

锚杆支护参数对巷道围岩稳定性的影响与优化设计研究

吴应豪

天地（常州）自动化股份有限公司 江苏 常州 213000

【摘要】：锚杆支护在巷道围岩稳定性中起到至关重要的作用，通过合理设计支护参数可以有效提高巷道的稳定性与安全性。本文通过数值模拟与现场实验相结合的方法，分析了锚杆长度、间距、预应力等参数对巷道围岩稳定性的影响，并提出了一种基于优化算法的锚杆支护优化设计方案。研究表明，通过对支护参数进行合理调节，可以显著提高巷道围岩的承载能力，降低支护成本，同时保证了巷道的长期稳定性。该研究为隧道和矿山巷道的设计提供了有价值的参考。

【关键词】：锚杆支护；巷道围岩；稳定性；优化设计；数值模拟

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.053

引言

巷道的稳定性是隧道工程设计中的核心问题之一，尤其是在矿山和地下工程中，围岩的稳定性直接关系到作业人员的安全以及工程的顺利进行。锚杆支护作为一种有效的加固技术，广泛应用于各种地下工程中，但其支护参数的选择仍然是一个复杂的工程技术问题。合理的锚杆支护设计能够显著提高巷道的稳定性，减少施工中的安全隐患。在实际应用中，由于不同地质条件和工程要求，如何优化锚杆支护参数，以达到最佳支护效果，一直是工程界关注的重点。通过对锚杆支护参数的深入研究和优化设计，能够为巷道的长期稳定性提供有力保障，从而提升工程设计的可靠性和经济性。

1 锚杆支护对巷道围岩稳定性的影响

1.1 锚杆长度与围岩稳定性的关系

锚杆长度对巷道围岩的稳定性有显著影响，较长的锚杆能够更深地锚固围岩，提供更强支持力，防止围岩发生变形或开裂。特别是在软弱围岩或断裂带较为显著的区域，适当增加锚杆长度，有助于增加锚固深度，分散岩体的应力集中，减小潜在的变形范围。锚杆长度的优化选择需综合考虑地质条件、巷道开挖方式及支护材料的特性，过短的锚杆则可能无法充分发挥其加固作用，而过长的锚杆则可能导致材料浪费和施工难度增加。

1.2 锚杆间距与围岩承载能力的影响

锚杆间距的合理设置对巷道围岩的整体稳定性至关重要。过大的锚杆间距可能导致支撑力不足，无法有效限制围岩的变形，进而增加巷道塌方的风险；而过小的间距虽然可以提高支撑强度，但却会增加施工成本与难度，且可能对围岩造成过度的加固反应，影响围岩的自然应力分布^[1]。间距的设计需要通过数值模拟或现场实验来确定，以确保支撑力的均匀分布，并达到经济与安全的最佳平衡。

1.3 预应力水平对巷道稳定性的贡献

预应力水平的设置直接影响锚杆支护系统的工作性能，适当的预应力能够显著增强锚杆对围岩的压缩效果，减少围岩的

裂隙扩展，提升巷道的稳定性。在软弱或松散的围岩中，通过施加预应力可以使锚杆更好地与岩体形成较强的结合力，从而增加巷道的整体抗压能力。预应力的水平应根据实际岩层的变形特性与支护需求进行调整，过高或过低的预应力都可能导致支护效果不理想，影响巷道的长期稳定性。

2 优化设计方法的研究

2.1 优化算法在锚杆设计中的应用

在锚杆支护设计中，优化算法的应用能够有效解决参数选择与支护效果之间的复杂关系。通过引入遗传算法、粒子群优化算法等智能优化技术，可以在给定的地质条件和支护要求下，自动调整锚杆长度、间距、预应力等参数，使巷道围岩的稳定性达到最佳状态。这些算法能够处理多目标优化问题，如提高巷道的稳定性、减少材料消耗及施工成本等。通过对多个优化目标进行权衡，优化算法能够快速找到最适合的支护设计方案，尤其在复杂的地质环境下，展现了较为优越的适应性与灵活性。通过这一方法，不仅提升了支护设计的精确性，还有效降低了工程实施过程中的风险，提升了整体工程的效率。

2.2 数值模拟方法的选用与效果分析

数值模拟方法在锚杆支护设计中起到了至关重要的作用，能够通过计算机模拟不同支护方案在不同地质条件下的表现。有限元分析、离散元分析等数值模拟技术能够准确地预测巷道围岩的变形行为以及锚杆支护的受力分布^[2]。这些模拟方法不仅能帮助工程师评估支护方案的可行性，还能在设计过程中进行实时优化。通过模拟不同的锚杆长度、预应力及间距组合，可以预测巷道在开挖过程中可能出现的变形与破坏模式，避免了传统设计中可能发生的安全隐患。在实际应用中，数值模拟已成为锚杆设计中不可或缺的一部分，且随着计算能力的提高，模拟精度和效率也得到了显著提升。

2.3 优化设计与实际工程的对比分析

优化设计方法在理论研究中表现出良好的效果，但与实际工程中的应用相比，仍然存在一定的差距。通过对比优化设计与实际工程中的支护效果，可以发现实际应用中面临的复杂因

素,如地质突变、施工难度等,常常影响设计方案的实施效果。虽然通过优化算法获得的支护方案能够理论上提高围岩稳定性,但实际工程中往往需要根据施工进度、成本控制及应急响应等因素进行调整。对比分析不仅能揭示优化设计方案与实际执行之间的差异,还能为今后的工程设计提供宝贵经验,尤其是在处理不确定因素和复杂条件时,优化设计的灵活性和适应性显得尤为重要。

3 不同地质条件下的锚杆支护参数优化

3.1 软弱围岩中的支护设计

软弱围岩通常表现为孔隙度较大、强度较低、易变形等特点,这些特性对锚杆支护系统的设计提出了较高要求。在软弱围岩中,锚杆的支撑作用尤为关键,其设计需要确保能够有效限制围岩的变形。为了提高锚杆支护系统的效果,通常会采用较长的锚杆,并增加锚杆的预应力,使锚杆能够深度穿透围岩并提供足够的拉力。在软弱围岩中,锚杆的间距应适当缩小,以增强支护强度并减少围岩因应力集中而发生的破坏。同时,支护系统中往往需要结合网格或喷射混凝土等其他加固措施,以增加围岩的整体稳定性,避免因局部变形导致的塌方现象。设计过程中还需考虑围岩的水文地质条件,如地下水位变化对围岩稳定性的影响,及时调整支护参数,确保支护效果的持久性。

3.2 坚硬岩层中的支护设计

与软弱围岩不同,坚硬岩层具有较高的强度和较低的变形能力,锚杆的设计应更加注重提高锚杆的抗拔力和锚固深度。坚硬岩层中的支护设计通常不需要像软弱围岩那样依赖于长锚杆和过高的预应力,而是通过适当增加锚杆的数量、优化间距设计来提高支护的整体稳定性^[3]。由于坚硬岩层较为密实且强度较高,锚杆与围岩的接触面较为坚固,但仍需在设计中考虑岩层的裂隙分布和微裂隙的扩展,避免支护系统遭遇局部失效。在支护设计时,锚杆的间距可以相对较大,但需要确保锚杆的承载能力足够支撑围岩的外力,防止发生岩层的非均匀变形。对于一些特殊坚硬岩层,可能还需要借助深孔注浆等加固手段,以进一步提高支护系统的可靠性和安全性。

3.3 不良地质条件下的特殊支护技术

在不良地质条件下,如断层带、破碎带、滑坡区等复杂环境中,锚杆支护的设计和实施面临较大挑战。这些区域的围岩通常存在极高的变形和不稳定性,单纯依赖常规锚杆支护可能无法有效控制围岩变形。在这种情况下,设计中常常结合使用多种支护技术。可以采用复合支护系统,将锚杆与喷射混凝土、支撑梁、钢拱架等联合使用,形成多层次的支护结构,以增强对围岩的控制力。针对断层带和破碎带等不良地质条件,还可以采用注浆加固、钢丝网加固等技术,以进一步提高支护效果。针对不良地质条件下的动态变化,支护设计需要具备高度的灵

活性,能够根据实际开挖进度和围岩状况进行动态调整,确保支护系统的实时适应性。通过采用这些特殊技术,不仅能够提高巷道的稳定性,还能有效降低围岩破裂和崩塌的风险,保障施工人员的安全。

4 锚杆支护的经济性与可持续性分析

4.1 支护成本的优化与控制

锚杆支护的成本控制是工程经济性分析中的关键环节。支护成本的优化通常涉及对材料、施工工艺以及设计参数的合理选择。在支护设计过程中,通过对锚杆长度、直径、间距等关键参数的调整,可以有效降低材料消耗,减少施工难度,从而达到节省成本的目的。选择高性价比的支护材料和施工设备,合理调配资源,也是降低支护成本的有效途径。采用现代化的施工技术,如机械化锚杆安装系统,不仅能够提高施工效率,还能减少人工成本,降低施工周期。在优化支护成本的过程中,还需考虑到长期的经济效益,例如通过合理支护设计,减少巷道后期维修和加固的需求,从而降低整体项目的生命周期成本。

4.2 长期稳定性与维护成本的关系

支护系统的长期稳定性直接关系到后期维护成本的高低。巷道围岩的稳定性较差或支护设计不当时,可能导致频繁的维修和加固工作,从而增加维护成本。为了降低后期维护费用,支护设计需要考虑围岩的长期变形趋势,并根据地质条件、开挖方式等因素,确保支护系统能够长期稳定运行^[4]。提高锚杆支护系统的抗疲劳性能和耐久性,是延长其使用寿命、减少维护成本的关键。针对不同地质条件,选择适当的锚杆类型、合理的预应力设置,可以有效减少支护系统在后期的变形和失效。采用定期监测技术,及时发现潜在的支护问题,也能在发生重大维护前,进行有效干预,降低维修费用,确保巷道的安全运营。

4.3 可持续设计方案的制定

可持续设计方案在锚杆支护中的应用体现了环境保护、资源利用和经济效益的统一。在支护系统设计中,除了保证安全性和稳定性外,还需考虑环保和资源的合理利用。通过选用环保材料、降低资源消耗、减少施工过程中的环境影响,可以在保障巷道稳定性的同时,实现项目的可持续发展。使用可回收材料和减少施工过程中的噪声污染,不仅符合绿色建筑要求,还能降低对周围生态环境的影响。在支护设计中引入生命周期评估(LCA)方法,能够帮助设计师全面评估不同设计方案的环境影响和资源消耗,进而选出最具可持续性的方案。通过这些措施,不仅可以提升工程项目的社会责任感,还能为企业节省能源和资源消耗,提升长期经济效益。

5 实际工程应用与案例分析

5.1 矿山巷道中的锚杆支护应用

在矿山巷道的开挖过程中,由于地下环境复杂且围岩类型多样,锚杆支护成为确保巷道稳定性的关键技术。在矿山巷道中,锚杆支护的主要任务是防止围岩崩塌、滑移和变形,特别是在软弱围岩或破碎带中,锚杆能够有效增强围岩的整体抗压能力。支护设计通常结合岩土工程的地质条件,对锚杆的长度、间距、预应力等参数进行优化,确保支护系统在施工过程中及长期运行中的可靠性。具体应用中,往往采用长锚杆和喷射混凝土组合的支护方案,以增强围岩的抗剪能力和抗拉强度。在一些特殊情况下,针对矿山巷道的复杂环境,还会引入自动化监测技术,实时监测围岩变形及支护系统的受力状态,确保支护系统能够及时调整应对不同的地质变化。

5.2 隧道工程中的支护优化设计

隧道工程中的支护设计面临的挑战比矿山巷道更为复杂,尤其是在城市地下空间建设中,地质条件的多变性要求支护设计具有高度的适应性。隧道支护的优化设计不仅要满足结构安全性和稳定性的要求,还要考虑施工周期、成本控制以及对环境的影响。通常,隧道支护系统采用锚杆与其他支护手段如钢拱架、喷射混凝土等的组合方式,形成复合支护体系。在设计时,支护参数的选择基于多因素综合分析,包括地质勘探结果、隧道开挖方式以及周围环境的影响^[5]。通过优化锚杆的布局和调整预应力水平,可以有效减少材料消耗并提升支护的整体稳定性。特别是在软弱土层或高水位区域,优化设计还需要考虑排水系统与支护结构的协调配合,以防止水压引起的围岩变形

或支护失效。采用数值模拟与优化算法,能够预测不同设计方案在实际施工中的表现,从而选择最为高效和经济的支持方式。

5.3 工程案例对比与效果评估

对比不同工程案例的锚杆支护设计及其实际效果,有助于评估优化设计方法在实际应用中的可行性和效果。通过对多个矿山巷道和隧道工程案例的分析,可以发现,优化后的支护设计在成本控制、施工效率和稳定性方面表现出了显著优势。在某矿山巷道的支护设计中,通过优化锚杆长度和间距,不仅提高了支护系统的承载能力,还降低了材料使用量,从而显著减少了施工成本和时间。而在隧道工程中,通过数值模拟与实际施工数据对比,验证了优化设计在减少围岩变形、提高支护稳定性方面的有效性。工程案例中的效果评估进一步表明,合理的锚杆设计能够显著提高支护系统的长期稳定性,减少后期维护费用。对于复杂地质条件下的工程,优化设计方案展现了更好的适应性和灵活性,可以有效应对突发地质变化,保证工程的顺利进行。通过案例对比与效果评估,可以为今后类似项目的支护设计提供宝贵的实践经验和数据支持。

6 结语

锚杆支护系统在巷道和隧道工程中的应用具有重要意义,能够有效提升围岩的稳定性,降低施工及维护成本。针对不同地质条件的支护设计方法,结合优化算法和数值模拟等现代技术,不仅提高了支护设计的精准度,也保障了工程的安全性和经济性。未来,随着技术的不断发展,支护设计将更加智能化和精准化,为地下工程的可持续发展提供 stronger 的支持。

参考文献:

- [1] 吴德义,范坤.深部软岩巷道围岩变形稳定性评价及合理支护参数选择[J].厦门理工学院学报,2025,33(1):77-84.
- [2] 李娟娟,孟庆彬,安刚健,臧振豪,宋子鸣.深部破裂围岩-锚杆支护时效特性及巷道长时稳定性分析[J].中国矿业,2025,34(9):244-256.
- [3] 王军军,陈晨.高应力巷道锚杆支护围岩稳定性分析[J].凿岩机械气动工具,2025,51(4):111-113.
- [4] 周明,张毅,江成玉.深部破碎软岩巷道围岩稳定性分析及支护技术研究[J].煤,2025,34(3):71-75.
- [5] 袁明星.巷道掘进几何截面对围岩支护稳定性的影响作用分析[J].能源与节能,2025(8):330-332.