

### 巴黎圣母院尖塔消失四年多后再现身,有望继续矗立千年

# “巨石交响乐”修复之旅带来怎样启迪



刘刚

始建于1163年前后的巴黎圣母院是一座无可替代的欧洲中世纪哥特建筑杰作。法国文学家维克多·雨果于1831年出版的伟大文学作品《巴黎圣母院》中,将它称之为“一首规模宏大的巨石交响乐”。巴黎圣母院也因此成为法国的精神和文化丰碑。

然而,2019年4月15日,这座矗立了800多年的大教堂意外遭遇了一场严重火灾,其高耸的尖塔轰然坠落,且屋顶木骨架几乎全部被烧毁,连一部分石质拱券的中殿拱顶一起,坍塌在下方的教堂里。

巴黎圣母院所遭遇的这种突如其来的灾难,在人类建筑文明史上曾发生过数次。其中的绝大多数建筑最后或成为供人凭吊的废墟,或者散落成传说。但这次借助互联网,这座烈焰中的法国文化地标迅速引发了强烈的全球共情,围绕这座恢弘建筑的浴火重生,形成了一次全球参与、共同保护文化遗产的标志性事件。

巴黎圣母院的灾后修复让人们看到,以传统的对于古建筑材料、工艺和风格样式等本体研究积累为基础,在现代数字孪生技术的加持下,不仅可以准确高效地统筹出设计定案和技术选型,还能让更多专家及时、动态地参与其中。在预案引导下,法国修复团队在古建筑修复的应对程序、适用手段、关键细节上的实践,为有效处置突发性文物破坏事件提供了可借鉴的经验。

## 加固与清理 大教堂首次细致深度清洁

2019年4月15日傍晚6点20分左右,巴黎圣母院发出了第一次火灾逃生警报。紧接着,消防队的第二次警报在6点45分发出,包括消防队、牧师在内的救援人员随后抵达现场,他们迅速进入燃烧的大教堂,对留存其中的珍贵文物展开抢救。最后,包括基督教圣物荆棘冠在内的诸多无价之宝得以脱险。

通过互联网的即时传播,全世界目睹了从大教堂升起的浓烟和火焰,高耸的尖塔木骨架在红光中尤为显眼,最后轰然坠落。

作为法国乃至欧洲文明的象征,巴黎圣母院的灾后修复牵动着全世界的心。法国政府很快作出决定:投入国家力量进行考古和修复。火灾发生后次日,法国文化部会同法国国家科学研究中心发起了一个大规模的研究项目,巴黎圣母院的重建工作和科学研究由此展开。

为了对建筑和艺术进行修复,以及为可能的发现做好准备,包括历史学家、修复和材料专家等在内的近200名专家学者,被分成8个不同的小组。他们的研究工作覆盖不同的材料研究领域,如石材、金属、木材、彩色玻璃等,也涉及建筑工程、声学、雕塑和装饰、人类学和数字化等方面。

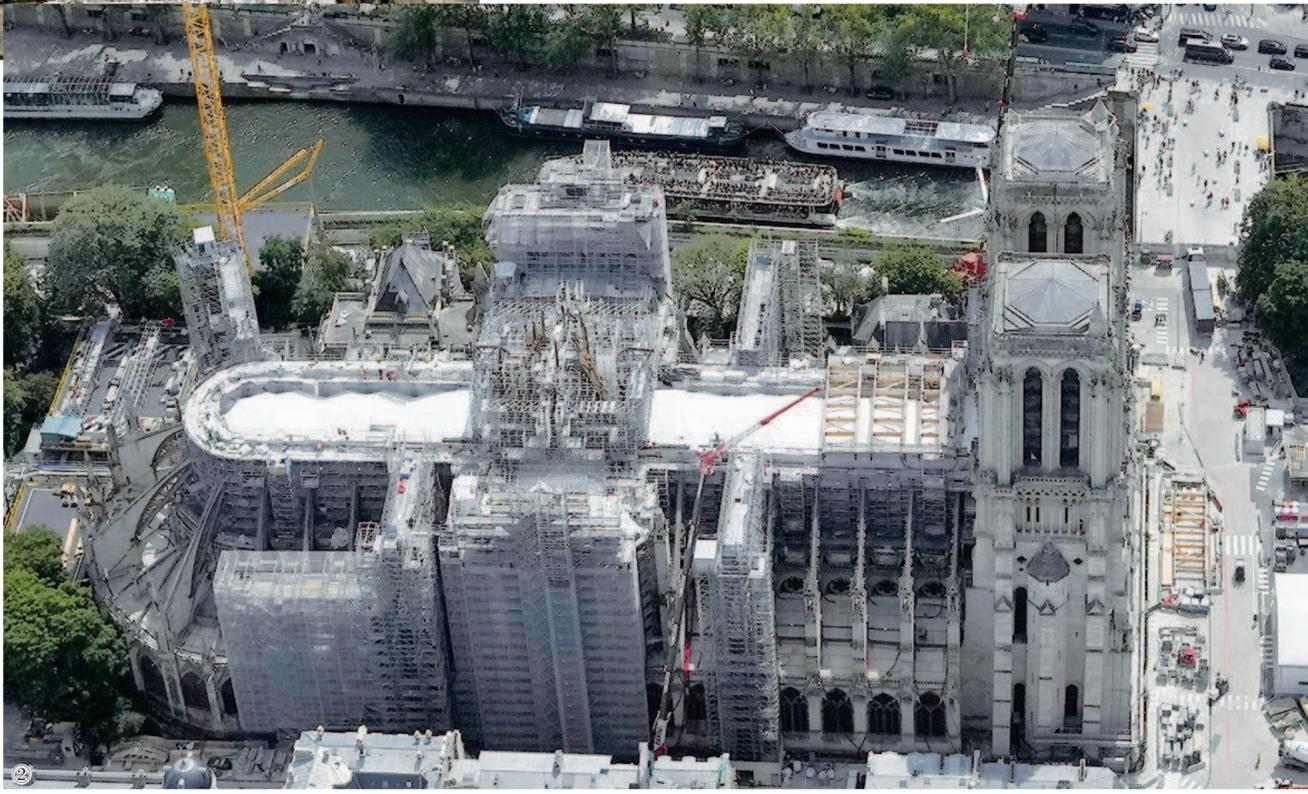
由于火灾发生在早前的屋顶修复工作现场,教堂内外有大量施工脚手架被烧毁,灾后剩余部分也有随时倒塌的可能,存在对大教堂造成进一步破坏的风险。因此,保护整体结构安全,特别是避免大教堂的脆弱拱顶不至于继续坍塌,是修复开展前极为重要的工作。

修复团队仔细清理并移走了火灾留下的脚手架废墟,并在大教堂内搭建新的脚手架。这一方面支撑住了暴露的石质拱顶,一方面也方便后续开展重建、加固修复等工作,可以在不危及大教堂结构完整性的情况下持续进行施工。

整整两年半后,上述清理工作圆满完成。在完成这些安全工程之后,包括法国历史古迹研究所、法国国家考古研究所等在内的专业国家机构立即开展了现场清理和记录工作。

此次火灾中,巴黎圣母院大教堂屋顶的铅板被大量烧毁、破坏,这导致大教堂内部被一层铅尘所覆盖。修复团队必须清除这层铅尘,并对整座大教堂进行从上到下的清洁,否则就无法确保建筑元素的完整性,也无法保证修复人员的健康安全。

2021年10月,修复团队开始对大教堂内部6000多平方米的墙壁、天花板、拱顶、地板和彩色玻璃窗进行大规模清洁。这项工作一直持续到2022年春季。



据报道,这是巴黎圣母院大教堂第一次经历如此细致而耗时的深度清洁,这需要石匠、锁匠、铁匠、木匠,以及雕塑和美术修复师等多个团队的专业知识。所有清洁工作都由工匠们使用软毛小刷子逐厘米完成,铅尘和污垢一旦从表面刷下来,会立即被吸入清洁工携带的专用背包里。

## 3D精细还原 对建筑原貌表达无限尊重

对巴黎圣母院进行灾后修复,需要进行大量研究准备工作。在对大教堂建造时序复原的基础上,专家团队首先对石质拱顶、屋顶木构和铅质构件进行了评估。

在拱顶方面,首先是明确损坏部位,对塌毁断面进行研究。接下来,针对未塌部分,修复团队利用现代探测技术,明确拱顶因火灾发生的形变程度,以判断是否需要加固。拱顶修复方案一部分采用传统做法,比如收集塌毁的石质拱券构件,在地面对其进行复原;另外一部分则采用数字技术,利用火灾前的精细化3D模型,对其进行还原。

在木结构方面,由于巴黎圣母院尖塔与大教堂的庞大屋顶木构构件在火灾中全毁,因此修复团队要从最基本的力学分析开始研究。由于屋顶十分沉重,力学分析对其后续安装过程和修复完成后的持续稳定至关重要。好在巴黎圣母院留存有1906年的屋架复原模型与2014年的屋架调查报告,这些都成为修复研究中无可替代的技术依据。

在尖塔方面,1970年的复原模型为本次复原提供了参考。而屋顶的雕像由于在火灾前已被取下进行修复,故而得以幸存。此外,修复团队还要对铅板屋顶的构成和铅饰进行还原,力争尽可能完整地从业存信息中恢复其原貌。

除了上述研究积累,专家们还在灾后现场收集大量数据并将其数字化,建立起数字孪生框架。这使灾后建筑遗产重建与修复工作的质量得以保证。

基于部分残缺的中殿拱顶现状恢复问题,参与修复的专家们在《自然》杂志在线发表的科学报告中指出,数字孪生实现了“物理-原生”和“数字-原生”过程的并行展开。在物理吻合、逆向工程、考古遗迹的时空追溯识别和运筹学决策等实验方向上,他们从数据采集到数据处理都应用了数字孪生框架。

15个月后,巴黎圣母院灾后修复的可行性研究无论在理论还是技术上都顺利完成了。关于此次修复理念,巴黎圣母院修复工程首席建筑师菲利普·维伦纽夫认为,重建大教堂必须以“无限的谨慎和无限的尊重来进行”,最重要的是“我们必须非常谦虚”,“不能在上面留下我们的痕迹”。对于一些试图用当代风格来重建巴黎圣母院标志性尖顶的意见,他表示应断然抵制。

2021年,维伦纽夫向法国国家遗产和建筑委员会提交了巴黎圣母院的修复计划,后者是受理法国重要修复项目的专门委员会。这一计划决心将巴黎圣母

院大教堂恢复到2019年火灾前的完整状态,包括使用最接近原初的材料来重建与19世纪建筑师勒·杜克索设计的完全相同的尖顶。报告提出,这些修复措施将确保这座哥特式建筑杰作的真实性、和谐性和一致性,“对大教堂的建筑结构表达了足够的尊重”。这一建议最终获得了批准。

## 选材千里挑一 精准匹配“复旧”严苛标准

按照获批的修复设计方案,巴黎圣母院大教堂中殿和唱诗班厅的屋顶木骨架将恢复如初。修复团队从法国各地严格挑选了1000棵橡树。这些橡树有部分来自自主设立的种植园,原本准备用来建造法国海军船只。它们的树龄在150到200年之间,最大的树高达近30米,需要特殊的拖车车辆才能搬运。

这些橡树的采伐时间设在2020年3月底,这是为了防止由于树液上升造成的木材过度潮湿。木材采伐后,要经过12至18个月的自然干燥,再由法国各地的45家锯木厂将其分类加工成修复工作所需的木材。从其中的8棵橡树中,团队得到了修复尖塔所需的长达20米的加工木材。令人欣喜的是,所有的橡木都精确符合首席建筑师对修复材料的严格要求。

除了古树难找,用以修复巴黎圣母院大教堂的石材也十分难寻。在火灾中,15%的教堂石拱顶遭到破坏,为了修复拱顶避免坍塌,专家必须找到中世纪同款石材。巴黎圣母院的石材大都源自12世纪巴黎地下采石场,想找到能与之相匹配的石头十分困难,而修复所需的石材量也大到惊人。

研究人员在对教堂里的石块进行取样后,几乎翻遍了全世界的古建筑和采石场,才从6000多个样品中找到了颜色、性能、成分都接近原款的石头。工匠还要采用古代工艺对这些石材进行“做旧”,才能使其与建筑中的其他石材看上去一致。



2020年初,为了制作巴黎圣母院屋顶和尖塔的木框架,修复团队从法国各地严格挑选了1000棵橡树。这些橡树有部分来自自主设立的种植园,原本准备用来建造法国海军船只。它们的树龄在150到200年之间,最大的树高达近30米,需要特殊的拖车车辆才能搬运。

这些橡树的采伐时间设在2020年3月底,这是为了防止由于树液上升造成的木材过度潮湿。木材采伐后,要经过12至18个月的自然干燥,再由法国各地的45家锯木厂将其分类加工成修复工作所需的木材。从其中的8棵橡树中,团队得到了修复尖塔所需的长达20米的加工木材。令人欣喜的是,所有的橡木都精确符合首席建筑师对修复材料的严格要求。

除了古树难找,用以修复巴黎圣母院大教堂的石材也十分难寻。在火灾中,15%的教堂石拱顶遭到破坏,为了修复拱顶避免坍塌,专家必须找到中世纪同款石材。巴黎圣母院的石材大都源自12世纪巴黎地下采石场,想找到能与之相匹配的石头十分困难,而修复所需的石材量也大到惊人。

研究人员在对教堂里的石块进行取样后,几乎翻遍了全世界的古建筑和采石场,才从6000多个样品中找到了颜色、性能、成分都接近原款的石头。工匠还要采用古代工艺对这些石材进行“做旧”,才能使其与建筑中的其他石材看上去一致。

在哥特大教堂的石质“骨骼”之间,弥漫着自然光感的细密瑰丽花窗,那是营造教堂内部空间氛围的灵魂。非常幸运的是,巴黎圣母院的彩色玻璃窗尽管被铅尘覆盖,但在火灾中未被破坏。在清理过程中,中殿、唱诗班和耳堂的39个高开间的彩色玻璃窗,以及圣器收藏室的彩色玻璃窗都被拆除下来,送到专门车间进行清洁、修复、加固,并对部分必须更换的铅质框架进行更换。

教堂内的大管风琴也经历了类似的移送保养修复,火灾后沉淀于大管风琴控制管和波纹管上的铅尘得到了彻底清洁。大管风琴的相关修复、部件组装和调试等工作,预计将于2024年初完成。

参与大教堂花窗修复的玻璃科学家克劳迪娜·卢塞尔说,面对一幅幅19世纪著名的彩色玻璃镶嵌画大师创作的作品,她在纳米尺度上对这些铅质框架中的古老玻璃进行了检查,“火场中的热浪对玻璃造成了一些微小损伤,但总体而言,这些几百年来的几乎没有退化的玻璃依旧保持了完整的艺术品质”。

卢塞尔还对消防队出色的现场工作给予极高赞赏:“他们在成功控制火势的同时,没有向窗户直接喷水,从而避免了火场中的彩绘玻璃骤然遇冷爆炸,体现出紧急状态下消防部门过硬的专业素质。”

作为世界文化遗产、欧洲中世纪的建筑瑰宝,巴黎圣母院在长达四五年的修复过程中经历了哪些重要阶段?现代修复技术如何使这座尖塔重获新生并继续矗立千年?本报特邀同济大学建筑与城市规划学院副教授刘刚详解其中曲折。

## 艺术品质完整 专业消防拯救彩绘玻璃

在哥特大教堂的石质“骨骼”之间,弥漫着自然光感的细密瑰丽花窗,那是营造教堂内部空间氛围的灵魂。非常幸运的是,巴黎圣母院的彩色玻璃窗尽管被铅尘覆盖,但在火灾中未被破坏。在清理过程中,中殿、唱诗班和耳堂的39个高开间的彩色玻璃窗,以及圣器收藏室的彩色玻璃窗都被拆除下来,送到专门车间进行清洁、修复、加固,并对部分必须更换的铅质框架进行更换。

教堂内的大管风琴也经历了类似的移送保养修复,火灾后沉淀于大管风琴控制管和波纹管上的铅尘得到了彻底清洁。大管风琴的相关修复、部件组装和调试等工作,预计将于2024年初完成。

参与大教堂花窗修复的玻璃科学家克劳迪娜·卢塞尔说,面对一幅幅19世纪著名的彩色玻璃镶嵌画大师创作的作品,她在纳米尺度上对这些铅质框架中的古老玻璃进行了检查,“火场中的热浪对玻璃造成了一些微小损伤,但总体而言,这些几百年来的几乎没有退化的玻璃依旧保持了完整的艺术品质”。

卢塞尔还对消防队出色的现场工作给予极高赞赏:“他们在成功控制火势的同时,没有向窗户直接喷水,从而避免了火场中的彩绘玻璃骤然遇冷爆炸,体现出紧急状态下消防部门过硬的专业素质。”

实际上,巴黎圣母院的屋顶可以被视为三个主要部分的复合体。以中殿为例,在石质拱顶上,隐藏着一排巨大的三角形木桁架,它们的重力同样落在侧墙上,再经由铅板覆盖,形成外部所见的坡形屋顶。

据推断,此次火灾被认为起于当时正在维修中的尖塔和屋顶处,大火吞噬了大部分屋顶木构和铅质构件,并引燃了巨大的尖塔,导致其坠落。与此同时,中殿的一部分石质拱顶也被烧毁,造成了一个露明的大洞。所幸消防员迅速控制住了火势,巴黎圣母院正立面的两座钟楼和花窗得以及时拯救。

从外形上看,尖塔建造者运用平面投影中对角和垂直向上的组合,巧妙地产生了一种几何动态。这种形式

的尺度规模与复杂性令人叹为观止,它既展示了建造者的集体智慧与力量,也给观者留下精神纪念碑式的深刻印象。

大教堂内部采用的是尖券肋骨拱和薄板填充的石质屋顶。它们是哥特风格的决定性特征之一——通过对角交叉的拱形石肋,一部分重力垂直向下传导到侧墙与细长束柱上,另一部分则水平外推,由外部的墩柱和飞扶壁来承重。

## 数字孪生 大显身手

在数字孪生技术及其应用成为建筑界最新的热门话题之前,数字化技术在近几十年的建筑设计和工程领域早已得到快速应用与推进:最初是计算机辅助设计(CAD),建筑师从中得到了极大的制图便利;接下来是建筑信息建模(BIM),它将物理对象变成数字化的3D模型,实现了可视化设计和构建虚拟表达。

这些技术都极大地有利于建筑设计和建造项目计划的执行,不仅可以帮助设计师们提升工作效率,对其他人来说,可视化、过程性的呈现也能让交流、决策,乃至数字化成果再生产,变得更加便捷。

虽然和BIM模型相似,都是物理空间的数字化复刻,但数字孪生在虚拟交互上更胜一筹。在巴黎圣母院的重建与修复工作中,最新的数字孪生技术被证明能够帮助团队更智能、更迅速地开展工作。

巴黎圣母院距今已有800多年历史,几乎没有任何原始图纸和模型资料可供现在的修复团队参考,也没有建筑师和施工团队有相关建造经验。因此,专家只能从建筑本身入手,研究其结构。为此,技术人员使用无人机和旋转扫描仪,扫描教堂内外全部建筑细节,并将其制作成3D模型,再由数字建模专家尽可能计算出每块石头在拱顶的原始位置,通过建模模拟不同的排列组合。

数字孪生技术提供了身临其境、逼真的三维空间探索,增强了不同工作角色之间的协作能力。在整个建筑生命周期中,该技术帮助建筑设计师、工程师和施工团队采用数据驱动的方式管理项目全过程,针对从初步计划到建造质量控制和持续的设施运行管理的各个环节,作出更好的决策,并创建更高效的 workflows。



工人在巴黎圣母院内部工作。

①巴黎圣母院顶部雕塑。②由于采用“古法重建”,巴黎圣母院近于烧毁的屋顶上安装了宽14至16米、高12至13米、重达7.5吨的桁架,由技艺精湛的木匠用中世纪技术制作。图为安装大型橡木桁架的巴黎圣母院。

## 浴火重生的尖塔与屋顶

2019年在火灾中倒塌的尖塔位于圣母院的正脊交汇处,高96米、重750吨,由覆盖着铅板的橡木骨架构成,犹如一顶宏伟的冠冕。

原先,巴黎圣母院并没有高耸入云的尖塔。1845年至1864年,天才建筑师维奥莱特-勒-杜克主持修复在法国大革命中受到严重破坏的巴黎圣母院大教堂。他根据自己对哥特风格的建筑形态原型研究及修复的理解,用一座巨大的尖塔替代了巴黎圣母院原有的屋顶。

众所周知,高大细长、开放式的骨架结构是欧洲中世纪哥特建筑的工程技术创举,进而在19世纪被归纳为结构理性主义的建筑文化意识。

从建造角度由外而内审视巴黎圣母院的屋顶和尖塔,首先被注意到,就是这座突入天空的尖塔。它在城市环境中凸显了大教堂的视觉存在,同时也增强了观赏者与天堂的心理联系。

从外形上看,尖塔建造者运用平面投影中对角和垂直向上的组合,巧妙地产生了一种几何动态。这种形式

的尺度规模与复杂性令人叹为观止,它既展示了建造者的集体智慧与力量,也给观者留下精神纪念碑式的深刻印象。



③发生火灾时倒塌的尖塔。④巴黎圣母院内的彩色玻璃。图/CFP ⑤起重机在屋顶吊装大型橡木桁架。本版图片除注明外均新华社发