

基于滚动摩擦的输送机刮板优化设计与效果分析

郝建^{1,2}, 陈琳^{1,2}, 宋旗¹, 李文昕^{1,2}, 王端一¹, 张晓峰³, 贾顺^{1,2}, 马彪⁴

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590;

3. 山东犀牛高分子材料有限公司, 山东 济南 250031;

4. 枣庄市留庄煤业有限公司, 山东 枣庄 277500)

摘要:刮板输送机作为综采工作面的核心装备之一,在煤炭生产中承担了巨大工作量。然而传统刮板因其自重过大导致磨损严重,在运行过程中存在高能耗、高载荷和难维护问题,严重影响工作面煤炭运输效率。为了降低刮板自重和磨损,提出了一种优化刮板局部结构的设计方案,旨在降低刮板的自重和刮板运行时的摩擦系数,从而减少传统刮板存在的问题。通过模拟实验和工程应用,验证其有效性。研究结果表明:通过改变刮板与中部槽之间的接触方式,使新型刮板的摩擦力比传统刮板减少约89.92%;使用新型刮板的输送机低载荷状态发生频率提升12.5%,中载荷、高载荷、超载荷状态发生频率均有所下降;每台电动机的年用电量降低约25%,内蒙古双欣煤矿年耗电量降低了约27%。本研究为刮板输送机的设计与改进提供了有益的参考,具有实际工程应用价值。

关键词:输送机;刮板;自动排污结构;滚动体;摩擦方式

中图分类号:TD528

文献标志码:A

Optimization design and effect analysis of conveyor scrapers based on rolling friction

HAO Jian^{1,2}, CHEN Lin^{1,2}, SONG Qi¹, LI Wenxin^{1,2}, WANG Duanyi¹,

ZHANG Xiaofeng³, JIA Shun^{1,2}, MA Biao⁴

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

3. Shandong Rhino High Polymer Material Co., Ltd., Jinan 250031, China;

4. Zaozhuang Liuzhuang Coal Industry Co., Ltd., Zaozhuang 277500, China)

Abstract: Scraper conveyors, as one of the core equipment of the comprehensive mining face, undertake huge workload in coal production. However, due to their excessive self-weight and serious wear and tear, the traditional scrapers have high energy consumption, high load and high maintenance during operation, which seriously affects the efficiency of coal transport at the working face. To reduce the self-weight and wear of scrapers, the research proposes a design scheme to optimize the local structure of the scraper, aiming to reduce the self-weight and the friction coefficient of the scraper when it is in operation so as to reduce the problems that exist in the traditional scrapers. Its effectiveness is verified by conducting simulation experiments and engineering applications. The results show that: By changing the contact method between the scraper and the middle trough, the friction of the new scraper is reduced by about 89.92% compared with the traditional scraper; After using the new scyapter, the

收稿日期:2024-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52174121);山东省高等学校“青创科技计划”创新团队项目(2021KJ060)

作者简介:郝建(1986—),男,山东枣庄人,副教授,博士,主要从事矿山压力与岩层控制等方面的研究。

陈琳(1998—),女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事系统设计与优化等方面的研究,本文通信作者。

E-mail:chlin201@163.com

frequency of the scraper conveyor occurring in the low load condition is improved by 12.5%, and the frequency of the medium load, high load, and overload conditions are all reduced; The annual power consumption of each motor has been reduced by about 25% and the annual power consumption of Inner Mongolia Shuangxin Coal Mine by about 27%; The research provides useful reference for the design and improvement of scraper conveyors and has practical engineering application value.

Key words: conveyor; scraper; automatic sewage structure; rolling element; friction mode

刮板输送机作为综采工作面的核心装备之一,承担着煤炭生产的巨大工作量^[1]。在刮板输送机组件中,刮板是决定刮板输送机效率和可靠性的关键部件之一。传统刮板输送机存在一系列问题^[2-3],如刮板与链条、中部底板之间采用滑动摩擦的接触方式,导致磨损严重。特别是负载运行时刮板输送机上的荷载增大,进一步增加磨损和耗电量。此外,刮板自重过大^[4],也会导致链条和中部槽的磨损加重。以上问题不仅会缩短刮板的使用寿命,严重时还会导致煤矿综采工作面的停滞,给煤炭企业带来经济损失^[5]。因此,优化刮板输送机的性能对于提高煤炭资源的运输效率至关重要。

目前,国内外学者着手对刮板输送机各部位进行优化以提高刮板输送机安全性和使用寿命。韩煜斌^[6]通过调整刮板链张紧程度减少中部槽磨损,刮板使用寿命提高了2个月。杨向峰^[7]提出通过熔覆技术对中部槽进行改进,提升中部槽耐磨性。闫沁江^[8]利用等离子熔覆耐磨强化技术在中部槽易失效部位熔覆 Fe-Cr-C 强化层,提高中部槽表面的耐磨性和表面宏观硬度。李俊^[9]采用有限元软件对刮板输送机中部槽中板受力进行分析,发现中板中部及两侧均出现不同程度应力集中情况,导致中板磨损增大,从而降低使用寿命。Xia 等^[10]采用离散元法建立散煤刮板输送机相互作用分析模型,预测了刮板输送机溜槽在运输过程中的磨损,发现溜槽磨损量与刮板输送机铺设角度呈负相关。Li 等^[11]研究了刮板输送机中间槽在不同介质下的摩擦和磨损,发现磨损随着载荷的增加而线性增加,随着滑动速度的增加呈非线性增加。Li 等^[12]对原始中槽样品和九组仿生中槽样品进行了结构静力分析和摩擦接触分析,发现凹坑具有应力缓释效应、扭矩效应、边缘强化效应和磨损碎片聚集作用,认为凹坑可以减少中间槽的疲劳磨损、磨粒磨损、冲击磨损、黏着磨损、热疲劳磨损和热磨损。以上研究都主要关注刮板输送机中部槽,另有学者则对刮板输送机的刮板进行优化,刘祖国等^[13]利用 SolidWorks 建立了刮板三维模型,通过 ANSYS Workbench 软件对刮板进行了静态分析,利用 Design Explorer 模块在静应力分析的基础上对膜土分离装置的刮板进行优化设计。Zhang 等^[14]利用 SolidWorks 和 ANSYS 有限元分析软件构建三维模型进行仿真分析,认为井型加筋有助于提高刮板的整体强度和刚度。刘保东^[15]运用 Pro/Engineer 软件建立精确的三维模型,对刮板组件进行有限元分析,研究了其应力分布和变形情况,对刮板的设计缺陷和薄弱区域进行优化,并对优化后的刮板组件进行有限元建模和结构分析,在材质不变的前提下,比较优化前后的质量、强度和刚度,肯定了优化后刮板结构的合理性。薛秀丽^[16]总结了刮板输送机在煤料输送过程中刮板磨损的原因,并对刮板结构进行设计与改进。王明旭等^[17]利用 EDEM 离散元仿真软件,定量模拟了刮板输送机水平运输段的输送动态过程,获得了刮板的磨损分布规律及磨损机理,并验证了刮板的可靠性。李扬^[18]和李小刚^[19]以选煤机排料系统中刮板结构为研究对象,研究分析排料系统受力特征,包括对传动链摩擦阻力、链条张力及刮板受力情况进行研究与计算,提出刮板结构的优化改进措施,有效提高了选煤机的稳定性与运行效率。Majumdar 等^[20]研究了刮板对减少砂轮周围旋转空气层的影响,并介绍了刮板在磨削区应用和流体输送的方法。

综上所述,目前国内外学者大多以刮板输送机的中部槽、刮板作为研究对象,未考虑刮板与中部槽的内在整体性,忽略了两者的关系,已有研究很少涉及刮板与中部槽间的磨损问题。本研究设计一种刮板底部安装滚动体的结构,以改变刮板与中部槽之间的摩擦方式,提高刮板输送机的使用寿命,降低使用成本和维护成本,可以有效解决传统刮板输送机存在的高能耗、高载荷和难维护问题,为优化煤炭资源运输工作提供技术支持。

1 新型刮板的优化设计

1.1 设计原理及总体方案

传统刮板输送机能耗过大的主要原因是刮板与中部槽之间存在动载静压摩擦,摩擦力较高,产生了较大的能耗。此外,刮板自身的重量以及环境因素也对刮板与中部槽之间的摩擦造成了进一步的影响。摩擦力是由两个物体表面之间的微小不规则结构相互作用产生的。当物体之间的接触方式由滑动摩擦变为滚动摩擦时,两物体间的触点不再持续相对滑动,而是随着滚动不断发生变化,从而使接触点之间的挤压和相对滑动减少。而且,滑动摩擦变为滚动摩擦可以改变摩擦力的作用方向,使摩擦力的平均效果减小,最终降低总摩擦力。因此,新型刮板优化设计原理是通过降低摩擦力减少能耗,包括改变刮板与中部槽的接触方式、将滑动摩擦变为滚动摩擦,以及更换锻造支撑体的材料、减轻刮板的自重,以达到减少磨损和降低能耗的目的。优化的新型刮板主要结构如图 1 所示,包括改造基体、支撑体、滚动体等。本研究以传统刮板(17GL7-1 型)作为设计新型刮板的改造基体,其规格如表 1 所示。在改造基体的底面两端开凿两个安装槽,再安装一组由高分子复合材料制作的支撑体,在支撑体上设计与滚动轴承组合的滚动支座,最后将滚珠和辅助滚珠与滚动轴承组合,将带有滚动轴承的支撑体嵌入刮板。

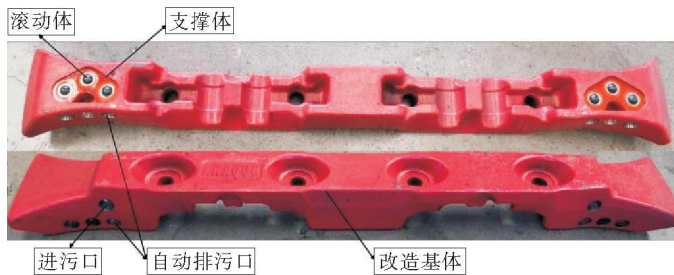


图 1 优化后的刮板实物图

Fig. 1 Optimized scraper diagram

表 1 传统刮板规格

Table 1 Traditional scraper specifications

构件	规格/mm
圆环链	48×152
槽宽	1 200
槽长	1 184
孔距	520±0.75
螺栓孔	33

1.2 材料优化

传统刮板通常采用 27SiMn 等硬质合金钢锻造^[21],钢材密度为 7.35 g/cm³,摩擦系数为 0.42。而摩擦系数同为 0.42 的高分子聚氨酯^[22]密度仅为 1.1 g/cm³,因此相同体积下,采用高分子聚氨酯作为支撑体材料的新型刮板重量更低,降低了刮板输送机的空载载荷,进而降低用电成本。

高分子聚氨酯材料比硬质合金钢具有更好的缓冲性能,能够有效降低结构间的磨损,而且满足煤矿阻燃和抗静电标准要求。因此,选择高分子聚氨酯作为制造支撑体的材料,能够有效提升刮板输送机的性能,支撑体实物如图 2 所示,其性能参数如表 2 所示。



图 2 高分子聚氨酯材料支撑体

Fig. 2 Polymer polyurethane material support body

表 2 高分子聚氨酯材料性能参数

Table 2 Polymer polyurethane material performance parameters

性能	硬度	拉伸强度/MPa	撕裂强度(直角)/(kN·m ⁻¹)	断裂伸长率/%	回弹/%
参数	SHA60~SHD80	25~80	50~230	300~800	25~70

新型刮板输送机采用球状滚动体结构,使用 YG8 钨钢球作为滚珠材料^[23],主要成分为钨钴合金,性能参数如表 3 所示。该材料具有出色的硬度和耐磨性能,并表现出良好的抗冲击和抗震动性能,适用于制造承受较大冲击和震动的零部件。

表 3 硬质合金球性能参数

Table 3 Carbide ball performance parameters

型号	成分	硬度/HRA	密度/(g·cm ⁻³)	抗弯强度/(g·m ⁻³)	金相分析
YG8 钨钢球	钨 92%, 钴 8%	89	14.4~14.8	1 800	A02B02C02

1.3 结构优化

新型刮板的接触方式为滚动摩擦,能够有效降低刮板与中部槽之间的磨损。在如图 3 所示的支撑体上安装滚动体和自动排污结构。支撑体的弹性作用使滚动体与支撑体之间形成一定的“膨胀”接触,推动滚动体接近中部槽,让滚动体与中部槽始终处于有效接触中。尤其是安装多个滚动体时,支撑体的弹性作用可以使全部的滚动体都能与中部槽处于稳定可靠的接触中,可以一定程度均衡整个刮板的负载。

在支撑体上设置自动排污结构,有效减少了刮板输送机在运行中受煤粉和水等杂质的干扰。在运行过程中,水和煤粉等杂质经过滚珠与辅助滚珠层时,随滚珠转动排出支撑体外,有效降低了运行过程中煤粉等物质对支撑体的磨损和腐蚀,而且水和煤粉等杂质经过滚珠和辅助滚珠层时起润滑作用,提高滚珠转动灵活性。煤屑等杂质通过刮板侧面的进污口进入,然后通过支撑体的自动排污结构经自动排污口排出,减少杂质产生的影响,提高刮板输送机的稳定性和可靠性,降低维护保养成本,提高运行工作效率。

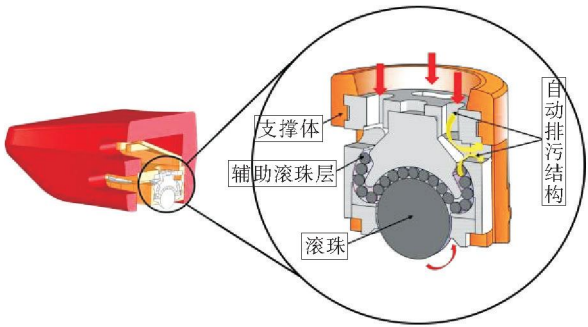


图 3 支撑体的自动排污结构图

Fig. 3 Automatic sewage structure diagram of support body

新型刮板的滚动体选用自带滚动支座及滚珠的 IN38 型万向球。万向球基体的材质为 HT200,球的材质为 GCr15,动态承载达到 250 kg。采用滚珠结构时,需要配合滚珠结构设置滚动槽。滚动槽设计成固定滚珠的球面形状的半封闭结构。安装的滚珠露出部分与中部槽发生滚动接触,其余部分在滚动槽内。为获得更高的稳定性和可靠性,在滚动槽与滚珠之间设置辅助滚珠层,在辅助滚珠层中安装一组更细小的辅助滚珠,形成二次滚动接触。滚珠和辅助滚珠形成的滚动组合体可以实现接近纯点接触的接触方式,这种方式可以进一步降低摩擦阻力,提升转动的灵活性。滚动体的使用寿命和更换周期相对统一,符合工业化设计的实际需求。

2 室内摩擦阻力实验研究

2.1 实验设计

所用到的实验材料和软件有:传统刮板、新型刮板、杠杆、塑胶带、摄像机、智取 DS2 系列推拉力计以及智取 DS2 系列推拉力计软件。

新型刮板与推拉力计相连,模拟刮板运行时的状态,由智取 DS2 系列推拉力计软件记录每次实验所得的拉力数据。以刮板实物模型在推拉力计上的拉力表示推杆的推力和链条的拉力。实际煤矿综采工作面上,由于刮板输送机的中部槽存在煤屑等物质,导致中部槽不是绝对平整,刮板表面各部分阻力不均匀。刮板连接在上端固定装置上,按下 ZERO 和 PEAK 键,手动向下拉推拉力计,记录推拉力计最大值作为刮板运行开始时的动力^[24]。实验数据主要来源于推拉力计上显示的终值以及推拉力计软件上显示的数据走势。

因实验以单个刮板为研究对象,暂不考虑有载状态下的刮板输送机运行状态。设置对照组,多次模拟刮板运行时的摩擦力状态,当刮板的拉力大于静摩擦力时,刮板移动。在刮板移动过程中,对其施加的拉力持续减少直至刮板趋于稳定移动。所有测量拉力方向与刮板运行方向保持一致,推拉力计和与之相连的杆在同一水平线上。

2.2 实验结果与分析

以刮板为对象,通过实验观测刮板相对运动过程中所受到的力的变化,揭示静摩擦力、动摩擦力及运动稳定状态下拉力的数值特征。多次进行刮板优化摩擦阻力的室内模拟实验,典型实验结果如图4所示:在0~13 s的时间段内,新型刮板受到的拉力逐渐增大,拉力达到13 N时,刮板发生相对运动。此后,拉力减小,直至刮板达到稳定运动状态。

经过对摩擦力实验的结果对比显示,优化刮板摩擦形式可有效降低刮板摩擦系数,将刮板摩擦系数从0.4降低为0.035,减小了刮板与中部槽之间的摩擦。优化后,刮板与中部槽之间的摩擦力由129 N变为13 N,降低了约89.92%。表明改变摩擦方式可有效降低刮板的摩擦系数,减轻刮板与中部槽之间的摩擦。整体上,新型刮板的摩擦力远远低于传统刮板的摩擦力,前者约为后者的1/10。

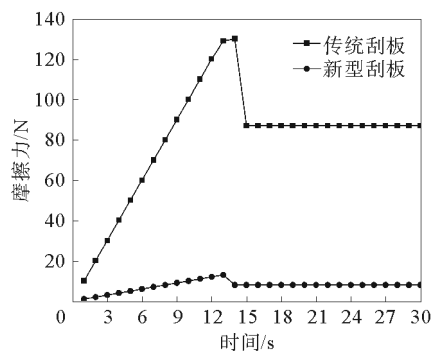


图4 某次刮板摩擦力数值

Fig. 4 Numerical values of scraper friction at a given time

3 新型刮板的应用效果

内蒙古双欣煤矿某工作面(以下简称工作面)走向长度为3 775.7 m,倾向长度为205 m,平均煤厚为5.31 m,使用MA7LS6电牵引双滚筒采煤机、ZY11000/28/63D型支撑掩护式支架和SGZ1250/2×1000型刮板输送机,设计运量1 500 t/h,装机功率为2×1 800 kW,链速1.35 m/s,刮板链单位长度的质量为90 kg/m,中部槽倾角为30°。刮板输送机机头机尾各备1台YJVFG-500M2-4T矿用隔爆兼本质安全型变频调速一体机,额定电流220 A,额定频率50 Hz。

3.1 载荷效果

电机的载荷与电流的关系是密切相关的。提取刮板输送机机头、机尾变频电机数据,选取运载量相近的两个时间段(3月1日—3月10日;6月3日—6月24日),对输送机电流数据进行对比分析。

在刮板输送机整体运行电流难以测量的情况下,用测量的两端电流量来代替整体电流量是一种常见的方法。这种方法基于电流在电路中的守恒原理,即电流进入一个节点等于离开该节点的电流。从图5中观察到,在内蒙古双欣煤矿投入使用新型刮板后,刮板输送机机头在电流40~89 A范围内的运行时间明显增加,而电流超过90 A的运行时间占比则减少。同时,机尾在电流40~99 A范围内的运行时间明显增加,而电流超过100 A的运行时间占比也减少。新型刮板在运行时更多地保持在低电流范围内,实现了刮板运行载荷的降低,达到了节能效果。

使用新型刮板后,刮板输送机的性能得到了显著改善。刮板输送机机尾日平均电流降低8%,机尾平均超载时间下降60%;而机头日平均电流下降11%,平均超载时间下降50.5%,刮板输送机日平均总电流下

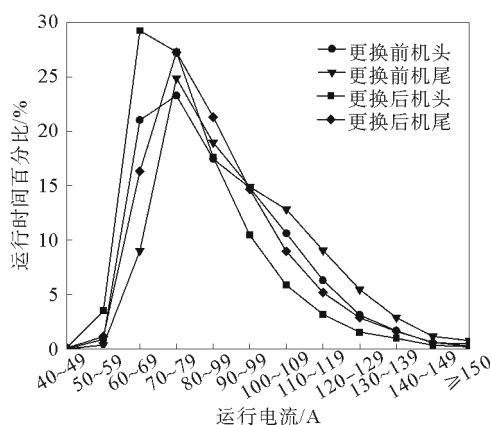


图5 刮板输送机机头、机尾电流分布变化

Fig. 5 Variation of current distribution at the head and tail of scraper conveyor

降 9.6%。

刮板输送机机头、机尾载荷时间段占比分别见图 6 和图 7,可以清楚地看到,刮板输送机更换新型刮板后,机头和机尾的运行载荷主要集中在低载荷和中载荷范围内。具体来说,低载荷在整体运行中所占比例逐渐增加,而超载荷、高载荷和中载荷所占比例则逐渐减小。新型刮板显著减小了刮板输送机的运行载荷,使得刮板输送机在运行时更趋向于低载荷和中载荷状态。

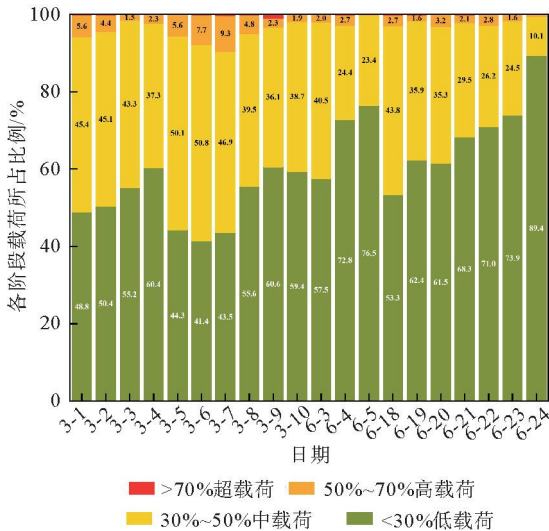


图 6 刮板输送机机头载荷时间段占比

Fig. 6 Percentage of time period of head load of scraper conveyor

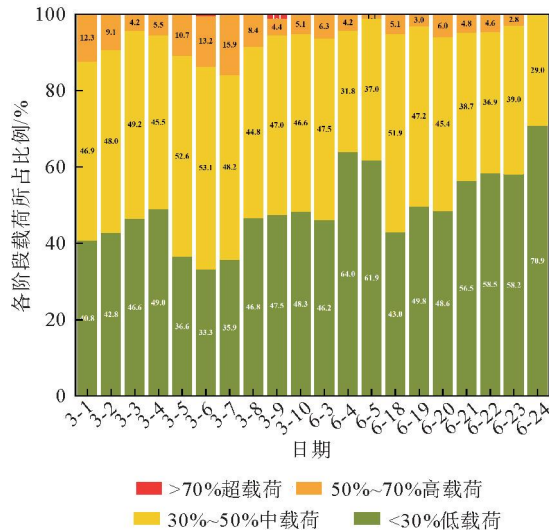


图 7 刮板输送机机尾载荷时间段占比

Fig. 7 Percentage of time period of tail load of scraper conveyor

刮板输送机电流频率对比见图 8,对比 3 月份和 6 月份 4 种不同载荷情况发生频率发现,新型刮板安装前,低载荷状态发生平均频率为 34%,而安装后发生平均频率为 46.5%;新型刮板安装前,中载荷状态发生平均频率为 55.7%,而安装后发生平均频率为 48.7%;新型刮板安装前,高载荷状态发生平均频率为 9.6%,而安装后发生平均频率为 4.6%;新型刮板安装前,超载荷状态发生平均频率为 0.7%,而安装后发生平均频率为 0.2%。相较于传统刮板,使用新型刮板的刮板输送机低载荷状态发生频率提升了 12.5%,而中载、高载、超载荷状态频率均有下降。这表明,新型刮板的使用,有效降低了空载及带载状态下的工作电流,不仅使刮板输送机更节能,也增加了刮板输送机的稳定性。

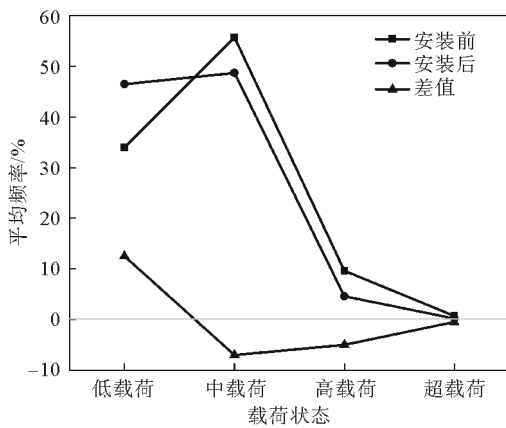


图 8 刮板输送机电流频率对比图

Fig. 8 Comparison of current frequency of scraper conveyor

3.2 节能效果

收集传统刮板与新型刮板运行时的电动机功率数据,分析使用新型刮板前后电动机的功率与运输能力的变化,结果如图 9 所示。空载时,传统刮板输送机的电动机功率为 614.2 kW,而新型刮板输送机的电动机功率为 415.5 kW,刮板空载运行时的初始功率明显降低,无效的机械功率降低了 32.4%。随着运输量的增加,电动机功率逐步提高。在运输量 1 500 t/h 时,传统刮板输送机的电动机功率为 1 754.87 kW,新型刮板输送机的电动机功率仅为 1 330.98 kW。

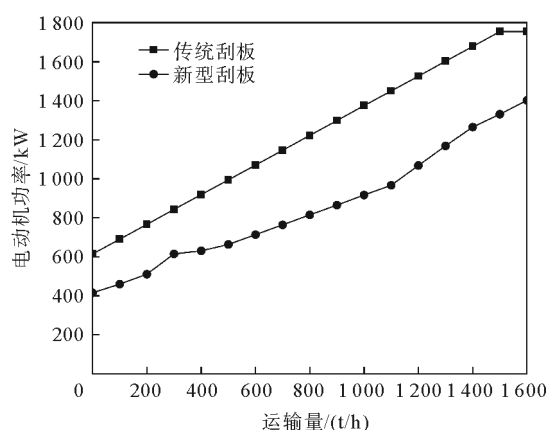


图9 电动机功率变化

Fig. 9 Motor power variation

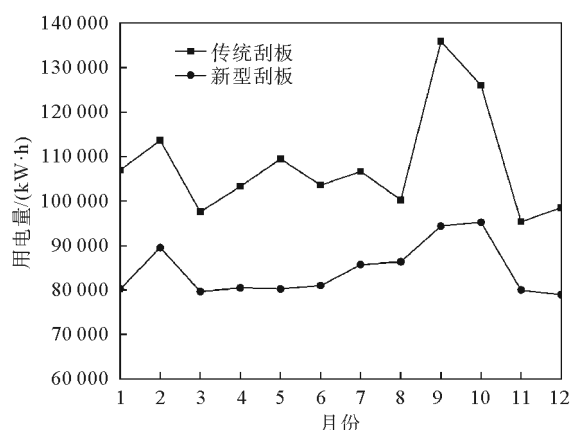


图10 刮板输送机电动机的年用电量变化

Fig. 10 Variation in annual electricity consumption of scraper conveyor motors

工作面安装了1台刮板输送机,配有2台电动机。为使数据更完整,分别取传统刮板输送机和新型刮板输送机在同一工作面各运行12个月的年用电量进行比较。如图10所示,新型刮板投入使用后,每台电动机的年用电量降低了25%左右。

在运输量相同的条件下,新型刮板投入使用后,输送机的无效机械功率降低了约33.3%。新型刮板输送机的电动机年用电成本明显下降,传统刮板输送机的电动机年用电成本为221.56万元/台,而新型刮板输送机的电动机的年用电成本为161.75万元/台,因此2台传统刮板输送机的电动机的年用电成本为443.12万元,而2台新型刮板输送机的电动机的年用电成本为323.5万元。新型刮板投入使用后,工作面年耗电量降低了27%。

新型刮板输送机可以在一定时间内提高工作效率,减少能耗,达到节能的作用。节能率 η 是指相同条件下新型刮板输送机比传统刮板输送机的单位能耗降低率,有

$$\eta = [(W_{ct} - W_{xx}) / W_{ct}] \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_{ct} 为传统刮板输送机能耗, W_{xx} 为新型刮板输送机能耗。

配有新型刮板的输送机应用于综采工作面的实际采煤作业中,有效节能率达6.66%,节能效果明显,满足了煤炭企业精益生产的需要,为煤炭企业带来经济效益。

3.3 维护成本

维护成本以刮板输送机故障率表示。故障率通常用于衡量设备的可靠性和稳定性,指机械设备在一定时间内发生故障的概率或频率,较高的故障率意味着刮板输送机更容易发生故障,需要更频繁的维修和维护;相反,较低的故障率表示刮板输送机更可靠,故障发生的概率较低^[25]。刮板输送机故障率

$$\gamma = t_f / T \quad (2)$$

式中: t_f 为刮板输送机故障时间, T 为刮板输送机总运行时间。

新型刮板在内蒙古双欣煤矿投入使用后,由于改变了刮板与中部槽之间的接触方式,有效减少了故障次数和故障时间。新型刮板投入使用前期一直在调试,从4月开始稳定运行,4—12月故障率具有有效性。刮板输送机故障率如图11所示,新型刮板输送机故障率为5.6%~15.2%,而传统刮板输送机4—12月的故障率为10.4%~27.7%。新型刮板输送机与传统刮板输送机相

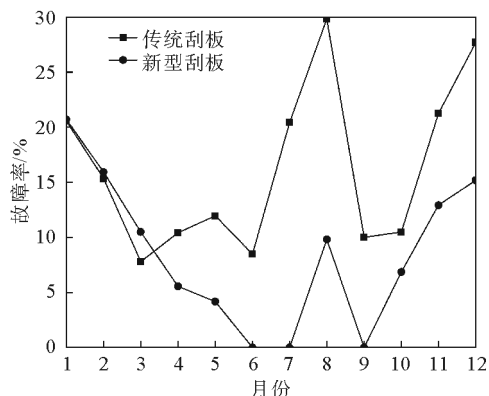


图11 刮板输送机故障率

Fig. 11 Failure rate of scraper conveyor

比,故障率总体呈下降趋势,表明通过改变刮板与中部槽的接触方式以及设置自动排污结构,可以有效降低刮板输送机运行中刮板带来的故障问题,提高运行效率和稳定性。

4 结论

通过改变刮板与中部槽的接触方式以及更换支撑体材料,减少了刮板输送机的磨损和能耗。采用聚氨酯材料制造新型刮板的支撑体,降低刮板自重,增加刮板的缓冲性。安装滚动支座,将刮板与中部槽之间的摩擦方式由滑动摩擦变为滚动摩擦,减小摩擦力,减轻刮板与中部槽的磨损状况,提升刮板乃至刮板输送机的整机使用寿命。摩擦阻力实验证明刮板局部优化效果显著,新型刮板的摩擦力远低于传统刮板的摩擦力,前者约为后者的 1/10。现场应用证明,新型刮板投入使用后,刮板输送机运行更加稳定,节能效果显著,维护成本有效降低。本研究仅考虑了刮板输送机的局部结构优化,忽略了链条张力等因素,而实际工作中刮板输送机一直在循环载荷和振动冲击载荷下工作,新型刮板投入使用后,对输送机链条的张力大幅度减少,这是否会对刮板输送机运行能耗产生影响,需要进一步研究。

参考文献:

- [1] 尤秀松,葛世荣,郭一楠,等. 智采工作面三机数字孪生驱动控制架构[J]. 煤炭学报,2024,49(7):3265-3275.
YOU Xiusong, GE Shirong, GUO Yinan, et al. Digital twin-driven control construction for three machines of smart coal mining face[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3265-3275.
- [2] 徐振华,陈新华. 矿用输送带磨损的原因分析及对策[J]. 山东矿业学院学报(自然科学版),1999,18(3):26-28.
XU Zhenhua, CHEN Xinhua. Analysis of the wear causes of mine conveyor belt and its countermeasures[J]. Journal of Shandong Institute of Mining and Technology(Natural Science), 18(3): 26-28.
- [3] 孔祥利,王建行,杨春学. 近水平煤层综采工作面刮板输送机“上窜下滑”控制方法研究[J]. 煤炭工程,2023,55(9):67-70.
KONG Xiangli, WANG Jianhang, YANG Chunxue. Control method of scraper conveyor slippage in fully mechanized working face of flat coal seam[J]. Coal Engineering, 2023, 55(9): 67-70.
- [4] 曹云改. 履带刮板取料机变幅机构的 2 种方案比选[J]. 中国新技术新产品,2021(2):55-58.
CAO Yungai. Comparison and selection of two schemes for the luffing mechanism of the crawler scraper reclaimer[J]. New Technology and New Products of China, 2021(2): 55-58.
- [5] 廖先玲,李玉然. 基于 DEA 的煤炭行业生态效率评价研究[J]. 山东科技大学学报(社会科学版),2016,18(5):91-95.
LIAO Xianling, LI Yuran. Evaluation of the ecological efficiency in the coal industry based on DEA[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Social Sciences), 2016, 18(5): 91-95.
- [6] 韩煜斌. 刮板输送机中部槽磨损问题分析与改进策略研究[J]. 机械管理开发,2023,38(7):44-46.
HAN Yubin. Analysis of wear problems and improvement strategies of the central groove of a scraper conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(7): 44-46.
- [7] 杨向峰. 刮板输送机中部槽结构设计优化研究[J]. 机械管理开发,2023,38(7):117-119.
YANG Xiangfeng. Study on the optimization of the design of the central structure of scraper[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(7): 117-119.
- [8] 闫沁江. 等离子熔覆技术在刮板输送机中部槽的研究与应用[J]. 能源与环保,2023,45(7):250-253.
YAN Qinjiang. Research and application of plasma cladding technology on middle slot of scraper conveyor[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023, 45(7): 250-253.
- [9] 李俊. 基于模拟分析的刮板输送机中部槽结构优化[J]. 机械管理开发,2023,38(5):120-122.
LI Jun. Structural optimization of the central trough of scraper conveyor based on simulation analysis[J]. Mechanical Management and Development, 2023, 38(5): 120-122.
- [10] XIA R, WANG X W, LI B, et al. The prediction of wear on a scraper conveyor chute affected by different factors based on the discrete element method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(17): 6229-6239.
- [11] LI J X, LIANG S W. Friction and wear of the middle trough in scraper conveyors[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2018, 70(6): 1072-1077.

- [12] LI B, WANG X W, XIA R, et al. Research on the bionic design of the middle trough of a scraper conveyor based on the finite element method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233(9): 3286-3301.
- [13] 刘祖国, 张大斌, 雷焱, 等. 基于 ANSYS 刮板静应力及优化分析[J]. 湖北工程学院学报, 2016, 36(6): 106-109.
LIU Zuguo, ZHANG Dabin, LEI Yan, et al. Static stress and optimization analysis of scraper based on ANSYS[J]. Journal of Hubei Engineering University, 2016, 36(6): 106-109.
- [14] ZHANG Q, ZHANG R X, TIAN Y. Scraper conveyor structure improvement and performance comparative analysis[J]. Strength of Materials, 2020, 52(4): 683-690.
- [15] 刘保东. 基于 Pro/Engineer 刮板输送机刮板的优化设计[J]. 矿山机械, 2017, 45(3): 30-34.
LIU Baodong. Optimization design of scraper of scraper conveyor basing on Pro/Engineer[J]. Mining and Processing Equipment, 2017, 45(3): 30-34.
- [16] 薛秀丽. 刮板输送机中刮板磨损问题的分析与改进[J]. 机械管理开发, 2020, 35(4): 123-124.
XUE Xiuli. Analysis and improvement of scraper wear in scraper conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2020, 35(4): 123-124.
- [17] 王明旭, 龙璠, 张洪源. 管链输送机刮板磨损分析与设计[J]. 包装与食品机械, 2021, 39(6): 53-59.
WANG Mingxu, LONG Yun, ZHANG Hongyuan. Analysis and design of scraper wear of pipe chain conveyor[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(6): 53-59.
- [18] 李扬. 选煤机排料系统中刮板结构的优化和应用[J]. 自动化应用, 2023, 64(13): 113-114.
LI Yang. Optimization and application of scraper structure in coal preparation machine discharge system[J]. Automation Application, 2023, 64(13): 113-114.
- [19] 李小刚. 选煤机排料系统中刮板结构的优化研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(12): 78-79.
LI Xiaogang. Study on the optimization of scraper structure in coal separator discharge system[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(12): 78-79.
- [20] MAJUMDAR S, KUMAR S, CHAKRABORTY S, et al. Effective application of scraper board in grinding[J]. Tribology International, 2017, 116: 120-128.
- [21] 王贤才, 张亚普, 柴蓉霞. 27SiMn 钢表面激光熔覆 304 不锈钢的组织 and 性能[J]. 金属热处理, 2020, 45(4): 188-193.
WANG Xiancai, ZHANG Yapu, CHAI Rongxia. Microstructure and properties of 304 stainless steel laser cladding on 27SiMn steel surface[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(4): 188-193.
- [22] 仇月仙, 李覃. 基于聚氨酯的高分子功能材料的导电响应特征[J]. 塑料工业, 2022, 50(11): 124-130.
ZHANG Yuexian, LI Qin. Conductive response characteristics of polymer functional materials based on polyurethane[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(11): 124-130.
- [23] 冯志威, 董方栋, 王志军. 硬质合金球形破片侵彻 UHMWPE 纤维层合板试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1): 69-73.
FENG Zhiwei, DONG Fangdong, WANG Zhijun. Experimental study on penetration of spherical cemented carbide fragment into UHMWPE fiber laminates[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(1): 69-73.
- [24] 杨子琴, 李建国, 张蕾, 等. 龙眼果实脱落特性参数与果柄分离力的相关性分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 2986-2992.
YANG Ziqin, LI Jianguo, ZHANG Lei, et al. Relativity analysis between characteristic parameters of off-season longan abscission and its fruit removal force[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(10): 2986-2992.
- [25] GHEIBI M, MOEZZI R, TAGHAVIAN H, et al. A risk-based soft sensor for failure rate monitoring in water distribution network via adaptive neuro-fuzzy interference systems[J/OL]. Scientific Reports, 2023, 13(1). DOI:10.1038/s41598-023-38620-w.

(责任编辑:吕海亮)