

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.09.016

# 瓦斯抽采钻孔堵塞段力学模型及其应用

王永龙, 宋维宾, 孙玉宁, 翟新献, 王振锋

(河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**建立瓦斯抽采钻孔堵塞段力学模型, 基于施工地点的供风压力极值  $p_{\max}$ , 求解相应临界堵塞段长度  $L_0$ , 当  $L > L_0$  时, 钻孔将发生堵塞; 研究了钻孔堵塞段退钻阻力的计算方法, 分析了堵塞段长度和堵塞段内部气体压力对退钻阻力的影响规律。分析结果表明, 在钻孔工程中, 钻孔堵塞段内存在较高的气体压力是造成钻孔发生堵塞、难以退钻的主要原因, 退钻阻力对堵塞段孔内气体压力变化非常敏感, 采取降压退钻是减小退钻阻力的有效方法。应用钻孔堵塞段力学模型, 分析了九里山矿钻孔施工现状, 提出增大排渣空间、降低排渣阻力、提高钻杆强度技术措施, 通过工业性试验, 未出现断钻现象, 钻进效率提高 17%。

**关键词:** 瓦斯抽采; 突出煤层; 供风压力; 钻孔堵塞; 退钻阻力

**中图分类号:** TD713.32

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-582X(2014)09-119-09

## Clogging mechanical model and its application in gas extraction borehole

WANG Yonglong, SONG Weibin, SUN Yuning, ZHAI Xinxian, WANG Zhenfeng

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract:** A clogging segment mechanical model is established on gas extraction horizontal borehole. Based on the air pressure extremes  $p_{\max}$  of the construction site, we solve the corresponding critical clogging length  $L_0$  and find clogging will occur when  $L > L_0$ . With the clogging segment mechanical model, we analyze the calculation method of the retreat drilling rod resistance in borehole. The influence rule of clogging length and air supplying system pressure on retreat drilling rod resistance is analyzed. Analysis results show that the main reason for difficult drilling clogging and retreat drilling rod is the higher pressure in borehole clogging segment. The retreat drilling rod resistance is especially sensitive to the change of air supplying system; therefore, the effective method of reducing the retreat drilling rod resistance is reducing the air supplying system pressure in borehole. The drilling construction status in Jiulishan coal mine is analyzed by using the clogging segment mechanical model, and three technical measures are put forward, including increasing slagging space, reducing slagging resistance and increasing drilling rod strength. When the improving measures are adopted, the pipe-sticking phenomena decreases, the drilling rod broken phenomenon are averted and the drilling efficiency increases by 17%.

**Key words:** gas drainage; outburst coal seam; air pressure; drilling clogging; retreat drilling rod drag

针对煤与瓦斯突出矿井安全开采, 中国政府明确要求“先抽后采”和“抽采达标”, 充分表明了瓦斯抽采的重要性。由于中国煤层地质条件复杂多变, 安全高效的地面井预抽煤层瓦斯受煤层地质条件和投资成本限

**收稿日期:** 2014-07-15

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目(2013BAA03B02); 河南理工大学博士基金资助项目(B2014-053)。

**作者简介:** 王永龙(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事矿井瓦斯防治、矿山与岩层控制等方面的教学与研究工作, (E-mail)wwyylong@126.com。

制,仅少数矿区适用,因此,在今后很长时间内,井工瓦斯抽采仍然是瓦斯治理的主要手段<sup>[1-4]</sup>。预抽煤层瓦斯以施工钻孔为前提,对于煤与瓦斯突出矿井,钻孔施工量大,许多矿井吨煤钻孔量大于 0.1 m/t,每产  $1 \times 10^6$  t 煤需施工钻孔量超过  $1 \times 10^5$  m。

煤与瓦斯突出矿井煤层以构造煤、软煤和软硬复合煤居多,受地应力、瓦斯压力、构造应力等因素影响,钻进过程中,“喷孔”、“煤炮”和“吸钻”等动力现象频发,孔壁易失稳破坏形成“钻穴”<sup>[5-6]</sup>,钻孔孔壁破坏位置易形成大量煤渣对钻杆的包裹,极易发生卡钻、丢钻、甚至断钻等现象,致使钻进工作无法进行,影响钻孔施工深度、钻进效率和钻孔成孔率<sup>[7-9]</sup>。

对于复杂条件煤层钻进技术,科研人员从不同的角度进行了大量的研究。林府进等<sup>[10]</sup>在淮南潘一矿做松软、突出煤层成孔试验时,采取提高排渣风压、控制钻孔倾角及适速钻进等技术措施,使成孔深度有所提高。殷新胜等<sup>[11]</sup>提出将中风压空气钻进的钻探工艺,应用到松软突出煤层瓦斯抽放孔的施工,取得了一定的钻进效果。Gentzis Thomas 等<sup>[12]</sup>对钻孔的开挖进行了数值分析,详尽分析了钻孔孔壁应力变化情况。Karacan C Ö 等<sup>[13]</sup>对本煤层实施钻孔瓦斯抽放,对煤层瓦斯的散逸率进行数值分析,抽放一段时间后,散逸率明显降低,技术人员根据散逸率情况评估煤层可采性;林柏泉等<sup>[14]</sup>应用双动力螺旋切槽钻进方式进行了试验,煤体卸压增透效果明显。

对于以风力排渣方式的钻进工艺,当钻孔收缩严重或局部失稳形成钻穴时,钻屑运移阻力增大,容易堆积并形成堵塞段,而风流能否及时将堵塞段疏通决定着钻孔能否继续进行。因此,应用粉体力学理论,建立堵塞段力学模型,研究堵塞位置对钻杆形成的轴向摩擦阻力大小,研究结果对于钻孔施工方案设计和钻机选型具有一定的指导意义。

## 1 钻孔堵塞段力学模型

### 1.1 钻屑堆积堵塞段形成原因

钻进过程中,钻孔排渣空间缩小、孔内排渣风压不稳、大块煤体阻挡以及煤体含水形成钻屑粘结等众多因素,都会造成孔内钻屑堆积,如未能及时处理、疏通,都会形成钻孔堵塞,图 1 为钻孔形成堵塞段  $L$ <sup>[15]</sup>。可见,钻孔施工过程中,无论何种原因形成孔内局部堵塞,都会造成钻屑无法排出,并在孔内继续堆积,伴随堵塞段长度的增长,堵塞段位置形成的摩擦阻力呈增大趋势,当该阻力大于风压系统的上限  $p_{\max}$  时,将造成钻孔完全堵塞,钻孔施工将被迫终止。

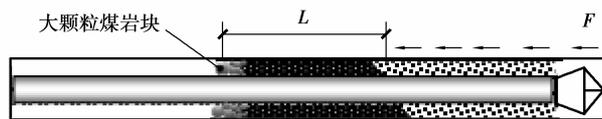


图 1 钻孔形成堵塞段

### 1.2 钻屑颗粒堆积堵塞段力学模型

由于中国很多矿区的瓦斯抽采钻孔多设计为近水平孔或一定角度的仰孔,对于水平钻孔,钻杆上方煤体重力作用于杆体,此时钻孔周围煤体重力因素形成的摩擦阻力达到最大,因此,笔者以水平孔为例,建立相应力学模型,如图 2 所示,为水平孔钻孔堵塞段力学模型。

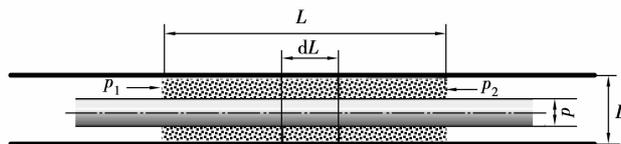


图 2 水平孔钻孔堵塞段力学模型

根据钻孔堵塞段的受力情况,假设形成的钻孔为标准的圆形,钻杆轴线始终与钻孔轴线重合,不考虑钻杆弯曲或扰动。基于上述条件,应用粉体力学理论,在孔内风压  $p_1$  作用下,堵塞段区域形成侧压力。因此,需要建立的方程包括重力引起摩擦阻力和堵塞段断面上侧压引起的摩擦阻力<sup>[16]</sup>。

### 1.2.1 重力引起摩擦阻力

重力引起摩擦力主要包括 2 部分,如图 3 所示,虚线所含部分重力作用于钻杆表面形成摩擦力,钻孔其他部分煤体重力作用于钻孔壁形成摩擦力。

设钻孔段长度微元  $dL$ ,因重力引起摩擦阻力  $F_1$ ,基于堵塞段力学模型,重力引起摩擦阻力  $F_1$  可统一表达为

$$F_1 = \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2) dL, \quad (1)$$

式中: $S_r$  为钻杆周围煤体圆环面积; $S_d$  为钻杆上方虚线所围面积; $L$  为堵塞段的长度; $\rho_b$  为堵塞处煤堆积密度; $f_1$  为堵塞段煤与钻杆表面的摩擦因数; $f_2$  为堵塞段煤与孔壁的摩擦因数。

### 1.2.2 侧压引起摩擦阻力

如图 3 所示,堵塞段形成后,在钻孔内轴向风压  $p_1$  作用下,在堵塞区域堵塞段与钻杆接触面  $C_1$ 、堵塞段与钻孔壁接触面  $C_2$  两个接触面上形成侧压力。侧压引起摩擦阻力  $F_2$ ,

$$F_2 = (f_1 d + f_2 D) k p \pi d L, \quad (2)$$

式中: $p$  为堵塞段钻孔内轴向气体压力; $k$  为侧压系数。

### 1.2.3 堵塞段力学方程

根据堵塞段的受力情况,以堵塞段的煤体为研究对象,基于式(1)、(2),建立如下方程,

$$S_r dp = F_1 + F_2, \quad (3)$$

即

$$S_r dp = \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2) dL + (f_1 d + f_2 D) k p \pi d L. \quad (4)$$

由式(4)可得:

$$dL = \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k p \pi + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)} dp, \quad (5)$$

两边积分

$$\int_0^L 1 dL = \int_0^L \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k p \pi + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)} dp. \quad (6)$$

在同一地点施工钻孔时,当应用的钻机、钻杆及钻头装备确定以后,钻孔直径  $D$ 、钻杆直径  $d$  为已知常数、而煤的堆积密度  $\rho_b$ 、侧压系数  $k$  可测试得到。因此,当  $L=0$  时,  $p=p_2$ ,堵塞段长度增大到  $L$  时,  $p=p_1$ ,可得:

$$L = \int_{p_2}^{p_1} \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k p \pi + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)} dp, \quad (7)$$

整理得:

$$L = \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k \pi} \ln \frac{(f_1 d + f_2 D) k \pi p_1 + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}{(f_1 d + f_2 D) k \pi p_2 + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}. \quad (8)$$

当钻孔发生堵塞时,堵塞段钻孔外部的的气体压力  $p_2$  与大气压力相同,本计算以大气压力为参考压力,因此,在计算中,可取  $p_2=0$ ,  $p_1$  取钻孔内部排渣风力形成的表压力  $p$ ,因此,可得:

$$L = \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k \pi} \ln \frac{(f_1 d + f_2 D) k \pi p + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}{\rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}. \quad (9)$$

基于式(9)可求得钻孔疏通压力  $p$  的表达式:

$$p = \left[ e^{\frac{(f_1 d + f_2 D) k \pi L}{S_r}} - 1 \right] \frac{\rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}{(f_1 d + f_2 D) k \pi}. \quad (10)$$

### 1.2.4 临界堵塞段长度

伴随堵塞段  $L$  长度的增长,孔内相应疏通压力呈增长趋势,当孔内疏通压力达到了井下风管供风能力的极限值  $p_{\max}$  时,可求解该条件下钻孔临界堵塞段长度  $L_0$ ,当堵塞段长度继续增长时,即  $L > L_0$  时钻孔将无法疏通。基于式(9)可求解临界堵塞段长度  $L_0$ :

$$L_0 = \frac{S_r}{(f_1 d + f_2 D) k \pi} \ln \frac{(f_1 d + f_2 D) k \pi p_{\max} + \rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}{\rho_b g(S_d f_1 + (S_r - S_d) f_2)}. \quad (11)$$

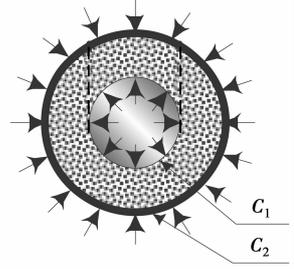


图3 堵塞段断面受力示意图

## 2 钻孔堵塞段力学模型动态分析

### 2.1 基本参数设置

#### 2.1.1 侧压系数 $k$ 的选择

当钻孔发生堵塞时,由于风压对堵塞段的轴向压力作用而形成的对钻孔壁的径向压力,径向压力与轴向压力的比值称为侧压系数,侧压系数  $k$  源于粉体力学理论,根据解本铭等<sup>[17]</sup>通过实验发现应用兰金系数计算散体的侧压系数理论值小于实际值的规律,对兰金系数进行修正:

$$k = 1.1(1 - \sin \varphi). \quad (12)$$

根据煤的类型及煤颗粒度的不同,煤散体内摩擦角一般为  $25^\circ \sim 35^\circ$  基于上述关于侧压系数计算的分析,在  $25^\circ \sim 40^\circ$  该范围内。对于钻孔堵塞段力学模型分析,侧压系数选择  $0.4 \sim 0.7$  范围内进行分析。

#### 2.1.2 煤堆积密度 $\rho_b$ 取值

钻屑在孔内堆积形成堵塞段,其密度为煤的堆积密度,而对于不同类型的煤,煤的堆积密度差别较大,无烟煤为  $0.7 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,烟煤为  $0.8 \sim 1.0 \text{ g/cm}^3$ ,褐煤为  $0.6 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ ,而泥煤仅为  $0.29 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ ,当考虑孔内发生堵塞时,钻屑堆积、压实,煤的堆积密度会有所增长,但一般不会超过煤的捣固密度,而煤的捣固密度一般可达到  $0.9 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ ,因此,综合考虑不同类型的煤,这里计算煤的堆积密度  $\rho_b$  在  $0.6 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$  范围内取值。

### 2.2 疏通压力 $p$ 与堵塞段长度 $L$ 关系

施工现场应用  $\phi 73 \text{ mm}$  圆钻杆钻进时,多采用  $\phi 113 \text{ mm}$  复合片钻头和  $\phi 120 \text{ mm}$  三翼合金钻头,实际成孔直径与理论计算存在一定的差异,钻孔直径并非恒定值,距离孔口不同位置,钻孔的直径也有所差异,一般形成的钻孔直径  $D = 100 \sim 130 \text{ mm}$  范围不等。根据钻孔堵塞段力学模型,设钻孔直径沿轴向是恒定的,忽略钻杆的扰动作用影响,取  $D = 120 \text{ mm}$ ,取堵塞段煤与圆钻杆表面之间的摩擦因数  $f_1 = 0.1$ ,堵塞段煤颗粒与孔壁的摩擦因数  $f_2 = 0.3$ ,侧压系数取  $k = 0.5$ ,煤的堆积密度取  $\rho_b = 800 \text{ kg/m}^3$ 。将参数代入式得:

$$p = 178(e^{9.55L} - 1). \quad (13)$$

基于方程,拟合疏通压力  $p$  与堵塞段长度  $L$  关系,如图 4 所示为疏通压力  $p$  与堵塞段长度  $L$  关系。

设曲线上方为 A 区,曲线下方为 B 区,基于图 4,分析如下:

1) 施工工况位于曲线上时。在曲线上的点,表明该点所对应的压力  $p$  与堵塞段长度  $L$  处于临界状态,该状态下,分为 3 种不同情况进行分析,第一,当供风系统风压能够继续提高,堵塞段会被疏通,保障钻孔排渣顺畅;第二,当风压能够继续提高,前方钻头处于破煤钻进工况,有大量钻屑产生,并不断补充堵塞段长度,此时堵塞段长度不断加大,如图 4 曲线所示,风压也会伴生增大,但当堵塞段不断被压实后,需要疏通的风压成倍增长,而现场供风装置能够提供的风压有限,包括采用移动空压机,一般不超过  $1.5 \text{ MPa}$ ,因此,在该情况下,当堵塞段长度达到一定长度时,钻孔无法疏通,钻进难以进行;第三,当风压不能继续提高,即风压难以达到堵塞段所需要的疏通压力时,钻孔发生堵塞。

2) 施工工况位于 A 区时。施工工况位于 A 区时,在相应曲线的上方区域点, A 区内点的位置表明,该施工过程中,钻孔可能发生堵塞段的长度,小于该位置的疏通压力,即钻孔内无法形成累积长度,排渣保持顺畅,此种情况为正常钻进时的良好排渣状态,如施工过程中,保持该工况,有利于形成较深钻孔。

3) 施工工况位于 B 区时。施工工况位于 B 区时,在相应曲线的下方区域点,表明该施工过程中,钻孔已经发生堵塞,当工况位于该区域某一点时,当钻孔堵塞段不再增长时,即对应横坐标的值不变,需提高风压,只有风压值超过了对应曲线位置时,堵塞段才会被疏通。

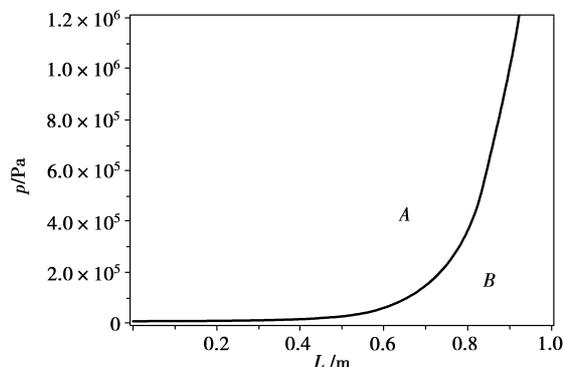


图 4 钻孔疏通压力与堵塞段长度关系曲线

### 3 钻孔堵塞段力学模型应用

#### 3.1 钻孔堵塞段退钻阻力力学模型

当孔内形成堵塞段时,钻杆被周围煤体包裹,由于孔内风压及煤体重力作用,当钻杆有退出趋势时,钻杆周围煤体对钻杆形成一定大小的摩擦阻力,笔者称之为“退钻阻力”<sup>[18]</sup>。钻杆能否退出决定于钻机的额定起拔力,钻机的起拔力一般在30~180 kN。松软突出煤层钻进过程中,夹钻现象频繁,通常采取短距离退钻,缓解堵塞区域的夹钻现象,因此,当退钻困难时,其退钻阻力已接近了钻机的最大起拔力。

如图2所示,应用圆钻杆钻进时,当堵塞段 $L$ 形成后,较短的堵塞长度,在钻杆扰动作用下,将堵塞段疏通或产生少许漏气,当堵塞段长度 $L > L_0$ 时,伴随钻头破煤形成的煤渣在堵塞段不断堆积,钻孔堵塞段长度不断增长,堵塞段内部漏气量逐渐减少,此时,钻孔的供风回路形成近似封闭的空间,堵塞段内部空间气体压力将逐渐升高,直到达到供风系统风压上限 $p_{\max}$ 。

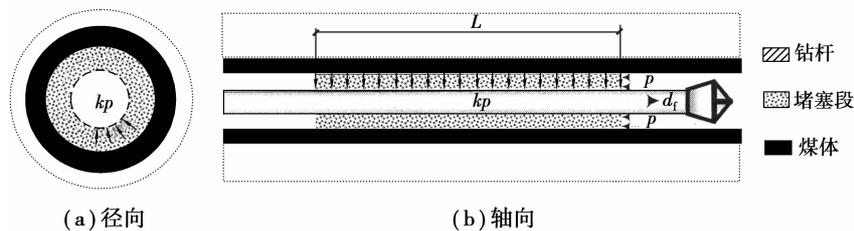


图5 堵塞段退钻阻力力学模型

如图5所示,为堵塞段退钻阻力力学模型,退钻阻力 $d_f$ 的求解方法如下。

1) 孔内堵塞段钻屑重力作用形成的摩擦阻力,基于式(1)可得:

$$d_{f_1} = \rho_b g S_d f_1 L. \quad (14)$$

2) 钻杆与钻孔底部的摩擦阻力,设孔内钻杆外表面上有1/4面积与孔底接触,钻杆每米质量为 $m$ ,孔内钻杆长度为 $l$ ,则钻杆重力作用与钻孔底部的摩擦阻力

$$d_{f_2} = \frac{1}{4} \pi d m g l^2 f_1. \quad (15)$$

3) 堵塞段孔内压力 $p$ 作用在堵塞段与钻杆接触面侧压形成的摩擦阻力

$$d_{f_3} = f_1 d k p \pi L. \quad (16)$$

结合式(14)、(15)、(16),退钻阻力求解方程为:

$$d_f = \rho_b g S_d f_1 L + \frac{1}{4} \pi d m g l^2 f_1 + f_1 d k p \pi L. \quad (17)$$

#### 3.2 钻孔堵塞段退钻阻力定性分析

##### 3.2.1 堵塞段长度 $L$ 对退钻阻力 $d_f$ 的影响

设钻孔直径沿轴向是恒定的,取钻孔直径 $D=120$  mm,钻杆直径 $d=73$  mm,壁厚7.5 mm,钻杆质量12.11 kg/m,开始退钻时孔内钻杆长度为60 m,堵塞段煤与钻杆表面的摩擦因数 $f_1=0.1$ ,堵塞段煤颗粒与孔壁的摩擦因数 $f_2=0.3$ ,侧压系数取 $k=0.5$ ,煤的堆积密度 $\rho_b=800$  kg/m<sup>3</sup>。当孔内堵塞趋于严重,孔内风压 $p$ 将迅速上涨到供风系统极限值 $p_{\max}$ ,此时 $p_{\max}=0.8$  MPa,将基本参数代入式可得:

$$d_f = 9\,171L + 2\,448. \quad (18)$$

基于式(18)拟合堵塞段长度 $L$ 与退钻阻力 $d_f$ 关系如图6所示。伴随堵塞段长度的增长,当堵塞段长度 $L > L_0$ 时,堵塞段内部压力达到供风系统压力上限 $p_{\max}$ 时,其退钻阻力增长迅速,同时受风流携渣等因素的影响,孔内堵塞段有增长的趋势,会造成退钻阻力的持续增大。例如,当孔内堵塞长度达到10 m时,退钻阻力达到了94.2 kN,当应用ZDY4000S钻机时,钻机最大起拔力 $F_c=150$  kN,钻杆能够正常退出;当应用ZDY3200S钻机时,钻机最大起拔力 $F_c=77$  kN,钻杆将难以退出。

通过上述分析,钻机的起拔力与退钻阻力存在着密切的关系,钻机生产厂家将钻机的起拔力设定较高的值,可见,在设计时已经考虑了施工过程中孔内可能会形成较大的退钻阻力,但退钻阻力的判断缺乏理论依

据;基于本文的相关力学模型,结合施工地点钻孔工艺设计参数,可定性求解可能出现的退钻阻力范围,基于计算结果不仅可以作为钻机厂家指导钻机设计的参考数据,同时还能够为矿方钻机选型提供依据。

### 3.2.2 堵塞段内部供风压力 $p$ 对退钻阻力 $d_f$ 的影响

堵塞段形成后,堵塞段内部压力会迅速达到供风系统压力上限  $p_{\max}$ ,由于风压对堵塞段作用,在堵塞段形成较大侧压,因此,有必要分析堵塞段内气体压力  $p$  降低时对退钻阻力的影响。设孔内堵塞段长度为 5 m,其他参数与上述分析设置相同,代入式得:

$$d_f = 2\,460 + 0.0573p. \quad (19)$$

基于式(19)拟合退钻阻力  $d_f$  与堵塞段内部供风压力  $p$  关系,如图 7 所示。

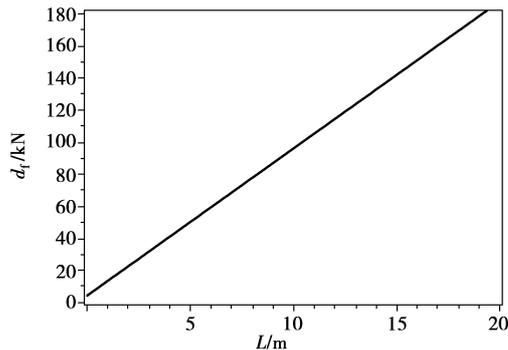


图 6 退钻阻力与堵塞段长度关系曲线

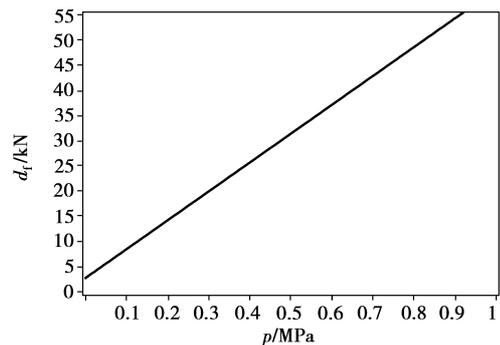


图 7 退钻阻力与堵塞段内部供风压力关系曲线

结合图 7,进行如下分析:

1) 伴随堵塞段内部压力  $p$  的增大,退钻阻力增长迅速,对于 5 m 长度的堵塞段,当堵塞段内气体压力为 0 时,不考虑钻头形成的摩擦阻力,应用圆钻杆时,退钻阻力仅为 2.46 kN。

2) 在实际工程中,当堵塞段无法疏通时,使用圆钻杆时,漏气量少,堵塞段内部风压往往与供风系统压力上限  $p_{\max}$  接近,如图 7 所示,最大退钻阻力达到 48.3 kN。

3) 当使用带有螺旋棱边或棱状类钻杆,钻杆表面附近漏气量较大,堵塞段内部风压处于  $0 \sim p_{\max}$  范围内,但由于钻杆外形的改变将造成其摩擦系数  $f_1$  增大,例如,当应用低螺旋钻杆时,在堵塞区域退钻时,由于在堵塞区域钻屑充满了螺旋槽空间,因此,其摩擦系数增大很多,取  $f_1 = 0.25$  时,应用式(17)计算,理论上退钻阻力为 6.1~121 kN 范围,但该类型在退钻过程中,漏气量大,堵塞段内部压力较低,其退钻阻力会降低很多。

4) 通过上述分析,退钻阻力对堵塞段内部的压力非常敏感,因此,对于风力排渣的钻进工艺,当出现退钻困难时,应采取加速旋转增加扰动,关闭供风控制阀,打开钻尾供风器,释放钻孔内风压后,再进行退钻操作,避免压风退钻或强行退钻,否则在堵塞区域形成干摩擦,易造成孔内瓦斯燃烧、CO 中毒及钻杆拉断等孔内事故。

## 4 工程应用分析

### 4.1 钻孔施工现状

施工地点为焦煤九里山矿 15051 工作面,埋深平均 400 m,煤层厚度 1.5~6.3 m,平均 4.5 m。瓦斯含量 20.05 m<sup>3</sup>/t,瓦斯压力 1.6 MPa,九里山矿当前钻孔施工存在如下问题:

1) 该施工地段煤体水分较大,钻头破煤后形成的渣体黏着在一起,成团状,施工地段瓦斯压力为 1.6 MPa,煤体酥软,钻孔变形、破坏严重。矿方采用低螺旋钻杆施工,低螺旋钻杆表面焊接成型的钢带宽而低,螺旋槽之间,很容易被黏着的煤渣覆盖,失去输送煤渣的作用,同时也加重了钻杆的整体质量,因此,该地段采用低螺旋钻杆,施工效果较差。

2) 低螺旋钻杆表面的钢带凸棱,采取焊接工艺,钢带与杆体之间存在受力弱面,在施工过程,钢带有脱离现象,钻杆旋转阻力明显增大,严重影响钻进施工,整体表现钻机动力损耗大、处理事故耗时长,工人劳动强度大、钻进效率较低。

## 4.2 钻孔退钻阻力分析

当前矿方钻机应用 ZDY4000S 钻机,  $\phi 73$  mm 低螺旋钻杆, 钻机最大起拔力  $F_c = 150$  kN, 钻头应用  $\phi 89$  mm 复合片钻头, 供风系统的风压极限  $p_{\max} = 0.7$  MPa。在钻杆扰动作用下, 钻孔直径有增大趋势, 但受地应力、瓦斯压力等因素影响, 同时钻孔有收缩的趋势, 综合考虑假设钻孔平均直径为  $D = 89$  mm, 煤与钻杆表面的摩擦系数取  $f_1 = 0.25$ , 孔内裂隙发育, 破碎带分布面积较大, 同时煤体含水一定程度降低了堵塞段煤与孔壁之间的摩擦系数, 综合考虑, 摩擦系数取  $f_2 = 0.4$ , 侧压系数取  $k = 0.5$ , 煤极为松软, 煤的堆积密度  $\rho_b = 800$  kg/m<sup>3</sup>, 基于现场施工参数进行如下计算。

1) 临界堵塞段长度  $L_0$ 。基于式(11)可求解钻孔发生堵塞的临界堵塞段长度  $L_0 = 0.31$  m, 当孔内堵塞段长度  $L > 0.31$  m 时, 钻孔将难以疏通。当钻孔发生堵塞时, 孔口不出风、不出渣, 因此, 通常旋转退钻, 在钻杆扰动、风压作用下, 较短的堵塞段一般能够疏通, 但处理不当时, 会造成钻孔堵塞段快速增长, 出现无法疏通的孔内堵塞。

2) 退钻阻力分析。设  $p_{\max} = 0.7$  MPa, 孔内钻杆长度为 40 m, 将基本参数代入式(17)可得:

$$d_f = 20\ 058L + 2\ 720. \quad (20)$$

基于式(20)拟合堵塞段长度  $L$  与退钻阻力  $d_f$  关系如图 8 所示。

当  $d_f = 150$  kN 时, 基于式(20)可计算相应堵塞段长度为  $L = 7.3$  m, 当  $L > 7.3$  m 时, 钻杆将难以退出, 如图 8 中  $A_1$  点为钻机达到最大起拔力时临界点。基于计算结果, 当钻杆无法后退时, 可评估孔内可能形成的堵塞段长度可能已经超过了 7.3 m, 可见, 当施工地点煤层地质条件差, 孔内变形、破坏严重, 孔内钻屑易堆积致使钻孔堵塞, 孔内发生钻杆无法退出事故的概率较高。

## 4.3 钻孔工艺案改进措施

基于上述分析, 改善钻孔施工现状从以下三个方面着手。

1) 增大排渣空间。在钻杆外径不变条件下, 增大排渣空间最简单的方式是增大钻头直径, 但过大的钻头直径不仅会给钻机带来过大动力损耗, 同时也会导致钻头破煤量增大, 钻孔发生堵塞的概率也有所增加。综合考虑, 选用  $\phi 94$  mm 复合片钻头增大排渣空间, 基于式(11), 增大钻孔直径  $D$ , 可提高临界堵塞段长度  $L_0$ , 钻孔发生堵塞的概率降低。

2) 降低排渣阻力。将螺旋凸棱设计成光滑圆弧状, 堵塞段煤与钻杆表面的摩擦系数  $f_1$  降低, 相比低螺旋钻杆, 基于式(17)可知,  $f_1$  减小其退钻阻力也会相应降低, 有利于钻杆退出。

3) 提高钻杆强度。应用等离子熔涂技术, 将硬质合金粉末熔涂在圆钻杆表面形成熔涂螺旋钻杆, 硬质合金粉末形成的凸棱与杆体熔为一体, 钻杆强度得到提高。如图 9 所示为熔涂螺旋钻杆外形结构图。

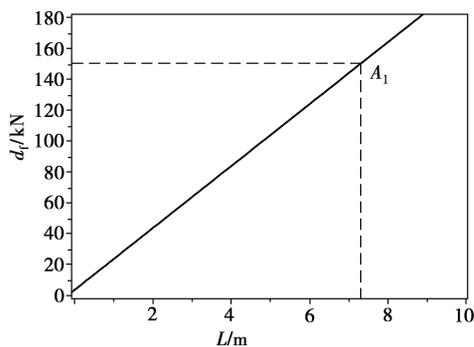


图 8 退钻阻力与堵塞段长度关系曲线



图 9 熔涂螺旋钻杆

## 4.4 钻孔施工工业性试验

综上, 应用相应改进方案, 工业性试验情况如下:

1) 应用低螺旋钻杆, 累计钻进时间 13 d 施工钻孔 31 个, 累计进尺 1 927 m, 单孔平均深度 62 m, 平均每天进尺 148 m; 采用熔涂螺旋钻杆, 累计钻进时间 12 d, 施工钻孔 33 个, 累计进尺 2 080 m, 平均深度 63 m, 除见矸钻孔外, 均能够达到设计深度 65 m, 平均每天进尺 173 m, 熔涂螺旋钻杆较矿方现行打钻, 钻进效率提高 17%。

2)应用熔涂螺旋钻杆,表面为圆弧状凸棱,阻力小,煤渣不易附着,钻进深度基本都能够达到设计深度。由于两种钻杆的排渣原理相同,且钻孔设计深度较小,两种钻杆平均钻进深度差别不大。

3)熔涂螺旋钻杆表面的凸棱是将硬质合金粉末熔涂在钻杆表面形成的,故强度高,不易脱离,遇矸石具有较好的穿矸能力,熔涂螺旋钻杆可用于穿层钻孔,扩展了该钻杆的使用范围。

4)通过钻进施工工艺的改进,应用熔涂螺旋钻杆施工,卡钻现象明显降低,未出现断钻现象,钻孔直径的加大、钻杆外形结构的改进,使孔内排渣空间增大,排渣更为顺畅。因此,改进后的施工钻孔工艺,避免花费大量时间处理卡钻问题,降低了工人劳动强度,间接提高了钻进效率。

## 5 结 论

1)以风力排渣的钻进工艺方式,因钻孔收缩严重或局部失稳形成钻穴区,在该区域,钻头破煤形成的钻屑运移堆积并形成一定长度堵塞段是造成松软突出煤层钻进困难的本质原因。堵塞段的形成,使钻头破煤形成的钻屑无法排出,且在堵塞区域继续堆积,堵塞段的生长,使钻进被迫停止。

2)基于粉体力学理论,建立水平钻孔堵塞段力学模型,分析了堵塞段长度  $L$  与相应疏通压力  $p$  之间的关系方程。基于施工地点的供风压力极值  $p_{\max}$ ,结合钻孔工艺设计参数,可求解施工地点临界堵塞段长度  $L_0$ ,当  $L > L_0$  时,钻孔将发生堵塞。

3)研究了退钻阻力计算方法,结合施工地点钻孔工艺设计参数,可定性求解可能出现的退钻阻力范围,基于计算结果可以作为钻机厂家指导钻机设计的参考数据;退钻阻力对堵塞段内部的压力非常敏感,由于孔壁侧压作用,使退钻阻力快速增长。基于工程实际,松软突出煤层钻进过程中钻杆无法退出现象多为堵塞段内部存在较高气体压力,孔内存在压力是造成钻孔发生堵塞趋于严重、难以退钻的主要原因。因此,当出现退钻困难时,应采取降压退钻技术措施,即关闭供风控制阀,打开钻尾供风器,释放钻孔内风压后退钻。

4)针对九里山矿瓦斯抽采钻孔施工现状,基于钻孔堵塞段力学模型,应用退钻阻力求解方法,分析了堵塞段长度  $L$  与退钻阻力的关系曲线,提出增大排渣空间、降低排渣阻力、提高钻杆强度技术措施,应用熔涂螺旋钻杆进行施工,通过工业性试验,除见矸钻孔,均能达到设计深度,卡钻现象降低,未出现断钻现象,降低了工人劳动强度,钻进效率提高 17%。

### 参考文献:

- [1] 袁亮,郭华,李平,等.大直径地面钻井采空区采动区瓦斯抽采理论与技术[J].煤炭学报,2013,38(1):1-8.  
YUAN Liang, GUO Hua, LI Ping, et al. Theory and technology of goaf gas drainage with large-diameter surface boreholes[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(1): 1-8.
- [2] Wang Haifeng, Cheng Yuanping, Wang Lei. Regional gas drainage techniques in Chinese coal mines[J]. International Journal of Mining Science and Techno, 2012(6): 873-878.
- [3] 孙海涛,郑颖人,郭盛强,等.地面井层面拉剪破坏模型及极限分析判识方法[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):31-38.  
SUN Haitao, ZHENG Yingren, GUO Chengjiang, et al. A surface borehole interface model and the limit analysis estimation method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(1): 31-38.
- [4] Han J Z, Sang S X, Cheng Z Z, et al. Exploitation technology of pressure relief coalbed methane in vertical surface wells in the Huainan coal mining area[J]. Mining Science and Technology, 2009(1): 25-30.
- [5] 孙玉宁,王永龙,翟新献,等.松软突出煤层钻进困难的原因分析[J].煤炭学报,2012,37(1):117-121.  
SUN Yuning, WANG Yonglong, ZHAI Xinxian, et al. Analysis on reasons of drilling difficulty in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 117-121.
- [6] 王永龙,翟新献,孙玉宁.刻槽钻杆应用于突出煤层钻进的合理参数研究[J].煤炭学报,2011,36(2):304-307.  
WANG Yonglong, ZHAI Xinxian, SUN Yuning. Reasonable parameters study on grooved drill pipe used in drilling outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 304-307.
- [7] 王永龙,孙玉宁,翟新献,等.松软突出煤层新型钻进技术研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):289-294.  
WANG Yonglong, SUN Yuning, ZHAI Xinxian, et al. Study on new drilling technology in soft and outburst SEAM[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 289-294.
- [8] 秦长江.顺层钻孔预抽煤层瓦斯区域防突关键技术研究[D].武汉:中国地质大学,2012.
- [9] 林柏泉,李庆钊,杨威,等.基于千米钻机的“三软”煤层瓦斯治理技术及应用[J].煤炭学报,2011(12):1968-1973.

- LIN Baiquan, LI Qingzhao, YANG Wei, et al. Gas control technology and applications for the three- soft coal seam based on VLD-1000 drilling systems[J]. Journal of China Coal Society, 2011(12): 1968-1973.
- [10] 林府进,徐贵发,董钢锋. 松软突出煤层顺层长钻孔成孔技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2006(2):10-11, 14, 8.  
LIN Fujin, XU Guifa, DONG Gangfeng. Study on hole formation technique of long Holes along Loose outburst seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2006(2): 10-11, 14, 8.
- [11] 殷新胜,凡东,姚克,等. 松软突出煤层中风压空气钻进工艺及配套装备[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(9):72-74.  
YIN Xinsheng, Fan Dong, Yao Ke, et al. Medium pressure compressed air drilling technique and matched equipment in soft and outburst SEAM[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(9): 72-74.
- [12] Gentzis T, Deisman N, Chalaturnyk R J. A method to predict geomechanical properties and model well stability in horizontal boreholes[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78(2): 149-160.
- [13] Karacan C Ö, Diamond W P, Schatzel S J. Numerical analysis of the influence of in-seam horizontal methane drainage boreholes on longwall face emission rates[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 72(1): 15-32.
- [14] 林柏泉,邹全乐,沈春明,等. 双动力协同钻进高效卸压特性研究及应用[J]. 煤炭学报, 2013(6): 911-917.  
LIN Baiquan, ZOU Quanle, SHEN Chunming, et al. Investigation on highly effective depressurization property of dual-power drilling and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2013(6): 911-917.
- [15] 王永龙,宋维宾,孙玉宁,等. 瓦斯抽采钻孔堵塞段卡钻扭矩力学模型分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(6):92-98.  
WANG Yonglong, SONG Weibin, SUN Yuning, et al. Analysis of pipe-sticking torque mechanical model for gas extraction borehole clogging segment[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 92-98.
- [16] 杨伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [17] 解本铭,朱晨,崔大妍. 料仓压力的理论分析和实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(4):226-227.  
XIE Benming, ZHU Chen, CUI Dayan. Theoretical analysis and experimental study on pressure of silo[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 26(4): 226-227.
- [18] 王永龙. 瓦斯抽采钻孔钻屑运移机理与成孔技术研究[D]. 焦作:河南理工大学,2013.

(编辑 郑洁)