

# 《3D 打印混凝土预混料》

## 编制说明

(征求意见稿)

标准编制组

2024年2月

# 目 录

一、工作简况 .....	2
(一)任务来源 .....	2
(二)主要工作过程 .....	3
(三)主要参加单位和工作组成员及其所做的工作 .....	4
二、标准编制的原则和主要内容 .....	5
(一)标准制定的原则 .....	5
(二)标准的主要内容 .....	6
三、主要技术与指标确定 .....	22
(一)3D 打印混凝土材料配合比设计 .....	22
(二)3D 打印混凝土材料湿态工作性能 .....	28
四、标准中涉及专利情况说明 .....	31
五、产业化情况 .....	31
六、采用国际标准 .....	32
七、与现行法律、法规、规章及相关标准的协调 .....	32
八、重大意见分歧的处理依据和结果 .....	33
九、标准性质的建议说明 .....	33
十、贯彻标准的措施建议 .....	33
十一、废止现行有关标准的建议 .....	34
十二、其他应说明的事项 .....	34

## 一、工作简况

### (一)任务来源

根据中国建筑材料联合会《关于下达 2022 年第三批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发[2022]10 号）和中国混凝土与水泥制品协会《关于下达 2022 年中国混凝土与水泥制品协会标准制定计划（第一批）的通知》（中制协字[2022]8 号）的要求，《3D 打印混凝土预混料》为协会标准制定项目，计划号 2022-26-xbjh。

本规程由中国建筑材料联合会和中国混凝土与水泥制品协会共同负责管理，由中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会牵头制定，由浙江大学、内蒙古科技大学等单位负责起草并组织相关单位共同完成。经广泛调查研究，认真总结实践经验，参考国内外技术标准和先进经验，在征求业内专家、研究机构和相关企业意见的基础上，制定《3D 打印混凝土预混料》团体标准。

3D 打印是一种伴随着第三次工业革命浪潮发展起来的新型增材制造技术，被誉为“第三次工业革命最具标志性的生产工具”。3D 打印混凝土作为数字化智能建筑材料，具有机械化程度高，节约材料，提高生产效率等优势，引领土木工程基础设施智能建造成为国家重要战略方向。混凝土增材制造融合信息技术与工业制造技术，以灵活、多变的生产方式来适应空间造型，具有无模生产，便捷高效、节约材料，绿色环保、一体性好等优点，拥有无可比拟的优势，在建筑领域得到探索应用和工程推广。采用 3D 打印技术进行混凝土增材制造，结构施工可以减少建筑垃圾 30%~60%，节约劳动力成本 50%~80%，节约生产时间 50%~70%，具有重要的工程研究和推广应用价值。发展 3D 打印混凝土预混料及产品制作标准，积极规划和探索预制化、装配化智慧基础设施、智能建造，推动绿色化建造的发展，不仅可以解决目前土木工程行业面临的劳动力不足、机械程度低、模板支护费工费时等一系列困境和难题，还可以为现代工业化建造和建设工程艺术化建造提供有力的支撑。

此外，3D 打印混凝土是我国智能建筑、智能建造技术创新重点推广的新型建筑材料，国内市场需求已开始呈现不断增加的趋势，国内生产企业也在不断发展壮大。2019 年 11 月 17 日，我国中建股份技术中心研制了打印规模为长宽高为 16×17×10 的框架式混凝土打印设备，和中建二局华南公司合作建成世界首例原位 3D 打印双

层示范建筑。建筑总高度 7.2 米，建筑面积约 230 平方米，该项目采用轮廓工艺打印中空墙体和构造柱，混凝土层条宽 5 cm、厚 2.5 cm，打印速率为 15 cm/s。同规模的常规施工建筑建设周期约 60 天，施工人员需要 15 人左右，而该 3D 打印建筑主体打印部分用时仅 3 天，打印完成净用时约 48.5 小时，同时节省了人工和成本。该建筑的打印建造表明我国在混凝土增材智能建造的设备和施工技术方面位居世界前列。2020 年，中国工程建设标准化协会颁布了 T/CECS 786-2020《混凝土 3D 打印技术规程》标志着我国混凝土增材智能建造技术已经基本成熟，为市场化推广提供了工程基础。2022 年，T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》和 T/CBMF 183—2022/T/CCPA 33—2022《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》颁布实施，3D 打印混凝土材料和工艺的成熟规范，为增材智能建造技术信息化、预制化、装配化全产业链发展提供了基础和平台，为 3D 打印混凝土预混料产品的加工、实施和规范提供了必要的技术支撑。



图 1 现有混凝土结构打印建造工程案例

## (二)主要工作过程

根据国发〔2015〕13 号《国务院关于印发深化标准化工作改革方案的通知》、国质检标联〔2016〕109 号文件《关于培育和发展团体标准的指导意见》、国办发〔2017〕27 号《国务院办公厅关于印发贯彻实施〈深化标准化工作改革方案〉重点任务分工（2017-2018 年）的通知》相关文件要求，以服务创新驱动发展和满足市场需求为出发点，以“放、管、服”为主线，激发社会团体制定标准。

中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会在申请本标准前，已经对3D打印混凝土的行业状况和国内外标准文件进行了广泛调研和技术论证。2022年3月31日，中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会以腾讯会议的形式组织召开了团体标准《3D打印混凝土预混料》编制组首次工作会，来自各地科研院所、生产企业等负责起草与参编单位的领导和专家代表参加了会议，在本次会议上确定了本标准的工作计划及任务分工。

首次工作会后，标准编制组立即着手进行国内外技术查新和样品信息的征集工作，按照工作组讨论稿要求的试验项目和试验方法安排了试验验证，由灵砫科技（杭州）有限公司、杭州冠力智能科技有限公司和北京空间智筑技术有限公司等进行了验证试验。在此基础上，标准制定工作组通过分析技术文献及实验数据结果，汇总形成了《3D打印混凝土预混料》团体标准草稿。

2022年7月5日，中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会以腾讯会议的形式召开团体标准《3D打印混凝土预混料》编制组第二次工作会，对草稿进行了细节论证和技术讨论，根据会议意见对标准内容进行认真核查、改进和修正，形成征求意见稿，并广泛征询业内专家技术建议改进。

### **(三) 主要参加单位和工作组成员及其所做的工作**

本标准的负责起草单位：中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会、浙江大学、内蒙古科技大学。参编单位为东南大学，中国矿业大学（北京），太原理工大学，清华大学，灵砫科技（杭州）有限公司，中建八局，杭州冠力智能科技有限公司，武汉源锦建材科技有限公司，广州市玖珂塘材料科技有限公司，北京空间智筑技术有限公司，铁科首钢轨道技术股份有限公司，包头市安顺新型建材有限责任公司，国家能源集团低碳研究院，佛山科学技术学院，南京绿色增材智造研究院、天津大学。

本标准主要起草人：孙晓燕、杭美艳、柯雄、师海霞、王海龙、辜振睿、杨富民、王栋民、蔺喜强、张亚梅、赖俊英、周港明、曲树强、阎蕊珍、董香军、郑肖威、张大旺、武逸群、刘泽、贾鲁涛、纪宪坤、王桂玲、桂强、徐卫国、董阳、田冠飞、张永虹、李犇、高远、徐杰。

本标准的编制组分工见表 1:

表 1 标准编制组工作分工

序号	单位名称	分工	参编人
1	中国混凝土与水泥制品协会预拌混凝土分会	负责组织全面工作	师海霞
2	浙江大学	提供核心技术支持和最新的科技查新资讯；分别完成“包装、贮存和运输”、“订货和交货”“原材料和配合比”、“质量要求”、“试验方法”、“检验规则”章节的编写	孙晓燕、王海龙
3	内蒙古科技大学		杭美艳
4	东南大学		张亚梅
5	中国矿业大学（北京）		王栋民
6	太原理工大学		阎蕊珍
7	清华大学		徐卫国
8	天津大学		徐杰
9	武汉三源特种建材有限公司	负责本标准的验证试验工作，并对实验结果进行分析；完成“制备”章节的编写	纪宪坤、辜振睿
10	广州市玖珂塘材料科技有限公司		柯雄
11	北京铁科首钢轨道技术股份有限公司		杨富民、周港明
12	包头市安顺新型建材有限责任公司		曲树强
13	中建八局		王桂玲、桂强
14	灵砫科技（杭州）有限公司	提供大量的试验数据、验证试验样品，以及生产工艺和实际工程应用相关的大量材料	董香军、郑肖威
15	杭州冠力智能科技有限公司		田冠飞、蔺喜强
16	北京空间智筑科技有限公司		张永虹
17	国家能源集团低碳研究院		董阳
18	佛山科学技术学院		李犇
19	南京绿色增材智造研究院		贾鲁涛

## 二、标准编制的原则和主要内容

### (一) 标准制定的原则

本标准按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。遵从以下规则：贯彻执行国家的政策、法规，与现行其他国家标准协调一致的原则；技术指标制定先进可行、规范合理的原则；标准制定突出产品特性，促进行业健康发展和产品推广的原则。标准制定过程中参考了各生产企业标准，试验方法主要采用现行的国家标准和行业标准，以保证标准中技术指标的准确性、科学性与可比性，各项指标值在满足工程要求的前提下根据各生产企业试样试验验证结果确定。

## (二) 标准的主要内容

### 1 范围

本标准规定了 3D 打印混凝土预混料的术语和定义、分类和标记、原材料、配合比设计、质量、制备、技术要求、试验方法、检验规则及标志、运输、贮存等要求。

本标准适用于现场智能建造的 3D 打印混凝土干拌料和用于搅拌站量化生产的预拌 3D 打印混凝土湿拌料，可用于建筑物、景观小品、基础设置的装配化、智能化材料制作及结构建造。

本标准不包括交货后的混凝土养护。

### 2 规范性引用文件

GB 175 通用硅酸盐水泥

GB 50119 混凝土外加剂应用技术规范

GB/T 201 铝酸盐水泥

GB/T 2419 水泥胶砂流动度测定方法

GB/T 9142 混凝土搅拌机

GB/T 9774 水泥包装袋

GB/T 10454 集装袋

GB/T 20472 硫铝酸盐水泥

GB/T 21120 水泥混凝土和砂浆用合成纤维

GB/T 25176 混凝土和砂浆用再生细骨料

GB/T 25177 混凝土用再生粗骨料

GB/T 26408 混凝土搅拌运输车

GB/T 38111 玄武岩纤维分类分级及代号

GB/T 38143 水泥混凝土和砂浆用耐碱玻璃纤维

GB/T 39147 混凝土用钢纤维

GB/T 50080 普通混凝土拌合物性能试验方法标准  
GB/T 50082 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准  
GB/T 51003 矿物掺合料应用技术规范  
JC/T 2182 建材工业用干混砂浆混合机  
JGJ 52 普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准  
JGJ 63 混凝土用水标准  
JGJ/T 12 轻骨料混凝土应用技术标准  
JGJ/T 70 建筑砂浆基本性能试验方法  
JGJ/T 193 混凝土耐久性检验评定标准  
JGJ/T 221 纤维混凝土应用技术规程  
T/CBMF 183—2022/T/CCPA 33—2022 3D打印混凝土基本力学性能试验方法  
T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022 3D打印混凝土拌合物性能试验方法

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

混凝土可打印性能 **Printability of concrete**

混凝土的可打印性能是指3D打印混凝土拌合后用于打印建造的性能，包括可挤出性，可建造性和开放时间。采用泵送工艺时，需同时满足可泵送性。

#### 3.2

3D打印混凝土可挤出性 **Extrudability of 3D printing concrete**

3D打印混凝土按照既定打印路径的平面成型能力，以连续挤出条带长度和连续挤出条带宽度变异性表征，以混凝土流动性作为衡量参数，区分骨料粒径以坍落度，扩展度和流动度作为测试指标。

#### 3.3

3D打印混凝土可建造性 **Buildability of 3D printing concrete**

3D打印混凝土按照既定打印路径的空间成型能力，以打印堆叠层数/高度衡量。



### 3.4

#### 3D打印混凝土开放时间 Open time of 3D printing concrete

3D打印混凝土在原材料加水混合后保持适合打印建造工作性能的时间，以凝结时间和打印工艺流程时间确定。

### 3.5

#### 3D打印混凝土强度 Strength of 3D printing concrete

3D打印混凝土养护28天后按照混凝土强度测试方法得到各方向最低强度或者使用方向的材料强度。

### 3.6

#### 3D打印混凝土 3D printing concrete

由胶凝材料、骨料、水、纤维和外加剂等原材料配制的可按照预定程序通过3D打印装备轮廓成型的混凝土材料。

### 3.7

#### 3D打印预拌混凝土 Concrete premix for 3D printing

由胶凝材料、骨料、纤维和外加剂等原材料按3D打印混凝土性能要求配制的混合料，包括3D打印混凝土干混料和3D打印混凝土湿混料。

### 3.8

#### 3D打印混凝土干混料 Dry concrete premix for 3D printing

由胶凝材料、骨料、纤维和外加剂等原材料按3D打印混凝土性能要求配制并干混均匀的颗粒混合物。

### 3.9

#### 3D打印混凝土湿混料 Wet concrete premix for 3D printing

由胶凝材料、骨料、纤维、外加剂和水等原材料按3D打印混凝土性能要求配制并混合均匀的新拌混合物。

### 3.10

3D打印普通混凝土 3D printing ordinary concrete

干表观密度为1950 -2600 kg/m<sup>3</sup>的3D打印混凝土。

### 3.11

3D打印轻质混凝土 3D printing light weight concrete

干表观密度不大于1950 kg/m<sup>3</sup>的3D打印混凝土。

### 3.12

3D打印重混凝土 3D printing heavy weight concrete

干表观密度大于2600kg/m<sup>3</sup> 的3D打印混凝土。

### 3.13

3D打印高强混凝土 3D printing high strength concrete

各向抗压强度均不低于C60的3D打印混凝土。

## 4 分类和标记

### 4.1 分类

3D 打印混凝土预混料分为干拌和湿拌。其中干拌 3D 打印混凝土预混料(D)为除拌合水之外的原材料按配合比例和制作工艺充分混合，湿拌 3D 打印混凝土预混料(W)为原材料按配合比例混合并按运输建造要求添加缓凝剂。

### 4.2 性能等级

3D 打印混凝土强度等级划分为 C10、C15、C20、C25、C30、C35、C40、C45、C50、C55、C60、C65、C70、C75、C80、C85、C90、C95 和 C100 等。

3D 打印混凝土拌合物流动性参照《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》T/CBMF 184-2022 中规定的方法测试，同时满足 3D 打印所需的流动性要求。

3D 打印混凝土耐久性能的等级划分应符合（规范标准号）耐久性的规定，按实际使用要求确定与试配。

### 4.3 标记/标识

3D 打印混凝土标记应按下列顺序:

- a) 干拌/湿拌方式 (3DP-D/3DP-W)
- b) 强度等级;
- c) 塌落度, 扩展度和流动性等级;
- d) 耐久性等级代号, 对于抗氯离子渗透性能和抗碳化性能, 后附设计值在括号中;
- e) 本标准号。

示例 1: 采用通用硅酸盐水泥、河砂、石、矿物掺合料、外加剂和水配制的 3D 打印混凝土干拌预混料, 强度等级为 C50, 坍落度为 180mm, 抗冻等级为 F250, 抗氯离子渗透性能电通量 QS 为 1000C, 其标记为:

3DP-D-P.O C50-180(S4)-F250Q-(1000)-T/CBMF XX—202X/ T/CCPA XX—202X。

## 5 原材料

用于结构 3D 打印预混料的混凝土强度等级不宜低于 C30, 用于预应力预制构件的 3D 打印预混料的混凝土强度等级不应低于 C40。用于景观构件部品的 3D 打印预混料的混凝土强度等级应满足设计相关要求。3D 打印预混料的类型按胶凝材料类型分为: 水泥基 3D 打印预混料、碱激发胶材 3D 打印预混料、石膏基 3D 打印预混料。

### 5.1 胶凝材料

配制 3D 打印混凝土宜选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥, 并应符合 GB175《通用硅酸盐水泥》的规定。选用硫铝酸盐水泥为胶凝材料时, 应符合 GB/T 20472《硫铝酸盐水泥》的规定。选用铝酸盐水泥为胶凝材料时, 应符合 GB/T 201《铝酸盐水泥》的规定。选用石膏为胶凝材料时, 应符合 GB/T 9776《建筑石膏》的规定。选用粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、钢渣粉以及其他硅铝酸盐为前驱体, 固体激发剂为化学激发剂制备碱激发胶凝材料时, 应通过试验验证, 确定混凝土性能满足要求后使用。当采用其他品种水泥时, 其性能指标应符合国家现行相关标准的规定。

### 5.2 辅助胶凝材料

配制 3D 打印水泥基混凝土可采用粉煤灰、粒化高炉矿渣粉、硅灰、钢渣粉、石

灰石粉、磷渣粉等矿物掺合料，且应符合 GB/T 51003《矿物掺合料应用技术规范》的规定。当采用其他矿物掺合料时，应通过试验验证，确定混凝土性能满足要求后使用。

### 5.3 骨料

3D 打印混凝土使用细骨料时，细骨料的公称粒径应根据打印头出口直径，通过试验确定，且最大粒径不得超过公称粒径。所用细骨料的其他质量、性能及试验方法应符合 JGJ 52《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的规定。

3D 打印混凝土使用粗骨料时，粗骨料宜选用级配合理、粒形良好，质地坚固的碎石或卵石，最大公称粒径不宜超过 16mm，且应根据打印头出口直径，通过试验确定。所用粗骨料的其他质量、性能及试验方法应符合 JGJ 52《普通混凝土用砂、石质量及检验方法标准》的规定。

3D 打印混凝土使用轻骨料时，性能应符合 JGJ/T 12《轻骨料混凝土应用技术标准》的规定。

3D 打印混凝土使用再生骨料时，性能应符合 GB/T 25177《混凝土用再生粗骨料》、GB/T 25176《混凝土和砂浆用再生细骨料》的规定。

### cc5.4 外加剂

减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、防冻剂、膨胀剂、速凝剂外加剂应符合准 GB 50119《混凝土外加剂应用技术规范》的规定。当采用触变剂、减缩剂、增稠剂等其他外加剂时，应通过试验验证，确定混凝土性能满足要求后使用。

### 5.5 纤维

3D 打印混凝土使用合成纤维时，性能应符合 GB/T 21120《水泥混凝土和砂浆用合成纤维》的规定。3D 打印混凝土使用钢纤维时，性能应符合 GB/T 39147《混凝土用钢纤维》的规定。3D 打印混凝土使用玄武岩纤维时，性能应符合 GB/T 38111《玄武岩纤维分类分级及代号》的规定。3D 打印混凝土使用玻璃纤维时，性能应符合 GB/T 38143《水泥混凝土和砂浆用耐碱玻璃纤维》的规定。打印混凝土使用其它种类的纤维时，在施工过程中应服从标准 JGJ/T 221《纤维混凝土应用技术规程》的规定。

### 5.6 拌合水

拌合用水和养护用水应符合 JGJ 63 《混凝土用水标准》的规定。

## 5.7 配合比

当 3D 打印混凝土采用干混砂浆的预混料形式时，3D 打印材料配合比应参照厂家提供的水料比的规定。当 3D 打印混凝土采用预拌砂浆的预混料形式时，3D 打印混凝土中是否掺加粗骨料和粗骨料参数需要根据结构设计和 3D 打印机硬件参数确定。当确定掺加骨料时，砂率宜 0.4-0.6 范围，并由试配和打印试验调整和确定。3D 打印混凝土的水胶比、胶骨比及掺合料掺量可参考表 2 的建议范围取值，并通过试验验证确定。根据 3D 打印混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能要求，选用矿物掺合料、外加剂、纤维的品种和掺量，并通过试验确定。

表 2 常用 3D 打印混凝土配合比主要参数建议范围

强度等级	C20	C30	C40	C50	C60
水胶比	0.40~0.46	0.36~0.42	0.34~0.40	0.30~0.36	0.28~0.34
胶/骨（体积比）	0.52~0.65	0.57~0.70	0.65~0.74	0.70~0.81	0.74~0.87
掺合料掺量（%）	≤50	≤40	≤30	≤20	≤10

注：此配合比参数主要针对水泥混凝土，其他胶凝材料混凝土配合比参数试验确定。

## 6 质量要求

### 6.1 强度

3D 打印混凝土强度应根据 3D 打印工艺通过 T/CBMF 183—2022/T/CCPA 33—2022 《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》中混凝土抗压强度测试方法，考虑空间各向异性均应满足设计要求。

### 6.2 流动性

流动性试验参照 T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022 《3D 打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。考虑打印建造工艺均应满足设计要求。当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径≤5mm 时，流动性按 GB/T 2419 《水泥胶砂流动度测定方法》规定的方法进行测试；混凝土流动度实测值与控制目标值的允许偏差宜符合表 3 的规定并满足打印建造需求。当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径超过 5mm 时，流动性按 GB/T 50080 《普通混凝土拌合物性能试验方法》规定的坍落

度与坍落扩展度法进行测试，混凝土坍落度、扩展度实测值与实测值与控制目标值的允许偏差应符合表 3 的规定。常规泵送 3D 打印混凝土坍落度控制目标值不宜大于 180mm，并应满足打印建造要求。坍落度经时损失不宜大于 30mm/h。

表 3 混凝土拌合物流动性参数允许偏差

项目	偏差 (%)
坍落度	$\pm (25\sim35)$
扩展度	$\pm 9$
流动度	$\pm 7$

### 6.3 含气量

混凝土含气量实测值不宜大于 7%，与工程规定值允许偏差不宜超过 $\pm 1.0\%$ 。

### 6.4 凝结时间

3D 打印混凝土干拌混凝土现场拌合，凝结时间按打印工艺设定，与目标值允许偏差不宜超过 20min。3D 打印混凝土湿拌混凝土预制拌合，凝结时间与运输流程与打印工艺有关，与目标值允许偏差不宜超过 10min。

### 6.5 可挤出性

3D 打印混凝土需具备流畅连续的条带可挤出性，连续打印条带长度大于条带宽度的 100 倍，沿打印方向条带宽度尺寸偏差不超过 5%。

### 6.6 可建造性

3D 打印混凝土需具备层叠施工，免模建造工艺所需的可建造性，与设计尺寸偏差不超过 5%。

### 6.7 耐久性能

3D 打印混凝土的耐久性能应满足设计要求，检验评定应符合 JGJ/T193《混凝土耐久性检验评定标准》的规定。

### 6.8 其他性能

当需方提出其他混凝土性能要求时，应按国家现行有关标准规定进行试验，无相应标准时应按合同规定进行试验;试验结果应满足标准或合同的要求。

## 7 制备

3D 打印混凝土预混料的制备应包括原材料贮存、计量、搅拌和运输。3D 打印混凝土预混料的制备应符合环保的规定。粉料输送及称量应在密封状态下进行，并应有收尘装置；拌合设备宜采用封闭系统；湿混料运输车出厂前应将车外壁和料斗壁上的湿混料残浆清洗干净；3D 打印材料生产单位应对生产过程中产生的工业废水和固体废弃物进行回收处理和再生利用。3D 打印混凝土预混料生产之前，应制订完整的技术方案，并应做好各项准备工作。

### 7.1 预拌 3D 打印混凝土干混料

各种原材料应分仓贮存，设置明显标识，并应符合有关环境保护的规定。水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别标识和贮存，并应防止受潮及污染。骨料应按品种和规格分别标识和堆放，并应进行干燥处理；必要时，宜进行分级处理。矿物掺合料应按品种和生产厂家分别标识和贮存，不得与水泥等其他粉状物料混杂，并应防止受潮。外加剂应按品种和生产厂家分别标识和贮存，并应有防潮措施。干混料中如需加入纤维，纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存。

原材料计量应采用电子计量设备。计量设备应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并应定期校验。生产单位每月应至少自检一次；每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准。计量设备应满足计量精度要求。计量设备应能连续计量不同配合比混凝土的各种原材料，并应具有实际计量结果逐盘记录和存储功能。原材料的计量允许偏差应符合表 4 的规定。

表 4 3D 打印混凝土干混料原材料计量允许偏差

原材料品种	水泥	骨料	矿物掺合料	外加剂
计量允许偏差 (%)	±1	±2	±1	±1

3D 打印混凝土干混料应采用计算机控制的干混砂浆混合机进行混合，混合机应符合 JC/T 2182《建材工业用干混砂浆混合机》的规定。混合时间应以保证物料的混合均匀为前提，如含有纤维则不应有肉眼可见的纤维结团；最佳混合时间宜与计量配料系统的配料时间相匹配。干混料各种原材料进入混合机时以及在混合过程中物

料温度不应超过 50℃。

干混料品种更换时，混合及输送设备等应清理干净。干混料在生产过程中的粉尘排放和噪音等应符合环保要求，不得对周围环境造成污染，所有原材料的输送及计量工序均应在封闭状态下进行，并应有收尘装置。

3D 打印混凝土干混料可采用散装或袋装，应根据具体工程特点选择合适的包装和运输方式，运输和物流设备应保证 3D 打印混凝土干混料的干燥和均质。散装 3D 打印混凝土干混料的运输设施应采用干混砂浆罐装专用车，运到目的地后的干混料应保持均匀。袋装 3D 打印混凝土干混料在装卸及运输过程中，应采取防雨、防潮措施，并避免高温和破包。

## 7.2 预拌 3D 打印混凝土湿混料

各种原材料应分仓贮存，设置明显标识，并应符合有关环境保护的规定。水泥应按品种、强度等级和生产厂家分别标识和贮存，并应防止受潮及污染。骨料应按品种和规格分别标识和堆放，堆场应有避雨设施。矿物掺合料应按品种和生产厂家分别标识和贮存，不得与水泥等其他粉状物料混杂，并应防止受潮。外加剂应按品种和生产厂家分别标识和贮存，并应有防潮措施。如使用液态外加剂，应储存在密闭容器内，并应防晒和防冻，如有沉淀等异常现象，经检验合格后方可使用。湿混料中如需加入纤维，纤维应按品种、规格和生产厂家分别标识和贮存。

原材料计量应采用电子计量设备。计量设备应具有法定计量部门签发的有效检定证书，并应定期校验。生产单位每月应至少自检一次；每一工作班开始前，应对计量设备进行零点校准。计量设备应满足计量精度要求。计量设备应能连续计量不同配合比砂浆的各种原材料，并应具有实际计量结果逐盘记录和存储功能。粉状和颗粒状原材料的计量应按质量计，水和液体外加剂的计量可按体积计。

原材料的计量允许偏差应符合表 5 的规定。对于 3D 打印混凝土湿混料的原材料计量，应根据骨料含水率的变化，及时调整骨料和拌合用水的称量。

表 5 3D 打印混凝土湿混料原材料计量允许偏差

原材料品种	水泥	骨料	矿物掺合料	外加剂	水
计量允许偏差 (%)	±1	±2	±1	±1	±1



3D 打印混凝土湿混料宜采用符合 GB/T 9142《建筑施工机械与设备 混凝土搅拌机》要求的强制式搅拌机进行搅拌，宜采用独立的生产线。搅拌时间应保证湿混料搅拌均匀，宜与计量配料系统的配料时间相匹配。从全部材料投完算起，湿混料搅拌时间不应少于 30s，并应根据拌合物状态及时调整搅拌时间。出机拌合物中不应有干粉团，如使用纤维则不应有肉眼可见的纤维结团。宜根据湿混料可打印时间和项目现场打印进度，合理配置生产方案，分批制备 3D 打印混凝土湿混料，保证供应连续。湿混料品种更换时，搅拌机及输送设备等应清理干净。湿混料在生产过程中产生的废水、废料、粉尘和噪音等应符合环保要求，不得对周围环境造成污染，所有原材料的输送及计量工序均应在封闭状态下进行，并应有收尘装置。骨料堆场应有防扬尘措施。

3D 打印混凝土湿混料应采用符合 GB/T 26408《混凝土搅拌运输车》要求的搅拌运输车运送。搅拌运输车在装料、运送过程中应能保证湿混料的均匀性，不应产生分层、离析现象。对于寒冷、严寒或炎热的天气情况，搅拌运输车的搅拌罐应有保温或隔热措施。搅拌运输车在装料前应将搅拌罐内积水排尽，装料后严禁向搅拌罐内加水。搅拌运输车在运送过程中应避免遗洒，卸料后应及时清洗干净。湿混料从搅拌机卸入搅拌运输车至卸料打印时的运输时间不宜大于 90min，应合理配置运输能力保证打印进程的连续性。湿混料的开放时间应匹配打印进程，结合凝结时间、可挤出性能和可打印性能进行调整，并经试验验证。

## 8 试验方法

3D 打印混凝土预混料湿拌性能包括表观密度、含气量、工作性能、湿坯强度和变形模量。3D 打印混凝土硬化性能测试包括立方体抗压强度、轴心抗压强度、静力受压弹性模量、抗折强度、劈裂抗拉强度（界面粘结强度）以及抗剪强度，参见 T/CBMF 183—2022/T/CCPA 33—2022《3D 打印混凝土力学性能试验方法》。3D 打印混凝土耐久性测试包括抗冻试验、抗水渗透试验、抗氯离子渗透试验、碳化试验、抗硫酸盐侵蚀试验。

试验环境相对湿度不宜小于 50%，温度应保持在（20±5）摄氏度。硬化性能及耐久性测试试件应分别采用标准养护和同条件养护，采用标准养护时，试件应放

入温度为(20±2)摄氏度、相对湿度为95%以上的标准养护室中养护,或在温度为(20±2)摄氏度的不流动氢氧化钙饱和溶液中养护。

区别于传统浇筑成型混凝土,3D打印混凝土力学性能呈现一定的各向异性,测试其力学性能时,应根据构件实际受力情况选取加载方向《3D打印混凝土力学性能试验方法》T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33—2022,并在试验报告中注明加载方向和界面情况。

3D打印混凝土力学性能测试所用试件尺寸、试件的取样和加工、试件尺寸测量和允许偏差应符合T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33—2022《3D打印混凝土力学性能试验方法》的规定。

## 8.1 湿拌性能

3D打印混凝土表观密度试验参照GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。含气量试验参照GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。流动性试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。当3D打印混凝土拌合物所含骨料粒径≤5mm时,流动性按GB/T 2419《水泥胶砂流动度测定方法》规定的方法进行测试;当3D打印混凝土拌合物所含骨料粒径超过5mm时,流动性按GB/T 50080《普通混凝土拌合物性能试验方法》规定的坍落度与坍落扩展度法进行测试。挤出性试验适用于评价3D打印混凝土拌合物从挤出头出料口挤出时的连续性和均匀性。挤出性试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。开放时间适用于评价3D打印混凝土拌合物保持顺利挤出并稳定建造的时间。开放时间试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。可建造性试验包括圆筒坍落度试验和打印体稳定性试验,分别测试3D打印混凝土拌合物的形状保持能力和3D打印拌合物在逐层堆叠过程中的稳定性。建造性试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。湿坯强度和变形模量试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合物性能试验方法》中规定的方法进行测试。凝结时间试验参照T/CBMF 184—2022/T/CCPA 34—2022《3D打印混凝土拌合

物性能试验方法》中规定的方法进行测试。当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径  $\leq 5\text{ mm}$  时，凝结时间按 JGJ/T 70 规定方法进行测试。当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径  $> 5\text{ mm}$  时，凝结时间按 GB/T50080 规定方法进行测试。

## 8.2 硬化性能

3D 打印混凝土立方体抗压强度试验参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土轴心抗压强度试验参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土静力受压弹性模量试验参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土抗折强度试验参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的方法进行测试。

当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径超过  $5\text{ mm}$  时，参见混凝土新老界面粘结强度，3D 打印混凝土劈裂抗拉强度包括基体劈裂抗拉强度和层条界面劈裂抗拉强度，参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的方法进行测试。当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径  $\leq 5\text{ mm}$  时，参见砂浆界面粘结强度。

3D 打印混凝土抗剪强度包括基体抗剪强度和界面抗剪强度，参照 T/CBMF 183-2022/T/CCPA 33-2022 《3D 打印混凝土力学性能试验方法》中规定的双面剪切法进行测试。

## 8.3 耐久性能

3D 打印混凝土抗冻试验参照 GB/T 50082 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中规定的方法进行测试。

当 3D 打印混凝土拌合物所含骨料粒径超过  $5\text{ mm}$  时，3D 打印混凝土抗水渗透试验参照 GB/T 50082 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土抗氯离子渗透试验参照 GB/T 50082 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土碳化试验参照 GB/T 50082-2009 《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》中规定的方法进行测试。3D 打印混凝土抗硫酸盐侵蚀试验参照 GB/T 50082 《普通混凝土长期

性能和耐久性能试验方法标准》中规定的方法进行测试。

## 9 检验规则

3D 打印混凝土预混料型式检验的项目见表 6。

在下列情况下进行型式检验：

- a) 正常生产条件下，每六个月进行一次；
- b) 新产品投产或产品定型鉴定时；
- c) 原材料、配方等发生变化，影响产品质量时；
- d) 生产工艺进行调整、设备进行维修、连续停产超过一个月以上恢复生产或成品存放期超过三个月时。

3D 打印混凝土预混料生产厂在同一品种、同一规格、同一配比预混料连续生产的第一盘必须进行取样检验，其中开盘检验仅对湿拌性能进行检验（见表 6 湿拌性能部分）根据其检验结果对生产工艺参数进行调整。

表 6 3D 打印混凝土预混料检验项目

预混料种类	湿拌性能	硬化性能
3D 打印混凝土干混料	坍落度和坍落度经时损失、扩展度、流动度、含气量、凝结时间、可挤出性、可建造性	抗压强度、弹性模量、氯离子渗透性能
3D 打印混凝土湿混料	表观密度、坍落度和坍落度经时损失、扩展度、流动度、含气量、凝结时间、可挤出性、可建造性	抗压强度、弹性模量、氯离子渗透性能

每一批预混料产品出厂前必须进行批检。批检项目见表 6。预混料产品合格证应以批检结果为依据。

同一配料工艺条件、同一类型、同一性能等级产品 100t 为一批。同一工程应用，不足上述数量时亦可以作为一批。同一配料工艺条件指相同原料、相同生产工艺及稳定连续生产；同一类型和性能等级，对于预混料打印产品指相同颜色、相同新拌工作性能和相同抗压强度等级。

## 9.1 检验项目

3D 打印混凝土预混料检验项目可参考表 6 选取设定, 出厂时按需方要求根据合同进行检验。

## 9.2 取样与检验

3D 打印混凝土预混料取样规则如下:

a) 预混料出厂检验的取样试验工作应由供方承担, 用于出厂检验的预混料试样应在生产地点抽取。

b) 取样方法如下:

I 取样应用不小于 1 升容量的取样金属铲斗将预混料样本盛装至清洁、干燥且可密封的取样容器。

II 每验收批的取样方法见表 7, 取样数量见表 8。

表 7 3D 打印混凝土预混料取样方法

预混料储存方式	取样方法
袋装预混料	随机抽取 8 袋, 每袋分别取 1 个小样本, 混成所需试验用样本
散装罐车、贮存仓 或卸料罐	用铲斗从卸下流动中的预混料横向取出小样本, 在不同时间间隔按上述方法取不少于 8 个小样本, 混成所需试验用样本
贮存仓或贮存罐	用铲斗在面层以下合理深度, 按一定间距取不少于 8 个小样本, 混成所需试验用样本
现场预混料搅拌机	用铲斗在预混料出料口处横向取样, 以保证样本的代表性。整盘预混料取不少于 8 个小样本, 混成所需试验用样本

注: 对每一项试验, 应不小于表 8 所规定的最小取样数量, 须做多项试验时, 如确能保证样品以一项试验后不影响其他项试验结果, 可用同组样品进行几项不同试验。

表 8 3D 打印混凝土预混料每一试验项目所需最少取样数量

单位为升

试验项目	预混料拌合物最少取样数量
坍落度和坍落度经时损失	10
扩展度	10
流动度	10
含气量	10
凝结时间	6
可挤出性	6
可建造性	10
抗压强度	10
<b>弹性模量</b>	<b>10</b>
氯离子渗透性能	10

预混料从出厂批次应符合表 9 的规定

表 9 3D 打印混凝土预混料出厂批次

单位为吨

年生产能力	产品批量
≤1000	≤800
400 ~ 1000	≤600
≤400	≤400 或 4 日产量
注：年生产能力为 1000t 以上，不超过 800t 为一个编号，其余类推。	

### 9.3 评定

按第 8 章试验方法和第 6 章质量要求根据合同要求测试评定表 5 中所列项目，如所有项目符合相应等级要求，则判定该批产品合格。如湿拌性能超出要求，允许调整水料比和外加剂用量至符合要求，然后制备试件检验硬化性能，抗压强度、抗渗性能符合相应要求，可判定该批产品合格，预混料产品应按调整后水料比和外加剂用量使用。调整后的检验项目有一项超出要求，则判该批预混料不合格。

## 10 包装、贮存和运输

## 10.1 标志

3D 打印预混料产品外包装上的标志或散装交货卡片上应包含：生产企业名称、地址；产品名称、标记和商标；产品净重；特别约定的颜色标记；生产日期和出厂编号；贮存与运输注意事项，包括“严禁受潮”字样；贮存期。

3D 打印预混料产品包装上的标志应包含：产品规格、产品净重、生产日期与批号、贮存与运输注意事项。

3D 打印预混料生产者应提供产品出厂检验报告（合格证）和使用说明。如有要求，生产者提供半年或一年的产品匀质性检验评定结果。

## 10.2 包装

3D 打印预混料产品可袋装或散装。袋装时应用防潮包装袋。小包装袋（包装质量不超过 50kg）应符合 GB/T 9774 的规定；集装袋（包装质量为 500kg~3000kg）应符合 GB/T 10454 的规定。

每袋净含量不应少于其标志质量的 99%。随机抽取 20 袋，总质量（含包装袋）应不少于标志质量的总和。

## 10.3 贮存和运输

不同类型、不同等级的产品应分别贮存，不应混杂。避免日晒雨淋，不应接近火源，设置隔挡防止碰撞、撕刮，注意通风。产品应干燥保存。应有防雨、防潮、防尘措施。3D 打印干混料产品的贮存期从生产之日起为 90 d。贮存超过 90 d，应检验外观和按出厂检验项目重新检验。

## 三、主要技术分析 with 指标确定

为保证标准项目要求的合理性，编制工作组对 3D 打印混凝土的配合比试验文献进行了深入调研，结合生产企业进行了广泛的样品收集开展了验证试验。标准编制组本着实事求是、精益求精的精神，在基材选取与处理、试样配置与试件制备、试验方法与处理条件等诸多方面加以论证、补充、细化、完善。

### (一) 3D 打印混凝土材料配合比设计

3D 打印混凝土(简称 3DPC)需要满足一定的流变性、可打印性能与成型后力学性能，以适应在制作过程中泵送、挤压、堆叠成型、硬化承载等不同阶段的要求，

其材料组分有别于现浇混凝土。由于输送系统尺寸限制，目前 3D 打印胶凝材料体系中不建议使用粒径超过 5 mm 的骨料，少量研究<sup>[1]</sup>使用了粒径为 10 mm 的粗骨料。现有的 3D 打印混凝土在原材料的组成可分为胶凝材料、骨料、水、纤维、以及外加剂。其中胶凝材料以硅酸盐水泥或硫铝酸盐水泥为主，以高炉粒渣矿粉、粉煤灰、硅灰、石灰石填料等工业废渣为辅助材料。为控制物料的工作性能与开放时间，还使用了减水剂、促进剂和缓凝剂等外加剂。材料组分及比例对 3D 打印混凝土性能有较显著的影响。国内外研究表明<sup>[2-22]</sup>：水与胶凝材料之比在 0.23~0.45 范围内，骨料与胶凝材料之比在 0.6~1.2 范围内，能够获得较好的打印性能和后期力学强度，如图 2 所示。

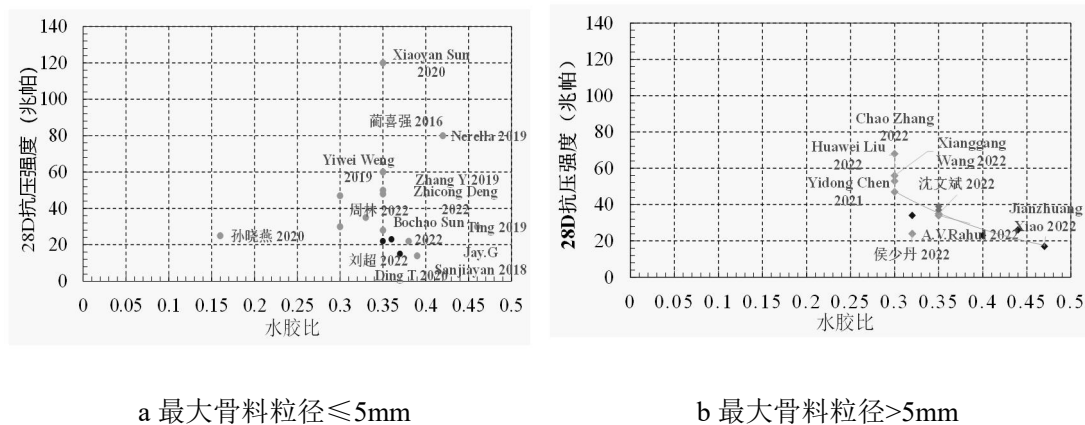


图 2 国内外 3D 打印混凝土配合比参数分析

## 1 水泥及胶凝材料

3DPC 要求材料性能具备适用的凝结时间与较高的早期强度。现有研究大多数采用普通硅酸盐水泥，其凝结时间长，早期强度较低，可采用一定剂量速凝剂调整。硫铝酸盐水泥含有大量的 C4A3 矿物成分，具备早强、高强、高抗渗、高抗冻等优良特点，但会过快凝结。因此针对两者开展试验研究以获得 3D 打印适用的凝结及早期性能成为研究趋势。Sun 等人<sup>[23]</sup>采用了硫铝酸盐水泥结合葡萄糖酸钠缓凝剂调节凝固时间，将新拌混凝土的初凝时间控制在 20 到 60 分钟内。楚宇扬<sup>[24]</sup>进行了硅酸盐水泥与硫铝酸盐水泥复掺，硫铝酸盐水泥替换硅酸盐水泥 14wt%~20wt%，快硬硫铝酸盐水泥促凝效果明显，净浆凝结时间与砂浆凝结时间都得到了有效地降低，初凝时间可控制在 40~70 min 之间，满足打印建造需求，同时提升 1d 抗压与抗折强度约 20%。Soltan<sup>[25]</sup>使用铝酸钙水泥制备了纤维增强 3D 打印混凝土，获得材料



流动性系数为 1.2~1.4，满足 3D 打印的要求，同时具备较高的早期强度，7d 强度为 30~38 MPa。

针对新型水泥开展 3D 打印材料探索一直是增材建造的热点方向，Panda<sup>[26]</sup>采用反应性氧化镁基水泥(MgO-SiO<sub>2</sub>)，获得了高强度(28d 抗压强度 38.3~44.3MPa)、低坍落度(最大 10 mm)、高流动度(100~180 mm)以及良好打印性的打印水泥基材料。相较于普通硅酸盐水泥 1450°C 的煅烧温度，其煅烧温度仅为 700°C，生产过程中的碳排放量更小，并可从废物中提取研制。Weng<sup>[27]</sup>开发了磷酸镁钾水泥(MKPC)应用于 3D 打印混凝土，具备低碳环保的特点，含有质量分数 60wt%的粉煤灰与 10wt%的硅粉，具备快速硬化能力，初凝时间为 5~25 min。试验证明材料及配合比可用于 3D 打印，能够完成 20 层和 180 mm 高度的试件打印。除此之外，还有使用土基材料配合海藻酸盐等生物聚合物作为打印材料<sup>[28]</sup>，打印的试件生坯强度与传统土基材料的抗压强度接近，分别为 1.21±0.03 MPa 与 1.22±0.04 MPa。基于地质聚合物的材料同样适合用于 3D 打印。Xia 等人<sup>[29]</sup>所制备的基于地质聚合物的材料能够实现足够的可打印性，可用于基于粉末的 3D 打印工艺。文献<sup>[30]</sup>采用了地质聚合物作为 3D 打印的胶凝材料，进行了流变性研究，获得了材料配合比的静态屈服应力为 0.4~1.6 KPa。研究表明：静态屈服应力为 0.6~1.0 KPa 时，地质聚合物砂浆可以满足可挤出性能，开放时间为 10~50min，获得了较好的打印性能，成功打印了尺寸为高度 60 cm，宽度 35 cm 的柱结构。

## 2 辅助胶凝材料(SCM)

目前国内外最为广泛应用的辅助胶凝材料为粉煤灰、高炉矿渣、硅灰以及偏高岭土等，其内部均含有矿物质成分，在水泥水化过程中会引起二次水化反应，通常称为火山灰反应。这些材料部分替代胶凝材料可以改善 3D 打印混凝土拌合物与硬化后的力学性能，如抗压强度、抗折强度、抗渗性能等，同时节省了原材料成本。目前已经有较多研究采用 SCM 替代部分胶凝材料，取得了较好的打印效果与材料性能。

Chen<sup>[31]</sup>分析了 3D 打印混凝土中使用 SCM 的可行性，归纳总结使用硅粉和粉煤灰可代替高达 45wt%比例的水泥，获得了良好的可打印性能。Chen<sup>[32]</sup>使用掺量

1wt%~3wt%的偏高岭土，提升了水泥浆体的静态屈服应力，结构变形从 7.69%减小到 4.87%，获得良好的触变性，提升了 3D 打印混凝土结构的堆积稳定性。Panda<sup>[33]</sup>使用大量粉煤灰(45wt%~75wt%)替代了水泥，同时加入少量的硅灰，提高了材料的触变性。Nerella<sup>[34]</sup>研究表明：与仅使用水泥的 3D 打印混凝土材料相比，含有 55wt%水泥、30wt%粉煤灰和 15wt%硅微粉的胶凝材料的 3DPC 具有更高强度，同时硬化后力学性能呈现的各向异性幅度获得了较大程度的降低，界面粘结强度降低幅度更小。Sun 等人<sup>[23]</sup>使用水泥质量 64wt%矿粉、18wt%硅灰两种胶凝辅助材料，获得了 115~120 MPa 的 28d 力学强度，可打印性能优异，可打印单条未封闭结构 40 层，单条封闭圆形结构 80 层。马国伟等人<sup>[35]</sup>使用了胶凝材料质量 20wt%粉煤灰与 10wt%硅灰，获得了 41~55 MPa 的 28d 力学强度，打印以 8 mm 厚度每层累计 20 层，其垂直变形仅为 0.5%~2.8%，具备较好的可打印性能。Zhang 等人<sup>[36]</sup>使用了 2wt%硅灰替代了部分硅酸盐水泥，试件打印最大高度为 260 mm，生坯强度 1~7 MPa，获得了较好的可打印性能与力学性能。使用过程中可复合掺入两种掺合料形成胶凝材料三元体系，更好地改善拌合物性能与硬化后的材料性能<sup>[37]</sup>，超细矿物掺合料的掺入可以增加堆积密度，填充到水泥颗粒之间的孔隙，形成“滚珠效应”，改善材料的流动性。

### 3 骨料

骨料是 3D 打印混凝土材料的重要组成部分。骨料的类型、细度将会较大程度地影响材料的流变行为和可打印性能<sup>[38-41]</sup>。3D 打印混凝土因挤压成型，材料中最大粒径不能影响打印机绞龙旋转，同时需要适应喷嘴的尺寸。Kazemian<sup>[39]</sup>使用最大粒径为 2.36 mm，细度模数 2.9 的人工砂用作细骨料。Zhang<sup>[40]</sup>测试了三种粒径范围不同的细骨料，最大粒径与细度模数分别为 4.75 mm~2.61、1.18 mm~2.02、2.36mm~2.33，研究表明：骨料比例影响拌合物需水量，骨料含量从 1195kg/m<sup>3</sup> 增大至 1455kg/m<sup>3</sup>，为保持拌合物的可建造性，需水量从 183 kg/m<sup>3</sup> 降低至 170 kg/m<sup>3</sup>。

Ma G<sup>[35]</sup>提出了一种低碳环保的水泥混合物，发现铜尾矿替代部分骨料可以增强混凝土的流动性，但降低可建造性。铜尾矿替代人工砂 0~30wt%时，打印 20 层试件（每层 8mm）的最终高度为 117~140mm，但替代比例为 30wt%~50wt%时，最终高度分别为 83 和 72 mm。通过考虑流动性，早期刚度和形状保持性能，优化得出

铜尾矿代替 30%的天然砂为最佳配合比，获得了更好的力学性能和可建造性，试件垂直变形比例为 1.2%。

研究表明<sup>[42-48]</sup>：连续级配骨料制备的混凝土具有最佳的可建造性，可打印 40 层而不发生明显变形。Xiao 等人<sup>[1]</sup>使用粉碎废弃混凝土之后的再生砂作为 3DPC 的骨料，细度模数为 1.53，最大粒径 0.9mm，对比使用最大粒径同为 0.9mm，细度模数为 1.62 的天然砂，研究表明：用再生砂替代 25wt%天然砂之后，新拌材料生坯强度提高了 38%，且硬化后的力学性能没有明显降低，28d 抗压强度差异在 15%以内，证实了再生砂替代河砂的可行性。Ting 等人<sup>[19]</sup>使用再生玻璃作为 3D 打印混凝土骨料，研究表明：再生玻璃作为骨料的 3D 打印混凝土相比于砂骨料混凝土拥有更低的塑性黏度、静态以及动态的屈服应力，流动性更好，但抗压强度、弯曲强度和抗拉强度分别比砂骨料试件低 50%、30%和 80%。Zhang 等人<sup>[42]</sup>使用河砂作为骨料，开发了一种高触变性 3D 打印混凝土，研究表明砂与水泥的比例(S/C)从 0.6 增大至 1.5，流动度减小 6.0%~21.1%；S/C 为 1.2 与 S/C 为 0.6 时相比，材料的初始黏度和屈服应力分别增加 16.4%和 129.8%。Weng<sup>[49]</sup>采用不同级配的硅砂与天然砂，基于富勒汤普森理论和 Marson-Percy 模型获得最大密度和最小孔隙含量的水泥基 3D 打印材料，对比了均匀分级、间隙分级方法以及天然河砂级配。

#### 4 外加剂

增粘剂加入新拌合混凝土后会影响到材料的流变行为，增强材料的内聚力，从而提高触变性。常用的增粘剂(VMA)可分为羟丙基甲基纤维素类(HPMC)、多糖类、微二氧化硅类，以及纳米黏土类。

羟丙基甲基纤维素类可以降低屈服应力，提高塑性粘度，可预防在泵送挤压过程中的偏析，提高触变性。Soltan D G<sup>[25]</sup>研究表明：通过改变 HPMC 和水泥与粉煤灰的比例控制黏度，可以成功地将流动性调整 1.2 至 1.4，满足材料的可打印范围。加入胶凝材料 0.8wt%的多糖 VEA，在水胶比为 0.44 的情况下，增加了 3 倍的材料静态屈服应力<sup>[26]</sup>。

3D 打印混凝土需具备快速成型、硬化的工作性能要求。使用普通硅酸盐水泥凝结速度较慢，可以通过使用适当的促凝剂<sup>[27]</sup>，以实现快速凝固和硬化。目前广泛应

用的是通过复掺普通硅酸盐水泥与硫铝酸钙(CSA)、铝酸钙水泥(CAC)等。铝酸盐水泥具备快速硬化的特性,调节到合适的比例(替代水泥比例 0~10wt%)能够很好地控制凝结时间<sup>[28]</sup>。当使用以硫铝酸盐水泥等快速硬化水泥为主要成分时,可通过加入缓凝剂调节凝结时间,常用缓凝剂为酒石酸、葡萄糖酸钠<sup>[29]</sup>等。

## 5 其他改性材料

添加纳米材料可明显改善 3D 打印混凝土流变性、力学性能和耐久性。目前常见的用于打印混凝土的纳米材料为碳纳米管、石墨烯、纳米二氧化硅、纳米黏土等。Sun 等人<sup>[23]</sup>研究表明:用量 0.02wt%~0.05wt%的碳纳米管能提高 3DPC 的 3d 早期强度 33.6%,但对 7 d 和 28 d 强度的贡献较小,强度增加在 4.7%以内。Kruger 等人<sup>[41]</sup>研究发现,由于纳米二氧化硅的面积与体积之比很大,纯度高且直径小,即使是低掺量加入纳米二氧化硅,也可显著改变水泥基材料的流变性。添加 1%wt 可获得 8Pa/s 的再絮凝速率,显著提高了触变性。加入纳米二氧化硅后孔隙结构更加细化,使得 3DPC 有致密的微观结构,加速火山灰效应,可提升混凝土强度和耐久性。

纳米黏土可增加 3D 打印混凝土的塑性黏度和内聚力,与高效减水剂的组合可以得到具有低动态屈服应力、高触变性和高静态屈服应力的 3D 打印混凝土。目前较多学者使用纳米黏土作为触变剂来提升混凝土的可建造性。Zhang<sup>[42]</sup>通过添加 2wt%纳米黏土和硅粉至水泥基材料,促进了水泥浆的结构重建,在泵送挤压过程中具有良好的流动性(192.5~294 mm),较高的触变性(7500~11000Pa/s)和较高的力学强度(44~58MPa)。Soltan<sup>[25]</sup>使用 0.5wt%和 0.8wt%掺量的纳米黏土,配合铝酸钙水泥使用可降低流动度损失,60min 内流动性系数大于 1.0,保证了较好的可加工性。

## 6 综合技术分析

表 10 现有 3D 打印混凝土材料配合比归纳

研究者	材料组成							
	水泥	矿粉	硅灰	粉煤灰	细骨料	水胶比	减水剂	纤维
TTLE <sup>[43]</sup>	1.00	—	0.14	0.29	1.51	0.28	1-2	1.2
Chen M <sup>[44]</sup>	1.00	—	—	—	—	0.35	0.3	—

表 10 (续) 现有 3D 打印混凝土材料配合比归纳

研究者	材料组成							
	水泥	矿粉	硅灰	粉煤灰	细骨料	水胶比	减水剂	纤维
Panda <sup>[45]</sup>	1.00	—	0.1~0.25	0.9~4	1.35	0.4	—	—

Nerella <sup>[46]</sup>	1.00	—	—	—	2.22	0.42	0.75	—
Kazemian <sup>[39]</sup>	1.00	—	0.1~0.11	—	2.30	0.43	0.05~0.16	1.18
Kruger <sup>[47]</sup>	1.00	—	0.14	0.28	1.41	0.32	1.48	—
Sun X <sup>[23]</sup>	1.00	0.64	0.18	—	0.49	0.35	0.2	0.8~1.5
Zhang Y <sup>[42]</sup>	1.00	—	0.02-0.02	—	1.00	0.35	0.26	—
*Soltan <sup>[25]</sup>	1.00	0.19~0.33		0.29~0.7	0.25~0.91	0.18~0.63	0.3~0.8	2
Xiao <sup>[1]</sup>	1.00	—	—	—	0.75~1	0.35~0.385	0.75~0.83	—
Ting <sup>[48]</sup>	1.00	—	0.14	0.29	1.20	0.46	—	—
Weng Y <sup>[49]</sup>	1.00	—	0.50	1.00	0.50	0.30	1.3	—

注：水胶比为水的质量除以胶凝材料质量，其余组分以水泥为单位 1 的相对比例，减水剂、纤维单位均为%；  
\*研究中纤维以体积分数表示。

归纳现有 3D 打印混凝土材料配合比如表 10，综合上述技术文献和试验资料，本标准相关技术建议如下：3D 打印混凝土中骨料参数需要根据结构设计和 3D 打印机硬件参数确定。当确定掺加粗骨料时，砂率宜 0.4~0.6 范围，并由试配和打印试验调整和确定。3D 打印混凝土的水胶比、胶骨比及掺合料掺量可参考本技术标准表 2 的建议范围取值，并通过试验验证确定。

根据 3D 打印混凝土的工作性能、力学性能以及耐久性能要求，选用矿物掺合料、外加剂、纤维的品种和掺量，并通过试验确定。

## (二) 3D 打印混凝土材料湿态工作性能

混凝土湿态工作性能是保障其实现可 3D 打印增材制造的关键，主要包括可挤出性、可建造性和开放时间三个方面，不同性能之间存在关联。

### 1 可挤出性

打印混凝土材料的可挤出性能定义为新拌合混凝土通过料斗和泵送系统输送到喷嘴的能力，要求能够连续顺畅不中断地挤出才能满足智能增材建造的技术要求，该指标与流动度有密切相关的联系<sup>[34, 35]</sup>。马国伟等人<sup>[35]</sup>使用宏观试验方式，测试连续挤出 2000 mm 混凝土打印条带，观察断裂与堵塞等现象以评估材料的可挤出性能。Le<sup>[38]</sup>通过连续挤出打印条带总长度进行材料的可挤出性能的量化评估。研究表明：流动度需介于 150~230 mm 的大致范围，良好的流动性可确保混凝土在大部分打印建造设备中的可泵送性和可挤出性。

### 2 可建造性

可建造性描述了 3D 打印混凝土经过挤压堆叠成型后保持形状稳定以及抵抗自身重力变形的能力，为 3D 打印湿态混凝土早期重要力学性能指标。材料可建造性不佳，会导致建造过程中发生较大的变形或者坍塌。破坏模式可分为材料破坏、稳定性失效<sup>[27]</sup>和综合失效，如图 3 所示。材料破坏取决于重力与材料的屈服强度随时间变化的相对关系。在材料屈服应力大于重力效应的情况下，胶凝材料打印条带在沉积后不会变形，反之则会产生变形，直至屈服应力与重力效应平衡后停止变形。Perrot 等<sup>[28]</sup>建立起了结构堆积率和屈服应力与时间变化的联系，用以描述在结构堆积过程中材料内部应力的增长，建立了静态屈服应力与拌合物可建造性之间的关系。稳定性失效更多是由于打印物件的尺寸设计、几何形状引起的受力不平衡，从而导致的屈曲现象。

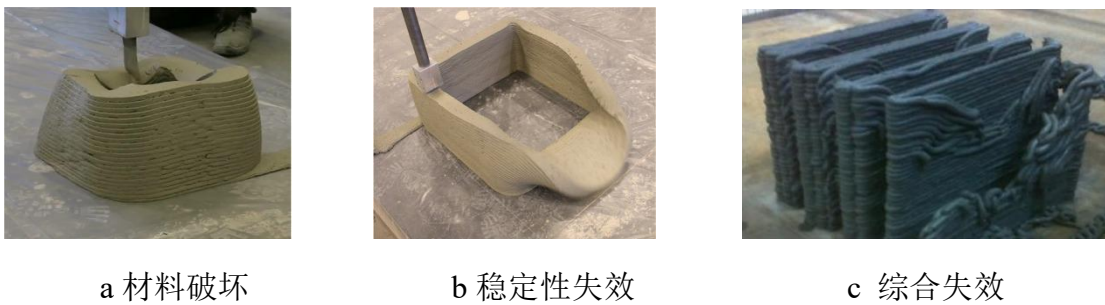


图 3 3D 打印混凝土建造过程破坏模式

可建造性指标的衡量方式在国内外研究并不统一，大体可分为两种。一种为直接宏观测试，通过打印一定层数的构件观测混凝土打印条带在湿态下的变形或者测试湿态混凝土堆叠打印的最大高度。马国伟等人<sup>[36]</sup>通过测试打印试件的整体垂直变形，比较了不同掺量的尾铜矿对可建造性的影响，研究发现尾铜矿代替 30%的天然砂可以获得良好的可建造性和较高的力学强度。Le 等人<sup>[43]</sup>将开放时间延长至 100 分钟，剪切强度为 0.55 KPa，混合物可以堆积多达 61 层，打印过程中没有发生明显的变形。通过打印过程中测试新拌和砂浆的变形大小评估了 3D 打印砂浆的可建造性，设计了变形监测装置，以监测堆叠时打印层的变形；另一种为采用基于流变学的间接测试方式，通过测试湿态混凝土材料的屈服应力，塑性黏度、触变环面积<sup>[15, 17, 31]</sup>间接评估建造性能。高屈服应力、高触变性以及低塑性粘度的材料更适合 3D 打印，能够获得良好的可建造性与可泵送性。Weng Y 等人<sup>[49]</sup>建立起材料屈服应力

与宏观最大打印高度的联系，如**错误!未找到引用源。**3c 所示。Zhang Y 等人<sup>[42]</sup>根据宾汉姆流体理论，阐述了可印刷混凝土材料的黏度、屈服应力和触变性的设计原则，研究了砂胶比(S/C)和开放时间对材料性能的影响，使用可见变形或塌陷来评估打印材料的可建造性，用流变性参数进行表征，证实了纳米黏土(NC)或硅灰(SF)能够提高材料的可建造性 150%和 117%。

### 3 开放时间

开放时间被定义为湿态混凝土维持可挤出状态的时间范围。开放时间不仅与混凝土的凝结时间相关，更准确的表示了材料的可加工性随时间变化的状态。混凝土的工作性能各参数存在复杂的交互机制，可泵送与可挤出性能与流动度呈现正相关，而可建造性与可挤出性存在需求矛盾。同时，开放时间内材料的可打印性能随时间变化过程，工作参数需要根据打印结构尺寸、建造规模统一协调设计。现阶段增材制造混凝土材料工作性能研究以水泥基材料的初凝时间作为材料的开放时间。Le<sup>[43]</sup>使用了剪切叶片装置测量剪切强度随时间的变化，进行对开放时间的参数表征。研究表明：适用于增材建造的混凝土材料初凝时间为 20~142 min。

### 4 综合技术分析

综合上述技术文献和试验资料，本标准相关技术建议如下：

混凝土坍落度、扩展度实测值与实测值与控制目标值的允许偏差应符合表 9 的规定。常规泵送 3D 打印混凝土坍落度控制目标值不宜大于 180mm，并应满足打印建造要求。坍落度经时损失不宜大于 30mm/h。

混凝土含气量实测值不宜大于 7%，与工程规定值允许偏差不宜超过±1.0%。

3D 打印混凝土干拌混凝土现场拌合，凝结时间按打印工艺设定，与目标值允许偏差不宜超过 20min。3D 打印混凝土湿拌混凝土预制拌合，凝结时间与运输流程与打印工艺有关，与目标值允许偏差不宜超过 10min。

3D 打印混凝土需具备流畅连续的条带可挤出性，连续打印条带长度大于条带宽度的 100 倍，沿打印方向条带宽度尺寸偏差不超过 5%。3D 打印混凝土需具备层叠施工，免模建造工艺所需的可建造性，与设计尺寸偏差不超过 5%。3D 打印混凝土各向耐久性能应满足设计要求，检验评定应符合 JGJ/T 193《混凝土耐久性检验评定

标准》的规定。

#### 四、标准中涉及专利情况说明

经检索，本标准所列技术内容没有涉及专利和知识产权的情况。

#### 五、产业化情况

21 世纪开始，3D 打印技术迈入了第三个阶段。2019 年全国已经以上海、浙江为中心形成了分布全国的打印产业规模，如图 4 所示。随着材料和设备的不断改进 3D 打印的成本逐渐降低，其速度、质量、精度和材料特性已经发展到可以实现打印配筋建造的程度。3D 打印不再是制造技术中的一个配角，而有能力取代整个生产环节，实现全数字化的生产过程。

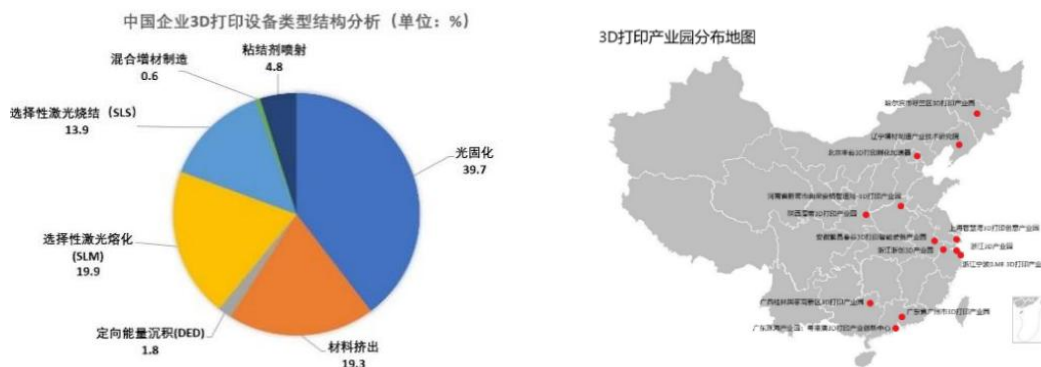


图 4 2019 年中国 3D 打印行业分析及企业分布

现有增材智能建造软件系统包括数字模型输入、切片设计、打印定位、路径输入、参数设定、路径优化、图形显示、后台监测等多种功能。用户可以使用软件包含的绘图软件进行设计，并导入打印软件完成打印。同时支持通用商业 3D 建模软件导入数字模型完成打印。打印软件系统支持断点打印，可以在打印过程中的任意位置停止、启动打印，对打印过程中的突发状况例如材料准备不足等问题进行解决，满足现场施工管理和布筋建造需求。同时打印系统根据设定打印流程进行打印头运



动轨迹动画模拟，可辅助开展打印工艺优化和智能建造管理。用户可以设置打印头挤料速度，移动速度和设备行走速度，控制打印材料的挤出宽度和打印质量，根据材料设计和数字模型需求实现增材混凝土结构智能建造，如图 5 所示。因此，现有增材建造混凝土可形成数字设计、预制加工的全产业链智能建造模式，3D 打印混凝土预混料是该产业链入口至关重要的环节，关系着智能建造产业的发展目标和总体技术水平。

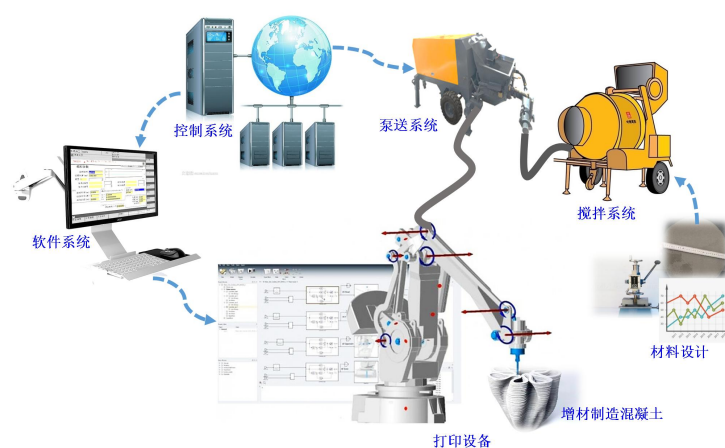


图 5 现有商用增材建造混凝土软、硬件系统

## 六、采用国际标准

无

## 七、与现行法律、法规、规章及相关标准的协调

本标准中内容均依照国内现行各类相关法律、法规、规章、标准予以要求。与现行相关法律、法规、规章及相关标准的协调一致，同时系统规范 3D 打印混凝土的材料加工制备、试验方法、检验规则和包装贮运，为增材智能建造技术信息化、预制化、装配化全产业链发展提供了技术基础，为 3D 打印混凝土预混料产品加工实施提供了必要支撑。

本标准与已发布中国工程建设标准化协会标准《混凝土 3D 打印技术规程》针

对 3D 打印混凝土配合比技术参数一致，如表 11 所示。

表 11 3D 打印混凝土配合比参数取值对比

	水胶比	胶骨比	辅助胶凝材料掺量
本标准配合比参数	0.28~0.46	0.52~0.87	10%~50%
T/CECS786-2020	0.28~0.46	0.52~0.87	10%~50%

本标准与中国建筑材料协会标准《3D 打印拌合物性能试验方法》T/CBMF184-2022、T/CCPA34-2022 针对 3D 打印混凝土拌合物性能测试方法基本一致，流动性能阈值参数如表 12 所示。

表 12 3D 打印混凝土拌合物流动性能阈值参数对比

本标准	流动性能阈值	
	≤5 mm	>5 mm
T/CECS786-2020	小于 5mm	5mm~16mm

本标准与中国建筑材料协会标准《3D 打印混凝土基本力学性能试验方法》T/CBMF183-2022/T/CCPA33-2022 针对 3D 打印混凝土混凝土性能测试方法一致。

## 八、重大意见分歧的处理依据和结果

在标准的编制过程中，广泛征求了行业相关单位和业内专家的意见和建议，主要针对标准规定中各项技术指标的要求范围做了深入研讨，各家单位和行业专家结合自身的工作经验和实验验证提出了作为数据支撑的有力依据，最终对标准要求达成一致。编制过程中对标准的主要内容并未产生重大意见分歧。

## 九、标准性质的建议说明

建议《3D 打印混凝土预混料》作为推荐性产品标准发布实施。

## 十、贯彻标准的措施建议

建议在本标准正式出台后，各生产厂家、科研单位、检测机构以及地方管理部门能够依据本标准中的相关规定对 3D 打印混凝土预混料进行统一的评价和管理。具体实施措施建议如下：

(1) 加大标准宣传力度，提高认知度，建立信息公共平台，将有参考价值的案例、好的做法和经验等在行业内部公开发布，引起有关部门领导和相关企业单位的重视，使相关单位能够积极主动的购买标准和资料、参加培训、结合本单位实际情况学习研究标准并准备贯彻实施标准。

(2) 标准归口单位进行贯标指导，组织标准宣贯培训班，由标准制定人员主讲。设立专门的答疑或咨询部门或网站，为贯标企业排忧解难，组织有关人员积极参加行业协会组织的各项活动，培训班等。及时了解标准制、修订信息。

(3) 鼓励行业相关企业成立标准贯彻实施小组，组员由标准化技术人员、产品主管设计人员、工艺主管设计人员、检验人员、车间技术人员等工作人员组成，进行明确的分工合作，适时组织标准宣贯会，使有关人员拥有标准、了解标准、熟悉标准，执行标准。产品主管设计人员、工艺主管设计人员、检验人员、车间技术人员、操作人员均须按照细则要求进行相应工作。

(4) 标准化技术人员全面负责贯标实施工作，跟踪服务对贯标中出现的技术问题协调处理作好贯标记录，并进行长期监督检查工作。

## 十一、废止现行有关标准的建议

无。

## 十二、其他应说明的事项

无。

## 参考文献

- [1] Xiao J, Zou S, Yu Y, et al. 3D recycled mortar printing: System development, process design, material properties and on-site printing[J]. *Journal of Building Engineering*. 2020, 32: 101779
- [2] 侯少丹, 肖建庄, 段珍华. 3D打印细石混凝土调配及其可打印性和力学性能[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25 (07) : 730-736.
- [3] RAHUL A V, MOHAN M K, Geert De Schutterand Kim Van Tittelboom. 3D printable concrete with natural and recycled coarse aggregates: Rheological, mechanical and shrinkage behaviour[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 125(1): 104311.
- [4] CHAO Zhang, JIA Zi-jian, WANG Xiang-gang, et al. A two-phase design strategy based on the composite of mortar and coarse aggregate for 3D printable concrete with coarse aggregate[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 54(1): 104672.
- [5] WANG Xiang-gang, JIA Lu-tao, JIA Zi-jian, et al. Optimization of 3D printing concrete with coarse aggregate via proper mix design and printing process[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 56(1): 104745.
- [6] LIU Hua-wei, CHAO Liu, BAI Guo-liang, et al. Influence of pore defects on the hardened properties of 3D printed concrete with coarse aggregate[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 55(1): 102843.
- [7] XIAO Jian-zhuang, LV Zhen-yuan, DUAN Zhen-hua, et al. Study on preparation and mechanical properties of 3D printed concrete with different aggregate combinations[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 51(1): 104282.
- [8] CHEN Yi-dong, ZHANG Yun-sheng, BO Pang, et al. Extrusion-based 3D printing concrete with coarse aggregate: Printability and direction-dependent mechanical performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 296(1): 123624.
- [9] 沈文斌. 粗骨料3D打印混凝土设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2022: 1-20.
- [10] 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 (06) : 141-144.
- [11] 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 (01) : 1-11.
- [12] 周林, 杜彩霞, 张鹏, 等. 3D打印混凝土的各向抗压性能研究[J]. *建筑结构*, 2022, 52 (06) : 85-89+75.
- [13] 孙晓燕, 乐凯笛, 王海龙, 等. 挤出形状/尺寸对3D打印混凝土力学性能的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23 (06) : 1313-1320.
- [14] SUN Bo-chao, QIANG Zeng, WANG Dian-chao, et al. Sustainable 3D printed mortar with CO2 pretreated recycled fine aggregates[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 134(1): 104800.
- [15] TAO Ding, XIAO Jian-zhuang, SHUAI Zou, et al. Hardened properties of layered 3D printed concrete with recycled sand[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 113(1): 103724.
- [16] NERELLA V N, HEMPEL S, MECHTCHERINE V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 205(1): 586-601.
- [17] SUN Xiao-yan, WANG Qun, WANG Hai-long, et al. Influence of multi-walled nanotubes on the fresh and hardened properties of a 3D printing PVA mortar ink[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247(1): 118590.

- [18] SANJAYAN J G, NEMATOLLAHI B, MING Xia, et al. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 172(1): 468-475.
- [19] TING G A, TAY Y D, QIAN Y, et al. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties[J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2019, 21(4): 994-1003.
- [20] YU Zhang, ZHANG Yun-sheng, WEI She, et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 201(1): 278-285.
- [21] WENG Yi-wei, LI Ming-yang, TAN M J, et al. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 163(1): 600-610.
- [22] DENG Zhi-cong, JIA Zi-jian, CHAO Zhang, et al. 3D printing lightweight aggregate concrete prepared with shell-packing-aggregate method - Printability, mechanical properties and pore structure[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 62(1): 105404.
- [23] Sun X, Wang Q, Wang H, et al. Influence of multi-walled nanotubes on the fresh and hardened properties of a 3D printing PVA mortar ink[J]. *Construction and Building Materials*. 2020, 247: 118590.
- [24] 楚宇扬, 徐金涛, 刘焯, 等. 快硬硫铝酸盐水泥在3D打印材料中的应用[J]. *建筑材料学报*. 2020: 1-11.
- [25] Soltan D G, Li V C. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing[J]. *Cement and Concrete Composites*. 2018, 90: 1-13.
- [26] Panda B, Sonat C, Yang E, et al. Use of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement mixes in 3D printing applications[J]. *Cement and Concrete Composites*. 2021, 117: 103901.
- [27] Weng Y, Ruan S, Li M, et al. Feasibility study on sustainable magnesium potassium phosphate cement paste for 3D printing[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 221: 595-603.
- [28] Perrot A, Rängeard D, Courteille E. 3D printing of earth-based materials: Processing aspects[J]. *Construction and Building Materials*. 2018, 172: 670-676.
- [29] Xia M, Sanjayan J. Method of formulating geopolymers for 3D printing for construction applications[J]. *Materials & design*. 2016, 110: 382-390.
- [30] Panda B, Tan M J. Experimental study on mix proportion and fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing[J]. *Ceramics International*. 2018, 44(9): 10258-10265.
- [31] Chen Y, Veer F, Copuroglu O, et al. Feasibility of Using Low CO<sub>2</sub> Concrete Alternatives in Extrusion-Based 3D Concrete Printing[Z]. Cham: Springer International Publishing, 2019: 269-276.
- [32] Chen M, Yang L, Zheng Y, et al. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up[J]. *Construction and Building Materials*. 2020, 252: 119090.
- [33] Panda B, Tan M J. Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application[J]. *Materials Letters*. 2019, 237: 348-351.
- [34] Nerella V N, Hempel S, Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 205: 586-601.
- [35] Ma G, Li Z, Wang L. Printable properties of cementitious material containing copper tailings for extrusion based 3D printing[J]. *Construction and Building Materials*. 2018, 162: 613-627.

- [36] Zhang Y, Zhang Y, Liu G, et al. Fresh properties of a novel 3D printing concrete ink[J]. *Construction and Building Materials*. 2018, 174: 263-271.
- [37] Jiao D, Shi C, Yuan Q, et al. Effect of constituents on rheological properties of fresh concrete-A review[J]. *Cement and Concrete Composites*. 2017, 83: 146-159.
- [38] 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, 45(8): 1221-1232.
- [39] Kazemian A, Yuan X, Cochran E, et al. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture[J]. *Construction and Building Materials*. 2017, 145: 639-647.
- [40] Zhang C, Hou Z, Chen C, et al. Design of 3D printable concrete based on the relationship between flowability of cement paste and optimum aggregate content[J]. *Cement and Concrete Composites*. 2019, 104: 103406.
- [41] Kruger J, Zeranka S, van Zijl G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 224: 372-386.
- [42] Zhang Y, Zhang Y, She W, et al. Rheological and harden properties of the high-thixotropy 3D printing concrete[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 201: 278-285.
- [43] Le T T, Austin S A, Lim S, et al. Hardened properties of high-performance printing concrete[J]. *Cement and Concrete Research*. 2012, 42(3): 558-566.
- [44] Chen M, Yang L, Zheng Y, et al. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up[J]. *Construction and Building Materials*. 2020, 252: 119090.
- [45] Panda B, Tan M J. Rheological behavior of high volume fly ash mixtures containing micro silica for digital construction application[J]. *Materials Letters*. 2019, 237: 348-351.
- [46] Nerella V N, Hempel S, Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 205: 586-601.
- [47] Kruger J, Zeranka S, van Zijl G. An ab initio approach for thixotropy characterisation of (nanoparticle-infused) 3D printable concrete[J]. *Construction and Building Materials*. 2019, 224: 372-386.
- [48] Ting G H A, Tay Y W D, Qian Y, et al. Utilization of recycled glass for 3D concrete printing: rheological and mechanical properties[J]. *Journal of material cycles and waste management*. 2019, 21(4): 994-1003.
- [49] Weng Y, Li M, Tan M J, et al. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model[J]. *Construction and Building Materials*. 2018, 163: 600-610.