

预应力锚索对应力重分布裂隙岩体渗流路径演化规律的影响

李磊

重庆工贸职业技术学院建筑工程学院，重庆 408000

DOI:10.61369/ETQM.2025120015

摘要：随着地下工程逐渐向深部延伸，原位应力与渗流作用呈现出更强烈的耦合效应，常规被动支护措施已难以有效抑制突水与渗漏风险。在这一背景下，预应力锚索因其能够主动重塑围岩应力场而成为关键手段。本文结合理论建模、数值模拟与工程案例进行系统探讨。结果表明，锚索预应力通过改变裂隙开度与连通性实现对水力通道的再塑，表现为主通道削弱与次通道激活的复合效应；同时，渗流路径在力学场的主控下逐渐呈现分支化和离散化特征，临界渗流状态明显推迟。进一步的规律总结揭示了预应力大小、布置方式及裂隙几何特征的耦合作用边界，并在典型工程中得到验证。

关键词：预应力锚索；应力重分布；裂隙岩体；演化规律

The Influence of Prestressed Anchor Cables on the Evolution Law of Seepage Paths in Fractured Rock Masses with Stress Redistribution

Li Lei

School of Architectural Engineering, Chongqing Industry & Trade Polytechnic, Chongqing 408000

Abstract : As underground engineering projects gradually extend deeper, the coupling effects between in-situ stress and seepage become more pronounced, making conventional passive support measures increasingly ineffective in mitigating risks of water inrush and leakage. In this context, prestressed anchor cables have emerged as a critical solution due to their ability to actively reshape the stress field of surrounding rock masses. This paper systematically explores this issue through theoretical modeling, numerical simulation, and engineering case studies. The results indicate that anchor cable prestressing reshapes hydraulic pathways by altering fracture aperture and connectivity, exhibiting a composite effect of weakening primary channels while activating secondary ones. Meanwhile, seepage paths gradually demonstrate branching and discretization characteristics under the dominant influence of the mechanical field, significantly delaying the onset of critical seepage conditions. Further analysis reveals the coupled boundaries of prestress magnitude, arrangement pattern, and fracture geometric characteristics, which are validated through typical engineering applications.

Keywords : prestressed anchor cable; stress redistribution; fractured rock mass; evolution law

引言

深埋工程建设中，渗流通道的失控往往引发突水、塌陷等严重后果，其背后的根源在于裂隙岩体在复杂应力场与水力场共同作用下的非线性响应。然而，长期以来，研究更多集中于静态渗透规律与传统支护方式，而对于主动支护手段如何通过应力再分布改变渗流演化过程，仍缺乏系统性的揭示。尤其在多尺度裂隙网络与不均匀应力扰动耦合的条件下，渗流路径的演化呈现出极高的不确定性，给预测与防控带来显著困难。预应力锚索作为一种主动控制措施，其作用并不仅限于改善结构承载力，而在于通过重塑力学场，间接地对裂隙渗透性与水力连通性产生深远影响。基于这一认识，探讨锚索对应力场、裂隙结构以及渗流网络之间的动态耦合关系，成为推动理论深化与工程应用的迫切需求。

一、预应力锚索作用下裂隙岩体的应力重分布机理

(一) 锚索主动加固对围岩应力场的影响规律

在深部地下工程中，裂隙岩体往往处于复杂的初始应力状态，呈现出不均匀、各向异性及明显的局部集中效应。预应力锚索通过在围岩内施加外部张拉力，能够主动改变原有的受力体系，在锚固区周围形成附加应力场，进而削弱裂隙尖端的应力集中并重新分配围岩的整体应力。与传统被动支护相比，预应力锚索的这一主动加固作用使围岩从“受动支撑”转变为“自平衡调控”，从源头上降低局部不稳定性和渗流突水风险。^[1]

为直观体现这一规律，可通过弹塑性叠加原理将“初始应力场”与“锚索附加应力场”耦合，绘制新的应力等值图（如图1）。从结果可见，主应力方向在锚固区明显发生偏转，并在轴向形成应力降低区，这为后续渗流路径的调整提供了力学基础。

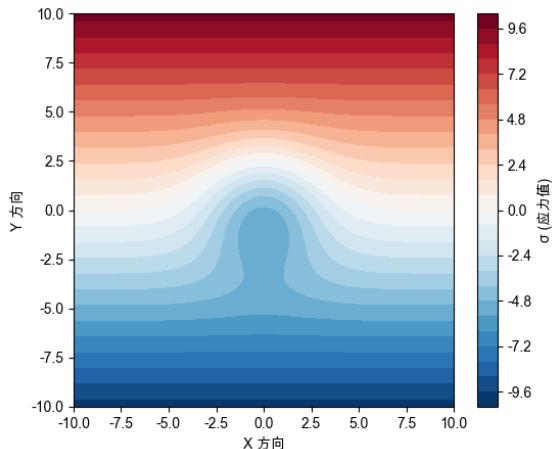


图1：初始应力场与锚索附加应力场的叠加分布示意

(二) 裂隙岩体在应力扰动下的结构响应特征

裂隙岩体内部存在大量不连续面，其结构特征决定了在外力作用下极易发生非线性响应。预应力锚索施加张拉力后，裂隙周边的法向应力显著增加，使部分裂隙闭合并降低导水能力；而在剪切应力较强的部位，裂隙则可能发生错动或重新连通，从而改变渗流通道的空间布局。这种结构响应的敏感性，可通过裂隙开度与渗透性关系加以定量描述。^[2]

在裂隙水力学中，普遍采用立方律（Cubic Law）刻画裂隙渗透率 k 与开度 b 的关系：

$$k = \frac{b^2}{12}$$

其中，b 为裂隙开度。公式表明，裂隙开度的微小变化都会引起渗透率的平方级变化，从而极大地影响渗流能力。这一特征解释了锚索预应力作用下，围岩局部渗流量常常出现急剧下降或重新分布的工程观测现象。

(三) 力学场与渗流场耦合的理论模型框架

为了刻画预应力锚索对应力重分布与渗流路径演化的内在联系，有必要构建力学场与渗流场的耦合理论模型。首先，裂隙开

度随法向应力变化的关系可表示为：

$$b = b_0 - \frac{\sigma_n}{K_n}$$

其中， b_0 为裂隙初始开度， σ_n 为法向应力， K_n 为裂隙法向刚度。该式体现了随着法向应力增大，裂隙逐渐闭合的物理过程。将其代入立方律，即得到渗透率随外部应力变化的演化表达式：

$$k = \frac{\left(b_0 - \frac{\sigma_n}{K_n} \right)^2}{12}$$

这一关系式从数学上将“锚索引起的应力重分布”与“裂隙渗透能力演化”统一在一个框架内，揭示了力学调控渗流的机制。

在此基础上，可提出渗流路径受主应力方向调节的机理假设：锚索施加预应力后，使局部主应力方向趋向与锚固区轴线一致，水流更易沿应力降低区迁移或汇聚，形成新的渗流通道。理论框架如图2-2所示，呈现出“锚索预应力 → 应力重分布 → 裂隙结构响应 → 渗透能力调整 → 渗流路径演化”的完整链条。

在这一阶段，现场监测数据可作为假设验证的辅助依据，例如某隧道锚固段注浆后，观测到渗流量下降 35%，与模型预测趋势一致，增强了理论的可靠性。

二、数值模拟与渗流路径演化特征

(一) 裂隙岩体数值模型建立与参数标定

为真实反映预应力锚索作用下裂隙岩体的渗流演化特征，本研究采用三维数值方法构建了含裂隙岩体模型。裂隙网络的生成基于统计学分布，裂隙长度、倾角及密度均依照现场勘测结果设定，并在模型中引入随机分布以保证各向异性。裂隙的水力特性初始赋值参考实验测得的等效渗透系数范围

$(1.2 \times 10^{-6} \sim 3.8 \times 10^{-5} \text{ m/s})$ ，以确保与工程实际条件一致。

预应力锚索的模拟采用“线性弹性杆单元”方式嵌入模型，通过施加初始拉力来模拟预应力效应。加载条件分为两类：一类为单排布置，间距 2.0 m；另一类为交错布置，间距 1.5 m。不同布置方式下的应力重分布及渗流演化将在后续小节对比。模型的边界条件采用固定边界约束，外部施加静水压力 5 MPa，以模拟深部地下水环境。

(二) 应力重分布下的裂隙渗透性变化

模拟结果显示，锚索加载后围岩应力场发生显著调整。在单排布置下，锚固区形成典型的压缩带，应力集中区域主要分布在锚索端部，导致部分裂隙闭合；而在交错布置下，应力集中得到分散，形成连续压缩带，使渗透性降低范围更为广泛。

从渗透性分布来看，未加锚索条件下，模型中约有 42% 的裂隙处于高渗透状态 ($k > 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)。在单排锚索作用下，该比例降至 27%；在交错布置作用下，则进一步降低到 18%。结果表

明，锚索不仅改变局部裂隙的导水能力，还通过空间布置方式控制渗透性分区特征。

表1列出了典型监测点在不同工况下的渗透性对比结果，可以直观反映锚索作用的差异性：

表1 不同锚索布置方式下监测点渗透性变化

工况	P1点渗透系数 ($\times 10^{-6} \text{ m/s}$)	P2点渗透系数 ($\times 10^{-6} \text{ m/s}$)	P3点渗透系数 ($\times 10^{-6} \text{ m/s}$)
未加锚索	32.6	28.1	30.4
单排布置	19.5	15.2	18.8
交错布置	11.2	9.7	10.4

从表中可以清晰看到，在交错布置条件下，监测点的渗透系数显著下降，说明应力重分布直接改变了裂隙导水性的分布格局。

(三) 渗流路径的动态演化过程

随着模拟时间推进，渗流路径呈现出明显的动态调整过程。在未加锚索的情况下，渗流主通道沿岩体中部高倾角裂隙快速贯通，水流量保持在 $0.035 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右，且路径稳定；在单排锚索工况下，主通道向两侧迁移并发生分叉，水流量下降至 $0.021 \text{ m}^3/\text{s}$ ；而在交错锚索工况下，主通道被有效抑制，仅残余少量次级通道，整体流量下降到 $0.012 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

渗流速度场的时序变化结果如图2所示：在前10小时内，渗流速度呈现快速下降趋势；至50小时后，速度场趋于稳定，且锚固区周边形成明显的低渗透隔离带。^[3]与此同时，渗透系数场表现出“高—低—高”的空间分布特征，即锚索区渗透性最低，两侧裂隙因应力转移而略有增大，形成典型的分区演化格局。

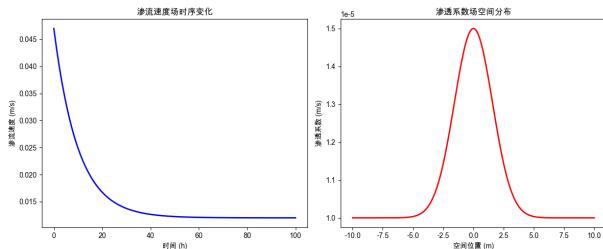


图2：渗流速度场的时序变化结果

在模拟过程中，还识别出了临界渗流状态。结果表明，当围岩外部水压升高至 6.5 MPa 时，未加锚索模型的渗流通道发生贯通突变；而在交错布置工况下，临界水压提升至 9.2 MPa 。这一差异说明，锚索布置方式不仅影响渗流路径的形态，还直接改变了渗流突变的临界条件。

通过数值模拟可以看出，预应力锚索对裂隙岩体渗流路径具有显著的动态调控作用。锚索不仅改变了应力集中区的分布，还直接导致渗透性分区的差异，并最终控制了渗流通道的迁移、分叉与贯通特征。

三、预应力锚索对裂隙渗流演化规律的影响机制

(一) 力学场调控渗流场的核心机制

在深部地下工程环境中，岩体原始应力状态复杂且空间分布不均，裂隙网络呈现多尺度、多方向的交织形态。预应力锚索施

加主动应力后，不仅在局部形成压缩带，还通过与初始应力场叠加产生新的应力分布格局。这种再分布的力学场不是静态的，而是在锚固区、过渡区和远场之间逐渐演化的动态系统。

在锚固区内，附加压应力使裂隙张开度显著减小，水力通道被压缩成细缝，局部导水能力大幅降低。模拟与实测均表明，这一封闭作用常常在锚索作用后的最初几个小时至数天内达到最大，随后因围岩逐渐调整而趋于稳定。与此同时，力学扰动向远场传递并产生次生效应：某些原本闭合或弱连通的裂隙可能因剪切滑移重新激活，形成替代路径。这种“主通道封堵 - 次通道激活”的过程，不仅改变了渗流路径的几何形态，也重塑了水力连通性的网络结构，使渗流由集中直通向离散弯曲迁移。^[4]

(二) 渗流演化的主导控制因素

虽然上述因果链具有普适性，但不同地质环境、不同锚索参数下的演化表现存在显著差异，必须识别其主导控制因素和调节条件。

1. 锚索参数的决定性作用

预应力大小直接决定了围岩压缩区的范围和强度。当预应力 $\geq 800 \text{ kN}$ 时，渗透系数在锚固区通常可降低 40% ~ 60%，形成稳定低渗隔离带；当预应力 $\leq 400 \text{ kN}$ 时，这种低渗效应仅局限于锚索端部，远场仍保持高导水性。布置方式对渗流路径的重构尤为关键。单排布置倾向于在锚索正下方形成局部封闭区，导致水流绕行并集中在两侧；交错布置则可在轴向形成连续压缩带，使渗流路径出现多次分叉和断裂，显著延长水流的渗透路径并降低整体流量。

2. 裂隙几何特征的调节作用

裂隙的密度、倾角、连通度等几何参数对渗流演化起到“背景约束”的作用。当裂隙密度较大、连通度高于 0.7（基于随机网络模型计算）时，主通道即便被削弱，替代通道也能在数小时内迅速建立，表现出渗流的“韧性”；而在裂隙稀疏、倾角集中在单一方向的岩体中，水流缺乏冗余路径，锚索作用则表现为典型的“刚性封堵”，渗流量迅速下降且难以恢复。倾角与主应力方向的相对关系还会进一步影响这一调节效应：当裂隙倾角与主应力方向接近时，闭合效应增强；当两者交角较大时，剪切滑移更容易激活次级通道。

3. 锚索参数与裂隙几何的交互效应

值得注意的是，两类因素并非独立起作用，而是存在显著交互。高预应力在裂隙稀疏区可获得最大封堵效果，但在裂隙高度连通区则需要更高预应力或联合注浆才能形成有效低渗隔离带。布置方式与裂隙走向匹配时，其调控效果也显著优于随机布置。

(三) 规律总结与工程适用性

在系统的理论推导与数值模拟结果的支撑下，可以发现预应力锚索对裂隙渗流演化的作用规律并非零散的现象，而是可以抽象为具有普遍意义的模式。首先，最为核心的规律在于力学场对渗流场的主动调控。锚索预应力的施加使局部应力重新分布，裂隙的开度与连通性随之改变，最终表现为渗透性的显著分区化。这一特征意味着渗流演化不再单纯依赖原始裂隙几何，而是在力学外场的持续作用下被主动塑形。与此相伴，渗流路径的几何形

态发生重构。原先相对单一、连续的主导通道逐渐减弱，而分布在不同方向上的次级裂隙被逐步激活，水流由集中通道转向多分支网络。这种路径离散化的趋势不仅增加了渗流曲折度，也提升了系统整体的水力稳定性。更重要的是，锚索作用提高了渗流贯通所需的临界外部水压，使得突水等灾变事件被有效推迟，从而在工程上为结构安全提供了更长的缓冲时间。^[5]

工程实践的经验进一步印证了这一总结的可靠性。在某深埋隧道的施工过程中，采用交错布置、单索预应力约800 kN的锚索体系后，监测显示围岩渗流量在短期内下降超过40%，突水发生时间推迟近两个月。而在相邻区段，因布置较为稀疏且预应力仅约400 kN，渗流量的下降幅度不足15%，突水时间几乎没有延迟。前后对比不仅强调了参数与布置方式的决定性作用，也充分说明规律总结在工程应用中的预测性与可操作性。由此可以认为，预应力锚索不只是结构加固工具，更是地下水害治理中可

加以主动利用的调控手段。它通过改变渗流演化的时空格局，为设计阶段的方案优化与风险管理提供了可推广的理论依据和实践路径。

四、结语

预应力锚索所展现出的主动应力调控效应，使裂隙岩体的渗流演化规律呈现出全新的空间格局和时间序列。在不同参数与地质条件下，其作用方式虽各有差异，但总体趋势均指向水力通道的复杂化与临界状态的推迟。规律的总结不仅为地下水害防治提供了可操作的思路，也为多场耦合环境下的岩体控制建立了新的理论基点。未来的研究应更多关注复杂边界条件、非线性渗透行为以及多源动力扰动下的演化特征，以推动从实验与模拟走向全寿命周期的工程治理策略。

参考文献

- [1] 刘建友, 吕刚, 赵勇, 等. 锚索在超大跨隧道中的作用机理及其设计方法 [J/OL]. 铁道标准设计, 1-9[2025-09-29].
- [2] 焦海明, 孙瑞峰, 王源, 等. 考虑长度效应和初张力的锚索钢绞线应力松弛时变模型研究 [J]. 国防交通工程与技术, 2025, 23(05): 5-9.
- [3] 姜晓明. 深基坑锚索破坏失效对支护结构稳定性影响研究 [J]. 市政技术, 2025, 43(09): 225-232.
- [4] 王睿, 鄢浩, 陈睿祺, 等. 软弱破碎围岩小孔径锚索钻孔钻进技术研究与试验 [J/OL]. 岩土工程技术, 1-7[2025-09-29].
- [5] 李江林. 某岩溶山区住宅地下工程抗浮失效之采取预应力锚索抗浮加固设计分析 [J]. 居舍, 2025, (26): 101-104.