

刮板输送机链轮磨损对传动系统动态特性影响分析*

INFLUENCE ANALYSIS OF SCRAPER CONVEYOR SPROCKET WEAR ON DYNAMIC CHARACTERISTICS OF DRIVE SYSTEM

朱 锋**

(国家能源集团 神东煤炭集团公司, 榆林 719315)

ZHU Feng

(Shendong Coal Group Company, CHN Energy, Yulin 719315, China)

摘要 矿用刮板输送机长期在复杂的环境中作业,链轮会发生不同程度的磨损,从而对刮板输送机动态性能产生较大影响,以SGZ 1000/3*1000矿用刮板输送机的圆环链传动系统为研究对象,首先建立了磨损链轮模型,然后对不同磨损程度下的链轮传动过程进行动力学仿真,分析了链轮磨损对系统动态特性的影响,并通过试验进行了验证。结果显示,相比无磨损时,链轮磨损加剧了运行过程中链条的速度波动,最高增大至原来的3倍;链轮与链环间的啮合接触力增加至原来的3倍;链环间的拉力增大至原来的2倍,同时拉力波动最高增大至原来的4倍。该研究为刮板输送机传动系统设计提供了理论参考。

关键词 刮板输送机 磨损链轮模型 圆环链传动系统 动态特性

中图分类号 TD528

Abstract Mining scraper conveyors operate in complex environments for a long time, and the sprocket will suffer different degrees of wear, which will have a great impact on the dynamic performance of the scraper conveyor. Taking the ring chain transmission system of the SGZ 1000/3*1000 mining scraper conveyor as the research object, and firstly the wear sprocket model was established. Then the dynamic simulation of sprocket drive process under different wear degree was carried out to analyze the influence of sprocket wear on the dynamic characteristics of the system, and it was verified by experiments. The results show that, compared with no wear, sprocket wear intensifies the speed fluctuation of the chain during operation, and increases up to 3 times. The meshing contact force between the sprocket and the chain ring is increased to 3 times the original; The connecting force between the links increases to twice the original, while the connecting force fluctuation increases up to four times the original. This study provides a theoretical reference for the design of the drive system of the scraper conveyor.

Key words Scraper conveyor; Wear sprocket model; Ring chain drive system; Dynamic characteristic

Corresponding author: ZHU Feng, E-mail: 718115567@qq.com

Manuscript received 20240531, in revised form 20240719.

0 引言

矿用刮板输送机是煤矿资源的主要输送设备,圆环链传动系统作为刮板输送机的核心部件之一,其动态性能将直接影响刮板输送机的运行状态,决定着刮板输送机的工作效率^[1-2]。

谢苗等^[3]对链轮链环啮合动力学特性进行了分析,得出了链轮链环接触力变化特性曲线、接触力最大位置。毛君等^[4]分析了圆环链传动系统的啮合传动特性,得到了启动过程中链环之间加速度、应力变化规律和正常工作中链环与链轮啮合过程位移、速度、应力的变化规律。张瑞峰等^[5]利用数值方法构建了刮

板输送机动力学模型,分析了刮板输送机在异常载荷工况下的动力学特性,得到了圆环链在不同位置断链以及链条节距变化对刮板输送机张力分布以及链条速度变化的影响。谢苗等^[6]对刮板输送机卡、断链工况进行动力学分析,揭示了卡链、断链瞬态链条张力变化规律。岳树鹏^[7]通过搭建试验平台进行试验,对刮板输送机的圆环链链条速度、加速度波动情况进行分析,提出刮板输送机在实际运行过程中速度和加速度为对称波动。郭洁等^[8]对刮板输送机卡、断链异常载荷下特殊点的动力学特性进行模拟分析,得到了卡、断链工况下链环之间接触力的变化规律,并且针对卡链工况展开了实验验证。侯德安^[9]利用数值分析

*20240531收到初稿,20240719收到修改稿。

**朱 锋,男,1988年生,山东枣庄人,汉族,国家能源集团神东煤炭集团公司高级工程师,工程硕士,主要研究方向为煤矿机电信息智能化科研项目及管理及研发。

的方法分析了圆环链传动系统多边形效应对链条运行速度和加速度的影响,并利用 Adams 软件构建动态模型进行了仿真验证。谢苗等^[10]通过实例对输送机卡链、断链工况下的动力学特性以及链轮驱动的多边形效应、链条节距误差引起的动力学问题进行了数值仿真分析。刘广鹏等^[11]对传动系统在启动、制动、额定工作和异常载荷情况下的动力学特性进行了分析,得出了驱动力矩、圆环链之间拉力、链轮与圆环链之间接触力的变化规律以及接触力最大值和对应的位置。王季鑫等^[12]通过采用建立虚拟样机以及试验相结合的方式对刮板输送机进行动力学仿真分析,探究了不同驱动方式、运输方式及铺设长度对刮板链加速度波动的影响。冯涛^[13]通过对圆环链传动系统的动态仿真,建立了正常运行条件下链条的速度曲线以及加速度曲线,提出多边形效应会引起链条发生波动的结论。朱锋等^[14]通过对圆环链传动系统在不同工况下的传动过程进行仿真,得到了不同工况对刮板输送机圆环链传动系统运动学和动力学特性的影响。毛君等^[15]采用有限元法构建了圆环链传动系统动力学模型,通过施加不同的载荷对传动系统的动力学问题进行了数值仿真,研究了刮板体系的扭摆特性、链条动力响应以及刮板间动力传递特性。张东升等^[16]以刮板输送机的圆环链传动系统为研究对象,应用数值仿真的分析方法,得到了不同齿数链轮的多边形效应对链条动力学振动特性的影响。张强等^[17]分析刮板输送机在空载启动、平稳运行、载荷突增以及卡链工况下的刮板链速度、电磁转矩的特性曲线,得到了启动时两链轮的转角曲线。谢春雪等^[18-19]通过仿真分析得到卡链位置前后物料不同的 4 种工况下刮板链条体系扭摆振动速度、加速度以及张力情况,并进行了实验验证。

以上研究均未考虑链轮磨损对圆环链传动系统动力学性能的影响,而矿用刮板输送机长期在恶劣的环境中工作,链轮在复杂载荷以及磨粒摩擦作用下会发生不同程度的磨损,从而可能对系统的动态特性产生影响。本文首先对圆环链传动系统进行建模,然后对圆环链传动系统在链轮不同磨损程度下的啮合传动过程进行了动力学仿真分析,分析了链轮磨损对系统动态特性的影响。

1 圆环链系统啮合传动分析

1.1 运动学分析

圆环链传动系统的链轮链环之间相对运动过程可以等价为链环在拉力作用下围着链轮作绕链运动^[20]。其相对运动过程如图 1 所示。

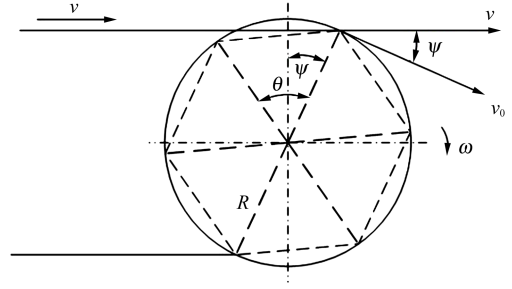


图 1 速度分析示意图

Fig. 1 Schematic diagram of velocity analysis

驱动链轮在驱动装置作用下,以大小为 ω 的角速度作旋转运动,若链轮节圆半径为 R ,则链条的瞬时速度 v 和瞬时加速度 a 可表达为

$$v = v_0 \cos \psi = R\omega \cos \psi \quad (1)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = R\omega \frac{d \cos \psi}{dt} - R\omega^2 \sin \psi \quad (2)$$

式中, v_0 为链轮节圆处的线速度; ψ 为线速度 v_0 与瞬时加速度 a 的夹角, $-\theta/2 \leq \psi \leq \theta/2$; θ 为链轮相邻两个轮齿之间的夹角。

1.2 运行阻力分析

刮板输送机所承受的工作阻力主要包括有载侧(上边链)的工作阻力 F_1 , 以及无载侧(下边链)的工作阻力 F_2 , 为

$$F_1 = (qf_1 + q_0f_2)gL \cos \beta + (q + q_0)gL \sin \beta \quad (3)$$

$$F_2 = (f_2 \cos \beta - \sin \beta)q_0gL \quad (4)$$

式中, q 为物料单位长度质量; q_0 为刮板链单位长度质量; L 为刮板链的长度; f_1 为物料在溜槽中的摩擦因数; f_2 为刮板链在溜槽中的摩擦因数。

1.3 啮合接触力学分析

由运动学分析可知,圆环链传动系统在链轮的旋转驱动下,圆环链的平环与链轮不断发生啮合,完成链条的平移运动。图 2 所示为链环与链轮啮合时的接触状态。

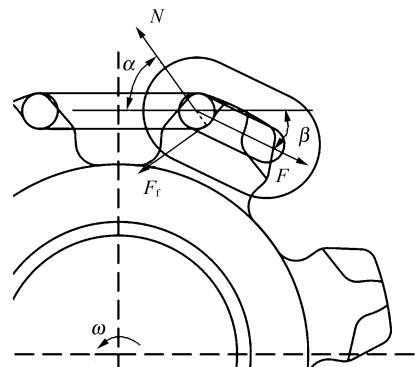


图 2 圆环链与链轮啮合受力

Fig. 2 Meshing force of the ring chain and the chain sprocket

对圆环链的平环进行受力分析得

$$\begin{cases} N = F \cos(\alpha - \beta) \\ F \sin(\alpha - \beta) = Nf \end{cases} \quad (5)$$

式中, F 为链环所受到的拉力; N 为链轮对链环的支持力; f 为链轮链环在接触点的摩擦因数; α 为支持力与水平方向的夹角; β 为圆环链的压链角; γ 为摩擦阻力与水平方向的夹角。

根据赫兹接触理论, 圆环链与链轮在接触力 N 的作用下, 接触点会发生微小形变形成一接触区域, 则接触区域最大的接触应力 $\sigma_{\max}$ 可表示为

$$\sigma_{\max} = \sqrt[3]{\frac{3}{\pi^3} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^3 N \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2} = \frac{3N}{2\pi b^2} \quad (6)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{3N}{4} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)} = \left(\frac{3R^*}{2E^*} \right)^{\frac{1}{3}} N^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

$$R^* = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \right)^{-1} \quad (8)$$

$$E^* = \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^{-1} \quad (9)$$

式中, b 为接触区域的接触半径; E_1 、 E_2 分别为链轮、链环的弹性模量; E^* 为等效弹性模量; μ_1 、 μ_2 分别为链轮、链环的泊松比。

2 圆环链传动系统建模

本文的研究对象为 SGZ 1000/3×1000 矿用刮板输送机的圆环链传动系统。首先使用 SolidWorks 对圆环链传动系统进行建模(图 3), 矿用刮板输送机的圆环链传动系统由多种零部件组成, 而圆环链、链轮是圆环链传动系统的核心零部件, 为了提高建模效率, 对圆环链传动系统的结构进行了相应的简化, 只分析与研究内容相关的结构部件, 对圆环链传动系统的圆环链、链轮进行建模与装配。



图 3 圆环链链环模型

Fig. 3 Model of a ring chain link

圆环链的链条规格为 48 mm×152 mm, 根据表 1 中的尺寸参数对圆环链的链环进行建模, 链环模型如图 2 所示。链轮时规格是依据圆环链的链条规格来确定的, 根据表 2 中链轮尺寸参数建立如图 4 所示链轮

模型。

表 1 圆环链链环参数

Tab. 1 Parameters of the ring chain

mm

基本参数 Basic parameter	数值 Numerical value
链环直边直径 Chain link straight edge diameter	48
链环节距 Pitch of the chain link	152
链环内宽 Chain link inside width	61
链环外宽 Chain link outer width	162
链环圆弧半径 Chain link arc radius	80

表 2 链轮参数

Tab. 2 Sprocket parameter

基本参数 Basic parameter	数值 Numerical value
链轮齿数 Sprocket teeth number	7
节圆直径 Pitch diameter/mm	684
链轮外径 Sprocket outside diameter/mm	780
立环立槽直径 Vertical ring groove diameter/mm	512
立环立槽宽度 Vertical ring groove width/mm	62
齿形圆弧半径 Tooth profile arc radius/mm	80
链窝长度 Sprocket socket length/mm	259.5
链窝中心距 Sprocket socket center distance/mm	211.5

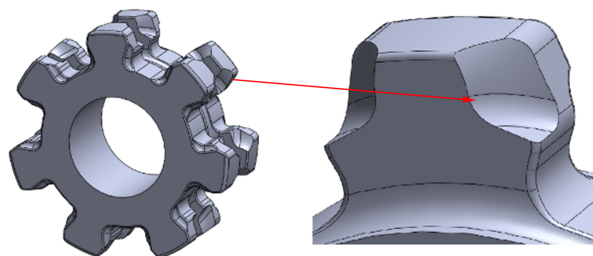


图 4 链轮模型

Fig. 4 Sprocket model

刮板输送机在工作过程中, 链轮与链条间不断地进行啮合传动, 链轮链窝与链环间不断发生摩擦滑动, 导致链轮链窝产生磨损^[21]。链轮链窝的磨损过程可以等价于链环对链轮的磨削过程, 链轮链窝磨损后曲面准线与磨损前曲面准线接近平行^[22-23], 如图 5 所示。分别建立链窝准线磨损深度为 5、10、15、20 mm 的不同磨损程度的链轮, 如图 6 所示。装配后的圆环链传动系统模型如图 7 所示。

3 仿真设置

使用 Adams 软件对系统的动力学特性进行仿真, 将装配好的圆环链传动系统模型导入软件, 单位制选择 MKS, 由于传动系统的结构刚度大, 为了简化处理, 将链轮、链环均当作刚体处理, 设置材料为钢, 质量、

质心位置和转动惯量由软件自动生成,重力方向设置在Z轴。

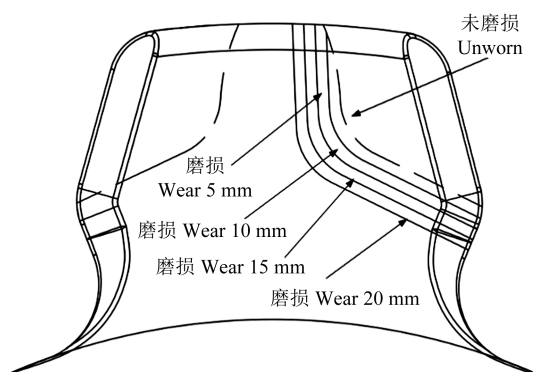


图5 不同磨损程度的链窝曲面准线

Fig. 5 Directrix of the sprocket socket concave surface with different wear degrees

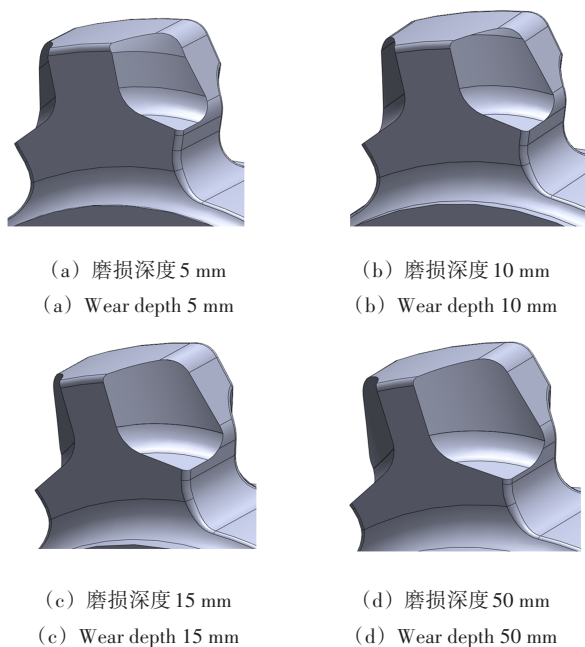


图6 不同磨损程度的链轮

Fig. 6 Sprockets with different wear degrees

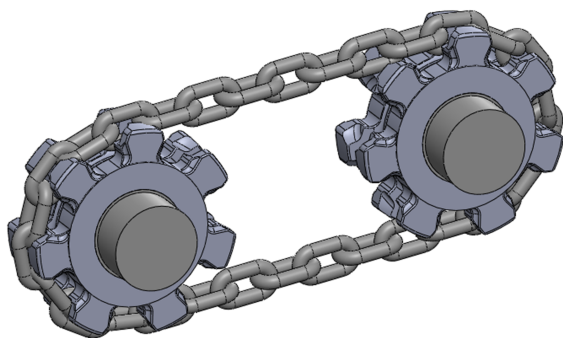


图7 圆环链传动系统模型

Fig. 7 Ring chain drive system model

3.1 设置接触

刮板输送机圆环链传动系统通过链轮链窝与平链环的啮合实现链条的运动,立链环与平链环以及平

链环与链轮之间均存在接触,以接触的形式完成力的传递。在接触设置窗口将链环与链轮之间,平链环与立链环之间的接触类型为实体对实体,法向力设置为基于赫兹接触的冲击函数法,接触刚度系数为 2×10^9 N/m,阻尼系数为 $60 \text{ N} \cdot \text{m/s}$,摩擦力设置为库仑摩擦,各系数选为系统默认值。

3.2 施加约束

圆环链传动系统在实际工作过程中,其各部件均存在着不同的约束来保证各运动部件按照预定的方式进行运动,为了提高仿真的准确性,仿真前对传动系统各部件进行约束^[24]。其中,两个链轮轴起到机架的作用,通过固定副与大地连接;链轮在工作过程中只有旋转运动,通过设置旋转副与链轮轴相连;平链环与链轮链窝间的啮合传动过程无法简单地用一个运动副来准确描述,因此只定义平链环与链轮之间的接触。

3.3 工作载荷

刮板输送机在实际工作过程中,需要克服货物与溜槽、刮板链与溜槽间的摩擦力,以及克服货重和自重的分力来进行工作,为了仿真的真实性,有必要对仿真模型施加工作阻力^[25],刮板输送机的各项工作参数如表3所示。

表3 刮板输送机基本参数

Tab. 3 Basic parameters of scraper conveyor

基本参数 Basic parameter	数值 Numerical value
刮板输送机的输送能力 Scraper conveyor transmission capacity $Q/(\text{t/h})$	3 700
圆环链的运行速度 Ring chain operating speed $v/(\text{m/s})$	1.8
煤炭单位长度质量 Coal mass per unit length $q/(\text{kg/m})$	571
刮板链单位长度的质量 Mass per unit length of scraper chain $q_0/(\text{kg/m})$	140
刮板机的铺设倾角 Laying angle of scraper conveyor $\beta/(^{\circ})$	0
刮板链的长度 Length of scraper chain L/m	300
物料在溜槽中的阻力系数 Resistance coefficient of material in chute f_1	0.5
刮板链在溜槽里的阻力系数 Scraper chain drag coefficient in the chute f_2	0.4

将各项参数代入式(3)、式(4)中计算:上边链的总运行阻力为1 004 kN,下边链总运行阻力为165 kN。链环所受阻力大小随链环空间位置的变化而发生改变,为了准确描述这种链环受力变化的特点,仿真建模时以场力的形式对链环进行阻力的施加。

在Adams中通过IF函数以及Distance函数来实现

阻力随链环位置变化而变化的特点,如图8所示为一链环在传动系统中的位置,通过判断链环质心点 P 相其在参考坐标系 Z 轴上的位移来确定链环所受到的阻力大小。

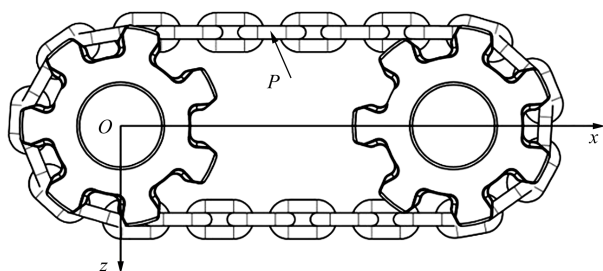


图8 链环在传动系统中的相对位置

Fig. 8 Relative position of the chain link in the drive system

链环所受阻力的表达式为

$$F_f = \begin{cases} F_{f1}, & z = c \\ 0, & -c < z < c \\ F_{f2}, & z = -c \end{cases} \quad (10)$$

式中, F_{f1} 、 F_{f2} 分别为链环处于上边链和下边链时所受阻力,上边链和下边链的总的运行阻力折算到单个链环上的运行阻力 $F_{f1}=55.8 \text{ kN}$ 、 $F_{f2}=9.2 \text{ kN}$; z 为链环质心点相对于链轮质心点在参考坐标系 Z 轴上的位移量; c 为位移的最大值,取 $c=0.342 \text{ m}$ 。

4 建立电动机模型

刮板输送机的传动装置是由驱动电动机通过耦合器以及减速器来驱动链轮进行力矩的传递的。

驱动链轮的转动速度为

$$n' = \frac{2\pi n}{60i} \quad (11)$$

驱动链轮所受到的驱动转矩为

$$T = \frac{9550P\eta i}{n} \quad (12)$$

式中, n 为驱动电动机的额定转速,取 $n=1490 \text{ r/min}$; i 为刮板输送机传动系统的总传动比,取 $i=29.44$; P 为刮板输送机驱动电动机的总功率,取 $P=3000 \text{ kW}$; η 为刮板输送机传动系统的总机械效率,取 $\eta=0.91$ 。

通过计算,驱动链轮稳定工作时的转动速度 $n'=5.3 \text{ rad/s}$,即 $n'=304(^{\circ})/\text{s}$,在仿真时,对驱动链轮施加一个 $304(^{\circ})/\text{s}$ 的转动速度来模拟驱动电动机,速度特性曲线如图9所示,分为4个阶段:在0~1 s内转速为0,表示只受重力的影响,使链轮与链环间,链环与链环间充分接触,更符合实际工作状态;在第1~2 s内是电动机的启动过程,速度逐渐上升至工作转速;随后2~4 s,电动机处于匀速状态;最后阶段,是电动机的制动过程,持续时间为1 s。

5 仿真结果分析

5.1 未发生磨损的链轮传动系统仿真分析

将仿真时间设置为5 s,仿真步数设置为5000步,对链轮未发生磨损的传动系统进行仿真,取链条的一个链环为研究对象,首先分析其质心相对于其静止时在 X 、 Y 、 Z 方向上的位移变化, Y 方向垂直纸面向外。由图10可以看出,在0~1 s内 X 、 Z 位移曲线均有明显的往复波动, Y 位移变化较小,这个阶段主要受重力影响,链环产生一定的浮动,位移曲线平滑,运动平稳,没有掉链、跳链的情况发生。

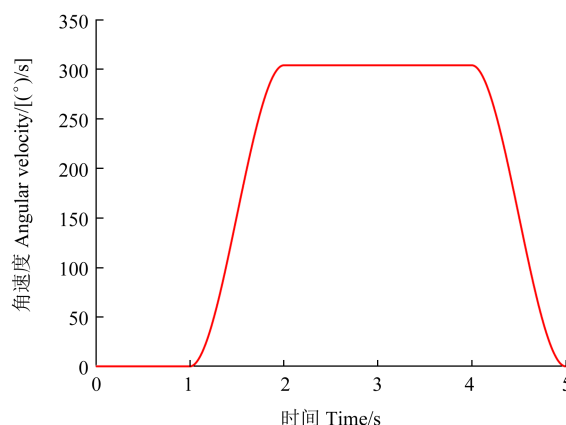


图9 驱动电动机的速度特性曲线

Fig. 9 Speed characteristic curve of the drive motor

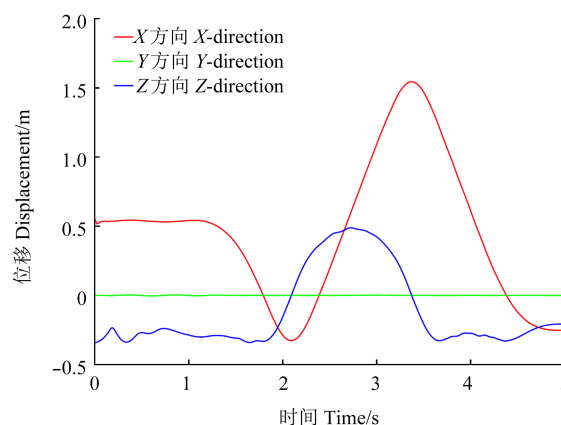


图10 链环位移变化曲线

Fig. 10 Displacement variation curve of the chain link

链环正常运行时的速度、加速度变化情况如图11、图12所示,在刚开始阶段,由于重力作用,链环在一瞬间受到很大的冲击,导致其在 X 、 Z 方向上的速度以及加速度在短时间上升很高,速度最高达 2.4 m/s ,加速度最高达 380 m/s^2 ,随后速度、加速度在0附近浮动。系统稳定运转后,链环处于上下边链时, X 方向的速度在 1.8 m/s 左右波动, X 方向的加速度在进入啮合以及脱离啮合时会产生较大的波动,这种速度、加速度波动是由链轮的多边形效应引起的。链环在 Z 方向上的明显的速度、加速度波动主要是由于重力影响。 Y 方

向上的速度、加速度变化较小。

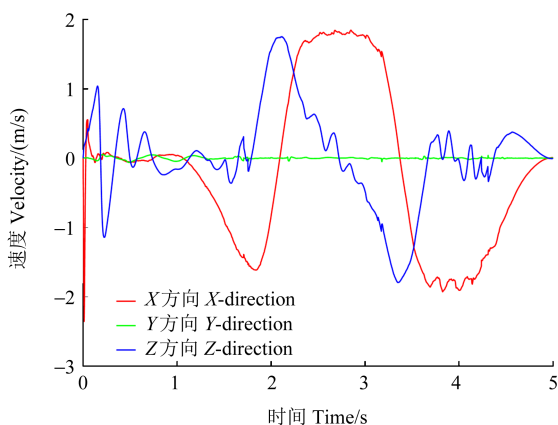


图 11 链环速度变化曲线

Fig. 11 Velocity variation curves of the chain link

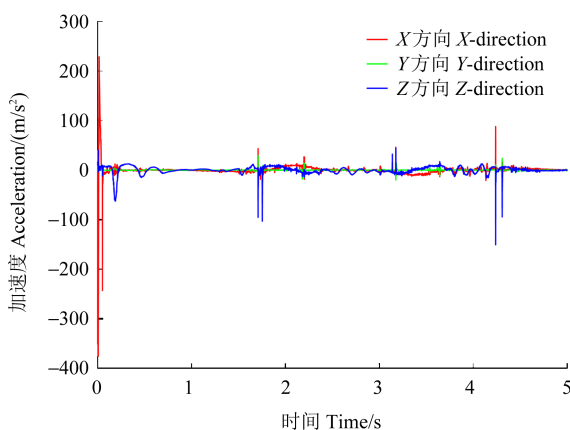


图 12 链环加速度变化曲线

Fig. 12 Acceleration variation curves of the chain link

5.2 链轮磨损对链条速度波动的影响分析

刮板输送机在实际工作过程中,由于“多边形效应”的存在,会造成链条在运行方向和竖直方向的速度波动,进而造成刮板输送机整体的振动^[26]。因此,对X方向上的链环速度进行深入分析。图13所示为圆环链传动系统采用不同的磨损深度链轮时,链环在X方向上的速度情况。在0~1 s内链轮转速为0,此时链环在X方向上的速度波动是受重力的影响;在1~2 s内是电动机的软启动过程,链轮转速逐渐上升至额定转速。2.5~3 s内,链环处于松边链作匀速运行,速度在1.8 m/s附近波动,不同磨损程度下松边链速度波动差值如图14(a)所示。随着磨损程度的增加,链条的速度波动逐渐增大,最高增大至未磨损下的链环波动差的3倍左右。3.5~4 s内,链环处于紧边链作匀速运行,速度在1.8 m/s附近波动,速度波动相对松边链较大,不同磨损程度下紧边链速度波动差值如图14(b)所示。随着磨损程度的增加,链条的速度波动逐渐增大,最高增大至未磨损下的链环波动差的2倍左右。

由图14可知,随着链轮磨损程度的增加,链轮链条的多边形效应会更加明显,造成松边链、紧边链的

链环速度的波动差会不断增大,影响刮板输送机传动系统的稳定性,且速度波动差值上升的速率会随着链轮磨损程度的增加而加快。因此,在实际工程运用中,应对刮板输送机的链轮链窝的磨损情况进行监测,在不影响工作效率以及经济效益的前提下,及时更换修复磨损的链轮,减小链条的速度波动来保证刮板输送机运行稳定性。

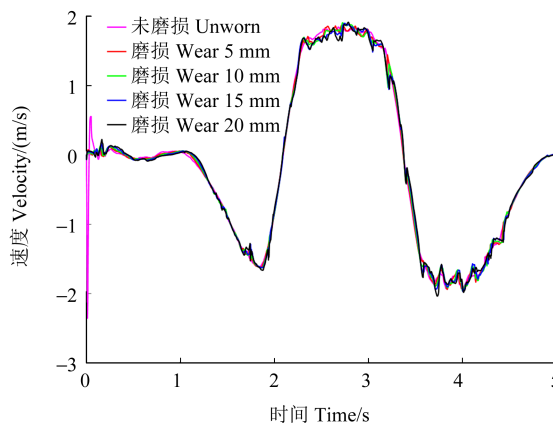
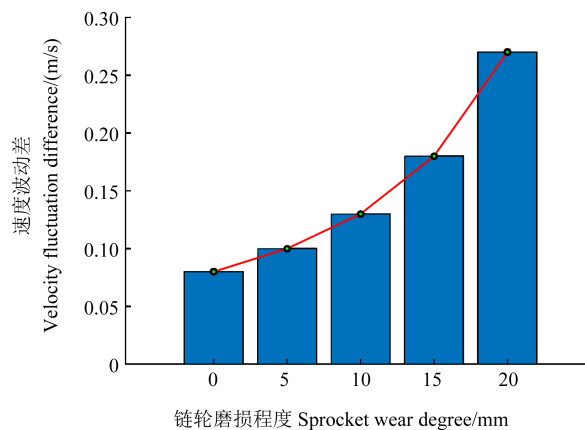


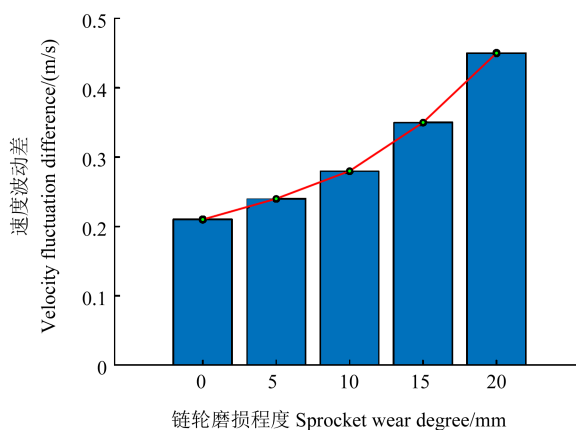
图 13 链环在X方向上的速度变化曲线

Fig. 13 Velocity variation curve of the chain link in the X-direction



(a) 松边链

(a) Loose chain



(b) 紧边链

(b) Tight chain

图 14 不同磨损链轮的链条速度波动差值

Fig. 14 Chain velocity fluctuation difference of different wear sprockets

5.3 链轮磨损对链环与链轮间啮合接触力的影响分析

图15为链环与驱动链轮之间的接触力的变化情况,可以看出在传动系统启动后,链环与驱动链轮之间接触力在1.5~2 s内以及4~4.5 s内出现两次剧烈的变化,分别对应链环与驱动链轮的两次啮合接触。第一次啮合接触力的峰值如图16(a)所示,随着链轮磨损程度的增加,啮合接触力逐渐增大,磨损深度为20 mm的链轮与链环的接触力上升至 1.49×10^6 N,接近正常链轮与链环间接触力的3倍。在第二次啮合接触时,链环与链轮的接触力峰值整体有所下降,但链环与不同磨损程度链轮间的接触力峰值依然有较大变化,磨损深度为20 mm的链轮与链环的接触力上升至 1.18×10^6 N,达到了正常链轮与链环间接触力的2倍,如图16(b)所示。

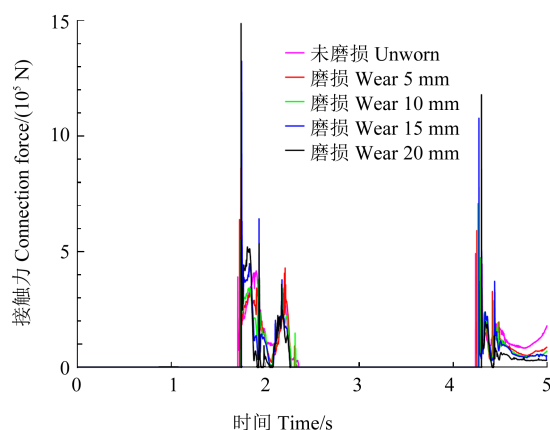


图15 链环与驱动链轮之间的啮合接触力变化曲线

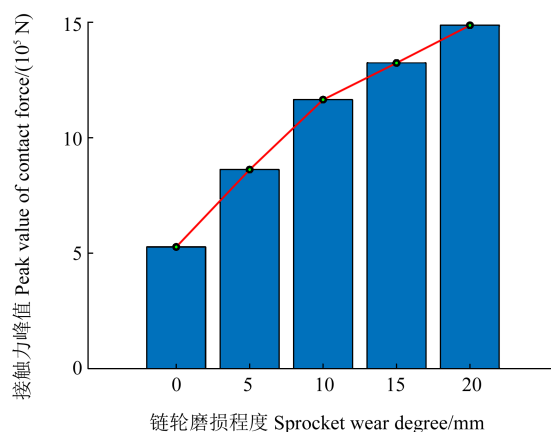
Fig. 15 Contact force change curves between the chain ring and the drive sprocket

从以上分析可知,随着链轮磨损程度的增加,链环与链轮啮合接触力会有显著的增加,最高可达正常啮合时接触力的3倍,过高的啮合接触力会导致链环的瞬时加速度增大,导致多边形效应更加明显,造成刮板输送机的振动。同时,根据 Archard 磨损理论^[27],随着接触力的增加,链轮磨损速度也会加快。

5.4 链轮磨损对圆环链链环间拉力的影响分析

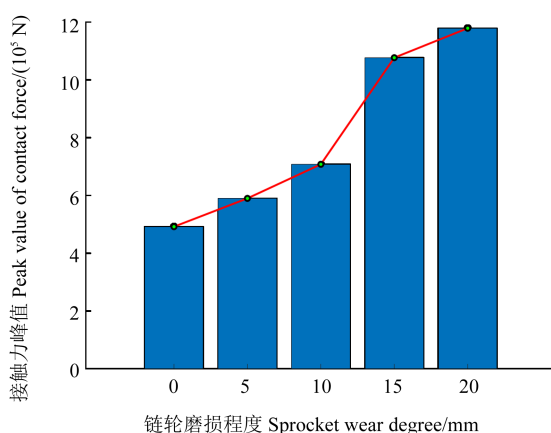
图17为圆环链链环间的拉力的变化情况,可以看出传动系统在1~2 s内的启动阶段,链环之间的拉力有剧烈的振荡,并于1.8 s左右达到峰值。不同磨损程度链轮的链环间的拉力峰值如图18所示,随着链轮磨损程度的增加,链环间的拉力逐渐增大,链轮磨损深度15 mm以及20 mm下的链环间拉力上升至 4.27×10^6 、 4.36×10^6 N,接近正常拉力峰值的2倍。在随后运行中,链环之间的拉力在 8×10^5 N上下呈周期性的波动,但波动差有明显变化,随着磨损程度的增加,链环间的拉力波动逐渐增大,磨损20 mm链轮的链环之间拉力波动

差为 1.78×10^6 N,达到了正常拉力波动差的4倍,不同磨损程度链轮的链环间的拉力波动差如图19所示。



(a) 第一次啮合

(a) First meshing contact



(b) 第二次啮合

(b) Second meshing contact

图16 链环与不同磨损程度链轮的啮合接触力峰值

Fig. 16 Peak value of meshing contact force between chain ring and sprocket with different wear degree

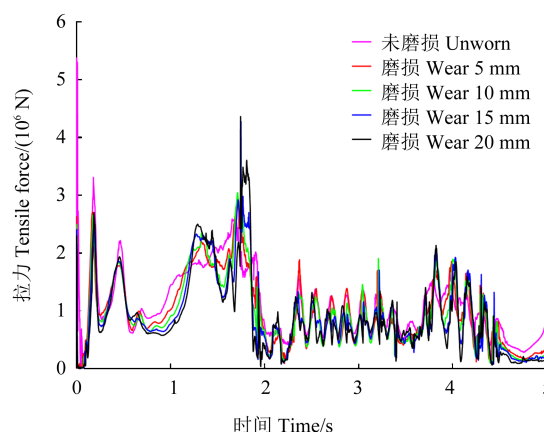


图17 链环间的拉力变化曲线

Fig. 17 Change curves of the tensile force of the vertical ring and the flat ring

从上述分析可知,链轮磨损会导致圆环链之间的拉力峰值增加,最高可达正常啮合圆环链拉力峰值的2倍左右,过高的拉力会导致圆环链链环出现严重的

变形,影响刮板输送机传动系统的正常啮合传动。同时,链轮磨损使得平稳运行时链环间的拉力波动差显著增加,链环在较大的周期性拉力作用下,会出现疲劳损伤,对链环造成破坏,甚至会导致断链的情况出现,造成安全事故的发生。

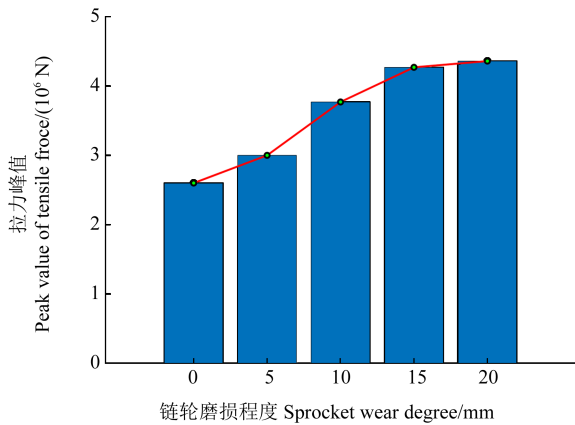


图 18 不同磨损程度链轮的链环间的拉力峰值

Fig. 18 Peak value of the tensile force of the vertical ring and the flat ring of the sprocket with different wear degree

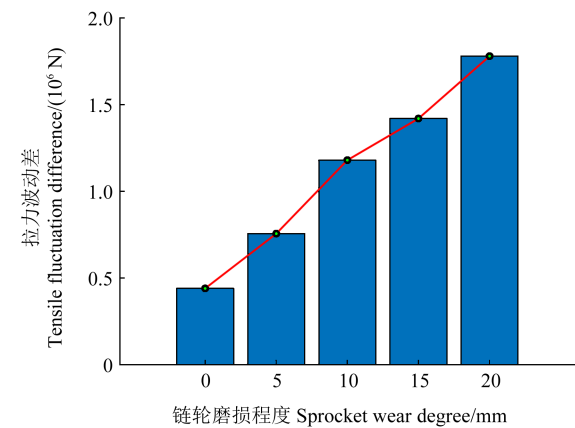


图 19 不同磨损程度链轮的链环间的拉力波动差

Fig. 19 Fluctuation difference of the connection force of the vertical ring and the flat ring of the sprocket with different wear degree

6 刮板输送机动态特性试验

本次动态特性试验在某刮板输送机试验基地进行,选择安装全新链轮以及磨损严重链轮的两个刮板输送机进行试验。

6.1 链条速度波动试验

使用加速度传感器对运行过程中链环在运行方向的加速度信号进行采集,信号经积分后,获得链环的速度变化情况。本次试验共选择 5 个链环进行测试,圆环链的速度波动情况如表 4 所示。原始速度波动的误差率最大为 16.3%,磨损后速度波动的误差率最大为 11.2%。原始速度波动差值的均值为 0.243,磨损后速度波动插值均值为 0.493,是原始速度波动

的 2.03 倍,与仿真结果一致。

表 4 圆环链条速度波动
Tab. 4 Speed fluctuates of the ring chain

测点 Measuring point	原始速度波动 Initial velocity fluctuation		
	原始状态 Initial condition/(m/s)	仿真值 Simulation value/(m/s)	相对误差 Relative error/%
1	0.242	0.21	13.2
2	0.239		12.1
3	0.247		14.9
4	0.251		16.3
5	0.236		11.1
测点 Measuring point	磨损后速度波动 Velocity fluctuation after wear		
	磨损状态 Wear condition/ (m/s)	仿真值 Simulation value/(m/s)	相对误差 Relative error/%
1	0.493	0.45	8.7
2	0.482		6.6
3	0.489		7.9
4	0.495		9.1
5	0.507		11.2

6.2 传动系统力学特性试验

将应变传感器粘贴于圆环链平环直边,通过测量运行过程中圆环链的应变间接测量拉力变化情况,本次试验共选择 5 个链环进行测试,圆环链的拉力波动情况如表 5 所示。未磨损链轮的链环间的拉力峰值误差率最大为 17.7%,磨损后链轮的链环间的拉力峰值的误差率最大为 15.7%。原始链环间拉力峰值的均值

表 5 链环间拉力峰值
Tab. 5 Peak value of the tensile force of the vertical ring and the flat ring

测点 Measuring point	原始拉力峰值 Peak value of initial tensile force		
	原始状态 Initial condition/ (10 ⁵ N)	仿真值 Simulation value/(10 ⁶ N)	相对误差 Relative error/%
1	2.33	2.60	11.6
2	2.21		17.7
3	2.29		13.5
4	2.25		15.6
5	2.34		11.1
测点 Measuring point	磨损后拉力峰值 Peak value of tensile force after wear		
	磨损状态 Wear condition/ (10 ⁵ N)	仿真值 Simulation value/(10 ⁶ N)	相对误差 Relative error/%
1	3.19	4.36	11.5
2	3.84		13.5
3	4.03		8.2
4	3.77		15.7
5	3.89		12.9

为 2.28×10^6 N, 磨损后链环间拉力峰值的均值为 3.89×10^6 N, 是原始链环间拉力峰值的 1.7 倍, 与仿真结果一致。

7 结论

本文采用 SolidWorks 对刮板输送机的圆环链传动系统进行建模, 采用 Adams 软件对不同磨损程度链轮的啮合传动过程进行仿真分析, 并在试验基地进行试验验证, 分析结果如下:

1) 圆环链传动系统在运行过程中, 链条的速度会出现一定波动, 这种波动是“多边形效应”引起的, 随着链轮磨损程度的增加, “多边形效应”会更加明显, 链条的速度波动差值会增加, 影响刮板输送机传动系统的稳定性, 且速度波动差值增加的速度会链轮磨损程度的增加而加快。

2) 随着链轮磨损程度的增加, 链环与链轮啮合接触力峰值会有显著的增加最高可达正常啮合时接触力峰值的 3 倍, 会导致链环的瞬时加速度增大, 导致多边形效应更加明显, 造成刮板输送机的振动, 同时, 链轮磨损速度也会加快。

3) 随着链轮磨损程度的增加, 圆环链之间的拉力峰值也有显著的增加, 最高可达正常啮合圆环链拉力峰值的 2 倍左右。同时, 链轮磨损使得平稳运行时链环间的拉力波动差显著增加, 最高达到正常拉力波动差的 4 倍, 会导致圆环链链环出现严重的变形, 甚至出现断链的情况。

4) 对刮板输送机的动态特性进行了试验验证, 在实际工程运用中, 应对刮板输送机的链轮链窝的磨损情况进行实时监测, 在不影响工作效率以及经济效益的前提下, 及时更换修复磨损的链轮, 保证刮板输送机运行稳定性以及安全性。

参考文献 (References)

- [1] 李树豪. 综采工作面刮板输送机链传动系统动态特性研究[J]. 自动化应用, 2023, 64(15): 114-115.
LI ShuHao. Study on dynamic characteristics of conveyor chain drive system in fully mechanized mining face[J]. Automation Application, 2023, 64(15): 114-115(In Chinese).
- [2] 高 龙. 选煤厂刮板输送机链传动系统动态波动特性的实验研究[J]. 机械管理开发, 2022, 37(4): 45-46.
GAO Long. Experimental study on dynamic fluctuation characteristics of scraper conveyor chain drive system in coal processing plant[J]. Mechanical Management and Development, 2022, 37(4): 45-46(In Chinese).
- [3] 谢 苗, 李 翠, 毛 君, 等. 刮板输送机链轮链环啮合动力学分析[J]. 机械设计, 2017, 34(5): 58-64.
XIE Miao, LI Cui, MAO Jun, et al. Contact dynamics of chain transmission system of scraper conveyor[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(5): 58-64(In Chinese).
- [4] 毛 君, 董先瑞, 谢 苗, 等. 刮板输送机链传动系统接触动力学特性分析[J]. 工程设计学报, 2015, 22(5): 445-451.
MAO Jun, DONG XianRui, XIE Miao, et al. Contact dynamics characteristic analysis on chain transmission system of scraper conveyor[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2015, 22(5): 445-451(In Chinese).
- [5] 张瑞峰, 卢进南. 基于 Matlab 的异常载荷工况下刮板输送机力学特性仿真分析[J]. 煤矿机械, 2022, 43(6): 67-70.
ZHANG RuiFeng, LU JinNan. Simulation analysis of mechanical characteristics of scraper conveyor under abnormal load condition based on Matlab[J]. Coal Mine Machinery, 2022, 43(6): 67-70(In Chinese).
- [6] 谢 苗, 杨润坤, 卢进南, 等. 刮板输送机卡链断链工况力学特性研究[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 394-401.
XIE Miao, YANG RunKun, LU JinNan, et al. Study on mechanical characteristics of scraper conveyor under chain-breaking condition[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 394-401(In Chinese).
- [7] 岳树鹏. 刮板输送机链传动系统波动特性的试验研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(5): 82-84.
YUE ShuPeng. Experimental study on fluctuation characteristics of chain drive system of scraper conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2021, 36(5): 82-84(In Chinese).
- [8] 郭 洁, 段金红, 郭传军, 等. 基于 Adams 的刮板输送机卡链及断链工况动力学特性分析[J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 236-240.
GUO Jie, DUAN JinHong, GUO ChuanJun, et al. Analysis of dynamic characteristics of chain jamming and broken conditions of scraper conveyor based on Adams[J]. Coal Technology, 2023, 42(12): 236-240(In Chinese).
- [9] 侯德安. 矿用刮板输送机链传动系统稳定性分析与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2021(1): 57-59.
HOU DeAn. Analysis and simulation of stability of mining scraper conveyor chain drive system[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021(1): 57-59(In Chinese).
- [10] 谢 苗, 毛 君, 许文馨. 重型刮板输送机故障载荷工况与结构载荷工况的动力学仿真研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(10): 1200-1204.
XIE Miao, MAO Jun, XU WenXin. Dynamics simulation of heavy scraper conveyor in working condition of failure—load and structural load[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(10): 1200-1204(In Chinese).
- [11] 刘广鹏, 王学文, 杨兆建, 等. 刮板输送机链传动系统动力学特性分析[J]. 机械传动, 2014, 38(7): 115-118.
LIU GuangPeng, WANG XueWen, YANG ZhaoJian, et al. Dynamics characteristic analysis of chain transmission system of scraper conveyor[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(7): 115-118(In Chinese).
- [12] 王季鑫, 李军霞, 王 沅. 刮板输送机链传动系统波动特性分析[J]. 机械传动, 2019, 43(9): 118-122.
WANG JiXin, LI JunXia, WANG Yuan. Fluctuation characteristic analysis on scraper chain transmission system[J]. Journal of Mechan-

- ical Transmission, 2019, 43(9): 118-122(In Chinese).
- [13] 冯 涛. 刮板输送机链传动动力学研究分析[J]. 机械管理开发, 2019, 34(4): 71-72.
FENG Tao. Study on chain drive dynamics of scraper conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2019, 34(4): 71-72(In Chinese).
- [14] 朱 锋, 王 鹏. 基于 Adams 的重型刮板输送机圆环链传动模拟分析[J]. 机械传动, 2022, 46(12): 137-141.
ZHU Feng, WANG Peng. Simulation analysis of ring chain drive of heavy scraper conveyors based on Adams[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(12): 137-141(In Chinese).
- [15] 毛 君, 王 鑫, 陈洪月, 等. 刮板输送机刮板链条体系扭摆动态特性研究[J]. 机械强度, 2018, 40(4): 978-982.
MAO Jun, WANG Xin, CHEN HongYue, et al. Torsion pendulum dynamic characteristics study of scraper chain system of scraper conveyor[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(4): 978-982(In Chinese).
- [16] 张东升, 于海洋, 赵西贝, 等. 刮板输送机链条多边形效应振动特性研究[J]. 机械强度, 2018, 40(1): 20-26.
ZHANG DongSheng, YU HaiYang, ZHAO XiBei, et al. Study on vibration characteristics of the polygon effect of scraper conveyor[J]. Journal of Mechanical Strength, 2018, 40(1): 20-26(In Chinese).
- [17] 张 强, 王海舰, 毛 君, 等. 刮板输送机系统机电耦合模型及仿真分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(23): 3134-3139.
ZHANG Qiang, WANG HaiJian, MAO Jun, et al. Electromechanical coupling modeling and simulation analysis of scraper conveyor system[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(23): 3134-3139(In Chinese).
- [18] 谢春雪, 刘治翔, 毛 君, 等. 卡链工况下刮板输送机扭摆振动特性分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2348-2354.
XIE ChunXue, LIU ZhiXiang, MAO Jun, et al. Analysis of torsional vibration characteristics of scraper conveyor on chain blocked condition[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(8): 2348-2354(In Chinese).
- [19] 毛 君, 张云升, 谢春雪, 等. 刮板输送机扭转振动动力学模型构建与过弯曲段工况分析[J]. 机械强度, 2022, 44(2): 279-286.
MAO Jun, ZHANG YunSheng, XIE ChunXue, et al. Construction of torsional vibration mechanics model of scraper conveyor and analysis of working conditions through bending section [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(2): 279-286(In Chinese).
- [20] 张 行, 江 帆, 贾晨曦, 等. 基于状态观测器的刮板链张力分布特性研究[J]. 机械传动, 2022, 46(2): 15-22.
ZHANG Hang, JIANG Fan, JIA ChenXi, et al. Research on tension distributed characteristic of scraper chain based on state observer [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2022, 46(2): 15-22(In Chinese).
- [21] 雷丽萍. 刮板输送机链条链轮磨损失效分析[J]. 煤矿机械, 2014, 35(1): 77-78.
LEI LiPing. Wear failure analysis of sprocket and chain for scraper conveyor [J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(1): 77-78(In Chinese).
- [22] 王淑平, 杨兆建, 王学文. 刮板输送机链轮磨损与圆环链形变之间的关系[J]. 中国机械工程, 2014, 25(12): 1586-1590.
WANG ShuPing, YANG ZhaoJian, WANG XueWen. Relationship between round link chain deformation and worn sprocket [J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(12): 1586-1590(In Chinese).
- [23] 王淑平, 杨兆建, 王学文. 刮板输送机驱动链轮磨损与啮合力学行为[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 166-171.
WANG ShuPing, YANG ZhaoJian, WANG XueWen. Wear of driving sprocket for scraper convoy and mechanical behaviors at meshing progress [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(1): 166-171(In Chinese).
- [24] 杨月英, 冯 宁, 张效伟, 等. 基于 Adams 的刮板输送机链传动分析[J]. 煤矿机械, 2020, 41(8): 77-79.
YANG YueYing, FENG Ning, ZHANG XiaoWei, et al. Analysis of chain drive of scraper conveyor based on Adams [J]. Coal Mine Machinery, 2020, 41(8): 77-79(In Chinese).
- [25] 王振国. 刮板输送机驱动链轮的磨损机理研究[J]. 煤炭与化工, 2017, 40(9): 36-38.
WANG ZhenGuo. Study wear mechanism of scraper conveyor sprocket drive [J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(9): 36-38(In Chinese).
- [26] 崔瑞峰. 矿用刮板输送机异常载荷动力学特性分析[J]. 矿业装备, 2023(9): 195-197.
CUI RuiFeng. Dynamic characteristics analysis of abnormal load of mine scraper conveyor [J]. Mining Equipment, 2023(9): 195-197(In Chinese).
- [27] 高俊峰, 李 伟, 靳卫华, 等. 基于 Archard 理论的浮动密封结构磨损特性试验研究[J]. 机电工程, 2023, 40(8): 1147-1156.
GAO JunFeng, LI Wei, JIN WeiHua, et al. Wear characteristics of floating seal structure based on Archard theory [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2023, 40(8): 1147-1156(In Chinese).