

深基坑内支撑静态爆破施工技术研究

文 / 周宣果 广西建工集团控股有限公司

摘要：随着城市化进程的加快，深基坑工程施工对内支撑结构的解体需求逐渐增加。本文针对深基坑内支撑静态爆破技术进行系统研究，分析了静态爆破的基本原理、材料特性及装备配置，提出了施工流程及参数优化方法。研究表明，合理选择爆破材料和设计施工参数，可有效实现支撑结构的安全高效解体，提升施工效率。

关键词：深基坑工程；静态爆破；施工技术

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.08.005

引言

深基坑工程广泛应用于地下空间开发中，其内支撑结构的合理解体直接影响后续施工的安全与效率。传统爆破方法在城市施工中面临噪声大、振动强等问题，而静态爆破技术以其低噪声、低振动和高安全性特点，成为内支撑结构解体的优选方案。然而，目前关于静态爆破在深基坑内支撑解体中的理论研究与技术实践尚不充分，施工参数优化及复杂工况下的适用性研究亟待深入探讨^[1]。

一、静态爆破技术基础概述

(一) 静态爆破的基本原理

1. 静态爆破的力学与化学作用机理

静态爆破的化学作用机理主要依赖于膨胀剂或裂石剂在受限环境中的化学反应。典型的膨胀剂以硅酸盐类为主，其在水混合后通过水化反应产生强大的体积膨胀力。这种膨胀力是非瞬时性的，通过持续的应力积累作用于周围介质，从而破坏支撑结构的内在力学平衡。与传统爆破相比，静态爆破不产生冲击波，而是通过缓慢且可控的膨胀应力将目标结构逐渐分离，这种方式在降低对周边环境扰动的同时，提高了施工的安全性和精准度^[2]。

2. 破碎模式与支撑结构解体机理分析

支撑结构的破碎模式与静态爆破的解体机理两者相互联系。在实际工程应用中，混凝土支撑和钢支撑的解体模式各有不同。对于混凝土支撑，膨胀剂施加的应力主要通过沿结构内部的弱界面（如微裂隙或界面缺陷）生成裂纹，并伴随裂纹的扩展最终导致结构的整体破碎。此过程中裂纹扩展的方向性与钻孔布置密切相关，选取适宜项目的孔距及深度设计能有效控制破碎区域的范围和质量。而对于钢支撑，由于材料的塑性变形能力较强，静态爆破主要通过集中应力的局部削弱来诱发失稳解体^[3]。

(二) 支撑结构特性与破坏分析

1. 深基坑内支撑的常见类型及受力特点

深基坑内常见的支撑结构通常包括钢支撑和混凝土支撑两种形式。钢支撑一般用于跨度较大的基坑，其材料特性表现为高强度和良好的塑性变形能力，受力形式以轴向压力为主，弯矩和剪力次之^[4]。

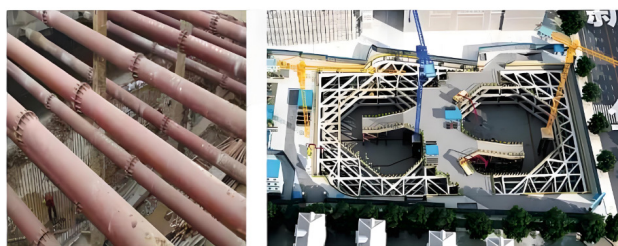


图1 钢支撑（左）、钢筋混凝土支撑（右）示意图

在荷载作用下，钢支撑因其材料的均匀性和延性，能够在变形前充分释放内力，因此在拆除过程中需要集中应力点以诱发局部失稳。相比之下，混凝土支撑因其抗压强度较高，但抗拉性能较弱，受力特点表现为内部微裂纹的累积扩展，其破坏通常以脆性失稳为主。在荷载分布不均的情况下，混凝土支撑容易产生剪切或弯曲裂缝，从而为静态爆破的作用提供了天然的裂缝拓展路径。在实际应用中，混凝土支撑常与钢筋搭配使用，形成钢筋混凝土支撑^[5]。

2. 静态爆破对不同支撑结构的适应性与作用效果

静态爆破对不同支撑结构的适应性与作用效果具有显著差异。对于钢支撑，静态爆破主要通过高压膨胀剂削弱其截面强度，使局部结构失去稳定性，从而诱发整体坍塌。钢支撑的高塑性特性要求膨胀力分布的精准性，以避免能量浪费并提高施工效率。对于混凝土支撑，静态爆破则依赖于裂石剂的膨胀压力沿着预设钻孔逐步渗透和扩展，通过诱发微裂纹的生成与贯通，实现支撑的解体。这种模式对钻孔布局 and 膨胀剂剂量的控制提出了更高的要求，需要在保证裂缝均匀分布的同时，避免过度膨胀引发的二次损伤。

(三) 静态爆破材料与装备

1. 静态爆破材料的特性与适用性比较

膨胀剂和裂石剂是静态爆破技术的常使用的材料，其特性和适用条件对工程施工效果有着不同程度的影响。膨胀剂主要以氧化钙（CaO）为核心成分，其通过与水发生化学反应生成氢氧化钙（Ca(OH)₂），并伴随体积的显著膨胀，从而在受控条件下产生足够的膨胀压力。根据氧化钙的纯度与反应速度的差异，膨胀剂可分为快速型、中速型和慢速型，其适用场景包括岩体破碎、混凝土结

构拆除以及特殊场景下的精确解体。裂石剂则通过特殊配方和无爆炸性化学反应释放膨胀力，特别适用于对震动和噪声要求严格的场合，如深基坑支撑拆除、城市区域的岩石开挖等。

表 1 常用膨胀剂与裂石剂的特性对比表

材料类型	化学成分	膨胀压力范围 (MPa)	最佳使用温度 (°C)	主要应用场景	优缺点分析
快速型膨胀剂	高纯氧化钙	30-50	10-35	混凝土快速拆除	反应迅速，效率高，但精度低
中速型膨胀剂	氧化钙 + 助反应剂	20-40	5-35	岩体开挖、基础拆除	平衡性较好，适用范围广
慢速型膨胀剂	低纯氧化钙	10-20	0-30	特殊环境解体（如下工程）	反应缓慢，控制性强，但效率较低
裂石剂	硝酸盐基化学成分	25-40	10-40	低震动、低噪音工程	无爆炸性，环保性好，但成本较高

从表 1 中可以看出，不同类型膨胀剂与裂石剂在膨胀压力、适用温度和应用场景方面存在显著差异。快速型膨胀剂适合需要快速见效的工程，但其对环境条件要求较高；慢速型膨胀剂则在精确控制施工效果方面更具优势。裂石剂因其无爆炸性特性，特别适用于对安全和环境敏感的场所。

2. 专用设备与工具的选择与配置要求

静态爆破施工技术依赖于专用设备与工具的高效配

合，依据工程特点与施工环境的多样性，对设备与工具的选择需考虑功能匹配性、操作便捷性以及施工场地的适应性。根据静态爆破的施工工序，专用设备主要包括钻孔设备、注浆设备、膨胀剂混合设备及监测设备。钻孔设备如液压钻机与电动岩石钻孔机，适用于不同岩层硬度与施工条件；注浆设备则用于高效输送膨胀剂或裂石剂至目标位置，确保材料的均匀分布与充分反应。

表 2 常用设备与工具的配置参考表

设备类型	主要功能	性能参数	适用场景	配置要求
液压钻机	高效钻孔，适应硬质岩层	钻孔深度 2—30m, 功率 >50kW	高硬度岩层、大型工程	大功率、耐久性强
电动钻孔机	精确钻孔，适应中低硬度岩层	钻孔深度 1—10m, 功率 10-30kW	城市工程、小型工程	便携性高，操作简单
注浆设备	均匀输送膨胀剂或裂石剂	输送量 5—15m³/h, 压力 >5MPa	大面积裂解、深基坑支撑拆除	精度高，支持多种材料兼容
膨胀剂混合设备	精确配比，提升膨胀剂性能	容量 100—500L, 自动混合	大规模爆破施工	精确计量，操作智能化
爆破监测设备	实时监控压力与结构变化	监测精度 ±0.01MPa	结构敏感区域，深基坑支撑爆破	高精度，数据采集与传输功能强

如表 2 所示，不同工程环境对设备与工具的配置要求具有显著差异。例如，在岩层硬度较高的场地需优先选择高功率液压钻机；而在场地受限的城市工程中，小型、便携式设备的需求更为突出。针对深基坑内支撑结构的静态爆破施工，应特别关注设备的高精度控制能力，以确保对周边结构与环境的低扰动性。

二、深基坑内支撑静态爆破施工技术体系

(一) 深基坑内支撑静态爆破施工流程与技术解析

1. 前期准备：场地布置、支撑检测与数据采集

前期准备是确保施工顺利开展的基础环节。首先，应依据基坑几何特征与周边环境布置施工场地，规划合理的设备摆放位置及物资堆放区域，确保施工过程中的高效性与安全性。其次，需对支撑结构进行全面检测，重点评估其材质、连接强度与受力分布等特性，为爆破方案的设计提供基础数据。最后，数据采集是精准实施的前提，包括基坑内土体性质、岩层分布及支撑结构状态等信息，所有数据应通过高精度监测设备获取，并进行数字化处理，以确保后续环节的科学决策。

2. 核心环节：钻孔布置、药剂填充与静置爆破

核心环节是施工技术的集中体现。钻孔布置需遵循支撑结构的力学特点与破碎模式，以实现最佳解体效果。具体而言，应确定钻孔的间距、深度与倾斜角度，并依据结构复杂性适当调整。药剂填充是静态爆破的关键步骤，需确保填充均匀性与密封效果，以提高爆破效率与安全性。填充完成后，药剂需经过一定时间的静置反应，以形成足够的膨胀力促使支撑结构解体。在这个过程中，应通过传感器实时监测压力变化与结构状态，确保爆破过程的可控性。

3. 后续处理：爆破区域清理与后续施工衔接

静态爆破完成后，需对爆破区域进行及时清理，包括移除解体的支撑结构碎片及周边松散物，以确保施工区域的整洁性与安全性。同时，需对周边环境进行再次检测，确认无残留隐患后方可开展后续施工。在后续施工衔接中，应特别关注基坑结构的稳定性，通过加固措施确保施工的安全推进。之后，施工团队需及时总结静态爆破的技术经验，以优化后续施工方案 [6]。

（二）关键参数设计

1. 钻孔参数（孔径、深度、间距）优化方法

孔径、深度与间距是决定爆破力分布与能量释放效率的核心因素。孔径的大小直接影响静态爆破剂的装填量及其膨胀压力的传递范围；钻孔深度决定了膨胀力对支撑结构的穿透能力与破碎效率；间距则需与支撑结构的力学分布模式相匹配，以确保破碎能量的均匀作用。研究表明，过大的孔间距可能导致局部破碎效果不佳，而过密的间距则会增加施工成本，且可能对结构整体稳定性产生负面影响。钻孔参数的优化需以理论分析为基础，结合现场实际需求进行动态调整。调整优化方法如下：

（1）孔径优化：孔径的选择主要依据静态爆破剂的膨胀压力特性和支撑结构的材料强度。一般情况下，可通过实验室试验确定最佳孔径范围，结合现场条件进行微调。例如，针对高强度混凝土支撑结构，可选用较大孔径以扩大膨胀压力的作用范围；而对于钢结构支撑，则需选择适中孔径以平衡填充量与膨胀效率。

（2）深度优化：钻孔深度需依据支撑结构的截面尺寸与爆破剂的作用特性设计。深度通常为结构截面厚度的80%至90%，以确保膨胀力能够有效作用于整个结构。若支撑结构为非均质材料，则需根据其不同层面的力学特性调整钻孔深度。

（3）间距优化：钻孔间距的设计需综合考虑膨胀力的作用范围与支撑结构的稳定性。一般间距范围为支撑结构最小截面厚度的1至1.5倍，但对于复杂结构可通过有限元模拟技术优化间距布置，以确保破碎效果的均匀性。

2. 药剂用量及其作用时间的控制策略

药剂用量是决定静态爆破剂膨胀力大小及其作用范围的核心参数，其设计需满足支撑结构的破碎要求并避免过量填充导致的材料浪费或施工安全隐患。其控制原则包括以下三点：

（1）与支撑材料特性匹配：对于高强度混凝土或钢筋混凝土支撑结构，需选择较高药剂用量以实现足够的膨胀压力；而对于低强度或老化结构，可适当减少用量以防止非目标部位的过度破坏。

（2）考虑钻孔参数影响：药剂用量与钻孔直径和深度密切相关，一般依据钻孔体积计算药剂填充量，同时留意填充密度的均匀性以避免局部应力集中。

（3）基于爆破目标调整：在精细化破碎或需要保护特定结构的情况下，应优先采用分区优化策略，根据支撑的受力分布设计差异化药剂用量。

静态爆破剂的作用时间主要受其化学反应速率及膨胀压力的传递特性影响，需在确保充分破碎效果的前提下，尽可能缩短等待时间以提高施工效率。作用时间的调控依据如下：

（1）化学反应速率：不同类型的静态爆破剂在温度、湿度等环境条件下的反应时间差异显著，需根据施

工环境选择适合的药剂型号，并通过现场试验验证其反应性能。

（2）支撑结构特性：对于厚重或高强度结构，需延长作用时间以确保膨胀压力能够完全传递至目标部位；而对于薄壁或轻质结构，可选择快速反应型药剂以避免结构过度振动。

（3）施工工序衔接：作用时间的设计还需考虑后续工序的衔接需求，确保爆破完成后能够迅速进入清理或加固环节，以提高整体施工效率。

（三）复杂工况下深基坑支撑静态爆破施工的优化策略

在深基坑支撑静态爆破施工中，复杂工况通常表现为不规则支撑结构的几何特性及特殊地质条件对施工方案的影响，这对施工技术提出更高要求。针对不规则支撑结构，优化策略主要集中在钻孔设计与药剂填充方案的适配性上。通过引入高精度建模技术，可对支撑结构的几何特征和受力状态进行三维分析，精确定位关键破碎点，调整钻孔角度与深度，实现爆破力在复杂结构中的均匀分布。对于曲面或交叉支撑结构，需采用分区分步的施工方法，通过逐步破碎降低应力集中风险，并减少爆破过程中的结构振动影响。在特殊地质条件下，静态爆破施工面临的主要挑战包括地下水渗透、高软岩比例以及夹层地质的不稳定性。技术调整措施需从材料选择与施工流程两方面入手。优先选择耐水性能优异的静态爆破剂，并采取有效的排水措施，如增加临时排水沟或采用真空脱水技术，确保施工区域的干燥性。

结语

研究表明，通过合理设计爆破材料、钻孔参数及药剂用量，可实现内支撑的安全高效解体。然而，本文在复杂地质条件与特殊支撑结构的适应性研究方面仍存不足。未来研究将进一步拓展静态爆破技术在复杂工况下的适用性与工程实践，为深基坑工程提供更加完善的技术支持。

参考文献

- [1] 王炳麟. 山岭隧道下穿明长城水磨钻静态爆破施工技术[J]. 设备管理与维修, 2023, (02): 144-147.
- [2] 王强. 邻近高压线岩质边坡静态爆破施工技术[J]. 工程机械与维修, 2022, (04): 268-270.
- [3] 李杰浩, 黄世林, 罗登钢, 曾怡枫, 肖宏丽. 城市复杂环境下水工隧洞静态爆破施工技术[J]. 工程建设与设计, 2021, (14): 142-144+154.
- [4] 刘永. 高速公路土石方开挖作业中的静态爆破施工技术[J]. 中国高新科技, 2021, (08): 45-46.
- [5] 芦晓龙, 周浩文, 阙显阳, 吴浩, 肖黎. 建筑密集区深基坑支撑梁爆破钻孔施工技术[J]. 建筑技术, 2021, (01): 63-65.
- [6] 吴乾坤, 李金明, 柴鑫, 王忠彪. 超深基坑内支撑爆破拆除对围护结构及周边建筑物的影响分析[J]. 工程勘察, 2021, (05): 59-63.