

大型高陡边坡支护关键技术与协同施工管理研究与实践

林军

中国水利水电第七工程局有限公司，四川成都，611130；

摘要：随着我国基础设施建设向地质条件复杂的西部山区深入推进，大型高陡边坡的稳定性控制成为工程建设成败的关键。高陡边坡支护是一项技术复杂、安全风险高的系统工程，其成功实施依赖于先进的技术装备、科学的施工组织、动态的设计优化以及全方位的安全管理。本文结合工程实践，系统探讨了高陡边坡支护中的一系列关键技术，包括基于高性能钻机的差异化钻孔工艺、通道式施工平台的应用、开挖与支护的动态协调施工顺序、基于地质信息的动态设计方法、立体排水系统的构建、严格的开挖支护循环、全面的监控量测体系、爆破协同控制以及针对特殊气候和地质条件的应对措施。研究表明，通过集成应用这些关键技术，并建立业主、设计、监理、施工四方的高效协同机制，能够有效控制边坡变形、保障施工安全、加快工程进度，为类似大型高陡边坡支护施工提供重要的实践参考。

关键词：高陡边坡；支护技术；动态设计；协同施工；安全监测

DOI：10.69979/3060-8767.25.12.052

1 高性能钻孔设备的应用与钻孔工艺创新

钻孔作业是锚索、锚杆及排水孔施工的基础，其效率与质量直接决定支护工程的成败。针对边坡不同部位的特点，采用差异化、高性能的钻孔设备是提高支护效果的关键。

1.1 高臂钻机用于高处钻孔作业

对于边坡中上部作业面，采用高臂钻机具有显著优势：（1）作业范围大，减少排架依赖。其钻臂行程高度可达15-30m，可覆盖极大范围的作业面，大幅减少了传统钢管排架的搭设与拆除工作量，从根本上降低了高空作业风险，减少了与开挖、运输的交叉干扰。（2）高效灵活，适应性强：设备采用全液压控制，操作方便，移位灵活，机动性好，钻孔效率高。更重要的是，它能够在漂石、卵石、砾石等松散覆盖层及破碎强风化岩层中实现高效的跟管钻进，有效解决塌孔难题，保障成孔质量和深度。（3）自动化程度高：具备自动拆卸钻杆和套管的功能，极大降低了工人的劳动强度，提高了施工效率与安全性。

1.2 柴电双动力钻车用于低处钻孔作业

对于边坡下部或地形复杂的区域，采用柴电双动力全液压履带式锚固工程钻车，展现出卓越的适应性：（1）动力灵活，环保节能：柴电双动力模式使其既能适应野外无电环境，又能在具备供电条件时切换为电力驱动，

降低噪音和排放，节约成本。（2）定位精准，覆盖全面：能够实现所有角度的精准对位，甚至可以“贴着地面”进行低角度孔的跟进施工，无死角覆盖各类设计孔位。（3）智能化监控：转速、油压、油位等关键参数实时监测并通过电子屏幕显示，一目了然，便于操作手精准控制钻孔过程，及时发现并排除故障，保障施工质量。

1.3 复杂地层钻孔工艺创新

在崩塌积块碎石土厚、岩石极其破碎、节理裂隙发育的地层中，预应力锚索钻孔常出现不返风、不返渣、孔壁坍塌的问题，成孔极其困难。（1）技术革新：摒弃传统的“砂浆固壁灌浆”反复扫孔工艺，采用跟进无缝钢管作为护壁套管的先进工艺。（2）核心优势：套管直接起护壁作用，无需待凝，可连续钻进直至完整岩层，下锚注浆后再拔出套管。此法成孔率高、质量好，大幅减少了材料消耗和待凝时间，显著加快了进度，实现了对复杂地层边坡的及时支护，有效降低了安全风险。

2 支护结构类型的精细化划分与动态优化

大型高陡边坡的支护体系通常分为浅层支护与深层支护。浅层支护旨在控制表层岩体的松弛与剥落，主要包括锚杆、锚筋束、挂网喷混凝土、浅层排水孔等；深层支护则针对潜在深层滑移面，主要包括预应力锚索、长锚筋束、框格梁混凝土、锚拉板混凝土及深层排水孔等。基于地质信息的动态设计方法，核心在于根据开挖

揭示的实际地质条件,精细化选择并动态调整支护参数与结构形式。

2.1 支护类型的动态选择与案例

以某大型工程为例,其支护设计根据岩体质量进行了精细化划分:

2.1.1 浅层支护类型划分

- A型支护:适用于V类岩体、破碎岩层、断层及开口线附近关键区域。采用高密度支护,包括系统锚杆($\Phi 28, L=6\text{m}, @2\text{m} \times 2\text{m}$)与系统锚筋束($3\Phi 28, L=6\text{m}, @3\text{m} \times 3\text{m}$)组合,并加强马道锁口(锚杆 $\Phi 28, L=4.5\text{m} @ 1.5\text{m}$;锚筋束 $3\Phi 32, L=12\text{m} @ 1.5\text{m}$)和锁脚(锚杆 $\Phi 28, L=9\text{m} @ 1.5\text{m}$)。

- B型支护:适用于以IV类岩体为主的区域。采用系统锚杆梅花形交错布置($\Phi 28, L=6\text{m}$ 与 $\Phi 25, L=4.5\text{m}, @2\text{m}$),锁口及锁脚锚杆间距适当放宽至 $@2\text{m}$ 。

- C型支护:适用于稳定性较好的III类岩体区域,以随机锚杆($\Phi 25, L=4.5\text{m}$)为主。

2.1.2 深层支护结构形式选择

- 普通锚索:适用于坡面完整、以III类岩体为主的区域。

- 锚索框格梁:适用于IV、V类岩体、卸荷强烈区域,通过梁体将锚索预应力扩散传递,增强坡面整体性。

- 锚拉板(锚索与混凝土板):适用于覆盖层、V类岩体、断层带及开口线附近,提供大面积承压面,有效约束极度破碎岩体。

2.2 支护结构的优化创新:锚墩形式的合理化选择

在动态设计理念下,支护结构本身也可根据具体条件进行优化。例如,在边坡地质条件较好、岩石强度高的部位,可提请设计单位将预应力锚索的“钢筋混凝土锚墩”调整为“钢板锚墩”。此种优化基于开挖揭示的实际情况及相关规范与工程经验,在保证锚固质量与安全的前提下,具有显著优势:(1)节约成本与工期:省去了钢筋绑扎、立模、混凝土浇筑及养护等复杂工序,施工便捷,能有效加快进度。(2)质量可靠:钢锚墩由上、下两层钢垫板组成,板下设置C735微膨胀混凝土找平层以确保应力有效传递。待找平层和锚固段注浆体达到设计强度后即可进行张拉,质量可控。此优化是动态设计与施工实践紧密结合的典范。

3 施工工艺与组织的优化创新

3.1 通道式施工平台的应用

为减少锚墩浇筑、张拉等工序与开挖的干扰,采用通道式施工平台是一项创新。该平台沿边坡马道或设计坡面架设,兼具交通通道与作业平台功能。(1)经济效益显著:相较于传统的满堂红贴坡排架,通道式平台用钢量少,安拆便捷,可重复利用,节约成本显著。(2)促进工序协同:作为稳定的施工通道,它实现了开挖与支护设备的并行作业,支护队伍可紧随开挖工作面开展工作,无需等待排架搭设,极大加快了施工进度。(3)安全实用:结构稳定,操作空间开阔,便于材料和设备运输,可靠实用,便利了现场施工。

3.2 动态调整的支护施工顺序

摒弃僵化的施工流程,根据岩体质量动态调整支护顺序,是实现“及时支护”的关键。(1)岩质较好段:采用“锚杆(索)先行”的顺序。即先进行锚杆(索)钻孔、安装注浆,然后利用锚杆外露部分架设钢筋网,最后进行喷混凝土封闭。此顺序利于锚杆及早受力,发挥支护作用。(2)岩质破碎段:采用“喷护先行”的顺序。即先对暴露岩面进行初喷混凝土封闭,防止风化及岩块塌落,然后施工砂浆锚杆,接着挂网并进行复喷混凝土至设计厚度。此顺序能快速封闭临空面,控制表层变形,为后续作业创造安全条件。(3)排水孔施工时机:在相应区域的预应力锚索注浆结束后进行,以防止灌浆液堵塞排水通道。

3.3 注浆工艺的优化:早强剂的应用

预应力锚索注浆后的等强时间往往是制约施工周期的关键环节。传统工艺需等待7天甚至更长时间才能进行张拉。为缩短工期,可在注浆浆液中掺加专用的水泥浆液早强剂。此举在确保注浆体最终强度满足设计要求的提前下,能显著提高其早期强度,从而缩短张拉前的等待时间。这一优化有效压缩了单束锚索从开孔至封锚的总工期,加快了边坡支护的整体进度,是施工工艺微创新带来显著效益的体现。

4 开挖与支护的协同施工管理

大型高陡边坡工程的成功,关键在于实现开挖与支护两大工序的协调有序。必须分区段、分高程进行作业面的交接与衔接,形成流畅的施工流水作业。这一管理核心旨在避免因工序衔接不畅导致的人员窝工、设备闲置与工期延误。其根本目的更在于通过“随挖随支”最

大限度地缩短边坡岩体的暴露时间，从而从源头上预防因应力释放过长而可能引发的边坡变形、开裂乃至坍塌等地质灾害。

4.1 严格遵循“分层开挖，随层支护”原则

边坡采用自上而下分层开挖，每层高度一般为15m。遇顺层发育、易垮塌的岩层，可把每层15m缩短到两个半层（7.5m/半层），等上半层支护受力后再支护下半层。必须严格执行“随挖随支”的黄金法则：（1）空间滞后控制：规定浅层支护（如锚杆、喷混凝土）与开挖工作面的高差不得大于一个台阶（15m）；深层支护（如预应力锚索）与开挖工作面的高差不得大于两个台阶（30m）。（2）工序逻辑：下层开挖不得影响上层已完成的支护结构的有效性；而上层及时完成的支护又是下层安全开挖的前提。随机支护（如对不稳定块体的临时加固）必须随开挖层及时进行。

4.2 建立爆破协同控制机制

爆破震动是对新老边坡稳定性的重大威胁。支护单位必须与开挖单位建立紧密的协同机制。（1）动态调整参数：根据不同的地质条件（如破碎带、断层），共同研究并及时动态调整爆破参数（如孔距、排距、单响药量），采用预裂爆破、光面爆破等控制爆破技术。（2）控制爆破影响：严格控制爆破振动速度、抛掷方向，防止爆破对已支护区域和新开挖未支护坡面造成破坏，避免引发岩体松动或锚索（杆）失效。

4.3 基于现场反馈的设计优化

施工单位不仅是方案的执行者，更是优化建议的重要来源。建立与设计（含地质）、业主、监理的快速沟通反馈机制至关重要。典型案例：锁口锚筋束位置优化。原设计在开挖后于马道下方1m处施工锁口锚筋束，但爆破常导致马道严重损毁，使其失去锁口意义。施工单位建议在开挖前，预先在马道平台上施工锁口锚筋束，待注浆达到强度后再进行预裂爆破和开挖。此优化真正起到了“锁口”作用，有效保护了马道的完整性，为后续支护、排水沟及生态修复施工提供了完好平台。

5 排水系统与防水措施

5.1 深层排水系统的补充与完善

地下水是边坡失稳的主要诱因之一。根据坡面渗水情况和已有排水孔出水情况，及时增补深层排水孔是必

要的优化措施。实践应用：在边坡的冲沟部位（汇水区域）或在不同高程（如每30m）的马道上每10m（根据出水情况，局部孔距调整为5m）间距，增加布置深度达40m的深层排水孔。这些深孔能够穿透潜在滑裂面，有效引排深层裂隙水，显著降低孔隙水压力，从根本上是增强边坡长期稳定性的治本之策。

5.2 及时做好边坡截水及排水系统施工

（1）截水沟设置：在边坡开口线外设置截水沟，拦截地表径流，防止水流冲刷坡面或下渗进入边坡内部岩层。（2）排水系统完善：及时施工坡面排水沟、急流槽等排水设施，形成完善的排水系统，减少水对边坡稳定性的不利影响。

6 特殊工况下的技术应对措施

6.1 冬季施工防冻措施

在高寒地区冬季施工时，必须采取严格的混凝土（包括喷砼）防冻措施：（1）材料改性：在混凝土中加入防冻剂和早强剂，降低冰点，提高早期强度。（2）保温养护：施工后及时覆盖保温材料（如保温被、塑料薄膜），对施工完成的锚墩等结构进行蓄热养护。（3）工艺调整：避免在夜间或极低温时段拆模，适当延长拆模时间。同时，做好施工道路与车辆的防冻防滑措施，保障运输安全。

6.2 增设安全防护措施

对于上部边坡陡峻、地质条件差、存在危岩落石风险的区段，除常规支护外，应增加额外安全措施。比如与设计、业主、监理沟通后，在适当位置增设被动防护网，形成一道柔性拦石网，有效拦截阻挡上方滚落的危石，保障下部施工区域的人员和设备安全。

7 结论

大型高陡边坡支护是一项复杂的系统工程，其成功实施依赖于技术、管理和协作的全面创新。本文通过工程实践总结出以下结论：

1. 技术装备与工艺是基础：采用高性能、专用化的钻孔设备（如高臂钻机、柴电双动力钻车）和创新的工艺（如跟管钻进、通道式平台、早强剂应用），是提高效率、保证质量、降低安全风险的物质基础。

2. 动态设计与精细化划分是关键：基于现场实际地质条件，对支护类型进行精细化划分（如ABC型浅层支

护、不同形式的深层支护），并动态优化支护结构（如钢板锚墩的应用），是实现“对症下药”、保证工程经济、高效的关键。

3. 协同管理是保障：建立“开挖-支护”一体化协同施工机制，严格控制开挖与支护的空间和高程关系，协同优化爆破参数，是减少干扰、保障进度和安全的核心管理手段。

4. 全面监测是底线：构建全方位的监控量测体系和完善的应急响应机制，是实现信息化施工、预防事故的最后一道坚实防线。

未来，随着智能化、数字化技术的发展，高陡边坡支护将更加趋向于基于BIM+GIS的三维可视化设计施工管理、无人机自动巡检、监测数据AI智能分析与预警等方向深度融合，进一步提升边坡工程的本质安全水平和管理效率。

参考文献

- [1]DL/T5083-2019，水电水利工程预应力锚索施工规范[S]
[2]SL/T212-2020，水工预应力锚固技术规范[S]

[3]冯杨文，张继勋，周钟.高陡边坡支护中自钻式锚杆与跟管钻进技术的联合应用研究[J].岩土力学，2022,43(S2):1-10

[4]赵勇，李海波，刘亚群等.复杂地质条件下高边坡开挖与支护顺序优化分析[J].岩石力学与工程学报，2021,40(5):1010-1020

[5]张可能，刘忠，欧阳振华等.某水电站高边坡施工期动态设计及稳定性控制[J].水利水电技术，2020,51(8):150-158

[6]宋胜武，冯学敏，向柏宇等.西南水电工程高陡岩石边坡工程实践[M].北京:中国水利水电出版社，2011

[7]国家能源局.水电工程施工安全防护设施技术规范（DL/T5162-2021）[S].北京:中国电力出版社，2021

[8]郑颖人，陈祖煜，王恭先等.边坡与滑坡工程治理[M].北京:人民交通出版社，2018

作者简介：林军，男（1974-），四川绵阳人，本科，高级工程师，一级建造师，从事水利水电工程施工技术与管理工作。