

岩爆段地下洞室安全高效开挖施工技术研究与应用

郝卫超 王靖玮 汪翔 刘东

中国水利水电第一工程局有限公司 吉林长春 130000

【摘要】随着深地工程的不断发展,岩爆已成为地下洞室开挖面临的重大挑战。本文深入探讨了岩爆段地下洞室安全高效开挖施工技术研究与应用。从岩爆机理及影响因素分析入手,阐述了预测预报、控制爆破和支护技术等关键技术。重点介绍了这些技术在施工准备、开挖过程和支护系统中的具体应用,以及相应的安全管理措施和效率提升策略。通过系统性的技术研究和实践应用,旨在为岩爆段地下洞室的安全高效开挖提供有效全面的技术支撑和管理指导,进一步提高深地工程施工安全性和效率。

【关键词】岩爆段; 地下洞室; 开挖施工技术

引言:

随着我国经济的快速发展和城市化进程的加快,地下空间开发利用日益广泛。大型水电站、地下储能设施、深部矿山等工程项目不断涌现,地下工程向深部化、大型化、复杂化方向发展。然而,随着开挖深度的增加,高地应力环境下的岩爆问题日益突出,成为威胁工程安全和施工效率的重大挑战。岩爆作为一种突发性、破坏性强的地质灾害,不仅会造成人员伤亡和设备损坏,还会导致工期延长和成本增加。传统的施工技术和方法在面对岩爆风险时往往显得力不从心。因此,研究岩爆段地下洞室安全高效开挖施工技术,对于保障工程安全、提高施工效率、降低工程风险具有重要的现实意义。

1 岩爆机理及影响因素分析

1.1 岩爆形成机理

岩爆是在高应力条件下,岩体突然发生剧烈破坏并伴随能量释放的现象。其形成机理可从能量角度解释:当岩体所储存的弹性应变能超过其自身强度所能承受的临界值时,岩体会瞬间失稳破坏。这个过程涉及应力重分布、能量积累和突然释放三个阶段。在开挖过程中,原本平衡的应力场被打破,导致应力集中于开挖面周围。随着开挖继续进行,应力不断累积,当达到岩体强度极限时,岩体内部会产生微裂隙。这些微裂隙的扩展和贯通最终导致岩体整体失稳,瞬间释放大量能量,表现为岩块弹射、岩屑抛出等现象。岩爆的破坏模式可分为拉裂型、剪切型和复合型,不同类型的岩爆在形成机理上略有差异,但本质上都是应力超过岩体承载能力的结果^[1]。

1.2 影响岩爆的主要因素

影响岩爆发生的因素复杂多样,主要分为内因和外因两大类。内因主要包括岩体自身的物理力学性质,如岩石类型、强度、弹性模量、泊松比等。坚硬、脆性强的岩石更容易发生岩爆,因为它们具有较高的弹性储能能力和较低的塑性变形能力。地质构造如断层、节理的存在也会影响应力分布,进而影响岩爆的发生。外因则主要涉及工程因素和环境因素。工程因素包括开挖方法、开挖顺序、支护时机和支护方式等。不合理的开挖和支护可能加剧应力集中,增加岩爆风险。环境因素主要指地应力状态,高地应力是岩爆发生的必要条件之一。而地下水的存在也可能改变岩体的力学性质和应力状态。此外,温度变化、地震等外部扰动也可能诱发岩爆。总的来说,充分了解这些影响因素对于预测、预防和控制岩爆至关重要。

2 安全高效开挖施工技术研究

2.1 预测预报技术

在岩爆段地下洞室开挖中,准确的预测预报技术是确保施工安全的关键。地质预测和微震监测是两种主要的预测预报手段,它们相辅相成,共同构筑了岩爆预警的第一道防线。地质预测主要通过钻探、物探等手段,提前掌握开挖区域的地质条件和应力分布情况^[2]。其中,地质雷达作为重要的物探工具,工作频率一般在50MHz-1GHz之间,探测深度可达30m-50m,空间分辨率可达0.1m。这种高精度探测能力使得地质雷达能够有效识别断层、裂隙等地质异常体,为施工提供重要参考。

微震监测则通过实时捕捉岩体中的微小震动信号,分析岩体稳定性变化趋势。现代微震监测系统的传感器灵敏度通常在 $1V/(\mu m/s)$ 以上,能够检测到震级小于-3级的微震

事件。这种高灵敏度使得监测系统能够捕捉到极其微小的岩体变动，为及时预警提供了可能。在岩爆发生前，微震事件的频率和能量通常会显著增加，通过分析这些变化趋势，可以预判岩爆风险，为调整施工方案提供依据。

2.2 控制爆破技术

在岩爆段地下洞室开挖中，控制爆破技术的应用对于减少岩爆风险、提高开挖质量至关重要。光面爆破和预裂爆破是两种主要的控制爆破方法，它们通过精确控制爆破参数，最大限度地减少对周围岩体的扰动。光面爆破技术的核心是在轮廓线上布置小直径、低装药密度的炮孔。炮孔间距通常控制在0.8m—1.2m之间，装药密度为每米0.3kg—0.6kg，以实现最佳爆破效果。这种精确控制不仅提高了开挖精度，还显著降低了对围岩的破坏，减少了支护工作量，提高了施工效率^[3]。

预裂爆破技术则在爆破主体工作前，先在预定轮廓线上形成连续裂缝。炮孔的填塞长度通常为炮孔直径的10—15倍，确保裂缝的连续性和有效性。这道预先形成的裂缝能有效阻断爆破应力波的传播，起到保护围岩的作用，不仅控制了开挖轮廓，还显著减少了爆破对周围岩体的扰动，提高了洞室的整体稳定性。

2.3 支护技术

在岩爆段地下洞室开挖中，科学合理的支护技术是保证洞室长期稳定的关键。系统锚杆支护、喷射混凝土支护和钢筋网支护构成了一个全面的支护体系，各有特点，相互配合。

系统锚杆支护通过预应力锚杆将松动岩层与深部稳定岩体锚固在一起，形成承载拱结构。锚杆的长度通常在1.5m—6m之间，具体取决于岩层的厚度和稳定性要求。锚杆间距一般控制在0.75m—1.5m之间，以确保足够的支护密度。预应力锚杆的预应力大小通常在20t—50t之间，提供充足的锚固力。可以根据不同的地质条件和应力状态，合理设计这些参数，实现最优的支护效果^[4]。

喷射混凝土支护技术提供了快速而有效的表面封闭。喷射混凝土的设计强度通常在C20—C30之间，厚度一般为50mm—200mm。这种技术不仅能迅速封闭岩面，防止岩体风化和剥落，还具有一定的柔性，可适应岩体轻微变形。同时，通过添加30kg/m³—80kg/m³的钢纤维，可进一步提升喷射混凝土的抗拉强度和韧性。

钢筋网支护作为辅助措施，在整个支护系统中扮演着重要角色。钢筋网的网格尺寸通常为150mm×150mm至300mm×300mm，钢筋直径一般在6mm—12mm之间。这种设计

不仅增强了喷射混凝土的抗裂性和韧性，还能有效分散应力，防止局部集中破坏。此外，钢筋网的搭接长度通常不小于一个网格的尺寸，确保结构的连续性。

3 岩爆段地下洞室安全高效开挖施工技术的应用

3.1 施工准备阶段的应用

在岩爆段地下洞室开挖施工中，施工准备阶段的工作至关重要，直接影响后续施工的安全性和效率。这一阶段主要包括地质条件评估和开挖方案优化两个关键环节。地质条件评估是整个工程的基础，通过综合运用钻探、物探、测绘等手段，详细了解岩体结构、岩石力学性质、地下水分布等关键信息。特别是对于岩爆倾向性的评估，需要结合室内试验和现场测试，如岩石冲击倾向性试验、现场应力测量等，全面掌握岩体的应力状态和岩爆潜在风险。基于详细的地质评估结果，工程团队可以针对性地优化开挖方案。这包括确定合理的开挖顺序、分区分段开挖策略、支护参数等。在方案优化过程中，需要充分考虑岩爆风险，如采用短进尺、弱爆破、强支护的原则，合理设计爆破参数和支护时序。同时，利用数值模拟技术，如有限元分析，可以预测不同开挖方案下的应力分布和变形情况，为方案优选提供科学依据。此外，在施工准备阶段还需要制定详细的监测计划，包括微震监测、位移监测等，为后续施工过程中的实时调整提供数据支持。

3.2 开挖过程中的应用

在岩爆段地下洞室的开挖过程中，安全高效施工技术的应用主要体现在分步开挖技术、控制爆破实施和实时监测与调整三个方面的有机结合。分步开挖技术是应对岩爆风险的核心策略，通常采用多台阶、小断面的开挖方式，以控制每次开挖后的应力释放程度^[5]。具体可根据岩体条件和洞室断面大小，将开挖面划分为多个区域，如上台阶、中台阶和下台阶，并按照“先上后下、先两侧后中间”的原则进行开挖。这种方法可以有效控制应力重分布，降低岩爆风险。控制爆破实施是开挖过程中的关键环节，主要采用光面爆破和预裂爆破技术。通过精确控制装药量、炮孔间距和起爆顺序，最大限度地减少对周围岩体的扰动。例如，在轮廓线附近采用小直径、低装药密度的炮孔，可以有效降低超挖率和岩体松动程度。实时监测与调整是确保开挖过程安全的重要保障。通过布设微震监测、位移监测等系统，实时掌握岩体的动态变化。当监测数据显示异常时，如微震事件频率突然增加或围岩变形速率加快，可及时调整开挖参数或加强支护措施。

3.3 支护系统的应用

在岩爆段地下洞室开挖中，支护系统的应用是确保工程安全和长期稳定的关键。支护系统通常包括初期支护、二次支护和联合支护体系，它们共同构成了一个全面、多层次的岩体稳定控制体系。初期支护是开挖后立即实施的临时性支护措施，主要目的是迅速封闭岩面，防止岩体松动和剥落。常用的初期支护方法包括喷射混凝土、锚杆（索）和钢筋网的组合应用。在有岩爆倾向区域，通常采用高强度、高性能的喷射混凝土，配合密集布置的预应力锚杆，以提供足够的支撑力和变形适应性^[6]。二次支护则是在初期支护稳定后实施的永久性支护结构，通常采用钢筋混凝土衬砌。在岩爆风险高的区域，可考虑增加衬砌厚度或采用钢纤维混凝土，以提高结构的抗冲击能力。联合支护体系是将多种支护方式有机结合，形成“软硬结合、刚柔并济”的整体支护系统。例如，可在初期支护和二次支护之间增加柔性缓冲层，如泡沫混凝土或橡胶板，以吸收岩爆产生的冲击能量。值得注意的是，支护系统的设计和实施需要基于详细的地质勘察和数值分析，并在施工过程中根据监测数据进行动态调整，以确保其有效性和经济性。

3.4 安全管理措施

在岩爆段地下洞室开挖过程中，安全管理是保障施工人员生命安全和工程顺利进行的关键。其核心在于建立完善的预警系统和制定切实可行的应急预案。预警系统的建立是基于多源数据的综合分析，包括微震监测、应力监测、位移监测等。通过实时采集和分析这些数据，可以及时发现岩体稳定性的异常变化。预警系统通常分为多个等级，如一级警戒（注意）、二级警戒（警告）和三级警戒（危险），每个等级对应不同的安全措施和响应机制。例如，当微震活动频率或能量超过预设阈值时，系统会自动发出警报，提醒现场人员采取相应的安全措施。应急预案的制定与实施是预警系统的必要补充。预案应详细规定不同警戒级别下的具体行动步骤，包括人员撤离路线、应急支护措施、救援设备配置等。预案的制定需要考虑工程的具体特点和可能面临的各种突发情况，并通过定期演练来确保其可操作性。此外，安全教育培训也是安全管理的重要组成部分。通过定期的安全培训，提高施工人员的安全意识和应急处置能力。

3.5 施工效率提升措施

在岩爆段地下洞室开挖中，提高施工效率既是经济效益的需求，也是降低长期暴露风险的重要手段。施工效率

的提升主要通过机械化施工、信息化管理和工序优化三个方面来实现。机械化施工是提高效率的基础，包括采用先进的凿岩设备、装载设备和运输设备。例如，使用全断面隧道掘进机（TBM）可以在适宜的地质条件下大幅提高开挖速度。对于钻爆法施工，采用计算机控制的多臂凿岩台车可以提高钻孔的精度和效率。信息化管理是现代化施工的核心，主要体现在建立基于BIM（Building Information Modeling）技术的施工管理平台。通过BIM模型，可以实现施工过程的可视化管理，优化资源配置，提高施工协调效率。同时，结合物联网技术，可以实现对关键设备和材料的实时跟踪管理，减少等待时间和资源浪费。工序优化是提高效率的关键，主要包括优化施工工艺、合理安排施工顺序、提高工序衔接的紧密度等。例如，采用“长进尺预裂+短进尺开挖”的施工工艺，可以在保证安全的前提下提高开挖效率。此外，通过优化通风、排水等辅助系统，也可以显著提高整体施工效率。

结束语：

岩爆段地下洞室安全高效开挖施工技术的研究与应用是一个复杂的系统工程，需要理论与工程实践的紧密结合。通过对岩爆机理的深入理解，结合先进的预测预报技术、控制爆破技术和支护技术，可以有效降低岩爆风险，提高施工安全性和效率。然而，面对复杂多变的地质条件和不断深化的工程需求，仍需要持续创新和优化施工技术。未来，应进一步加强智能化监测、大数据分析和人工智能等新技术在岩爆防控中的应用，推动岩爆段地下工程施工技术的不断进步，为我国地下空间开发利用事业的可持续发展做出贡献。

参考文献：

- [1] 郭春恒, 陈旭东, 李碧涵. 岩爆形成机理及防治措施研究[J]. 科技风, 2023(26): 75-77.
- [2] 李建俊. 水利工程隧洞开挖技术施工工艺[J]. 水上安全, 2023(02): 190-192.
- [3] 夏国燕, 赵炜锋, 方露妮. 路桥隧道工程开挖支护的施工要点研究[J]. 工程与建设, 2022, 36(04): 1118-1121.
- [4] 韩宗泽. 高速公路隧道施工岩爆的防治技术[J]. 交通世界, 2022(11): 106-107.
- [5] 梁大中. 高地应力地下洞室开挖施工岩爆防治措施[J]. 四川水力发电, 2021, 40(03): 32-35.
- [6] 王敬宾. 复杂环境城市地铁大断面钻爆开挖施工技术研究[J]. 四川建材, 2020, 46(05): 123-124.