

小半径曲线病害成因及整治措施

翟 涛

中天合创能源有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 小半径曲线因设计半径过小、超高与轨底坡设置不当、运营重载提速及客货混跑冲击大、轨道结构弹性衰减、养护维修不足等因素,易引发钢轨伤损(侧磨、波磨等)、几何尺寸超限、连接零件松动及轨枕失效等病害。整治需从优化参数(动态检算超高、修正轨底坡)、强化钢轨保护(涂油、调边)、整治道床(清筛、补砟)、修复轨枕及连接零件、应用智能检测与机械化维修等方面综合施策。

关键词: 小半径曲线;病害成因;整治措施

引言:在铁路线路中,小半径曲线因其特殊几何形态,成为病害高发区段。受列车高速重载运行、频繁启停制动及复杂轮轨关系影响,小半径曲线易出现钢轨磨耗、轨道几何尺寸超限、连接零件松动及轨枕失效等典型病害。这些病害不仅增加养护成本,更威胁行车安全。本文通过系统分析小半径曲线病害的成因机制,提出针对性整治措施,旨在为铁路部门提供科学养护依据,保障线路安全平稳运行。

1 小半径曲线常见病害类型及特征

1.1 钢轨伤损病害

(1) 钢轨伤损呈明显集中分布规律:侧磨在半径越小的曲线段越严重,如门克庆专用线 $R \leq 600$ 曲线侧磨率高达30.87%,且多集中于曲线外股钢轨;波磨常出现在曲线内股,波长多为10-30m,伴随列车振动加剧;剥离掉块多分布于轮轨接触频繁区域,尤其在曲线变坡点附近;核伤则易产生于钢轨头部,在年通过总重超50Mt的曲线段发生率显著升高。(2) 接头病害表现突出:轨头低塌多发生在曲线接头处,因轮轨冲击反复作用,轨头表面出现凹陷;夹板裂纹集中于夹板螺栓孔周边,受横向拉力影响,裂纹沿孔位扩展;铝热焊接头失效常见于曲线地段,因焊接质量不均或受力过大,接头处易出现缝隙、错牙,甚至断裂。

1.2 轨道几何尺寸超限

(1) 轨距扩大与正矢偏差关联紧密:半径越小,轨距超限频率越高,如门克庆专用线 $R \leq 600$ 曲线轨距超限次数是 $R > 1000$ m曲线的4-5倍;超高不合理时,欠超高导致外股钢轨受力集中,引发正矢向外侧偏移,过超高则使内股受压,正矢向内侧偏差,两者均破坏曲线圆顺性。(2) 高低偏差常伴随暗坑、吊板:高低偏差多分布于曲线接头及道床板结区域,偏差值可达5-8mm;暗坑、吊板集中在曲线下股,因道床弹性衰减,荷载传递不均,导致轨面出

现局部下沉,列车通过时产生强烈冲击^[1]。

1.3 连接零件松动与破损

(1) 接头螺栓折断多因横向力过大:曲线段轮轨横向推力使螺栓承受交变剪应力,长期作用下螺栓疲劳折断,尤其在接头错牙处,折断概率升高30%。(2) 轨距杆断裂源于超限拉力:当轨距扩大趋势明显时,轨距杆承受的拉力超设计值,易在杆体与接头焊接处断裂。

(3) 尼龙座挤碎受挤压应力作用:曲线段钢轨横向位移使尼龙座被轨底与轨枕挡肩反复挤压,超过材料抗压极限后出现碎裂。

1.4 轨枕失效

(1) 挡肩破损集中于曲线外股轨枕:外股钢轨横向推力直接作用于轨枕挡肩,使挡肩出现裂纹、掉块,门克庆专用线 $R \leq 600$ 曲线挡肩破损率超58%。(2) 沉轨槽溃烂分布具规律性:多发生在曲线内股轨枕,因内股钢轨承受较大竖向压力,轨枕承轨槽长期受挤压磨损,出现混凝土剥落、凹陷,如门克庆专用线小半径曲线轨枕更换量占全段91%,其中83%为沉轨槽溃烂导致。

2 小半径曲线病害成因分析

2.1 设计因素

(1) 曲线半径过小是引发病害的核心设计问题。根据离心力计算公式 $F = mv^2/R$ (其中 F 为离心力, m 为列车质量, v 为行驶速度, R 为曲线半径),当列车质量与速度不变时,曲线半径 R 减小会导致离心力 F 呈反比激增。过大的离心力使轮轨间横向作用力显著增强,加剧外股钢轨侧磨、轨距扩大等病害,同时对轨枕、连接零件产生额外冲击,加速结构损耗。(2) 超高设置不合理直接诱发针对性病害。欠超高(实际超高低于设计超高)会导致列车通过曲线时,轮轨横向力集中作用于外股钢轨,引发外股侧磨加剧,同时增加接头区域的冲击荷载;过超高(实际超高高于设计超高)则使内股钢轨承

受过大竖向压力，长期作用下导致内股钢轨压溃、道床下沉，形成“上磨下压”的病害格局。

2.2 运营条件

(1) 列车提速与重载化显著加重轨道负担。当前货运列车轴重普遍提升，部分货车轴重达25t，轴重增加使钢轨接触应力大幅提高，超过钢轨材料的疲劳极限后，加速钢轨剥离掉块、核伤等接触疲劳病害的产生；同时，提速后列车离心力进一步增大，与小半径曲线的固有缺陷叠加，导致几何尺寸超限频率升高。(2) 客货混跑的速差问题形成“记忆性病害”。客车与货车行驶速度差异大，通过同一曲线时，对超高的需求不同：客车易因速度高产生欠超高，货车易因速度低产生过超高。两种超高异常交替作用于轨道，使钢轨、扣件长期处于不稳定受力状态，形成难以根治的“记忆性病害”，如钢轨波磨、轨枕挡肩反复破损^[2]。

2.3 轨道结构缺陷

(1) 轨底坡不足无法适配曲线超高性能。我国轨道标准轨底坡为1/40，该坡度在直线段可保证轮轨良好接触，但在小半径曲线段，受超高影响，轮轨接触点偏移，1/40的轨底坡无法满足曲线段的受力需求，导致轮轨接触应力集中，加剧钢轨侧磨与踏面剥离。(2) 道床弹性衰减破坏荷载传递平衡。小半径曲线段列车冲击荷载大，长期作用下易导致道床板结、翻浆冒泥，使道床弹性显著衰减。弹性不足会造成荷载传递不均，部分轨枕承受过大竖向压力，引发沉轨槽溃烂、轨枕开裂，同时加剧钢轨接头低塌等病害。

2.4 养护维修不足

(1) 错误拨道方法引发轨道几何变形。部分养护作业中采用“从中间向两端拨道”的方式，该方法易导致曲线曲率不均匀，形成“鹅头”变形（曲线局部出现反向弯曲），进而引发轨距扩大、正矢偏差等问题，同时加剧轮轨横向冲击，加速连接零件破损。(2) 预防性打磨缺失导致病害恶性循环。当钢轨肥边厚度达7mm时，若未及时进行预防性打磨，肥边会使轮轨接触应力进一步集中，加剧钢轨侧磨与剥离，同时肥边与轮缘的异常接触会引发列车振动，加速道床板结、轨枕失效，形成“病害加重—维护滞后”的恶性循环。

3 小半径曲线病害整治措施

3.1 钢轨伤损治理

3.1.1 调整曲线参数

(1) 动态检算超高需以实测车速为核心依据，通过轨检车或便携式测速设备获取列车实际通过速度，结合曲线半径计算合理超高值，将超高误差严格控制在

$\pm 5\text{mm}$ 范围内。例如，当实测货车平均速度较设计速度提升5km/h时，需对应提高超高值，避免欠超高引发的外股侧磨；若客车速度低于设计值，则需降低超高，防止过超高导致内股压溃。(2) 修正轨底坡时，需摒弃直线段1/40的标准坡度，采用1/30-1/20的坡度范围适配曲线超高性能。通过增大轨底坡，可调整轮轨接触位置，扩大接触面积，分散接触应力，尤其在半径小于600m的曲线段，采用1/25轨底坡可使轮轨接触应力降低15%-20%，有效缓解钢轨侧磨与踏面剥离问题。

3.1.2 强化钢轨保护

(1) 上股钢轨涂油减磨需选用耐磨损、抗高温的复合润滑剂，通过自动涂油装置或人工定期涂刷，在钢轨侧面形成润滑膜。实践表明，使用复合润滑剂可降低钢轨侧磨率40%以上，以年通过总重80Mt的曲线段为例，涂油后每年可减少钢轨侧磨量2-3mm，延长钢轨更换周期。(2) 定期调边使用适用于曲线内外股钢轨磨损差异较大的情况，当外股钢轨侧磨量达8mm、内股钢轨压溃深度超3mm时，需及时将内外股钢轨调换位置，利用内股钢轨较好的踏面状态承担外股受力，可使钢轨整体寿命延长1.5倍，大幅降低换轨成本^[3]。

3.1.3 焊接与打磨技术

(1) 铝热焊接头探伤需采用超声波检测技术，重点检测接头熔合线、热影响区等易产生裂纹的部位，检测频率需与列车通过密度挂钩，年通过总重超50Mt的曲线段每3个月检测1次，发现裂纹深度超2mm时需立即进行补焊或更换接头，防止接头失效引发断轨事故。(2) 钢轨预打磨需在新轨铺设后、列车通行前实施，通过砂轮打磨消除钢轨淬火层表面的微小缺陷（如氧化皮、微小裂纹），使钢轨踏面粗糙度控制在Ra1.6 μm 以下。预打磨可降低钢轨初期剥离风险，数据显示，经过预打磨的钢轨，运营1年内剥离掉块发生率较未打磨钢轨降低60%。

3.2 轨道几何尺寸控制

3.2.1 精确拨道

(1) 采用绳正法计算拨道量时，需先测量曲线正矢值，对比设计正矢确定拨道方向与幅度，同时根据道床弹性、轨枕状态预留回弹量，经验值为每10m曲线段预留2-3mm回弹量。例如，计算某100m曲线需向外拨道50mm时，实际拨道量需设置为52-53mm，避免拨道后因道床回弹导致正矢偏差。(2) 增设副矢点可提升曲线拨道精度，在传统10m间距正矢点的基础上，于每10m区间内加测5m点位的副矢值，形成“10m主矢+5m副矢”的检测体系。通过加密测点，可及时发现曲线局部“鹅头”变形，确保拨道后曲线曲率连续均匀，轨距偏差控制在

±2mm内。

3.2.2 道床整治

(1) 清筛翻浆道床需采用机械清筛设备, 清筛深度 $\geq 300\text{mm}$, 彻底清除道床内的淤泥、碎砟等杂质, 同时更换20%-30%的新砟, 恢复道床弹性。对于翻浆严重的曲线段, 需结合路基加固处理, 如铺设土工格栅防止路基土混入道床, 清筛后道床竖向弹性系数可恢复至150-200kN/mm, 有效减少暗坑、吊板问题。(2) 补充道砟时需针对曲线外侧受力大的特点, 将外侧道床堆高150mm, 道床宽度较直线段加宽200mm, 形成“外高内低”的道床断面。通过增加外侧道床厚度与宽度, 可提高道床横向阻力, 抵抗轮轨横向推力, 降低轨距扩大风险, 同时增强道床整体稳定性。

3.3 连接零件与轨枕修复

3.3.1 零件更换标准

(1) 螺栓扭矩需严格按照规范执行, 混凝土枕接头螺栓扭矩 $\geq 700\text{N}\cdot\text{m}$, 采用扭矩扳手逐个检测, 对扭矩不足的螺栓及时复紧, 对锈蚀、滑丝的螺栓立即更换。定期(每6个月)进行扭矩复核, 确保螺栓长期处于稳定紧固状态, 防止因螺栓松动引发轨距扩大、接头错牙等问题。(2) 尼龙座更换周期需设定为每2年全面检查1次, 重点检查曲线段尼龙座的磨损程度、碎裂情况, 当尼龙座磨损量超3mm或出现明显裂纹时, 需批量更换。

3.3.2 轨枕加固

(1) 挡肩破损修复采用环氧树脂修补材料, 先清理破损部位的松散混凝土, 露出坚实基层, 再涂抹环氧树脂粘结剂, 填充修补砂浆, 养护72小时后恢复使用。该方法适用于挡肩破损面积小于 100cm^2 的情况, 修补后挡肩抗压强度可恢复至原设计值的90%以上, 有效抵抗钢轨横向冲击力。(2) 沉轨槽溃烂处理需彻底更换轨枕, 优先选用Ⅲ型混凝土枕, 其承轨槽采用强化设计, 抗磨损、抗挤压性能较Ⅱ型枕提升30%。更换时需同步检查道床状态, 对道床板结区域进行清筛, 确保新轨枕与道床紧密贴合, 更换后轨枕沉轨槽溃烂发生率可降低80%^[4]。

3.4 新型养护技术应用

3.4.1 智能检测系统

(1) 轨检车动态监测需采用高精度检测设备, 检测精度达0.1mm, 可实时采集轨距、超高、正矢、高低等几

何参数, 以及钢轨伤损、接头状态等数据, 每季度对小半径曲线段进行1次全面检测, 生成病害分析报告, 为整治措施制定提供数据支撑。(2) 便携式激光弦线适用于现场短途检测, 其检测效率较传统弦线法提升3倍, 可快速检测曲线短波不平顺(波长1-30m), 尤其在养护作业后验收阶段, 通过激光弦线检测可及时发现拨道、捣固后的微小偏差, 确保轨道几何尺寸达标。

3.4.2 机械化维修

(1) 大型养路机械精捣需采用捣固车、稳定车联合作业, 捣固车通过高频振动压实道床, 稳定车施加竖向压力使道床密实度进一步提升, 作业后轨道质量指数(TQI)值可降低25%。以半径500m的曲线段为例, 精捣前TQI值为12, 精捣后可降至9以下, 轨道平顺性显著提升。(2) 钢轨打磨列车需针对曲线钢轨磨损特征制定打磨方案, 采用多砂轮组合打磨模式, 消除波磨峰值0.2mm以上的不平顺, 同时修复钢轨踏面轮廓。打磨后钢轨表面粗糙度可控制在 $Ra0.8\mu\text{m}$ 以下, 轮轨接触应力分布更均匀, 可有效延缓钢轨波磨、侧磨的发展速度。

结束语

小半径曲线作为铁路线路的薄弱环节, 其病害整治是保障行车安全与效率的关键。本文从设计、运营、结构及养护等多维度剖析了病害成因, 并提出动态参数调整、强化钢轨保护、精细化道床整治及智能化养护等综合措施。实践表明, 科学实施这些措施可显著降低病害发生率, 延长设备使用寿命。未来, 随着新技术、新材料的应用, 小半径曲线养护将向精准化、智能化方向发展, 为铁路高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]董涛,于海军,周尽晖,等.铁路轨道小半径曲线病害的原因与整治方法[J].冶金设备管理与维修,2023,(04):42-43.
- [2]曹斌.铁路线路小半径曲线病害成因及其整治措施[J].科学时代,2021,(10):101-102.
- [3]南海军.铁路小半径曲线病害成因与整治对策[J].高铁速递,2022,(06):74-76.
- [4]晋永忠.大秦重载铁路小半径曲线病害的成因与整治[J].太原铁道科技,2022,(14):144-146.