s - \gamma_a)}{\gamma_a}} \quad (7)$$

则由式(6), (7)得

$$S = \psi \frac{60d}{D} \left(u_m - 2.73 \sqrt{\frac{d(\gamma_s - \gamma_a)}{\gamma_a}} \cdot \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_s - \gamma_a} \right) \quad (8)$$

由式(8)可看出, 底板锚索孔钻进速度 S 随底板岩性 γ_s 的变化而变化, 不同的岩性, 底板钻进速度不同。

2.4 钻渣液上返流速 u_m

根据泵吸反循环的伯努利方程有

$$u_m = \sqrt{\frac{\frac{p_s - \Delta p_a - \Delta p_t - \Sigma \Delta p_{\text{内}}}{\gamma_m} - h - H \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_m}\right)}{\alpha \left(1 + \Sigma \xi + \frac{\lambda_2}{d} L\right)}} 2g \quad (9)$$

式中: p_s 为水泵的真空度, kPa; Δp_a 为钻场大气压修正值, kPa; Δp_t 为钻场水温超过 20 °C 后的气化压力修正值, kPa; h 为水泵轴线距孔内水位线距离, m; H 为钻孔深度, m; $\Sigma \xi$ 为局部阻力系数之和; λ_2 为沿程阻力系数; L 为沿程长度, m, $L=H+h_c+l_1$; h_c 为主动钻杆长度, m; l_1 为水龙头到水泵进水管之间的胶管长度, m; α 为动能修正系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

3 底板锚索孔泵吸反循环钻进验算

某煤矿巷道底板锚索孔采用泵吸反循环钻进, 双壁钻杆外管内径 d_1 为 28 mm, 外径 d_3 为 42 mm, 内管外径 d_2 为 22 mm, 内径 d 为 16 mm, 主动钻杆长度 h_c 为 1.5 m, l_1 为 3.5 m, 钻孔直径 D 为 50 mm, 冲洗液采用井下压力为 0.5 MPa 静压水, 水的运动黏度 ν 为 $1.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 钻渣密度为 2.3 g/cm^3 , 水的密度为 1.0 g/cm^3 , 水泵的真空度 p_s 为 65 kPa, Δp_a 为 3 kPa, Δp_t 为 0, $\Sigma \xi$ 为 1.4, α 为 1.1, γ_s 为 21.3 kN/m^3 , γ_a 为 10 kN/m^3 , 令钻渣的体积含量 ψ 分别为 10%, 15%, 20%。

3.1 冲洗液进入孔底及携带钻渣上返沿程水力损失

代入式(1), (2)得冲洗液在冲洗孔底钻渣及排出孔外的过程的流体为紊流, 则其沿程阻力系数为 $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.012$ 。

$$\begin{aligned} \Delta p &= 8.28 \times 10^{-3} + 9.18 \times 10^{-6} H \\ \Sigma \Delta p_{\text{内}} &= 3.44 \times 10^{-6} L \end{aligned} \quad (10)$$

从式中可看出, 随着钻孔深度的增大, 冲洗液进入孔底和携带钻渣排出孔口的沿程损失呈正比增大。在底板锚索孔钻进时, 底板锚索孔较浅, 一般在 4~8 m 之间, 故沿程水力损失分别为:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 8.31 \times 10^{-3} \sim 8.35 \times 10^{-3} \text{ MPa} \\ \Sigma \Delta p_{\text{内}} &= 3.10 \times 10^{-5} \sim 4.47 \times 10^{-5} \text{ MPa} \end{aligned}$$

冲洗液进入孔底的压力损失最大占注入孔底静压水压力的 1.67%, 而冲洗液在携带钻渣排出孔外的压力损失占水泵真空度的 6.88%。故, 进行计算时冲洗液进入孔底的沿程压力损失可以忽略不

计, 表明底板反循环钻进时, 使用该型号的钻具可以顺利地把冲洗液输送到孔底, 进一步检验了设计的双壁钻杆内外管的环形间隙是合理的。

3.2 钻进深度与孔内冲洗液高度的关系

将上述数据代入式(7)得钻渣的悬浮速度为 $u_g = 3.67 \times 10^{-2} \text{ m/s}$ 。

由式(9)得

$$\frac{p_s - \Delta p_a - \Delta p_t - \Sigma \Delta p_{\text{内}}}{\gamma_m} - h - H \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_m}\right) \geq 0$$

则有

$$h \leq H \left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma_m}\right) - \frac{p_s - \Delta p_a - \Delta p_t - \Sigma \Delta p_{\text{内}}}{\gamma_m}$$

进一步有孔内冲洗液的高度 l_2 为

$$l_2 \geq H \left(2 - \frac{\gamma_a}{\gamma_m}\right) - \frac{p_s - \Delta p_a - \Delta p_t - \Sigma \Delta p_{\text{内}}}{\gamma_m} \quad (11)$$

将钻渣的体积含量 ψ 分别为 10%, 15%, 20% 及其他参数代入式(11), 得如图 3 所示底板锚索孔泵吸反循环钻进时锚索孔深度与孔内冲洗液高度的关系。

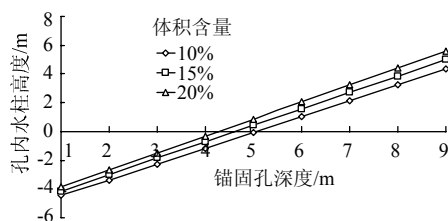


图 3 底板锚索孔深度与孔内冲洗液高度的关系

Fig.3 Relationship of floor anchoring hole depth and flush fluid height in hole

从图 3 可知: ① 在钻渣体积含量一定(即钻进速度一定)时, 受泵真空度的影响, 锚索孔内冲洗液的高度随孔深增加而增大, 否则钻渣随冲洗液无法排出孔外。在钻渣体积含量为 10% 时, 锚索孔钻进 5 m 前冲洗液可以在孔底循环, 大于 5 m 后孔内需要有一定高度的冲洗液, 泵才能顺利地把钻渣抽出孔外。② 在泵真空度一定时, 随着钻渣含量的增大(即钻速增大), 冲洗液顺利在孔底循环的锚索孔深度将降低, 当钻渣含量 20% 时, 锚索孔深度在大于 4.2 m 时孔底便会有一定的冲洗液柱才能使反循环正常运行。

因此, 底板锚索孔泵吸反循环钻进时, 选择真空度高的水泵(密封性好)、钻进速度低时有利于钻渣在孔底的排出; 在钻进较深的锚索孔时, 在不影响钻孔质量的条件下孔底适量存在冲洗液柱是必

要的；由于目前真空度最高的水泵 p_s 小于 80 kPa，完全孔底反循环钻进锚索孔的深度也要小于 6.5 m，在孔深度大于 6.5 m 时孔内的冲洗液及钻渣通过泵抽出孔外。

3.3 底板锚索孔钻进速度的影响因素

设冲洗液只在孔底反循环，水泵轴线距孔内水位线距离 h 与孔深 H 相等，设孔深 4 m，代入式(6)，(8)和(9)得表 1 所列的参数。

表 1 钻渣液上返流速、钻渣上返流速及钻进速度的参数

Table 1 Arising velocity parameters of intermixture, boring mud and drilling velocity

$\psi/\%$	$\gamma_m/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$u_m/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$u_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$S/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
10	11.13	2.588	2.545	4.36
15	11.70	2.031	1.999	5.09
20	12.26	1.351	1.322	4.49

由表 1 可看出：① 在钻孔深度一定时，钻渣上返速度 u_s 与钻渣体积含量 ψ 呈反比，并随着钻渣体积分含量的增加，钻渣上返速度迅速减小，当钻渣体积分含量为 24.1% 时，钻渣将不随冲洗液一起被抽出孔外，表明钻渣体积分含量大于 24.1% 时无法完成泵吸反循环，底板锚索孔将无法继续钻进，如图 4；② 底板锚索孔的钻进速度不随钻渣体积分含量的增加而增加或减小，当钻渣体积分含量为 15% 时钻进速度最快，理论计算钻速为 5.09 m/s，但锚索孔的钻进速度还受钻压、岩性、钻机转速等因素的影响，使得钻速远远低于泵吸反循环钻进的理论值。

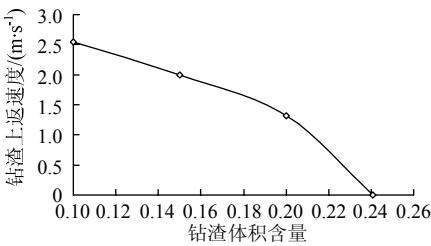


图 4 钻渣含量与上返速度之间的关系

Fig.4 Relationship of boring mud content and ascending velocity

4 巷道底板锚索孔泵吸反循环钻进试验

采用自行设计的反循环钻具及隔膜泵组成底板钻进排渣系统，并在内蒙古伊东东圪堵煤矿进行了现场试验。如图 5 是伊东东圪堵煤矿底板锚索孔泵吸反循环施工现场，该矿底板岩层以砂质泥岩、泥岩为主，强度较低，遇水易泥化。

在钻进 4 m 深度的钻孔时，未发现冲洗液从钻

孔壁溢出，提钻后，钻孔内冲洗液注仅有不到 0.2 m，钻孔成孔质量较好。表明底板砂质泥岩采用泵吸反循环钻进，钻渣在钻头附近形成后随即被泵抽吸力排出孔外，不仅减少冲洗液对孔壁的泥化作用，而且避免了泥质钻渣聚集挤压对钻杆的抱死。

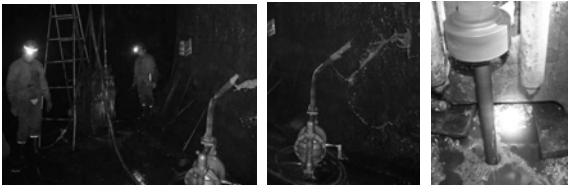


图 5 底板锚索孔泵吸反循环钻进施工试验

Fig.5 Pump suction reverse circulation drilling test of floor anchoring hole

钻进过程中，在钻压一定的情况下，底板锚索孔钻进时间与钻进深度的关系如图 6 所示。

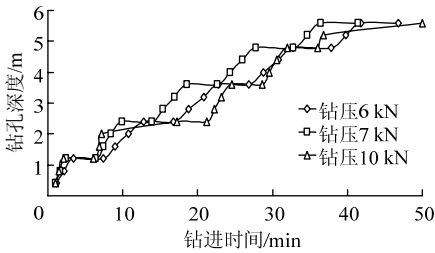


图 6 钻进时间与钻进深度关系曲线

Fig.6 Relationship of drilling time and drilling depth

图中显示钻机稳定钻压分别为 6，7，10 kN 时的钻孔深度与时间的曲线。钻机每钻进 1 个回程(0.4 m)记录一次时间，钻杆 1.2 m/根，钻进 5.6 m 需要更换 4 次钻杆，每更换一次需要 4 min，共需 16 min，钻孔有效钻进时间控制在 30 min 之内。在钻压为 6，7 kN 时，随着钻压的增大，锚索孔的累计钻进时间明显减少，表明钻压的提高有助于提高钻进速度。但当钻压稳压到 10 kN 时，由于钻压较大，遇到较软的泥岩时，钻进速度会突然增大，但随之出现卡钻现象，表明岩层性质对钻进速度影响较大，如何有效控制钻压与岩性的关系还需要进一步研究。此外，由于孔内钻渣直接通过泵排出，使巷道内的作业环境及锚索孔的成孔质量大大提高，有利于底板锚索的锚固，避免底板岩层受水的侵害。

5 结 论

1) 底板锚索孔正循环钻进由于其“钻渣三区”的相互作用，成为制约底板锚索快速钻进的根本原因。提出了底板锚索孔泵吸反循环钻进，通过泵的抽吸力将孔底钻渣排出，有效防止“钻渣三区”

的形成,提高了钻进效率。

2) 利用流体力学的原理,推导了冲洗液全程沿程水力损失、钻渣上返速度、钻渣悬浮速度及钻渣液上返流速的力学公式。通过工程验算可知,底板锚索孔泵吸反循环钻进时钻孔深度、泵的真空度及钻渣液的上返速度、钻渣体积含量等之间的关系,得出实施泵吸反循环对底板锚索孔的快速钻进是可行的。

3) 根据巷道特殊的地质环境及底板锚索孔的成孔要求,研发设计了一套泵吸反循环钻具,并对泵进行了优选,实现了底板锚索孔钻进与排渣同时作业。现场试验表明,巷道底板锚索孔泵吸反循环钻进 5.6 m 深孔单孔有效钻进时间可以控制在 30 min 内,解决了底板锚索孔排渣的难题,提高了钻进速度,净化了作业环境,为巷道底板预应力锚注加固奠定了强有力的基础。

参考文献:

- [1] 史元伟,张声涛,尹世魁,等.国内外煤矿深部开采岩层控制技术[M].北京:煤炭工业出版社,2009:293-299.
- [2] 刘泉声,高玮,袁亮.煤矿深部岩巷稳定性控制理论与支护技术及应用[M].北京:科学出版社,2010:201-202.
- [3] 张辉,康红普,徐佑林.深井巷道底板预应力锚索快速加固技术研究[J].煤炭科学技术,2013,41(4):16-19. ZHANG Hui, KANG Hongpu, XU Youlin. Study on rapid reinforced technology with pre-stressed anchor for floor of mine roadway in deep mine[J]. Coal Society and Technology, 2013, 41(4): 16-19.
- [4] 孙利辉,纪洪广,杨本生,等.大采深巷道底板软弱夹层对底鼓影响数值分析[J].采矿与安全工程学报,2014,31(5):695-701. SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng, et al. Simulation analysis of influence of floor weak inter-layer on floor heave in deep mining roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(5): 695-701.
- [5] 奥顿哥 M. 巷道底鼓的防治[M].王茂松,译.北京:煤炭工业出版社,1985:19-56.
- [6] 刘少伟,冯友良,董士举.巷道底板锚固孔排渣影响因素分析及参数优化[J].中国矿业大学学报,2013,42(5):761-765. LIU Shaowei, FENG Youliang, DONG Shiju. Influence factors analysis and parameters optimization of deslag-
- ging in roadway floor anchoring boreholes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 761-765.
- [7] 张辉,康红普,徐佑林.煤矿巷道底板锚固孔排渣机理及应用[J].煤炭学报,2013,38(3):430-435. ZHANG Hui, KANG Hongpu, XU Youlin. Deslagging mechanics and application of roadway floor anchor hole in coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 430-435.
- [8] 马植侃,汪滨.钻探工程学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1998:108-115.
- [9] 秋实.关于凿岩排渣问题的分析[J].凿岩机械气动工具,2002(1):27-32. QIU Shi. Analysis on drilling slagging problem[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2002(1): 27-32.
- [10] 师贺庆,李国富,戴铁丁.基于破碎巷道底板成孔的快速钻杆钻头技术研究[J].煤矿机械,2009(2):20-21. SHI Heqing, LI Guofu, DAI Tieding. Research on technology of fast speed drill pipe bit based on breaking roadway floor ore-forming[J]. Coal Mine Machinery, 2009(2): 20-21.
- [11] 张景富.钻井流体力学[M].北京:石油工业出版社,1994:39-47.
- [12] 袁恩熙.工程流体力学[M].北京:石油工业出版社,2004:81-159.
- [13] 刘永贵,周英操,王广新,等.欠平衡钻井环空岩屑对井底负压的影响[J].石油学报,2005,21(6):96-103. LIU Yonggui, ZHOU Yingcao, WANG Guangxin, et al. Effect of annular cuttings on negative pressure in under-balanced drilling process[J]. Journal of Oil, 2005, 21(6): 96-103.
- [14] 王海锋,李增华,杨永良,等.钻孔风力排渣最小风速计压力损失研究[J].煤矿安全,2005,36(3):4-6. WANG Haifeng, LI Zenghua, YANG Yongliang, et al. Research on lowest wind speed and pressure loss of drilling dust extraction with wind-force for borehole[J]. Coal Mine Safety, 2005, 36(3): 4-6.
- [15] 姚向荣,石必明,夏抗生.深井遇软结构煤岩瓦斯抽采钻孔固化成孔技术研究[J].煤炭工程,2010(6):67-70. YAO Xiangrong, SHI Biming, XIA Kangsheng. Research on borehole solidification forming technology for gas drainage in soft structural coal and rock of deep mine[J]. Coal Engineering, 2010(6): 67-70.
- [16] 康红普,张辉,吕华文.煤矿巷道底板钻孔装置及方法:中国,CN102678040A[P].2014-09-18.