

改性糯米灰浆改良煤矸石渣土性能研究

苏进源¹, 裴向军², 王勇¹, 张晓超², 唐之茗¹,
张乐飞¹, 祖明静³, 杨帅⁴

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

3. 成都理工大学材料与化学化工学院, 成都 610059;

4. 成都理工大学生态环境学院, 成都 610059)

摘要: 我国现有煤矸石及存量达 6.3×10^9 t 以上, 大量煤矸石渣土的露天堆积带来了一系列环境问题, 以煤矸石渣土为研究材料, 针对其存在的大孔隙和难以留存水分的问题, 掺入改性糯米灰浆、有机保水材料和改良剂对其抗压强度和水理特性进行改善。结果表明: 棕丝纤维和松香酸钠使风干抗压强度和饱和抗压提高, 硅藻土使抗压强度降低, 其中 2% 的松香酸钠使风干抗压强度增大 94.7%, 0.9% 的棕丝纤维使饱和抗压强度增大 46.8%。改性糯米灰浆和有机保水材料对水理特性的影响十分显著, 渗透系数从 6.3×10^{-2} cm/s 减小至 3.2×10^{-5} cm/s, 田间持水量从 12.21% 增大至 21.21%, 蒸发率从 4.2% 减小至 3.33%。

关键词: 改性糯米灰浆; 煤矸石; 矿山修复; 抗压强度; 水理特性

中图分类号: TD167; S156; X171.4 **文献标识码:** A

STUDY ON THE PROPERTIES OF MODIFIED STICKY RICE MORTAR TO IMPROVE COAL GANGUE SLAG

SU Jin-yuan¹, PEI Xiang-jun², WANG Yong¹, ZHANG Xiao-chao²,
TANG Zhi-ming¹, ZHANG Le-fei¹, ZU Ming-jing³, YANG Shuai⁴

(1. College of environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. College of Materials and Chemistry and Chemical Engineering,

Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 4. College of Environment and Ecology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: China's existing gangue and stock of more than 6.3 billion, a large number of gangue slag open-pit accumulation has brought a series of environmental problems, with gangue slag as the research material, in view of its existence of large porosity and difficult to retain water problems, the incorporation of modified glutinous rice mortar, organic water retention materials and modifiers to improve its compressive strength and hydraulic characteristics. The results showed that brown silk fiber and sodium rosin increased the air-

收稿日期: 2022-07-24 **改回日期:** 2022-11-03

基金项目: 全国大学生创新创业训练计划项目(202110616005); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主课题(SKLG2021Z018)

dried compressive strength and saturated compressive strength, and diatomaceous earth reduced the compressive strength, of which 2% sodium rosin increased the air-dried compressive strength by 94.7%, and 0.9% brown silk fiber increased the saturated compressive strength by 46.8%. The influence of modified glutinous rice mortar and organic water retention materials on hydrological properties was significant, and the permeability coefficient decreased from 6.3×10^{-2} cm/s to 3.2×10^{-5} cm/s, the water holding capacity in the field increased from 12.21% to 21.21%, and the evaporation rate decreased from 4.2% to 3.33%.

Key words: modified sticky rice mortar; gangue; mine restoration; compressive strength; hydrological characteristics

煤炭是我国的主要能源之一,2020年我国煤炭消费达 28.3×10^8 t,占全国能源消费总量的56.8%。众多煤田为我国社会经济发展提供了重要的能源基础,但煤矿的开采过程中会产生大量的煤矸石,约占煤炭产量的15%,我国现有煤矸石积存量达 63×10^8 t以上,大量煤矸石渣土的露天堆积带来了土地占用、地表下沉、水土流失、生态破坏、重金属淋溶、煤矸粉扬尘等问题^[1,2]。

矿山生态修复中土壤改良是根本^[3],煤矸石渣土孔隙率大,地表水分流失速度快,难以满足植物生长需要。解决煤矸石渣山生态修复的难题关键在于减小渣土的孔隙率,进而改善渣土的水理特性以满足持久修复要求。

糯米灰浆是我国古代一种重要的建筑材料,主要由糯米浆和石灰组成,国内外学者对其进行了广泛的研究。杨富巍^[4]等通过实验发现糯米浆对碳酸钙方解石结晶体大小和形貌有明显的调控作用,同时糯米淀粉能够很好地粘结碳酸钙纳米颗粒并填充其微孔隙,使糯米灰浆具有强度大、韧性好、防渗性优越等良好力学性能。郑晓平等^[5]发现硅酸盐的掺入可以增大糯米灰浆的抗压强度、耐冻融性和耐水性。贾栋钦^[6]等利用改性糯米灰浆固化黄土作为墙面修复材料,其中的石膏和方解石晶体改变了黄土原有的孔隙结构,并增强了土颗粒间的粘结,改善了黄土的水敏性。范明明等^[7]在糯米灰浆中掺入石膏和改性剂研制出一种优良的灌浆材料,在九寨沟修复裂缝、加固崖体现场修复试验中取得了良好的效果。卢喆等^[8]发现偏高岭土和麻纤维的掺入可以增大糯米灰浆抗氯盐侵蚀能力和抗冻融循环能力。阳令明等^[9]发现玄武岩纤维的空腔结构及细小直径的特点对糯米灰浆的力学性能有较大帮助,5%(质量分数)掺量的玄武岩纤维-糯米灰浆综合性能最佳。闫强强等^[10]发现偏高岭土可以增强传统糯米-石灰浆的力学性能。多年来,人们向传统糯米灰浆

中掺入不同的材料来改善其力学性能,其应用于遗址土^[11]、黄土^[6]和九寨沟裂缝修复^[7]的工程实践为本文将糯米灰浆应用于煤矸石渣山的生态修复提供了思路。

本文针对渣土存在的大孔隙问题,在传统糯米灰浆的基础上中掺入一水石膏、有机保水材料和3种改良剂对改性糯米灰浆加固煤矸石渣土的抗压强度和水理特性进行研究。

本文选取的3种改良剂分别是引气剂松香酸钠、棕丝纤维和硅藻土,主要是基于以下考虑选取的:松香酸钠曾作为引气剂被广泛应用于水泥基材料中,其可以在混凝土内部引入微米级的优异气泡,从而提高混凝土的抗压强度和抗冻性^[12],有关引气剂对糯米灰性能影响的研究较少;植物纤维具有较好的韧性,古代中国常将竹子和麻绳作为修建城墙的材料,其可以通过物理作用提高土体的整体性,从而改善城墙的力学性能;硅藻土的化学成分主要是 SiO_2 ,很多学者早已提出,混凝土中添加硅藻土材料,有助于提高混凝土力学性能与耐久性能^[13]。

1 实验

1.1 材料与配比

煤矸石渣土取自青海省西部某高原矿区,筛分至粒径小于20 mm,颗分曲线如图1所示;糯米粉购于成都当地超市;石灰采用化工用熟石灰($\text{Ca}(\text{OH})_2$)含量大于95%),产地为新余市,颗粒细度为200目;一水石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ 含量大于90%)购于山东优索化工科技有限公司,400目;硅藻土购于福晨化学试剂有限公司,分析纯;松香酸钠购于丰汇化工,纯度为99.8%,300目;棕丝纤维为编织用细麻,将其裁剪成长度3~5 cm的麻刀。

本文的改性糯米灰浆是在传统糯米灰浆的基础上掺入一水石膏制成的,具有较好流动性的稳定浆液,其配比见表1。

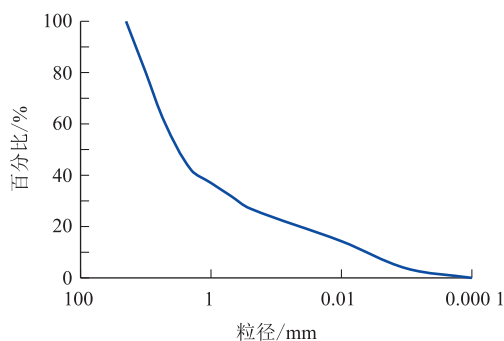


图1 粒径小于20 mm的煤矸石渣土颗粒分曲线

表1 改性糯米灰浆配比

物质名称	石灰/份	石膏/份	糯米胶/份
加量	23	23	54

根据前期试验结果,选用12.5%加量的有机保水材料和8%加量的改性糯米灰浆作为基础配比,各组试验配比见表2,所有材料加量均为煤矸石渣土干质量百分比。

表2 各组试样配合比

试验组别	渣土/kg	改性糯米灰浆/%	有机保水材料/%	棕丝纤维/%	硅藻土/%	松香酸钠/%
C	32					
B	32	8	12.5			
Z1	32	8	12.5	0.3		
Z2	32	8	12.5	0.6		
Z3	32	8	12.5	0.9		
G1	32	8	12.5		2	
G2	32	8	12.5		4	
S1	32	8	12.5			2

1.2 试样制备

试样制备过程参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2019)进行,采用100 mm×100 mm×100 mm的立方块试模制作抗压强度和饱和抗压强度试块。

试验采用1.25%浓度的糯米胶,熬制方法如下:称取25 g糯米粉,与1 975 g纯净水混合均匀,边搅拌边加热至90℃,糊化时间为40 min,熬制过程中及时补充水分以保证浓度不变。将石灰、一水石膏和糯米胶高速搅拌均匀得到改性糯米灰浆,依次加入有机保水材料、改良剂及煤矸石渣土,搅拌均匀后进行注模制样。试样养护过程参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GBT50082-2009)进行。

1.3 试验方法与评价指标

1.3.1 抗压强度试验

试样养护至28 d时采用CSS-44100电子万能

试验机进行单轴无侧限抗压强度试验,加载速率为1 mm/min。

1.3.2 水理特性试验

(1) 渗透系数

解决煤矸石渣山长久修复的主要难题在于减小孔隙率,但孔隙率的测定过于繁琐,渗透系数从某种程度上可以反映孔隙率的情况。

试样制备和测定参照《森林土壤渗滤率的测定》(LY/T1218-1999)中所注环刀法进行,此时土壤渗透系数由达西定律计算,详见式(1)。

$$K = \frac{Q \times L}{S \times t \times h} \quad (1)$$

其中, K 为渗透系数,单位为厘米/秒(cm/s); Q 为流量,单位为毫升(ml); L 为渗透经过的饱和土厚度,单位为厘米(cm); S 为渗透试样的横截面积,单位为平方厘米(cm²); t 为渗透通过 Q 水量所用时间,单位为秒(s); h 为试验中水头差,单位为厘米(cm)。

(2) 田间持水量

田间持水量指的是土壤在不受地下水影响下所能稳定保持的最高土壤含水量,也是对作物有效的最高土壤含水量,可以间接衡量植物能否正常生长。试样制备和测定参照《土壤田间持水量的测定-环刀法》(NY/T1121.22-2010),因其离散性较大,故取5次试验数据,在舍弃最大值和最小值后取其平均值,详见式(2)。

$$X = \frac{(m_1 - m_2) \times 100}{m_2 - m_0} \quad (2)$$

其中, X 为田间持水量,单位为克/千克(g/kg); m_0 为烘干空铝盒质量,单位为克(g); m_1 为烘干前铝盒+湿土样质量,单位为克(g); m_2 为烘干后铝盒+干土样质量,单位为克(g)。

(3) 蒸发率

研究区所在地为高原,风速高,年降雨量为477.1 mm,年蒸发量为1 049.9 mm,水分蒸发速率较快,故对水分蒸发率进行检测以观察改良后的渣土能否减少蒸发量。为了减小因初始含水量高而导致的误差,我们将最终蒸发率(蒸发水量与初始含水量之比)作为评价指标,因其离散性较大,故取5次试验数据,在舍弃最大值和最小值后取其平均值,详见式(3)。

$$Z = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \quad (3)$$

其中, Z 为水分蒸发率,单位为百分比(%); m_0 为蒸发试验前试样的饱和质量,单位为克(g); m_1 为蒸发后试样的质量,单位为克(g)。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度分析

从图2可以发现,棕丝纤维组别的风干抗压强度随着纤维加量的增加而增大,当加量为0.9%时增幅最大,从对照组的0.75 MPa提高到了1.06 MPa,增幅为41.3%;硅藻土组别中,试样风干抗压强度均出现了减小,当加量分别为2%和4%时,对应的风干抗压强度分别为0.60 MPa和0.54 MPa,减幅分别为20%和28%;2%松香酸钠组别的风干抗压强度为1.46 MPa,增幅为94.7%,增幅最大。

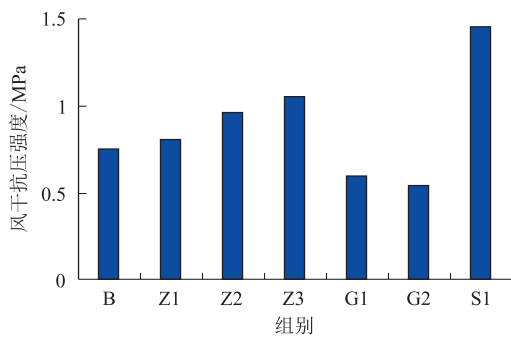


图2 不同组别风干抗压强度

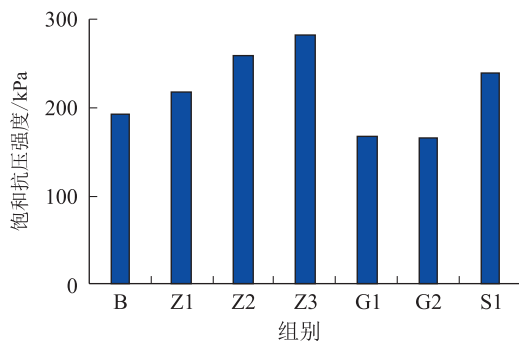


图3 不同组别饱和抗压强度

从图3可以发现,棕丝纤维组别的饱和抗压强度随着纤维加量的增加而增大,Z3组增幅最大,从对照组的193.2 kPa提高到了283.7 kPa,增幅为46.8%;硅藻土组别中,试样饱和抗压强度均出现了减小,G1组和G2组对应的饱和抗压强度分别为167.6 kPa和166.3 kPa,减幅分别为13.3%和13.9%;2%松香酸钠组别的饱和抗压强度为239 kPa,增幅为23.7%。

2.2 水理特性试验分析

2.2.1 渗透系数

A组为未经处理的原状煤矸石渣土,其孔隙率为45.4%,渗透系数为 6.3×10^{-2} cm/s。

从图4可以发现,仅掺入了糯米灰浆和有机保

水材料的B组渗透系数为 3.2×10^{-5} cm/s,显著优于原状煤矸石渣土A组的 6.3×10^{-2} cm/s,而棕丝纤维、硅藻土和松香酸钠的改变对渗透系数影响不大。其中棕丝纤维组别的渗透系数随着纤维掺量的增加而增大,Z1组、Z2组、Z3组的渗透系数分别为 4.16×10^{-5} cm/s、 5.38×10^{-5} cm/s、 6.17×10^{-5} cm/s,推测出现这一现象的原因是纤维的掺入导致试样孔隙率变大;硅藻土组和松香酸钠组渗透系数与空白对照组相比略微减小,推测出现这一现象的原因是硅藻土和松香酸钠作为细粉末状物质填充试样内部孔隙而使孔隙率减小。

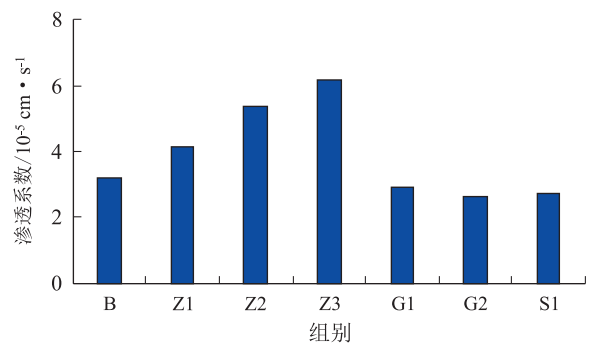


图4 不同组别渗透系数

2.2.2 田间持水量

从图5可以发现,原状煤矸石渣土A组的田间持水量较低,仅为12.2%,是由于其孔隙率较大,难以存留大量的毛细孔隙水。改性糯米灰浆和有机保水材料的掺入填充了渣土中的大孔隙,从而使得B组的田间持水量增大至21.21%。

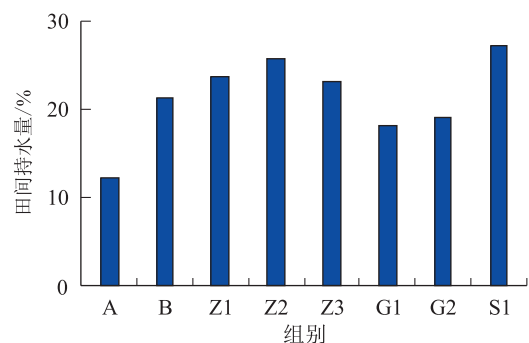


图5 不同组别田间持水量

与B组相比,棕丝纤维、硅藻土和松香酸钠的改变对田间持水量有一定影响。棕丝纤维组中,田间持水量随着棕丝纤维的掺入而略微增加,Z1组、Z2组、Z3组对应的田间持水量分别为23.77%、25.62%和23.2%;硅藻土的掺入使得田间持水量减小至18.23%;松香酸钠的掺入使得田间持水量增大至27.25%,增幅最大。

2.2.3 蒸发率

从图6可以发现,原状煤矸石渣土A组的蒸发率较高,为4.20%。B组中,改性糯米灰浆和有机保水材料的掺入使得蒸发率减小至3.33%;而棕丝纤维、硅藻土和松香酸钠的掺入对蒸发率基本没有影响。

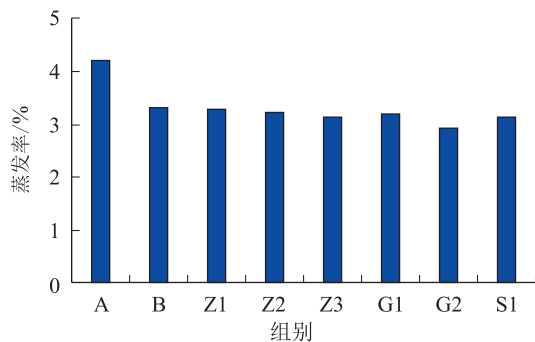


图6 不同组别蒸发率

3 结论

本作以煤矸石渣土为研究对象,分析改性糯米灰浆在不同改良剂和不同配比情况下对煤矸石渣土抗压强度和水理特性的影响,主要得到以下认识:

(1) 棕丝纤维和松香酸钠有助于提高抗压强度,硅藻土会导致抗压强度减小。2%的松香酸钠使风干抗压强度增大了94.7%,使饱和抗压强度增大了23.7%;0.9%的棕丝纤维使风干抗压强度增大了41.3%,饱和抗压强度增大了46.8%;4%的硅藻土使风干抗压强度减小了28%,使饱和抗压强度减小了13.9%。

(2) 糯米灰浆和有机保水材料对水理特性的影响十分显著。掺入了改性糯米灰浆和有机保水材料的B组与未作任何处理的原状煤矸石渣土比较,渗透系数从 $6.3 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 减小至 $3.2 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,田间持水量从12.20%增大至21.21%,蒸发率从4.2%减小至3.33%。

(3) 棕丝纤维、硅藻土和松香酸钠对煤矸石渣土的水理特性有一定程度的影响,与B组进行比较有以下发现:0.9%掺量的棕丝纤维Z3组的渗透系数增大了,为 $6.17 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$;0.6%掺量的棕丝纤维Z2组的田间持水量增大至25.62%;2%掺量的松香酸钠S1组的渗透系数减小至 $2.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$,田间持水量增大至27.25%。

参考文献

- [1] 周楠,姚依南,宋卫剑,等. 煤矿矸石处理技术现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报,2020,37(1):136-146.
- [2] 李方方,马超,徐小波,等. 矿区煤及矸石压占灾害决策树分类提取方法[J]. 地质灾害与环境保护,2010,21(4):73-76.
- [3] 蒋文翠,杨继清,彭尔瑞,等. 矿山生态修复研究进展[J]. 矿业研究与开发,2022,42(4):127-132.
- [4] 杨富巍,张秉坚,曾余瑶,等. 传统糯米灰浆科学原理及其现代应用的探索性研究[J]. 故宫博物院院刊,2008,(5):105-114.
- [5] 郑晓平,魏国锋,张秉坚. 自制硅酸盐对传统糯米灰浆性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程,2017,39(4):128-133.
- [6] 贾栋钦,裴向军,张晓超,等. 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究[J]. 水文地质工程地质,2019,46(6):90-96.
- [7] 范明明,裴向军,杜杰,等. 改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用[J]. 水文地质工程地质,2020,47(4):183-190.
- [8] 卢喆,王社良,王善伟,等. 氯盐侵蚀-冻融循环耦合作用下改性糯米灰浆耐久性能增强方法[J]. 材料导报,2021,35(3):3033-3040.
- [9] 阳令明,张维祥,周绍青. 玄武岩纤维对传统糯米灰浆性能的影响及机理分析[J]. 硅酸盐通报,2020,39(12):3924-3931.
- [10] 闫强强,王社良,吴卓,等. 偏高岭土增强传统糯米-石灰浆力学性能及耐久性试验研究[J]. 混凝土,2021,(12):113-116.
- [11] 湛文武,张起勇,刘宏伟,等. 糯米浆温度对糯米灰浆加固遗址土的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S2):4244-4250.
- [12] 杨艳娟,张茂亮,白召军,等. 松香酸钠对水泥基材料早期抗冻性的影响及作用机理研究[J]. 混凝土,2018,(4):98-101.
- [13] 秦泳,徐彬,郑一峰. 掺加硅藻土混凝土孔隙结构冻融破坏试验研究[J]. 路基工程,2020,(5):43-48.

作者简介: 苏进源(2000—),男,本科生,福建南安人,从事斜坡稳定性研究工作。E-mail: sujy2050@163.com

通讯作者: 裴向军(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事工程边坡稳定性评价与治理等教学与研究以及浆材与注浆等研究工作。E-mail: peixj0119@tom.com