地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中的扩散机理

叶 红

四川宏雨建筑工程有限公司 四川成都

【摘要】地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中展示出独特的优势，能够有效提升岩溶地基的承载力与稳定性。本文通过研究地聚合物注浆材料在岩溶地基中的扩散机理，揭示了其在岩溶层间的渗透与硬化过程。通过物理与化学反应的协同作用，地聚合物能够快速填充岩溶孔隙，改善土体的力学性能。地聚合物的化学成分、注浆压力、和施工工艺等因素对扩散效果有显著影响。进一步优化注浆材料和施工方法将提升岩溶地基的处理效果。本文的研究为岩溶地基处理提供了新的思路和技术路径。

【关键词】地聚合物；注浆材料；岩溶地基；扩散机理；土体加固

【收稿日期】2025 年 6 月 11 日 【出刊日期】2025 年 7 月 10 日 【DOI】10.12208/j.jer.20250310

Diffusion mechanism of geopolymer grouting material in karst foundation treatment

Hong Ye

Sichuan Hongyu Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu, Sichuan

【**Abstract**】Geopolymer grouting material exhibits unique advantages in karst foundation treatment, effectively improving the bearing capacity and stability of karst foundations. This paper explores the diffusion mechanism of geopolymer grouting material in karst foundations, revealing its infiltration and hardening processes between karst layers. Through the synergistic effect of physical and chemical reactions, geopolymers can quickly fill karst pores and enhance the mechanical properties of soil. Factors such as the chemical composition of geopolymers, grouting pressure, and construction technology have a significant impact on the diffusion effect. Further optimization of grouting materials and construction methods will improve the treatment effect of karst foundations. The research in this paper provides new ideas and technical paths for karst foundation treatment.

【**Keywords**】Geopolymer; Grouting material; Karst foundation; Diffusion mechanism; Soil reinforcement

引言

岩溶地基是工程建设中的一大挑战，特别是在深基坑、桥梁等大型基础设施建设中，岩溶地基的稳定性直接影响到结构的安全性与耐久性。传统的地基处理方法，如水泥注浆，往往存在材料强度不足、施工难度大等问题，难以满足高要求的工程需求。地聚合物注浆材料作为一种新型的土体加固材料，具有较强的抗渗性和高强度特性，近年来被广泛应用于岩溶地基处理中。地聚合物材料在岩溶地基中的扩散过程影响着其最终的加固效果。为了深入理解这一过程，本研究围绕地聚合物注浆材料的扩散机理展开，通过实验与理论分析，探讨地聚合物在岩溶环境中的渗透特性及其影响因素。研究结果有助于提高岩溶地基处理的效果，并推动地聚合物材料的应用与发展。

1 地聚合物注浆材料的物理化学特性及其对岩溶地基的适应性

地聚合物注浆材料作为一种新型的土体加固材料，具有独特的物理化学特性，能够有效改善岩溶地基的承载力与稳定性。地聚合物的主要成分为铝硅酸盐矿物质，在适当条件下，通过化学反应生成具有高强度、低渗透性的固化体。其显著的物理化学特性包括优异的抗压强度、抗渗性以及耐高温、耐酸碱等能力。这些特性使得地聚合物材料在处理岩溶地基时，能够快速填充岩溶孔隙，改善土体的力学性能。与传统水泥注浆相比，地聚合物注浆材料具有更高的抗渗性和环境友好性，尤其在需要较长时间稳定性的复杂岩溶地基中，表现出更为明显的优势。地聚合物材料的固化过程通过化学反应生成结晶结构，从而增强了其与岩土层的粘结力，显著提升了其在岩溶地基处理中的应用效果。

地聚合物的化学反应性决定了它在岩溶地基中的

适应性。岩溶地基往往具有复杂的孔隙结构，地下水流动较为复杂，这对注浆材料的扩散和固化效果提出了较高要求。地聚合物材料的反应机理能够有效适应这一环境[1]。通过对地聚合物注浆液的调配，能够在岩溶地基中形成强有力的胶结物质，防止水分渗透，减少水流的影响。这种材料不仅能够在多孔的岩土层中快速扩散，还能够迅速与土体发生化学反应，生成具有强大粘结力的凝胶体，形成一种相对稳定的加固效果。地聚合物注浆材料的适应性还表现为其良好的环境适应性，特别是在含水量高、孔隙复杂的岩溶环境中，地聚合物能够在较短时间内快速反应并固化，提高地基处理的效率和稳定性。

地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中的适应性与其施工工艺密切相关。合理的施工工艺能够最大限度地发挥地聚合物材料的优越性能。通常情况下，施工过程中的注浆压力、注浆速率和材料的配比等因素对地聚合物的扩散效果具有重要影响。注浆材料在注入岩溶地基时，需保证其足够的流动性和渗透性，以确保能够进入较深层次的空隙进行有效加固。在岩溶地基处理过程中，施工工艺的优化和地聚合物配方的合理选择至关重要。地聚合物注浆材料的良好适应性，使其在岩溶地基加固过程中逐渐成为一种理想的选择。

2 岩溶地基中地聚合物注浆材料的扩散机理分析

在岩溶地基的处理过程中，地聚合物注浆材料的扩散机理直接决定了其加固效果。岩溶地基通常存在着大量的裂隙和空洞结构，地下水的流动性和复杂的岩土特性使得注浆材料的扩散变得更为复杂。地聚合物注浆材料在注入岩溶地基后，其扩散过程包括了液态材料通过孔隙和裂隙的渗透、与土体的化学反应及最终的凝固过程。这一过程中，扩散的效率受到材料粘度、注浆压力、土体类型、孔隙结构及地下水流速等因素的影响。地聚合物注浆液具有较好的流动性，可以在较高的注浆压力下，迅速进入岩溶地基中的裂隙和空洞。地聚合物液体中的化学成分与土壤矿物质发生化学反应，形成凝胶体，这一过程显著提高了土体的强度和稳定性。

地聚合物的扩散机理在岩溶地基中的应用需要考虑到岩土层的异质性。不同类型的岩石和土壤其孔隙结构和流体渗透性各异，这就要求地聚合物注浆材料在扩散过程中能够适应不同的环境条件。扩散机理的研究表明，地聚合物注浆材料的扩散不仅仅是物理渗透的过程，还包括了与岩土层化学成分的相互作用。土体中的矿物质与地聚合物中的活性成分发生反应，生成的产物在土体中形成稳定的化学结构，进一步增强了注浆材料的抗压和抗渗性能[2]。这一过程使得地聚合物在岩溶地基中的扩散效果优于传统的水泥注浆材料，尤其在处理复杂岩土层时，能够实现较为均匀的固化效果。

地聚合物在岩溶地基中的扩散还受到注浆工艺的影响。通过合理控制注浆液的配比、注浆压力和注浆速率，可以有效控制地聚合物材料的扩散范围和固化速度。在实际施工中，采用高压注浆技术，可以将地聚合物材料充分注入岩溶地基的深层空隙，提高其加固效果。通过优化施工流程，减少地下水流动的干扰，可以确保地聚合物注浆材料的充分反应和固化。这些因素共同作用下，地聚合物注浆材料能够在岩溶地基中实现均匀的扩散，进一步提高地基的承载力和稳定性。

3 影响地聚合物扩散效果的主要因素及优化策略

地聚合物注浆材料在岩溶地基中的扩散效果受到多种因素的影响，其中注浆液的配比、注浆压力、注浆速率、土体类型及孔隙结构等因素尤为重要。地聚合物的扩散效果与注浆液的流变性能密切相关。流变性较差的注浆液往往无法顺利渗透到岩溶地基的深层孔隙中，导致加固效果不理想。控制地聚合物注浆液的配比，调整其粘度和流动性，是提高扩散效果的关键。适当的注浆液配比能够确保其具有良好的流动性和渗透性，从而实现有效的扩散。

注浆压力和注浆速率对地聚合物的扩散效果有重要影响。较高的注浆压力可以促进地聚合物注浆液快速渗透到岩溶地基的深层空隙中，而注浆速率的控制则有助于保证注浆材料的均匀分布。过快的注浆速率可能导致注浆材料在岩溶地基中未能充分反应和固化，从而影响其加固效果。在实际应用中，需要根据不同地基条件合理调整注浆压力和注浆速率，以达到最佳的扩散效果。通过优化这些工艺参数，可以显著提高地聚合物注浆材料的扩散效果，使其更好地适应岩溶地基的复杂环境。

在实际施工中，岩土层的异质性对地聚合物扩散效果的影响至关重要。不同岩土层的孔隙结构、矿物成分和水流条件存在显著差异，这直接影响地聚合物材料的渗透性、扩散速度以及与土体的反应性。为了确保地聚合物注浆材料能够在复杂的岩土环境中发挥最大效能，必须进行全面的地质勘察，评估岩土层的物理性质和化学特征，从而选择最适合的注浆材料配方[3-7]。施工过程中应通过实时监测注浆液的扩散情况，及时调整注浆压力、速率及材料配比，以适应不同地层的变

化。动态监控不仅能够发现潜在问题，还能根据现场条件灵活调整施工方案，从而确保注浆材料的均匀分布和最佳加固效果。

4 地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中的应用效果与前景

地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中的应用效果逐渐得到广泛认可。随着地聚合物材料的技术不断发展，其在岩溶地基中的应用优势逐步显现。地聚合物注浆材料在提高岩溶地基的承载力方面表现出了显著优势。通过合理的注浆工艺，地聚合物能够快速进入岩溶地基的裂隙和空洞，并与土体发生化学反应，形成具有较高强度的固化体，从而显著提高地基的承载能力。与传统的水泥注浆相比，地聚合物注浆材料能够提供更长时间的稳定性，有效避免了水泥材料的老化和开裂问题。地聚合物注浆材料的抗渗性较强，能够有效防止地下水渗透，提高地基的稳定性。

地聚合物注浆材料在环保方面的优势也逐渐得到认可。传统的水泥注浆材料在生产过程中会产生大量的二氧化碳排放，对环境造成一定影响。而地聚合物材料的生产过程更加环保，其主要成分来自工业废料，如矿渣和粉煤灰等，因此在生产过程中能够有效减少资源浪费和环境污染。这一环保特性使得地聚合物注浆材料成为可持续发展的理想选择，特别是在一些生态敏感区域的工程项目中，地聚合物材料的应用具有重要意义[8]。随着研究的深入，地聚合物注浆材料的应用前景更加广阔。未来，随着施工工艺的不断优化和地聚合物配方的改进，地聚合物注浆材料将在更多复杂地质条件下发挥重要作用，特别是在岩溶地基、湿陷性黄土等特殊土质的处理过程中，地聚合物材料将提供更多的技术解决方案。预计随着技术的成熟和成本的降低，地聚合物注浆材料将在基础设施建设中得到更广泛的应用，成为岩土工程领域的重要材料之一。

5 结语

地聚合物注浆材料在岩溶地基处理中的应用展现了其显著的优势，尤其在提高地基承载力、稳定性及抗渗性方面表现突出。通过对其物理化学特性、扩散机理及施工工艺的深入研究，地聚合物材料逐渐成为解决岩溶地基问题的理想选择。尽管目前仍面临一些挑战，如施工技术的优化及材料成本控制，但随着技术的不断发展，地聚合物注浆材料的应用前景广阔。未来，随着地聚合物技术的成熟和应用领域的拓展，预计将在更多复杂地质环境下发挥重要作用，为岩土工程提供更加可靠和环保的解决方案。

参考文献

[1] 周来,茅恒旗,叶涛,等.碱激发地聚合物原位治理酸性矿井水微观反应机理[J/OL].中国矿业大学学报,1-9[2025-07-15].

[2] 姜澳,李建强,段小明,等.碱-水热活化盾构渣土制备单组分地聚合物：活化机理与抗压性能研究[J].四川环境,2025,44(03):156-162.

[3] 胡晓宇,王晓东,朱世彬,等.煅烧时间对煤矸石基注浆材料中胶凝组分活性的影响机制[J].煤矿安全,2025,56(05):153-158.

[4] 王家乐,王学安,冯博,等.神东矿区煤矸石胶凝材料配比优化及力学性能研究[J].煤炭加工与综合利用,2025,(03):99-105.

[5] 孟志鹏,胡建林,高通通,等.粉煤灰-矿渣基地聚合物注浆材料性能及机理研究[J].河北建筑工程学院学报,2024,42(04):64-73.

[6] 何杏,刘凤菁.聚合物注浆料配比设计与性能试验研究[J].交通世界,2024,(34):51-54.

[7] 张森龙,刘杰胜,魏靖,等.地聚合物注浆材料流动性能与强度影响因素研究[J].湖北工程学院学报,2024,44(06):93-98.

[8] 李辉,罗曾严,韩孟君,等.偏高岭土基地质聚合物注浆材料屏障性能研究[J/OL].应用基础与工程科学学报,1-14[2025-07-15].

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/