

文章编号:1673-2049(2019)05-0001-10

# 混凝土结构拆除技术与绿色化发展

肖建庄<sup>1</sup>,陈立浩<sup>1</sup>,叶建军<sup>2</sup>,蓝戊己<sup>3</sup>,曾亮<sup>1</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院,上海 200092; 2. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院,湖北 武汉 430068;  
3. 上海天演建筑物移位工程股份有限公司,上海 200336)

**摘要:**阐述了传统人工、机械、爆破等拆除方法在混凝土结构拆除中的使用现状及所存在的不足,分析了相关技术绿色化发展对所处施工及周边环境的影响,展望了智能拆除技术未来的发展趋势。通过改变正向与逆向2种拆除施工工艺顺序,使绿色拆除施工方法得到深入研究,同时找到混凝土结构拆除与资源化不同利用层次之间的相关联问题,展望绿色拆除与资源化技术紧密结合的前景,揭示有选择性和分类性等重要特征的绿色拆除能够显著地提高建筑固废资源化利用程度。结合某大桥匝道绿色拆除的典型实例,分别通过绿色拆除施工方法有效将该大桥两侧匝道完成同步下降和整体移位,最大程度满足施工目的的同时,保证原有桥体结构部件完整性,有效达到节约资源的目的。最后探讨建筑绿色化拆除发展对于提高建筑固废资源化利用和建筑生命周期理论发展的意义。结果表明:通过建筑拆除与固废资源化2个阶段可以完善建筑生命周期理论,使其拓展成闭合的循环发展生命周期。

**关键词:**混凝土结构;生命周期;正向拆除;逆向拆除;绿色拆除;资源化

**中图分类号:**TU746.5

**文献标志码:**A

## Technology and Green Development of Demolition for Concrete Structures

XIAO Jian-zhuang<sup>1</sup>, CHEN Li-hao<sup>1</sup>, YE Jian-jun<sup>2</sup>, LAN Wu-ji<sup>3</sup>, ZENG Liang<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Civil Engineering Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;  
3. Shanghai Tianyan Building Shift Engineering Co., Ltd., Shanghai 200336, China)

**Abstract:** The current situation and shortcomings of traditional manual, mechanical, blasting and other demolition methods for concrete structures construction were described, as well as the impacts of the green development of related technologies on the construction and surrounding environments were analyzed, and the future development trend of intelligent demolition technology was prospected. By changing the order of construction process, the forward or reverse green demolition of construction method was studied further. The concrete structure demolition problems associated with resource between different levels were found, and the prospects for combining with the green dismantling and recycling technology were forecasted. And the fact that the green demolition with important characteristics of selectivity and classification could increase the utilization degree of building solid waste significantly was revealed. Combined with typical examples of bridge ramp that was green demolition constructed, related works were done on both sides of the bridge ramp to ensure the synchronous declining and the overall shifting. While

收稿日期:2018-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51325802)

作者简介:肖建庄(1968-),男,山东沂南人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:jzx@tongji.edu.cn。

satisfying the purpose of construction to the greatest extent, the integrity of the original bridge structure components was guaranteed, and this effectively achieved the objective of resource conservation. Finally, the significance of the development of green demolition for improving the utilization of solid waste in buildings and the development of theory of building life cycle were discussed. The results show that the theory of building life cycle can be improved through two stages of building demolition and solid waste recycling to develop into one closed cycle of life cycle.

**Key words:** concrete structure; life cycle; forward demolition; backward demolition; green demolition; resource utilization

## 0 引言

建筑生命周期是指建筑产品从建材生产、建造施工、使用维护到被拆除所经历的全过程<sup>[1]</sup>。在社会对可持续发展的不断追求之下,越来越多的学者和工程师认为建筑拆除并不是建筑物的最终归宿,拆除后得到的建筑固废经过资源化技术处理后可成为生产绿色建材的原料<sup>[2]</sup>。由此,建筑生命周期可以从最初单方向的发展重新被定义为建筑产品从建材生产、建筑设计、建造施工到建筑使用及维护,再经过建筑拆除和建筑废弃物资源化 2 个阶段而重新成为建材原料的循环发展周期。建筑生命周期循环示意图如图 1 所示。

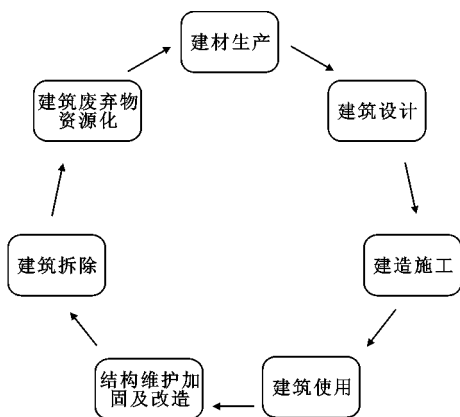


图 1 建筑生命周期

Fig. 1 Building Life Cycle

混凝土结构是中国使用最为广泛的一种建筑结构形式,目前对混凝土结构的拆除方法通常被区分为人工拆除、机械拆除、爆破拆除和智能拆除 4 种,其中前 3 种拆除方法在实际工程中应用较多,智能拆除则属于土木工程领域高新技术之一。传统拆除工艺往往对环境产生严重有害效应,资源化程度低,已不能满足中国生态文明建设的需求。

随着社会文明不断加速进步,建筑物的更新换代越来越快,不可避免地出现大量因用地规划改变

而产生的征地拆迁、建筑的局部结构改造、临时建筑和危险建筑的拆除,同时改造和拆除造成的扬尘、噪声、能耗以及建筑固废处理等导致的生态环境保护问题也日益凸显。因此,在建筑生命周期和建筑固废资源化两大学术背景下,对混凝土结构采取绿色拆除方法并分析研究现状,对促进建筑生命周期理论发展和提高建筑固废资源化利用率具有十分重要的意义。

## 1 拆除方法

### 1.1 人工拆除

人工拆除是最普遍的基础施工方法,采用手动工具或小体积的手工工具进行拆除施工。一般对常规建筑进行拆除所采取的做法是:按照先内后外、先上后下的原则进行施工,同时兼顾拆除作业形成流水施工,做到分层分类的拆除。涉及对结构改造要做到先补强后拆除、先支护后拆除、先填充墙和梁板后承重柱(墙)的施工顺序。

人工拆除常用于低矮建筑物或构筑物的拆除,也用于机械拆除和爆破拆除的预处理或辅助工作<sup>[3]</sup>。对人工拆除的绿色技术要求主要体现在实现建筑行业节能、节地、节水、节材和环境保护的“四节一环保”目标过程中,能够最大限度地辅助发挥节约资源并减少对环境负面影响的作用。

### 1.2 机械拆除

传统的机械拆除方法按照机械操作方式的不同,可以分为机械破碎法、机械吊拆法、重锤撞击法以及综合拆除法<sup>[4]</sup>。通常机械拆除是在人工拆除辅助下进行的,因此以使用机械为主、人工为辅的拆除方法都可以直接称为机械拆除<sup>[5]</sup>。一般机械拆除基本原则是先支撑后拆除,先拆除非承重构件再拆除承重构件,先拆除次要构件再拆除主要构件<sup>[6]</sup>,但也有特例,例如预应力拆除方法,就是施加外荷载的方式使结构主要承重构件破损,从而引发整体或局部

结构发生定向的快速倒塌<sup>[7]</sup>。

为有效提高施工安全性,尽量保持构件的完整性,张静涛等<sup>[8]</sup>介绍了一种机械拆除框架柱的方法:在使用挖掘机施加液压力放倒框架柱前,用液压剪剔除倾倒方向和两侧的混凝土保护层,再使用割炬切断主筋和箍筋,如图 2 所示<sup>[9]</sup>。这也是一种采取机械拆除方法的绿色施工延伸范畴,可将混凝土框架柱有计划性、有步骤地拆除,在规定的理想区域内降低对结构的破坏,便于分类再处理的资源化利用。

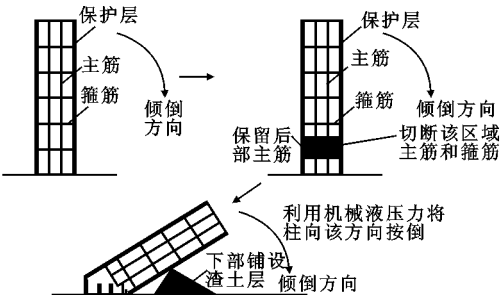


图 2 一种框架柱的机械拆除方法

Fig. 2 One Mechanical Demolition Method for Frame Column

作为一个典型的参考对象,在机械拆除配合方案中使用频率较高的是对各种千斤顶系统设备的灵活应用,目前市场上 PLC 多点同步控制千斤顶系统<sup>[10]</sup>通过传感器和电磁阀的换向,基本已无须人工进行现场数据跟踪,即可将误差范围减小,特别是被应用在混凝土结构的托换工程。这种“互联网+平移顶升远程监控平台”通过千斤顶控制台及倾斜传感器,读取内部沉降数值、应变数值、倾斜数值等,从而实时掌握混凝土结构的平移距离、平移速度、压力、位移等情况,使建筑物能够在连续受力情况下交替顶升,保持稳定状态,不发生偏斜,并具有实时报警系统以确保安全性。这种机械拆除配合方案在减

表 1 绿色爆破拆除相对于传统爆破拆除对环境影响的改善

Tab. 1 Improvement for Environment by Green Explosive Demolition Relative to Common Explosive Demolition		
环境影响	传统爆破拆除	绿色爆破拆除
噪声	以中低频率为主,大多集中在 2~5 Hz(处于人特别敏感的频率范围),持续时间大约 10 s,可控性低。	通过装药结构和精确装药技术控制炸药单耗,有明确的目的性达到爆破目的。
扬尘	传统爆破后短时间内粉尘颗粒浓度达到峰值(可达原先环境浓度的 20 倍~30 倍),扬尘污染持续时间大约 30 min。	绿色爆破可以通过水袋压渣和覆盖防尘网等措施有效抑制扬尘。
有害气体	传统爆破产生的 CO 气体危害人体健康,产生的氮氧化物易引起光污染和导致酸雨形成。	业界对于爆破拆除产生的有害气体方面的研究表明,通常 1 m <sup>3</sup> 混凝土结构用药量为 300 g,在可控范围内,且可通过炸药的氧平衡减少有害气体产生。
地震效应	传统爆破产生复杂的随机复合波,相比天然地震、爆破地震具有加速度大、频率高、衰减速度快、持续时间短的特点。	绿色爆破通过轴向预埋、切割箍筋等技术手段,把炸药单耗在常规爆破拆除的基础上至少降低了 70%,可基本保证安全并降低地震危害。

少人力资源投入的同时,尽可能实现原有结构的完整性,使其对环境的影响最小。

1.3 爆破拆除

爆破拆除基本技术原理是爆破破碎一部分混凝土承重构件,使整体结构失稳后在自重产生的力矩作用下发生倾倒,触地后解体<sup>[11-12]</sup>。传统的爆破拆除分为控制爆破和静态爆破。静态爆破是指将静态爆破膨胀剂装入待拆除结构或构件孔洞,触发水化反应,体积膨胀而产生膨胀力使得混凝土或岩体开裂的技术。目前静态爆破因为产生的破坏力较小且操作程序繁琐、破碎剂污染、成本不易控制等缺陷,已很少被应用于混凝土结构的拆除。控制爆破是指以炸药或雷管为媒介,根据爆破控制要求在结构特定位置设置引爆点,形成爆点网络,最后通过控制各点起爆顺序而拆除建筑物的一种常见方法<sup>[4]</sup>。

近年来,为了克服钻孔难度、爆破成本优势不明显和进一步减少对环境的影响,在毫秒延期雷管和普遍精确爆破网络的基础上,已有专家学者在炮孔的形成、装药结构和精确装药技术等方面,开发了轴向预埋管作为炮孔实现免钻孔,发明了新型装药长袋和堵孔材料实现精确爆破,提出了水耦合装药结构实现低环境影响等一系列混凝土结构的绿色爆破技术<sup>[13-15]</sup>,充分破碎了混凝土,减轻了对钢筋的损伤,基本可实现降低环境影响,达到安全、低碳、低能耗的目的,如表 1 所示。

1.4 智能拆除

智能拆除是指通过应用信息技术、机器人技术对建筑材料、构件及结构进行解构或破碎的拆除方法。智能拆除技术在发达国家发展较为深入,Brokk 系列拆除机器人可以适应沙土、泥泞、废墟等多种施工地面,并且使用低排放柴油驱动和减噪系统以减少环境负担<sup>[16]</sup>。瑞典 Ume 设计院学生在概

念层面上设计了一种名为 ERO 的拆除机器人,如图 3 所示,其工作原理是使用高压水枪喷射瓦解混凝土<sup>[17]</sup>,从而达到拆除混凝土而保留钢筋的目的,该机器人在有辐射或有毒等无法人工作业的特定工作环境里有着特殊应用前景。



图 3 拆除机器人  
Fig. 3 Robot for Demolition

1.5 不同拆除方法的比较

传统的人工拆除对建筑周围环境影响较小,可适用于其他拆除方法无法完成的精细化拆除工作,并且可以较好地进行建筑固废的分类分拣等预处理工作,获得较为完整的砖块、金属、玻璃、木材等可直接回收利用的建筑材料<sup>[9]</sup>。人工拆除存在的问题同样非常明显。人工拆除工作环境复杂、安全管控难度<sup>[18]</sup>非常高,在现代施工建设条件和要求之下,单独依靠人工拆除效果有限。随着现代化建筑结构的不断升级和复杂化,在大多数的拆除施工中已逐渐演变为其他拆除施工工艺的辅助方法。

机械拆除无须施工人员直接接触作业点,安全性相对较好且施工速度快,可有效保证施工工期。传统的机械拆除有其明显的缺点,受到设备工况和垂直运输条件的限制,在拆除高层建筑时面临的

技术难度较大;如果不是事前确定选择性拆除方式,机械拆除对被拆除的混凝土结构及其他构件会造成较大的破坏性,且对拆除后的建筑固废资源化利用将产生不利影响,通常还需要专门进行分离、分选和分类再处理。目前机械拆除已逐步发展为主要拆除方法,从简单结构到复杂结构、从局部拆除到整体拆除几乎都能使用机械拆除。机械拆除与其他拆除方法共同配合使用不仅可以提高工作效率,也可以进一步满足对不同建筑拆除的环境控制要求。

爆破拆除在抢险救灾、危房及危桥的紧急拆除等方面具有一定优势,可改善人工拆除和机械拆除相对效率低、工期长的缺点,但传统的爆破拆除方法对建筑的局部构件和建材性能损伤严重,造成相应各类固废的混合程度较其他拆除方法更高,使资源化利用处理更为复杂。同时短时间内对群众生产生活及周边环境影响较为严重,并不能完全避免噪声、扬尘、光等方面的污染<sup>[18-19]</sup>。

相对于前几项拆除方法的成熟发展,智能拆除技术还处于研究发展阶段,距离非特定环境的广泛智能拆除应用还需要很长时间,现阶段智能拆除带来的更多是一种理念。目前拆除机器人已被尝试应用在核工业、抢险救灾等特定高危拆除场合中。相信随着第四次工业革命<sup>[20]</sup>概念兴起,传统拆除装备在物联网信息系统的推动下有望尽早完成智能化升级改造,为建筑绿色拆除提供更多环保的实现方法。

随技术进步,传统机械拆除中已越来越多地采用多种拆除配合方案(表 2),达到绿色拆除的目的。

2 拆除工艺顺序

2.1 正向拆除施工

混凝土结构拆除存在正向及逆向 2 种施工工艺,正向拆除是按照建筑施工逆顺序的统称,如图 4

表 2 拆除技术的绿色化改进

Tab. 2 Green Improvement for Demolition Technology

项目实例	拆除设备	拆除方案	绿色改进
厦门市仙岳路立交桥改造工程 <sup>[21]</sup>	千斤顶、绳锯	墩承台扩大处理→墩台立柱的中间部分切割→立柱切割拆除	对桥面梁端设置钢支撑体系,千斤顶交替顶升
天津市高层写字楼外立面改造工程 <sup>[22]</sup>	墙锯、水钻	脚手架搭设→对板梁底部的有效支撑→切割→对斜坡外墙和外挑阳台切割	支顶卸荷后切割成条块,对结构件分离、破碎以及清运
嘉盛大厦商住楼原地下室拆除工程 <sup>[23]</sup>	挖掘机、切割机	定位放线→洞口切割→部分梁板拆除→地下室底部局部拆除	对地下室局部采取爆破,有效地为后期扩建打好基础
上海市某商圈深基坑支撑拆除工程 <sup>[24]</sup>	镐头机、绳锯	第 3 道支撑破碎拆除→第 2 道支撑爆破拆除→第 1 道支撑绳锯切割、破碎拆除	在商圈敏感地段,对深基坑支撑采取爆破及破碎拆除,降低对周围环境影响
深圳市某商品住宅建筑拆除工程 <sup>[25]</sup>	挖掘机、破碎机	装饰部分→砖砌体结构→楼板→梁→框架柱→剪力墙	地上部分拆除,通过破碎机对建筑固废妥善处置

注:改造工程项目仅指其中的拆除部分。

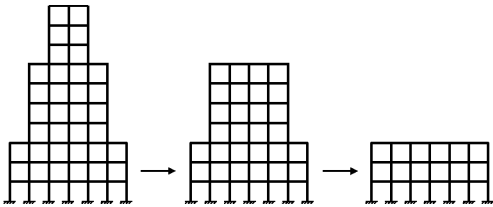


图 4 正向拆除示意图

Fig. 4 Sketch of Forward Demolition

所示。传统的正向拆除是依据荷载传递路径,先拆次要混凝土结构,再拆主要混凝土结构,自上而下逐层逐段完成拆除<sup>[6]</sup>。文献[26]指出预应力结构移除构件时会遇到预应力释放的问题,拆除不当容易造成结构倒塌,安全的拆除是按照原来施工逆顺序(正向拆除方式)拆除结构。

为了改善传统正向拆除在拆除高层建筑时面临的诸多环保问题,同时最大限度降低安全风险,并避免气候影响,日本大成建设公司研发了一种名为 TECOREP 系统型绿色环保的超高层正向拆除方

法。TECOREP 系统在建筑顶部建立封闭式顶盖作为拆除场地,可通过系统内临时柱子上的自动下降装置实现拆除一层即时下降一层的功能,同时垂直运输系统内设发电机,利用系统下降重力势能发电,从而节约能源和减少碳排放<sup>[27]</sup>。

尽管这种 TECOREP 系统工法相对传统拆除施工顺序的成本高,临时支撑系统的设施布置也对工期有所影响,且在处理顶盖系统同步降落问题时具有一定难度,但工程实践也表明 TECOREP 系统可有效克服传统正向拆除施工时处于敞开式环境带来的部分缺点。该系统通过在封闭环境内进行拆除施工,避免了高空强风的影响,也不会因为天气状况不佳而耽误工期应用。TECOREP 系统拆除高层建筑特别是混凝土结构,可以显著降低扬尘污染、噪声污染,利用系统下降的重力势能发电效益也十分可观,该绿色拆除工艺已有多个超高层办公楼成功拆除的应用案例。传统正向拆除与 TECOREP 系统拆除比较如表 3 所示。

表 3 绿色拆除与传统正向拆除的比较

Tab. 3 Comparison Between Green Demolition and Common Forward Demolition

环境影响	传统正向拆除	绿色拆除 (TECOREP 系统)
噪声	噪声在高空传播,影响程度大、范围广	封闭场地拆除,噪声对周围环境影响甚微
扬尘	扬尘在高空扩散,影响范围扩大	封闭场地拆除,扬尘对周围环境影响甚微
碳排放	机械设备、建筑废物垂直运输能源消耗大	重力势能发电效益显著,能源消耗量降低
安全性	高空对流强风,拆除施工安全度低	封闭式环境,拆除施工安全性高
工期	易受恶劣天气影响,需预留延误工期	不受恶劣天气影响,不必预留延误工期

2.2 逆向拆除施工

逆向拆除是从下往上拆除建筑或构筑物的一种拆除方式,如图 5 所示。从整体建筑而言,与正向拆除相反,逆向拆除是按照建筑施工顺序进行拆除。从概念上来看,逆向拆除的实现包含 2 个基本条件:一是底层拆除时,必须有替代结构支撑起整个上部结构;二是上部结构随着拆除工作的进行能够逐层下降。第 1 个基本条件主要分为竖向承重体系和水平抗侧能力两方面,在考虑竖向承重体系时将第 2 个基本条件纳入考虑,即竖向承重体系提供竖向升降功能。竖向承重体系可以由千斤顶替代,也可以由具备升降功能的机械底盘提供。水平抗侧能力可由立柱斜撑系统或设置额外抗侧结构保证。

在实际工程中已经得到应用的逆向拆除方法叫做“鹿岛削底拆除法”(Kajima Cut & Take Down Method),又叫“鹿岛工法”<sup>[28-29]</sup>。这是一种利用千斤顶代替底层立柱支撑整个上部结构,同时设置核心墙-传力框架保证待拆结构抗震性的自下而上逐层在地面上完成全部拆除工作的逆向拆除方法。削

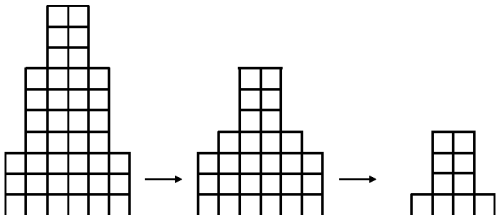


图 5 逆向拆除示意图

Fig. 5 Sketch of Backward Demolition

底拆除法底层承担竖向力的立柱由千斤顶代替(图 6),千斤顶支撑力需要满足承载力的要求,并且为保证传力可靠,各千斤顶必须能够高精度同时升降<sup>[30]</sup>。在设置千斤顶之前,在原有框架上建造封闭的混凝土核心墙。核心墙贯穿地下一层至地上三层,通过钢结构传力框架与周围 4 个立柱连接。核心墙的设置使得结构在自下而上拆除时能够保证水平抗震性能不低于原有结构。

削底拆除法的主要施工步骤如下:①建造混凝土核心墙及钢结构传力框架;②切断底层立柱,插入千斤顶;③拆除底层梁板墙构件;④依次切割立柱



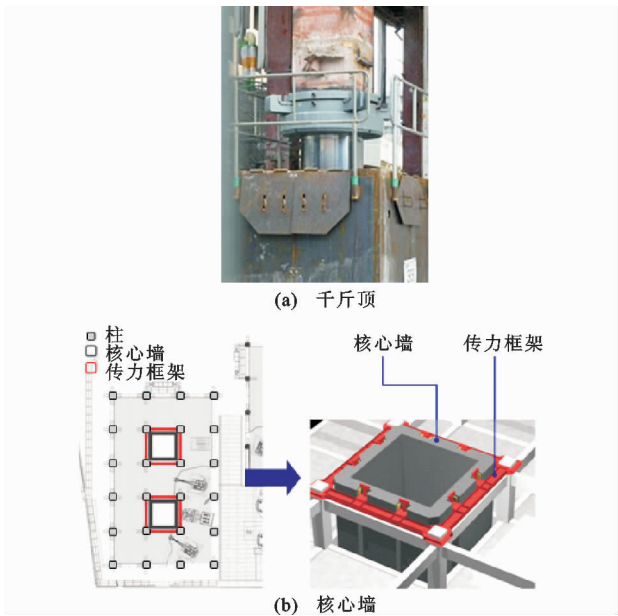


图 6 削底拆除法中千斤顶和核心墙  
Fig. 6 Lift Jack and Core Wall in Cut and  
Take Down Method

70~80 cm,千斤顶顶升相同高度;⑤立柱切割 1 圈后,千斤顶同时下降到原先高度;⑥重复立柱切割和千斤顶顶升下降 5 次,完成一层结构拆除;⑦重复步骤③~⑥,最终完成全部楼层拆除工作。

相比正向拆除,逆向拆除虽然同样有千斤顶系统同步操作的困难以及成本和工期不易控制的缺点,但整个施工作业场地被转移至地面,从而避免高空作业和垂直运输,也能更好地配合环保技术的应用,因此在抑制扬尘、减少噪声和碳排放方面具有显著优势,如表 4 所示。此外,地面存放的场地条件相对更好,也便于及时运输和各类机械设备进入,对于提高拆除效率和建筑固废资源化利用水平也大有裨益。

表 4 逆向拆除的环境效益

Tab. 4 Environmental Benefits of Backward Demolition

环境效益	分析
控制噪声	在地面拆除,无噪声在高空传播,避免垂直运输产生的巨大声响。
抑制扬尘	拆除场地从高空转到地面本身降低约 10% 粉尘,此外还易于配合喷雾技术进一步降低粉尘。
减少碳排放	地面拆除效率高,避免高空垂直运输产生的能源消耗,大约减少 8.5% 的碳排放量。
建筑固废资源化	建筑固废存放场地条件好、运输效率高,分类回收利用效率可提高 1 倍以上。

2.3 混凝土结构拆除顺序

混凝土不同的结构区域在不同的施工工艺顺序

指导下所采取的拆除顺序也有所不同。

正向拆除施工。根据《建筑拆除工程安全技术规范》拆除施工的要求,当采用机械拆除建筑时,应从上至下、逐层分段进行,先拆除非承重结构,再拆除承重结构。拆除框架结构建筑必须按楼板、次梁、主梁、柱子的顺序进行施工。对于具体的构件,通常采用“先撑后拆,分块、分段破碎分离”的原则进行拆除,以混凝土框架剪力墙结构为例,每层拆除顺序为板→次梁→主梁→框架柱→剪力墙,各构件具体拆除方法总结如表 5 所示<sup>[31]</sup>。

表 5 框架剪力墙拆除施工工艺

Tab. 5 Demolition Construction Technology of  
Frame-shear Wall

构件名称	拆除工艺
楼面板	先按标准区格分块放线、划分,然后沿划分线破碎出分离带,再切割楼板钢筋,逐块下落板件到下层的楼板上。
框架梁	确保梁端剪力墙,先单向开孔破碎混凝土梁,后分块切割。
框架柱	先设置支撑体系,后从上而下分块切割或先破碎柱底混凝土保护层并切断纵筋,后放倒柱体。
剪力墙	先设置支撑体系,后从上而下分区分块切割;或先竖向分割剪力墙,后破碎墙底混凝土保护层并切断钢筋,再放倒墙体。

逆向拆除施工。逆向拆除的全部拆除工作都是在建筑底层进行,在上部结构受到有效支撑后,将下部结构逐层拆除。就每层混凝土结构而言,先拆除梁板等水平构件,再拆除墙柱等竖向构件,最终完成逐层逐步的拆除。拆除框架结构建筑,仍然必须按楼板、次梁、主梁、柱子的顺序进行施工。

3 绿色拆除与资源化展望

在建筑生命周期理论中建筑拆除是建筑固废资源化的前一个阶段。通过绿色拆除实现资源化利用的过渡是建筑固废资源化解方案的关键环节之一。废旧建筑材料资源化利用层次可分为系统级、产品级和材料级<sup>[32]</sup>,分别对应不同拆除目标,如表 6 所示,由此可以分析得到以下 3 点关于拆除与资源化关系的认识:

(1)从建材到构件层面分类拆除

通常装修材料在混凝土结构拆除前可通过人工方式分类拆除并进行资源化处理。拆除时实现从建材到构件层面的分类拆除可提高建筑固废资源化利用层次,分类拆除的同时必须考虑建材或构件的存放和运输问题,尤其是多高层建筑正向拆除时的场

表 6 废旧建筑材料资源化利用层次与目标

Tab. 6 Resource Utilization Levels and Purposes of Used and Discarded Building Materials

资源化利用层次	概念	目标	资源化的建筑产品
系统级	旧建筑翻新改造以满足新的使用需求	对旧建筑翻新改造	整体建筑或局部建筑系统
产品级	旧建筑结构件或局部结构件的回收利用	旧建筑拆除,实现对旧建筑结构件的无损拆除	拆除后的完整建筑结构件
材料级	旧建筑材料的再生利用	旧建筑拆除,实现对旧建筑材料破碎分离	破碎后的建筑再生料

地需求和垂直运输条件会遇到较多限制,多数情况下会对构件进行破碎,资源化利用层次提高较为困难。此外为实现拆除到资源化的过渡,在分类拆除前应根据工程实际确定好具体的资源化处理方式和利用途径。

(2)从构件无损拆除到建筑可拆装

一般无损拆除是指拆除构件时对原有混凝土结构和其他构件没有损坏损伤,常常用于局部拆除和改造工程。为了更好地对拆除产生的建筑固废进行资源化处理,拆除造成的构件损伤也应当得到控制。现阶段,建筑可拆装分为结构和构件 2 个层次。结构层次是指可拆装的简单结构,如木结构和全螺栓连接钢结构建筑,关键技术在于结构系统简化和可拆卸节点设计<sup>[33-34]</sup>。构件层次是指可拆除的标准化构件,如可拆装组合楼板和可更换剪力墙<sup>[35]</sup>,关键技术在于标准构件设计和拆装构造。从构件无损拆除到建筑可拆装,可以更大程度上实现建筑固废在系统级和产品级层次上的资源化利用。

(3)从混凝土结构拆除到资源化

随着中国城镇化速度的加快,建筑拆除仍无法完全按照绿色拆除理念进行施工方案的制定,单纯追求施工速度不可避免造成对环境的影响,也未能彻底实现对建筑固废的高效利用。针对传统拆除混凝土结构施工工艺的种种弊端,综合考虑拆除施工成本、环境影响因素,将绿色拆除与资源化技术紧密结合,是达到减少建筑垃圾量和提高废弃物资源化利用率的关键。

4 大桥匝道绿色拆除案例

根据城市整体交通规划,对大桥上匝道实施平移,需将该匝道北侧 28#~34# 墩的桥梁墩柱进行拆除,而南侧 20#~28# 墩八跨桥梁需要进行整体调坡降落,且对 28# 墩改台,如图 7,8 所示。南侧的八跨桥梁配跨为 8×20 m,宽度为 9.55 m;上部结构均为简支预应力板梁,混凝土强度为 C40;下部结构桥墩均为方桩(C25)、承台(C25)、立柱接盖梁(C30)。桥梁单跨最大质量为 460 t,八跨总质量约为 3 400 t。



图 7 需拆除的北侧六跨桥段

Fig. 7 Six Segments Need Demolition at North of Bridge



图 8 需整体降落的南侧八跨桥段

Fig. 8 Eight Segments Need Low Down at South of Bridge

该案例中存在 2 个问题:一是降坡落梁技术难度大,按设计要求,八跨简支梁长为 160 m,整体最大降落高度为 5.231 m,降落面积为 1 528 m<sup>2</sup>;二是工程工期紧,按施工进度要求,该工程需要尽快通车,施工周期很短。

为此,施工单位为确保该工程项目能够优质、安全、按期完工,在绿色施工思路研发出降坡拆除施工的专用设备,并针对该工程特点组织顶升降落施工方案及技术措施,包括墩柱降落反力基础改造、降落支撑安装、支撑体系加固、降落设备安装连接、墩柱切割、20#~28# 墩桥梁整体调坡降落和墩柱连接等分项方案。

通过在原承台顶部植筋增厚混凝土找平层来改造墩柱降落的反力基础,为降落支撑的安装及持力提供保障,改造后的基础结构可永久保留,无需拆

除。降落支撑体系采用钢结构拼装式格构体系,主支撑采用标准钢桶通过法兰螺栓连接,横向连接加固件采用标准型钢焊接。该体系在现场进行拼装,工程结束后还可拆除重复利用。降落设备采用 PLC 液压交替降落控制设备,计算机全程控制液压千斤顶的同步误差不大于 1 mm。采用绳锯切割墩柱,基本可做到施工过程中无振动、无噪声、无污染,施工效率高且安全性能较好。

该工程的降落工艺及设备有针对性地改善施工条件及控制措施,仅通过支座更换及对必要的支撑设施生产及拆除,基本做到对原匝道混凝土结构较为完整的保留,实现产品级至系统级的资源化再利用。同时也看到,植筋打孔等施工不可避免对原结构有一定程度破坏,降落工艺尚未能够实现系统化,施工过程仍存在不确定的风险因素。在类似的拆除工程上辅以相应有效的加固措施,同时推进工艺标准化,是全面实现绿色拆除施工的有效保障。

## 5 结 语

(1)建筑拆除阶段是建筑生命周期中的关键环节之一,与建筑固废资源化紧密关联。

(2)采用传统策略拆除混凝土结构现已不能很好地满足生态环境保护要求。具有有选择性和分类性等重要特征的绿色拆除可以显著提高建筑固废资源化利用程度。绿色拆除与资源回收两者的目标具有高度一致性。

(3)机械拆除由于设备研发和施工方法不断更新,未来一段时间仍将作为主要拆除方法;随着人工智能的不断进步,机械拆除越来越智能化,智能拆除已可预见成为一种发展趋势;绿色爆破拆除相对于传统爆破更能提高效率,有效控制对生态环境的影响;人工拆除则已逐步成为非简易结构建筑物拆除的辅助施工方法。

(4)通过对拆除的设计和优化,正向和逆向 2 种拆除施工方法均可实现环境友好和资源化。绿色拆除技术的深入研究可以丰富和推动建筑生命周期理论与技术的发展。

## 参考文献:

## References:

[1] TSAI W H, YANG C H, CHANG J C, et al. An Activity-based Costing Decision Model for Life Cycle Assessment in Green Building Projects[J]. European Journal of Operational Research, 2014, 238 (2): 607-619.

[2] 林 叶. 基于生态视角的建筑废弃物资源化产业发展研究[D]. 重庆:重庆大学, 2014.  
LIN Ye. Study on C&D Waste Recycling Industry Development Based on the Ecological Perspective[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.

[3] 程晓辉. 建筑物拆除施工噪声评价及控制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.  
CHENG Xiao-hui. The Assessment of Construction Demolition Noise and It's Control[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.

[4] 蒋洪涛. 混凝土箱梁桥拆除施工技术研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2011.  
JIANG Hong-tao. Demolished Construction Technology Research of Concrete Box Girder Bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2011.

[5] 张 帆. 连续刚构钢筋混凝土箱梁拆除技术研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2013.  
ZHANG Fan. The Study of Continuous Rigid-frame Structure of Reinforced Concrete Box Girder Demolition Technology[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013.

[6] 王泽锋. 基坑钢筋混凝土支撑梁的机械拆除施工技术[J]. 建筑施工, 2016, 38(10): 1354-1356.  
WANG Ze-feng. Construction Technology for Mechanical Demolition of Foundation Pit Concrete Support Beams[J]. Building Construction, 2016, 38 (10): 1354-1356.

[7] 张国辉. 混凝土框架结构的预应力拆除技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.  
ZHANG Guo-hui. Study on the Technique for Dismantling RC Frame with Prestressing Method[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.

[8] 张静涛, 杨凯明. “降层拆除法”在高层建筑楼体拆除中的应用[J]. 建筑施工, 2016, 38(10): 1444-1446.  
ZHANG Jing-tao, YANG Kai-ming. “Demolition Method for Lowering Building Floor” Applied to High-rise Building Demolition[J]. Building Construction, 2016, 38(10): 1444-1446.

[9] ELIAS-OZKAN S. Selective Demolition of Redundant and Earthquake Damaged Buildings in Turkey[J]. METU Journal of the Faculty of Architecture, 2012, 29(1): 139-152.

[10] 李 然. 基于 Simotion C240 的数控液压千斤顶同步控制系统研究[J]. 自动化应用, 2016(8): 111-113.  
LI Ran. Research on Synchronous Control System of Hydraulic Jack Based on Simotion C240[J]. Automation Application, 2016(8): 111-113.

[11] 刘培林. 钢筋混凝土结构爆破拆除研究[D]. 兰州: 兰



- 州大学,2012.
- LIU Pei-lin. Research on Blasting Demolition of Reinforced Concrete Structure[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [12] 刘昌邦. 城市高架桥爆破拆除力学机理与模型试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- LIU Chang-bang. Study on Mechanical Mechanism and Model Test of Urban Viaduct Demolition Blasting [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.
- [13] 程大春, 叶建军, 汪腊香, 等. 钢筋混凝土梁柱轴向预埋孔长袋水耦合精确装药爆破拆除技术[J]. 爆破, 2018, 35(2): 107-113.
- CHENG Da-chun, YE Jian-jun, WANG La-xiang, et al. Explosive Demolition of Reinforced Concrete Beam and Column by Water Coupling Accurate Charging with Pre-buried Axial Holes and Long Bag[J]. Blasting, 2018, 35(2): 107-113.
- [14] 叶建军, 程大春, 舒大强, 等. 钢筋混凝土杆件轴向预埋孔绿色拆除爆破技术[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(10): 151-157.
- YE Jian-jun, CHENG Da-chun, SHU Da-qiang, et al. Green Blasting Technology for Demolition of Reinforced Concrete Bars by Using Pre-buried Axial Pipes as Blast Holes[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 151-157.
- [15] 叶建军, 程大春, 明 军. 基坑钢筋混凝土临时支撑梁绿色拆除爆破技术[J]. 爆破, 2017, 34(1): 101-107.
- YE Jian-jun, CHENG Da-chun, MING Jun. Green Explosive Demolition of Temporary Reinforced Concrete Pit-supporting Beams[J]. Blasting, 2017, 34(1): 101-107.
- [16] 蒋 君. 遥操作拆除机器人工作装置的设计与研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2016.
- JIANG Jun. The Design and Research of Teleoperation Demolition Robot Working Device [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2016.
- [17] SOBOTKA A, RADZIEJOWSKA A, CZAJA J. Tasks and Problems in the Buildings Demolition Works: A Case Study[J]. Archives of Civil Engineering, 2015, 61(4): 3-18.
- [18] 李君婷, 崔建文, 魏昶帆, 等. 22层楼房爆破拆除震动监测分析[J]. 爆破, 2013, 30(1): 126-130.
- LI Jun-ting, CUI Jian-wen, WEI Chang-fan, et al. Blasting Vibration Monitoring of Explosive Demolition of 22-storey Structure[J]. Blasting, 2013, 30(1): 126-130.
- [19] 吴永刚, 吴春平, 谢 源. 基于爆破振动有害效应的室内居住环境影响评价[J]. 有色金属: 矿山部分, 2013, 65(4): 67-70, 74.
- WU Yong-gang, WU Chun-ping, XIE Yuan. Impact Assessment of Indoor Living Environment Based on the Harmful Effect of Blasting Vibration[J]. Nonferrous Metals: Mining Section, 2013, 65(4): 67-70, 74.
- [20] 李彦宏. 智能革命——迎接人工智能时代的社会、经济和文化变革[M]. 北京: 中信出版集团, 2017.
- LI Yan-hong. Intelligent Revolution — Social, Economic and Cultural Revolution in the Era of Artificial Intelligence[M]. Beijing: China Citic Press, 2017.
- [21] 游 炜. 城市桥梁改造中的既有连续梁桥顶升技术改造[J]. 福建建筑, 2015(5): 78-81.
- YOU Wei. City Bridge Reconstruction in Both Continuous Beam Bridge Jacking Technology Transformation [J]. Fujian Architecture & Construction, 2015 (5): 78-81.
- [22] 闫文斌, 王宏林, 章传学. 高层建筑板墙切割拆除工艺[J]. 建筑结构, 2010, 40(增2): 654-656.
- YAN Wen-bin, WANG Hong-lin, ZHANG Chuan-xue. The Construction Technology of Cutting Floor and Wall in High-rise Building [J]. Building Structure, 2010, 40(S2): 654-656.
- [23] 朱田明. 逆向拆除原地下室结构施工工艺[J]. 施工技术, 2015, 44(增): 135-137.
- ZHU Tian-ming. Construction Technology of Reverse Demolition of the Original Basement [J]. Construction Technology, 2015, 44(S): 135-137.
- [24] 韦伟鸿, 于银宝. 深基坑支撑拆除工法的灵活运用[J]. 工业建筑, 2008, 38(增): 971-974.
- WEI Wei-hong, YU Yin-bao. Demolish Method Flexible Applied in Deep Foundation Pit Supporting [J]. Industrial Construction, 2008, 38(S): 971-974.
- [25] 欧阳磊. 基于碳排放视角的拆除建筑废弃物管理过程研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2016.
- OUYANG Lei. Research on the Process of Demolition Waste Management from the Perspective of Carbon Emission [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2016.
- [26] PEREIRA S S R, MAGALHAES M D C, GAZZINELLI H. An Alternative Technique to the Demolition of a Prestressed Concrete Box-girder Bridge: A Case Study [J]. Case Studies in Construction Materials, 2017, 6: 192-197.
- [27] KAYASHIMA M, SHINOZAKI Y, KOGA T. A New Demolition System for High-rise Building [C]//CTBUH. CTBUH 9th World Congress Shanghai 2012 Proceedings. Shanghai: CTBUH, 2012: 631-636.

- [28] 郝赤彪, 苏楠. 建筑拆除过程中的可持续措施初探[J]. 中外建筑, 2015(2): 114-116.  
HAO Chi-biao, SU Nan. On Sustainable Strategies in the Process of Building Demolition[J]. Chinese & Overseas Architecture, 2015(2): 114-116.
- [29] 郭彪. 日本鹿岛住宅建筑工业化技术与工程实践[J]. 住宅产业, 2012(6): 76-80.  
GUO Biao. Industrial Technology and Engineering Practice of Residential Building in Kashima, Japan[J]. Housing Industry, 2012(6): 76-80.
- [30] MIZUTANI R. Jack Down Building Demolition Method; KC & D C (The Kajima Cut and Take Down Method)[J]. Journal of the Society of Mechanical Engineerings, 2011, 114: 424-425.
- [31] 朱进军, 邵勇, 杨晓红. 在建高层建筑局部拆除技术及安全控制[J]. 建筑技术, 2016, 47(11): 1030-1033.  
ZHU Jin-jun, SHAO Yong, YANG Xiao-hong. Local Dismantlement Technique and Safety Control of High-rise Building Under Construction[J]. Architecture Technology, 2016, 47(11): 1030-1033.
- [32] 贡小雷. 建筑拆解及材料再利用技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.  
GONG Xiao-lei. The Technology Research of Building Deconstruction & Building Materials Reuse [D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [33] 徐洪澎, 康健, 吴健梅. “3R”原则下现代木建筑创作的实证方案分析[J]. 建筑学报, 2015(12): 82-88.  
XU Hong-peng, KANG Jian, WU Jian-mei. An Empirical Analysis on the Schemes of Modern Timber Architecture Based on the 3R Principle of Material Efficiency[J]. Architectural Journal, 2015(12): 82-88.
- [34] 陈德平, 杨彦. 可持续理念在钢结构设计中的应用——厦门某可拆装钢结构停车楼设计[J]. 福建建筑, 2015(7): 35-37.  
CHEN De-ping, YANG Yan. The Application of Sustainable Idea in Steel Structure Design — Designing of a Removable Steel Parking Garage in Xiamen[J]. Fujian Architecture & Construction, 2015(7): 35-37.
- [35] 吕西林, 陈聪. 带有可更换构件的结构体系研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(1): 27-36.  
LU Xi-lin, CHEN Cong. Research Progress in Structural Systems with Replaceable Members[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(1): 27-36.