

3D 打印模板在大跨度复杂外形预制结构中的应用*

李佳宇, 徐 森, 王洪新

(上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200032)

[摘要] 复杂外形结构给模板工程带来新的挑战,传统模板工艺难以满足设计要求且成本高昂。3D 打印技术为此提供了经济可行的解决方案。依托某大跨度复杂外形预制结构工程,系统研究了 3D 打印模板制作技术并给出具体方案,成果已成功应用于工程实践。借助 ABAQUS 有限元软件展开浇筑工况下数值模拟,结果表明,3D 打印模板强度与刚度均满足要求。现场采用锤击法进行无损检测并进行荷载试验,结果表明,屋架内部材料密实且构件表面未出现明显裂缝。

[关键词] 模板;预制;3D 打印技术;数值模拟;试验

[中图分类号] TU755

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0072-07

Application of 3D Printing Formwork in Large-span Complex Shape Prefabricated Structures

LI Jiayu, XU Sen, WANG Hongxin

(Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The complex shape structure brings new challenges to formwork engineering. The traditional formwork process is difficult to meet the design requirements and is costly. 3D printing technology provides an economical and feasible solution for this. Based on a large-span complex shape prefabricated structure project, the 3D printing formwork production technology is systematically studied and the specific scheme is given. The results are successfully applied to engineering practice. With the help of ABAQUS finite element software, the numerical simulation under pouring conditions is carried out. The results show that the strength and stiffness of 3D printing formwork meet the requirements. The hammering method was used for non-destructive testing and load test. The results showed that the internal materials of the roof truss were dense and no obvious cracks appeared on the surface of the components.

Keywords: formwork; prefabrication; 3D printing technology; simulation; tests

0 引言

混凝土是建筑行业最主要的材料之一,因其可塑性好,被广泛应用于各种造型、满足多种功能的建筑中。现代混凝土技术诞生已超过百年,为在混凝土初凝前固定其形状,模板与支撑技术也得以蓬勃发展。早期的模板(木模板、金属模板、复合材料模板等)多为平板形态^[1-3],只适用于外形规整构件或简单异形构件。随着现代技术发展和人们对建筑形态多样性的追求,建筑外观及其结构、装饰部件等几何形态日益复杂,传统模板体系难以满足这

种要求,高分子材料模板、3D 打印技术等新型模板材料和技术应运而生。特别是 3D 打印技术可使模板造型几乎不受限制,能进一步发挥混凝土材料特性,满足更复杂的结构外形设计需求。本文以某超大跨度整体预制复杂造型鱼腹式屋架工程为例,详细研究和讨论 3D 打印技术在模板工程中的应用,以期类似工程提供一种全新的技术方案。

1 模板体系

1.1 木模板体系

木材是人类最早使用的天然材料之一,作为建筑模板可追溯到几千年前,也是混凝土的第一代模板。其分布广、易获取、易加工,因而成本低、可塑性好、可重复使用。随着木材加工技术的发展,出现了性能更优的胶合板,至今仍在模板市场占据相

* 上海隧道工程股份有限公司课题:零碳(低碳)产业园建筑关键技术研究(CK2023193A)

[作者简介] 李佳宇,高级工程师,E-mail:liy050957@126.com

[收稿日期] 2025-02-20

当大的份额。但木模板也具有明显局限性^[4]:①我国森林资源有限,大量使用木模板会产生负面的环境影响;②木模板为天然材料,容易发生变形和受潮,在重复使用过程中也易产生不可逆的损耗^[5],耐久性较差,周转一般为 3~4 次;③木模板造型能力有限,不适用于造型要求高、表面曲率大的情况;④木模板残值几乎为 0,报废的木模板绝大多数情况只能当作废品,不利于资源的节约使用。

1.2 金属模板体系

金属模板主要包括钢模板和铝合金模板。1908 年,美国工程师率先使用了钢模板^[6],并于 1960 年开始大量应用,我国从 20 世纪 80 年代开始大量开发和使用钢模板。相比于木模板,由于钢模板大多数为工厂化加工,所以其最大的优势在于高精度;经过合理设计,钢模板也具有较大刚度,可减少垂直支撑体系的设置,在使用过程中也不易发生变形^[6-7]。尽管钢材在日常使用环境下锈蚀现象较严重,但如果维护良好,钢模板的耐久性依然好于木模板,报废后的残值率也更高。

钢模板劣势为自重大、分块较小、拆装效率不高^[6],铝合金模板的出现在一定程度上解决了这个问题^[8]。除了兼具大部分钢模板优势外,铝合金模板自重小^[9-10](常规铝合金模板自重仅为 20~25kg/m²),可进行人工搬运,降低了对塔式起重机的依赖。铝合金模板在抗锈蚀方面的表现也优于钢模板。

金属模板体系的普遍劣势在于对复杂或不规则造型的适应性较差。金属模板加工难度较大,因此尽量使用标准部件是降低总成本的重要措施。然而,对于诸如不规则曲面等几何形态复杂的建筑,金属模板需单独开模或铣雕成型,周转次数少或只能使用 1 次,相应的成本大幅提高。

1.3 高分子材料模板体系

20 世纪中期,日本率先使用了 ABS(丙烯腈-丁二烯-苯乙烯)树脂作为建筑模板^[11],这种高分子材料模板易脱模、质量小、耐腐蚀、易加工、可重复使用^[12-13]。逐渐地,聚氯乙烯(PVC)、聚丙烯(PP)、聚碳酸酯(PC)、尼龙(PA6, PA66)、改性树脂(ASA)等高分子材料也被广泛应用于建筑模板中^[14]。为增大高分子材料模板强度,在其中增加纤维材料(玻璃纤维、芳纶纤维、碳纤维等)组成复合材料模板。

高分子材料具有很强的可加工性,可通过注塑、挤出、模压等工艺形成各种形状模板,即使只使用 1 次,其成本也远低于同样形状的金属模板^[15]。随着 3D 打印技术的发展,高分子材料可低成本地

被加工成任意形状,进一步拓展了其应用场景。

高分子材料模板劣势主要体现在耐候性,在日常使用过程中容易老化,从而降低寿命。

1.4 模板体系对比

目前,建筑业最常用的 3 种模板体系物理和施工性能对比如表 1 所示^[12,16],力学性能对比如表 2 所示^[17-19]。

表 1 物理和施工性能对比

Table 1 Comparison of physical and construction performance				
项目	木模板	钢模板 (Q235)	铝合金模板 (6061-T6) (加玻璃纤维)	ABS
面板厚/mm	15~20	5~6	3~4	10~12
自重/ (kg·m ⁻²)	10.5~14.0	85.0~95.0	18.5~20.0	12.1~14.5
施工难度	易	易	易	易
施工效率	低	高	高	高
周转次数/次	3~4	≥600	400~500	≥50
维护费用	低	高	低	较低
耐久性	较差	好	好	较好
吸水变形	易变形	无	无	无
回收残值	低	中	较高	较高
对吊装机械的依赖	部分依赖	依赖	部分依赖	部分依赖

注:高分子材料种类、规格较多,表中数据以某种 ABS 为代表

表 2 力学性能对比

Table 2 Comparison of mechanical properties				
项目	木模板	钢模板 (Q235)	铝合金模板 (6061-T6) (加玻璃纤维)	ABS
拉伸强度/MPa	—	215	200	90.6
弯曲强度/MPa	25~50	215	200	119.3
弹性模量/GPa	4.0~5.0	210	70	7.3

由表 1,2 可知,高分子材料模板性能总体上优于木模板,但在强度、刚度、耐久性等方面的性能不如金属模板。目前,高分子材料模板产业化远低于传统模板,因此其使用成本仍相对较高,普及性较差,只在一些特殊工况下体现出独特的优势。

2 3D 打印技术在建筑模板领域的应用

2.1 3D 打印技术

3D 打印技术是一种基于数字模型的快速成型技术,其通过堆叠、黏结、融合等方式制造产品^[20]。目前,可用于 3D 打印的材料较丰富,如银、蜡、钛合金、不锈钢、合金钢、光敏聚合物、高分子聚合物、混凝土等^[21]。

3D 打印技术的最大特点在于:通过一套技术方案和设备即可快速且高精度地制造定制化、个性化产品,无需批量生产摊薄成本,给传统制造方式带来了革命性变化^[22]。目前,3D 打印成型技术主要

有 3 类^[21]:基于激光技术的烧结法、选择性熔化法、光固化法。

3D 打印技术已在土木工程领域的多种场景中得到应用,主要包括复杂结构构件、异形模板及艺术造型等。混凝土材料虽然可在常温下流动并凝固,但通常需与其他材料或结构配合,且需要较长时间才能形成强度,因此混凝土 3D 打印技术尚不成熟,难以大面积应用^[22]。金属材料和高分子材料则具有更好的成型性和快速形成强度的特点,因此基于这 2 种材料的 3D 打印技术在土木工程领域的应用更广泛。

2.2 3D 打印模板

3D 打印模板是 3D 打印技术在土木工程领域的重要应用之一,目前主要使用的材料为各种工程塑料。如前文所述,模板工程是混凝土结构的重要组成部分,然而传统的模板对异形结构的适用性较差,采用金属铣雕工艺制作异形模板的成本又非常高,3D 打印技术恰好可弥补这些不足。

得益于 BIM 技术的发展,异形结构通常采用参数化设计^[23-24],其设计成果可直接生成数字模型文件,因而只需简单的软件操作即可完成相应模板设计。3D 打印技术可直接调用这些数字文件,再通过打印设备完成高精度模板的制作。打印完成的模板一般仅需对表面进行简单的抛光处理,即可达到使用要求。

3D 打印过程无需人工值守,打印设备可 24h 不间断工作,因此模板制作速度快。采用工程塑料作为 3D 打印原材料的工艺为“增材制造”,生产过程中几乎不产生材料浪费,部分材料还可回收使用。总之,3D 打印模板具有很高的经济性,应用前景十分广阔。

3 3D 打印模板应用案例

3.1 工程概况

依托某中心医院医技楼采光顶的预应力鱼腹式整体预制屋架制作及吊装工程,该屋架为 UHPC(超高性能混凝土)整体预制,每榀长约 40.8m,矢高 3.1m,体积约 12.0m³,自重约 32t,共 7 榀。屋架原设计方案为钢网架结构,为追求建筑效果,后调整为鱼腹式屋架,屋架弦杆均为纺锤形(见图 1),截面厚度为 250mm,上弦杆下表面和下弦杆上、下表面均为曲面,其余面均为平面。

3.2 模板方案选择

由于屋架外形复杂且几何尺寸较小,可用方案为钢模板和高分子材料 3D 打印模板。

经过初步设计,钢模板外模面板及端面采用 8mm 厚钢板,隔仓内模面板采用 6mm 厚钢板,筋板

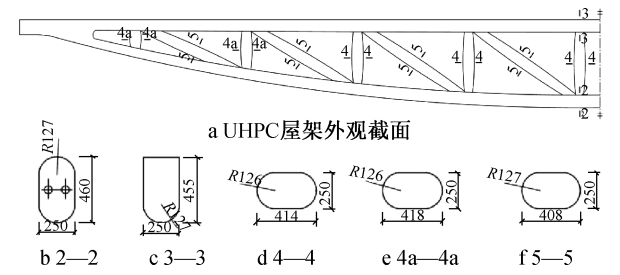


图 1 预应力鱼腹式屋架外形
Fig. 1 Shape of prestressed fish-bellied roof truss

及底模板均为 10mm 厚钢板,模板总重为 21t(含各种辅材)。模板加工主要为弯折+车铣工艺,制作周期 45d,综合单价 3.2 万元/t,即总成本约 67.2 万元/榀。

高分子材料 3D 打印模板方案拟采用的材料为专为大尺寸 3D 打印设计的 20%玻纤增强型 ABS 粒料(ABS+GF),其主要物理机械性能如表 3 所示。

表 3 20%玻纤增强型 ABS 粒料物理机械性能
Table 3 Physical and mechanical properties of 20% glass fiber reinforced ABS pellets

项目	指标	项目	指标
密度(21.5℃)/(g·cm ⁻³)	1.21	杨氏模量/MPa	7 343±158
熔体指数/[g·(10min) ⁻¹]	12.7	拉伸强度/MPa	90.6±0.9
玻璃化转变温度/℃	96	断裂伸长率/%	2.3±0.1
维卡软化温度/℃	109	弯曲模量/MPa	6 328±317
负载 1.8MPa	96	弯曲强度/MPa	119.3±2.7
热变形温度/℃	102	简支梁冲击强度/(kJ·m ⁻²)	9.2±0.2
负载 0.45MPa			

经初步设计,模板主体部分厚 5~8mm,每块模板边缘处施作加强筋,厚 12mm,打印方案采用基于挤出喷嘴式技术的熔融沉积法(FDM),模板总重 1.65t(含各种辅材),制作周期 30d,综合单价 18.1 万元/t,即总成本约 29.7 万元/榀。

本工程仅需翻模 7 次,因此综合考虑施工便利性、经济性、制作周期等因素,确定采用高分子材料 3D 打印模板。

3.3 3D 打印模板深化设计

3.3.1 拆分方案

根据屋架几何形状特征,考虑到模板制作难度、搬运便利性等,模板拆分最大长度拟定为 2m。根据实际尺寸,最终 2m 长以下模板 90 块,2.05m 长模板 21 块,共 111 块,单块最重 25kg,可不借助起重设备进行人工操作,如图 2,3 所示。为进一步控制成本,模型所有平面部分采用防水胶合木模板,单块长度 2m,共 25 块。

3.3.2 加固与连接方案

由于屋架外形呈复杂曲面,模板体系必须具备

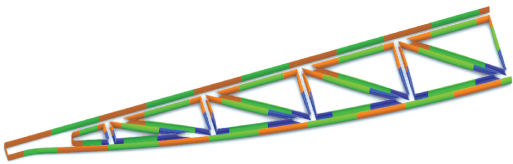


图 2 模板拆分
Fig. 2 Splitting of formwork



图 3 模板试拼装
Fig. 3 Trial assembly of formwork

良好的抗变形性能。尽管屋架平面外厚度仅 250mm,设计方案仍对上缘进行固定,并在模板跨中增设支撑,如图 4 所示。

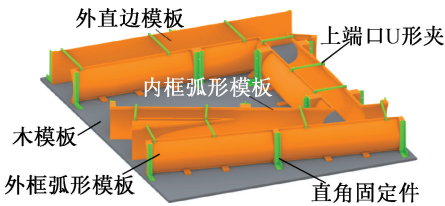


图 4 模板加固示意
Fig. 4 Reinforcement of formwork

为控制模板上口张开变形量,每隔 0.5 ~ 1.0m 设置 U 形夹约束模板上缘,防止其在 UHPC 的侧压力下发生变形。同时,还在较长模板跨中设置直角固定件,其一边与模板相连,另一边根据放线位置与底模板相连,以确保模板不发生过大的鼓胀变形。模板两端设置直角固定件,除起加固作用外还兼作连接件,相邻模板可借助连接件以 M8 螺栓紧固,如图 5 所示。

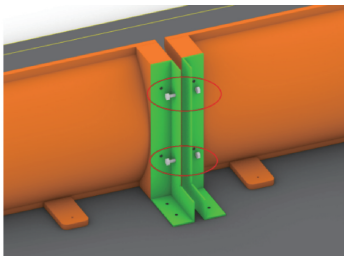


图 5 模板连接示意
Fig. 5 Connection of formwork

3.3.3 表面处理

由于 3D 打印为材料逐层堆叠而成,因此模板内部会有层状纹路,会对脱模产生不利影响,需进

行光滑处理。由于 3D 模板形状不规则,因此无法利用传统车床进行车削处理,只能采用铣床或 CNC 加工中心,但这种工艺要为每种模板单独设计夹具,总体成本高。

经研究,拟采用补磨结合方法处理模板内表面。做法为:采用不饱和聚酯树脂腻子(原子灰)对模型内表面的缺陷进行填补并抹平,再经人工打磨光滑,处理效果如图 6 所示。与此同时,对处理后的模板进行节点区混凝土浇筑试验(见图 7),验证了内表面处理工艺的可行性。

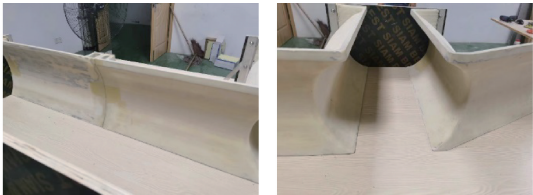


图 6 模板内部打磨效果
Fig. 6 Internal grinding effect of formwork

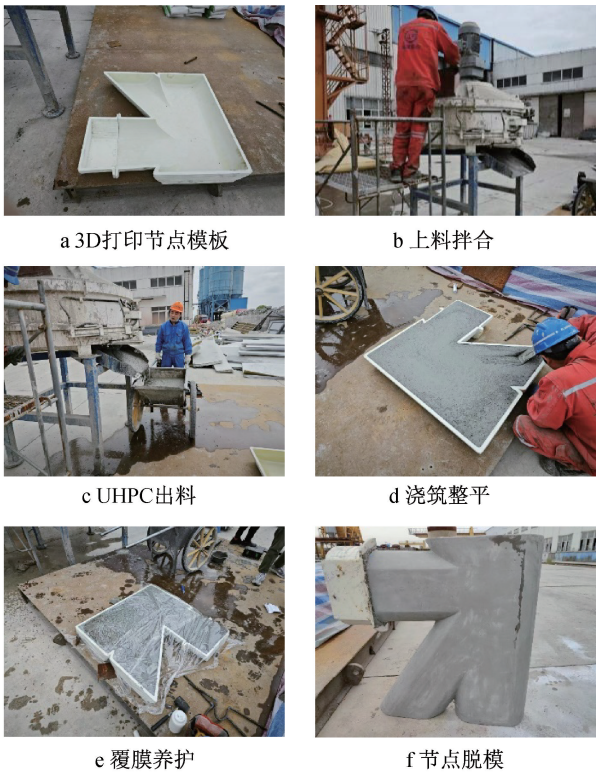


图 7 3D 打印节点模板浇筑试验
Fig. 7 3D printing joint formwork pouring test

3.3.4 安装与脱模

因屋架总长度约 40.8m 且仅 250mm 厚,故要求浇筑场地的平整度偏差 $\leq 1/1\,000$ 。为此,在原有 20cm 厚 C20 素混凝土+15cm 厚 C25 细石混凝土(内含 $\phi 6@200\text{mm}$ 钢筋网片)基础上,专门设计了 6cm 厚 C25 细石混凝土(内含 $\phi 4@200\text{mm}$ 钢筋网

片)精找平面层。地坪施工完成后,利用全站仪对其平整度进行复核,并完成 3D 打印模板定位放线;模板拼装完成后,再次核对其尺寸与位置,确认无误后方可进行下一步施工。

为保证模板平面位置,模板跨度方向每间隔 1m 固定 1 个直角固定件,直角固定件利用 2 颗自攻螺丝和底面木模板固定,每 0.25m 设置 1 个伸出固定脚,利用 1 颗自攻螺丝和底面木模板固定,如图 8 所示。

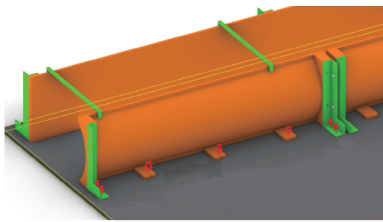


图 8 模板固定示意
Fig. 8 Fixing of formwork

为防止 3D 打印模板底部缝隙产生漏浆,在地坪基础上铺设 2 层 15mm 厚木模板,第 1 层沿台座满铺,第 2 层仅在 UHPC 预制构件与模板处铺设,且在模板底部断缝隔开,3D 打印模板与木模板间采用泡沫双面胶进行密封。

脱模时,平面木模板和外侧弧形模板可自由拆卸,无需指定顺序。但对于内侧模板,则需根据其几何特征,设置合理的脱模顺序,以确保脱模效果和保护模板不受损伤。如图 9 所示,根据前期现场试验,内侧模板脱模顺序原则为先平移取出直线段模板(图中 1,2,3 号模板),再取出角部模板(图中 4,5,6 号模板)。如脱模困难,应使用橡胶锤轻敲模板,不得采用坚硬工具。

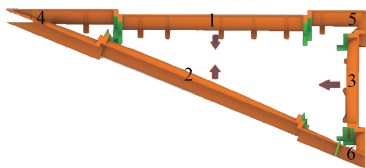


图 9 内侧模板脱模顺序示意
Fig. 9 Demoulding sequence of inner formwork

3.3.5 浇筑工况数值模拟

在完成整套 3D 打印模板拆分、组装与脱模方案设计后,选取屋架上弦 K 形节点模板,借助 ABAQUS 有限元软件展开浇筑工况下数值计算。有限元计算时几何模型、材料参数、边界条件、荷载水平为:①3D 打印模板密度取 $1\,210\text{kg/m}^3$,弹性模量取 7.3GPa ,泊松比取 0.2,线膨胀系数取 1.7×10^{-5} ;②侧模底边约束 5 个自由度,释放绕屋架模板跨度

方向旋转自由度;③现场节点模板顶部间隔 0.5m 设置 1 道斜支撑,计算模型中对应位置约束 3 个方向平动自由度,释放 3 个方向旋转自由度;④UHPC 浇筑侧压力按 250mm 厚浇筑层在屋架底部产生的最大值取值;⑤温度作用取模型整体升温 90°C 。数值模拟结果如图 10 所示。

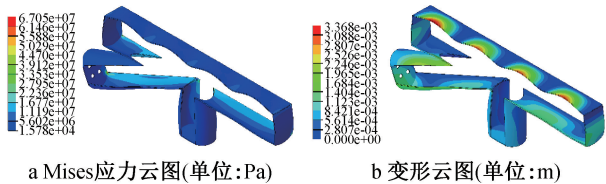


图 10 节点模板数值模拟结果
Fig. 10 Numerical simulation results of joint formwork

由图 10 可知,在混凝土侧压力及温度作用下,节点模板最大 Mises 应力为 67MPa ,小于其拉伸强度 90MPa ,强度比为 1.34;最大变形位于顶部上弦,约 3.37mm 。由于数值计算时,按最不利工况考虑,混凝土对侧模压力沿侧模高度范围均取底部最大值,实际浇筑时在模板上口同时设置 U 形夹(见图 4),经现场实测,UHPC 浇筑至脱模过程中,3D 打印模板变形均 $<1\text{mm}$ 。综上,本项目采用的 3D 打印模板强度与刚度均满足要求。

3.4 3D 打印模板应用效果

脱模效果如图 11 所示。由图 11 可知,除内侧锐角处脱模略困难、底部存在轻微黏模外,其余部位均顺利脱模。构件几何效果完整呈现,其表面平整度与弧度均满足设计要求。由于模板几何形状限制,部分区域振捣时难以排出全部气泡,致使构件表面出现少量微小蜂窝,但不影响受力性能,且可通过后续批嵌腻子及涂饰予以修补,如图 12 所示。



a 节点内侧模板脱模



b 屋架整体脱模

图 11 脱模效果
Fig. 11 Demoulding effect

3D 打印模板首次脱模后内表面状态如图 13 所示。可见模板内表面无混凝土残留,仍保持光滑,仅需简单冲洗即可再次使用。后续施工表明,该套



图 12 构件表面装饰施工

Fig. 12 Decoration construction of component surface

3D 打印模板成功周转 7 次, 总体维修率<2%, 验证了该模板方案的可行性。



图 13 模板首次脱模后内表面状态

Fig. 13 Inner surface of formwork after the first demoulding

首榀屋架施工完成后, 现场采用锤击法进行无损检测, 并进行荷载试验。试验结果表明: 屋架内部材料密实, 无缺陷; 在弹性阶段可承受 1.2 倍设计荷载(基本组合), 构件表面未出现明显裂缝, 残余挠度小于最大挠度的 20%, 满足设计要求。

4 结语

1) 通过研究和实践表明, 合理的工艺选择与方案设计可使 3D 打印模板的强度、刚度及表面平整度等均满足施工要求, 并实现多次周转, 验证了该技术的适用性与经济性。由此证明, 3D 打印技术及其所用材料的成熟度已能满足模板工程对复杂建筑效果的需求。

2) 3D 打印模板仍存在局限性, 其各向异性明显, 即使已配置加筋结构, 模板仍易沿打印方向断裂, 锐角区域脱模存在困难。这些问题仍需从打印成型工艺、材料选择及模板设计等方面进行更深入探索。

参考文献:

[1] 朱广元, 李华东. 浅谈我国建筑模板现状及发展[J]. 四川建筑, 2022, 42(1): 36-38.
ZHU G Y, LI H D. On the present situation and development of building formwork in China [J]. Sichuan architecture, 2022, 42(1): 36-38.

[2] 赵玉章. 我国建筑模板技术的进步与发展方向[J]. 建筑技术, 2006, 37(8): 568-571.
ZHAO Y Z. Progress and development direction of construction formwork technology in China [J]. Architecture technology, 2006, 37(8): 568-571.

[3] 高峰, 石亚明. 我国建筑模板产品现状与展望[J]. 施工技术, 2017, 46(2): 98-101.

GAO F, SHI Y M. Present situation and prospect of building formwork products in China [J]. Construction technology, 2017, 46(2): 98-101.

[4] 余敏. 定型弧形木模板结构分析及施工技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
SHE M. Structure analysis and construction technology research of shaped arc wood formwork [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.

[5] 田冰洁. 新型建筑模板支撑体系结构设计及应用 [D]. 济南: 山东大学, 2013.
TIAN B J. Design and application of new building formwork support system structure [D]. Jinan: Shandong University, 2013.

[6] 蒋东艳, 吴迪, 张健, 等. 基于 BIM 的铝合金模板配模及深化设计研究 [J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(17): 48-51.
JIANG D Y, WU D, ZHANG J, et al. Virtual assembly and deepening design of aluminum alloy formwork based on BIM [J]. Construction technology, 2022, 51(17): 48-51.

[7] 杨东, 张慧杰, 陈雅, 等. 超高楼层铝合金模板满堂架支撑体系施工技术 [J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(2): 131-135.
YANG D, ZHANG H J, CHEN Y, et al. Construction technology of aluminum alloy formwork full scaffold support system for high-rise floors [J]. Construction technology, 2025, 54(2): 131-135.

[8] 路亮. 建筑工程施工中铝合金模板综合价值研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
LU L. Research on the comprehensive value of aluminum alloy formwork in building engineering construction [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.

[9] 陈祖军, 宁宏翔. 高层住宅建筑若干关键施工技术的应用 [J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(17): 74-78.
CHEN Z J, NING H X. Research and application of several key construction technologies for high-rise residential buildings [J]. Construction technology, 2023, 52(17): 74-78.

[10] 刘波, 赵会娟. 建筑铝合金模板型材模具设计与制造 [J]. 建筑科学, 2025, 41(3): 185.
LIU B, ZHAO H J. Design and manufacture of mould for building aluminum alloy formwork profile [J]. Building science, 2025, 41(3): 185.

[11] RICHARDSON J N. Factors prompting developments in formwork and falsework [J]. Concrete, 2006, 40(6): 20, 22-23.

[12] 吴厚增. 聚丙烯塑料模板在建筑工程的应用研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
WU H Z. Application research of PP plastic formwork in building construction [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.

[13] 王洲杰. PVC 木塑模板材料特点及在建筑行业中的应用前景 [J]. 塑料助剂, 2024(6): 72-74.
WANG Z J. PVC wood-plastic template material characteristics and application prospects in the construction industry [J]. Plastic additives, 2024(6): 72-74.

[14] 令狐延, 彭恺. 我国房屋建筑模板技术的研究综述 [J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(17): 71-76.
LINGHU Y, PENG K. Review on building formwork technology in China [J]. Construction technology, 2024, 53(17): 71-76.

[15] 田新泉, 雷富匀, 唐巍, 等. 新型高分子复合模板体系在工程

中的应用[J]. 施工技术(中英文),2022,51(19):128-130.

TIAN X Q,LEI F Y,TANG W,et al. Application of new polymer composite formwork system in engineering [J]. Construction technology,2022,51(19):128-130.

[16] 刘洋彤. 建筑铝模板市场推广影响因素分析及对策研究[D]. 重庆:重庆大学,2015.

LIU Y T. Analysis of influencing factors and countermeasures of building aluminum formwork market promotion[D]. Chongqing: Chongqing University,2015.

[17] 中国林业科学研究院木材工业研究所,山东新港企业集团有限公司,厦门市以和为贵建设工程管理有限公司. 混凝土模板用胶合板:GB/T 17656—2018[S]. 北京:中国标准出版社,2018.

Wood Industry Research Institute of China Academy of Forestry Sciences, Shandong Xingang Enterprise Group Co., Ltd., Xiamen YiheweiGui Construction Engineering Management Co., Ltd. Plywood for concrete form: GB/T 17656—2018 [S]. Beijing:Standards Press of China,2018.

[18] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

MCC Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd. Standard for design of steel structures:GB 50017—2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2017.

[19] 同济大学,现代建筑设计集团上海建筑设计研究院有限公司. 铝合金结构设计规范:GB 50429—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2008.

Tongji University, Modern Architectural Design Group Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd. Code for design of aluminium structures:GB 50429—2007[S]. Beijing: China Planning Press,2008.

[20] The third industrial revolution: the digitisation of manufacturing will transform the way goods are made and change the politics of jobs too[Z]. 2012-04-21.

[21] 陶雨濛,张云峰,陈以一,等. 3D 打印技术在土木工程中的应用展望[J]. 钢结构,2014,29(8):1-8.

TAO Y M, ZHANG Y F, CHEN Y Y, et al. Prospective applications of 3D printing technology in civil engineering[J]. Steel construction,2014,29(8):1-8.

[22] SHAHRUBUDIN N,LEE T C,RAMLAN R. An overview on 3D printing technology: technological, materials, and applications [J]. Procedia manufacturing,2019,35:1286-1296.

[23] 肖力光,仲小康. 3D 打印粗骨料混凝土的研究进展及应用[J]. 混凝土,2024(6):169-172,179.

XIAO L G,ZHONG X K. Research progress and application of 3D printed coarse aggregate concrete[J]. Concrete, 2024 (6): 169-172, 179.

[24] 徐亮,张利伟. 基于“BIM+3D 打印技术”在异性混凝土构件模具设计中应用研究[J]. 工业建筑,2023,53(S2):231-233.

XU L,ZHANG L W. Research on the application of BIM+3D printing technology in the mold design of anisotropic concrete members[J]. Industrial construction,2023,53(S2):231-233.

(上接第 64 页)

3)该技术在深圳罗湖某超高层项目中进行了示范应用,结果表明,系统在无遮挡条件下可实现 75m、遮挡条件下 20m 范围内的稳定通信,且报警-喷淋系统联动迅速可靠,验证了技术方案的实用性与可行性,为超高层建筑全生命周期的安全运行提供了技术支撑。

参考文献:

[1] 罗洪波,张英,王佳宁. 基于物联网技术的超高层建筑火灾风险动态评估方法[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2025,47(1):31-37.

LUO H B,ZHANG Y,WANG J N. Dynamic assessment method of fire risk in super high-rise buildings based on Internet of Things technology [J]. Journal of Wuhan University of Technology (information & management engineering),2025,47(1):31-37.

[2] 任浩,王宪杰,张林飞,等. 超高层建筑施工中起火预测及火灾模拟与人员疏散[J]. 科学技术与工程,2024,24(12):5114-5122.

REN H,WANG X J,ZHANG L F,et al. Fire prediction, fire simulation and personnel evacuation during the construction of super high-rise buildings [J]. Science technology and engineering,2024,24(12):5114-5122.

[3] 戴志宏. 建筑施工场所火灾成因及消防管理[J]. 消防科学与技术,2018,37(4):554-556.

DAI Z H. Discussion on fire cause and fire management of construction site[J]. Fire science and technology,2018,37(4):554-556.

[4] 杨易,钟尚轩,解学峰,等. 超高层建筑烟囱效应的现场实测和压差特性分析[J]. 建筑结构学报,2023,44(3):148-156.

YANG Y,ZHONG S X,XIE X F,et al. Field measurement of stack effect for super high-rise buildings and their stack pressure characteristics[J]. Journal of building structures,2023,44(3):148-156.

[5] 路永明,孟繁欣,李嘉琪,等. 基于 BIM、物联网技术的智能管控平台在火灾报警系统中的应用[J]. 水利水电技术(中英文),2021,52(S1):134-137.

LU Y M,MENG F X,LI J Q,et al. Application of intelligent control platform based on BIM, Internet of Things technology in fire alarm system [J]. Water resources and hydropower engineering,2021,52(S1):134-137.

[6] 闫肃. 基于物联网与深度神经网络的建筑单体火灾动态风险自适应评估体系[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.

YAN S. Adaptive dynamic risk assessment system of building monomer fire based on Internet of Things and deep neural network [D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2021.

[7] 彭天海,陈羽,杨帆,等. 高层建筑电气火灾监控终端信息模型[J]. 山东大学学报(工学版),2022,52(5):132-140.

PENG T H, CHEN Y, YANG F, et al. Information model of electrical fire monitoring terminal in high-rise building [J]. Journal of Shandong University (engineering science), 2022, 52(5):132-140.