

• 土木工程 •

DOI:10.12454/j.jsuese.202400788



本刊网刊

冻融作用下煤基固废改良黄土路基模型试验研究

武立波^{1,2}, 刘惠阳¹, 林战举³, 杨嘉伟¹, 陈宏信²

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏 银川 750021; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中国科学院 西北生态环境资源研究院 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要:受周期性冻融循环作用的影响,中国西北黄土区路基工程极易发生冻融病害,常用的解决方法是将改良黄土作为路基填料。鉴于西北地区煤基固废的堆存量巨大且资源化利用率低,为给季节冻土区黄土路基病害防治提供新的解决思路,尝试用煤矸石和煤气化渣对黄土进行改良。基于室内模型试验,以兰州黄土(简称素黄土)与石灰改良黄土作为对比试验组,探究冻融作用下煤基固废改良黄土路基的水热状态与变形特征。结果表明:1)与素黄土及石灰改良黄土路基相比,适当掺量的煤气化粗渣或煤矸石能显著增强路基土体的保温性能,如路基深度为 0.3 m 时,15% 煤气化粗渣与 50% 煤矸石改良黄土路基内部温度最低值分别提高了 46% 与 19%;2)掺入煤矸石与煤气化粗渣降低了改良黄土的最优含水率,3 组改良路基在最优含水率条件下经历冻融作用后路基的含水率变化均小于 3%,显著低于对比试验组的含水率变化,说明煤矸石与煤气化粗渣的掺入减少了路基土体内部的水分迁移;3)相比于素黄土路基,15% 煤气化粗渣、30% 与 50% 煤矸石改良黄土路基在最优含水率条件下经历冻融作用后的最大冻胀量分别降低了 67%、59% 与 64%,最大融沉量分别降低了 62%、57% 与 63%,并且这 3 组改良路基控制冻胀变形的效果接近于石灰改良的效果,而控制融沉变形的效果优于石灰改良;4)微观结构分析表明,与素黄土填料相比,掺入一定量的煤矸石与煤气化粗渣能有效地降低导热系数。微观结构观测表明路基改良机理为:掺入煤矸石能够降低改良黄土的孔隙率,进而降低了冻融作用下路基土体内部的水分迁移量;掺入煤气化粗渣能够降低改良土体内部自由水含量,进而降低改良黄土的冰点。两种材料都降低了土体内部的热量传播效率,进而降低了路基的冻胀融沉变形量。同时导热系数测定结果表明,15% 煤气化粗渣或 30%、50% 煤矸石改良黄土填料的导热系数明显小于素黄土,因而煤基固废改良黄土路基的保温性能更好。总的来说,黄土中掺入煤气化粗渣或煤矸石能改善黄土路基填料的寒区服役性。

关键词:冻融作用;煤气化粗渣;煤矸石;黄土;路基模型;水热分布;变形

中图分类号:U419.92

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2025)06-0163-15

中国西北地区属于典型的季节冻土区,广泛分布着黄土。处在季节冻土区的路基等工程经受周期性冻融循环作用,强烈的冻融作用会引发黄土工程结构破坏^[1],例如路基的冻胀和融沉破坏^[2-3]、黄土边坡的失稳^[4]等,冻胀和融沉也是寒区修筑道路时面临的两大工程难题^[5]。对黄土进行改良处理是防治黄土冻融病害的常用方法。路基是否发生冻融病害的影响因素较多,其中,路基土质是最主要的一个影响因素^[6],选用优质的路基填料是在工程中预防路基冻融病害重点考虑的因素。但随着交通基础设施等建设的快速发

展,当前寒区土建行业及道路工程所需的砂石等原材料已十分紧缺。因此,在黄土区进行道路工程建设时,改良黄土往往是优先考虑的填料来源。

特殊土改良研究一直是岩土工程领域的研究热点,因黄土具有结构松散、强度低、湿陷性等特性^[7],未经处理的黄土不能直接被用于工程建设,需要对其进行改良。目前,有关黄土改良方面的研究已取得了诸多有益的成果,概括而言,改良材料主要包括:1)无机结合料,最常用的有石灰^[8]、水泥^[9-10],这也是目前工程上最常用的改良材料;2)微生物^[11-12]、新型固化

收稿日期:2024-09-29 修回日期:2025-03-04 网络出版日期:2025-03-06

基金项目:国家自然科学基金项目(41961011);宁夏自然科学基金项目(2024AAC03068);2023 年度宁夏回族自治区留学回国人员创新项目;同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室开放基金项目(KLE-TJGE-B2302)

作者简介:武立波(1978—),女,副教授,博士。研究方向:寒区路基工程及环境岩土工程。E-mail:wulibo@nxu.edu.cn

剂^[13-14];3)工业废弃物等固废材料,包括粉煤灰^[15-19]、木质素^[20-23]、矿渣^[24]、钢渣^[25]等。同时,诸多研究表明,使用石灰、水泥对黄土进行改良,能显著提高黄土的强度和抗冻融性能,但是水泥、石灰等的高碱性会加剧西北地区土壤荒漠化的趋势,而且生产水泥原料时碳排放量巨大,会对环境造成不可逆的损害^[13]。利用微生物、固化剂等材料改良黄土,在合理的掺量范围内对黄土的力学性能等具有较好的效果,但仍然需要结合水泥^[26],并且这类改良方法成本较高。利用工业废弃物等固废材料改良黄土既能提高黄土的诸多性能,又兼顾环境友好和资源节约,有着良好的应用前景。近年来,使用工业废弃物已逐渐成为工程地基改良处理的新趋向。张军辉等^[27]指出采用工业废弃料改性不良路基土成为缓解道路材料短缺问题的重要途径。对于西北地区,亟需开展更多类型工业废弃物改良黄土的研究并评价改良黄土路基的稳定性。

对于季节性冻融循环频发的西北黄土区,路基填料在冻融作用下的水热分布和变形特征直接影响路基的稳定性。多年来,冻融作用下路基的水热力响应变化因其重要性一直被持续关注,诸多学者开展了相关研究。杨进财^[28]、巩丽丽^[29]等通过模型试验分析了冻融循环下普通路基和人工盐化路基的温度、水分和位移变化规律,发现对路基土进行人工盐化后能有效整治季节性冻土区路基冻害。刘德仁等^[30]通过控制降雨-日照循环条件,对黄土边坡模型中温度、水分及坡面位移进行监测,验证了温度及含水率变化是引起黄土边坡发生浅层溜塌的主要因素。万琪等^[31]通过黄土路基模型试验研究得出,路基填挖交界处含水率的显著差异是造成路基后期运营出现沉降甚至滑移等病害的主要原因。试验及实践表明,室内路基模型试验是验证改良土路基性能的有效方法。

由于中国大面积都分布有季节冻土、黄土,很多已建、在建与计划建设的公路、铁路等工程均需穿越季节冻融黄土地区。一方面,作为特殊性土的黄土地基需进行处理;另一方面,中国堆存量巨大的煤基固废亟需资源化、减量化处理。2022年,工业和信息化部等部委共同发布的《关于加快推动工业资源综合利用的实施方案》^[32]专门指出“针对黄河流域,着力促进煤矸石等固废的协同利用”。以地处黄河流域并且煤炭资源丰富的宁夏地区为例,当地煤矸石、煤气化渣的资源化利用与生态环境保护成为亟需解决的突出问题。煤气化渣分为煤气化粗渣与煤气化细渣。一般来说,煤气化细渣的残碳量远超煤气化粗渣^[33],因此煤气化细渣的烧失量一般不满足《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)^[34]中对路基填料的烧失量要求,因此一般将煤气化粗渣作为道路材

料使用。结合煤矸石和煤气化粗渣较好的抗冻性,本文尝试使用煤矸石与煤气化粗渣对黄土进行改良,并通过室内模型试验探究在相同压实度与相同环境温度条件下,煤气化粗渣改良黄土路基与煤矸石改良黄土路基在冻融循环作用下的温度变化、水分变化及位移变化,并以素黄土与石灰改良黄土路基为对比试验组,以期减轻季节冻土区黄土路基冻融病害,拓宽煤基固废的资源化利用途径提供新的思考和参考。

1 试 验

1.1 试验材料

1.1.1 黄土

试验用黄土取自甘肃省兰州市皋兰县兰秦快速路东南段,取土深度为3~4 m。土样松散、均匀,颜色呈淡黄色,有细小白色颗粒,土中无明显根系。按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)测得其物理性质见表1。

表1 试验用黄土物理性质
Tab. 1 Physical properties of the loess

天然密度/ (g·cm ⁻³)	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最优 含水率/%	塑限/ %	液限/ %	塑性指数/ %
1.21	1.77	16.84	14.81	26.32	11.51

1.1.2 煤矸石与煤气化粗渣

煤矸石(图1(a))取自宁夏灵武羊场湾煤矿,煤气化粗渣(图1(b))取自宁夏宁东能源化工基地。煤矸石与煤气化粗渣的物理性质见表2。通过XRF分析仪测定了煤矸石与煤气化粗渣的主要氧化物组成及含量,结果见表3。由表3可知,煤矸石与煤气化粗渣试样的主要成分均为SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃,分别约占各自总氧化物含量的87.52%和77.59%,均满足《公路路基设计规范》(JTGD30—2015)^[34]中相关标准的要求。

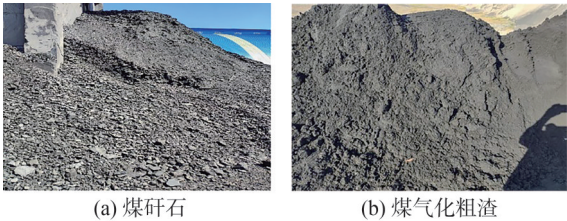


图1 煤矸石与煤气化粗渣

Fig. 1 Coal gangue and coal gasification coarse slag

表2 煤矸石与煤气化粗渣的物理性质

Tab. 2 Physical properties of coal gangue and coal gasification coarse slag

材料 名称	含水 率/%	表观密度/ (g·cm ⁻³)	吸水 率/%	压碎值/ %	烧失量/ %
煤矸石	7.77	2.17	2.41	20.59	3.33
煤气化粗渣	4.67	2.16	8.02	18.51	15.31

表3 煤矸石与煤气化粗渣的主要氧化物含量
Tab.3 Main oxide contents of coal gangue and coal gasification coarse slag

氧化物	煤矸石	煤气化粗渣	/%
SiO ₂	58.86	45.78	
Fe ₂ O ₃	6.26	16.67	
Al ₂ O ₃	22.40	15.14	
CaO	2.64	11.66	
MgO	1.92	2.37	
SO ₃	0.79	2.05	
K ₂ O	3.83	2.01	
Na ₂ O	1.09	1.44	
TiO ₂	1.47	1.19	

1.1.3 熟石灰

试验掺配的石灰取自甘肃省兰州市中坪石灰厂,主要成分为CaO(质量百分比为76.38%),具体成分见表4。

表4 钙质熟石灰粉成分测定
Tab.4 Determination of calcareous slaked lime powder composition

成分	质量百分比/%	等级评定标准/%		
		I级	II级	III级
CaO+MgO	77.88	≥65	≥60	≥55
MgO	1.50		≤4	

表5 试验材料颗粒组分分布情况分析

试验材料	质量百分比/%				不均匀系数C _u	曲率系数C _c
	<0.005 mm	[0.005, 0.075] mm	[0.075, 2.000] mm	>2.000 mm		
素黄土	8.47	85.14	5.53	0.86	8.33	1.33
煤矸石	0	0	74.74	25.26	6.20	1.45
煤气化粗渣	0	0	91.55	8.45	6.07	1.69
熟石灰	100.00	0	0	0	5.10	1.22

1.2 室内试验

1.2.1 试验模型

试验在冻土工程国家重点实验室的低温实验室完成,试验装置示意图如图3所示。模型箱尺寸长1.65 m、宽1.60 m、高1.00 m,箱体外部紧密贴合20 cm厚保温材料,隔绝模型箱内外的热量交换。数据采集系统包括温度测试系统、水分测试系统和位移测试系统。温度测试系统由UX120-014M四通道热电偶温度记录仪与传感器探头组成,每30 min自动采集一次数据;水分测试系统由水分传感器和数据采集仪构成,水分传感器选用美国HOBO S-SMD-M005土壤水分传感

根据《城市道路交通工程项目规范》(GB 55011—2021),该批石灰为钙质熟石灰粉,所检项目均达到I级技术要求。

1.1.4 试验材料粒径分布

图2为相关试验材料的颗粒级配曲线,具体数据见表5。结合图2与表5可知:经颚式破碎后的煤矸石最大粒径为10 mm。取样的煤气化粗渣的最大粒径为4 mm,二者的主要颗粒粒径大小均分布于0.075~2.000 mm区间内,说明煤矸石与煤气化粗渣颗粒在粒径特征上属于粗颗粒土范畴;素黄土主要颗粒粒径分布于0.005~0.075 mm区间内,归属于细粒土。由此可见,在素黄土中掺入煤矸石或煤气化粗渣,能够有效改善素黄土在粒径大于0.075 mm颗粒级配方面存在缺失的问题。

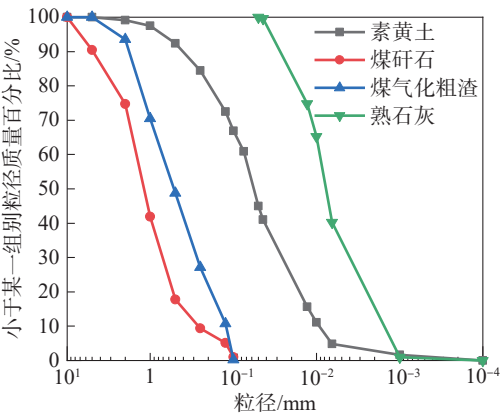


图2 试验材料颗粒级配曲线
Fig.2 Particle grading curves of test materials

器;位移测试系统采用位移百分表(量程为10 mm,精度为0.01 mm)记录。同时,采用温度自动监测仪U23-004(量程-40℃到100℃;准确度±0.18℃;分辨率0.02℃)对环境温度变化进行实时监测。

模型路基采用1:7缩尺模型。设计顶面宽1.0 m、底宽2.5 m,坡度为1.00:1.25,高0.6 m。试验采用半幅路基模型,路基模型底部铺设0.2 m厚碎石并加水,碎石顶部铺设透水土工布。设置A、O、B共3个控制截面作为数据提取面,各控制截面传感器分布如图3所示。为确保路基模型各处压实情况保持一致和内部传感器的数据传输正确,选取在试验条件下所能达到的最

大压实度 0.90 作为整体压实度。该压实度相对于实际情况偏低,但是根据《公路路基施工技术规范》(JTG/T 3610—2019),压实度为 0.90 时仍能满足三、四级公

路对路堤的压实度要求,因此能为煤矸石或煤气化粗渣改良黄土路基填料在实际工程中的应用提供一定的参考依据。

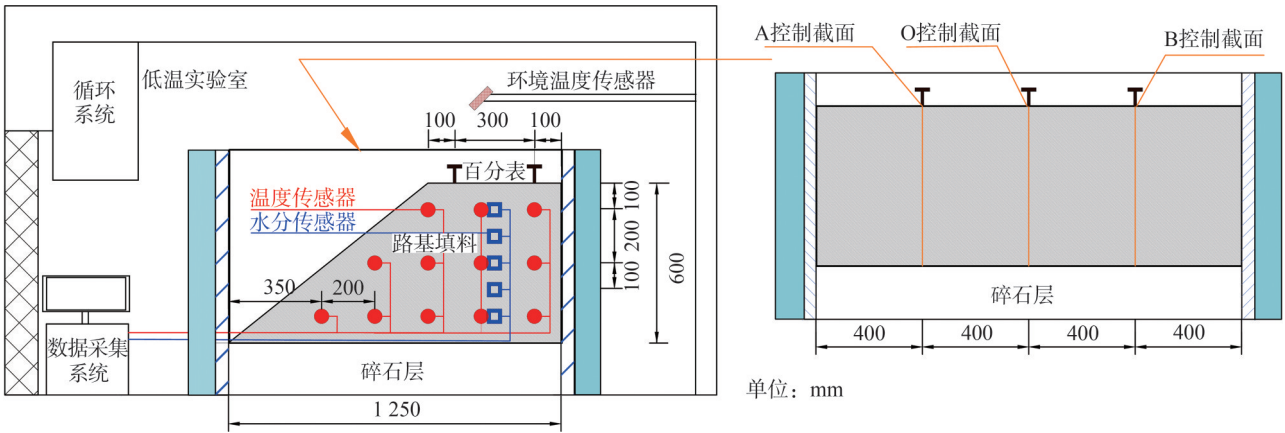


图3 试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental equipment

1.2.2 试验工况

为研究冻融作用下煤基固废改良黄土路基填料的水热及变形特性,按路基填料种类设置 5 组工况,见表 6,改良材料掺入比例均为质量比。根据作者前期的研究成果^[35-36]、前期进行的预试验结果及已有的研究结论^[37],本文设置的改良黄土工况能够满足《黄土地区公路路基设计与施工技术规范》(JTJ/T D31-05—2017)中对路基填料相关力学性能的要求。在保持压实度一致的情况下,各工况含水率采用最优含水率以贴近工程实际。需要说明的是,对于 LL 填料,由于石灰具有吸水性,因此最优含水率较高,该工况仅作为对比试验组,对研究结果无影响;其他工况最优含水率相近。

提下,开展冻融试验。试验结束后,提取数据并清理模具后再进行下一个工况的试验。

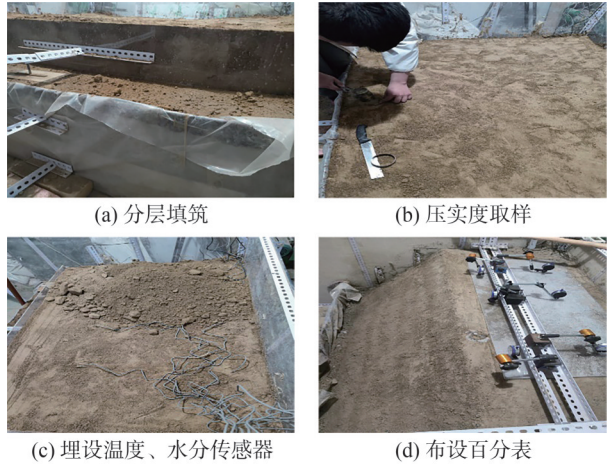


图4 试验模型施工过程

Fig. 4 Process of test model construction

表 6 试验工况					
Tab. 6 Test conditions					
试验编号	质量配比	压实度	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	试验类别
PL	100%黄土(简称素黄土)	0.90	1.77	16.84	对照组
LL	96%黄土+4%石灰	0.90	1.65	20.19	
CGSL	85%黄土+15%煤气化粗渣	0.90	2.32	12.58	试验组
CG1	70%黄土+30%煤矸石	0.90	1.83	14.09	
CG2	50%黄土+50%煤矸石	0.90	1.88	11.03	

1.2.3 路基填料制备及模型填筑过程

根据路基模型尺寸计算所需材料量,并充分拌合以保证制备的路基填料松散均匀。图 4 为模型施工过程,采用分层填筑,每一层填筑完成后采用环刀取样,保证不同位置压实度相同,含水率相近。整个填筑过程在 6 h 内结束。结束后,静置 12 h,再布设位移柱。在保证温度传感器、水分传感器与百分表读数稳定的前

1.3 试验温度条件

试验环境温度数据来源于中国天气网(https://www.tianqi.com/qiwen/city_gaolan/),相关研究^[38]表明该数据来源有效。将冻融作用明显的 10 月—次年 4 月的环境温度拟合为路基模型试验环境温度,单个路基模型试验时间设置为 7 d(168 h),路基初始温度设置为秋季最低温度(13 ℃)。为了保证试验能够正常进行,避免因循环系统长时间制热导致变温速率下降,将 11 月月平均温度(1.45 ℃)作为环境温度起始点。试验控制环境温度如式(1)所示:

$$T=1.45+10\sin\left(\frac{2\pi x}{168}-9.57\right)$$

(1)

式中: T 为环境温度,℃; x 为试验时间, h。

试验中设计环境温度曲线与实际环境温度曲线如图 5 所示。

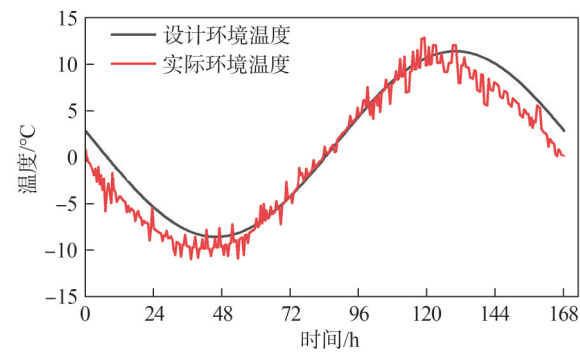


图5 设计与实际环境温度随时间变化曲线

Fig. 5 Variation curves of design and actual ambient temperature with time

2 试验结果分析

2.1 路基温度场与冻结锋面发展规律

2.1.1 路基温度变化分析

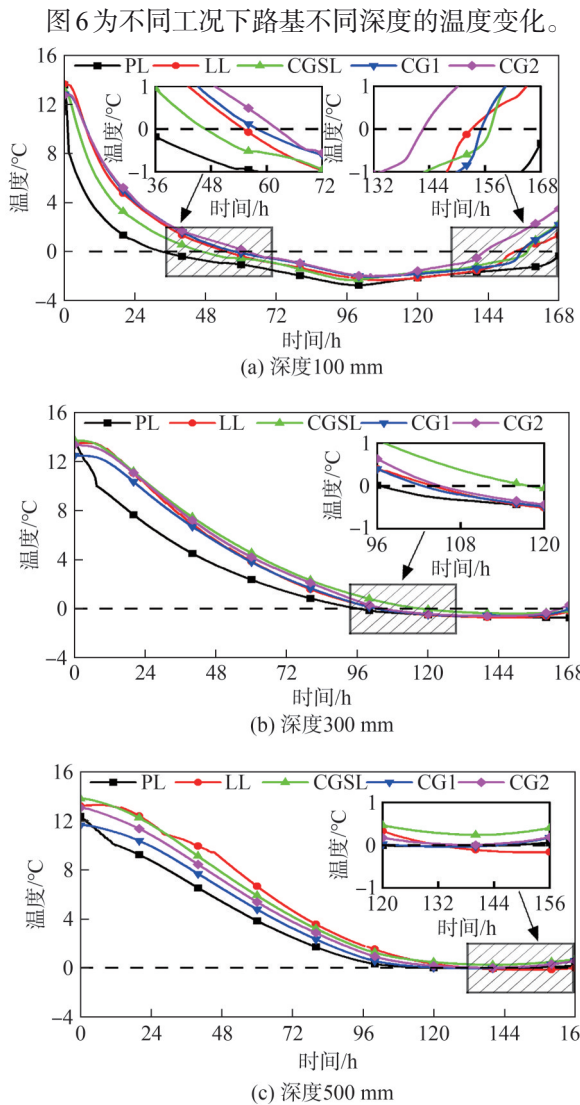


图6 各工况路基填料不同深度的温度随时间的变化

Fig. 6 Temperature change of subgrade fill in different depth with time under different conditions

由图6可以看出:路基不同深度的温度变化随深度增加幅度减小;各工况路基在同一深度的温度变化呈现相同变化趋势;各深度温度最低点的出现时间随深度增加逐渐延迟,同时温度最低值随路基深度的增加而不断提高。

表7为不同工况下路基不同深度的温度达到0℃的时间情况。由表7可知:各工况路基深度为100 mm处的温度变化较深度为300 mm和500 mm时更为明显;在深度为100 mm处,各试验工况路基相比PL路基达到0℃的时间要晚14~29 h。CG2组在融化阶段到达0℃的速度最快,之后依次为LL组、CG1组、CGSL组,PL组没有达到0℃;在深度为300 mm处,仅有CGSL路基、CG2路基存在两个0℃时刻;在深度为500 mm处,CGSL路基部分最低温度高于0℃,说明CGSL路基深度在500 mm处并未完全冻结。综上,对比PL路基,其他4种工况下路基首次达到0℃的时间更晚,处于冻结状态的时间更短,融化达到0℃的时间更早,并且这种在时间上的差异随深度增加逐渐变小。处于冻结状态的时间随深度增加延迟,这进一步说明煤气化粗渣与煤矸石的加入能够降低黄土路基内部温度随外部环境温度快速变化产生的影响,其改良效果与LL路基相近。

表7 各工况路基不同深度的土体到达0℃的时间

Tab. 7 Time to different depth of subgrade filling reaching 0℃

深度/mm	h				
	PL	LL	CGSL	CG1	CG2
100	33	55/153	47/157	58/155	62/143
300	96	104	117/165	102	105/165
500	112	132		132	132

2.1.2 路基冻结深度与冻结宽度

图7为不同工况下路基冻结深度随时间变化的曲线,可知各路基的冻结深度发展趋势相近。

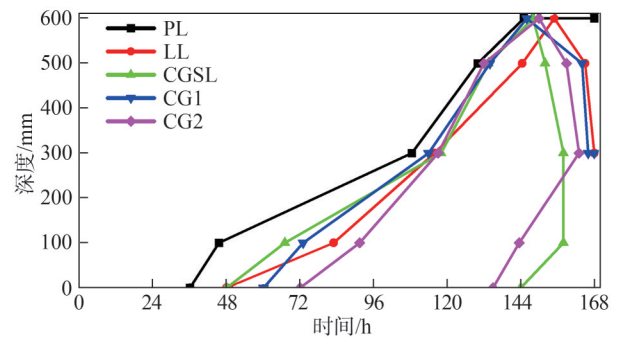


图7 各工况路基冻结深度变化

Fig. 7 Variation of subgrade freezing depth under different conditions

由图 7 可以看出:CGSL、CG1、CG2 组路基出现冻结锋面的时间对比 PL 路基延迟了 12~36 h,对比 LL 路基也延迟 0~24 h;各工况路基的最大冻结深度均为 600 mm。冻融作用结束后,仅有 CGSL 路基与 CG2 路基完全解冻,其他组路基在深度 300~600 mm 处仍存在冻结部分。以上说明试验工况下的煤气化粗渣与煤矸石改良黄土路基填料抵抗外部温度变化的能力与保温效果优于石灰改良黄土路基填料。

图 8 为不同工况下路基在不同深度冻结宽度随时间的变化曲线。从图 8 可以看出,各路基在不同深度的冻结宽度发展趋势相近。除 CGSL 路基以外,随深度增加,其他路基达到最大冻结宽度的时间增长。在深度为 500 mm 时,CGSL 路基并未达到最大冻结宽度,说明其保温效果最好,这与表 7 的研究结果相互印证。对比 PL

路基,在所有深度下,各试验工况路基达到最大冻结宽度时间均延迟 14 h 以上,同时试验结束后的各试验组残余冻结宽度更少,并且在深度为 500 mm 时,其改良效果优于 LL 路基。结合前文对于冻结深度的分析表明:试验工况下的煤气化粗渣与煤矸石改良黄土路基填料能够有效抵抗外部温度变化导致路基冻结深度与冻结宽度的发展,提高了路基的保温性能,降低了冻结锋面发展过快导致路基顶面出现不均匀冻胀变形的可能性。

为了直观地表现试验工况下煤矸石与煤气化粗渣改良黄土路基填料的保温性能,图 9 绘制了不同工况下路基在 0 与 168 h 时控制截面的温度场分布。由图 9 可以看出:不同工况下路基在试验开始时内部温度相近且相对稳定,均处于 13℃ 上下;试验结束时,PL 路基仍有大部分处于冻结状态,此时作为对照组的 LL 路基也有部分位置处于 0℃ 以下,试验组的 CGSL 路基与 CG2 路基已经完全解冻,进一步证明了试验工况下的煤气化粗渣与煤矸石路基填料的保温效果优于石灰改良路基填料。

2.2 路基含水率变化

图 10 为不同工况下路基内部不同深度含水率随时间的变化曲线。由图 10 可知:各工况下路基的初始含水率约为最优含水率。路基内部含水率变化的主要原因有^[39]:重力导致的渗水;温度梯度导致的水分迁移;冰水相变引起的含水率变化。试验中,各工况下路基的含水率变化幅度随温度的增加而不断减小,这说明冰水相变是影响含水率变化的主要原因。

由图 10(a)、(b)可知:PL 路基在试验过程中的含水率变化幅度为 4.0%,在冻结阶段的底层土层与融化阶段的表层土层存在含水率上升的现象,说明该路基的冻结速率快,仅在底部存在外部补水的情况下才出现含水率上升的现象;在融化阶段,表层部分解冻导致含水率上升,这与第 2.1.1 节的温度分析结果一致。LL 路基内部含水率变化幅度最大,达到了 5.1%,这是由于石灰的加入使填料最优含水率增大,同时石灰具有吸水性,使得其在冻融作用下含水率变化明显。

由图 10(c)、(d)、(e)可知:CG2 路基各层含水率变化幅度均小于 1.2%,且相对稳定,说明其内部水分迁移量与重力渗水量较少,可以有效减少水分聚集。虽然 CGSL 与 CG1 路基内部含水率变化幅度大于 CG2 路基,但是变化幅度均在 3% 左右,仍小于对比试验组的含水率变化幅度;当深度小于 200 mm 时,两者含水率变化表现出相似的发展趋势,即下降—上升;当深度大于 300 mm 时,CGSL 路基含水率的变化趋势为上升至最大值后持续下降直至试验结束,而 CG1 路基的含水率则为轻微下降后上升。含水率

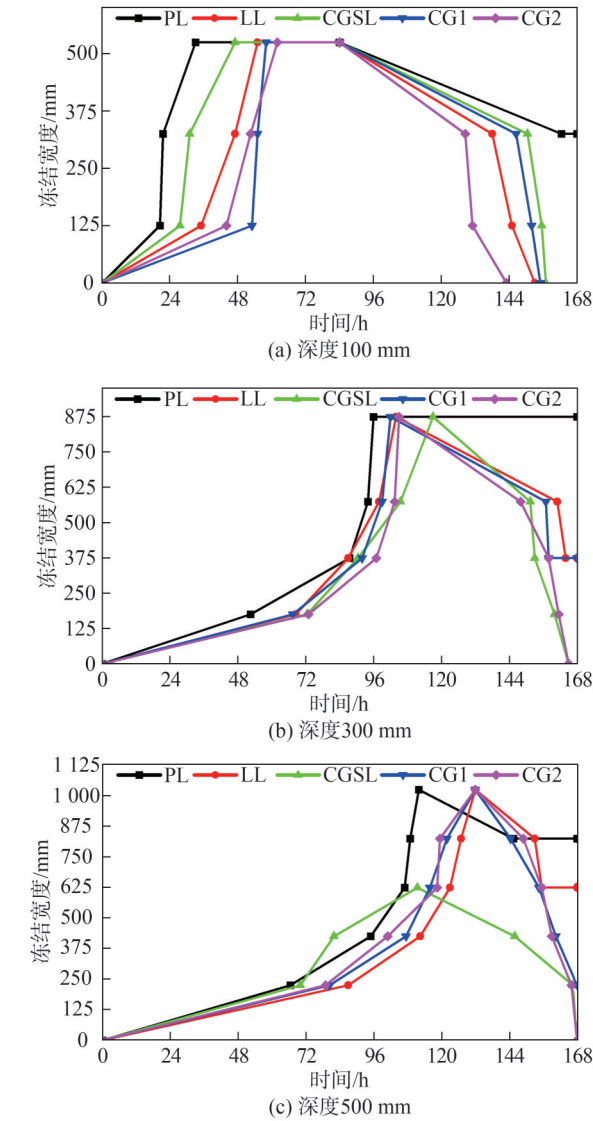


图 8 各工况路基填料不同深度处的冻结宽度随时间变化
Fig. 8 Frozen width changes of subgrade fill in different depth with time under different conditions

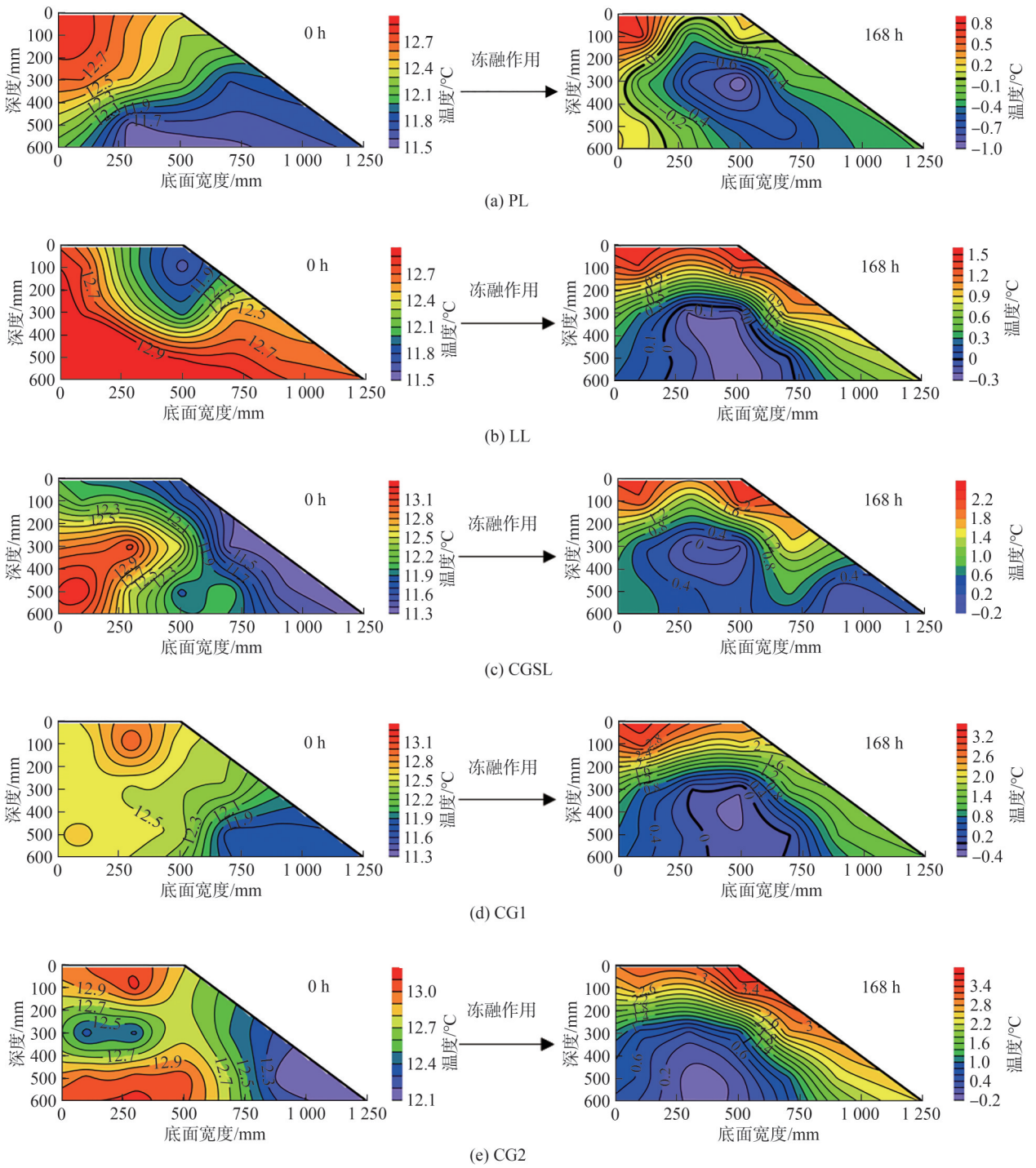


图9 不同工况路基经冻融循环前后内部温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of subgrade under different conditions before and after freeze-thaw cycles

的变化可以从侧面评价模型路基的冻胀变形,说明煤矸石与煤气化粗渣的掺入能够起到减小路基内部水分迁移的作用。

2.3 路基顶面位移

2.3.1 路基顶面位移变化

图 11 为各工况路基顶面相对于初始状态发生的位移随时间变化曲线,以向上位移为正。由图 11 可以看出:在 A 截面与 O 截面中,距路基中心 400 mm 处的

位移变化量均大于距路基中心 100 mm 处的位移变化量,这是由于循环系统接近模型路基路肩,降温从路肩部分开始,产生了不均匀冻胀;各工况下,路基顶面位移的变化趋势呈现相似的规律,在冻结阶段位移量逐渐上升,在 96 h 时达到位移最大值,然后开始持续下降直至试验结束;各路基达到位移最大值的时间与前文深度为 100 mm 处温度达到最低点的时间一致,说明模型路基顶面位移以冻胀变形为主。

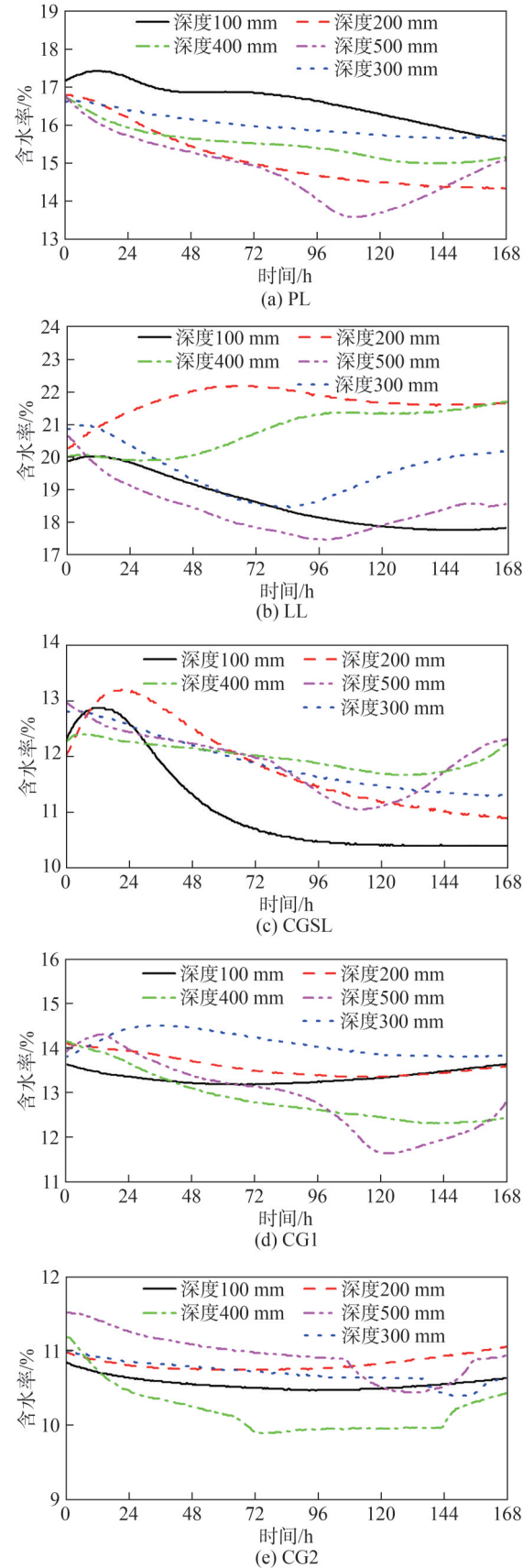


图 10 各工况下路基填料不同深度含水率变化
Fig. 10 Water content in different depth of subgrade filling change under different conditions

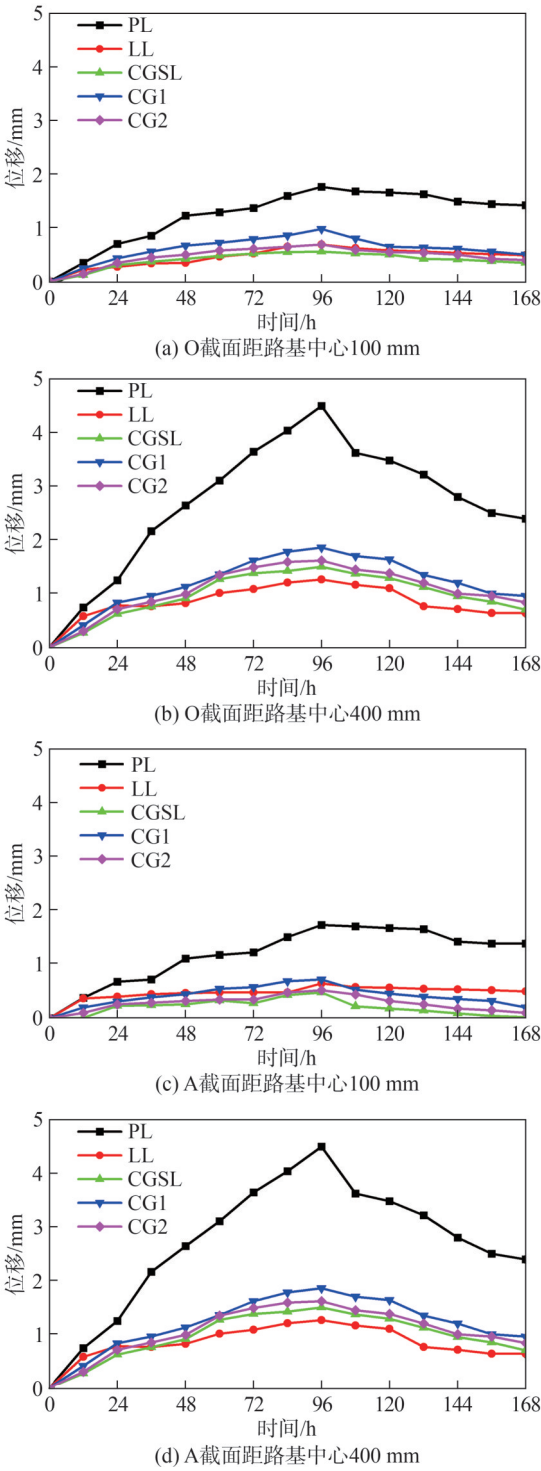


图 11 各工况路基的顶面位移随时间变化

Fig. 11 Deformation of the top surface of the subgrade varies with time under different conditions

由于 A 截面与 B 截面在试验结束后的位移数据相近,规律一致,因此仅列出 A 截面与 O 截面顶部位移的具体数据。表 8 为各工况路基的最大冻胀量与最大融沉量。由表 8 可以看出:除 LL 组最大融沉量出现在 A 截面距路基中心 400 mm 处外,其他各工况下的最大冻胀量与最大融沉量均出现在 O 截面距路基中心

400 mm处,此时CGSL组、CG1组和CG2组的最大冻胀量与最大融沉量相对于PL组分别降低了66.7%、58.7%、64.0%与61.9%;57.1%、62.9%;作为对照组的LL组的最大冻胀量与最大融沉量相对于PL组降低了71.8%与48.1%。

表 8 O截面与A截面顶部位移变化

Tab. 8 Deformation of top surface of section O and A

工况 编号	截面 编号	距路基中心 100 mm		距路基中心 400 mm	
		最大冻胀 量/mm	最大融沉 量/mm	最大冻胀 量/mm	最大融沉 量/mm
PL	O截面	1.77	0.34	4.50	2.10
LL		0.65	0.12	1.27	0.63
CGSL		1.42	0.25	1.50	0.80
CG1		0.98	0.48	1.86	0.90
CG2		0.69	0.29	1.62	0.78
PL	A截面	1.74	0.35	4.01	2.01
LL		0.65	0.15	1.18	1.01
CGSL		0.48	0.46	0.93	0.70
CG1		0.72	0.52	1.34	0.46
CG2		0.52	0.42	1.24	0.30

以上分析表明,15%煤气化粗渣与30%、50%煤矸石的掺入可以有效降低模型路基顶面位移,即降低最大冻胀量与最大融沉量。虽然最大冻胀量的减小值不如掺入4%石灰改良后的路基高,但降低的最大冻胀量也在50%以上,同时对于最大融沉量的改良效果要优于掺入4%石灰改良后的路基。煤矸石掺量由30%增加到50%后,最大冻胀量与最大融沉量分别降低了5.3%与5.8%。

2.3.2 路基顶面位移与水分、温度的变化规律

为探究各工况下路基顶面位移与水、热变化之间的关系,选取O截面距路基中心400 mm处作为特征点,绘制试验过程中该处路基顶面位移与水分、温度变化关系曲线,结果如图12所示。由图12可以看出,各工况下路基顶面位移与含水率、温度呈现相反的变化趋势,即:位移呈现先增大后减小的变化趋势,温度与含水率呈现先减小后增大的变化趋势。从冻结阶段至融化阶段后12 h内,位移增大,温度降低,位移最大值与温度最低点均位于96 h;而在96 h后,位移下降,温度上升,至融化阶段结束,这说明此时路基顶面位移变化主要由冻胀变形造成。含水率变化虽然与温度变化趋势相似,但是各工况含水率最低值出现在96~132 h,无明显分布规律。

综上所述,在冻结阶段,温度降低导致路基内部形成冻结锋面,在冻结过程中冻结锋面逐渐向路基内部移动,未冻区的孔隙水在温度梯度的驱动下向冻结锋面迁移^[27,40],并在冻结锋面处冻结成冰。这增

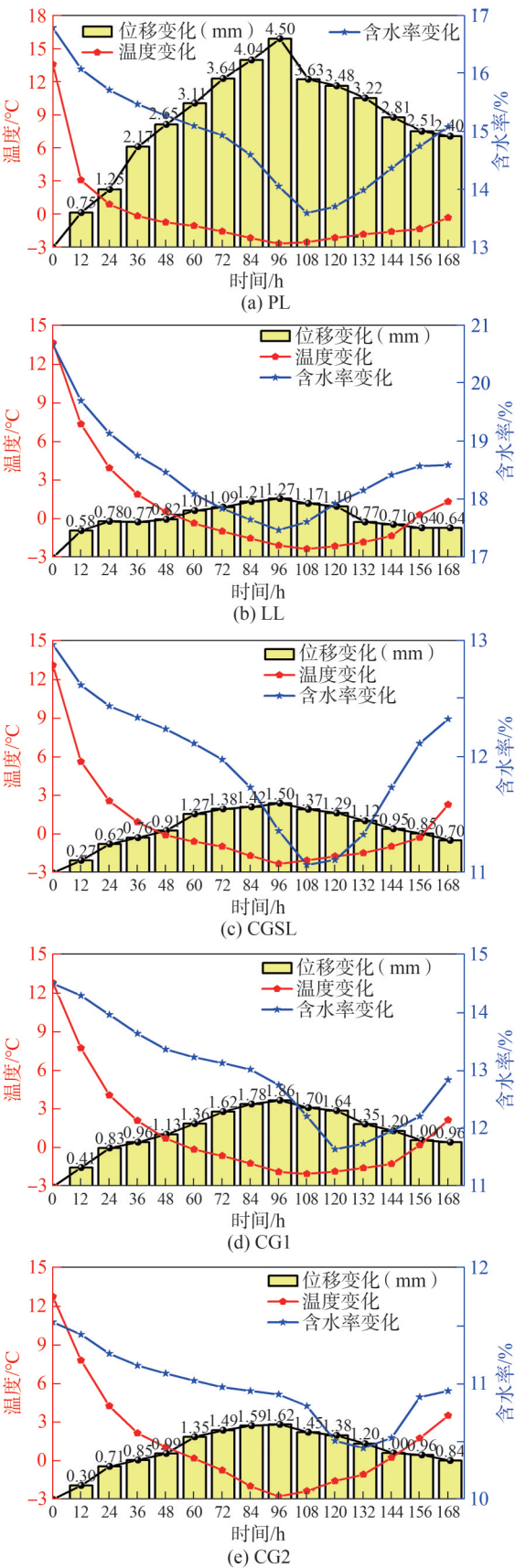


图 12 各工况下温度、含水率与顶面位移随时间变化
Fig. 12 Temperature, moisture and displacement of top surface change with time under different conditions

加了土体体积,造成了冻胀^[41]。在解冻过程中,冻结过程中孔隙水的迁移导致水分分布不均匀,并且随温度升高孔隙冰重新转化为孔隙水,在温度梯度的作用下重新分布。因此,融化形成的沉降是由于冰-水相变和水分再分配造成的;并且土本身的塑性特性导致了残余变形。煤气化粗渣与煤矸石的掺入降低了改良黄土路基填料的最优含水率,减小了原位冻胀,同时也提升了改良填料的保温性能,使得填料内部温度梯度减小从而减少了水分重迁移,降低了路基顶面位移量。

3 冻融作用下煤基固废改良黄土路基水热状态与变形特征的内在机制分析

为了进一步分析冻融作用下煤基固废改良黄土路基水热状态与变形特征的内在机制,对素黄土组(PL)与试验组(CGSL、CG1、CG2)路基填料进行电镜扫描、CT扫描与不同温度条件导热系数的测定,结果如图 13 及表 9、10 所示,其中,电镜扫描结果选取放大 800 倍和放大 4 000 倍下的扫描图。需要说明的是,既有研究^[35-36]表明:当煤矸石粒径小于 2 mm 时,其能够更好

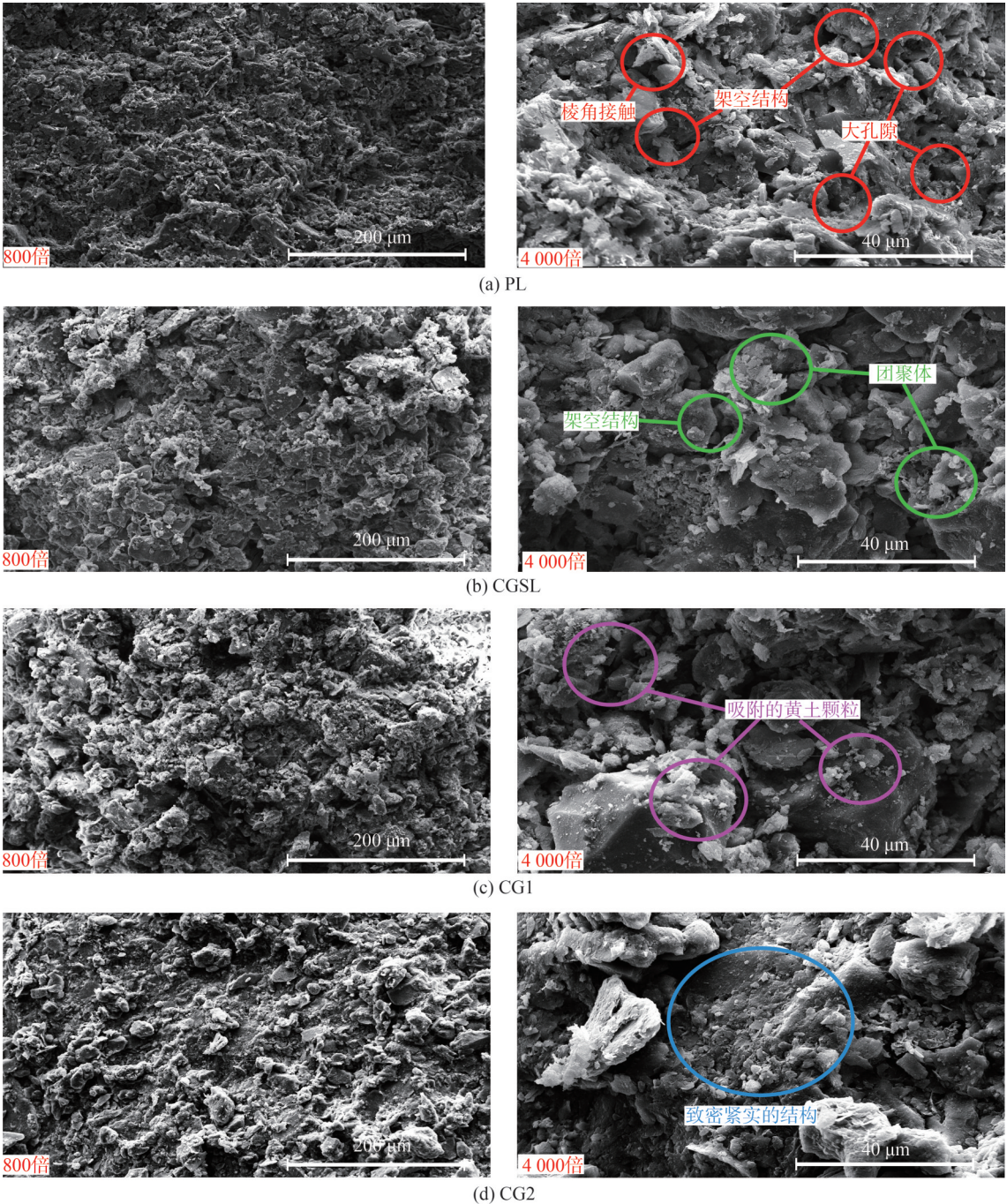


图 13 试验组与素黄土组填料在不同放大倍数下的 SEM 电镜扫描图

Fig. 13 SEM scans of the experimental groups filling and pure loess group filling under different magnification

地与黄土发生离子交换。但本文研究中的煤矸石与煤气化粗渣的主要颗粒粒径分布于 0.075~2.000 mm 区间,黄土颗粒与煤矸石和煤气化粗渣通过离子交换生成黏聚物,进而形成团聚体,有利于降低土体导热系数。

表 9 试验组与素黄土组在不同温度下的导热系数
Tab. 9 Thermal conductivity of the experimental groups and pure loess group at different temperatures
 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

温度/℃	PL	CGSL	CG1	CG2
15	1.20	1.12	1.17	1.13
-15	1.15	1.07	1.14	1.08

表 10 各土料试样在 5 次冻融循环前后的孔隙率^[41]
Tab. 10 Porosity of each experimental group before and after 5 freeze-thaw cycles^[41]

工况编号	%	
	冻融循环 0 次	冻融循环 5 次
PL	8.2	18.4
CGSL	8.0	18.2
CG1	4.8	10.6
CG2	2.6	7.6

由图 13(a)可知,PL 组路基填料中土颗粒间大小差异大,颗粒间以棱角接触和架空接触为主,形成了大量的大孔隙。由图 13(b)~(d)可知,试验组路基填料土体中形成了大量的团聚体,相较于 PL 组路基填料大孔隙数量明显降低。具体来说:由图 13(b)可知,掺入煤气化渣后,改良土体内部具有大量团聚体,虽然仍存在架空结构,但是和素黄土相比,土体孔隙率在冻融作用前后都有所下降^[42]。由图 13(c)、(d)可知,掺入煤矸石后,煤矸石颗粒对黄土颗粒的吸附作用很强,在掺量为 50% 的情况下,煤矸石颗粒与黄土颗粒形成致密紧实的结构,大孔隙几乎消失,这是因为煤矸石本身就已填充了较多的土体孔隙,从而降低了土体的孔隙率。土体孔隙率的降低直接减少了冻融作用下土体内部的水分迁移,而水分迁移量的减小又直接降低了冻融作用下路基的冻胀与融沉变形量。并且,煤气化粗渣和煤矸石的掺入降低了改良土体的孔隙率也就降低了水分迁移与水分冻结融化导致的黄土颗粒骨架破坏引起的变形。此外,前期试验研究表明,在冻融作用下,黄土中掺入 15% 煤气化粗渣或 30%~50% 的煤矸石后,改良黄土的压缩系数显著降低,压缩模量显著上升^[35-36],也即与素黄土填料相比,15% 煤气化粗渣、30%~50% 煤矸石改良黄土路基在冻融作用下的变形量更小。

由表 9 可知,加入 15% 煤气化粗渣或 30%、50% 煤矸石后,改良黄土路基填料在不同温度下的导热系数

均小于素黄土组填料。由表 10 可知,煤矸石与煤气化粗渣改良黄土试样的孔隙率则表现出了明显差异。对比 PL 组,CG1 与 CG2 组的孔隙率在冻融前后大幅降低,而 CGSL 组的孔隙率则没有明显变化,这说明掺入煤矸石降低改良黄土导热系数的机理与掺入煤气化渣并不完全相同。首先,煤矸石能够通过改良黄土的颗粒级配使土体更加密实,从而导致热量传递效率降低,进而使得导热系数下降;对于煤气化粗渣来说,虽然改良土的孔隙率变化很小,但是导热系数明显下降,这是由于煤气化粗渣改良黄土的微观结构使其逐渐由分散结构向聚集-分散结构转变,由于煤气化粗渣的疏水性,部分水含量可能被限制在聚集体内部的孔隙中。根据 Gibbs-Thomson 效应^[43],这部分水难以冻结,降低了混合料的冰点,即加入煤气化粗渣后,黄土样品中的自由水含量降低;而自由水含量越低,土体内部热量传递越慢,因此掺入煤气化粗渣能够降低改良黄土的导热系数,增大土体的保温性能。

4 结 论

本文通过室内模型试验,以素黄土路基与石灰改良黄土路基为对比试验组,研究了煤气化粗渣、煤矸石改良黄土路基在冻融循环作用下的水、热、力响应。主要结论如下:

- 1)改良路基表现出优异的保温性能与温度稳定性。相较于素黄土,15% 煤气化粗渣与 50% 煤矸石改良路基在 0.1 m 与 0.3 m 深度的内部最低温度最高可提升 46%,并有效延迟了冻结锋面的出现(12~36 h)。
- 2)煤基固废的掺入降低了填料的最优含水率。在最优含水率下,改良路基经历冻融循环后的含水率变化均小于 3%,远低于对比组(>4%),表明其能有效抑制土体内部水分的迁移与重分布。
- 3)改良路基的变形控制效果显著。15% 煤气化粗渣、30% 与 50% 煤矸石改良路基的最大冻胀量与融沉量相较于素黄土路基降低了 57%~67%,且在控制融沉方面优于 4% 石灰改良路基。
- 4)微观结构与导热系数测试结果表明,煤矸石主要通过优化孔隙结构降低水分迁移量;煤气化粗渣则通过降低土体冰点与自由水含量发挥作用。二者均降低了填料的导热系数,从而提升了保温性能。

研究为煤基固废在路基工程中的应用提供了初步依据,然而其长期性能与工程适用性仍需进一步验证。建议后续研究重点聚焦于:1)开展更多次冻融循环试验,以评估改良填料的长期耐久性与性能衰变规律;2)通过现场试验验证室内结论并发展相应的施工工艺与质量控制标准。

参考文献:

- [1] Deng Qingsong, Zeng Chao, He Xianzhi, et al. Simulation of hydrothermal field difference and anti-frost heaving of highway subgrade with sunny-shady slopes in seasonally frozen regions[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2022, 53(8): 3113–3128. [邓青松, 曾超, 何先志, 等. 季冻区公路路基水热场阴阳坡差异与防冻胀模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(8): 3113–3128.]
- [2] Xu Jian, Wang Zhangquan, Ren Jianwei, et al. Comparative test study on deterioration mechanism of undisturbed and remolded loess during the freeze-thaw process[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 643–649. [许健, 王掌权, 任建威, 等. 原状与重塑黄土冻融劣化机理对比试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 643–649.]
- [3] Xu Jian, Zhang Minghui, Li Yanfeng, et al. Experimental study on deterioration behavior of saline undisturbed loess with sodium sulphate under freeze-thaw action[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(9): 1642–1650. [许健, 张明辉, 李彦锋, 等. Na_2SO_4 盐渍原状黄土冻融过程劣化特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(9): 1642–1650.]
- [4] Wang Qian, Zhong Xiumei, Gao Zhongnan, et al. Study on liquefaction characteristics of saturated loess in Lanzhou under freeze-thaw action[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(Supp1): 2986–2994. [王谦, 钟秀梅, 高中南, 等. 冻融作用下兰州饱和黄土的液化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(增刊 1): 2986–2994.]
- [5] Cheng Guodong. Interaction between Qinghai—Tibet railway engineering and permafrost and environmental effects [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2002, 17(1): 21–25. [程国栋. 青藏铁路工程与多年冻土相互作用及环境效应[J]. 中国科学院院刊, 2002, 17(1): 21–25.]
- [6] 赖远明, 张明义, 李双洋, 等. 寒区工程理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [7] Chai Shaobo, Li Xianpeng, Li Yinan, et al. Experimental study on dynamic properties of loess improved by rubber particles and EICP technology[J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56(3): 134–146. [柴少波, 李显鹏, 李轶楠, 等. 橡胶颗粒及 EICP 技术改良黄土动力特性试验[J]. 工程科学与技术, 2024, 56(3): 134–146.]
- [8] Hu Zaiqiang, Liang Zhichao, Wu Chuanyi, et al. Experimental study on mechanical properties of lime modified loess under freeze-thaw cycle[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(Supp1): 211–217. [胡再强, 梁志超, 吴传意, 等. 冻融循环作用下石灰改性黄土的力学特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增刊 1): 211–217.]
- [9] Jiang Yingjun, Zhang Wei, Li Qilong, et al. Mechanical properties of cement-improved loess filler for intercity railway [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(7): 2409–2417. [蒋应军, 张伟, 李启龙, 等. 城际铁路水泥改良黄土填料力学特性[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(7): 2409–2417.]
- [10] Jiang Tao. The frost heave law of cement-improved loess as filling material for subgrade and evaluation of anti-frost effect in Gansu—Ningxia section of Yinchuan—Xi'an high-speed railway[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(9): 8–17. [江涛. 银西高铁甘宁段水泥改良黄土路基冻胀规律及冻胀防治效果评价[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 8–17.]
- [11] Xu Tianchi, Zhang Haonan, Jia Cangqin, et al. Experimental study on disintegration properties of microbially induced calcite precipitation modified loess[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(2): 674–681. [许天驰, 张浩男, 贾苍琴, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改良黄土的崩解性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 674–681.]
- [12] Ji Hui, Zhang Tao, Liu Baojian, et al. Experimental study on shear mechanical properties of composite improved loess under wet and dry cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(8): 120–126. [冀慧, 张涛, 刘保健, 等. 干湿循环下复合改良黄土剪切力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(8): 120–126.]
- [13] Peng Yu, Zhang Huyuan, Lin Chengbin, et al. Engineering properties and improvement mechanism of loess soil modified by consolid system[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(3): 762–772. [彭宇, 张虎元, 林澄斌, 等. 抗疏力固化剂改性黄土工程性质及其改性机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 762–772.]
- [14] Xu Pengfei, Li Zeying, Wang Yinmei, et al. Impact of freeze-thaw cycles on mechanical properties of loess solidified with new polymer curing agent SH[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(1): 137–141. [徐鹏飞, 李泽莹, 王银梅, 等. 冻融循环对新型高分子材料 SH 固化黄土力学特性的影响试验研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(1): 137–141.]
- [15] Zhong Xiumei, Wang Qian, Liu Zhaozhao, et al. Experimental study on dynamic strength of loess subgrade improved by fly ash under dry–wet cycle[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(Supp1): 95–99. [钟秀梅, 王谦, 刘钊钊, 等. 干湿循环作用下粉煤灰改良黄土路基的动态强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 95–99.]
- [16] Wang Qian, Liu Zhaozhao, Wang Lanmin, et al. Review on seismic reinforcement of loess foundation[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(6): 1366–1381. [王谦, 刘钊钊, 王兰民, 等. 黄土地基抗

- 震处理技术研究进展与展望[J]. 防灾减灾工程学报, 2021,41(6):1366–1381.]
- [17] Zhang Yuchuan, Yao Yongguo, Zhou Hong. Experimental study of shear strength and permeability of improved loess with long age[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Supp2): 170–176. [张豫川, 姚永国, 周泓. 长龄期改良黄土抗剪强度与渗透性试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增2): 170–176.]
- [18] Wang Lili, Xie Wanli, Zhong Xiumei, et al. Mechanical properties of fly ash-modified loess reinforced by geogrid[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2024, 46(2): 349–357. [王丽丽, 谢婉丽, 钟秀梅, 等. 土工格栅加筋粉煤灰改良黄土力学特性研究[J]. 地震工程学报, 2024, 46(2): 349–357.]
- [19] Zhang Yang, Johnson A E, White D J. Freeze-thaw performance of cement and fly ash stabilized loess[J]. Transportation Geotechnics, 2019, 21: 100279.
- [20] Hou Xin, Ma Wei, Li Guoyu, et al. Influence of lignosulfonate on mechanical properties of Lanzhou loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Supp2): 18–26. [侯鑫, 马巍, 李国玉, 等. 木质素磺酸盐对兰州黄土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(增2): 18–26.]
- [21] Gao Zhongnan, Wang Qian, Zhao Chengcheng, et al. Effect of mixing method of sample preparation on the strength of loess improved by lignin fiber[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2021, 43(4): 930–934. [高中南, 王谦, 赵乘程, 等. 制样拌和方法对木质素纤维改良黄土强度的影响[J]. 地震工程学报, 2021, 43(4): 930–934.]
- [22] Huang Yuling, Zhang Wuyu, Ji Gang'ao, et al. Experimental study on mechanical properties of calcium lignosulfonate modified loess under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(6): 1863–1874. [黄雨灵, 张吾渝, 季港澳, 等. 冻融循环作用下木质素磺酸钙改良黄土的力学特性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(6): 1863–1874.]
- [23] Dong Chaofan, Zhang Wuyu, Zhang Ruixing, et al. Experimental study of the mechanical and thermal properties of lignin fiber-stabilized loess under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(2): 612–622. [董超凡, 张吾渝, 张瑞星, 等. 冻融作用下木质素纤维改良黄土力学与热学特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(2): 612–622.]
- [24] Yang Guohui, Li Chi, Shang Yan, et al. Mechanical properties and shear strength prediction model of slag micronized improved loess[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(3): 1185–1191. [杨国辉, 李驰, 商艳, 等. 矿渣微粉改良黄土力学性能及抗剪强度预测模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(3): 1185–1191.]
- [25] Mozejko C A, Francisca F M. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag[J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117901.
- [26] Wang Jinglong, Wang Xu, Li Jiandong, et al. Mechanism of experimental loess reinforced by F1 ionic soil stabilizer in physical and mechanical properties[J]. Materials Review, 2021, 35(8): 70–75. [王景龙, 王旭, 李建东, 等. F1 离子固化剂加固试验黄土的物理力学特性变化机理[J]. 材料导报, 2021, 35(8): 70–75.]
- [27] Zhang Junhui, Chen Shasha, Gu Fan, et al. Industrial waste materials utilized in subgrade modification: A review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 1–16. [张军辉, 陈莎莎, 顾凡, 等. 工业废弃料在路基改良中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 1–16.]
- [28] Yang Jincai, Gong Lili, Wang Xu, et al. Experimental study on multiple freezing-thawing cycles of artificial saline soil subgrade[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1001–1008. [杨进财, 巩丽丽, 王旭, 等. 多次冻融循环人工盐渍土路基模型试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 1001–1008.]
- [29] Gong Lili, Wang Yanhu, Yang Nan, et al. Experimental study on frost heave model of artificial saline subgrade in seasonal frozen soil area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(3): 129–135. [巩丽丽, 王彦虎, 杨楠, 等. 季节性冻土区人工盐化路基冻胀模型试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(3): 129–135.]
- [30] Liu Deren, Zhang Wenqing, Huang Xinzhi, et al. Laboratory model test on water and heat variation process of unsaturated loess slope[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Supp2): 236–240. [刘德仁, 张文清, 黄新智, 等. 非饱和黄土边坡水热变化过程室内模型试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(增2): 236–240.]
- [31] Wan Qi, Yan Changgen, Zhang Xiaoming, et al. Model test on the half-filled and half-excavated subgrade in loess area[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Sciences), 2022, 41(12): 99–103. [万琪, 晏长根, 张晓鸣, 等. 黄土地区半填半挖式路基模型试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(12): 99–103.]
- [32] 中华人民共和国工业和信息化部. 关于加快推动工业资源综合利用的实施方案[EB/OL]. [2022–1–27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202202/11/content_5673067.html.
- [33] Liao Changjian, Wang Jing, Jin Ping, et al. Review of physical and chemical characteristics and heavy metal migration rules of coal gasification slag[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2): 426–443. [廖昌建, 王晶, 金平, 等. 煤气化渣理化特性及其所含重金属迁移规律综述[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(2): 426–443.]
- [34] Zhang Kewei, Liao Changjian, Wang Jing, et al. Review on characteristics and resource utilization of coal gasification

- coarse slag[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(7): 13–29. [张可伟, 廖昌建, 王晶, 等. 煤气化粗渣特性分析及利用技术研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(7): 13–29.]
- [35] Sun Mengmeng, Wu Libo, Yang Qiuning, et al. Mechanical and freeze-thaw resistance properties of loess improved by coal gangue[J]. *China Powder Science and Technology*, 2024, 30(2): 24–35. [孙萌萌, 武立波, 杨秋宁, 等. 煤矸石改良黄土的力学和抗冻融性能[J]. *中国粉体技术*, 2024, 30(2): 24–35.]
- [36] Cao Jinsheng, Wu Libo, Sun Mengmeng, et al. Experimental analysis of mechanical properties of loess improved by coal gasification slag[J]. *China Sciencepaper*, 2024, 19(1): 23–32. [曹金生, 武立波, 孙萌萌, 等. 煤气化渣改良黄土的力学特性试验分析[J]. *中国科技论文*, 2024, 19(1): 23–32.]
- [37] Wang Jie, Zhu Yiding, Yan Changyu, et al. Experimental study on road performance of collapsible loess mixed with coal gangue roadbed soil-rock mixture[J]. *Subgrade Engineering*, 2021(4): 65–68. [王杰, 朱一丁, 延常玉, 等. 湿陷性黄土掺配煤矸石路基土石混合料路用性能试验研究[J]. *路基工程*, 2021(4): 65–68.]
- [38] Bai Ruiqiang, Lai Yuanming, Zhang Mingyi, et al. Investigating the thermo-hydro-mechanical behavior of loess subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(9): 6305–6318.
- [39] Zhang Mingyi, Lu Jianguo, Pei Wansheng, et al. Laboratory study on the frost-proof performance of a novel embankment dam in seasonally frozen regions[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 602: 126769.
- [40] Zhang Mingyi, You Zhilang, Pei Wansheng, et al. Mitigating embankment frost heave with nano-ZnO in the Arctic[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 393: 136073.
- [41] Geng Lin, Tang Hao, Luo Jun, et al. Experimental study on frost-heaving characteristics of high speed railway subgrade fillers mixed with coal gangue[J]. *Railway Engineering*, 2019, 59(2): 41–45. [耿琳, 唐浩, 罗军, 等. 掺煤矸石高速铁路路基填料冻胀特性试验研究[J]. *铁道建筑*, 2019, 59(2): 41–45.]
- [42] Wu Libo, Yang Jiawei, Liu Huiyang, et al. Freeze-thaw characteristics and microscopic mechanism of coarse coal gasification slag improved loess filler[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2024, 46(3): 930–943. [武立波, 杨嘉伟, 刘惠阳, 等. 煤气化粗渣改良季节冻土区黄土填料的冻融特性及其微观机理研究[J]. *冰川冻土*, 2024, 46(3): 930–943.]
- [43] Wang C, Lai Y M, Zhang M Y. Estimating soil freezing characteristic curve based on pore-size distribution[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 124, 1049–1060.

Experimental Assessment of Coal-based Solid Waste Improved Loess Model Test Under Freeze–Thaw Action

WU Libo^{1,2}, LIU Huiyang¹, LIN Zhanju³, YANG Jiawei¹, CHEN Hongxin²

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

3. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract:

Objective The influence of cyclic freeze–thaw cycles is identified as a primary factor contributing to the susceptibility of subgrades in loess areas of Northwest China to freeze–thaw deterioration. Frost heave and thaw subsidence are recognized as significant engineering challenges in road construction within cold regions. The quality of the soil composing the subgrade is a crucial factor in determining its vulnerability to freeze–thaw damage. However, the current civil engineering industry in cold regions and road construction projects faces a scarcity of sand, gravel, and other raw materials. Therefore, in loess areas, improved loess as a filler is often the preferred material for road construction. The use of cement, lime, and other inorganic binding materials to improve loess can lead to environmental degradation, while employing microorganisms and other innovative materials for enhancement is more costly. Therefore, the present study aims to address the critical issues of the resourceful use of coal gangue and coal gasification coarse slag, as well as ecological environmental protection in Ningxia and surrounding regions, by exploring the potential of their combined utilization. The study focuses on applying coal gangue and coal gasification coarse slag in enhancing loess subgrades, particularly under freezing–thawing and moisture variation conditions, as well as analyzing displacement and the underlying mechanisms governing these processes. The objective is to mitigate freeze–thaw damage affecting loess subgrades in seasonal permafrost areas, expand the utilization of coal-based solid waste, and provide an innovative approach for reference.

Methods The research findings on the mechanical properties of gangue and coal gasification coarse slag-improved loess, along with the pre-test and previous research results, were considered. The study examined three coal-based solid waste improved loess conditions, incorporating 30% or 50% gangue mixing and 15% coal gasification coarse slag mixing. At the same time, vegetal loess and lime-improved loess were established as control groups. Taking the Lanqin Expressway in Gaolan County, Lanzhou as a prototype, an indoor half-span scaled subgrade model was con-

structed in the cryogenic test chamber, and three control sections were set within each model. Temperature and moisture sensors were arranged in each control section, and a percentage meter was installed on the top surface of the subgrade to monitor displacement changes. The low-temperature test hall simulated the seasonal temperature variations in the study area. The study illustrated the improvement effect and mechanism of gangue and gasification slag-improved loess subgrade filler at both macroscopic and microscopic levels by monitoring temperature, moisture, and displacement variations inside the subgrade under different working conditions during freeze–thaw cycles, and combining the results of SEM electron microscope scanning and CT scanning tests.

Results and Discussions The main research content and results were as follows: 1) Analysis of the internal temperature variation of the subgrade model indicated that, compared to the plain loess subgrade, the 30% and 50% coal gangue-improved loess subgrades and the 15% coal gasification coarse slag-improved loess subgrade exhibited a 15% increase in temperature at a depth of 0.1 m. At a depth of 3 m, the minimum recorded internal subgrade temperature increased by more than 16%, and at a depth of 0.5 m, the 15% coal gasification coarse slag-improved loess subgrade and the 50% coal gangue-improved loess subgrade did not experience a completely frozen moment. This result indicated that the 15% gasification slag-improved loess subgrade and the 50% coal gangue-improved loess subgrade demonstrated good thermal insulation performance and temperature stability. 2) Analyzing the internal moisture variation of the subgrade model exhibited that, compared to the plain loess subgrade fill, the optimal moisture content of the 30% and 50% gangue-improved loess subgrade fill and the 15% coal gasification coarse slag-improved loess decreased. The moisture content of the three improved loess subgrades indicated that the presence of gangue and gasification slag within the soil of the improved loess subgrade significantly hindered water migration. 3) After the freezing and thawing of the three improved subgrade groups under optimal moisture conditions, the maximum frost heave of the 15% coal gasification coarse slag-improved loess subgrade and the 30% and 50% coal gangue-improved loess subgrades decreased by 67% and 59%, respectively. In addition, the maximum thaw settlement decreased by 62%, 57%, and 63%, respectively, indicating that the incorporation of 15% coal gasification coarse slag or 30% or more coal gangue significantly reduced the frost heave and thaw settlement deformation of loess subgrades. The findings showed that the inclusion of 15% coal gasification coarse slag or more than 30% coal gangue effectively mitigated the freeze-thaw deformation of loess subgrades. In addition, the efficiency in controlling frost heave deformation in these three improved subgrade groups was comparable to that of 4% lime, while their effectiveness in controlling thaw settlement was even superior to that of 4% lime. 4) Microstructural analysis revealed that the addition of coal gangue reduced the porosity of the improved loess, decreasing water migration within the subgrade soil during freeze–thaw periods. Similarly, the incorporation of coal gasification coarse slag decreased the free water content within the improved soil, thus lowering the freezing point of the improved loess. The reduction in heat transfer efficiency within the soil was achieved through different mechanisms, reducing the freeze–thaw deformation of the subgrade. In addition, thermal conductivity measurements indicated that the thermal conductivity of the 15% coal gasification coarse slag or 30% and 50% coal gangue-improved loess filler was significantly lower than that of plain loess, thus enhancing the thermal insulation performance of coal-based solid waste-improved loess subgrades.

Conclusions Based on the results of this research, the use of coal gangue and coal gasification coarse slag to improve loess as a subgrade filler demonstrates significant advantages. Compared to plain loess filler, mixing 50% coal gangue or 15% coal gasification slag in loess can effectively enhance the thermal insulation performance of the subgrade, reduce variations in water content, and decrease the deformation of the subgrade’s top surface. In addition, the large quantities of locally available coal gangue and coal gasification slag can compensate for the serious shortage of sand, gravel, and other road construction materials. However, to fully realize these benefits, construction quality must be strictly controlled. Before construction, the proposed coal gangue, coal gasification coarse slag, and loess should undergo comprehensive testing of fundamental physical properties such as grain size, density, and moisture content to ensure that the materials meet design requirements. During construction, the water content and compaction of the mixed fill must be rigorously controlled to guarantee the overall quality and stability of the subgrade.

Key words: freeze-thaw action; coal gasification slag; coal gangue; loess; subgrade model; hydrothermal distribution; deformation

(编辑 李轶楠)

引用格式: Wu Libo,Liu Huiyang,Lin Zhanju,et al.Experimental assessment of coal-based solid waste improved loess model test under freeze–thaw action[J].Advanced Engineering Sciences,2025,57(6):163–177.[武立波,刘惠阳,林战举,等.冻融作用下煤基固废改良黄土路基模型试验研究[J].工程科学与技术,2025,57(6):163–177.]