

重载铁路路基填料改良与压实工艺优化

李 鹏 常云云

陕西煤业化工建设（集团）有限公司路桥分公司 陕西 西安 710021

摘 要：重载铁路路基长期承受高频循环动荷载，填料性能与压实工艺直接决定路基服役安全。本文围绕填料改良与压实工艺优化展开论述，分析重载荷载分布特征与循环变形累积机理，明确填料强度、刚度及水稳定性等性能要求。在此基础上，探讨水泥、石灰、粉煤灰等化学改良技术的作用机理与复合配比优化方法，剖析粗颗粒嵌锁骨架搭建与级配连续性控制等物理改良手段。结合分层填筑厚度与压实能量匹配、碾压机械选型及遍数控制等工艺参数，提出压实质量动态检测与工艺闭环优化策略，为重载铁路路基施工提供技术支撑。

关键词：重载铁路；路基填料；改良技术；压实工艺

引言：重载铁路轴重与牵引质量远超普通线路，轮轨荷载以密集序列形式反复作用于路基，引发不可逆累积变形与强度衰减，对填料力学性能及压实质量提出严苛要求。既有填料普遍存在强度不足、级配离散、水稳定性差等问题，传统压实工艺难以匹配重载工况下的高标准需求。围绕填料化学改良与物理改性机理、级配优化方法及分层压实工艺参数控制等关键技术环节展开系统梳理，对提升路基长期承载能力与运营安全性具有显著工程价值。

1 重载铁路路基荷载特征与填料性能要求

1.1 重载列车轴重与运营荷载的分布特点

重载列车轴重普遍处于 250 至 300 千牛区间，部分线路轴重可达 375 千牛。荷载沿线路纵向呈现长编组密集分布特征，车辆转向架间距较小，轮轴荷载在短距离内连续作用，形成密集荷载序列^[1]。横向荷载分布呈现非均匀特征，路基面竖向动应力横向大致呈 M 形分布，轨下区域应力峰值显著高于两侧路肩区域，应力衰减速率随深度增加逐步放缓。荷载传递路径具有明确层次性，轮轨接触应力经轨枕、道床传递至路基表层，再逐步向深层扩散，表层应力集中效应最为显著。

1.2 循环动荷载对路基长期变形的累积影响

列车运营过程中路基承受高频低幅循环动荷载作用，荷载作用频次随行车密度提升显著增加，部分线路日作用频次可达数千次。循环荷载作用下土体产生不可逆塑性变形，累积应变随作用次数增加呈非线性增长趋势，初期变形速率较快，后期逐步趋于稳定。低幅循环荷载下累积应变速率随振动次数增加逐渐减小并趋近于零，高幅循环荷载下累积应变速率则会持续增大，最终

导致结构破坏。长期循环作用引发土体颗粒重新排列，孔隙结构持续调整，细粒填料易出现颗粒迁移，粗粒填料则发生骨架嵌挤松弛，共同加剧路基永久变形发展。

1.3 路基填料在重载条件下的强度与刚度需求

重载工况下填料需具备高抗剪强度，抵御轮载传递的剪切应力，防止路基发生剪切破坏，基床表层填料 CBR 值需满足规范限定，保障局部承压能力。刚度指标需匹配荷载传递需求，基床表层动态变形模量需达到规定数值，回弹模量维持在 200 至 550 兆帕区间，控制动应力传递过程中的变形量。填料需具备良好的抗疲劳性能，在反复荷载作用下强度衰减幅度控制在合理范围，避免长期运营后出现结构性弱化。基床不同层级填料刚度需形成合理梯度，表层刚度最高，向下逐步递减，实现应力均匀扩散，减少应力集中引发的变形问题。

1.4 填料颗粒级配对路基承载性能的制约

颗粒级配决定填料密实度与骨架结构稳定性，良好级配需实现粗细颗粒逐级填充，粗颗粒形成承载骨架，细颗粒填充孔隙，提升整体嵌挤强度。不均匀系数与曲率系数需处于合理区间，保障颗粒分布连续性，避免出现颗粒离析或架空现象，降低压实后空隙率。粗颗粒含量过高会导致孔隙率增大，细粒不足引发压实不均；细颗粒含量过高则降低填料透水性，遇水易软化，削弱承载能力。级配曲线形态影响填料回弹模量与抗变形能力，圆滑连续的级配曲线可使填料在荷载作用下应力分布更均匀，减少局部应力集中。

2 路基填料化学改良技术

2.1 水泥改良填料的水化反应与强度提升机理

水泥掺入填料后，其主要矿物成分硅酸三钙、硅酸

二钙与填料中的自由水发生水化反应,生成水化硅酸钙凝胶与氢氧化钙晶体。水化硅酸钙凝胶具有极强胶结能力,可将填料颗粒紧密胶结形成整体结构,氢氧化钙晶体填充颗粒间隙,进一步提升结构密实度^[2]。水化反应进程受水分含量、温度影响显著,适宜的水分条件可保证反应充分进行,温度升高可加快反应速率,缩短强度形成周期,最终通过胶结作用与密实度提升,实现填料整体强度的显著改善。

2.2 石灰改良填料的离子交换与骨架作用原理

石灰掺入填料后,与水分反应生成氢氧化钙,解离出钙离子与氢氧根离子。钙离子可与填料颗粒表面吸附的钠、钾等阳离子发生交换,降低颗粒表面电位,减少颗粒间排斥力,促使颗粒凝聚团聚,形成结构稳定的团聚体。同时,氢氧化钙与填料中的活性二氧化硅、氧化铝发生火山灰反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶结物质,增强颗粒间胶结强度。石灰水化生成的晶体物质填充颗粒间隙,形成刚性骨架结构,约束填料颗粒位移,提升填料抗变形能力,尤其针对细粒土填料,可有效改善其遇水软化特性,强化整体结构稳定性。

2.3 粉煤灰改良填料的火山灰效应与孔隙填充作用

粉煤灰富含活性二氧化硅与氧化铝,在碱性环境下可与水泥、石灰水化生成的氢氧化钙发生火山灰反应,生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶结产物,补充胶结物质,增强填料颗粒间联结强度。粉煤灰颗粒呈球形玻璃体,质地致密,可填充填料颗粒间的空隙,减少孔隙率,提升填料密实度,同时降低填料渗透性。球形颗粒还能改善填料颗粒级配,减少颗粒间摩擦阻力,便于压实作业,提升压实效率与压实质量。火山灰反应持续时间较长,可逐步提升改良土长期强度,同时粉煤灰的掺入可降低改良成本,实现工业废料资源化利用。

2.4 复合改良剂配比优化与室内试验方案

复合改良剂配比优化需结合填料性质,基于单一改良剂作用特点,通过合理搭配水泥、石灰、粉煤灰等组分,发挥各组分协同作用,弥补单一改良剂不足。配比优化需重点考虑各组分掺量对改良土强度、密实度的影响,确定最优掺量范围。室内试验方案需围绕配比优化展开,设置不同掺量梯度的复合改良剂试样,通过击实试验确定最优含水率与最大干密度,通过无侧限抗压强度试验测定不同龄期强度指标,通过渗透试验与收缩试验评估改良土水稳定性与收缩特性,为现场施工提供科学依据。

2.5 改良土长期性能衰减与耐久性控制

改良土长期性能衰减主要源于胶结物质老化、环境因素侵蚀及荷载作用损耗。长期暴露于大气环境中,胶结物质易发生碳化反应,导致强度下降;水分反复侵蚀会溶解胶结组分,破坏颗粒间联结;循环动荷载作用会加剧胶结结构破损,引发性能衰减。耐久性控制需从材料选用、配比优化与施工控制入手,选用活性高、稳定性好的改良剂,优化配比提升胶结结构稳定性,施工中确保压实充分,减少孔隙率,同时设置合理排水设施,防止水分滞留,避免冻融循环、干湿交替对改良土结构造成破坏,维持改良土长期服役性能。

3 路基填料物理改良与级配优化

3.1 不同粒径颗粒的嵌锁效应与骨架搭建原理

路基填料物理改良核心依赖不同粒径颗粒的嵌锁效应构建稳定承载骨架,粗颗粒作为骨架核心,颗粒间通过棱角接触形成相互咬合的嵌锁结构,抵御荷载作用下的颗粒位移。中细颗粒填充粗颗粒间空隙,增强颗粒间接触紧密性,提升嵌锁结构稳定性^[3]。大粒径颗粒可承受并传递主要荷载,限制整体变形,中粒径颗粒填充大颗粒间隙,细化骨架结构,小粒径颗粒进一步填充微小孔隙,降低结构空隙率。嵌锁效应强弱与颗粒形状、粒径差异相关,棱角分明的颗粒嵌锁能力更强,合理的粒径梯度可使嵌锁结构更稳定,为路基提供充足承载能力。

3.2 填料级配曲线的连续性控制与调整方法

填料级配曲线连续性直接决定改良效果,连续级配可实现粗细颗粒逐级填充,避免出现断级现象导致的结构缺陷。级配曲线连续性控制需确保曲线无明显陡降段,粒径分布均匀,不均匀系数与曲率系数控制在合理区间。调整方法以掺配为主,针对断级配填料,掺入缺失粒径区间的颗粒,补全级配短板;针对级配过粗或过细的填料,分别掺入细颗粒或粗颗粒,调整曲线形态,使曲线趋于圆滑连续,确保各粒径颗粒比例合理,为后续压实作业奠定基础。

3.3 粗颗粒掺配改善细粒土压实性能的工艺

细粒土填料含水量高、压实难度大,掺入粗颗粒可有效改善其压实性能。粗颗粒掺配需根据细粒土性质确定掺配比例,优先选用级配良好、强度高的粗颗粒材料。掺配工艺需保证粗细颗粒混合均匀,先将粗颗粒摊铺平整,再均匀撒布细粒土,通过机械搅拌实现颗粒充分混合,避免出现颗粒离析。搅拌后需及时进行碾压,

利用粗颗粒骨架作用,提升细粒土压实密实度,减少压实过程中的水分迁移,改善细粒土遇水软化、干缩开裂等问题。

3.4 填料含水率与最优含水率的匹配控制

最优含水率是填料达到最大干密度的关键参数,含水率过高会导致颗粒间润滑作用增强,碾压时易出现软弹、推移现象;含水率过低则颗粒间摩擦力过大,难以压实。匹配控制需通过试验确定不同填料的最优含水率,施工中实时检测填料天然含水率,若含水率过高,采用晾晒、翻拌等方式降低水分;若含水率过低,适量洒水湿润,确保填料含水率控制在最优含水率 $\pm 2\%$ 范围内,保障压实效果,提升路基承载稳定性。

4 重载路基分层填筑与压实工艺

4.1 分层填筑厚度与压实能量的匹配关系

分层填筑厚度与压实能量的适配的核心是确保压实能量有效传递至填筑层底部,避免厚度过大导致下层压实不足或厚度过小影响施工效率。压实能量由碾压机械吨位、激振力决定,填筑厚度需根据压实能量合理调整,厚度增加需对应提升压实能量,否则易出现深层土体密实度不足,引发后期沉降。填筑厚度过薄会造成压实能量浪费,增加施工工序与成本,还可能导致表层土体过度压实出现结构破损^[4]。适配关系需结合填料类型调整,粗粒土可适当增加填筑厚度,细粒土或改良土需减小厚度,确保压实能量渗透均匀,实现每层密实度达标。

4.2 碾压机械选型与激振力参数的合理配置

碾压机械选型需结合填料性质与填筑层级,重载路基优先选用重型振动压路机,粗粒土填料适配单钢轮振动压路机,增强颗粒嵌锁效果,细粒土改良填料可选用凸块式压路机,强化揉搓压实作用。激振力参数配置需贴合填筑厚度与填料密实度要求,激振力过小无法克服颗粒间摩擦力,难以达到设计密实度;激振力过大易导致填料颗粒破碎,破坏级配结构。激振频率需与填料颗粒固有频率适配,提升能量传递效率,避免无效振动。

4.3 碾压遍数与压实度之间的对应控制标准

碾压遍数与压实度呈非线性关联,初始碾压阶段压实度提升速度较快,随遍数增加提升速率逐步放缓,达到一定遍数后压实度趋于稳定。控制标准需通过试验路段数据确定,结合填料类型、压实机械参数明确对应关系,避免碾压遍数不足导致压实度不达标,或过度碾压造成能源浪费与土体结构损伤。碾压过程中需实时观察土体状态,结合压实度检测数据调整遍

数,确保压实度符合重载路基各层级技术要求,兼顾压实效率与工程质量。

4.4 层间结合面处理与搭接部位的碾压补强

层间结合面处理核心是消除层间薄弱环节,避免后期运营中出现层间滑移。填筑上层填料前,需对下层顶面进行拉毛、翻松处理,清除浮土与杂物,确保层间颗粒紧密接触,提升粘结强度。搭接部位易出现压实盲区,需采用错位搭接方式,扩大碾压覆盖范围,对搭接区域进行碾压补强。补强碾压需调整机械运行参数,放慢碾压速度,增加碾压遍数,确保搭接部位密实度与主体区域一致,消除压实薄弱点,保障路基整体连续性与稳定性。

4.5 压实质量检测与工艺动态优化方法

压实质量检测需采用无损检测与抽样检测相结合的方式,实时监测压实度、动态变形模量等指标,检测点分布需均匀,覆盖全断面各关键部位。检测数据需及时分析,判断压实工艺参数合理性,针对检测中发现的密实度不足、压实不均等问题,动态调整施工参数。优化方法包括调整填筑厚度、激振力、碾压遍数及机械运行速度,结合填料含水率变化优化碾压时机,同时总结施工数据,形成适配具体工程的压实工艺参数体系,确保压实质量持续提升。

结束语

重载铁路路基填料改良与压实工艺优化,是保障线路长期安全运营的关键技术支撑。化学改良借助水泥水化与石灰火山灰反应提升填料胶结强度,物理改良通过粗颗粒嵌锁与级配连续性控制构建稳定骨架,二者协同弥补天然填料性能短板。分层填筑厚度与压实能量的精准匹配、碾压机械与激振参数的合理配置,保障了每层压实质量的均匀可控。压实质量动态检测与工艺闭环优化机制的建立,实现了施工参数的实时调整与持续改进,为重载铁路路基高质量建设奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] 王伟刚,李岩.重载铁路路基填料性能改良试验研究[J].岩土工程技术,2024,38(3):344-350.
- [2] 冀国华,张栋.原位改良土复合结构层整治重载铁路路基翻浆冒泥技术研究[J].铁道建筑,2025,65(9):87-91.
- [3] 商拥辉,徐林荣.重载铁路水泥改良土路基动力特性试验研究[J].振动工程学报,2021,34(6):1276-1283.
- [4] 商拥辉,徐林荣,刘维正,等.重载铁路改良土和A组填料过渡段的动力特性[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(6):2128-2136.