山东农业大学学报(自然科学版),2026,57(4):708-720 VOL.57 NO.4 2026
Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition) doi:10.3969/j.issn.1000-2324.2026.04.012

振动碾压作用下煤矸石路基压实规律及施工参数优化研究

任 喆,李玫颖,张 锐,柳洪源,黄林璇,郑义科,张 健*
山东农业大学水利土木工程学院,山东 泰安 271018

摘 要: 煤矸石作为路基填料可实现资源化利用与成本控制,但其振动碾压压实效果与施工参数间的关联规律尚不明确。本文通过理论分析与离散元模拟相结合的方法,系统研究了碾压参数对压实效果的影响规律。通过理论推导,建立了碾压能量与施工参数的数学模型,揭示了平均沉降量Z与行驶速度v呈负相关关系,与激振频率f和单次最大沉降Z_0呈正相关关系。Z_0由压实能量W决定,而W与激振力及碾压轮自重呈正相关。基于正交试验设计,使用PFC^{2D}离散元软件对路基振动碾压进行数值模拟,结果表明:激振力从100 kN增至250 kN,经10遍碾压后干密度增长0.09 g/cm³,孔隙率下降8%;激振频率从20 Hz增至50 Hz,干密度增长0.06 g/cm³,孔隙率下降6.3%;行驶速度从1 m/s增至2.5 m/s,干密度下降0.03 g/cm³,孔隙率上升1.5%;松铺厚度从30 cm增至45 cm,干密度下降0.06 g/cm³,孔隙率上升4.7%,表现为激振力、激振频率与压实效果正相关,行驶速度、松铺厚度与压实效果负相关的变化规律。通过极差、方差分析得出影响碾压沉降率最关键的因素为松铺厚度,其次为激振力,而行驶速度、激振频率对碾压沉降率的影响较小。煤矸石路基最优碾压施工参数为松铺厚度35 cm、行驶速度2 m/s、激振频率40 Hz和激振力150 kN。研究结论可为提高煤矸石路基施工质量和效率以及促进煤矸石等矿业废弃物的资源化利用提供一定依据。

关键词: 煤矸石;路基;振动碾压;PFC^{2D};压实施工
中图法分类号: U416 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-2324(2026)04-0708-13

Compaction Law and Construction Parameter Optimization of Coal Gangue Roadbed under Vibration Rolling

REN Zhe, LI Mei-ying, ZHANG Rui, LIU Hong-yuan, HUANG Lin-xuan, ZHENG Yi-ke, ZHANG Jian*
College of Water Conservancy and Civil Engineering /Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

Abstract: Coal gangue can be used as a roadbed filler to achieve resource utilization and cost control. However, the correlation between its vibration compaction effect and construction parameters remains unclear. This study systematically investigates the influence of rolling parameters on the compaction effect by combining theoretical analysis with discrete element simulation. Firstly, it establishes a mathematical model of rolling energy and construction parameters by theoretical derivation. The results reveal that the average settlement Z exhibits a negative correlation with the driving speed v, and a positive correlation with both the excitation frequency f and the single maximum settlement Z_0. Furthermore, Z_0 is governed by the compaction energy W, which in turn shows a positive correlation with the excitation force and the roller weight. Based on orthogonal test design, the vibration rolling of subgrade is simulated by PFC^{2D} discrete element software. The results show that when the excitation force increases from 100 kN to 250 kN, the dry density increases by 0.09 g/cm^3 and the porosity decreases by 8% after 10 rolling passes. When the excitation frequency increases from 20 Hz to 50 Hz, the dry density increases by 0.06 g/cm^3, and the porosity decreases by 6.3%. When the driving speed increases from 1 m/s to 2.5 m/s, the dry density decreases by 0.03 g/cm^3, and the porosity increases by 1.5%. When the loose laying thickness increases from 30 cm to 45 cm, the dry density decreases by 0.06 g/cm^3, and the porosity increases by 4.7%. This indicates a positive correlation between excitation force, excitation frequency, and compaction effectiveness, and a negative correlation between driving speed, loose laying thickness and compaction effect. Furthermore, through range and variance analysis, it is concluded that the most critical factor affecting the rolling settlement rate is loose laying thickness, followed by excitation force, while driving speed and excitation frequency have relatively minor effects. The optimal compaction construction parameters of coal gangue subgrade are a loose laying thickness of 35 cm, a driving speed of 2 m/s, an excitation frequency of 40 Hz, and an excitation force of 150 kN. The conclusions of this research can provide a basis for improving the

收稿日期: 2025-08-13 **修回日期:** 2026-06-18
第1作者简介: 任 喆(1992-),女,博士,副教授,研究方向:岩土工程。E-mail:kmrz1204@163.com
***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:zhangj614@163.com

construction quality and efficiency of coal gangue roadbed and promoting the resource utilization of mining waste such as coal gangue.

Keywords: Coal gangue; roadbed; vibration rolling; PFC^{2D}; compaction construction

近年来，煤矿开采活动逐年加剧，每年产生大量工业废料[1]。煤矸石作为煤炭开采及洗选过程中的副产物[2]，长期堆积可引发土地、水源及空气的污染问题，对生态环境产生极大危害[3-5]。因此，探索煤矸石的有效利用途径已成为一个亟待解决的重要议题。

国内外研究学者采用物理试验、数值模拟分析、微观试验和工程现场试验，探究煤矸石作为路基填料的可行性并取得了一定成果[6-9]。煤矸石颗粒分布均匀、密实度高、抗剪强度优良，具备良好的力学性能、稳定性及排水性能，可满足路基填筑的规范要求[10-13]。Chen 等[14]和 Bradley 等[15]综合采用数值模拟与现场试验的方法，研究冲击碾压过程中土体颗粒的位移特征、应力分布及速度矢量变化规律，明确了冲击能量对土体的有效压实深度。Yang 等[16]结合 SEM、EDS 和拉曼光谱技术分析不同煤矸石性能对路基强度稳定性的影响机制，增加煤矸石密度、黏度和剪切强度可有效保证路基的稳定性和固化效果。李文炜等[17]基于地表形变监测、内部变形测量及颗粒运移轨迹追踪等多维观测手段，阐明了牵引速度与平均沉降量的影响机制，激振频率与单次最大沉降的动态影响规律。Song 等[18]通过室内试验研究不同 pH 条件下煤矸石 pH 值与电导率变化特性及其二者之间的相关性。朱晟等[19]研究表明，堆石料振动压实过程中，动应力随深度增加而降低，干密度、相对密度及影响深度随碾压遍数或碾轮吨位的增加而提高。

路基结构的质量紧密依赖于填料质量与压实工艺，而后者对于路基质量具有决定性影响[20,21]。现场碾压试验工作量大且不易实施，因此数值模拟成为分析路基碾压效果的重要工具。PFC^{2D}颗粒接触力链的变化可有效评估实际的压实效果[22]。Cundall 等[23]提出的离散元方法已成为研究颗粒材料振动压实机理的重要分析工具，该方法通过细观尺度模拟为揭示颗粒体系的压实机制提供了有效研究手段[24]。王大群等[25]基于 PFC^{2D}建立考虑块石破碎的土石混合料振动压实模型，结果显示土石混合料的最大干密度随含石量增加呈先增大后减小的趋势，随泥岩比例增加而增大；块石破碎率随含石量和泥岩比例增大而增大。李杨等[26]通过颗粒流数值模拟与现场试验相结合的方法，研究堆石体振动碾压过程，研究表明，在堆石体振动碾压过程中，沉降率和破碎率均随碾压遍数的增加而增大，同时随碾压吨位的提高而提升；相反，二者均随铺层厚度的增加而下降。顾晓强等[27]针对高填方工程中的砾石填料，通过室内击实试验和现场碾压试验，明确砾石填料的最大干密度和最优含水率随砾石含量增加分别呈先快后慢的增长和下降的规律，为实际工程中的配合比设计和施工参数优化提供依据。周忠等[28]基于离散元软件对宕渣路堤碾压过程进行数值模拟，结果表明，宕渣路堤的沉降量随碾压遍数增加呈先快后缓的趋势，碾压 5-6 遍后沉降稳定且颗粒间作用力趋于平衡，而继续增加碾压遍数将导致效率降低并出现明显回弹现象。徐平等[29]采用离散元法对块石填料摊铺层的振动压实过程及效应进行深入分析得出压实能量通过促使颗粒位移和降低空隙率来增强密实效果，其中慢速小激振力利于填充压实，快速大激振力则更有效实现挤压密实。以往的众多研究采用室内试验、数值模拟和现场试验探讨了路基填料、压实工艺与施工以及环境等因素对路基性能的影响，但对于压实过程中各施工因素与路基碾压效果的内在联系鲜有研究。此外，早期路基碾压模拟多采用静态荷载实现碾压。这与振动压路机通过振动轮的高频振动来实现路面有效压实的实际施工情况并不相符[30]。

针对上述问题，本文基于理论分析对振动压路机碾压轮的运动状态进行剖析，旨在将碾压轮释放的能量与产生的碾压沉降量相结合，得出单次碾压周期内沉降面积与平均沉降量的理论关系。并借助 PFC^{2D}颗粒流软件，对煤矸石在不同施工因素影响下的振动碾压过程进行数值模拟，揭示煤矸石在碾压过程中的压实机理。最终通过正交试验得出考虑激振力、激振频率、行驶速度及松铺厚度的最优碾压方案。研究可为煤矸石在路基工程中的应用提供有力的理论依据，同时有助于指导振动压路机的高效作业。

1 振动碾压模型理论构建

现有研究在模拟路基碾压时，普遍采用静态荷载假设，忽略了振动压路机动态碾压的实际施工过程，导致模拟结果与实际工况存在显著差异[30]。本文针对该问题，提出一种考虑振动周期性的动态分析模型，将振动碾压过程划分为“脱离地面”和“接触地面”两个阶段，更真实地反映动态施工过程；在此基础上，建立了激振力、激振频率、行驶速度等施工参数与碾压沉降量之间的理论关系式。

振动压路机借助振动轮产生的高频振动来达到压实效果，其主要依赖于振动轮自身的重力以及偏心块在旋转过程中产生的离心力。碾压轮在一个完整的运动周期内，其运动状态可以被简化为两个阶段：脱离地面状态（图 1）和与地面接触状态（图 2）。

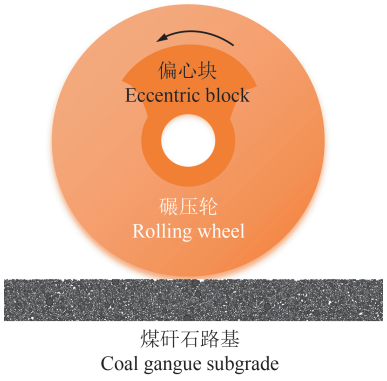


图 1 脱离地面阶段

Fig. 1 Stage of leaving the ground

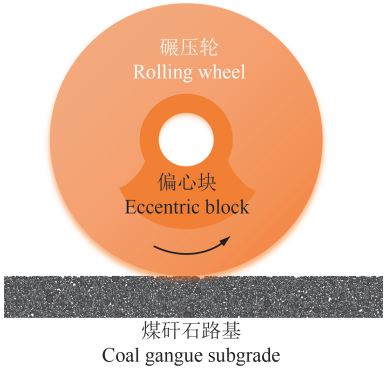


图 2 接触地面阶段

Fig. 2 Stage of contacting the ground

碾压轮结构可简化为外部碾轮与内部偏心块两部分。偏心块旋转可驱动碾压轮进行振动，具体过程如图 3 所示。$F_{激}$为偏心块旋转所产生的激振力。在忽略碾压轮与车身间的接触作用的前提下，碾压轮在振动过程中仅受三种力的作用：自重（G）、偏心块旋转产生的离心力（即激振力$F_{激}$）以及与土体接触时土体施加的反作用力。从 t_0=0 时刻开始，偏心块进行旋转而产生离心力，当 $F_{激}\sin\omega t=G$ 时（ω 为偏心块旋转角速度，$\omega=2\pi f$，f 为单位时间内振动的次数即频率），即碾压轮自重与偏心块旋转产生的竖向力达到平衡状态。此时刻碾压轮达到临界平衡，偏心块转动时间记为 t_1，对应的转动角度记为 φ_1，则有：

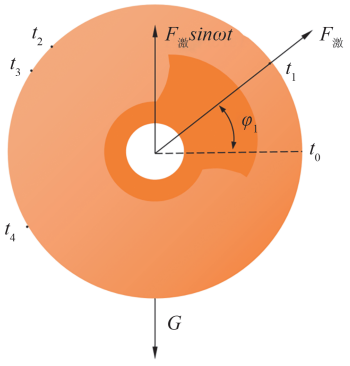


图 3 振动轮碾压过程

Fig. 3 Vibration wheel rolling process

$$t_1=\frac{\arcsin\dfrac{G}{F_{激}}}{\omega} \tag{1}$$

$$\varphi_1=\omega t_1 \tag{2}$$

偏心块在 t_1 时刻后继续旋转运动，导致竖向分力逐渐增大超过碾压轮自重。此时，碾压轮因向上的加速度蓄积势能，并逐渐脱离地面。当偏心块旋转至角度 $\pi-\varphi_1$ 时，其产生的竖向分力与碾压轮自重再次达到平衡状态，此时加速度降为 0，此时刻记为 t_2。自 t_1 至 t_2 的时间属于脱离地面阶段（阶段 1），因此，阶段 1 碾压轮的加速度为：

$$a_{(t)}=\frac{F_{激}\sin\omega(t)-G}{M} \tag{3}$$

式中：ω — 角速度（rad/s）；

G — 碾压轮自重（N）；

M — 碾压轮质量（kg）。

则 t_1 至 t_2 时间段内，碾压轮竖向上升的速度与时间之间的关系为：

$$v(t)=\int_{t_1}^{t}\frac{F_{激}\sin\omega t-G}{M}dt \tag{4}$$

则 t_2 时刻碾压轮竖向速度为：

$$v_2 = \frac{F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_1 - \cos\omega t_2) + \frac{G}{M}(t_1 - t_2) \quad (5)$$

式中:t_2—偏心块旋转至角度$\pi - \varphi_1$的时间,可表示为$\frac{\pi - \varphi_1}{\omega}$。

则t_2时刻碾压轮相对于地面的竖向位移x_2为:

$$x_2 = \int_{t_1}^{t_2}\left[\frac{F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_1 - \cos\omega t) + \frac{G}{M}(t_1 - t)\right]\mathrm{d}t \quad (6)$$

经过t_2时刻后,偏心块所产生的竖向力开始小于碾压轮的自重。当碾压轮速度减至0,该时间记为t_3,即t_3时刻是碾压轮上升至最高点的瞬间。$t_2 \rightarrow t_3$期间碾压轮竖向速度随时间的变化关系见式(7),通过$v_{(t3)}=0$可解得t_3。因此t_3时刻碾压轮相对于t_2时刻的竖向位移增量为:

$$x_3 = \int_{t_2}^{t_3}\left[\frac{F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_1 - \cos\omega t) + \frac{G}{M}(t_1 - t)\right]\mathrm{d}t \quad (7)$$

碾压轮在单次碾压过程中相对于地面的最大高度$H=x_2+x_3$。当时间超过t_3时刻后,碾压轮在自身重力以及偏心块竖向分力的共同影响下,开始向下进行加速运动。$t_3 \rightarrow t_4$时间段内,碾压轮速度为:

$$v(t) = \frac{F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_3 - \cos\omega t) + \frac{G}{M}(t_3 - t) \quad (8)$$

则t_3到t_4时刻的位移为:

$$x(t) = \int_{t_3}^{t}\left[\frac{F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_3 - \cos\omega t) + \frac{G}{M}(t_3 - t)\right]\mathrm{d}t \quad (9)$$

则最大高度可表示为:

$$H = x(t_4) = \frac{F_{激}(t_4 - t_3)}{\omega M}\cos\omega t_3 + \frac{F_{激}}{\omega^2 M}(\sin\omega t_3 - \sin\omega t_4) - \frac{G}{2M}(t_4 - t_3)^2 \quad (10)$$

通过式(10)可解得t_4。

在碾压轮从t_3到t_4下落过程中,其所受重力以及偏心块竖向分力共同所作竖向功为:

$$W_1 = \int_{t_3}^{t_4}\left(F_{激}\sin\omega t - G\right)\mathrm{d}x(t) \quad (11)$$

式中:$x(t)$ — t_3到t_4时刻位移随时间的变化关系。

将t_4代入后,碾压轮下落对土体做的功W_1为:

$$W_1 = \frac{F_{激}^2\cos\omega t_3}{\omega^2 M}(\cos\omega t_3 - \cos\omega t_4) + \frac{Gt_4F_{激}}{\omega M}(\cos\omega t_4 - \cos\omega t_3) + \frac{F_{激}Gt_3}{M\omega}(\cos\omega t_3 - \cos\omega t_4) + \frac{G^2}{2M}(t_4 - t_3)^2 \quad (12)$$

碾压轮与地面接触时其动能传递给路基,即接触地面阶段(第2阶段)开始。从t_4时刻到下一次的t_1时刻,碾压轮与土体的接触过程可以被视为一个单自由度振动模型。利用动力学方程(式13)可求解出自重及偏心块共同作用下碾压轮与土体接触时的竖向位移。随后,通过竖向位移可计算出第2阶段中碾压轮对土体做的功。

$$M\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_{激}\sin\omega t \quad (13)$$

式中:$x(t)$ — 碾压轮处于第2阶段(与土体接触)竖向位移随时间变化的关系;

c — 阻尼系数[31](N·s/m);

k — 刚度系数[32](N/m);

M — 碾压轮质量(kg)。

由式(13)可得:

$$\ddot{x}(t) + 2\zeta\omega\dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = \frac{F_{激}\sin\omega t}{M} \quad (14)$$

式中:ζ — 阻尼比,$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{kM}}$;

ω — 角速度(rad/s),$\omega = \sqrt{\frac{k}{M}}$。

基于式(14)可解得第2阶段(接触土体阶段)碾压轮竖向位移:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega t}(C_1\cos\omega\sqrt{1-\zeta^2}\,t + C_2\sin\omega\sqrt{1-\zeta^2}\,t) - \frac{F_{激}}{2\zeta\omega^2 M}\cos\omega t \quad (15)$$

因此,接触土体阶段碾压轮所作竖向功为:

$$W_2 = \int_{t_4}^{T+t_1}\left(F_{激}\sin\omega t - G\right)\mathrm{d}x(t) \quad (16)$$

式中:$x(t)$ — 接触土体阶段的竖向位移。

则单次振动碾压过程中碾压轮给予土体的能量为:

$$W = W_1 + W_2 \quad (17)$$

根据压实沉降量公式[33]可得出单次碾压最大沉降量:

$$Z_0 = \frac{W}{R_0} + \frac{R_0}{2C} \quad (18)$$

式中:Z_0 — 单次碾压最大沉降量(m);

R_0 — 土体结构塑性极限对应的荷载(kN)；

C — 加荷比例常数(N/m)。

在进行上述计算时，首先需要确定振动系统模型的等效圆半径。基于面积等效的原则，将碾压过程中碾压轮与土体的接触简化为圆柱面与土体面的接触。从截面视角观察，这种接触表现为一段圆弧的接触，其接触长度等同于碾压轮的宽度。通过设定圆柱面与土体面的接触面积等于刚性圆盘与地面的接触面积，可以求解出等效圆的半径(图4)[34]。

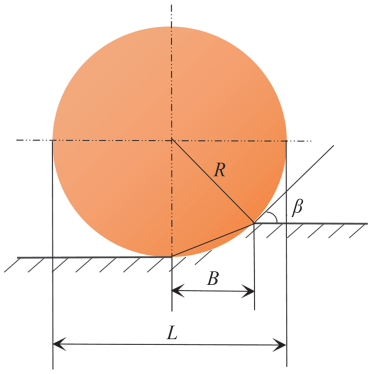


图4 碾压轮与路基接触面

Fig. 4 Contact surface between roller and subgrade

设碾压轮的宽为L，碾压轮与土体的接触弧长为B，则碾压轮的触地面积为$A=BL$，令刚性圆盘的触地面积与其相等，则有：

$$\pi r^2 = BL \tag{19}$$

即

$$r = 0.55\sqrt{BL} \tag{20}$$

又因$B=R\sin\beta$，因此

$$r = 0.55\sqrt{RL}\sqrt{\sin\beta} \tag{21}$$

其中β为碾压轮与土体接触点的切线和水平线之间所围夹角的大小，R为碾压轮半径。

在单次碾压过程中，沉降量呈现圆弧轨迹(图5)，该圆弧线会随碾压速度变化而改变，从而导致沉降量产生相应的差异。对于整个路基而言，圆弧线轨迹会影响整体沉降量的平均值。路基碾压平均沉降量可用于判断行驶速度对碾压效果的影响。此外，单次振动碾压所产生的沉降量会对路基的整体平均沉降量产生影响。而单次碾压沉降量与碾压轮的激振力、激振频率、自重均密切相关。因此，可通过计算路基平均沉降量来分析碾压效果与各因素的关系。

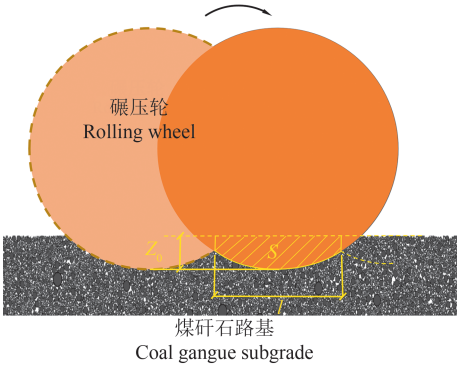


图5 碾压过程

Fig. 5 Compaction process

碾压沉降量Z_0(图5)代表单次碾压所能达到的最大深度。通过综合考虑行驶速度v、碾压轮半径R可计算出单次碾压周期内的沉降面积S。若已知单周期碾压的宽度l($l=vT$)，则可以推导出单次碾压的平均沉降量Z。在振动碾压过程中，每个周期碾压效果均一致，单次碾压平均沉降量也即代表路基碾压平均沉降量。

单次碾压周期内沉降面积S可近似表示为：

$$S = \frac{1}{2}\left\{2Z_0 + \sqrt{R^2 - \frac{v^2T^2}{4}} - R\right\}vT \tag{22}$$

式中：R — 碾压轮半径(m)；

T — 振动周期(s)。

路基碾压平均沉降量Z为：

$$Z = Z_0 + \frac{1}{4}\sqrt{4R^2 - \left(\frac{v}{f}\right)^2} - \frac{R}{2} \tag{23}$$

在碾压轮半径R保持恒定的情况下，平均沉降量Z随着行驶速度v的增大而减小。此外，激振频率f增大、单次碾压最大沉降Z_0增大都会导致沉降量Z的相应增加。当碾压轮振动频率处于较低水平时，为了满足碾压要求，可以通过降低行驶速度v来实现。而在工期较为紧迫的情况下，则可通过提高激振频率来增强碾压效果。同时，单次碾压最大沉降Z_0的增大也会使整体平均沉降量增大，其大小则与压实能量以及土体性质相关。若填筑路基材料相同，Z_0仅受压实能量W影响。根据式(12)和式(16)，碾压轮自重以及激振力与压实能量之间存在正相关关系，即激振力越大，碾压轮的动能越大。其中，碾压轮的自重主要影响第2阶段与地面接触时的静压能量，自重的增加会直接导致压实能量的增大。

2　路基振动压实离散元模拟

二维颗粒流程序(Particle Flow Code PFC^{2D})是基于离散元法(Discrete Element Method，DEM)的数值模拟技术，可模拟圆形颗粒介质运动与相互作用以研究岩土等材料的力学特性。PFC模型将材料离散为刚性颗粒集合，颗粒间的接触力通过既定的接触模型进行计算，并采用显式有限差分法循环迭代求解系统的应力平衡状态。因此，本文采用PFC^{2D}对煤矸石路基碾压过程进行模拟。

本研究基于离散元法的基本原理，结合已有文献[35-38]的研究成果，确定了煤矸石路基碾压过程中颗粒间相互作用的模型参数。其中，煤矸石颗粒密度设定为2 100 kg/m³，以反映其实际物理特性。表1列出了煤矸石路基碾压的详细模型参数。

表1 煤矸石路基碾压细观物理力学参数

Table 1 Meso-physical and mechanical parameters of coal gangue roadbed rolling

模型参数 Model parameter	参数值 Parameter value	模型参数 Model parameter	参数值 Parameter value
墙体单元摩擦系数 Wall unit friction coefficient	0.8	球链的法向粘结强度/MPa The normal bond strength of the ball chain	1
球链颗粒线性平行粘结接触模量/GPa Linear parallel bond contact modulus of spherical particles	0.8	球链的切向粘结强度/MPa Tangential bond strength	1
球链颗粒平行粘结刚度比 Parallel bond stiffness ratio of ball chain particles	1	球链平行粘结内摩擦系数 Internal friction coefficient of ball chain parallel bonding	0.8
碾压轮墙体刚度/GPa Rolling wheel wall stiffness	10	煤矸石线性接触刚度比 Linear contact stiffness ratio of coal gangue	1
碾压轮墙体刚度比 Rolling wheel wall stiffness ratio	1	煤矸石线性接触模量/GPa Linear contact modulus of coal gangue	0.1
碾压轮墙体单元摩擦系数 Rolling wheel wall friction coefficient	0.8	煤矸石单元摩擦系数 Coal gangue unit friction coefficient	0.8

2.1　模型建立

针对煤矸石材料，为提高计算效率，需对土颗粒尺寸进行优化处理，本文将小于5 mm的颗粒统一调整至5 mm。此外，碾压轮周长3.77 m，因此设定合理路基长度为4.6 m，以确保碾压轮在碾压过程中至少碾压一周。

模拟步骤如下：

(1)建立初始模型。利用domain命令创建足够宽广模拟区域，并在该区域内借助wall命令构建长为4.6 m的墙体边界。根据煤矸石级配在墙体内部生成颗粒，并将所有尺寸小于5 mm的颗粒统一等效为5 mm颗粒。采用线性接触模型模拟颗粒在自重作用下达到平衡状态的过程。

(2)颗粒摊铺整平。该过程用于模拟实际施工中的推土机整平作业。即在模拟中删除超出既定松铺厚度的颗粒，再次进行自重平衡计算，模拟结果如图6所示。



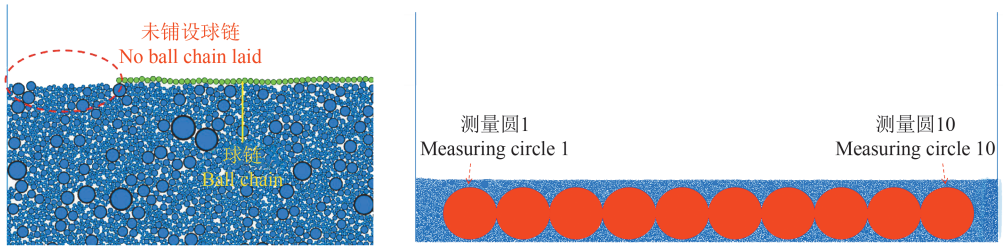
(a)颗粒整平前
(a) Before particle leveling

(b)颗粒整平后
(b) After particle leveling

图6 颗粒整平

Fig. 6 Particle leveling

(3)沉降与孔隙率计算。在已整平颗粒层表面铺设球链以监测沉降量。球链颗粒采用线性接触黏结模型，其抗拉强度为1 MPa，抗剪强度为1 MPa。为避免碾压过程中出现挤土现象，特别设定碾压轮起始与结束位置，即使其与墙体边缘保持0.15 m距离(图7a)。此外，在颗粒内部布置10个测量圆计算碾压过程中煤矸石孔隙率(图7b)。



(a)球链铺设(局部)
(a) Ball chain laying (detail)

(b)测量圆布置
(b) Measuring circle layout

图 7 球链与测量圆布设

Fig. 7 Layout of the ball chain and the measuring circles

(4)碾压模拟。通过圆形碾压轮对目标区域施加荷载。该过程中需配置碾压轮关键施工参数(垂向压力、水平行进速度及碾压轮的旋转速率)实行多次碾压循环作业,且应确保碾压轮轨迹均匀覆盖于球链上方(图 8)。

2.2　参数选取与方案设计

基于振动碾压轮能量与沉降量的理论关系,采用数值模拟探讨松铺厚度、碾压轮自重、行驶速度、激振力及激振频率参数对碾压效果的影响。正交试验设计高效且便捷,适用于研究多因素多水平问题,本文采用该方法探讨多因素影响下的煤矸石路基最优碾压方案。

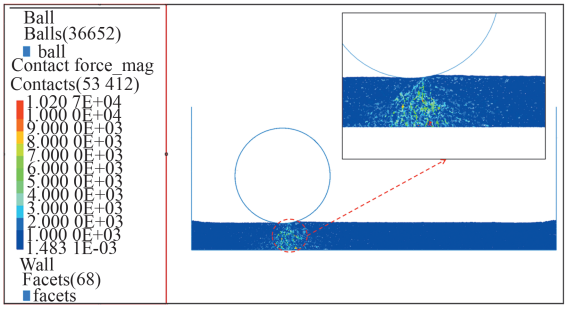


图 8 碾压模拟

Fig. 8 Simulation of roller compaction

本文正交试验因素及水平设计如表 2 所示,选取松铺厚度、行驶速度、激振频率及激振力 4 个关键因素,各因素均设置 4 个水平。

表 2 正交试验因素及水平设计

Table 2 Orthogonal test factors and level design

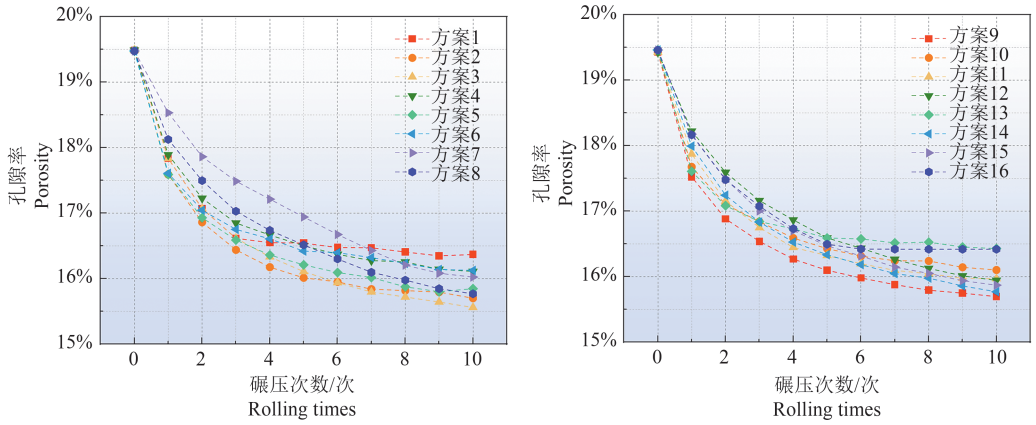
水平 Factors	因素 Factors			
	松铺厚度/cm Loose-laying thickness	行驶速度/(m·s^{-1}) Driving speed	激振频率/Hz Excitation frequency	激振力/kN Excitation force
	A	B	C	D
1	30	1	20	100
2	35	1.5	30	150
3	40	2	40	200
4	45	2.5	50	250

建立 4 因素 4 水平的 $L_{16}(4^4)$ 正交表(表 2)对各碾压工况进行模拟,采用碾压沉降量作为碾压效果的衡量标准。

2.3　结果与分析

2.3.1 *碾压孔隙率与沉降率*　煤矸石路基孔隙率随碾压次数的变化曲线如图 9 所示。可以看出,孔隙率随碾压次数的增加而降低。以编号 3 为例,首次碾压时,煤矸石摊铺层孔隙率为 19%,当碾压第 5 次时,孔隙率降低至 16%;当碾压第 10 次时,孔隙率降低至 15%。在前 5 遍碾压过程中,孔隙率随碾压次数增加呈线性递减趋势;6-10 遍时,孔隙率减小缓慢并逐渐稳定。具体表现为碾压初期颗粒迅速密实,后期形成稳定结构后,孔隙率对压实能量的响应减弱。

不同测量区域的孔隙率随碾压时间的变化情况如图 10 所示。可见,随着碾压时间的增加,各测量区域孔隙率整体呈下降趋势。孔隙率波动较为剧烈时,该区域煤矸石在振动碾压时颗粒排列与孔隙变化复杂,颗粒间相对运动频繁。孔隙率相对稳定的区域煤矸石颗粒排列有序,孔隙减小过程平稳,利于实现均匀沉降。



(a)方案1-方案8　(a) Scheme 1-Scheme 8　　(b)方案9-方案16　(b) Scheme 9-Scheme 16

图9 孔隙率随碾压遍数变化

Fig. 9 Porosity changes with the number of rolling passes

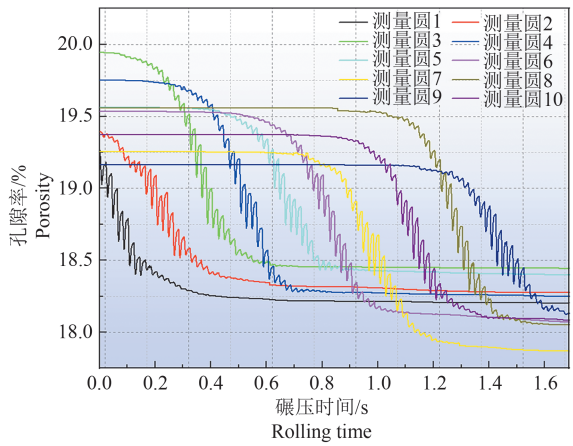
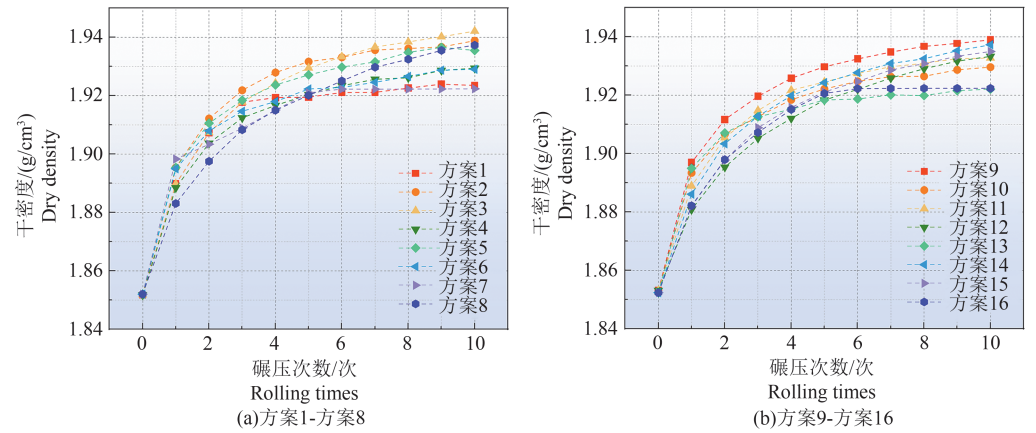


图10 孔隙率变化

Fig. 10 Porosity variation

煤矸石路基填料干密度随振动碾压次数的变化曲线如图11所示。可以看出,随碾压次数不断增加,煤矸石干密度逐渐增大。首次碾压时,煤矸石摊铺层干密度为1.85 g/cm³。以编号3为例,当碾压次数达到第10次时其最大干密度为1.94 g/cm³,干密度增长率为0.09 g/cm³,碾压效果明显。随着碾压次数增大,煤矸石摊铺层干密度增长幅度逐渐减小。当碾压次数大于5次时,煤矸石干密度趋于稳定。

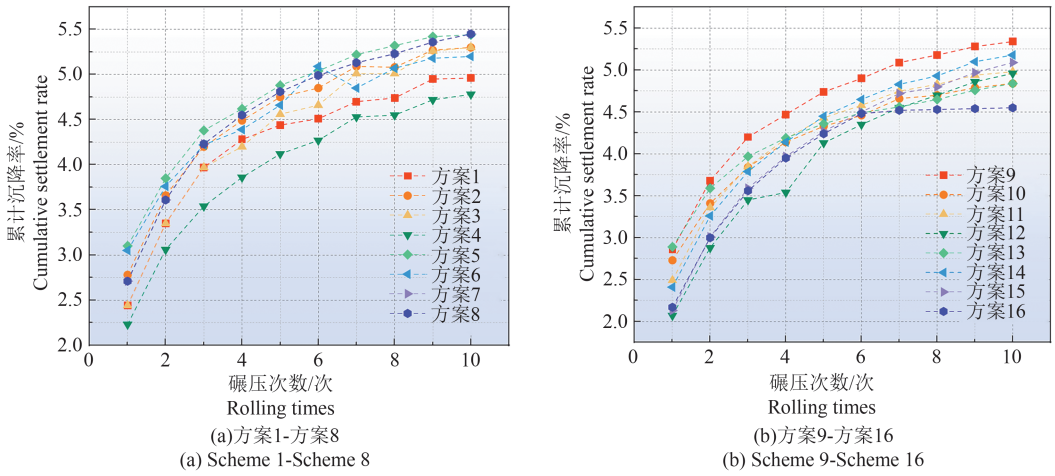
煤矸石路基累计沉降率随碾压次数的变化曲线如图12所示。可以看出,随碾压遍数的递增,累计沉降率的变化趋势与干密度的增长趋势相吻合,均呈现出逐渐上升但增幅减缓的特点。首次碾压后,碾压效果最为突出,累计沉降率最低为2.07%;最高达到3.10%。当碾压进行到第5遍时,累计沉降率上升到4.14%-4.88%,之后沉降量增加趋于平缓。经过10遍碾压后,累计沉降率最高达到5.45%(方案7),最低则为4.55%(方案16)。



(a)方案1-方案8　(a) Scheme 1-Scheme 8　　(b)方案9-方案16　(b) Scheme 9-Scheme 16

图11 煤矸石摊铺层干密度随碾压遍数变化

Fig. 11 Dry density of coal gangue paving layer changes with the number of rolling passes



(a)方案1-方案8　(a) Scheme 1-Scheme 8　(b)方案9-方案16　(b) Scheme 9-Scheme 16

图 12 累计沉降率随碾压遍数变化

Fig. 12 Cumulative settlement rate changes with the number of rolling passes

2.3.2 碾压接触力云图分析　图 13 为不同碾压次数下煤矸石颗粒接触力云图。随着碾压次数的增加，煤矸石颗粒间的接触数量与接触力均逐渐增大。整体看来，随着碾压次数增加，接触力云图由蓝色低接触力区域逐渐转变为黄绿、红色等高接触力区域。第 1 遍碾压时，高接触力（红、黄色区域）集中于碾压轮附近，且分布范围较小，说明煤矸石颗粒间接触作用初步建立，尚未充分发展，此时接触数量为 69 720。相比第 2 遍碾压，第 4 遍碾压时，接触数量为 70 025，接触力区域有所扩大，表明颗粒间相互挤压、咬合作用增强。第 10 遍碾压时，接触力区域占据相对较大范围，接触力网络高度发育，表明经过多次碾压，煤矸石颗粒间接触力充分发展，颗粒间相互作用达到较高水平，结构更为稳定。接触力的变化直观反映了煤矸石在碾压过程中压实特性的改变，即随着碾压遍数增加，颗粒间接触力增多、分布范围扩大且网络更复杂，意味着煤矸石颗粒间空隙减小、密实度增加，宏观上体现为煤矸石材料逐渐被压实，强度和稳定性逐步提升。

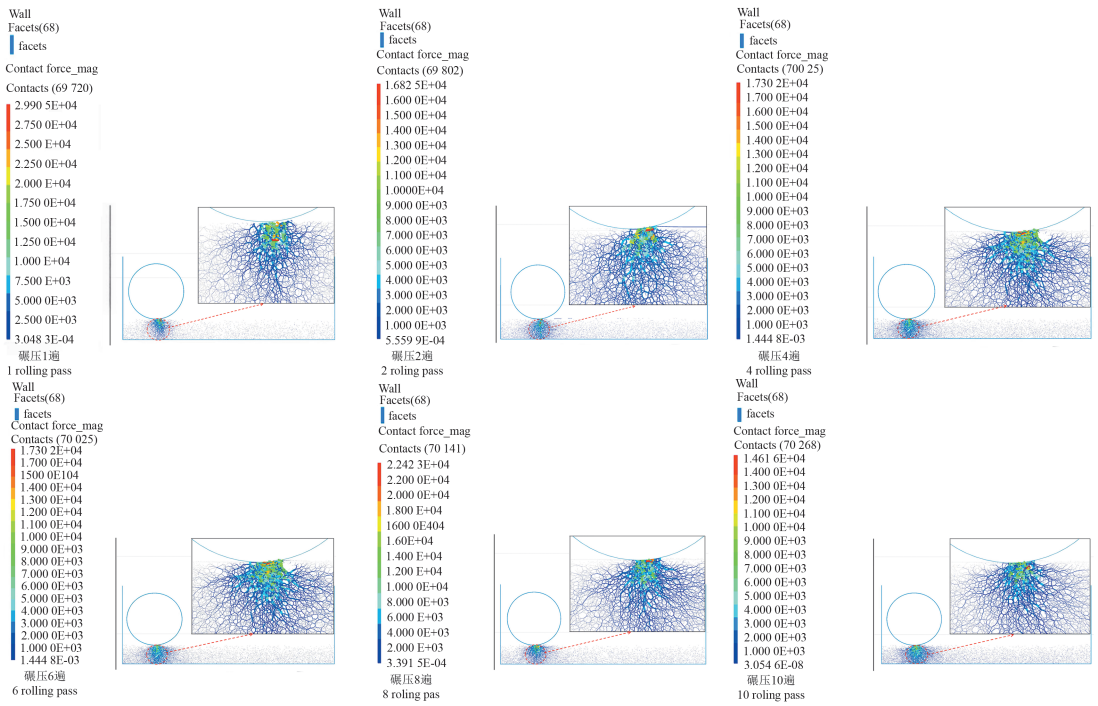


图 13 不同碾压遍数下煤矸石颗粒接触力云图

Fig. 13 Contact force cloud diagram of coal gangue particles under different rolling times

3　最优碾压方案

为进一步探究各因素不同水平组合下煤矸石路基碾压的实际效果,具体正交试验方案及结果如表3所示。

对16组正交试验数据的分析表明,碾压沉降率在4.55%(方案16)至5.45%(方案7)范围内波动。这一显著的数据差异证实,松铺厚度、行驶速度、激振频率和激振力等参数的组合变化会显著影响碾压沉降效果,这为后续施工参数的优化选择提供了重要的试验依据。

3.1　极差分析

碾压结果的各项指标受4个因素共同影响,但各因素对试验结果的影响程度存在显著差异。由表4可知,极差按照从大到小的顺序依次为A(松铺厚度)、D(激振力)、B(行驶速度)、C(激振频率),表明松铺厚度对沉降量的影响最为显著。根据正交试验结果,从16种碾压方案中确定最优方案为$A_2B_3C_3D_2$,即碾压方案为松铺厚度35 cm、行驶速度2 m/s、激振频率40 Hz、激振力150 kN。

表3 正交试验方案

Table 3 Orthogonal test scheme

编号 Number	松铺厚度/cm Loose-laying thickness	行驶速度/m·s^{-1} Driving speed	激振频率/Hz Excitation frequency	激振力/kN Excitation force	碾压沉降率/% Rolling settlement rate
1	30	1	30	150	4.96
2	30	1.5	40	200	5.30
3	30	2	50	250	5.30
4	30	2.5	20	100	4.78
5	35	1	20	250	5.44
6	35	1.5	50	100	5.20
7	35	2	40	150	5.45
8	35	2.5	30	200	5.37
9	40	1	50	200	5.34
10	40	1.5	20	150	4.84
11	40	2	30	100	4.98
12	40	2.5	40	250	4.96
13	45	1	40	100	4.84
14	45	1.5	30	250	5.18
15	45	2	20	200	5.09
16	45	2.5	50	150	4.55

表4 极差分析

Table 4 Extremum difference analysis

统计量	松铺厚度 Loose-laying thickness	行驶速度 Driving speed	激振频率 Excitation frequency	激振力 Excitation force
K_1	20.34%	20.58%	20.15%	19.80%
K_2	21.46%	20.52%	20.49%	19.80%
K_3	20.12%	20.82%	20.55%	21.10%
K_4	19.66%	19.66%	20.39%	20.88%
k_1	5.09%	5.15%	5.04%	4.95%
k_2	5.37%	5.13%	5.12%	4.95%
k_3	5.03%	5.21%	5.14%	5.28%
k_4	4.92%	4.92%	5.10%	5.22%
极差	0.45%	0.29%	0.10%	0.33%
最优方案	$A_2B_3C_3D_2$			

注:A、B、C、D分别代表松铺厚度、行驶速度、激振频率、激振力;下标数字1、2、3、4表示各因素的水平编号。

Note: A, B, C, and D denote loose-laying thickness, driving speed, excitation frequency, and excitation force, respectively; the subscripts 1, 2, 3, and 4 indicate the factor levels.

3.2 方差分析

为进一步分析松铺厚度、行驶速度、激振频率及激振力等碾压工艺参数对碾压沉降率的影响程度，本研究采用方差分析法，结果如表5所示。

表5 方差分析

Table 5 Analysis of variance

方差来源 Source of variance	平方和 Quadratic sum	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F值 F ratio	临界值 Critical value	P值 P ratio	显著性 Significance	效应量η^2 Effect size η^2
松铺厚度 Loose-laying thickness	0.004 02	3	0.001 34	0.876	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	大于0.05	不显著	0.321
行驶速度 Driving speed	0.001 68	3	0.000 56	0.366	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	大于0.05	不显著	0.134
激振频率 Excitation frequency	0.000 08	3	0.000 03	0.020	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	大于0.05	不显著	0.006
激振力 Excitation force	0.002 18	3	0.000 73	0.477	$F_{0.05}(3,3)=9.28$	大于0.05	不显著	0.174
误差 Error	0.004 58	3	0.001 53	/	/	/	/	/
总和 Summation	0.012 54	15	/	/	/	/	/	/

方差分析结果（表5）显示，在显著性水平α=0.05下，松铺厚度、行驶速度、激振频率及激振力对沉降率的影响均未达到统计学显著性（P>0.05）。然而，根据效应量η^2（Cohen标准[39]：$\eta^2\geq$0.01为小效应，$\eta^2\geq$0.06为中等效应，$\eta^2\geq$0.14为大效应），松铺厚度（η^2=0.321）和激振力（η^2=0.174）表现出较大的实际工程影响趋势，而行驶速度（η^2=0.134）和激振频率（η^2=0.006）影响较弱。极差分析和方差分析结果一致表明，松铺厚度对碾压沉降率影响最大，其次是激振力，行驶速度和激振频率影响较小。综合分析确定最优碾压方案为松铺厚度35 cm、行驶速度2 m/s、激振频率40 Hz、激振力150 kN。

4 结论

本文通过对振动压路机在路基碾压过程中碾压轮的运动状态进行分析，基于理论推导了碾压轮在运动过程中受力、速度、位移及能量公式，建立了煤矸石路基振动碾压沉降量与碾压轮激振力、激振频率、自重、行驶速度的关系。采用颗粒流PFC^{2D}软件对煤矸石的压实特性进行数值模拟，揭示了激振力、激振频率、行驶速度及松铺厚度对路基碾压效果的影响规律。最终通过正交试验得出最优碾压施工方案，所得结论如下：

（1）碾压轮在振动压实过程中的能量传递可分为两个阶段：在脱离地面阶段（第1阶段），激振力是影响能量的主要因素，激振力增大可显著提高能量输出；而在接触地面阶段（第2阶段），碾压轮传递给土体的能量主要受自重控制，自重增加可增强煤矸石压实效果。

（2）激振力、激振频率的增大可增强煤矸石路基压实效果。激振力由100 kN增大至500 kN、激振频率从20 Hz提高至50 Hz时，路基干密度显著增大，孔隙率相应降低。碾压行驶速度与松铺厚度的增加则削弱压实效果，当碾压行驶速度由1 m/s提升至2.5 m/s或松铺厚度从30 cm增加至45 cm时，路基填料干密度均降低，压实效果减弱。

（2）数值模拟与试验观测发现，累计沉降量随碾压次数增加呈上升趋势，干密度增长在首次碾压时最为显著，占总增长率的42.86%；碾压5次后干密度的累积增长率占10遍碾压总增长率的99.44%，表明碾压5次后煤矸石路基干密度已接近稳定状态，继续增加碾压遍数对密实度提升的贡献显著降低。

（4）选取松铺厚度、行驶速度、激振频率及激

振力4个因素,每个因素均选取4个水平进行正交试验。通过极差分析、方差分析的方法,发现松铺厚度是对碾压沉降率影响最为关键的因素,其次为激振力,而行驶速度和激振频率对碾压沉降率的影响相对较小。最终确定松铺厚度35 cm、行驶速度2 m/s、激振频率40 Hz、激振力150 kN为最优煤矸石路基碾压方案。

参考文献

[1] 张华林,赵梦飞,江晓亮,等.煤矸石改性方法及其资源环境利用研究进展[J].化学学报,2024,82(05):527-540.

[2] 王长龙,郑永超,刘世昌,等.煤矸石铁尾矿制备微晶玻璃的微观结构和力学性能[J].稀有金属材料与工程,2015,44(S1):234-238.

[3] 李 康,孟少伟,李 曼,等.煤矿固体废弃物的危害与治理[J].能源与节能,2024(09):91-94.

[4] Li R,Yao J,Liu J, et al.Impact of steel slag, gypsum, and coal gangue on microbial immobilization of metal(loid)s in non-ferrous mine waste dumps[J]. Journal of Hazardous Materials,2024,480:135750.

[5] 王彬宇,李 莉,李 菁,等.用工业固体废料合成沸石分子筛的研究进展[J].高等学校化学学报,2021,42(01):40-59.

[6] 任连伟,李 波,邹友峰,等.废弃蒸压砌块与煤矸石在煤矿采空区地基加固中的试验研究[J].煤炭科学技术,2023,51(11):51-62.

[7] 郝洪顺,徐利华,翟 玮,等.硅铝系固体废弃物合成Sialon材料的研究进展[J].无机材料学报,2010,25(11):1121-1127.

[8] Wen P H, Wang C H, Chen M, et al. Engineering property evaluation and multiobjective parameter optimization of argillaceous gangue‐filled subgrade based on grey relational analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2023,35(4):04023007.

[9] 仝 佳.煤矸石的路用性能及路基填筑施工技术[J].石材,2024(07):126-128.

[10] Li L H,Long G C,Bai C N, et al.Utilization of coal gangue aggregate for railway roadbed construction in practice[J].Sustainability,2020,12(11):4583.

[11] 刘 晶,刘生涛.煤矸石的路用性能及其在路基填筑施工中的应用[J].黑龙江科学,2024,15(02):100-102.

[12] Ashfaq M, Lal H M, Moghal B A A, et al. Carbon footprint analysis of coal gangue in geotechnical engineering applications[J].Indian Geotechnical Journal, 2019,(prepublish):1-9.

[13] Li J M, Huang Y L, Ouyang S Y, et al. Transparent characterization and quantitative analysis of broken gangue's 3D fabric under the bearing compression[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022,32(2):335-345.

[14] Chen Y, Jaksa M B, Kuo Y L, et al. Numerical investigation of the performance of the 3-sided impact roller[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 157: 105331.

[15] Bradley A C,Jaksa M B,Kuo Y L, et al.Finite element modelling of rolling dynamic compaction[J].Computers and Geotechnics,2023,157:105275.

[16] Yang X, Zhang Y, Li Z. Embankment displacement PLAXIS simulation and microstructural behavior of treated-coal gangue[J].Minerals,2020,10(3):218-218.

[17] 李文炜,占鑫杰,王保田,等.冲击碾压加固松散堰塞坝料的细观机制研究[J].岩土力学,2023,44(08):2297-2307.

[18] Song G Y,Hui B,Cui Y J, et al.Analysis of pH and conductivity variation characteristics of coal gangue used inFreeway subgrade and its correlation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021,632(2):022010.

[19] 朱 晟,卢知是,刘 纯,等.堆石体现场振动压实试验研究与应用[J].岩土力学,2021,42(09):2569-2577.

[20] Shen P, Lin S. Mathematic modeling and chaotic identification for practice construction in vibratory compacting[J]. Journal of Vibration Engineering and Technologies,2018,6(1):1-13.

[21] 徐红星,周 飞.高速铁路路基碾压三维有限元仿真分析[J].路基工程,2007(06):115-116.

[22] Beainy F, Commuri S, Zaman M, et al. Viscoelastic-plastic model of asphalt-roller interaction[J].International Journal of Geomechanics,2013,13(5):581-594.

[23] Cundall P A, Strack O D L. A discrete numericalmodel for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47-65.

[24] Zhou W,Yang L,Ma G, et al.DEM modeling of shear bands in crushable and irregularly shaped granular materials[J].Granular Matter,2017,19(2):1-12.

[25] 王大群,秦金桥.基于颗粒流程序的土石混合料振动压实特性数值分析[J].路基工程,2020(05):99-104.

[26] 李 杨,佘成学,朱焕春.现场堆石体振动碾压的颗粒流模拟及验证[J].岩土力学,2018,39(S2):432-442.

[27] 顾晓强,梁玉珍,周奇辉,等.白鹤滩水电站高填方工程砾石填料的物理力学特性[J].同济大学学报(自然科学版),2022,50(04):528-536.

[28] 周 忠,秦长国,徐永福,等.宕渣路堤碾压过程的数值模拟[J].中外公路,2008,28(06):45-49.

[29] 徐 平,何嘉雄,乔世范,等.基于离散元法的块石填料摊铺层振动压实过程及效应研究[J].水资源与水工程学报,2025,36(01):163-173.

[30] He W J L, Gong M Q. PFC's application on the dynamic response analysis of high speed railway ballastless subgrade[J].Applied Mechanics and Materials, 2014,2973(505-506):9-14.

[31] 郭丽丽.尾矿库地震动力响应分析中的阻尼问题研究[D].昆明:昆明理工大学,2016.

[32] 张世英.关于振动压路机设计中土的参数的确定方法[J].工程机械,1998(01):5-8+49.

[33] 王钕承.高填方路堤强夯法施工数值模拟及力学分析[D].重庆:重庆交通大学,2019.2.

[34] 母坤霖.振动压路机压实质量检测系统研究[D].西安:长安大学,2021.

[35] 张 革,曹 玲,王成汤.考虑各向异性影响的冻土修正线性黏结接触模型开发及应用[J].岩土力学,2023,44(S1):645-654.

[36] 王鹏程,刘建坤,李 旭,等.双轴压缩条件下碎石集料静力剪切特性研究[J].铁道学报,2014,36(06):87-92.

[37] 崔晓艳,庄 妍,张希栋,等.循环荷载下桩承式路堤中土拱效应动力折减系数离散元研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2022,49(09):164-172.

[38] 史旦达.单调与循环加荷条件下砂土力学性质细观模拟[D].上海:同济大学,2007.

[39] Jacob C .Statistical power analysis for the behavioral sciences[M].UK: Taylor and Francis,2013-05-13.