

# Research and Application of Digital Construction Technology Based on 3D Printing

Zibo Zuo<sup>1,2</sup>, Yulin Huang<sup>1,2</sup>, Xiaojian Wu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Construction Group Co., Ltd., Shanghai

<sup>2</sup>General Engineering Institute of Shanghai Construction Group, Shanghai

Email: zuozibo@foxmail.com

Received: Oct. 11<sup>th</sup>, 2018; accepted: Oct. 30<sup>th</sup>, 2018; published: Nov. 7<sup>th</sup>, 2018

## Abstract

Three-dimensional printing can be used as a new technical means for the transformation and upgrading of the traditional construction industry. This paper focuses on the systematic application technology of 3D printing model in building digital construction. The factors affecting the efficiency and consumables of the 3D printing of the reduced size building model are discussed. The application direction of 3D printing in the construction stage of planning, design, bidding, construction, completion and maintenance is given. The recommended materials and printing parameters for the technology applied at these stages are introduced. Taking the complicated reconstruction of existing underground space as an example, some 3D printing model tests were carried out to analyze the feasibility and applicability of 3D printing models in engineering applications.

## Keywords

3D Printing, Digital Construction, Appearance Test, Printing Parameters, Material Selection

# 3D打印数字建造技术研究与应用

左自波<sup>1,2</sup>, 黄玉林<sup>1,2</sup>, 吴小建<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>上海建工集团股份有限公司, 上海

<sup>2</sup>上海建工集团工程研究总院, 上海

Email: zuozibo@foxmail.com

收稿日期: 2018年10月11日; 录用日期: 2018年10月30日; 发布日期: 2018年11月7日

## 摘要

3D打印可为传统建筑业的转型升级提供一种新的技术手段。系统研究了3D打印模型在建筑数字化建造

文章引用: 左自波, 黄玉林, 吴小建. 3D 打印数字建造技术研究与应用[J]. 土木工程, 2018, 7(6): 765-773.

DOI: 10.12677/hjce.2018.76092

中的应用技术,探讨了影响建筑缩尺模型3D打印效率和耗材的因素。给出了3D打印在规划设计、投标、施工、竣工和运维阶段的应用方向,以及技术应用的选材及打印参数建议。以复杂的既有地下空间竖向拓展改造工程为案例,开展了3D打印模型试验,分析了3D打印模型在工程应用的可行性和适用性。

## 关键词

3D打印, 数字建造, 外观试验, 打印参数, 材料选择

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

3D 打印是以三维数字模型为基础,通过打印机将材料逐层堆积生产出实体的新兴数字制造技术,该技术将对传统行业的生产模式产生深刻影响,为传统建筑业的转型升级提供一种新的技术手段。目前,3D 打印技术应用最为广泛和成熟的是打印缩尺度的模型[1]。由于打印的模型具有直观性,3D 打印技术最原始的应用是教学和无障碍沟通,如打印各类复杂人体组织、分子结构、机械结构等。其次 3D 打印模型被用于方案的模拟分析和优化,如医生在手术前通过打印模型进行手术方案的模拟,寻求最佳手术方案。之后,3D 打印模型被用于外观和几何验证。最近,3D 打印模型被用于性能试验,如通过打印不同类型结构的模型进行性能试验研究,获取最佳的设计结构,此外,该技术可用于打印相似模型,进行力学性能[2]、离心机模拟[3]和风洞试验[4]。

尽管 3D 打印模型已被广泛地应用于各领域,但在土木建筑领域的应用仍处于最原始的应用阶段,即打印模型的可视化应用,总之,当前 3D 打印模型技术在土木工程中的应用尚缺乏系统研究。

本文将系统研究 3D 打印模型在土木工程的应用技术,探讨影响建筑缩尺模型 3D 打印效率和耗材的因素,以及该技术在土木工程不同实施阶段(规划设计、投标、施工、竣工、运维)的应用方向和技术应用的选材及打印参数建议,并结合实际工程,进行打印试验,探索 3D 打印模型在工程应用的可行性。

## 2. 研究及应用现状

开展 3D 打印技术与应用的统计分析,如图 1 所示。由图可见,国际涉及 3D 打印技术研究较为广泛的领域是工程技术(17.7%)、机械工程(11.1%)和计算机科学技术(10.8%),其中土木建筑工程领域研究不足 1%,冶金工程技术、化学工程等其他领域研究占比均小于 3%。国内涉及 3D 打印技术研究较为广泛的领域是计算机科学技术(32.5%)、经济学(15%)和临床医学(10.7%),其中土木建筑工程领域研究占 3.2%,电子通信与自动控制技术、航空航天科学技术、法学等其他领域研究占比均小于 3%。需要说明的是图中 WOS 和 CNKI 分别表示 Web of Science 和中国知网数据库(数据截止 2017 年 12 月),计算机\*、电子通信\*和土木工程\*分别表示计算机科学技术、电子通信与自动控制技术和土木建筑工程。

对比国内外 3D 打印技术研究领域,由于 3D 打印技术起源与国外,国外在机械、计算机与自动化控制、材料等 3D 打印基础科学有大量研究,且工程应用的比例较高;尽管国内涉及 3D 打印技术在计算机科学技术领域占有较高比例,但在自动化控制、材料、机械等基础科学的研究比例不高,同时工程应用的占比较低。尽管与国外相比,国内在土木建筑工程领域对 3D 打印技术的重视程度较高,但国内外在土木建筑工程领域涉及 3D 打印技术的研究占比总体低于其他领域。

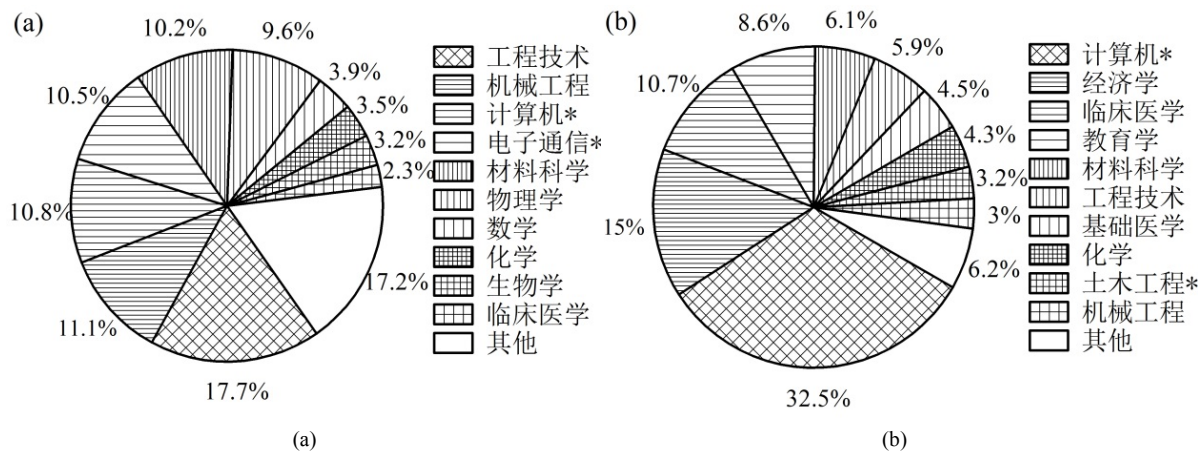


Figure 1. Analysis of research field for 3D printing technology; (a) WOS; (b) CNKI  
图 1. 3D 打印技术研究领域分析; (a) WOS 数据库; (b) CNKI 数据库

图 2 为 3D 打印技术研究及应用发展趋势, 由图可见, 与国内相比, 2013 年以前国际对 3D 打印技术的关注度较高, 但自 2013 年后, 国内对 3D 打印技术的关注度大幅度提高, 逐渐高于国外。

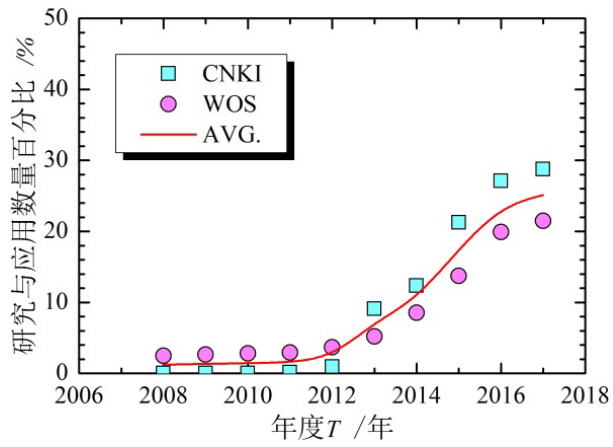


Figure 2. Research and development trend of 3D printing technology  
图 2. 3D 打印技术研究及应用发展趋势

总体而言, 国内外在 3D 打印技术的研究与应用呈现增长的趋势, 且自 2012 年后, 增长幅度显著增大。综合国内外 3D 打印技术的应用现状, 3D 打印技术在建筑业的应用占所有行业应用的比例不高, 尚未成规模, 目前主要应用于建筑装饰及模型等, 3D 打印实体建筑技术尚处于试验阶段, 仅有个别应用案例。

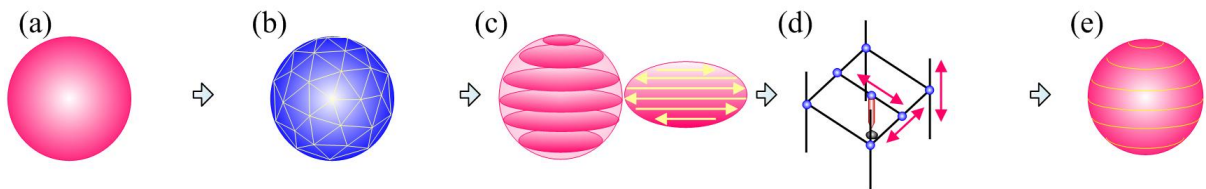
### 3. 基本原理及关键技术

#### 3.1. 基本原理

无论是从三维虚拟模型到打印缩尺建筑模型或打印建造实体建筑, 其基本原理相同, 均可概括为如图 3 所示, 具体如下:

a) 3D 数字模型的建立。根据设计概念建立 3D CAD 模型或 BIM 模型, 模型必须为三维基于构造实体几何(Constructive-Solid-Geometry, CSG)或边界表示(Boundary-Representation, B-rep)的模型[5]。通常包

括两种建模的方法[6]: 建筑参数化建模软件(如 Revit、3dmax、3D CAD、Solidworks、Pro-E、Catia、Rhino 等)直接建模, 以及逆向技术建模(如通过三维扫描等获取点云数据, 构造出三维模型)。



**Figure 3.** Basic principle of 3D printing  
**图 3.** 3D 打印建造原理

- b) 通用格式转化。将 BIM 模型转化为通用 3D 打印数据交互文件, 最为流行的格式为 STL (Stereolithography)文件, 该文件为一系列三角形面的坐标列表, 其边缘完全接触以形成表面模型[7]。
- c) 切片及路径规划[5] [7]。通过数据软件处理, 采用一系列平行、等间距的二维模型进行拟合, 即分层切片处理; 将切片得到的层片轮廓转化为打印喷嘴的运行填充路径, 即层片路径规划[8]。
- d) 生产机器语言。生产机器能识别的语言, 如 G, H or M-codes 等[5] [9]; 经过步骤(c)处理生成机械运动指令。
- e) 打印模型或实体建筑。在建筑 3D 打印系统的控制下打印头按照规划的路径进行层层叠加打印, 最终形成建筑产品[5]。

**3.2. 3D 打印的影响因素**

影响建筑缩尺模型 3D 打印效率和耗材的影响因素如表 1 所示, 主要包括: 打印前准备时间、被打印物体体量、被打印物体复杂度、打印设备精度、打印强度、内支撑形式、打印方向、后处理时间等影响因素[10]。

**Table 1.** Key factors affecting 3D printing models  
**表 1.** 影响 3D 打印模型的关键因素

| 关键因素     | 定义及描述                                                           |
|----------|-----------------------------------------------------------------|
| 打印前准备时间  | 3D 模型建立及转化、打印前固定、设备调试等所需时间                                      |
| 被打印物体体量  | 与变化横截面积和高度有关                                                    |
| 被打印物体复杂度 | 复杂程度越高, 打印头移动路径越长、后处理部位越多且时间越长                                  |
| 打印设备精度   | 包括机械定位精度、层厚精度、成型精度; 打印装置确定后, 成型精度与层厚精度相关, 层厚精度越高, 成型精度越高、打印时间增加 |
| 打印强度     | 打印支撑的填充率, 打印强度越高, 材料用量越多、打印时间越长                                 |
| 内支撑形式    | 内支撑形式有多种, 其影响打印强度和打印时间                                          |
| 打印方向     | 打印方向不同, 会引起支撑结构不同, 影响打印时间和耗材质量                                  |
| 后处理      | 打印结束后需处理被打印物体表面以及多余支撑结构, 粘合和上色                                  |

研究表明, 被打印物体体量、被打印物体复杂度和打印强度均与打印耗材质量及打印时间呈正相关关系; 打印精度与打印耗材质量及打印时间呈负相关关系, 不同的打印内支撑形式(线性、十字、同心、蜂巢(honeycomb)、钻石型)、打印方向等对打印耗材质量及打印时间均匀影响; 后处理主要包括拆支撑物和表面处理, 表面处理方法包括机械、化学、电化学和现代表面处理, 不同的处理方法具有适用性, 针对不同的材料和工艺, 应选取合理的处理方法; 3D 打印实际应用中应合理的确定各影响因素。

3.3. 应用方向及选材

表 2 为 3D 打印缩尺模型技术在土木工程不同实施阶段(规划设计、投标、施工、竣工、运维)的应用方向,主要包括 10 种类型,分别为:概念性外观试验、创意性外观试验、结构组装试验、结构力学试验、方案展示试验、施工准备试验、实施外观试验、竣工外观模型、竣工数字模型和运维外观试验。

表 3 给出了不同实施阶段 3D 打印缩尺模型应用选材和打印参数建议,可根据不同的实施阶段选出不同的打印材料和不同的打印参数。推荐的材料包括:聚合物、金属、陶瓷和石膏粉末等。打印参数包括打印模型的尺寸、精度和强度。

**Table 2.** Possible applications of 3D printing models in construction  
**表 2.** 3D 打印缩尺模型在土木工程不同实施阶段的应用方向

| 实施阶段 | 3D 打印缩尺模型应用方向 | 应用目的                | 编号 |
|------|---------------|---------------------|----|
| 规划设计 | 概念性外观试验       | 验证设计模型的合理性          | D1 |
|      | 创意性外观试验       | 设计创意的可视化和无障碍沟通      | D2 |
|      | 结构组装试验        | 验证设计结构的可装配性         | D3 |
|      | 结构力学试验        | 相似力学试验及结构优化         | D3 |
| 投标   | 方案展示试验        | 施工方案展示,提升中标率        | I  |
| 施工   | 施工准备试验        | 方案的无障碍沟通            | C1 |
|      | 实施外观试验        | 施工方案模拟与优化           | C2 |
| 竣工   | 竣工外观模型        | 3D 打印模型纪念品,补充企业激励措施 | F1 |
|      | 竣工数字模型        | 归档形成数字博物馆,后续推广应用    | F2 |
| 运维   | 运维外观试验        | 后期运维可视化管理           | O1 |

**Table 3.** Choice of materials and parameters for 3D printing models in construction  
**表 3.** 3D 打印缩尺模型在不同实施阶段应用的选材和打印参数建议

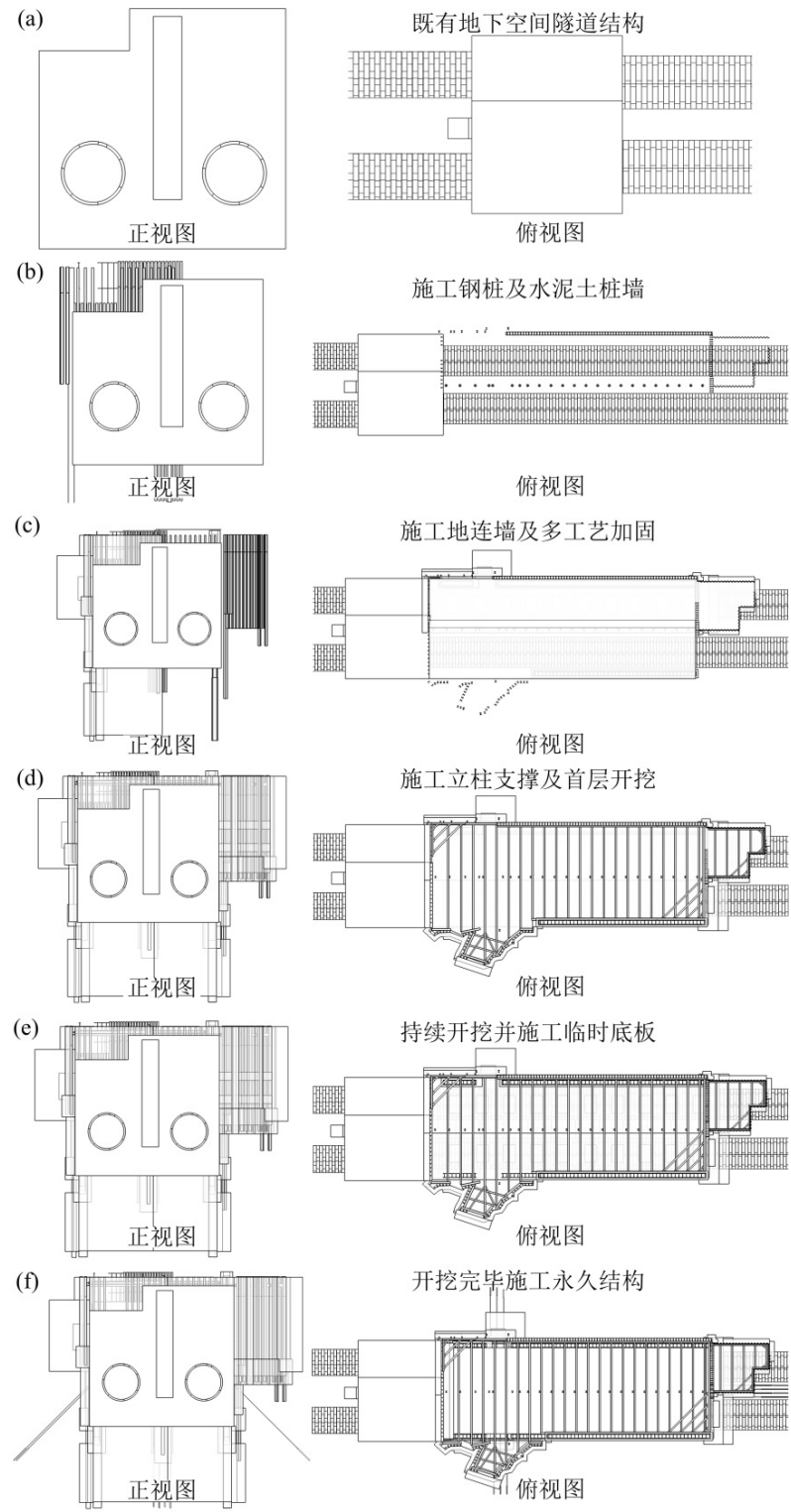
| 编号 | 材料选择建议                                    | 打印参数尺寸 D、精度 A、强度 S |
|----|-------------------------------------------|--------------------|
| D1 | 光敏树脂、PLA、ABS 等                            | 中-低-低              |
| D2 | ABS、透明 PC 等                               | 中-低-中              |
| D3 | PLA, ABS 等                                | 中-高-中              |
| D3 | 碳纤维 PA、PC、热固性塑料、合金、PPFS、PEEK、Endur、不锈钢、陶瓷 | 高-高-高              |
| I  | 光敏树脂、蓝蜡等                                  | 中-中-低              |
| C1 | PLA、ABS、光敏树脂等                             | 中-低-低              |
| C2 | PLA、ABS, 细部光敏树脂等                          | 中-低-低              |
| F1 | 光敏树脂、弹性塑料 EP、PETG、不锈钢、有色金属等               | 中-中-低              |
| F2 | 光敏树脂、蓝蜡、石膏粉末等                             | 中-低-低              |
| O1 | 光敏树脂、蓝蜡、石膏粉末等                             | 中-低-低              |

4. 工程应用

4.1. 背景工程

某工程需要在已建双线地铁上方进行地下空间拓展,施工大型建筑综合体,如图 4(a)所示。为了保证已建地铁和新建建筑施工中的安全,拟开发新型施工工艺,即既有地下空间竖向网络化拓建改造施工

工艺，如图 4 所示。



**Figure 4.** Vertical networked extension and reconstruction technology for underground space

**图 4.** 既有地下空间竖向网络化拓建改造施工工艺

该工艺主要包括图 4(b)施工预制型钢桩及铣削水泥土搅拌桩墙、图 4(c)施工地连墙及注浆等多工艺加固、图 4(d)局部加固及施工立柱支撑、图 4(e)开挖并施工临时预制混凝土底板、图 4(f)施工永久结构等关键技术步骤。

针对复杂的竖向网络化拓建改造施工工艺，为了交流更直观和无障碍沟通，采用 3D 打印技术进行工艺流程推演，实现工艺方案的优化。

4.2. 应用效果及分析

工程应用中所使用建模软件为 AutoCAD 3D，所采用的打印设备包括桌面型 3D 打印机 Cube Pro Duo 和工业级立体光固化 3D 打印设备(图 5)，其中立体光固化设备主要技术参数如表 4 所示。



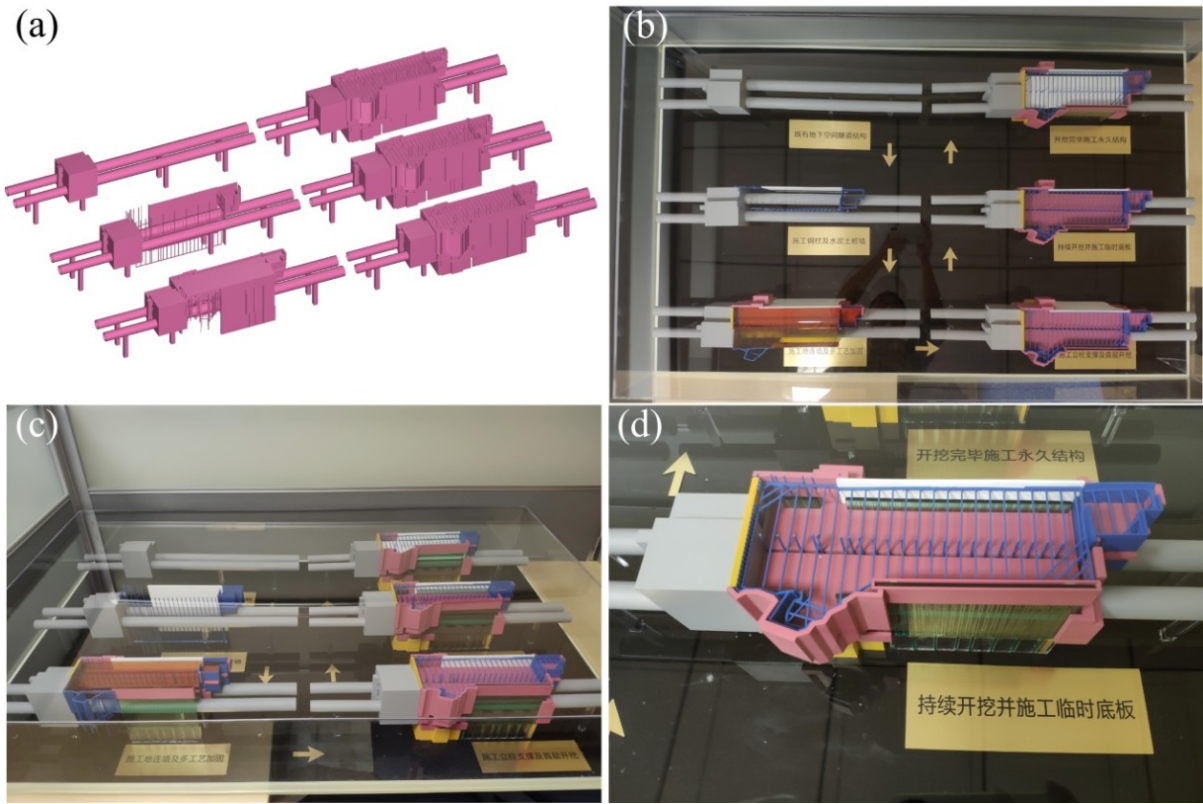
Figure 5. 3D printer based on stereo lithography apparatus  
图 5. 立体光固化 3D 打印设备

Table 4. Key performance parameters of 3D printer based on stereo lithography apparatus  
表 4. 立体光固化 3D 打印设备主要技术参数

| 设备参数       | 指标                                    |
|------------|---------------------------------------|
| 成型材料       | 光敏树脂                                  |
| 范围/mm      | 600 × 600 × 400                       |
| 成型精度/mm    | ±0.1 (L ≤ 100 mm)或±0.1%L (L > 100 mm) |
| 最小壁厚/mm    | 0.6                                   |
| 分层厚度/mm    | 0.05-0.25                             |
| 数据接口       | STL                                   |
| 激光功率 mW    | 500 或 1000                            |
| 光斑直径/mm    | 0.12-0.20                             |
| 扫描速度/(m/s) | 6~10                                  |

通过 3D 打印不同工况的模型试验，进行工艺流程推演研究，实现了工艺方案的优化，形成了优化后的既有地下空间竖向网络化拓建改造施工工艺，如图 6 所示。由图可见，3D 打印技术可实现施工方案更加直观地交流和无障碍沟通，以此指导背景工程的施工。由此可见，3D 打印模型在土木工程

造中的应用，具有较好的适用性。



**Figure 6.** Application display using 3D printing: (a) 3D Digital model; (b) Printed models (Top view); (c) Printed models (Side view); (d) Details of printed model

**图 6.** 3D 打印技术应用效果: (a) 3D 数字模型; (b) 打印模型俯视; (c) 打印模型侧视; (d) 模型细部

### 5. 结语

针对 3D 打印模型技术在土木建筑领域应用缺乏的问题，系统研究了 3D 打印模型在建筑数字化建造中的应用技术。结论如下：

- 1) 探讨了影响建筑缩尺模型 3D 打印效率和耗材的因素，包括被打印物体体量、被打印物体复杂度、打印设备精度、打印强度、内支撑形式、打印方向等，实际应用中应合理地确定各因素对应的参数。
- 2) 给出了 3D 打印在规划设计、投标、施工、竣工和运维阶段的应用方向，包括概念性外观试验、结构力学试验、运维外观试验等 10 类应用，并阐述了 3D 打印应用的选材及打印参数建议。
- 3) 以复杂的既有地下空间竖向网络化拓建改造施工为案例，开展了 3D 打印模型试验，试验结果表明，3D 打印模型在土木工程的数字建造中的应用，具有较好的适用性。

### 基金项目

国家重点研发计划项目(2018YFC0705800)，上海市“科技创新行动计划”社会发展领域项目(16DZ1201600)，住房和城乡建设部项目(2017-K8-066)，上海建工重点科研项目(16JCYJ-02)。

### 参考文献

- [1] Gibson, I. and Shi, D.P. (1997) Material Properties and Fabrication Parameters in Selective Laser Sintering Process.

- Rapid Prototyping Journal*, **3**, 129-136. <https://doi.org/10.1108/13552549710191836>
- [2] Barak, M.M. and Black, M.A. (2018) A Novel Use of 3D Printing Model Demonstrates the Effects of Deteriorated Trabecular Bone Structure on Bone Stiffness and Strength. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, **78**, 455-464. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.12.010>
  - [3] Liang, T., Knappett, J.A., Bengough, A.G. and Ke, Y.X. (2017) Small-Scale Modelling of Plant Root Systems Using 3D Printing, with Applications to Investigate the Role of Vegetation on Earthquake-Induced Landslides. *Landslides*, **14**, 1747-1765. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0802-2>
  - [4] Kroll, E. and Artzi, D. (1995) Enhancing Aerospace Engineering Students' Learning with 3D Printing Wind-Tunnel Models. *Rapid Prototyping Journal*, **17**, 393-402. <https://doi.org/10.1108/13552541111156522>
  - [5] Buswell, R.A., Thorpe, A., Soar, R.C. and Gibb, A.G.F. (2008) Design, Data and Process Issues for Mega-scale Rapid Manufacturing Machines used for Construction. *Automation in Construction*, **17**, 923-929. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.03.001>
  - [6] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1-10.
  - [7] Hager, I., Golonka, A. and Putanowicz, R. (2016) 3D Printing of Buildings and Building Components as the Future of Sustainable Construction. *Procedia Engineering*, **151**, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.357>
  - [8] Zuo, Z.B., Gong, J. and Huang, L.Y. (2017) Performance of 3D Printing in Construction by Using Computer Control Technology. *Proceedings of the 7th International Conference on Computer Engineering and Networks*, Shanghai, 22 July-23 July 2017. <https://doi.org/10.22323/1.299.0048>
  - [9] Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F. and Thorpe, T. (2012) Developments in Construction-Scale Additive Manufacturing Processes. *Automation in Construction*, **21**, 262-268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
  - [10] 李荣帅. 基于熔融沉积制造建筑 3D 打印效率的关键影响因素[J]. 理化检验-物理分册, 2016, 52(10): 675-681.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [hjce@hanspub.org](mailto:hjce@hanspub.org)