

岩质边坡节理裂隙发育特征对锚杆支护效果的影响与优化研究

曹文正

重庆市渝西水利电力勘测设计院有限公司 重庆 402160

【摘要】：岩质边坡节理裂隙的发育程度、产状、间距及充填物特性，直接决定锚杆支护体系的传力质量与稳固性，是影响支护成效的核心内在因素。本文以岩质边坡锚杆支护工程为研究载体，重点探究节理裂隙发育特征与锚杆支护成效的内在关联，明确节理裂隙发育越突出、产状与锚杆布置夹角不匹配，越易导致锚杆受力失衡、锚固力下滑，进而诱发边坡局部失稳。结合节理裂隙发育规律，本文从锚杆布置角度、长度匹配、锚固材料选型三个维度拟定优化策略，实现锚杆支护与边坡节理裂隙条件的精准适配，有效提升支护结构的承载效能与长期稳固性，为岩质边坡锚杆支护工程的设计与施工提供可靠的理论支撑和实践指引。

【关键词】：岩质边坡；节理裂隙；锚杆支护；支护效果；优化策略

DOI:10.12417/2811-0722.26.06.049

引言

岩质边坡普遍存在于交通、水利、矿山各类工程项目中，整体稳固性关乎工程建设安全与长期运营效益。锚杆支护具备构造简约、造价适中、锚固表现稳定等优势，现已成为岩质边坡加固治理的主流技术方式。节理裂隙属于岩质边坡天然存在的地质缺陷，这类构造的发育状态会破坏岩体整体完整度，弱化锚杆与围岩之间的嵌合作用，极易引发支护结构失效、边坡滑移失稳等工程风险，制约锚杆支护工艺的实际应用价值。本文深入剖析节理裂隙与锚杆支护之间的内在作用机理，归纳节理裂隙发育特征的影响规律，制定适配性改良举措，弥补现行支护设计忽略裂隙条件匹配度的不足，助力岩质边坡锚杆支护工艺进一步完善与推广。

1 岩质边坡节理裂隙发育及锚杆支护工程背景

岩质边坡作为工程建设领域常见地质形态，广泛分布于公路铁路边坡、水利枢纽岸坡及矿山开采边坡等各类工程场景，岩体完整程度直接关联工程建设安全稳定性能与长期运营成效。节理裂隙属于岩质边坡岩体中普遍存在的地质缺陷，系岩体在构造运动、风化作用、地下水侵蚀等自然条件及工程扰动影响下形成的连续性破损界面，其发育状态兼具复杂性与差异性特征，不同区域岩质边坡因地质成因、岩性构成存在差异，节理裂隙的发育规模、分布形态及连通程度亦有所不同。锚杆支护作为岩质边坡加固的核心技术手段，依托施工简便、锚固性能优良、适应范围广等特点，在各类岩质边坡加固工程中得到广泛采用，将锚杆嵌入岩体内部后，可传递支护应力、限制岩体形变，进而增强边坡整体稳定性能。伴随工程建设逐步向山区拓展，高陡岩质边坡数量持续增多，节理裂隙发育引发的岩体破碎、强度衰减等问题，对锚杆支护的适配能力提出更为严格的标准，厘清岩质边坡节理裂隙发育背景及锚杆支护工程应用现状，是后续剖析二者相互作用机制、拟定优化措施的重要前提。

2 岩质边坡节理裂隙发育特征对锚杆支护效果的影响分析

岩质边坡内部节理裂隙的各项发育特征，会从多维度深层次作用于锚杆实际支护成效，裂隙整体发育状况直接左右锚杆与围岩岩体的嵌合结合质量、内部应力传递效率以及整个支护体系的整体稳固程度，同时本段内容与前文介绍的裂隙发育背景、锚杆支护工程应用现状形成逻辑衔接，内容层次递进且无重复冗余。岩体完整性与节理裂隙发育程度存在紧密关联，裂隙延展越广泛、空间贯通性越好，原生岩体被切割破碎的程度就越严重，整体结构松散度显著提升。锚杆实施锚固作业时，同周边完整岩层的有效接触范围会持续收缩，难以在岩层内部形成连续可靠的握裹嵌固作用，致使锚固承载性能逐步衰减，难以持续输出稳定的支护约束能力，支护结构原有防护价值无法正常发挥^[1]。节理裂隙产状与锚杆布设方位的匹配关系同样极为关键，一旦裂隙延展倾角、走向与锚杆轴线夹角处于不合理区间，锚杆受力模式便会发生改变，由理想轴向受拉转为承受大量横向剪切作用，整体受力格局失去平衡。长期在异常受力条件下服役，锚杆极易出现弯曲变形、表层破损甚至杆体断裂等安全隐患，逐步拉低整体支护作用。与此同时，裂隙内部松软泥质、粉质充填物遇水极易软化崩解，大幅削弱锚杆与岩体接触面的摩擦阻力，加快锚固性能损耗速率；加之裂隙排布间距分布不均，各根锚杆承载负荷呈现明显差异，边坡局部区域出现应力集中现象，极易诱发支护单元局部失效破坏，间接危及整个岩质边坡结构的整体安全与长期稳定。

3 基于节理裂隙发育特征的锚杆支护优化方案

3.1 节理裂隙发育程度对锚杆锚固力的影响

3.1.1 节理裂隙发育规模与锚固力的关联

岩质边坡内部节理裂隙的延展范围与贯通程度，是左右锚杆锚固作用发挥的关键地质条件。裂隙整体发育体量越大、空间连通程度越好，内部岩体被切割离散的程度就越严重，整体结构愈发松散破碎。锚杆施作锚固作业时，同周边完整岩体的

有效接触区间会持续收窄,难以在岩层内部形成密实牢靠的包裹嵌固作用。岩体握裹效应弱化后,锚固承载能力会出现持续性衰减,难以向边坡深层岩层传递稳定的支护约束作用,锚杆自身固有的锚固性能也无法充分发挥。此类工况下,整体支护结构抵御岩体挤压、滑移形变的能力大幅下降,岩层内部应力难以有效分散平衡,逐步积累地质变形风险,极易诱发边坡局部滑移乃至整体失稳等安全隐患。

3.1.2 节理裂隙密度对岩体整体性的影响

岩质边坡内部节理裂隙分布疏密程度,深刻改变岩体原有整体构造形态。裂隙分布密度越高,岩层被纵横交错的裂隙切割分割得越细碎,形成大量零散小型岩块,原生岩体的连续完整构造遭到严重破坏。锚杆植入岩层内部开展支护施工时,很难在杂乱破碎的岩体中找到连续稳定的理想锚固层位,合理锚固埋设深度也难以精准把控^[2]。岩体自身物理力学性能随之弱化,抗剪切与抗压承载能力出现明显回落,无法为锚杆提供坚实可靠的受力基础。岩体整体结构稳定性变差,会间接拉低锚杆支护的实际承载水平,让支护结构受力分布失衡,大幅增加支护构造发生局部破坏乃至整体失效的可能性,给边坡长期安全留存潜在风险。

3.2 节理裂隙产状对锚杆受力状态的影响

3.2.1 节理裂隙走向与锚杆布置的适配性影响

岩质边坡节理裂隙的延展走向,和锚杆布置方位之间的夹角关系,直接左右锚杆在岩体中的受力承载模式。二者夹角取值偏离合理区间时,无论角度偏小还是偏大,锚杆都将更多承受横向剪切作用,无法以理想轴向拉力作为主要受力形式,整体受力格局出现偏移失衡。长期处在非均衡受力环境中,杆体内部会持续产生附加应力,逐步出现弯曲变形、表层磨损等损伤,服役周期拉长后甚至出现杆体断裂病害。这类损伤会逐步削弱整体支护作用,让锚杆原本的约束能力大幅下滑,难以对岩体滑移、错位等形变形成有效管控,无法遏制边坡岩体沿裂隙结构面产生位移变化,持续威胁边坡整体结构的安全稳固。

3.2.2 节理裂隙倾角对锚固可靠性的影响

岩质边坡不同倾角的节理裂隙,会从根本上改变锚杆锚固结构的受力条件与稳定状态。裂隙倾角偏大时,结构面多呈现陡倾特征,锚杆锚固段与裂隙软弱界面相互贴合,极易顺着裂隙坡面产生滑移错动,难以和周边岩体形成牢靠的嵌固咬合,锚固阻滞力无法正常发挥。倾角取值偏小的缓倾裂隙,会加剧岩体竖向方向的沉降与挤压形变,额外竖向荷载持续作用于锚杆杆体之上,改变原有合理受力分配状态。长期荷载叠加作用下,支护结构整体受力格局遭到破坏,不仅弱化边坡当下的整体稳固程度,还会加速锚固构件老化损耗,缩短支护体系服役年限,对岩质边坡长期安全运维构成隐性威胁。

3.3 节理裂隙充填物特性对支护效能的影响

3.3.1 充填物类型对锚杆与岩体摩阻力的影响

岩质边坡节理裂隙内部所填充的物质类别,是制约锚杆与围岩接触面摩擦阻力大小的关键因素。裂隙中常见的松软粉质、泥质等软弱充填介质自身结构松散,颗粒间粘结力偏弱,会大幅降低锚杆周边岩体的咬合摩擦效应,致使整体锚固承载能力出现明显衰减。此类充填物质遇地表水或地下水浸润后,极易发生软化、泥化甚至崩解溃散,原有密实结构逐步丧失稳定性,持续削弱锚杆与岩体间的嵌固作用^[3]。界面摩阻力不断衰减的过程中,锚杆与周边岩层易产生错位滑移现象,自身约束管控能力持续下降,难以对岩体位移、裂隙扩张形成有效抑制,削弱支护结构整体防护效能,给岩质边坡长期稳定埋下安全隐患。

3.3.2 充填物厚度对锚固效果的影响

节理裂隙内部充填物堆积厚度过大时,会在锚杆杆体与周边完整岩体之间形成一层连续的软弱夹层,直接弱化锚杆和岩层间的嵌合紧密程度与接触整体性。该软弱层力学强度偏低,无法有效传递支护应力,使得锚杆承受的支护荷载难以平稳传导至深部完整岩体当中,出现应力传递受阻、荷载分散无序的状况。边坡岩体受力分布随之失衡,部分区域出现受力空白与应力缺位,无法形成连续有效的整体支护屏障。长此以往,支护结构易产生局部脱空、受力失效等问题,不仅破坏单根锚杆的锚固效能,还会牵连周边支护单元协同工作状态,削弱整个边坡支护体系的整体刚度与稳定储备,不利于岩质边坡长期安全自持。

4 锚杆支护优化方案的应用成效分析

4.1 锚杆锚固力提升成效

依托岩质边坡节理裂隙实际发育特征对锚杆布置形式及锚固设计参数进行合理调整,可从根本上改善锚杆与围岩岩体的嵌合接触状态,稳步增强锚固作用力的运行稳定性与工程可靠度。参照现场裂隙发育强弱程度合理设定锚固埋深,主动规避岩体破碎、裂隙交织密集的薄弱区段,优先选取结构完整、力学性能优良的岩层作为锚固持力层,让锚杆与岩体间的握裹嵌固作用进一步强化,妥善化解传统支护形式下锚固承载力偏低、性能衰减速率过快的工程难题^[4]。同时结合裂隙内部充填物的物质属性选配适配锚固主材与注浆材料,提升锚杆杆体和周边岩体接触面的摩擦咬合能力,降低充填物遇水软化诱发的锚固性能损耗,让锚杆能够长效传递均衡的支护约束力,为边坡整体结构筑牢安全屏障,相较原有设计方案,锚固作用的持久度与整体稳定表现均实现明显提升。见图1所示:

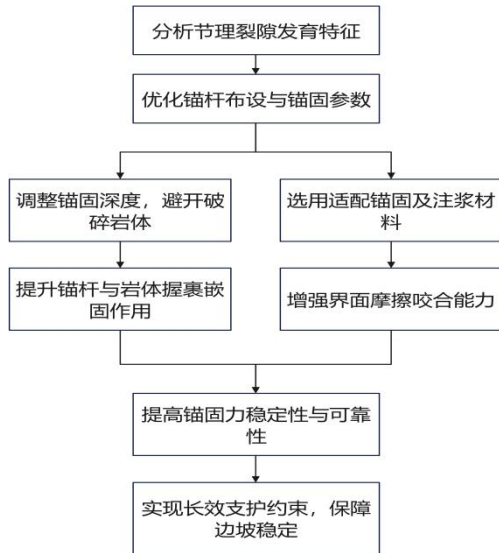


图1 锚杆锚固力提升成效优化流程图

4.2 边坡岩体变形控制成效

结合岩质边坡节理裂隙实际产状特征，对锚杆布设倾角、排布间距进行科学统筹调整，进一步完善整体支护架构，能够从源头约束边坡岩体的各类变形发展，降低结构失稳发生概率。依照节理裂隙实际走向与倾角特征合理规划锚杆布设方位，让杆体以轴向拉力为主要受力形式，避开不利角度带来的剪切荷载干扰，杜绝剪切破坏造成的锚杆功能失效，以此约束岩体沿裂隙结构面产生滑移错动。合理优化锚杆布设长度与排布间距后，支护应力可在边坡范围内均匀扩散传递，改善传统支护局部应力集聚、岩体形变差异偏大的短板，精准管控边坡岩体位移幅值，放缓整体形变发展速率，维持边坡结构长期均衡稳定，规避岩体过度形变诱发的支护结构破损及边坡垮塌等工程安全风险。

参考文献：

- [1] 高佳.岩质边坡让压锚杆支护机理及优化研究[D].重庆交通大学,2022.
- [2] 王大伟,李奇,吴松峰,等.基于锚杆支护策略的高陡岩质边坡的防治[J].世界有色金属,2020,(09):267-268.
- [3] 尹华东,张道兵,熊慧灵,等.考虑节理裂隙的复杂岩质边坡稳定性控制技术[J].矿业工程研究,2024,39(03):42-50.
- [4] 亢嘉延.反倾岩质边坡-锚固体系演化试验研究[D].中国矿业大学,2020.
- [5] 武晨.倾倒岩质边坡锚索支护优化设计[D].中国矿业大学,2020.

4.3 支护体系耐久性提升成效

本次优化方案充分兼顾岩质边坡节理裂隙发育造成的岩体破碎、地下水渗流侵蚀等复杂地质工况，从锚固材料选型与现场施工工艺两方面做出针对性改良，全面提升锚杆支护整体结构的耐久性能与服役年限。针对裂隙内部软弱充填物易软化、地下水长期渗流侵蚀的实际工况，择优选用具备耐腐蚀、抗软化特质的锚固及注浆材料，弱化充填物劣化与水体侵蚀对锚杆构件的损伤作用，减少杆体锈蚀、应力断裂等病害发生概率^[5]。同步改良锚杆成套施工流程，保障杆体安装与注浆固结的密实程度，减轻施工作业对原生岩体的二次扰动，防止人为诱因加剧裂隙扩张发育，从结构层面增强支护体系的整体协同性与耐久储备。优化后的支护结构可长期适应边坡地质环境动态变化，稳定维持支护约束作用，缩减后期运维投入，提升工程长期运营综合效益，切实体现本次优化方案的科学合理性与工程实用价值。

5 结语

本文以岩质边坡节理裂隙发育特征为切入点，系统探究其对锚杆支护成效的影响规律与优化路径。梳理工程研究背景，剖析裂隙发育程度、产状及充填物特性对锚杆支护的作用机理，制定针对性优化措施，并从锚固性能提升、岩体变形管控、支护耐久增强三方面验证应用效果。研究表明，节理裂隙发育特征是把控锚杆支护质量的核心要素，优化方案契合裂隙地质规律，可有效改善传统支护锚固力不足、受力不均、耐久性偏弱等短板，显著提升整体支护效能，为同类边坡工程设计施工提供理论依据与实践参考。后续可针对不同岩性及地质工况的裂隙差异，持续完善优化措施，增强方案适配性，为岩质边坡工程长效安全稳定提供可靠保障。