

重载铁路无缝线路稳定性分析

刘月

国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司 062350

【摘要】重载铁路无缝线路属于现代铁路运输关键技术基础,肩负着保障列车安全运行的关键使命。在运输需求快速增长的情形下,无缝线路稳定性变为提升重载运输能力的核心要点,其对于提高运营效率以及降低维护成本等层面有着关键作用。然而重载铁路无缝线路仍有着诸多技术难题,这些问题对重载铁路的安全运营与发展造成了制约。本文以无缝线路稳定性机理作为切入点,详细分析了影响因素与作用机制,并且提出了系统性的保障措施与控制策略,期望可为重载铁路无缝线路的设计施工以及养护维修给予理论指导和实践参考。

【关键词】重载铁路;无缝线路;稳定性;温度力;道床横向阻力

Stability analysis of seamless railway with heavy load

Liu Yue

Suning Branch of Guoneng Shuohuang Railway Development Co., LTD 062350

【Abstract】Seamless tracks for heavy-haul railways are a key technological foundation of modern railway transportation, tasked with ensuring the safe operation of trains. In the context of rapidly growing transport demand, the stability of seamless tracks has become a core focus in enhancing heavy-haul transport capacity. It plays a crucial role in improving operational efficiency and reducing maintenance costs. However, seamless tracks for heavy-haul railways still face numerous technical challenges that constrain their safe operation and development. This paper focuses on the mechanisms of seamless track stability, providing a detailed analysis of influencing factors and their mechanisms. It also proposes systematic measures and control strategies to provide theoretical guidance and practical references for the design, construction, and maintenance of seamless tracks for heavy-haul railways.

【Key words】heavy railway; seamless track; stability; temperature force; transverse resistance of ballast

铁路运输的重载化以及高速化发展,对无缝线路提出了更为严格的要求。无缝线路因为消除了钢轨之间的间断,有平顺性良好、可减少冲击以及降低维修费用等诸多优点,已然成为现代铁路线路的主要形式。随着轴重不断增大、运量持续提升,重载铁路无缝线路面临着道床横向阻力不够、温度力控制艰难等一系列技术挑战。在极端气候状况下,温度力与重载荷载的耦合作用使得轨道结构的失稳风险加剧,深入研究重载条件下无缝线路的稳定性机理,对于提升无缝线路设计施工水准、保障运营安全有着关键的理论价值与工程意义。

一、无缝线路稳定性基本理论

(一)无缝线路失稳机理

无缝线路失稳的机理源自钢轨温度应力和外部荷载之间复杂的耦合作用。在钢轨温度升高时,内部积累的压缩应力会致使轨道框架出现横向变形的趋势,此变形在初始阶段呈现出弹性的特性,轨道结构依旧可维持稳定的状态^[1]。随着温度不断升高,压缩应力渐渐接近临界值,轨道框架的几何非线性效应变得日益明显。一旦触发动态失稳的过程,钢轨内储存的巨大弹性势能会迅速释放,引发轨道框架的横向

突变位移,这种失稳现象和道床横向阻力的非线性特性紧密相连,当横向位移超过临界值时,道床阻力会呈现出软化的特征,从能量的角度而言,失稳过程实际上是系统势能从局部极小值状态向新的平衡位置跃迁的过程。

(二)温度力作用特性

温度力的作用特性具体呈现在钢轨纵向应力和温度变化所存在的非线性关系中,钢轨因温度发生变化产生热胀冷缩的情况,这会受到轨道扣件系统的限制约束,最终在钢轨内部形成温度应力,该应力随着温度的改变呈现出十分突出的非对称特性,当钢轨冷缩时主要体现为拉应力,而在热胀时则是以压应力作为主要表现形式^[2]。在实际工程中,零应力轨温的选择会直接对温度力的分布状态造成影响,轨道结构里的扣件系统刚度以及轨枕间距等相关参数,会对温度力的传递特性产生一定影响,在重载的条件之下,列车荷载和温度力的叠加作用会让应力分布变得更为复杂,需要借助合理控制零应力轨温的方式来降低其产生的不利影响。

(三)稳定性控制理论

无缝线路稳定性控制重点在于关注轨道结构在不同工况时的变形特点以及受力状况。轨道结构稳定性的维持依靠道床横向阻力跟轨道框架刚度共同发挥作用,只要其中任何一方被削弱,就有可能引发稳定性方面的问题。在重载运

输的条件下,借助合理调控零应力轨温、改进道床横向抗力、提高扣件系统性能等方式,可切实提高轨道结构的整体稳定性。具体的措施覆盖优化道床断面形状、调整道碴级配、改进扣件结构等工程办法,结合温度监测以及位移观测等手段,可达对轨道结构稳定状态的动态监控。

二、影响无缝线路稳定性的主要因素

(一) 温升幅值影响

温升幅值对于无缝线路稳定性所产生的影响呈现出累积效应的特点。环境温度会随季节发生变化,同时列车运行过程中产生的摩擦热与之相互叠加,最终使得钢轨实际温度高于环境温度。在重载运输条件下,列车频繁制动所产生的热量积累变得日益明显,促使钢轨温度迅速升高。实践证明,当钢轨温度超出设计锁定轨温 20°C 时,轨道框架非常容易出现失稳的情况^[3]。在夏季正午时段,阳光直接照射会致使钢轨温度急剧上升,再加上列车制动产生的热量没办法及时散发出去,很容易形成温度力峰值,这种温升幅值的剧烈改变会让轨道结构的变形趋势加剧,使得整体稳定性降低,需要采取降温措施来进行有效的防控。

(二) 初始不平顺影响

轨道初始不平顺是在钢轨制造、运输以及铺设过程中所形成的几何偏差造成的。具体体现为轨道平面和高程出现局部变形,这些初始存在的缺陷会致使轨道结构的临界失稳载荷降低,成为诱发轨道变形的薄弱部位。在重载运输状况下,初始不平顺的地方通常会成为应力集中的点,使得局部变形在动载荷的作用下逐步扩大。实践经验显示,当初始弯矢值每增加 1mm 时,轨道失稳的临界温度就会下降 2 至 3°C ,严格把控钢轨制造精度、规范施工工艺以及加强铺设质量检验等举措,对于提升无缝线路的稳定性有着关键的作用。

(三) 轨道框架抗弯刚度影响

轨道框架抗弯刚度所代表的是轨道结构对变形的抵抗能力,这种能力主要是由钢轨断面特性、扣件系统性能以及轨枕参数所决定的。在重载条件下,轨道框架会承受极大的垂向荷载以及横向力,这便对抗弯刚度提出了更高的要求,扣件系统的弹性特性会直接对轨道框架的整体性能产生影响,其纵向阻力以及扭转刚度对于抑制钢轨爬行、防止轨头倾斜有着关键作用。混凝土轨枕的截面尺寸以及配筋方案同样会对框架刚度产生影响,合理进行轨枕间距设计可提供更好的支撑效果,依靠对各部件参数加以优化,提升扣件系统性能,可提高轨道框架的抗弯能力,提高无缝线路的整体稳定性。

(四) 道床横向阻力影响

道床横向阻力给无缝线路提供了基础的稳定保障,其具体大小主要受到道碴料级配、道床断面尺寸以及道床养护状态等影响^[4]。在重载运输条件下,道床结构会长时间承受振动荷载,这容易致使道碴粒料的棱角出现磨损,并且使得道

床密实度有所降低,对横向阻力造成削弱,道床横向阻力呈现出十分突出的非线性特征,当轨道位移超过临界值的时候会出现软化现象,让失稳过程加剧。相关研究显示,道床横向阻力的衰减和道碴污染程度紧密相关,当道碴中细粒含量每增加 10% 时,横向阻力大概可降低 15% ,维持道床结构的完整、保证道碴质量以及及时清筛受到污染的道碴,成为维持无缝线路稳定性的关键举措。

三、重载条件下无缝线路稳定性特征

(一) 重载荷载效应分析

重载列车在运行过程中会产生巨大的动态荷载,这种荷载对无缝线路的稳定性有着较为深远的影响,当高轴重车辆凭借的时候,钢轨会承受相当的垂向压力以及横向力,这些力反复作用就会致使轨道结构出现累积变形。随着重载运输密度不断增大,道床振动变得更加剧烈,使得道碴颗粒间的嵌挤作用有所减弱,降低了道床的横向约束能力。重载车辆运行所产生的离心力在曲线段表现得非常明显,这加剧了轨道横向变形的趋势。在大轴重的情况下,钢轨与轮缘的接触应力增大,使得钢轨表面磨损加快,改变了轮轨接触状态,对轨道结构的受力特性以及稳定性能造成影响。

(二) 制动力对稳定性的影响

重载列车制动过程对无缝线路稳定性的影响体现在诸多方面。制动之时产生的强大纵向力经由轮轨接触面传递至钢轨,引发轨道结构出现纵向位移的趋势。在长大坡道区域,列车频繁制动会致使制动热量不断积累,使得钢轨温度迅速上升,超出环境温度达 15 至 20°C 。制动进程中,鉴于多台机车分布于列车的不同位置,故而容易出现制动力不同步的状况,导致轨道结构承受不均匀的纵向力。实践中发现,站前下坡道制动区段大多时候成为无缝线路失稳的高发地段,这主要是由于制动热与纵向力的叠加作用降低了轨道结构的稳定性能。

(三) 疲劳损伤累积效应

在重载运输的条件之下,轨道结构所出现的疲劳损伤呈现出了较为突出的累积效应,钢轨在循环荷载发挥作用的情况下会产生表面疲劳裂纹,随着载荷次数不断增加,裂纹会慢慢朝着深度方向进行扩展,改变了钢轨原本的力学性能,扣件系统长时间承受动态载荷,弹条出现疲劳松弛使得扣压力下降,这便减弱了轨道框架的整体性。道床结构在反复振动的状况下会逐渐变得松动,道碴颗粒的棱角遭到磨损致使其咬合力降低,道床横向阻力呈现出退化的趋势,这种疲劳损伤的积累过程有渐进性的特征,各个部件性能的衰减彼此之间存在影响,最终致使轨道结构整体稳定性能出现降低的情况。

(四) 轨道结构服役性能变

轨道结构在重载运输条件之下的服役性能呈现出一定的时变特性。随着运营时间不断增加,钢轨表面生出波磨、

侧磨等病害,改变了轮轨接触状态,加剧了动力作用效应,扣件系统出现老化状况,使得其弹性性能有所下降,致使轨道结构的整体性慢慢变弱,混凝土轨枕表面出现裂纹、剥落等损伤情况,影响到其支撑性能。道床结构因道碴破碎、污染等问题,横向阻力持续降低,这些性能退化现象彼此相互作用,致使轨道几何状态恶化速度加快,维修周期缩短,在曲线地段,因附加应力产生影响,各部件的性能衰减更为较大,对轨道结构的稳定性造成更大威胁。

四、无缝线路稳定性保障措施

(一) 设计阶段控制要点

无缝线路设计阶段的控制要点覆盖诸多关键环节,要全面考量运输条件以及环境因素^[5]。锁定轨温的确定要充分顾及地区气温特性,合理挑选施工季节,以此保障钢轨应力水平处在安全范围之内,道床结构设计时,借助优化道碴级配、增大道床横向尺寸、提升道床肩高度等办法来提高横向稳定性。扣件系统选型需要权衡弹性和刚度之间的关系,一方面要保证有足够的纵向阻力,另一方面要适应温度变形的需求,轨枕类型与间距的确定应当考虑重载荷载的特点,合理安排防爬器的位置,在曲线段、桥隧过渡段等特殊地段,要采用加强型道床断面以及特殊扣件形式,提高局部稳定性。

(二) 施工质量保证措施

无缝线路施工质量控制在整个铺设过程中都有体现,要严格依照技术规范要求来执行。在钢轨运输以及存放的过程中,要防止产生永久变形,对于焊接作业而言,要严格把控焊缝质量,以此保证接头平直度符合标准,长轨铺设之前需要进行预应力调整,将运输过程中产生的应力消除掉。铺设作业要在合适的轨温区间开展,对钢轨温度变化进行实时监测,保证锁定轨温的准确性,道床填筑以及捣固作业要保证道碴级配合格,道床横向尺寸达到标准,并且凭借多遍捣固来实现均匀密实,扣件安装过程中要严格控制扭力矩,保证轨距、水平以及轨向等各项几何尺寸符合设计要求,为无缝线路的稳定运营奠定基础。

(三) 运营维护技术要求

无缝线路的运营维护工作要构建完善的检测评估以及养护制度,借助定期展开钢轨伤损检测、轨温监测、轨道几

何状态检查等工作,可及时了解线路的服役状态,养护作业应当严格依照“四不超”原则来进行,也就是作业时温度不能超过规定值、起道高度不能超过限定高度、扒碴长度不能超过一定长度、拨道量不能超过规定数量。道床维护方面要重视维持道碴料级配符合标准,适时补充道碴,以此保证道床横向阻力达到要求,对扣件系统开展定期的检查维护工作,及时更换损坏的零件,让扣压力保持在达标的状态,针对曲线地段、特殊区段等薄弱部位,制定专门的养护方案,增加检查与维修的周期,建立完备的维修质量评估体系,保证各项技术指标始终契合运营的要求。

(四) 应急处置与防护措施

无缝线路应急处置工作要构建起完备的预警机制以及快速响应体系,在高温季节来临之际,需强化轨温监测工作,以此来确立分级预警标准,合理把控列车运行速度,一旦察觉到轨道位移出现异常情况,要即刻安排人员前往现场展开检查,并采取如提高道床横向阻力、调整轨温等措施。要是发生胀轨现象,需马上采取降温、加固等应急处理手段,在必要之时实施临时限速,对于严重胀轨的地段,要凭借切割钢轨来释放应力,并且使用应急夹板进行临时加固,要做好防护设施的配备工作,涉及应急器材、降温设备等,保障应急处置工作可快速且有效地开展,另外还要建立事后评估机制,对事故原因进行总结分析,完善防护措施,提升应急处置能力。

结束语

重载铁路无缝线路的稳定性问题与铁路运输安全和效率紧密相连,对其展开研究可为工程实践提供关键指导,经过对温升幅值、初始不平顺、轨道框架刚度以及道床横向阻力等关键因素影响机理的系统分析,成功指出重载条件下无缝线路失稳的特征及其演变规律,研究显示,借助优化设计参数、严格把控施工质量、强化运营维护以及完善应急处置等综合举措,可切实保障无缝线路的稳定性。随着重载铁路朝着更高轴重、更大密度的方向发展,无缝线路稳定性控制技术会持续创新,新型轨道结构以及智能监测手段的应用会为无缝线路的安全运营给予更为可靠的技术支持。

参考文献

- [1]李翠欣.铁路简支梁桥上曲线地段无缝线路稳定性研究[D].石家庄铁道大学, 2024.
 - [2]潘振, 谢铂泽, 马战国.路基区段有砟轨道无缝线路震后稳定性分析[J].铁道建筑, 2022, 62(01): 39-42.
 - [3]张斌, 徐玉坡.朔黄铁路桥上无缝线路监测系统设计研究[J].铁道建筑, 2022, 62(01): 47-50.
 - [4]魏朝雄.重载铁路无缝线路稳定性分析[J].中国高新技术企业, 2015, (34): 89-90.
 - [5]刘莺春, 周晶, 田英, 等.重载铁路无缝线路稳定性分析[J].中国铁路, 2009, (06): 67-69.
- 作者简介: 刘月(1993.02-)男, 河北保定人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 铁路线路工。