

冻害地段轨道几何状态变化规律与整治方法

侯 勇

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】：季节冻土区铁路线路受冻融和列车荷载耦合作用影响，易形成冻胀隆起、春融沉陷和支承刚度突变，进而引起高低、水平、轨向、轨距等指标波动。本文分析冻胀融沉对轨面偏差的传导链，识别水热条件、基床填料、道床支承和动检指标的耦合规律，并提出路基热稳处治、道床排水整修、轨道结构调整、季节性跟踪和典型冻害地段状态解析方法。冻害整治应由单次轨面修理转向水热条件、结构支承和几何指标联合控制；轻微冻胀宜采用保养整修和周期复测，反复冻害宜实施排水、换填、防冻层和轨道结构调整组合措施。

【关键词】：冻害地段；轨道几何状态；冻胀融沉；线路整治；动态检测

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.024

引言

寒区铁路运营中反复经历负温冻结和春季融化，路基、基床表层和道床水热状态随季节改变，轨面平顺性同步波动。冻害经轨枕支承、道床刚度和扣件约束传递到钢轨顶面，使轨道几何指标出现短波突变、中波起伏和残余变形。铁路线路平顺性要求持续提高，冻害地段养护重点已由超限后整修转向动检识别、分级处治和周期跟踪。分析冻害地段轨道几何状态变化规律，可以明确冻胀、融沉、排水和道床状态之间的作用关系，并为不同病害等级选择整治方法。

1 冻害地段轨道几何状态概述

冻害地段轨道几何状态，是季节冻土区铁路线路在冻结、融化和列车荷载共同作用下形成的轨面空间位置变化。直接表现不是一处路基隆起或道床翻浆，而是高低、水平、轨向、轨距和三角坑等指标在短波与中波尺度上同步波动。寒区线路进入负温期后，路基和道床孔隙水向冻结锋面迁移，含冰量增加导致局部上拱；春融期承载刚度下降，融沉又使同一地段回落。下部结构冻害识别应和轨面几何读数合并判别，养护判断还要同步查看温度背景、排水条件、轨枕支承和前期整修记录^[1]。实际养护中还要注意冻害状态的时滞性。负温初期几何指标可能仍可控，但基床含冰量已经增加；低温持续、排水受阻和列车荷载反复作用后，轨面才集中出现峰值变化。春融阶段还会出现反向沉降和支承松动，前后状态不能割裂处置。

2 冻害地段轨道几何状态变化规律分析

2.1 冻胀融沉概念界定与偏差模型构建

冻胀是含水土体在负温梯度下发生水分迁移和冰晶增长后引起的体积扩张，融沉则是含冰结构融化后孔隙水排出、骨架重新压密形成的竖向回落。轨道几何偏差模型应把两个过程放在同一季节周期内理解：冬季上拱提高轨面局部高程，春融回落扩大相邻测点高差，列车荷载在刚度突变处叠加动应力，使轨面变化从路基竖向位移扩展为轨向、水平和轨距的联动偏差。冻害防治技术把水分补给、温度边界和填料性质列为核心

条件，模型边界也要区分可恢复弹性变形和季节残余变形^[2]。偏差模型可按输入、传递和输出三层理解：输入层为含水量、冻结深度和细颗粒比例，传递层为基床刚度、道床弹性和扣件约束，输出层为轨面高低、水平和轨向读数。整治判断不能只看输出层超限，还要反推输入层是否仍具备冻胀条件，否则模型难以指导治理。

2.2 冻胀变形关键传导过程解析

冻胀变形的传导起点通常位于基床表层或路基局部含水量，水分沿毛细通道向冻结锋面补给，冰晶生长后形成竖向膨胀压力。压力先改变轨枕下支承刚度，再借道床颗粒接触和扣件约束传递到钢轨，造成短距离上拱；相邻未冻胀地段保持原高程时，轨面便形成波峰、波谷和坡率突变。铁路路基冻害治理把排水和基床处理作为阻断反复冻胀的关键动作，桥涵过渡段、路堤低洼段和侧沟堵塞段也应列入传导链核范围^[3]。传导过程还存在横向差异：路肩侧排水不畅时，一股钢轨下部支承先发生抬升或软化，水平差和三角坑会早于轨距变化出现；道心积水或道床板结时，两股钢轨可能同步上拱，高低指标更敏感。分清单侧传导和整体传导，有助于选择盲沟、清筛、捣固或局部换填等措施。

2.3 轨道几何状态变化核心影响因素

影响轨道几何状态变化的首要因素是水热条件。地表径流、边坡渗水、涵洞附近汇水和道床脏污会提高基床含水量，细颗粒含量较高的填料在负温期更容易形成冰透镜；线路纵坡较小或排水出路受阻时，冻胀峰值往往集中在低洼区和过渡段两端。温度场决定冻结深度和冻结持续时间，同一线路在阴坡、风口和积雪覆盖地段会出现不同冻胀持续期。既有养修方式同样重要，若上一年度只对轨面起拨道，未处理排水沟、翻浆冒泥和基床软化，轨枕下弹性差异会在严寒期继续扩大。线路结构条件也会改变响应幅度。无砟轨道板下支承连续性较强，冻胀常表现为板端翘曲或长波不平顺；有砟轨道吸收局部变形能力较强，但道床含泥、含水和空吊会放大短波冲击。道岔区部件多、刚度突变明显，高低不良更容易伴随方向和轨距偏差。

3 冻害地段轨道几何状态整治措施

3.1 构建动检数据动态识别体系

冻害识别应以轨道检查车、添乘感受、人工静检和重点地段温湿度记录共同构成动态识别体系。轨检车数据连续反映高低、水平、轨向和轨距变化，适合发现冻害期几何状态趋势；人工静检补充轨枕空吊、道床翻浆、排水沟结冰和路肩裂缝等现场征象；温湿度记录帮助判断偏差是否与负温积累、昼夜融冻或降雪融水有关。冻胀幅值、空间位置和水热条件应共同进入状态判断，并设置冬前基准值、严寒期峰值和春融后残余值的同里程对比口径^[4]。识别体系还应设置异常确认顺序。先由轨检车筛出同里程重复峰值，再由人工检查确认轨枕、道床和排水状态，最后结合温度和融雪记录判定冻害属性。对疑似点不宜马上按普通不平顺处理，应先保留原始曲线和现场照片，避免作业后失去源头证据。

3.2 聚焦冻胀节点和进行路基热稳处治

路基热稳处治适用于冻胀来源清楚、几何偏差反复出现且单纯起拨道难以保持的地段。整治前应先确定冻胀节点含水来源和冻结边界，重点检查边沟排水、路肩封闭、基床填料细颗粒含量、涵洞附近渗流和地下水位变化。处治顺序宜先截断水源，再改善温度边界，最后恢复轨道支承；排水措施降低基床含水补给，换填和防冻层减小冻胀敏感性，捣固稳定把支承状态传递到轨面几何^[5]。防排水、隔热、换填和结构加强应作为组合处治方向。热稳处治还要注意施工窗口，严寒期不宜大范围开挖基床，可先疏通排水、清除冰堵并采用临时保温；春融后承载力最低，应控制重型机械扰动，待含水状态稳定后再实施换填、防冻层和结构恢复。处治完成后应把排水出口、路肩封闭和边坡渗流纳入复查。图1展示了冻胀融沉对轨道几何状态的传导关系及整治节点。

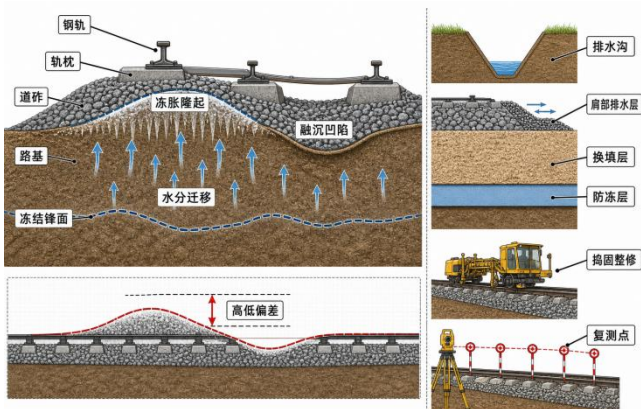


图1 冻害地段轨道几何状态变化与整治节点示意

图1中蓝色水分迁移箭头指向冻结锋面，说明冻胀隆起首先来自路基和道床水热条件；红色高低偏差曲线把局部上拱和融沉凹陷转化为轨面几何读数，右侧排水沟、换填层、防冻层、捣固整修和复测点则对应切断水源、改善温度边界、恢复支承

和跟踪效果四个整治动作。

3.3 推行轨道结构调整和道床排水整修措施

轨道结构调整主要处理冻害已经传导到钢轨和轨枕层后的几何偏差。轻微高低不良可采用起道、捣固、稳定和复测组合，重点恢复轨枕下连续支承；曲线和道岔区还要同步校核轨向、水平和轨距，避免只修高低后留下横向偏差。道床污染地段应先清筛、补充洁净道砟并恢复肩宽，再实施捣固整修，否则脏污道砟在春融期继续保水，会使轨枕下弹性再次下降。水、温、土和结构状态之间的耦合决定了道床排水整修不能脱离路基处治。轨道结构调整还应服务于长期支承恢复。起道量过大可能使局部道床更加松散，捣固不足又会留下新的空吊点；排水整修若只清理表面水沟，没有恢复道床横向排水和路肩排水坡，春融期仍会积水。作业后宜安排稳定车和人工精调衔接，使钢轨位置、轨枕支承同步恢复。

3.4 建立巡检评估和季节性跟踪制度

冻害地段整治后的状态跟踪应覆盖完整冻融周期。冬前检查排水通道、道床洁净度和既有冻害里程，入冬后结合气温下降和降雪融水情况提高巡检频次，严寒期跟踪轨检车高低峰值和人工添乘振动感受，春融期重点查验融沉、翻浆和残余轨向偏差。每次整治记录应保留作业日期、里程范围、整修方法、轨检前后指标和现场水害处置情况。分级参数可把几何偏差幅值、异常连续长度、轨枕支承状态和跟踪周期放在同一表内比较，便于区分保养整修、排水修复和综合处治。跟踪资料宜按“一处一档”保存，内容包括冻害里程、初次发现时间、最低气温、降雪融水、几何指标峰值、现场支承状态、整治措施和复测结果。连续年度同位复发的地段，应从普通保养对象转为重点整治对象；只有跨冬季和春融期均保持稳定，才可降低巡检等级。表1列出冻害地段轨道几何状态整治分级参数。

表1 冻害地段轨道几何状态整治分级参数

状态等级	高低峰值 (mm)	连续异常长度 (m)	水平差变化 (mm)	轨枕空吊数量 (处)	跟踪周期 (d)
轻微冻胀	4	25	2	0	14
局部上拱	7	40	4	2	7
反复冻害	10	65	6	5	3
春融沉陷	8	50	5	4	5
排水受阻	6	80	3	3	7
综合处治段	12	100	8	8	2

表1中综合处治段的高低峰值、连续异常长度和轨枕空吊数量均处于高档，说明整治重点应由轨面保养转向路基、排水

和道床组合处理；轻微冻胀地段跟踪周期较长，适合巡检复测和小机捣固控制；反复冻害地段跟踪周期缩短至3d，体现同一里程复发时应提高动态检测和现场复核密度。

4 典型冻害地段状态解析

4.1 冻害地段几何状态概况

典型冻害地段通常具有明确空间边界。线路进入负温期后，异常里程多集中在排水汇集、路基填挖交界、桥涵台背和道床污染区，轨面高低曲线先出现局部抬升，再向相邻轨枕跨扩展；当冻胀体下部水分补给稳定时，峰值位置在数周内变化不大，但幅值会随低温持续时间增加。若整治仅对轨面实施起拨道，短期检测值可以回落，下一次低温过程仍会在同一位置出现上拱。状态概况还应标明病害与涵洞、边沟和积雪阴坡之间的空间关系^[6]。若以典型地段建立状态画像，可把线路分成水害诱发型、填料敏感型、过渡段刚度突变型和道床污染型。水害诱发型重点看排水出口和汇水路径，填料敏感型重点看基床细颗粒和含水量，过渡段重点看差异沉降，道床污染型重点看翻浆、板结和空吊。分类越清楚，后续整治越能避开泛化处理。

4.2 冻害传导下几何偏差分析

几何偏差分析应先区分冻胀峰值、坡率突变和春融残余三类指标。冻胀峰值决定严寒期行车安全控制，坡率突变影响车辆垂向加速度和轮轨冲击，春融残余反映基床压密和道床污染程度。单一幅值指标不足以描述车辆动力响应，连续测点之间的变化率和多指标耦合更能揭示养修需求。现场判定时还应把相邻测点差值、轨枕空吊范围、道床含水征象和扣件状态一并纳入，避免把结构性冻害误判为普通高低不良^[7]。几何偏差还应和列车运行感受互相印证。若曲线峰值较小但坡率变化集

中，车辆垂向响应仍可能明显；若高低偏差已经回落，但添乘仍有周期性晃动，则可能存在支承空吊或道床弹性不均。分析时要把几何曲线、现场支承和车辆响应放在同一里程轴上，才能找准整治对象。

4.3 整治效果轨道指标判定分析

整治效果应以轨道几何指标稳定性而不是一次作业后的即时读数判定。严寒期整修后，高低峰值、水平差和三角坑应降至运营安全控制范围，春融期复测时同一里程不应出现反向沉陷扩大；若轨面读数合格但轨枕空吊、道床翻浆或排水沟积水仍存在，病害里程仍属于复发风险点。判定分析应保留整治前、整治后、严寒期复测和春融期复测四类状态；若任一环节反复恶化，则应提高处治等级。效果判定还要区分一次恢复和耐久恢复。一次恢复关注作业后几何指标是否回到控制范围，耐久恢复关注下一次低温和春融过程是否仍保持稳定。对综合处治段，应同时检查排水沟、防冻层、换填区和轨枕支承，避免只因轨检值短期合格就结束跟踪。

5 结语

冻害地段轨道几何状态变化具有季节性、空间集中性和多指标耦合特征。负温期水分迁移和冰晶增长使路基及道床局部上拱，春融期承载力下降又诱发沉陷和残余偏差，轨面高低、水平、轨向及轨距由此形成连续变化链。有效整治应先利用轨检车数据、人工静检和水热条件调查识别冻胀节点，再按轻微冻胀、局部上拱、反复冻害和春融沉陷等状态选择保养整修、排水恢复、基床换填、防冻层设置和捣固复测等措施。同一里程的多期指标变化比单次读数更能说明整治耐久性；只有高低峰值、水平差、轨枕支承和春融残余量同步稳定，冻害整治才具备持续效果。

参考文献：

- [1] 杨文,戴少石,李茂,等.重载铁路路基冻害识别方法[J].铁道建筑,2026,66(3):52-56.
- [2] 王堃.季冻区铁路路基冻害防治技术研究综述[J].中国设备工程,2026,(14):203-206.
- [3] 殷庆霄.关于铁路路基冻害治理的研究[J].减速顶与调速技术,2024,(4):30-32.
- [4] 邱德仁.关于铁路路基冻害防治的实践与探索[J].哈尔滨铁道科技,2024,(2):8-11.
- [5] 曹密,苏云鹏,张先军,等.敦白高速铁路路基冻胀规律及冻害成因[J].铁道建筑,2024,64(6):130-135.
- [6] 胡田飞,李天峰,袁一飞,等.冻土地区铁路路基冻害防控技术综述[J].铁道学报,2025,47(4):141-154.
- [7] 朱志有,王磊,刘振奇,等.季节性冻土区铁路路基冻害研究现状[J].中国铁路,2022,(3):124-130.