

DOI:10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.04.007

文章编号:1672-9331(2022)04-0064-11

引用格式:王里,林文宇,姜海龙.3D打印风积沙混凝土抗碳化性能试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(4):64-74.

Citation: WANG Li, LIN Wenyu, JIANG Hailong. Experimental study on carbonation resistance of 3D printed concrete with aeolian sand[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(4): 64-74.

# 3D打印风积沙混凝土抗碳化性能试验研究

王里<sup>1,2</sup>, 林文宇<sup>1</sup>, 姜海龙<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学 土木与交通学院, 天津 300401; 2. 建筑3D打印河北省工程研究中心, 天津 300401)

**摘要:**【目的】进一步明晰3D打印风积沙混凝土的抗碳化性能。【方法】制备3D打印风积沙混凝土试件(以下简称3D打印试件),研究沙胶比对3D打印试件碳化深度的影响,并引入碳化各向异性系数来评估3D打印工艺对混凝土碳化行为的影响;测试分析碳化后3D打印试件的抗压、抗折性能,并基于沙胶比在 $x$ 、 $y$ 、 $z$  3个方向建立3D打印风积沙混凝土碳化深度预测模型。【结果】3D打印试件的碳化深度随碳化龄期和沙胶比的增加而增加,并且碳化深度和碳化后的力学性能均表现出明显的各向异性;在碳化28 d后,与打印基体相比,3D打印试件的打印条间、打印层间的碳化深度分别增加了24%和10%。【结论】碳化作用在一定程度上减弱了3D打印试件抗压强度和抗折强度的各向异性。

**关键词:**混凝土3D打印;抗碳化性能;层间界面;各向异性

**中图分类号:** TU528

**文献标志码:** A

## 0 引言

自建筑3D打印技术问世以来,其应用领域随着材料、工艺和软件的发展而迅速扩大,并逐步由建筑景观向承载结构转变<sup>[1-2]</sup>。为了改善3D打印混凝土抗拉、抗剪等性能,国内外学者尝试了一系列加筋增韧方法,主要有定向钢纤维、钢筋网格、U型钉、外部钢筋加固、连续纤维筋和3D打印类钢筋材料增韧方法等,这些方法均达到了预期的增强和增韧效果<sup>[3-6]</sup>。

然而,3D打印混凝土固有的分层属性不可避免地要在3D打印混凝土中引入了薄弱黏结面,其主要表现为不连续分布的空隙<sup>[7-9]</sup>。结构在长期的服役过程中, $\text{CO}_2$ 通过表面较大的孔隙、层间界面微裂隙扩散到内部混凝土中,然后与混凝土内部的碱性物质发生化学反应,从而降低了内部混凝土

的碱性,使3D打印混凝土的抗碳化性能受到了较大的影响<sup>[10]</sup>。3D打印结构在长期的服役过程中,金属增韧材料面临着混凝土碳化导致的锈蚀破坏问题。当混凝土内部pH低于11.5时,混凝土中的钢筋不再受周围高碱度环境的保护,钢筋表面的钝化膜处于不稳定状态,钢筋易发生锈蚀破坏,从而使打印结构的力学承载能力和耐久性能受到影响<sup>[11]</sup>。

目前,已有部分学者针对风积沙混凝土的抗碳化性能进行了研究,如吴俊臣等<sup>[12]</sup>研究发现,从整体上风积沙混凝土的抗碳化能力明显比普通混凝土的好,并且风积沙掺量为60%的混凝土的抗碳化能力明显比其他风积沙掺量的混凝土的好。而刘海峰等<sup>[13]</sup>的研究表明,当风积沙替换率为20%时混凝土的碳化深度最小。

现有研究多集中于常规浇筑的风积沙混凝土的抗碳化性能,而对3D打印风积沙混凝土抗碳化

收稿日期:2022-06-28;修回日期:2022-07-24;接受日期:2022-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178198);河北省自然科学基金优秀青年基金资助项目(E2021202039);天津市自然科学基金资助项目(20JCYBJC00710)

通信作者:王里(1988—)(ORCID:0000-0003-1286-4407),男,教授,主要从事建筑3D打印关键技术与创新应用方面的研究。E-mail:wangli1@hebut.edu.cn

性能的研究较少,其碳化劣化规律及影响机理尚待明晰。

本研究通过试验分析3D打印风积沙混凝土试件(以下简称为3D打印试件)的抗碳化性能,旨在阐明打印层间界面与打印条间界面对3D打印试件碳化行为的影响规律,为3D打印混凝土耐久性规范的建立提供试验数据和参考。

## 1 材料和试验

### 1.1 原材料及配合比

3D打印风积沙混凝土的胶凝材料由P·O 42.5级普通硅酸盐水泥(质量分数为88%)、硅灰(质量分数为4%)和粉煤灰(质量分数为8%)组成。细集料为来自内蒙古库布齐沙漠的风积沙,细度模数为0.7,含泥量为0.4%,表观密度为 $2\,630\text{ kg/cm}^3$ ,堆积密度为 $1\,400\text{ kg/cm}^3$ 。本研究共设置了4组沙胶比,分别为1.25、1.50、1.70、1.90,其对应的3D打印试件分别用M1、M2、M3、M4表示。外加剂和纤维的掺量按胶凝材料的质量百分比添加,分别为减水剂1.50%、纤维素醚0.15%、消泡剂0.20%、聚丙烯纤维0.20%。

3D打印试件如图1所示。打印喷头直径为15 mm,打印速度为5 cm/s,层高为6 mm。每组试件的打印尺寸均为 $460\text{ mm} \times 560\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ ,在标准养护28 d后将其切割成 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的棱柱体试件以备后续测试。

### 1.2 测试方法

1) 碳化试验:鉴于目前尚没有3D打印混凝土材料耐久性方面的测试规范,本研究参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GB/T

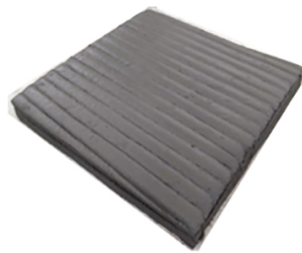


图1 3D打印试件

Fig.1 The 3D printed specimen

50082—2009)中的规定进行试验。采用尺寸为 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的棱柱体试件进行碳化试验,在试验时用石蜡将试件的5个面封住,只留1个碳化侵蚀面。在试件达到3、7、14和28 d的碳化龄期时,沿图2所示的测试截面将试件劈裂,分别测量不同碳化龄期时的碳化深度。其中,沿 $x$ 方向分别在试件碳化侵蚀面1/5、2/5、3/5、4/5处取一个碳化深度测试截面;沿 $y$ 、 $z$ 方向均在试件碳化侵蚀面1/2处取一个碳化深度测试截面。

2) 力学性能试验:在试件达到3、7、14和28 d的碳化龄期时,分别测量不同碳化龄期时的抗折强度及抗压强度。抗折试验的试件尺寸为 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ ,抗压试验的试件尺寸为 $45\text{ mm} \times 45\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 。在进行力学性能测试时,分别在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向进行加载,抗折试验的加载速度为50 N/s,抗压试验的加载速度为2 400 N/s。

## 2 结果与分析

### 2.1 沙胶比对碳化深度的影响

碳化深度随碳化龄期的变化过程如图3所示。由图3可以看出,碳化深度随碳化龄期和沙胶比的增加而增加。试件的碳化过程可分为三个阶段:

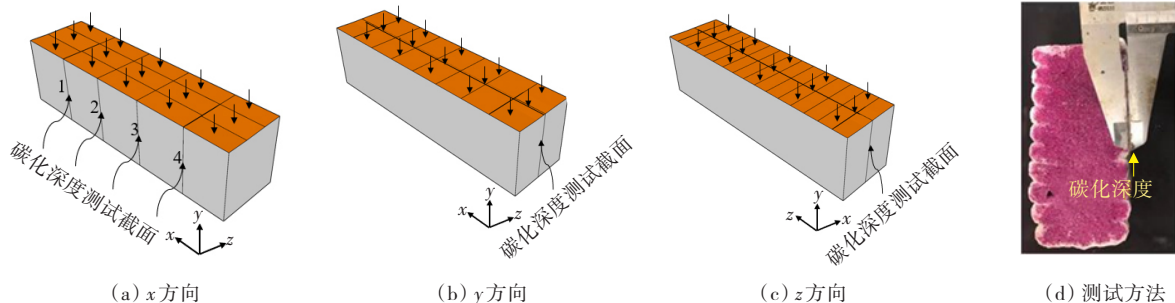


图2 碳化深度测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of carbonization depth test

第一阶段(3~7 d),碳化深度随时间增长缓慢,3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向和浇筑试件7 d时的平均碳化深度比3 d时的分别增加了30.8%、28.3%、29.5%和25.1%;第二阶段(7~14 d),碳化深度随时间的增加而迅速发展,3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向和浇筑试件14 d时的平均碳化深度比7 d时的分别增加了96.3%、128.6%、88.9%和98.5%;第三阶段(14~28 d),碳化深度随时间的增加而趋于平缓,3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向和浇筑试件28 d时的平均碳化深度比14 d时的分别增加了13.5%、12.7%、23.5%和16.1%。

以 $y$ 方向为例,相比于3 d时的碳化深度,3D打印试件在碳化28 d后,M1、M2、M3、M4的碳化深度分别增加了241.3%、171.5%、195.3%和167.6%。与M1相比,M2、M3、M4在 $y$ 方向上的碳化深度分别增加了6.1%、15.4%和21.9%,在 $x$ 、 $z$ 方向及浇筑试件上也出现了相似的规律,这主要是由于风积沙表面圆滑、比表面积大。沙胶比越大,混凝土内部的孔隙就越多,这样外界的 $\text{CO}_2$ 就能更顺利地进

入混凝土内部,并最终降低了3D打印试件的抗碳化能力<sup>[14-15]</sup>。在碳化14 d后,碳化深度增加速度减缓,这是由于3D打印试件在碳化过程中,外界的 $\text{CO}_2$ 经由打印层间缺陷及内部孔隙结构扩散到了混凝土内部,并与水泥胶体中的碱性物质发生了一系列复杂的物理化学反应,生成了 $\text{CaCO}_3$ 。随着碳化过程的进行, $\text{CaCO}_3$ 越来越多,这使得混凝土整体密实度有所增大,从而减缓了碳化的侵蚀速度<sup>[16-17]</sup>。

3D打印风积沙混凝土在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的碳化深度有所不同,并呈现出 $d_z > d_y > d_x$  ( $d_x$ 、 $d_y$ 、 $d_z$ 分别表示 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的碳化深度)的规律。这是由于3D打印试件采用的是分层叠加的成型方式,这种成型方式在3D打印试件的成型过程中会在打印条间与层间引入界面黏结缺陷,这使得孔隙在黏结界面处较密集,并形成层间弱面与条间弱面。因此,层间与条间弱面数量及弱面存在形式的不同使得沿 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的碳化深度有所不同。其中,沿 $x$ 方向的碳化侵蚀面有2条长200 mm的打印条间

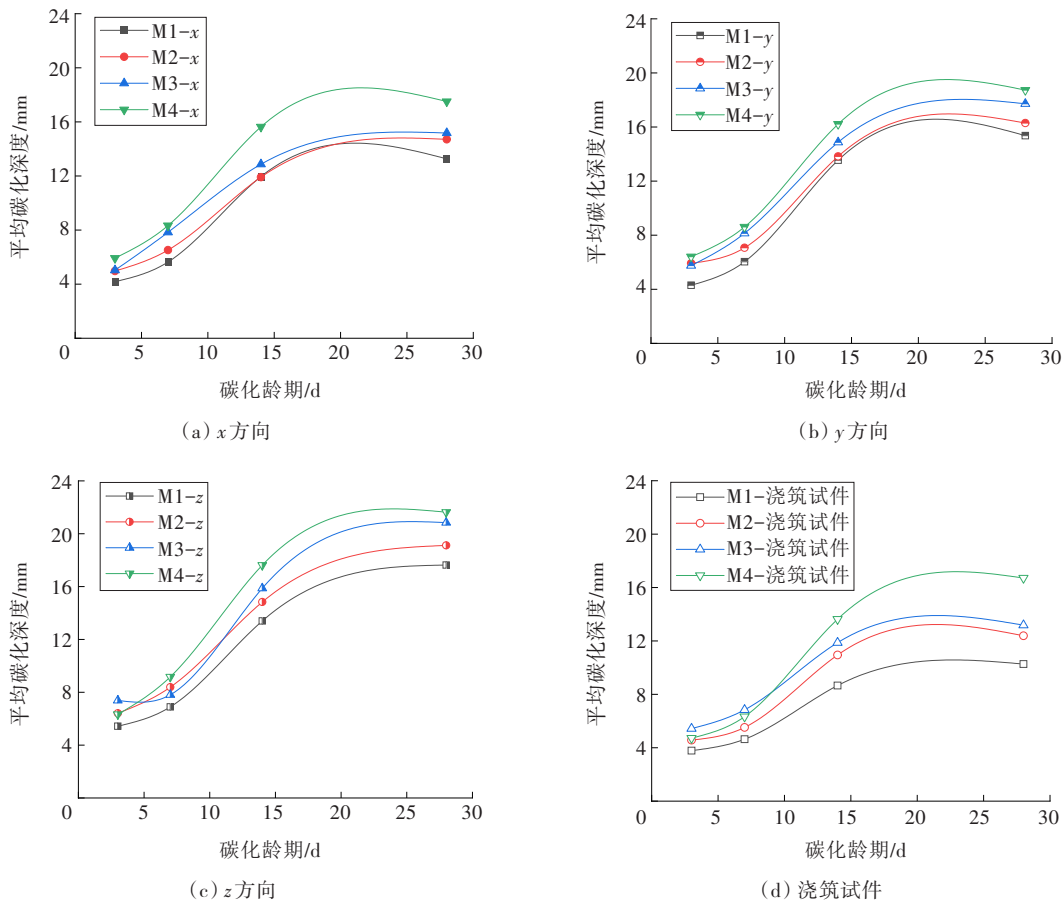


图3 碳化深度随碳化龄期的变化过程

Fig. 3 The change of carbonization depth with carbonization age

带;沿 $y$ 方向的碳化侵蚀面有13条长45 mm的打印条间带;沿 $z$ 方向的碳化侵蚀面有33条长45 mm的打印层间带。

为了进一步明确在不同碳化龄期和沙胶比情况下,3D打印试件以及浇筑试件的碳化规律,本研究采用比值法进行对比分析,结果如图4所示。由图4可以看出,在碳化28 d时,各组3D打印试件

的碳化深度整体上呈现出 $d_z > d_y > d_x > d_c$  ( $d_c$ 表示浇筑试件的碳化深度)的规律。以M1为例,在碳化28 d后3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向及浇筑试件的平均碳化深度分别为13.27、15.36、17.63和10.27 mm。与浇筑试件相比,3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的碳化深度分别加深了29.2%、49.6%和71.7%,并表现出明显的碳化各向异性。

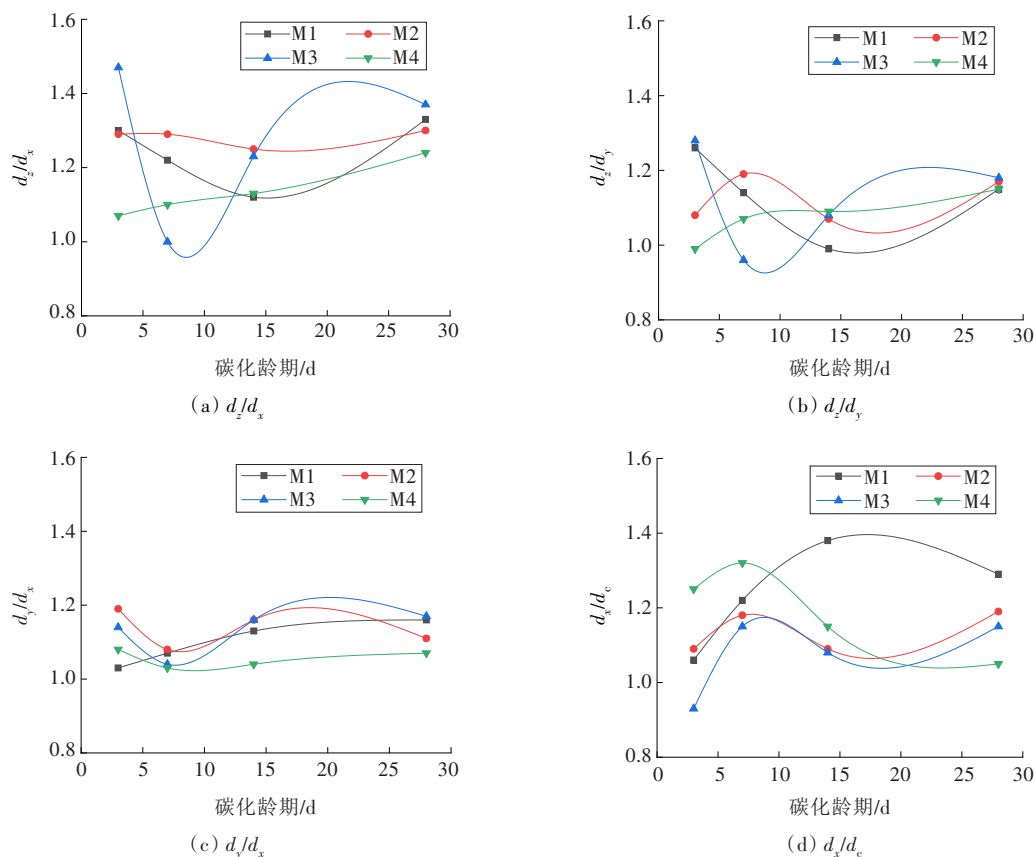


图4 碳化深度的比值随碳化龄期的变化过程

Fig. 4 The change of ratio of carbonization depth with carbonization age

## 2.2 打印界面对碳化深度的影响

图5所示为3D打印试件不同界面处、基体以及浇筑试件的碳化深度。由图5可以看出,各组3D打印试件的碳化深度呈现出 $d_{\text{条}} > d_{\text{层}} > d_{\text{基}}$  ( $d_{\text{条}}$ 、 $d_{\text{层}}$ 、 $d_{\text{基}}$ 分别表示打印条间、打印层间及基体的碳化深度)的规律。以M4为例,3D打印试件的基体区域在3、7、14和28 d的碳化深度分别为4.48、6.81、13.31和16.92 mm;与基体区域相比,在碳化龄期为3、7、14和28 d时,打印条间的碳化深度分别增加了46.0%、41.1%、32.7%和24.5%,打印层间的碳化深度分别增加了29.7%、7.3%、12.8%和11.0%。因此,相比之下,打印条间缺陷使得3D打印试件更容易被碳化。

## 2.3 碳化对抗压强度的影响

抗压强度随碳化龄期的变化过程如图6所示。由图6可以看出,不同沙胶比的3D打印试件的抗压强度均随碳化龄期的增长而有所提升,尤以碳化龄期为14 d时提升最为显著。以 $y$ 方向的抗压强度为例,与未碳化时相比,碳化14 d后M1~M4的抗压强度分别增加了9.97%、11.59%、9.42%和9.83%。碳化后不同沙胶比情况下的3D打印试件的抗压强度呈现出 $f_{cy} > f_{cx} > f_{cz} > f_{cc}$  ( $f_{cc}$ 、 $f_{cx}$ 、 $f_{cy}$ 、 $f_{cz}$ 分别为浇筑试件及3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的抗压强度)的规律。同时,沙胶比为1.70的3D打印试件(M3)的抗压性能最优。

碳化后3D打印试件的强度有所提升,主要是



因为:一方面,3D打印试件处于 $\text{CO}_2$ 的体积分数为 $(20 \pm 3)\%$ 、相对湿度为 $(70 \pm 5)\%$ 、温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的环境中,充足的水分、适宜的温度和湿度使得混凝土得到了更充分的水化,水化产物填充了混凝土内部孔隙,这使得基体更加密实,从而提升了基体的抗压强度<sup>[18]</sup>;另一方面,3D打印试件内部的C-S-H凝胶和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CO}_2$ 发生化学反应,产生了大量的 $\text{CaCO}_3$ ,并填充于打印层间与打印条间的缺陷部位,改善了孔隙结构,优化了打印界面结构,进而提高了混凝土试件的抗压强度<sup>[19-20]</sup>。

#### 2.4 碳化对抗折强度的影响

抗折强度随碳化龄期的变化过程如图7所示。从图7可以看出,3D打印试件的抗折强度随碳化龄期的增长而提高,并在碳化龄期为14 d时提升得最为显著。与抗压强度不同的是,碳化后各组3D打印试件的抗折强度比浇筑试件的低,整体上呈现出 $f_{tc} > f_{ty} > f_{tx} > f_{tz}$  ( $f_{tc}$ 、 $f_{tx}$ 、 $f_{ty}$ 、 $f_{tz}$ 分别为浇筑试件及3D打印试件 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向的抗折强度)的规律。以 $y$ 方向为例,与未碳化时相比,碳化14 d后M1、M2、

M3、M4的抗折强度分别增大了11.49%、13.10%、11.21%和8.48%。与抗压强度试验结果类似,沙胶比为1.70的3D打印试件(M3)的抗折性能最优。

### 3 讨论

#### 3.1 碳化深度的各向异性

本研究通过引入各向异性系数 $C_a$ 来表征3D打印材料碳化深度的各向异性, $C_a$ 的计算公式为:

$$C_a = \sqrt{(d_x - d_{\text{avg}})^2 + (d_y - d_{\text{avg}})^2 + (d_z - d_{\text{avg}})^2} / d_c \quad (1)$$

$$d_{\text{avg}} = (d_x + d_y + d_z) / 3 \quad (2)$$

式中: $d_{\text{avg}}$ 为 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向的平均碳化深度。

对于各向同性材料,各向异性系数 $C_a=0$ ,即 $C_a$ 越小,材料碳化深度的各向差异性越小。M1~M4的碳化深度各向异性系数见表1。由表1可以看出,各试件碳化深度各向异性系数 $C_a$ 随着碳化龄期的增长而增大。碳化龄期从7 d到14 d,M1、

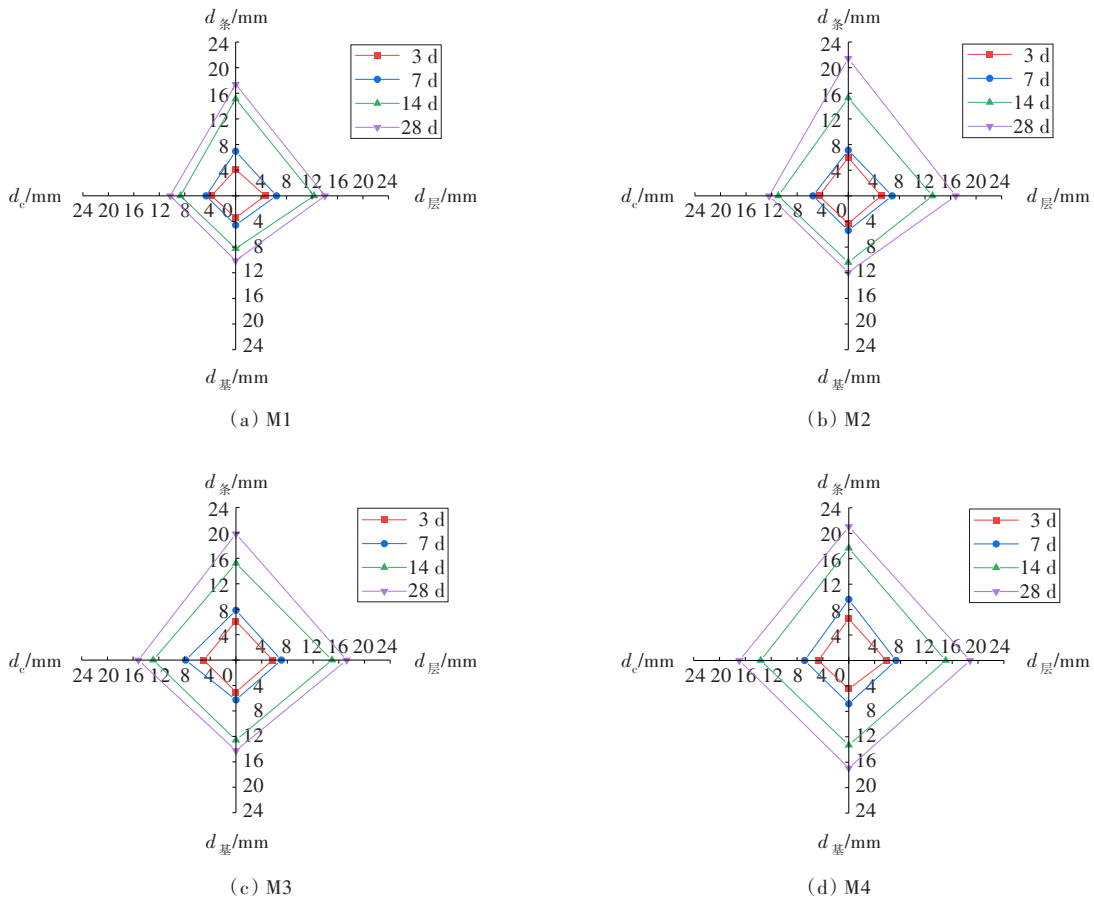


图5 3D打印试件不同界面处、基体以及浇筑试件的碳化深度

Fig.5 Carbonation depth of 3D printed specimens in different interfaces (layers, strips, matrix) and cast specimens

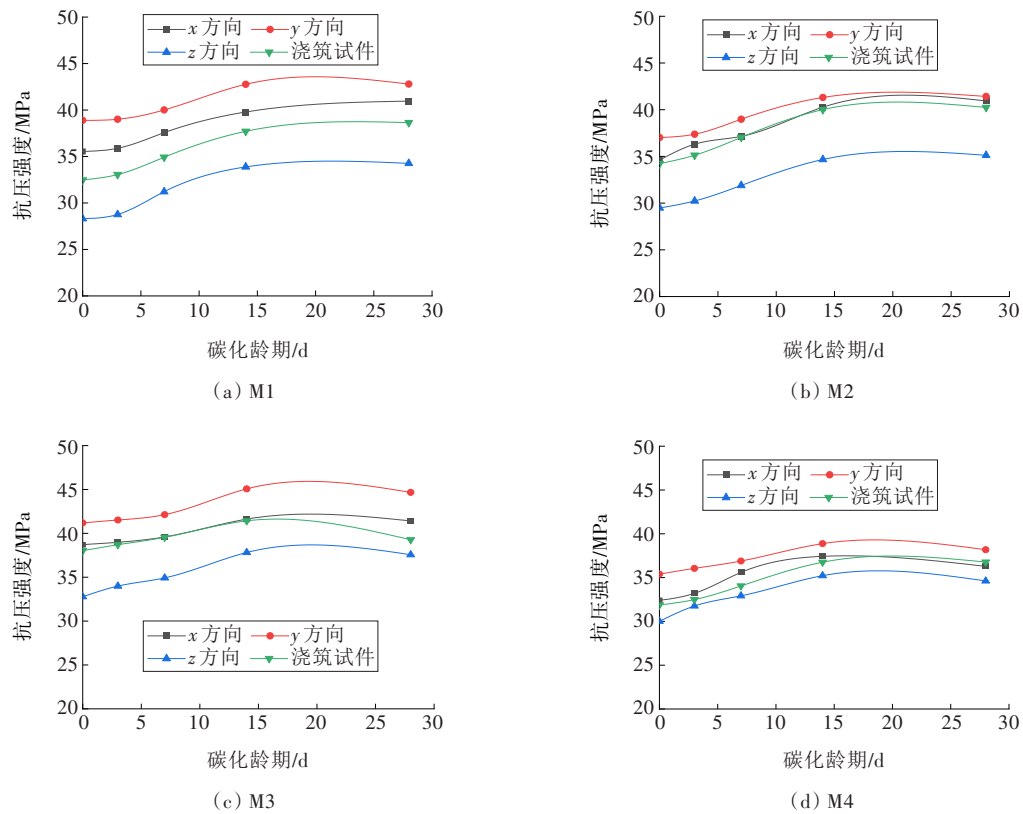


图6 抗压强度随碳化龄期的变化过程

Fig.6 The change of compressive strength as a function of carbonization age

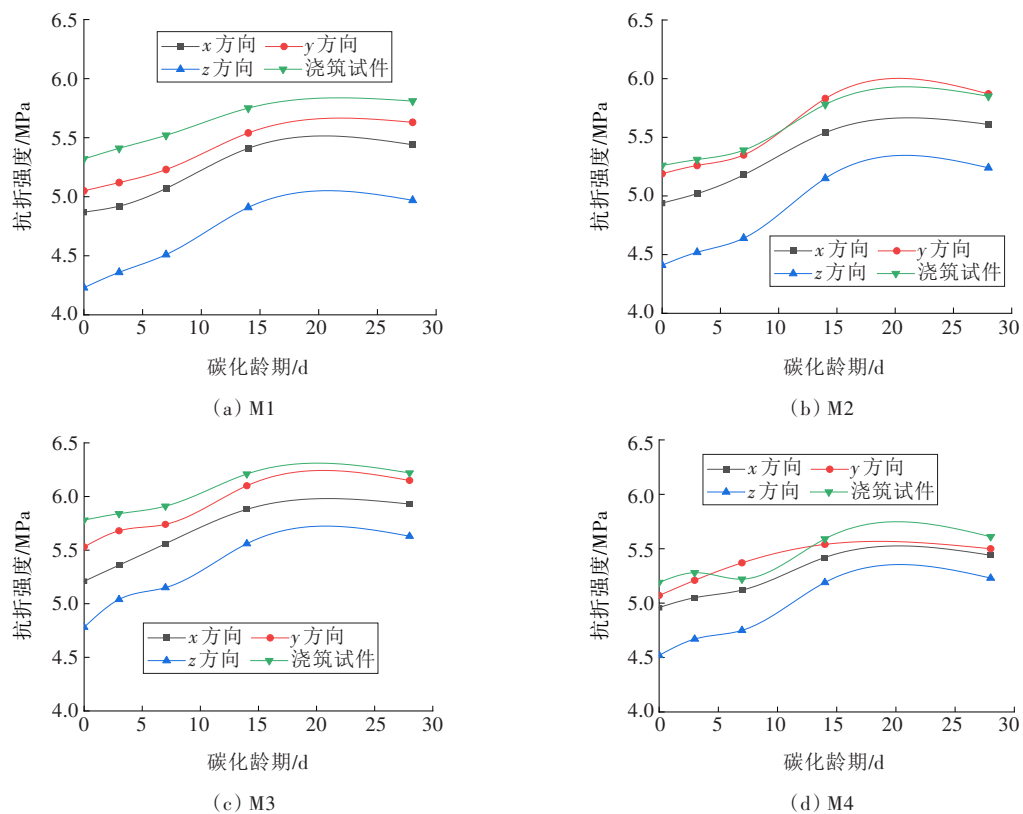


图7 抗折强度随碳化龄期的变化过程

Fig.7 The change of flexural strength as a function of carbonization age

M2、M3、M4的碳化深度的各向异性系数分别提高了9.52%、4.35%、72.73%和30.00%。

表1 各试件不同碳化龄期碳化深度的各向异性系数  
Table 1 Anisotropy coefficient of carbonization depth of each specimen with different carbonization age

试件	3 d	7 d	14 d	28 d
M1	0.20	0.21	0.23	0.24
M2	0.21	0.23	0.24	0.26
M3	0.09	0.11	0.19	0.31
M4	0.08	0.10	0.13	0.18

图8为碳化深度各向异性系数的拟合曲线。由图8可知,3D打印试件碳化深度的各向异性系数与碳化龄期之间呈线性关系。随着碳化过程的进行,3D打印试件在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的抗碳化性能的差异越来越明显,这主要是由于3D打印试件从 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 3个方向被侵蚀时,碳化侵蚀面上打印层间与打印条间的数量有所不同。而打印层间与打印条间存在一定数量不连续的裂缝及空隙等缺陷,这使得打印层间与打印条间的碳化深度比打印基体的深,且碳化侵蚀速率也比打印基体的大得多。随着碳化过程的进行,打印层间、打印条间与打印基体之间在碳化深度上的差异越来越大。因此,3D打印试件碳化深度的各向异性系数越来越大。

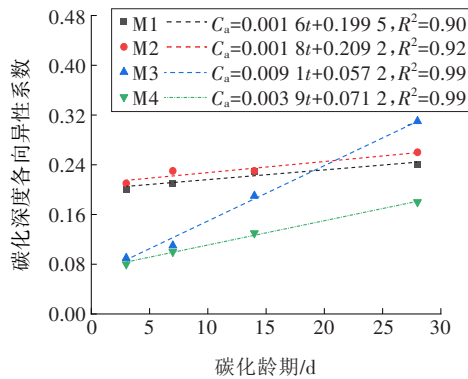


图8 碳化深度各向异性系数的拟合曲线

Fig. 8 Fitting curve of anisotropy coefficient of carbonization depth

表2 力学各向异性系数随碳化龄期的变化

Table 2 Variation of mechanics anisotropy coefficient with carbonization age

试件	抗压强度各向异性系数					抗折强度各向异性系数				
	0 d	3 d	7 d	14 d	28 d	0 d	3 d	7 d	14 d	28 d
M1	0.24	0.22	0.19	0.17	0.17	0.13	0.12	0.11	0.09	0.08
M2	0.18	0.16	0.14	0.13	0.12	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08
M3	0.16	0.14	0.13	0.12	0.13	0.10	0.10	0.09	0.07	0.04
M4	0.12	0.09	0.08	0.07	0.07	0.09	0.08	0.07	0.05	0.05

### 3.2 力学强度的各向异性

3D打印试件碳化后的抗压、抗折强度各向异性系数的计算结果见表2。碳化作用在一定程度上减弱了3D打印试件的力学各向异性。以M3为例,在碳化3、7、14和28 d后M3的抗压强度各向异性系数分别下降了12.5%、18.8%、25.0%和18.8%,M3的抗折强度各向异性系数分别下降了0.0%、10.0%、30.0%和60.0%。同时,碳化前和碳化后抗压和抗折各向异性系数均随着沙胶比的增大而逐渐减小。为进一步明确表征碳化后3D打印试件的力学各向异性,本研究对文献[7]中3D打印试件平均强度的计算公式修正如下:

$$f_{\text{avg}} = (f_x + f_y + f_z) / 3 \quad (3)$$

$$I_a = \sqrt{(f_x - f_{\text{avg}})^2 + (f_y - f_{\text{avg}})^2 + (f_z - f_{\text{avg}})^2} / f_c \quad (4)$$

式中: $f_{\text{avg}}$ 为3D打印试件在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向受力时,3D打印试件的平均强度,MPa; $f_x$ 、 $f_y$ 、 $f_z$ 分别为3D打印试件在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向受力时,这3个方向的强度,MPa; $f_c$ 为浇筑试件的强度,MPa; $I_a$ 为强度各向异性系数。

### 3.3 碳化性能的综合评估

图9所示为各向异性系数随碳化龄期的变化过程。

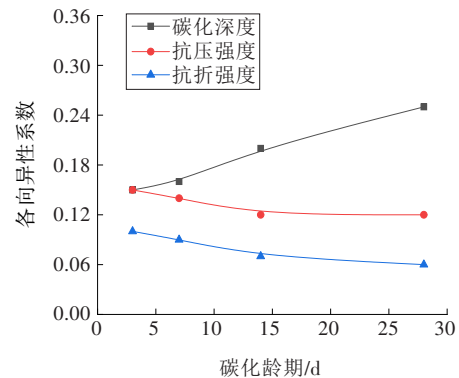


图9 各向异性系数随碳化龄期的变化过程

Fig. 9 Variation of anisotropy coefficient with carbonization age

由图9可以看出,3D打印试件碳化深度的各向异性系数随着碳化龄期的增长而增大,而抗压强度和抗折强度的各向异性系数则随着碳化龄期的增长而减小。由前文可知,3D打印试件固有的逐层堆叠成型过程和打印工艺的影响使得所制备的试件沿 $x$ 方向的碳化侵蚀面有2条长200 mm的打印条间带,沿 $y$ 方向的碳化侵蚀面有13条长45 mm的打印条间带,沿 $z$ 方向的碳化侵蚀面有33条长45 mm的打印层间带。相对于层间带,打印条间带更加狭长、贯通, $\text{CO}_2$ 气体更容易进入混凝土内部并使混凝土发生碳化。因此,3D打印试件呈现出 $d_{\text{条}} > d_{\text{层}} > d_{\text{基}}$ 的规律,碳化深度各向异性系数随碳化龄期的增长而不断增大。同时,在碳化过程中,一方面碳化环境使得混凝土材料水化得更加充分,基体更加密实;另一方面,碳化生成的 $\text{CaCO}_3$ 填充于打印层间与打印条间界面的缺陷部位,改善了打印界面的孔隙结构,弥补了打印缺陷造成的强度损失,减小了强度的各向异性,进而使

抗压强度和抗折强度各向异性系数随碳化龄期的增长而不断减小<sup>[21-22]</sup>。

### 3.4 碳化深度的预测

3D打印试件碳化深度与碳化龄期的拟合曲线如图10所示。碳化深度 $d$ 与暴露在碳化环境中的时间 $t$ 直接相关,再考虑单个或多个影响系数,可得到碳化深度 $d$ 的表达式为:

$$d = k \times \sqrt{t} \quad (5)$$

式中: $k$ 为影响系数。

式(5)的碳化深度预测模型未考虑各向异性以及沙胶比的影响。本研究将碳化龄期和沙胶比作为依据,建立碳化深度预测模型及碳化影响系数 $f(S)$ 与沙胶比的关系:

$$d = f(S)\sqrt{t} \quad (6)$$

$$f(S) = AS + BS^2 + C \quad (7)$$

式中: $S$ 为沙胶比; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 为回归系数。

根据式(6)~(7)拟合得到适用于风积沙混凝土的碳化深度模型:

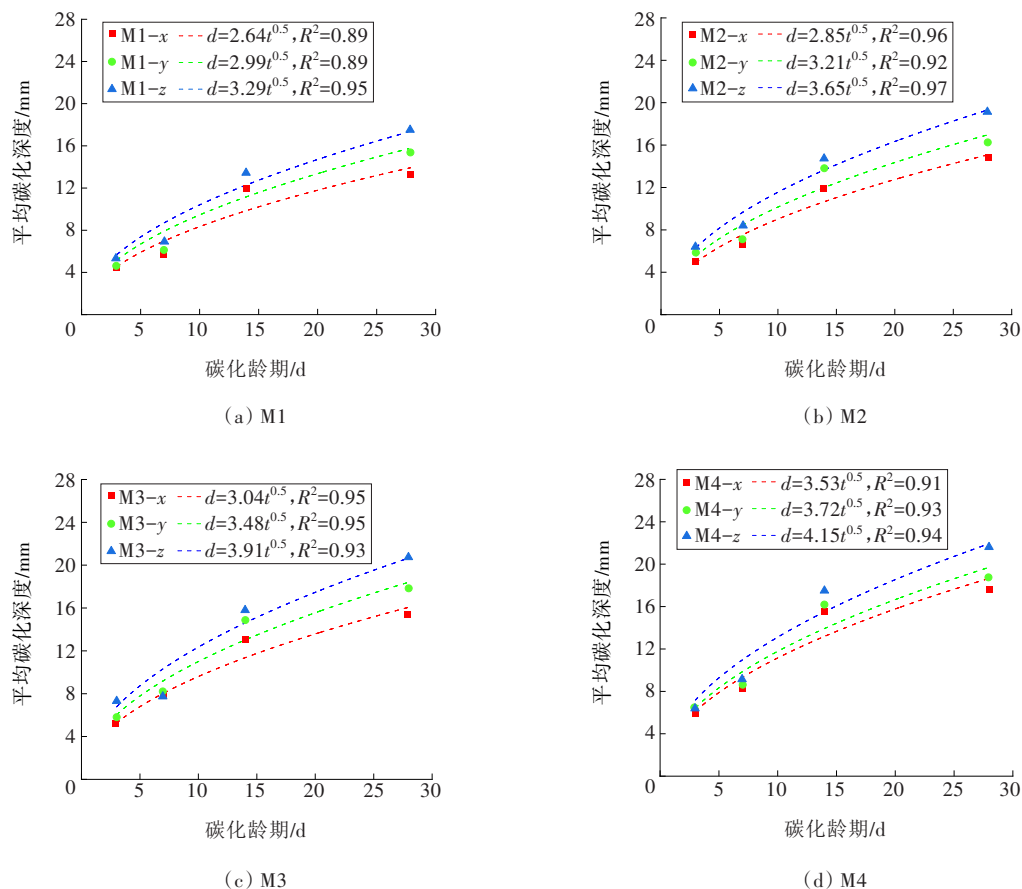


图10 碳化深度与碳化龄期的拟合曲线

Fig. 10 Fitting curve of carbonization depth as a function of carbonization age



$$d_x = f(S) \sqrt{t} = (-4.25S + 1.77S^2 + 5.20) \sqrt{t} \quad (8)$$

$$d_y = f(S) \sqrt{t} = (-0.20S + 0.43S^2 + 2.57) \sqrt{t} \quad (9)$$

$$d_z = f(S) \sqrt{t} = (2.22S - 0.28S^2 + 0.96) \sqrt{t} \quad (10)$$

## 4 结论

本研究对3D打印试件的碳化性能进行了测试和分析,得出以下结论:

1) 3D打印试件的碳化深度随碳化龄期的增长而呈增大趋势,并存在 $d_z > d_y > d_x > d_c$ 的规律。打印层间与打印条间弱面的分布决定了3D打印混凝土试件的碳化行为,碳化各向异性系数 $C_a$ 随着碳化龄期的增长而增大。在碳化28 d后,与打印基体相比,打印条间、打印层间的碳化深度分别增加了24%和10%。3D打印试件的抗碳化性能因受打印条间与打印层间的界面制约而有所减弱。

2) 在碳化作用下,3D打印试件的力学性能得到显著提升。在碳化14 d后,3D打印试件 $y$ 方向强度的提升较明显,抗压强度和抗折强度分别提高了10.20%和11.07%,说明碳化作用弥补了 $y$ 方向的部分打印缺陷。

3) 随着沙胶比的增大,3D打印试件的抗碳化性能随之下降。沙胶比的提高会产生应力集中,降低材料的强度和韧性,并且会增大基体的孔隙率,从而降低基体的抗碳化能力。

### [参考文献]

- [1] MA G W, BUSWELL R, LEAL DA SILVA W R, et al. Technology readiness: a global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development[J]. Cement and Concrete Research, 2022, 156: 106774. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106774.
- [2] XIAO J Z, JI G C, ZHANG Y M, et al. Large-scale 3D printing concrete technology: current status and future opportunities[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122: 104115. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104115.
- [3] WANG L, MA G W, LIU T H, et al. Interlayer reinforcement of 3D printed concrete by the in-process deposition of U-nails[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 148: 106535. DOI: 10.1016/j.cemconres. 2021. 106535.
- [4] 刘天浩, 王里, 李之建, 等. 混凝土3D打印加筋增韧方法研究进展[J]. 工业建筑, 2021, 51(6): 9-15. DOI: 10.13204/j.gyjzG21031901.
- LIU Tianhao, WANG Li, LI Zhijian, et al. A review of incorporating reinforcement method in 3D concrete printing[J]. Industrial Construction, 2021, 51(6): 9-15. DOI: 10.13204/j.gyjzG21031901.
- [5] 李之建, 马国伟, 王里. 3D打印连续微钢筋混凝土梁受弯承载力试验研究[J]. 实验力学, 2021, 36(4): 516-524. DOI: 10.7520/1001-48888-20-143.
- LI Zhijian, MA Guowei, WANG Li. Experimental study on the bending capacity of 3D printed continuous micro-reinforcement reinforced concrete beams[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(4): 516-524. DOI: 10.7520/1001-48888-20-143.
- [6] 白刚, 王里, 王芳, 等. 3D打印UHPC的制备和力学性能试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(12): 12063-12069. DOI: 10.11896/cldb.20040209.
- BAI Gang, WANG Li, WANG Fang, et al. Investigation of the printability and mechanical properties of 3D printing UHPC[J]. Materials Reports, 2021, 35(12): 12063-12069. DOI: 10.11896/cldb.20040209.
- [7] 王里, 王伯林, 白刚, 等. 3D打印混凝土各向异性力学性能研究[J]. 实验力学, 2020, 35(2): 243-250. DOI: 10.7520/1001-4888-18-188.
- WANG Li, WANG Bolin, BAI Gang, et al. Experimental study on the mechanical anisotropy of 3D printed concrete[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(2): 243-250. DOI: 10.7520/1001-4888-18-188.
- [8] MA G W, LI Z J, WANG L, et al. Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing[J]. Construction and Building Materials, 2019, 202: 770-783. DOI: 10.1016/j.conbuildmat. 2019. 01.008.
- [9] 李岩峰, 姚亮, 王里, 等. 3D打印混凝土力学各向异性与细观破坏机制研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(5): 81-89. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.05.010.
- LI Yanfeng, YAO Liang, WANG Li, et al. Study on mechanical anisotropy and meso damage mechanism of 3D printing concrete[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(5): 81-89. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.05.010.
- [10] WANG L, MA H, LI Z J, et al. Cementitious composites blending with high belite sulfoaluminate and medium-heat Portland cements for largescale 3D printing[J]. Additive Manufacturing, 2021, 46: 102189. DOI: 10.1016/j.addma.2021.102189.
- [11] 田泽皓. 3D打印混凝土层间界面的力学和耐久性能研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2020. DOI: 10.27105/d.cnki.ghbgu.2020.000498.
- TIAN Zehao. Investigation into the mechanical and durable interlayer bonding performances of 3D printing

- concrete[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2020.DOI:10.27105/d.cnki.ghbgu.2020.000498.
- [12] 吴俊臣,申向东,郝负洪.风积沙混凝土的碳化试验研究与预测[J].硅酸盐通报,2017,36(7):2306-2309,2314. DOI:10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2017.07.025.
- WU Junchen, SHEN Xiangdong, HAO Yunhong. Research and prediction on carbonation of aeolian sand concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(7): 2306-2309, 2314. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2017.07.025.
- [13] 刘海峰,马荷姣,刘宁,等.粉煤灰及沙漠砂对混凝土抗碳化性能的影响[J].硅酸盐通报,2017,36(11):3823-3828,3847. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2017.11.041.
- LIU Haifeng, MA Hejiao, LIU Ning, et al. Influence of fly ash and desert sand on the carbonation resistance property of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(11): 3823-3828, 3847. DOI: 10.16552/j. cnki. issn1001-1625.2017.11.041.
- [14] 银英姿,雷雅楠,苏英.风积沙混凝土微观结构及孔隙特征研究[J].建筑结构,2021,51(16):135-139,50. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.16.022.
- YIN Yingzi, LEI Ya'nan, SU Ying. Study on microstructure and pore characteristics of aeolian sand concrete[J]. Building Structure, 2021, 51(16): 135-139, 50. DOI: 10.19701/j.jzjg.2021.16.022.
- [15] 高冠一,张铖,麻凤海.混凝土抗碳化性能影响因素试验研究[J].混凝土,2020(6):30-32. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2020.06.007.
- GAO Guanyi, ZHANG Cheng, MA Fenghai. Experimental study on influencing factors of concrete carbonation resistance[J]. Concrete, 2020(6): 30-32. DOI: 10.3969/j. issn.1002-3550.2020.06.007.
- [16] 崔天龙,王里,马国伟,等.HB-CSA与膨胀剂对3D打印混凝土收缩开裂性能的影响[J].材料导报,2022,36(2):80-86. DOI:10.11896/cldb.20120078.
- CUI Tianlong, WANG Li, MA Guowei, et al. Effect of HB-CSA and expansion agent on shrinkage and cracking performance of 3D printing concrete[J]. Materials Reports, 2022, 36(2): 80-86. DOI: 10.11896/cldb.20120078.
- [17] ZHANG Y, QIAO H X, QIAN R S, et al. Relationship between water transport behaviour and interlayer voids of 3D printed concrete[J]. Construction and Building Materials, 2022, 326: 126731. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126731.
- [18] 李晟文,李果.不同养护龄期矿物掺合料自密实混凝土碳化性能试验[J].混凝土,2019(3):27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.03.007.
- LI Shengwen, LI Guo. Carbonation performance test of self-compacting concrete with different curing age mineral admixtures[J]. Concrete, 2019(3): 27-29. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.03.007.
- [19] 李根峰,申向东,邹欲晓,等.风沙冲蚀与碳化耦合作用下风积沙粉体混凝土耐久性能[J].农业工程学报,2018,34(17):158-166. DOI: 10.11975/j.issn.10026819.2018.17.021.
- LI Genfeng, SHEN Xiangdong, ZOU Yuxiao, et al. Durability of aeolian sand powder concrete under mechanism of aeolian sand blowing erosion and carbonization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(17): 158-166. DOI: 10.11975/j.issn.10026819.2018.17.021.
- [20] 姚力科.陕北地区风积砂混凝土抗压强度与碳化性能试验研究[D].西安:西安科技大学,2020. DOI: 10.27397/d.cnki.gxaku.2020.000994.
- YAO Like. Experimental research on compressive strength and carbonation performance of aeolian sand concrete in Northern Shaanxi[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27397/d.cnki. gxaku.2020.000994.
- [21] 任志丽.混凝土碳化开裂行为及碳化机理研究[D].深圳:深圳大学,2020. DOI: 10.27321/d.cnki.gszdu.2020.000604.
- REN Zhili. Investigation of carbonation cracking behavior and carbonation mechanism of concrete[D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020. DOI: 10.27321/d. cnki.gszdu.2020.000604.
- [22] 肖文广,郭樟根,吴政鹏,等.再生混凝土抗碳化性能试验研究及理论分析[J].土木建筑与环境工程,2015,37(6):47-53. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.007.
- XIAO Wenguang, GUO Zhanggen, WU Zhengpeng, et al. Experimental research and theoretical analysis on carbonation resistance behavior of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2015, 37(6): 47-53. DOI: 10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.007.

## Experimental study on carbonation resistance of 3D printed concrete with aeolian sand

WANG Li<sup>1,2</sup>, LIN Wenyu<sup>1</sup>, JIANG Hailong<sup>1</sup>

(1.School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2.Engineering Research Center on 3D Construction Printing of Hebei, Tianjin 300401, China)

**Abstract:**[Purposes] The paper aims to further clarify the carbonation resistance of 3D printed aeolian sand concrete. [Methods] In this paper, 3D printed desert sand concrete was prepared, and the influence of sand-binder ratio on the carbonation depth of 3D printed concrete was studied. The anisotropy coefficient of carbonation was introduced to evaluate the effect of 3D printing process on the carbonation behaviors of concrete. The compressive and flexural properties of 3D printed concrete after carbonization were tested and analyzed, and the carbonization prediction model of 3D printed concrete was established based on the sand-binder ratio in  $x$ ,  $y$  and  $z$  directions. [Findings] The carbonization depth increased with the increase of carbonization age and sand-binder ratio, and the carbonization depth and mechanical properties showed obvious anisotropy. After 28 days of carbonization, compared with the printing matrix, the carbonization depth between printing strips and layers increased by 24% and 10% respectively. [Conclusions] Carbonation reduced the anisotropy of compressive strength and flexural strength of 3D printed specimens to a certain extent.

**Key words:**concrete 3D printing; carbonization resistance; interlayer interface; anisotropy

---

**Manuscript received:**2022-06-28; **revised:**2022-07-24; **accepted:**2022-07-30

**Foundation item:** Project (52178198) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (E2021202039) supported by Excellent Youth Foundation of Hebei Natural Science Foundation; Project (20JCYBJC00710) supported by Natural Science Foundation of Tianjin

**Corresponding author:** WANG Li (1988—)(ORCID:0000-0003-1286-4407), male, professor, research interest: key technologies and innovative application of construction 3D printing. E-mail: wangl1@hebut.edu.cn

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:田湘)