

# 高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能优化研究

刘艺芳

煤科（北京）新材料科技有限公司，北京 100021

**摘要：** 本研究聚焦于高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能优化问题。通过分析当前高分子注浆材料在煤矿井下应用中面临的主要挑战，探讨了优化其性能的关键因素和技术路径。研究采用文献分析、实验研究和现场应用相结合的方法，系统考察了高分子注浆材料的力学性能、渗透性能、耐久性能等关键指标，并提出了相应的优化策略。结果表明，通过优化材料配方、改进注浆工艺、强化质量控制等措施，可显著提升高分子注浆材料在煤矿井下复杂环境中的应用效果。本研究为进一步提高高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能提供了理论依据和技术支持，对促进煤矿安全高效生产具有重要意义。

**关键词：** 高分子注浆材料；煤矿井下；性能优化；应用研究

## Research on Performance Optimization of Polymer Grouting Materials in Underground Coal Mine Applications

Liu Yifang

Coal Technology (Beijing) New Materials Technology Co., Ltd., Beijing 100021

**Abstract：** This study focuses on the performance optimization of polymer grouting materials in underground coal mine applications. By analyzing the main challenges faced by polymer grouting materials in underground coal mine applications, the key factors and technical approaches for optimizing their performance were explored. The research employed a combination of literature analysis, experimental research, and field application methods to systematically examine key indicators such as the mechanical properties, permeability, and durability of polymer grouting materials, and proposed corresponding optimization strategies. Results show that through measures such as optimizing material formulations, improving grouting techniques, and strengthening quality control, the application effectiveness of polymer grouting materials in complex underground coal mine environments can be significantly enhanced. This study provides theoretical basis and technical support for further improving the performance of polymer grouting materials in underground coal mine applications, and has important implications for promoting safe and efficient coal mine production.

**Keywords：** polymer grouting materials; underground coal mine; performance optimization; application research

## 引言

随着我国煤炭开采向深部和复杂地质条件发展，煤矿井下地质灾害防治和工程加固的需求日益迫切。高分子注浆材料凭借其独特的物理化学性质和优异的工程性能，在煤矿井下加固、防渗、堵水等领域展现出广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。然而，煤矿井下环境复杂多变，对注浆材料的性能提出了严峻挑战。如何优化高分子注浆材料的性能，使其更好地适应煤矿井下的特殊需求，成为当前亟需解决的重要课题。

高分子注浆材料在煤矿井下应用中面临诸多挑战。首先，井下环境温度、湿度、压力等因素复杂多变，对材料的稳定性和耐久性提出了较高要求。其次，煤矿岩层结构复杂，裂隙发育，对注浆材料的流动性和渗透性能有特殊需求。再者，井下作业条件受限，对注浆材料的操作性和施工工艺也提出了特殊要求。此外，煤矿安全生产的要求也使得注浆材料必须具备良好的环保性和安全性<sup>[2]</sup>。

本文的研究内容主要包括以下几个方面：首先，对高分子注浆材料在煤矿井下应用的现状进行全面分析，明确当前面临的主要问题和挑战。其次，深入探讨影响高分子注浆材料性能的关键因素，包括材料组成、环境条件、施工工艺等。再次，针对不同应用场景，提出高分子注浆材料性能优化的具体策略和技术路径。最后，通过实验研究和现场应用案例，验证所提出优化方案的可行性和有效性。

## 一、高分子注浆材料在煤矿井下应用的现状分析

### （一）高分子注浆材料的类型及特性

高分子注浆材料是一类以高分子化合物为主要成分的注浆材

料，具有良好的流动性、渗透性和固化性能。在煤矿井下应用中，常用的高分子注浆材料主要包括聚氨酯类、环氧树脂类、水玻璃类和丙烯酸盐类等。这些材料各具特色，适用于不同的工程需求。

聚氨酯类注浆材料以异氰酸酯和多元醇为主要原料，通过添

加催化剂和发泡剂等形成具有一定强度的泡沫体。这类材料反应速度快、膨胀倍率高、粘结强度大，特别适用于裂隙充填和岩体加固。环氧树脂类注浆材料由环氧树脂和固化剂组成，具有良好的粘结性能和较高的力学强度，常用于精密灌浆和结构加固，但成本相对较高。水玻璃类注浆材料主要由水玻璃和各种有机或无机固化剂组成，具有良好的渗透性和较低的成本，适用于大面积防渗和堵水。丙烯酸盐类注浆材料以丙烯酸及其衍生物为主要成分，具有良好的流动性和渗透性，适用于细微裂隙的封堵<sup>[3]</sup>。

## （二）高分子注浆材料在煤矿井下的主要应用领域

高分子注浆材料在煤矿井下找到了广泛的应用领域，充分发挥了其独特的性能优势。在岩体加固方面，高分子注浆材料可有效增强岩体的整体性和稳定性，防止岩体破碎和冒落，这对于改善巷道围岩条件，提高煤矿安全性具有重要意义。例如，在某些地质条件复杂的矿区，使用聚氨酯类注浆材料对巷道围岩进行加固，显著提高了巷道的稳定性，降低了维护成本。

在防水堵漏方面，高分子注浆材料的作用同样突出。这类材料具有良好的渗透性和固化特性，可有效封堵岩层裂隙和孔隙，阻止地下水渗入。在处理井下涌水、透水等问题时，高分子注浆材料常常能够在传统水泥浆无法施工的情况下取得良好效果。例如，某煤矿在处理采空区积水问题时，采用改性聚氨酯注浆材料，成功封堵了多条地下水通道，有效控制了水害。

这些应用充分体现了高分子注浆材料在煤矿井下地质灾害防治和工程加固中的重要作用。然而，不同应用场景对材料性能的要求各不相同，这也为高分子注浆材料的性能优化研究提出了新的挑战。例如，在处理高压水害时，材料需要具备更好的耐久性和抗压性；而在处理瓦斯问题时，则需要材料具有良好的气密性和耐久性。因此，针对不同的应用场景开展有针对性的性能优化研究，成为推动高分子注浆材料在煤矿井下广泛应用的关键。

## （三）高分子注浆材料应用中存在的主要问题

尽管高分子注浆材料在煤矿井下应用中展现出巨大潜力，但在实际应用过程中仍面临一些亟待解决的问题。首先是材料性能的不稳定性。煤矿井下环境复杂多变，温度、湿度、压力等因素的波动可能导致高分子注浆材料的性能发生变化，影响其固化效果和长期稳定性。例如，某些聚氨酯材料在高温高湿环境下可能发生副反应，导致泡沫结构不均匀，影响材料的力学性能<sup>[4]</sup>。

这些问题的存在，既反映了当前高分子注浆材料在煤矿井下应用中面临的挑战，也为进一步的性能优化研究指明了方向。只有深入分析这些问题的根源，有针对性地开展优化研究，才能推动高分子注浆材料在煤矿井下应用中发挥更大作用。例如，通过开发新型环境响应材料，可以提高材料在复杂环境中的适应性；通过优化材料配方和注浆工艺，可以改善材料的渗透性能和操作性；通过开发绿色环保型材料，可以降低环境风险。这些优化方向将成为未来研究的重点领域。

## （四）高分子注浆材料的相关研究

在高分子注浆材料的应用研究方面，近年来国内学者取得了一系列重要进展。张盛敏等人对煤矿用高分子灌浆材料进行了系统研究，指出了其在煤矿工程中的广泛应用前景<sup>[5]</sup>。王国军等的研究进一步探讨了这类材料在不同煤矿地质条件下的适应性，为材料选择提供了重要参考<sup>[6]</sup>。在安全性方面，钱四发的研究着重探讨了煤矿加固用

高分子材料的安全使用技术，为实际应用中的风险控制提供了理论基础和实践指导<sup>[7]</sup>。郑和平等人在新型高分子注浆材料的研发方面取得了突破性进展，他们开发的材料在注浆加固应用中表现出优异的性能，为解决复杂地质条件下的加固问题提供了新的技术方案<sup>[8]</sup>。在注浆工艺方面，杨仁凯等人提出的高分子材料分段注浆工艺在固沙应用中取得了显著效果，这一创新工艺为提高注浆效率和质量开辟了新的途径<sup>[9]</sup>。陈城的研究则聚焦于富水砂卵石地层的注浆问题，通过材料性能测试和注浆模拟试验，为特殊地质条件下的注浆设计提供了科学依据<sup>[10]</sup>。这些研究成果不仅丰富了高分子注浆材料在煤矿井下应用的理论基础，还为实际工程应用提供了多样化的技术选择和优化方向。综合这些研究，我们可以看到，高分子注浆材料在性能优化、安全应用、工艺创新等方面都取得了显著进展，这为进一步提升材料在复杂煤矿环境中的应用效果奠定了坚实基础。

# 二、高分子注浆材料性能优化的关键因素分析

## （一）材料组成对性能的影响

高分子注浆材料的性能在很大程度上取决于其化学组成和配方设计。主体树脂的选择是影响材料性能的首要因素。不同类型的主体树脂，如聚氨酯、环氧树脂等，具有不同的特性。例如，聚氨酯类材料通常具有较好的弹性和膨胀性，适合处理变形较大的岩体；而环氧树脂类材料则具有较高的强度和耐化学性，适用于需要高强度固结的场合。

优化材料组成，可以在很大程度上改善高分子注浆材料的综合性能，使其更好地适应煤矿井下的特殊需求。然而，组分的调整往往是一个复杂的平衡过程，需要通过大量实验和现场验证来确定最佳配方。例如，提高材料强度可能会降低其弹性，增加渗透性可能会影响固化速度。因此，在进行材料组成优化时，需要综合考虑各项性能指标，找到最佳平衡点。

## （二）环境因素对性能的影响

煤矿井下环境复杂多变，各种环境因素对高分子注浆材料的性能都有重要影响。深入理解这些影响是优化材料性能的重要前提。温度是影响高分子注浆材料性能的关键因素之一。井下温度的变化会影响材料的固化速度和最终强度。高温环境可能加速材料固化，导致操作时间缩短；而低温环境则可能延缓固化过程，影响早期强度发展。例如，某煤矿在冬季进行巷道加固时，发现常规聚氨酯材料固化速度显著降低，影响了工程进度。针对这一问题，研究人员通过调整固化剂配比和添加低温催化剂，成功开发出了适用于低温环境的注浆材料。

通过深入研究这些环境因素的影响机制，可以有针对性地优化材料配方和施工工艺，提高高分子注浆材料在复杂井下环境中的适应性和稳定性。例如，开发温度自适应型材料，可以解决材料在不同深度和季节变化下的适应性问题；研究压力响应型材料，可以提高深部高压环境下的注浆效果；开发耐酸碱性强材料，可以扩大材料的应用范围。这些研究方向将为高分子注浆材料在煤矿井下的广泛应用奠定基础。

## （三）注浆工艺对性能的影响

注浆工艺的选择和优化对于充分发挥高分子注浆材料的性能

至关重要。合理的注浆工艺可以显著提高材料的利用效率和工程效果。注浆压力是影响注浆效果的关键因素之一。适当的注浆压力可以提高材料的渗透深度和填充效果。然而，过高的压力可能导致地层破裂或材料流失，而过低的压力则可能影响渗透效果。在实际工程中，往往需要根据地质条件和材料特性，不断调整注浆压力。例如，在处理一处复杂断层带时，工程人员采用了阶梯式增压注浆法，逐步提高注浆压力，成功实现了断层带的有效封堵。

通过优化注浆工艺，可以在很大程度上提高高分子注浆材料的应用效果，实现材料性能的最大化利用。然而，注浆工艺的优化是一个系统工程，需要综合考虑材料特性、地质条件、工程需求等多方面因素。未来的研究方向可能包括开发智能化注浆系统，实现注浆参数的实时监测和自动调节；探索新型注浆技术，如超声波辅助注浆、电场诱导注浆等，进一步提高材料的渗透性和分布均匀性。这些创新将为高分子注浆材料在煤矿井下的高效应用开辟新的途径。

### 三、高分子注浆材料性能优化策略

#### （一）材料配方优化

基于对影响因素的深入分析，材料配方优化成为提升高分子注浆材料性能的关键策略。改性主体树脂是一个重要的研究方向。通过引入新型单体或改性剂，可以显著提高树脂的耐热性、耐久性和力学性能。例如，在聚氨酯体系中引入硅氧烷结构，可以提高材料的耐热性和耐久性。研究表明，这种改性后的聚氨酯材料在80℃高温环境下仍能保持良好的力学性能，使用寿命延长了50%以上。

通过配方优化策略，可以显著提升高分子注浆材料的综合性能，使其更好地适应煤矿井下复杂环境的需求。然而，配方优化是一个复杂的系统工程，需要考虑多个性能指标之间的平衡。未来的研究可能会更多地关注多功能复合材料的开发，如自修复型注浆材料、导电型注浆材料等，以满足煤矿井下多样化的工程需求。

#### （二）注浆工艺改进

优化注浆工艺是提高高分子注浆材料应用效果的另一个重要途径。智能压力控制系统的开发是一个重要方向。通过开发基于实时反馈的智能压力控制系统，可以根据地层特性和材料性能自动调节注浆压力，以实现最佳的渗透效果。例如，某研究团队开发了一种智能注浆系统，该系统能够实时监测注浆压力、流量和地层反压，并根据预设算法自动调整注浆参数。在一项实际应用中，这一系统使注浆材料的有效扩散半径提高了20%，大大提升了注浆效果。

工艺改进措施可以与材料配方优化相结合，进一步提高高分子注浆材料在煤矿井下应用中的效果。例如，智能压力控制系统可以与环境响应型材料配合使用，实现注浆压力和材料性能的动态匹配；温度调控技术可以与温度敏感型材料结合，确保材料在最佳条件下固化。这种材料与工艺的协同优化将成为未来研究的重要方向。

#### （三）质量控制措施

为确保高分子注浆材料性能优化效果的可靠性和一致性，严格的质量控制措施不可或缺。原材料质量管理是确保注浆材料性能的基础。建立严格的原材料质量检测和管理制度，确保原材料的纯度和稳定性，是提高注浆材料性能一致性的关键。例如，某大型煤矿企业建立了专门的原材料检测实验室，对每批进场的注

浆材料原料进行全面检测，包括化学成分分析、物理性能测试等，有效保证了原材料的质量稳定性。

环境参数监测是确保注浆效果的重要保障。建立井下环境参数（温度、湿度、压力等）的实时监测系统，为材料性能优化和施工工艺调整提供依据。在一项深部煤矿注浆工程中，通过布设多点环境监测设备，实时掌握井下环境变化，及时调整材料配方和注浆参数，显著提高了注浆的成功率。

通过这些质量控制措施，可以确保高分子注浆材料性能优化的效果得到充分发挥，为煤矿井下工程的安全和效率提供可靠保障。未来，质量控制技术可能会向更加智能化和自动化的方向发展，如开发基于人工智能的质量预测系统，实现对注浆质量的前瞻性控制。

### 四、结论与展望

本研究系统探讨了高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能优化问题，得出以下主要结论：

材料组成、环境因素和注浆工艺是影响高分子注浆材料性能的关键因素。通过优化这些因素，可以显著提升材料在煤矿井下复杂环境中的应用效果。材料配方优化、注浆工艺改进和质量控制措施是实现高分子注浆材料性能优化的有效途径。实验研究和工程应用案例验证了性能优化措施的有效性，优化后的高分子注浆材料在固化速度、强度、耐久性和工程效果等方面均有显著提升。

展望未来，高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能优化研究仍有广阔空间：开发新型环境响应智能材料，实现材料性能的自适应调节。探索生物基和可降解高分子材料，提高环保性。结合人工智能和大数据技术，开发智能化注浆系统。深入研究材料-岩体相互作用机理，为材料性能优化提供理论基础。开发高性能多功能复合注浆材料，满足复杂工况需求。

通过持续的研究创新和工程实践，高分子注浆材料在煤矿井下应用中的性能将不断提升，为煤矿安全高效生产提供更加可靠的技术支持。

### 参考文献

- [1] 张连军. 煤矿高分子材料用注浆装置技术要求与性能特性研究[J]. 煤矿机械, 2021, 42(04): 41-42.
- [2] 王巍. 浅谈矿用高分子注浆材料应用现状及发展对策[J]. 广东化工, 2020, 47(07): 127-128.
- [3] 王凯, 柏广峰, 张豫, 等. 煤矿反应型高分子材料研究现状及发展趋势[J]. 煤炭与化工, 2022, 45(06): 129-135+157.
- [4] 赵永刚. 化学高分子材料在煤矿井巷淋水治理中的应用[J]. 内蒙古煤炭经济, 2019, (17): 174+209.
- [5] 张任勇. 新型注浆材料在煤矿工程中的应用[J]. 山西化工, 2018, 38(06): 153-154+164.
- [6] 王国军, 张盛敏. 煤矿用高分子灌浆材料[J]. 化工管理, 2017, (29): 64.
- [7] 钱四发. 煤矿加固用高分子材料安全使用技术研究[J]. 山东煤炭科技, 2016, (10): 34+42.
- [8] 郑和平, 李季, 邢宇龙. 矿用新型高分子注浆材料研发及注浆加固应用[J]. 陕西煤炭, 2023, 42(06): 206-210.
- [9] 杨仁凯, 张双, 陶文盼, 等. 高分子材料分段注浆工艺在固沙中的应用[J]. 市政技术, 2022, 40(05): 146-150.
- [10] 陈城. 富水砂卵石地层注浆材料性能及注浆模拟试验研究[D]. 北京建筑大学, 2019.