

煤矿井下采掘设备柱塞泵与柱塞马达运维难点及管控技术研究

孙福龙

1.中国煤炭科工集团太原研究院 山西 太原 030006

2.山西天地煤机装备有限公司 山西 太原 030006

3.煤矿采掘机械装备国家工程实验室 山西 太原 030006

【摘要】：针对煤矿井下高粉尘、高湿度、重载冲击、介质污染恶劣工况，采掘设备柱塞泵、柱塞马达故障率高、运维成本高、停机时长久的行业痛点，依托井下综采、综掘工作面现场运行数据，系统梳理两类核心液压元件的故障分布、失效机理和运维瓶颈。重点剖析柱塞泵与柱塞马达的动力耦合匹配关系、故障联动特征，精准识别密封失效、配流磨损、气蚀泄漏、振动超差等核心运维难点。

【关键词】：柱塞泵-马达系统；井下恶劣工况；失效机理分析；状态监测与预警；开机率提升

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.054

1 研究背景与工程现状

煤矿井下环境影响柱塞泵、马达运行，井下工况加速摩擦副损伤，泵马达系统故障率 10%，环境介质故障占比超 82%，年均非计划停机 120~180h。现有检修多为事后处置，耦合故障联动易被忽视。失效机理与运维研究可减少故障，保障采掘作业，工程价值突出。

2 矿用柱塞泵与柱塞马达结构原理及井下工况特性

2.1 核心结构与工作原理

柱塞泵与柱塞马达为矿用高压容积式液压核心元件，核心构件包含缸体、柱塞组件、滑靴、回程盘、配流盘、变量斜盘、密封组件、控制阀等零部件（见图 1）。

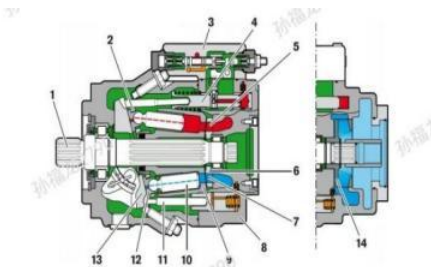


图2-2 A11VO系列柱塞泵的内部特点
1-主轴 2-回程盘 3-控制阀 4-控制活塞 5-高压腔 6-配油盘 7-低压腔
8-后端盖 9-缸体 10-柱塞体 11-控制顶杆 12-滑靴 13-变量斜盘 14-增压叶轮

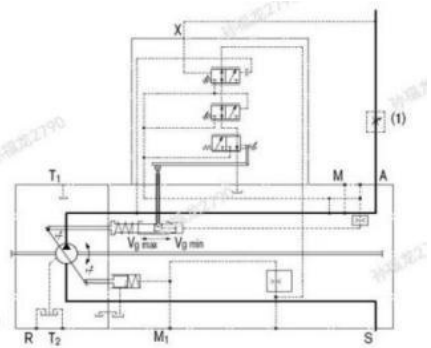


图 1 A11VO 系列柱塞泵内部结构图及柱塞泵工作原理

A11VO 柱塞泵主轴驱动缸体旋转，柱塞往复运动，依靠

斜盘变化容积，配合配流盘完成吸压油，将机械能转为液压能。负载敏感 LS 阀依据负载调整斜盘摆角改变排量，压差维持 1.4~2.5MPa（标准 1.8MPa），实现按需供油。

柱塞马达采用柱塞泵逆向工作原理，高压油通入柱塞腔推动柱塞，配合滑靴、斜盘产生扭矩驱动主轴转动，液压能转化为机械能。输入流量、压力的变化可分别调控设备转速与输出扭矩。

ZDY4000L 坑道钻机流量 92 L/min、压差 28 MPa，配备 160 mL/r 柱塞马达，额定扭矩 4000 N·m，转速 60~200 r/min，调速性能优于摆线马达。泵、马达形成动力耦合闭环，泵输出参数关联马达工作精度，摩擦副状态决定系统效率与使用寿命。

2.2 井下恶劣工况对泵-马达系统的影响机制

井下工况损耗液压元件，粉尘、湿气、交变载荷、油液污染均会破坏各类摩擦副、密封件与轴承。硬质粉尘产生磨粒磨损，高压切削摩擦副表层，磨损速率提升 45%以上。湿气入箱造成油液乳化，气泡溃灭产生气蚀点蚀。压力波动与潮湿条件加速密封老化泄漏。交变载荷引发轴承、回程机构疲劳损伤，增大设备振动幅度。

井下工况下元件磨损速率为标准工况的 2.1 倍，设备整体使用寿命缩短四成以上（见表 1）。

表 1 矿用柱塞马达与摆线马达核心性能参数对比

参数指标	轴向柱塞马达	摆线马达
排量/(mL·r ⁻¹)	160	480
额定转速/(r·min ⁻¹)	60	54
最大转速/(r·min ⁻¹)	198	121
额定扭矩/(N·m)	4000	4000
容积效率	0.93	0.84

注：同等额定扭矩条件下，轴向柱塞马达具备更高容积效率与转速调节区间，更适配井下重载交变钻进工况。

3 井下柱塞泵与柱塞马达故障统计及运维难点分析

3.1 现场故障数据统计分析

选取晋北某矿综采一队、综采二队，掘进三队；晋东某矿掘进一队共计 28 台采掘设备开展全年故障统计，包含坑道钻机、综掘机液压泵马达系统，统计结果如表 2。

表 2 井下柱塞泵-马达系统现场故障统计数据表

所属煤矿	作业 区队	设备 型号	统计 周期	统计 台数	故障 种类	故障 台次	故障 率 /%
晋北恒泰 煤矿	综采 一队	EBZ-2 00 综 掘机	12 个 月	8	配流 副、柱 塞副 磨损	7	87.5
晋北恒泰 煤矿	综采 一队	EBZ-2 00 综 掘机	12 个 月	8	动密 封泄 漏	3	37.5
晋北恒泰 煤矿	综采 二队	ZDY4 000L 坑道 钻机	12 个 月	6	气蚀 损伤	2	33.3
晋北恒泰 煤矿	掘进 三队	ZDY4 000L 坑道 钻机	12 个 月	6	轴承 疲劳 损坏	1	16.7
晋东盛达 煤矿	掘进 一队	EBZ-1 60 综 掘机	12 个 月	8	密封 老化 渗漏、 滑靴 磨损	6	75.0

3.2 核心运维难点及机理剖析

现场数据表明泵-马达系统存在显著故障联动效应。配流副磨损间隙与泵容积效率呈非线性负相关（见图 2），磨损临界间隙 0.015 mm，超过该阈值容积效率快速断崖式下降。

1. 马达理论输出转速：
$$n_{mt} = \frac{Q_p \cdot \eta_v}{V_m}$$

式中： n_{mt} - 马达理论转速，r/min； Q_p - 柱塞泵输出流量，L/min； η_v - 马达容积效率； V_m - 马达排量，mL/r。

2. 马达实际输出转速： $n_{ma} = n_{mt} \cdot (1 - \delta)$ 式中： n_{ma} - 马达实际转速； δ - 转速作业降低率。

3. 转速作业降低率：
$$\delta = \frac{n_{mt} - n_{ma}}{n_{mt}} \times 100$$

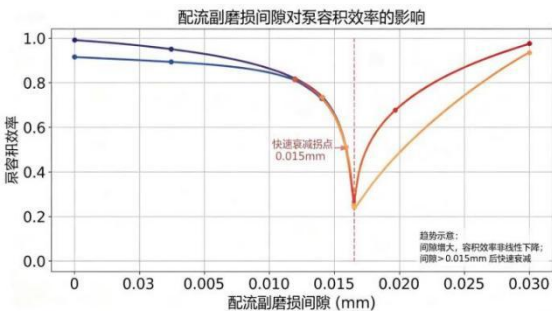


图 2 曲线图

配流副为柱塞泵核心精密摩擦副，对油液洁净度敏感度高。油液内含 2~20 μm 硬质颗粒冲刷磨损端面，致使配合间隙增大。煤矿高压重载工况会加剧泵内泄、降低容积效率，间隙超限后设备效率会快速下降。井下常规运维仅更换配件，无法解决工况耦合、油液污染等核心问题。现场统计泵马达系统故障复发率 42.3%，增加运维成本与非计划停机时长。

4 煤矿井下采掘设备柱塞泵与柱塞马达运维管控技术

4.1 井下液压油分级过滤与定期换油管控

井下油液污染诱发的泵-马达联动磨损问题，可通过分级过滤搭配动态换油的管控体系实现有效治理（见图 3）。摒弃单一固定换油周期运维方式，采用运行时长+油液理化指标双维度管控，滤芯、液压油更换判定标准见表 3。

表 3 滤芯、液压油更换判定管控标准

管控对象	运行时长触发 条件	油液检测指标触发条件	处置措施
吸油过滤器滤芯	累计运行 250h	堵塞报警压差 ≥ 0.08MPa	立即更换滤芯
压力管路过滤器滤芯	累计运行 300h	堵塞报警压差 ≥ 0.10MPa	立即更换滤芯
回油管路过滤器滤芯	累计运行 400h	堵塞报警压差 ≥ 0.12MPa	立即更换滤芯
系统液压油	累计运行 1000h	NAS 颗粒度 ≥ 9 级; 含水率 ≥ 0.3%; 运动粘度衰减 > 15%	整机全部更换液压油，同步更换全部滤芯

设备每 15 天抽检油液颗粒度、含水率、粘度核心参数，同步采集压力油路与回油路油液样本，规避单点采样带来的数据偏差。油液指标达到限定标准时，设备即刻停机，开展滤芯更换或换油作业。

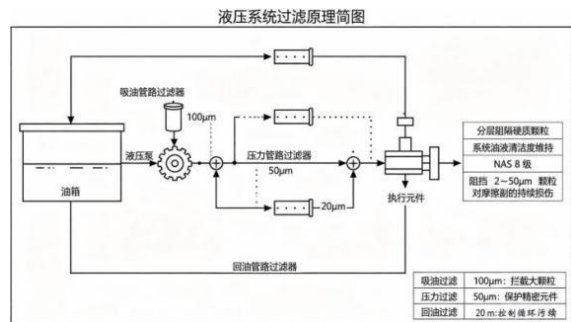


图 3 液压系统过滤原理简图

4.2 设备密封件针对性定期更换养护

柱塞泵与马达内部动密封装配精度要求严苛，井下环境难以洁净拆装，不得开盖更换内部高压动密封。内部密封失效后设备需升井进厂检修。井下仅可更换壳体、法兰外部静密封。

密封件优化选型：

（1）材质：主密封选用 FKM 氟橡胶，耐水汽、抗老化、抗压永久变形；低压辅助密封选用 HNBR 氢化丁腈橡胶。

(2) 结构：动密封采用斯特封+格莱圈组合；壳体静密封采用 O 型圈+密封垫复合结构；法兰增设防尘挡圈阻挡煤尘侵蚀。

运维策略：运维重点检查壳体、法兰外部密封，渗漏故障优先更换静密封，密封沟槽变形控制 $\leq 0.005\text{mm}$ 。现场应用后，密封渗漏故障下降 62.5%，阻断粉尘水汽侵入造成的设备磨损。

4.3 运行压力转速实时监测预警技术

针对配流副磨损与振动隐性耦合故障，基于原有传感器搭建压力、转速在线监测系统，每秒采集参数并以额定值为判定依据：转速低于额定 87%为性能衰减；压力脉动、泵出口压力波动超额定 6%，分别判定配流副劣化、摩擦副磨损。该技术可提前 7~10d 预判隐性故障，准确率 94.2%，可避免泵、马达协同损坏。

4.4 井下设备防尘防潮密闭防护管控

井下高粉尘、高湿度环境会持续侵蚀液压设备，适配工况特点可搭建全面的防尘防潮密闭防护体系。液压油箱、泵-马达舱体与管路接头采用氟橡胶密封垫搭配密封胶的双重密闭结构，设备缝隙粉尘侵入概率可控制在 5%以内。

对油箱原有呼吸装置进行专项改造，改进结构如图 4，图中标注：①防尘过滤层；②高分子透气防水膜；③排水积污腔；④外壳壳体。

改进工作原理：高分子 e-PTFE 透气防水膜只允许油箱内外空气压差交换，液态水、水雾、粉尘颗粒无法穿过薄膜；外部进入的少量凝露、煤尘颗粒沉降在下部积污腔，定期排污；既保留油箱呼吸通气功能，又阻断潮湿水汽、粉尘直接进入油箱油液。

改进先进性：

传统呼吸帽仅可阻隔大颗粒粉尘，无法防水汽。改进款采用高分子防水透气膜实现气液分离，有效防水防油乳化、避免元件气蚀；底部沉降腔便于排污、延长膜件寿命。其体积小巧，可直接替换原阀，无需改动油箱，适配井下改造。

设备运行防护落实常态化巡检机制，日常核查舱体密封状态与管路接头紧固情况，每周开展密封防护性能全面检测，及时更换老化失效的密封配件。

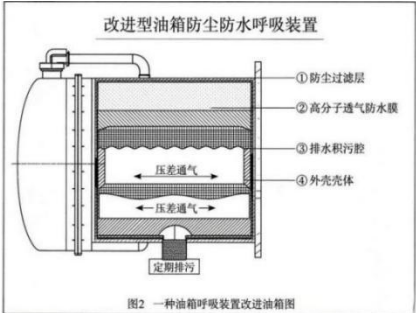


图 4 改进型油箱防尘防水呼吸装置

5 工程应用与效果验证

5.1 针对性运维管控技术实施

以 3 台 ZDY4000L 钻机、2 台 EBZ200 综掘机开展工业试验，摒弃被动维修，建立监测、预判、维保、溯源闭环运维模式。探明泵马达耦合失效机理，搭建工况维保闭环，增设联动检测、溯源油液污染、完善运维台账，根除故障复发隐患。

5.2 现场应用效果与运维效率提升分析

选取晋北恒泰煤矿综掘工作面开展工业试验，管控周期 6 个月，管控前后故障统计如表 4。

表 4 现场管控实施前后故障数据对比

煤矿名称	设备编号	设备类型	统计周期	管控前故障次数 (6 个月)	管控后故障次数 (6 个月)
晋北恒泰煤矿	1#	ZDY4000 L 坑道钻机	2025.03-2025.08	4	1
晋北恒泰煤矿	2#	ZDY4000 L 坑道钻机	2025.03-2025.08	3	0
晋北恒泰煤矿	3#	ZDY4000 L 坑道钻机	2025.03-2025.08	5	1
晋北恒泰煤矿	4#	EBZ-200 综掘机	2025.03-2025.08	6	2
晋北恒泰煤矿	5#	EBZ-200 综掘机	2025.03-2025.08	5	1

经过 6 个月现场工程应用验证，整套运维管控技术成效显著，各项指标均实现量化提升，管控前后设备运维及运行性能参数对比如表 5 所示。

表 5 运维管控技术实施前后系统性能指标对比

性能指标	管控前	管控后
系统故障率/%	10.0	3.1
故障复发率/%	42.3	8.7
月均非计划停机时长/h	15.2	4.8
设备开机率/%	87.2	95.6
柱塞马达满载容积效率	0.81~0.85	≥ 0.90
马达满载输出转速	达到额定转速 87%-97%	稳定维持额定转速 93% 以上
年均运维成本降幅/%	—	32.6

表 4、表 5 数据表明，成套运维管控技术应用成效突出，大幅优化泵-马达系统运维指标，有效抑制元件劣化、故障及停机问题，遏制效率衰减与成对失效，备件更换频次下降 57.8%，为井下装备长效运维、智能管控提供有力支撑。

6 结论

针对井下恶劣工况柱塞泵-马达耦合失效高发问题，本文阐

明介质污染、高湿、交变载荷协同劣化机理,明确核心故障与护一体化闭环运维体系。现场应用表明,该体系可有效降故障、联动损伤规律,构建滤油管控、密封养护、在线预警、油箱防减停机、提开机率,工程应用价值良好。

参考文献:

- [1] 施少良,左斌,高钰荣,等.柱塞液压马达振动特性及流体噪声研究[J].机械工程与自动化,2025,54(5):98-99+102.
- [2] 张伟超.液压系统中柱塞泵常见故障及维修探讨[J].中国设备工程,2025,(18):163-165.
- [3] 吴永源,黄惠,陈金兰,等.斜轴式柱塞马达振动和噪声特性试验分析[J].机床与液压,2024,52(22):143-148.
- [4] 孟祥俊.柱塞马达与摆线马达在坑道钻机中的应用[J].煤矿机电,2023,44(5):80-83.
- [5] 郭志敏,黄伟迪,崔凯,等.斜轴式柱塞马达轴承寿命影响因素分析[J].液压与气动,2023,47(5):1-7.