

重载铁路小半径曲线钢轨磨耗规律及减磨措施

刘万权

中铁一局集团新运工程有限公司 陕西 咸阳 712000

摘要：重载铁路小半径曲线因轮轨接触应力集中、横向力大，成为钢轨磨耗的高发区域。本文针对该区域钢轨磨耗问题，系统分析了磨耗类型及其危害，结合现状调查揭示了磨耗的分布规律、发展趋势及影响因素，并探讨了磨耗形态与钢轨损伤的关联机制。在此基础上，从轨道结构优化、耐磨钢轨应用、轮轨润滑改善、车辆参数调整及维护管理加强等方面，提出了针对性的减磨措施，为缓解重载铁路小半径曲线钢轨磨耗、延长轨道寿命提供理论与技术参考。

关键词：重载铁路；小半径曲线；钢轨磨耗规律；减磨措施

引言：重载铁路作为大宗货物运输核心载体，其轨道结构稳定性关乎运输效率与安全。小半径曲线是线路薄弱环节，受重载列车轮轨复杂作用影响，钢轨磨耗问题突出，制约线路服役寿命并增加运营成本。近年来，重载运输量增长与轴重提升，加剧了小半径曲线钢轨磨耗，使其速率加快、形态更复杂。这不仅导致轨道几何尺寸失准、轮轨动态响应加剧，还可能引发钢轨剥离、裂纹等损伤，威胁行车安全。因此，深入研究该区域钢轨磨耗规律、探索减磨措施，对优化轨道设计、降低维修成本、保障重载铁路安全高效运营，具有重要意义和工程价值。

1 重载铁路小半径曲线钢轨磨耗现状

1.1 磨耗类型

重载铁路小半径曲线钢轨磨耗类型多样，主要包括侧磨、滚动磨耗和疲劳磨耗。侧磨是最常见类型，因列车通过曲线时轮轨横向力大，钢轨侧面与车轮轮缘长期摩擦导致，内外轨侧磨程度差异显著，外轨通常更严重。滚动磨耗由轮轨滚动接触产生，伴随塑性变形和材料转移。疲劳磨耗则因轮轨反复接触应力超过材料疲劳极限，使钢轨表面出现裂纹并逐渐扩展，三种磨耗常相互叠加，形成复杂磨耗形态。

1.2 磨耗危害

钢轨磨耗会带来多方面危害。首先，导致轨道几何参数恶化，曲线方向偏差增大，影响列车运行平稳性，增加轮轨冲击振动。其次，削弱钢轨承载能力，磨耗后的钢轨截面削弱，在重载作用下易产生变形甚至断裂，威胁行车安全。同时，磨耗加快钢轨更换频率，大幅增加维修成本和线路停运时间，降低运输效率。此外，严重磨耗还会引发钢轨剥离、掉块等损伤，进一步加剧轮轨相互作用，形成恶性循环，对重载铁路运营构成严重

挑战。

1.3 磨耗现状调查

通过对重载铁路多个小半径区段的实地调研和检测发现，钢轨磨耗问题普遍存在且形势严峻。在半径较小的曲线区段，钢轨侧磨速率明显高于直线和大半径曲线区域，内外轨磨耗呈现明显不对称性，外轨磨耗量远大于内轨，部分严重区段外轨磨耗已接近重伤标准。不同运营年限的线路磨耗程度差异显著，运营时间较长的区段普遍出现钢轨疲劳裂纹、鱼鳞纹等损伤，且磨耗分布与列车运行密度、轴重密切相关，运量大、轴重重的区段磨耗问题更为突出。列车通过速度对磨耗影响显著，速度过高会使轮轨离心力增大，加剧侧磨；速度过低则会因轮轨滑动摩擦比例增加，导致滚动磨耗加重^[1]。

2 重载铁路小半径曲线钢轨磨耗规律

2.1 磨耗分布规律

重载铁路小半径曲线钢轨磨耗呈现显著的空间分布特征。在横向分布上，外轨磨耗量远大于内轨，外轨侧磨主要集中在距轨顶边缘一定范围，内轨则以滚动磨耗为主，磨耗区域覆盖轨顶中心至内侧部分区域。纵向分布呈现“两端低、中间高”的特征，曲线中部磨耗最严重，向曲线缓和段逐渐递减，且半径越小，这种纵向差异越明显。此外，磨耗沿钢轨长度方向存在不均匀性，在列车制动点、变坡点等位置易形成局部磨耗峰值，部分区段局部磨耗量比平均水平高出不少。

2.2 磨耗发展规律

磨耗发展过程可分为三个阶段：初期磨耗速率较快，主要因轮轨接触关系未达到稳定状态；中期进入稳定磨耗阶段，轮轨接触趋于平衡；后期磨耗速率再次加快，此时钢轨表面出现疲劳层，材料耐磨性显著下降。同时，磨耗形态随时间演变，初期以均匀侧磨为主，中

期伴随塑性流动形成轨头肥边，后期因疲劳损伤出现局部剥落，形成复合型磨耗。列车速度在这一过程中影响显著，稳定运行速度下磨耗发展较均匀，频繁变速则会打乱磨耗节奏，导致局部磨耗加剧。

2.3 不同因素对磨耗规律的影响

曲线半径是核心影响因素，半径越小，磨耗速率越快。轴重增加会显著提高磨耗速率，轴重大的列车磨耗量明显高于轴重小的列车。轨道超高设置不合理会加剧磨耗，超高过大导致轮轨横向力增加，超高不足则使轮重转移加剧。列车速度对磨耗的影响呈双向性，速度过高或过低都会加速磨耗，只有在合理速度区间内，磨耗速率才能保持相对较低水平。此外，道床刚度不均匀会引发轮轨动态作用力波动，使磨耗分布更不均匀，道床弹性不足区段的磨耗速率比正常区段高出不少。

2.4 磨耗形态与钢轨损伤的关联规律

磨耗形态与钢轨损伤存在显著关联。侧磨量较大时，钢轨截面削弱导致轨头承载能力下降，易引发轨头压溃；滚动磨耗伴随的塑性变形累积到一定程度，会在轨顶形成疲劳裂纹，裂纹扩展方向与磨耗轨迹一致；当磨耗速率超过材料修复能力时，表面会出现鱼鳞状剥落，剥落坑深度随磨耗量增加而扩大。列车速度变化会改变轮轨接触状态，进而影响损伤的形成与扩展速度，高速冲击下更易产生裂纹类损伤。

2.5 不同运营工况下的磨耗差异规律

不同运营工况下钢轨磨耗差异显著。货运列车为主的线路磨耗速率比客货混跑线路高出不少，因货运列车轴重大、制动频繁。列车通过密度大的区段，磨耗量比密度小的区段高出较多，且磨耗均匀性差。长交路列车运行区段磨耗分布更稳定，而短交路、频繁启停区段易出现局部磨耗集中。此外，季节性差异明显，雨季磨耗速率比旱季高出不少，因轮轨间润滑条件受雨水影响，使磨耗情况发生变化。列车速度的频繁变化会导致磨耗形态更复杂，匀速运行区段磨耗相对均匀^[2]。

3 减磨措施

3.1 优化轨道结构

3.1.1 合理设置曲线半径

在线路规划与设计阶段，应结合货运量、轴重及地形条件，优先选用较大的曲线半径，以减少轮轨横向力和接触应力。对于受地形限制必须设置小半径曲线的区段，需通过多方案比选确定最小合理半径。同时，控制相邻曲线半径差值，避免因半径突变导致轮轨作用力剧烈波动。此外，小半径曲线连续长度不宜过长，且两端应设置足够长度的缓和曲线，使列车平稳过渡，减少曲

线入口处的钢轨磨耗，同时为列车进出曲线时的速度调整提供缓冲空间。

3.1.2 调整轨道几何参数

针对小半径曲线特点，精准调整轨道几何参数以优化轮轨接触关系。轨道超高设置应与列车平均运行速度相匹配，减少轮重转移和横向力。轨距偏差和轨向偏差需严格控制在合理范围内，确保轨道平顺性。同时，合理设置轨底坡，使轮轨接触点位于轨顶中心附近，避免接触应力集中。定期对轨道几何参数进行复测与调整，尤其是在列车通行密集时段后，及时修正偏差，维持良好的轮轨作用状态，为列车在合理速度下运行创造条件。

3.1.3 加强轨道扣件系统

强化轨道扣件系统可提高轨道结构的稳定性，减少钢轨横向位移，从而减轻磨耗。小半径曲线区段优先采用弹性变形能力强的扣件，以有效缓冲轮轨冲击力。扣件螺栓预紧力需严格控制，定期检查并复紧，防止因松动导致轨距扩大。曲线外侧采用加强型扣件，增加扣压力，并增设轨距挡板和防爬器，限制钢轨横向位移。此外，在扣件与轨枕接触部位增设弹性垫层，进一步提升轨道的整体弹性，减少轮轨振动带来的磨耗，尤其能缓解因速度变化产生的冲击影响。

3.2 采用耐磨钢轨

3.2.1 选择合适的钢轨材质

在重载铁路小半径曲线区段，钢轨材质的选择直接关系到磨耗程度。针对曲线段轮轨横向力大、磨耗类型复杂的特点，需优先选用高强度耐磨钢轨。这类钢轨通过优化成分设计，能显著提升自身硬度，增强抗侧磨能力，减少轮缘与钢轨侧面的摩擦损耗。对于轴重大的线路，更要注重钢轨的综合性能，需采用兼具优良韧性和耐磨性的高强度钢轨，确保其在承受轮轨间巨大接触应力时，既不易出现脆性断裂，又能有效抵抗磨损。同时，必须根据曲线半径科学匹配钢轨材质，小半径区段因磨耗更为剧烈，宜选用更高强度的钢轨，在保障耐磨性的同时严格把控脆性风险，从而降低磨耗速率，让钢轨更好地适应不同运行速度下轮轨的复杂作用，为小半径曲线钢轨的长期稳定运行提供坚实的材质支撑。

3.2.2 对钢轨进行表面处理

对钢轨进行表面处理是提升其耐磨性能的重要手段，能有效延缓磨耗进程。常用的钢轨表面淬火处理，通过精准控制加热和冷却过程，在轨头表面形成一层坚硬的淬火层，这层淬火层能大幅提高钢轨表面硬度和耐磨性，减少轮轨接触时的塑性变形和材料损耗。激光表面合金化技术则是通过高能激光束使钢轨表面与合金材

料融合，形成高硬度合金层，进一步增强钢轨表面的抗塑性变形能力，提升其抗磨性能。对于已铺设的钢轨，定期进行专业打磨至关重要，通过打磨可以去除表面积累的疲劳层和磨耗形成的凸棱，恢复轨头的设计轮廓，确保轮轨接触状态良好，避免局部磨耗集中。尤其是在列车速度变化频繁的区段，打磨能有效改善轮轨接触不良问题，进一步延长钢轨的使用寿命。

3.3 改善轮轨润滑条件

3.3.1 安装轮轨润滑装置

在小半径曲线区段应优先安装自动润滑装置，如车载式轮缘润滑器和轨旁固定式润滑系统。车载装置可根据曲线位置自动触发，精准向轮缘喷射润滑剂；轨旁系统通过传感器检测列车通过信号，向钢轨侧面定量供油，减少人工维护成本。对于小半径曲线，建议合理设置轨旁润滑点，确保润滑覆盖全曲线段，同时配备监控系统实时监测润滑效果，避免过量润滑导致轮轨黏着系数下降影响制动安全，尤其要保证在不同速度下润滑效果的稳定性。

3.3.2 选择合适的润滑剂

润滑剂需兼顾减磨效果与轮轨黏着性能，重载铁路宜选用合适类型的润滑剂，以适应夏季高温环境，在不同温度下仍能保持良好流动性。对于多雨地区，应选择抗水型润滑剂，防止雨水冲刷导致润滑失效。同时，润滑剂需具备良好的附着性，单次涂抹有效持续里程较长，且对钢轨和车轮无腐蚀作用，定期检测润滑剂理化指标，确保其在轮轨接触压力下形成稳定润滑膜，适应不同速度下的轮轨接触状态。

3.4 优化车辆参数

3.4.1 合理设计车轮踏面形状

针对小半径曲线轮轨接触特点，采用磨耗型踏面替代传统锥形踏面，其踏面等效斜率更大，能减少轮轨接触应力集中。设计时确保轮轨接触点沿踏面均匀分布，避免固定接触点长期磨损导致局部磨耗加剧。曲线区段可采用不对称踏面设计，改善曲线通过时的轮轨匹配性。同时，严格控制踏面擦伤和剥离程度，定期对踏面进行镟修，恢复其设计轮廓，减少因踏面形态异常引发的钢轨磨耗，使车轮在不同速度下都能与钢轨保持良好接触。

3.4.2 调整车辆悬挂系统参数

通过调整悬挂系统参数优化车辆曲线通过性能，提升车辆横向稳定性，减少轮缘与钢轨侧面的冲击摩擦。增大抗蛇行减振器阻尼系数，有效抑制车辆蛇行运动，

降低轮轨横向力波动幅度。对于重载货车，合理调整一系悬挂垂向刚度，确保轮轨接触力分布更均匀。同时，合理设置轴箱定位刚度，兼顾车辆导向性与稳定性，减少轮轨附加作用力，从而减轻钢轨磨耗，尤其能降低因速度变化产生的附加力影响。

3.5 加强轨道维护管理

3.5.1 定期检测钢轨磨耗

对小半径曲线区段实施高频次、高精度的钢轨磨耗检测，采用钢轨轮廓测量仪、激光检测系统等设备，定期完成全面检测，重点记录内外轨侧磨量、垂直磨耗量及轨头断面变化。建立磨耗数据库，通过数据分析预测磨耗发展趋势，当侧磨量达到一定程度时发出预警，制定换轨或打磨计划。同时，结合列车通过频次和速度变化情况，对轴重大、流量高的曲线区段增加检测频次，确保及时发现局部磨耗集中现象，为后续维护提供精准数据支撑。

3.5.2 及时修复轨道病害

针对检测发现的轨道病害，建立快速修复机制。对于轨距偏差、方向不良等区段，及时进行拨道、改道作业，恢复轨道几何参数；发现道床板结、空吊板等问题时，采用清筛、捣固等工艺处理，保证道床弹性均匀。对钢轨表面出现的鱼鳞纹、轻微裂纹等早期损伤，及时进行预防性打磨，去除损伤层；对扣件松动、失效等情况，及时完成更换，确保扣压力达标，通过及时修复各类病害，避免轮轨作用力异常增大，减轻钢轨磨耗，为列车在合理速度下运行提供良好的轨道条件^[3]。

结束语

综上所述，重载铁路小半径曲线钢轨磨耗受多因素影响，呈现出特定的分布、发展等规律，且不同运营工况下差异明显。这些磨耗不仅影响钢轨寿命，还关乎行车安全。因此，积极采取优化轨道参数、采用耐磨材料、合理润滑等减磨措施至关重要。通过科学应对磨耗问题，能有效延长钢轨使用寿命，降低维护成本，保障重载铁路运输的安全与高效，为铁路事业的持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]高彦明。有砟轨道无缝线路应力放散锁定施工要点[J].山西建筑, 2021 (10) : 282-283
- [2]吕光棋。山区铁路小半径曲线地段铺设无缝线路探讨[J].铁道建筑, 2021 (6) : 74-76
- [3]候玉碧, 孙占恒。铺设75kg/m钢轨跨区间超长无缝线路[J].铁道建筑, 2021 (10) : 38-40