

MT4400矿用卡车后悬挂挂耳拉筋强化改造创新

吴 铎 宋春东 李鹏飞 孙宏建 孙永超
国能北电胜利能源有限公司 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘 要：MT4400型220t电动轮自卸卡车为露天煤矿主力重载运输设备，后悬挂挂耳是核心承力节点，长期交变载荷作用下易疲劳开裂，传统补焊裂纹复发率超85%，整体更换总成本超80万元且停机损耗严重。本文依托ANSYS有限元仿真剖析开裂机理，创新双斜向拉筋强化方案，建立探伤、清裂、控温焊接、回火消应力及多级复检标准化工艺。经千小时重载实车验证，改造后未发生二次开裂，服役周期提升4倍，有效降低备件与停产成本，可为同类矿卡钢结构失效治理提供标准化技术借鉴。

关键词：MT4400矿用卡车；后悬挂挂耳；高强度低合金钢；拉筋强化；焊接修复；疲劳失效

引言：露天矿大型化开采促使MT4400型220t矿用自卸车广泛应用，其后悬挂挂耳承受多重复合载荷，是保障运输安全的关键结构。该部件服役4~6个月便易产生疲劳裂纹，极易引发重大安全事故。常规补焊修复复发率超85%，整体更换车架成本高、停机久、产能损失大。本文借助ANSYS有限元仿真探明失效诱因，研发分布式拉筋强化结构与成套改造工艺，经实测验证有效，为同类重载矿车构件延寿修复提供技术支撑^[1]。

1 创新背景与挂耳失效机理分析

1.1 工况特征与故障规律

MT4400 后悬挂采用双油缸刚性结构，单侧配套 2 个铸焊一体式高强度低合金钢挂耳，全熔透焊接固定于车架纵梁腹板、翼缘交接处，长期承受三重极端载荷：

重载静载荷：单挂耳额定承载超 200t，载荷全部集中于挂耳根部焊缝；

交变冲击载荷：装卸料冲击、路面颠簸、加减速转向产生周期性交变载荷，峰值冲击载荷达 600kN；

多向复合应力：油缸摆动带来拉伸、弯曲、剪切、扭转耦合应力，结构突变位置极易形成应力集中

故障统计显示，挂耳开裂故障占悬挂系统总故障 40% 以上，失效规律清晰：裂纹高发区与 ANSYS 仿真应力峰值区域完全重合，以焊趾微观缺陷为源头，在循环载荷下发展为贯穿疲劳裂纹；多次补焊会烧损母材、粗化晶粒，形成“开裂—补焊—应力加剧—再开裂”的恶性循环^[2]。

1.2 核心失效机理

结合仿真计算与现场故障拆解，挂耳开裂存在三大根本诱因：

1.2.1 结构先天应力集中缺陷

原挂耳为单悬臂结构，挂耳与车架连接截面突变、焊缝密集布置，ANSYS 静力学仿真显示根部焊缝等效应力远超材料疲劳极限，是裂纹萌生的核心区域，如下图一所示。

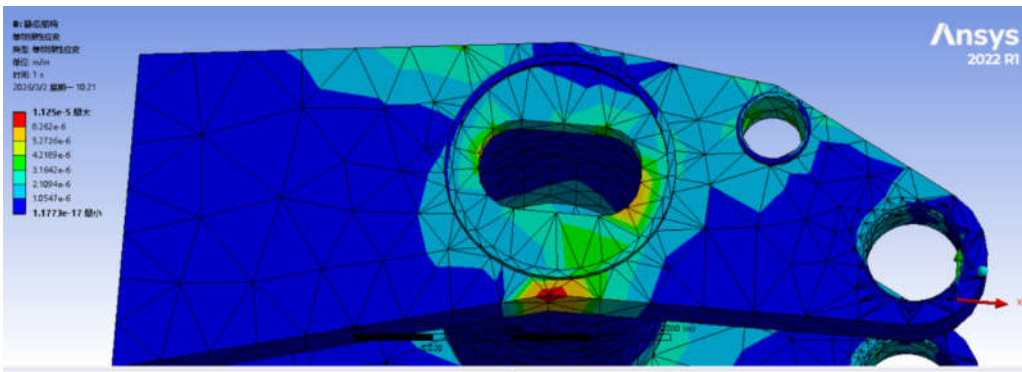


图1 改造前后悬挂应力集中示意图

1.2.2 交变载荷下的高周疲劳损伤累积

卡车辆行驶持续承受 0~100Hz 路面振动交变载荷，

即便工作载荷低于材料屈服强度，长期循环作用仍会持续累积疲劳损伤，加速裂纹源生成与扩张。

1.2.3 焊接残余应力与焊修次生损伤

焊接工序会产生残余应力与接头软化区，残余应力与工作应力叠加大幅降低构件疲劳极限；反复清根补焊进一步减薄母材、降低冲击韧性，持续恶化受力条件^[3]。

1.3 现有维修技术核心痛点

一是局部补焊治标不治本，仅消除表面裂纹，未优化整体受力分布，裂纹反复复发，多次焊修后母材彻底报废；二是车架总成更换经济性极差，挂耳与车架为一体化焊接结构，更换需整车拆解，备件采购成本超 80 万元、维修周期 15 天，停产损失巨大，且无法解决原始结构应力缺陷。

2 拉筋强化改造创新方案设计

2.1 方案设计核心原则

本方案深遵循设计原则，确保改造方案的科学性、可靠性与实用性：

基于ANSYS数值模拟的应力峰值区域与开裂高发区，精准设计拉筋结构，针对性补强薄弱环节，避免盲目加强导致的刚度突变；通过拉筋重构承力路径，将挂耳根部的集中载荷均匀分散至车架纵梁整体结构，大幅降低局部应力峰值。拉筋结构不改变挂耳原有安装尺寸、悬挂油缸配合间隙与整车性能参数。采用模块化分体设计，无需拆解车架与悬挂总成，可在矿山维修车间现场完成改造。

2.2 核心材料选型

2.2.1 拉筋基材选型

拉筋基材选用与车架一致的高强度低合金钢指标如下：

表1 拉筋基材选型表

材料性能参数	指标数值
密度	7.85g/cm ³
弹性模量	2×10 ¹¹ Pa
抗拉强度	3.8×10 ⁸ Pa
屈服强度	2.35×10 ⁸ Pa
硬度	235HV
焊接性	低碳当量，适配Mig/Mag气体保护焊、手工电弧焊工艺

2.2.2 焊接材料选型

气体保护焊：φ1.2mm 81Ni药芯焊丝，具备优异的抗裂性能与低温冲击韧性；

手工电弧焊：E7018-1低氢型焊条，使用前经350℃×1h烘干，100-150℃保温存放，取出后4小时内必须用完。

2.3 拉筋强化结构设计

针对单侧悬挂 2 个挂耳对称配置两组斜向主承力拉

筋，重构整体传力体系：拉筋上端与挂耳上部承载区全熔透焊接，避开原有裂纹高发区域，^[4]承接油缸集中载荷；下端沿车架纵梁斜向延伸，分别与车架上下翼缘板熔透焊接，将载荷均匀分散至车架腹板、翼缘整体结构，彻底解决根部焊缝载荷集中问题。主拉筋厚度取车架母材壁厚 2/3，宽度匹配挂耳安装面，长细比经稳定性校核，避免受压失稳。

2.4 基于ANSYS的结构强度仿真校核

采用 SolidWorks 建立 1:1 实体模型，简化次要螺栓孔、倒角；导入 ANSYS Workbench 分区域网格划分，焊缝、应力集中区加密网格。仿真边界条件：约束车架两端自由度，施加 220t 满载垂直载荷、油缸极限冲击载荷、转向侧向载荷，计算变形、等效应力、安全系数等指标。仿真对比结果：

变形控制：挂耳核心承载区总变形下降 48%，整体刚度提升 35%，交变形变幅度显著降低，延缓疲劳损伤累积；

应力优化：原根部焊缝应力峰值下降 58%，整体应力分布平缓，全部区域应力低于材料疲劳极限，从根源杜绝裂纹萌生条件；

疲劳性能：薄弱区应变能峰值降低 52%，大幅削弱裂纹扩张驱动力；

安全系数：拉筋端部、焊缝无新增应力集中，正常工况安全系数 ≥ 3，满足矿山特种设备安全规范。

3 现场施工标准化工艺流程

3.1 施工前准备

配齐二氧化碳气保焊机、碳弧气刨、红外测温仪、PT/UT 无损检测全套耗材，计量器具在校验有效期；作业区搭建防风保温棚，控制风速 ≤ 2m/s、环境温度 ≥ 10℃、湿度 ≤ 85%；严格执行矿山动火审批，悬挂机械锁止、液压卸荷，布置消防器材，作业人员持焊接、探伤特种作业证上岗。

3.2 基体检测与预处理

采用 PT 渗透检测 100% 扫查挂耳、焊缝、车架连接区域，标记裂纹位置与深度；碳弧气刨分段清除裂纹，单段长度 100~150mm，刨削深度不低于裂纹深度 1.5 倍，彻底剔除疲劳损伤层；角磨机打磨坡口及焊缝两侧 100mm 范围，去除氧化皮、锈蚀，露出均匀金属光泽，表面粗糙度 Ra ≤ 12.5μm；清根后二次 PT 探伤，确认无残余缺陷方可进入下道工序。

3.3 拉筋下料与预成型

数控切割加工拉筋，外形尺寸偏差 ≤ 1mm，切口无毛刺、变形；拉筋两侧 50mm 打磨露出金属本

色；依据车架外形预弯成型，保证拉筋与母材贴合同隙 $\leq 0.5\text{mm}$ ，禁止强制装配产生装配应力。

3.4 焊前预热

坡口及焊缝两侧 76mm 范围整体预热，氧乙炔中性焰对称加热，红外测温多点监控，温度稳定 $150\text{℃}\pm 10\text{℃}$ ，恒温保温 30min，预热完成 30min 内开展焊接，避免温度流失。

3.5 拉筋定位与焊接施工

采用对称点焊固定，复核安装尺寸与基准面。采用分段双向对称多层多道焊接法，单段焊缝为 100 ~ 150mm，从中间向两端交替焊接；双侧拉筋双人同步对称焊接，避免焊接应力叠加。焊接工艺参数见下表：

表2 焊接工艺参数表

焊接方法	焊层	电流 (A)	电压 (V)	焊速 (cm/min)	气体流量 (L/min)	备注
GMAW	打底层	180-200	22-24	12-15	15-18	二氧化碳气体保护焊
GMAW	填充层	220-240	24-26	18-20	18-20	二氧化碳气体保护焊
GMAW	盖面层	200-220	22-24	15-18	15-18	二氧化碳气体保护焊

每层焊完立即清渣打磨，清除夹渣、气孔；层间温度维持 150 ~ 250℃，最高不超过 500℃，防止母材晶粒粗化；出现未熔合、微裂纹时彻底清除缺陷后重新施焊。

3.6 焊后打磨整形

工件冷却至室温后打磨焊缝余高至 2 ~ 3mm，保证焊缝与母材平滑过渡；焊趾、拉筋端部精细打磨，打磨方向平行主应力，消除尖角，粗糙度 $Ra \leq 6.3\mu\text{m}$ ，降低局部应力集中。焊缝及两侧 100mm 区域均匀加热至 $200\text{℃}\pm 10\text{℃}$ ，保温 45min 释放焊接残余应力；保温棉完全包裹加热区域自然缓冷，冷却时长不少于 8h，严禁水冷、强制风冷，全程记录温度曲线。

3.7 无损检测与最终验收

外观检查焊缝成型均匀，不存在裂纹、气孔、夹渣等缺陷；焊缝及热影响区 100%PT 检测未见表面缺陷，全熔透焊缝 UT 检测达到 JB/T 4730.3-2015 I 级标准。超标缺陷补焊后再次热处理与探伤。复核孔位及配合间隙达标，归档施工资料；经空载及重载试运行，设备无异响、渗漏、跑偏，验收合格准予投用。

4 质量控制与管理要求

构建工序报验、检测验收、签字确认闭环管控体系，上道工序不合格不得流转，全部检测记录归档实现质量可追溯。严格管控作业人员资质，焊材与主材均需附带合格证明并按规范烘干储存。施工严控焊接顺序、

预热温度等关键工艺参数，工艺改动需审批。完工汇总全套技术档案，存档时长不低于设备全生命周期。

5 应用效果与经济效益分析

5.1 现场应用效果

本方案已在多台 MT4400 矿卡实施改造，效果良好。改造后挂耳连续运行超 1000 小时，无裂纹、开焊及变形问题，可靠性大幅提高。单台改造工期仅 3 天，相比总成更换缩短 80%、传统补焊停机时间缩短 70%；无故障服役周期提升 4 倍至 24 个月以上。施工未损伤车架母材，全程安全合规、零安全事故。

5.2 经济效益分析

落地应用后综合效益突出：改造后挂耳稳定运行超 1000 小时，焊缝与原开裂区域未出现裂纹、变形等问题，故障复发率显著下降；单台双侧挂耳改造仅需 3 天，相较总成更换工期缩短 80%，相比传统补焊停机时长缩减 70%；无故障服役周期由 4~6 个月延长至 24 个月以上，寿命提升 4 倍。改造全程无强制装配与过度焊修，规避车架母材二次损伤，全程安全生产零事故。

5.3 安全与环保效益

从根源上消除了挂耳开裂引发的悬挂油缸脱落、整车失控等重大安全隐患，大幅提升设备运行本质安全水平，降低矿山设备维修的安全压力。减少挂耳与车架备件的频繁更换，降低钢材消耗与新件制造碳排放，单台卡车年减少钢材消耗超 8t；同时减少重复焊接作业带来的废气、废渣，环保效益显著。

结束语

本创新首次将拉筋强化技术用于 MT4400 矿卡后悬挂挂耳治理，依托 ANSYS 数值模拟定位薄弱区域，重构承力体系分散载荷，根除应力集中与疲劳裂纹复发问题。建立仿真、预处理、焊接、热处理及验收全流程标准工艺，现场即可实施，无需拆解总成。方案效益突出，可适配 MT3700、MT5500 等多款矿卡，为重载设备部件运维提供范例，推广价值极高。

参考文献

[1]黄志宏.矿用170D自卸卡车后悬挂缸故障分析[J].露天采煤技术,1996,(1):20-21.
[2]廖朝能.MT4400矿用卡车机架轴承位修复工艺研究[J].露天采矿技术,2026,41(3):104-107.
[3]崔国梁.矿用自卸930E卡车救援拖车托架改造方案设计[J].露天采矿技术,2026,41(2):107-112.
[4]王琼杰.我国推动露天矿山无人驾驶规模化应用:截至去年底全国在运行无人驾驶矿卡突破4000台[N].中国矿业报,2026-05-07(001).