

文章编号: 1674-599X(2020)02-0092-06

## 基于离散元法的道砟胶固化道床力学特性模拟

魏明鉴<sup>1</sup>, 许平<sup>1</sup>, 周陶勇<sup>1</sup>, 郑瑶<sup>1</sup>, 王磊<sup>2</sup>

(1.昆明理工大学 机电工程学院, 云南 昆明 650500; 2.金川集团有限责任公司, 甘肃 金昌 737100)

**摘要:** 针对有砟轨道稳定性差的问题。在铁路的养护维修工作中, 对道砟进行胶固化处理, 形成了一种较稳定的新型道床形式-胶固化道床。根据道砟胶固化道床的特点, 分别选择了道砟颗粒级配和聚氨酯粘结剂中 A 组多异氰酸酯、B 组聚合物多元醇的使用配比作为变量, 对 2 种不同级配和 3 种不同配比的道砟胶固化道床的力学特性进行了研究; 采用三视图立体重建的方法对道砟颗粒的几何形状进行基础重建, 获得了较为真实的道砟颗粒结构; 在离散元仿真计算中, 通过粘结模型建立的道砟胶固化道床模型进行仿真模拟。研究表明: 在道砟胶固化道床中, 采用宽级配和 A:B=3:2 的道砟胶配比更有利于提高道床的力学特性。

**关键词:** 道砟胶固化道床; 级配; 道砟胶; 离散元法

中图分类号: U213.2<sup>+</sup>12

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.015

### Simulation study on mechanical properties of ballast bed solidified by ballastglue based on discrete element method

WEI Ming-jian<sup>1</sup>, XU Ping<sup>1</sup>, ZHOU Tao-yong<sup>1</sup>, ZHENG Yao<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>2</sup>

(1. Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Jinchuan Group Ltd., Jinchang 737100, China)

**Abstract:** To improve the stability of the ballast bed, the glue-solidified treatment was applied on the ballast to form a stable ballast bed (namely glue-solidified ballast bed) in the maintenance of the railway. According to the characteristics of the glue-solidified ballast bed, the ratio of Polyisocyanate (Group A) and Polymer polyols (Group B) in the ballast particle gradation and polyurethane binder was selected as variables. The mechanical properties of the glue-solidified ballast bed with two gradations and three ratios of ballast rubber were studied. The geometry of ballast particles was built by three-view stereo reconstruction to obtain the realistic structure of the ballast particle. In discrete element software, a complete ballast curing ball bed model was established and simulated based on the bond model. The results show that in the glue-solidified ballast bed, a wide gradation and A:B=3:2 the ballast rubber ratio of A:B=3:2 are more favorable to improve the mechanical properties of ballast bed.

**Key words:** ballast glue curing ballast bed; grading; glue solidified; the discrete element method

铁路是一个国家重要的基础性设施之一, 也是一个国家发展的命脉<sup>[1]</sup>。虽然无砟轨道正在兴起, 但有砟轨道的重要性不可替代, 其在国内占据较大的比例, 具有散体的力学特性, 能够实现均匀传力, 有砟轨道有弹性、缓冲和减振的作用, 且具有良好的排水能力等特点<sup>[2]</sup>。

在铁路运营中, 因为有砟轨道是散体道床, 所以稳定性较差<sup>[3-5]</sup>。随着列车的速度和重载的快速发展, 道床沉降明显, 道砟粉化飞溅严重, 影响铁路运营的质量和安全<sup>[6-8]</sup>。道砟粘结是道床加固中的一项重要技术, 对于提高道床密实度和改善道床的力学性能起重要作用, 是确保线路运营质量的重

收稿日期: 2019-11-26

作者简介: 魏明鉴(1996-), 男, 昆明理工大学硕士生。

要环节<sup>[9-12]</sup>。因此, 本研究针对道砟胶固化道床拟利用 EDEM 离散元仿真软件进行建模及仿真计算, 得到了道砟胶固化道床的最佳级配和道砟胶粘度。

### 1 研究方案设计

#### 1.1 离散元基本理论及其模型选用

在研究颗粒体本身特性时, 采用软球模型。在软球模型中, 颗粒 *i* 与颗粒 *j* 发生碰撞的同时会有一定接触部分的重合, 发生一定的弹性变形如图 1 所示, 并可以在极短的时间步长之内将其记录下来, 作为研究参数使用, 同时, 可以计算出发生碰撞颗粒之间的合力, 如图 2 所示。通过牛顿第二定律进行计算颗粒的加速度、瞬时速度和相对位移量。

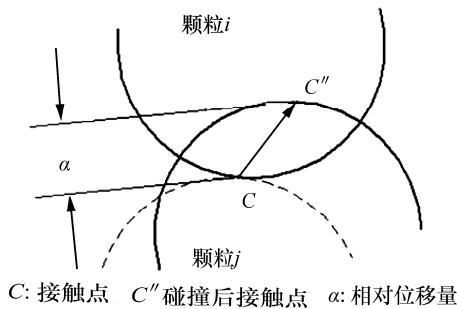


图 1 软球模型

Fig. 1 Soft ball model

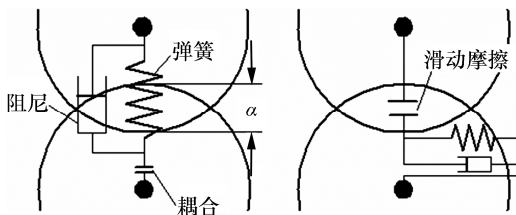


图 2 软球模型接触力简化处理

Fig. 2 Simplified of soft ball model contact force

在离散元计算体系中, 将每一个颗粒单元作为一个独立的整体单元, 采用循环迭代计算每一个颗粒整体所组成的集合。可分 2 个步骤: ①由作用力与反作用力的原理及相应的接触模型的分析确定相互接触的颗粒 *i* 与颗粒 *j* 之间的力与相对位移量, 通过经典力学理论牛顿第二定律确定所产生的新的不平衡, 如图 3 所示。②进行循环的迭代计算, 直至达到一种相对平衡的状态。

颗粒离散元相比于有限元进行仿真计算, 其准确性与真实性都有所提高, 并且可以解决试验所产生的费时、费钱等问题。因此, 本研究利用 EDEM

离散元软件进行道砟胶固化道床的建模和仿真。

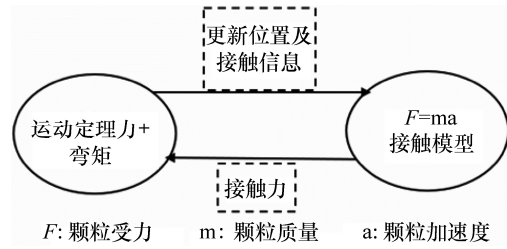


图 3 离散元计算流程示意

Fig. 3 Diagram of discrete element calculation process

#### 1.2 胶固化道床级配试验方案

按照《铁路碎石道砟(TB/T2140-2008)》<sup>[13]</sup>中所规定的道砟级配标准, 在试验中制定了 2 种级配方式, 分别为颗粒粒径相对集中的窄级配(级配-1)和颗粒粒径分布较广的宽级配(级配-2)。

2 种级配的级配分布见表 1。

表 1 级配-1 和级配-2 型道砟尺寸参数

Table 1 Ballast size parameters of the Grading-1 and

Grading-2					
级配-1			级配-2		
方孔筛孔边长 /mm	标准 /%	级配 /%	方孔筛孔边长 /mm	标准 /%	级配 /%
22.4	0~3	2	16.0	0~5	2
31.5	1~25	12	25.0	5~25	12
40.0	30~65	40	35.5	25~40	30
50.0	70~99	70	45.0	55~75	70
63.0	100	100	56.0	92~97	92
—	—	—	63.0	97~100	100

#### 1.3 胶固化道床粘结强度试验

在道砟胶固化道床中, 采用聚氨酯粘结剂对其进行粘结。聚氨酯粘结剂为 A 组多异氰酸酯和 B 组聚合物多元醇组混合使用。A 组提供聚氨酯道砟胶的粘度, B 组提供聚氨酯道砟胶的稀释度。A 和 B 经物理共混、扩链反应、凝胶及固化成型等过程, 在道砟间形成聚氨酯弹性体材料, 实现对道砟粘结和固化。

对于道砟胶的用量, 以完全渗透作为用量标准。本试验选用 36 kg/m<sup>3</sup> 为道砟胶用量标准并制定 3 种聚氨酯粘结剂的配比方式, 分别为粘结强度较低的 A:B=1:1, 粘结强度中等的 A:B=3:2 及粘结强度较高的 A:B=2:1。拟利用离散元法分别模拟道砟胶固化道床在 2 种不同级配和 3 种不同配比下的力学特性, 研究道床垂向刚度和横向阻力的变化。探究在相同条件下不同粘结强度的道床进行粘结之

后, 道床不同位置道砟的瞬时速度。分析道床整体弹性和道床粘结键的断裂百分比, 比较道床的稳定性。

## 2 道砟胶固化道床模型的建立

### 2.1 道砟的建立

利用三视图原理构建道砟颗粒模型, 其步骤分为3步:

1) 数据的采集, 通过相机来拍摄道砟颗粒的俯视图、右视图和主视图, 如图4所示。

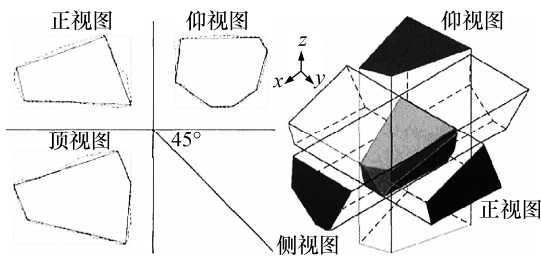


图4 颗粒几何结构 Fig. 4 The figure of grain geometry

2) 将拍摄的道砟三视图导入到 Matlab 软件中进行图片的数字化处理, 以根据算法得到轮廓曲线。根据颗粒的实际情况对简化的轮廓进行调整, 以求达到真实的效果。

3) 在 Solid Edge 软件中进行三维拉伸重建, 得到真实的道砟颗粒模型。颗粒的几何结构采集过程如图5所示。

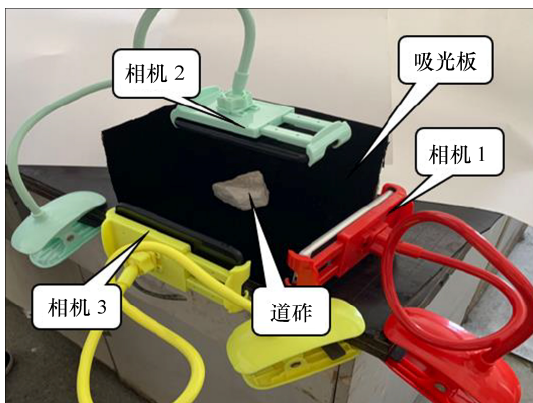


图5 颗粒几何结构采集过程 Fig. 5 Acquisition process of particle geometry

本试验采用手动填充的方式完成道砟颗粒在 EDEM 中的建立, 即将一定尺寸的球体通过改变其大小和位置, 进行颗粒的填充。该方法的优势是道砟颗粒的球体大小、位置等都可以自行调节, 对于轮廓棱角部分的填充较为完全, 并且球体个数较

少, 可以有效减少不必要的计算量。

### 2.2 EDEM 中道床模型的建立

轨枕和道床的具体参数根据《铁路轨道设计规范 (TB10082-2017)》<sup>[14]</sup> 的相关规定进行建立, 轨枕采用 III 型混凝土轨枕, 建立的直线地段道床横截面如图6所示。

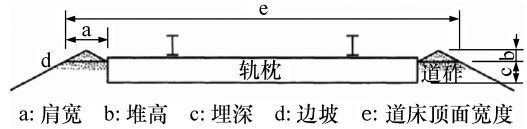


图6 直线地段道床横截面 Fig. 6 Cross section of track bed in straight section

道砟颗粒的填充采用“落雨法”, 如图7所示, 在不同的填充区域建立虚拟填充面, 生成相对应的填充颗粒, 以保证颗粒均匀分布。

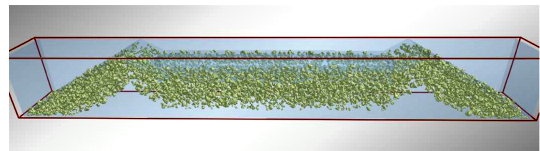


图7 “落雨法”示意 Fig. 7 Schematic diagram of “falling rain method”

### 2.3 道砟胶固化道床参数的选择

接触参数和粘结参数的选择见表2和表3。

表2 材料及接触参数

参数	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
花岗岩	0.25	10 <sup>6</sup>	2 600	—	—	—
混凝土	0.17	1.9×10 <sup>9</sup>	2 500	—	—	—
道砟之间	—	—	—	0.5	0.7	0.2
道砟与轨枕	—	—	—	0.5	0.4	0.1

表3 粘结参数

粘结参数	正向刚度系数/(10 <sup>7</sup> N·m <sup>-3</sup> )	切向刚度系数/(10 <sup>7</sup> N·m <sup>-3</sup> )	最大正压力/GPa	最大剪切力/GPa
1:1	1.5	1.5	1.10	1.10
3:2	1.5	1.5	1.42	1.42
2:1	1.8	1.8	16.00	1.42

## 3 道砟胶固化道床力学仿真分析

### 3.1 不同级配胶固化道床的静力学分析

首先分别采用级配-1和级配-2以全部粘结的方式进行道床填充和粘结, 完成道床的建立。然后对轨枕分别施加一定的垂向位移和横向位移, 获取轨

枕所受垂向和横向的合力, 从而对道砟胶固化道床进行垂向阻力和横向阻力的测试。最后通过垂向阻力  $P$  和垂向位移  $\delta$  计算垂向刚度( $K$ ), 计算式为:

$$K=P/\delta \tag{1}$$

2 种级配的垂向阻力和横向阻力的仿真结果如图 8,9 所示。

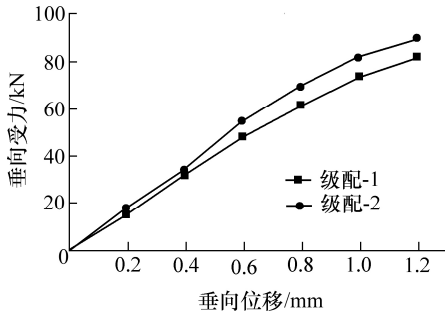


图 8 不同级配胶固化道床的垂向阻力

Fig. 8 Vertical resistance of glue-solidified ballast bed with different gradation

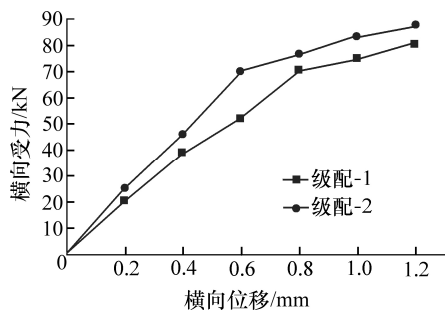


图 9 不同级配胶固化道床的横向阻力

Fig. 9 Lateral resistance of glue-solidified ballast bed with different gradation

从图 8 可以看出, 2 种级配的垂向阻力变化趋势基本相同, 计算得到  $K_{\text{级配-1}}=78.941 \text{ 1 kN/mm}$ ;  $K_{\text{级配-2}}=83.163 \text{ 7 kN/mm}$ 。表明: 采用 2 种不同级配进行全部粘结的道砟胶固化道床的垂向刚度具有一定差异, 宽级配道砟胶固化道床的垂向刚度较大, 力学性能较好。

从图 9 可以看出, 2 种级配的横向阻力变化趋势基本相同, 宽级配道砟胶固化道床的横向阻力较大, 上升较为明显, 力学性能较好。

### 3.2 不同级配胶固化道床的动力学分析

首先分别采用级配-1 和级配-2 以全部粘结的方式进行道床填充和粘结, 完成道床的建立。再对道床采用横向振幅 2 mm、频率 32 Hz 结合垂向位移 10 mm 的方式, 先进行 5 s 的道床道砟稳定 and 密实,

稳定后利用粘结键来模拟道砟之间键的粘结。然后通过对轨枕施加垂向载荷, 获取不同深度的道砟速度变化, 从而分析道砟胶固化道床的弹性。最后对其施加 10 Hz, 1 mm 的振动, 分析粘结键的破坏比例, 表明粘结的稳定性。2 种级配的胶固化道床不同深度的速度变化的仿真结果如图 10。

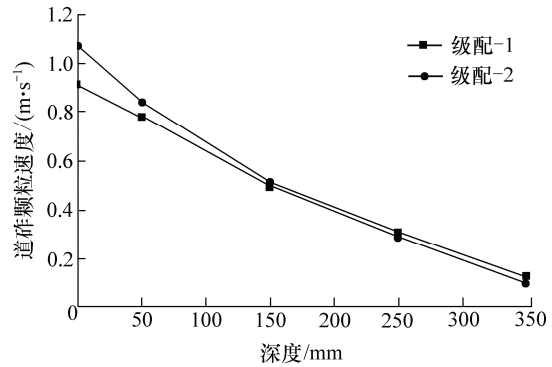


图 10 不同级配胶固化道床不同深度的颗粒速度

Fig. 10 Grain speed of glue-solidified ballast bed with different gradation at different depth

从图 10 可以看出, 2 种级配的道砟速度的衰减变化趋势基本相同, 级配-2 的速度衰减较为明显, 弹性较好, 能起到较好的缓冲作用。

由表 4 可知, 相对窄级配, 宽级配键的破碎比例较小, 道床较为稳定。表明: 在道砟胶固化道床中宽级配道床的垂向刚度和横向阻力相对于窄级配较大。同时道砟颗粒速度的衰减趋势更为明显, 道床整体弹性较强, 且粘结键的破碎比例也相对较小, 更有利于提高道砟胶固化道床的力学特性。

表 4 不同级配道床粘结键破碎率

Table 4 Bond breaking rate of the ballast bed with different gradation

配比方式	完整键数量	破损键数量	破碎比例/%
级配-1	116 523	8 739	7.50
级配-2	123 587	8 635	6.98

### 3.3 不同粘结强度的胶固化道床的静力学分析

首先采用级配-2 来进行道床填充, 再用 3 种不同配比的粘结剂对有砟道床进行粘结, 完成道床的建立。3 种粘结强度的垂向阻力和横向阻力的仿真结果如图 11,12 所示。

从图 11 可以看出, 3 种配比的垂向阻力变化趋势相同, 相对于 1:1, 其余 2 种配比的垂向阻力较大一些。计算得到  $K_{1:1}=75.349 \text{ 9 kN/mm}$ ;  $K_{3:2}=83.257 \text{ 4 kN/mm}$ ;  $K_{2:1}=87.311 \text{ 9 kN/mm}$ 。表明: 除

1:1 配比外, 其余 2 种配比的道砟胶固化道床的垂向刚度较大, 道床的力学性能较好。

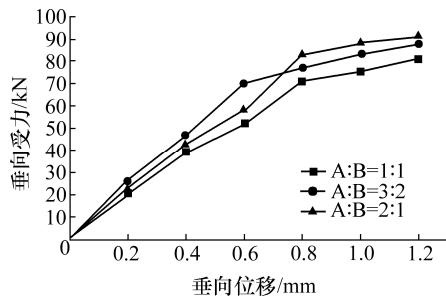


图 11 不同粘结强度的胶固化道床的垂向阻力

Fig. 11 Vertical resistance of glue-solidified ballast bed with different bonding strength

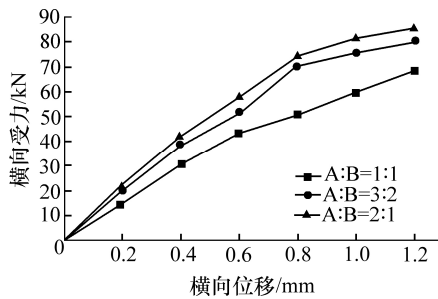


图 12 不同粘结强度的胶固化道床的横向阻力

Fig. 12 Lateral resistance of glue-solidified ballast bed with different bonding strength

从图 12 可以看出, 3 种配比的横向阻力变化趋势基本相同。相对于 1:1 配比, 其余 2 种配比的横向阻力变化趋势相似, 横向阻力值更高, 更稳定。

### 3.4 不同粘结强度的胶固化道床的动力学分析

首先采用级配-2 来进行道床填充, 再用 3 种不同配比的粘结剂对有砟道床进行粘结, 完成道床的建立。道床建立后的仿真过程与 2 种级配的胶固化道床的动力学分析一致。3 种配比的胶固化道床不同深度的速度变化的仿真结果如图 13 所示。

从图 13 可以看出, 3 种配比的速度衰减趋势基本相同。相对于 2:1 配比, 其余 2 种的速度衰减更接近, 更稳定, 同时, 最下层的道砟颗粒速度值较小。

由表 5 可知, 相对于 1:1 配比, 其余 2 种配比的破碎比例更接近, 更低, 道床更稳定性。所以在聚氨酯道砟胶中, 以 A:B=1:1 配比进行粘结的道砟胶固化道床的垂向阻力和横向阻力都较小。以 A:B=3:2 配比进行粘结的道砟胶固化道床的垂向阻力和横向阻力相对 A:B=2:1 略小, 但道砟颗粒速度的衰减趋势更为明显, 道床整体弹性较强, 且粘结

键的破碎比例也较小。因此, 使用 A:B=3:2 配比的聚氨酯道砟胶更有利于提高道砟胶固化道床的力学特性。

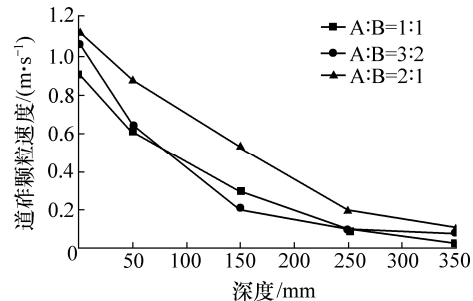


图 13 不同粘比强度的胶固化道床不同深度的颗粒速度

Fig. 13 Grain speed of glue-solidified ballast bed with different bonding strength

表 5 不同粘结强度道床粘结键破碎率

Table 5 Bond breaking rate with different bond strength

ballast			
A:B	完整键数量	破损键数量	破碎比例/%
1:1	113 423	8 739	7.59
3:2	119 734	6 124	6.98
2:1	114 798	6 572	6.99

## 4 结论

通过对 2 种不同级配和 3 种不同配比的道砟胶固化道床的力学特性进行了仿真分析, 得到的结论为:

- 1) 宽级配的道砟胶固化道床的力学特性较好。
- 2) A:B=3:2 配比的道砟胶固化道床的力学特性最佳。

### 参考文献(References):

[1] 马春生,肖宏,高亮.高速铁路弹性轨枕有砟轨道力学特性试验研究[J].土木工程学报,2015,248(S2):81-87. (MA Chun-sheng, XIAO Hong,GAO Liang.Experimental study on mechanical characteristics of elastic sleeper ballast track on high-speed railways[J].China Civil Engineering Journal,2015, 248(S2):81-87.(in Chinese))

[2] 高亮,罗奇,徐旻,等.基于离散元法的铁路道床力学特性[J].同济大学学报:自然科学版,2014,42(7):1064-1069. (GAO Liang,LUO Qi,XU Yang,et al.Railway ballast bed mechanical property based on discrete element method[J]. Journal of Tongji University:Natural Science,2014,42(7): 1064-1069.(in Chinese))

- [3] 鄒录朝,王红,许永贤,等.聚氨酯固化道床的力学性能试验研究[J].铁道建筑,2015(1):107-112.(QIE Lu-chao,WANG Hong,XU Yong-xian,et al.Experimental study on mechanical performance of polyurethane solidified ballast bed[J].Railway Engineering,2015(1):107-112.(in Chinese))
- [4] 王斌,包进荣,杨冠岭,等.道砟胶对道床参数的影响研究[J].铁道标准设计,2010(11):14-16.(WANG Bin,BAO Jin-rong,YANG Guan-ling,et al.Study on the influence of ballast glue on ballast bed parameters[J].Railway Standard Design,2010(11):14-16.(in Chinese))
- [5] 郑瑶.道砟胶固化道床的力学特性研究[D].昆明:昆明理工大学,2019.(ZHENG Yao.Study on mechanical properties of ballast rubber cured ballast bed[D].Kunming: Kunming University of Science and Technology,2019.(in Chinese))
- [6] 张亚晴,许平,周陶勇,等.捣固参数对道床密实度的影响研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):11-15.(ZHANG Ya-qing,XU Ping,ZHOU Tao-yong,et al.Study on the effect of tamping parameters on compactness of the ballast bed for the high-speed railway[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):11-15.(in Chinese))
- [7] 王岭军.不同荷载形式下的路基粗粒土填料稳定性分析[J].公路工程,2019,44(1):251-255.(WANG Ling-jun.Stability analysis of subgrade coarse grained soil fillers under different load forms[J].Highway Engineering,2019,44(1):251-255.(in Chinese))
- [8] 王红.铁路有砟道床聚氨酯固化技术的发展及应用[J].铁道建筑,2015(4):135-140.(WANG Hong.Development and application of polyurethane solidified technology used for railway ballast bed[J].Railway Engineering,2015(4):135-140.(in Chinese))
- [9] 胡飞.高速铁路道砟胶固化道床轨道过渡段力学特性研究[D].北京:北京交通大学,2013.(HU Fei.Study on the mechanical properties of the ballast bed using ballast bonding technology in high-speed railway[D].Beijing: Beijing Jiaotong University,2013.(in Chinese))
- [10] 元伟,刘玉涛,李成辉.道砟胶分段固化道床动力性能测试与分析[J].中南大学学报:自然科学版,2018,49(3):764-770.(QI Wei,LIU Yu-tao,LI Cheng-hui.Dynanmic testing and analysis of ballasted track of different stiffness sections using polyurethane ballast reinforcement technique[J].Journal of Central South University:Science and Technology,2018,49(3):764-770.(in Chinese))
- [11] 刘晓阳,刘浩.道砟胶对加强道床刚度的作用[J].中国西部科技,2013,12(5):14-15,33.(LIU Xiao-yang,LIU Hao.Study on the role of ballast glue in strengthening the stiffness of ballast bed[J].Science and Technology of West China,2013,12(5):14-15,33.(in Chinese))
- [12] 韩自力,鄒录朝,王红,等.聚氨酯固化道床技术研究与应用[J].中国铁路,2017(5):1-6.(HAN Zi-li,XI Lu-zhao,WANG Hong,et al.Study and application of polyurethane curing technology for railway bed[J].China Railway,2017(5):1-6.(in Chinese))
- [13] 中国铁道科学研究院.TB/T2140-2008,铁路碎石道砟[M].北京:中国铁道出版社,2008.(China academy of railwa.TB/T2140-2008,Railway ballast[M].Beijing:China Railway Publishing House,2008.(in Chinese))
- [14] 中铁第四勘察设计院集团有限公司.TB10082-2017,铁路轨道设计规范[M].北京:中国铁道出版社,2017.(China Railway Siyuan Survey And Design Group co.ltd.TB10082-2017,Code of design of railway track[M].Beijing:China Railway Publishing House,2017.(in Chinese))