

用于 3D 打印的固废材料配合比设计及性能研究

Mix Design and Performance Study of Solid Waste Materials for 3D Printing

邓经祥¹, 王振坤¹, 牛立可², 陈 朋², 何 博¹, 陈俊玮², 惠 冰²

(1. 葛洲坝集团交通投资有限公司, 武汉 430000; 2. 山东省交通科学研究院, 济南 250104)

摘 要: 为减少公路施工过程中的碳排放, 实现煤矸石、高炉矿渣、粉煤灰等固废材料在 3D 打印技术中的应用, 进行 3D 打印技术的多源固废材料配合比设计及性能研究, 分析粉煤灰水泥质量比、水胶比、砂胶比及减水剂掺量对材料可打印性、建造性、物理力学性能及耐久性的影响。结果表明: 水胶比与减水剂是固废材料流动性能的主要影响因素, 与流动度正相关; 打印材料高度变化率及抗压强度随水胶比增大而降低, 水胶比宜采用 0.35; 粉煤灰质量占比与抗压强度负相关, 粉煤灰水泥质量比宜为 10:90; 随砂胶比增大, 打印材料抗压强度呈先增后减趋势, 峰值点出现在 1.2 处; 固废材料耐久性与减水剂掺量负相关, 减水剂掺量不宜超过 1%。研究成果可为类似 3D 打印材料设计及应用提供借鉴与参考。

关键词: 3D 打印; 固废材料; 配合比; 打印性能; 影响因素

中图分类号: U416.1 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0039-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.008

DENG Jingxiang¹, WANG Zhenkun¹, NIU Like², CHEN Peng², HE Bo¹, CHEN Junwei², HUI Bing²

(1. Gezhouba Group Transportation Investment Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Shandong Transportation Research Institute, Ji'nan 250104, China)

Abstract: In order to reduce carbon emissions during highway construction, the application of solid waste materials such as coal gangue, blast furnace slag and fly ash in 3D printing technology is realized. This paper studies the design and performance of multi-source solid waste materials based on 3D printing technology. The effects of fly ash cement mass ratio, water-binder ratio, sand-binder ratio and water reducer on the printability, buildability, physical and mechanical properties and durability of materials are analyzed. The results show that the water-binder ratio and water reducer are the main factors affecting the fluidity of solid waste materials, which are positively correlated with the fluidity; The height change rate and compressive strength of the printing material decrease with the increase of water-binder ratio, the water-binder ratio should be 0.35; The mass ratio of fly ash to cement is negatively correlated with compressive strength, the mass ratio of fly ash to cement should be 10:90; With the increase of sand-binder ratio, the compressive strength of printing materials increases first and then decreases, and the peak point appears at 1.2; The durability of solid waste material is negatively correlated with the dosage of water reducing agent, the dosage should not exceed 1%. The research results can provide reference for the design and application of similar 3D

基金项目: 山东省交通运输厅科技计划项目 (2023B47)。

作者简介: 邓经祥 (1989—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 公路工程。

通信作者: 惠 冰 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 地下工程及岩土工程。

收稿日期: 2024-06-03

材料科学

printing materials.
Key words: 3d printing; solid waste materials; mix proportion; printing properties; influencing factor

0 引言

随着我国智能建造技术日新月异的高速发展,新兴3D打印技术。3D打印技术是一种逐层建造技术,具有灵活、快速、绿色、环保等优点^[1]。但相对于传统工艺,3D打印技术要求材料具有较好的可打印性能及建造性能^[2],因此对打印材料的性能研发提出了更高的要求。

3D打印技术要求材料具有更好的流动性能以及早强性能,许多学者针对3D打印材料性能展开研究。其中,汲广超等^[3]研究发现3D打印试件的力学性能存在明显的层间薄弱区;乔星宇等^[4]、刘超等^[5]在混凝土中掺加减水剂、速凝剂、碳纤维等外加剂,缩短了混合料的凝结时间,改善了材料的力学性能;段珍华等^[6]研究了骨料对3D打印材料性能的影响,研究表明,采用全再生骨料制备3D打印材料,有助于缩短材料向塑性转化的时间,提高了打印材料的建造性能;范诗建等^[7]认为磷酸盐水泥具有早强、黏结强度高等特点,符合3D打印材料的要求,但需解决材料耐久性差的问题;蔺喜强等^[8]对矿物-快硬硫铝酸盐水泥胶凝材料进行研究,通过添加调凝剂与稳定剂制得强度稳定的打印材料;Le等^[9]、张超等^[10]研究了水泥基3D打印构件的强度、孔隙率等性能,认为打印会造成构件的各项异性以及强度损失;江权等^[11]、Leventis等^[12]针对水泥基打印材料展开试验研究,从打印过程、实体尺寸及堆积效果等角度对3D打印试件质量进行评价,

得到3D打印基础配比;高磊等^[13]通过室内试验,设计出一种适用于桩基工程的水泥基3D打印材料配比,认为加入减水剂可有效改善混合料的流动性与力学性能;邓嘉等^[14]采用粉煤灰、矿渣及尾矿制备地质聚合物,得到的胶凝材料具有良好的抗冻性能、抗干燥收缩性能及抗硫酸盐侵蚀性能。

综上所述,3D打印材料的研究主要集中在水泥基混凝土领域,针对煤矸石、高炉矿渣、粉煤灰等固废材料方面的研究鲜有报道。以济宁至商丘高速公路交通附属构件工程为例,对多源固废3D打印材料进行试验研究,以流动度、首层高度变化率、抗压强度、强度及质量损失率为评价指标,分析固废配合比对材料可打印性能、建造性能、物理力学性能及耐久性能的影响。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

试验材料包括煤矸石、高炉矿渣、粉煤灰、普通硅酸盐水泥(化学组成见表1)及外加剂。其中煤矸石、高炉矿渣、粉煤灰等固废材料来源于济宁周边,煤矸石及高炉矿渣需先使用鄂式破碎机破碎成小颗粒(8 mm左右),再使用粉碎机研磨成细小颗粒(级配见表2,按照1:1混合制作细砂材料);粉煤灰为Ⅱ级灰;水泥为P·O 42.5水泥;外加剂包含聚丙烯纤维(性能见表3)、聚羧酸高性能减水剂(见表4)、增稠剂(性能20万黏度)。

表 1 各材料化学成分													/%	
Table 1 Chemical composition of each material														
名称	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	其他	
煤矸石	1.7	61.7	14.9	3.1	7.2	2.2	2.2	2.4	0.1	0.1	0.2	0.5	3.7	
高炉矿渣	39.2	35.0	11.7	—	0.5	8.3	—	—	—	1.0	—	—	4.3	
粉煤灰	4.1	47.1	24.0	—	8.5	0.8	0.7	0.9	0.7	—	—	—	13.2	
水泥	61.0	22.3	5.0	4.8	—	2.3	0.1	0.8	2.2	0.5	0.1	0.6	0.3	

表 2 颗粒级配						/%	
Table 2 Particle gradation							
材料名称	2 mm	1 mm	0.5 mm	0.25 mm	0.074 mm		
煤矸石	100	93.5	79.8	46.1	4.8		
高炉矿渣	100	99.9	85.1	61.9	17.2		

表 3 聚丙烯纤维物理性能								/%	
Table 3 Physical properties of polypropylene fiber									
检测项目	密度 /(g/cm ³)	熔点 /℃	直径 /μm	长度 /mm	抗拉强 度/MPa	断裂伸 长率/%	弹性模 量/GPa		
技术要求	0.91	≥165	25	12±1	≥500	≥20	≥5.2		
检测结果	0.91	167	25	12	510	20	5.5		

表 4 聚羧酸高性能减水剂物理性能

检测项目	抗压强度比		28 d 收缩率比	含气量	泌水率比	减水率
	7 d	28 d				
技术要求	≥150	≥140	≤110	≤6.0	≤60	≥25
检测结果	168	159	103	2.0	6	27

1.2 配合比设计

参照正交试验设计方法，开展了多源固废材料配合比设计研究，分析砂胶比、水胶比、粉煤灰及减水剂掺量等因素对打印材料性能的影响。其中固废材料砂胶比、粉煤灰与水泥质量比、水胶比、减水剂等配比设计见表 5，聚丙烯纤维与增稠剂掺量分别为 0.5%、0.05%。通过测量流动度、首层高度变化率及抗压强度等指标，评价固废材料的可打印性、建造性及物理力学性能，分析固废材料配合比对打印材料性能的影响，并筛选初步配合比进行耐久性（抗冻性能）测试，进而确定 3D 打印固废材料的最佳配合比。

表 5 配合比设计
Table 5 Mix proportion design

编号	砂胶比	粉煤灰:水泥	水胶比	减水剂掺量/%
1	1.0	5:95	0.32	
2	1.0	10:90	0.35	0.5
3	1.0	15:85	0.38	1.0
4	1.0	20:80	0.40	1.5
5	1.1	5:95	0.35	1.0
6	1.1	10:90	0.38	1.5
7	1.1	15:85	0.40	
8	1.1	20:80	0.32	0.5
9	1.2	5:95	0.38	1.5
10	1.2	10:90	0.40	
11	1.2	15:85	0.32	0.5
12	1.2	20:80	0.35	1.0
13	1.3	5:95	0.40	0.5
14	1.3	10:90	0.32	1.0
15	1.3	15:85	0.35	1.5
16	1.3	20:80	0.38	

1.3 试验方法

(1) 可打印性：试验以流动度为评价指标，用刚拌和好的固废材料进行跳桌试验，测量结束后取底面直径（两垂直面）的平均值作为试验结果。

(2) 建造性：采用首层高度变化率衡量固废材料的可建造性^[15]。试验过程中，按照空心六棱柱模型进行打印，第一层打印后，使用刻度尺测量首层高度，之后每打印一层测量一次。

(3) 物理力学性能：制备 150 mm × 150 mm ×

150 mm 标准试件（3 块/组），标准养护 7（打印试件）、28 d（浇筑及打印试件）后采用压力机测量试件抗压强度，取平均值作为测量结果（共 39 组），其中打印试件按照实心六棱块模型打印，标准养护 7、28 d 后切割成标准试件。

(4) 耐久性试验：综合可打印性、建造性及物理力学性能试验结果，并根据 28 d 抗压强度大于 38.225 MPa（试配强度）的指标要求，确定初始配合比。根据初始配比制作打印试件（按实心六棱柱打印后切割）及浇筑试件，试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm，标准养护 28 d 后（提前 4 d 取出浸泡）将试件取出放在冻融箱内循环 50 次（-18 ℃ 冷冻 4 h，20 ℃ 融化 4 h 为一个循环），测量质量损失率及冻融循环后试件抗压强度（结合未冻融试件抗压强度，得到强度损失率）。

2 结果与分析

2.1 可打印性

图 1 是材料流动度与各因素水平的对应关系图，从图 1（a）可以看出，水胶比 0.32、0.35、0.38、0.40（粉煤灰：水泥为 5：95）所对应的流动度分别为 129、155、172、216 mm，流动度增加量依次为 26、17、44 mm，这表明材料流动度与水胶比正相关，增加用水量可以改善固废材料的可打印性能，但该正比关系存在一定界限，当水胶比超过 0.38 时，流动度大幅增加，材料流动性能过高导致黏聚性能降低，材料可塑性的降低反而不利于材料的打印。分析原因可知，增加水胶比会增加混合料的水分子含量，多余的水会在砂浆颗粒周围形成一层水膜，起到润滑作用，使得材料的流动性能进一步加强。

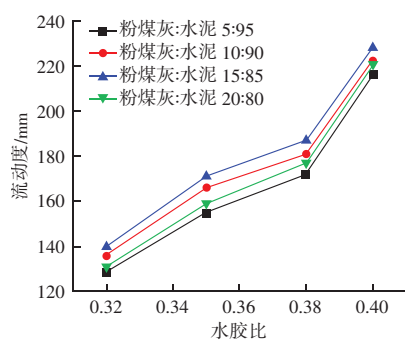
根据图 1（b）可知，砂胶比与流动度负相关，这表明增加砂的用量会降低混合料的工作性能，不利于固废材料的打印。这是因为增加砂胶比，胶凝材料及水的用量相对降低，固废颗粒间的水分子含量降低，水膜厚度减小，颗粒间摩阻力增加，导致流动度减小。

由图 1（c）可知，减水剂对流动度的影响与水胶比类似，呈现出流动度随减水剂掺量增加而增大的趋势，且掺量超过 2% 时，减水剂对流动度的改善效果显著增加。这是因为减水剂对水泥的分散作用，

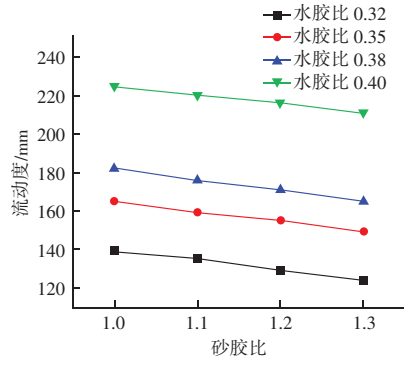
材料科学

使水泥颗粒分散，释放被包裹的水分子，颗粒间的自由水增加，颗粒摩阻力降低，流动性增加。

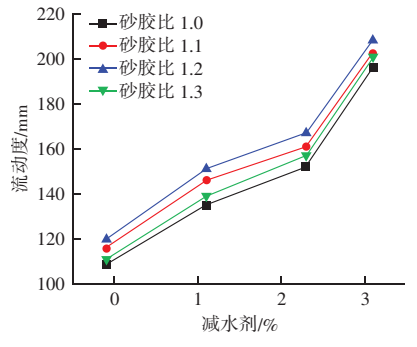
图1(d)反映了粉煤灰水泥质量比与对混合料流动度的对应关系。粉煤灰水泥质量比与流动度呈“上凸型”抛物线关系，“拐点”为15:85，此时流动度最大，混合料的流动性能最佳，这表明适量掺入粉煤灰可以改善固废材料的工作性能，粉煤灰占比超过一定限值后，增加粉煤灰用量会降低材料的流动性能，这与粉煤灰的颗粒形态有关，光滑的球形使得粉煤灰在混合料中可以充当润滑剂的作用，提高了混合料的均匀性及流动性，但各产地或公司生产的粉煤灰品质不一，且试验采用的Ⅱ级粉煤灰，导致需水量较高，掺量过多后，不利于混合料的流动性。



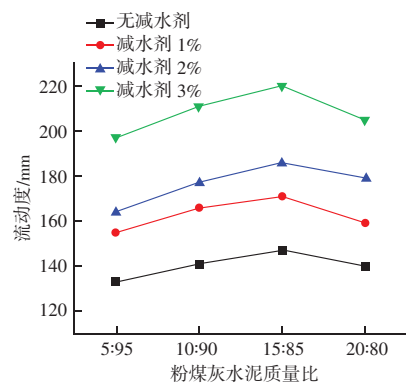
(a) 水胶比 (减水剂 1%，砂胶比 1.2)



(b) 砂胶比 (减水剂 1%，粉煤灰水泥 5:95)



(c) 减水剂掺量 (水胶比 0.35，粉煤灰水泥 5:95)



(d) 粉煤灰水泥质量比 (水胶比 0.35，砂胶比 1.2)

图1 流动度与各因素水平的关系
Fig. 1 Relationship between fluidity and the level of each factor

2.2 建造性

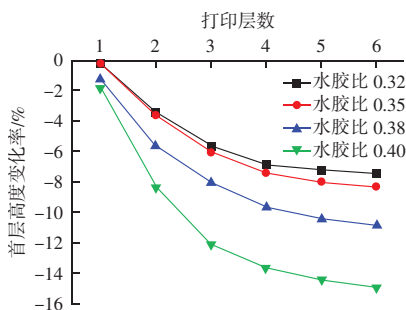
图2为首层打印高度变化率与各因素水平的对应关系图（试验基准配比为粉煤灰水泥比为5:95，水胶比0.35，砂胶比1，减水剂掺量1%），打印1至6层时，首层打印高度变化率分别为-1.8%、-8.3%、-12.1%、-13.6%、-14.4%、-14.9%，首层打印高度相对变化率分别为-1.8%、-6.5%、-3.8%、-1.5%、-0.8%、-0.5%。以图2(a)中水胶比0.40为例，打印高度变化率与打印层数呈负相关，同时打印第2层时首层高度降低最快，打印4层后，首层高度基本不再变化。分析原因可知，3D打印采用逐层打印的方式，上层混合料的重量便施加在先打印的模型上，此时下层打印材料尚未水化完全，仍具有一定的可塑性，下层材料承重的增加使其变形增大，随打印层高增加，混合料水化时间增加，流动性降低，早期强度逐渐增大，高度变化率逐渐降低。

由图2(a)可知，水胶比0.32、0.35、0.38、0.40对应的首层高度变化率分别为-7.4%、-8.3%、-10.8%、-14.9%（打印6层），二者呈负相关关系，且水胶比超过0.35后，首层高度显著降低，这表明增加混合料中用水量，会导致固废材料的建造性降低。这是因为水胶比的增加使得混合料颗粒间的水膜厚度增加，颗粒间的作用力减小，抵抗变形的能力降低，首层高度降低幅度增大。

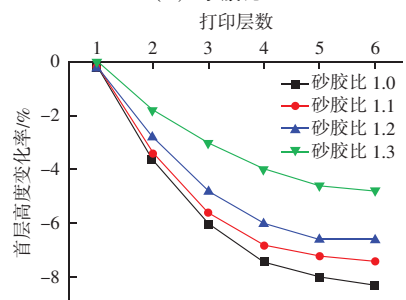
图2(b)反映了不同砂胶比对应的3D打印首层高度变化规律。砂胶比1.0对应的首层高度变化率最小，砂胶比1.3的变化率最大，增加砂胶比可提高

固废材料的可建造性, 因此工程中可采用增加砂胶比的方式, 降低打印材料变形率, 提高材料建造性能。

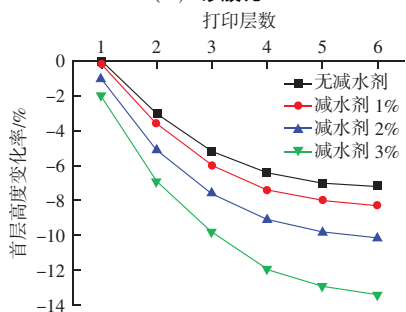
由图 2 (c) 可知, 减水剂掺量与水胶比对材料建造性的影响规律相似, 首层高度变化率随减水剂用量的增加而逐渐减小, 这表明增加减水剂掺量, 3D 打印固废材料的变形率增加, 材料的建造性降低。



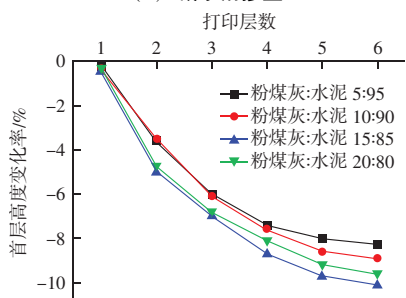
(a) 水胶比



(b) 砂胶比



(c) 减水剂掺量



(d) 粉煤灰水泥质量比

图 2 打印高度变化率与各因素水平的关系

Fig. 2 Relationship between printing height change rate and the level of each factor

由图 2 (d) 可知, 不同粉煤灰水泥质量比对应的高度变化率表现为 $5:95 > 10:90 > 20:80 > 15:85$, 增加粉煤灰占比, 建造性呈先降低后增强的趋势, 粉煤灰占比 15% 时, 建造性最差。粉煤灰水泥质量比 $5:95$ 与 $15:85$ 所对应的高度变化率相差并不大, 仅 2% 左右 (打印 6 层), 远小于水胶比的 7.5% (0.32 与 0.40 对应的高度变化率差值), 这表明相较水胶比而言, 粉煤灰水泥质量比对建造性的影响不大, 是次要影响因素。

2.3 物理力学性能

图 3 为抗压强度与各因素水平的对应关系图。不同配比下的抗压强度均随着龄期的增加而增大, 3 d 强度达到了 28 d 强度的 70% 左右, 这表明固废混合料的强度与龄期正相关, 其强度主要在拌合打印后的前 7 d 形成, 这与水泥的水化规律有关。同时, 对比打印与浇筑试件的 28 d 强度可知, 采用 3D 打印技术制备的试件强度明显低于浇筑试件, 这是 3D 打印技术的成型方式导致的, 与传统的浇筑成型不同, 3D 打印技术是按照提前设置好的模型进行逐层打印, 每层之间具有一定的打印时间间隔, 先打印的材料表面湿度降低, 在表面张力的作用下形成“薄膜层”冷缝^[16], 导致打印试件在层与层交界处出现薄弱面, 其整体性降低。

由图 3 可知, 不同配比参数与抗压强度的关系:

(1) 粉煤灰水泥质量比 $5:95$ 、 $10:90$ 、 $15:85$ 、 $20:80$ 对应的 28 d 强度 (浇筑试件) 分别为 42.1、40.7、38.6、35.2 MPa, 试件抗压强度随粉煤灰占比增加而逐渐降低, 且强度降低幅度逐渐增加, 这是因为混合料的强度主要来自于水泥的水化作用, 因此工程中要控制粉煤灰的用量, 综合考虑工作性与建造性, 粉煤灰水泥质量比以 $10:90$ 为宜;

(2) 增加减水剂掺量有利于提高多源固废材料的抗压强度, 但提高程度有限, 且减水剂掺量超过 2% 后, 强度不再增加。综合各项性能, 减水剂掺量不宜大于 2%;

(3) 随砂胶比增加, 试件抗压强度表现出先增加后减小的趋势, 砂胶比在 1.2 时达到抗压强度峰值, 分析原因可知, 固废材料的强度源自于细集料与胶凝材料的共同作用, 增加砂胶比使得细集料用量增加, 用于承压的骨料增多, 抗压强度随之增强,

材料科学

但砂表面包裹的胶凝材料也随之逐渐减小,砂胶比超过一定比例,砂表面包裹的胶凝材料不足,抗压强度降低;

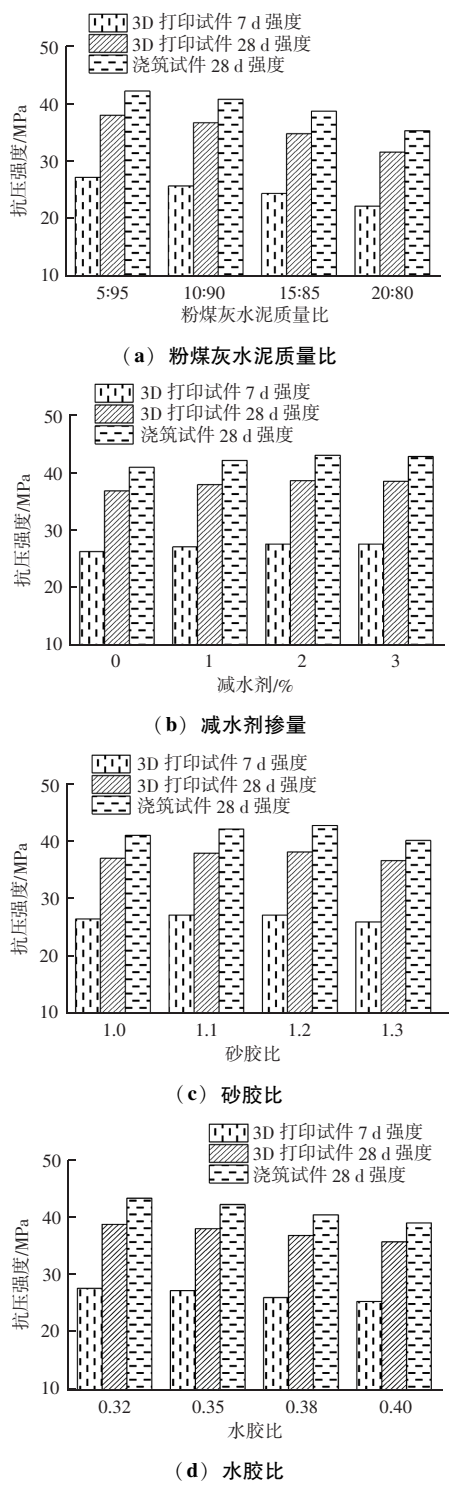


图3 抗压强度与各因素水平的关系

Fig.3 The relationship between compressive strength and the level of each factor

(4) 固废材料抗压强度随水胶比的增加而逐渐降低,因此在保证流动的前提下,应尽量减小用水量。

2.4 耐久性分析

图4反映了减水剂掺量与强度、质量损失率的对应关系。对比图中打印与浇筑试件可知,在减水剂掺量为1%时打印试件的强度损失率为9.3%,比浇筑试件高4%左右,这是因为打印试件的内部具有水平向的层间孔隙与竖向的接缝孔隙,冻融循环过程中,自由水会留存在该缝隙中,相较于浇筑试件的整体结构,缝隙中自由水的冻胀作用对混合料结构的破坏性更强。质量损失率的试验结果与之相反,打印试件的质量损失率明显小于浇筑试件,分析原因可知,打印试件是逐层挤压打印而成,且每层的打印条带相互垂直,冻融循环过程产生的碎屑被锁在试件内部,使其质量损失率更低。

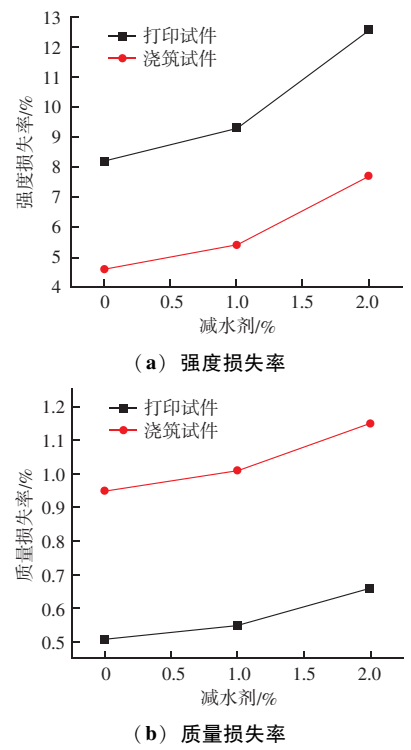


图4 减水剂掺量与强度、质量损失率

Fig.4 Water reducing agent content and strength and mass loss rate

同时,初始配比的强度损失率均在13%以下,质量损失率均在1.2%以下,满足规范设计要求(强度损失率 $\leq 25\%$,质量损失率 $\leq 5\%$)。试件的质量损失率与强度损失率均随减水剂掺量的增加而增加,减水剂掺量由1%增加至2%时,强度损失率与质量

损失率分别增加了 3.3%、0.11%（打印试件），均显著大于未掺减水剂增加至减水剂掺 1% 时的增加量，原因是减水剂的加入使得水泥胶凝结构更加松散，进而释放出更多被水泥包裹的自由水，而混合料中的自由水在冻融过程中会发生冻胀，会破坏固废混合料的结构，导致试件的强度损失率与质量损失率降低。为保障固废材料的耐久性，减水剂掺量不宜超过 1%。

3 结论

采用煤矸石、高炉矿渣、粉煤灰、普通硅酸盐水泥、外加剂等制备多源固废 3D 打印材料，分析了材料对比对固废材料打印性能、物理力学性能及耐久性能（交通工程附属构件）的影响，得到以下结论：

（1）固废材料水胶比、减水剂掺量均与流动度正相关，增加砂的用量不利于材料的打印挤出，增加粉煤灰的占比会导致流动度先增加后减小，其中水胶比及减水剂掺量对流动性能的影响较大，是主要影响因素，控制减水剂及水的用量对提高可打印性能至关重要。

（2）增大水胶比会导致固废材料高度变化率降低，不利于材料的建造性能，因此流动度不宜过大，综合考虑各项性能指标，水胶比以 0.35 为宜。

（3）粉煤灰占比越大，材料抗压强度越低，且粉煤灰质量占比超 15% 后，强度出现较大幅度降低，结合考虑工作性与建造性，粉煤灰质量宜为 10:90。减水剂的加入有利于材料的抗压强度，而增加水胶比会起反作用。随砂胶比增大，打印材料抗压强度先增加后减小，峰值点出现在砂胶比 1.2 处。

（4）减水剂对固废材料耐久性有较大的影响，增加减水剂用量，强度损失率与质量损失率增加，材料抗冻性能降低，因此减水剂用量不宜超过 1%。

参 考 文 献

- [1] 张亚梅. 建筑 3D 打印助力美丽乡村建设 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (9): 3344–3345.
- [2] 肖力光, 张育嘉. 3D 打印环保混凝土的研究进展及发展趋势 [J]. 应用化工, 2024, 53 (5): 1175–1179.
- [3] 汲广超, 肖建庄. 3D 打印粗骨料混凝土力学性能 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2023, 51 (11): 1711–1718.
- [4] 乔星宇, 李韵通, 潘宁. 3D 打印建筑混凝土配合比设计研究 [J]. 现代装饰 (理论), 2016 (6): 240–241.
- [5] 刘超, 王有强, 刘化威, 等. 基于打印参数影响的 3D 打印混凝土力学性能试验研究 [J]. 材料导报, 2023, 37 (1): 84–90.
- [6] 段珍华, 吕振源, 肖建庄, 等. 3D 打印全再生粗骨料混凝土各向异性力学性能研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2024, 52 (3): 370–377.
- [7] 范诗建, 杜骁, 陈兵. 磷酸盐水泥在 3D 打印技术中的应用研究 [J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (1): 1–4.
- [8] 蔺喜强, 张涛, 霍亮, 等. 水泥基建筑 3D 打印材料的制备及应用研究 [J]. 混凝土, 2016 (6): 141–144.
- [9] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete [J]. Materials & Structures, 2012, 45 (8): 1221–1232.
- [10] 张超, 邓智聪, 侯泽宇, 等. 混凝土 3D 打印研究进展 [J]. 工业建筑, 2020, 50 (8): 16–21.
- [11] 江权, 吴思, 刘强, 等. 水泥基 3D 打印材料基础配合比试验与质量评价 [J]. 岩土力学, 2023, 44 (5): 1245–1259.
- [12] LEVENTIS A, VERGANELAKIS D A, HALSE M R, et al. Capillary imbibition and pore characterisation in cement pastes [J]. Transport in Porous Media, 2000, 39 (2): 143–157.
- [13] 高磊, 罗易, 许蒋鹏, 等. 桩基工程 3D 打印混凝土材料工程性质研究 [J]. 河北工程大学学报 (自然科学版), 2018, 35 (4): 21–24, 29.
- [14] 邓嘉, 鲍文博, 杨宇豪, 等. 粉煤灰基尾矿碱激发地质聚合物耐久性研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 58–66.
- [15] 杨钱荣, 赵宗志, 肖建庄, 等. 矿物掺合料与化学外加剂对 3D 打印砂浆性能的影响 [J]. 建筑材料学报, 2021, 24 (2): 412–418.
- [16] 姚杰, 黄明洋, 赵宝军, 等. 混凝土 3D 打印技术的研究与应用现状 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (10): 1–9.