

装配式建筑构件免模少撑施工技术分析

李健文

(广州建筑股份有限公司, 广东 广州 510000)

摘要 本文对装配式建筑构件中的三种免模少撑施工技术进行了详细分析, 分别是手工木模板、数控泡沫模板和 3D 打印聚合物基模板。通过比较这些方法在精度、成本和时间消耗方面的性能, 发现 3D 打印技术在高精度和高重复使用性方面具有显著优势。研究表明, 尽管 3D 打印的初始成本较高, 但在大规模生产中具有经济性。本文还提出了优化设计策略, 以期对提高 3D 打印技术在装配式建筑中的应用效果有所裨益。

关键词 装配式建筑; 免模少撑施工技术; 3D 激光扫描

中图分类号: TU767

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)09-0007-03

装配式建筑因其施工速度快、质量稳定和成本可控等优点, 正逐渐成为建筑行业的重要趋势。在装配式建筑中, 免模少撑施工技术的应用对提升施工效率和构件质量起到至关重要的作用。传统的模板制作方法主要有手工木模板和数控泡沫模板, 这些方法在实际应用中存在一定的局限性。近年来, 3D 打印技术的快速发展为免模少撑施工提供了新的解决方案。本文旨在通过对比分析三种免模少撑施工技术的性能, 探讨 3D 打印技术在装配式建筑中的应用潜力, 并提出相应的优化设计策略, 以期提高模板制作的效率和经济性。

1 研究方法

1.1 示范房项目

2018 年夏季, 在中国太阳能十项全能竞赛期间, 设计并建造了示范房。建筑设计的灵感来自荷花, 这是纯洁和优雅的自然象征。其自由形态的花瓣被抽象为弯曲的墙壁, 其圆形平面形状合理地详细设计为由弗兰克·劳埃德·赖特有机设计概念启发的住宅布局。通过在建筑设计和施工中使用免模少撑技术, 该项目旨在展示一栋创新、吸引人且可持续的房屋。自由形态的示范房由 12 个抛物线形状的外墙组成^[1]。每个面板墙由玻璃纤维增强混凝土 (GFRC) 外壳和玻璃纤维增强石膏 (GFRG) 内壳组成, 两者之间有一个填充有钢骨架和绝缘材料的腔体。这些面板墙形状相似但尺寸不同, 每个都独一无二。屋顶由八块双曲面复合板构成, 与外墙面板相同的结构^[2]。

1.2 定制构件的制造

示范房最初的目标是在现场直接打印复杂的有机形态, 以展示免模少撑技术可以实现房屋的大规模定制。考虑到定制构件的低重复性、紧迫的施工进度

和有限的预算, 项目管理者决定采用手工和数控模板制作方法来生产建筑构件。免模少撑方法通过对一个 GFRC 墙板的预制进行了样本模板的分析和比较^[3]。

使用免模少撑制作的聚合物基模板在预制一个 GFRC 墙板的过程中得到了应用, 用于概念验证。大面积增材制造 (BAAM) 系统采用 20% 碳纤维强化 ABS 聚合物作为模板材料。模板打印完成后, 采用数控铣床对模板表面进行抛光。本研究开发并测试了另外两种模板制作方法, 以量化比较它们与免模少撑技术之间的性能。手工木模板制作方法用于制造壳体面板墙。首先使用数控机床将名义木板切割成数百个成品件。木工随后组装小木片以形成 3D 形状, 并使用环氧灰泥完成模板, 以获得光滑的 3D 表面。数控机床使用两步 (切割和铣削) 为屋顶板制造泡沫模板^[4]。表 1 总结了示范房项目中使用的三种模板制作方法。

表 1 示范房项目中使用的三种模板制作方法

参数	制作方法
手工木模板	数控泡沫模板
应用	所有壳体墙板
机器	数控切割机、木工工具
材料	木板、纤维板、环氧灰泥

1.3 3D 激光扫描测量和形态表面精度比较

3D 激光扫描是一种基于活动范围的反向工程技术, 用于测量目标的特征尺寸。该过程通过脉冲激光照射目标, 并使用传感器检测反射的脉冲光来生成 3D 数字表示。本研究使用 3D 激光扫描来检查三种方法的模板表面的最终精加工, 并通过数字重建其实际建造模型, 以获得精度分析的测量参数^[5]。

3D 激光扫描设备的测量公差在毫米数量级，并具体范围误差由选定的扫描仪型号决定。本研究使用手持式扫描仪进行表面测量和数字重建木模板。使用地面激光扫描仪（TLS）进行泡沫和免模少撑模板的表面扫描，其范围误差小于 1 mm。

三种模板的精度通过实际建造模型与设计模型之间的偏差来衡量。使用全面的计量软件进行质量检验，生成了尺寸、形状和位置偏差分析，用图形和数据表明不同模板制作方法的精度。

2 三种模板制作方法的流程

2.1 手工木模板制作方法

许多预制项目使用木模板，特别是对于由于低重复性或复杂形状而不经济适用于钢模板的模板。示范房的外墙采用了这种方法。手工木模板制作方法结合了传统和现代技术。根据形状的复杂程度，手工木模板制作方法是一个劳动和设备密集型的过程，可以与船舶木工相比较。该方法包括四个步骤：数字建模、数控切割、模板制作和表面处理，如图 1 所示。下面详细描述每个步骤。

步骤 1：数字建模。首先是从文件到工厂的转化。墙板表面的犀牛模型转化为许多二维纵向框架组合。所有框架细节（x、y 和 z 坐标）都被标记。然后，从犀牛软件直接将二维计算机辅助设计（CAD）数据导出到数控机床。

步骤 2：数控切割。使用数控机床从木材、纤维板或胶合板上切割出纵向框架。对于示范房，每个墙板的模板约包含 30 个纵向框架。

步骤 3：模板制作。模板制作包括框架和镶板。首先将纵向框架在标有坐标点和线的平面上对齐，像船舶的梁一样夹紧在一起。一旦骨架做好，只需要对切口角度进行微调。然后，将胶合板沿纵向框架的曲线贴合。这些胶合板由同一块木材制成，以确保均匀的弯曲力。对于表面的扭曲，需要更多的胶合板片。当创建了船体 / 曲面后，胶合板的膨胀引起了边缘和甲板的开裂，需要额外的调整。

步骤 4：表面处理。表面处理包括抹灰、打磨和油漆。整个船体 / 曲面的表面都用 30 mm 环氧灰泥 / 腻子修补。灰泥干燥后，表面进行打磨。此外，使用玻璃纤维胶带加固边缘和角落。由于曲角和小的死角，打磨是具有挑战性的，因此某些区域需要多次涂抹环氧灰泥以获得完美的平滑表面。最后，用于脱模的蜡层涂覆在表面。蜡层固化 24 h 后，模板即可用于制作玻璃纤维增强混凝土（GFRC）墙板。

2.2 数控泡沫模板制作方法

与墙板类似，屋顶板也是所有独特的，并且是最终的 GFRC 所需材料。这些板件使用刚性 EPS 泡沫作为模板材料，通过数控模具进行铸造。这种数控泡沫模板制作过程包括数字建模、数控铣削和表面处理，如图 2 所示。

步骤 1：数字建模。工程师通过数控软件将数字屋顶板模型转换为 CNC 机器所需的格式。

步骤 2：数控铣削。大型数控机床在两个阶段对坚硬泡沫块进行铣削：首先进行粗铣削，然后进行精细铣削。为减少废料，三块泡沫用于一个整体块的 CNC

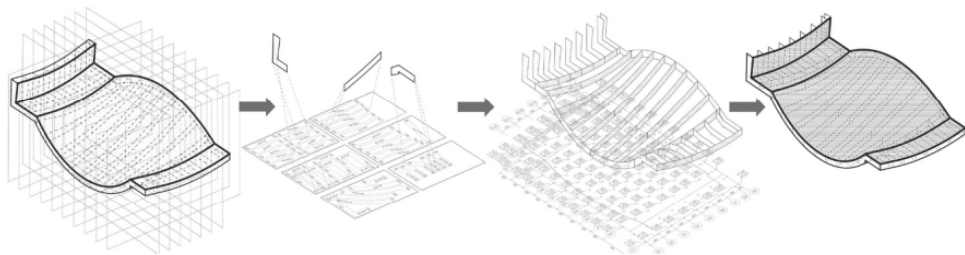


图 1 手工木模板制作过程：数字建模、数控切割、模板制作和表面处理

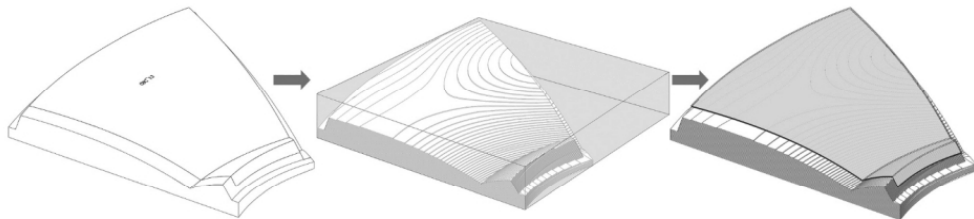


图 2 数控泡沫模板制作过程：数字建模、数控铣削和表面处理

铣削制造一个构件。在粗铣削过程中，第一阶段的每个铣削通道深度约为 10 ~ 15 mm，而精细铣削过程的每个铣削厚度约为 5 mm。两个阶段的铣削过程大约需要 12 h。

步骤 3：表面处理。处理过程包括手工涂覆 30 mm 环氧灰泥，然后打磨顶层以达到完美的光滑度。这一步与手工木模板制作方法中的步骤相同。

2.3 3D 打印聚合物基模板制作方法

为了分析 3D 打印方法，打印了外部 GFRC 壳体墙板的样品模板，如图 3 所示，3D 打印聚合物基模板制作方法包括四个步骤：（1）犀牛中的数字设计建模；（2）根据 3D 打印工艺调整模型；（3）3D 打印；（4）CNC 打磨。通过商业 BAAM 服务提供商，制作了概念验证模板。这被认为是大型 3D 零件的经济有效制造。

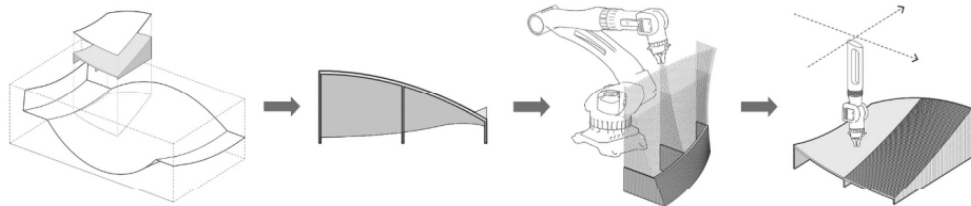


图 3 3D 打印聚合物基模板制作的过程：设计建模、模型调整、免模少撑和 CNC 打磨

步骤 1：设计建模。该过程始于选择在犀牛中设计的 GFRC 外墙板的部分模型。为了确保模板的结构稳定，必须横向添加额外的支撑结构。由于打印成为一个外壳，因此必须保证模板有足够的支撑结构。数字模型以 STL 文件格式导出，这是 CAD 软件的本地格式。STL 文件导入到一个类似于 CNC 刀具路径生成软件的分层软件中，这是专门为与 BAAM 打印机模型配合使用而设计的自定义软件。最后，在内置的 BAAM 软件中模拟免模少撑过程，以确保开发的工具路径可行。

步骤 2：免模少撑。在这一步骤中，通过将 ABS 聚合物与 20% 碳纤维组成的材料层层堆积，构建了样品模板。挤出沉积（ED）是通过利用低熔点、低畸变和各向异性机械性能的聚合物材料的关键过程。BAAM 系统采用龙门式系统进行操作，并且以一系列层次沉积熔融复合物。

步骤 3：CNC 打磨。打印后，由于层层挤出沉积而产生的粗糙表面，需要通过 CNC 机器进行打磨。与其他方法不同，打磨后的聚合物基模板可以无需抹灰即可从模板中脱模。将样品模板的一半铣削至实际建造状态，另一半保持原始设计状态。在设计模型和实际建造模型之间的定量比较证实了免模少撑模板的精度。

3 结束语

通过对三种模板制作方法的综合分析，得出以下结论：

1. 精度：3D 打印聚合物基模板在精度方面表现最佳，经过 CNC 打磨后的平均偏差为 1.29 mm，显著优于手工木模板和数控泡沫模板。

2. 经济性：尽管 3D 打印模板的初始成本较高，但在高重复使用的情况下，其每次浇筑的平均成本最低，为 24.67 元 / m²，适合大规模生产。

3. 时间消耗：3D 打印方法在时间消耗方面具有显著优势，制作时间约为 1.1 h / m²，大大低于其他两种方法。

4. 优化策略：为了充分发挥 3D 打印技术的优势，建议在设计过程中减少定制构件的变化，并增加这些

构件的数量，以提高模板的制作效率和经济性。同时，对于低重复性的定制构件，仍可以结合使用泡沫和木模板制作方法，以达到最佳效果。

综上所述，3D 打印技术在装配式建筑中的应用前景广阔，通过优化设计和合理选择模板制作方法，可以显著提高建筑构件的质量和生产效率。

参考文献：

- [1] 陈则威. 住宅建筑中装配式构件免模少撑的施工技术研究 [J]. 居舍, 2024(19):43-45,49.
- [2] 林国潮, 凌礼贤, 柴吉元, 等. 多方向阈值下的装配式建筑构件吊装施工场景三维重建方法 [J]. 结构工程师, 2024,40(03):172-178.
- [3] 王思磊. 装配式建筑预制构件应用难点质量控制措施 [J]. 建筑技术开发, 2024,51(06):99-101.
- [4] 王胜男, 黄龙飞, 王俊飞. BIM 技术在装配式建筑预制构件设计中的应用 [J]. 模具制造, 2024,24(06):193-195,198.
- [5] 池思源, 任或, 张雅杰. 预制预应力免模少撑楼盖体系在“一带一路”工程中的应用 [J]. 福建建筑, 2023(06):108-111.