

# 重载铁路钢轨接头伤损分析及维修探讨

高星飞

国能朔黄铁路公司肃宁分公司 河北 沧州 062350

**摘要:** 重载铁路钢轨接头因承受巨大冲击力, 易产生核伤、螺孔裂纹、马鞍形磨耗等伤损, 严重威胁行车安全。成因涉及材质缺陷、运营条件、养护不当等。维修策略包括采用高强度夹板、胶接绝缘接头技术强化接头; 实施预防性打磨与修复性打磨; 加强道床与轨枕维护; 利用智能化检测技术提升探伤精度, 构建大数据与AI融合的维修管理系统, 实现精准维修。

**关键词:** 重载铁路; 钢轨接头伤损; 维修

引言: 重载铁路作为国家运输大动脉, 在经济发展中发挥着关键作用。其钢轨接头作为线路的薄弱环节, 长期承受重载列车的巨大冲击力与交变应力, 伤损问题频发, 如核伤、接头部位裂纹等, 严重影响行车安全与运输效率。深入剖析伤损类型、成因, 并探索科学有效的维修技术与策略, 对于提升重载铁路运营稳定性、保障运输安全, 具有至关重要的现实意义。

## 1 重载铁路钢轨接头伤损类型与特征

### 1.1 伤损分类

(1) 核伤: 作为轨头关键伤损类型, 主要表现为横向裂纹, 进一步可分为白核与黑核两类。其形成根源多为钢轨材质本身存在缺陷, 如内部夹杂、偏析等, 或在长期重载列车运行过程中, 轨头与车轮接触区域反复承受交变应力, 引发接触疲劳, 导致裂纹不断扩展, 最终形成核伤。(2) 接头部位伤损: 该类伤损集中于钢轨接头区域, 常见类型包括螺孔裂纹、下颏裂纹、马鞍形磨耗等。此类伤损的产生与接头部位承受的巨大冲击力直接相关, 重载列车通过接头时, 由于轨缝存在及接头结构特性, 会产生瞬时冲击载荷, 长期作用下易引发各类接头部位伤损。(3) 纵向裂纹: 主要出现在轨腰或轨底位置, 裂纹走向分为水平方向与垂直方向。其成因多为钢轨制造过程中产生的缺陷, 如轧制裂纹、分层等, 或在运营期间, 由于线路养护不当、列车偏载运行等情况, 导致轨腰或轨底局部应力集中, 进而产生纵向裂纹<sup>[1]</sup>。(4) 焊接接头缺陷: 在钢轨焊接过程中, 易出现未焊透、气孔、夹渣等缺陷。未焊透会导致焊接接头局部强度不足, 气孔和夹渣会破坏焊接接头的整体连续性, 降低接头的承载能力, 在重载列车反复作用下, 易引发焊接接头失效。(5) 其他伤损: 除上述主要类型外, 还包括轨头剥落掉块、轨底锈蚀等伤损。轨头剥落掉块多因接触疲劳导致表层金属脱落, 轨底锈蚀则与环境因素相关, 如潮湿、腐

蚀性介质等, 会削弱钢轨截面强度, 影响使用寿命。

### 1.2 典型伤损特征

(1) 核伤: 从断面观察, 白核呈现平坦光亮的特征, 黑核则因氧化作用表现为发黑状态。核伤具有较强的隐蔽性, 初期不易发现, 一旦发展到一定程度, 极易在列车载荷作用下引发钢轨折断, 对行车安全构成严重威胁。(2) 螺孔裂纹: 该类裂纹多发生在钢轨接头的第一螺孔位置, 裂纹走向多与钢轨纵向呈一定角度。其产生与钻孔工艺密切相关, 若钻孔时产生应力集中或毛刺未清除, 易诱发裂纹; 同时, 线路养护不良, 如低接头、轨缝过大等情况, 会加剧螺孔周边的应力集中, 加速裂纹扩展。(3) 马鞍形磨耗: 轨头表面呈现中间凹陷、两侧凸起的“马鞍”状形态。这种磨耗主要是由于钢轨淬火层与母材硬度存在差异, 在车轮反复冲击和滚动作用下, 硬度较低的轨头中间部位磨损速度快于两侧, 最终形成马鞍形磨耗, 会改变车轮与钢轨的接触关系, 影响行车平稳性。(4) 焊接接头缺陷: 未焊透的焊接接头在外观上可能表现为焊缝高度不足, 内部存在未熔合区域; 气孔多以圆形或椭圆形的孔洞形式存在于焊缝内部或表面; 夹渣则表现为焊缝中夹杂的非金属杂质, 这些缺陷通过无损检测手段(如超声波检测)可清晰识别, 且会显著降低焊接接头的力学性能。(5) 轨头剥落掉块: 伤损部位表现为轨头表面金属呈片状或块状剥落, 剥落区域多伴随一定的氧化痕迹, 且周边常存在疲劳裂纹。该伤损会导致轨头表面不平整, 增加车轮与钢轨的冲击振动, 进一步加剧钢轨损伤。

## 2 重载铁路钢轨接头伤损成因分析

### 2.1 材质与制造缺陷

(1) 在钢轨生产环节, 若钢锭内部存在的白点、气泡、非金属夹杂物等原始缺陷未被彻底切除, 会在钢轨内部形成应力集中源。随着重载列车长期运行, 这些缺

陷周边会不断积累疲劳应力,逐步诱发裂纹并向纵深扩展,最终成为核伤萌生的核心诱因,且此类由材质缺陷引发的核伤,初期隐蔽性强,后期发展速度快。(2)焊接工艺不良是导致焊接接头性能劣化的关键因素。例如铝热焊过程中,若预热温度不足、焊剂配比不当或冷却速度过快,易出现未焊透问题,使接头处存在明显的力学薄弱面;闪光焊时,若焊接电流不稳定、顶锻压力不足,可能产生灰斑缺陷,该缺陷会显著降低接头的抗拉强度与韧性,在重载载荷反复作用下,极易引发焊接接头开裂。

## 2.2 运营条件影响

(1)当前重载铁路普遍采用大轴重、高密度的运输模式,轮轨接触应力远超普通铁路。过大的接触应力会使轨头表面金属反复承受挤压、摩擦作用,加速轨头剥离、擦伤等表层伤损出现,同时也会促使轨头内部已有的微小裂纹快速扩展,进一步加剧核伤的形成与发展,缩短钢轨使用寿命<sup>[2]</sup>。(2)曲线地段列车运行时,受离心力作用,车轮轮缘会对钢轨内侧产生较大挤压力,导致轨道出现偏载现象。这不仅会造成钢轨侧磨严重,还会使轮缘反复挤压轨颍部位,在该区域产生大量微裂纹。这些微裂纹若未及时处理,会逐渐发展为核伤或下颍裂纹,对钢轨结构安全构成严重威胁。(3)列车制动与启动瞬间,车轮与钢轨间会产生剧烈的滑动摩擦,摩擦过程中产生的大量热量会导致轨面局部温度急剧升高,使轨面材料的金相组织发生改变,硬度与强度下降,材料性能退化。这种性能退化会使轨面更易出现磨损、剥落等伤损,同时也为其他类型伤损的萌生创造了条件。

## 2.3 养护维修不当

(1)接头部位的养护维修对钢轨安全运行至关重要。若道床板结未及清理,会导致道床弹性下降,无法有效缓冲列车冲击;低接头未及整治,会使列车通过时接头处产生更大的冲击载荷;轨缝过大则会加剧车轮对钢轨接头的撞击。这些养护缺失问题都会显著增加接头部位的冲击力,加速接头伤损的产生与发展。(2)轨面打磨是预防钢轨伤损的重要措施。若轨面出现肥边、波浪磨耗时未及时进行打磨处理,会导致轮轨接触状态恶化,列车运行时轮轨间的动力作用显著加剧。过大的动力作用会使钢轨承受更大的交变应力,不仅会加速已有伤损的扩展,还会诱发新的伤损。(3)钢轨焊补过程中,若焊补工艺存在缺陷,如焊补层与母材熔合不良、焊补后未将焊补层打磨平整,或焊补过程中引入微裂纹,这些问题会使焊补部位成为新的应力集中点。在重载列车反复载荷作用下,焊补部位的微裂纹会快速扩展,成为核伤的

起源点,引发新的核伤,严重影响钢轨的使用安全。

## 3 重载铁路钢轨接头维修技术与策略

### 3.1 预防性维修技术

#### 3.1.1 接头强化措施

(1)针对重载铁路接头刚度不足、易受冲击的问题,采用高强度夹板(如上弯夹板)进行强化处理。上弯夹板通过特殊的弧形设计,能有效分散列车通过时接头处的集中载荷,提升接头整体刚度,减少夹板与钢轨的相对变形,降低因刚度差异引发的冲击损伤,延长接头使用寿命。在安装过程中,需严格控制夹板螺栓的拧紧力矩,确保夹板与钢轨紧密贴合,避免因螺栓松动导致强化效果减弱<sup>[3]</sup>。(2)推广应用胶接绝缘接头技术,该技术通过专用胶粘剂将钢轨与绝缘夹板牢固粘接,不仅能消除传统接头轨缝带来的冲击问题,还能有效隔绝电流,避免电腐蚀对钢轨接头的损害。胶接绝缘接头的粘接强度需满足重载列车运行的载荷要求,同时具备良好的耐老化、耐水性能,适应不同气候环境下的使用需求。在日常养护中,需定期检查胶接部位是否存在开裂、剥离现象,及时进行修复处理。

#### 3.1.2 轨面整修技术

(1)实施钢轨打磨作业,根据钢轨伤损情况分为预防性打磨与修复性打磨。预防性打磨主要针对轨面初期出现的微小缺陷(如轻微肥边、氧化层),通过定期打磨去除轨面不规则部分,恢复轨面平顺性,优化轮轨接触关系,减少接触应力集中,从源头预防轨头剥离、擦伤等伤损的产生。修复性打磨则针对已出现明显伤损(如波浪磨耗、轻微剥落)的轨面,根据伤损深度与范围制定专项打磨方案,去除伤损层,恢复轨头正常几何形状,避免伤损进一步扩展。打磨过程中需严格控制打磨量与打磨精度,防止过度打磨削弱钢轨截面强度<sup>[4]</sup>。(2)优化轨头淬火工艺,通过调整淬火温度、冷却速度等参数,平衡轨头硬度与韧性。重载铁路钢轨轨头需具备较高的硬度以抵抗磨损,同时需有一定的韧性以承受冲击载荷,避免因脆性过大导致轨头开裂。优化后的淬火工艺可使轨头形成均匀的淬火层,确保轨头表面硬度达到设计要求,且淬火层与母材过渡平缓,减少因硬度差异引发的应力集中,提升轨头抗疲劳性能。

#### 3.1.3 道床与轨枕维护

(1)定期对道床进行清筛作业,清除道床内的粉尘、杂物及失效道砟,保持道砟的清洁度与弹性。重载列车长期运行会导致道床板结,降低道床缓冲能力,加剧列车对钢轨接头的冲击。通过清筛作业,可恢复道床的孔隙率,提升道砟的密实度与弹性,增强道床对列车冲击

载荷的吸收能力,减少振动对钢轨接头的影响。清筛周期需根据道床污染程度、通过总重等因素综合确定,确保道床始终处于良好工作状态。(2)及时更换失效轨枕(如开裂、腐朽、破损的轨枕),并采用弹性垫板替代传统刚性垫板。弹性垫板具有良好的缓冲减振性能,能有效吸收列车运行产生的振动冲击,减少振动荷载向钢轨接头的传递,降低接头伤损发生概率。在选择弹性垫板时,需考虑其刚度、耐疲劳性能等参数,确保与重载铁路的运行条件相匹配。同时,需定期检查弹性垫板的老化、变形情况,及时更换失效垫板,保证减振效果。

### 3.2 伤损修复技术

(1)针对螺孔裂纹,根据裂纹长度与位置采取差异化修复方案。若裂纹较短(小于10mm),采用钻孔扩修技术,在裂纹末端钻取止裂孔,阻止裂纹进一步扩展;若裂纹较长但未贯穿钢轨,可植入专用加固螺栓,通过螺栓的夹紧力增强螺孔周边强度,或采用胶接加固技术,将高强度复合材料粘结在螺孔裂纹区域,恢复螺孔承载能力;若裂纹严重,则需更换钢轨接头夹板或局部钢轨。(2)处理核伤时,首先通过无损检测确定核伤的深度与范围。若核伤较浅且未影响钢轨主体强度,可采用局部打磨去除伤损区域;若核伤较深,需切除包含核伤的钢轨伤损段,然后采用铝热焊或闪光焊技术插入短轨进行连接,焊接完成后需进行严格的探伤检测(如超声波探伤、磁粉探伤),确保焊接接头无缺陷,恢复钢轨的连续性与承载能力。(3)整治马鞍形磨耗时,优先采用轨面打磨技术,使用专用打磨列车按照轨头标准断面曲线进行精准打磨,消除轨头中间凹陷与两侧凸起,恢复轨头几何形位;若磨耗深度较大(超过3mm),则先采用电弧焊或气体保护焊进行轨头焊补,填补磨耗凹陷区域,焊补后再进行打磨修整,确保轨面平顺性与轮轨接触精度<sup>[5]</sup>。

### 3.3 智能化维修管理

(1)推动探伤技术升级,采用超声波探伤与涡流探伤联合应用的检测模式。超声波探伤可深入检测钢轨内部的核伤、焊接缺陷等,分辨率高;涡流探伤则适用于检测钢轨表面及近表面的裂纹、锈蚀等伤损,检测速度快。通过两种技术的互补,实现对钢轨接头伤损的全方

位、高精度检测,减少漏检与误检,及时发现潜在伤损。(2)构建大数据与AI融合的维修管理系统,建立覆盖全线路的钢轨伤损数据库,实时采集探伤数据、运营荷载数据、环境数据等。利用AI算法对数据进行分析处理,构建伤损发展预测模型,精准预测不同类型伤损的扩展速度与寿命周期,根据预测结果制定个性化、动态化的维修计划,避免过度维修与维修不足,提高维修资源利用率。(3)引入无人机与机器人巡检技术,无人机搭载高清摄像头与红外热像仪,可对线路周边环境、道床状态进行快速巡检,及时发现道床塌陷、异物侵限等问题;钢轨检测机器人则沿钢轨行驶,通过内置传感器实时检测轨面磨耗、接头几何参数等,实现全天候、自动化巡检。这些技术不仅能大幅提高检测效率,还能减少人工巡检的劳动强度与安全风险,确保巡检工作的及时性与可靠性。

### 结束语

重载铁路钢轨接头伤损成因复杂,涵盖材质、运营、养护等多方面。通过深入剖析伤损类型与特征、成因,针对性提出预防性维修、伤损修复及智能化管理等技术策略,能有效降低接头伤损发生率,提升钢轨使用寿命与行车安全性。未来,随着科技不断进步,需持续优化维修技术,强化智能化管理手段,以适应重载铁路更高运输需求,保障铁路运输安全、稳定、高效运行,推动重载铁路事业迈向新台阶。

### 参考文献

- [1]陶艳明.重载铁路钢轨冻结接头夹板疲劳特性分析及优化[J].中国铁路.2021(07):105-112.
- [2]尹段泉.重载铁路道岔区钢轨接头轨腰裂纹伤损整治[J].铁道建筑.2022,62(11):40-43.
- [3]安磊.普速铁路钢轨焊接接头伤损分布特点及规律[J].建筑理论,2025,(07):74-75.
- [4]王晓栋.重载铁路钢轨接头病害的成因分析及整治[J].工程地质学,2023,(09):102-103.
- [5]常晟.重载铁路钢轨接头病害的成因及整治措施[J].建筑理论,2022,(05):62-63.