

新型耐磨铠装溜槽的工业测试与经济效益分析

许留关¹, 王 智¹, 张 彪¹, 高 腾¹, 任卫华², 米 超², 鲁 斌²

¹ 陕西新能选煤技术有限公司 陕西西安

² 山西汇永青峰选煤工程技术有限公司 山西朔州

【摘要】针对选煤厂转运溜槽在高速煤流冲刷和大块矸石冲击下磨损快、维修周期长及动火风险高等问题, 研发陶瓷—金属—橡胶梯度复合耐磨衬板与模块化铠装结构。测试结果表明: 复合衬板质量损失率 40.0 mg/h, 为原衬板的 1/6.13; 平均失效冲击次数 37 800 次, 为原衬板的 3.15 倍; 界面平均剪切强度 12.14 MPa, 表面粗糙度 Ra 平均 1.86 μm 。文家坡选煤厂累计完成 383.1 m²耐磨铠装施工, 单次维修时间缩短 75%, 高磨损工位停机检修频次降低 60%以上, 溜槽复合耐磨技术年净效益 30.15 万元。材料梯度复合与模块化快换协同可显著提升溜槽耐磨、抗冲击、本质安全与全生命周期经济性。

【关键词】耐磨铠装; 转运溜槽; 陶瓷—金属复合; 抗冲击; 模块化维修; 经济效益

【收稿日期】2026 年 3 月 5 日 **【出刊日期】**2026 年 8 月 24 日 **【DOI】**10.12208/j.ispm.20260017

Industrial test and economic benefit analysis of a new wear-resistant armored chute

Liuguan Xu¹, Zhi Wang¹, Biao Zhang¹, Teng Gao¹, Weihua Ren², Chao Mi², Bin Lu²

¹ Shaanxi Xinneng Coal Preparation Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi

² Shanxi Huiyong Qingfeng Coal Preparation Engineering Technology Co., Ltd., Shuozhou, Shanxi

【Abstract】 A ceramic-metal-rubber gradient composite liner and modular armored chute were developed to address rapid wear, long maintenance duration and hot-work risks of coal transfer chutes under high-velocity abrasion and gangue impact. Laboratory tests and industrial verification were conducted. The mass-loss rate of the composite liner was 40.0 mg/h, compared with 245.0 mg/h for the original liner, corresponding to a relative wear resistance of 6.13. The average failure impact number was 37,800 and the relative impact life was 3.15. The average interfacial shear strength was 12.14 MPa and the mean surface roughness Ra was 1.86 μm . A total of 383.1 m² of armored lining was installed in Wenjiapo Coal Preparation Plant. The maintenance time was reduced by 75%, the shutdown frequency caused by liner wear was reduced by more than 60% at high-wear positions, and the reported annual net benefit of the chute wear-resistance technology was 301,500 CNY. The combination of gradient composite materials and modular rapid replacement significantly improves wear resistance, impact resistance, maintenance safety and life-cycle economy.

【Keywords】 Wear-resistant armor; Transfer chute; Ceramic-metal composite; Impact resistance; Modular maintenance; Economic benefit

1 引言

转运溜槽是选煤、焦化、煤气化原料预处理及其他煤基固体物料系统中的关键连接设备, 其本身不消耗动力, 但其结构可靠性直接影响物料连续输送、设备作业率和检修安全。选煤厂原煤、矸石在落料和转向过程中具有粒径跨度大、硬质夹杂物多、

速度变化明显等特征, 溜槽内壁长期承受冲击、切削、犁削和低应力磨粒磨损。已有研究表明, 溜槽和提升容器衬板的主要损伤机制通常为冲击磨损与磨粒磨损耦合, 冲击速度、颗粒尺寸、冲击角和材料硬度均会显著影响磨损强度^[1-6]。

传统溜槽通常采用碳钢、高锰钢或单一耐磨钢衬

板。耐磨钢具有较好的承载能力和施工便利性,但在大块矸石高频冲击和长期滑移磨损条件下仍存在局部磨穿快、衬板更换频繁等问题。陶瓷材料硬度高,适合承担磨粒磨损,但其韧性和抗冲击能力有限;橡胶材料能够吸收冲击能量,却难以单独承担高强度磨粒磨损。先进陶瓷及其复合结构已成为煤炭生产与加工装备提高耐磨耐蚀性能的重要方向^[7-9]。因此,将高硬陶瓷、韧性金属和弹性缓冲材料进行功能分层,并进一步采用模块化连接方式,有望同时解决“耐磨—抗冲击—易维修”三类相互制约的工程问题。

另一方面,溜槽耐磨改造的工程价值不能仅用材料磨损率评价。对连续生产系统而言,衬板使用寿命、局部损坏后的停机时间、备件消耗、维修人数及受限空间动火风险共同决定全生命周期成本。已有选煤厂溜槽改造案例表明,合理的曲线导流、衬板选型及防堵结构可明显改善设备可靠性并产生

经济效益^[2-5]。基于此,本文依托文家坡选煤厂工程项目,研制陶瓷—金属—橡胶梯度复合耐磨衬板与模块化铠装溜槽,系统开展耐磨、抗冲击、界面结合和表面光洁度测试,并结合 383.1m²工业应用数据分析其运行可靠性、维修效率与经济效益。

2 磨损工况与新型耐磨铠装设计

2.1 溜槽分区磨损特征

现场溜槽的磨损具有明显空间非均匀性。落料区煤矸石以较大的法向速度冲击衬板,易产生局部压痕、坑蚀、疲劳剥落甚至脆性崩裂;弯道区同时存在较高法向冲击和切向滑移,属于冲击—磨粒复合磨损最为突出的区域;直段区物料运动趋于稳定,以持续滑移和低应力磨粒磨损为主。针对不同区域采用同一厚度和同一材料,容易造成落料区保护不足而直段区材料冗余。图 1 给出了典型分区磨损机理。

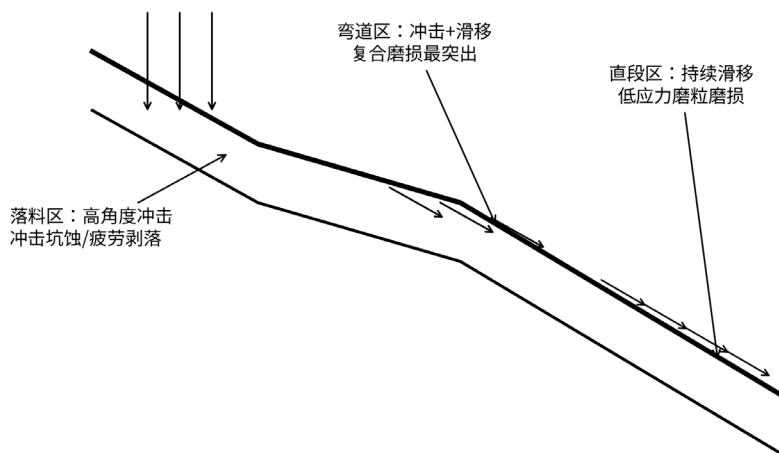


图 1 溜槽分区磨损机理及差异化铠装思路

基于上述差异,本研究将溜槽划分为落料区、弯道区和直段区等标准功能模块。落料区强调“高硬耐磨+弹性缓冲”,弯道区强调“耐磨+抗冲击+导流”,直段区强调“低摩擦+耐磨+快速更换”。通过将高损耗部位设计为可替换铠装单元,使衬板承担可控损耗而保护溜槽主体结构。

2.2 陶瓷—金属—橡胶梯度复合衬板

复合衬板的陶瓷层以 α -Al₂O₃ 为主要耐磨相,质量分数 65%, D50 约 0.8 μ m; 采用 7% 氧化锆晶须和 4% TiCN 纳米颗粒进行跨尺度增韧,并加入 CeO₂ 与 NiCr 合金粉。陶瓷预制体经 1550℃ 预烧和 1850℃ 真空烧结后加工为蜂窝结构,再将 Cr 质量

分数 28% 的高铬铸铁熔液在 8 MPa 压力下渗入蜂窝孔隙,形成约 50~80 μ m 扩散过渡层。该结构利用陶瓷层的高硬度承担主要磨粒磨损,以金属相和界面扩散层提高承载与抗裂能力。

缓冲层采用氢化丁腈橡胶 (HNBR), 加入纳米 SiO₂ 和碳纳米管进行改性。陶瓷表面经喷砂处理并施加 KH-550 硅烷偶联剂后,与 HNBR 层进行分段硫化,形成“高硬陶瓷—金属陶瓷过渡—弹性橡胶—结构基体”的梯度模量体系。项目制备工艺得到的界面剪切强度可达到 15~18 MPa,既保证耐磨层不易脱落,又利用橡胶层降低大块矸石冲击时陶瓷局部脆裂概率。结构与制备思路如图 2 所示。

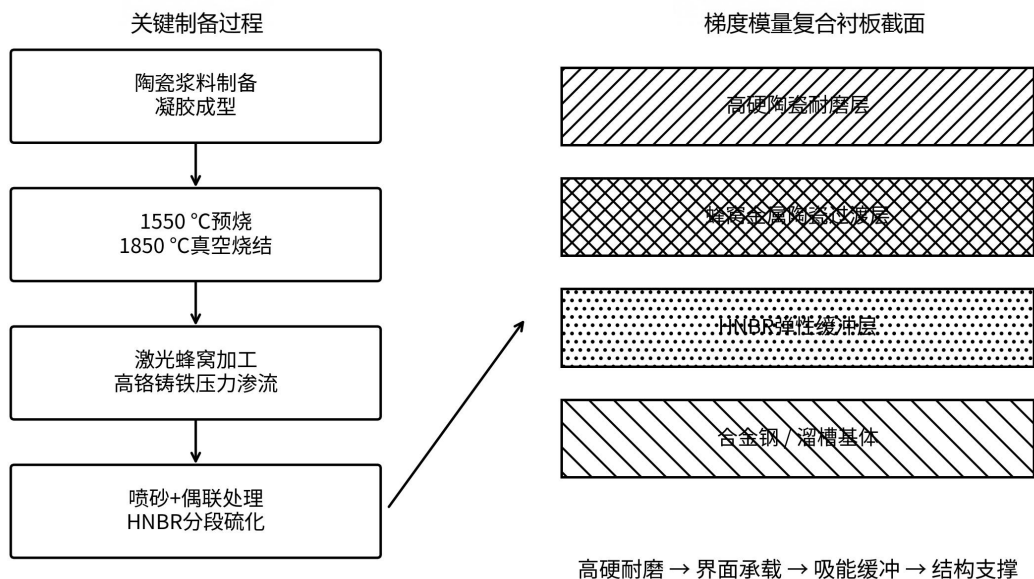


图2 陶瓷—金属—橡胶梯度复合衬板结构与制备示意

2.3 模块化铝装与无动火快速连接

在结构设计上, 将整体溜槽拆分为标准化分溜板单元, 每个单元布置耐磨衬板和侧向缓冲结构。相邻分溜板采用卡块—卡槽快速定位, 侧板通过插杆—插孔保持对齐, 底部调节螺杆实现初步固定, 外侧挡板与固定螺钉进一步锁紧; 部分衬板采用楔形自锁+弹性卡扣双重连接, 安装精度控制在 ± 0.1 mm。该结构使局部损坏后无需拆除整条溜槽, 可直

接抽出单个损坏单元。

在高冲击工位, 侧板外部设置限位弹簧、内部设置缓冲板。物料横向飞溅或偏载冲击时, 缓冲板后移并压缩弹簧, 将部分冲击动能转化为弹簧势能, 降低侧板瞬时峰值应力。项目现场曾记录大块矸石直接冲击侧板后缓冲板后移约 8 mm 并复位, 侧板未出现永久变形。模块化抗冲击耐磨溜槽结构如图 3 所示。

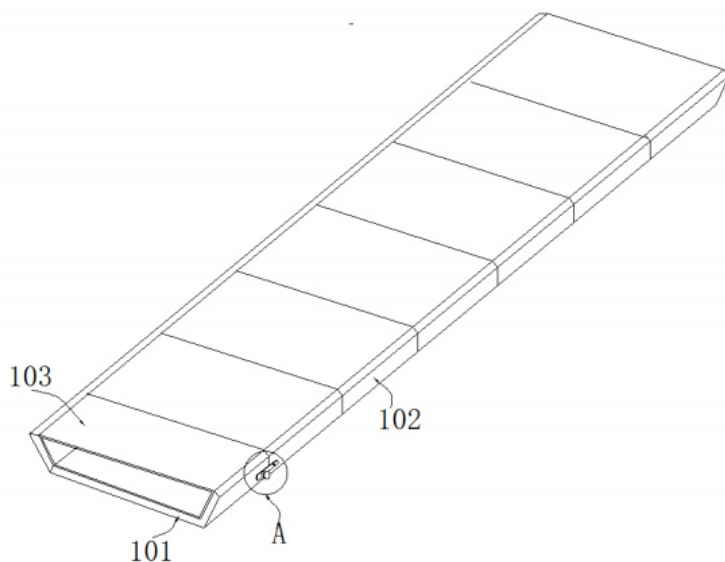


图3 模块化抗冲击耐磨溜槽结构示意图

101—分溜板; 102—侧板; 103—防溅板。

3 工业测试方案

3.1 材料性能检测

为评价新型复合衬板的耐磨、抗冲击、界面结合和表面光洁度,项目委托第三方检测机构开展对比试验。耐磨性采用煤矸石颗粒冲刷磨损试验,新型复合陶瓷衬板与原耐磨钢衬板在相同介质、速度、角度和时间条件下进行质量损失比较;抗冲击性采用落锤重复冲击,以出现长度≥5 mm 肉眼可见裂纹或破损作为失效判据;粘结强度采用拉伸剪切方法;表面粗糙度采用接触式轮廓仪测定,主要试验条件见表 1。

3.2 工业现场验证

工业验证以文家坡选煤厂为示范现场,在落料区、弯道区和直段区分区实施耐磨铝装,累计施工面积 383.1m²。现场评价重点包括:①衬板是否出现明显磨穿、碎裂、脱落和漏煤;②煤流通过是否顺畅,有无因衬板粗糙度或连接台阶导致的挂料、堵塞;③模块连接在长期振动和冲击下是否松动、错位;④局部损坏后的更换人数、维修时间和停机时长;⑤与传统衬板相比的更换周期和检修频次。新型耐磨铝装溜槽工业应用现场如图 4 所示。

表 1 复合耐磨衬板主要检测项目及条件

检测项目	试验方法	主要条件	样品数	评价指标
耐磨性	冲刷磨损	煤矸石 4.8 mm, 200 g/L; 12 m/s; 30°; 100 h	每组 3 块	质量损失率、相对耐磨倍数
抗冲击性	落锤重复冲击	5 kg; 1.5 m; 1 次/10 s	每组 3 块	失效冲击次数、相对寿命
粘结强度	拉伸剪切	Q235 基材; 室温固化 72 h; 10 mm/min	每组 5 件	平均剪切强度、破坏模式
表面光洁	接触式轮廓测	取样 0.8 mm; 评定 4.0 mm	每样 3 点	Ra

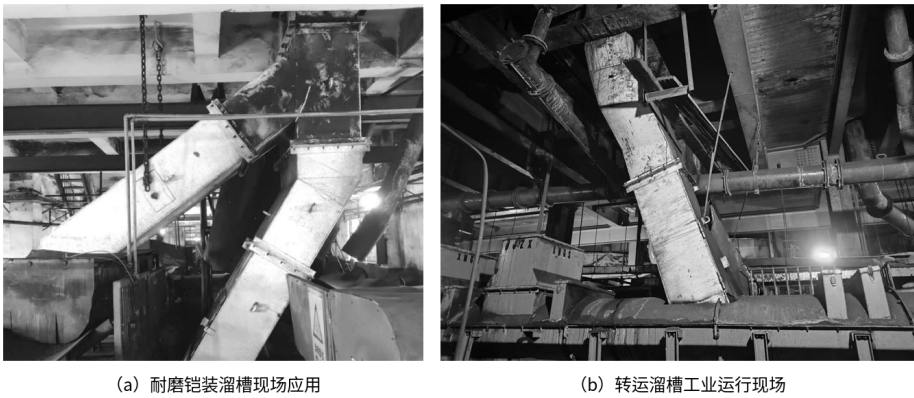


图 4 新型耐磨铝装溜槽工业应用现场

4 测试结果与分析

4.1 耐磨性能

冲刷磨损试验中,新型复合耐磨陶瓷质量损失率为 40.0 mg/h,原衬板为 245.0 mg/h。相对耐磨倍数按原衬板质量损失率与新型衬板质量损失率之比计算,即 $245.0/40.0=6.13$,达到“耐磨程度为原衬板 6 倍以上”的技术目标。换算为质量损失率降幅,新型衬板较原衬板降低约 83.7%。

耐磨性能提升主要来源于 3 个方面:一是高硬氧化铝陶瓷承担颗粒切削和犁削作用;二是蜂窝金属渗流结构提高陶瓷层的约束与承载,减少局部裂纹扩

展;三是弹性缓冲层降低大块物料冲击造成的瞬态接触应力,使“高硬度”不再以显著降低抗冲击能力为代价。该结果与文献中高硬陶瓷/复合材料在煤炭和矿物输送环境具有较高耐磨性的规律一致^[7-9]。

4.2 抗冲击与界面可靠性

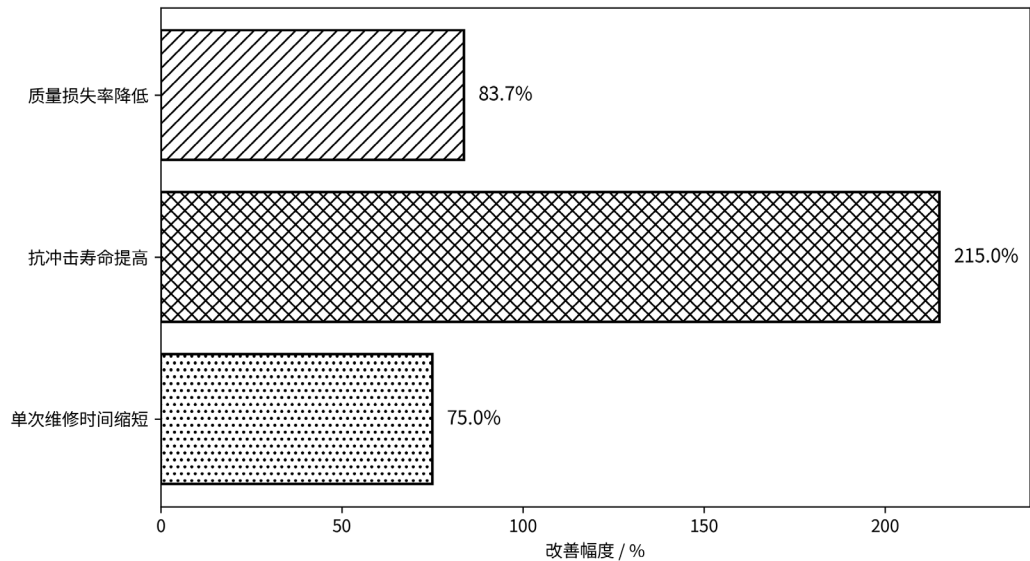
落锤冲击试验中,新型复合耐磨陶瓷平均失效冲击次数为 37 800 次,原衬板为 12 000 次,相对寿命倍数为 3.15。相对于原衬板,失效冲击次数提高 215%。这说明在高硬耐磨层之外,金属过渡层和 HNBR 缓冲层对延缓裂纹萌生和扩展具有明显作用。

拉伸剪切试验得到平均剪切强度 12.14 MPa, 所有试件破坏均发生在陶瓷本体而非胶粘层, 说明界面连接强度已不再是试件最薄弱环节。表面粗糙度 Ra 范围为 1.82~1.95 μm , 平均 1.86 μm , 低于项目

控制值 3.2 μm 。较低的表面粗糙度有利于降低物料滑移阻力, 减少局部积料对冲击角和磨损位置的二次改变。测试结果汇总见表 2, 关键指标改善情况如图 5 所示。

表 2 新型复合衬板与原衬板检测结果

指标	新型复合衬板	原衬板/要求	评价结果	结论
质量损失率/($\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$)	40.0	245.0	相对耐磨 6.13 倍	达标
平均失效冲击次数/次	37 800	12 000	相对寿命 3.15 倍	达标
平均剪切强度/MPa	12.14	≥ 12	陶瓷本体破坏	达标
表面粗糙度 Ra/ μm	1.86	≤ 3.2	1.82~1.95	达标



注：质量损失率和抗冲击寿命按检测结果计算；维修时间缩短值取项目工业应用考核结果。

图 5 新型耐磨铝装溜槽关键指标改善

5 工业应用效果

5.1 磨损与服役状态

工业现场运行表明, 耐磨铝装后的溜槽表面保持较好的光洁度, 煤流通过顺畅, 未出现因衬板凸起或连接结构造成的明显堵料。在含矸石量较高的连续处理工况下, 项目运行记录根据阶段性磨损状态预计, 高耐磨衬板服役周期可由传统衬板约 12 个月延长至 24~30 个月; 因衬板磨损引起的停机检修频次降低 60%以上。需要说明的是, 24~30 个月属于基于现阶段磨损趋势的工程寿命预测, 仍需通过更长周期现场跟踪进一步验证。

模块化抗冲击溜槽在高落差受料点运行 6 个月 后, 底部衬板仅出现轻微磨损纹路, 无磨穿; 侧向 缓冲板工作正常, 限位弹簧未发生塑性变形。另一

类高效耐磨溜槽在高湿、腐蚀性较强的原煤输送工 位运行 12 个月后, 氧化铝陶瓷衬里未出现明显脱落 或碎裂, 基体未发生明显锈蚀穿孔。上述现场结果 说明, 材料复合和结构缓冲的协同设计能够在不同 磨损工况下形成多层防护。

5.2 模块化维修与本质安全

项目综合考核结果显示, 楔形锁紧+弹性卡扣快 速连接使单次维修时间缩短 75%, 维修过程无需对 衬板进行焊接或钻孔。在模块化单节溜槽试验中, 局部损坏后单节更换约 15min, 而传统整体更换需 4h 以上; 在分溜板局部更换场景中, 单块衬板也可 在约 15min 内完成更换并恢复生产。

维修方式由“整体切割—吊装—焊接恢复”转 变为“定位解锁—局部抽换—机械锁紧”, 一方面

减少停机窗口, 另一方面取消了溜槽内部常规火电焊工序, 从而消除由该类动火检修本身带来的触电、一氧化碳中毒、火灾和爆炸风险源。对于煤气生产、焦化及煤气化原料煤输送系统等同样存在粉尘和受限空间风险的场景, 该无动火快换理念具有较强的迁移参考价值, 但具体应用仍需针对温度、腐蚀介质和防爆等级进行再校核。

6 经济效益分析

6.1 经济效益形成机制

耐磨铠装改造的经济收益主要来自 3 类: 备品备件消耗下降、维修人工下降和非计划停机损失减少。若以传统方案为基准, 年度净效益可表示为:

$$B_{\text{net}} = \Delta C_{\text{spare}} + \Delta C_{\text{labor}} + \Delta C_{\text{down}} - C_{\text{inc}}$$

式中: B_{net} 为年度净效益; ΔC_{spare} 为延长衬板寿命带来的备件节约; ΔC_{labor} 为维修次数和单次工时减少形成的人工节约; ΔC_{down} 为停机时

间缩短带来的生产损失减少; C_{inc} 为采用复合材料及模块化结构相对于传统方案增加的年化投资成本。项目总结报告依据实际应用进行了综合测算, 溜槽复合耐磨技术每年净效益为 30.15 万元。由于原始项目资料未进一步列出上述各分项成本的货币明细, 本文不对 30.15 万元进行反向拆分, 以避免人为分配造成的经济数据失真。

从可量化运行指标看, 经济效益具有明确的物理基础: 耐磨倍数达到 6.13, 可降低更换材料消耗; 高磨损工位预计使用周期由 12 个月延长至 24~30 个月, 可减少年度备件采购; 停机检修频次降低 60% 以上, 单次维修时间缩短 75%, 可同时减少检修人工与生产停机损失。因此, 30.15 万元年度净效益并非单一材料价格差形成, 而是“寿命延长—检修减少—停机缩短—安全作业简化”的综合结果, 耐磨铠装技术经济效益形成机制如图 6 所示。

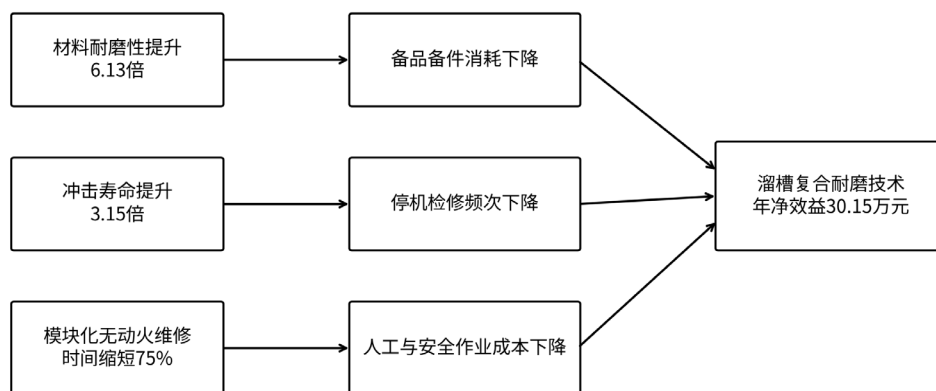


图 6 耐磨铠装技术经济效益形成机制

6.2 全生命周期经济性讨论

若仅比较首次采购单价, 陶瓷—金属—橡胶复合衬板通常高于普通钢衬板, 但转运溜槽属于典型的高维护成本设备, 评价时应采用全生命周期成本而非一次投资成本。对于连续生产系统, 衬板提前磨穿不仅产生材料费用, 还可能引起漏煤、堵塞、带式输送机停运及连锁停机, 因此维修窗口的价值常高于单件衬板本身。

本研究的工程数据表明, 材料耐磨性和结构可维护性存在显著协同: 如果仅提高材料硬度而仍采用整体焊接结构, 虽然更换周期延长, 但每次维护仍需较长停机; 如果仅采用模块化结构而材料寿命

不足, 则频繁更换仍会增加累计维护成本。梯度复合耐磨材料与模块化机械连接同时应用, 可同时降低“更换频率”和“单次更换代价”, 这是本技术获得全生命周期经济优势的主要原因。

7 讨论与推广边界

7.1 技术创新与现有研究的区别

现有溜槽研究主要集中于结构导流优化、DEM (Discrete Element Method) 磨损预测或单一衬板材料选择^[1-8]。本文的工程特点在于将材料和维护方式作为统一系统设计: 高硬陶瓷负责耐磨, 蜂窝金属层承担界面支撑, 橡胶层负责吸能缓冲; 同时通过标准化分区和机械快换连接实现局部维护。由此,

评价指标也从单纯磨损率扩展到抗冲击寿命、界面强度、表面光洁度、维修时间和年度净效益, 形成“材料性能—结构可靠性—运维效率—经济效益”的完整证据链。

从后续发展看, 数字化磨损监测值得与模块化铠装进一步结合。Ou 和 Chen^[7]已通过数字磨损传感器与 DEM 模型实现工业溜槽局部磨损的在线预测。对于本研究模块化衬板, 可在高磨损单元嵌入厚度或振动传感器, 根据实时剩余厚度安排按需更换, 从“定期检修”进一步转向“状态检修”, 有望继续减少非计划停机。

7.2 推广应用限制

本研究工业验证主要在选煤厂常温原煤/矸石转运条件下完成。对于焦化、煤制气或煤气化企业的原料煤转运系统, 冲击和磨粒磨损机理具有相似性, 因此具有工程借鉴意义; 但若存在高温焦炭、酸碱介质、焦油污染或更高防爆要求, 应重新评价 HNBR 缓冲层耐温、界面胶黏体系、金属基体耐腐蚀性及连接件防松性能, 不能直接套用现有参数。

此外, 当前经济效益资料给出了年度净效益总值, 但缺少备件、人工、停机损失和增量投资的完整分项账目; 部分 24~30 个月寿命数据属于阶段性趋势预测而非全寿命实测。后续应建立统一的磨损厚度数据库, 连续跟踪至少一个完整寿命周期, 并采用净现值或年等值成本方法对不同衬板方案进行对比, 以进一步提高经济评价的可复核性。

8 结论

(1) 针对传统转运溜槽耐磨与抗冲击性能难以兼顾的问题, 构建了陶瓷—金属—橡胶梯度复合耐磨体系, 通过高硬陶瓷耐磨、蜂窝金属过渡承载和 HNBR 弹性吸能实现多机制协同防护。

(2) 第三方检测结果显示, 新型复合衬板质量损失率为 40.0 mg/h, 较原衬板 245.0 mg/h 降低 83.7%, 相对耐磨倍数为 6.13; 平均失效冲击次数 37 800 次, 相对抗冲击寿命 3.15 倍; 平均剪切强度 12.14 MPa, Ra 平均值 1.86 μm , 满足项目技术要求。

(3) 在文家坡选煤厂累计完成 383.1 m²耐磨铠装施工。工业应用表明, 高磨损工位停机检修频次降低 60%以上, 项目综合口径单次维修时间缩短 75%, 模块化结构实现局部无动火快速更换, 提高了连续运行能力和检修本质安全水平。

(4) 项目总结报告测算溜槽复合耐磨技术年净

效益为 30.15 万元。其经济优势来自耐磨寿命提升、备件消耗下降、维修工时减少和停机损失降低的共同作用。后续应结合在线磨损监测和完整寿命周期数据, 进一步建立可复核的寿命预测与全生命周期成本评价模型。

参考文献

- [1] 马鹏飞. 选煤厂溜槽设计与改进[J]. 选煤技术, 2015, 43(1): 88-91.
- [2] 马鹏飞. 选煤厂溜槽耐磨衬板的选择[J]. 选煤技术, 2015, 43(4): 97-100.
- [3] 王德记, 李军. 青龙寺选煤厂原煤分级筛筛下溜槽的优化改造[J]. 选煤技术, 2021, 49(2).
- [4] 刘敏. 曲线溜槽在红柳洗煤厂的应用[J]. 选煤技术, 2024, 52(2).
- [5] 王鹏家, 周海霖. 带式输送机转载溜槽结构优化设计[J]. 煤矿机械, 2024, 45(11): 14-16.
- [6] YIN Z X, LI T Q, WANG N, et al. Experimental study on impact wear characteristics of the skip liner under different impact velocities and coal types[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2022, 14(6): 1-16.
- [7] OU T, CHEN W. On accurate prediction of transfer chute wear using a digital wear sensor and discrete element modelling[J]. Powder Technology, 2022, 407: 117680.
- [8] CHEN W, BISWAS S, ROBERTS A, et al. Abrasion wear resistance of wall lining materials in bins and chutes during iron ore mining[J]. International Journal of Mineral Processing, 2017, 167: 42-48.
- [9] MEDVEDOVSKI E. Advanced ceramics and coatings for wear and corrosion related applications in modern high-efficient coal production and processing: A technical review[J]. Ceramics International, 2024, 50(11B): 19447-19487.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS