

低油耗工况下露天煤矿卡车轮胎耐用性提升技术及成本节约效应分析

邢业华

国能准能集团黑岱沟露天煤矿 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：本文分析了低油耗工况对露天煤矿卡车轮胎耐用性的影响，并提出了轮胎材料改进、结构优化、使用与维护技术改进及车辆运行参数优化等系统性解决方案。通过黑岱沟露天煤矿的实际应用案例，验证了这些技术能有效提升轮胎耐用性，降低成本。详细分析了单项技术和综合技术应用的成本节约效应，并对长期经济效益、环境效益和行业技术发展进行展望，提出了加强技术研发合作、完善行业标准规范和强化人才培养等建议，为露天煤矿轮胎全生命周期管理提供理论支撑与实践参考。

关键词：低油耗工况；露天煤矿；卡车轮胎；耐用性提升；成本节约

引言：在露天煤矿的运营中，低油耗工况已成为节能增效的重要手段。该工况通过平稳的速度控制、合理的负载调节以及高效的动力输出，显著降低了燃油消耗。然而，这种工况对卡车轮胎的耐用性提出了新的挑战。传统轮胎在低应力、中温持续运行环境下，易出现磨损不均、橡胶老化加速等问题，导致使用寿命缩短与成本上升。因此，如何提升轮胎在低油耗工况下的耐用性，成为露天煤矿亟待解决的问题。

1 低油耗工况对露天煤矿卡车轮胎耐用性的影响

1.1 低油耗工况的特征

低油耗工况通过智能化管理与精细化操作实现节能运营，其核心特征体现在速度管控的平稳性、负载调节的合理性以及动力输出的高效性。车辆在行驶过程中，通过车载智能系统限制急加速、急减速操作，实现匀速行驶；采用动态称重系统严格控制超载，使实际载重稳定在额定荷载的合理区间；通过发动机工况优化算法，使卡车在不同路段自动匹配最佳转速，从而降低燃油消耗。

1.2 影响轮胎耐用性的因素分析

1.2.1 轮胎受力状态变化

低油耗工况下的匀速行驶模式，改变了轮胎的传统受力特征。在起步阶段，为降低油耗，发动机扭矩输出受到限制，轮胎所受纵向驱动力减小，但持续时间延长，形成“低载荷、长周期”的受力模式，容易引发胎面橡胶的疲劳磨损。在爬坡过程中，动力系统通过多档位切换维持匀速，导致轮胎侧向力出现高频小幅波动，使得胎肩部位产生不规则磨损，磨损分布呈现明显的不均衡性。

1.2.2 轮胎温度变化

温度是影响轮胎橡胶性能的关键因素。低油耗工况通过改变摩擦强度与散热条件，影响轮胎的热状态。匀速行驶时，轮胎与路面的滑动摩擦系数降低，单位时间发热量减少，但连续行驶时间的延长使累积热量增加，轮胎温度稳定在中温范围。这种持续的中高温环境，加速了橡胶的交联反应，使轮胎硬度增加，弹性模量下降。同时，低油耗策略下的低速下坡操作，减少了刹车片强制制动的使用，轮胎自然制动频率增加，胎侧温度升高，加剧了胎侧橡胶的老化^[1]。

1.2.3 路面接触条件

露天煤矿的路面状况较为复杂，由爆破后的碎石与黏性土构成，平整度较差。低油耗工况下的匀速行驶，使轮胎与路面的接触时间延长，单颗碎石对胎面的挤压作用从瞬时冲击变为持续压迫，增加了胎面花纹沟槽内嵌入碎石的概率。此外，负载稳定化使得轮胎接地压强分布更加集中，在凹凸路面形成局部高压区，加速了花纹块边缘的剪切磨损，导致轮胎因碎石切割等问题的早期报废率上升。

1.2.4 轮胎自身性能

传统矿山轮胎的设计主要针对高负荷、强冲击的工况，在低油耗环境下存在性能不匹配的问题。例如，胎面橡胶配方侧重抗撕裂性，但在持续中温环境下耐磨性不足；胎体结构采用较多层数的钢丝帘线增强，虽能满足超载需求，但在匀速低应力下柔韧性欠佳，容易产生疲劳裂纹。在低油耗工况下，传统轮胎的耐磨指数下降，使用寿命缩短。

2 低油耗工况下露天煤矿卡车轮胎耐用性提升技术

2.1 轮胎材料改进技术

针对低油耗工况的中温持续受力特征，新型轮胎材料采用了“高耐磨-低生热”的复合配方体系。在橡胶基质中掺入特定比例的聚丁苯橡胶与异戊二烯橡胶，通过分子链段优化，降低玻璃化温度，提高轮胎在中温区间的回弹率。同时，添加纳米碳酸钙作为补强剂，利用其“微裂纹桥接”效应，显著提升胎面的耐磨性。骨架材料采用“钢丝帘线-芳纶纤维”混杂结构，在保证轮胎抗冲击强度的同时，减轻了轮胎重量。实际试用数据显示，采用该材料体系的轮胎在低油耗工况下，行驶一定时间后，胎面剩余花纹深度明显优于传统轮胎。

2.2 轮胎结构优化技术

胎面花纹采用“宽基-浅沟”的仿生设计，增加花纹宽度，扩大接地面积，降低单位压力。同时，减小主花纹沟深度，并对沟底进行圆弧过渡，减少碎石嵌入概率。横向花纹采用特定倾斜角度，形成高效的排水通道，提升在泥泞路面的排水效率，避免打滑磨损。胎侧结构引入“波浪形”加强筋，通过应力分散效应，有效减少胎侧变形量。有限元分析表明，优化后的轮胎在侧向力作用下，最大应变值降低，能够有效抑制胎侧裂纹的产生。在实际矿区应用中，该结构轮胎的胎侧破损率显著下降。

2.3 轮胎使用与维护技术

智能胎压管理系统由无线传感模块、车载终端与充气装置组成，能够实时监测轮胎内部压力与温度。当胎压偏离标准值时，系统自动报警，并通过自动充气阀进行动态调节。系统还会定期采集数据，生成胎压变化曲线，为维护人员预判轮胎气密性状态提供依据。在轮胎换位方面，采用“对角线交叉”策略，并结合胎面打磨技术，定期对轮胎进行调试，提升轮胎整体磨损的均匀度。日常维护引入高压清洗与超声波探伤相结合的方式，有效清除花纹沟内的碎石，并对轮胎进行全面检测^[2]。通过建立轮胎全生命周期档案，利用大数据分析预测轮胎更换周期，提高预测准确率。

2.4 车辆运行参数优化技术

开发“速度-负载-坡度”动态匹配算法，基于矿区数字地图与实时称重数据，自动生成最优行驶速度曲线。根据不同坡度条件，合理控制车速，并在下坡路段启用动能回收系统，减少轮胎制动次数。该算法集成在车载终端，响应速度快，能够在复杂路况下实时调整。智能驾驶辅助系统包含毫米波雷达与惯性导航模块，具备前向碰撞预警、车道保持与自适应巡航等功能。通过精准控制车辆行驶状态，减少轮胎因人为操作导致的异常磨损。在实际矿场测试中，该系统有效降低了异常磨损情况。

3 低油耗工况下轮胎耐用性提升技术的成本节约效应分析

3.1 成本构成分析

露天煤矿卡车轮胎相关成本构成复杂且多样，主要由采购成本、更换成本、维护成本及残值回收四部分组成。采购成本在总成本里占据较大比例，单条矿山专用轮胎价格高昂，这主要源于其特殊的设计、材质及性能要求。更换成本涵盖多方面，人工费用、吊装设备租赁费用以及停机损失等都在其中。维护成本也不容忽视，胎压监测系统、清洗设备等投入及耗材费用都需计算在内。此外，废旧轮胎并非毫无价值，其具有一定的残值回收价值。据某矿场统计数据显示，年度轮胎总成本居高不下，平均单台车年支出也相当可观，这凸显了降低轮胎成本、提升成本节约效应的紧迫性。

3.2 单项技术的成本节约测算

3.2.1 轮胎材料改进技术

新型材料轮胎在采购成本方面，相较于传统产品有所增加。这是因为新型材料的研发、生产等环节成本较高。然而，从长远来看，其优势显著。新型材料使轮胎使用寿命大幅延长，综合计算下来，年采购成本反而降低。同时，由于新型材料提升了轮胎磨损的均匀性，使得轮胎在报废时整体状态更好，残值回收增加。这种采购成本的降低与残值回收的增加，共同作用实现了成本的节约，为露天煤矿卡车轮胎成本控制提供了新的有效途径。

3.2.2 轮胎结构优化技术

优化结构轮胎在采购成本上略有上升，这是由于结构优化需要更精细的设计和更复杂的生产工艺。但它在后续使用过程中展现出强大的成本节约能力。结构优化使轮胎使用寿命得以延长，减少了更换轮胎的频率。而且，胎侧破损减少，大大降低了维修费用。综合这些因素，整体成本节约效果十分明显。对于露天煤矿而言，采用轮胎结构优化技术，虽然前期采购成本稍高，但从长期运营角度，能够有效降低轮胎相关成本，提高经济效益。

3.2.3 轮胎使用与维护技术

智能胎压系统等使用与维护技术需要一定的初始投入，包括设备采购、安装调试等费用。但这些投入能够通过多方面得到补偿。智能胎压系统可以实时监测轮胎胎压，确保轮胎处于最佳工作状态，从而延长轮胎寿命，减少更换次数。同时，减少了因轮胎问题导致的维护人工成本。通过这些方面的综合作用，实现了净成本节约。对于露天煤矿卡车轮胎管理来说，引入智能胎压系统等使用与维护技术，是一种具有前瞻性和经济效益

的投资^[3]。

3.2.4 车辆运行参数优化技术

智能驾驶辅助系统的投入相对较大，包括设备采购、系统集成以及人员培训等方面的费用。但从综合收益来看，其效果显著。智能驾驶辅助系统能够优化车辆运行参数，使车辆行驶更加平稳、合理，从而延长轮胎寿命。而且，它还能降低燃油消耗，减少能源成本。综合轮胎寿命延长和燃油消耗降低带来的收益，远远超过了系统的年均分摊成本。因此，采用车辆运行参数优化技术，对于露天煤矿降低运营成本、提高整体经济效益具有重要意义。

3.3 综合技术应用的成本节约效应评估

当综合应用轮胎材料改进、结构优化、使用与维护以及车辆运行参数优化这四项技术后，露天煤矿卡车轮胎展现出显著的成本节约效应。从轮胎使用寿命来看，各项技术协同作用，使其大幅延长。以往频繁的轮胎更换情况得到极大改善，年更换次数显著降低，这不仅减少了更换轮胎所需的人工、设备租赁等更换成本，还降低了因停机更换轮胎而产生的运营损失。在成本计算方面，将采购成本、各项技术的年均分摊成本以及维护与残值收益等进行综合考量。虽然前期在新型材料轮胎采购、智能胎压系统及智能驾驶辅助系统等方面有一定投入，但轮胎使用寿命的延长使得年采购成本降低，同时维护成本减少、残值回收增加，综合下来实现了可观的总节约。

4 实际应用与长期效益分析

4.1 实际应用案例：黑岱沟露天煤矿

黑岱沟露天煤矿作为大型矿场，面临卡车轮胎消耗大的挑战。为解决此问题，矿场引入了多项技术措施。首先，采用新型“高耐磨-低生热”轮胎替换部分传统轮胎，并实施轮胎结构优化，如“宽基-浅沟”仿生设计和“波浪形”加强筋结构。此外，安装智能胎压管理系统，实时监测轮胎压力和温度，并引入“速度-负载-坡度”动态匹配算法和智能驾驶辅助系统优化车辆运行。这些措施效果显著，新型轮胎和结构优化轮胎的使用寿命明显延长，磨损均匀度提高，智能胎压管理系统减少了胎压异常导致的损坏，维护成本降低。据统计，实施后单台车年轮胎成本降低显著，同时燃油成本也有所下降。

4.2 长期效益展望

4.2.1 经济效益

长期看，随着技术成熟和应用扩大，成本节约将更可观。新型轮胎材料和智能系统的研发将进一步降低成本，提高性能。智能监测系统的精准预测能力将减少突发故障损失，车辆运行优化技术将使卡车运行更高效，

持续降低燃油和轮胎消耗^[4]。

4.2.2 环境效益

技术的应用对环保也具积极意义，燃油消耗降低减少温室气体排放，轮胎寿命延长减少废旧轮胎产生，减轻处理压力。智能驾驶系统提高行驶安全，减少交通事故，保护矿区生态环境。

4.2.3 行业技术推动

黑岱沟的成功实践为行业提供借鉴，促进轮胎制造企业和科研机构加大研发投入，推动智能监测和车辆控制技术发展，形成产业协同效应，推动露天煤矿运输系统高效、绿色、智能化发展。

4.3 行业发展建议

4.3.1 加强技术研发合作

露天煤矿企业应与轮胎制造、科研机构合作，共同研发新技术，加速技术应用。例如，联合开发新型轮胎材料，探索更优结构设计，提高智能监测系统准确性等。

4.3.2 完善行业标准规范

政府和行业协会应制定和完善相关标准规范，明确轮胎性能指标、测试方法、质量要求等，为技术选型和质量控制提供依据。规范智能监测系统和车辆运行优化设备的安装和使用标准，确保安全、可靠运行。

4.3.3 强化人才培养与引进

企业应重视人才培养和引进，建立高素质团队。加强员工培训，提高其新技术、新设备操作能力。引进轮胎技术、智能控制专家，推动企业技术创新和管理水平提升。

结束语

综上所述，低油耗工况下露天煤矿卡车轮胎耐用性提升技术的应用不仅有助于降低运营成本，提高经济效益，还对环境保护具有积极意义。随着技术的不断发展和完善，这些技术将在露天煤矿行业得到更广泛的应用和推广，同时，加强技术研发合作、完善行业标准规范和强化人才培养等措施也将为行业的可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]孙加强.卡车调度系统在露天煤矿的应用研究[J].中国科技期刊数据库工业A,2023(5):0060-0063
- [2]程平,李晓光,顾清华,江松.露天矿新能源纯电动卡车的智能调度优化及应用[J].金属矿山,2023(3):193-198
- [3]张耀文,肖虹.运输卡车制动系统在线监测技术现状与发展趋势[J].机械工程学报,2022,58(12):112-120.
- [4]朱振,高峰.基于物联网的矿用运输车辆制动系统智能监测方法[J].矿业安全与环保,2023,50(3):33-39.