

文章编号:1001-4888(2020)01-0151-08

巷道底板小孔径锚固孔深孔 钻进强力排渣机理研究^{*}

张辉^{1,2,3}, 李国盛¹, 蒋帅旗¹

(1. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南焦作 454003; 2. 煤炭科学研究总院 开采设计研究分院, 北京 100013;

3. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南焦作 454000)

摘要: 为了解决煤矿巷道底板锚固孔钻进困难的问题, 本文提出采用高压水流正循环钻进可以有效避免“钻渣三区”的形成, 并研发了一套巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统。利用固液两相耦合流体力学理论, 推导出冲洗液压力与钻渣颗粒半径、钻渣浓度和钻孔深度之间的关系式以及钻孔深度、钻渣上返速度与冲洗液压力之间的计算公式。结果表明: 随着钻渣浓度的提高及钻渣半径的增大, 能量消耗的频度和强度就会增加, 所需要的冲洗液压力也会增大; 冲洗液压力随着钻孔深度的增加而逐渐增大, 当钻孔深度为8m时, 要求冲洗液压力大于1.9MPa, 另外降低钻机推进速度及增大钻头钻速, 是保证锚固孔钻进强力排渣的关键。

关键词: 底板锚固孔; 强力排渣; 水力损失; 冲洗液压力

中图分类号: TD3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-098

0 引言

随着煤炭开采深度由浅部向深部发展, 地应力急剧增高, 围岩呈现出明显的软岩变形特征, 巷道底鼓现象尤为突出, 严重影响巷道稳定与安全。近年来, 有关学者在巷道底鼓特征、影响因素及防治措施方面进行了大量的研究, 姜耀东等^[1,2]探讨了巷道底鼓的基本特征, 将其分为挤压流动性底鼓、遇水膨胀性底鼓、挠曲褶皱性底鼓、剪切错动性底鼓; 钟祖良等^[3]、孙利辉等^[4]、初明祥等^[5]、兰永伟等^[6]对巷道底鼓的影响因素进行了分析; 柏建彪等^[7]提出了底鼓的“两点三区”特征: 即采动巷道底板存在零位移点、零应变点, 将采动巷道底板分为拉应变上升区、拉应变压缩区、压应变压缩区; 李学华等^[8]提出了控制硐室底鼓的应力转移新技术, 即通过在硐室底板掘巷, 并结合在底板开掘巷道间、或底角进行松动爆破, 形成一定范围的围岩弱化区的方法; 王晓卿等^[9]研发出适用于底板加固的端锚锚索束, 提出了以端锚锚索束为主的底鼓控制方案。

锚杆(索)支护技术在长期广泛应用中得到了长足的发展, 为控制巷道底鼓提供了强有力的技术支撑。目前治理巷道底鼓最为有效的措施是向巷道底板安装锚杆(索), 在钻打锚杆(索)孔的过程中, 仍然存在底板锚杆(索)孔成孔困难, 效率低的问题, 影响成孔最重要的因素是在钻孔过程中钻渣难以排出。张辉等^[10-13]将环形排渣空间从孔底处到孔外处分成了“钻渣三区”, 即钻渣上返区、钻渣聚集区和钻渣挤压区, 认为“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; 冯友良等^[14]对具有不同横截面尺寸的双壁钻杆进行了流体排渣过程数值试验研究, 以排渣效率作为指标, 选出了双壁钻杆最优

^{*} 收稿日期: 2018-05-07; 修回日期: 2018-08-05

基金项目: 河南省科技厅科技攻关项目(182102310005)资助

通讯作者: 张辉(1983—), 男, 副教授, 博士。主要从事巷道围岩控制方面的教学和研究工作。Email: caikuangzhang@163.com

横截面尺寸;刘少伟等^[15]得出了决定排渣效果的影响因素由高到低依次为:排渣通道压力、进水通道孔径、机具长度、进水通道压力、排渣通道孔径。但无论是采用正循环排渣,还是采用泵吸反循环排渣,都难以实现锚杆孔直径、钻杆直径、锚固剂直径等“钻孔三径”的匹配。因此,本文对巷道底板小孔径锚固孔深孔钻进强力排渣机理进行探讨,以便为底板小孔径锚固孔深孔的钻进提供理论依据。

1 巷道底板锚固孔深孔钻进强力排渣技术原理

煤矿巷道底板锚固孔钻进排渣方式主要有三种:水力排渣、风力排渣和机械螺旋排渣^[17-19],其中水力排渣应用最为普遍。目前水力排渣存在的最大问题是排渣困难,常规正循环排渣系统所提供的冲洗液压力较小,当施工钻孔深度较小时,钻渣在较小的冲洗液压力作用下就可以顺利地排出孔外;但随着钻孔深度的增大,就会出现冲洗液压力不足的情况,从而易在环形排渣空间内形成“钻渣三区”。影响钻渣排出效率的因素很多,主要包括钻渣浓度、环空返速、钻机推进速度、钻渣密度及钻渣颗粒半径等因素。图 1 为巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统示意图。

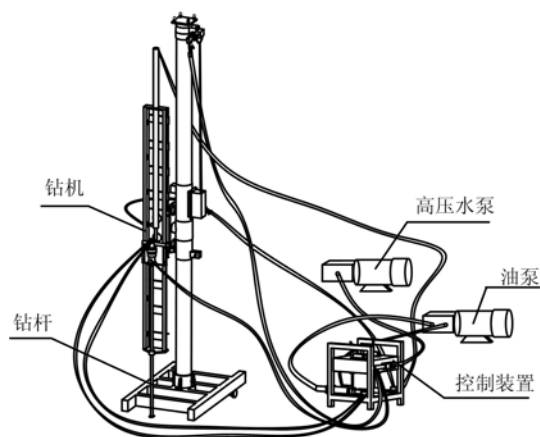


图 1 巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统

Fig. 1 Deep hole strong slag discharge system for tunnel floor anchor holes

巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统主要由钻机、高压水泵、油泵、控制装置及钻杆等组成。在钻打巷道底板锚固孔之前,先将整个系统稳固;其中高压水泵设有水压调节开关和水力压力表,可以调节并记录冲洗液压力;控制装置可以对钻机推进速度及钻头钻速进行调节;随着钻孔深度的增大,调大冲洗液压力,降低钻机推进速度,增大钻头钻速,以减小钻渣颗粒大小及浓度,保证钻渣颗粒始终有较大的上返速度,避免在环形排渣空间内形成“钻渣三区”,可以提高钻渣排出效率。巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统的最大特色在于,该系统所提供的冲洗液压力可以根据钻孔深度的增加而增大,保证在钻打巷道底板锚固孔整个过程中,锚固孔孔内的钻渣能够在较大的冲洗

液压力的携带作用下排出孔外,从而提高了底板锚固孔钻孔效率。

2 巷道底板锚固孔钻进强力排渣能量分析

2.1 钻渣在环形排渣空间内的能量分析

钻渣能够实现从环形排渣空间内排出,其主要动力来源是冲洗液压力。该排渣过程可以分为两个阶段,第一阶段主要在钻杆内进行,第二阶段在环形排渣空间内完成,下面将对两个阶段的能量分别进行分析。做功主要包括四个方面,分别为压力做功、重力做功、动能做功及沿程水力损失。根据伯努利方程,可得

$$p_1 + \rho_l \frac{v_1^2}{2} + \rho_l g z_1 = p_2 + \rho_l \frac{v_2^2}{2} + \rho_l g z_2 + \Delta p_{(1-2)} \quad (1)$$

式中, $(p_1 - p_2)$ 为压力做功; $\rho_l g(z_2 - z_1)$ 为重力做功; $(\rho_l v_2^2/2 - \rho_l v_1^2/2)$ 为动能做功; $\Delta p_{(1-2)}$ 为沿程水力损失, Pa。在第一阶段, ρ_l 为冲洗液的密度, 其值为 1 g/cm^3 ; p_1 为冲洗液压力, Pa; p_2 为标准大气压, 取 101325 Pa ; v_1 为钻渣颗粒的初始速度, 其值为 0 ; v_2 为水流从钻杆内进入到钻孔中的流速, m/s; $\Delta p_{(1-2)}$ 为水流在钻杆内、接头内及钻头内的沿程水力损失。

在第二阶段, 采用固液两相流的伯努利方程^[20], 此阶段中公式仍然采用公式(1), 但公式中的字母所代表的含义有所不同, 分别是: ρ_l 为混合流体的密度, 其计算公式为 $\rho_l = (\rho_l C_l + \rho_s C_s) / (C_l + C_s)$, ρ_l 、 ρ_s 分别为冲洗液、钻渣的密度, kg/m^3 ; C_l 、 C_s 分别为水流、钻渣所占混合液的浓度, 其中 $C_l + C_s = 1$; p_1 、 p_2 为标准大气压, 取 101325 Pa ; v_1 为水流从钻杆内进入到钻孔中的流速, m/s; v_2 为在钻孔孔处混

合流体的平均流速, m/s ; $\Delta p_{(1-2)}$ 为混合流体在环形排渣空间内的沿程水力损失。

2.2 钻孔内循环沿程水力损失

巷道底板锚固孔钻进过程中, 其沿程损失分为两个阶段。第一阶段主要在钻杆内进行, 第二阶段在环形排渣空间内完成, 冲洗液总的水力损失 Δp 为

$$\Delta p = \frac{\gamma v_b^2}{2g} \left[\lambda_1 \sum \left[\frac{n_1 l}{d_1} + \frac{n_2 l_D}{d_4} + \sum (\xi_1 + \xi_2) + \xi_3 \right] \right] + \lambda_2 \frac{\sum n_3 l}{d_3 - d_2} \cdot \frac{\gamma v_a^2}{2g} \quad (2)$$

式中, γ 为流体容重, N/m^3 ; l 为每根钻杆的长度, m ; $v_b^2/2g$ 为速度水头, m ; v_b 为钻杆内流体平均速度, m/s ; l_D 为钻杆接头长度, m ; n_1 为钻杆的个数; n_2 为钻杆接头的个数; n_3 为钻头出水孔个数; v_a 为冲洗液在钻孔孔内环空上返速度, m/s ; d_1 为钻杆内部通道直径, mm ; d_2 为钻杆外径, mm ; d_3 为钻孔直径, mm ; d_4 为钻杆接头内部通道直径, mm ; ξ_1 为突然扩大的局部阻力系数, $\xi_1 = (1 - A_1/A_2)^2$; ξ_2 为突然缩小的局部阻力系数, $\xi_2 = 0.5(1 - A_1/A_2)$; A_1 为钻杆内部通道截面积, m^2 ; A_2 为钻杆接头内部通道截面积, m^2 ; ξ_3 为钻头出水孔的局部阻力系数, $\xi_3 = 0.6$; λ_1 、 λ_2 为沿程阻力系数, 按临界雷诺数 Re 进行确定, 即为

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (3)$$

式中, ν 为高压水流的运动粘度, m^2/s ; v 为圆环通道内的流体流速, m/s ; d 为圆环通道的当量直径, m 。

沿程阻力系数 λ 采用阿里特苏里公式计算:

$$\lambda = 0.11 \left[\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{Re} \right]^{0.25} \quad (4)$$

式中 Δ 为管壁的当量粗糙度, 对于钻杆内壁取为 0.19mm , 钻孔孔壁的当量粗糙度取为 1.5mm 。

2.3 钻渣在钻孔内的速度分析

(1) 冲洗液在钻孔孔内环空上返速度为

$$v_a = \frac{318.5 \pi d_1^2 v_b \times 10^{-3}}{d_3^2 - d_2^2} \quad (5)$$

式中, v_b 为冲洗液在钻杆内部流速, m/s 。

(2) 冲洗液在钻杆内部流速: 该速度主要与通过阀门的压力差、阀门形状及冲洗液密度 ρ_l 有关, 为

$$v_b = \mu \sqrt{\frac{2(P - P_0 - \Delta p_{(1-2)})}{\rho}} \quad (6)$$

式中, $\Delta p_{(1-2)}$ 为冲洗液第一阶段中在钻杆内部的沿程水力损失; P_0 为大气压, 取值为 101300Pa ; ρ 为冲洗液密度, 取值 1g/cm^3 ; μ 为流量系数, 与阀门形状有关, 这里取为 0.63 。

(3) 钻渣颗粒的滑落速度计算: 钻渣颗粒在冲洗液的上返作用下, 以一定的速度被携带至地面。通过以上计算得出, 钻渣颗粒从钻孔孔底排出至地面的整个过程中, 冲洗液流动状态为紊流, 则钻渣滑落速度采用 Moore 滑落速度公式计算, 有

$$v_s = 0.942 \sqrt{\frac{2r_0(\rho_s - \rho_l)g}{\rho_l}} \quad (7)$$

式中, r_0 为钻渣颗粒, mm ; ρ_s 为钻渣密度, 取 2.7g/cm^3 ; g 为重力加速度, 取 9.81m/s^2 。

(4) 钻渣颗粒在环形排渣空间内上返速度: 钻渣颗粒在此期间内的运动速度主要分为三个部分, 一是钻渣在钻杆高速旋转的作用下, 产生垂直于钻杆旋转方向的速度 v_m , 主要对钻渣运移路径产生作用, 这里不予考虑; 二是冲洗液携带钻渣颗粒垂直向上的速度, 即冲洗液上返速度 v_a ; 三是钻渣滑落速度 v_s 。为了保证能够将钻渣顺利地排出孔外, 必有冲洗液和钻渣所组成的混合液上返速度 v_t 大于 0 。设混合液上返速度为 v_t , 钻渣颗粒在垂直方向上速度分布图如图 2 所示, 则有

$$v_t = v_a - v_s \quad (8)$$

3 巷道底板锚固孔深孔强力排渣工程应用

设钻打巷道底板锚固孔钻杆截面形状为圆形, 钻杆内径 d_1 为 10mm , 外径 d_2 为 28mm , 钻孔直径

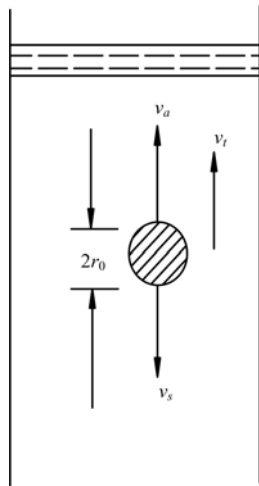


图 2 钻渣颗粒在垂直方向上的速度分布图

Fig. 2 Distribution of speed of drilling slag particles in vertical direction

d_3 为 32mm, 钻杆接头内径 d_4 为 16mm, 接头长度 l_D 为 10cm, 水的运动粘度 ν 为 $1.142 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 钻渣密度 ρ_s 为 2.7 g/cm^3 , 冲洗液密度 ρ_l 为 1 g/cm^3 , 钻孔深度 h 最大为 8m。

3.1 钻孔深度、钻渣半径及浓度与冲洗液压力之间的关系

钻渣颗粒从钻孔孔底排出孔外过程中, 其速度在钻孔孔口处存在一个临界值, 该速度值是保证钻渣颗粒能否从钻孔排出的重要条件。通过理论分析并计算出该速度临界值, 从而推导出钻孔深度与水力压强之间的关系。该临界值的存在情况为, 在钻孔孔口处钻渣上返的速度为零, 即有冲洗液的上返速度 v_a 等于钻渣的滑落速度 v_s 。联合公式(5)~(8), 有

$$\frac{318.5\pi d_1^2 \times 10^{-3}}{d_3^2 - d_2^2} \cdot \mu \sqrt{\frac{2r_0(P - \Delta p_{(1-2)} - P_0)}{\rho}} = 0.942 \sqrt{\frac{2r_0(\rho_s - \rho)g}{\rho}} \quad (9)$$

式中 $\Delta p_{(1-2)}$ 为混合流体在第二阶段中环形排渣空间内的沿程水力损失。将前面的相关参数代入式(9), 通过计算并整理得

$$P = 220320r_0 + 136575h + 3740C_a + 131198C_a h + 92425 \quad (10)$$

冲洗液压力 P 、钻渣浓度 C_a 、钻渣半径 r_0 和钻孔深度 h 的关系如图 3 所示, 其中, 曲线由下往上依次表示深度为 1~8m, 由图可以看出:

(1) 随着钻孔深度的增加, 钻渣由孔底向钻孔孔处的路程越来越大, 造成运输钻渣的所需要克服的能量就越多, 即说明所需要冲洗液压力就越大。

(2) 当钻孔深度 h 是稳定值时, 冲洗液压力 P 与钻渣浓度 C_a 、钻渣粒径 r_0 的关系如下: 同时增大钻渣半径和钻渣浓度, 所需要的冲洗液压力也增大。这说明钻渣半径的增大, 造成单颗颗粒排出孔外所需要的冲洗液压力增加; 钻渣浓度的增大, 使钻渣颗粒在环形排渣空间内的碰撞、摩擦等发生的频率和强度都会增大, 导致外部能量消耗增多, 提高了所需要的冲洗液压力。

(3) 通过以上分析可知, 钻渣半径大小、钻渣浓度及钻孔深度的变化都会对冲洗液压力有影响, 为更好地实现钻打底板锚固孔, 就要处理好冲洗液压力、钻进速度和钻头钻速等之间的关系。当钻孔深度太深、钻渣浓度太高或钻渣半径太大

时, 都不利于排渣的实现。在保证较高的冲洗液压力的同时, 要协调好钻头钻速及推进速度之间的关系, 加大钻头钻速或适当调节钻头推进速度, 都将利于钻孔排渣的实现。

3.2 钻孔深度、混合液上返速度与冲洗液压力之间的关系

根据伯努利方程, 选取钻孔孔底处与钻孔孔口处之间的能量关系进行讨论。为便于计算, 钻渣在环形排渣空间内排出的过程中, 不计钻渣之间碰撞、摩擦等能量损耗, 仅考虑水力沿程损失。设钻渣浓度为 20%, 联合公式(1)~(4), 可计算出钻孔深度、混合液上返速度与冲洗液压力之间的关系式为

$$P = 670v_a^2 + 153160h + 92425 \quad (11)$$

大气压力 P 、混合液上返速度 v_a 和钻孔深度 h 的关系如图 4 所示, 由图可以看出: (1) 在保证冲洗液压力 P 不变的情况下, 随着钻孔深度 h 的增大, 由钻渣和冲洗液混合而成的混合液上返速度 v_a 逐渐减小, 直到减少至零, 此后再继续钻孔, 由于混合液上返速度为零, 钻渣不能及时排出, 钻进过程就会被

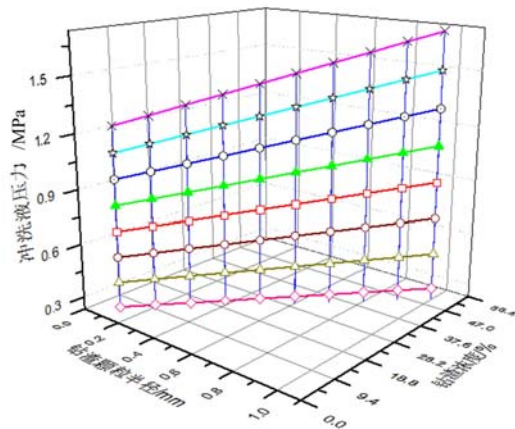


图 3 P 、 r_0 、 C_a 及 h 的关系曲线图

Fig. 3 Relation curve of P , r_0 , C_a and h

中断;若要实现继续钻孔,则需要提高冲洗液压力来增大混合液的上返速度;(2) 冲洗液压力与钻孔深度存在正相关的关系,随着钻孔深度的增加,所需要的冲洗液压力也随之增大,说明钻渣在环形空间内出现的能量损失就越多,即钻渣与冲洗液之间的摩擦及冲洗液水力损失等能量消耗的频度和强度就会增加,从而造成混合液上返速度下降较快。

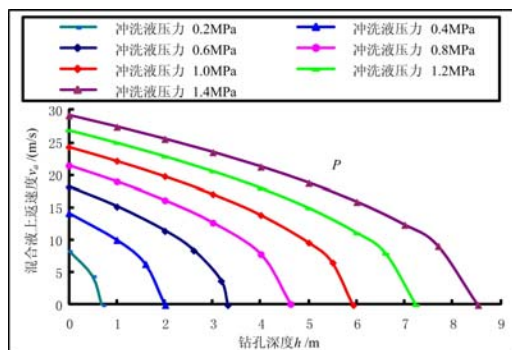


图4 P 、 v_a 及 h 的关系曲线图

Fig. 4 Relationship curves of P , v_a and h



图5 井下现场施工图

Fig. 5 Underground site construction drawings

3.3 锚固孔钻进强力排渣措施

通过对强力排渣机理分析,在贵州湾田煤矿 1433 水平轨道巷进行井下工程应用,井下现场施工图如图 5 所示。巷道底板岩层多为弱胶结粉砂岩、细砂岩及含粉砂岩,强度较低,且遇水极易膨胀泥化,钻渣颗粒直径主要处于 1.0~1.6mm,在 1433 水平轨道巷钻打 6 个巷道底板锚固孔,深度都为 8m,同时对底板锚固孔排出的钻渣颗粒进行收集,通过高压水泵上的水力压力表,每钻打 1m 钻孔记录一次冲洗液压力,最后取其平均值,并与钻渣浓度为 20%、钻渣颗粒半径 1.0mm 的钻孔深度 h 与冲洗液压力 P 之间的理论计算结果进行对比,如图 6 所示。从图 6 可以看出,现场实测值始终大于理论计算值,两者之间最大差值小于 0.2MPa,但考虑到钻打巷道底板锚索孔实际情况,存在钻渣之间的碰撞、摩擦等其他能量损失,该误差值处于可接受范围内。通过理论计算和现场试验得出,在钻孔深度为 8m 时,所需要的冲洗液压力大于 1.9MPa。因此,随着钻孔深度的增加,通过水压调节开关逐渐增大冲洗液压力,以保证钻渣颗粒在排渣空间内始终有较大的上返速度;同时利用控制装置来降低钻机推进速度及增大钻头钻速,降低钻渣颗粒大小及浓度,是实现锚固孔钻进强力排渣的关键。

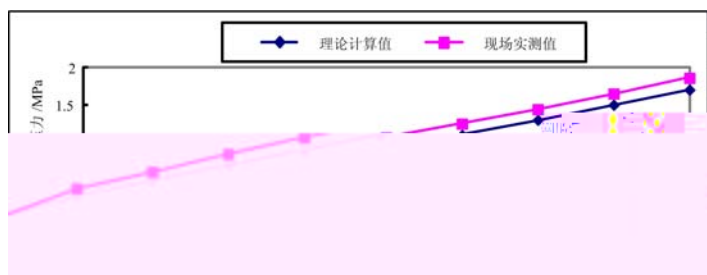


图 6 理论计算与现场实测对比图

Fig. 6 Comparison between theoretical calculation and field measurement

4 结论

(1) 针对巷道底板钻进排渣困难的问题,研发了一套巷道底板锚固孔深孔强力排渣系统,并推导出冲洗液压力与钻渣颗粒半径、钻渣浓度和钻孔深度之间以及冲洗液压力与钻孔深度、钻渣上返速度之间的关系公式。

(2) 随着钻渣浓度、钻渣半径的增大,在环形空间内发生钻渣与钻渣之间的碰撞、摩擦等外部能量消耗的频度和强度就会增加,造成所需要的冲洗液压力也增大。

(3) 通过理论计算及现场试验可得,在钻孔深度为 8m 时,所需要的冲洗液压力大于 1.9MPa;冲洗液压力随着钻孔深度的增加而逐渐增大,始终保证钻渣颗粒在排渣空间内有较大的上返速度,同时降低钻机推进速度及增大钻头钻速,以降低钻渣颗粒大小及浓度,是实现锚固孔钻进强力排渣的关键。

参考文献:

- [1] 姜耀东, 赵毅鑫, 刘文岗, 等. 深部开采中巷道底鼓问题的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14):2396—2401 (JIANG Yaodong, ZHAO Yixin, LIU Wengang, et al. Research on floor heave of roadway in deep mining [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14):2396—2401 (in Chinese))
- [2] 姜耀东, 陆士良. 巷道底膨机理的研究[J]. 煤炭学报, 1994, 19(4):343—351 (JIANG Yaodong, LU Shiliang. Research on mechanics of roadway floor bulge[J]. Journal of China Coal Society, 1994, 19(4):343—351 (in Chinese))
- [3] 钟祖良, 刘新荣, 王道良, 等. 桃树垭隧道底鼓发生机理与防治技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(3):471—476 (ZHONG Zuliang, LIU Xinrong, WANG Daoliang, et al. Mechanism analysis of floor heave in Taoshuya tunnel and its prevention techniques[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(3):471—476 (in Chinese))
- [4] 孙利辉, 杨本生, 孙春东, 等. 深部软岩巷道底鼓机理与治理试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2):235—242 (SUN Lihui, YANG Bensheng, SUN Chundong, et al. Experimental research on mechanism and controlling of floor heave in deep soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2):235—242 (in Chinese))
- [5] 初明祥, 王清标, 夏均民. 采空侧巷道底鼓形成机制与防治技术研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2):413—417 (CHU Mingxiang, WANG Qingbiao, XIA Junmin. Study of formation mechanism of floor heave at goaf side of roadway and prevention technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup. 2):413—417 (in Chinese))
- [6] 兰永伟, 张永吉, 高红梅. 深部开采条件下巷道底鼓机理的研究[J]. 矿业研究与开发, 2005(1):34—36 (LAN Yongwei, ZHANG Yongji, GAO Hongmei. Research on the mechanism of floor heave of roadway in deep mining [J]. Mining Research and Development, 2005(1):34—36 (in Chinese))
- [7] 柏建彪, 李文峰, 王襄禹, 等. 采动巷道底鼓机理与控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1):1—5 (BAI Jianbiao, LI Wenfeng, WANG Xiangyu, et al. Mechanism of floor heave and control technology of roadway induced by mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28(1):1—5 (in Chinese))
- [8] 李学华, 黄志增, 杨宏敏, 等. 高应力硐室底鼓控制的应力转移技术[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(3):296—300 (LI Xuehua, HUANG Zhizeng, YANG Hongmin, et al. Stress transfer technique of controlling chamber's

- floor heave under high mining stress[J]. Journal of University of Mining & Technology, 2006, 35(3):296—300 (in Chinese))
- [9] 王晓卿, 阚甲广, 焦建康. 高应力软岩巷道底鼓机理及控制实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(2):214—220, 227 (WANG Xiaoqing, KAN Jiaguang, JIAO Jiankang. Mechanism of floor heave in the roadway with high stress and soft rock and its control practice[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(2):214—220, 227 (in Chinese))
- [10] 张辉, 程利兴, 常建超. 巷道底板锚索孔钻进粉渣运移特征及现场试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(5):765—770 (ZHANG Hui, CHENG Lixing, CHANG Jianchao. Study on migration characteristic of boring mud in roadway floor anchor wire hole and its field test[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2015, 32(5):765—770 (in Chinese))
- [11] 张辉, 程利兴, 常建超. 煤矿巷道底板锚索孔反循环钻进试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(8):55—59 (ZHANG Hui, CHENG Lixing, CHANG Jianchao. Experiment study on reverse circulation drilling of anchor borehole in floor of mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(8):55—59 (in Chinese))
- [12] 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, 2014, 39(03):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, 2014, 39(3):430—435 (in Chinese))
- [13] 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, 23 (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 Science and Technology, 2013, 41(4):16—19, 23 (in Chinese))
- [14] 冯友良, 鞠文君, 焦建康, 等. 巷道底板锚固孔钻进泵吸反循环排渣数值试验[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(1):32—38 (FENG Youliang, JU Wenjun, JIAO Jiankang, et al. Study on pump suction reverse circulation deslagging in drilling roadway floor anchoring boreholes through numerical experiments[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, 34(1):32—38 (in Chinese))
- [15] 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 deslagging in roadway floor anchoring boreholes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5):761—765 (in Chinese))
- [16] 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 (in Chinese))
- [17] 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 (in Chinese))
- [18] 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 (in Chinese))
- [19] 姚向荣, 石必明, 夏抗生. 深井遇软结构煤层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 (in Chinese))
- [20] 陈奇. 深海采矿矿浆泵内固液两相流数值模拟及性能预测研究[D]. 湖南:中南大学, 2014:8—9 (CHEN Qi. Numerical simulation on solid-liquid two-phase flow and performance prediction of slurry pump for deep-sea mining [D]. Hunan: Central South University, 2014:8—9 (in Chinese))

Study of the mechanism of strong slag discharge in deep hole drilling of small-bore anchoring hole in roadway floor

ZHANG Hui^{1, 2, 3}, LI Guo-sheng¹, JIANG Shuai-qi¹

(1. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. Coal Mining and Design Branch, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 3. Coal Production Safety Collaborative Innovation Center in Henan Province, Jiaozuo 454000, Henan, China)

Abstract: In order to solve the difficult problem of anchor hole drilling in roadway floor of coal mine, this paper puts forward that high-pressure water flow positive circulation drilling can effectively avoid the formation of "three areas of drilling slag", and develops a set of strong slag discharge system for anchoring deep hole in roadway floor. By using solid-liquid two-phase coupled fluid dynamics theory, the relation expressions among the flushing fluid pressure, drilling slag particle radius, drilling slag concentration, drilling depth were deduced. At the same time, computational formula of the drilling depth, drilling slag upward return velocity and flushing fluid pressure were also derived. Results show that with the increase of the drilling slag concentration and the increase of the radius of the drilling slag, the frequency and intensity of energy consumption increase, and the pressure of flushing fluid also increases. The pressure of flushing fluid increases with the increase of drilling depth. When the drilling depth is 8m, the pressure of flushing fluid is required to be greater than 1.9MPa. In addition, decreasing the propulsion speed of drilling rig and increasing the drilling speed are the key to ensure the strong slag discharge in anchorage hole drilling.

Keywords: floor anchoring hole; strong slag discharge; hydraulic loss; washing fluid pressure