

# 机电设备全生命周期健康管理在胶带机维护中的应用及成本效益分析

张小勇

国能神东锦界煤矿管理处

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8740

**[摘要]** 胶带机是煤炭行业核心物料输送设备，其运行稳定性直接决定生产连续性与经济效益。传统维护模式存在“重维修、轻预防”“阶段脱节”等问题，导致非计划停机频繁、维护成本偏高。本文基于设备全生命周期管理理论，介绍胶带机维护现状，系统探讨全生命周期健康管理在胶带机规划设计、采购安装、运行维护、报废处置全阶段的应用实践，量化分析应用效益，旨在为煤炭企业胶带机精细化维护、降本增效提供实践参考。

**[关键词]** 胶带机；全生命周期；健康管理；维护策略；成本效益

## Application and Cost-Benefit Analysis of Full Life Cycle Health Management in Belt Conveyor Maintenance

Zhang Xiaoyong

Guoneng Shendong Jinjie Coal Mine Management Office

**[Abstract]** As a core material handling equipment in the coal industry, belt conveyors directly determine production continuity and economic efficiency through their operational stability. Traditional maintenance models suffer from issues like "overemphasis on repairs while neglecting prevention" and "disconnected maintenance phases," resulting in frequent unplanned shutdowns and high maintenance costs. Based on full life cycle management theory, this paper examines the current status of belt conveyor maintenance and systematically explores the application of full life cycle health management across all stages—from planning and procurement to operation, maintenance, and decommissioning. Through quantitative analysis of benefits, it aims to provide practical references for coal enterprises to refine maintenance practices, reduce costs, and enhance efficiency.

**[Key words]** tape conveyor; full life cycle; health management; maintenance strategy; cost-effectiveness

### 引言

在煤炭开采行业，胶带机作为高效连续的物料输送核心装备，承担着70%以上的井下及地面物料运输任务，是连接采掘、加工、仓储等环节的关键纽带，其运行状态直接影响生产流程的连续性与作业安全性。随着煤炭行业智能化转型的推进，高产高效矿井建设对胶带机的可靠性、稳定性提出了更高要求，而传统胶带机维护多采用“故障后维修”或“定期预防性维修”模式，存在明显局限性。传统维护模式下，中小型矿区胶带机年均停机时长远高于行业先进水平，且易出现“维修不足”或“过度维修”的极端情况，既无法及时规避隐性故障，又造成人力、耗材的无效消耗。而智能化系统设备的出现可以改善这一情况，陕煤曹家滩矿业应用智能化系统使设备故障平均停机时间缩短了40%<sup>①</sup>；华电煤业应用的设备智能管理系统，每年可节约运维成本超千万元，同时故障识别准确率提升了30%以上<sup>②</sup>，上述这些案例说明从传统维护转向基于状态的健康管理，能显著提升可靠性并降低成本。机电设备全生命周期健康管理以“全阶段管控、数据驱动、预防为先”为核心，整合智能化监测与数据分析技术，打破传统分段式管理壁垒，实现设备全

流程健康管控。本文聚焦煤炭行业胶带机全生命周期健康维护，系统探讨全生命周期健康管理模式的应用路径与效益，为行业内同类企业提供借鉴。

### 一、全生命周期管理理论内涵

全生命周期管理 (Lifecycle Management, LCM) 是一种系统性管理模式，核心是将管理对象视为完整的生命周期系统，贯穿规划设计、采购安装、运行维护、报废处置四个核心阶段，强调各阶段协同衔接与全流程闭环管控，而非孤立关注某一阶段管理成效。与传统分段式管理相比，该模式更注重“事前预防、事中管控、事后复盘”的全链条优化，核心目标是在保障设备（或管理对象）稳定运行的前提下，最大化降低全生命周期成本 (Lifecycle Cost, LCC)，提升资产利用率与投资回报率。

### 二、胶带机传统维护现状及痛点

胶带机作为高产高效矿井的典型代表，承担着井下原煤输送的关键任务。其运行稳定性直接决定矿井产能释放与作业安全。在推行全生命周期健康管理前，很多煤炭企业在胶带机维护管理时大多还是采用传统“定期维护+故障抢修”模式，虽

能满足基础运维需求，但结合井下高粉尘、高湿度、强振动的极端工况，逐渐凸显诸多痛点，难以适配高产高效生产需求：

一是故障预警能力薄弱，依赖人工巡检排查隐患，难以捕捉带面隐性破损、轴承早期劣化等潜在故障，导致非计划停机频繁，据统计，传统模式下主井胶带机年均非计划停机时间较长，单次输送带断裂等重大故障可造成矿井“采、掘、运”全链条中断，造成经济损失；二是维护精准度不足，采用“一刀切”定期维护模式，存在过度维修与维修不足并存的问题，年均维护耗材成本偏高，且浪费大量人工资源和维护成本；三是数据管控分散，设备初始参数、运行数据、维护记录未实现集中管理，无法追溯设备全生命周期健康状态，难以总结劣化规律、优化维护策略；四是报废处置粗放，未开展科学的报废评估与资源化回收，既浪费设备剩余价值，又难以通过复盘优化提升后续设备管理水平。

### 三、全生命周期健康管理在胶带机维护中的应用实践

为解决上述痛点，煤炭企业可以依托智能化转型契机，引入机电设备全生命周期健康管理理念，实现维护模式从“被动抢修”向“主动预防”转型。

#### (一) 规划设计阶段加强健康管控，规避先天隐患

规划设计是胶带机健康管理的源头，煤炭行业要重点结合井下高粉尘、空间狭窄等工况，将健康管理理念融入设计全过程，从源头规避先天缺陷：一是开展工况适配性设计，优化胶带机结构参数，选用紧凑型驱动装置与滚筒，避免设计负荷与实际运输量不匹配、结构与巷道空间冲突引发的故障；同时优化核心部件设计，输送带优先选用抗冲击、防撕裂的钢丝绳芯型号，滚筒包胶采用耐磨陶瓷材料，提升部件耐磨损、抗冲击能力。二是预留智能化监测接口，在滚筒、托辊、减速器等核心部件设计中，预留传感器、线缆的标准化安装接口与走线通道，为后期加装智能化监测设备提供便利，降低改造成本。三是搭建数字孪生基础模型，还原井下巷道与胶带机布局，模拟设备运行状态与劣化过程，为后续健康监测、故障模拟奠定基础，提前优化设计方案。

#### (二) 采购安装阶段严控质量，夯实健康基础

采购环节，可以推行基于健康管理的选型标准，优先选择可靠性高、易维护、适配井下工况且满足智能化监测需求的设备及零部件，建立动态厂商评价机制(QCDS)，降低采购风险；在采购技术协议中明确关键部件防护要求，传感器选用矿用本安型、防护等级IP67及以上产品，适配井下高粉尘、高湿度环境，同时明确数据接口标准，确保设备可实现数据互通。

安装调试阶段，严格按照设计方案施工，应用激光对中仪控制驱动滚筒与改向滚筒的平行度与同轴度(误差 $\leq 0.5\text{mm}$ )，减少因安装不当引发的跑偏、磨损问题；依托BIM施工协同平台实现设备布局可视化与冲突检测，减少井下施工返工成本。调试过程中，完成72小时连续负载测试，模拟井下极端工况，监测设备各部件运行状态，记录初始振动、温度等健康数据，排查安装隐患；同时对监测设备进行校准，确保数据采集准确性。

此外，为每台胶带机及核心部件生成唯一“数字身份证”，建立初始健康档案，记录规格型号、出厂参数、安装日期、初始运行数据等信息，实现设备健康数据全生命周期追溯，为后续维护、复盘提供支撑。

#### (三) 运维阶段精准监测预警，优化维护执行

运维阶段是设备全生命周期健康管理的核心，企业可以构建“感知—分析—决策—执行”闭环体系，破解井下巡检盲区大、故障预警滞后等痛点，实现精准维护。

一是搭建立体化智能感知网络，适配井下工况，优化监测布局。在核心转动部件部署振动与温度传感器，监测设备运行状态；在输送带关键点位部署AI+线激光三维视觉巡检系统，实现皮带损伤毫米级识别报警，破解人工巡检盲区；通过电流传感器规避电机过载风险。依托“端—边—云”协同传输平台，井下边缘计算网关预处理海量数据，仅上传有效信息，借助工业互联网环网保障数据传输稳定，确保预警及时。

二是建立科学预警与评估机制。基于云端平台整合多源数据，融合机理模型与大数据算法构建诊断模型，量化设备劣化程度并划分四级健康等级；搭建故障特征库，精准匹配井下损伤模式，定位故障位置与类型；预测核心部件剩余寿命，采用动态阈值算法降低预警误报率，提前发出维护提示。

三是推行精准化维护策略，摒弃“一刀切”模式，结合健康等级制定差异化方案：正常设备定期巡检，轻度劣化设备强化监测，中、重度劣化设备启动应急维护，到期部件预防性更换。平台自动生成维护工单并派发，维修后归档故障信息形成专家知识库，辅助后续决策。

四是完善数据复盘优化机制。定期复盘运行、维护及故障数据，总结工况对设备劣化的影响，优化评估模型与维护策略。例如，通过数据分析锁定皮带划痕集中区域，精准定位隐患源头，提升预防性维修效率。通过整体闭环管理，实现井下设备运维的精准化、高效化。

#### (四) 报废处置阶段强化残值利用，实现闭环优化

该阶段核心是科学评估、资源化回收、复盘优化，实现全生命周期闭环管控。煤炭企业可以建立基于经济寿命与技术寿命的报废评估模型，结合胶带机健康数据、运行年限、维护成本等指标，判断设备是否报废：核心部件严重劣化，无法修复或修复成本过高的胶带机启动报废流程；可修复的电机、滚筒等部件单独评估，优先回收再制造，作为井下备件，降低采购成本。

在资源化回收方面，对报废胶带机分类拆解，输送带胶料进行脱硫再生处理，金属结构件回收熔炼，实现资源循环利用；单台报废电机经修复校准后重新投入使用，可节约采购成本8000-12000元。同时，开展全生命周期复盘，全面分析胶带机健康数据、故障情况、成本投入与维护成效，总结经验教训，将复盘结果反馈至前序各阶段，优化设计方案、选型标准与维护策略，实现管理体系持续升级。

### 四、胶带机全生命周期健康管理应用效益评估

本次以煤炭行业1.4米带宽、2000米运距、电机功率630kW的主井胶带机为评估对象，对比传统维护模式与全生命周期健康管理模式的成本与效益，分析周期为设备全生命周期(传统模式10年，健康管理模式12年)，通过量化数据与表格直观呈现应用成效。

#### (一) 核心监测设备及适配性

胶带机健康管理体的落地，依托定制化监测设备来适配井下工况，其核心设备选型及部署如下表所示，确保监测精度与稳定性：

表1 胶带机核心监测设备选型及适配性表

系统/设备名称	核心功能/规格	工况适配特性	部署要点
AI 视觉巡检系统	皮带损伤识别 (精度≤1mm)、跑偏检测、大块煤识别	防爆设计、抗粉尘镜头、低照度适应	每 200—300 米部署一处, 覆盖皮带全宽
无线振动温度传感器	监测轴承、齿轮传动加速度与温度趋势	矿用本安型、IP67 防护、电池寿命≥1—2 年	关键驱动/转向滚筒轴承座、减速器各轴端
边缘计算网关	数据就地处理、协议转换、断点续传	宽温设计、防震、多接口兼容	就近安装在配电点或专用防爆箱内
健康管理云平台	数据汇聚、健康评估、预警预测、报表管理	支持私有化部署、与现有 MES/ERP 系统集成	地面数据中心部署, 提供 Web/移动端访问

## (二) 成本量化对比

胶带机全生命周期成本核心差异集中在运行维护成本与故障损失成本, 健康管理模式虽增加了智能化改造与监测运维

成本, 但大幅降低了人工、耗材及故障损失成本, 具体对比如下表所示:

表2 主井胶带机全生命周期成本对比表

维护模式	全生命周期	智能化改造投入 (万元)	年均运行维护成本 (万元)	年均故障损失成本 (万元)	全生命周期总成本 (万元)	静态投资回收期
传统维护模式	10 年	-	65-70	465-725	6500-8500	-
全生命周期健康管理模式	12 年	40-60	35-45	105-170	3800-5200	8-14 个月

具体来看, 运行维护成本方面, 传统模式下单台主井胶带机需配备 4-5 名专职维护人员, 年均人工成本 40 万元, 耗材年均更换成本 20 万—25 万元; 健康管理模式下, 仅需 2-3 名专职人员, 年均人工成本降至 20 万—25 万元, 耗材更换成本因故障减少降至 8-12 万元, 新增监测设备运维成本 5-8 万元, 年均运行维护成本较传统模式节约 25-35 万元, 降幅达 25%-35%。

故障损失成本方面, 传统模式下年均非计划停机 420 小时, 每小时损失 1-1.5 万元, 年均非计划停机损失 450-675 万元, 重大故障年均 3—5 次, 维修损失 15-50 万元; 健康管理模式下, 年均非计划停机缩短至 100 小时以下, 非计划停机损失降至 100-150 万元, 重大故障年均 1—2 次, 维修损失 5-20 万元, 年均故障损失节约 226-354 万元, 降幅达 50%-60%。

## (三) 综合效益评估

胶带机全生命周期健康管理的应用效益体现在多方面, 兼具经济、管理、安全及生态价值, 验证了模式可行性与高价值。直接效益聚焦成本节约与残值回收, 单台主井胶带机 12 年全生命周期可节约成本并斩获各类收益共计 3608-4212 万元, 核心部件寿命延长 30%以上, 提升设备资产利用率。间接效益体现为生产效率提升与管理升级, 胶带机非计划停机减少、运力提升, 12 年累计创造额外利润 9600-12600 万元, 同时数字化管理模式为其他井下设备提供借鉴, 推动企业设备管理体系升级。安全效益上, 可提前排查故障、规避安全事故, 降低故障停机率至 3%以下, 消除人工巡检隐患, 年均节约事故处理成本 50-100 万元。此外, 该模式减少耗材消耗与环境污染, 契合绿色低碳发展需求, 前期 40-60 万元智能化改造投入 8-14 个月即可收回, 12 年全生命周期投资回报率极高, 实现经济效益与管理水平双重提升。

## 结语

综上, 胶带机作为煤炭行业核心输送设备, 其维护质量直接影响矿井生产连续性、作业安全性与经济效益, 传统被动化、分段式维护模式已无法适配智能化、高产高效矿井的发展需求。机电设备全生命周期健康管理以全流程协同、数据驱动、精准预防为核心, 有效打破传统维护瓶颈, 实现胶带机健康状

态的全链条管控, 是煤炭企业胶带机精细化维护的重要路径。本文以煤炭行业常用设备胶带机为例, 系统探讨了全生命周期健康管理在胶带机全阶段的应用实践, 实践表明, 该模式可有效解决井下胶带机故障预警滞后、维护精准度不足、成本偏高的痛点, 实现故障停机率降至 3%以下、维护成本削减 25%-35%、设备使用寿命延长 2-3 年的显著成效, 同时提升生产效率、降低安全风险, 投资回报率突出, 兼具经济效益、安全效益与生态效益。未来, 随着数字孪生、深度学习等技术与设备健康管理的深度融合, 胶带机全生命周期健康管理将向更精准、更智能的方向发展, 重点优化井下极端工况的适配能力, 实现降本增效、安全生产, 助力煤炭行业高质量发展。

## [参考文献]

- [1]张天峰.深度学习在煤矿机电设备检测技术中的应用研究[J].自动化仪表, 2025, 46(2): 102-106.
- [2]赵雄威, 吴未林, 翁海涛.数字孪生技术在机电装备全生命周期管理中的应用[C]//《中国招标》期刊有限公司.新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛——绿色智造·采购革新专题.浙江顾家梅林家居有限公司;杭州国昇楼宇建筑工程有限公司; , 2025: 7-11.
- [3]康精彩.数字孪生技术在机电一体化智能装备全生命周期预测性维护中的创新实践[J].行车指南, 2024(5): 0078-0079.
- [4]刘方波.医疗系统设备全生命周期管理方案建设[C]//天津市电子学会.第三十七届中国(天津)2023'IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集.天津市北辰医院; 2023: 210-213.

## 注释:

①陕西煤业股份有限公司 - 陕西煤业股份有限公司官方网站 <https://www.shxcoal.com/innovations?id=7879>

②AI为煤炭企业“妙手诊脉”, 江苏企业参与的科技成果通过权威鉴定\_中国江苏网 [https://jsnews.jschina.com.cn/jsw/202505/t20250528\\_s68371801e4b0825be02729c0.shtm1](https://jsnews.jschina.com.cn/jsw/202505/t20250528_s68371801e4b0825be02729c0.shtm1)

作者简介: 张小勇, 1987年6月21日, 男, 陕西绥德, 汉族, 本科, 矿井维修电工/工程师, 研究方向: 煤矿机电。