

文章编号: 1674—8247(2024)03—0110—05

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2024. 03. 020

## 高速铁路隧道轨道板上拱切割落道施工技术

杨星智<sup>1,2,3</sup> 冀胜利<sup>2</sup> 李曙光<sup>2</sup> 何炳兴<sup>2</sup> 刘 博<sup>2</sup> 赵小飞<sup>2</sup>

(1. 中铁二十局集团第三工程有限公司, 重庆 400060; 2. 中铁二十局集团有限公司, 西安 710016;  
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:**某隧道仰拱在地质构造应力及承压富水环境的综合作用下, CRTSI 型双块式无砟轨道道床板出现上拱变形和平面移位, 最大上拱变形值达 47.1 mm, 最大横向移位达 10 mm, 超出常规扣件可精调的范围。本文提出了一种利用绳锯切割仰拱填充(即找平层), 以实现道床板与下部隧道结构分离落道的施工方法, 利用千斤顶、水平顶推装置、气垫等方式进行道床板平面位置或高程姿态调整。结果表明: 该技术避免了因道床板及仰拱填充层大拆大换造成的行车中断, 降低了拆除和重建成本, 保证了无砟轨道结构整体性受力, 经济、社会效益显著。研究成果可为类似道床板线性大尺度偏位处理提供借鉴。

**关键词:**隧道; 轨道板; 绳锯切割; 仰拱填充; 落道; 姿态调整

中图分类号: U457.2; U216 文献标志码: A

## A Technology for Upwarped Track Slab Cutting and Track Lowering in High-speed Railway Tunnels

YANG Xingzhi<sup>1,2,3</sup> JI Shengli<sup>2</sup> LI Shuguang<sup>2</sup> HE Bingxing<sup>2</sup> LIU Bo<sup>2</sup> ZHAO Xiaofei<sup>2</sup>

(1. The Third Engineering Co., Ltd. of China Railway Twentieth Bureau Group Co., Ltd., Chongqing 400060, China; 2. China Railway Twentieth Bureau Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China;  
3. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The tunnel invert underlain by geostress and hydrostatic pressure in water-bearing strata has led to upwarping deformation and planar displacement of CRTSI bi-block ballastless track bed slab, with maximum upwarping deformation reaching 47.1 mm and maximum lateral shift of 10 mm, surpassing the adjustable range of conventional fasteners. This paper presented a technology utilizing wire saw cutting of the invert infill (levelling layer) to facilitate separation and track lowering of the track bed from the underlying tunnel structure, incorporating jacks, horizontal push devices, air cushions, and other means for planar position or elevation adjustments of the track bed. Results demonstrate that this technology circumvents the need for disruptive and costly dismantling and reconstruction associated with extensive track bed and invert infill replacement, preserves the integral load-bearing capacity of the ballastless track structure, and yields significant economic and social benefits. The findings offer valuable references for addressing large-scale linear displacements in similar track bed scenarios.

**Key words:** tunnel; track slab; wire saw cutting; invert infill; track lowering; attitude adjustment

随着国内高速铁路大面积建设和运营, 我国高速铁路发展即将进入既有设备的维护时代。中国作为一个地

收稿日期: 2022-09-30

作者简介: 杨星智(1987-), 男, 高级工程师。

引文格式: 杨星智, 冀胜利, 李曙光, 等. 高速铁路隧道轨道板上拱切割落道施工技术[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(3): 110-114.

YANG Xingzhi, JI Shengli, LI Shuguang, et al. A Technology for Upwarped Track Slab Cutting and Track Lowering in High-speed Railway Tunnels[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(3): 110-114.

域面积大国,地形地质复杂,气候环境多变。部分隧道出现无砟轨道上拱问题,影响车辆运营的舒适性。轨道上拱问题较严重区段甚至存在安全隐患,不得不进行列车限速或者线性姿态调整。

针对轨道上拱问题,国内众多学者对其产生原因及整改措施进行了研究。黄飞<sup>[1]</sup>针对长大隧道内双块式无砟轨道上拱病害,提出了采用铣磨承轨台的处理方法,该整治方案能有效处理上拱量 $\leq 40\text{ mm}$ 的病害。张国胜<sup>[2]</sup>等针对郑西高速铁路K 921+000~+208区段线路病害,提出无砟轨道结构局部重新施作、局部挖除及重植轨枕、道床板落道整治、打磨轨枕承轨台和道床现浇承轨台方案。张志远<sup>[3]</sup>分析了CRTS II型板式无砟轨道支承层伤损原因,提出基于绳锯切割的支承层伤损整治成套技术。袁丛军<sup>[4]</sup>针对无砟轨道路基上拱变形问题提出了在限速运行及天窗条件下宜采用暗挖置换方案。殷明旻<sup>[5]</sup>等提出了路基段轨道上拱变形问题的营业线天窗时间内无砟轨道重构整治方案。李铁钟<sup>[6]</sup>采用“隧底抗拔锚杆注浆锚固+轨道板植筋加固”方式进行上拱问题整治处理;赵彦旭<sup>[7]</sup>分析了岩溶隧道内的无砟轨道上拱原因,采用了增设泄水洞、排水减压、仰拱基础锚固等措施。杨春光<sup>[8]</sup>研究了板端植筋、板端植筋+板间切缝、凸台限位3种方式对于高速铁路隧道无砟轨道上拱问题的整治效果。还有学者分析了弹性支承块、整体道床以及线下基础,提出复杂艰险山区弹性支承块式无砟轨道结构病害整治方案。刘成杰<sup>[9]</sup>通过地质情况及补充勘探、土工试验对化马隧道仰拱变形的原因进行综合分析,提出对轨道异常段采取降压泄水、疏干地下水、注浆加固改良围岩、消除应力集中区等措施进行整治。王崇良<sup>[10]</sup>等通过蠕变试验、数值分析及理论分析研究了隧道底鼓病害机理,采取“隧底补强”措施抑制了隧道底鼓现象。杨延强<sup>[11]</sup>等针对黄土隧道内无砟轨道异常上拱病害,探讨了“钻孔桩+纵梁”加固补强措施的工程可行性及工程效果。杨星智<sup>[12]</sup>等基于隧道内轨道隆起病害的原因,提出了采用仰拱重做置换加强技术,增加钻孔桩锚固、自进式锚杆注浆等加固措施对仰拱质量缺陷进行加固处理的综合施工技术。李奎<sup>[13]</sup>等采用人工测量及补勘等手段,探索道床隆起病害的原因,提出了注浆、洞外锚固桩的整治措施。李强<sup>[14]</sup>采取限速45 km/h、锚杆加固隧道边墙、切断钢轨及道床板、设置短轨、分段拆换仰拱等措施实现了隧底上拱病害的整治。

综上所述,国内高速铁路隧道内无砟轨道病害的处理方式多为道床板下方仰拱拆换及加固处理等,或

打磨承轨台处理进行高程调整,而针对采用绳锯切割轨道板下方结构落道,实现高程和平面调整的报道相对较少。

本文以某隧道为依托,研究出一种利用绳锯切割仰拱填充(即找平层),以实现道床板与下部隧道结构分离落道的施工方法。研究成果可为类似道床板线性大尺度偏位处理提供借鉴。

## 1 工程概况

研究隧道地处青藏高原东北缘祁连山脉,平均海拔3 600~4 200 m,最高海拔4 430 m。隧道起讫里程DK 328+820~DK 335+370(K 1 965+538~K 1 972+088),全长6 550 m,为双线隧道。洞内线路纵坡为6‰、-9‰的人字坡,变坡点位于DK 332+250(K 1 968+968),除进口端2 260.707 m位于曲线上外,余均位于直线。线路DK 331+886(K 1 968+604)左侧设有一座长约1.1 km的永久斜井。

## 2 问题描述及成因

### 2.1 存在问题

隧道斜井工区K 1 968+500~K 1 968+680、K 1 968+800~K 1 969+150段及出口工区K 1 971+380~K 1 971+490段轨道出现上拱变形。

截至2021年3月,斜井工区轨道变形情况为:K 1 968+500~K 1 968+680、K 1 968+800~K 1 969+150区段的不均匀上拱,最大上拱量34.3 mm(上行)/47.1 mm(下行)(2020年标件数据计算),方向变化相对较少,在可调范围内。出口工区轨道变形情况为:上行线在K 1 971+380~K 1 971+490区段出现上拱并伴随轨向偏移,最大上拱点K 1 971+416附近,上拱量约38.2 mm(上行)/27.2 mm(下行),相应位置偏移量上下行均向线路两侧约10 mm。轨道累计变形值曲线如图1所示。

### 2.2 上拱原因分析

经补勘及专家分析,判定病害原因为:变形段位于岩性接触带附近,灰岩、板岩节理裂隙发育甚至高度发育;地质构造复杂,地应力高;地下水富集,具有承压性。在高地应力及地下承压水作用下,轨道结构出现上拱变形,局部出现平面偏移。

## 3 技术方案

对道床板上拱一般病害地段采取“打设泄水孔+

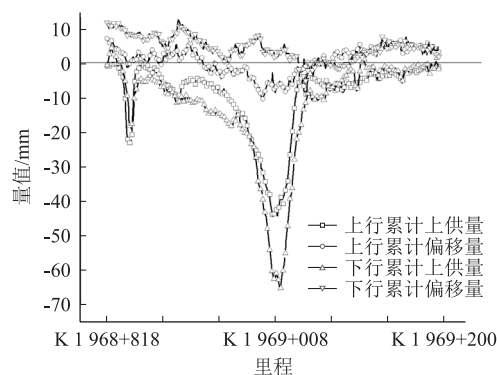


图1 轨道累计变形值曲线图(mm)

扣件精调顺接”进行处理。对道床板上拱值较大地段采取切割仰拱填充层降低轨面标高并进行方向纠偏,其主要施工工艺流程为:施工准备→轨道平面及高程测量→找平层混凝土凿除→道床板限位装置安装→绳锯水平导向孔施工→仰拱填充层水平切割、竖向切割、临时支撑、限位装置安装→顶推凿除混凝土、临时支撑垫块安装→道床板横移及精调→道床板落道及高程调整→去除临时支撑、灌注聚合物水泥砂浆→纠偏区段道床板植筋锚固、限位装置拆除、仰拱填充混凝土回填→轨道精调及逐级提速。

4 关键技术

4.1 施工准备

高速铁路隧道轨道板切割落道处理作为既有线天窗点施工,施工前应办理好各种施工手续,对管理人员、施工人员提前做好培训及交底,按照施工计划备足所需的各种机具设备及材料,做好现场清点及防护工作。其中,每日天窗点内具体施工时间安排根据当日批复天窗时长和作业内容可适当调整,但须保证预留线路平顺性测量和精调作业、人员工机具清点时间充足,确保每日列车安全运行。

4.2 道床高程、平面位置测量

采用全站仪和轨道精调小车对线路线形进行测量,采集轨道基础数据。实测上拱、偏移变形量,并对扣件调整量进行详细调查和统计分析,以确认整治范围。以上拱偏移变形最大位置为起点,向两侧划分并标记道床板与找平层混凝土界面切割的水平切割单元,原则上以4根轨枕间距为1个切割单元。

4.3 找平层混凝土凿除

施工槽开凿前,凿除整治范围内道床板边混凝土踏步(保留原PVC管,以便恢复)。先用切割机沿纠偏区段道床板的纵向和横向对道床板两侧的仰拱回填层进行垂直切割,再用风镐或电镐凿除线路两侧的仰拱填充切割部分混凝土,开凿出绳锯切割槽,切割槽

5 cm深、80 cm宽。

4.4 道床板限位

将已凿除的混凝土找平后,根据限位装置底座螺栓孔位置,在找平层混凝土上垂直钻取 $\phi 28$  mm、深15 cm的螺栓锚固孔。采用植筋胶将 $\phi 20$  mm、长22 cm的螺栓与找平层混凝土锚固。沿道床板两侧按照2根轨枕间距安装限位装置,对道床板进行限位。

4.5 钻绳锯切割孔

根据现场情况、切割工效、绳锯设备情况等,沿道床板纵向合理布置横向水平钻孔位置,纵向水平间距为2.6 m/孔。在道床板水平切割单元的界面处钻取竖向两排 $\phi 40$  mm的绳锯切割孔,钻孔中心位于道床板与找平层混凝土界面处。

4.6 水平切割

拆除影响切割施工的限位装置,在施工槽内将导轮安装在切割孔对应位置,连接切割链条,通过绳锯对水平切割单元的道床板与找平层混凝土界面位置进行切割,水平切割后恢复限位装置。

4.7 切割缝垫板临时支撑

水平切割后,采用1 mm、2 mm、3 mm、5 mm等不同厚度的宽35 cm、长80 cm的塑料垫板通过组合方式塞入轨枕正下方的切割缝内,进行临时支撑。

每隔2.6 m设1对限位装置。每个限位装置采用不少于4个M16膨胀螺栓进行固定,每10 m在轨道结构两边增设一对 $\phi 100$  mm钢管支撑。

4.8 道床板竖向切割

整治范围内的水平切割全部完成后,在无砟轨道上拱偏移最大位置,采用绳锯从整治区间端头的2个施工孔内对道床板进行竖向切割,并采用木制“U”型防护装置对切割位置道床板的上方钢轨进行防护。

4.9 精调装置定制和道床板横移纠偏

待所有切割完成、道床状态稳定后,对道床几何形态进行复测分析,确定最终的道床板纠偏量。将施工位置轨枕下部的找平层混凝土凿除,利用水平千斤顶顶推或手拉葫芦牵引取出切割层,形成千斤顶和精调装置放置槽。放置槽宽度35 cm、深度15 cm、高度20 cm,以确保千斤顶和精调装置可同时放置在槽内。槽底找平后,测量精调装置放置位置槽的实际高度,结合该位置的道床板最终降低量,计算精调装置高度并加工。

拆除扣件,松开限位装置螺杆,将道床板顶起1 cm,移除临时支撑垫板,落板后,以侧墙或另一线道床板为反力墙,安装横向顶推装置。每间隔5.2 m安装一组横向顶推装置。顶推过程中通过钢板尺和全站仪共同监测纠偏量。纠偏达到设计值后,将轨道



偏移方向的限位装置的横向螺杆拧紧,防止道床板回弹。

纠偏详细过程如下:

在下行线左侧安装临时支撑并压紧,支撑间距5 m;在下行线左侧临时支撑( $\phi 120\text{ mm}$ ,长度可调节 $80\text{ cm}\pm 10\text{ cm}$ )附近安装百分表并记录初值。在上行线右侧安装百分表并记录初值。按设计方案更换施工范围内轨距挡板,在两线间安装临时支撑( $\phi 200\text{ mm}$ ,总长144 cm,前后钢板厚2 cm)和千斤顶(手动液压100 t,顶高14.1 cm),松开上行道床板限位装置,按设计纠偏量,将道床板进行顶推平移。平移至目标位置后,立即用绝对测量小车进行测量,根据测量结果,对局部位置进行二次平移。全部平移至目标平面位置,重新安装道床板限位装置,平面限位装置安装夹有黄油的塑料板,以便次日高程微调。更换完成后再用测量小车确认轨道平顺性是否满足限速行车条件。

4.10 道床板落道

纠偏完成后,将道床板顶起,放置已精确测量后的精调装置(根据实际情况凿除找平层混凝土,放置精调装置),落板后道床板落至精调装置上,道床板一次调整到位。如局部道床板高程与设计值偏差较大,可采用微调内限位装置高度的方式进行高程调整。道床板调整完成后,将道床板两侧的限位装置螺杆拧紧,并采用全站仪和水准仪对调整后的道床板几何状态进行复测,如道床板横向出现轻微偏差,可通过限位装置的横向螺杆进行调整。

4.11 灌注聚合物水泥砂浆

平面调整完成后,随即进行高程微调,高程微调与道床板、仰拱填充空隙注浆填充安排在同一天窗完成,注浆采用优化升级后的聚合物水泥砂浆,即在原材料基础上通过聚合物改性调整、粒度匹配优化和组分设计优化等,满足施工时间可调、强度发展可控及天窗时间内修补、天窗时间后列车通行的要求。性能指标如表1所示。

表1 改性聚合物水泥砂浆性能指标表

项目		性能参数
出机扩展度/mm		300
30 min 扩展度/mm		280
抗压强度 /MPa	2 h	$\geq 5$
	1 d	$\geq 15$
	28 d	$\geq 30$
粘结强度/MPa		$\geq 1.5$
膨胀率/%		0~2.0
抗冻性		剥落量 $\leq 2\,000\text{ g/m}^2$ ,动弹模损失 $\leq 40\%$
抗疲劳性		10 000次不断裂

施工前将顶升槽、注浆孔、观察孔(植筋孔)完成。首先安装顶升千斤顶(手动液压50 t,顶高7 cm),将道床板顶升10~30 mm,将临时支撑全部取出,并用高压水枪对切割面进行冲洗,冲洗干净后,用5 cm×10 cm小钢板支撑。用绝对测量小车对轨面进行测量,复核高程和平面,如有偏差用千斤顶进行顶升和平移,并通过增加钢板等措施进行支撑和固定。确定支撑稳定、限位牢固,高程、平面线形满足要求后,用堵漏王进行封边,封边时每3 m左右预留一对排气孔,灌浆孔和排气孔应呈梅花型布置。

根据每日天窗时长确定当日注浆范围,并计算单次处理段落灌注所需的聚合物水泥砂浆用量,提前20 m用充气膨胀管进行注浆隔断。一切就绪后,对聚合物水泥砂浆称量,并采用专用的砂浆搅拌机进行搅拌,搅拌完成后立即进行砂浆工作性能检测,合格后方可砂浆灌注施工。注浆填充需保证灌注饱满,即保证所有排气孔都有溢浆,在排气孔封堵后,能看到所有观察孔浆面高出切割面。注浆完成后,立即对道床板和钢轨道进行清洗。

此外,灌浆过程中还需借助百分表对道床板顶面高程进行监测,发现高程变化超过0.5 mm,应立即停止注浆,待道床板顶面高程回落后移至相邻注浆孔开始注浆;待砂浆灌注完成并硬化达到一定强度后,拆除扣压装置。注浆完成次日,将两侧封闭凿除,检查切割缝灌注是否有空洞或离缝,如有则注AB胶进行填充。

4.12 纠偏区段道床板植筋锚固

纠偏施工完成后,对纠偏区段及相邻4根轨枕的道床板进行植筋锚固,加强道床板与仰拱填充之间的连接质量。植筋采用HRB400级 $\phi 20$ 钢筋,按每两根轨枕间植一排和每排4根进行布置;钻孔 $\phi 25\text{ mm}$ ,钢筋长38 cm,植入下部基础部分20 cm;植筋长度范围采用植筋胶填充,道床板上部无植筋范围采用无收缩砂浆填灌。

4.13 施工槽回填

按比例配制并现场搅拌混凝土(标号不低于原设计),灌注至施工槽。混凝土用插入式振捣棒捣固密实后按原设计设置2%的横向排水坡并收光,喷涂养护剂养护。在原踏步位置立模,设置纵向排水管,浇筑踏步混凝土。用裂缝修补胶对道床板上纠偏过程中产生的裂缝进行修复。

4.14 轨道精调及逐级提速

对纠偏区段道床进行精调,拆除扣件时须使用专业工具,防止弹条砸飞伤人,更换扣件时加强个人

防护,避免挤伤或压伤。此外,精调前先测量实际轨温,如实测轨温比锁定轨温低 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,可连续松开扣件数量小于40个;如实测轨温比锁定轨温高 $0^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,可连续松开扣件数量小于20个。

## 5 结论

(1)利用绳锯切割隧道仰拱填充,通过千斤顶顶推或手拉葫芦牵引取出切割层,然后落道进行道床板平面和高程姿态调整,使落道纠偏段轨道与其他段落轨道平滑衔接,显著提升了轨道的整体平顺性。

(2)采用绳锯切割仰拱填充层,并进行线路姿态纠偏,有效避免了大拆大换及列车停运影响,可实现降速运营,且施工全过程无结构受损或受力状态破坏问题。

(3)采用聚合物改性、粒度匹配优化、组分设计优化后的聚合物水泥砂浆进行充填,具有施工时间可调、强度发展可控等特点,能够满足天窗时间内修补、天窗时间后列车通行的要求。

## 参考文献:

- [1] 黄飞. 铣磨承轨台法处理上拱病害关键技术研究[J]. 科学技术创新, 2021(29): 134-136.  
HUANG Fei. Study on Key Technology of Treating Arch Disease by Milling and Grinding Rail Bearing Platform Method [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(29): 134-136.
- [2] 张国胜,刘更新,贾华强. 郑西高铁K921段无砟轨道上拱整治方案研究[J]. 中国铁路, 2013(7): 52-54.  
ZHANG Guosheng, LIU Gengxin, JIA Huaqiang. Study on Treatment Scheme of Upper Arch of Ballastless Track in K921 Section of Zhengzhou-Xi'an High-speed Railway [J]. Chinese Railways, 2013(7): 52-54.
- [3] 张志远. 基于绳锯切割的高速铁路纵连板式无砟轨道支承层修复技术[J]. 铁道建筑, 2021, 61(3): 113-115.  
ZHANG Zhiyuan. Research on Repair Technology of Supporting Layer of Longitudinal Slab Ballastless Track of High Speed Railway Based on Wire Saw Cutting [J]. Railway Engineering, 2021, 61(3): 113-115.
- [4] 袁丛军. 高速铁路无砟轨道路基上拱变形整治研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(10): 49-55.  
YUAN Congjun. Study on Improvement of Overarching Deformation of Ballastless Track Subgrade of High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(10): 49-55.
- [5] 殷明旻,向芬,乔建春,等. 路基段双块式无砟轨道在线重构整治研究与实践[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(5): 102-106.  
YIN Mingmin, XIANG Fen, QIAO Jianchun, et al. Research and Practice of On-line Reconstruction of Bi-block Ballastless Track in Subgrade Section [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(5): 102-106.
- [6] 李铁钟. 某高速铁路隧道无砟轨道上拱处治技术[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(5): 125-128.  
LI Tiezhong. Treatment Technology for Ballastless Track Uplift of a High Speed Railway Tunnel [J]. Railway Standard Design, 2018, 62(5): 125-128.
- [7] 赵彦旭. 岩溶隧道内无砟轨道上拱原因分析与治理[J]. 铁道建筑, 2017, 57(12): 113-115.  
ZHAO Yanxu. Analysis and Treatment of Upward of Ballastless Track Slab in Karst Tunnel [J]. Railway Engineering, 2017, 57(12): 113-115.
- [8] 杨春光. 高铁隧道无砟轨道上拱整治技术研究[J]. 工程机械与维修, 2021(2): 50-51.  
YANG Chunguang. Study on Treatment Technology of Upper Arch of Ballastless Track in High-speed Railway Tunnel [J]. Construction Machinery & Maintenance, 2021(2): 50-51.
- [9] 刘成杰. 化马隧道无砟轨道异常整治方案[J]. 四川建材, 2020, 46(7): 157-158, 177.  
LIU Chengjie. Treatment Scheme for Abnormal Ballastless Track in Huama Tunnel [J]. Sichuan Building Materials, 2020, 46(7): 157-158, 177.
- [10] 王崇良,王茂靖,赵文,等. 兰渝铁路梅岭关隧道底鼓病害成因分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(6): 63-68.  
WANG Chonggen, WANG Maojing, ZHAO Wen, et al. Cause Analysis of Diseases in the Floor Heave Section of Meilingguan Tunnel in Lanzhou-Chongqing Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6): 63-68.
- [11] 杨延强,张立阳,任新. 某高速铁路隧道无砟轨道异常段仰拱整治技术[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(5): 19-22.  
YANG Yanqiang, ZHANG Liyang, REN Xin. Improvement of Inverted Arch in Abnormal Section of Ballastless Track in High-speed Railway Tunnel [J]. Journal of Lanzhou Institute of Technology, 2019, 26(5): 19-22.
- [12] 杨星智,李藏,李曙光. 某高铁隧道内轨道隆起原因分析及整治方案[J]. 中国铁路, 2021(11): 82-87.  
YANG Xingzhi, LI Wei, LI Shuguang. Cause Analysis and Treatment Scheme on Track Upheaval in a High Speed Railway Tunnel [J]. China Railway, 2021(11): 82-87.
- [13] 李奎,刘凯. 某客专隧道洞口段道床隆起病害分析与整治[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(11): 1910-1918.  
LI Kui, LIU Kai. Analysis of Heaving Disease of Track Bed in Entrance Section of a Passenger-dedicated Railway Tunnel and Its Countermeasures [J]. Tunnel Construction, 2018, 38(11): 1910-1918.
- [14] 李强. 高速铁路隧道无砟轨道上拱整治技术研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 117-123.  
LI Qiang. Research on Treatment Technology for Ballastless Track Upward of High-speed Railway Tunnels [J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 117-123.