



煤炭科学技术 COAL SCIENCE AND TECHNOLOGY

# 煤炭科学技术

## 500 m超长工作面刮板智能输送技术研究

崔卫秀 穆润青 解鸿章 闫世元

### 引用本文:

崔卫秀, 穆润青, 解鸿章, 等. 500 m超长工作面刮板智能输送技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 326–335.

CUI Weixiu, MU Runqing, XIE Hongzhang. Research on intelligent conveying technology of 500 m ultra-long face scraper[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 326–335.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0739>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 智能综采工作面刮板输送机直线度监测方法研究

Study on straightness monitoring method of scraper conveyor in intelligent fully-mechanized mining face

煤炭科学技术. 2022, 50(4): 246–255 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a3ab4304-0801-469e-b5e5-2b04b89a7246>

#### 智能化高强度开采超长工作面围岩灾变预警技术

Early warning technology of surrounding rock in high-intensity mining of intelligent ultra-long working face

煤炭科学技术. 2019(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/893edac6-5c75-4f84-82c2-ab5502e11332>

#### 刮板输送机多永磁电机串联驱动新模式及关键技术

New mode and key technology of series drive of multiple permanent magnet motors for scraper conveyor

煤炭科学技术. 2024, 52(2): 238–252 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1396>

#### 基于图像处理与磁探伤技术的工作面刮板输送机在线监测系统

On line monitoring system of face scraper based on image processing and magnetic flaw detection technology

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 390–395 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2173>

#### 综采工作面智能开采关键技术实践

Key technology practice of intelligent mining in fully-mechanized coal mining face

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9adfabb1-c68f-4a26-99d6-2cfdbbe228b3>

#### 6 ~ 10 m厚煤层超大采高液压支架及其工作面系统自适应智能耦合控制

Adaptive intelligent coupling control of hydraulic support and working face system for 610 m super high mining in thick coal seams

煤炭科学技术. 2024, 52(5): 276–288 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1692>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

崔卫秀, 穆润青, 解鸿章, 等. 500 m 超长工作面刮板智能输送技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(4): 326–335.

CUI Weixiu, MU Runqing, XIE Hongzhang, *et al.* Research on intelligent conveying technology of 500 m ultra-long face scraper[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(4): 326–335.

## 500 m 超长工作面刮板智能输送技术研究

崔卫秀<sup>1,2</sup>, 穆润青<sup>1,2</sup>, 解鸿章<sup>1,2</sup>, 闫世元<sup>1,2</sup>

(1. 中煤张家口煤矿机械有限责任公司, 河北 张家口 076250; 2. 河北省高端智能矿山装备技术创新中心, 河北 张家口 076250)

**摘要:**在中厚煤层开采领域, 超长工作面智能开采是煤炭开采技术的发展趋势, 而智能运输是其重要组成部分。在总结现阶段国内 400~450 m 工作面智能开采中刮板运输系统问题的基础上, 探索了 500 m 超长工作面智能刮板输送系统装机功率与运量合理匹配的方法, 提出了解决 500 m 超长工作面刮板运输技术难题的可行性方案。基于综采三机选型配套技术方案及 2 000 kW 以上高端传动系统的应用实践, 研制了国产 2 500 kW 大功率变频一体智能传动系统, 包括变频一体电机、减速器、限矩器等, 关键技术、关键部件均实现了国产化。为解决因传动装置重心位置后移、中部槽槽宽参数不变, 不利于端头设备顺利推移的技术难题, 研究了中等槽宽配置大功率传动装置的防偏沉技术, 建立了机头(尾)推移部多工况推移模型, 并对推移部进行了结构优化, 解决了因传动装置偏沉造成机头整体失衡、漂溜严重、推移难度加剧的问题。针对刮板链断链后, 中部槽内煤量负荷较大时, 液压马达难以带动、断链事故处理较为困难的问题, 选用了大扭矩数字液压马达并研制了数字马达控制系统, 减小了维护刮板链的工作强度。基于刮板运输设备安全运行对链条进行实时变形补偿的需求, 提出了 500 m 运距链条张紧控制策略, 开发了运行过程中链条张紧度随负荷梯度智能调节技术, 解决了 500 m 运距链条弹性变形的动态补偿问题, 并通过在机尾架盖板上端加装 AI 高清摄像头来实现对链条运行状态的实时检测, 为工作人员对链条运行状态的实时掌控提供了便利。此外, 为了提高伸缩机尾对多种复杂工况的适应性, 确保其在使用周期内能够伸缩自如, 提出了从结构、材料、制造工艺三方面来提高伸缩机尾的强度和刚度的技术方案, 并研制了液压缸防护罩、伸缩机尾滑道自动冲洗系统, 进一步提升了伸缩机尾的可靠性。井下现场工业性试验表明: 该设备运量与装机功率匹配合理, 2 500 kW 变频一体智能传动系统占用空间较小、传递扭矩精准, 斜推式机头(尾)推移部稳定可靠, 数字液压马达处理断链问题方便省力, 伸缩机尾按负荷分梯度自动张紧时未出现卡滞, 保障了煤炭的安全、高效运输, 为 500 m 超长工作面智能开采提供了技术保障。

**关键词:** 500 m 超长工作面; 刮板输送系统; 智能开采; 数字马达; 自动张紧

**中图分类号:** TD528

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-2336(2024)04-0326-10

### Research on intelligent conveying technology of 500 m ultra-long face scraper

CUI Weixiu<sup>1,2</sup>, MU Runqing<sup>1,2</sup>, XIE Hongzhang<sup>1,2</sup>, YAN Shiyuan<sup>1,2</sup>

(1. China Coal Zhangjiakou Coal Mining Machinery Co., Ltd., Zhangjiakou 076250, China; 2. Hebei Province High-end Intelligent Mine Equipment Technology Innovation Center, Zhangjiakou 076250, China)

**Abstract:** In the field of medium and thick coal seam mining, intelligent mining of ultra-long face is the development trend of coal mining technology, and intelligent transportation is an important part of it. Based on the summary of the problems of the scraper transportation system in the intelligent mining of 400–450 m working face in China at present, the method of reasonable matching between the installed power and the volume of the intelligent scraper transportation system of 500 m ultra-long working face is explored, and the feasible scheme to solve the technical problems of scraper transportation of 500 m ultra-long working face is proposed. Based on the technical scheme of selection of three fully mechanized mining machines and the application practice of high-end transmission system above 2 000 kW,

收稿日期: 2023-05-20

责任编辑: 周子博

DOI: 10.12438/cst.2023-0739

作者简介: 崔卫秀(1985—), 男, 山西忻州人, 高级工程师, 硕士。E-mail: 64063733@qq.com

the domestic 2 500 kW high-power variable frequency integrated intelligent transmission system is developed, including variable frequency integrated motor, reducer, moment limiter, etc. The key technologies and key components are realized in China. In order to solve the technical problem that the center of gravity of the transmission device is shifted back and the middle groove width parameter is unchanged, which is not conducive to the smooth moving of the end equipment, the anti-deflection technology of the high-power transmission device configured with medium groove width is studied, the multi-working condition moving model of the head (tail) moving part is established, and the structure of the moving part is optimized. The problems of overall head imbalance, serious drift and aggravating difficulty of moving are solved due to the deflection of transmission device. In view of the problems that the hydraulic motor is difficult to drive when the coal load in the middle trough is large after the scraper chain is broken, the digital hydraulic motor with large torque is selected and the digital motor control system is developed to reduce the working intensity of the scraper chain maintenance. Based on the demand for real-time deformation compensation of chain during the safe operation of scraper transportation equipment, the tensioning control strategy of 500 m haul chain is proposed, and the intelligent adjustment technology of chain tension with load gradient during operation is developed to solve the dynamic compensation problem of elastic deformation of 500 m haul chain. Moreover, AI high-definition camera is installed on the upper end of the tail frame cover plate to realize real-time detection of the running state of the chain, which provides convenience for the staff to real-time control of the running state of the chain. In addition, in order to improve the adaptability of the telescopic tail to a variety of complex working conditions and ensure that it can expand freely during the service cycle, a technical scheme is proposed to improve the strength and stiffness of the telescopic tail from three aspects of structure, material and manufacturing process, and the hydraulic cylinder protective cover and automatic flushing system of the telescopic tail slide are developed to further improve the reliability of the telescopic tail. Underground field industrial tests show that: The equipment capacity and installed power matching reasonable, 2500 kW frequency conversion integrated intelligent transmission system occupies less space, accurate torque transmission, inclined push head (tail) push part is stable and reliable, digital hydraulic motor to deal with the problem of broken chain convenient and labor saving, the retractable tail according to the load gradient automatic tensioning without stuck, to ensure the safety and efficient transportation of coal. It provides technical support for intelligent mining of 500 m ultra-long working face.

**Key words:** 500 m indicates a long working face; scraper conveyer system; intelligent mining; digital motor; automatic tensioning

## 0 引 言

超长工作面智能开采是煤炭开采技术发展的趋势,是提高煤炭开采经济效益的有效途径。超长工作面开采可使煤炭生产企业减少巷道开拓、巷道支护、开采设备等资金投入。从工作面具体特征来看,适量加长工作面长度,可以减少搬家倒面次数及工作面准备工作量,生产效率和资源采出率显著提高。随着煤炭智能化开采技术的快速发展,超长运距智能化刮板输送装备的应用推广,将利于科技助力煤炭结构低碳升级,利于实现碳达峰、碳中和目标<sup>[1-2]</sup>。

截止 2020 年底,美国有 8 个工作面的长度超过 450 m,其中位于宾夕法尼亚州的 Bailey 煤矿的 Crabapple 工作面长度达 480 m<sup>[3-4]</sup>,使用 SGZ1200/3×1200 型刮板输送机。现阶段在国内各大矿区地下开采实践中,一般将大于 400 m 的工作面称为超长工作面。目前我国 450 m 以上超长工作面包括:陕煤集团小保当煤矿 457 m 工作面,使用 SGZ1100/3×1600 型刮板输送机;神东哈拉沟煤矿 450 m 工作面,使用 SGZ1000/2×1000 型刮板输送机;山东能源济宁二号煤矿 450 m 工作面,使用 SGZ1000/2×855 型刮板输送机。在超长工作面开采技术领域,王庆雄<sup>[5]</sup>采用现场观测和理论分析的方法对哈拉沟煤矿 450 m

超长综采工作面矿压显现规律进行分析。结果表明:亚关键层和主关键层共同作用导致工作面呈现大小周期来压特征,即主关键层破断导致亚关键层提前破断,进而造成了工作面来压步距和来压强度的大小交替变化。周期来压时基本顶分别在压力峰值区域发生破断,各破断岩块随着工作面推进沿工作面倾向发生回转下沉,导致其附近区域支架工作阻力增加。张金虎等<sup>[6]</sup>针对济宁二号煤矿二采区末采阶段形成孤岛工作面造成强矿压难控制等问题,提出了超长工作面合面的布置方式,综合对比分析了超长工作面(单面)、对拉、背拉、顺拉和分工作面布置方式的优缺点,设计了一种预掘中间巷道的 450 m 超长工作面布置方式,优化了超长工作面关键设备选型及管理技术,解决了超长工作面易断链和工作面直线度的控制难题,分析了超长工作面矿压显现特征,实现了首个全套国产装备的 450 m 超长工作面高效生产。王家臣等<sup>[7]</sup>介绍了目前美国煤炭地下长壁自动化开采的发展现状、存在的问题及发展方向。杜锋等<sup>[8]</sup>通过研究美国长壁开采自动化装备的发展及存在的问题,指出了未来长壁工作面开采自动化开采将以“全面自动化+人工辅助”的模式为主要发展方向。

当前对超长工作面开采技术研究较多,而对超



长工作面开采中刮板输送装备研究较少。以中厚煤层超长工作面智能化开采为研究背景,结合400~450 m开采实践,总结了现阶段超长工作面智能开采中刮板运输系统存在的技术问题,并有针对性地提出了具体的解决方案,探索了500 m超长运距智能刮板运输系统可行性,为中厚煤层超长工作面安全开采提供借鉴。

## 1 超长运距智能刮板输送装备发展现状

### 1.1 国内长运距刮板输送装备存在的问题

依据不同矿区、不同煤层、不同地质条件,现阶段我国煤炭开采在保持原有2~6 m煤层250~300 m工作面开采的基础上,工作面布置逐步向320、350、400、450 m发展<sup>[9-12]</sup>。在刮板输送装备领域,1 000 mm中等槽宽系列刮板输送机三驱装机功率由3×700 kW向3×855 kW、3×1 000 kW、向3×1 200 kW发展,两驱装机功率由2×700 kW向2×855 kW、2×1 000 kW、2×1 200 kW、2×2 000 kW发展,1 250 mm槽宽系列刮板输送机装机功率由3×1 000 kW向3×1 200 kW、3×1 600 kW发展。随着工作面布置长度的增加,刮板运输装备的装机功率、整机技术性能、可靠性均有了较大幅度的提升,国内400 m以上工程案例如下:

1)山东能源石拉乌素煤矿406 m工作面。煤层深度:660~700 m,煤层厚度:平均5.06 m,煤质硬度: $f$ (普氏硬度系数) $<2$ ,煤层倾角:平均 $2^{\circ}$ 左右。使用中煤张煤机公司SGZ1250/3×1200型刮板输送机,配套使用 $\Phi 52 \times 128/170$ 超扁平链。

2)陕煤集团小保当煤矿457 m工作面。煤层深度:约350 m,煤层厚度:平均2.5 m,煤质硬度: $f$ (普氏硬度系数) $<2$ ,煤层倾角:平均 $2^{\circ}$ 左右。使用西北天地奔牛公司SGZ1100/3×1600型刮板输送机,配套使用 $\Phi 56 \times 187$ 紧凑链。

3)神东哈拉沟煤矿450 m工作面。煤层深度:约400 m,煤层厚度:平均2.11 m,煤质硬度: $f$ (普氏硬度系数) $<3$ ,煤层倾角: $1^{\circ} \sim 3^{\circ}$ 。使用美国久益公司SGZ1000/2×1000型刮板输送机,配套使用 $\Phi 42 \times 128/164$ 扁平链。

4)济宁二号煤矿450 m工作面。煤层深度:500~560 m,煤层厚1.3~2.7 m,煤质硬度: $f$ (普氏硬度系数) $<3$ ,煤层倾角: $0^{\circ} \sim 5^{\circ}$ 。使用中煤张煤机公司SGZ1000/2×855型刮板输送机,配套使用 $\Phi 42 \times 146$ 紧凑链。

刮板输送机在以上工程案例中遇到的主要问题有:

1)运距越长,无用功率损耗越大,中部槽内煤炭突然增多时,越容易压死刮板输送机。

2)煤层起伏较大时,刮板输送机上窜下滑较为明显,且控制难度较大。

3)刮板链断链后,中部槽内煤量负荷较大时,液压马达难以带动,断链问题处理较为困难。

4)设备中间部件出现故障时,维护较为不方便,要求运输设备的可靠性较高。

5)因超长工作面煤量负荷的不均匀性较为显著,链条弹性伸长量较大,伸缩机尾在自动张紧时,液压缸伸缩幅度较大,且伸缩较为频繁,伸缩机尾容易出现卡滞,导致液压缸推出去缩不回来<sup>[13]</sup>。

### 1.2 国内长运距刮板输送装备智能化发展概况

随着煤炭智能化开采技术的快速发展,刮板输送机智能化水平有了大幅提升,现阶段刮板输送机智能化技术主要有变频技术、软启动技术、多电机转矩平衡技术、链条自适应控制技术、煤量检测及智能调速技术、断链检测及保护技术、智能传感技术、传动轴承振动监测技术、智能诊断及预警技术等<sup>[14-15]</sup>,可根据用户实际需求进行配套,可实现的性能如下:

1)软启动、多电机功率平衡、过载保护等技术的应用,有效减少对链轮、链条及电网的冲击,提高过载能力和重载启动性能,充分发挥电机及传动系统效率,延长整机运转周期和使用寿命。

2)全面感知设备状态,对于电机、减速器、冷却水、链轮、链条等零部件的状态实时监测,通过检测、建模分析、特征提取、数据预处理、故障类别推理和故障预警,及时发现设备隐患,合理安排检修,提高开机率。

3)激光雷达感应分析、视频分析和电流分析相结合的煤量检测方案,实现依据煤量调整设备速度,提高电机效率,降低设备损耗,具有显著的节能效果。

4)专家系统具有各种功能完善的知识库,为设备故障诊断、灾害预警和决策支持等提供有力保证。

5)协同工作及决策支持,与采煤机、液压支架、破碎机、转载机和带式输送机等综采工作面相关设备和辅助设备配合,实现采煤工艺机械化,满足综采工作面自动化采煤的需要,为实现智能化无人综采工作面奠定基础。

## 2 500 m超长工作面智能运输需要解决的主要技术难题

超长工作面(500 m)与普通工作面(300~400 m)相比,生产效率和资源采出率显著提高,开采经济效

益显著。对刮板输送系统而言, 500 m 超长运距不仅是铺设长度简单的加长, 必须考虑其应用矿井工作面地质条件、开采装备能力等因素。国内某矿规划布置 500 m 超长工作面, 要求保持原有采煤机、液压支架空间布局不变, 以减少设备投资。结合该工作面地质条件及原有装备的配套情况, 需要解决的主要技术难题归纳如下:

1) 中厚煤层开采中, 当工作面加长后, 因工作面煤壁在采煤机割煤后空顶处无约束, 变形不受限制, 矿压显现更加剧烈<sup>[16]</sup>。在超前压力作用下, 煤体裂隙发育, 易发生大面积片帮, 大块片帮煤增多, 如何将运量与装机功率进行合理匹配, 避免煤量瞬间增多时压死刮板输送机是确保煤炭安全运输的关键<sup>[17-20]</sup>。

2) 工作面加长后, 刮板输送机装机功率势必增大, 传动装置体积、重量均增大, 在保持原有采煤机、液压支架不变的情况下, 如何合理选型, 满足“三机”空间布局是开采能否成功的关键。

3) 传动装置体积、重量增大后, 重心位置后移, 而液压支架推移步距保持不变, 因传动装置的偏沉容易造成机头整体失衡、漂溜, 严重影响采煤的正常进行。

4) 若采用原有装备的刮板链, 中部槽内煤量负荷较大时容易断链, 如何提高链条的可靠性是防止断链的有效途径, 同时选择大功率液压马达是处理断链问题的必要手段。

5) 刮板输送机运距越长, 链条弹性变形越大, 越容易造成链条的松弛, 堆积后容易造成断链、断刮板、断链轮齿的事故, 如何对刮板链进行随煤量负荷张紧是解决问题的关键。

6) 运距越长, 机尾自动张紧时, 液压缸来回伸缩幅度较大, 伸缩机尾越容易出现卡滞, 如何防止机尾架变形和保持伸缩滑道的畅通是伸缩机尾伸缩自如的关键。

### 3 500 m 超长运距刮板运输技术可行性

#### 3.1 运量与功率的匹配

为了发挥工作面设备最大生产能力, 需要合理配置采煤机割煤能力和运输系统输送能力。根据国内某矿原有采煤机、液压支架空间布局不变的实际条件进行“三机”选型配套, 选定 1 750 mm(长)×1 000 mm(宽)型中部槽, 其运量满足 3 000 t/h 的生产要求。因工作面巷道断面空间受限, 交叉侧卸机头架难以布置, 故采用端卸式结构。

中厚煤层开采中, 当工作面加长后, 矿压显现更加剧烈, 势必导致大块片帮煤增多。运输问题的首要是考虑超长工作面煤量的突然增多对功率损耗的影响程度, 根据刮板输送机设计经验, 可以设计预留功率损耗增量百分比大于工作面增长量百分比的 1.2 倍, 即 500 m 与 400 m 相比长度增加了 25%, 400 m 刮板输送机总功率为 3 600 kW, 功率的预留损耗  $P_0$  应在原有损耗的基础上增加  $1.2 \times 25\%$ , 即:

$$P_0 \geq 1.2 \times 25\% P_1 \quad (1)$$

$$P_2 = P_1 + P_0 \quad (2)$$

按照式(1)、(2)推算, 装机总功率大于 4 680 kW 满足要求。因该矿工作面巷道空间受限, 三驱布置难以实现, 故仅考虑双驱布置。参考现有电机功率参数, 若使用 3 000 kW 电机, 总功率达 6 000 kW, 满足功率要求, 但是电机选型还需结合外形尺寸考虑。电机高度增加, 卸载高度也随之增加, 过高的卸载高度极易影响煤炭的顺畅卸载, 电机过宽则会占用行人空间, 影响端头支架的布置。因此电机选型时在满足使用功率的情形下, 尽可能外形尺寸要小。综上考虑采用 2 500 kW 变频一体电机, 装机总功率按 5 000 kW 进行技术配套, 采用端卸双驱布置形式, 在此条件下, 计算得到不同倾角输送机功率利用率见表 1。

表 1 功率利用率  
Table 1 Power utilization ratio

铺设长度/m	倾角/(°)	输送量/(t·h <sup>-1</sup> )	装机功率/kW	功率利用率/%	链条安全系数
500	-10	3 000	2×2 500	44	1.156
	-5			54.2	
	0			64	
	+5			73.3	
	+10			82.1	

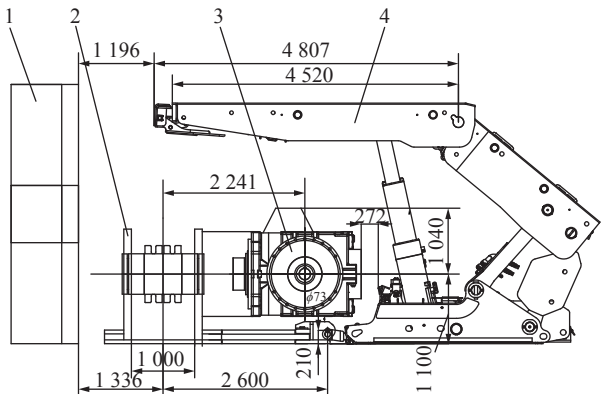
经验算, 近水平输送机功率利用率 64%。而普通 400 m 工作面近水平功率利用率为 80%, 原有功率预留 20% 为较为合理, 通过式(1)验算如下:

$$\text{即, } 36\% \geq 20\% + 1.2 \times 25\% \times 20\%$$

因此选择装机功率 2×2 500 kW 满足方案要求, 配套 2- $\Phi$ 56×187 中双链, 链条安全系数为 1.156, 符合煤量瞬间增多刮板输送机安全可靠运行的条件。

此外 2 500 kW 电机外形尺寸满足端头液压支架、刮板输送机、采煤机配套空间布局, 如图 1 所示。

综上, SGZ1000/5000 型刮板输送机满足该矿 500 m 工作面开采对刮板输送装备的需求。



1—采煤机；2—机头架；3—2 500 kW 减速器；4—液压支架

图 1 “三机”配套机头断面图

Fig.1 Three machine matching head section

3.2 2 500 kW 变频一体智能传动系统

变频一体智能传动系统主要由变频一体电机、矿用行星减速器、摩擦限矩器等组成,如图 2 所示。

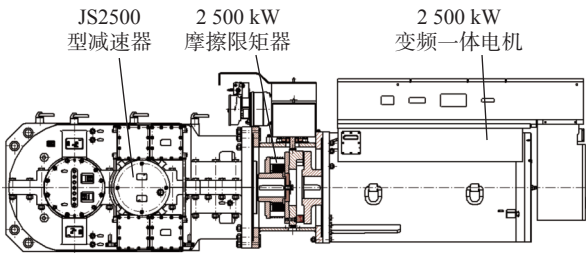


图 2 2 500 kW 传动系统

Fig.2 2 500 kW drive system

变频一体智能传动系统输出端与输送机的链轮组件联接,担负着提供原动力以及将原动力平稳地传递到工作机的作用,其可以通过降低电机转速、增大扭矩,实现软启动、过载保护和张紧链条等功能。为避免进口产品交货逾期、断供,在煤矿高端刮板输送装备领域实现了动力传递关键技术和关键部件全部国产化开发应用。

3.2.1 2 500 kW 变频一体电机的国产化

现阶段国产变频一体电机已完全替代进口,产品系列较为全面,且运行稳定性、可靠性和进口产品相当。单机功率最大为 3 000 kW,基本满足我国各大煤矿综采设备的配套使用。在 3 000 kW 变频一体电机的应用实践中发现散热是影响电机使用寿命的关键因素之一。为进一步提高变频电机散热性及使用寿命,2 500 kW 变频一体电机采用焊接式轴向折返型水道结构,机壳中沿轴向均匀分布若干条轴向水道,较 3 000 kW 变频一体电机的单向冷却水道,具有机械结构强,散热均匀的特点。此外变频一体电机绕组、轴承、变频器直接水冷的一体式散热网络

保证了各部分高效无死区散热。

3.2.2 2 500 kW 减速器的国产化

减速器是刮板链条运动的关键驱动装置,其作用主要为降速增扭,通过一定的减速比将电机输出的高速转动转化为链轮的低速转动,从而驱动链条进行一定速度的传输运动。

基于进口大功率减速器实际应用设计理论的优化和 1 600 kW 国产减速器的应用实践,研发了额定传递功率 2 500 kW 的大功率减速器,设计寿命 5 a,轴承寿命 $\geq 60\,000$  h。与 3 000 kW 进口减速器相比,外形尺寸占用空间较小,结构较为紧凑,可满足 500 m 超长工作面“三机”配套空间布局及刮板输送机链速 0~1.68 m/s 的运行需求。功率 1 600、2 500、3 000 kW 减速器的参数见表 2。

表 2 减速器参数对照

Table 2 Reducer parameter comparison

型号	长/mm	宽/mm	高/mm	速比 <i>i</i>	输出扭矩/(kN·m)
JS3000	2 715	1 825	1 340	39.33	727
JS2500	2 730	1 700	1 250	39.317	629.9
JS1600	2 600	1 750	1 350	33.3	341.7

2 500 kW 减速器与 1 600 kW 减速器相比,冷却效果、润滑效果、传递动力的均匀性 3 个方面均有提升:

1) 1 600 kW 减速器采用两组抽屉式冷却模块,冷却管路呈平行式布置。2 500 kW 减速器采用四组抽屉式冷却模块,冷却管路呈螺旋环绕式布置,两者相比 2 500 kW 减速器冷却效果得到了明显提升。

2) 1 600 kW 减速器输入轴采用传统的轴端泵单通道强制润滑技术,而 2 500 kW 减速器输入轴采用轴端泵双通道强制润滑技术,润滑效果及可靠性提升显著。

3) 1 600 kW 减速器行星机构内置 3 个行星轮机械结构,2 500 kW 减速器行星机构内置 4 个行星轮机械结构,减速器内部零件承受载荷更加均匀、运行平稳,实现了高精度、高效率、高可靠性的动力传递。

此外,2 500 kW 减速器还可按需配置轴承、润滑油、冷却水参数控制单元,实现智能监测及故障预警,提高了减速器的使用寿命。

3.2.3 2 500 kW 摩擦限矩器的国产化

摩擦限矩器是电机和减速器之间的一种过载保护装置,通过打滑来实现过载保护,被广泛应用在煤矿井下各种易受冲击的刮板输送设备中,有效保护



刮板链、减速器和链轮免受瞬时载荷过大或输送机卡住引起的过载冲击力的危害。

基于 1 600 kW 摩擦限矩器设计理论及进口 2 000、3 000 kW 上摩擦限矩器应用实践,开发了 2 500 kW 大功率摩擦限矩器,基本参数对照见表 3。

表 3 摩擦限矩器参数对照  
Table 3 Friction torque limiter parameter comparison

功率/kW	外直径/mm	宽/mm	过载倍数	保护转矩/(kN·m)
2 500	700	300	4~4.5	56~64
1 600	630	280	3.5~4	36~41

2 500 kW 摩擦限矩器由 18 组小直径摩擦副及 16 组圆柱螺旋压缩式弹簧组件构成,摩擦片采用高防爆非金属无石棉有机摩擦材料。而 1 600 kW 摩擦限矩器的摩擦副、圆柱螺旋压缩式弹簧组件仅为 12 组。两者相比,2 500 kW 摩擦限矩器保护转矩数值更高、范围更宽,能够维持恒定扭矩输出的同时避免了冲击载荷对链传动系统相关部件造成非必要的损坏,机械性能及运行稳定性均有了大幅提升。

3.3 传动系统的偏沉问题的解决

综采工作面刮板输送装备机头(尾)推移部是输送机与支护设备(液压支架)的联接纽带,推移部一

端与主机相联,另一端与液压支架相联,推移与拉架产生的力由推移部来传递,因此推移部必须有足够的强度和刚度。随着刮板输送机装机功率的增大,传动装置的体积、质量也随之增大。现阶段煤矿地下开采中,经常发生由于传动装置的偏斜,造成液压支架在推移机头(尾)架时,机头(尾)整体失衡,漂溜严重,推移难度加剧,直接导致因采煤机卧底量不足而无法切透三角煤,给采煤的顺利进行带来诸多不便。如图 3 所示,采用传统结构的机头推移部,近水平开采时,传动装置在重力影响下,传动装置偏斜约 0.5°,俯采时不发生偏斜,仰采时偏斜达到 3.5°。500 m 开采装备属于中等槽宽系列范畴,若配置 2 500 kW 大功率传动装置,其重量和体积更为庞大,中心距达 2 260 mm。为避免推移过程中出现漂溜现象,设计了端卸斜推式防漂溜的高可靠性的推移部(图 4),推移部下端为斜面结构,机头架与机头推移部相互限位。近水平开采和俯采时不发生偏斜,使得推移机头传动部时不发生漂溜。仰采时偏斜角度也得到了缓减,某矿其余工作面开采实践中仰采几率较小。斜推式推移部避免了因传动装置的偏沉造成推移部的抬底,避免了因漂溜影响采煤的正常进行,进一步提高了设备的可靠性。

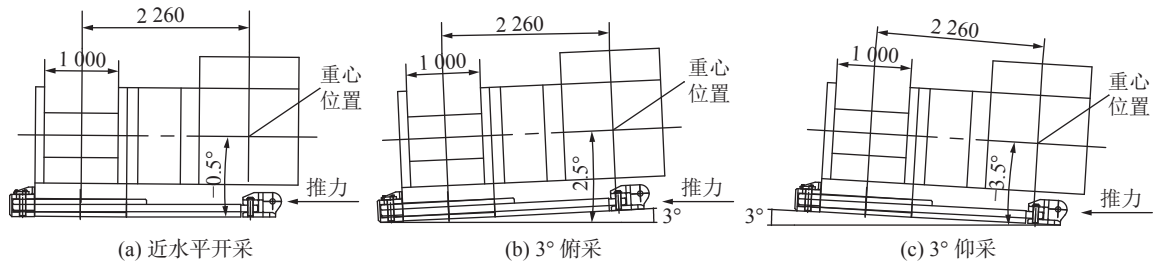


图 3 常规机头推移部近工作状态模型

Fig.3 The model of the near working state of the conventional nose shift

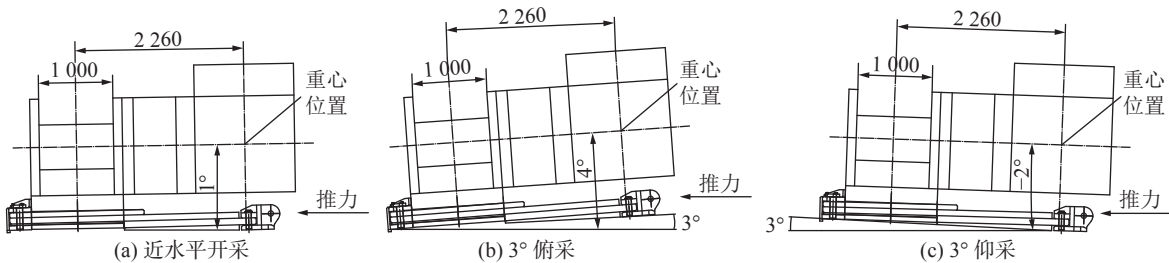


图 4 斜推式防漂溜的推移部工作状态模型

Fig.4 Working state model of pushing part for anti drift

3.4 断链处理较为困难问题的解决

在 400~450 m 超长工作面开采中,刮板输送机断链后,当中部槽内煤量负荷较大时,此时液压马达

难以带动,断链问题处理较为困难,针对这一难题,在 500 m 工作面开采中,采取措施如下:

1)加大链条规格,提高链条安全系数。现阶段

1 000 mm 中等槽宽系列刮板输送机配套最大链条规格为  $\Phi 52 \times 170$  超扁平链, 500 m 运距刮板输送机若仍采用  $\Phi 52 \times 170$  超扁平链, 安全系数为 1。为提高链条的安全系数, 研制了配套 1 000 mm 中部槽的  $\Phi 56 \times 187$  刮板链, 安全系数为 1.15, 可靠性提升了 15%。

2)应用数字马达控制系统, 提高制动扭矩。发生断链后, 当中部槽内煤量负荷较大时, 常规液压马达 MSE11 难以带动, 为此应用大扭矩数字液压马达 MS35 及紧链控制系统, 数字马达 PTU(液压张进装置)如图 5 所示。

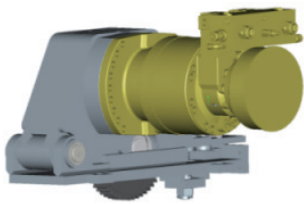


图 5 数字马达 PTU

Fig.5 Digital motor PTU

MSE11 与 MS35 基本参数见表 4, 几何排量、额定输出扭矩较之前分别提升 87%、65%。

表 4 液压马达参数对照

Table 4 Hydraulic motor parameter comparison

型号	排量/ ( $\text{mL} \cdot \text{r}^{-1}$ )	最大功率/ kW	最大转速/ ( $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ )	最大制动 扭矩/( $\text{N} \cdot \text{m}$ )
MSE11	1 678	50	130	11 840
MS35	3 143	70	112	19 600

马达紧链系统将控制阀功能进行拆分, 阀体与马达进行一体化设计, 控制供液的换向阀采用电磁液控换向阀, 布置在供液管路系统中, 可实现远程控制。该紧链系统无需连接控制阀与液压马达制动器接口之间的胶管, 避免胶管连接错误造成控制阀和马达损坏或污染。

在液压马达内部安置速度传感器, 在一体化的阀体上布置压力传感器, 在供液管路系统中布置流量传感器, 对液压马达紧链系统的各部位工作状态进行数字化, 可视化。通过程序控制, 实现一键式自动紧链操作, 紧链力可根据工作面布置情况和链条规格进行设置, 亦可根据设置的紧链长度进行自动紧链。

该紧链系统能够满足张紧链条需求, 最大紧链链速 1.09 m/min。能够拖动过载输送机, 并且在拖动过载输送机时, 马达不易损坏。

3.5 500 m 链条变形补偿问题及运行状态监测

3.5.1 500 m 超长运距张紧的问题

500 m 超长运距刮板输送机选型为: SGZ1000/2×2 500, 刮板链链速 1.68 m/s, 铺设长度 500 m, 运量 3 000 t/h, 按满负载计算得到最小行程为 0.87 m, 伸缩机尾驱动力应该大于 1 896 kN。按液压缸供液压力  $P = 31.5 \text{ MPa}$  计算, 若采用单侧液压缸推动, 其直径  $D$  计算如下:

$$D = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left( \frac{T}{P} \right)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \left( \frac{1\,896 \times 1\,000}{31.5} \right)} = 277 \text{ mm}$$

液压缸选型时, 为推力留有足够的余量是选型的前提, 结合现有液压缸规格, 选用缸径为 300 mm 的液压缸作为伸缩机尾的推力液压缸, 其推力可达 2 219 kN, 可靠性得到了极大提升。为使伸缩机尾保持平衡性, 采用双缸结构, 完全满足伸缩机尾对推移力的要求。

3.5.2 张紧控制流程

刮板输送机的刮板链作为一弹性体, 运行时因受到链轮组件的牵引力, 会产生弹性伸长, 导致其在下链道入口处出现松弛, 松弛过量便会堆积。因刮板链堆积而导致断链、断刮板、断链轮齿的事故时有发生。采用配置自动伸缩机尾对链条的张力进行自动调节, 伸缩机尾通过液压缸的伸缩来进行紧链或松链操作, 实现刮板链张紧力的无级调整, 可有效地减少输送机的紧链次数。

伸缩机尾常规控制方式是通过分析液压缸压力、预紧力及负载变化的关系来实现自动张紧。在 450 m 超长运距开采实践中, 由于负载变化频率太快, 刮板输送机运行过程中完全实现根据负载变化、液压缸压力来进行全自动伸缩实现较为困难, 液压缸频繁动作容易造成链条跳链, 严重影响使用寿命。而 500 m 超长运距的刮板输送机, 因煤流负荷的不均匀性更为显著, 刮板链长度增长势必会导致弹性伸长量增大。如何对链条弹性变形进行动态补偿, 实现对刮板链伸长量的实时预紧成为解决 500 m 超长工作面煤炭开采的安全智能运输问题的关键。

在刮板输送机运行过程中, 调节链条张紧度的一般措施如下: ①重载运行导致链条伸长造成机尾堆链, 调节液压缸控制机尾伸出; ②轻载运行机尾链条张力过大, 刮板连和链轮啮合声音异常, 调节液压缸控制机尾缩回; ③刮板输送机起动前自动伸出机尾, 保持适当的预紧力; ④刮板输送机停机后自动缩回机尾, 使刮板链疲劳应力的到释放。

机尾链条张紧程度与负载变化时液压缸压力的



变化趋势有关,理想的控制方式是监测液压缸压力的同时实时监测刮板输送机电机的输出转矩,根据转矩变化时液压缸压力的变化进行链条张力调节控制。基于 500 m 链条变形幅度和煤量的不均匀性,以及刮板输送机负载快速频繁变化及机械振动,实际运行过程中电机输出转矩(或电流)频繁变化,液压缸压力值不稳定,如采煤机在运输机头时和采煤机在机尾时煤量不同造成链条伸长状态也大不相同,针对 500 m 运距链条弹性变形的动态补偿问题,提出了按负荷分梯度对刮板链进行补偿的方案,即刮板输送机在停机调试之后,运行过程中按 20%、40%、60%、80%、100%、120% 负载预张紧,具体实施过程如下:

根据 500 m 运距设备规格,通过检测链条静态张力人工调节液压缸,记忆静态液压缸压力值  $P_0$ 。

划分压力区间段:按预紧压力  $P_0$ 、 $0.2 P_0$ 、 $0.4 P_0$ 、 $0.6 P_0$ 、 $0.8 P_0$ 、 $1.2 P_0$  为间距划分 6 个区间。

当采煤机运行至距离机头 100 m 时,预紧力按  $0.2 P_0$  执行,控制流程如图 6 所示。

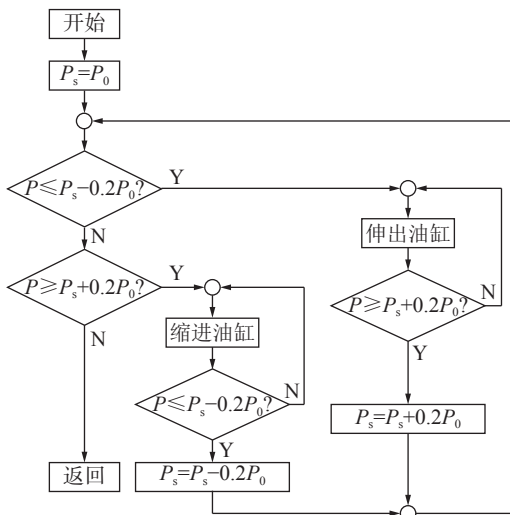


图 6 控制流程

Fig.6 Control flow

如此类推,采煤机在工作面的行进位置可反映刮板运输机内的煤量负荷,将负荷与预紧压力区段进行对应,其中  $1.2 P_0$  为刮板输送机重载启动时的状态。刮板输送机按预紧压力对刮板链分梯度进行张紧补偿可确保伸缩机尾下刮板链不产生堆积,为机头、机尾变频电机功率利用平衡奠定了基础。

### 3.5.3 AI 链条运行状态监测装置

为方便地面集控中心能够对机尾链条运行状态进行监控,在机尾架盖板上设置高速高清球形摄像

仪及补光灯,将视频信号传输至运输系统集成平台,利用计算机诊断技术和 AI 视频识别技术,通过图像采集、图像分析与数据处理,对断链、断刮板、链条过松、机尾堆链等工况进行检测,高速高清摄像机及补光灯安装位置如图 7 所示。

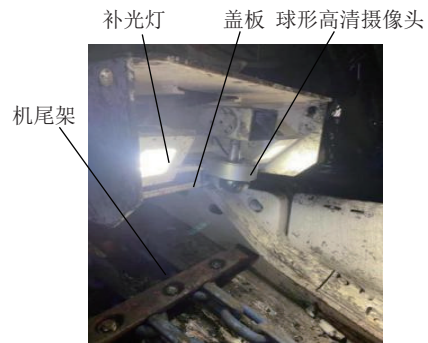


图 7 高清摄像机安装位置

Fig.7 Hd camera installation position

### 3.5.4 机尾架伸缩滑道结构优化及自动冲洗

超长工作面开采实践中机尾活动机架伸出去缩不回来的原因主要有:①伸缩机尾架刚度不足导致固定架变形,加之液压缸伸缩幅度较大,出现伸出去缩不回来的现象;②伸缩滑道内积煤导致活动机架缩不回去;③液压缸护罩内积煤泥水使液压缸活塞杆周围逐渐变成硬块,导致液压缸缩不回去。

针对伸缩机尾架刚度不足造成液压缸缩回过程固定架变形的问题,主要从结构、材料、制造工艺上来解决,结构上尽可能增加伸缩滑道的导向长度并采用正 T 型搭接结构如图 8 所示,以此来抵御变形问题。所涉及的材料尽可能选用高强板,制造工艺上严格执行焊接工艺,防止焊接变形。

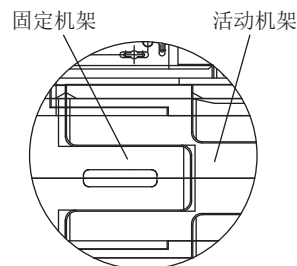


图 8 正 T 型搭接结构

Fig.8 Positive T lap structure

针对伸缩滑道内积煤、液压缸护罩内积煤泥水,导致活动机架缩不回去的问题,在伸缩机尾两侧的伸缩滑道中板处设置冲水喷头,利用高压乳化液及时冲洗滑道,防止滑道内煤泥的堆积,如图 9 所示。

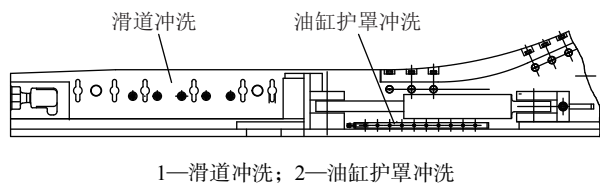


图9 伸缩机尾

Fig.9 Telescopic tail

## 4 工程实践

### 4.1 工程概况

500 m 超长工作面刮板智能输送技术在国内某矿进行了现场应用。为减少巷道开拓的资金投入,该矿将原有 200 ~ 250 m 工作面开采方式进行优化,陆续布置 400 ~ 500 m 超长工作面。114158 工作面是该矿第一个超长工作面,该工作面煤层赋存较稳定,煤层厚度 3.0 ~ 3.9 m,平均厚度 3.5 m,煤层厚度较稳定,产状平稳,近水平开采,煤层结构简单,不含夹矸。114158 工作面设计走向长度 2 045 m,预计推采长度 1 900 m。为节约设备投资成本,该矿要求保持原有液压支架、采煤机配套空间不变,刮板输送机围按 500 m 工作面配置。

### 4.2 应用效果

500 m 超长工作面刮板智能输送技术与装备目前已完成井下工业性试验,井下现场如图 10 所示。



图10 井下现场应用

Fig.10 Downhole field application

井下工业性试验表明:该套设备运量与装机功率匹配合理,煤量突然增多时未发生压死刮板输送机的现象。机头(尾)推移部稳定可靠,2 500 kW 变频一体智能传动系统占用空间较小、传递扭矩精准。数字液压马达处理切链问题时方便省力。伸缩机尾按负荷分梯度自动张紧时未出现卡滞,未发生因堆链造成的断链事故。采用上述技术方案的刮板输送技术保障了煤炭的安全、高效运输,同时为 500 m 超长工作面智能开采提供了技术参考。

## 5 结论与展望

针对现阶段国内中厚煤层开采领域 400 ~ 450 m

工作面智能开采实践中刮板运输系统存在的问题,开展了 500 m 超长工作面智能刮板输送的应用研究。2 500 kW 变频一体机、减速器、限矩器的国产化的研制,弥补了国产刮板输送机高端装备存在的技术短板;斜推式防漂溜推移技术解决了刮板输送设备使用过程中存在的因传动部偏沉造成推移部漂溜的问题;数字化大扭矩马达的应用解决了断链处理困难的技术难题;链条负荷分量分梯度变形补偿控制、AI 链条运行状态监测装置、机尾架伸缩滑道结构优化及自动冲洗提高了 500 m 运距刮板输送机的自能张紧的可靠性。超长工作面智能开采是煤炭开采技术的发展趋势,应针对不同煤层、不同地质条件研究超长工作面刮板输送技术,提高煤炭开采效益。

### 参考文献(References):

- [1] 谢和平,王金华,姜鹏飞,等.煤炭科学开采新理念与技术变革研究[J].中国工程科学,2015,17(9):36-41.  
XIE Heping, WANG Jinhua, JIANG Pengfei, et al. New concepts and technology evolutions in scientific coal mining[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(9): 36-41.
- [2] 唐永志,傅家德,李万峰,等.深部大采高超长工作面开采技术研究及展望[J].煤炭技术,2015,34(12):15-17.  
TANG Yongzhi, FU Jiade, LI Wanfeng, et al. Prospect and research on mining technology in ultra Long deep large height fully mechanized mining face[J]. Coal Technology, 2015, 34(12): 15-17.
- [3] 李西蒙,刘长友, Syd S. Peng. 美国快速推进长壁工作面开采设备发展现状[J].煤炭科学技术,2016,44(1):166-171.  
LI Ximmeng, LIU Changyou, Peng S S. Mining equipment development status of fast advance longwall face in US[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 166-171.
- [4] 彭赐灯,杜 锋,程敬义,等.美国长壁工作面自动化发展[J].中国矿业大学学报,2019,48(4):693-703.  
PENG Syd S, DU Feng, CHENG Jingyi, et al. Automation in U. S. Long wall coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(4): 693-703.
- [5] 王庆雄,鞠金峰.450 m 超长综采工作面矿压显现规律研究[J].煤炭科学技术,2014,42(3):125-128.  
WANG Qingxiong, JU Jinfeng. study on mine strata pressure behavior law of 450 m ultra long fully mechanized coal mining face[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 125-128.
- [6] 张金虎,李明忠,胡 健,等.超长工作面布置方式优化设计与设备选型配套[J].煤炭工程,2021,53(7):7-10.  
ZHANG Jinhu, LI Mingzhong, HU Jian, et al. Optimized design of super-long working face layout and the equipment selection and matching[J]. Coal Engineering, 2021, 53(7): 7-10.
- [7] 王家臣, PENG Syd S, 李 杨. 美国煤炭地下开采与自动化技术进展[J].煤炭学报,2021,46(1):36-45.  
WANG Jiachen, PENG Syd S, LI Yang. State-of-the-art in underground coal mining and automation technology in the United

- States[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 36–45.
- [ 8 ] 杜 锋, 彭赐灯. 美国长壁工作面自动化开采技术发展现状及思考[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(5): 949–956.
- DU Feng, PENG Syd S. The state-of-the-art and thought of automated longwall mining in the United States[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 949–956.
- [ 9 ] 王国法, 赵国瑞, 任怀伟. 智慧煤矿与智能化开采关键核心技术分析[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 34–41.
- WANG Guofa, ZHAO Guorui, REN Huaiwei. Analysis on key technologies of intelligent coal mine and intelligent mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 34–41.
- [ 10 ] 王国法, 范京道, 徐亚军, 等. 煤炭智能化开采关键技术创新进展与展望[J]. 工矿自动化, 2018, 44(2): 5–12.
- WANG Guofa, FAN Jingdao, XU Yajun, *et al.* Innovation progress and prospect on key technologies of intelligent coal mining[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(2): 5–12.
- [ 11 ] 刘 峰, 曹文君, 张建国. 持续推进煤矿智能化 促进我国煤炭工业高质量发展[J]. 中国煤炭, 2019, 45(12): 32–36.
- LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming. Coal mine intellectualization: the core technology of high quality development[J]. China Coal, 2019, 45(12): 32–36.
- [ 12 ] 王家臣, 王兆会, 杨 杰, 等. 千米深井超长工作面采动应力旋转特征及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 876–888.
- WANG Jiachen, WANG Zhaohui, YANG Jie, *et al.* Mining-induced stress rotation and its application in longwall face with large length in kilometer deep coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 876–888.
- [ 13 ] 范京道, 徐建军, 张玉良, 等. 不同煤层地质条件下智能化无人综采技术[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 43–52.
- FAN Jingdao, XU Jianjun, ZHANG Yuliang, *et al.* Intelligent unmanned fully-mechanized mining technology under conditions of different seams geology[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 43–52.
- [ 14 ] 刘会利, 郭彦科. 浅埋中厚煤层超长工作面未采矿压规律研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(3): 6–10.
- LIU Huili, GUO Yanke. Law of mine pressure during the end mining of super-long working face in shallow medium-thick coal seam[J]. Coal Engineering, 2021, 53(3): 6–10.
- [ 15 ] 王家臣, 杨胜利, 杨宝贵, 等. 深井超长工作面基本顶分区破断模型与支架阻力分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 54–63.
- WANG Jiachen, YANG Shengli, YANG Baogui, *et al.* Roof sub-regional fracturing and support resistance distribution in deep longwall face with ultra-large length[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 54–63.
- [ 16 ] 陈忠辉, 谢和平, 李全生. 长壁工作面采场围岩铰接薄板组力学模型研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 172–176.
- CHEN Zhonghui, XIE Heping, LI Quansheng. Study on plategroup mechanical model for main roof of longwall face[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 172–176.
- [ 17 ] 缪协兴, 钱鸣高. 超长综放工作面覆岩关键层破断特征及对采场矿压的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 45–47.
- MIAO Xiexing, QIAN Minggao. Broken feature of key strata and its influence on rock pressure in super-length fully-mechanized coal face[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 45–47.
- [ 18 ] 文 虎, 王 文, 陶维国, 等. 超长综采工作面撤架期间煤自燃预测及防控技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 167–173.
- WEN Hu, WANG Wen, TAO Weiguo, *et al.* Study on coal spontaneous combustion prediction and control technology during withdrawal period of super long fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 167–173.
- [ 19 ] 宋选民, 顾铁凤, 闫志海. 浅埋煤层大采高工作面长度增加对矿压显现的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(S2): 4007–4012.
- SONG Xuanmin, GU Tiefeng, YAN Zhihai. Research on the influence of the increase in the length of the large mining face in shallow buried seams on the appearance of ground pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S2): 4007–4012.
- [ 20 ] 王生彪, 黄庆享. 浅埋煤层 400 m 超长综采工作面矿压规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 75–80.
- WANG Shengbiao, HUANG Qingxiang. Study on roof weighting of 400 m fully-mechanized mining face in shallow coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 75–80.