

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.014

有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术*

叶建军¹, 郭水龙¹, 刘佳乐¹, 韩学军², 刘兵兵²

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068; 2. 湖北凯龙工程爆破有限公司, 荆门 448004)

摘要: 基于建筑全寿命设计理念, 提出了有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术。新技术主要特征是: 在钢筋混凝土框架结构建筑物建造时就预埋轴向孔, 该预埋孔在建筑物使用期间兼作穿线管、落水管等用途, 待建筑物寿命终结时用于拆除炮孔。给出了满足钢筋混凝土框架结构建筑物全寿命功能要求的预埋孔的布置形式、管径和材质建议, 及其用于爆破拆除的倒塌方式、爆破切口、装药结构和施工流程设计方法; 基于 PKPM 结构计算软件, 提出了轴向预埋孔对钢筋混凝土框架结构的力学性能影响分析方法。在此基础上, 将新技术应用到某多层钢筋混凝土框架结构工程的原地坍塌拆除设计, 并与传统钻孔爆破技术进行了技术经济对比分析。结果表明: 直径 50 mm 的轴向预埋孔不会影响结构的安全; 相比钻孔爆破拆除技术, 新技术堵塞、防护和组网工作量大幅降低, 大幅提高了拆除效率, 炸药消耗降低了 72.9%, 雷管消耗降低了 84.7%, 直接成本降低了 52.5%, 有害效应也明显降低。因此, 新技术具备显著的先进性, 也具备可用性。

关键词: 全寿命设计; 钢混框架; 爆破拆除; 轴向预埋孔; 一孔多用; 力学性能

中图分类号: TU746.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0121-12

Blasting Demolition Technology for Reinforced Concrete Frame Structures with Longitudinal Pre-embedded Holes

YE Jian-jun¹, GUO Shui-long¹, LIU Jia-le¹, HAN Xue-jun², LIU Bing-bing²

(1. College of Civil, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 2. Hubei Kailong Engineering Blasting Co., Ltd., Jingmen 448004, China)

Abstract: Based on the whole-life building design concept, this study proposes a blasting demolition technology for reinforced concrete frame structures incorporating longitudinal pre-embedded holes. The key innovation of this technology lies in the pre-embedded longitudinal holes during reinforced concrete frame construction, which serve as dual conduits (e. g., for wiring or drainage) during the building's service life and subsequently as blast holes during demolition. The study proposes optimized specifications for pre-embedded holes, including layout configurations, diameter parameters, and material selection, to ensure functional performance across the building's lifecycle. Concurrently, it develops integrated demolition solutions that encompass collapse mechanisms, blasting cut designs, charge structure configurations, and construction sequencing protocols. Using the PKPM structural analysis software, an analytical method is proposed to evaluate the effects of longitudinal pre-embedded holes on the mechanical performance of reinforced concrete frame structures. The technology was successfully applied in the controlled vertical implosion demolition of a reinforced concrete frame structure, with a technical and economic comparison demonstrating its ad-

收稿日期 (Date of reception): 2025-05-21

网络首发日期 (Published online): 2025-09-05

作者简介: 叶建军 (1974-), 男, 湖北英山人, 博士、教授、博导, 主要从事绿色爆破、绿色拆除、生态护坡研究, (E-mail) 20141005@hbut.edu.cn。

基金项目: 湖北省安全生产监督管理局项目“城市建筑物拆除爆破低环境影响安全生产技术”(项目编号: 4217/00078)

About the author: YE Jian-jun (1974-), male, born in Yingshan, Hubei Province, Ph. D, professor, doctoral supervisor, mainly engaged in green blasting, green demolition, ecological slope protection research, (E-mail) 20141005@hbut.edu.cn.

Fund Programs: Hubei Provincial Administration of Work Safety Project 'Safety Operating Technology for Urban Building Demolition and Blasting with Low Environmental Impact' (Project No. 4217/00078)

vantages over conventional drilling-and-blasting methods. Results indicate that longitudinal pre-embedded holes with a 50 mm diameter do not compromise structural safety. Compared to conventional drilling and blasting techniques, this technique substantially reduces the workload of stemming, protection requirements, and network configuration efforts, thereby significantly enhancing demolition efficiency. The results indicate a 72.9% reduction in explosive consumption, an 84.7% decrease in detonator usage, and a 52.5% reduction in direct costs, along with substantially mitigated harmful effects, demonstrating the significant progressiveness and practical applicability of the new technology.

Key words: whole-life cycle design; reinforced concrete frame; blasting demolition; longitudinal pre-embedded holes; one hole for multiple uses; mechanical performance

钢筋混凝土框架结构建筑物拆除主要有机械拆除和爆破拆除两种技术。爆破拆除技术凭借其安全可控、高效率 and 环境影响短暂等优势,在可见的未来仍然是主要拆除手段^[1]。然而,随着我国城市在安全、环保等方面的要求越来越高,爆破拆除也面临诸多挑战^[2],须朝精细化和绿色化方向发展^[3,4]。

已有的框架结构爆破拆除研究主要集中在倒塌运动机理、倒塌过程数值模拟、爆破切口设计和有害效应控制等方面^[5-10]。经过去几十年的研究,基本解决了切口设计、装药结构设计、准确倒塌、塌落振动和飞石控制等关键技术难题^[2],框架结构爆破拆除技术已日臻完善。然而,作为框架结构建筑物全寿命周期的一个环节,传统的框架结构爆破拆除是孤立存在的,即直到框架结构建筑物寿命终结时才考虑拆除问题。传统爆破拆除的基本操作是:先选定倒塌方式和确定爆破切口,然后对爆破切口中梁柱采用钻孔爆破,使之倒塌移除。爆破切口内的梁柱等结构的炮孔通常为浅孔,炮孔数量庞大,钻孔工作量且钻孔困难(钻头容易遇到钢筋而损坏),爆破网路复杂,一次爆破总炸药量大且能量利用率低。这种传统钢筋混凝土梁柱钻爆拆除法不但作业复杂、劳动强度高,还有较严重的钻孔噪音和粉尘污染,大药量带来的有害爆破效应也较突出。

为了避免钻孔带来的成本和环境污染,要引入全寿命设计理念:从钢筋混凝土结构建筑物设计建造时就考虑爆破拆除问题,在结构设计和建造时就预埋用于拆除的炮孔。该想法最先用于寿命较短的钢筋混凝土基坑支撑梁(一种临时建筑)的拆除工程^[11]。早期在钢筋混凝土支撑梁中布置的预埋孔模仿钻孔布置方式,也为浅孔。这种预埋浅孔爆破同样存在炮孔数量多、爆破网路复杂、炸药能量利用率低的缺点。为了克服预埋浅孔爆破的缺点,叶建军等提出沿钢筋混凝土杆件长轴布置预埋孔(即轴向预埋孔或轴向预埋管)的方案^[12]。该方案经过实际工程应用的检验^[13],能大幅降低了炮孔数量,提高了炸药的能量利用率,降低器材消耗和拆除成本,

显著降低有害效应。

早期预埋孔用途单一,只用于拆除炮孔。为了进一步提高建筑物全寿命效益,预埋孔一孔多用的方案陆续提出:在大体积混凝土中的预埋孔前期作为降温和控制裂缝的管道^[14],寿命终结时用作拆除炮孔;在公路面层和基层之间预埋孔,路面使用期间作为发热融雪化冰管道^[15],路面大修拆除时用作拆除炮孔等。

在这些混凝土建筑物预埋孔一孔多用做法的启发下,将临时建筑杆件轴向预埋孔拆除爆破技术进一步发展用于永久钢混框架结构中,提出了有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术^[16]。分析了轴向预埋孔一孔多用的可行性,给出了轴向预埋孔对框架结构的力学影响有限元分析方法,提出了框架结构中轴向预埋孔的布置形式、管径和管材建议,以及利用轴向预埋孔进行钢混框架结构爆破拆除的倒塌方式和装药结构,论证了技术的可用性。在此基础上,对某多层框架结构拆除工程利用新技术进行了设计,并与传统钻孔爆破拆除方案进行技术经济对比,以彰显新技术的先进性。

1 有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术

该技术的最主要特征是:在框架结构建造时就预埋轴向孔,该轴向孔在建筑物使用期间兼作穿线管、落水管等用途,待建筑物寿命终结时,用于拆除炮孔。

1.1 轴向预埋孔的布置

钢混框架结构爆破拆除时多数只爆破框架柱即可实现框架结构拆除。在框架柱中布置轴向预埋孔,该预埋孔既要满足作为穿线管、落水管和拆除炮孔的功能需求,还要满足框架结构的强度刚度要求。

1.1.1 预埋孔布置及功能

框架柱主要分为周边柱和中间柱。根据课题组论文《落水管内置入钢筋混凝土周边柱的可行性分析》(已被《科学技术与工程》杂志录用,2025年7月见刊)研究:将落水管内置于框架结构周边柱中

能同时满足排水和爆破拆除周边柱的需求。周边柱预埋孔(作为落水管和拆除炮孔)布置如图 1 所示。

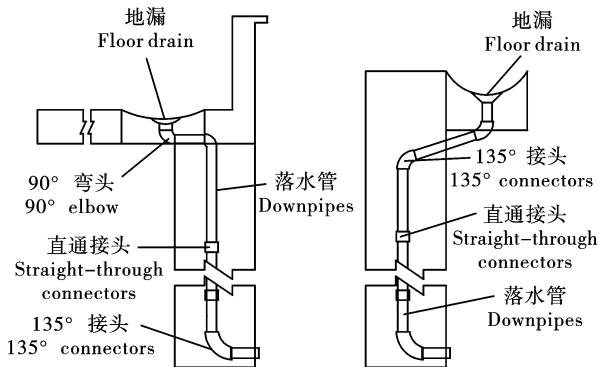


图 1 周边柱预埋孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pre-embedded holes in peripheral columns

类似地,在钢混框架结构中间柱中布置轴向预埋孔,该预埋孔在建筑物使用期间可用作穿线管等,待建筑物寿命终结时作为拆除炮孔^[17]。这实际上也是把传统的开槽布置或外挂布置的框架结构建筑管线内移到框架结构中间柱里。建筑管线包括给水、排水、电气、暖通、燃气、消防和通信等多种管线。考虑结构安全、管道的寿命和维护,以及管道破裂后对结构可能产生的影响,给水、排水、暖通、燃气、消防管道都不宜内移进入框架结构梁柱中。电气管和通信管在建筑使用期间较稳定、寿命长,管道破裂对结构影响小,且在建筑中布置广泛,呈“树状”分布特征,可将电气管和通信管的主干管内置于框架柱中。在周边柱中已预埋落水管的情形,电气管和通信管可内置于框架中间柱中。

为便于预埋孔穿线和后期装药,框架柱轴向预埋孔需侧向开孔。考虑到框架结构梁柱节点处往往钢筋加密、强度增加,柱端也有箍紧效应,宜将侧向开孔布置在梁柱节点附近,如图 2 所示。

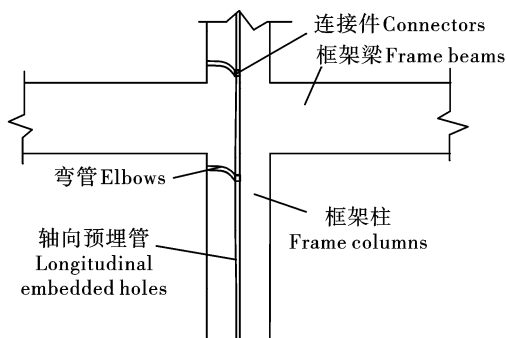


图 2 中间柱预埋孔示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pre-embedded holes in central columns

除上述在钢混框架柱中布置轴向管,还可在框架的梁中布置轴向管。框架柱和框架梁中的预埋管可以相互贯通,进而形成有轴向预埋孔的梁柱体系^[16],形成框架结构的“血管”,直通建筑各个部位,以满足电气通信管道等功能需求,减少后期建筑开洞和开槽等工作。部分管道或管道的局部在建筑拆除时可作为拆除炮孔,避免了或大幅减少了常规钻孔工作。

1.1.2 预埋孔孔径

根据课题组相关研究,单根钢筋混凝土柱的空心率在 0.18% ~ 2.0% 之间,轴向预埋孔对钢筋混凝土柱的影响基本可以忽略,可保证框架结构的安全(该规律在论文《落水管内置入钢筋混凝土周边柱的可行性分析》中发表)。按照这个安全要求,常见规格的框架结构柱中布置轴向预埋孔孔径要求见表 1 第 2 列。框架结构柱满足爆破拆除,孔径要足够大,其最大装药量要大于或等于钢筋混凝土柱的炸药单耗。根据工程实践,发现使用轴向预埋炮孔时^[13,17],钢筋混凝土梁的炸药单耗为 278 ~ 500 g/m³。考虑到框架柱受压和永久建筑中框架柱配筋较高和处于受压状态,有轴向预埋孔的框架柱爆破拆除炸药单耗需要提高,宜采用 400 ~ 800 g/m³。再根据炸药单耗、常规炸药类型(直径 32 mm 乳化炸药)、装药长袋、雷管脚线所占空间和便于装药操作,轴向预埋孔最小孔径宜为 50 mm。当柱子较细、孔径较大时,可以采用间隔装药满足炸药单耗 400 ~ 800 g/m³ 范围要求。满足爆破拆除的预埋孔孔径见表 1 第 3 列。轴向预埋孔孔径除了满足结构安全和拆除炮孔要求,还需满足建筑功能要求。《建筑给水排水与节水通用规范》GB 55020—2021 要求的落水管管径最小为 75 mm,通常外置落水管管径大于 110 mm。当建筑落水管外置时数量较少,而内置时可增加数量;考虑到 1 根管径 110 mm 落水管的泄流能力相当于 5 根 50 mm 或 3 根 75 mm 落水管的泄流能力,内置落水管孔径可突破规范要求,孔径大于 50 mm 即可,孔径为 50 ~ 110 mm 安全性和经济性最佳,见表 1 第 4 列(当落水管内置于周边柱仍然无法满足排水要求,可以在建筑拐角处设置外置落水管)。根据《建筑电气与智能化通用规范》GB 55024—2022 要求,电气通信管管径多为 15 ~ 50 mm,即可满足要求,因此管径大于 15 mm 即可,宜在 15 ~ 50 mm,见表 1 第 5 列。因此,周边柱轴向预埋孔在满足结构安全、爆破拆除、屋顶排水要求下的孔径建议值见表 1 第 6 列,中间柱轴向预埋孔在满足结构安全、爆破拆除和电气通信管的孔径建议值见表 1 第 7 列。轴向预埋孔孔径取值尽量靠近建议值范围

内的最小值,且应选用常用管道直径,以减轻对结构的影响,也降低材料成本。

表 1 钢混框架柱轴向预埋孔孔径建议值(单位:mm)

Table 1 Recommended bore diameter values for longitudinal pre-embedded holes in frame columns(unit:mm)

横截面尺寸 Cross-sectional dimension	轴向预埋孔孔径要求 Diameter requirement of longitudinal embedded holes				轴向预埋孔孔径建议值 Recommended bore diameter values for longitudinal pre-embedded holes	
	结构安全 Structural safety	爆破拆除 Demolition blasting	落水 Drowning	电气或通信 Electricity or communication	周边柱 Perimeter columns	中间柱 central columns
500 × 500	24 ~ 80				50 ~ 80	50 ~ 80
600 × 600	28 ~ 98	≥50	≥50	≥15	50 ~ 90	50 ~ 90
700 × 700	34 ~ 112	宜 50	宜在 50 ~ 110	宜在 15 ~ 50	50 ~ 110	50 ~ 110
800 × 800	38 ~ 128	Suitable	Suitable at	Suitable at	50 ~ 125	50 ~ 125
900 × 900	44 ~ 144	at 50	50 ~ 110	15 ~ 50	50 ~ 140	50 ~ 140
1000 × 1000	48 ~ 160				50 ~ 160	50 ~ 160

1.1.3 管材材质

由于预埋孔要同时兼顾穿线管、落水管和拆除炮孔的功能,所以管材材质既要有良好的耐久性,又不能强度太高而不易爆破拆除。塑料材质成为可选材质,例如:PE、PVC 等。PVC 管因其良好的物理性质、防震、耐化学药品、电绝缘性能、成本低廉、寿命长和易加工等优势,成为工程首选,PVC 管壁厚根据规范要求即可。

1.2 有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除倒塌方式

当钢混框架结构的所有框架柱都有轴向预埋孔时,可根据实际环境,灵活选择多种倒塌方式。考虑到城市中建筑密集的现实,以及预埋管与建筑高度相当的特点,原地坍塌方式更有优势。如图 3 所示

的案例中,通过合理设置切口位置和延期起爆顺序,可实现最大程度地降低单响药量、充分解体建筑和控制爆堆范围的目的。较优的起爆方案为:第一圈中间柱首先起爆,逐柱延时 25 ms 左右起爆,每根柱的所有切口同时起爆;第二圈中间柱的起爆时间宜比第一圈中间柱滞后 200 ms 以上(参考文献[9]),第二圈中间柱可顺时针或逆时针逐柱依次延时 50 ms 左右起爆,每根柱的所有切口也同时起爆;为控制倒塌方向和减少爆堆范围,第三圈柱和最外两排柱先爆破最下切口,再从下到上依次爆破其余切口,然后逐柱延期 50 ms 左右。

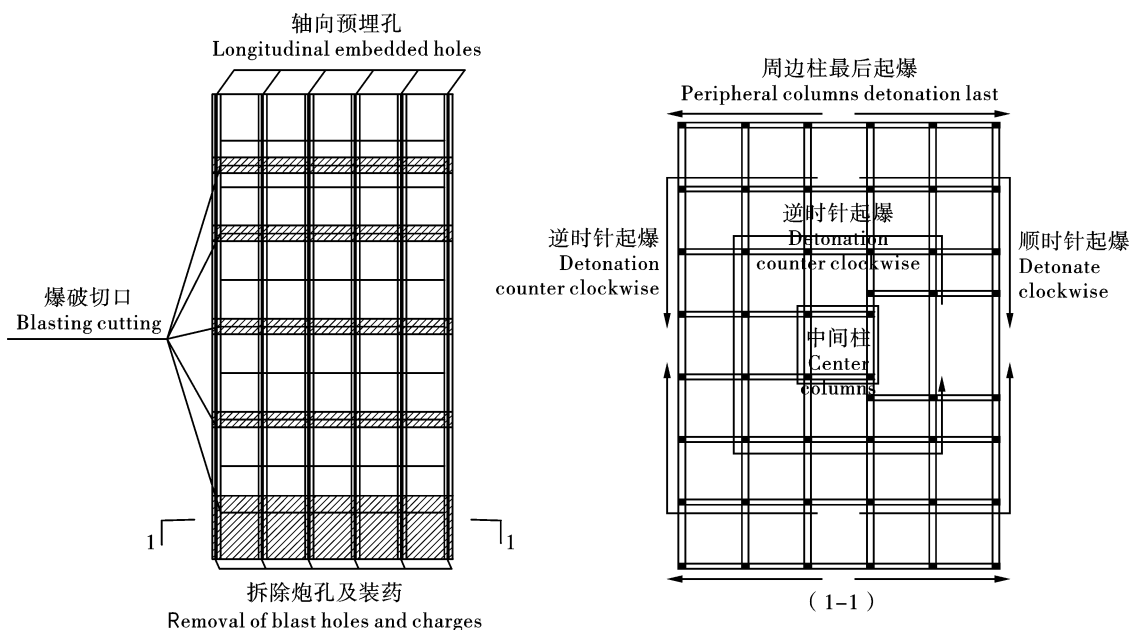


图 3 原地坍塌爆破切口及起爆顺序示意图

Fig. 3 Schematic diagram of blasting cutting and detonation sequence in vertical implosion collapse design

1.3 爆破切口、装药结构设计和施工流程

切口确定后,就确定了需要爆破的柱的炸高。为了实现更加充分的框架结构解体,降低楼体的塌落振动,减少二次破碎的工作量,还可在梁柱节点处装药。钢混框架结构爆破拆除爆破切口设计与传统钻爆切口设计一致^[18],不同之处在于炮孔布置和装药结构。要想在轴向预埋孔中装药,就需要在框架柱侧面打通轴向孔,可通过提前预埋侧向弯管或后期钻斜孔的方式实现。斜孔开口于室内,以便于钻孔、装药和连线作业。

考虑到对钢混框架柱预埋炮孔装药要经过转角,为使炸药在转角处不堵塞且能精确间隔装药,宜采用装药长袋进行装药^[19]。装药长袋总长度为设计装药段长度(即装药总长+装药之间间隔段总长)。

相较于钻孔爆破,轴向预埋孔的存在可大幅简化拆除炮孔的布置和繁杂的组网工作。选择对应爆

破切口内的梁柱中的轴向预埋孔,进行装药,确定合理起爆延时方案起爆,即可实现爆破拆除的目的。根据钢混框架柱截面尺寸、选用炸药规格和选定的炸药单耗,就可以计算出每延米装药量,进而确定采用间隔装药结构还是连续装药结构。采用连续装药结构时,炮孔两端采用炮泥进行堵塞,如图4(a)所示(图中利用柱中落水管最下段作为炮孔)。间隔装药结构可采用装药长袋装药,如图4(b)所示。当爆破部位位于轴向预埋孔中间部分时(如折叠爆破的上切口),也可采用装药长袋进行装药,同时装药段底部可钻直孔并使用长木棍等封堵预埋孔(如图4(c)所示),以延长爆生气体的作用时间,避免出现装药长袋或悬挂绳索断裂炸药滑落到预埋孔孔底的情形。对于更长炮孔,为降低单响药量和避免装药过长引起的拒爆,应采用孔内分段爆破技术^[20],中间设置阻隔段;如图4(d)所示。

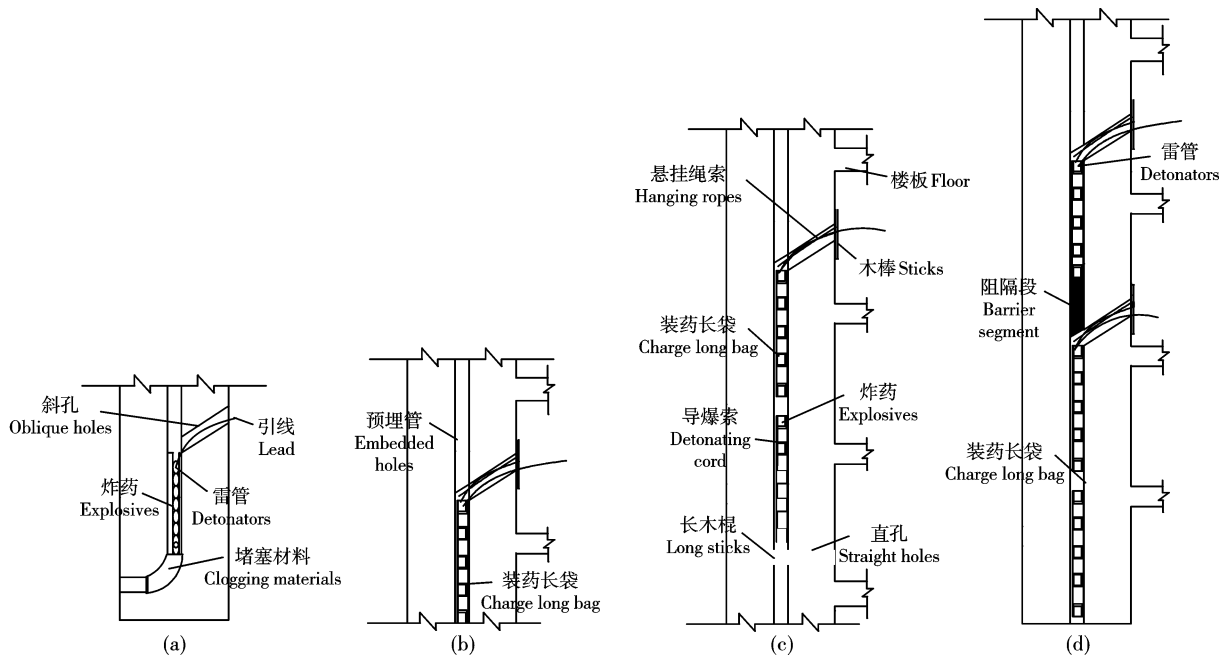


图4 框架柱轴向预埋孔装药结构图

Fig. 4 Charge structure diagram of longitudinal pre-embedded holes in frame columns

有轴向预埋孔的框架结构爆破拆除施工流程如下:预处理→根据设计定位切口内框架柱中的预埋孔的位置→在框架柱侧边钻斜孔→试爆确定最佳装药量→利用装药长袋进行装药、堵塞和防护→组网爆破。

1.4 新技术的优势

有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术基于建筑全寿命设计理念,在建筑物全寿命周期充分利用了轴向预埋孔——建筑物寿命期限内用作穿线孔、落水孔,寿命终结时用作拆除炮孔。相对于传统框架建筑物,不但减少了装修时开槽布管工作量,也

减少了外露管线,使建筑更加美观。在建筑物拆除时,梁柱中布置的轴向预埋孔使爆破拆除有更加灵活的选择余地,也大幅减低了钻孔、堵塞、组网、防护的工作量和炸药雷管的使用量,也大幅削减了爆破有害效应。该技术显著提高了建筑全寿命周期效益,为框架结构设计、建造和拆除提供了一种全新的思路。

2 预埋孔对钢混框架结构的力学性能影响数值模拟分析方法

为查明轴向预埋孔对钢混框架结构的力学性能

的影响,需要运用 pkpm 结构计算分析软件对有预埋孔的钢混框架结构进行有限元分析。有限元模拟分析的基本流程包括:模型建立、参数设置、结构计算和结果分析。

模型建立主要包括几何建模、荷载和边界条件。为充分展示结构应力应变情况,框架结构模型通常采取分离式建模。荷载包括恒载、活载和地震荷载,恒载(重力荷载)和地震荷载(0.05g)以惯性力的方式施加于模型,活载(2.0 kN/m²)以均布荷载施加于框架板上。边界条件为框架柱底部施加固定约束以模拟结构与基础的连接。参数设置主要包括材料

参数和计算控制参数等。框架结构材料参数主要为混凝土和钢筋。其中,钢筋采用 LINK160 单位,材料本构采用 PLASTIC-KINEMATIC (PK) 模型,模型参数见表 2;混凝土采用 SOLID164 单位,材料本构采用 JOHNSON-HOLMQUIST-CONCRETE (HJC) 模型,模型参数见表 3;两者连接采用共节点耦合方式^[21]。结构计算包括选择计算模块,如:SWTWE 适用于高层建筑物结构的内力与抗震设计;以及软件执行计算,包括静力分析、动力分析和抗震分析等。结果分析主要包括分析结构内力、位移和变形是否满足规范要求。

表 2 钢筋本构关系参数

Table 2 Parameters of constitutive model for steel reinforcement

密度 Density $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 Elastic modulus E/Pa	泊松比 Poisson's ratio	屈服强度 Yield strength σ_s/Pa	剪切模量 Shear modulus G/Pa	材料常数 Material constants
7.83×10^3	2.07×10^{11}	0.3	4.0×10^8	5.0×10^{11}	1.0

表 3 混凝土 HJC 本构关系参数

Table 3 Parameters of HJC constitutive model for concrete

含义 Meaning	符号/单位 Symbols/Units	值 Value	含义 Meaning	符号/单位 Symbols/Units	值 Value
密度 Density	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2.4×10^3	压碎压力 Crushing pressure	P_c/Pa	1.17×10^7
准静态单轴抗压强度 Quasi-static uniaxial compressive strength	f_c/Pa	3.51×10^7	压碎体积模量 Crush bulk modulus	μ_c	6.2634×10^{-4}
剪切模量 Shear modulus	G/Pa	1.39×10^{10}	锁定压力 Locking pressure	P_l/Pa	8.0×10^8
材料常数 Material constants	A	0.79	锁定体积模量 Lock bulk modulus	μ_l	6.0×10^{-2}
材料常数 Material constants	B	1.60	损伤常数 Damage constant	D_1	4.52×10^{-2}
材料常数 Material constants	C	7.0×10^{-3}	损伤常数 Damage constant	D_2	1.0×10^7
材料常数 Material constants	N	0.61	材料常数 Material constants	K_1/Pa	8.5×10^{10}
拉伸强度 Tensile strength	T/Pa	2.88×10^6	材料常数 Material constants	K_2/Pa	-1.71×10^{11}
最小应变 Minimal strain	$\varepsilon_{f \min}$	1.0×10^{-2}	材料常数 Material constants	K_3/Pa	2.08×10^{11}
最大应力 Maximum stress	S_{\max}	7.0			

3 应用案例

某 8 层钢筋混凝土框架结构(为使问题简化,暂且剔除楼梯或电梯)需要拆除。该建筑两个开间分别 4.5 m,进深 5.1 m 和 5.7 m,柱截面尺寸 500 mm × 500 mm,梁截面尺寸 400 mm × 600 mm,楼

板厚 200 mm,建筑层高 3 m。该框架结构强度大、刚度高,位于城市闹市区,四周均有保护目标,可供定向倒塌的空间不足,需严格控制楼体塌落振动和爆堆范围,选定倒塌方式为原地坍塌。拟采用钻孔爆破拆除(方案 I)和有轴向预埋孔的爆破拆除(方案 II)分别进行设计;设计后进行技术经济对比分析。

3.1 框架结构爆破拆除技术方案

3.1.1 钻孔爆破拆除方案

根据类似工程拆除经验^[9],爆破切口设置在 1~2 层、3 层、5 层和 7 层,各个切口的高度如图 5 所示,上部切口靠近楼板,有利于破坏梁柱节点和楼

房充分解体。多个切口可有效划分楼房整体的重力势能,减小触地冲击力。各个待爆柱的起爆时间如图 5 所示;同一根周边柱中,上切口比相邻下切口延迟 100 ms。框架结构爆破拆除主要破坏构造柱,因此本次拆除方案设计重点在框架柱的爆破拆除。

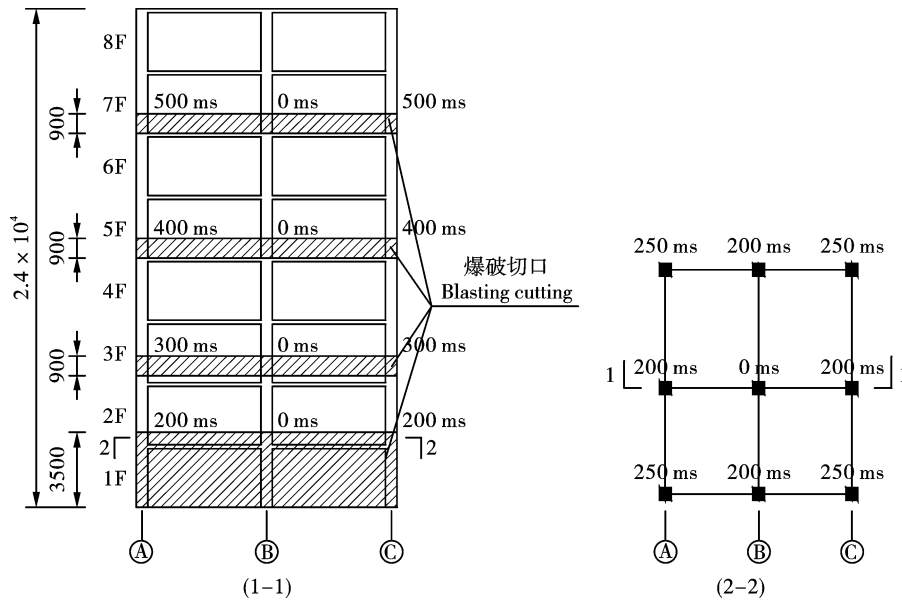


图 5 爆破切口(单位:mm)

Fig. 5 Blasting cut configuration(unit:mm)

炮孔直径为 40 mm,炮孔布置、炮孔孔深和装药参数见图 6 和表 4;起爆顺序见图 5。计算得:爆破切

口内框架柱共有 236 个炮孔,钻孔长度为 82.6 m,炸药消耗量为 35.4 kg,电子雷管消耗量为 236 发。

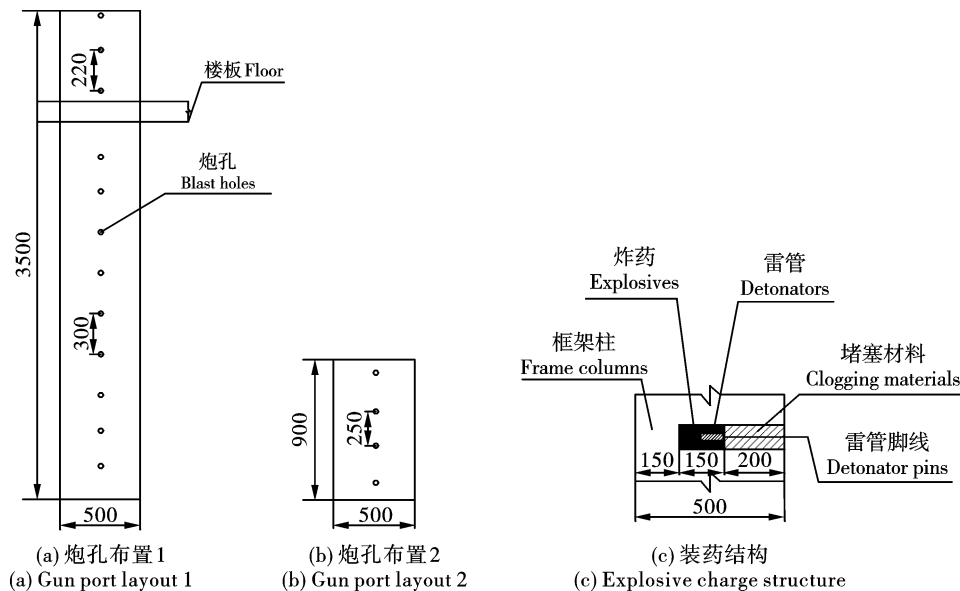


图 6 框架柱钻孔及装药结构图(单位:mm)

Fig. 6 Diagram of drilling and charging structure of embedded holes in framework column(unit:mm)

3.1.2 有轴向预埋孔的爆破拆除方案

根据 1.1 节对预埋管径的建议,在框架结构中设置孔径 50 mm 的轴向预埋孔。因为轴向预埋孔

的存在,炸药消耗量大幅降低,爆破切口在方案 I 的基础上,3 层、5 层和 7 层切口增加至 1.2 m,覆盖到梁柱节点,在梁柱节点处装药爆破,更加有利于楼体

的充分解体,减少二次破碎的工作量。装药结构和爆破参数见图 7 和表 5;各柱起爆顺序见图 5。计算得:轴向预埋炮孔 9 个,侧边钻孔长度 19.35 m,炸

药消耗量 9.59 kg,电子雷管消耗个数 36 个,装药长袋消耗 63.9 m,导爆索消耗 70 m,PVC 管消耗 63.9 m。

表 4 框架柱钻孔爆破参数

Table 4 Drilling and blasting parameters for frame columns

切口类型 The type of cutting	孔深/mm Hole depth/mm	炸药单耗/(g·m ⁻³) Powder factor/(g·m ⁻³)	单孔药量/g Charge per hole/g	孔数/个 Number of holes/pcs	药量/kg Amount of explosives/kg
3.5 m 切口 3.5 m cutting	350	2000	150	118	17.7
0.9 m 切口 0.9 m cutting				118	17.7

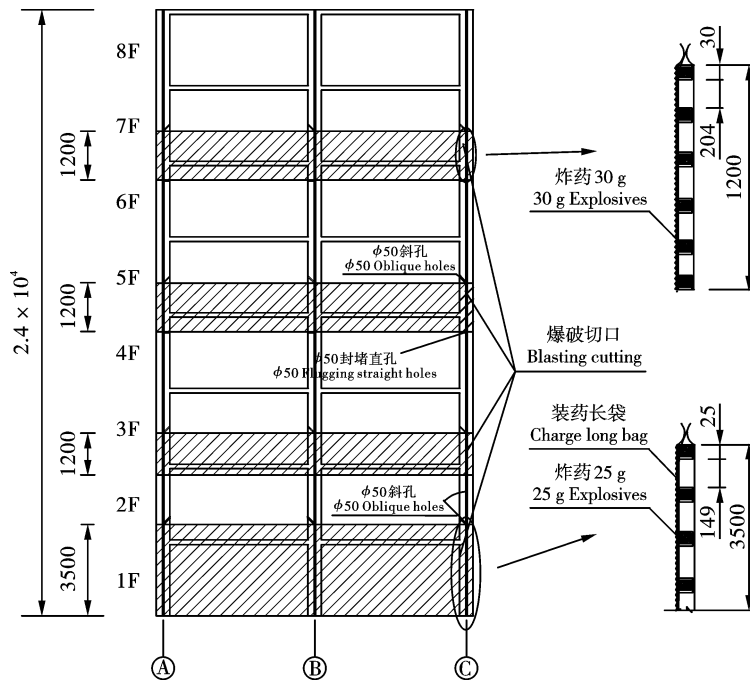


图 7 框架结构预埋孔装药结构图(单位:mm)

Fig. 7 Diagram of charging structure for longitudinal pre-embedded holes in frame structure(unit:mm)

表 5 框架柱预埋孔爆破参数

Table 5 Blasting parameters for frame columns with longitudinal pre-embedded holes

切口类型 The type of cutting	炸药单耗/(g·m ⁻³) Powder factor/(g·m ⁻³)	单孔药量/g Charge per hole/g	总药量/g Amount of explosives/g	间隔距离/mm Separation distance/mm	单点药量/g Charge per point/g
3.5 m 切口 3.5 m cutting	600	525	4725	149	25
1.2 m 切口 1.2 m cutting		180	4860	204	30

3.2 轴向预埋孔对框架结构的力学性能影响

利用第 2 节分析方法分别模拟计算了框架结构整体的应力状况、梁柱节点处的应力状况、钢筋轴力

状况和结构顶部水平位移状况,与无预埋孔的框架结构进行对比分析。

框架结构分离式模型和框架柱轴向预埋孔模型

如图 8 所示。

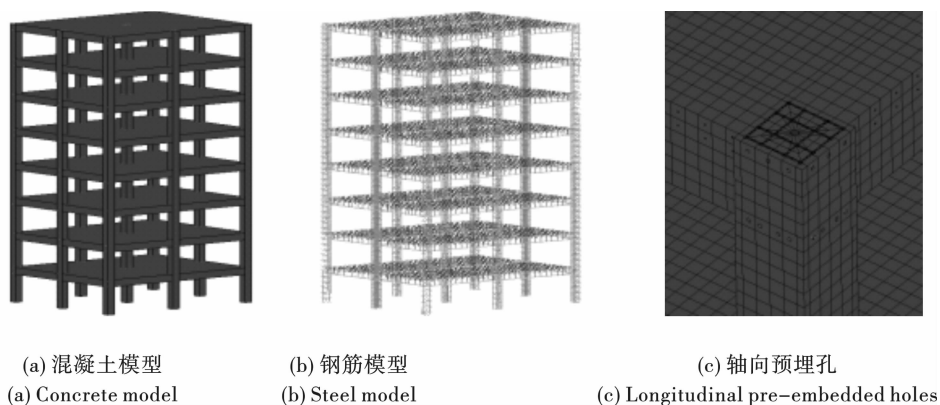


图 8 框架结构模型

Fig. 8 Frame structure model with longitudinal pre-embedded holes

利用 PKPM 计算的结果查看及分析:

1) 框架结构整体应力状况

从图 9 中可以看出无预埋孔框架结构,其整体的应力分布较为均匀,应力梯度特征较为平缓。预埋直径 50 mm 预埋管的框架结构整体应力状况与无预埋孔框架结构差异不大,但在梁柱节点处的应力集中的现象却较为明显。可见,预埋孔对框架结构(尤其梁柱节点处)的应力应变有影响。

2) 梁柱节点应力状况

从图 10 中可以发现,相较于无预埋孔的框架结构梁柱节点,有预埋孔的框架结构梁柱节点应力明显增加。特别是中柱部位,由于承受了较大的压力,其 Von Mises 应力值也相应较高。这表明了预埋孔在梁柱节点处对的框架结构产生了一定的影响。

3) 钢筋轴力状况

对于框架结构楼板、梁、柱内的钢板轴力变化情况,有预埋孔的框架结构钢筋轴力与无预埋孔的框架结构基本一致,这表明预埋孔对框架结构钢筋的

受力情况没有大的影响,预埋孔对框架结构的力学性能影响较小。

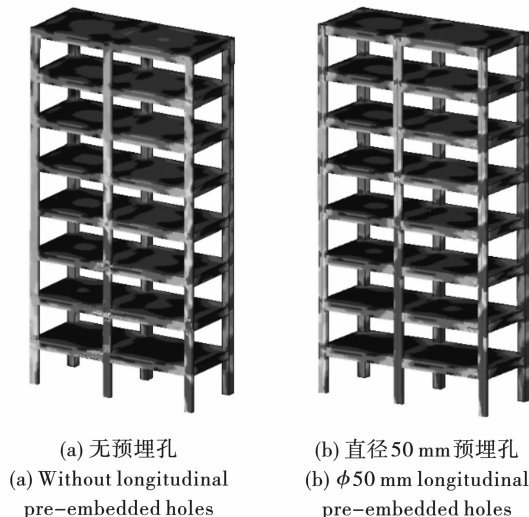


图 9 框架结构应力云图

Fig. 9 Stress contour of frame structure with longitudinal pre-embedded holes

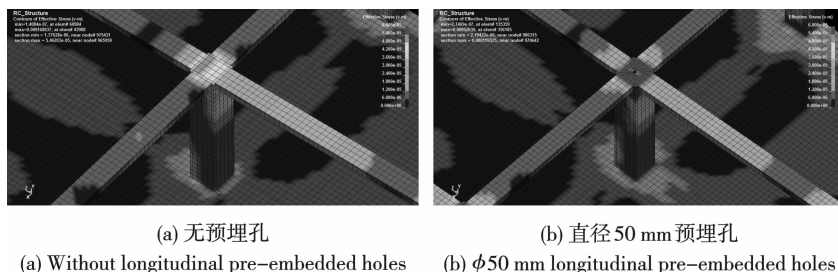


图 10 框架结构梁柱节点应力云图

Fig. 10 Stress contour of beam-column joint in frame structure

4) 框架结构顶部水平位移

在水平地震荷载作用的任何时间段,有直径 50 mm 的预埋孔框架结构与无预埋管的框架结构的

顶点水平位移曲线几乎吻合。这表明了在这样的地震荷载下,预埋孔直径大小对结构水平位移的影响非常有限。除此之外,混凝土材料还设置了应变破

坏准则,但数值模拟未反映框架结构出现破坏。

综上所述,预埋直径 50 mm 的轴向预埋孔对钢筋混凝土框架结构的承载能力影响有限,不会影响结构的安全。

3.3 技术经济对比

3.3.1 拆除费用对比

从上述设计可以算出钻孔长度和各种爆破耗材

数量。根据市场价格,考虑人工和机械, ϕ 40 mm 和 ϕ 50 mm 炮孔钻孔费分别为 25 元/m 和 30 元/m,炸药 15 元/kg,电子雷管 20 元/发,导爆索 10 元/m,装药人员台班费 300 元/人/d, ϕ 50 mm PVC 预埋管 6 元/m(仅计算炮孔段 PVC 管成本),装药长袋 10 元/m。其中方案 I 和方案 II 的人工分别按 40 台班和 20 台班计算。则两种方案的直接成本对比见表 6。

表 6 两方案直接成本对比(单位:元)

Table 6 Comparison of direct cost between the two schemes(unit:CNY)

方案 Scheme	钻孔费 Drilling fees	耗材费用 Consumables cost					人工成本 Labor costs	直接成本 Direct costs
		炸药 Explosives	雷管 Detonator	导爆索 Detonating cord	PVC 管 PVC pipe	装药长袋 Charge long bag		
I	2065	531	4720	0	0	0	12 000	19 316
II	580.5	143.9	720	700	383.4	639	6000	9166.8

对比结果显示:方案 II 相较于方案 I,直接成本减少了 52.5%。具体来说,方案 II 比方案 I 的钻孔费降低了 71.9%,炸药费用降低了 72.9%,雷管费用降低了 84.7%。在方案 II 中,虽然增加了装药长袋和导爆索的成本,但大幅降低了拆除工程中钻孔、炸药雷管、堵塞和防护的工作量及费用,有轴向预埋孔的框架结构爆破拆除技术具有显著的技术经济优势。

3.3.2 安全和效率对比

预埋孔爆破拆除技术充分利用了轴向孔的优势,避免了钻孔,也将大量的垂直于钢混杆件纵轴的浅孔爆破变成埋设在钢混杆件截面形心的轴向孔,显著提高了炸药的能量利用率,大幅降低了炸药雷管的使用量,从而大幅降低了钻孔噪音和粉尘污染,减轻了爆破振动、爆破粉尘、爆破冲击波和飞石等有害效应,减小了拆除工程对周边环境的影响。这在城市复杂环境下有重大意义。

相比钻孔爆破拆除技术,新技术显著减少了大量的钻孔作业量,炮孔的数量也大幅下降,简化了爆破网路,进而使得爆破拆除施工效率显著提高,节省了工期。

4 结论及展望

有轴向预埋孔的钢混框架结构爆破拆除技术基于建筑全寿命周期理论,创造性地提出在框架梁柱中布置轴向预埋孔,可兼顾建筑使用期间穿线管、落水管等建筑功能用途和建筑寿命终结时拆除炮孔用途,显著提高建筑物全寿命效益。该技术是绿色建筑发展的必要结果。相信在不久的将来必然会在实际工程中得到应用推广。为了加快新技术应用,将

来有必要深入考察该技术提供的轴向预埋孔在建筑使用期间作为穿线管、落水管等带来的经济效益和全寿命过程的碳排放减少情况。

参考文献 (References)

- [1] 贾永胜,孙金山,姚颖康,等.我国拆除爆破研究进展与展望(1994—2024)[J].工程爆破,2024,30(5):45-60.
- [1] JIA Yong-sheng, SUN Jin-shan, YAO Ying-kang, et al. Research progress and prospect of demolition blasting in China (1994-2024) [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(5):45-60. (in Chinese)
- [2] 汪旭光,吴春平.我国爆破行业发展成就、挑战与机遇[J].中国矿业,2024,33(12):1-9.
- [2] WANG Xu-guang, WU Chun-ping. Blasting industry in China: achievements, challenges and opportunities [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(12):1-9. (in Chinese)
- [3] 谢启启.精细爆破发展现状及展望[J].中国工程科学,2014,16(11):14-19.
- [3] XIE Xian-qi. Precision blasting, current status and its prospective [J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(11):14-19. (in Chinese)
- [4] 肖建庄,陈立浩,叶建军,等.混凝土结构拆除技术与绿色化发展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(5):1-10.
- [4] XIAO Jian-zhuang, CHEN Li-hao, YE Jian-jun. Technology and green development of demolition for concrete structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(5):1-10. (in Chinese)
- [5] 黄小武.高层钢筋混凝土框架结构爆破拆除倒塌解体力学机制研究[D].武汉:武汉科技大学,2024.

- [5] HUANG Xiao-wu. Study on collapse and disintegration mechanical mechanism of high-rise reinforced concrete frame structure of demolition blasting[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2024. (in Chinese)
- [6] 王 贵,王 渊,孙国利,等. 复杂环境下低层框架结构楼房拆除爆破[J]. 工程爆破, 2022, 28(4): 68-72, 119.
- [6] WANG Gui, WANG Yuan, SUN Guo-li, et al. Demolition blasting of low-rise frame structure building in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(4): 68-72, 119. (in Chinese)
- [7] 伍锡南,聂群富,夏多马. V型起爆技术在复杂环境下房屋拆除爆破中的应用[J]. 工程爆破, 2024, 30(1): 104-109, 118.
- [7] WU Xi-nan, NIE Qun-fu, XIA Dou-ma. Application of V-shaped blasting technology in the demolition blasting of buildings under complex environment [J]. Engineering Blasting, 2024, 30(1): 104-109, 118. (in Chinese)
- [8] 马世明,余兴春,任少华,等. 复杂环境下14层框剪楼房折叠拆除爆破[J]. 工程爆破, 2021, 27(1): 69-73, 78.
- [8] MA Shi-ming, YU Xing-chun, REN Shao-hua, et al. Folding demolition blasting of 14-storey frame shear building in complex environment[J]. Engineering Blasting, 2021, 27(1): 69-73, 78. (in Chinese)
- [9] 刘昌邦,贾永胜,黄小武,等. 框架结构楼房逐跨向内倾倒爆破拆除[J]. 爆破, 2020, 37(4): 81-88.
- [9] LIU Chang-bang, JIA Yong-sheng, HUANG Xiao-wu, et al. Span-by-span inward collapse blasting demolition of frame structure building[J]. Blasting, 2020, 37(4): 81-88. (in Chinese)
- [10] 杨志红,郑文富,何慧明,等. 框架核心筒结构高层建筑的对向倒塌爆破拆除[J]. 爆破器材, 2022, 51(6): 60-64.
- [10] YANG Zhi-hong, ZHENG Wen-fu, HE Hui-ming, et al. Demolition of high-rise buildings with frame-core tube structure by opposite collapse blasting [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6): 60-64. (in Chinese)
- [11] 谭 灵,张伟新,谭雪刚. 混凝土控制爆破拆除中的炮孔预埋法[C]//第七届全国工程爆破学术会议论文集, 2001: 592-597.
- [11] TAN Ling, ZHANG Wei-xin, TAN Xue-gang. The demolition technique of concrete structure using pre-buried blasting hole[C]//Proceedings of the 7th National Conference on Engineering Blasting Studies, 2001: 592-597. (in Chinese)
- [12] 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.
- [12] YE Jian-jun, CHENG Da-chun, SHU Da-qiang, et al. Green blasting technology for demolition of reinforced concrete bars by using pre-buried longitudinal pipes as blast holes [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(10): 151-157. (in Chinese)
- [13] 叶建军,程大春,詹小杰,等. 基坑支撑梁轴向预埋孔爆破拆除技术[J]. 爆破, 2017, 34(2): 74-79.
- [13] YE Jian-jun, CHENG Da-chun, ZHAN Xiao-jie, et al. Blasting technology of demolition of pit-support beam by pre-buried axial pipes blast holes [J]. Blasting, 2017, 34(2): 74-79. (in Chinese)
- [14] 郭兵文,吴亚平,于天佑,等. 混凝土结构施工中采用冷却水管减少裂缝效果及机理分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(4): 1607-1612.
- [14] GUO Bing-wen, WU Ya-ping, YU Tian-you, et al. Effect and mechanism analysis of using cooling water pipe to reduce crack in concrete structure construction [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(4): 1607-1612. (in Chinese)
- [15] 叶建军,殷 旭,谭保华,等. 一种道路或机场预埋管布置结构及进行温控和拆除的方法: 中国, 202211210274. 4[P]. 2023-08-15.
- [15] YE Jian-jun, YIN Xu, TAN Bao-hua, et al. A method for the arrangement structure of pre-buried pipes in roads or airports and for temperature control and dismantling: China, CN202211210274. 4[P]. 2023-08-15. (in Chinese)
- [16] 叶建军,刘佳乐,郭水龙,等. 一种有预埋管的装配式钢筋混凝土梁柱体系及方法: 中国, CN2024102673 46. 1[P]. 2024-11-26.
- [16] YE Jian-jun, LIU Jia-le, GUO Shui-long, et al. Prefabricated reinforced concrete beam-column system with embedded pipe and method thereof: China, CN2024102673 46. 1[P]. 2024-11-26. (in Chinese)
- [17] 操 鹏,吴剑锋,钟冬望,等. 基坑支撑梁轴向布孔爆破拆除技术及应用[J]. 爆破, 2017, 34(3): 96-99, 119.
- [17] CAO Peng, WU Jian-feng, ZHONG Dong-wang, et al. Application of explosive demolition technology of foundation pit support beam based on axial hole layout [J]. Blasting, 2017, 34(3): 96-99, 119. (in Chinese)
- [18] 汪旭光. 爆破设计与施工[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 393-394.
- [18] WANG Xu-guang. Blasting design and construction [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2011: 393-394. (in Chinese)
- [19] 叶建军,程大春,舒大强. 装药长袋及利用装药长袋对炮孔装药的方法: 中国, CN105627845A[P]. 2016-06-01.
- [19] YE Jian-jun, CHENG Da-chun, SHU Da-qiang. The method

- of charging the charge long bag and the use of the charge long bag to the blast hole: China, CN105627845A[P]. 2016-06-01. (in Chinese)
- [20] 叶建军,彭庆波,王雁冰,等. 深孔孔内分段爆破技术[J]. 爆破,2023,40(2):61-68.
- [20] YE Jian-jun, PENG Qing-bo, WANG Yan-bing, et al. In-hole sectional initiation technology of deep hole blasting [J]. *Blasting*, 2023, 40(2):61-68. (in Chinese)
- [21] 徐鹏飞. 拆除爆破中钢筋混凝土本构模型及应用研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2017.
- [21] XU Peng-fei. Study of reinforced concrete constitutive model and its application in blasting demolition [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2017. (in Chinese)
-
- (上接第114页)
- [7] 刘占全,王德胜,崔 凤,等. 巴润矿矿岩混合复杂爆区爆破分离技术试验研究[J]. 金属矿山,2022(1):136-141.
- [7] LIU Zhan-quan, WANG De-sheng, CUI Feng, et al. Experimental study on blasting separation technology in complex ore-rock mixed blasting zone in Barun Mine [J]. *Metal Mine*, 2022(1):136-141. (in Chinese)
- [8] YU Z, SHI X Z, ZHANG Z X, et al. Using a dividing open-pit blast (DOPB) method to reduce ore loss and dilution caused by blast-induced rock movement [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(8):4311-4327.
- [9] 李顺波,李泽华,杨 军,等. 矿岩分离露天爆破毫秒延时间隔研究[J]. 爆破器材,2019,48(3):55-58.
- [9] LI Shun-bo, LI Ze-hua, YANG Jun, et al. Research on millisecond delay interval of open blasting for separation of ore and rock [J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(3):55-58. (in Chinese)
- [10] 蔡兴琪,董文明,谭期仁,等. 基于品位控制模型的露天铀矿爆破流程优化[J]. 金属矿山,2022(7):105-112.
- [10] CAI Xin-qi, DONG Wen-ming, TAN Qi-ren, et al. Blasting process optimization based on grade control model in open-pit Uranium Mine [J]. *Metal Mine*, 2022(7):105-112. (in Chinese)
- [11] 黄 雄,曹进军,周桂松,等. 复杂岩体回填料爆破技术[J]. 爆破,2020,37(2):26-29,41.
- [11] HUANG Xiong, CAO Jin-jun, ZHOU Gui-song, et al. Blasting technology for backfill in complex rock mass [J]. *Blasting*, 2020, 37(2):26-29,41. (in Chinese)
- [12] 曹进军,朱 宽,李晓虎,等. 中深孔与浅孔联合布孔在煤层底板爆破中的数值模拟研究[J]. 爆破,2016,33(4):65-72.
- [12] CAO Jin-jun, ZHU Kuan, LI Xiao-hu, et al. Numerical simulation research of medium-deep hole combined with shallow hole blasting in seam floor [J]. *Blasting*, 2016, 33(4):65-72. (in Chinese)
- [13] 陈运成,谢守冬,颜世留,等. 露天超深孔大抵抗线爆破技术研究[J]. 爆破,2023,40(1):62-68.
- [13] CHEN Yun-cheng, XIE Shou-dong, YAN Shi-liu, et al. Open-pit blasting technology research on super deep hole and large resistance line [J]. *Blasting*, 2023, 40(1):62-68. (in Chinese)
- [14] 王皓永,任晓玲,林日宗,等. “硬软夹层”条件下深浅结合方形布孔爆破技术试验研究[J]. 爆破,2023,40(1):92-99.
- [14] WANG Hao-yong, REN Xiao-ling, LIN Ri-zong, et al. Experimental study on blasting technology of square hole layout with deep and shallow holes under condition of hard and soft rock layers [J]. *Blasting*, 2023, 40(1):92-99. (in Chinese)
- [15] CHIRONIS N P. Casting overburden by blasting [J]. *Coal Age*, 1980, 85(5):172-180.
- [16] 李克民,张幼蒂,傅洪贤. 露天煤矿抛掷爆破参数分析[J]. 采矿与安全工程学报,2006(4):423-426.
- [16] LI Ke-ming, ZHANG You-di, FU Hong-xian. Analysis of casting blast parameters in surface coal [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006(4):423-426. (in Chinese)
- [17] 肖双双. 抛掷爆破一拉斗铲倒堆工艺参数优化理论研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2016.
- [17] XIAO Shuang-shuang. Research on optimization theories of parameters in blast casting-dragline stripping technology [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese)
- [18] 樊永强,马俊斌,焦卫宁,等. 复杂山体削坡爆破控制飞石方向的工程实践[J]. 爆破,2022,39(1):95-100.
- [18] FAN Yong-qiang, MA Jun-bin, JIAO Wei-ning, et al. Engineering practice of controlling fly rock direction in complex mountain slope cut blasting [J]. *Blasting*, 2022, 39(1):95-100. (in Chinese)
- [19] 费鸿禄,纪海楠,山 杰. 露天台阶水介质间隔装药结构优选及对比试验研究[J]. 黄金科学技术,2023,31(6):930-943.
- [19] FEI Hong-lu, JI Hai-nan, SHAN Jie. Optimization and comparative experimental study of charge structure of water medium interval on open-air step [J]. *Gold Science and Technology*, 2023, 31(6):930-943. (in Chinese)
- [20] JAYASINGHE L B, SHANG J, ZHAO Z, et al. Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence [J]. *Computers and Geotechnics*, 2019, 116:103207.