DOI: 10.3901/JME.2021.21.211

矿用带式输送机承载托辊的磁性液体润滑与密封性能*

赵少迪¹ 鲍久圣^{1,2} 徐浩¹ 阴妍¹ 谢厚抗¹ 刘同冈¹

(1. 中国矿业大学机电工程学院 徐州 221116;

2. 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室 兰州 730000)

摘要: 托辊密封不可靠会引发轴承润滑失效, 进而导致托辊旋转阻力急剧增加直至完全卡阻, 已成为煤矿井下带式输送机的主要故障原因之一, 提高托辊密封与润滑性能对于提升带式输送机工作效率具有重要现实意义。基于纳米磁性液体密封与润滑理论设计了新型托辊样机, 利用可模拟井下环境的托辊旋转阻力试验台在不同试验条件下与普通托辊进行了性能对比试验。结果表明, 常规环境定载荷试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊最大降低 45%, 平均降低 17%; 常规环境定带速试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊最大降低 73%, 平均降低 54%; 模拟井下煤尘环境试验中, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊平均降低 26%; 煤泥水淋水 24 h 试验后, 普通托辊的旋转阻力增大至原来的 7 倍, 而磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力基本无变化。采用磁性液体密封润滑的托辊在不同试验条件下具有低旋转阻力、高抗水淋性等优异性能, 可为井下带式输送机向低能耗、高可靠、长寿命方向发展提供有力技术支撑。

关键词: 托辊; 带式输送机; 磁性液体; 密封; 润滑; 旋转阻力

中图分类号: TD528

Magnetic Fluid Lubrication and Sealing Performance of Mining Belt Conveyor Roller

ZHAO Shaodi¹ BAO Jiusheng^{1,2} XU Hao¹ YIN Yan¹ XIE Houkang¹ LIU Tonggang¹

(1. School of Mechatronic Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Chinese Academy of Sciences Lanzhou Institute of Chemical Physics, Lanzhou 730000)

Abstract: Unreliable sealing will lead to lubrication failure of the roller, which results in quick rising of rotational resistance and even turning blocked, is one of the most important failure reason of the belt conveyor used in coal mine. In order to solve the problem of excessive rotation resistance and service life of the roller conveyor belt, a roller prototype is designed and manufactured on the basis of nano magnetic liquid seal and lubrication principles. The test was carried out under different conditions between the magnetic liquid sealed & lubricating (MLSL) roller and the traditional roller, to compare their working performance. The results show that under the normal environment and the determined load, the rotational resistance of the MLSL roller is reduced by 45% compared with the traditional roller, and the average reduction is 17%. Under the normal environment and the determined belt speed, the maximum reduction of rotational resistance of the MLSL roller compared with the traditional roller is 73%, and the average value is 54%. In the simulated underground coal dust environment, the rotational resistance of the MLSL roller is reduced by 26% compared with the traditional roller. After spraying by the coal slurry water for 24 hours, the rotational resistance of the traditional roller is increased by 7 times. However, the rotational resistance of the MLSL roller is substantially unchanged. It is proved that the roller with magnetic liquid sealing and lubrication structure has excellent performances such as low rotation resistance and high anti-water performance under different test conditions, which can provide powerful technical support for the development of low-energy, high-reliability and

* 江苏高校优势学科建设工程资助项目。20201108 收到初稿, 20210319 收到修改稿

long-life roller for belt conveyors.

Key words: roller; belt conveyor; magnetic liquid; sealing; lubrication; rotational resistance

0 前言

带式输送机作为煤矿中应用最广泛的运输设备具有低成本、大运量、远距离、高可靠性等优点^[1]。托辊作为带式输送机不可或缺的部件,其重量占带式输送机 1/3~2/5,成本占比为 1/5~3/10,同时它也是整机故障率最高的组件^[2-4]。托辊阻力增大或失效将会导致带式输送机的能耗增加甚至超载停机等^[5-7]。而托辊故障的主要原因是筒皮磨损、托辊弯曲变形和密封件失效,前两者取决于托辊的本体结构设计和材料选择,后者则与托辊的轴端密封技术相关^[8]。托辊轴端密封性能差将导致润滑脂的变质与流失,从而伤害托辊的“心脏”,即轴承失效,因此,可靠的轴端密封方式是避免托辊失效的关键^[9]。

目前国内广泛使用的托辊密封方式有迷宫密封和唇形密封。迷宫密封在低转速情况下的密封效果很不理想,不能做到零泄漏;唇形密封运转阻力相对较大,唇口部位的磨损严重、橡胶材料容易老化。很多学者为了改善托辊的密封性能对托辊的密封机构进行了改进。彭兆辉等^[10]分析托辊失效的原因,分析了托辊密封结构的改进方法。郭覃等^[11]针对托辊使用工况及结构分析了其失效形式,采用“U”型自补偿旋转密封结构来补偿轴间和密封唇的相对磨损,这种密封方式属于接触式密封,所以阻力较大非接触并无优势,另外因磨损产生的磨屑会在密封结构中无法排出,可能会浸入润滑脂使其被破坏。刘杰等^[12]结合迷宫密封和油封密封设计出一种组合式密封托辊,实验结果表明该密封形式的防水、防尘性能优良,寿命增加,但因其采用的密封方式是基于传统密封方式的组合,所以阻力性能只是达到标准,相较于传统密封方式并没有较大改善。李小磊等^[13]研究了径向迷宫密封、轴向迷宫密封分别与附加密封的组合结构,结果表明新型组合式密封托辊的阻力更小,寿命更长,但新型托辊的防水、防尘性能在文中并未进行测试。刘广建等^[14]研制了一种多层密封的新型高分子托辊,并在自制的托辊试验机上进行测试,结果表明新型托辊的功耗更小、寿命更长。王伟平等^[15]提出了一种内置弹簧压环的双唇性密封托辊,可以自动补偿密封唇和轴间的磨损,增强了托辊的密封性能。上述研究大多都是在传统密封的基础上增加附加密封结构或采取多种密

封方式的组合,在本质上并未突破传统密封方式的束缚,且缺少试验来证明其密封结构的优越性。

磁性液体是一种新型功能材料,而磁性液体密封是基于磁性液体特殊的磁性和流动性发展起来的一项密封技术,其密封原理是采用聚磁结构将磁性液体约束在密封间隙中而实现密封目的^[16]。磁性液体密封是一种非接触式的密封,可以应用于静密封、动密封、旋转密封和往复密封等,它有着很多传统密封无法比拟的优点,如:密封可靠、零泄露、寿命长、低摩擦、无污染、能承受高转速、运转平稳和最佳的扭矩传递等^[17]。朱景建等^[18]将磁性液体密封应用于爪型干式真空泵,使泵的功耗减少、转速和效率提高。于振燕等^[19]在水轮机主轴上设置一种轴向与径向复合式磁性液体密封结构,并对其进行电磁场有限元仿真分析。刘训涛等^[20]基于 TRIZ 理论提出了磁性液体密封托辊,可以增加了密封寿命,降低了旋转阻力和故障率。PARMAR 等^[21]研究了大径向间隙静、动磁性流体密封的设计方法。YOSHINORI 等^[22]研究了液体环境下限制磁性流体密封使用寿命的因素和解决方法。LI 等^[23]将磁流体作为润滑介质,提出了一种适用于气液支架磁流体润滑的微磁铁阵列设计方法。但在矿用带式输送机领域,关于磁性液体密封与润滑的研究少之又少。因此,研发一种低阻力、长寿命的新型托辊,对于提高矿用带式输送机的工作性能与效率和降低煤炭生产运输成本具有重要实际意义。本文基于磁性液体密封与润滑理论,设计制造了磁性液体密封与润滑托辊,并通过对比试验研究了新型托辊在降低旋转阻力、延长寿命方面的优势。

1 试验设计

1.1 磁性液体密封与润滑原理

如图 1 所示,密封结构由永磁体、极靴和导磁轴套组成,从图 1 中可以看出在截面内部形成磁回路,从而吸附磁性液体形成液体密封环。

图 1 磁性液体密封原理

1.2 磁性液体密封与润滑托辊方案设计

市面上常见的普通托辊大多采用迷宫密封, 其结构图如图 2 所示。磁性液体密封与润滑托辊以普通托辊为基础, 用磁性液体密封替代迷宫密封, 同时采用磁性液体对轴承润滑, 其结构如图 3 所示^[24-25]。

图2 常见托辊结构

1. 托辊轴 2. 外迷宫密封圈 3. 内迷宫密封圈
4. 轴承 5. 轴承座 6. 筒体

图3 磁性液体密封与润滑托辊结构

1. 托辊轴 2. 左极靴 3. 永磁体 4. 轴承座
5. 隔磁外套 6. 右极靴 7. 轴承 8. 筒体

1.3 磁性液体密封与润滑托辊样机

(1) 材料选取。

根据设计方案, 磁性液体需要同时具备良好的磁性能和润滑性能, 试验最终选用 Fe_3O_4 磁性颗粒、烷基基载液和油酸表面活性剂的磁性液体。综合考虑剩磁 B_r 、矫顽力 H_c 和静态最大磁能积 $(BH)_{\max}$ 等因素, 选用轴向充磁的 N38 牌号钕铁硼作为永磁体的材料。鉴于极靴的磁场积聚作用与加工难度, 将极靴齿形设计为矩形, 材料选用电工纯铁^[26]。导磁

轴套作为形成磁路的一部分, 同时承担着定位轴承的作用, 其材料需选择导磁性能较好的 Q235 低碳钢材料。为了减少漏磁、优化磁路, 隔磁外套材料选用相对磁导率较低, 磁场不易通过的 304 不锈钢。

(2) 结构尺寸优化。

轴承内外侧轴向磁性液体密封结构尺寸示均如图 4 所示^[27]。其中, R 为托辊中心轴线到永磁体外径的距离, 由隔磁外壳的内径所确定, 已知为 22.5 mm。 r 为托辊中心轴线到永磁体内径的距离, L 为永磁体的轴向尺寸, L_t 为极靴的齿宽, L_h 为极靴的槽深, L_s 为极靴的槽宽, L_g 为密封间隙。

图4 密封结构尺寸示意图

其他条件不变的情况下, 密封间隙的磁场强度与永磁体的体积成正比。为在空间有限的托辊内部最大程度的提高密封效果, 以永磁体体积建立目标函数如下

$$V = \pi(22.5^2 - r^2)L \quad (1)$$

根据轴向定位要求, 永磁体与两极靴总宽度为 13 mm, 即

$$L + 2L_s + 4L_t = 13 \quad (2)$$

槽宽 L_s 需要满足的要求为: $L_s/L_g = 10 \sim 25$, $L_t/L_g = 2 \sim 6$, 由于密封间隙 $L_g = 0.2 \text{ mm}$, 即

$$0.2 \leq L_s \leq 5 \quad (3)$$

$$0.4 \leq L_t \leq 1.2 \quad (4)$$

而 $L_h/L_s = 0.8 \sim 1.0$, 即

$$15 + L_h \leq r \leq R \quad (5)$$

综合上述目标函数及约束条件, 得到如下结构优化模型

$$\begin{aligned} \max \quad & V = \pi(22.5^2 - r^2)L \\ \text{s.t.} \quad & L + 2L_s + 4L_t = 13 \\ & r - 22.5 \leq 0 \\ & 2 - L_s \leq 0 \\ & L_s - 5 \leq 0 \\ & 0.4 - L_t \leq 0 \\ & L_t - 1.2 \leq 0 \\ & 0.8L_s - L_h \leq 0 \\ & L_h - L_s \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

通常 Matlab 中的极值求解使用 fmincon 最小值函数, 本文只需再需在目标函数前加负号即可, 最终解出优化后的尺寸如表 1 所示。

表 1 优化后的密封结构参数

参数	数值
永磁体长度 L/mm	6.0
永磁体内径 r/mm	16.2
槽宽 L_g/mm	1.5
齿宽 L_t/mm	1.0
槽深 L_h/mm	1.2
永磁体体积 V/mm^3	3 827.8

(3) 电磁场仿真验证。

利用优化后的尺寸参数进行 ANSYS 参数化仿真, 结果如图 5、6 所示。从图 5 可以看出磁力线由永磁体发出, 进入极靴后多数磁力线向极齿处汇聚, 少数磁力线通过极靴向上分散, 即所谓的漏磁现象, 这也说明了方案中隔磁外壳的必要性。图 6 显示四个极齿处都存在较大的磁感应强度, 由此可见, 内外侧磁性液体密封与润滑结构方案是合理的, 通过结构优化使磁性液体密封与润滑托辊样机具有理论最优的密封效果, 为后期对比试验取得理想结果提供了基础保障。

图 5 优化后的磁力线分布

图 6 优化后的磁感应强度分布

1.4 模拟井下环境的托辊阻力试验台

为全面准确地测试磁性液体密封与润滑托辊的性能, 根据井下运输巷道环境并参考《煤矿安全规程》, 搭建了能够模拟井下温度、湿度和粉尘环境的带式输送机托辊旋转阻力试验台^[28], 其实物图如图 7 所示, 环境模拟装置的控制方案如图 8 所示。

图 7 模拟井下环境的托辊旋转阻力试验台

图 8 环境控制方案

井下环境模拟装置由风机、加湿器和加热器组成, 可以调节环境湿度、粉尘浓度与环境温度, 同时通过传感器实时监测环境参数, 将环境信息反馈到控制箱实现对井下模拟环境的动态调节。为准确测得托辊旋转阻力, 在托辊轴两端布置扭矩传感器, 传感器与托辊轴端通过轴承座连接并固定在试验台上。旋转阻力的测量原理如图 9 所示, 具体的计算方法如下^[29]

$$M_L = \frac{M_1 + M_2}{2} \quad (7)$$

$$F_z = \frac{2M_L}{d_i} \quad (8)$$

式中, M_1 为托辊左端阻力矩, $\text{N}\cdot\text{mm}$; M_2 为托辊右端阻力矩, $\text{N}\cdot\text{mm}$; M_L 为托辊两端平均阻力矩,

$\text{N}\cdot\text{mm}$; F_z 为托辊的旋转阻力, N ; d_i 为托辊的直径, mm 。

图9 阻力计算原理图

1. 扭矩传感器 2. 轴承座 3. 托辊轴

1.5 托辊阻力对比试验方案设计

为比较磁性液体密封与润滑托辊相较于传统托辊在使用过程中的性能优势, 利用上文所述的模拟井下环境的带式输送机托辊旋转阻力试验台, 设计如下四种方案对两种托辊进行测试。

(1) 常规环境定载荷试验。

为对比两种润滑方式带来的旋转阻力差异, 测定五组托辊载荷分别为 0 N 、 125 N 、 250 N 、 375 N 和 500 N 下, 带速由 0 m/s 增加到 1.2 m/s 过程中的阻力变化情况。

(2) 常规环境定带速试验。

为对比两种托辊的承载能力上的区别, 分别进行测定带速为 0.3 m/s 、 0.6 m/s 、 0.9 m/s 、 1.2 m/s 情况下, 载荷从 0 N 增加到 500 N 过程中两托辊的旋转阻力数值。

(3) 模拟井下煤尘环境试验。

为探究磁性液体密封润滑托辊在井下实际应用中的优势, 将传统托辊与磁性液体密封润滑托辊在模拟井下环境的托辊旋转阻力试验台上进行对比试验。根据《煤矿安全规程》和《煤矿用带式输送机托辊技术条件》, 在载荷 100 N 、带速 1.2 m/s 、环境温度 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、环境湿度 90% 、粉尘浓度 $1\,000\text{ mg/m}^3$ 的条件下进行 200 h 测试, 以旋转阻力作为密封可靠性的评判依据。

(4) 煤泥水淋水试验。

带式输送机长时间运行, 煤粉会在托辊轴端堆积, 若巷道内存在托辊淋水或浸水情况, 则更加考验托辊的密封性能。为此, 对模拟井下环境装置进行升级, 通过煤泥水淋水试验模拟上述工况。采用可控制水流大小的水桶作为储水容器, 将煤尘与清水均匀混合后作为淋水水源, 采用三通接头的两端口作为出水口, 对两托辊密封处进行煤泥水淋水试验。试验台带速保持在 1 m/s 左右, 不施加载荷, 共进行 24 h 的试验, 每 1 h 采集一次试验过程中的阻力数据。

2 结果与讨论

按照上述试验方案对普通托辊和磁性液体润滑与密封托辊进行测试, 试验结果分析如下。

2.1 常规环境定载荷试验

如图 10 所示, 相同载荷情况下两托辊的旋转阻力均随输送带速度的增加而增大, 但是变化率逐渐减小, 总体来看磁性液体密封润滑托辊稳定运转的旋转阻力较普通托辊有明显的降低。对比图 10a~10e, 两种托辊的旋转阻力随着载荷的增加都有明显增加趋势, 但每个试验过程中两托辊的阻力都出现了明显波动, 这是因为托辊的轴承座与筒体为焊接, 两轴承座的同轴度精度不高, 在运行时存在跳动, 所以施加载荷时的阻力大于未施加载荷时, 且先加载再启动试验台会使托辊跳动更明显, 阻力波动更大。图中试验开始阶段, 磁性液体密封与润滑托辊的旋转阻力存在大于传统托辊的情况, 这是由于磁性液体密封与润滑托辊在试验前长时间的静置, 磁性颗粒出现团聚现象使磁性液体的黏度增大, 造成托辊内部磁性液体的流动性变差, 磁性液体与极靴和导磁套间的静摩擦作用导致磁性液体密封托辊的启动阻力增加, 随着转动的持续, 磁性液体受到的剪切速率增大, 其流动性逐渐恢复到正常状态^[30]。通过式(9)可数字化表示磁性液体润滑与密封托辊相较于普通托辊的旋转阻力降低水平, 其中, $\bar{F}_p$ 和 $\bar{F}_c$ 分别表示普通托辊和磁性液体密封与托辊在同一载荷条件下的旋转阻力均值, γ 表示磁性液体密封与托辊较普通托辊的旋转阻力变化水平, 正值说明阻力降低, 负值代表阻力增加。按上述方法进行求解, 得到五种载荷条件下旋转阻力平均降低水平为 17% , 最大降低水平 45% 。

$$\gamma = \frac{(\bar{F}_p - \bar{F}_c)}{\bar{F}_c} \times 100\% \quad (9)$$

图 10 定载荷条件下两托辊旋转阻力变化

2.2 常规环境定带速试验

如图 11 所示, 相同带速条件下两托辊的旋转阻力均随载荷的逐渐增加而增大, 整体来看, 磁性液

体密封与润滑托辊的旋转阻力要比普通托辊小, 且随着带速越高两者差别越明显。根据式(9)计算可得, 四种带速条件下旋转阻力平均降低水平为 54%, 最大降低水平为 73%。

图 11 定带速条件下两托辊旋转阻力变化

2.3 模拟井下煤尘环境试验

从图 12 可以看出在整个试验过程中, 磁性液体密封与润滑托辊的旋转阻力波动较普通托辊更加稳定, 随着时间推移, 两种托辊的阻力都有所增加, 但在整个过程中磁性液体密封与润滑托辊的旋转阻力均比普通托辊要低。磁性液体密封与润滑托辊的旋转阻力上升原因是粉尘突破外部挡圈, 与导磁轴套和最外侧极齿间隙中的磁性液体形成油泥而阻碍运转, 然而油泥的形成又可成为阻止粉尘继续侵入的屏障, 使托辊阻力大致保持稳定。取试验中两托辊各自旋转阻力平均值, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊的旋转阻力减小 26%。

图 12 载荷 $F=100\text{ N}$, 带速 $v=1.2\text{ m/s}$ 两托辊 200 h 内的阻力变化

2.4 煤泥水淋水试验

煤泥水淋水试验结果如图 13 所示, 整个试验过程中, 磁性液体密封与润滑的托辊旋转阻力整体变动不大, 而采用迷宫密封的普通托辊在试验第 12 h 左右开始出现旋转阻力大幅上升的现象; 在第 21 h 左右, 迷宫密封托辊旋转阻力稳定在 35 N 上下。此时采用迷宫密封的托辊其旋转阻力数值几乎达到初始旋转阻力值的 7 倍左右, 且经实际观察, 迷宫密封托辊的筒体几乎已经与轴同时旋转, 说明此时迷宫密封的轴承已经出现问题。

图 13 淋水试验中两托辊旋转阻力变化对比

为判断经过极端工况试验后的两种托辊轴承状态, 对试验后的两托辊进行了拆解。从图 14 中可以看到普通托辊内迷宫密封圈的环状沟槽中已经布满了粉尘, 轴承已经被泥水混合物侵入, 轴承自带的防尘密封圈也不能起到良好的保护作用, 导致轴承内外圈完全卡死、不能转动。

图 14 普通托辊密封圈

由图 15 可知, 磁性液体密封与润滑托辊在其密封间隙处聚集了一圈黑色的油泥。该油泥为外界粉尘、泥水与密封间隙处的纳米磁性液体混合的产物, 而油泥的存在一方面增加了托辊的旋转阻力, 另一方面也阻止更多污染物的侵入。实际上轴承内并无灰尘侵入, 转动状态良好。

图 15 磁性液体密封润滑托辊

试验证明纳米磁性液体密封能够有效阻止粉尘、煤泥水等污染物, 对托辊轴承起到可靠的保护作用; 迷宫密封虽然对粉尘等固体污染物的阻挡作用较好, 但是对流体污染物不能起到较好的抵挡作用。综上所述, 对于环境尤其恶劣的井下, 磁性液体密封与润滑托辊仍能保持可靠的密封作用。

3 结论

(1) 磁性液体密封与润滑托辊长时间静置磁性颗粒会发生磁团聚现象, 造成磁性液体黏度增加, 导致试验开始阶段启动旋转阻力大于普通托辊。

(2) 通过四种不同条件下的对比试验可发现, 定载荷阻力试验下, 磁性液体密封润滑托辊的旋转阻力较普通托辊平均降低 17%, 最大降低 45%; 定带速阻力试验下平均降低 54%, 最大降低 73%; 模拟井下环境下降低 26%; 煤泥水淋水试验下的差距更加明显, 旋转阻力相差 7 倍之多, 普通托辊已经完全卡死, 磁性液体密封与润滑托辊转动良好。结

果表明磁性液体密封润滑托辊比普通托辊具有更可靠的密封润滑能力。

(3) 由于托辊本身并非精密部件, 在加工过程中两个轴承座难以保持较高的同轴精度, 造成试验过程中的波动较大, 而磁性液体密封间隙仅为 0.2 mm, 因精度带来的跳动可能会对磁性液体密封造成影响, 是下一步工作需要考虑解决的问题。

参 考 文 献

- [1] 曲建平. 煤矿带式输送机现状与发展趋势[J]. 煤炭科技, 2015(4): 146-147.
QU Jianping. Current situation and development trend of belt conveyor in coal mine[J]. Coal Science and Technology Magazine, 2015, (4): 146-147.
- [2] 刘振. 带式输送机高速托辊的应用研究[J]. 矿山机械, 2011, 39(6): 66-69.
LIU Zhen. Study on application of high-speed idlers of conveyors[J]. Mining and Processing Equipment, 2011, 39(6): 66-69.
- [3] 刘振, 刘静. 带式输送机托辊的分析[J]. 机电信息, 2011(3): 86-87.
LIU Zhen, LIU Jing. Analysis of belt conveyor idlers[J]. Mechanical and Electrical Information, 2011(3): 86-87.
- [4] 陈恒新. 带式输送机托辊密封设计[J]. 矿山机械, 2010, 38(17): 86-87.
CHEN Hengxin. Design of idler sealing of belt conveyor[J]. Mining and Processing Equipment, 2010, 38(17): 86-87.
- [5] 朱华, 吴兆宏, 李刚, 等. 煤矿机械磨损失效研究[J]. 煤炭学报, 2006(3): 380-385.
ZHU Hua, WU Zhaohong, LI Gang, et al. Study on wear failures of mining machinery[J]. Journal of China Coal Society, 2006(3): 380-385.
- [6] 宋彤菊. 矿用带式输送机常见故障分析及预防措施[J]. 机械管理开发, 2009, 24(3): 68-69.
SONG Tongju. Common fault analysis and preventive measures of mine belt Conveyor[J]. Mechanical Management and Development, 2009, 24(3): 68-69.
- [7] 樊祥. 煤矿带式输送机常见事故与预防措施分析[J]. 机械管理开发, 2017, 32(7): 20-21+24.
FAN Xiang. Analysis of common accidents and preventive measures of belt conveyor in coal mine[J]. Mechanical Management and Development, 2017, 32(7): 20-21+24.
- [8] 李仟. 带式输送机托辊失效原因与改进措施分析[J]. 陕西煤炭, 2019, 38(5): 72-75.
LI Qian. Analysis of failure reasons and improvement measures of belt conveyor roller[J]. Shaanxi Coal, 2019, 38(5): 72-75.
- [9] 江旗. 胶带输送机托辊密封结构机理及托辊强度分析[D]. 唐山: 华北理工大学, 2019.
JIANG Qi. Structural mechanism and strength analysis of roller seal for belt conveyor[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2019.
- [10] 彭兆辉, 吴桐. 皮带机的托辊密封结构分析[J]. 中国新技术新产品, 2017(1): 72-73.
PENG Zhaohui, WU Tong. Analysis of roller seal structure of belt conveyor[J]. New Technology and New Products of China, 2017(1): 72-73.
- [11] 郭覃, 周哲波, 刘大利, 等. 带式输送机托辊的长寿命密封设计[J]. 机械设计与制造, 2008(3): 18-19.
GUO Qin, ZHOU Zhebo, LIU Dali, et, al. The long life seal design of belt conveyor[J]. Machinery Design and Manufacture, 2008(3): 18-19.
- [12] 刘杰, 于涛, 孙丽英. 新型复合密封托辊的结构设计与试验研究[J]. 铸造设备与工艺, 2015(3): 20-22.
LIU Jie, YU Tao, SUN Liying. Design and experimental research of the new composite sealing roller[J]. Foundry Equipment and Technology, 2015(3): 20-22.
- [13] 李小磊. 新型密封结构托辊及其试验机的设计研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
LI Xiaolei. The design and research of a new type of roller Sealing structure and its testing machine[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2011.
- [14] 刘广建, 陈冲冲, 马艳娥, 等. 新型密封结构高分子托辊的摩擦磨损试验研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(11): 49-51.
LIU Guangjian, CHEN Chongchong, MA Yane, et, al. Test research on friction and wear of new sealing structure polymer roller[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(11): 49-51.
- [15] 王伟平. 煤矿用带式输送机托辊的密封设计[J]. 煤矿机械, 2009, 30(6): 9-10.
WANG Weiping. Seal design of belt conveyor carrier roller used in coal mines[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(6): 9-10.
- [16] 孙明礼, 李德才, 何新智, 等. 磁流体密封的磁场数值分析及优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2007(3): 269-272.

- SUN Mingli, LI Decai, HE Xinzhi, et al. Simulation and design of magnetic fluid sealing devices[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2007(3): 269-272.
- [17] 李德才. 磁性液体密封的理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- LI Decai. The theory and application of magnetic liquid sealing[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [18] 朱景建. 爪型干式真空泵磁流体密封的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(7): 660-664.
- ZHU Jingjian. Sealing of claw-type dry vacuum pump with magnetic fluid[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(7): 660-664.
- [19] 于振燕, 张玮. 磁流体密封在水轮机主轴中的应用[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(2): 151-155.
- YU Zhenyan, ZHANG Wei. Application of magnetic fluid seal in hydraulic turbine shaft[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(2): 151-155.
- [20] 刘训涛, 吴卫东, 张岩, 等. 基于 TRIZ 理论的托辊密封的研究[J]. 矿山机械, 2009, 37(13): 62-65.
- LIU Xuntao, WU Weidong, ZHANG Yan, et al. TRIZ theory based the idler roll sealing research[J]. Mining and Processing Equipment, 2009, 37(13): 62-65.
- [21] SAURABH PARMAR, VENKAT RAMANI, R.V. UPADHYAY et al. Design and development of large radial clearance static and dynamic magnetic fluid seal[J]. Vacuum, 2018, 156: 325-333.
- [22] YOSHINORI M, KAZUMITSU S, EIJI O. Magnetic fluid seals working in liquid environments: Factors limiting their life and solution methods[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2020, 500166293.
- [23] LI Jingbing, DAI Qingwen, HUANG Wei, et al. Feasibility study of magnetic fluid support and lubrication behaviors on micro magnet arrays[J]. Tribology International, 2020, 150.
- [24] 徐浩. 纳米磁性液体密封润滑的托辊设计及性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- XU Hao. Design and performance of nano magnetic liquid sealed and lubricated idler[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [25] 鲍久圣, 徐浩, 葛世荣, 等. 一种纳米磁性液体密封与润滑的带式输送机托辊[P]. 中国, CN201810430112.9, 2018-11-30.
- BAO Jiusheng, XU Hao, GE Shirong, et al. The utility model relates to a belt conveyor idler sealed and lubricated by nano magnetic liquid[P]. China, CN201810430112.9, 2018-11-30.
- [26] 杨松. 钠堆主轴径向微动工况下磁性液体密封的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- YANG Song. Study on magnetic fluid under radial fretting condition of sodium cooled fast reactor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [27] 杨文明, 李德才, 赵晓光, 等. 磁性液体密封结构的优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2010, 30(1): 80-83.
- YANG Wenming, LI Decai, ZHAO Xiaoguang, et al. Simulation and optimization of magnetic fluid seal structures[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2010, 30(1): 80-83.
- [28] 国家安全生产监督管理总局, 国家煤矿安全监察局. 煤矿安全规程[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- State Administration of Work Safety, State Administration of Coal Mine Safety. Coal mine safety regulations[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
- [29] 蔡雪晴, 鲍久圣, 阴妍, 等. 带式输送机托辊性能测试技术研究进展[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 271-274.
- CAI Xueqing, BAO Jiusheng, YIN Yan, et al. Research progress of idler performance testing technology of belt conveyor[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 271-274.
- [30] 程艳红, 李德才, 戴荣坤. 氟醚油基磁性液体密封启动力矩的实验分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(8): 1316-1321.
- CHENG Yanhong, LI Decai, DAI Rongkun. Experimental analysis of starting torque of perfluoro polyethers-based magnetic fluid seal[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(8): 1316-1321.

作者简介: 赵少迪, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为摩擦学与制动技术。

E-mail: cumtspd@foxmail.com

鲍久圣(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为矿山运输与摩擦学。

E-mail: cumtbjs@cumt.edu.cn