



煤矿超长走向综放工作面远距离智能供液供电技术研究与应用

张传明 臧庆凯 牛永明 郭辉 李然 张东岳

引用本文:

张传明, 臧庆凯, 牛永明, 等. 煤矿超长走向综放工作面远距离智能供液供电技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 415-425.

ZHANG Chuanming, ZANG Qingkai, NIU Yongming. Research and application of remote intelligent fluid supply and power supply technology in coal mine super-long strike fully mechanized caving face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 415-425.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2021-1141>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

工作面智能供液技术进展与应用

Progress and application of intelligent fluid supply technology in working face

煤炭科学技术. 2022, 50(12): 247-253 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-0487>

特厚煤层综放工作面智能控制关键技术研究

Study on key technology of intelligent control in fully-mechanized top coal caving face in extra thick seam

煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/74be4f1f-0ac0-4a87-9049-cf0b22e6bd95>

综采工作面分布式蓄能供液系统研究及应用

Research and application of liquid supply system with distributed energy accumulators in fully-mechanized mining face

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 238-247 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1115>

高瓦斯综放工作面智能放煤关键技术研究与应用

Research and application of key technology of intelligent coal caving in high gas fully-mechanized top coal caving face

煤炭科学技术. 2023, 51(10): 252-265 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1407>

超大采高工作面乳化液泵关键技术研究及工程应用

Research on key technology and engineering application of emulsion pump in super-high mining face

煤炭科学技术. 2024, 52(11): 153-162 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-1019>

千万吨级综放工作面智能化放煤理论及关键技术

Theory and key technologies for intelligent fully-mechanized top-coal caving faces of annual production of millions of tons

煤炭科学技术. 2024, 52(9): 48-67 <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0880>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



张传明, 臧庆凯, 牛永明, 等. 煤矿超长走向综放工作面远距离智能供液供电技术研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 415-425.
ZHANG Chuanming, ZANG Qingkai, NIU Yongming, *et al.* Research and application of remote intelligent fluid supply and power supply technology in coal mine super-long strike fully mechanized caving face[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 415-425.

煤矿超长走向综放工作面远距离智能供液供电技术 研究与应用

张传明¹, 臧庆凯¹, 牛永明¹, 郭 辉¹, 李 然², 张东岳³

(1. 山东新巨龙能源有限责任公司, 山东 菏泽 274918; 2. 北京天玛智控科技股份有限公司, 北京 101399;
3. 华夏天信智能物联股份有限公司, 山东 青岛 266510)

摘要:在煤矿长走向工作面工况下, 供液供电设备通常采取移动式回撤的方法来跟随工作面的开采, 该生产方式具有移动列车设备数量多、不安全、动力电缆及管理混乱、铺设单轨吊或地轨工程量较大等缺点, 不利于实现煤矿安全生产及减人降耗的长远目标。基于目前综放工作面刮板输送机、乳化液泵站传统驱动及近距离供液供电方式存在的问题, 研制大功率远距离输出高压防爆组合变频器和智能型远距离集成供液系统, 实现工作面供电供液系统装备的优化配套及远距离供电供液输出已经迫在眉睫。整个项目分为前后部刮板输送机远距离变频驱动项目和智能型泵站集成系统远距离供液项目。前后部刮板输送机远距离变频驱动项目的研究为: 新巨龙煤矿 2305 工作面采用 2 台 BPJV-3×1 600/3.3 矿用隔爆兼本质安全型高压组合变频器, 采用“一拖二”模式用于驱动机头、机尾 2 台 1 200 kW 电动机, 采用变频远距离供电技术实现刮板输送机电机的重载软启动。智能型泵站集成系统远距离供液项目为: 采用高压大流量高可靠智能型乳化液泵站、喷雾泵站及自动配液和多级过滤系统的方案形成一个集成供液系统, 该系统通过铺设长距离主供液管、主回液管、清水管路, 将泵站系统放在距离工作面较远的硐室, 形成了向各液压支架用液点供给高压乳化液、喷雾降尘冷却清水以及接收低压回液的一套管路供回液系统。该项目在新巨龙煤矿 2305 工作面的顺利实施, 对国内冲击地压复杂地质条件下的大型煤矿新型工作面远距离供液、供电系统的设计起到了显著的引导和示范作用。该项目成果可显著降低综放工作面安全事故发生率, 减少设备检修维护成本、降低设备机械磨损, 提高设备使用寿命, 提高系统可靠性, 保证工作面设备的开机率。同时, 能够实现煤矿工作面减人提效、安全生产、节能降耗的目标, 对确保综放工作面的安全高产高效具有重要意义。与国内外同类技术比较, 在电站拉移方式、供电供液距离、集中控制方式、检修时间、安撤周期等方面均有明显优势, 可在同行业采煤工作面推广应用。

关键词: 智能供液; 智能供电; 远距离供电供液; 高次谐波; LR 滤波

中图分类号: TD421 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2024)S2-0415-11

Research and application of remote intelligent fluid supply and power supply technology in coal mine super-long strike fully mechanized caving face

ZHANG Chuanming¹, ZANG Qingkai¹, NIU Yongming¹, GUO Hui¹, LI Ran², ZHANG Dongyue³

(1. Shandong Xinjulong Energy Co., Ltd., Heze 274918, China; 2. Beijing Tianma Intelligent Control Technology Co., Ltd., Beijing 101399, China; 3. Huaxia Tianxin Intelligent Internet of Things Co., Ltd., Qingdao 266510, China)

Abstract: In the working conditions of long-strike coal mine faces, the traditional approach for liquid supply and power supply equipment is mobile withdrawal to follow the mining progress. However, this production method has several drawbacks. It involves a large number of mobile train equipment, posing safety risks. There are also issues such as chaotic management of power cables, and a large amount of work

收稿日期: 2023-09-21 责任编辑: 常 琛 DOI: 10.12438/cst.2021-1141

作者简介: 张传明(1971—), 男, 汉族, 山东泰安人, 高级工程师, 本科。Tel: 15753011986, E-mail: hellozqk@163.com

in laying monorail cranes or ground rails. These disadvantages are not conducive to achieving the long-term goals of safe coal mine production, personnel reduction, and consumption reduction. Considering the problems existing in the traditional drive and short-distance liquid supply and power supply methods of scraper conveyors and emulsion pump stations in fully mechanized caving faces, the development of high-power, long-distance output high-voltage explosion-proof combined frequency converters and intelligent long-distance integrated liquid supply systems to optimize the equipment matching of the working face power supply and liquid supply systems and achieve long-distance power supply and liquid supply output is extremely urgent. The entire project is divided into two parts: the long-distance frequency conversion drive project for the front and rear scraper conveyors and the long-distance liquid supply project for the intelligent pump station integrated system. For the long-distance frequency conversion drive project of the front and rear scraper conveyors, in the 2305 working face of Xin Julong Coal Mine, two sets of BPJV-3×1 600/3.3 mine-used explosion-proof and intrinsically-safe high-voltage combined frequency converters are adopted. The "one-drive-two" mode is employed to drive two 1 200 kW motors at the head and tail of the conveyor. The frequency conversion long-distance power supply technology is utilized to achieve the heavy-load soft start of the scraper conveyor motors. For the long-distance liquid supply project of the intelligent pump station integrated system, a solution integrating high-pressure, large-flow, highly reliable intelligent emulsion pump stations, spray pump stations, automatic liquid-mixing, and multi-stage filtration systems is adopted to form an integrated liquid supply system. By laying long-distance main liquid supply pipes, main liquid return pipes, and clean water pipelines, and placing the pump station system in a chamber far from the working face, a pipeline liquid supply and return system is established to supply high-pressure emulsion, spray dust suppression and cooling clean water to each hydraulic support liquid-using point and receive low-pressure return liquid. The successful implementation of this project in the 2305 working face of Xin Julong Coal Mine has played a significant guiding and exemplary role in the design of long-distance liquid supply and power supply systems for new working faces of large coal mines under complex geological conditions of rock bursts in China. The project results can significantly reduce the incidence of safety accidents in fully mechanized caving faces, cut down equipment maintenance and repair costs, reduce equipment mechanical wear, extend equipment service life, enhance system reliability, and ensure the equipment startup rate in the working face. Meanwhile, it is of great significance for achieving the goals of personnel reduction, efficiency improvement, safe production, energy conservation, and consumption reduction in coal mining faces, and ensuring the safety, high yield, and high efficiency of fully mechanized caving working faces. Compared with similar domestic and foreign technologies, it has obvious advantages in aspects such as power station pulling-moving mode, power supply and liquid supply distance, centralized control mode, maintenance time, installation and removal cycle, etc., and can be widely promoted and applied in coal mining faces of the same industry.

Key words: smart for liquid; intelligent power supply; remote power supply for liquid; higher harmonic; LR filtering

0 引 言

目前国内外煤矿工作面普遍采用近距离供液方式,其泵站供液设备布置在靠近工作面处的顺槽设备列车上,导致巷道空间非常狭小,并且存在采动压力变化大、顶板来压剧烈、巷道变形严重等问题^[1]。因此,在实际工作中会出现设备列车移动困难的情况,同时,还存在设备列车移动过程中危险系数高、设备列车频繁移动使工人的劳动强度增大、巷道起伏引起泵站吸空等一系列问题^[2-3]。工作面远距离供液可以有效地解决上述难题,该技术的思路是将移动变电站、乳化液泵站、喷雾泵站、液箱等设备全部从工作面巷道附近移出来,布置到巷道外端的联络巷内。

随着煤矿生产产能的逐步提高,矿井下工作面刮板输送机的装机容量、铺设长度、运量在不断增加,设备常处于高负荷运转状态,系统启动频繁。工作现场环境复杂,在与综采设备配套使用中,由于下落煤块大小的不确定性,且采煤机的割煤速度和行走

方向也不断变化,刮板机的负载或轻、或重、甚至过负荷,且持续时间没有规律性^[4]。在启动负载或运行负载冲击较大且极不稳定的状态下刮板输送机经常发生卡链、断链、脱齿、底链落道等故障。作为挠性传动件的刮板链,需要定期紧链,这就要频繁启动电机且经常在重载或满载下启动,这些都会对电机造成一定的损害,有时甚至烧毁电机。近几年,矿用防爆变频器的应用有效地解决了以上问题。

基于上述刮板输送机、乳化液泵站传统驱动方式存在问题,为了适应国内开采技术不断发展的需求,响应综采工作面智能化升级的要求。研制了大功率远距离输出高压防爆组合变频器和智能型远距离集成供液系统,实现工作面供电供液系统装备的优化配套及远距离供电供液输出。本项目的研究成果可完全取消工作面移动式列车或单轨吊设施,显著降低综采工作面安全事故发生率,减少设备检修维护成本及时间、降低设备机械磨损,提高设备使用寿命,提高系统可靠性,保证工作面设备的开机率^[5]。同时,能够实现煤矿工作面减人增效战略目标,对确

保综放工作面的安全高产高效具有重要意义。

本项目通过调研山东新巨龙能源有限责任公司(以下简称新巨龙煤矿)2305工作面情况,确定合理的设计输入需求,研究设计基于超长走向综放工作面智能远距离供液、供电技术的整体设计方案。

1 远距离变频驱动方案及技术研究

1.1 高压变频器及移动变电站容量设计

前部、后部刮板输送机型号为SGZ1200/2400,均配套2台3300V电压等级电机,额定功率为1200kW,额定电流为250A,额定转速为1484r/min。

高压变频器选型采用需用系数法进行计算^[6-7]:

$$S = \sum P_N \frac{K_X}{\cos\varphi} \quad (1)$$

式中: P 为变频器额定功率,kW; P_N 为参加计算的所有用电设备额定功率之和,kW; $\cos\varphi$ 为VVVF、PWM整流方式变频器平均功率因数,取0.86^[7]; K_X 为需用系数(刮板输送机可能出现的最大长时负荷率),取1.1(功率富裕系数×过载系数/变频器效率)。

$$\sum P_N = 1200 + 1200 = 2400 \text{ (kW)} \quad (2)$$

$$S = \sum P_N \frac{K_X}{\cos\varphi} = 2400 \times 1.1 \div 0.86 = 3069.76 \text{ (kW)} \quad (3)$$

因此,选用一台总功率大于3069.76kW的高压变频器,采用“一拖二”模式,即能满足综放工作面刮板输送机使用要求。考虑到新巨龙煤矿2305工作面作为公司主力出煤工作面,是保障生产的关键力量,因此在确定变频器驱动数量时考虑冗余设计选型原则,确定采用“2用1备”的选型策略^[8-9]。

综上所述,配套的前部、后部刮板输送机远距离供电的高压组合变频器具备3个输出回路(2用1备),单回路功率选择1600kW(1600kW>3069.76kW/2,满足设计选型计算值)。矿用隔爆兼本质安全型高压组合变频器型号为BPJV-3×1600/3.3。

1.2 前后部刮板输送机变频驱动方案设计

变频器及配套移动变电站安装于固定硐室,硐室位于顺槽机头位置,变频器安装位置距采煤工作面3000m。工作面后部刮板输送机机头、机尾2台电机使用1台BPJV-3×1600/3.3型高压组合变频器驱动;前部刮板输送机机头、机尾2台电机使用1台BPJV-3×1600/3.3型高压组合变频器驱动;如图1所示。该方案可实现对前后部刮板输送机机头机尾任意一台电机的单独启停控制以及主从联合启

停控制,变频器内部采用高速总线通信方式,可自动调整自身的输出,实现主从运行及动态功率平衡。

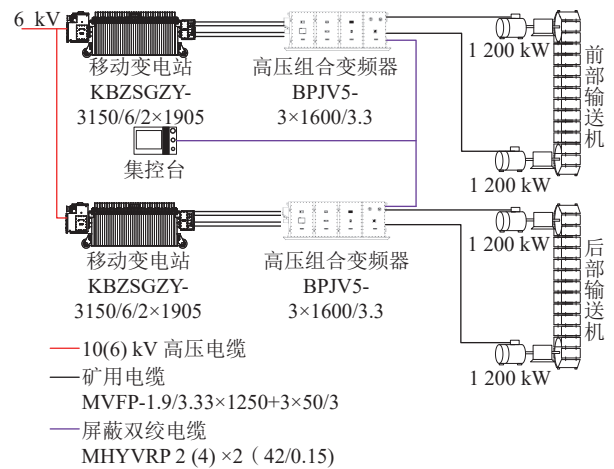


图1 长距离供电前部、后部刮板输送机驱动系统效果

Fig.1 Long distance power supply front and rear scraper conveyor drive system rendering

1.3 变频器远距离供电技术研究

1.3.1 远距离供电存在的技术问题分析

变频器和电动机通常使用长电缆连接,每根电缆的几何尺寸、材料、电缆之间的相对位置都近似相等^[10],因此电缆中的基本参数有分布电感 L_{odx} 和分布电容 C_{odx} ,两者经过一定的计算得到电缆波阻抗,当电缆波阻抗和电机等效阻抗匹配时,电压信号可以顺利地进行传输,如果两者不匹配,电压信号就会产生反射,这样电压波分为两部分,一部分为原来的入射波,另一部分为后来产生的反射波,两者叠加会使得电机端电压加倍。将使电机侧和电缆各处的绝缘高限升高,绝缘成本加大,甚至造成电机绝缘失效。变频器输出电缆过长,易造成线路压降严重,导致电机无法正常实现重载启动能力,动力电缆分布由电容/电抗等效示意图如图2所示。

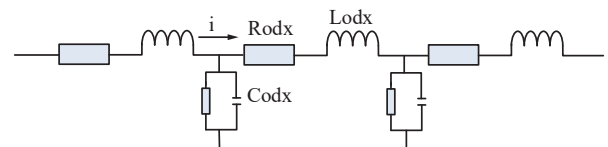


图2 远距离动力电缆分布电容/电抗等效示意

Fig.2 Equivalent diagram of distributed capacitance / reactance of long distance power cable

1.3.2 远距离供电技术问题的解决措施

1) 为有效抑制高频 dV/dt (电压变化率)、共模电压、轴承电压和轴承电流,变频器内置输出LR滤波单元,能够有效吸收变频器输出产生的电压尖峰,降低输出至电机端的电压峰值^[11]。同时有效降低电动

机绕组侧高压谐波的含量,减少电磁干扰,提高电动机的使用寿命,延长变频器输出电缆长度。

2) 变频器采用三电平逆变结构,该结构决定了变频器输出电压理论最高峰值为7500VDC。通常绝缘等级为H级的电机绕组间耐压值能超过12000VAC,耐压峰值大于16000VDC^[12]。因此,长电缆模式下,变频器输出电压最大理论峰值显著小于电机相间耐压值。

3) 确定变频器输出载波频率300Hz左右。同等周期下,输出波形产生的电压尖峰数量显著小于国内同类产品,减少了电压尖峰对电机的绝缘冲击,提高电机使用寿命。

4) 变频器采用大量叠成母排设计工艺

变频器中从直流储能电容至逆变器的器件之间的直流母线上的寄生电感通常在硬开关逆变器中,切换时的瞬时过电压会使器件过热,甚至有时使逆变器失控并超过器件的额定安全工作区,限制了开关工作频率的提高^[13]。因此如何降低母线寄生电感成为一个影响变频技术发展的关键技术之一。

由于变频器直流环节存在杂散电感,在IGBT关断时会出现过电压,加上直流母线电压VDC,IGBT电压 V_{ce} 可能会超过IGBT最高耐压值 V_{cemax} ,导致IGBT因过电压损坏,电压尖峰原理如图3所示。

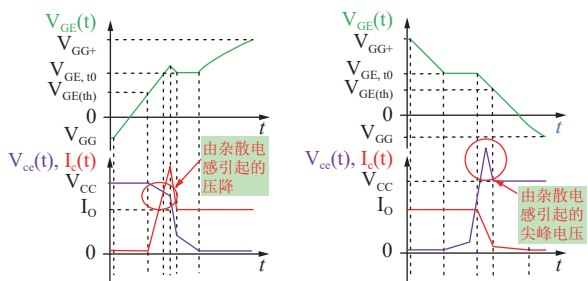


图3 杂散电感引起的IGBT功率器件通断过电压尖峰示意
Fig.3 Schematic diagram of on-off overvoltage spike of IGBT power devices caused by stray inductance

叠成母排技术采用正负极平行层叠分布的结构形式降低线路分布电感,从而降低功率元件两端的反向尖峰电压,降低功率元件对电压保护吸收电路的要求,提高功率元件运行的可靠性和稳定性,同时提高了电路的集成度,便于设备维护。另外,叠成母排结构DC+DC-形成的母线电容,对电路中的高频噪声具备一定滤波效果。

5) 变频器具备远距离供电输出电压补偿功能,能够通过对输出侧电机的辨识实现自动升压补偿,保证电机启动转矩达到2.2倍。

刮板输送机属于频繁启停设备,实际使用过程

中经常出现重载压刮板输送机的现象^[14],变频器通过内置电压PID补偿功能模块,提高输送机重载启动能力。具体技术实施方式:变频器通过电机输出电流及转差率相结合的数学模型,判断启动时电机的输出力矩,当输出力矩无法满足速度要求时,变频器在输出频率不变的前提下,通过PID电压补偿模块自动提升输出电压,保证电机输出转矩的提升,达到重载启动的效果。

1.4 变频器对电网影响的分析研究及应对措施

变频驱动刮板输送机方案的成功应用,减少了启动过程对刮板输送机链轮、链条、中部槽等机械结构的冲击,减少机械部件备件使用量,提高刮板输送机使用寿命,降低刮板输送机全生命使用周期成本^[15]。但也会对电网产生一定的影响,本项目研究组成员对变频启动对电网的影响分析体现在2方面:1)变频启动瞬间,对前级电网的电压波动影响力;2)变频运行过程中,输入侧谐波对电网波形的影响力。

1.4.1 变频器启动瞬间对电网的影响分析

刮板输送机传统的“组合开关+双速电机”启动方式,采用直接工频启动,启动瞬间具有“电压高、速度快、电流大”的特点^[16],高电压大电流的启动方式必然需要电网瞬间提供非常大的电能,会引起电网电压的瞬间跌落,严重时可能引起电网下的第3方电气设备因欠压无法正常工作。传统双速启动方式与变频启动方式下刮板输送机电机端电压/电流变化曲线及网测电压/电流变化曲线如图4所示。

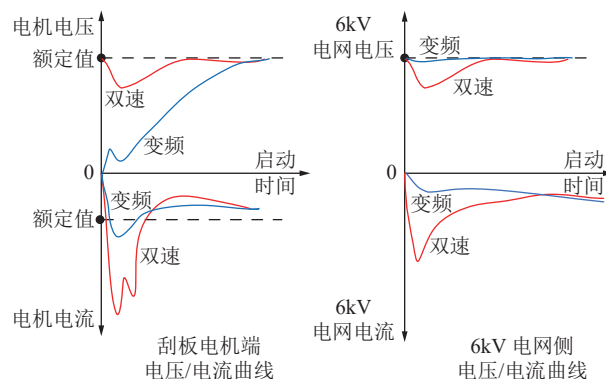


图4 不同驱动模式下的网测波动对比

Fig.4 Comparison chart of online measurement fluctuation under different driving modes

变频器启动属于“低压大电流”的输出方式,对电网瞬间冲击小,不会造成大负荷启动瞬间引起的电网电压跌落现象。

1.4.2 变频器谐波对电网的影响分析

由于变频器整流回路的快速换相会产生一定的

高次谐波,可达35次以上,高次谐波会对通信线路产生一定的干扰。这种整流电路结构简单,但是输入电流中含有较高的谐波分量,输入电流的5次谐波可达20%,7次谐波可达12%。这种整流电路总的谐波电流失真约为30%^[17],由于输入谐波较高,要配备输入谐波滤波器,滤波器的设计与电网参数和负载工况都有关系,一旦参数和工况发生变化,滤波器需重新调整,十分不便,且影响滤波效果。但此方案较为经济,一般适用于变频器占电网负荷比例较小时安装。

12脉冲整流电路如图5所示,电路由2组晶闸管整流桥串联而成,分别由输入变压器的2组副边(星型和三角形,互差30°电角度)供电。这种整流电路的优点是把整流电路的脉冲数由6脉冲提高到12脉冲,带来的好处是大大减少了5次和7次谐波电流的比例,12脉冲整流结构总谐波电流失真约为10%左右^[18]。(谐波电流近似为基波电流的 h 倍, h 为谐波次数, $h=n \times p \pm 1$,其中 n 为自然数, p 为脉冲数。)

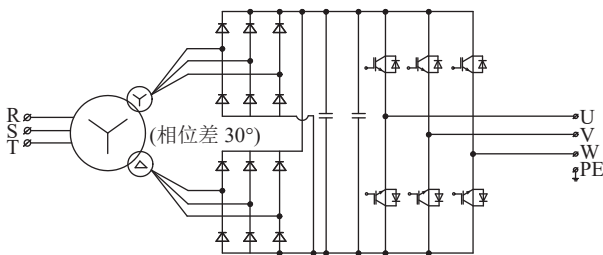


图5 不同驱动模式下的网测波动对比

Fig.5 Comparison chart of online measurement fluctuation under different driving modes

变频器若采用12脉冲整流,消除了5、7次谐波对电网的干扰,同时变频器电容容量较大,能够有效减少母线纹波电流含量,进一步降低了整流侧谐波的含量。在变频器系统实际应用中,通过对电网侧谐波含量测试,实际电压谐波总含量低于3%。

2 远距离智能集成供液系统研究设计

高压大流量高可靠智能型乳化液泵站、喷雾泵站及自动配液和多级过滤系统形成了一个集成供液系统^[19-20],所谓远距离供液就是把泵站系统放在距离工作面较远的统一硐室或联巷里边,通过铺设主供液管、主回液管、清水管路,向各支架用液点供给高压乳化液、喷雾降尘冷却清水以及接收低压回液。

2.1 工作面液压支架支护设计

2.1.1 液压支架选型

结合矿井实际情况并经过多个工作面的实践摸

索,新巨龙公司选择了一套适合本矿井3煤层的工作面液压支架,现采取2种方法对工作面支架工作阻力进行计算^[21]:

1) 建立在支架和围岩相互作用关系基础之上的数值模拟方法。

2) 建立在支架工作阻力构成分析基础上的估算法。

支架工作阻力确定的基本条件:2305S工作面3煤层厚度平均为9.2 m,采煤机割煤高度为3.8 m,放煤高度为5.4 m,煤的普氏硬度系数约为1.59。

3) 数值模拟方法确定支架工作阻力

通过前面数值分析,由煤科院提供模型并由此计算出结果,得出的工作面支护强度与顶板下沉量的关系如图6所示,分析该图不难看出,当支护强度为1.1~1.2 MPa时,其顶板下沉量随支护强度的增加而减少的程度明显下降,确定支架的合理支护强度取1.1~1.2 MPa。综合分析支架的垂直应力云图与弹塑性区图,最终确定支架的支护强度选取应在1.2 MPa以上比较合适。

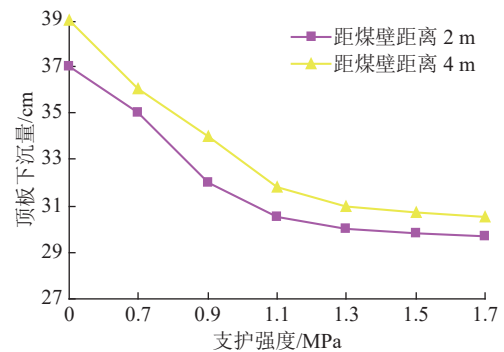


图6 工作面支护强度与顶板下沉位移关系

Fig.6 Relationship between support strength and roof subsidence displacement of working face

4) 估算法确定支架工作阻力

这种计算方法的基础是工作面支架工作阻力支撑垮落带顶板岩层和顶煤的质量,并平衡基本顶失稳时对支架的动载,计算公式为

$$q = K_d \cdot (q_m + q_{dm}) \quad (4)$$

式中: q 为工作面支架所需支护强度,MPa; K_d 为基本顶失稳时的动载系数,根据工作面矿压观测结果,一般取1.1~1.8,考虑3号煤层上部8 m的粉细砂岩互层顶板,强度试验值较高,此处动载系数取1.8; q_m 为垮落带岩层自重应力, $q_m = \gamma_d \times h$, γ_d 为顶板岩层容重:26 kN/m³,根据煤层结构,垮落带高度 $h=11.4$ m; q_{dm} 为支架上方顶煤自重应力, $q_{dm} = \gamma_m \cdot M_d$, γ_m 为顶煤容重13.67 kN/m³。

初步估算:

$$q=1.8 \times (11.4 \times 26 + 5.05 \times 13.67) = 657.7 \text{ kN/m}^2 =$$

0.6577 MPa

综上所述,考虑一定的安全系数,液压支架支护强度确定为1.2 MPa。因此选用该种正四连杆低位放顶煤液压支架满足要求。

2.1.2 液压支架支护强度验算

1) 经验计算支护强度

$$P_1 = kh\gamma g = 815.4 \text{ kN/m}^2 = 0.8154 \text{ MPa} \quad (5)$$

式中: P_1 为工作面合理的支护强度, MPa; k 为支架上方顶板垮落系数,取0.8; h 为工作面最大采高4.0 m; γ 为岩石容重, 2.6 t/m^3 ; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 。

选择工作面支护强度应大于

$$815.4 \text{ kN/m}^2 = 0.8154 \text{ MPa}。$$

2) 实测2304S工作面支架支护强度验算

实测全面支架工作阻力平均为9985.9 kN,是支架额定工作阻力的66.6%,平均支护强度为0.93 MPa;实测工作面初次来压期间,支架平均工作阻力为9396.78 kN,是支架额定工作阻力的62.65%,支护强度为0.88 MPa。

用实测矿压参数计算顶板运动不同阶段工作面来压强度。来压时按平均值加一倍均方差、全部观测段按平均值加二倍均方差计算。

①全部观测段平均支护强度:

$$\begin{aligned} P_q &= (R_r + 2 \times S_1) \times n \\ &= (9985.9 + 2 \times 219.7) \times 1/10.69 \\ &= 975.24 \text{ kN/m}^2 = 0.9752 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (6)$$

是工作面额定支护强度(1.460 MPa)的66.8%。

②岩梁初次来压时支护强度:

$$\begin{aligned} P_f &= (R_f + 1 \times S_2) \times n \\ &= (9396.78 + 561.6) \times 1/10.69 \\ &= 931.56 \text{ kN/m}^2 = 0.9316 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (7)$$

是工作面支架额定支护强度的63.81%。

③非来压时支护强度:

$$\begin{aligned} P_{nf} &= (R_{nf} + 2 \times S_3) \times n \\ &= (9541.92 + 2 \times 219.7) \times 1/10.69 \\ &= 933.71 \text{ kN/m}^2 = 0.9337 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (8)$$

是工作面支架额定支护强度的63.95%。

④岩梁周期来压时支护强度:

$$\begin{aligned} P_w &= (R_f + 1 \times S_4) \times n \\ &= (10448.19 + 208.8) \times 1/10.69 \\ &= 996.91 \text{ kN/m}^2 = 0.9969 \text{ MPa} \end{aligned} \quad (9)$$

是工作面支架额定支护强度的68.28%。预计工

作面矿压观测参数参考表见表1。

3) 工作面条件与支架适应条件对照表见表2。

表1 预计工作面矿压参数参考

Table 1 Reference table of predicted mine pressure parameters of working face

序号	项目	单位	同煤层面实测	本面选取或预计
1	直接顶厚度	m	26.1	23.92
	顶底板条件			
	基本顶厚度	m	4.2	3.50
2	直接底厚度	m	1.1	0.35
	顶煤初次垮落步距	m	17	17
	来压步距	m	60.1	60.1
3	初次来压			
	平均支护强度	MPa	0.88	0.88
	来压程度		明显	明显
4	来压步距	m	15.4	15.4
	周期来压			
	平均支护强度	MPa	1.04	1.04
5	来压程度		明显	明显
	平时			
	平均支护强度	MPa	0.96	0.96
6	直接顶悬顶情况	m	<1	<1
7	底板容许比压	MPa	0.718	0.718
8	直接顶类型	类	2b类	2b类
9	基本顶级别	级	II级	II级
10	巷道超前影响范围	m	28	28

表2 工作面条件与支架适应条件对照

Table 2 Comparison table of working surface conditions and support adaptation conditions

项目	工作面条件	支架适应条件
采高/m	3.8	2.3~4.3
倾角/(°)	0~12	<15
煤厚/m	2.44~9.0	8.0~11.0
煤硬度	1.59	最大4.0
底板比压/MPa	6	1.26
支护强度/(kN·m ⁻²)	996.9	1260~1460
顶板种类	2b类	2b类

2.2 泵站容量计算

针对新巨龙煤矿2305S工作面液压支架自动化工作面在自动跟机过程中的参数匹配问题,对综采工作面内采煤机速度和液压支架动作参数进行了参数仿真,对正常工况下在2台泵站(公称流量630 L/min)开启条件下液压支架完成一个全动作所需时间进行了仿真计算,对液压支架能匹配的最大采煤机速度进行了分析,为综采工作面跟机自动化的参数设计提供参考。

为了计算液压支架动作时间可以匹配的采煤机速度,在自动化跟机过程中,采用化整为零的方式,计算不同泵站开启模式下,单台液压支架完成整个动作流程时间的理论值即极限值,通过该理论值计算可以匹配的最大采煤机速度^[22]。

单台液压支架在跟机自动化过程中其主要完成“降柱—拉架—升柱”、“伸缩梁伸—一级护帮伸—一级护帮收—伸缩梁收”和推移刮板输送机,在时间上这几个动作是分离的,为了仿真计算的简化,将推移刮板输送机动作放在前面动作“降柱—拉架—升柱”作为一部分进行分析,将护帮和伸缩梁动作部分作为另一部分进行分析。

针对大采高液压支架,在自动化跟机过程中,降柱位移至少要大于抬底位移才能保证在抬底拉架时不会发生支架接顶。因此,控制器降柱时间参数设定极为关键,设置过小,导致拉架接顶;设置过大时,造成跟机时间太长产生资源浪费,同时在设定控制器降柱时间参数时,需要有足够的裕度以防止极端工况下降柱可靠到位。

计算当理想状态下降柱时间为 t 时,降柱位移超过抬底缸总行程,由于抬底过程中存在一定空行程,将抬底有效行程设为150 mm;根据该计算结果,设定控制器参数。

立柱降柱时间为 t ; t 秒后拉架开始动作,当推移刮板运输机缸行程到达960 mm时,停止;延时0.5 s立柱升柱,立柱下腔压力满足要求后停止。

2.2.1 泵站容量估算

为了方便计算和分析,以1台液压支架动作为例,为了匹配采煤机速度,在采煤机经过1台支架宽度所需要的时间内,支架应该完成整个动作流程,基于此分析,其单台支架动作时间和采煤机速度有如下关系:

$$t_1 = 60 \times L / v_m \quad (10)$$

式中: t_1 为液压支架配合采煤机速度的动作时间, s; L 为液压支架宽度, 1.75 m; v_m 为采煤机速度, m/min。

以采煤机速度13.5 m/min, 支架宽度为1.75 m来计算,则每个支架的理想动作时间为7.78 s才能保障支架动作能协调采煤机速度;在采煤过程中单台支架整个动作流程包括降—移—升—推遛,“伸缩梁伸—一级护帮伸—一级护帮收—伸缩梁收”共2大组成动作,其中降—移—升动作为主动作,因为其用液大,直接影响支架的动作时间;而护帮和伸缩梁动作为辅助动作,其用液少,动作时间短;推遛为不连续动作;在支架动作分析时以降—移—升动作总时

间为主,为了匹配采煤机速度,故需要保证这4个动作的时间要小于极限时间 t_1 。

根据支架的动作关系,主要需液量大的动作包括降柱—拉架—升柱—推遛—拉架—护帮伸缩等动作,按照容量算法(忽略容积压缩的影响,后续通过安全系数1.2做补偿)。

在自动化跟机过程中,为了保证可靠拉架,根据地质条件一般将降柱量设为150 mm以保证足够的安全余量从而保证可靠拉架,据此计算各个动作的需液量。

1) 立柱升柱需液量:

$$V_1 = 2 \left[(\pi D_1^2 \cdot L_1) / 4 \right] = 2 \times \pi \times 400^2 \times 150 / 4 = 37.68 \text{ L} \quad (11)$$

2) 立柱降柱需液量:

$$V_2 = 0.1 \times V_1 = 3.77 \text{ L} \quad (12)$$

3) 拉架需液量:

$$V_3 = 2 \times \left[(\pi D_2^2 \cdot L_2) / 4 \right] = \pi \times 180^2 \times 865 / 2 = 44 \text{ L} \quad (13)$$

4) 推遛需液量

$$\begin{aligned} V_4 &= 2 \times \left[\pi / 4 (D_2^2 - d_2^2) \cdot L_2 \right] \\ &= \pi \times (180^2 - 120^2) \times 865 / 2 \\ &= 24.44 \text{ L} \end{aligned} \quad (14)$$

5) 护帮伸需液量

$$V_5 = 2 \times (\pi D_3^2 \cdot L_3) / 4 = \pi \times 100^2 \times 525 / 2 = 8.24 \text{ L} \quad (15)$$

6) 护帮收需液量

$$\begin{aligned} V_6 &= 2 \times \left[\pi (D_3^2 - d_3^2) \cdot L_3 \right] / 4 \\ &= \pi \times (100^2 - 70^2) \times 525 / 2 = 4.2 \text{ L} \end{aligned} \quad (16)$$

总需液量计算:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 = 122.34 \text{ L} \quad (17)$$

按照20%的安全余量系数,每分钟所需的供液量为

$$\begin{aligned} Q &= 1.2 \times 60 \times V / t = 1.2 \times 122.34 \times 60 / 7.78 \\ &= 1132.52 \text{ L/min} \end{aligned} \quad (18)$$

根据设计计算结果,为了达到13.5 m/min的采煤机速度,建议供液流量在1132.52 L/min,选用4台630 L/min乳化液泵,用3备1,可以满足生产需求。

2.3 系统方案设计

SAP型智能集成供液系统: SAP (System of Automatic Pump) 型智能集成供液系统是集泵站、电磁卸载自动控制、泵站智能控制、变频控制、多级过滤、乳化液自动配比、水处理设备、系统运行状态记

录与上传于一体的自动化设备,同时也是1套完整的综采工作面供液系统解决方案^[23-28]。但SAP型智能集成供液系统并不是上述功能设备的简单累加,而是通过系统集成技术将系统各组成设备结合成1个有机的整体,充分发挥各个设备的功能,实现了1+1>2的效果。

2.3.1 泵站系统配置

SAP型智能集成供液控制系统根据用户需求,乳化液泵采用4泵2箱配置。4台乳化液泵其中2台为变频泵,由2台输出功率为500 kW的单回路变频器进行驱动;剩余2台为工频泵,由组合开关进行驱动。设备正常使用时,2台运行,2台备用。乳化液泵站采用主泵变频与电磁卸荷联动控制的供液方式,降低了系统压力波动,有效提升供液效率,满足该工作面支架快速移架对泵站流量及压力的要求。乳化液箱总容积为14 m³,其中主液箱为7 m³,集成油箱为1 m³,辅助液箱为7 m³,液箱具有稳流、消泡、沉淀等作用。喷雾泵采用3泵2箱配置,正常运行时用2备1,全部采用工频泵,由组合开关进行驱动。清水箱容积为7 m³,具有自动补水装置2套。此外,集成供液系统配置泵站控制系统1套、乳化液浓度在线监测及自动配比系统1套、多级过滤系统1套、乳化液配比给水反渗透装置1套、乳化液泵用变频器2台、8回路小功率组合开关2台、10回路组合开关1台、管路及附件1套等。泵站全部采用单侧布置方式,通过配置的大流量预增压泵进行强迫吸液,乳化液泵配增压泵2台、喷雾泵配增压泵2台。系统布置示意图如图7—图8所示。



图7 设备列车布置(乳化液泵站)

Fig.7 Equipment train layout (emulsion pump station)

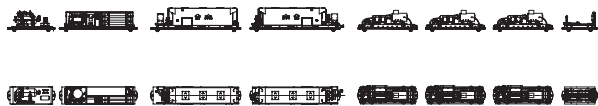


图8 设备列车布置(喷雾泵站)

Fig.8 Equipment train layout (spray pump station)

2.3.2 控制系统配置

泵站控制系统方面,采用集中分布式控制方式,实现在综采工作面泵站系统的自动化控制,是集系统运行信息检测与上传等功能于一体,保障采煤工作面泵站的安全高效运转的整体解决方案^[29-31]。系统采用泵站控制器作为核心控制设备,每台泵站、液

箱都配有独立泵站控制器,每个控制器均能够进行互换,不同类型设备所用控制器无需更改程序,只需重新进行参数配置即可,使用方便,满足紧急情况下的使用。每个控制器各自负责处理所控制设备的运行信息、决定受控设备的动作。主控制器作为上位机,负责向各控制器发送宏观控制指令、协调各控制器之间的关系。主控制器与控制分站之间通过通信方式传递指令、交换数据^[32]。此外,控制器类型可通过软件自由设置,配置灵活,解决了国外控制系统电控箱功能与类型固定不变,无法更改的问题,应用更加灵活。此外,该控制系统架构与操作方式,符合矿方现有操作使用习惯,系统适用性更强。

控制器接线采用护套连接器,强度大,传感器导线内部具有屏蔽层,减小外部对通信信号的干扰。设备间与传感器电缆均采用铜头式的快速插接方式,系统连接安全、可靠、拆装方便,便于维护,能够提高工作效率。同时,采用快插方式能够有效延缓电缆接头的损坏,降低损耗,提高产品的使用寿命。其产品结构示意图如下:

集成供液控制系统核心部件的控制器采用以ARM7为处理器的嵌入式计算机,存储器容量FLASH 1M, SRAM 512K,系统软件包括操作系统程序、下载管理程序和应用程序等。采用 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 实时操作系统,在稳定运行的同时具有较高的实时性;下载管理软件可实现应用程序管理、升级功能,通过井下相应设备可以在工作现场方便的升级控制器应用程序,为应用程序的修改和控制功能的调整提供了方便,具有很强的适应性。

系统软件结构方面,采用“5横1纵+可复用的显示/通信/存储服务”的嵌入式架构,如图9所示。此架构有效避免了传统“洋葱式”分层降低系统的性能的缺陷,开发过程规范,标准化的设计使软件稳定性高、可维护性好;系统软件可扩展性强,可高效率的对控制功能进行调整和为客户提供定制化服务。

应用软件采用模块化的设计,易于根据客户不同需求提高设备自动化水平,最大限度的降低功能间的相互影响,提高了系统的鲁棒性,更好的适应复杂工况,使用安全可靠。应用软件层次结构如图10所示。

3 结 论

1) 通过配置LR输出滤波装置抑制高频dV/dt;通过采用三电平逆变结构提高变频器输出耐压;同时,采用低载波频率变频控制器、叠层母排技术减小

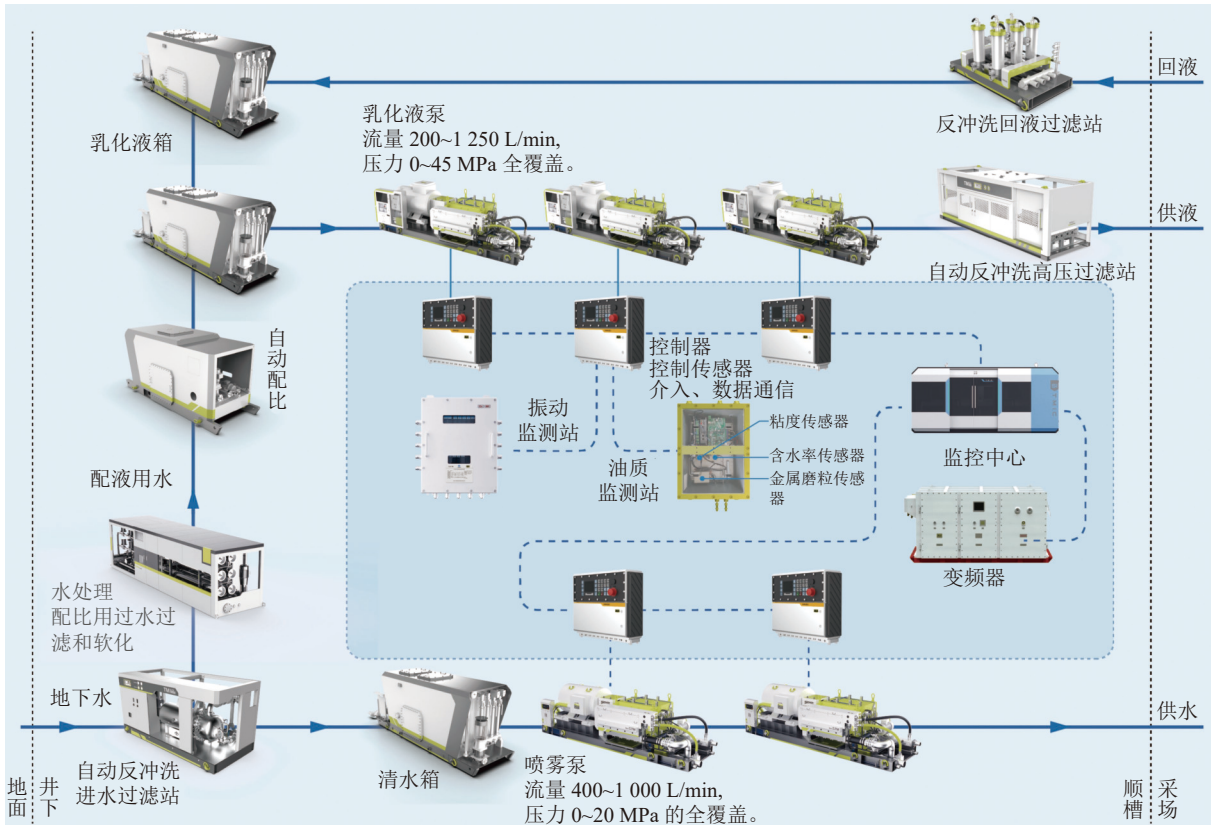


图9 7泵4箱乳化液泵站控制系统结构示意图

Fig.9 Structure diagram of control system of emulsion pump station with 7 pumps and 4 tanks

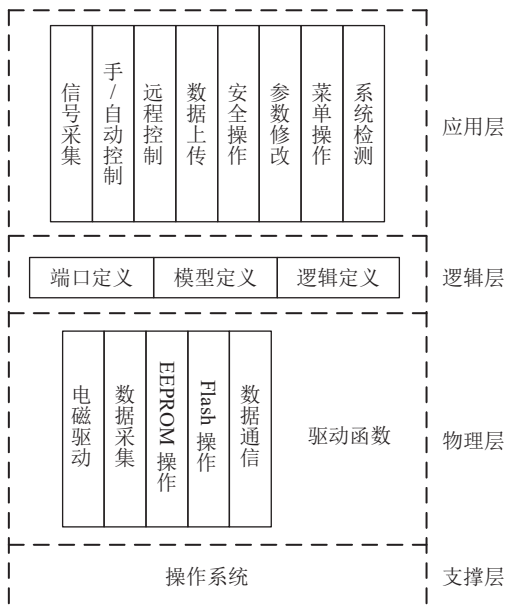


图10 应用软件层次结构

Fig.10 Hierarchy chart of application software

电压尖峰等策略确保了2305工作面3000米远距离供电。

2) 研究以工作面用液需求为目标的压力窄幅波动大流量供液模式,创新提出了自适应采煤工艺的乳化液均衡输出控制方法并研制出首套智能供液控

制系统,实现系统的闭环智能联动控制。最终攻克超远距离供液技术难题,建立井上智能集中供液中心,满足千万吨矿井工作面用液需求。

3) 与液压支架电液控制系统互联互通,实现工作面用液需求的预知预判和及时响应。将液压支架电液控制系统与集成供液系统融为一体,实现信息的互联互通,液压支架电液控制系统在执行动作功能之前,将控制信息传达给集成供液系统,集成供液系统根据工作面用液需求,采用变频技术对电机转速进行平滑控制实现对输出流量的控制,达到与用液需求相匹配的目的,提高泵站流量利用率,降低泵空转运行时间和能耗,减少电磁卸荷次数,有效提升了电磁卸荷阀的使用寿命^[33];通过各泵电磁卸载阀不同压力等级的设定,实现泵站多组合智能调节高效运行。

参考文献(References):

[1] 王国法, 庞义辉, 徐压军, 等. 综采成套技术与装备系统集成 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
 [2] 李然. 矿用高压大流量乳化液泵站应用现状及发展趋势 [J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(7): 93-96.

LI Ran. Current status of application and development trend of mining high-pressure and large-flow-rate emulsion pump

- station[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(7): 93-96.
- [3] 李然. 大采高工作面高压大流量乳化液泵的研制及应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 145-149.
LI Ran. Research and development as well as application of high pressure and high flow emulsion pump to large mining height face[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 145-149.
- [4] 冯国营. 矿山刮板输送机控制技术应用分析[J]. 中国矿业, 2008, 17(5): 106-108.
FENG Guoying. Application analysis of the control technology for mine scraper conveyor[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(5): 106-108.
- [5] 申宝宏, 郭玉辉. 我国综合机械化采煤技术装备发展现状与趋势[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(2): 1-3, 44.
SHEN Baohong, GUO Yuhui. Development status and tendency of technology and equipment for fully mechanized coal mining in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(2): 1-3, 44.
- [6] 张纯, 沈宜敏, 张纯宪. BPJV-1400/3.3 矿用隔爆兼本质安全型高压变频器的研制及应用[J]. 煤矿机电, 2013, 34(2): 83-84, 87.
ZHANG Chun, SHEN Yimin, ZHANG Chunxian. Research and application of BPJV-1400/3.3 flame-proof and intrinsically safe high voltage inverter[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2013, 34(2): 83-84, 87.
- [7] 刘亮喜. VVVF 变频器的功率因数[J]. 能源技术, 2002, 23(4): 176-177, 181.
LIU Liangxi. Power factor for VVVF type of variable frequency drive[J]. Energy Technology, 2002, 23(4): 176-177, 181.
- [8] 高小强, 杜福银, 蔡爱国. 变频驱动刮板输送机负载特性及调速的智能控制策略研究[J]. 矿山机械, 2011, 39(11): 12-16.
GAO Xiaoqiang, DU Fuyin, CAI Aiguo. Study on load characteristic and intelligent speed control strategy of VFD scraper conveyor[J]. Mining & Processing Equipment, 2011, 39(11): 12-16.
- [9] 青岛天信电气有限公司. BPJV-2000(1400)/3.3 矿用隔爆兼本质安全型高压变频器说明书[D]. 青岛: 青岛天信电气有限公司, 2012: 12-16.
Qingdao Tianxin Electric Co., Ltd. Manual of bpjv-2000 (1400) / 3.3 mine flameproof and intrinsically safe high voltage inverter[D]. Qingdao: Qingdao Tianxin Electric Co., Ltd., 2012: 12-16.
- [10] 姬凯, 张启平, 高跃. 三电平 PWM 整流控制技术研究[C]//湖北省科学技术协会. 湖北省电工技术学会、武汉电工技术学会 2008 年学术年会暨理事会换届大会论文集. 武汉, 2008: 122-129.
JI Kai, ZHANG Qiping, GAO Yue. Three level PWM rectifier control technology [C]//Proceedings of 2008 academic annual meeting and Council General Meeting of Hubei Electrotechnical Society and Wuhan Electrotechnical Society. Hubei: Hubei Electrotechnical Society, Wuhan Electrotechnical Society, 2008: 122-129.
- [11] 张树齐, 黄东风, 马可白. 刮板输送机节能降耗分析[J]. 煤矿机电, 2010, 31(1): 79-82.
ZHANG Shuqi, HUANG Dongfeng, MA Kebai. On the energy saving of scraper conveyor[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2010, 31(1): 79-82.
- [12] 闫晓杰. 刮板输送机三种启动控制方式分析[J]. 科学之友, 2013(9): 17-18.
YAN Xiaojie. Analysis of scraper conveyor three starting control mode[J]. Friend of Science Amateurs, 2013(9): 17-18.
- [13] 李国平. 高产高效矿井刮板输送机成套设备研发[C]//中国煤炭工业协会. 第七次煤炭科学技术大会文集(下册). 北京, 2011: 210-214.
Li Guoping. Research and development of complete sets of scraper conveyor equipment for high yield and high efficiency mine [C]// Proceedings of the seventh coal science and Technology Conference (Volume II), Beijing: Coal Industry Press, 2011: 210-214.
- [14] 张成刚. 交流变频调速技术在刮板输送机驱动系统上的应用[J]. 煤矿机械, 2011, 32(10): 209-210.
ZHANG Chenggang. Application of AC frequency-conversion technology in driving system of armoured face conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(10): 209-210.
- [15] 毛君, 赵金元. 刮板输送机的启动动力特性与软启动技术[J]. 煤炭科学技术, 2002, 30(2): 38-42.
MAO Jun, ZHAO Jinyuan. Start dynamic features and soft start technology of AFC[J]. Coal Science and Technology, 2002, 30(2): 38-42.
- [16] 姜敬. 变频电动机在综采工作面刮板输送机的应用[J]. 煤矿机电, 2012, 33(3): 100-102.
JIANG Jing. Application of variable frequency motor on scraper conveyor at fully mechanized coal face[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2012, 33(3): 100-102.
- [17] 胡登恩. 变频调速和 CST 在煤矿大型带式输送机的应用分析[J]. 矿山机械, 2006, 34(9): 82-85, 5.
HU Dengen. Analysis to the application of the variable-frequency velocity regulation and CST on the big-scale belt conveyor in the coal mine[J]. Mining & Processing Equipment, 2006, 34(9): 82-85, 5.
- [18] 牛津玉, 李春荣. 变频调压软启动器在综采刮板输送机上的应用[J]. 中国煤炭, 2005, 31(9): 35-36, 40.
NIU Jinyu, LI Chunrong. The application of frequency-and-voltage-modulating soft starter for scrape conveyor in fully mechanized mining face[J]. China Coal, 2005, 31(9): 35-36, 40.
- [19] 田振林, 张传伟, 李建华. 综采工作面技术装备的发展动态[J]. 煤炭技术, 2006, 25(10): 1-2.
TIAN Zhenlin, ZHANG Chuanwei, LI Jianhua. Present status and tendency of fully mechanized coal mining equipment[J]. Coal Technology, 2006, 25(10): 1-2.
- [20] 韦文术, 李然, 王伟, 等. 一种综采工作面智能供液方法及系统: CN108518243B[P]. 2019-09-24.
- [21] 付翔, 王然风, 赵阳升. 工作面支架液压系统仿真与稳压供液技术[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1471-1478.
FU Xiang, WANG Ranfeng, ZHAO Yangsheng. Investigation of hydraulic system simulation and fluid feeding technology with steady pressure of working face supports[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1471-1478.
- [22] 冯银辉, 黄曾华, 李昊. 互联网+综采自动化专家决策平台设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(7): 73-79.
FENG Yinhui, HUANG Zenghua, LI Hao. Design and applica-

- tion of Internet plus experts decision making platform to fully-mechanized mining automation[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(7): 73-79.
- [23] 韦文术, 宋艳亮. 矿用本安型电磁卸荷阀的研究[J]. *煤矿机械*, 2007, 28(10): 52-54.
- WEI Wenshu, SONG Yanliang. Research on intrinsically-safe solenoid pilot valve of mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2007, 28(10): 52-54.
- [24] 李然, 王伟, 苏哲. 高压大流量乳化液泵曲轴疲劳强度分析[J]. *煤矿开采*, 2014(1): 45-48.
- LI Ran, WANG Wei, SU Zhe. Fatigue strength analysis of bent axle of large-flow and high-pressure emulsion pump[J]. *Coal Mining Technology*, 2014(1): 45-48.
- [25] LI R. Mechanics research with prediction on the fatigue life of the five-cylinder emulsion pump crankshaft[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 738: 163-166.
- [26] 李然, 王伟, 苏哲. 高压大流量乳化液泵滑动轴承热流体动力润滑仿真分析[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(S2): 576-582.
- LI Ran, WANG Wei, SU Zhe. Numerical study on thermohydrodynamic performance of journal bearing in high-pressure and large-flow-rate emulsion pump[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(S2): 576-582.
- [27] 李然, 贾琛, 叶健, 等. 高压大流量乳化液泵站可靠性分析与研究[J]. *煤矿开采*, 2016(5): 29-32.
- LI Ran, JIA Chen, YE Jian, et al. Reliability analysis and studying of emulsion pump station with high pressure and large discharge[J]. *Coal Mining Technology*, 2016(5): 29-32.
- [28] 李森. 乳化液浓度在线检测技术现状及前景分析[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(3): 96-99.
- LI Sen. Analysis on status and prospects on online detection technology of emulsion concentration[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(3): 96-99.
- [29] 国家安全生产监督管理总局. 液压支架用乳化油、浓缩油及其高含水液压液: MT/T 76—2011[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2012.
- [30] 韦文术, 李然, 王伟, 等. 一种无减速器乳化液泵: CN105822533A [P]. 2016-08-03.
- [31] 李继周, 张文全. 一种用于泵急停的关储卸压控制阀: CN101761470B[P]. 2011-12-28.
- [32] 周如林. 综采工作面纯水液压系统应用研究及展望[J]. *液压气动与密封*, 2014, 34(11): 11-13.
- ZHOU Rulin. Water hydraulic system applications and prospects of mechanized coal face[J]. *Hydraulics Pneumatics & Seals*, 2014, 34(11): 11-13.
- [33] PEI J F, HE C, LV M R, et al. The valve motion characteristics of a reciprocating pump[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 66: 657-664.