

830E 型矿用卡车扭力管覆板加强技术及应用

宋春东 李鹏飞 吴 铎 赵 宇

国能北电胜利能源有限公司 内蒙古 锡林郭勒 026000

摘 要：830E 型矿用自卸卡车是露天煤矿核心运输装备，扭力管作为其传动系统关键承力部件，长期在高冲击、高交变载荷工况下运行，覆板焊缝开裂、疲劳失效故障频发，传统补焊与总成更换存在复发率高、成本高、周期长的痛点。本文基于 ANSYS 数值模拟精准定位失效薄弱区，融合载荷分散设计理念，提出“弧形覆板+焊缝优化”的复合加强方案，制定“基体预处理-精准成型-低应力焊接-低温回火”的全流程标准化施工工艺。经现场应用验证，加强后扭力管应力峰值下降 45% 以上，故障发生率降低 90%，连续稳定运行超 1000 小时无二次开裂。该技术针对性强、实操性高，为同类矿用设备关键承力部件的延寿修复提供了技术支撑。

关键词：830E 型矿用卡车；扭力管覆板；Q690 钢；加强技术；疲劳失效

引言：露天煤矿开采的规模化发展推动矿用运输设备向大吨位、高负荷方向升级，小松 830E 型矿用卡车以其优异的承载能力成为国内露天矿煤炭运输与岩土剥离的核心装备。扭力管作为整车传动系统的核心部件，承担着动力传递、载荷分配与行驶稳定性保障的关键功能，其结构完整性直接决定设备运行安全与生产连续性。胜利露天煤矿多台 830E 卡车在服役过程中，扭力管母材及焊缝区域频繁出现疲劳开裂，占该车型传动系统故障总数的 35% 以上。传统现场补焊仅能临时消缺，裂纹复发率超 70%，形成“开裂-补焊-再开裂”的恶性循环；而扭力管总成更换单台成本超 20 万元，维修周期超 70 天，造成巨大的产能损失与资金占用。本文结合现场故障案例与数值模拟分析，系统开展扭力管失效机理研究、加强结构创新设计及标准化施工工艺制定，形成一套可推广的扭力管延寿技术体系^[1]，效果见图 1。

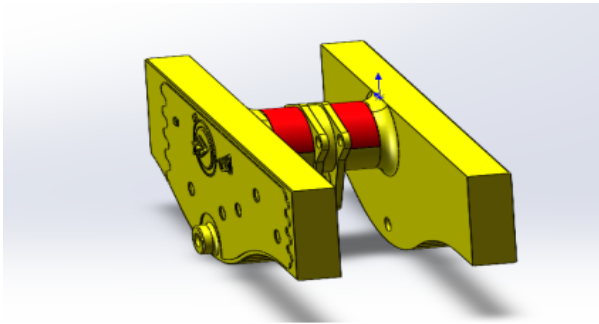


图 1：为中扭力梁结构

1 830 E 型矿用卡车扭力管结构与材料特性

1.1 结构组成

830E 矿用卡车扭力管采用空心圆管焊接结构，主要由管体、覆板及连接焊缝组成，覆板焊接于管体外侧关键受力区域，兼具防护与辅助承力双重作用。扭力管服役时需承受最高 800kN 的垂直冲击载荷、转向制动产生的水平扭矩及满载状态下的轴向压力，开裂高发区域集中在扭力管本体、盖板焊接接头及油箱安装支架连接区域。

1.2 材料性能

原扭力管覆板采用 Q345 低合金结构钢，改进后选用 Q690 高强度合金钢板，该材料屈服强度 $\geq 690\text{MPa}$ ，抗拉强度 $\geq 770\text{MPa}$ ，相较于 Q345 钢疲劳强度提升 40% 以上，具备良好的抗冲击性与焊接性能，但焊接过程中对残余应力控制要求严格，需配套低氢焊接与焊后消应力工艺^[2]。

2 扭力管覆板失效原因综合分析

2.1 结构先天应力集中缺陷

扭力管与盖板、支架连接区域存在截面突变，焊缝布置集中，形成显著的应力突变区。ANSYS 数值模拟表明，静载荷工况下上述区域等效应力峰值远超材料疲劳极限，是裂纹萌生的核心根源。

2.2 交变载荷下疲劳损伤累积

卡车行驶过程中，扭力管长期承受周期性交变载荷，尤其是频繁启停、转向过程中载荷方向与大小不断变化，即使载荷远小于材料屈服强度，也会造成高周

疲劳损伤持续累积，裂纹从焊缝热影响区快速扩展。

2.3 焊接残余应力与焊修次生损伤

焊接过程不可避免产生残余应力与接头软化区，常规补焊未及时开展应力消除处理，残余应力与工作应力叠加后加速裂纹扩展；多次清根补焊导致母材烧损减薄、晶粒粗大、韧性下降，进一步恶化结构受力状态。

2.4 腐蚀介质侵蚀

煤矿作业环境粉尘浓度超 $200\text{mg}/\text{m}^3$ ，煤尘、雨水及润滑油脂等腐蚀介质会侵蚀焊缝与母材表面，形成微观缺陷，成为裂纹萌生的初始位点^[3]。

3 扭力管覆板加强方案制定与实施

3.1 改造前准备

数值模拟分析：采用 SolidWorks 按 1:1 比例建立扭力管三维实体模型，导入 ANSYS Workbench 进行分区域网格划分，应力集中区采用 0.5mm 精细六面体网格，效果见图 2。

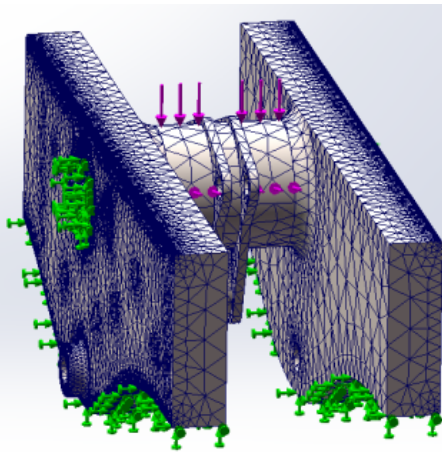


图 2：扭力梁网格图

图为扭力梁总成有限元网格模型，是扭力梁结构强度仿真的前置核心模型。本次仿真依托 SolidWorks Simulation 完成几何离散、约束与载荷施加，为后续静力学强度、扭转刚度校核提供数值计算载体。

模型中绿色标识为固定约束边界，施加于扭力梁安装支座底面与侧边装配面，模拟整车装配时悬架与车身的刚性连接状态，限制全部平动、转动自由度，还原实车工况下的固定支撑条件。紫色矢量箭头为外部载荷，分为竖直向下垂向载荷与水平侧向载荷，分别对应车辆行驶时的路面冲击载荷、转向侧倾带来的横向

作用力，载荷均匀施加于扭杆筒承载区域，复现极限扭转与承压复合工况。网格模型完整还原扭力梁焊接结构几何特征，约束与载荷贴合实车受力逻辑，可用于分析扭杆筒焊缝、连接板拐角处的应力分布，识别高应力危险区域，为扭力梁焊接工艺优化、板材厚度轻量化设计、结构补强方案提供数据支撑，是扭力梁结构可靠性分析不可或缺的数值模型基础^[4]。

基于上述网格模型开展系统性数值模拟分析：采用 SolidWorks 按 1:1 比例建立扭力管三维实体模型，导入 ANSYS Workbench 进行分区域网格划分，应力集中区采用 0.5mm 精细六面体网格。依托软件间模型无损转换功能，规避几何特征丢失、网格尺寸突变等计算缺陷，延续前文梯度化网格设计思路，对扭杆筒焊缝、板件转角等易失效部位加密细化，刚性平板区域适度放大单元尺寸，平衡计算精度与运算成本。完成网格校验后施加与实车匹配的约束、载荷边界条件，复现车辆行驶、转向、颠簸等复合受力工况，同步输出应力、变形、振动响应多维度计算结果。通过静态结构分析与谐响应分析，精准定位应力峰值区域，为加强结构设计提供理论依据。通过静态结构分析与谐响应分析，精准定位应力峰值区域，为加强结构设计提供理论依据^[5]，效果见图 3。

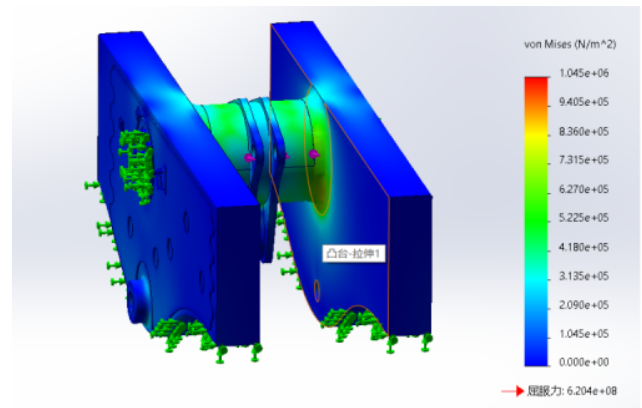


图 3：为扭力梁受力分析图

工器具与环境准备：配备二氧化碳气体保护焊机、碳弧气刨设备、红外测温枪及无损检测全套耗材；作业区域设置在车间内，控制环境风速 $\leq 2\text{m}/\text{s}$ 、温度 $\geq 10^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\leq 85\%$ ，严格执行矿山动火作业审批制度。

3.2 材料与设备选型

覆板材料：选用 Q690 高强度合金钢板，确保力学性能与母材匹配，避免刚度突变引发新的应力集中。

焊接材料：气体保护焊采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 药芯焊丝，手工电弧焊采用 E7018-1 低氢型焊条，焊条使用前经 $350^{\circ}\text{C}\times 1\text{h}$ 烘干，保温存放并在 4 小时内用完。

设备：选用松下 YD-350GR 逆变式气体保护焊机，采用氧乙炔进行预热，配备红外测温仪实时监测温度。

3.3 加强结构设计

基于靶向加强与载荷分散原则，设计“主加强覆板+端部渐变过渡覆板”的组合结构：

弧形覆板设计：将传统平板覆板改为与管体半径精准匹配的弧形结构，增大接触面积，优化载荷传递路径，抗变形能力提升 30% 以上。

主加强覆板：全覆盖扭力管开裂高发区，长度超出裂纹两端各 100mm，包覆角度 120° ，厚度为母材壁厚的 $1/2\sim 2/3$ 。

过渡覆板：主覆板两端设计梯形渐变过渡段，长度不小于覆板厚度的 5 倍，端部采用圆弧过渡，消除截面突变。

焊缝优化：将连续焊缝改为分段交错焊缝，焊脚尺寸从 8mm 提升至 12mm，焊缝处设置 R15mm 过渡圆角；覆板端部设置微型卸荷槽，阻断裂纹扩展路径^[6]。

3.4 现场施工关键步骤

基体检测与预处理：采用染料渗透检测（PT）精确定位裂纹，碳弧气刨分段清除裂纹至深度为裂纹深度的 1.5 倍以上，打磨坡口及两侧 100mm 范围至露出金属光泽，再次 PT 检测确认无残留裂纹。覆板下料与成型：采用氧乙炔自动切割机器人数控下料，尺寸偏差 $\leq 1\text{mm}$ ；数控卷板机进行弧形成型，弧形半径误差 $\leq \pm 2\text{mm}$ ，确保覆板与基体贴合间隙 $\leq 0.5\text{mm}$ 。焊前预热：对坡口及两侧各 $75\text{mm}\pm 5\text{mm}$ 区域均匀预热，温度控制在 $150^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，恒温 30 分钟后立即施焊。焊接施工：采用分段双向对称多层多道焊接法，从中间向两端交替焊接；严格控制焊接工艺参数，层间温度保持在 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，每道焊缝完成后及时清渣打磨。焊后打磨整形：打磨焊缝余高至 2-3mm，对焊趾处及覆板端部进行精细打磨，打磨方向与主应力方向平行，消除尖锐棱角与应力集中。

4 焊后热处理与质量检测

4.1 焊后热处理工艺

采用局部低温回火工艺消除焊接残余应力，加热范围为焊缝及两侧各 100mm 区域，加热温度控制在 $200^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ ，保温 90 分钟后用保温棉包裹自然缓冷至室温，缓冷时间不少于 2 小时，严禁采用水冷、强制风

冷等快速冷却方式。

4.2 改造后质量检测

外观检测：焊缝成型均匀，无裂纹、气孔、夹渣等缺陷，焊缝与母材平滑过渡，余高符合设计要求。

无损检测：对焊缝区域、热影响区及覆板端部进行 100%PT 检测，无表面线性缺陷；对全熔透焊缝进行超声波检测（UT），符合 JB/T4730.3-2015I 级合格标准。

残余应力检测：采用盲孔法检测，焊缝区残余应力峰值 $\leq$ 母材屈服强度的 30%。

试运转验收：装配完成后进行空载、重载试运转，扭力管运行平稳，无异响、无渗漏，各项参数符合设备出厂标准。

结束语

830E 型矿用卡车扭力管覆板开裂是结构设计缺陷、疲劳损伤累积、焊接残余应力及环境腐蚀等多因素共同作用的结果，其中应力集中与高周疲劳是核心诱因。采用“ANSYS 靶向设计+弧形复合覆板加强+低应力焊接+低温回火消应力”的技术路线，可有效重构承力体系，降低局部应力峰值，从根源上抑制疲劳裂纹萌生与扩展。

该技术无需拆解总成，可在矿山现场高效实施，改造后扭力管力学性能显著提升，全使用寿命延长至原结构的 2 倍以上，具有显著的经济效益、安全效益与环保效益，可推广至同系列其他车型及各类矿用重载设备关键承力部件的延寿修复与结构优化。

参考文献

- [1] 小松（中国）投资有限公司.830E 型矿用自卸卡车维修手册 [Z]. 上海：小松（中国）投资有限公司，2019.B2：4-9
- [2] 本手册为小松（中国）内部售后技术资料，资料来源：小松（中国投资有限公司）矿山设备事业部内部资料库，因企业保密规定无公开网络链接。
- [2] 王强，刘军.Q690 高强度钢焊接接头氢致裂纹敏感性研究 [J]. 焊接学报，2023,44(5):89-96+158.
- [3] 高磊.830E 卡车车架开裂原因分析及修复工艺 [J]. 露天采矿技术，2024,39(6):90-93.
- [4]NB/T47013.3-2015, 承压设备无损检测第 3 部分：超声检测 [S]. 北京：新华出版社，2015.45-51
- [5]GB50205-2020, 钢结构工程施工质量验收标准 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2020.32-45
- [6] 赵杰.830E-1AC 型矿用卡车前悬挂的预防维修技术 [J]. 设备管理与维修，2026(5):54-56.