

铁路无缝线路钢轨断裂原因分析与预防措施

魏志刚

国家能源集团新朔铁路大准铁路分公司 内蒙古 鄂尔多斯 010010

【摘要】：铁路无缝线路长期承受温度力、轮轨冲击和基础约束共同作用，钢轨断裂会直接破坏线路连续性和行车安全。本文分析无缝线路断轨运行特征、钢轨断裂成因分布、焊缝接头与温度力叠加情形，识别巡检探伤、维修组织和结构状态中的断裂诱发原因，提出钢轨断裂预防与防范措施，落实为强化探伤与处置、优化养护与锁温、提升状态监测预警三项专业动作。分析认为，焊缝缺陷、疲劳裂纹、轨温拉应力、轨道不平顺和腐蚀减薄应按同一桩号连续追踪，伤损分级、应力调整、打磨更换和复查放行共同构成断轨预防控制链。

【关键词】：铁路无缝线路；钢轨断裂；锁定轨温；探伤巡检；预防措施

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.029

引言

无缝线路取消了普通线路的大量钢轨接头，能够改善列车运行平顺性并降低接头冲击，但长钢轨被扣件、道床和桥隧结构连续约束后，温度变化、轮轨动力和局部缺陷会在较长范围内传递。钢轨一旦发生断裂，线路连续性被破坏，行车安全、运输秩序和现场抢修都会受到直接影响。断轨风险的复杂性在于裂纹往往先在焊缝、轨头核伤、轨底腐蚀或螺孔附近形成，早期尺寸小、信号弱，只有在低温拉应力、重载冲击或轨道不平顺叠加后才迅速扩展。因而，分析铁路无缝线路钢轨断裂原因，需要把材料、焊接、轨温、线路状态和作业管理放在同一链条中考察，并把预防措施落实到可复核的探伤、维修和应力控制动作。

1 铁路无缝线路钢轨断裂统计分析

1.1 无缝线路断轨总体运行特征

无缝线路断轨具有部位集中、季节敏感和病害叠加三类运行特征。焊缝接头、轨头踏面下方、轨腰过渡圆弧和轨底边缘是裂纹容易起裂的位置，其中焊缝热影响区同时承受组织不均匀、残余应力和轮轨冲击，低温季节又叠加纵向拉应力，断裂扩展速度会快于普通轨身^[1]。曲线、小半径、长大坡道、桥隧过渡和重载依托区的断轨风险更高，原因在于横向力、垂向冲击和基础刚度突变会改变轮轨接触斑位置，使既有微裂纹获得更大的应力幅。从运行表现看，断轨前常伴随探伤波形异常、鱼鳞伤密集、波磨加深、轨底锈蚀、扣件失效或轨距水平变化；若这些信号分别由不同班组记录而未被合并研判，单项记录可能只被视为普通病害，无法形成断轨风险预警。

1.2 钢轨断裂成因分布规律分析

钢轨断裂的成因可以分为缺陷源、应力源、结构源和管理源。缺陷源包括夹杂、焊接缺陷、轨头核伤、轨底腐蚀和表面剥离；应力源包括低温拉应力、轮轨交变荷载、制动冲击和残余拉应力；结构源包括道床空吊、扣件失效、轨道几何不平顺和曲线侧磨；管理源则体现在探伤周期、复核质量、维修窗口

和应力放散安排。各类因素单独存在时未必立即断轨，但在同一桩号附近叠加后，裂纹尖端的扩展条件会迅速恶化^[2]。其中焊缝缺陷和轨头核伤更多承担起裂作用，低温拉应力和轮轨冲击承担扩展作用，腐蚀减薄和扣件失效则降低结构剩余承载能力。断轨统计分析应把这些因素按部位、季节和线路条件交叉归类，才能判断哪一类病害已经从普通养护问题转化为行车安全风险。

2 铁路无缝线路典型断轨情形回顾与剖析

2.1 焊缝接头伤损诱发断轨情形

焊缝接头是无缝线路中的连续性薄弱点。闪光焊、气压焊或铝热焊接头在成形过程中经历快速加热和冷却，热影响区的组织、硬度和残余应力与母材存在差异。若焊缝存在夹渣、未焊合、晶粒粗大或打磨不平顺，列车依托时轮轨冲击会集中作用于接头附近，初始缺陷逐渐转化为轨头核伤、轨腰裂纹或轨底裂纹^[3]。部分裂纹位于轨头下颚或轨底三角区，外观难以发现，探伤波形又容易被焊筋、结构回波和耦合状态干扰。对这种情形，预防重点应放在焊缝编号管理、探伤复核、打磨质量记录和接头前后轨道几何复测上；同一焊缝若连续出现可疑回波、打磨后波形仍复现，或者处在曲线与低温拉应力叠加地段，应提高处置等级。

2.2 温度力叠加疲劳裂纹断轨情形

无缝线路的钢轨纵向温度力来自轨温相对锁定轨温的偏差。当实际轨温低于锁定轨温时，钢轨受拉；温差越大，拉应力越高，既有疲劳裂纹越容易张开。低温夜间、寒潮过程和桥隧口温度突变位置，裂纹扩展可能从稳定增长转为快速贯通。若轨道基础存在空吊、扣件松动或线路爬行，局部约束刚度变化还会造成附加应力集中。疲劳裂纹前期增长缓慢，后期接近临界尺寸后扩展速度突然提高；轨头滚动接触疲劳、轨底腐蚀坑、焊缝热影响区微缺陷都可能成为起裂点，轮轨交变荷载则持续推动裂纹尖端扩展。在桥梁伸缩区、隧道口和长大坡道等约束条件突变位置，钢轨纵向位移受限更明显，裂纹尖端承受

的拉开趋势也更稳定，断轨常表现为低温过程后的突然贯通。

3 铁路无缝线路钢轨断裂原因剖析

3.1 巡检探伤与现场作业偏差原因

巡检探伤偏差主要表现为周期覆盖不足、重点部位识别不准和疑似波形复核不彻底。探伤仪能够发现内部缺陷，但耦合状态、速度控制、探头角度和操作者判波经验都会影响结果^[4]。焊缝、道岔、曲线磨耗地段和轨底三角区的信号更复杂，若作业只追求进度，容易把异常回波误判为结构回波或非缺陷波形。现场作业偏差还包括打磨深度控制不准、伤损轨更换后前后顺坡不足、扣件复紧和轨距水平复测遗漏，探伤记录、维修记录和复查记录分散保存时，裂纹位置、作业时间和处置效果难以互相校验。

3.2 养护计划与维修组织失配原因

养护计划失配通常发生在病害增长速度快于维修窗口安排时。重载线路、繁忙干线和寒冷地区的钢轨伤损可能在较短时间内由轻伤发展为重伤，若计划仍按一般区段周期执行，风险会在等待维修期间积累。曲线波磨、轨底锈蚀和焊缝伤损具有空间聚集性，按平均里程分配维修资源容易低估重点区段^[5]。维修组织方面，工务、电务、调度和现场车间之间如果信息传递滞后，限速条件、材料准备、天窗计划和复核资料会出现错位，现场病害可能在临时加固状态下继续承受列车荷载。当同一病害在计划、材料和封锁窗口之间反复等待时，裂纹继续服役的时间被拉长，轻伤向重伤发展的过程也更难被及时截断。

3.3 轨温应力与结构状态异常叠加原因

锁定轨温是温度力管理核心参数。锁定轨温偏高对应低温条件下拉应力增大的原因链，锁定轨温偏低对应高温条件下压应力升高的原因链；断轨分析还应核对实际轨温、锁定轨温、应力放散历史和左右股差异。结构异常会放大温度力局部作用，道床脏污、翻浆冒泥、扣件弹条疲劳、轨枕空吊和桥隧过渡刚度突变，会使钢轨纵向和横向约束不均匀，形成局部附加拉压应力。温度力、残余应力和轮轨冲击共同作用时，裂纹尖端应力场呈集中状态，材料缺陷与线路系统状态失衡在同一位置叠加。纵向温度力在该原因链中承担应力方向判别作用。温度力合成量在低温拉应力和轮轨附加动力项同向增大时，表现为更高的裂纹张开条件。温度力合成量可按式（1）计算。

$$N_r = \sqrt{(EAc_T d_T)^2 + F_d^2} \quad (1)$$

式（1）中， N_r 为温度力合成量，单位为牛顿； E 为钢轨弹性模量，单位为帕； A 为钢轨截面面积，单位为平方米； c_T 为温度变形系数，单位为每摄氏度； d_T 为轨温相对锁定轨温偏差，单位为摄氏度； F_d 为轮轨附加动力项，单位为牛顿。该关系把温度偏差项和轮轨附加动力项合并为风险相关温度力合成量，低温拉应力与动力冲击同处高位时，裂纹区段的断轨

风险更集中。

4 钢轨断裂预防与防范措施

4.1 强化探伤与处置筑牢能力防线

断轨预防应先配置分层探伤和快速处置能力。焊缝接头、曲线外股、重载依托区、低温敏感地段和既有伤损复发点列为加密检测对象，探伤车、手工探伤和目视巡查形成互补；对可疑波形，在24小时内安排复探，必要时结合打磨观察、轨底检查和线路几何复测判断缺陷性质^[6]。处置能力的关键在于分级和时限，轻伤、重伤和折断风险区段分别对应限速、监护、更换和复查要求；低温来临前，对焊缝伤损和轨底腐蚀区段准备夹板、短轨、焊接材料和应急人员，使发现风险后的封锁、抢修和放行不依赖临时调配。断轨预防参数分档见表1。

表1 断轨预防参数分档表

控制对象	分档参数	复核周期(d)	预防指标	处置动作	记录口径
焊缝接头	重点区段	15	波形复现	复探、换轨	焊缝编号
低温轨温	低于-20℃	1	拉应力偏高	限速、复核	轨温记录
曲线半径	小于800m	30	侧磨波磨	打磨、复紧	曲线桩号
腐蚀潮湿区	轨底锈蚀	180	截面减薄	排水、防护	病害位置
重载通过区	轴重大	30	疲劳增长	探伤复核	通过总重
桥隧过渡段	刚度突变	30	空吊扣件弱化	捣固、垫板	过渡桩号

表1中，焊缝接头按15d复核，低温轨温按1d加密，曲线半径和重载通过区按30d复核，腐蚀潮湿区按180d复核；复核周期、预防指标和处置动作共同限定断轨预防的优先级。

4.2 优化养护与锁温完善管控执行

配置养护维修参数时，曲线钢轨根据侧磨、波磨和轮轨接触状态确定30日至60日的打磨观察周期，打磨量按轨头廓形恢复应控制在0.20mm至0.60mm区间，作业后复测轨距、水平和轨向；腐蚀潮湿区段在雨季前后各完成1次轨底检查，排水沟淤积深度达到5cm或扣件锈蚀连续出现时同步整治道床洁净度和扣件防护。锁定轨温管理贯穿施工、维修和运营全过程，应力放散、长轨更换、焊复和大机作业后，在50m至100m间距布设位移观测点，核对实际锁定轨温、左右股差异和线路爬行量；当轨温记录缺失、左右股差异超过3℃或冬季最低轨温接近-20℃时，优先安排应力复核和伤损轨更换窗口^[7]。维修分级还应关注裂纹尖端应力强度，伤损尺寸和等效拉应力同步升高时，更换优先级随之提高。当打磨后轨面波磨仍在下一复测周期复现，或者焊复区段的位移观测曲线继续偏离相邻区段时，维修计划应把同一区间的温度力复核、轨道几何复测和伤

损轨更换合并安排,减少重复封锁和病害反复暴露时间。裂纹尖端应力强度可按式(2)表征。

$$K_I = Y_s \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

式(2)中, K_I 为 I 型裂纹尖端应力强度因子, 单位为兆帕根米; Y 为几何修正系数, 单位为无量纲; s 为裂纹处等效拉应力, 单位为兆帕; a 为等效裂纹尺寸, 单位为米。该关系说明裂纹尺寸和等效拉应力共同控制扩展风险, 维修处置应同时降低应力幅并缩短伤损轨继续服役时间。

4.3 提升钢轨状态监测预警防护水平

状态监测预警应把探伤波形、轨温、轨道几何、通过总重、焊缝编号、打磨记录和伤损处置结果统一到区段台账中, 按桩号追踪病害。系统先按连续 2 个探伤周期可疑回波和 30 日内几何复测异常筛出复核对象, 再叠加 3°C 以上锁定轨温差、50m 至 100m 观测段位移异常和腐蚀扩展记录, 形成状态监测预警排序。结构防护按风险位置组合实施, 重点区段采用廓形优化打磨、扣件弹性恢复、道床整治、桥隧过渡加强、排水防腐和焊缝质量复核; 断轨相对风险指数达到 0.80 以上时列入立即复核, 0.50 至 0.80 列入计划复核, 低于 0.50 保持常规巡查, 现场仍以复探和线路状态检查确认处置级别。轨温偏差预警参数关系见图 1。

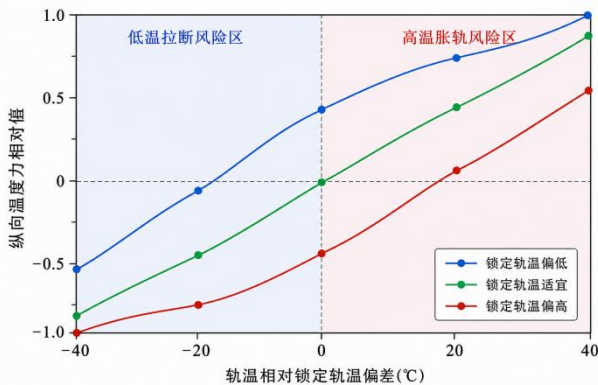


图 1 轨温偏差与断轨预警参数关系

参考文献:

- [1] 许鑫,胡杰,王玉婷,等.重载铁路用高强钢轨母材典型伤损原因分析及预防对策[J].高速铁路新材料,2026,5(3):59-64.
- [2] 许鑫,杨其全,唐俊杰,等.我国铁路钢轨母材典型伤损影响因素及预防对策[J].高速铁路新材料,2024,3(5):7-13.
- [3] 马玉麟.高速铁路钢轨斜裂纹伤损防治措施研究[J].铁道工务,2026,4(1):8-11.
- [4] 白志强.重载铁路钢轨疲劳损伤治理及预防研究[J].能源科技,2025,23(3):75-80.
- [5] 吴潇.铣磨与打磨相结合的重载铁路钢轨综合维修方案研究(下)[J].铁道技术监督,2024,52(12):58-61.
- [6] 吴潇.铣磨与打磨相结合的重载铁路钢轨综合维修方案研究(上)[J].铁道技术监督,2024,52(11):31-35.
- [7] 刘平.重载铁路钢轨伤损分析及改善措施研究[J].高速铁路新材料,2023,2(5):49-53.

图 1 中, 轨温偏差相对量由负值转为正值时, 纵向温度力相对值同步改变方向; 锁定轨温偏高曲线在低温端更接近拉断风险区, 锁定轨温偏低曲线在高温端更接近胀轨风险区。该关系为状态监测预警提供参数排序依据。

图 1 已经把轨温相对锁定轨温偏差、纵向温度力相对值和三类锁定轨温状态放在同一坐标中比较, 并显示低温拉断风险区与高温胀轨风险区的方向差异。4.3 的预警排序还需把探伤裂纹、线路纵向力和材料初度边界合并为一个无量纲量, 避免只凭单项波形或单日轨温判断。断轨相对风险可按式(3)分项评价。

$$R_f = \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_C}\right)^2 + \left(\frac{N_r}{N_L}\right)^2} \quad (3)$$

式(3)中, R_f 为断轨相对风险指数, 单位为无量纲; K_I 为 I 型裂纹尖端应力强度因子, 单位为兆帕根米; K_C 为钢轨材料初度边界, 单位为兆帕根米; N_r 为温度力合成量, 单位为牛顿; N_L 为线路纵向力边界, 单位为牛顿。该关系把裂纹强度比和纵向力比合成为断轨相对风险指数, 任一分项接近控制边界时, 状态监测预警应转入复核、限速或更换程序。

5 结语

铁路无缝线路钢轨断裂的直接表现是钢轨连续性破坏, 深层原因则来自缺陷源、温度力、轮轨冲击、结构状态和养护组织之间的叠加。焊缝接头、疲劳裂纹、轨底腐蚀和曲线不平顺提供起裂与扩展条件, 锁定轨温偏差和低温拉应力进一步降低既有裂纹的承载余量。预防措施应围绕探伤巡检、锁定轨温管理、预防性打磨、腐蚀防护、伤损分级和复查放行展开, 形成以桩号、焊缝编号、轨温记录和处置结果为核心的连续台账。只有把材料缺陷识别、线路状态复测和维修组织执行纳入同一控制链, 才能在断轨发生前压缩裂纹快速扩展的时间窗口。