

刮板输送机中部槽的磨损特性及其耐磨优化研究现状

李 博, 乔琳栋, 夏 蕊, 王学文

(太原理工大学 机械与运载工程学院, 煤矿综采装备山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 为了降低刮板输送机中部槽磨损失效而产生的影响和提高耐磨性能, 综述中部槽磨损特性和耐磨优化研究的发展历程, 包括磨损形式、磨损原因、磨损形貌和磨损区域等理论研究, 输运条件、煤岩散料特性等试验研究, 离散元法及与多体动力学耦合的仿真分析等。概括耐磨材料、表面强化技术、结构改进、仿生设计等4种提高中部槽耐磨性能的方法。提出磨损特性研究的下一步方向为磨损内在本质的研究、磨损定量的研究, 提出用非线性理论方法进行中部槽磨损量拟合、磨损预测等新的研究思路; 耐磨优化研究重点应在节约成本, 并将耐磨技术尽快应用于刮板输送机生产实际; 用非线性理论方法进行中部槽磨损量拟合预测, 并从中部槽摩擦副之间的相互作用为出发点进行磨损特性和耐磨优化的研究。

关键词: 刮板输送机; 中部槽; 摩擦磨损; 耐磨优化

中图分类号: TD528; TH227; TB44

文献标志码: A

引用格式:

李博, 乔琳栋, 夏蕊, 等. 刮板输送机中部槽的磨损特性及其耐磨优化研究现状[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(6): 1-15.

LI B, QIAO L D, XIA R, et al. Present situation of wear characteristics and wear resistance optimization in line pane of scraper conveyor[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(6): 1-15.

Present situation of wear characteristics and wear resistance optimization in line pane of scraper conveyor

LI Bo, QIAO Lindong, XIA Rui, WANG Xuewen

(College of Mechanical and Vehicle Engineering, Shanxi Provincial Key Laboratory of Coal Mining Equipment, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to reduce the impact caused by the wear fault in line pane of scraper conveyor and improve wear resistance, the development of wear characteristics and wear resistance optimization were reviewed, including the theoretical studies about wear forms, wear causes, wear morphology and wear areas, the experimental studies about transport conditions and coal bulk properties, and the simulation analysis about discrete element method and coupling with multi-body dynamics. Including wear-resistant materials, surface strengthening technology, structural improvement and bionic design, four methods to improve the wear resistance in line pane were summarized. It is suggested that the next direction of the research of wear characteristics is to study the intrinsic nature of wear and the quantitative study of wear. The research of wear-resistant optimization should focus on saving cost and applying wear-resistant technology to real scraper conveyor production as soon as possible. The nonlinear theory method is used to predict the wear quantity of the middle groove, and the wear characteristics and wear resistance optimization are studied from the interaction between the friction pairs of the middle groove.

Keywords: scraper conveyor; line pane; friction; wear resistance optimization

收稿日期: 2023-08-09, 修回日期: 2023-09-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目 编号: 52204149, 51804207; 山西省基础研究计划 编号: 202103021223080, 202203021221051。

第一作者简介: 李博(1988—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为机械装备结构与性能优化。E-mail: libo@tyut.edu.cn。

通信作者简介: 王学文(1979—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 研究方向为机械设计及理论。E-mail: wxuew@163.com。

刮板输送机是煤炭开采过程中运煤的关键设备,其高效安全的运转关系着整体的采煤效率^[1-2]。中部槽是刮板输送机运行时煤料的承载部分^[3],主要由槽帮、中板、底板等部件组成。在煤矿实际生产过程中,中部槽工作空间狭窄,且直接与刮板链、刮板和煤块等接触发生摩擦,产生的磨损十分严重,是刮板输送机磨损最严重的部件^[4-8]。而刮板输送机发生故障,也多由中部槽的过度磨损或断裂引起^[9],因此,中部槽能否长久使用是整个刮板输送机保持连续运行和高效运煤的关键。

中部槽磨损特性的研究经历了一定的发展过程^[10-12]。前期大部分的研究集中于中部槽的磨损形貌、磨损形式等方面,磨损特性研究处于基础阶段;随着综采工作面及煤炭开采技术的不断发展,基础理论研究不能完全满足刮板输送机的发展要求,相关学者开始分析中部槽的运行工况特点和煤散料的不同特性,利用磨损试验机模拟不同的工况条件,研究中部槽的磨损部位、影响磨损的因素等,磨损特性研究得到进一步发展;随着离散元法与仿真技术的发展,学者们开始将离散元仿真技术引入煤机装备研究中,基于离散元法构建中部槽与煤散料的刚散耦合模型进行仿真研究,并取得了大量的研究成果,磨损特性研究朝着现代化和全面化方向发展。基于磨损特性的研究,对于提高中部槽耐磨性能和使用寿命方法的研究也在一步步发展^[13-15]。最初的研究集中于中部槽的制作材料方面,学者们将尼龙、合金等新型材料替代原有的传统金属材料,中部槽磨损现象得到改善;随着堆焊、熔覆等技术在金属材料方面的研究发展,学者们利用表面强化技术在中部槽表面生成涂层,中部槽耐磨性能得到进一步提高;同时有学者通过调整厚度、曲线优化等方法实现中部槽的结构改进,其耐磨性能同样得到提高;随着仿生技术的不断成熟,学者们通过提取特定的生物体表面结构特征,加工成相应的仿生中部槽,将仿生理论应用于煤机装备中,经试验验证,中部槽耐磨性能大幅度提高。中部槽耐磨优化研究朝着高效化和多元化方向发展。

本文从中部槽的磨损特性和耐磨优化两方面入手,从理论研究、试验研究、仿真分析3个方面综述了中部槽的磨损特性研究现状,介绍了耐磨材料、表面强化技术、结构改进、仿生设计4种提高中部槽耐磨的方法,并对中部槽的耐磨优化研究做出展望。

1 中部槽的磨损特性

磨损是一种因摩擦而引起物质不断损失的现象^[16]。图1为中部槽磨损图。如图所示,中部槽长时间与煤矸石和刮板等摩擦,发生的磨损十分严重。目前,相关学者通过运用理论研究、试验研究、仿真分析等方法在刮板输送机中部槽磨损特性方面进行了大量的研究,并取得了一定的研究成果。



图1 刮板输送机中部槽磨损

Fig.1 Wear in line pane

1.1 理论研究

中部槽的磨损理论研究集中在磨损原因、磨损形式、磨损形貌和磨损区域4个方面。

对于磨损原因,首先联想到中部槽与煤块直接接触发生摩擦。王新刚等^[17]将中部槽和刮板链的工况特点相结合,运用摩擦学理论分析中部槽磨损失效的原因,发现刮板链会无规则上下浮动,部分煤块被压在刮板链和刮板下,导致中板与煤块发生持续磨损,同时在中部槽下方煤块堵塞,导致运行阻力增大,加剧磨损。中部槽运行情况十分复杂,外有空间狭小、粉尘污染的工作环境,内有复杂零部件之间的

相互作用,因此磨损原因不是唯一的。吴兆宏等^[18]根据煤矿井下的刮板输送机调研资料,发现磨损不仅仅由煤块与中部槽摩擦产生,还包括刮板、刮板链以及其他部件对中部槽的接触摩擦产生的磨损。对于磨损形式,Chen等^[19]以SGW-44型刮板输送机为研究对象,分析了中部槽的结构和工作时的磨损情况,指出磨粒磨损、黏着磨损、疲劳磨损和腐蚀磨损是中部槽失效的4种形式。赵运才等^[20]通过研究中部槽摩擦学系统结构探索其磨损形式,发现在经典磨损理论的基础上,中部槽磨损形式以磨粒磨损和腐蚀磨损为主。对于磨损形貌和磨损区域,井下服役过的刮板输送机即为最真实的研究对象。在磨损形貌方面,胡元哲^[21]从宏观表面和亚表层2个方面分析了中部槽的磨损形貌,在宏观形貌上,煤块的不规则棱角在中部槽表面形成较深的磨坑,磨坑附近出现严重变形,呈现出纤维状的组织;在亚表层形貌上出现白亮层,由磨损产生的表面细马氏体组织组成,与中部槽基体材料形成鲜明对比。史志远^[22]通过调研煤矿开采单位、相关制造企业等,获得了许多真实磨损后的中部槽样槽资料,总结出中板的主要磨损形貌为链道磨损和穿透,底板的主要磨损形貌为变形与开裂。在磨损区域方面,史志远^[22]分析了磨损后的中部槽,发现在潮湿和易腐蚀的环境下,中板和底板磨损情况严重。温欢欢等^[23]分析煤机公司报废后的中部槽磨损情况,结果表明,中部槽整体存在不同程度的磨损,刮板链下方区域、中板边缘和槽帮处磨损最严重。

1.2 试验研究

中部槽的磨损量并非定值,与工况、环境温湿度和煤散料性质等有着密不可分的关系,理论研究无法分析这些条件,仅靠理论研究不能全面地掌握中部槽的磨损特性,而试验研究则可以弥补这一缺陷。由于刮板输送机体积庞大,且工作环境十分恶劣,直接在其表面进行试验研究难度较大,可执行性不高,因此,许多学者通过磨损试验机进行中部槽磨损试验,从运输条件和煤散料性质2个角度模拟中部槽工况条件进行磨损特性的研究。

通过磨损试验机控制接触压力、滑动速度和煤散料流速等运输条件,模拟中部槽真实的运行工况,李平辉等^[24]使用ML-130E型橡胶轮磨损试验机,通过控制橡胶轮转速(对应中部槽滑动速度)、磨料流速和试验时长,对槽帮材料进行磨损试验并观察磨损后的形态,发现表面出现许多截面宽、深度大的磨痕,并伴随着一些微犁沟与微切削区域。Shi等^[25]使用MLS-225型半自由磨损试验机进行多组磨损试验,模拟不同的接触压力和滑动速度,研究中部槽在不同工况条件下的磨损机制,绘制磨损机制分布图,如图2所示。由图可知,随着接触压力和滑动速度的增加,中部槽的磨损量也随之增加。

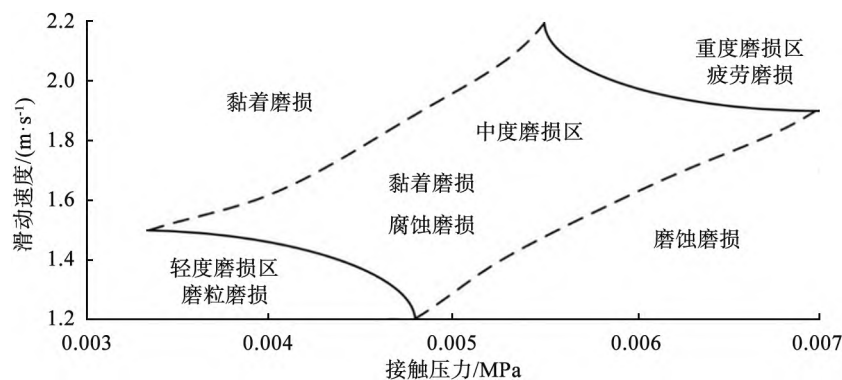


图2 磨损机制分布图

Fig.2 Wear mechanism distribution diagram

除了运输条件,中部槽磨损还与煤岩散料性质有关。Xia等^[26]使用ML-100C型磨粒磨损试验机,设计不同参数(泊松比、剪切模量和密度)的煤散料磨损试验,结果表明,中部槽的磨损受到煤散料性质的影响,磨损量随着3种参数的增加而增加,剪切模量对磨损量的影响最显著,其次是泊松比,密度影响最小。Li等^[27]使用MFT-4000型往复式磨损试验机,研究不同介质下刮板输送机中部槽的摩擦和磨损,结果表明,煤的种类对中部槽的磨损有影响。相同条件下,当无烟煤作为介质时,对中部槽的磨损最为严重,当褐煤作为介质时,对中部槽的磨损最小,只能看到轻微的磨损,磨损程度随着煤散料粒度的增加而增加。

中部槽运输条件和煤岩散料性质对磨损都有着至关重要的影响,二者结合才能模拟中部槽真实运行工况条件。如 Xia 等^[28-29]使用 ML-100C 型磨粒磨损试验机,结合 Plackett-Burman 试验设计和跟踪煤颗粒在磨损过程中位置变化等方法,研究了中部槽在不同的煤散料特性(哈氏可磨指数(HGI)、粒度、含水率、含矸率)和运输条件(法向载荷、刮板链速)的磨损情况。结果表明,中部槽磨损质量随着含水率、法向载荷、含矸率和粒度的增加而增加,呈现出正效应;随着 HGI 和刮板链速的增加而降低,呈现出负效应。6 种参数的影响显著性排序如图 3 所示。李博等^[30]为了探索煤岩散料特性和中部槽运输条件中影响磨损的显著性因素,基于响应面法设计了多组磨损试验。结果表明,法向载荷、含水率和含矸率对磨损有显著影响;得到了含水率与含矸率、含水率与磨损行程 2 组交互作用项对磨损的影响结果,如图 4、5 所示。由图分析可知,含水率对中部槽磨损的影响最明显,与其他因素交互作用时,磨损影响更为显著。

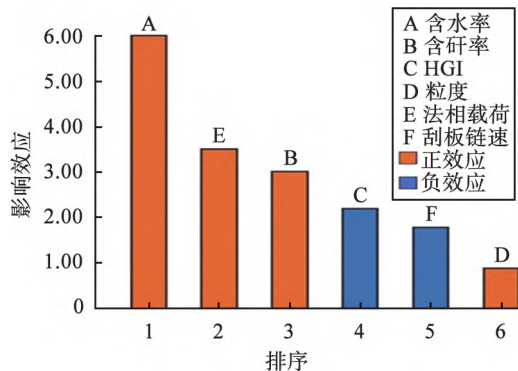
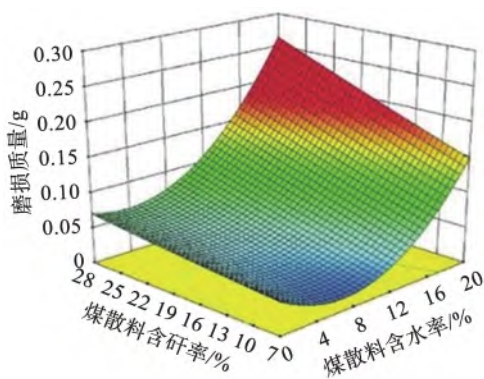
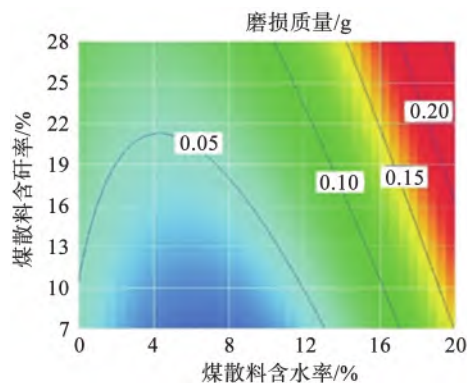


图 3 6 种参数影响显著性排序

Fig.3 Impact significance rank of six parameters



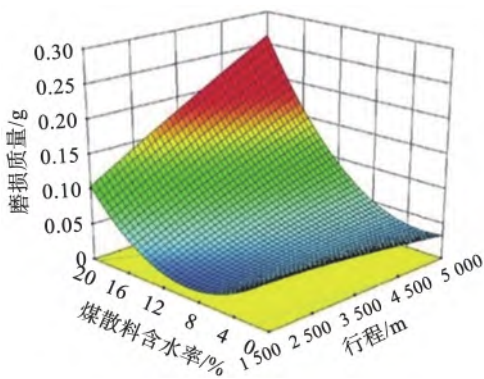
(a) 响应面图



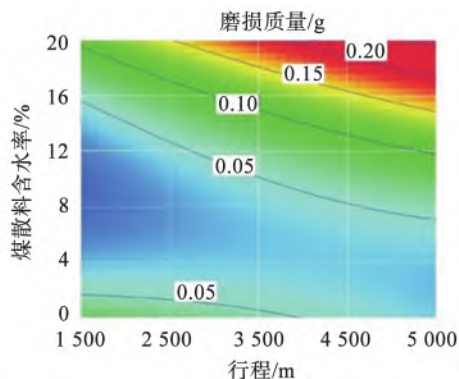
(b) 等高线图

图 4 煤散料含水率和含矸率对磨损质量的影响

Fig.4 Impact to wear amount between water content and gangue content



(a) 响应面图



(b) 等高线图

图 5 煤散料含水率和磨损行程对磨损质量的影响

Fig.5 Impact to wear amount between water content and wear distance

1.3 仿真分析

中部槽磨损特性的研究涉及到的因素与变量众多,仅依靠试验研究无法将因素考虑全面且所耗资金和时间成本较高,而模拟仿真研究则为中部槽磨损特性的研究提供便利。离散元法对于研究描述零部件、煤岩散料相互作用过程中颗粒的运动过程和受力状态等具有一定优势^[31-32]。近几年,国内外学者使用离散元法解决矿山机械装备领域诸多问题取得了较好的效果。离散元软件(EDEM) 可以设定如图 6 所示的颗粒形状、颗粒参数和接触模型,在模拟散料性质方面有独特的优势,应用于中部槽磨损特性的研究可以真实地模拟煤散料的各种特性。

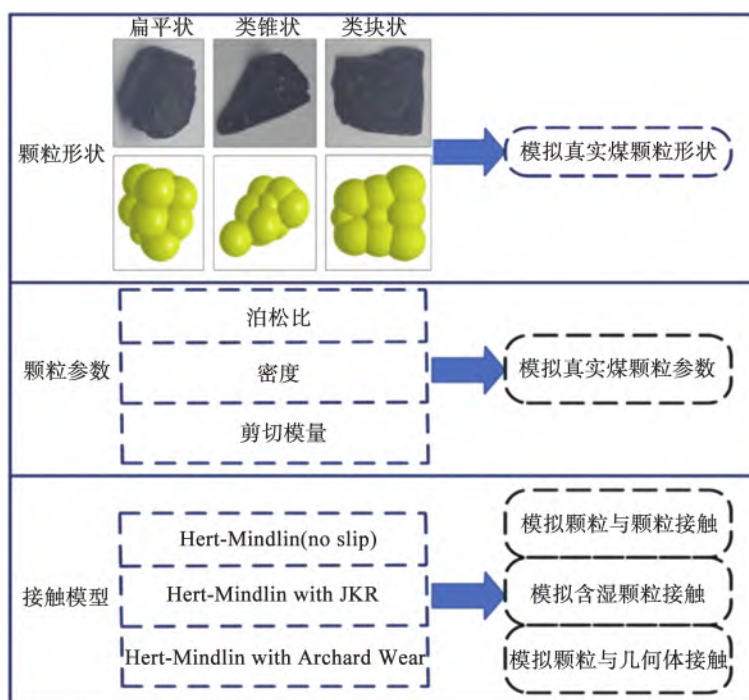


图 6 EDEM 设定颗粒特性

Fig.6 Setting up bulk properties in EDEM

相关学者使用 EDEM 软件进行了中部槽的仿真研究。Xia 等^[33]建立了中部槽和煤散料相互作用模型,研究中部槽在不同工况和煤散料特性下的磨损情况,结果表明,中部槽在落煤点附近的区域磨损最严重,离落煤点越远,运煤过程越平缓,磨损深度越小。Yao 等^[34]使用 EDEM 软件分析中部槽磨损情况,结合正交矩阵分析方法,获得了不同水平条件下煤散料粒度、刮板链间距和不同方向倾角 3 种因素对中部槽的磨损深度,其中煤散料粒度对中部槽磨损的影响最大,其次是刮板链间距,中部槽倾角的影响最小。李康等^[35]在 EDEM 软件中分析不同结构形式(链间距和刮板距离)和煤散料参数(种类和粒径)对中部槽的磨损影响,结果表明,随着链间距、刮板距离和煤散料粒径的增加,中部槽磨损深度呈现出逐渐加深的趋势,在不同种类的煤块中,无烟煤对磨损的影响最大。

EDEM 软件在模拟煤散料特性方面发挥了巨大优势,中部槽磨损特性的研究更加方便,但中部槽的磨损不仅涉及到煤散料造成的磨损,还涉及到中部槽部件之间相互摩擦产生的磨损,例如槽帮-煤散料-刮板之间的三体磨损。在面对磨损研究中的刚体接触时, EDEM 软件不具备机械系统动力学分析功能,无法模拟中部槽零部件之间复杂的相互作用过程,因此需借助多体动力学软件实现刚体(中部槽)和散料(煤岩散料)的耦合分析^[36],如图 7 所示,才能真实模拟中部槽工况特点。目前学者们耦合研究使用最多的是 EDEM 软件和 RecurDyn 软件,如李博等^[37]使用 EDEM 和 RecurDyn 建立中部槽刚散耦合作用模型,对中部槽输运状态和不同工况条件下的中板磨损进行了研究,刮板链下方的中板区域磨损量远大于其他区域的磨损量;中部槽磨损量随负载和煤散料含矸率的增加而增加;煤散料在中部槽输运过程中存在大颗粒在上、小颗粒在下的现象,即“巴西果效应”,如图 8 所示。赵保林等^[38]使用

EDEM 和 RecurDyn 耦合分析了磨损后的中板状态,观察磨损形貌,发现中板表面呈现出较为明显的犁沟、细长或水滴状的金属黏着块。Ma 等^[39]使用 EDEM 和 RecurDyn 建立了中部槽耦合模型,根据中部槽的磨损形态对中部槽进行磨损分析,发现中板上存在间歇性和条状磨损区域,如图 9 所示。中间的 2 个磨损严重区域位于刮板和双排链条的正下方,侧面磨损严重区域位于刮板的正下方,中板在不同位置的磨损程度差异很大。

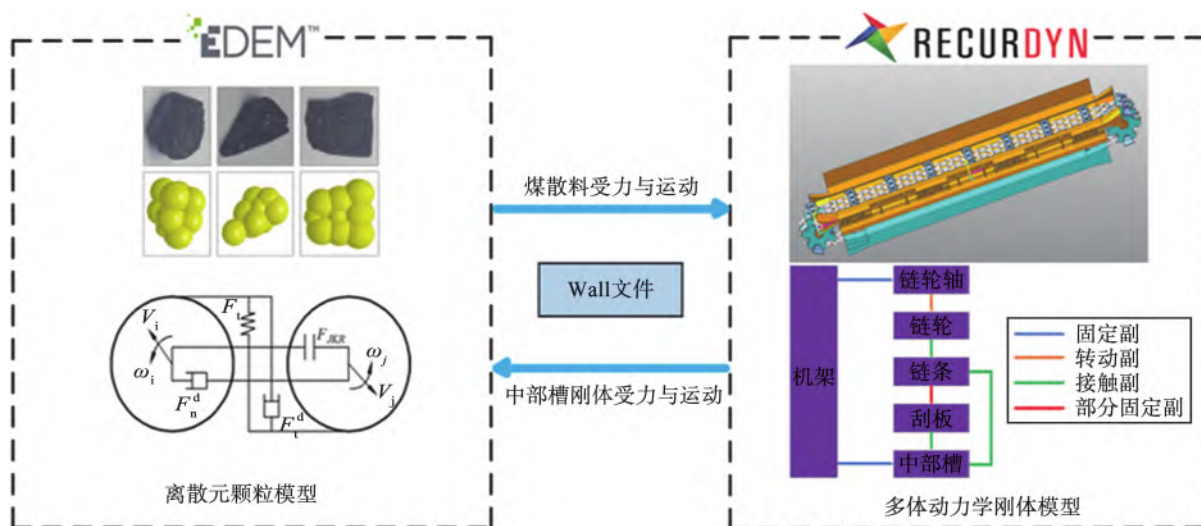


图 7 耦合仿真

Fig.7 Coupling simulation

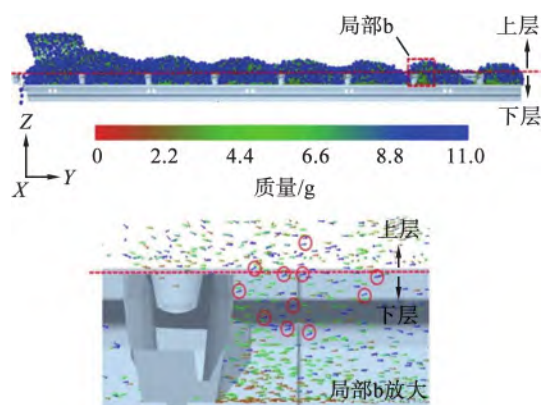


图 8 不同质量的煤散料分布

Fig.8 Different quality coal bulk distribution

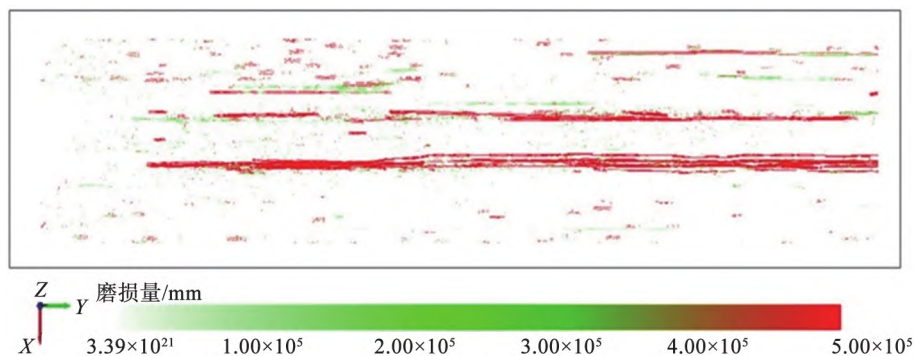


图 9 中板磨损区域

Fig.9 Wear area of middle plate

2 中部槽的耐磨优化

2.1 耐磨材料

制作中部槽的材料以合金钢 ZG30MnSi 和碳锰钢 16Mn 为主;但由于其强度、韧性以及耐磨性较差,导致过煤量和输运效率处于较低水平,因此难以满足现代煤矿开采对刮板输送机的要求。直接研究中部槽整体材料消耗较大,经济成本较高,因此将耐磨材料应用于磨损相对严重的中板和槽帮部件,成为学者们研究的重要方向。

对于中板磨损,Ge 等^[40]研制了新型中锰奥氏体钢并应用于中板材料,在中板表面形成厚度为 1 mm 的硬化层,磨损量降低了 30%。Chai 等^[41]对比了一种新型的高钛低合金耐磨钢(ZM4-13)和一种典型耐磨钢(NM400)的耐磨性,发现在 ZM4-13 钢表面形成一个高硬度的沉淀区域,阻碍了煤颗粒的犁削和塑性变形,经试验测定 ZM4-13 钢的耐磨性是 NM400 钢的 1.1~2.1 倍,ZM4-13 钢更适用于刮板输送机中部槽的耐磨材料。董志斌等^[42]研究 16Mn、耐磨钢(NM360、NM400、NM450、NM500、Hardox400) 6 种中板材料的耐磨性能,结果表明,NM500 材料的耐磨性能最好,用于中部槽材料可以最大程度地实现减磨的目的。对于槽帮磨损,徐海峰等^[43]研发了价格低廉且制造难度低的新耐合金钢(ZG30MnSiMoRe)用于槽帮,经实验测定其使用寿命提高 1 倍以上,显著提高了中部槽耐磨性能。宋建峰等^[44]通过合金元素和热处理工艺相结合,制成高强度高耐磨性能的合金钢(TNZ 系列)用于槽帮,解决了传统槽帮强度低、耐磨性差等问题,延长了槽帮使用寿命。

通过调整中部槽原材料中的元素配方比例,改善材料的耐磨性能,如通方煤机在槽帮材料中添加适当的 Cu、Cr 和稀土合金元素并改变各元素配比,中部槽的磨损情况得到改善,耐磨性能提升了近 30%^[45]。朱瑾等^[46]研究了新型不同 Ti 元素含量的耐磨钢的耐磨性能,并通过实验加以验证,结果表明,中部槽的磨损量随着 Ti 元素含量的增加而降低,在已有的耐磨钢材料中适当添加 Ti 元素,可以提高其耐磨性。Li 等^[47]制备了不同 Gr 含量的 Fe-Ni 基复合材料用于刮板输送机中部槽材料,发现其耐磨性能约为 16Mn 钢耐磨性能 2 倍,且当 Gr 质量分数为 3%时,中部槽的耐磨性能最佳。

2.2 表面强化技术

表面强化技术主要通过各种强化工艺来增强材料的硬度和耐磨性等^[48],应用于中部槽修复场合,对于提高中部槽耐磨性和使用寿命具有重要意义。常用的中部槽表面强化技术包括堆焊技术、等离子熔覆技术和激光熔覆技术,经表面强化处理后的中部槽如图 10 所示。

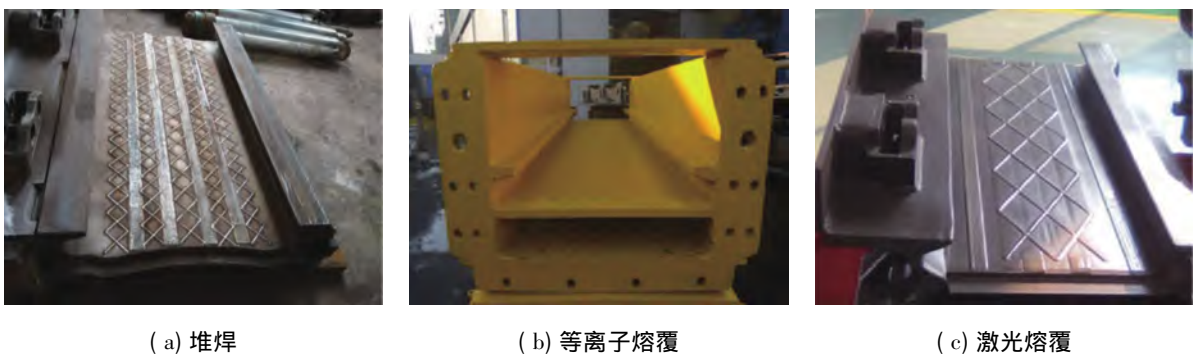


图 10 处理后的刮板输送机中部槽

Fig.10 Strengthening line pane

2.2.1 堆焊技术

堆焊技术是一种金属制造加工技术,通过将金属材料在高温下融化,堆积在中部槽磨损严重的区域,形成较厚的金属层,从而提高中部槽的耐磨性能^[49]。应鹏展等^[50]通过磨损试验对 3 种耐磨焊条进行对比研究,发现中板耐磨焊层由马氏体、奥氏体和碳化物组合而成,中板硬度和耐磨性均有提高,堆焊焊条(Cr-W-B-Nb)耐磨性最好。张小凤等^[51]通过使用新型焊条对中板进行菱形花纹焊道堆焊,发现

经耐磨堆焊后的中部槽机械稳定性得到加强,耐磨性和使用寿命得到提高。刘朝阳等^[52]通过堆焊条纹法设计了中板试样,并通过摩擦磨损试验与光滑中板试样进行对比,结果表明堆焊条纹中板磨损大部分集中在条纹凸体上,耐磨性能远远高于光滑中板试样。

2.2.2 等离子熔覆技术

等离子熔覆技术通过将金属粉末在高温等离子体环境中迅速融化,在中部槽表面形成一层致密均匀的涂层,从而提高耐磨性能^[53]。Yang 等^[54]采用等离子熔覆技术在耐磨钢(Hardox450)表面生成了具有抗摩擦作用的熔覆层,摩擦系数和磨损率均低于原材料,并且不随载荷和滑动速度的变化而变化,有效提高了中部槽的硬度和耐磨性能。Li 等^[55]用 Fe-Cr-B-Si 基合金粉末通过等离子熔覆技术在 NM450 型钢材表面制备涂层研究其摩擦磨损性能,发现在涂层中形成了大量的高强度马氏体,比原材料的硬度更高,摩擦磨损性能更好,应用于中部槽能够大幅度提高其耐磨性能。刘鸣放等^[56]使用等离子熔覆设备,在中部槽表面生成熔覆层,磨损试验表明随着熔覆层中硼元素含量的增加,稳定性和耐磨性呈现先上升后下降的趋势;当硼元素质量分数为 4.5% 时,熔覆层稳定性最强,耐磨性为原材料的 5.4 倍;井下实验表明,生成熔覆层的中部槽使用寿命可延长 2~3 倍。

2.2.3 激光熔覆技术

激光熔覆技术是一种高精度激光加工技术,将高能激光束对中部槽进行加热处理,使覆盖在表面的金属物质迅速融化并附着在表面形成金属涂层,提高中部槽的耐磨性能^[57]。激光熔覆技术具有高效、高精度和破坏力小等特点,加工技术方面十分方便。Guo 等^[58]研究热处理激光熔覆铁基合金的摩擦磨损性能,发现经处理后的刮板输送机磨损量降低了近 34%,耐磨性显著提高。潘兴东等^[59]针对中板磨损,利用激光熔覆提升中板性能,通过试验验证中板在激光熔覆后,整体磨损性能显著提高,中部槽寿命得到延长。曹青等^[60]使用自行设计的 WC 颗粒增强镍基合金粉末,利用激光熔覆技术在矿用刮板运输机中部槽上成功制备了 Ni50-WC 涂层。相比于传统材料,使用 WC 粉末制备出的熔覆涂层耐磨性能更优异,中部槽使用寿命更长。

2.3 结构改进

结构改进通常包括曲线优化和尺寸调整等方法。中部槽体积在整个刮板输送机中占比最大,其重量占据了近 70%,整体上进行结构改进难度较大,因此部分学者将槽帮、中板等易发生磨损的部位作为研究出发点,以期望通过结构改进方法降低中部槽磨损。

相关研究表明,通过结构改进方法降低中部槽磨损,效果显著,如对于槽帮的改进,刘俊等^[61]在原有结构的基础上进行曲线优化,将上边沿的直线型结构优化为带有弧形的结构,将上边沿最下端的直角状优化为向外凸三角状,将下边沿在原有基础上向下倾斜一定角度,如图 11 所示;将 2 种槽帮结构进行耦合仿真研究,获得了如图 12 所示的煤料、刮板对 2 种槽帮的作用力变化曲线,分析发现新型槽帮所受作用力均小于原结构槽帮,有利于延缓槽帮磨损。对于中板的改进,胡万飞等^[62]通过调整中板尤其是刮板链下方磨损严重区域的厚度,改善了中板磨损情况,磨损现象明显减轻。为了降低中板磨损,有

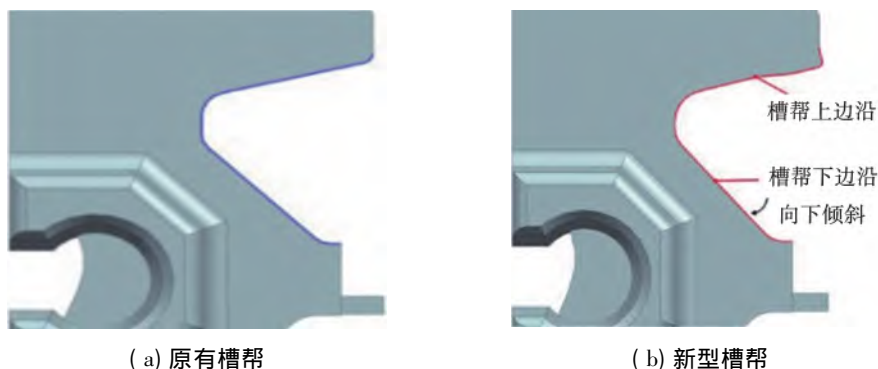


图 11 槽帮曲线优化

Fig.11 Curve optimization of groove

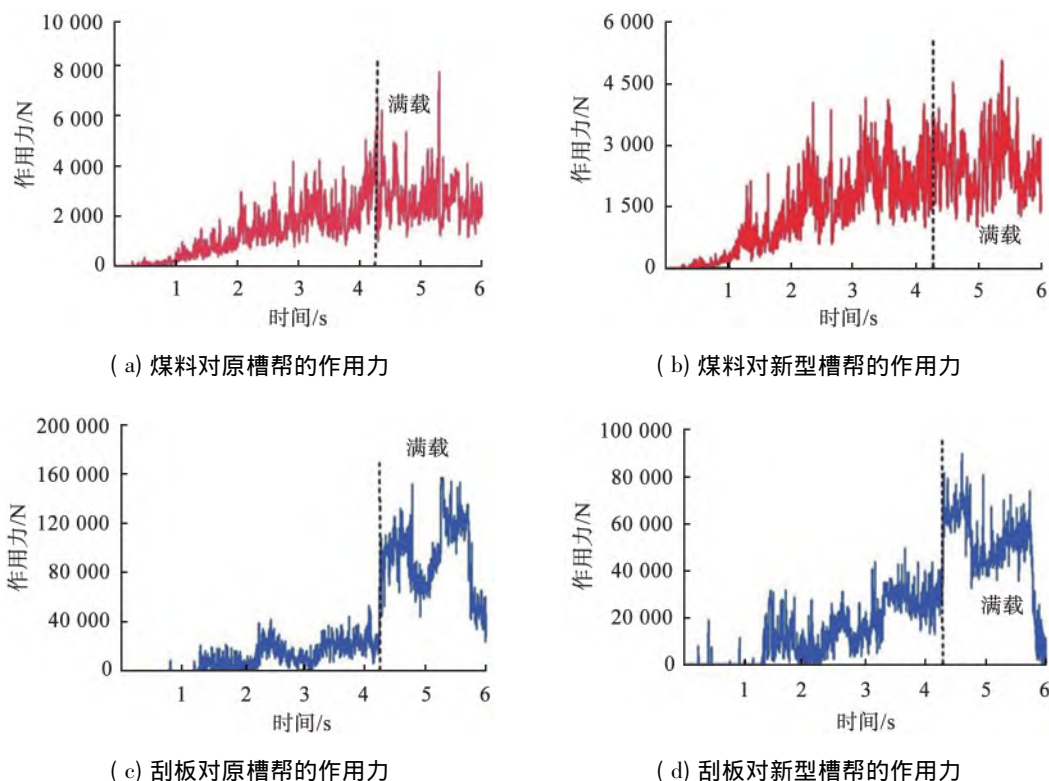


图12 槽帮所受作用力曲线图

Fig.12 Force curve diagram

厂家在基础中板部件上方加装由耐磨合金制成的可更换中板层,原中板不被破坏,耐磨性能明显提升^[63]。除了槽帮和中板,针对两节中部槽相连接的地方,Feng等^[64]通过增加哑铃销销身长度和哑铃销两端直径对中部槽进行结构改进,结果表明,增加哑铃销两端直径的方法比增加哑铃销销身长度更有效,但2种方法同时使用的话,耐磨效果更好。

2.4 仿生设计

仿生学是一门利用从自然界生物体获得的知识解决实际工程问题的科学^[65],诸多研究将仿生技术应用于复杂机械设备的减摩耐磨领域。如图13所示,刮板输送机中部槽的研究引进仿生耐磨技术,对提高其耐磨性有明显的效果。如Li等^[66]基于仿生非光滑耐磨理论,采用四因素三水平正交试验对中板进行仿生设计,并与仿真结果进行比较,发现仿生凹坑结构能够缓解煤散料对其表面的摩擦与冲击作用,使中板受力情况得到改善,提高了中板的耐磨性能。王学文等^[67]借助仿生非光滑理论,在中板表面设计出仿生凹坑型结构,将最优耐磨参数组合下的仿生结构与光滑结构对比,结果表明,凹坑型仿生结构减磨效率达到24.81%,可以有效地减少中部槽的磨损,具有良好的耐磨性能。李娟莉等^[68]以扇贝壳为原型设计了仿生条纹型中板,通过单因素法和响应面法对仿生结构进行磨损试验,结果表明仿生条纹型结构有效提高了中板的耐磨性能,相比于光滑中板,磨损量减少了78.54%。

3 中部槽研究展望

3.1 磨损特性研究局限性分析及展望

目前刮板输送机中部槽的磨损特性研究已经从磨损形式、磨损原因、影响磨损的因素等方面取得了大量的研究成果,在一定程度上揭示了摩擦磨损机理,为中部槽的耐磨优化以及刮板输送机的改进设计提供了理论依据。然而这些研究还停留在磨损表面阶段和定性研究,对于磨损变化的本质、变化的内在过程及趋势等研究相对较少。磨损的定量研究,即根据磨损机制演变相应的理论公式进行磨损规律研究,如张丹等^[69]根据黏着磨损而演变出的Archard磨损计算公式,通过建立磨损数学模型研究采煤机

行走轮齿的磨损特性,根据获得的磨损深度、滑动距离等数据分析磨损情况。中部槽磨损特性的研究,还有望在非线形理论方法中寻求新的研究思路,如王平等^[70]基于 PSO 混合算法,在模拟试验机上优化反向传播(back-propagation)网络对火车钢轨进行磨损量拟合。杨俊叶等^[71]构建卷积神经网络(CNN),结合粒子群算法(PSO)对刮板输送机中部槽进行磨损预测并对结果进行评估寻优。可见,对于磨损因素之间的复杂关系,通过非线性理论方法为中部槽磨损特性的研究提供了一种可行的方法。内外研究结合、定性研究与定量研究结合才能全面地认识摩擦磨损机理,从而更好地推动中部槽耐磨优化研究。

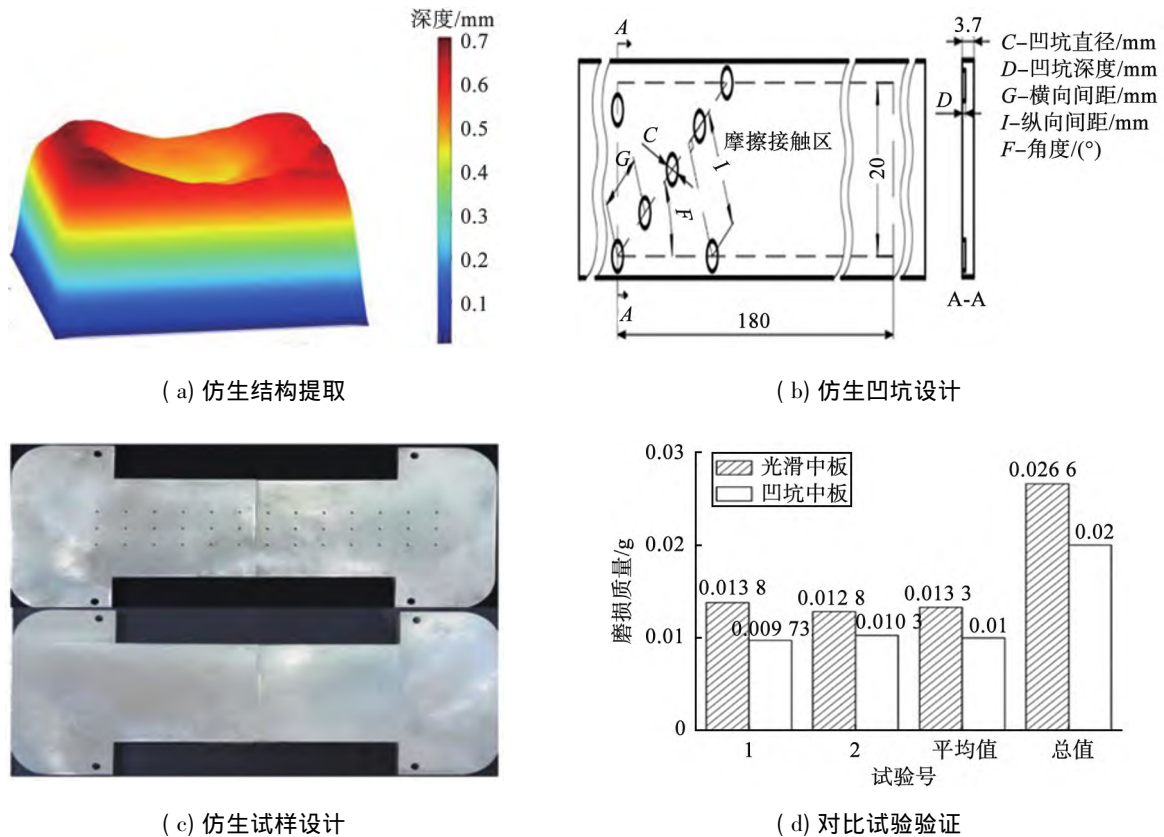


图 13 仿生结构设计

Fig.13 Bionic design

3.2 耐磨优化研究局限性分析及展望

中部槽磨损特性研究的意义在于为其耐磨优化提供理论支持,减轻磨损现象,延长中部槽使用寿命。当前,中部槽在提升耐磨性方面的研究有大幅度提升。根据已有的研究成果,使用新型耐磨材料和表面强化技术减少了中部槽的磨损,但 2 种方法需要耗费的资金巨大,从一定程度上增加了刮板输送机的制造成本,如何降低所需投入的物力财力等也是不可忽视的问题。结构改进和仿生设计 2 种方法虽然在中部槽减磨方面效果明显,但已有的研究都建立在实验室条件和简化中部槽模型的基础上,相关技术还不够成熟,真实耐磨性能有待证实,因此将这 2 种方法尽快投入真实刮板输送机制造生产以及应用于真实煤矿井下进行试验,才能使中部槽的耐磨性能有质的提升。除上述 4 种方法,摩擦副的研究给中部槽减磨耐磨研究提供了一种新的思路,如王其良等^[72]以矿用刮板输送机液黏离合器中的摩擦副为研究对象开展相关研究;孙少妮等^[73]通过表面织构技术改善刮板输送机多组摩擦副的可靠性和耐磨性。

现阶段对于中部槽磨损特性以及耐磨优化的研究,多以槽帮、中板等单一部件为研究对象,较少从多个部件组成的摩擦副(如槽帮-煤岩散料-刮板)间相互作用出发进行三体间的磨损研究,因此这也是今后中部槽磨损研究的一个重要方向。

4 结论

1) 阐述了刮板输送机中部槽磨损特性研究和耐磨优化研究的发展历程。从理论研究、试验研究和仿真分析3种研究方法角度综述了在磨损形式、磨损原因、磨损形貌、磨损区域等方面以及运输条件和煤散料特性结合、离散元方法和多体动力学方法结合的磨损特性研究现状。

2) 介绍了耐磨材料、表面强化技术、结构改进和仿生设计4种中部槽耐磨优化方法及其研究现状。对中部槽磨损特性和耐磨优化研究现状进行了总结,分析了研究中存在的局限性和不足之处。

3) 对中部槽研究进行展望,指出磨损特性研究的下一步方向为磨损内在本质的研究、磨损定量的研究,提出用非线性理论方法进行中部槽磨损量拟合、磨损预测等新的研究思路;指出耐磨优化研究的下一步方向为节约成本,将耐磨技术尽快应用于刮板输送机生产实际中,提出从中部槽摩擦副之间的相互作用为出发点进行磨损特性和耐磨优化的研究。

参考文献(References):

- [1] WU G, QIAO F K, FANG X Q, et al. Straightness perception mechanism of scraper conveyor based on the three-dimensional curvature sensing of FBG [J]. Applied Sciences, 2023, 13(6): 3619–3632.
- [2] YANG J J, FU S C, WANG D. Dynamic simulation of startup-characteristics of scraper conveyor based AMESim [C]//2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2015, Beijing, China, 2015: 369–374.
- [3] WANG X W, LI B, WANG S W, et al. The transporting efficiency and mechanical behavior analysis of scraper conveyor [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2017, 232(18): 3315–3324.
- [4] CAO L M, ZENG Q L, CUI J, et al. Development of hydraulic security shearing machine for the annulus chain used in coal mine [C]//Advanced Materials Research. International Conference on Material Engineering, Chemistry, Bioinformatics. Wuhan, China, 2011: 371–374.
- [5] MAO J, YANG Z Y, LU J N. Research on signal analysis and diagnosis of chain drive system of the scraper conveyor guided by artificial intelligence algorithm [J]. Optik, 2022, 271: 107149.
- [6] YAN X D, ZHOU G B, HAN L F, et al. Posture monitoring method of scraper conveyor based on adaptive extended kalman filter [C]//2022 International Conference on Sensing, Measurement & Data Analytics in the era of Artificial Intelligence (ICSMD). Harbin, China, 2022: 1–6.
- [7] ZHANG P L, LI B, WANG X W, et al. The loading characteristics of bulk coal in the middle trough and its influence on rigid body parts [J]. Strojniški Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2020, 66(2): 114–126.
- [8] ZHAO S F, ZHAO J J, LU Z X, et al. Data-driven cooperative control model of shearer-scraper conveyor based on rough set theory [J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 811646.
- [9] WANG H J, ZHANG Q, XIE F. Dynamic tension test and intelligent coordinated control system of a heavy scraper conveyor [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(7): 871–877.
- [10] 蔡柳, 王学文, 王淑平, 等. 煤散料在刮板输送机中部槽中的运动分布特征与作用力特性 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(增刊1): 247–252.
CAI L, WANG X W, WANG S P, et al. Motion characteristics and force properties of bulk coal in middle pan of scraper conveyor [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(S1): 247–252.
- [11] 任宇轩, 庞新宇, 李博, 等. 基于正交试验的刮板输送机中部槽磨损试验研究 [J]. 煤炭工程, 2019, 51(11): 129–133.
REN Y X, PANG X Y, LI B, et al. Experimental study on wear of middle trough of scraper conveyor based on orthogonal experiment method [J]. Coal Engineering, 2019, 51(11): 129–133.
- [12] 夏蕊, 杨兆建, 李博, 等. 刮板输送机中部槽摩擦学研究现状与发展 [J]. 煤炭技术, 2019, 38(4): 157–159.
XIA R, YANG Z J, LI B, et al. Present situation and development of tribology research in middle chute of scraper conveyor [J]. Coal Technology, 2019, 38(4): 157–159.
- [13] 葛世荣, 王军祥, 王庆良, 等. 刮板输送机中锰钢中部槽的自强化抗磨机理及应用 [J]. 煤炭学报, 2016, 41(9): 2373–2379.

- GE S R, WANG J X, WANG Q L, et al. Self-strengthening wear resistant mechanism and application of medium manganese steel applied for the chute of scraper conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2373-2379.
- [14] 李金桂. 表面强化技术与模具寿命[J]. 中国表面工程, 2002, 15(1): 2-7.
- LI J G. Surface strengthening technology and mold life[J]. China Surface Engineering, 2002, 15(1): 2-7.
- [15] 宋锐, 郑玉坤, 刘义祥, 等. 煤矿井下仿生机器人技术应用与前景分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2155-2169.
- SONG R, ZHENG Y K, LIU Y X, et al. Analysis on the application and prospect of coal mine bionic robotics[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2155-2169.
- [16] BAO H Y, ZHANG C, HOU X N, et al. Wear characteristics of different groove-shaped friction pairs of a friction clutch[J]. Applied Science, 2021, 11(1): 284-299.
- [17] 王新刚, 梁爱国. 刮板输送机中部槽与刮板链的磨损分析及对策[J]. 煤矿机械, 2015, 36(5): 109-111.
- WANG X G, LIANG A G. Wear analysis and counter measures of scraper conveyor central groove and scraper chain[J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(5): 109-111.
- [18] 吴兆宏, 朱华, 王勇华, 等. 刮板输送机磨损失效及对策[J]. 煤矿机械, 2005(7): 58-59.
- WU Z H, ZHU H, WANG Y H, et al. Scraper conveyor wear loss efficiency and countermeasures[J]. Coal Mine Machinery, 2005(7): 58-59.
- [19] CHEN H W, WANG R J. Study on wear of scraper conveyor chute[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Intelligent Systems Research and Mechatronics Engineering, Zhengzhou China, 2015: 2254-2257.
- [20] 赵运才, 李伟, 张正旺. 中部槽磨损失效的摩擦学系统分析[J]. 煤矿机械, 2007(8): 57-58.
- ZHAO Y C, LI W, ZHANG Z W. Analysis on tribological systems of wearing failures in ore chamfer[J]. Coal Mine Machinery, 2007(8): 57-58.
- [21] 胡元哲. 刮板输送机中部槽磨损失效分析与抗磨措施[J]. 矿山机械, 2009, 37(1): 33-36.
- HU Y Z. Failure analysis of chute abrasion in scraper conveyor and anti-wear measures[J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(1): 33-36.
- [22] 史志远. 刮板输送机中部槽关键部件磨损形貌及影响因素分析[J]. 煤矿开采, 2016, 21(5): 33-35.
- SHI Z Y. Analysis of wear appearance and influence factors of middle chute critical components in scraper conveyor[J]. Coal Mining Technology, 2016, 21(5): 33-35.
- [23] 温欢欢, 刘混举. 刮板输送机中部槽的磨损失效及报废条件探讨[J]. 煤矿机械, 2012, 33(7): 99-101.
- WEN H H, LIU H J. Study on wear failures and scrap conditions of middle trough of scraper conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(7): 99-101.
- [24] 李平辉, 胡纯, 柳明多, 等. 综采工作面刮板输送机槽帮腐蚀和磨损机制[J]. 润滑与密封, 2022, 47(9): 105-110.
- LI P H, HU C, LIU D M, et al. Corrosion and wear mechanism of groove side of scraper conveyor in fully mechanized mining face[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(9): 105-110.
- [25] SHI Z Y, ZHU Z C. Case study: wear analysis of the middle plate of a heavy-load scraper conveyor chute under a range of operating conditions[J]. Wear, 2017, 380-381, 36-41.
- [26] XIA R, WANG X W, LI B, et al. Discrete element method-(DEM)-based study on the wear mechanism and wear regularity in scraper conveyor chutes[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019: 4191570.
- [27] 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.
- [28] XIA R, LI B, WANG X W, et al. Screening the main factors affecting the wear of the scraper conveyor chute using the plackett-burman method[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019: 204091.
- [29] XIA R, WANG X W, LI B. Abrasion performance of the scraper conveyor chute under complex working conditions[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2021, 235(11): 2364-2375.
- [30] 李博, 夏蕊, 王学文, 等. 基于响应面法的多因素交互作用下中部槽磨损试验研究[J]. 中国机械工程, 2019, 30(22): 2764-2771.
- LI B, XIA R, WANG X W, et al. Experimental study on wear of middle plates under multi factor interactions based on response surface method[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(22): 2764-2771.
- [31] TIAN Z, JING S X, LIU W, et al. Experimental and numerical study on cutting performance of coal plow[J]. IEEE

- Access , 2020 , 8: 211882–211891.
- [32]ZHANG H , CHEN Y , ZHANG Z H , et al. Determination of loading capacity index of a continuous miner in soft rock roadway and virtual test method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science , 2022 , 236(10) : 5165–5180.
- [33]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.
- [34]YAO Y P , LIU W L , GAO Z P. Impact damage to the middle trough of a scraper conveyor based on the engineering discrete element method and orthogonal matrix analysis[J]. PLOS ONE , 2022 , 17(4) : 0266831.
- [35]李康,李军霞,梁绍伟. 散煤料对落煤区域中部槽磨损性能分析[J]. 煤炭科学技术, 2019 , 47(8) : 175–181.
- LI K , LI J X , LIANG S W. Analysis of wear performance of loose coal material in middle groove of coal falling area[J]. Coal Science and Technology , 2019 , 47(8) : 175–181.
- [36]LOMMEN S , LODEWIJKS G , SCHOTT D L. Co-simulation framework of discrete element method and multibody dynamics models[J]. Engineering Computations , 2018 , 35(3) : 1481–1499.
- [37]李博,未星,夏蕊,等. 刮板输送机中部槽多区域输运状态预测[J]. 煤炭科学技术, 2021 , 49(11) : 200–210.
- LI B , WEI X , XIA R , et al. Prediction of multi-area transportation state in the central trough of scraper conveyor[J]. Coal Science and Technology , 2021 , 49(11) : 200–210.
- [38]赵保林,李博,夏蕊,等. 刮板输送机中板仿生耐磨优化试验研究[J]. 中国机械工程, 2020 , 31(24) : 3006–3015.
- ZHAO B L , LI B , XIA R , et al. Experimental study of bionic wear resistance optimization for middle plates in scraper conveyors[J]. China Mechanical Engineering , 2020 , 31(24) : 3006–3015.
- [39]MA H Z , WANG X W , LI B , et al. Study on the mechanical effect and wear behaviour of middle trough of a scraper conveyor based on DEM-MBD[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , Part J: Journal of Engineering Tribology , 2021 , 236(7) : 1363–1374.
- [40]GE S R , WANG Q L , WANG J X. The impact wear-resistance enhancement mechanism of medium manganese steel and its applications in mining machines[J]. Wear , 2017 , 376: 1097–1104.
- [41]CHAI J R , LI G H. Comparative experiment of abrasion-corrosion-sliding wear performance of two kinds of low alloy wear-resistant steel[J]. Materials , 2022 , 15(18) : 6463.
- [42]董志斌,庞新宇,李博,等. 基于模糊层次分析法的刮板输送机中部槽中板材料选择[J]. 机械设计与制造 , 2021(3) : 248–252.
- DONG Z B , PANG X Y , LI B , et al. Material selection of medium plate in scraper conveyor based on FAHP[J]. Machinery Design & Manufacture , 2021(3) : 248–252.
- [43]徐海峰,李海,李凤敏,等. 合金元素及热处理对新型槽帮钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理 , 2023 , 48(4) : 148–154.
- XU H F , LI H , LI F M , et al. Effects of alloy element and heat treatment on microstructure and properties of new-type slot edge steel[J]. Heat Treatment of Metals , 2023 , 48(4) : 148–154.
- [44]宋建锋,苏怡宁,刘龙飞,等. 矿用刮板输送机整铸中间槽设计及应用[J]. 煤炭工程 , 2018 , 50(6) : 139–141.
- SONG J F , SU Y N , LIU L F , et al. Research and application of inblock casting AFC pan of mine scraper conveyor[J]. Coal Engineering , 2018 , 50(6) : 139–141.
- [45]王志娜. 刮板输送机中部槽耐磨技术[J]. 煤矿机械 , 2017 , 38(4) : 101–103.
- WANG Z N. Scraper conveyor in central trough wear-resisting technology[J]. Coal Mine Machinery , 2017 , 38(4) : 101–103.
- [46]朱瑾,陈华辉,滕子,等. 刮板输送机中板用新型耐磨钢的磨料磨损性能[J]. 煤炭学报 , 2020 , 45(10) : 3607–3614.
- ZHU J , CHEN H T , TENG Z , et al. Abrasive wear behavior of new wear resistant steels applied for the middle plate of scraper conveyor[J]. Journal of China Coal Society , 2020 , 45(10) : 3607–3614.
- [47]LI J F , ZHU Z C , PENG Y X , et al. Microstructure and wear characteristics of novel Fe–Ni matrix wear-resistant composites on the middle chute of the scraper conveyor[J]. Journal of Materials Research and Technology-Jmr & T , 2020 , 9(1) : 935–947.

- [48]HUANG H, NIU J T, XING X T, et al. Effects of the shot peening process on corrosion resistance of aluminum alloy: a review [J]. *Coatings*, 2022, 12(5): 629.
- [49]PENG S X, ZHOU J, ZHANG M M, et al. Fundamental research and numerical simulation of new hot stamping tool manufactured by surfacing technology [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 107(7/8): 3527–3541.
- [50]应鹏展, 应放天. 刮板输送机中部槽耐磨焊条研究 [J]. *煤矿机械*, 2000(11): 20–21.
YING P Z, YING F T. Research on wear-resistant welding electrodes for middle groove of scraper conveyor [J]. *Coal Mine Machinery*, 2000(11): 20–21.
- [51]张小凤, 霍伟亚. 断续菱形花纹焊道工艺在刮板输送机中部槽耐磨修复中的应用 [J]. *中国煤炭*, 2013, 39(12): 81–83.
ZHANG X F, HUO W Y. Application of technique of intermittent argyle pattern weld bead to wear-resisting repair of middle trough of scraper conveyor [J]. *China Coal*, 2013, 39(12): 81–83.
- [52]刘朝阳, 李博, 李娟莉. 刮板输送机中部槽堆焊条纹法修复工艺参数优化 [J]. *中国粉体技术*, 2021, 27(5): 27–37.
LIU Z Y, LI B, LI J L. Optimization of process parameters for surfacing welding stripes in middle trough [J]. *China Powder Science and Technology*, 2021, 27(5): 27–37.
- [53]ZHANG D K, YU R Q, CHEN K, et al. Corrosion and corrosion-friction properties of plasma cladding wear-resistant layer on Fe-based alloy [J]. *Materials Research Express*, 2018, 5(2).
- [54]YANG X B, LI J X. The wear resistance of plasma cladding layers on the substrate Hardox450 of middle trough [C]//IOP Publishing Ltd 6th Annual International Conference on Material Science and Engineering, ICMSE 2018. Suzhou, China, 2018: 22–24.
- [55]LI J X, ZHANG H Y, ZHANG H B, et al. Microstructure and tribological properties of Fe–Cr–B–Si-based alloy coating on the surface of scraper conveyor middle trough NM450 [J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition*, 2020, 35(5): 967–972.
- [56]刘鸣放, 张兵权, 马宗彬. 手持式等离子熔覆刮板输送机中部槽的研究 [J]. *煤炭科学技术*, 2011, 39(6): 52–54.
LIU M F, ZHANG B Q, MA Z B. Research on handy plasma coating on intermediate pan of scraper conveyor [J]. *Coal Science and Technology*, 2011, 39(6): 52–54.
- [57]KOVARIKOVA I, KOLENIC F, HODULOVA E. Research of laser clad properties with globular WC in abrasive wear resistance [C]//3rd Central European Conference on Logistics, Trnava, SLOVAKIA, 2013: 121–125.
- [58]GUO W, ZHANG L P, XU C, et al. Study on the wear resistance of laser cladding iron-base alloy by heat treatment [J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(2): 026572.
- [59]潘兴东, 杜学芸, 李圣文, 等. 中部槽激光熔覆层磨损性能的研究 [J]. *煤矿机械*, 2015, 36(6): 88–90.
PAN X D, DU X Y, LI S W, et al. Research on wear resistance of laser cladding layer [J]. *Coal Mine Machinery*, 2015, 36(6): 88–90.
- [60]曹青, 蔡志海, 秦航, 等. WC增强镍基合金激光熔覆层性能及其在刮板输送机中部槽上的应用 [J]. *应用激光*, 2018, 38(4): 522–526.
CAO Q, CAI Z H, QIN H, et al. Properties of laser cladding layer of WC reinforced nickel-based alloy and its application in chute of scraper conveyor [J]. *Applied Laser*, 2018, 38(4): 522–526.
- [61]刘俊, 梁超, 夏蕊, 等. 刮板输送机槽帮磨损及内侧曲线优化研究 [J]. *煤炭工程*, 2023, 55(2): 171–176.
LIU J, LIANG C, XIA R, et al. Groove side wear and inner curve optimization of scraper conveyor based on DEM–MBD [J]. *Coal Engineering*, 2023, 55(2): 171–176.
- [62]胡万飞, 卜侃侃, 米佩. 刮板输送机耐磨性改进效果分析 [J]. *煤矿机械*, 2023, 44(6): 138–140.
HU W F, B K K, MI P. Analysis of abrasion resistance improvement effect of scraper conveyor [J]. *Coal Mine Machinery*, 2023, 44(6): 138–140.
- [63]张建平. 刮板输送机中部槽耐磨复合中板的应用 [J]. *煤矿机电*, 2015(6): 107–109.
ZHANG J P. Application of wear-resisting compound middle plate for scraper conveyor [J]. *Colliery Mechanical & Electrical Technology*, 2015(6): 107–109.
- [64]FENG Y, ZHANG M T, LI G P, et al. Finite element analysis and structure optimization of the middle groove of scraper

- conveyor[C]//IOP Publishing Ltd, 3rd International Conference on Advanced Technologies in Design, Mechanical and Aeronautical Engineering, Shanghai, China, 2019.
- [65]REN L Q, LIANG Y H. Preliminary studies on the basic factors of bionics[J]. Science China: Technological Sciences, 2014, 57(3): 520-530.
- [66]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.
- [67]王学文, 刘朝阳, 李博, 等. 基于响应面法的仿生凹坑型中部槽耐磨性[J]. 煤炭学报, 2022, 47(10): 3829-3839.
WANG X W, LIU Z Y, LI B, et al. Wear resistance of bionic pit-shaped middle trough based on response surface method[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(10): 3829-3839.
- [68]李娟莉, 刘朝阳, 李博, 等. 刮板输送机仿生条纹型中部槽耐磨性试验研究[J]. 中国机械工程, 2021, 32(21): 2542-2551, 2561.
LI J L, LIU Z Y, LI B, et al. Experimental study of wear resistance of bionic striped middle trough for scraper conveyors[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(21): 2542-2551, 2561.
- [69]张丹, 张标, 徐鹏, 等. 基于 Archard 磨损模型的采煤机行走轮磨损特性研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(9): 211-215.
ZHANG D, ZHANG B, XU P, et al. Research on wear characteristics of shearer walking wheels based on archard wear model[J]. Coal Technology, 2022, 41(9): 211-215.
- [70]王平, 王彩芸, 王文健, 等. 基于 PSO 混合算法优化 BP 网络在钢轨磨损量预测中的应用[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 15-20.
WANG P, WANG C Y, WANG W J, et al. Optimization of BP network based on PSO hybrid algorithm application in rail wear prediction[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(8): 15-20.
- [71]杨俊叶, 申冰. 基于机器学习的刮板输送机中部槽磨损预测方法[J]. 煤炭技术, 2023, 42(4): 205-208.
YANG J Y, SHEN B. Prediction method for middle slot wear of scraper conveyor based on machine learning[J]. Coal Technology, 2023, 42(4): 205-208.
- [72]王其良, 张毅, 王建梅, 等. 矿用大尺寸湿式摩擦副瞬态摩擦热特性研究[J]. 润滑与密封, 2022, 47(11): 148-154.
WANG Q L, ZHANG Y, WANG J M, et al. Study on transient friction thermal characteristics of large size wet friction pairs for mining[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(11): 148-154.
- [73]孙少妮, 谢里阳, 龙日升. CST 液黏传动摩擦副表面织构技术研究[J]. 机械设计与制造, 2018(12): 117-120.
SUN S N, XIE L Y, LONG R S. Research of surface texture technique used on CST hydro-viscous drive friction pair[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(12): 117-120.

(责任编辑: 武秀娟)