

引文格式:孟凡奇,阎蕊珍,柯国炬,等.白云岩石粉用于3D打印混凝土的试验研究[J].太原理工大学学报,2026,57(2):425-432.

MENG Fanqi, YAN Ruizhen, KE Guoju, et al. Application of dolomite powder to 3D printing concrete[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(2): 425-432.

白云岩石粉用于3D打印混凝土的试验研究

孟凡奇, 阎蕊珍, 柯国炬, 贾柯瑞, 周梦龙, 杨小康

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原)

摘 要:【目的】白云岩石粉是开采和加工白云岩过程中产生的废弃物,通过白云岩石粉取代部分质量的水泥,以提高白云岩石粉利用率。【方法】对3D打印混凝土(3DPC)的可打印性能和力学性能进行了试验研究,结合扫描电子显微镜和能量色散X射线分析对硬化后3DPC的性能开展了机理分析,探索使用白云岩石粉以减少3DPC碳排放和能耗的潜力。【结果】结果表明:随着白云岩石粉掺量的增加,3DPC的流动性提高,开放时间延长;掺量不超过5%的白云石粉可提高3DPC的可建造性和层间结合强度;白云岩石粉的去白云石化反应有助于3DPC后期抗折强度和抗压强度的提高。掺入一定量(本研究为5%)的白云岩石粉可提高3DPC的可打印性,对力学性能不产生显著影响,减少水泥用量,降低打印材料的碳排放。

关键词:3D打印混凝土;白云岩石粉;可打印性能;力学性能;环境影响

中图分类号:TU528 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.tyut.1007-9432.20230843

文章编号:1007-9432(2026)02-0425-08

Application of Dolomite Powder to 3D Printing Concrete

MENG Fanqi, YAN Ruizhen, KE Guoju, JIA Kerui, ZHOU Menglong, YANG Xiaokang

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】Dolomite powder (DP) is one of the natural waste powders generated during the mining and processing of dolomite. For its better utilization, this study is carried out. 【Methods】A sustainable 3D printing concrete (3DPC) was investigated by using DP as a partial replacement of cement and the printability and mechanical properties of 3DPC were evaluated. Meanwhile, mechanism analysis of the properties of hardened 3DPC with DP was conducted by using scanning electron microscopy and energy dispersive spectroscopic X-ray analysis. Moreover, the potential of DP usage to reduce carbon emission and energy consumption of 3DPC was explored. 【Results】The results show that the fluidity and open time of 3DPC are improved with the increase of DP content. When the content of DP reaches 5%, the buildability and interlayer bond strength of 3DPC are improved. The dedolomitization reaction of DP contributes to the improvement of flexural and compressive strengths of 3DPC in the later stage. From this study, it can be concluded that incorporating a certain amount (5% in this study) of DP can improve the printability of 3DPC without significantly influencing its mechanical properties. Furthermore, the DP incorporation can reduce the amount of cement usage and decrease the carbon emission of printing materials.

Keywords: 3D printing concrete; dolomite powder; printability; mechanical property; environmental impact

收稿日期:2023-12-24;修回日期:2024-03-20

第一作者:孟凡奇,硕士研究生,(E-mail)1396465868@qq.com

通信作者:阎蕊珍,副教授,主要从事混凝土材料方向研究,(E-mail)yanruizhen2266@163.com

在当今社会,建筑业碳排放和能耗问题日益突出^[1]。虽然 3D 打印混凝土(3DPC)技术因其环保、高效等特点受到关注^[2],但环境友好型 3DPC 材料的开放仍面临挑战。为了满足 3DPC 的工程需求,往往需要消耗大量水泥,这一过程无疑加剧了大气中二氧化碳的排放^[3]。为此,可以通过加入一些矿物掺合料来取代部分水泥来减轻环境负荷和经济成本^[4,5]。然而,目前常见的矿物掺合料,如粉煤灰、矿粉等,存在着分布不均、资源匮乏和价格倍增等诸多问题^[6,7],难以满足中国基础设施建设的需求。因此,寻找其他绿色环保、性能优异,且廉价易得的矿物掺合料对发展绿色混凝土至关重要。

在中国,白云石矿产分布广泛,白云石储量丰富,已探明保守储量在 40 亿 t 以上^[8]。但白云岩石粉作为开采白云岩和生产机制砂时不可避免的副产物,因目前没有合适的消耗途径被随意堆砌,造成资源的浪费。据研究显示^[9-12],白云岩石粉能加速水泥的水化,有利于水泥混凝土的早期强度发展,并会在混凝土内部发生去白云石化反应,与混凝土内部的氢氧根离子结合生成方解石,抑制钙矾石的形成,提高混凝土的后期强度,但白云岩石粉对 3D 打印混凝土(3DPC)各项性能影响的研究鲜有报道。因此,开展白云岩石粉对 3DPC 的影响研究,为白云岩石粉作为 3DPC 矿物掺合料的工程应用提供有力理论支撑。

本文研究白云岩石粉对 3DPC 新拌和硬化性能的影响,主要包括 3DPC 拌合物的流动性、开放时间、可挤出性、可建造性,以及硬化浆体的层间黏结强度、抗折强度和抗压强度,进一步从微观结构角度进行机理分析,并结合生命周期评估(LCA)分析对减少碳排放和能耗做出的贡献,探究使用白云岩石粉制备 3DPC 的可能性。

1 实验方案设计

1.1 试验原材料

3DPC 所使用的主要原材料如下:

P·O 42.5 水泥,由山西智海建材有限公司提

供,其各项基本物理指标见表 1;

细骨料,IOS 标准中中级砂,粒径在 0.5~1 mm 范围内;

加密硅灰,由山西晋硅朗科技有限公司提供;

白云岩石粉,由山西中大建设集团集团有限公司提供,白云岩石粉的 X 射线衍射分析和基本物理性能指标如图 1 和表 2 所示;

表 1 水泥基本物理性能指标
Table 1 Basic physical parameters of cement

比表面积/ (m ² ·kg ⁻¹)	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	初凝	终凝	3 d	28 d	3 d	28 d
379	160	220	4.9	8.6	24.9	51.3

表 2 白云岩石粉基本物理性能指标
Table 2 Basic physical parameters of dolomite powder

密度/(g·cm ⁻³)	比表面积/(m ² ·kg ⁻¹)	需水量比/%	亚甲蓝值
2.8	437	95	0.25

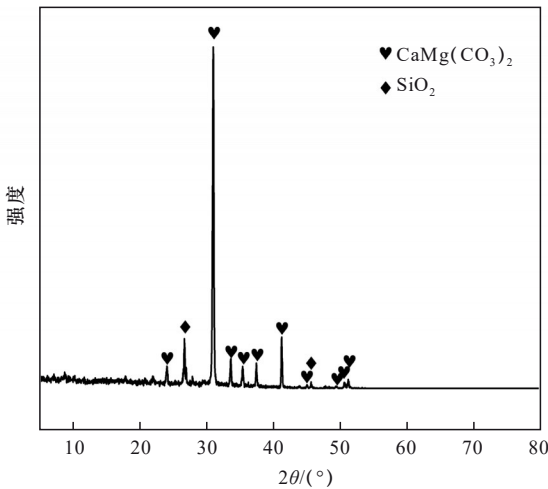


图 1 白云岩石粉的 X 射线衍射图谱
Fig. 1 XRD pattern of dolomite powder

羟丙基甲基纤维素,北京弗特恩科技有限公司生产,黏度为 200 000 mPa·s。

聚羧酸减水剂,北京弗特恩科技有限公司生产,减水效率为 38%。

可再分散乳胶粉,北京弗特恩科技有限公司生产,比重为 490±50 g/L,含固量≥98%。

其中,水泥、硅灰及白云岩石粉的化学组成和粒度分布分别见表 3 和图 2。

表 3 水泥、硅灰及白云岩石粉的化学成分
Table 3 Chemical compositions of cement, silica fume, and dolomite powder %

胶凝材料	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	LOI
水泥	43.08	17.48	1.78	7.52	1.87	0.54	0.24	0.14	27.35
硅灰	0.65	81.03	1.14	0.43	0.83	1.6	—	0.54	13.78
白云岩石粉	27.79	3.95	0.26	1.47	15.12	0.3	0.03	0.03	51.05

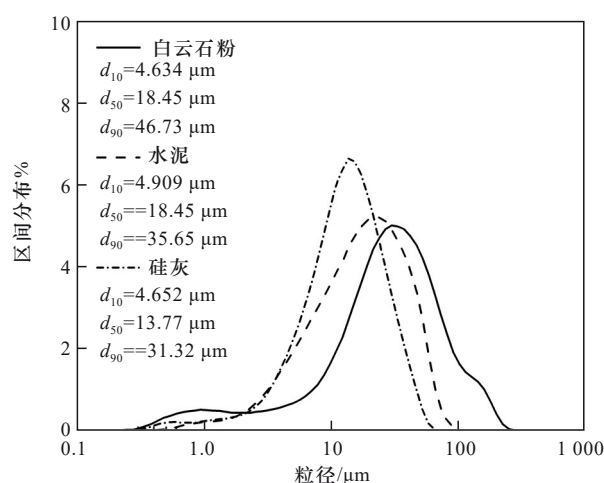


图 2 水泥、硅灰和白云岩石粉的粒度分布

Fig. 2 Particle size distributions of cement, silica fume, and dolomite powder

1.2 试验配合比

根据相关文献^[13,14]可知,3DPC中的胶砂比在1~1.5时打印材料的综合性能较好。经试验调整,研究用3DPC中的胶砂比确定为1.39,水灰比为0.22。白云岩石粉取代水泥的质量百分率分别为2.5%、5%、7.5%和10%。具体配合比如表4所示。

表 4 3DPC 的配合比

Table 4 Mix proportions of 3DPC (g)

组别	白云岩石粉	水泥	砂	硅灰	乳胶粉	减水剂	纤维素醚	水
D0	0.00	1 330.00	1 000	60	0.8	3	1	305
D1	33.25	1 296.75	1 000	60	0.8	3	1	305
D2	66.50	1 263.50	1 000	60	0.8	3	1	305
D3	99.75	1 230.25	1 000	60	0.8	3	1	305
D4	133.00	1 197.00	1 000	60	0.8	3	1	305

1.3 试验方案

本研究主要对白云岩石粉不同质量取代水泥制备的3DPC的可打印性能、硬化混凝土的力学性能及环境影响等几个方面进行了试验和分析。

1.3.1 可打印性试验

根据LE等^[15]的研究,3DPC的可打印性能主要包括拌合物的流动性、可挤出性、开放时间和可建造性,具体测试方法如下:

1) 流动性试验

按照规范《水泥胶砂流动度测定方法》^[16]中规定的跳桌流动度法进行测试。

2) 可挤出性试验

通过打印 2 000 mm 的条带,观察是否出现阻塞

或断裂现象,判断可挤出性是否良好。

3) 开放时间试验

在 3DPC 停止搅拌后的 20 min 时开始打印长 200 mm 的条带,随后每隔 10 min 打印一条条带,直到条带不能够被连续挤出时记录当前时间为开放时间。

4) 可建造性试验

通过打印的最大高度来评价可建造性,连续堆叠打印长 200 mm 的条带,在打印过程中发生较大的变形或坍塌时停止打印。

1.3.2 力学性能试验

3DPC 的力学性能试验主要包括硬化混凝土的层间黏结强度、抗折强度和抗压强度。

1) 层间黏结强度试验

参考《混凝土 3D 打印技术规程》^[17],从 3DPC 中切割出 40 mm×40 mm×40 mm 的小试块(如图 3),继续养护至 28 d 时进行层间黏结强度测试。

2) 抗折强度和抗压强度试验

硬化混凝土的抗折强度和抗压强度参照《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》^[18]的方法进行,所用试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,一组 3 个试件,测试龄期包括 3、7、14、28 d。

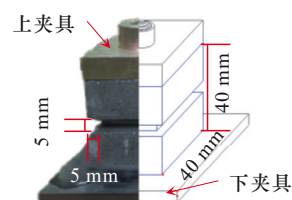


图 3 层间粘结强度试块

Fig. 3 Interlayer bonding strength specimen

1.3.3 微结构分析

从养护至目标龄期的试块中取一些直径为 5 mm、厚度为 1~1.5 mm 的 SEM 样品,在无水乙醇中浸泡不少于 24 h,之后更换到新的无水乙醇中继续浸泡不少于 6 h,并在测试前将样品进行干燥处理。

1.3.4 环境影响评价

参考 HU 等人^[19]的研究,对掺有白云岩石粉的 3DPC 进行碳排放和能耗评估,探索白云岩石粉在绿色混凝土中的潜力。

2 实验结果分析

2.1 流动性

图 4 为不同白云岩石粉掺量下 3DPC 的流动度。由图可知,3DPC 的流动度随着白云岩石粉掺

量的增加而提高。掺入 2.5%、5%、7.5% 和 10% 白云岩石粉的 3DPC 的流动度分别与对照组相比增加了 5.1%、8.1%、9.0% 和 10.6%，其主要因素可归于级配良好的白云岩石粉颗粒与水泥和硅灰颗粒相互填充，减少了彼此之间的间距，释放出一定量的游离水^[20]。次要原因为白云岩石粉需水量要低于水泥，据表 2 为 95%，用白云岩石粉部分替代水泥后水泥含量降低，水泥水化对水的需求减少，最终使得游离水增加。

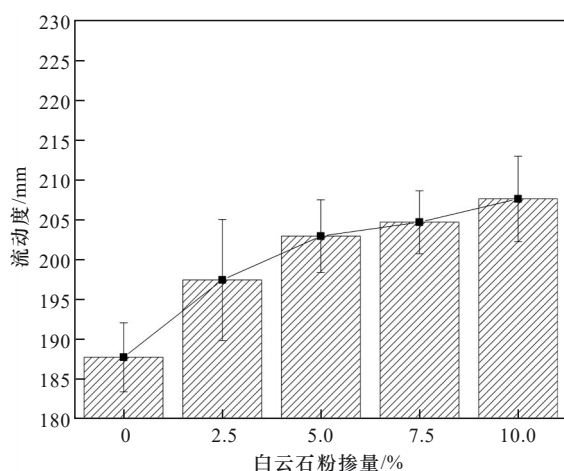


图 4 白云岩石粉掺量对 3DPC 流动度的影响

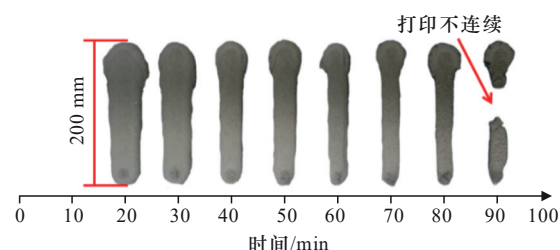
Fig. 4 Effect of dolomite powder content on fluidity of 3DPC

2.2 开放时间

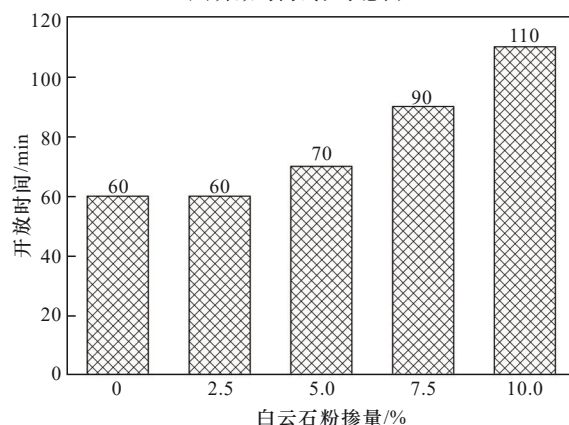
开放时间是指胶凝材料连续通过喷嘴不会发生停止或堵塞的时间段，用以表达材料的可加工性随时间变化的状态。当条带不能够被连续挤出时记录当前时间为开放时间，如图 5(a)所示。图 5(b)显示了不同白云岩石粉掺量下 3DPC 的开放时间。结果表明：白云岩石粉掺量为 2.5% 和 5% 时，对 3DPC 的开放时间影响较小，开放时间均保持在 70 min 以内；当掺量为 7.5% 和 10% 时，3DPC 的开放时间被大幅度延长，对比对照组分别延长了 50% 和 83.3%。MA 等^[21]建议 3DPC 开放时间的最小值为 70 min，要求 3DPC 在 70 min 内可以连续地被挤出，因此掺入大于 5% 掺量的白云岩石粉可使得 3DPC 满足开放时间的要求。

2.3 可挤出性

良好的可挤出性是打印连续、自密实长丝的前提。图 6 显示了不同白云石粉掺量下 3D 打印砂浆的可挤出性。可以很明显地看出，各掺量的打印条带并未出现阻塞或断裂现象，并且打印条带的宽度会随着白云石粉掺量的增加而变宽，这表明白云石粉的加入并不会给 3D 打印砂浆的可挤出性带来负



(a) 开放时间试验示意图



(b) 开放时间随白云岩石粉掺量的变化

图 5 白云岩石粉掺量对 3DPC 开放时间的影响

Fig. 5 Effect of dolomite powder content on open time of 3DPC

面影响。但目前还没有测试方法的相关标准，无法定量对可挤出性的评价。

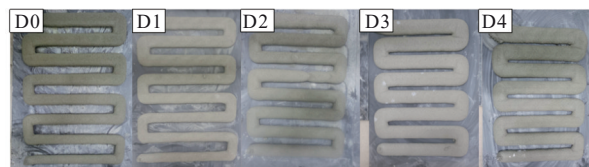


图 6 不同白云岩石粉掺量下的打印条带

Fig. 6 Printed strips with different dosages of dolomite powder

2.4 可建造性

通过打印的最大高度来评价可建造性。图 7 显示了不同白云岩石粉掺量下 3DPC 的堆叠打印状态。若将每层厚度变化不大，各层垂直堆叠良好，站立平稳，无明显变形、倾斜和塌陷定义为可建造性良好，则 0~7.5% 掺量白云岩石粉的 3DPC 具有良好的可建造性。0、2.5% 和 5% 白云岩石粉掺量下对应的最大打印层数为 55、60 和 56。7.5% 掺量时对应层数为 36，最大打印层数下降明显但仍能够堆叠打印到一定高度。当白云岩石粉掺量达到的 10% 时，此时 3DPC 无法承受自身的自重，在打印第一层时就发生较大的形变，宽度变宽，高度变低，使得后续打印头与 3DPC 的垂直距离越来越大，打印条带易偏离预期轨道，因此 10% 掺量的白云岩石粉不适宜用于 3D 打印。

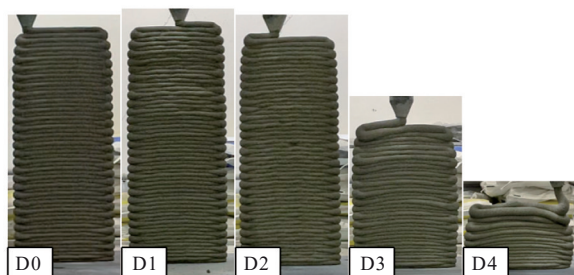


图 7 3DPC 的堆叠打印

Fig. 7 Stacked printings of 3DPC

2.5 层间黏结强度

3DPC 的层间黏结强度以 28 d 龄期试样的单轴拉伸作为其评测方法,破坏面如图 8 所示。结果如表 5 所示,当白云岩石粉掺量为 5% 时,层间黏结强度达到最大值,相比对照组 (2.64 MPa) 提高了 5.7%,但继续加大掺量会降低 3DPC 的层间黏结强度。在相同养护龄期与测试方法的条件下,张宇等^[24]制备试块的层间黏结强度平均值为 2.36 MPa,而赵雅萌等^[25]的则为 1.8 MPa,各组的层间黏结强度均可达到相关研究的要求,这表明掺入白云岩石粉的 3DPC 仍拥有良好的抵抗层间拉伸破坏的能力。

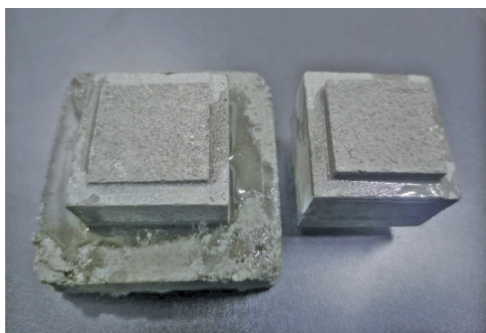


图 8 层间粘结强度试样的破坏面

Fig. 8 Failure interfaces of interlayer bonding strength specimens

表 5 3DPC 的层间黏结强度

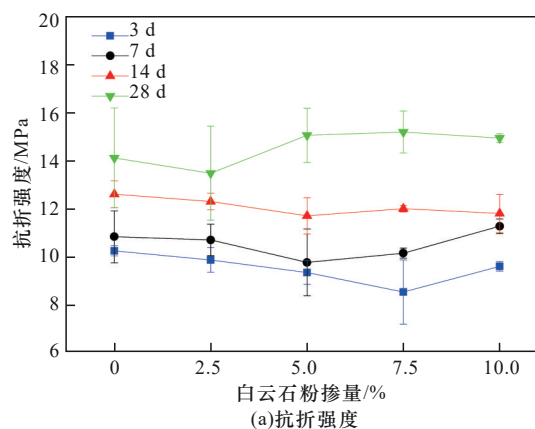
Table 5 Interlayer bond strengths of 3DPC specimens

组别	D0	D1	D2	D3	D4
层间黏结强度/MPa	2.64	2.42	2.79	2.59	2.30

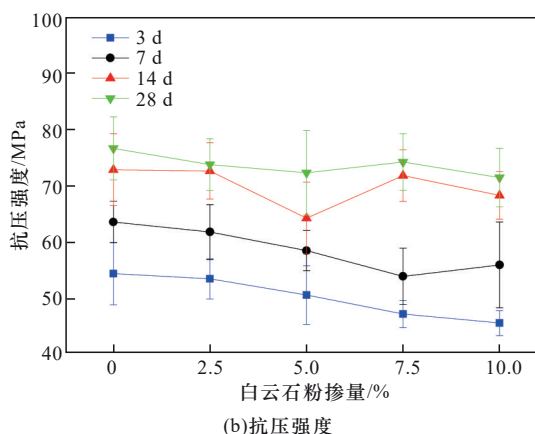
2.6 抗折强度和抗压强度

图 9 显示了白云岩石粉掺量对不同龄期 3DPC 抗折强度和抗压强度的影响。由图可知,3DPC 的抗折强度和抗压强度均会随着龄期的增加而增加,并且 3 d 龄期的抗折强度和抗压强度就已达到 28 d 的 70% 左右。在 3 d 和 7 d 龄期时,0~7.5% 白云岩石粉掺量下 3DPC 的抗折强度和抗压强度随白云岩石粉含量的增加而降低,这是因为白云岩石粉是惰性材料,反应程度低,且掺入会降低水泥的含量从而导致早期,进而导致强度降低。当掺量达到 10%

左右时,抗折强度和抗压强度有增加的趋势,这是因为白云岩石粉在 3DPC 内部逐渐发挥了作用,发生了去白云石化反应,白云岩石粉与水泥的反应活性增强^[26]。吴伟鸿等^[27]发现掺入 10% 的粉煤灰、矿粉或硅灰制备的 28 d 3DPC 试块的抗压强度在 32~48.8 MPa 范围内。朱伶俐等^[28]掺入 40% 的钢渣和矿渣制作出了 28 d 抗压强度分别为 44.22 MPa 和 27.43 MPa 的 3DPC。相比之下,本实验中 10% 掺量白云岩石粉的 3DPC 28 d 抗压强度可达 71.49 MPa,明显高于其他种类固废 3DPC 力学性能的研究。



(a) 抗折强度



(b) 抗压强度

图 9 白云岩石粉掺量对 3DPC 抗折强度和抗压强度的影响

Fig. 9 Effects of dolomite powder content on flexural strength and compressive strength of 3DPC

3 微结构分析

使用 Phenom XL 扫描电子显微镜 (SEM) 对 3DPC 3 d 和 28 d 样品进行微观形貌观察。从图 10 可以观察到,3DPC 主要的水化产物包括无定型胶体状的 CSH 凝胶,板状的氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 和针棒状的钙矾石 (AFt)。并且能很明显地观察到,随着龄期的发展,钙矾石变得密集,氢氧化钙也越来越厚。

随着白云岩石粉的掺量的增加,水化产物的类

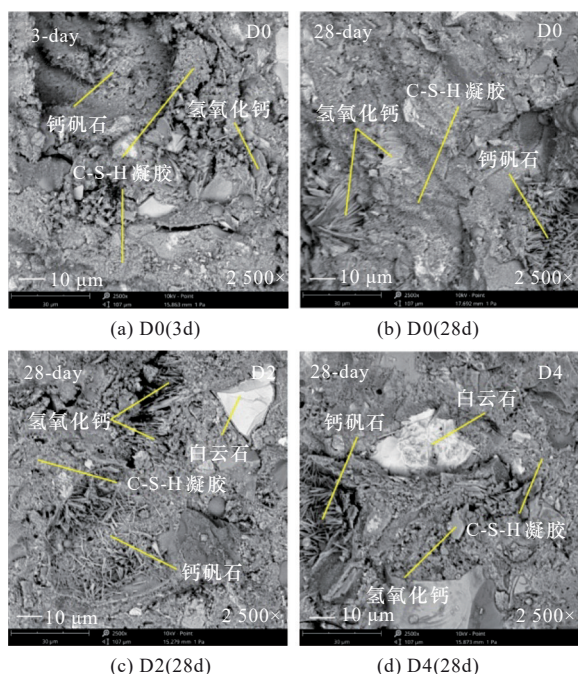


图 10 3DPC 的 SEM 像

Fig.10 SEM images of 3DPC

型没有发生明显的变化,但是在白云岩石粉颗粒附近的水化产物,例如钙矾石,明显变得有些稀疏,这表明白云岩石粉有着倾向于阻碍和限制水化产物生长的趋势,这是因为白云岩石粉的掺入提高了 3DPC 的致密性^[29],压缩了水化产物的生长空间。

掺有白云岩石粉的 3DPC 样品在 SEM 图像中还可以看到存在一些不属于 CSH 凝胶,氢氧化钙和钙矾石的产物,如图 11(a)。根据 EDS 分析(图 11(b)和(c)),正方形产物(点 1)主要含有 Mg 和 O 元素,六边形产物(点 2)富含 Ca 和 O,结合之前对水镁石和方解石形态的研究^[30-31],可以判断出正方形和六边形产物分别为水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$)和方解石(CaCO_3),这表明含有白云岩石粉的 3DPC 在养护过程中发生了去白云石化反应。

4 环境影响评估

建筑环境对全球变暖影响受到人们的广泛关注,混凝土作为一种最重要的建筑材料,其环境影响评估极为复杂。其中一种方法是通过统计和监测企业或个人直接产生的碳排放($\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$)和能耗($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$),这种方法计算容易,来源可靠,但是不够全面。针对这一现状,一些研究人员提出生命周期评估(LCA)的方法去计算混凝土的碳排放和能耗,通过分析原材料提取、运输到现场、施工过程等过程中的所有主要排放或消耗去计算整个生命周期的碳排放和能耗。混凝土中原材料产生的环境影

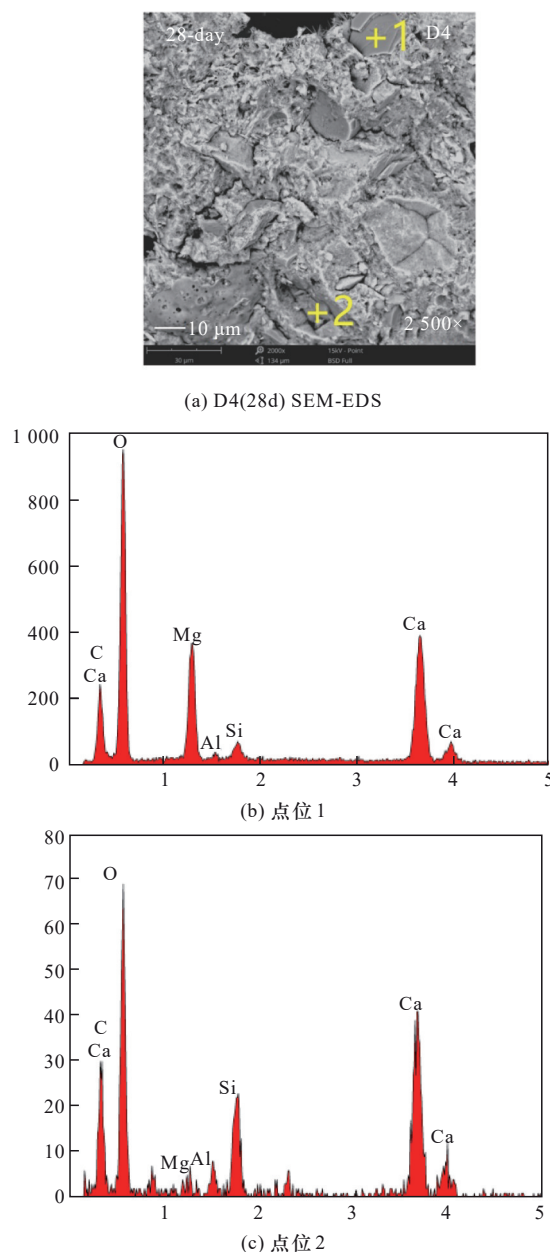


图 11 3DPC 的 EDS 元素分析

Fig.11 Elemental component analyses of 3DPC

响,即每种原材料产生的碳排放和能耗,可通过将每单位原材料的潜在碳排放和能耗与每种原材料在每吨混凝土中的质量相乘得出,计算公式见式(1)和式(2)。

$$CE = ac \quad (1)$$

$$EC = ae \quad (2)$$

式中:CE为碳排放,EC为能耗, α 为材料在混凝土中质量的百分数,c为潜在碳排放,e为潜在能耗。

表 6 显示了从最新研究中获得的混凝土材料的潜在能耗和碳排放^[32-33]。因为外加剂掺量不足 3DPC 重量的 1%,以及硅灰的碳排放远远小于水泥^[34],对混凝土的碳排放影响不大,在当前的分析

中忽略不计。

表 6 各成分单位潜在能耗和碳排放明细表		
Table 6 Unit potential energy consumption and carbon emission of each ingredient		
成分	能耗/(MJ·t ⁻¹)	碳排放/(kg·t ⁻¹)
普通硅酸盐水泥	4 730	830
石英砂	22	1
白云岩石粉	69	29
水	10	0

如表 7 所示,未掺白云岩石粉的 3DPC 具有最高的能耗和碳排放,其能耗和碳排放分别为 2 339.41 MJ·t⁻¹和 409.25 kg·t⁻¹。3DPC 的能耗和碳排放会随着白云岩石粉掺量的增加呈现出下降趋势,最大可下降 9.8%和 9.6%。因此,使用白云岩石粉作为水泥的替代品可以明显降低 3DPC 的能耗和碳排放,从而实现良好的环境效益,并减少不可再生资源的消耗。

5 结论

本研究探讨了白云岩石粉对 3DPC 流动性、开放时间、可挤出性、可建造性、层间黏结强度、抗压

表 7 3DPC 的能耗和碳排放					
Table 7 Energy consumption and carbon emission data of 3DPC specimens					
环境影响	D0	D1	D2	D3	D4
能耗/(MJ·t ⁻¹)	2 339	2 282	2 225	2 167	2 110
碳排放/(kg·t ⁻¹)	409.1	399.4	389.5	379.7	369.8

强度、抗压强度、微结构以及环境的影响,根据这项研究的结果,可以得出以下结论:

- 1)白云岩石粉的掺入会导致 3DPC 中的游离水量增加,使得 3DPC 的流动性提高,开放时间延长。
- 2)适当掺量的白云岩石粉有利于 3DPC 的可建造性和层间黏结强度,2.5%掺量白云岩石粉 3DPC 的可建造性最佳,5%掺量白云岩石粉 3DPC 的层间黏结强度最大。
- 3)3DPC 的抗折强度和抗压强度随着白云岩石粉掺量的增加呈现出先下降再升高的趋势,但整体波动并不显著,10%掺量的白云岩石粉 3DPC 的抗压强度仍可达到 71.49 MPa。
- 4)白云岩石粉的掺入可降低 3DPC 的能耗和碳排放,这表明白云岩石粉有应用到绿色混凝土中的潜力。

参考文献:

[1] PENG C H. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 453-465.

[2] BERMAN B. 3-D printing: The new industrial revolution[J]. Business Horizons, 2012, 55(2): 155-162.

[3] WANGLER T P, ROUSSEL N, BOS F P, et al. Digital concrete: A review[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105780.

[4] ZHANG X, XUE X L, DING D X, et al. Feasibility of uranium tailings for cemented backfill and its environmental effects[J]. Science of the Total Environment, 2023, 863: 160863.

[5] KECHAGIA P, KOUTROUMPI D, BARTZAS G, et al. Waste marble dust and recycled glass valorization in the production of ternary blended cements[J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 143224.

[6] 蒋林华, 张炎, 李辰治, 等. 石灰石粉水泥基材料的研究与应用进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2018, 46(1): 83-89.

JIANG L H, ZHANG Y, LI C Z, et al. Review on the research and application of cement-based materials with limestone powder [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2018, 46(1): 83-89.

[7] JUENGER M C G, BERNAL S A, SNEELLINGS R. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights[J]. Cement Concrete Research, 2019, 122: 257-273.

[8] 贾丽莉, 高育欣, 赵日照, 等. 白云石制备矿物掺和料及对混凝土性能的影响[J]. 施工技术, 2015(3): 61-65.

JIA L L, GAO Y X, ZHAO R X, et al. Preparation of concrete admixtures with dolomite rock debris and its influence on concrete properties[J]. Construction Technology, 2015(3): 61-65.

[9] XU J T, CHEN J W, LU, DUYOU, et al. Effect of dolomite powder on the hydration and properties of calcium sulfoaluminate cements with different gypsum contents[J]. Construction and Building Materials, 2019, 225: 302-310.

[10] NGUYEN H A, CHANG C P, SHIH J Y, et al. Enhancement of low-cement self-compacting concrete with dolomite powder [J]. Construction and Building Materials, 2018, 161: 539-546.

[11] LIN W Q, ZHOU F Y, LUO W J, et al. Recycling the waste dolomite powder with excellent consolidation properties: Sample synthesis, mechanical evaluation, and consolidation mechanism analysis[J]. Construction and Building Materials, 2021, 290: 123198.

[12] 田志宗, 陈登, 张艳, 等. 白云石粉细度对白云石粉-水泥水化性能的影响[J]. 非金属矿, 2021, 44(5): 11-14.

TIAN Z Z, CHEN D, ZHANG Y, et al. Effect of dolomite powder fineness on hydration properties of dolomite-cement[J].

- Non-Metallic Mines, 2021, 44(5): 11-14.
- [13] RAHUL A V, SANTHANAM M, MEENA H, et al. 3D printable concrete: Mixture design and test methods[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97: 13-23.
- [14] BUSWELL R A, LEAL D S W R, JONES S Z, et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 112: 37-49.
- [15] LE T T, AUSTIN S A, LIM S, et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete[J]. Materials and structures, 2012, 8(45): 1221-1232.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 水泥胶砂流动度测定方法: GB/T 2419-2005[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [17] 中国工程建设标准化协会标准. 混凝土 3D 打印技术规程: TCECS 786-2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
- [18] 中国建筑材料科学研究总院有限公司. 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- [19] HU H B, YAO W, WEI Y Q. Recycling waste dolomite powder in cement paste: Early hydration process, microscale characteristics, and life-cycle assessment[J]. Science of the Total Environment, 2023, 902: 166008.
- [20] 龙广成, 王新友, 肖瑞敏. 矿物掺合料对 C3S 胶凝体系的填充密实效应研究[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(3): 215-219.
- LONG G C, WANG X Y, XIAO R M. Research of filling role of mineral blends in C3S cementitious system[J]. Journal of Building Materials, 2002, 5(3): 215-219.
- [21] MA G W, LI Z J, WANG L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. Construction and Building Materials, 2018, 162: 613-627.
- [22] ZOU M T, LIU C B, ZHANG K Y, et al. Evaluation and control of printability and rheological properties of 3D-printed rubberized concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80: 107988.
- [23] YIN Y C, HUANG J, WANG T Z, et al. Effect of hydroxypropyl methyl cellulose (HPMC) on rheology and printability of the first printed layer of cement activated slag-based 3D printing concrete[J]. Construction and Building Materials, 2023, 405: 133347.
- [24] 张宇. 3D 打印水泥基材料的设计、制备与性能研究[D]. 南京: 东南大学.
- [25] 赵雅萌. 基于 3D 打印的超高性能混凝土制备及性能研究[D]. 济南: 山东建筑大学.
- [26] 张少华, 卢都友, 徐江涛, 等. 白云石和石灰石微粉对水泥砂浆强度和水化产物的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(8): 60-65, 25.
- ZHANG S H, LU D Y, XU J T, et al. Effects of dolomite and limestone powders on strength and hydration of cement mortars[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(8): 60-65, 25.
- [27] 吴伟鸿, 罗素蓉, 欧翔, 等. 矿物掺合料对 3D 打印水泥基材料力学各向异性的影响[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2023, 51(2): 286-292.
- WU W H, LUO S R, OU X, et al. Effect of mineral admixtures on mechanical anisotropy of 3D printed cement-based materials[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2023, 51(2): 286-292.
- [28] 朱伶俐, 杨章, 赵宇, 等. 钢渣-矿渣复合水泥基材料 3D 打印性能[J]. 材料导报, 2023, 37(12): 107-112.
- ZHU L L, YANG Z, ZHAO Y, et al. 3D printing performance of composite cement-based materials with blast furnace slag and steel slag[J]. Materials Reports, 2023, 37(12): 107-112.
- [29] CHEN X, CHEN H M, CHEN Q, et al. Effect of partial substitution of cement with dolomite powder on glass-fiber-reinforced mortar[J]. Construction and Building Materials, 2022, 344: 128201.
- [30] MIN D, GUANG Q, XIANG L, et al. Dedolomitization and its mechanism of dolomite in concrete[J]. Journal of Nanjing University, 2002, (04): 1-8.
- [31] MO C, ZHANG G, TANG Y, et al. Molecular simulation study of liquid sulfur adsorption and diffusion in calcite nanoscale slits under varying temperature and pressure conditions[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2023, 676: 132193.
- [32] MÜLLER H S, HAIST M, VOGEL M. Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime[J]. Construction and Building Materials, 2014, 67: 321-337.
- [33] LONG G C, GAO Y, XIE Y J. Designing more sustainable and greener self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 84: 301-306.
- [34] FLOWER D J M, SANJAYAN J G. Greenhouse gas emissions due to concrete manufacture[J]. Life Cycle Assessment, 2017, 12: 282-288.