

DOI:10.3969/j.issn.2096-8248.2024.01.015

## 磷尾矿砂-土的击实性质及机理\*

赵晓晴<sup>1,2</sup>, 丁其峰<sup>1</sup>, 于志龙<sup>3</sup>, 宗钟凌<sup>1,2</sup>, 江舜根<sup>3</sup>, 徐振红<sup>3</sup>, 张长杰<sup>3</sup>, 曾强忠<sup>3</sup>, 徐传赓<sup>3</sup>

(1. 江苏海洋大学 土木与港海工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 江苏省海洋资源开发研究院, 江苏 连云港 222005;  
3. 连云港市铁路事业发展中心, 江苏 连云港 222000)

**摘要:** 利用磷尾矿砂改性黏土制备磷尾矿砂-土填料, 通过击实试验对11种不同配合比的磷尾矿砂-土的击实性质进行分析, 判断磷尾矿砂最佳掺量, 并从级配角度分析其击实机理。结果表明, 三次函数的拟合结果总体优于二次函数; 随着磷尾矿砂掺量的增加, 混合料的最大干密度先增加后减小, 最优含水率持续减小。磷尾矿砂和黏土具有颗粒互补性质, 采用40%磷尾矿砂和60%黏土形成的磷尾矿砂-土混合料, 可以形成骨架密实结构。

**关键词:** 磷尾矿砂; 黏土; 击实曲线; 最大干密度; 最优含水率; 级配机理

中图分类号: TU416

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2024)01-0115-06

引用格式: 赵晓晴, 丁其峰, 于志龙, 等. 磷尾矿砂-土的击实性质及机理[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2024, 33(1): 115-120.

## Study on Compaction Properties and Mechanism of Phosphate Tailings-clay

ZHAO Xiaoping<sup>1,2</sup>, DING Qifeng<sup>1</sup>, YU Zhilong<sup>3</sup>, ZONG Zhongling<sup>1,2</sup>, JIANG Shungen<sup>3</sup>,  
XU Zhenhong<sup>3</sup>, ZHANG Changjie<sup>3</sup>, ZENG Qiangzhong<sup>3</sup>, XU Chuangeng<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China;  
2. Jiangsu Institute of Marine Resources Development, Lianyungang 222005, China;  
3. Lianyungang Railway Development Center, Lianyungang 222000, China)

**Abstract:** Phosphate tailings modifying clay can be used to prepare phosphate tailings-clay filler. The compaction properties of 11 different mix proportions of phosphate tailings-clay were analyzed by the compaction tests, determining the optimal content of phosphate tailings. The compaction mechanism was analyzed from the perspective of the gradation. The results show that the fitting results of cubic functions are generally better than those of quadratic functions. With the increase of phosphorus tailings content, the maximum dry density of the mixture firstly increases and then decreases, and the optimal moisture content continues to decrease. The phosphate tailings and clay have the complementary characteristics of the particles, and the phosphate tailings-clay formed by 40% phosphate tailings and 60% clay can form a skeleton compact structure.

**Key words:** phosphate tailings; clay; compaction curve; maximum dry density; optimum water content; compaction mechanism

\* 收稿日期: 2023-09-12; 修订日期: 2024-01-02

基金项目: 江苏省重点研发计划(社会发展)项目(BE2021681); 江苏高校“青蓝工程”资助项目; 江苏省高等学校自然科学研究项目(23KJA580003); 连云港市重点研发计划项目(SF2230); 连宿高速产学研项目(JOUH22089)

作者简介: 赵晓晴(1981—), 女, 江苏连云港人, 副教授, 博士, 研究方向为固废资源化利用, (E-mail)zxqjhd@jou.edu.cn.

通信作者: 宗钟凌(1979—), 男, 山东菏泽人, 教授, 博士, 研究方向为地基处理新技术, (E-mail)jouzhl@jou.edu.cn.

## 0 引言

我国是磷矿资源大国。国家统计局的数据显示,2016年我国磷矿储量为32.4亿t,占世界的4.6%左右,居世界第二<sup>[1]</sup>。虽然磷矿储量大,但是90%以上的储量为中低品位矿<sup>[2-3]</sup>,富矿占比相对较少,导致在采选过程产生巨大的难度。磷尾矿砂<sup>[4]</sup>是在磷矿石提取过程中产生的一种副产品,属于工业废弃物。在磷矿石开采和提取过程中会产生巨量的磷尾矿砂,而目前对磷尾矿砂的处理方式以简单的堆放和填埋为主,由此带来较为严重的环境问题,诸如粉尘飞扬、土壤和水体污染、生态系统破坏以及潜在的人体健康风险<sup>[5-6]</sup>。另外磷尾矿砂的堆积也造成了巨大的浪费,一是由于磷尾矿砂本身就是一种可利用资源,二是由于磷尾矿砂日积月累地堆放将占用大量的土地。因此,急需对磷尾矿砂进行高掺量、大规模的资源化处理 and 利用。最近几年,我国道路基础设施建设蓬勃发展。以连云港为例,目前连宿高速新建、连淮高速扩建,还有其他地方的道路建设等,都对路基填料具有高需求。而由于环保等原因,目前填料较为匮乏,由此产生非常重要的研究课题——磷尾矿砂制备路基填料的可行性<sup>[7]</sup>。磷尾矿砂可以取代或部分取代黏土、改性黏土,来制备路基填料,这样既可以高效利用磷尾矿砂,又能提高土体性质,还能改善道路填料匮乏的困境,节约土地,提升周边环境质量。

吴非<sup>[8]</sup>研究了磷尾矿砂掺量对磷尾矿砂-土性能的影响,得出磷尾矿砂掺量为50%时,颗粒级配达到最优状态,抗剪强度最高,CBR值最高且满足规范要求;张魁等<sup>[9]</sup>利用磷尾矿砂配合水泥固化天然软土,提高其承载能力,研究发现,固化土的强度随着水泥含量和磷尾矿含量的增加而增加,强度主要来源于磷尾矿砂的骨架作用和水泥水化物的胶结作用。庄心善等<sup>[10]</sup>通过在膨胀土中掺入不同质量比的磷尾矿,对改良土进行无荷膨胀率、无侧限抗压强度及三轴试验,得到磷尾矿掺量与改良土黏聚力、内摩擦角以及强度的关系:磷尾矿对膨胀土的膨胀性有一定的抑制作用;掺入量为6%时,改良土无侧限抗压强度和抗剪强度均达到最大;黏聚力随着磷尾矿掺量的增加而减小,内摩擦角先增大后减小。林万锋等<sup>[11]</sup>利用GDS真三轴仪动力加载模块进行磷尾矿改良膨胀土(磷尾矿砂掺量为7%)的动力试验,研究了在不同围压(50,100,150 kPa)、频率(1,

2,5 Hz)条件下磷尾矿改良膨胀土的动弹模、阻尼比变化规律;频率、围压与动弹性模量呈非线性正相关关系。任园等<sup>[12]</sup>对磷尾矿砂-土进行了研究,在10%,30%,50%,70%这4种不同的磷尾矿砂掺量下进行击实试验,结果证实当磷尾矿砂掺量为50%时为最优配合比。陈琦<sup>[13]</sup>采用磷尾矿砂掺量分别为25%,50%,75%的磷尾矿砂-土进行击实性质研究,得出当磷尾矿砂掺量为25%时最大干密度最大。不同学者对磷尾矿砂-土的击实性质、强度性质进行了研究,得出的最优配合比有所区别,这是因为磷尾矿砂、基质土的性质有所区别,二是因为不同研究人员选择的配合比广度和精度不同。

在研究土的击实性质时,需要对最大干密度和最优含水率进行精确的读取,因此需要对击实曲线进行更为准确的拟合,通过数学方法计算得出最大干密度和最优含水率。不同的拟合方式精确度不同,导致击实性质也具有差异性。为了探究磷尾矿砂-土的击实性质及击实机理,本文设计了11种配合比的磷尾矿砂-土混合料,通过击实试验得出击实数据,利用Origin软件进行二次和三次拟合,判断两种拟合方法的精确性,选择精确性更高的拟合方式计算最优含水率和最大干密度。基于击实试验,分析磷尾矿砂掺量对混合土的击实性质的影响规律,判断磷尾矿砂最佳掺量,并从级配角度分析其击实机理。

## 1 试验材料

磷尾矿砂取样于江苏连云港市锦屏磷矿的尾矿堆场,颜色呈淡黄色(如图1所示),用手细搓时感觉类似于细颗粒状的砂或粉土。磷尾矿砂主要成分是碳酸钙、碳酸镁和氧化硅等<sup>[14]</sup>。黏土取样于江苏海洋大学校园,颜色呈褐色(如图2所示),可塑性高、黏性强。黏土的矿物成分中黏土矿物主要有伊利石、高岭石等。



图1 磷尾矿砂

Fig. 1 Phosphate tailings



图 2 黏土

Fig. 2 Clay

试验材料具体物理性质如表 1 所示。

表 1 试验材料物理性质

Table 1 Physical properties of test materials

试验材料	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	比重/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
磷尾矿砂	5.3	—	—	2.96
黏土	39.05	54.40	31.06	2.64

## 2 试验方案及方法

### 2.1 试验方案

对磷尾矿砂黏土混合料进行击实试验,配合比设计以材料所占质量分数表示。具体配合比如表 2 所示。

表 2 磷尾矿砂-土配合比

Table 2 Proportions of phosphate tailings-clay

配合比编号	磷尾矿砂占比/%	黏土占比/%
PC0	0	100
PC1	10	90
PC2	20	80
PC3	30	70
PC4	40	60
PC5	50	50
PC6	60	40
PC7	70	30
PC8	80	20
PC9	90	10
PC10	100	0

### 2.2 试验方法

采用重型击实试验<sup>[15-16]</sup>。锤质量为 4.5 kg,高度为 45 cm,击实桶体积为 997  $\text{cm}^3$ 。每个试样分 5 层击实,每层击 27 次。在击实前按照四分法每组配合比以不同的含水率制备至少 5 个试样(见图 3),含水率以 2% 递增,闷料(见图 4)时间不

少于 24 h。



图 3 击实试样

Fig. 3 Compacted specimen



图 4 闷料

Fig. 4 Curing material

## 3 试验结果分析

### 3.1 击实曲线拟合模型

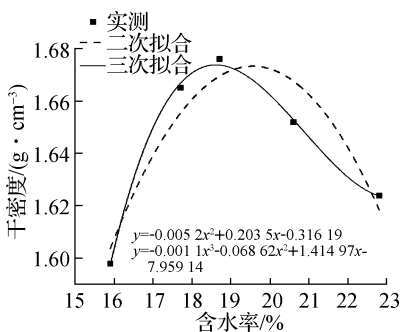
磷尾矿砂、黏土及磷尾矿砂-土混合料击实结果如图 5 所示。为了准确定位最优含水率和最大干密度,采用含水率为  $x$  自变量,干密度为  $y$  因变量,通过 Origin 软件进行二次和三次拟合,判断不同拟合方法的精确性<sup>[17]</sup>。

如图 5 所示,磷尾矿砂-土的击实拟合曲线均为单峰值曲线且开口朝下,符合一般填料的击实规律。通过 Origin 软件寻找和计算二次和三次拟合曲线峰值的  $x$  和  $y$  坐标值,得到了最大干密度和最优含水率。通过 Origin 软件计算二次和三次拟合的相关系数  $R^2$ 。 $R^2$  是回归平方和与总平方和的比值,用于衡量回归模型的质量优劣。 $R^2$  越接近于 1,拟合的值越接近于真实值<sup>[18]</sup>。

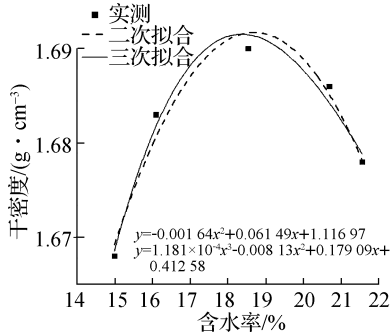
不同配合比拟合相关系数  $R^2$  的比较如图 6 所示。可以观察到,二次拟合和三次拟合的击实曲线  $R^2$  均较高,除了二次拟合的 PC0 组和 PC10 组外,均大于 0.9,说明二次拟合和三次拟合的精度均能适应一般工程需要。但是三次拟合的击实曲线  $R^2$  基本上均大于二次拟合,且更为接近于 1,

说明三次拟合的精度更高,能够更好地描述数据的变化趋势,得到更为准确的最大干密度和最优含水率,更能有效指导实际工程施工的压实度以

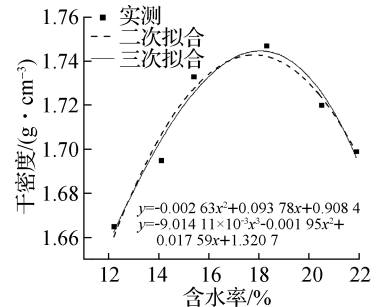
及压实机具的选择,提高施工质量。因此,建议采用三次拟合模型确定磷尾矿砂-土的最大干密度和最优含水率。



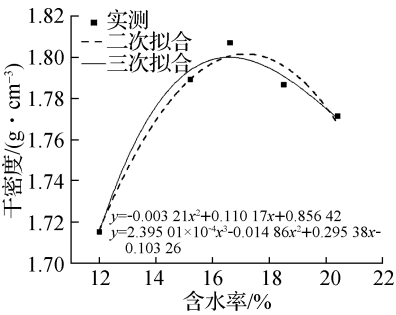
a PC0 击实拟合曲线



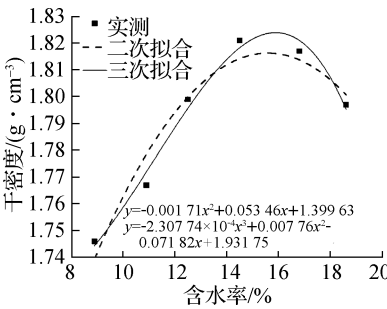
b PC1 击实拟合曲线



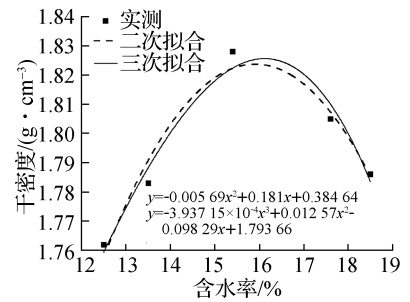
c PC2 击实拟合曲线



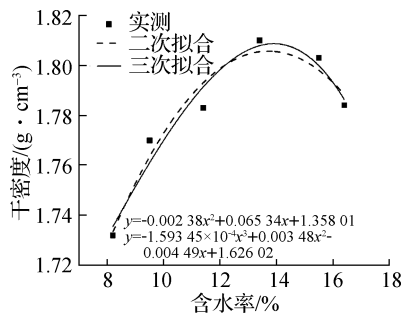
d PC3 击实拟合曲线



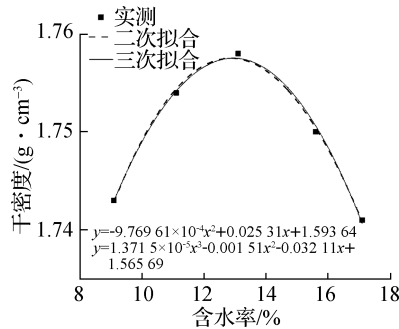
e PC4 击实拟合曲线



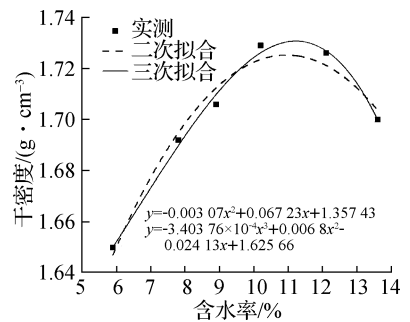
f PC5 击实拟合曲线



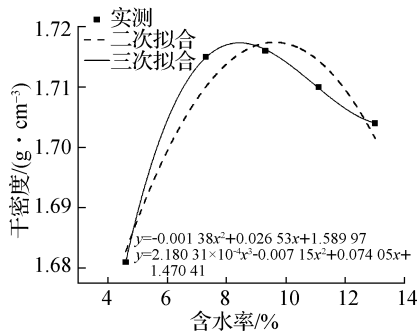
g PC6 击实拟合曲线



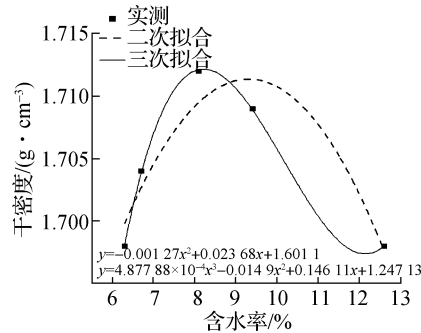
h PC7 击实拟合曲线



i PC8 击实拟合曲线



j PC9 击实拟合曲线



k PC10 击实拟合曲线

图5 磷尾矿砂-土击实拟合曲线

Fig. 5 Fitting curveson compaction of phosphate tailings-clay

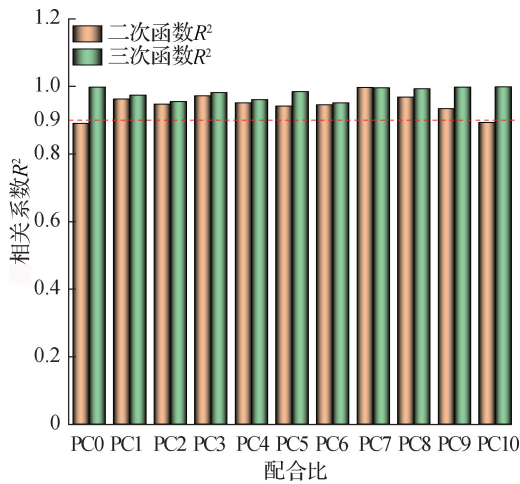
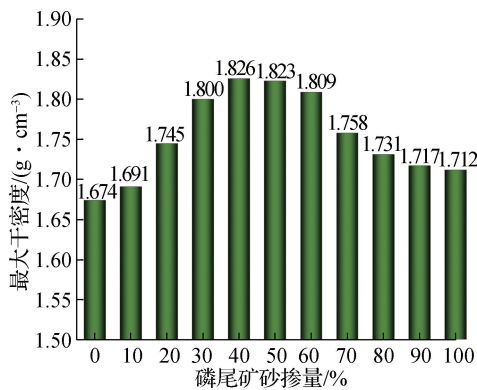


图 6 磷尾矿砂-土各组相关系数 R<sup>2</sup> 值

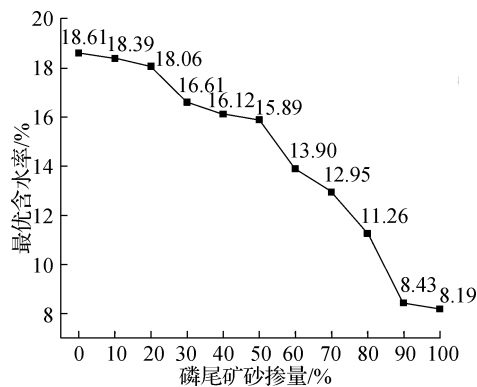
Fig. 6 R<sup>2</sup> value of phosphate tailings-clay

### 3.2 磷尾矿砂-土击实性质

利用“2.2”中击实方法进行不同配合比磷尾矿砂-土的击实试验,采用三次拟合模型确定其最大干密度及最优含水率,如图 7 所示。



a 最大干密度



b 最优含水率

图 7 磷尾矿砂-土最大干密度及最优含水率

Fig. 7 Maximum dry density and optimum water content of phosphate tailings-clay

磷尾矿砂的掺入对黏土的最大干密度和最优含水率产生了明显的影响。随着磷尾矿砂掺量的不断增大,磷尾矿砂-土的最大干密度先增大后减小,存在一个峰值,对应于磷尾矿砂掺量 40% 处,其最大干密度达到最大,为 1.826 g/cm<sup>3</sup>。当磷尾矿砂掺量为 40% 和 50% 时,两者最大干密度较为接近。究其原因:磷尾矿砂最大干密度大于黏土最大干密度,并且磷尾矿砂颗粒粗于黏土颗粒,因此随着磷尾矿砂掺量的增大,磷尾矿砂自身的最大干密度占比作用提升;较粗的磷尾矿砂形成骨架空间,较细的黏土颗粒能够有效填充该骨架空间,形成骨架密实结构,导致最大干密度提高;随着磷尾矿砂掺量的进一步增大,混合料中的砂粒含量增大,黏土含量减小,磷尾矿砂形成的空间骨架得不到黏土的有效填充,形成骨架空隙结构,可压实性降低,因此混合土最大干密度逐渐减小。随着磷尾矿砂掺量的不断增大,磷尾矿砂-土的最优含水率不断降低。黏土的粒度主要集中在粉粒和黏粒,吸水性和保水性高,最优含水率高(18.61%);而磷尾矿砂颗粒主要集中在砂粒,颗粒较大,比表面积大,保水性低,最优含水率低(8.19%)。因此,磷尾矿砂掺量增大导致最优含水率降低。

### 4 机理分析

土中所含各粒组的相对含量,以土粒总质量的百分数表示,称为土的颗粒级配。良好的颗粒级配可以使土的孔隙率较小,密实度更大。经击实之后,其最大干密度也更大,力学性质更佳。

图 8 和表 3 列出了磷尾矿砂、黏土及磷尾矿砂-土(最大干密度配合比组)的颗粒级配。大于 0.075 mm 的颗粒采用筛分法,小于 0.075 mm 的颗粒采用水分法。

不均匀系数(C<sub>u</sub>)大于 5 和曲率系数(C<sub>c</sub>) 在 1 到 3 之间的土,为级配良好的土。黏土和磷尾矿砂这两种材料的不均匀系数均大于 5,说明颗粒分布不均匀。黏土的曲率系数 C<sub>c</sub> 为 0.35,小于 1,说明存在级配间断情况;而磷尾矿砂的曲率系数为 27,远大于 3,表明其含有较多粗颗粒。无论黏土还是磷尾矿砂,都面临级配不良的问题。然而,黏土偏细,磷尾矿砂偏粗,两种材料可以以适合的比例混合来弥补各自的不足。黏土在掺入过程中,其颗粒能够填补磷尾矿砂颗粒间的空隙,并形成相互黏结的结构,不仅能够增加材料的黏聚力,提高其强度和性

能,还能够改善其孔隙结构。

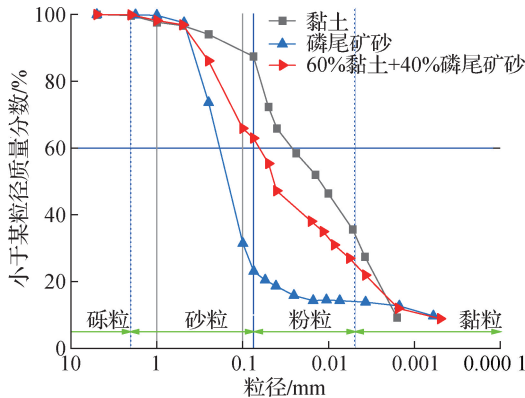


图8 磷尾矿砂-土颗粒级配

Fig. 8 Particle gradation of phosphate tailings-clay

表3 颗粒粒径分析

Table 3 Particle size analysis

材料	$d_{10}/\text{mm}$	$d_{30}/\text{mm}$	$d_{60}/\text{mm}$	$C_u$	$C_c$
黏土	0.001 80	0.004 1	0.027	15	0.35
磷尾矿砂	0.001 70	0.094 0	0.190	111	27.00
PC4	0.000 75	0.007 9	0.065	86	1.28

60%黏土+40%磷尾矿砂的磷尾矿砂-土试样充分利用了两种材料颗粒互补性质,其 $C_u$ 为86, $C_c$ 为1.28,同时满足 $C_u(>5)$ 和 $C_c(1\sim3)$ 的要求。该配合比拥有足够的粗颗粒来形成土骨架,也拥有足够的细颗粒来填充土骨架的空隙,从而形成骨架密实结构。综上所述,采用60%黏土和40%磷尾矿砂混合形成磷尾矿砂-土级配良好,形成骨架密实结构,具有较强的工程应用性。

## 5 结论

本文探讨了磷尾矿砂-土不同配合比的击实特性,并从级配角度分析击实机理,得出如下结论。

(1) 磷尾矿砂掺配黏土可以制备路基填料,其击实性良好。磷尾矿砂-土的击实曲线均呈开口向下单峰值曲线。

(2) 随着磷尾矿砂掺量的增大,磷尾矿砂-土最大干密度先增加后降低,最优含水率逐渐降低。当磷尾矿砂掺量达40%时,磷尾矿砂-土最大干密度达到最大。当磷尾矿砂掺量为40%和50%时,两者

最大干密度较为接近。

(3) 磷尾矿砂和黏土具有颗粒互补性质,采用40%磷尾矿砂和60%黏土混合形成的磷尾矿砂-土,可以形成骨架密实结构,其不均匀系数为86,速率系数为1.28,具有良好的级配。

## 参考文献:

- [1] 吴发富,王建雄,刘江涛,等. 磷矿的分布、特征与开发现状[J]. 中国地质,2021,48(1):82-101.
- [2] 张德龙,向鹏成. 多用途低品位矿利用的经济分析[J]. 中国资源综合利用,2006(7):22-24.
- [3] 吴礼定,曾波,王生军. 中低品位磷尾矿的综合利用研究进展[J]. 云南化工,2008(6):55-58.
- [4] 路学军,吕子健,卢中宝,等. 锦屏磷尾矿砂综合利用探讨[J]. 化工矿物与加工,2005(5):28-30.
- [5] 张中雷. 磷尾矿砂的开发利用[J]. 化工环保,1997(6):54-56.
- [6] 张淑会,薛向欣,刘然,等. 尾矿综合利用现状及其展望[J]. 矿冶工程,2005(3):44-47.
- [7] 刘军收. 尾矿砂作为路基填料的探讨[J]. 公路,1998(11):44-47.
- [8] 吴非. 黏土外掺比例对磷尾矿砂性能的影响研究[J]. 北方交通,2019(3):45-48.
- [9] 张魁,李红,朱立位,等. 磷尾矿砂固化原状海相软土试验研究[J]. 江苏建筑,2020(6):88-89.
- [10] 庄心善,杨文博,胡其志. 磷尾矿改良合肥膨胀土强度试验研究[J]. 科学技术与工程,2018,18(5):281-284.
- [11] 林万锋,庄心善. 磷尾矿最佳掺量下改良膨胀土的动力特性试验[J]. 土工基础,2022,36(2):269-272.
- [12] 任园,邵静. 黏土改良磷尾矿砂用作路基填料的研究与应用[J]. 公路,2018,63(11):46-49.
- [13] 陈琦. 碱渣-磷尾矿砂-黏土混合料的路用性能与工程应用[D]. 南京:东南大学,2020.
- [14] 罗海兵,闫红民. 磷尾矿砂在道路基(垫)层中的应用[J]. 公路,2005(5):146-148.
- [15] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [16] 刘华,梁腾,赵晓晴,等. 碱渣土的击实特性[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版),2022,31(4):84-88.
- [17] 杜瑞锋,裴向军,张晓超,等. 土工击实试验数据处理方法[J]. 实验室研究与探索,2019,38(9):19-24.
- [18] 黄紫竹. 基于Origin的土工击实试验数据处理探讨[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(9):8-10.

(责任编辑:褚金红 实习编辑:易圣杰)