

文章编号:1007-9629(2024)06-0520-08

## 污泥气化渣骨料回填混凝土的制备与性能

马军涛<sup>1</sup>, 谭云飞<sup>2</sup>, 付豪<sup>1</sup>, 赵顺波<sup>1,\*</sup>

(1. 华北水利水电大学 河南省生态建材工程国际联合实验室, 河南 郑州 450045;

2. 郑州市污水净化有限公司, 河南 郑州 450053)

**摘要:**采用污泥气化渣完全替代混凝土中的粗、细骨料,制备了回填混凝土,并在实验室和实际工程中进行了设计和应用.结果表明:由于其吸水特性,污泥气化渣骨料可在混凝土中起到内养护的作用,并优化混凝土界面过渡区,因此具备作为骨料用于回填混凝土的可行性;通过响应面法得到混凝土最优配合比,即砂率为 60%,粗骨料中 5~10 mm 粒径占比为 60%,预湿用水量为 90%.

**关键词:**污泥气化渣;回填混凝土;流动性能;抗压强度;界面过渡区

中图分类号:X799.3

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.006

### Preparation and Performance of Sludge Gasification Slag Backfill Concrete

MA Juntao<sup>1</sup>, TAN Yunfei<sup>2</sup>, FU Hao<sup>1</sup>, ZHAO Shunbo<sup>1,\*</sup>

(1. International Joint Research Lab for Eco-Building Materials and Engineering of Henan, North China University of

Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. Zhengzhou Sewage Purification Co., Ltd.,

Zhengzhou 450053, China)

**Abstract:** Sludge gasification slag (SGS) was designed to prepare backfill concrete which was used to completely replace the coarse and fine aggregate in concrete, which was applied in laboratory and practical engineering simultaneously. The results show that the good water absorption of SGS can play the role of internal curing in concrete as aggregate, and improve the interface transition zone of concrete, which indicates the feasibility of the application in backfilling concrete. Response surface method was used in the concrete proportioning design and the optimal mix ratio is obtained in this experiment as follows: sand rate is 60%, the proportion of 5–10 mm particle size in coarse aggregate is 60%, and the pre-wet water consumption is 90%.

**Key words:** sludge gasification slag; backfill concrete; flow performance; compressive strength; interface transition zone

建筑基坑肥槽是建筑施工过程中为提供作业面而多开挖的部分,施工完毕后需要回填至开挖前的地面状况.近年来,大部分建筑工程肥槽使用素土或灰土回填并夯实,但由于夯实人工成本较高,有些基坑回填施工直接采用铲车倒入填土的方式,导致肥槽回填质量极差<sup>[1]</sup>.为了确保回填质量和回填效率,部分工程使用低标号混凝土<sup>[2]</sup>或泡沫混凝土<sup>[3]</sup>进行回填,但前者有自重较大、回填后强度较大导致不易维

修等缺点,后者具有造价高、后期收缩变形严重等问题.

随着城市废水、污水的排放量日益增多,城市污泥的排放量也大幅度增加,亟需对其进行资源化利用<sup>[4]</sup>.污泥热解气化技术将污泥脱水造粒后置于气化炉中,通过其中的有机物生成可燃气体,再燃烧产生高温烟气,并进行热解气化而形成炉渣,可使污泥减量 90% 以上.经过处理后的污泥气化渣具有轻质多

收稿日期:2023-08-13; 修订日期:2023-10-20

基金项目:河南省科技攻关项目(242102321058, 232102321080)

第一作者:马军涛(1984—),男,河南鲁山人,华北水利水电大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail:majuntao@ncwu.edu.cn

通讯作者:赵顺波(1964—),男,河北武邑人,华北水利水电大学教授,博士生导师,博士. E-mail:sbzhao@ncwu.edu.cn

孔的特点,具备作为混凝土中轻质骨料的潜质.在之前的研究中,循环流化床(CFB)炉渣<sup>[5]</sup>、垃圾焚烧炉渣<sup>[6]</sup>和煤矸石炉渣<sup>[7]</sup>均已作为混凝土骨料应用的基础,高温处理后炉渣自身的多孔和吸水特性使其具有内养护效果,可改善混凝土的界面结构,进而改善其强度和体积稳定性<sup>[8-10]</sup>.但与此同时,污泥气化渣自身强度相对较低,限制了其在普通混凝土骨料中的应用<sup>[11-13]</sup>.而对于回填材料来说,由于其力学性能需求相对较小,如可使用污泥气化渣作为主要原材料,制备得到可实现自密实成型、无需振捣措施的混凝土,则一方面可在节约人工成本的同时保证施工质量,另一方面可实现污泥气化渣的资源化利用,缓解城市污泥处理的压力.

本文以污泥气化渣为原材料,对其进行破碎分级后用于制备回填混凝土,通过调整砂率、粗骨料级配和预湿用水量等指标对回填混凝土工作性能

和力学性能进行优化设计,结合微观形貌观察分析其力学性能形成机理,并在工程中进行了中试应用,以探讨污泥气化渣作为骨料制备回填混凝土的可行性.

## 1 试验

### 1.1 原材料

污泥气化渣来自郑州市污水处理厂.表1和图1分别为污泥气化渣的化学组成<sup>1)</sup>和XRD图谱.由表1和图1可知,污泥气化渣化学组成与黏土类似,其物相组成以石英和长石为主.使用Pore Master 33GT型全自动压汞仪测试污泥气化渣孔隙分布曲线,结果见图2.使用Zeiss Gemini Sigma 300扫描电镜(SEM)观察其内部微观形貌特征,见图3.结合图2、3可知,污泥气化渣中孔径主要分布于0.09~0.30 μm和5.00~105.00 μm区间,相比于普通骨料呈现出显著的多孔特性.

表1 污泥气化渣的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of sludge gasification slag

Unit: %										
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	IL
47.27	15.23	4.66	3.65	7.31	1.48	2.14	0.10	0.56	11.67	5.93

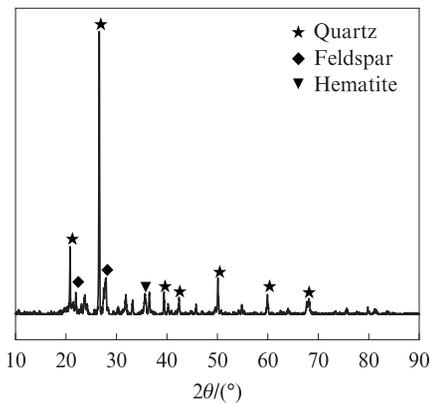


图1 污泥气化渣的XRD图谱

Fig. 1 XRD pattern of sludge gasification slag

为了进一步优化污泥气化渣粒形和级配,使用小型辊式破碎机对污泥气化渣进行破碎筛分处理,得到了0~5、5~10、10~16 mm这3种粒径区间的骨料,其颗粒级配如表2所示.不同粒径区间污泥气化渣的物理力学性能如表3所示.由表3可见,10~16 mm颗粒筒压强度仅为1.5 MPa,同时由于污泥热解气化过程中温度不均匀,气化渣具有0.8%~1.2%含泥量.

水泥为天瑞P·O 42.5普通硅酸盐水泥,比表面积

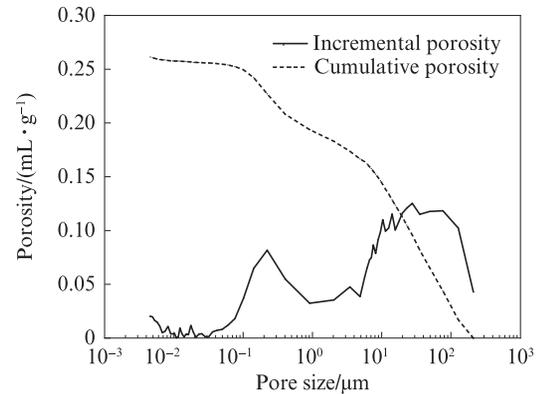


图2 污泥气化渣孔隙分布曲线

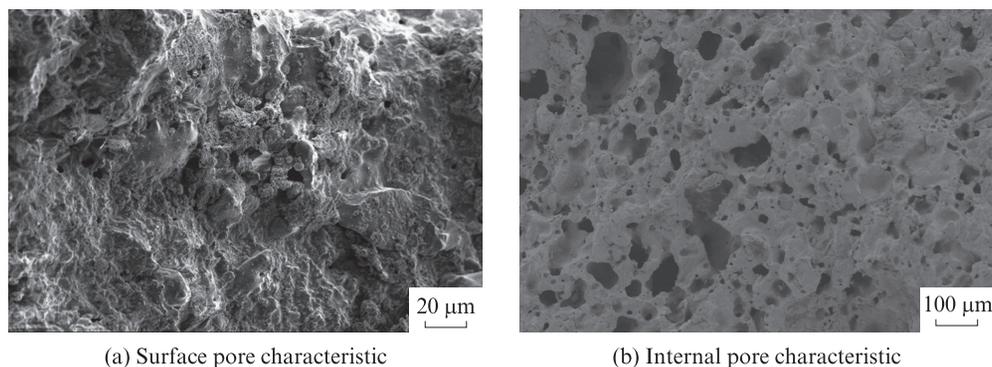
Fig. 2 Pore distribution curve of sludge gasification slag

为343 m<sup>2</sup>/kg,3、28 d抗压强度分别为25.7、47.5 MPa.粉煤灰为偃师电厂Ⅱ级粉煤灰,比表面积为410 m<sup>2</sup>/kg.表4为水泥和粉煤灰的化学组成.普通碎石(SS)来自郑州市紫东混凝土有限公司,页岩陶粒(TL)来自广州畅材节能科技有限公司,最大粒径均为20 mm.

### 1.2 试验方法

采用Design-Expert 8.0.6 Trial软件通过响应面法对回填混凝土配合比进行试验设计,试验自变量因素编码与水平如表5所示.其中ω<sub>s</sub>为砂率,即污泥

1)文中涉及的组成和比值等除特别说明外均为质量分数或质量比.



(a) Surface pore characteristic

(b) Internal pore characteristic

图3 污泥气化渣孔隙特征

Fig. 3 Pore characteristics of sludge gasification slag

表2 不同粒径区间污泥气化渣的颗粒级配

Table 2 Particle gradation of SGS in different particle size ranges

Size range/mm	Individual residue ratio(by mass)/%								
	20 mm	16 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm
0-5	0	0	0	5.22	27.72	24.02	15.06	16.08	4.94
5-10	0	2.05	8.97	84.83	4.15	0	0	0	0
10-16	0.79	3.52	93.74	1.95	0	0	0	0	0

表3 不同粒径区间污泥气化渣的物理力学性能

Table 3 Physical and mechanical properties of sludge gasification slag particles in different particle size range

Size range/mm	Bulk density/(kg·m <sup>-3</sup> )	Apparent density/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 h water absorption (by mass)/%	Cylinder strength/MPa	Softening coefficient	Sediment percentage (by mass)/%
0-5	826	1 940	16.9			1.2
5-10	751	2 081	18.5			0.8
10-16	695	1 739	20.8	1.5	0.8	0.8

表4 水泥和粉煤灰的化学组成

Table 4 Chemical composition (by mass) of cement and fly ash

Unit: %

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	IL
Cement	19.7	5.3	3.4	62.3	2.3	0.5	0.8	2.1	3.6
Fly ash	53.7	28.1	11.6	3.5	0.8	0.4	0.8	0	1.1

表5 试验自变量因素编码与水平

Table 5 Test independent variable factor code and level

Code	Factor	Level		
		-1	0	1
A	w <sub>s</sub> /%	50	55	60
B	w <sub>g</sub> /%	40	50	60
C	w <sub>wy</sub> /%	80	90	100

气化渣中0~5 mm颗粒在所有颗粒中的占比; w<sub>g</sub>为粗骨料(5~20 mm颗粒之和)中5~10 mm粒径占比; w<sub>wy</sub>为骨料预湿用水量比,即骨料实际用水量占其1 h吸水量的比例。

选择坍落度和扩展度作为响应面法中的响应指标,进行污泥气化渣回填混凝土配合比设计,如表6所示。参考GB/T 50080—2016《普通混凝土拌合物性能

试验方法标准》对回填混凝土的坍落度、扩展度和静置2 h后的扩展度进行测试,使用3 000 kN-SANS压力试验机测试回填混凝土的7、28、56 d抗压强度。

为了分析污泥气化渣回填混凝土的强度发展机理,试验同时使用5~16 mm连续级配的污泥气化渣(采用饱水和未饱水2种状态,分别记作BS和WBS,其中未饱水即自然干燥状态,含水率为3%)、同级配的普通碎石SS及页岩陶粒TL,参考GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法》制备不同骨料回填混凝土试件,编号分别为C-BS、C-WBS、C-SS和C-TL,具体配合比如表7所示,养护28 d后测试其抗压强度,并使用Zeiss Gemini Sigma 300扫描电镜SEM观察其微观形貌。

## 2 结果与分析

### 2.1 流动性

针对不同配比新拌混凝土的坍落度、扩展度和静置2 h后的扩展度进行了测试,结果见表8。

由表8可见,对于不同配合比的新拌混凝土,除了试件X5、X9和X12外,其余新拌混凝土坍落度均

表6 污泥气化渣回填混凝土配合比

Table 6 Mix proportions of sludge gasification slag backfill concretes

Unit: kg/m<sup>3</sup>

No.	Cement	Fly ash	Sludge gasification slag			Pre-wet water	Mixing water
			0-5 mm	5-10 mm	10-16 mm		
X1	165.0	385.0	616.9	197.4	296.1	181.3	330.0
X2	165.0	385.0	740.3	157.9	236.8	182.6	330.0
X3	165.0	385.0	616.9	296.1	197.4	181.3	330.0
X4	165.0	385.0	740.3	236.8	157.9	182.6	330.0
X5	165.0	385.0	616.9	246.7	246.7	161.2	330.0
X6	165.0	385.0	740.3	197.4	197.4	162.3	330.0
X7	165.0	385.0	616.9	246.7	246.7	201.5	330.0
X8	165.0	385.0	740.3	197.4	197.4	202.9	330.0
X9	165.0	385.0	678.6	177.6	266.5	161.7	330.0
X10	165.0	385.0	678.6	266.5	177.6	161.7	330.0
X11	165.0	385.0	678.6	177.6	266.5	202.2	330.0
X12	165.0	385.0	678.6	266.5	177.6	202.9	330.0
X13	165.0	385.0	678.6	222.0	222.0	181.9	330.0
X14	165.0	385.0	678.6	222.0	222.0	181.9	330.0
X15	165.0	385.0	678.6	222.0	222.0	181.9	330.0
X16	165.0	385.0	678.6	222.0	222.0	181.9	330.0
X17	165.0	385.0	678.6	222.0	222.0	181.9	330.0

表7 不同骨料回填混凝土的配合比

Table 7 Mix proportions of backfill concretes with different aggregates

Unit: kg/m<sup>3</sup>

No.	Cement	Sand	Aggregate	Total water
C-SS	538	538	1 305	242
C-TL	538	538	646	242
C-BS	538	538	625	242
C-WBS	538	538	625	362

表8 污泥气化渣回填混凝土的工作性能和表观密度

Table 8 Workability and apparent density of sludge gasification slag backfill concrete

No.	Slump/mm	Expansion/mm	2 h expansion/mm	Apparent density/(kg·m <sup>-3</sup> )
X1	240	580	540	1 491.1
X2	240	560	545	1 565.3
X3	230	555	525	1 508.2
X4	220	560	510	1 562.1
X5	170	310	255	1 453.1
X6	210	420	395	1 535.5
X7	230	575	525	1 590.6
X8	210	420	405	1 572.3
X9	170	295	260	1 506.1
X10	220	410	405	1 511.8
X11	250	565	545	1 440.6
X12	180	420	410	1 581.5
X13	220	430	420	1 492.1
X14	230	460	435	1 542.3
X15	220	440	415	1 533.4
X16	230	435	410	1 541.6
X17	220	420	400	1 532.5

可达到200 mm以上,扩展度均可达到400 mm以上,部分试件扩展度可达到550 mm以上,且静置2 h后扩展度无明显降低,说明污泥气化渣具备在回填混凝土中使用的可行性.为了进一步分析不同因素对混凝土工作性能的影响,以混凝土扩展度为评价指标,通过Design Expert 8.0.6Trial软件针对砂率、粗骨料级配和预湿用水量比进行3D交互影响分析,结果如图4所示.

由图4可以看出:当预湿用水量比一定时,砂率

和粗骨料5~10 mm粒径占比分别为60%、40%时扩展度最优;当粗骨料5~10 mm粒径占比一定时,砂率和预湿用水量比分别为50%、100%时扩展度最优;当砂率一定时,粗骨料5~10 mm粒径占比和预湿用水量比分别为40%、100%时扩展度最优;当预湿用水量比不变时,砂率和粗骨料级配对混凝土扩展度的影响较小且几乎一致,预湿用水量比对混凝土扩展度的影响较明显,扩展度随预湿用水量比增加呈先上升后下降的趋势.

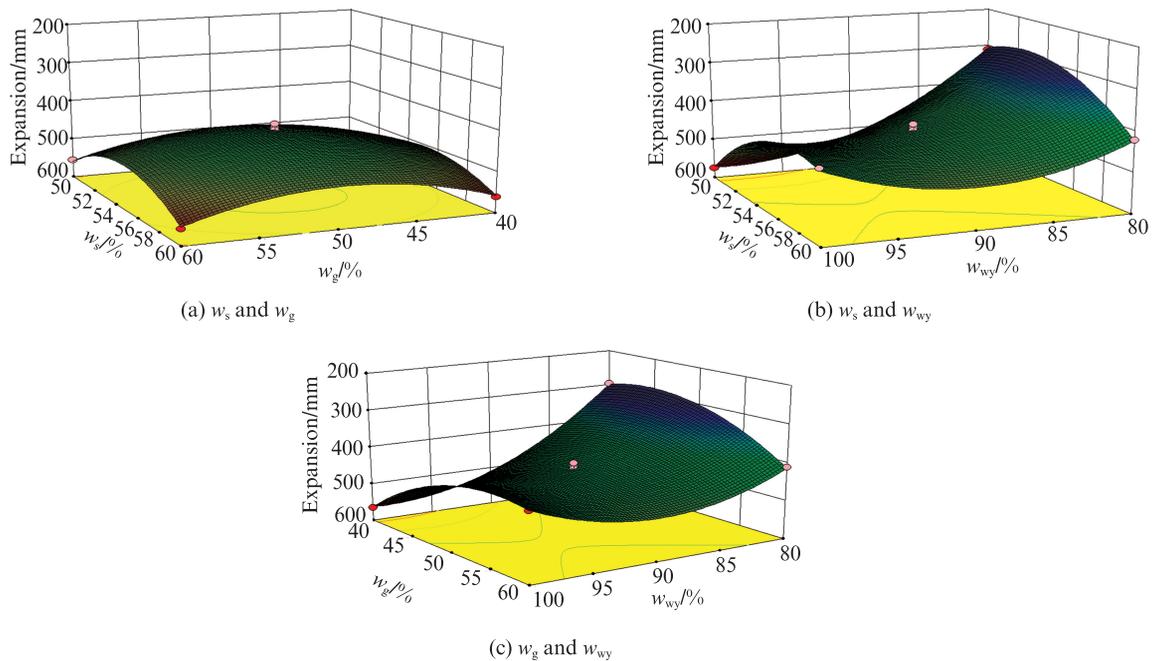


图4 不同因素对污泥气化渣回填混凝土扩展度的交互影响

Fig. 4 Interaction effect of different factors on the expansion of sludge gasification slag backfill concrete

## 2.2 表观密度

混凝土按照表观密度 $\rho$ 的大小可分为重混凝土( $\rho > 2500 \text{ kg/m}^3$ )、普通混凝土( $1950 \text{ kg/m}^3 \leq \rho \leq 2500 \text{ kg/m}^3$ )和轻质混凝土( $\rho < 1950 \text{ kg/m}^3$ ).根据回填混凝土对侧方压力的要求,轻质混凝土比普通混凝土更适用于回填工程.对标准养护28 d的回填混凝土试件进行表观密度测试,结果见表8.由表8可见,回填混凝土的平均表观密度为 $1527.1 \text{ kg/m}^3$ ,满足轻质混凝土的要求.

## 2.3 力学性能

污泥气化渣回填混凝土的7、28、56 d抗压强度如表9所示.图5为污泥气化渣回填混凝土56 d抗压强度与表观密度的拟合曲线.

由表9可见,不同配合比污泥气化渣回填混凝土在养护7、28 d时抗压强度大多在1.0 MPa左右,56 d抗压强度可达到3.0 MPa以上.由于回填混凝土配合比中水泥用量较少,而污泥气化渣中含泥量相对较

高,会对回填混凝土早期强度产生不利影响,使早期强度发展较慢,养护至56 d后才满足回填混凝土的强度使用要求.由图5可见,回填混凝土抗压强度与表观密度呈正相关,抗压强度较高的回填混凝土表现出更高的表观密度.基于各性能指标对混凝土配合比进行优选,可得到配比为X4(砂率60%、粗骨料中5~10 mm粒径占比60%、预湿用水量比为90%)的混凝土扩展度、表观密度和56 d抗压强度分别为560 mm、 $1562.1 \text{ kg/m}^3$ 、3.66 MPa,满足回填混凝土的使用要求.

由于污泥气化渣自身强度较低,当其作为骨料使用时会对回填混凝土强度产生较大影响;另外,其多孔结构可在制备过程中预吸水,并在养护过程中释水,这将有助于胶凝材料的水化和回填混凝土强度的发展.

为了分析不同骨料在回填混凝土中对胶凝材料水化过程的作用机理,按照表7中配合比设计得到不

表9 污泥气化渣回填混凝土的7、28、56 d抗压强度  
Table 9 Compressive strength of sludge gasification slag backfill concrete at 7, 28, 56 d

No.	Compressive strength/MPa		
	7 d	28 d	56 d
X1	0.85	0.93	3.23
X2	1.39	1.76	3.80
X3	0.91	1.02	3.26
X4	1.27	1.60	3.66
X5	0.65	0.77	2.80
X6	1.18	1.55	3.59
X7	0.76	0.86	3.98
X8	0.69	0.83	3.95
X9	0.98	1.13	3.35
X10	1.12	1.31	3.42
X11	1.01	1.05	2.36
X12	0.66	0.75	3.98
X13	1.00	1.13	3.25
X14	1.04	1.22	3.50
X15	1.00	1.23	3.46
X16	1.07	1.24	3.53
X17	1.05	1.22	3.49

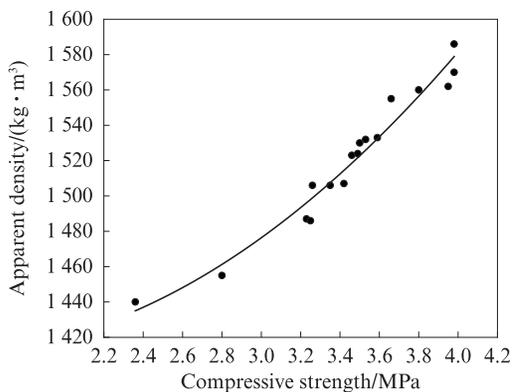


图5 污泥气化渣回填混凝土56 d抗压强度与表观密度拟合曲线  
Fig. 5 Fitting curve of 56 d compressive strength and apparent density of sludge gasification slag backfill concrete

同骨料回填混凝土的抗压强度如图6所示。

由图6可见:普通碎石作为骨料制备的回填混凝土C-SS的强度显著高于其他轻骨料;页岩陶粒试件C-TL的3 d抗压强度可达到试件C-SS的86.5%,28 d抗压强度可达75.7%;采用饱水和未饱水污泥气化渣制备的回填混凝土C-BS、C-WBS的3 d抗压强度仅为试件C-TL的69.2%、72.8%;试件C-BS的28 d抗压强度仅为24.1 MPa,试件C-WBS的28 d抗压强度则可达到试件C-TL的82.8%、C-SS的62.7%。由于饱水状态下的污泥气化渣吸收了大量的水,在回填混凝土硬化的过程中,吸收的水分能够再

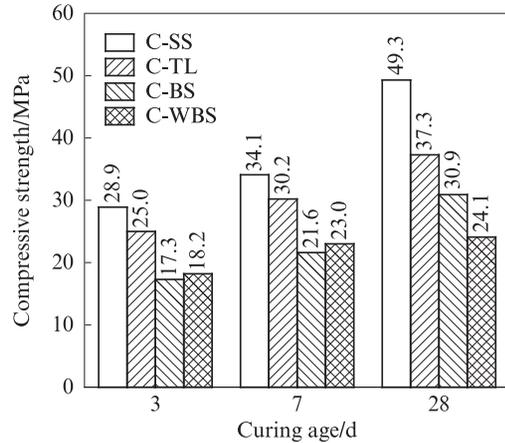


图6 不同骨料回填混凝土的抗压强度  
Fig. 6 Compressive strength of backfill concrete with different aggregates

次释放出来,促进了回填混凝土中水化反应的进行,起到了内养护的作用.对于未饱水污泥气化渣,其在养护过程中会吸附水泥浆体中的部分游离水,导致后期外部养护水不足而使抗压强度降低。

图7为不同骨料回填混凝土中水泥浆体和骨料界面过渡区的微观形貌。

由图7可见:在普通碎石与水泥浆体的界面(C-SS组)处,可观察到明显的裂缝,这表明使用普通碎石制备回填混凝土时其界面过渡区较为薄弱;其他3种骨料制备的回填混凝土界面过渡区相对不明显,在页岩陶粒和污泥气化渣制备的回填混凝土中均可观察到较多的孔隙,还可观测到部分水泥浆体进入骨料孔洞内部,起到填充孔洞的作用,在一定程度上弥补了骨料强度的不足;在饱水污泥气化渣与水泥浆体的界面(C-BS组),可观察到骨料孔洞中有钙矾石(AFT)等水化产物,还可观察到明显的过渡带,表明饱水状态下的污泥气化渣在回填混凝土中能够更好地与水泥浆体结合,在养护过程中骨料释放出的水分使界面过渡区产生更多的水化产物,在一定程度上提升了回填混凝土的强度;而对于未饱水污泥气化渣回填混凝土(C-WBS组)来说,由于骨料与水泥浆体界面过渡区水化用水不足造成其结合不够紧密,导致回填混凝土强度下降。

污泥气化渣在作为回填混凝土骨料使用时,虽然由于自身强度较低导致回填混凝土强度低于普通碎石和页岩陶粒回填混凝土,但其预吸水释水效应可起到一定的内养护效果,改善界面过渡区,对强度提升有一定的积极作用.相比于干燥状态的污泥气化渣,饱水状态的污泥气化渣回填混凝土在凝结硬化后骨料与水泥浆体界面过渡区黏结性更好,整体强度更高.参照强度标号测试方法,饱水污泥气化渣

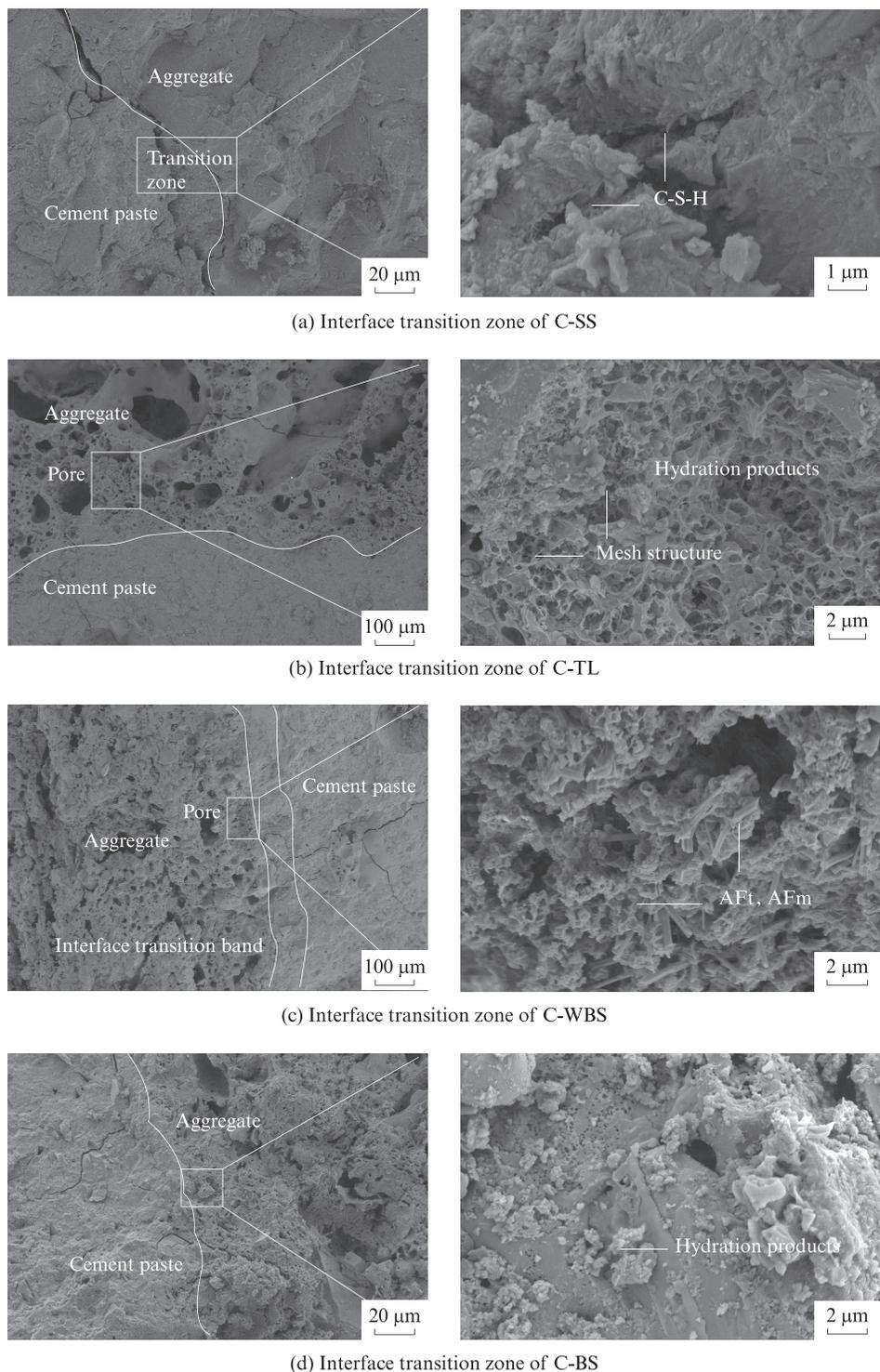


图7 不同骨料与水泥浆体的界面过渡区

Fig. 7 Interface transition zone between cement paste and aggregate

回填混凝土强度可达到普通碎石混凝土的60%以上,页岩陶粒混凝土的80%以上。

### 3 工程应用

在郑州市南曹污水处理厂项目中对污泥气化渣回填混凝土进行了中试应用。依据工程回填需求,回填混凝土中水泥和粉煤灰用量分别为165、385 kg/

$m^3$ ,依据现场含水率调整预湿用水量为 $26 kg/m^3$ (污泥气化渣总用量为 $1097 kg/m^3$ ),水胶比为0.6。

根据取样结果,新拌混凝土出厂和到达施工现场时坍落度分别为260、250 mm,表观密度可控制在 $1650 kg/m^3$ 左右,56 d抗压强度达到了2.0 MPa。同时,根据成本核算,按照水泥每吨450元、粉煤灰每吨85元(混凝土搅拌站提供数据)计算,每方污泥气化

渣回填混凝土胶凝材料的成本为107元,骨料为污水处理厂产出废渣,泵送成本每方计20元,施工成本可控制在每方130元以下,低于回填土人工夯实的成本(每方150元以上),具有显著的经济社会效益,且力学性能和表观密度也具备显著优势,有望在回填混凝土工程中推广应用,并解决污泥气化渣的消纳难题。

## 4 结论

(1)污泥气化渣颗粒具有轻质多孔的特点,具备作为轻质骨料用于回填混凝土的可行性。

(2)通过响应面法设计并分析了砂率、粗骨料级配和预湿用水量对回填混凝土扩展度的影响,优选出了混凝土砂率60%、粗骨料中5~10 mm 粒径占比60%、预湿用水量比90%的最佳配合比,其扩展度、表观密度和56 d 抗压强度分别为560 mm、1 562.1 kg/m<sup>3</sup>、3.66 MPa,满足回填混凝土的要求。

(3)通过对比普通碎石、页岩陶粒和饱水前后污泥气化渣所制备回填混凝土的强度和界面形貌发现,经过饱水的污泥气化渣在混凝土中可表现出内养护效果并改善界面过渡区,其28 d 抗压强度可达页岩陶粒混凝土的80%以上。

## 参考文献:

- [1] 斯方海,帅小根,熊慧萍,等.高流态免振捣全再生骨料混凝土在深基坑肥槽回填中的应用研究[J].混凝土,2023(6):176-179. SI Fanghai, SHUAI Xiaogen, XIONG Huiping, et al. Application study of the super high flow recycled aggregate concrete without vibration in the backfill of deep foundation trench [J]. Concrete, 2023(6):176-179. (in Chinese)
- [2] 葛折圣,黄晓明,张肖宁,等.陶粒粉煤灰混凝土在桥涵台背回填中的应用研究[J].岩土力学,2006(11):2076-2079,2084. GE Zhesheng, HUANG Xiaoming, ZHANG Xiaoning, et al. Study on application of argil fly-ash concrete to highway-bridge abutment-backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(11):2076-2079,2084. (in Chinese)
- [3] KUMAR A, AHIRWAR S K, MANDAL J N. Behavior of box culvert with geofom as a backfill material in highway [J]. Transportation Research Procedia, 2020, 48:3642-3647.
- [4] GHERGHEL A, TEODOSIU C, DE GISI S. A review on wastewater sludge valorisation and its challenges in the context of circular economy [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 228:244-263.
- [5] 周明凯,王宇强,陈潇.CFB炉渣代机制砂对混凝土强度的影响机理[J].建筑材料学报,2022,25(12):1241-1247. ZHOU Mingkai, WANG Yuqiang, CHEN Xiao. Influence mechanism of circulating fluidized bed slag replacing machine made sand on concrete strength [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(12):1241-1247. (in Chinese)
- [6] 刘栋,李立寒,崔华杰.水泥稳定炉渣碎石的强度性能[J].建筑材料学报,2014,17(3):538-542. LIU Dong, LI Lihan, CUI Huajie. Strength performance of cement stabilized aggregate containing bottom ash aggregate (BAA) [J]. Journal of Building Materials, 2014, 17(3):538-542. (in Chinese)
- [7] 孙家瑛.用煤矸石炉渣取代天然砂的混凝土性能研究[J].建筑材料学报,2012,15(2):179-183. SUN Jiaying. Study on properties of concrete with coal gangue slag to replace natural sand [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2):179-183. (in Chinese)
- [8] 钟何,赵羽习,孟涛.贻贝粗骨料混凝土的宏观性能[J].建筑材料学报,2022,25(11):1160-1167. ZHONG He, ZHAO Yuxi, MENG Tao. Macroscopic and microscopic properties of mussel coarse aggregate concrete [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11):1160-1167. (in Chinese)
- [9] 王建民,李鹏飞,冯楚祥,等.陶粒轻骨料与普通混凝土的黏结剪切性能[J].建筑材料学报,2022,25(7):700-707. WANG Jianmin, LI Pengfei, FENG Chuxiang, et al. Interfacial shear performance of ceramicsite lightweight aggregate and normal concrete cold joint [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(7):700-707. (in Chinese)
- [10] RODRÍGUEZ-ALVARO R, SEARA-PAZ S, GONZÁLEZ-FONTEBOA B, et al. Waste-based porous materials as water reservoirs for the internal curing of concrete. A review [J]. Construction and Building Materials, 2021, 299:124244.
- [11] 杨俊杰,郭春霞,谢静,等.污泥气化渣制备蒸压加气混凝土研究[J].环境保护科学,2022,48(4):79-83. YANG Junjie, GUO Chunxia, XIE Jing, et al. Research on autoclaved aerated concrete production with sludge gasification residue [J]. Environmental Protection Science, 2022, 48(4):79-83. (in Chinese)
- [12] 张晓燕,张冰心,梁娜,等.城市污水处理污泥烧结料制备建筑细骨料的可行性研究[J].新型建筑材料,2021,48(4):103-105,139. ZHANG Xiaoyan, ZHANG Bingxin, LIANG Na, et al. Experimental study on the feasibility of municipal sewage treatment sintered sludge used for building fine aggregate [J]. New Building Materials, 2021, 48(4):103-105,139. (in Chinese)
- [13] LI C Y, ZHANG X Y, ZHANG B X, et al. Reuse of sintered sludge from municipal sewage treatment plants for the production of lightweight aggregate building mortar [J]. Crystals, 2021, 11(8):999.