

# 单弯螺杆马达与液动潜孔锤复合钻具研究

刘建林,王四一,赵江鹏,赵建国

(中煤科工集团西安研究院有限公司,陕西 西安 710077)

**摘要:**为解决煤矿井下硬岩层定向钻进效率低的难题,提出将单弯螺杆马达与液动潜孔锤组合在一起,形成的复合钻具具有硬岩层中轨迹可控和钻进效率高的特点。介绍了复合钻具的组成及实现冲击回转定向钻进的原理,研究了具体实施方法,包括:钻具组合形式、工具选型、流量匹配、随钻测量系统防振以及专用钻头设计。研究结果表明:液动潜孔锤置于单弯螺杆马达与钻头之间较为合理;为满足液动潜孔锤低转速的要求和单弯螺杆马达调角的需要,定制了低转速可调弯外壳螺杆马达;随钻测量系统与钻具之间设计了双向减振短节;根据不同工具工作排量,提出了3种流量匹配的方法;基于复合钻具碎岩机理,设计了柱-片混合型钻头;最后指出了可能存在的问题,并给出了解决问题的建议。

**关键词:**单弯螺杆马达;液动潜孔锤;复合钻具;定向钻进

**中图分类号:**TD41      **文献标志码:**A      **文章编号:**0253-2336(2018)05-0138-05

## Study on compound drilling tools of single bending screw motor and hydro hammer

LIU Jianlin, WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, ZHAO Jianguo

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low efficiency of directional drilling in hard rock underground coal mine, the combination of single bending screw motor and hydro hammer is put forward, which has the characteristics of controlled trajectory and high efficiency of directional drilling in hard rock. This paper introduces the combination of the compound drilling tools and the principle of realizing the impact rotary directional drilling, and studies the concrete implementation methods, including the combination of drilling tools, the selection of tools, the matching of flow, the anti-vibration of the drilling measurement system and the design of special bit. The results show that the hydro hammer should be set up between the single curved screw motor and the bit. In order to meet the requirements of the low speed of the hydro hammer and the need of the bending angle of the single bending screw motor, a low speed and adjustable curved shell screw motor is made. According to the work displacement of different drilling tools, three kinds of flow matching methods are put forward. Based on the mechanism of rock breaking by compound drilling, a column-chip mixed type bit is designed. Finally, the possible problems are put forward, and some suggestions for solving the problems are given.

**Key words:** single bending screw motor; hydro hammer; compound drilling tools; directional drilling

## 0 引言

煤矿井下随钻测量定向钻进技术具有钻进效率高、轨迹可控、可施工分支等诸多优点,井下定向长钻孔已成为煤矿瓦斯高效抽采的重要技术途

径<sup>[1-4]</sup>。随着井下定向钻进工艺及配套装备的发展完善,已成功推广应用与井下水害防治和隐蔽致灾地质异常体探查等领域<sup>[5-8]</sup>。井下高位瓦斯抽采定向长钻孔、顶板水探放定向钻孔、地质异常体探查定向钻孔主要在岩层中延伸<sup>[7-12]</sup>,当钻遇硬度较大的

收稿日期:2017-12-22;;责任编辑:赵 瑞      DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.05.022

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0804102);2016年陕西省工业科技攻关资助项目(2016GY-188)

作者简介:刘建林(1981—),男,内蒙古赤峰人,副研究员,博士。E-mail:liujianlin@cctegxian.com

引用格式:刘建林,王四一,赵江鹏,等.单弯螺杆马达与液动潜孔锤复合钻具研究[J].煤炭科学技术,2018,46(5):138-142,211.

LIU Jianlin, WANG Siyi, ZHAO Jiangpeng, et al. Study on compound drilling tools of single bending screw motor and hydro hammer [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(5): 138-142, 211.

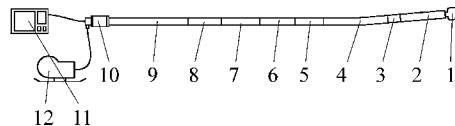
灰岩、砂岩层时,尚存在钻进效率低、施工周期长等问题,一定程度上限制了定向钻进技术的进一步推广与应用,制约了井下定向长钻孔技术优势的发挥。

2011年,中煤科工集团西安研究院申请的专利“一种煤层顶板瓦斯抽采定向长钻孔的钻具及其施工方法”<sup>[13]</sup>,采用单弯螺杆马达与潜孔锤2种不同孔底动力钻具组合、钻进工艺分段、交替施工,充分发挥单弯螺杆马达的可定向特性和潜孔锤钻进岩石地层的高效性。但也存在需要频繁更换钻具的缺点:当实钻轨迹倾角或方位角偏离设计值超过4°时则停止钻进,提钻更换钻具组合,下入单弯螺杆马达钻具组合,实施滑动定向钻进工艺纠正实钻轨迹的延伸方向,实钻轨迹回归正常后更换钻具组合,再次下入潜孔锤钻具组合继续实施冲击回转钻进工艺,根据需要重复更换钻具组合的操作。

因此,根据上述专利的思路,针对煤矿井下顶底板硬岩高效钻进需求,将螺杆马达钻具与潜孔锤钻具组合起来形成复合钻具,同时发挥单弯螺杆钻具的轨迹可控性和潜孔锤钻进的高效性,不需要频繁起下钻操作,进一步提高了钻进效率。

## 1 单弯螺杆马达与液动潜孔锤复合钻具的组成及原理

单弯螺杆马达与液动潜孔锤复合钻具连接方式如图1所示。



1—专用钻头;2—液动潜孔锤;3—接头;4—单弯螺杆马达;  
5—减振短节;6—下无磁;7—测量探管;8—上无磁;  
9—通缆钻杆;10—通缆水便;11—孔口监视器;12—泥浆泵

图1 单弯螺杆马达与液动锤复合钻具连接示意

Fig.1 Connection diagram of composite drilling tool of single-bending screw motor and hydraulic DTH hammer

其主要组成包括:专用钻头、液动潜孔锤、接头、单弯螺杆马达、减振短节、下无磁、测量探管、上无磁、通缆钻杆、通缆水便。复合钻具是将随钻测量设备、单弯螺杆马达、液动潜孔锤结合在一起,充分发挥这3种工具的功能,以单弯螺杆马达和随钻测量探管实现轨迹可调、可控的定向钻进;充分发挥液动潜孔锤高效碎岩功能,最终实现在煤矿井下顶底板硬岩层中的高效定向钻进。

## 2 关键技术

### 2.1 螺杆马达与液动潜孔锤组合形式

考虑到如果液动潜孔锤在螺杆马达后面,高频冲击必然导致螺杆马达损坏,因此将液动锤放在螺杆马达与钻头之间的位置<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 液动潜孔锤及螺杆马达选型

1)液动潜孔锤选型。螺杆马达与液动潜孔锤选型应以煤矿井下常用钻孔孔径为依据,煤矿井下常规钻孔直径范围大多为65~153 mm,液动潜孔锤选型也在这个范围内选取。中国地质科学院勘探技术研究所生产YZX系列液动潜孔锤是目前市场上比较成熟的产品,性能稳定,可以用于煤矿井下的型号相关参数见表1。

表1 YZX系列液动潜孔锤

Table 1 YZX series DTH hammer

型号参数	YZX54	YZX73	YZX89	YZX98	YZX127
锤体外径/mm	ø54	ø73	ø89	ø98	ø127
钻孔直径/mm	ø56~65	ø75~85	ø91~105	ø112~120	ø136~158
单次冲击功/J	10~50	15~70	20~90	80~120	120~250
冲击频率/Hz	25~45	20~45	20~40	20~40	7~15
工作泵量/(L·min <sup>-1</sup> )	60~90	90~150	120~190	250~320	350~550
工作泵压/MPa	0.5~2.0	0.8~3.0	1.0~3.0	1.5~4.0	2.0~5.0
总长/mm	863	1 000	1 000	1 600	1 950
总质量/kg	12	25	35	72	120

2)螺杆马达选型。相同直径的螺杆马达与液动潜孔锤相比,排量会相对大一些,要使两者的排量尽量一致,在范围上有所重叠的型号,一般尽量选择头数较少的型号,现将天津立林机械集团产品样本中符合要求的型号见表2。

原则上以上型号外径尺寸一致的钻具都可以组合,但是液动潜孔锤要求的转速都比较低,为20~60 r/min,而螺杆马达是为PDC钻头设计,转数大多在100 r/min以上,为解决转数匹配问题,定制低转数的专用螺杆马达。

螺杆马达与液动潜孔锤连接后,螺杆马达弯点以下的长度增加1 000 mm,如果还使用常用的1.25°单弯螺杆马达,则在定向时,由于钻头径向偏移较大,角度难以调节,为此采用可调弯外壳螺杆马达代替目前常用的弯角1.25°的单弯螺杆马达,根据实际情况可以将弯角调整为0.62°或者0.93°。以1 000

mm 长的液动潜孔锤为例,1.25°单弯螺杆马达前端长度为 700 mm, 钻头径向偏移量为 15.3 mm; 将可调弯外壳螺杆马达弯角调节为 0.62°, 然后将 1 000 mm 长液动潜孔锤连接在螺杆马达前端, 弯点以下长度达到 1 700 mm, 钻头径向偏移量为 18.4 mm, 与 1.25°单弯螺杆马达相当。

表 2 拟选用的螺杆马达

Table 2 Screw motor to be selected

型号	5LZ54×3.5L-3-360	4LZ73×3-480	4LZ89×5-560	4LZ95×5-600	4LZ127×5-725
外径尺寸/mm	ø54	ø73	ø89	ø98	ø127
钻孔直径/mm	ø60~89	ø95~121	ø107~121	ø118~149	ø149~200
螺旋线头数	5:6	4:5	4:5	4:5	4:5
级数	3	3	5	5	5
工作排量/(L·min⁻¹)	106~240	113~303	190~570	270~720	495~990
工作压降/MPa	2.4	2.4	4.0	4.0	4.0
输出转矩/(N·m)	130	460	726	1190	1780
转速/(r·min⁻¹)	282~638	154~410	140~420	129~340	150~300
总长/mm	1 720	3 210	4 080	4 950	6 560
总质量/kg	22	78	110	160	520

液动潜孔锤的结构比较复杂, 参数调节不易实现, 而螺杆马达原理和结构相对简单, 制造低转速螺杆马达相对容易, 目前市场上虽没有直接可用的螺杆马达, 但是可以定制低转数(20~60 r/min)的可调弯外壳螺杆马达。

### 2.3 螺杆马达与液动锤流量匹配

流量匹配问题分以下 3 种情况进行设计:

1) 第 1 种情况: 螺杆马达流量与潜孔锤一致, 只需要 1 个双公接头将螺杆马达与潜孔锤连在一起即可, 如图 2 所示, 这种情况最简单。

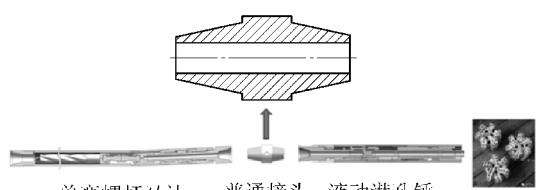


图 2 螺杆马达排量与潜孔锤一致时的匹配方案

Fig.2 Flow distribution scheme when screw motor displacement and DTH hammer are consistent

定制的低转数螺杆马达与液动潜孔锤排量相

近, 则直接用接头将二者连接即可。

2) 第 2 种情况: 螺杆马达所需流量大, 液动潜孔锤所需流量小, 可采用在连接头上设计分流孔, 分流孔内安装背压喷嘴的方法, 如图 3 所示, 一部分循环介质驱动液动潜孔锤做功, 将多余的循环介质排出到钻具与钻孔的环空间隙中。

根据应用流体力学知识, 喷嘴直径计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$d = \eta \sqrt{\frac{q}{0.658n\sqrt{p}}} \quad (1)$$

式中:  $d$  为喷嘴直径, mm;  $p$  为喷射压力, MPa, 此处取液动潜孔锤工作压力降与排渣所需压力之和;  $q$  为喷射流量, L/min, 此处取需要分流的流量, 用泥浆泵流量减去液动锤工作流量;  $n$  为喷嘴数量, 个;  $\eta$  为喷嘴系数, 一般取 1.05~1.10。

目前能够选用的螺杆马达与液动潜孔锤, 直径相同的螺杆马达排量大于液动潜孔锤排量, 比如 YZX89 液动潜孔锤和 4LZ89×7.0L-5-560 螺杆马达钻具组合的流量匹配, 就属于第 2 种情况。

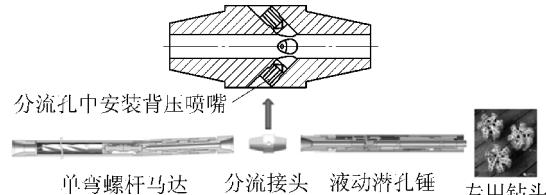


图 3 螺杆马达排量大于液动潜孔锤时的匹配方案

Fig.3 Flow distribution scheme when screw motor displacement is higher than hydraulic DTH hammer

以使用 400 L/min 排量的泥浆泵为例计算, 工作压力降 3 MPa, 排渣压力取 2 MPa, 则  $p = 5$  MPa;  $q$  为泥浆泵流量 400 L/min 与液动潜孔锤工作排量 190 L/min 之差, 为 210 L/min; 喷嘴数量  $n$  取 4 个, 喷嘴系数  $\eta$  取 1.05, 则可得

$$d = 1.05 \sqrt{\frac{210}{0.658 \times 4\sqrt{5}}} = 6.27 \text{ mm}$$

所以可以设计 4 个 6.27 mm 的喷嘴安装于连接短节上。

3) 第 3 种情况: 螺杆马达所需流量小, 而潜孔锤所需流量大, 可采用中空转子螺杆马达, 如图 4 所示, 将螺杆马达的转子加工成带喷嘴的中空转子, 使流经马达的循环介质, 一部分通过密封容腔做功, 一部分通过转子的中心通孔直接进入潜孔锤。

定制的螺杆马达排量小于液动潜孔锤排量, 则

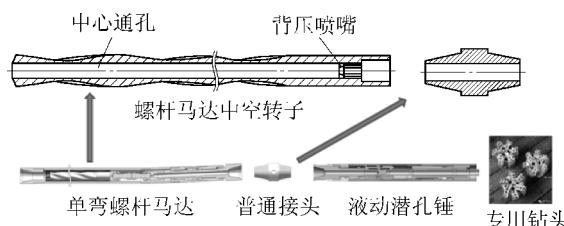


图 4 螺杆马达排量小于潜孔锤时的匹配方案

Fig.4 Flow distribution scheme when screw motor displacement is lower than hydraulic DTH hammer

应使用中空转子螺杆马达,中空转子中心通孔喷嘴直径按照下式计算<sup>[17]</sup>:

$$d = \sqrt[4]{\frac{898\rho q^2}{\Delta P}} \quad (2)$$

式中: $d$  为喷嘴直径,mm; $\rho$  为循环介质的密度,kg/L; $q$  取泥浆泵排量与螺杆马达工作排量之差; $\Delta P$  为螺杆马达工作压降,MPa。

## 2.4 随钻测量系统防振

液动锤高频冲击会对随钻测量系统的结构造成损坏,同时影响随钻测量精度。采用增加减振短节的方法,可以解决这个问题。钻进所产生的振动是纵向和扭转的复合振动<sup>[18-19]</sup>,具有轴向和扭转双重减振作用的双向减振短节具有更好的减振效果<sup>[20]</sup>。

## 2.5 专用钻头设计

柱-片混合型钻头,目的是利用柱齿降低 PDC 片所承受的冲击力,即冲击回转钻进时,柱齿先承担前期较大冲击力,并压入岩层一定深度后,PDC 片才会切削岩层钻进。钻头唇面结构计划采用柱-片相间或者柱-片平行 2 种结构,如图 5 所示。其共同特点是:①柱齿的布置全覆盖孔底,且柱齿采用尖型结构。②PDC 片布置全覆盖孔底。③柱齿高于 PDC 片 1~2 mm,根据试验情况进行调整。

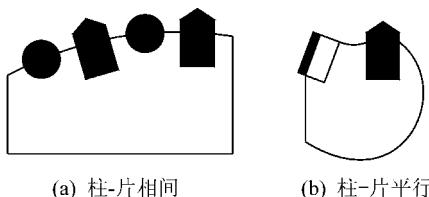


图 5 柱-片混合型钻头唇面设计方案

Fig.5 Lip design of column-chip hybrid drill

设计的钻头模型如图 6 所示,钻头与液动潜孔锤相连接,因此钻头尾部采用花键连接、卡环吊挂的结构,钻头唇面由锥形柱齿和 PDC 复合片组成,锥形柱齿齿顶高出 PDC 复合片 2 mm,2 种不同的布齿方式如图 6a 和图 6b 所示。冲击时由锥形柱齿碎

岩,回转时靠 PDC 复合片切削岩层,并且钻头具有较强的抗冲击能力。钻头分两体加工,然后用摩擦焊接的方式结合为一体。

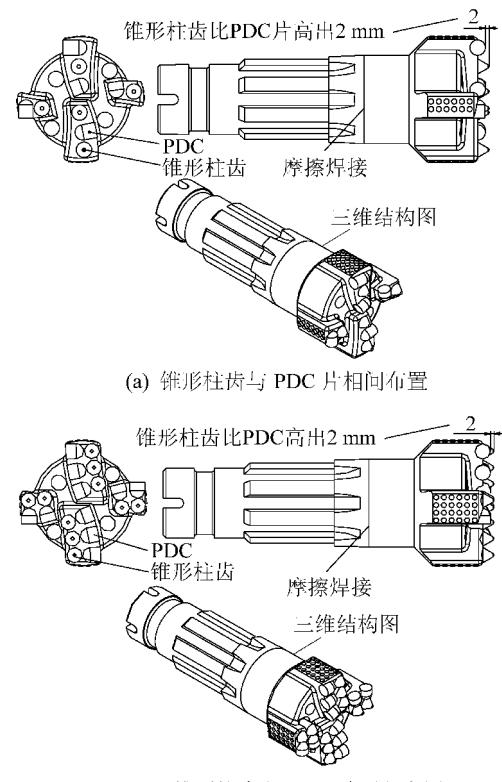


图 6 柱形柱齿和 PDC 片混合型钻头结构示意

Fig.6 Structure diagram of column gear and PDC chip hybrid bit

## 3 结论与展望

螺杆马达与液动锤复合钻具兼具两者的优势,在两者复合的连接顺序、选型、流量匹配问题、随钻测量系统减振问题以及专用钻头设计上进行了探究,并给出了以下方案。

- 1) 连接顺序:钻头+液动锤+螺杆马达+减振短节+下无磁+随钻测量系统+上无磁+钻杆等。
- 2) 为匹配液动锤的转速和满足单弯螺杆马达调角需要,须定制低转速、可调弯外壳的螺杆马达。
- 3) 根据螺杆马达与液动潜孔锤的实际工作排量,给出了流量匹配的 3 种实施方法。

- 4) 通过增加双向减振短节解决随钻测量系统防振问题。
  - 5) 设计了专用的抗冲击柱-片混合型钻头。
- 通过以上研究,实现了煤矿井下冲击回转定向钻进工艺,但也存在以下问题:①液动潜孔锤安装在

钻头与螺杆马达之间,使螺杆马达弯点以下长度变长,工具的调角能力会有所减弱;②增加的液动潜孔锤和减振短节使随钻测量控管距离钻头更远,随钻测量滞后更严重。

通过研制长度更短的液动潜孔锤和减振短节可以在一定限度内减轻这些问题对钻具性能的影响;将长度更短的冲击机构内置于螺杆马达,研制新型冲击螺杆是另一个解决问题的方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 许超.基于复合钻进技术的煤层瓦斯抽采定向钻孔施工[J].煤矿安全,2015,46(4):130-133.  
XU Chao. Directional drilling construction of coal seam gas drainage based on compound drilling technology [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46 (4) :130-133.
- [2] 杨虎伟,许超,董萌萌,等.中硬煤层瓦斯抽采定向长钻孔高效钻进工艺[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2014,41(11):20-23,27.  
YANG Huwei, XU Chuo, DONG Mengmeng, et al. Efficient drilling technology of long directional borehole for gas drainage in the medium hard coal seam [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2014, 41 (11) :20-23,27.
- [3] 方新秋,耿耀强,王明.高瓦斯煤层千米定向钻孔煤与瓦斯共采机理[J].中国矿业大学学报,2012,41(6):885-892.  
FANG Xinqiu, GENG Yaoqiang, WANG Ming. Kilometer directional drilling simultaneous extraction of coal and gas from a high gas coal seam [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2012, 41 (6) :885-892.
- [4] 张迎接,曹石榴.彬长矿区顺层抽采定向钻孔与常规钻孔的间距对比[J].煤炭技术,2016,35(5):216-218.  
ZHANG Yingjie, CAO Shiliu. Comparison of directional and normal drilling in coal seam in Binchang mining area [J]. Coal Technology, 2016, 35 (5) :216-218.
- [5] 史海岐.随钻测量定向钻进技术在煤矿水害防治中的应用[J].现代矿业,2014,30(4):38-41.  
SHI Haiqi. Application of measurement while directional drilling technology in preventing and controlling the water disasters in coal mine [J]. Modern Mining, 2014, 30 (4) :38-41.
- [6] 王四一.煤矿隐蔽致灾地质因素井下探查用随钻测量系统测试研究[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2016,43(6):68-71.  
WANG Siyi. Research on test of MWD system used for exploration of the hidden geological factors causing disasters in coal mine [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2016, 43 (6) :68-71.
- [7] 石智军,李泉新,姚克.煤矿井下水平定向钻进技术与装备的新进展[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2015,42(1):12-16.  
SHI Zhijun, LI Quanxin, YAO Ke. Latest developments of horizontal directional drilling technology and the equipments for underground coal mine [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2015, 42 (1) :12-16.
- [8] 方俊,陆军,张幼振,等.定向长钻孔精确探放矿井老空水技术及其应用[J].煤田地质与勘探,2015,43(2):101-105.  
FANG Jun, LU Jun, ZHANG Youzhen, et al. Technology and application of precise detection and drainage of goaf water directional long borehole [J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43 (2) :101-105.
- [9] 李泉新,石智军,史海岐.煤矿井下定向钻进工艺技术的应用[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):85-88,92.  
LI Quanxin, SHI Zhijun, SHI Haiqi. The application of directional drilling technology in coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42 (2) :85-88,92.
- [10] 魏宏超,杨慧琳,王洪涛,等.大直径顶板定向钻孔在亭南煤矿上隅角瓦斯治理中的应用[J].煤炭工程,2017,49(6):64-67.  
WEI Hongchao, YANG Huilin, WANG Hongtao, et al. Application of large diameter directional roof drilling in upper corner gas control [J]. Coal Engineering, 2017, 49 (6) :64-67.
- [11] 孙荣军,李泉新,方俊,等.采空区瓦斯抽采高位钻孔施工技术及发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(1):94-99.  
SUN Rongjun, LI Quanxin, FANG Jun, et al. Construction technology and development tendency of high level borehole for gas drainage in goaf [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (1) :94-99.
- [12] 赵建国.煤层顶板高位定向钻孔施工技术与发展趋势[J].煤炭科学技术,2017,45(6):137-141.  
ZHAO Jianguo. Construction technology and development tendency of high level directional drilling in seam roof [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (6) :137-141.
- [13] 石智军,刘建林,赵永哲,等.一种煤层顶板瓦斯抽采定向长钻孔的钻具及其施工方法:中国, CN102134965A[P].2011-04-25.
- [14] 王年友,谢文卫,陈晓琳,等.三合一组合式取心钻具:中国, CN1587635[P].2005-11-25.
- [15] 王年友,谢文卫,冯起增,等.绳索取心、液动潜孔锤、螺杆马达“三合一”钻具[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2005,32(S1):45-47.  
WANG Nianyou, XIE Wenwei, FENG Qizeng, et al. Three into one drilling tool which combined wire line core, hydro-hammer and PDM [J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2005, 32 (S1) :45-47.
- [16] 朱自强.应用计算流体力学[M].北京:航空航天大学出版社,1998.
- [17] 王家进.空心转子螺杆钻具的外特性分析及其改进方法研究[D].北京:中国石油天然气总公司石油勘探开发科学研究院,1996.
- [18] 艾池,盖伟涛,王黎明.钻柱在扭转、纵向振动下的疲劳寿命估算[J].大庆石油学院学报,2006,30(4):9-11.

(下转第211页)

3)提出了正断层错动处理、逆断层错层处理方法,消除了数据重叠区域,保证了煤层包络面封闭,实现了复杂断层网络切割影响下非连续煤层实体模型的一体化构建,大大降低了建模的复杂度和难度。

### 参考文献(References):

- [1] 吴立新.数字矿山技术[M].长沙:中南大学出版社,2009.
- [2] 王李管,陈 鑫.数字矿山技术进展[J].中国有色金属学报,2016,26(8):1693-1710.  
WANG Liguan, CHEN Xin. Advancing technologies for digital mine [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (8):1693-1710.
- [3] Moretti L, Lepage Aproach F, Cuiton M. KINE3D:a new 3D restoration method based on a linking geometry and geomechanics[J]. Oil & Gas Science and Technology, 2005, 60:1-12.
- [4] 朱良峰,潘 信,吴信才,等.地质断层三维可视化模型的构建方法与实现技术[J].软件学报,2008,19(8):2004-2017.  
ZHU Liangfeng, PAN Xin, WU Xincuai, et al. Construction method and actualizing techniques of 3D visual model for geological faults [J]. Journal of Software, 2008, 19(8):2004-2017.
- [5] 朱良峰,潘 信,吴信才.三维地质建模及可视化系统的设计与开发[J].岩土力学,2006,27(5):828-832.  
ZHU Liangfeng, PAN Xin, WU Xincuai. Design and development of 3D geological modeling and visualization system [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (5):828-832.
- [6] 阎洪军,葛瑛芳,陈 军.通过断层分区实现复杂地层的三维显示[J].上海地质,2008,29(3):27-33.  
YAN Hongjun, GE Yingfang, CHEN Jun. Displaying complicated stratum 3D visually by means of fault division [J]. Shanghai Geology, 2008, 29 (3):27-33.
- [7] 刘光伟,宋佳琛,白润才,等.基于C-F方法三维地质模型精度评价研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):192-198.  
LIU Guangwei, SONG Jiachen, BAI Runcai, et al. Study on accuracy evaluation of 3D geological model based on C-F Method [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45 (11):192-198.
- [8] 李兆亮,潘 懇,杨 洋等.三维复杂断层网建模方法及应用[J].北京大学学报:自然科学版,2015,51(1):79-85.  
LI Zhaoliang, PAN Mao, YANG Yang, et al. Research and application of the three-dimensional complex fault network modeling [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, 51 (1):79-85.
- [9] LEE D T, Schachter B J. Two algorithms for constructing a delaunay triangulation[J]. Int J of Computer and Information Science, 1980, 9 (3):219-242.
- [10] MARC V. An improved incremental algorithm for constructing restricted Delaunay triangulations[J]. Computer & Graphics, 1997, 21 (2):215-223.
- [11] 赵 浩.宝日希勒露天矿三维地质建模及应用研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2012:43-45.
- [12] 李增学.煤炭地质学[M].北京:煤炭工业出版社,2009:173-177.
- [13] 胡 明,廖太平.构造地质学[M].北京:石油工业出版社,2007:110-134.
- [14] 皇甫岗,王晋南.滇西北地区断层破碎带宽度与断层错距的统计关系[J].地震研究,1993,16(4):384-390.  
HUANG Fugang, WANG Jinnan. Statistic relations between width of crack belt and dislocation distance of faults in north-west of Yunnan [J]. Journal of Seismological Research, 1993, 16(4):384-390.
- [15] 雷光伟,杨春和,王贵宾,等.断层影响带的发育规律及其力学成因[J].岩石力学与工程学报,2016,35(2):231-241.  
LEI Guangwei, YANG Chunhe, WANG Guibin, et al. The development law and mechanical causes of fault influenced zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (2): 231-241.
- [16] 李昌领.复杂地层体三维建模算法研究[D].徐州:中国矿业大学,2014:34-38.
- [17] 孙效玉,陈 舜,王 侠.应用平面法动态建立三维矿体包络面模型[C]//2005年全国金属矿山采矿学术研讨与技术交流会论文集.中国冶金矿山企业协会、中国金属学会采矿分会、中钢集团马鞍山矿山研究院,2005.
- [18] 曲业明.吉林郭勒二号露天矿三维地质建模及应用研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2013.
- [19] 刘光伟,李成盛,于 涵.露天煤矿采区接续方案[J].科技导报,2014,32(1):59-64.  
LIU Guangwei, LI Chengsheng, YU Yuan. Mining area connection scheme in surface coal mine [J]. Science & Technology Review, 2014, 32 (1):59-64.
- [20] 刘光伟,白润才,付恩三.SMCAD 矿业工程软件在露天煤矿的应用[J].露天采矿技术,2013(1):74-78.  
LIU Guangwei, BAI Runcai, FU Ensan. Application of SMCAD mining engineering software in open-pit coal mine [J]. Open-cast Mining Technology, 2013(1):74-78.
- [21] 刘光伟.数字化露天矿虚拟开采模型构建技术及应用研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2010.

(上接第142页)

- AI Chi, GAI Weitao, WANG Liming. Estimation of fatigue life of drill string under torsional and longitudinal vibration [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2006, 30(4):9-11.
- [19] 张明月.岩心钻探中钻杆扭转振动特性分析及其应用[D].成都:成都理工大学,2014.

- [20] 田家林,付传红,董明键,等.海洋钻井用双向减振器的失效机理与应对措施研究 [J]. 海洋工程装备与技术, 2015 (2):99-104.  
TIAN Jialin, FU Chuanhong, DONG Mingjian, et al. Study on failure mechanism and countermeasures of two way shock absorber in ocean drilling [J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2015 (2):99-104.