

文章编号: 1673-3363-(2012)02-0289-06

# 松软突出煤层新型钻进技术研究

王永龙, 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** 低螺旋钻杆是为解决松软突出煤层钻进难题而发明的一种新型钻杆。为充分发挥低螺旋钻杆应用于松软煤层钻进的优势, 根据实际应用情况, 建立相应的排渣数值模型, 分析低螺旋钻杆螺旋凸棱的宽度和螺距的变化对排渣效果的影响情况; 根据在实际应用中配套钻机的动力参数, 对低螺旋钻杆进行强度分析。研究表明, 螺旋凸棱宽度  $l$  为 14 mm, 螺距  $s$  为 80 mm, 排渣效果最优, 且钻杆强度的最小安全系数为 1.87, 钻杆加工参数优化设计合理。通过松软突出煤层钻进工业性试验, 钻进深度和钻进效率提高显著。

**关键词** 低螺旋钻杆; 松软突出煤层; 螺旋凸棱; 安全系数; 数值分析

**中图分类号** TD 823.82

**文献标识码** A

## Study on New Drilling Technology in Soft and Outburst Seam

WANG Yong-long, SUN Yu-ning, ZHAI Xin-xian, WANG Zhen-feng

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

**Abstract** Low spiral drill rod is a new type of drill rod, which invented to solve the drilling problems of soft and outburst seam. In order to fully play the advantage when low spiral rod applied to soft coal seam drilling, the paper analysis effect on the slag removal conditions due to low spiral rod in different spiral convex edges width and pitch change according to the practical applications and establish corresponding numerical model of the slag removal. According to the dynamic parameters of the matching drilling rig in engineering application, the strength of low spiral rod has been analyzed. The result of study shows that it is optimum to slag removal result, and the minimum safety factor of drill rod strength for 1.87 with the convex edges width  $l=14$  mm, pitch  $s=80$  mm. It is reasonable to optimization parameter design of machining low spiral drill rod. Depth and efficiency increase significantly showing when drilling industrial experiment carried out.

**Key words** low spiral drill rod; soft and outburst seam; spiral convex edges; safety factor; numerical analysis

对于高瓦斯煤层及煤与瓦斯突出煤层, 根据煤矿安全开采规程, 按照“先抽后采”原则开采。“先抽后采”的目的是消除煤层的突出危险性, 便于安全回采。当前, 煤层瓦斯预抽是煤层消突的主要手段, 而煤层瓦斯预抽以施工煤层钻孔为前提,

钻孔的深度决定着瓦斯抽采的效果, 对于各种煤层施工钻孔, 以松软突出煤层难度最大, 在施工过程中, 钻孔在地应力、瓦斯压力和钻杆扰动力的作用下, 钻孔很容易发生变形, 即在钻孔深部出现塌孔, 形成“钻穴”<sup>[1]</sup>, 伴随着“钻穴”的增多, 钻杆旋

收稿日期: 2011-03-21

作者简介: 王永龙 (1980-), 男, 河北省承德市人, 博士, 从事瓦斯抽采及其关键装备方面的研究。

E-mail: wwylong@126.com

Tel: 0391-3987957

转阻力增大, 极易发生卡钻、丢钻现象, 致使钻进工作无法进行。许多矿区的松软突出煤层只能施工 20 m 左右, 距离设计深度相差较大, 因此致使矿方的抽采工作无法进行, 严重影响煤矿的生产进度, 给矿方造成巨大的经济损失<sup>[2-3]</sup>。

近年来许多科研单位通过对松软突出煤层钻进技术装备及工艺的课题研究和大量的煤矿井下钻进试验, 取得了一些研究成果, 如棱状钻杆的应用<sup>[4]</sup>, 高压风移动空压机的使用, 这些在某些矿区都起到了一定的效果, 使松软煤层的钻进深度有了一定的提高, 但这些工艺都是以增加设备为前提, 增加了钻进工艺的难度, 如, 棱状钻杆需要改进钻机夹持器, 且强度难以控制, 移动空压机增加了钻进成本, 且对于小构造较多的软硬复合煤层效果并不明显<sup>[5-6]</sup>。

本文通过对前期科研成果存在的问题进行分析, 提出了在结构上更加合理的双动力低螺旋钻杆, 增强了钻杆本身的排渣能力, 为充分发挥流体与机械排渣的最佳性能, 采用数值分析的方法, 分析不同参数的螺旋凸棱条的排渣能力, 优化螺旋凸棱的最优参数, 为发挥双动力低螺旋钻杆在松软煤层实现深孔高效安全钻进提供可靠的加工参数。

## 1 新型钻杆的提出

### 1.1 高叶片麻花钻杆的改进

目前, 矿方常用的依靠机械排渣的高叶片麻花钻杆, 通过钻杆的旋转, 叶片螺旋结构对渣体产生的摩擦力带动渣体向外运动, 可称之为机械排渣钻杆。图 1 为以螺旋叶片机械排渣为主的高螺旋叶片钻杆钻进示意图, 这是高瓦斯煤层及煤与瓦斯突出煤层常用的安全钻进方式, 其主要动力来源于钻机, 因此对钻机的动力要求较高。

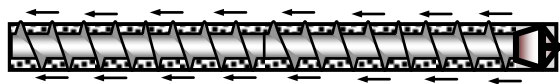


图 1 采用螺旋钻杆钻进机械排渣路线图

Fig.1 Sketch map of mechanical slag removal route application spiral pipe drilling

对于松软煤层, 采用麻花钻杆钻进, 因钻孔容易发生变形, 钻孔内很快形成多塌孔区, 高叶片麻花钻杆的旋转阻力急剧增大, 其机械渣排渣叶片被塌孔形成的“钻穴”封堵, 钻杆很快被煤渣裹紧抱死, 严重会出现“吸钻”、“丢钻杆”等现象; 当

前也有些矿区尝试采用高螺旋叶片钻杆结合风压钻进, 因螺旋叶片较高, 对风的阻力很大, 同时在“塌孔区”, 因风压的作用, 更容易造成煤渣在“塌孔区”迅速聚集, 将钻杆压死, 出现难以退钻或“丢钻”等现象。

### 1.2 扒孔降温钻杆的应用分析

河南理工大学于 2006 年发明了扒孔降温钻杆<sup>[7]</sup>, 其结构如图 2 所示, 应用该钻杆在相关煤矿进行煤层钻进的科研与实践工作, 在钻进深度和钻进效率上取得了非常明显的效果, 因其工艺结构是在壁厚加厚的光面钻杆表面刻制螺旋槽, 发挥钻杆本身的机械排渣功能。通过对刻槽杆体的力学分析, 当槽体过深时, 降低钻杆的整体强度, 同时槽体容易被煤渣填满, 而失去辅助排渣的功能。

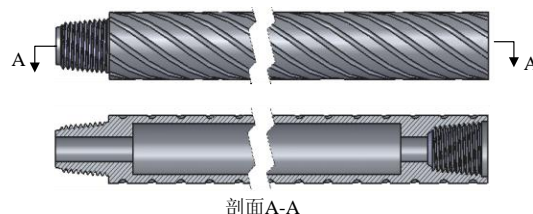


图 2 扒孔降温钻杆

Fig.2 Dredging-cooling drilling rod

扒孔降温钻杆在很多矿区进行了相关工业性试验, 取得了不错的效果, 但对于煤层坚固性系数  $f < 0.3$  的松软煤层, 其钻进深度有所提高, 但提高比例不大。

### 1.3 双动力低螺旋钻杆的提出

通过上述分析和扒孔降温钻杆的工业应用情况, 提出了双动力低螺旋钻杆<sup>[8]</sup>, 即降低高叶片麻花钻杆的叶片高度, 从而降低排渣阻力, 其外形结构如图 3 所示。

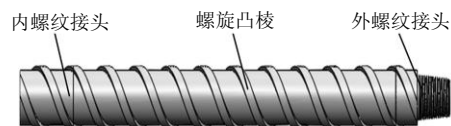


图 3 低螺旋钻杆示意图

Fig.3 Sketch map of low spiral drill rod

## 2 低螺旋钻杆的参数优化

如上分析, 低螺旋钻杆其结构是在光面钻杆表面焊接螺旋凸棱, 即要发挥钻杆本身的排渣功能, 又不能阻力过大而降低风力排渣功能, 因此螺旋凸棱的工艺参数是决定其在煤层钻进过程发挥作用

的程度，也有部矿区采用了传统手段，用模糊参数进行设计加工，结果其使用优势没有体现出来。因此，采用数值分析的手段，对不同参数的螺旋凸棱进行排渣模拟，观察对比影响排渣效率的因素，从而确定最优化的加工参数。

## 2.1 物理模型

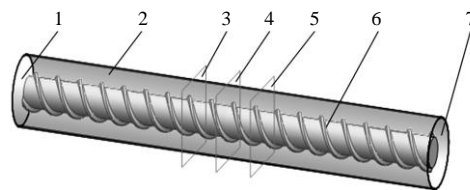
对于松软煤层，钻头破煤后，形成的渣体相对均匀，且颗粒较细，同时，在向外排出的过程中，在钻杆扰动作用下，煤颗粒会进一步变细；无论是风力排渣还是水力排渣，为了方便计算，文中把流体动力和煤颗粒混合物看成具有一定密度的均匀流体介质，以一定的流量从模型的入口进入，此计算方法，虽不能完全真实模拟在煤层打钻过程中，煤颗粒排出的真实动力状况，但相同的边界条件，可以准确判断应用不同参数设计的低螺旋钻杆模型，渣体在钻孔内排出的速度及压力等重要参数，通过计算所得参数的对比，反映不同参数低螺旋钻杆在钻孔内排渣的优劣<sup>[9]</sup>。

图4为低螺旋钻杆的排渣模型。在数值计算过程中，取钻杆模型长度为850 mm，介质选择煤与水混合物，其密度定义为

$$\rho = 1.35 \text{ g/cm}^3$$

其边界条件设置如下：

入口：质量流量  $Q = 0.5 \text{ kg/s}$ ；出口：静压状态；  
钻杆：旋转速度  $280 \text{ r/min}$ 。



1-渣体入口；2-煤层钻孔；3-观测面 1；4-观测面 2；  
5-观测面 3；6-低螺旋钻杆；7-渣体出口

图4 低螺旋钻杆排渣模型

Fig.4 The slag removal model of low spiral drill pipe

本次计算以工业现场的实际应用为前提条件，矿方拟采用 ZDY1900 钻机，因此在  $\Phi 50 \text{ mm}$  钻杆表面焊接高度  $h = 6.75 \text{ mm}$  螺旋钢带，钢带的截面设计成梯形，这样，成型的钻杆外径为  $\Phi 63.5 \text{ mm}$ ，能够满足钻机夹持器夹持，同时该高度也在低螺旋钻杆螺旋凸棱条件的理论设计范围之内。

## 2.2 螺旋凸棱螺距优化

螺旋凸棱螺距优化计算参数为：凸棱宽  $l = 10 \text{ mm}$ ，凸棱高  $h = 6.75 \text{ mm}$ ，单螺旋螺距  $s = 75, 80, 85, 90, 95, 100 \text{ mm}$ ，通过对比不同螺距的渣体的平均流速，确定最佳螺距，数值计算结果如图5所示。

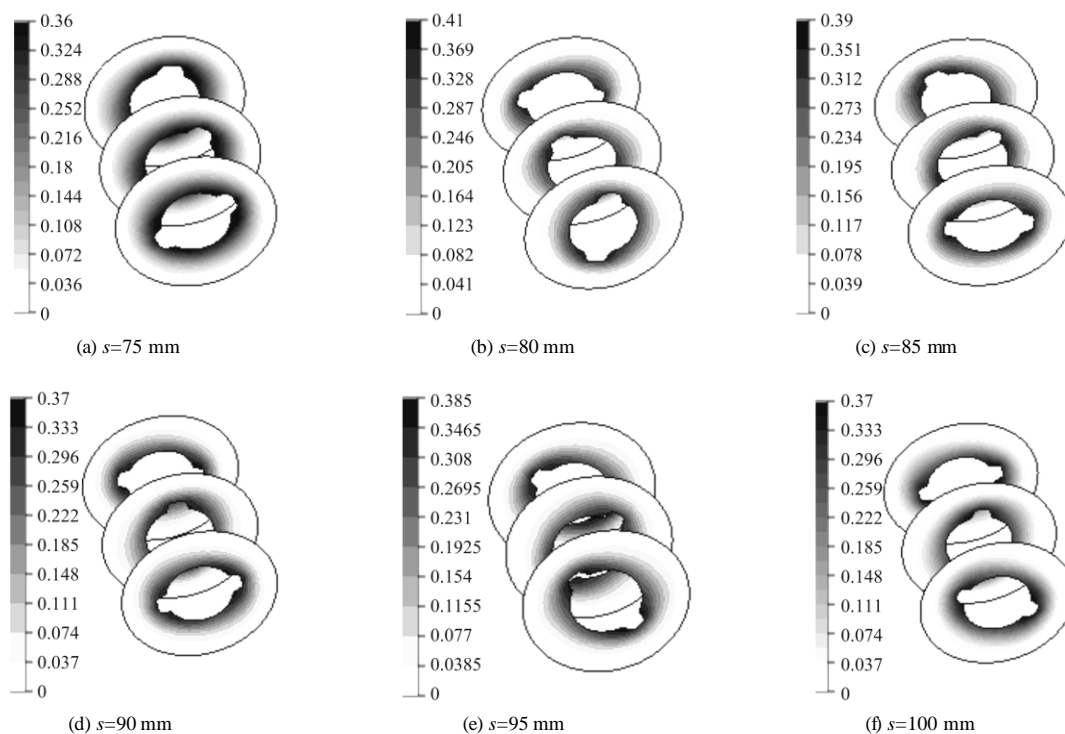


图5 不同螺距钻杆排渣速度云图 (m/s)

Fig.5 Distribution cloud diagram of velocity of different pitch

为了能够更加清晰形象的分析低螺旋钻杆在旋转排渣过程中, 钻杆周围速度变化, 在同一时间, 截取 3 个不同位置的观测面进行分析, 核心排渣速度分布在双螺旋凸棱两侧, 核心速度以外的空间, 排渣速度稳定, 波动小, 这有利于降低流体排渣阻力, 除依靠钻杆本身的机械排渣能力以外, 能够充分发挥流体动力排渣的优势。根据不同螺距钻杆排渣速度云图, 可以看到, 如图 5b 所示, 当螺旋  $s=80$  mm 时, 核心速度值达到  $0.41$  m/s, 相对于其它螺旋, 排渣速度最高, 因此, 螺旋  $s=80$  mm 为最优参数。

### 2.3 螺旋凸棱宽度优化

螺旋凸棱宽度优化计算参数为: 凸棱宽  $s=80$  mm, 凸棱高  $h=6.75$  mm, 螺旋凸棱宽度  $l=10, 12, 14, 16$  mm。

为便于分析对比, 取流体计算空间距中心线为  $45$  mm 的直线, 长度为  $200$  mm 的一段为数据观测线, 提取速度数据进行对比分析。观测线未取距离钻杆表面较近的核心速度区, 取低速区的目的是观测螺旋棱边对远距离排渣区的影响情况, 如图 6 所示。

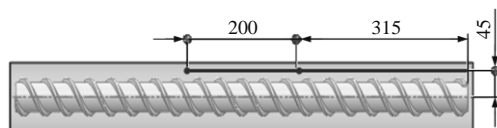


图 6 模型流道观测线图

Fig.6 Sketch map of observation line of the model flow passage

其数据分析如图 7 所示, 排渣速度非常接近, 其数值在  $0.07$  m/s 上下对称波动,  $l=10, 12$  mm 时, 其速度分布接近, 且上下波动较小, 即螺旋凸棱对煤渣沿径向扬起的作用较小, 相对于其它 2 种参数, 不是最优结果。当  $l=16$  mm 时, 其排渣速度值的整体分布小于其它几种情况, 当  $l=14$  mm 时, 排渣速度值的整体分布较高, 因此螺旋凸棱宽度  $l=14$  mm 时最优。基于上述分析结果, 说明对于不同型号的低螺旋钻杆的叶片参数, 有一个最佳值, 叶片宽度过窄, 影响其径向的扬渣能力, 间接影响风力协渣能力; 叶片宽度太宽, 形成的阻力太大, 影响排渣区域的整体排渣速度。可见, 对低螺旋钻杆的结构参数进行流体动力学分析, 对于获得低螺旋钻杆最优加工参数具有重要的指导意义。

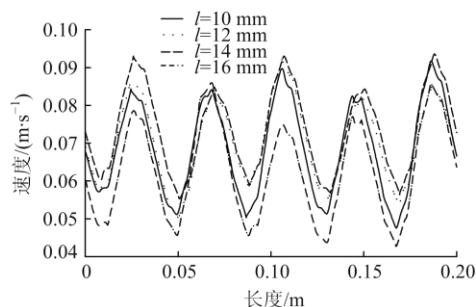


图 7 不同螺旋凸棱宽度观测线长度-速度关系图

Fig.7 Length-velocity relation curves of observation line in different spiral convex edges width

### 3 低螺旋钻杆的强度分析

为保证低螺旋钻杆按上述优化参数加工的钻杆安全可靠, 对其强度进行数值计算。考虑到实际应用过程中, 钻杆在钻进过程中或退钻过程中, 通常受提拉和扭转两种交变应力, 因此在数值计算中也要同时考虑拉力和扭转力, 模型采用一端固定, 一端受拉力和扭转力, 如图 8 所示。杆体和螺旋凸棱的材料选择合结钢, 屈服强度为  $6.20422 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup>。根据使用钻机 ZDY1900 的相关参数, 边界条件如下:

扭转力:  $N=1\ 900$  N·m

拉力:  $T=112\ 000$  N

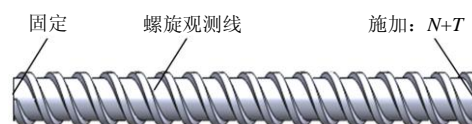


图 8 强度分析模型

Fig.8 The model of the strength analysis

螺旋凸棱是焊接在钻杆表面的, 因此对其接触面的螺旋线数值计算结果进行观测, 能够反应杆体的整体应力分布状况, 如图 9 所示。

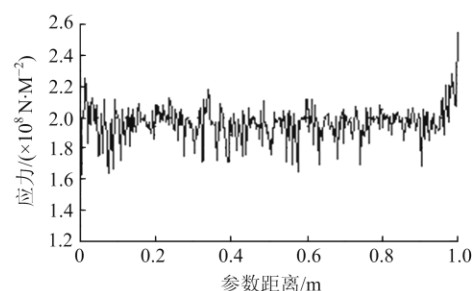


图 9 钻杆接触面螺旋线最大主应力分布图

Fig.9 Maximum principal stress distribution in interface spirals

根据图示, 螺旋线上数据结果显示最大主应力在  $1.6 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  与  $2.6 \times 10^8 \text{ N/m}^2$  之间波动, 未超出材料的屈服强度值。

采取同样的方法, 对螺旋线上的安全系数进行检查, 如图 10 所示, 安全系数为 2.5 与 4.0 之间波动, 杆体强度没有问题。

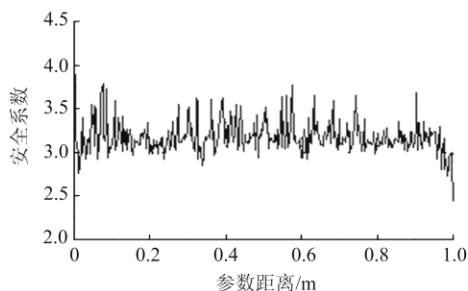


图 10 接触面螺旋线安全系数分布图

Fig.10 Safety factor distribution in interface spirals

为了确保杆体的整体强度能够满足要求, 采用不同的强度准则法检查杆体的安全系数, 其结果如下:

#### 1) 最大 von Mises 应力准则

$$\frac{\sigma_{\text{vonMises}}}{\sigma_{\text{Limit}}} < 1$$

最大 von Mises 应力:  $2.978 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 屈服力:  $6.204 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 最小安全系数为 2.08。

#### 2) 最大抗剪应力准则:

$$\frac{\tau_{\text{max}}}{0.5\sigma_{\text{Limit}}} < 1$$

最大抗剪应力  $\tau_{\text{max}} = 1.659 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 屈服力:  $6.204 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 最小安全系数为 1.87。

#### 3) 最大法向应力准则:

$$\frac{\tau_1}{\sigma_{\text{Limit}}} < 1$$

法向应力  $\tau_1 = 2.855 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 屈服力:  $6.204 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ , 最小安全系数为 2.173。

经过以上 3 个准则的设计检查, 安全系数都大于 1, 且钻杆强度的最小安全系数为 1.87, 因此, 所设计的低螺旋钻杆在正常工作条件下能够满足强度要求<sup>[10-13]</sup>。

采用上述研究方法, 可根据钻机动力大小, 对其它型号的低螺旋钻杆进行优化, 得到最优化的加工参数, 充分发挥低螺旋钻杆在松软突出煤层钻进的优势。

## 4 低螺旋钻杆的工业性试验

该低螺旋钻杆分别在平煤、阳煤、晋煤矿区的多个矿井进行试验。相对于常规的圆钻杆及麻花钻杆, 应用效果良好, 其优势体现在钻进深度和钻进效率上。对于突出煤层的钻孔施工, 主要为掘进工作面和本煤层的钻孔施工, 尤其掘进工作面的钻孔施工难度较大, 本文列举近期应用于煤巷掘进工作面钻孔施工的例子。

大峪沟煤业集团华泰煤业待掘工作面, 煤巷宽度 2.9 m, 煤巷高度 3 m, 断面为拱形结构, 断面积不足  $8 \text{ m}^2$ , 煤层坚固性系数  $f=0.15$  左右, 煤体酥软, 属构造鸡窝煤。该面在掘进过程中, 采用圆钻杆和麻花钻杆施工, 钻进深度很难突破 25 m, 并且在钻进过程中, 喷孔严重, 单孔排出煤渣 10 t 以上, 致使掘进工作面掘进难以进行, 严重影响煤矿的正常生产。

根据矿方钻进面临的问题, 拟订以下技术方案:

#### 1) 降低排渣阻力

由于麻花钻杆, 完全依靠叶片的螺旋输送, 将煤渣排出孔外, 当结合风力排渣时, 由于叶片高度的限制, 很难发挥其风力排渣的作用, 且容易造成钻孔堵塞。因此, 采用低螺旋钻杆, 可以降低排渣阻力。

#### 2) 提高钻机动力

矿方原钻机最大扭矩为 780 N·m, 根据当前钻进实际情况, 调整后, 采用 ZDY3200 钻机。

矿方初期仍采用小型钻机, 光面钻杆施工, 统计 7 天的钻进数据, 共完成钻孔 21 个, 总累计钻进深度为 399 m, 平均深度为 19 m, 平均每天施工 57 m; 通过现场调研和矿方技术人员沟通, 采用低螺旋钻杆施工, 统计 5 d 的钻进数据, 共完成钻孔 15 个, 总累计钻进深度为 510 m, 平均深度为 34 m, 平均每天施工 102 m。

根据上述钻进数据分析得到如下结果:

钻进深度提高/%:  $(33-19)/19=73.7\%$

钻进效率提高/%:  $(102-57)/57=78.9\%$

基于矿方掘进工作面设计与开采安全考虑, 该钻进深度, 不能进行循环掘进。因此, 尽管钻进深度和钻进效率都有较大的提高, 但对于掘进工作面的掘进工作仍然不能进行。

根据上述技术方案, 采取提高钻机动力措施,



使用 ZDY3200 钻机, 由于初期采用低螺旋钻杆, 钻进深度和钻进效率都有明显提高, 因此, 在使用 ZDY3200 钻机的同时, 直接应用低螺旋钻杆施工。矿方设计深度为 72 m, 每个钻孔基本都能达到设计深度, 且有继续提高深度的空间。

采用低螺旋钻杆, 结合压风钻进和提高钻机动力的技术措施, 钻进深度、钻进效率有了大幅度的提高, 在掘进工作面进行埋管抽放, 使掘进面向前推进, 解决了煤巷掘进工作面停止进尺的被动局面。

## 5 结 论

1) 依据流体与机械两种动力源协同排渣能力大于其中一种动力源的原理, 在扒孔降温钻杆的基础上提出低螺旋钻杆。

2) 建立低螺旋钻孔排渣数学模型, 结合现场实际应用, 综合考虑排渣空间的大小, 合理设置螺旋凸棱的高度, 并对螺旋凸棱的螺距和宽度时行优化, 研究表明: 螺旋  $s=80$  mm, 凸棱宽  $l=14$  mm, 钻杆的排渣性能最最优。

3) 依据优化结果, 对其整体结构进行强度校核, 最小安全系数为最大抗剪应力准则: 安全系数为 1.87, 满足钻杆加工材料的强度要求。

4) 通过现场工业性试验, 钻进深度和钻进效率提高显著, 解决了煤巷掘进工作面一度停止进尺的被动局面。

## 参考文献:

- [1] 孙玉宁. 本煤层瓦斯抽采成孔与封孔技术研究[D]. 焦作: 河南理工大学能源科学与工程学院, 2008.
- [2] 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 Xin-sheng, 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.
- [3] 王庆永. 复杂松软煤层中风压钻进工艺技术[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(2): 39-42.  
WANG Qing-yong. Medium pneumatic pressure drilling technique in complicated soft seam[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(2): 39-42.
- [4] 凌标灿, 戴世鑫, 曹承平, 等. 三棱钻杆在中软煤层顺层瓦斯抽排钻孔的应用[J]. 煤炭科学技术, 2009, 37(10): 44-46.  
LING Biao-can, DAI Shi-xin, CAO Cheng-ping, et al. Application of triangular drilling rod to gas drainage borehole drilling in medium soft seam[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(10): 44-46.
- [5] 秦刚伟, 秦法秋. 突出煤层瓦斯抽采钻孔技术探讨[J]. 煤炭技术, 2009, 28(11): 183-185.  
QIN Gang-wei, QIN Fa-qiu. Highlight extraction of coalbed methane drilling technology to out spdece[J]. Coal Technology, 2009, 28(11): 183-185.
- [6] 冀前辉, 殷新胜, 王毅. 松软煤层空气钻进工艺试验[J]. 煤田地质与勘探, 2009, 37(3): 78-80.  
JI Qian-hui, YIN Xin-sheng, WANG Yi. Experiment on technical parameters of air drilling in floppy coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2009, 37(3): 78-80.
- [7] 突出煤层扒孔降温钻具及其钻进方法: 中国: CN 101131069[P]. 2008-02-27.
- [8] 双动力低螺旋钻杆. 中国: CN200920088879.4[P]. 2010-01-27.
- [9] 王永龙, 翟新猷, 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 Yong-long, ZHAI Xin-xian, SUN Yu-ning. Reasonable parameters study on grooved drill pipe used in drilling outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 304-307.
- [10] 段守德, 王永龙. 报废钻杆的合理利用研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(11): 203-204.  
DUAN Shou-de, WANG Yong-long. Study on rational utilization of scrap drill pipe[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(11): 203-204.
- [11] 郭朋星, 王永龙, 王建军. 刻槽钻杆在东峰煤矿的应用[J]. 煤炭工程, 2010, 29(9): 28-29.  
GUO Ming-xing, WANG Yong-long, WANG Jian-jun. Application of groove drill pipe in the Dongfeng Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2010, 29(9): 28-29.
- [12] 田东庄. 矿用高强度钻杆关键制造工艺技术分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009(7): 43-45.  
TIAN Dong-zhuang. Analysis on key manufacturing technology of high-strength mine drilling rod[J]. Exploration Engineering, 2009(7): 43-45.
- [13] 江进国, 舒晓勇. 基于 ANSYS 软件的钻杆扭转振动分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003(增刊): 176-178.  
JIANG Jin-guo, SHU Xiao-yong. Drilling Pipe Torsional Vibration Analyses with ANSYS Software[J]. Exploration Engineering, 2003(Supp): 176-178.