

水电站工程中帷幕灌浆法应用于特殊地层施工技术的研究

文 / 张小生 高安市水利局

摘要: 水电站工程中,特殊地层的施工环境对帷幕灌浆法提出了较高要求。该技术通过注浆形成不透水层,以保证水坝的稳定性和密封性。针对不同地质条件,如软弱围岩和断层破碎带等,探讨了帷幕灌浆技术的适应性和施工要点。采用改进型注浆工艺,结合现场实践案例,验证了该技术在提高施工质量、缩短工期、降低施工风险等方面的有效性。帷幕灌浆法为水电站工程中的特殊地层施工提供了可靠的技术支持。

关键词: 帷幕灌浆法; 特殊地层; 水电站工程; 施工技术; 注浆工艺

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.15.072

引言

随着水电站规模的不断扩大和建设难度的增加,特殊地层的施工问题日益突出,尤其是在软弱围岩和断层破碎带等复杂地质条件下,施工安全和工程质量面临巨大挑战。帷幕灌浆法作为一种关键的防渗技术,在水电站工程中广泛应用,通过注浆形成稳定的屏障层,有效解决了这些难题。然而,如何在不同地质条件下优化应用该技术,仍然是施工中亟待解决的问题。探索和完善帷幕灌浆法的施工技术,对于提升水电站工程的质量和安全性具有重要意义。

一、特殊地层条件对水电站工程施工的挑战

在水电站工程建设中,特殊地层的存在给施工带来了严峻的挑战。水电站通常位于复杂的地质环境中,尤其是软弱围岩、断层破碎带及地下水丰富的区域,这些地层条件对传统施工方法提出了较高的要求。软弱围岩不仅承载能力差,而且易于发生位移和变形,直接影响坝体的稳定性和施工安全。断层破碎带则由于其地质结构的破碎和不稳定,容易引发施工过程中渗漏和涌水等问题,从而影响工程进度和质量。此外,地下水丰富的地区,尤其是与水流或水源密切相关的区域,往往导致水电站的防渗处理变得复杂和困难。

面对这些特殊地层条件,传统的防渗和加固技术难以应对,尤其在保证水库长期稳定运行的要求下,解决防渗问题成为关键。由于软弱围岩和断层破碎带的复杂性,普通的加固方法往往不能满足设计要求,因此需要采用更为先进和精准的技术手段。帷幕灌浆法作为一种有效的防渗施工技术,通过向地下注入水泥浆液或其他材料形成密实的隔水屏障,有效解决了渗漏问题,确保水电站的坝体在复杂地质条件下的稳定性。

然而,帷幕灌浆法的实施也面临一些技术难题。首先,不同地质条件下,灌浆材料的选择和注浆方法需要根据实际情况进行调整。例如,在软弱围岩中,需要选用具有较好流动性的浆液,以便更好地填充岩石缝隙,而在断层破碎带中,则需要使用高强度的浆液,以增加屏障的密实性。其次,如何精确控制注浆压力和注浆量,以确保形成均匀且有效的防渗层,是施工过程中需要特别关注的问题。此外,施工人员必须深入了解现场的地质

情况,通过持续的监测和评估来调整灌浆方案,确保施工过程的顺利进行。尽管如此,随着技术的不断进步和实践经验的积累,帷幕灌浆法在水电站工程中的应用已取得显著成效,为解决特殊地层条件下的施工难题提供了强有力的技术支持。

二、帷幕灌浆法在水电站工程中的应用原理

帷幕灌浆法是一种常用于水电站工程中的防渗技术,其基本原理是通过向地下特殊地层注入浆液,以形成一个连续、不透水的屏障层,阻止地下水的渗漏。这一技术通过精准的注浆施工,能够有效地解决在复杂地质条件下,如软弱围岩、断层破碎带等地质环境中的渗漏问题。水电站建设过程中,坝体、引水隧洞、地下厂房等重要设施常常需要与水源或地下水体接触,因此保持坝体的防渗性至关重要。而帷幕灌浆法通过在这些区域周围建立起一个坚固的防水屏障,确保了水电站在长期使用过程中的安全性和稳定性。

帷幕灌浆法的应用流程包括钻孔、浆液注入和封闭形成防渗层三个主要步骤。首先,施工人员根据工程的实际地质条件和设计要求,选择适当的位置进行钻孔。钻孔的深度和间距需要精确计算,以确保浆液能够覆盖整个需要加固的区域。接下来,浆液被注入钻孔中,通常采用水泥浆、化学浆液或其他高性能注浆材料,以便填充岩石裂隙、孔洞和空隙,形成防水屏障。在注浆过程中,需要精确控制浆液的注入压力和流量,以确保浆液能够均匀地扩展并填充到所需位置,避免形成不均匀的防水层。最后,当浆液注入完成后,施工方会进行封闭处理,确保灌浆层稳定并具有长期的防渗能力。如图1所示。

在水电站工程中,帷幕灌浆法具有独特的优势,特别是在应对复杂地质条件时展现了其优越性。对于软弱围岩,传统的加固方法可能无法有效地提高其承载力和防渗性,而帷幕灌浆法通过在岩层内部注入浆液,能够有效密实岩层结构,增强其稳定性和防渗效果。同时,在断层破碎带等地质条件下,浆液的注入能够填补裂隙,形成无缝的防渗层,避免水流渗漏,确保水电站坝体的稳定性和密封性。与其他加固方法相比,帷幕灌浆法不仅施工周期较短,而且施工过程中的影响较小,能够最大程度地减少对环境和周围地质结构的破坏。

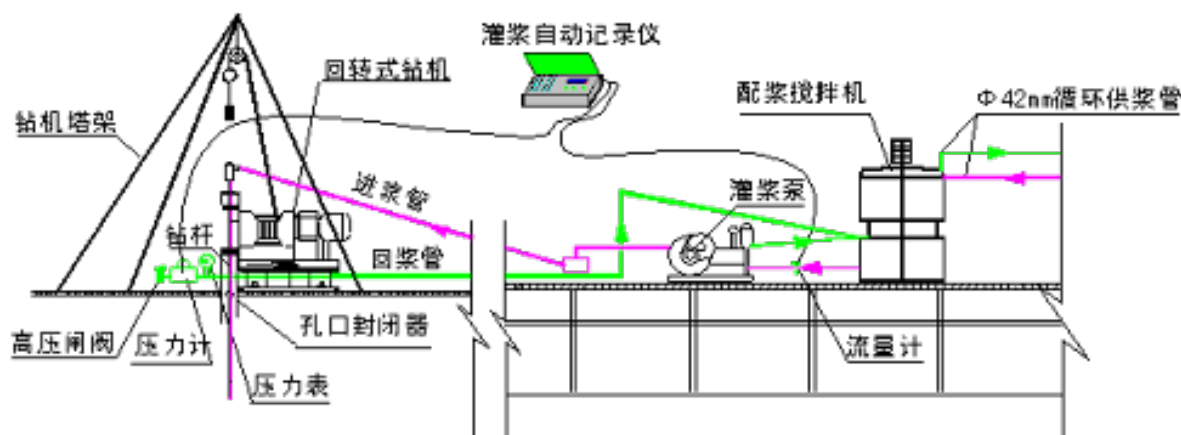


图1 帷幕灌浆法施工法示意图

然而，尽管帷幕灌浆法在水电站工程中的应用取得了显著成效，但其实施仍面临一些挑战。首先，地质条件的复杂性要求施工团队对不同地层的性质进行深入研究，以确保选用合适的浆液材料和注浆方法。不同地质环境中的水文条件、岩土性质以及裂隙发育程度都可能影响灌浆效果，因此需要通过现场勘测和实验数据来不断调整施工方案。其次，灌浆过程中的浆液控制尤为关键，过高或过低的注浆压力都可能导致防渗层的质量问题。为了确保施工效果，施工人员必须严格监控灌浆参数，并对施工过程中的异常情况进行实时调整。

三、不同地质条件下帷幕灌浆法的适应性分析

帷幕灌浆法在水电站工程中的应用依赖于对不同地质条件的适应性。在各种复杂的地质环境中，帷幕灌浆技术能通过注浆形成不透水的屏障，从而有效解决渗漏问题，保证坝体的稳定性。然而，由于地质条件的多样性，帷幕灌浆法在不同地层中的表现差异较大。因此，了解各种地质条件下帷幕灌浆法的适应性和调整方法对于提高施工效率和工程质量至关重要。软弱围岩、断层破碎带以及水丰富的地层等，都对帷幕灌浆的实施提出了不同的要求。

在软弱围岩地层中，岩石的强度较低，通常具有较大的孔隙和裂隙，这使得传统的加固和防渗方法难以奏效。而帷幕灌浆法能够通过注浆技术将水泥浆或其他特殊浆液灌注到这些裂隙和孔洞中，起到填充和加固的作用。为了确保浆液能够渗透并充分填充这些孔隙，浆液的流动性和黏度必须适当调节。通常，软弱围岩的注浆工艺要求浆液具备较好的流动性，以便在裂隙中扩展并形成密封层。这一过程要求严格的浆液配比和注浆压力控制，才能保证灌浆效果和长期的防渗能力。在软弱围岩地层的应用中，灌浆量和施工精度是关键，过量或过少的注浆都会影响防渗效果。

对于断层破碎带等复杂地质条件，帷幕灌浆法同样具有较强的适应性。断层破碎带通常存在大量的裂隙、碎石及不稳定的岩土结构，这些特点使得水流渗漏问题

尤为严重。帷幕灌浆法在这种地层中的应用，需要采用高强度的浆液，确保浆液能够填补深层裂隙并形成持久的防渗层。在此过程中，浆液的注入压力通常较高，以便浆液能够深入并封闭较深的裂隙和孔洞。此外，在断层破碎带中，由于岩层的不规则性和破碎性，浆液的均匀分布会面临更大的挑战。因此，施工人员需要通过精细的现场勘测和连续的监测，调整灌浆工艺，确保浆液能够全面覆盖和封堵所有可能的渗漏通道。

在地下水丰富的地层中，帷幕灌浆法同样展现了其独特的优势。在这种地层中，水的渗透性较强，尤其是在施工过程中可能面临水压较大的情况。为了有效阻止地下水的渗漏，帷幕灌浆法需要采用更为密实的浆液，且注浆压力和速度必须精确控制。施工过程中，如何平衡浆液的流动性与密封性，确保其在高压条件下仍能保持稳定的防渗效果，是关键挑战。注浆过程中的监控和调整尤为重要，必须根据现场水流的变化及时调整浆液的配比和注入参数。通过合理的工艺设计，帷幕灌浆法不仅能有效防止地下水的渗漏，还能增强水电站坝体的稳定性，确保工程长期运行的安全性。

帷幕灌浆法在不同地质条件下的适应性表现出较强的灵活性和可操作性。通过科学的浆液配比、精确的施工控制和持续的监测，可以在多种复杂地质环境中实现有效的防渗和加固。然而，施工的成功与否不仅依赖于技术本身的优越性，还与施工过程中的调整和管理密切相关。

四、改进型注浆工艺在特殊地层中的应用效果

在特殊地层条件下，传统的帷幕灌浆法往往无法满足复杂地质环境中的防渗需求，尤其是面对软弱围岩、断层破碎带和地下水丰富的地层时。为了提高灌浆效果和施工效率，改进型注浆工艺应运而生。这种改进型注浆工艺结合了先进的材料、精确的注浆技术和施工方法，能够在复杂地质环境中提供更强的适应性和更优的防渗效果。改进型注浆工艺通过优化浆液配方和注浆方式，不仅增强了浆液的流动性和渗透性，还能提高其在特殊地层中的密封性和持久性。

在软弱围岩等地层中，传统的灌浆工艺通常面临浆液不易渗透或填充不完全的困难。而改进型注浆工艺通过采用高性能的灌浆材料，如水泥-化学复合浆液，解决了这一问题。这些改进型浆液具有更好的流动性和渗透性，能够深入岩层的微裂缝和孔隙，形成更加均匀、坚固的防渗层。此外，在注浆过程中，改进型工艺通过精确控制浆液的注入压力、流量和注入速度，使浆液能够更均匀地扩展到整个地层，确保了防渗层的连续性和稳定性。

对于断层破碎带等复杂地层，改进型注浆工艺也展现了其卓越的效果。断层破碎带通常存在大量的裂隙和不稳定的岩土结构，普通的浆液容易通过这些裂隙渗透出去，造成灌浆效果不理想。改进型注浆工艺采用了更

高强度的浆液，并通过调整浆液的注入压力和速率，使浆液能够深入断层深处并填充所有的裂隙。这种工艺不仅能够增强防渗层的密实性，还能通过更高的注浆压力形成更强的屏障，抵抗高水压条件下的渗漏问题。

改进型注浆工艺在地下水丰富的地层中同样表现出色。面对高水压环境，浆液的流动性和密实性是影响防渗效果的关键。通过改进浆液的组成和注浆工艺，能够确保浆液在高水压下仍然能够充分填充裂隙和孔洞，形成坚固的防渗层。这种改进工艺不仅提高了浆液的抗渗透能力，还能有效减少施工中的涌水现象，缩短了施工周期。在实际应用中，改进型注浆工艺显著提升了水电站工程在复杂水文条件下的施工质量，为工程的长期稳定运行提供了技术保障。如表 1 所示。

表 1 改进型注浆工艺在不同地层中的应用效果对比

地层类型	传统灌浆工艺效果	改进型注浆工艺效果
断层破碎带	浆液易流失，防渗层不稳定	高强度浆液，均匀填充，提高密实性和稳定性
地下水丰富地层	高水压影响浆液填充效果	优化配方，增强抗水压能力，提高防渗性能

通过上述对比可以看出，改进型注浆工艺在各种特殊地层中均表现出优越的适应性和防渗性能，为水电站工程提供了更可靠的技术支持。

五、帷幕灌浆法施工技术的质量控制与风险管理

在水电站工程中，帷幕灌浆法作为一种防渗施工技术，广泛应用于复杂地质条件下的防渗加固。然而，为确保施工质量并降低风险，必须对其施工技术进行严格的质量控制和风险管理。施工中的质量控制主要体现在灌浆材料、施工工艺、灌浆压力和灌浆量等方面。选择合适的浆液材料是质量控制的关键，水泥浆、化学浆液等材料应根据不同地质条件进行科学选择，以确保其具有良好的渗透性和抗渗能力。在施工过程中，注浆压力和流量的控制至关重要，过高或过低的注浆压力都会影响浆液的均匀分布，从而导致防渗层的质量不稳定。因此，施工人员必须通过监测设备实时跟踪这些参数，确保浆液能够在裂隙中均匀扩展并形成坚固的防渗屏障。

施工过程中的风险管理也至关重要。帷幕灌浆法施工面临的主要风险包括地质条件的变化、施工设备故障、施工人员操作不当以及环境变化等。为降低这些风险，必须在施工前进行详细的地质勘察和风险评估，明确不同地层的特点，选择合适的施工方法。在施工过程中，要加强施工现场的监控，确保施工人员严格按照标准操作，避免因操作失误造成浆液浪费或防渗效果不佳。同时，定期检查施工设备，确保其运行正常，防止设备故障导致施工中断。此外，施工期间还应考虑天气和地下水变化的影响，及时调整施工计划，避免外部环境因素对施工质量造成影响。

有效的质量控制和风险管理可以大大提高帷幕灌浆法的施工效果，降低工程的风险。在特殊地层条件下，

质量控制和风险管理的有效实施，不仅能够确保水电站工程的安全性，还能够提高施工效率，缩短工期，降低施工成本。因此，施工单位应不断加强技术人员的培训，提升操作技能，同时引入先进的监控和检测技术，确保施工过程中每一个环节都能高效、安全地完成，最终实现水电站工程的高质量、低风险建设。

结语

帷幕灌浆法作为水电站工程中应对特殊地层的关键技术，已在复杂地质条件下取得了显著成效。通过改进注浆工艺和加强质量控制，能够有效提升防渗效果，确保坝体的稳定性和安全性。尽管面临各种地质挑战，科学的技术应用和严格的风险管理可以大大减少施工中的不确定性，确保工程的顺利进行。随着技术的不断发展，帷幕灌浆法将在水电站建设中发挥更大的作用，为复杂地层下的防渗问题提供更加可靠的解决方案。

参考文献

- [1] 唐柏林, 吴乃文. 桐子林水电站大坝基础帷幕灌浆工程项目管理措施 [J]. 云南水力发电, 2020, 36 (05): 197-200.
- [2]. 国内高难度坝基深厚覆盖层帷幕补强灌浆工程开工——泸定水电站河床段补强帷幕灌浆 [J]. 云南水力发电, 2020, 36 (08): 95.
- [3] 王丽红. 基于帷幕灌浆法的水电站工程特殊地层施工技术研究 [J]. 三峡大学学报 (自然科学版), 2020, 42 (05): 24-27.
- [4] 杨再志, 张会员, 刘军, 杨柳, 贺永锋. 乌弄龙水电站大坝帷幕灌浆工程施工质量管理与实践 [J]. 云南水力发电, 2021, 37 (02): 75-78.
- [5] 刘兴华, 白朝伟, 乔白. 莲花台水电站工程坝基帷幕灌浆设计 [J]. 地下水, 2022, 44 (01): 291-292.