

深部低渗煤层注水增效技术与材料研究现状及挑战

王 刚^{1,2}, 王恩茂², 程卫民², 倪冠华², 刘义鑫², 李 钊²

(1. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要:煤层注水在矿井粉尘源头治理、瓦斯防治及冲击地压防控中具有重要作用,但深部煤层存在高应力、低渗透等特点,导致注水效率和防灾效果不佳,注水增效技术与材料的重要性进一步凸显。本研究收集了近年来煤层注水增效技术与材料方面的主要研究成果,从媒体水力造缝增渗技术、注水减阻技术以及润湿强化材料等方面,系统梳理了煤层注水增效方面的研究进展。在媒体水力造缝增渗技术方面,通过定向水力压裂、高压水射流割缝以及水力冲孔等技术对煤层裂缝进行扩展控制,结合数值模拟与现场监测优化缝网形态,构建多尺度裂缝网络以增强煤层的渗透性,扩大注水润湿范围;注水减阻技术方面,通过聚合物减阻材料、表面活性剂减阻材料及复合减阻材料,减小液体与孔壁之间的阻力,扩大煤层润湿的范围,降低注水压力;在润湿强化材料研发方面,基于煤体表面润湿性差异,研发了表面活性剂及复配体系等新型材料,通过降低液体表面张力,增加煤层的渗润效果。然而,现有注水技术仍存在工艺参数不明确、设备集成化与智能化水平低、施工作业对空间环境要求高、材料的经济性与环保性不足等问题,均需在今后的研究中进一步完善。本研究可为未来低渗煤层注水增效技术及材料的开发与应用提供参考。

关键词:低渗煤层;注水增渗;裂缝网改造;减阻技术;润湿强化材料

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Research progress and challenges of water injection and efficiency enhancement technology and materials for deep low-permeability coal seams in China

WANG Gang^{1,2}, WANG Enmao², CHENG Weimin², NI Guanhua², LIU Yixin², LI Zhao²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Coal seam water injection plays an important role in mine dust source control, gas control and rock burst prevention and control. However, the high stress and low permeability of deep coal seams lead to poor water injection efficiency and disaster prevention effect, which further highlight the importance of water injection and efficiency enhancement technology and materials. By collecting major research results on water injection and efficiency enhancement technology and materials, this paper systematically sorts out the research progress of coal seam water injection and efficiency enhancement technology from the aspects of hydraulic permeability enhancement technology of fracture network reconstruction, water injection drag reduction technology, and wetting strengthening materials. In terms of increasing the permeability of coal seam hydraulic fracture network reconstruction, the technologies of directional hydraulic fracturing, high pressure water jet slotting and hydraulic punching are used to control the expansion of fractures, numerical simulation and field monitoring are integrated to optimize the fracture

收稿日期:2024-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(52174194)

作者简介:王 刚(1984—),男,山东临沂人,教授,博士生导师,主要从事煤炭岩体微裂隙结构渗流理论与防灾工程方面的研究。E-mail:gang.wang@sdust.edu.cn

network shape, and multi-scale fracture networks are constructed to enhance the permeability of coal seams and expand the wetting range of water injection. In terms of water injection drag reduction, polymer drag reduction materials, surfactant drag reduction materials and composite drag reduction materials are developed to reduce the resistance between liquid and pore wall, improve the wetting range of coal seams, and reduce the pressure of water injection. In terms of the research and development of wetting strengthening materials, new materials such as surfactant and compound system were developed on the basis of the differences of wettability of coal surface to enhance the liquid infiltration effect by reducing the surface tension of liquid. However, the existing water injection technology has such problems as unclear process parameters, low levels of equipment integration and intelligence, high requirements for spatial environment in construction operations, and insufficient material economy and environmental protection, all of which need to be further improved in future research. This study can provide reference for the future development and application of water injection and permeability enhancement technology and materials for low-permeability coal seams.

Key words: low permeability coal seam; water injection for permeability enhancement; fracture network reconstruction; drag reduction technology; wetting enhancement material

随着煤炭开采的机械化、大规模集约生产水平的不断提高,浅部煤层资源已被大规模开采,煤矿开采向深部发展。早在20世纪80年代,波兰、德国、英国、日本和法国的煤矿开采深度已达1 000 m以上^[1]。我国煤矿平均开采深度接近600 m,部分矿井最深可达1 500 m,并仍以每年10~25 m的速度向深部延伸,现阶段东部矿区几乎全部进入深层开采^[2]。

深部煤层与浅部煤层相比,具有高地应力、高地温、高瓦斯、高冲击地压和高孔隙流体压力等典型特征。这些“高”特征不仅加剧了煤岩体结构破坏与变形的不确定性,也使灾害防控更加困难。煤层注水技术作为一种可同时抑制粉尘、瓦斯与冲击地压等灾害的综合防灾手段,广泛应用于浅部矿区并取得显著成效。然而,当应用于深部低渗煤层时,效果明显减弱,其根本原因在于深部煤层裂隙闭合、渗透性差、含水性弱,导致注水难以有效渗入和扩散,形成“注不进、渗不出、润不透”的典型难题。造成这些难题的原因具有多重复杂性:深部高地应力条件下,煤体原生裂隙受压闭合,渗流通道显著减少;高地温又加速有机质的热解与固化,使煤体更致密、更脆硬;而长期的构造应力叠加与地质演化导致煤层层理紊乱、孔隙连通性差;成煤环境的差异也使煤的有机质组成与含量差异显著,形成强烈的非均质性结构。这些因素共同导致深部煤层普遍呈现低渗透性与难润湿性,成为限制注水防灾技术应用效果的关键地质因素。

从微观机理上看,煤层注水的实质是煤-水界面的润湿过程。如图1所示,煤体表面富含多种亲油性有机质^[3],其表面能特征决定了煤-水接触角较大,难以实现充分润湿。同时,煤中常见的黄铁矿、黏土矿物等胶结物不仅降低了煤层的孔隙度和渗透率^[4],还增强了煤的整体疏水性,使得注水液体更倾向于沿局部裂隙流动而非均匀渗透。因此,深部低渗煤层的煤-水作用呈现出明显的“三相耦合-非均质”特征。传统的单孔注水模式在此类煤层条件下难以实现有效渗透。由于煤体的强疏水性和渗透率差异显著,注入水常沿阻力较小路径运移,形成有限的优势渗流通道,而煤层大部分区域仍处于未润湿状态。这种非均匀扩散特征不仅使实际注水半径远小于理论

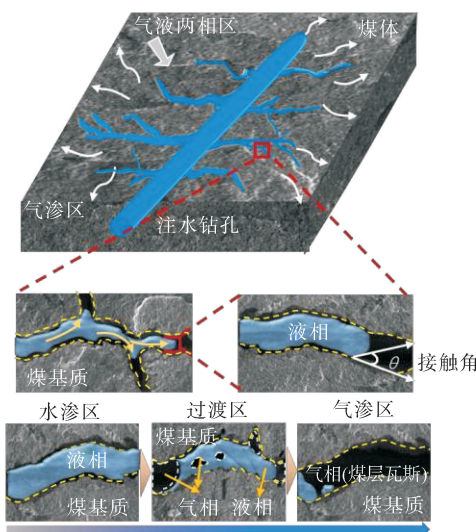


图1 固-液-气三相渗流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solid-liquid-gas three-phase flow

值,也使得注水效果对地质构造变化极为敏感,常出现偏流、受阻或注水量剧烈波动等问题。因此,在深部低渗煤层条件下,传统注水技术已难以满足防灾与增渗双重需求。

深部低渗煤层的注水防灾问题是一个涉及多尺度裂隙演化、流体渗流与煤-水相互作用的复杂耦合过程。为破解深部低渗煤层注水难题,国内外学者围绕“结构改造-渗流优化-润湿强化”三方面开展了系统探索。本研究在总结相关研究的基础上,重点分析了深部低渗煤层注水增效技术与材料的现状与挑战,并提出未来的发展方向与研究重点。

1 煤体水力造缝增渗技术

煤体水力造缝增渗技术通过主动构建煤岩体裂缝网络与卸压空间,显著提升渗透性,成为煤层注水增渗的核心手段,主要包括水力压裂增渗、高压水射流割缝增渗和水力冲孔增渗等三类。

1.1 水力压裂增渗技术

水力压裂技术是通过高压流体压裂煤岩体形成裂缝网络,从而提高煤层渗透率和资源采收率。图2展示了煤矿岩层压裂技术实施的流程,从技术设计到钻进成孔,再到高压液体注入施工,最后裂缝扩展与监测,直观体现了煤体裂缝网络形成的工程路径。该技术最早应用于油气资源开发以提高采收率,后因其增渗效果显著,逐步被引入煤矿瓦斯治理中,成为低渗透煤层增透及灾害防治的重要手段。自1965年煤炭科学研究总院抚顺分院首次开展煤层水力压裂试验以来,该技术在国内外经历了从初步验证到广泛应用的过程^[5]。



图2 煤层压裂技术实施流程

Fig. 2 Implementation process of coal seam fracturing technology

近年来,在工程应用方面,多个现场案例验证了水力压裂技术的显著增渗效果。程卫民等^[6]提出混合式注水方式,即动压区采用静压注水,静压区采用动压注水,并在东滩煤矿1305综放工作面开展现场应用,有效降低了粉尘浓度和工作面温度。李宝发等^[7]在兴安煤矿实施水力压裂现场试验,明确了适宜的注水压力,显著提升了瓦斯抽采效率。Huang等^[8]在神东集团寸草塔2号矿通过水力压裂控制顶板垮落,裂缝扩展范围达4~8 m,取得良好防灾效果。吴攀飞等^[9]在蒋家河煤矿ZF1412工作面实施定向钻孔分段水力压裂与裂隙带瓦斯抽采试验,成功形成半径8~14 m的裂缝网络,使周期来压步距由15 m降至12~13 m、瓦斯抽采浓度提升1~2倍,上隅角与回风巷瓦斯体积分数分别降至0.15%和0.06%左右。

在理论研究方面,数值模拟与相似性实验被广泛用于揭示裂缝扩展规律。Hu等^[10]通过多组合真三轴压裂试验表明,在致密砂岩中天然弱面(包括裂缝与层理)的几何方位及差异应力条件共同控制裂缝路径,使

水力裂缝在不同应力差与角度条件下发生偏转、滑移、交叉或停滞,从而形成形态多变的扩展模式。唐书恒等^[11]基于 ANSYS 研究地应力差异对裂缝方向的影响。闫天雨等^[12]在真三轴压裂模拟试验中发现,致密砂岩储层在低水平应力差、低黏度压裂液和高排量压裂条件下易形成多分支、互相连通的复杂缝网结构,裂缝可出现 48°分支角并形成多条裂缝互汇的网络形态。Zhao 等^[13]采用砂煤(单层与双层)室内试验,从不同工程因素出发研究薄煤层组水压致裂的裂缝扩展规律,发现向碎裂煤中注入压裂液时,难以形成有效裂缝,且裂缝规模较小,因此应避免将钻孔位置选在碎裂煤中。Zhao 等^[14]对页岩岩心开展高静水压力致裂试验,探究了不同层理倾角页岩的裂缝起裂压力及扩展模式差异,结果表明:在 59 MPa 静水压力条件下,页岩样品在水力压裂破裂阶段会发生两次破裂;当层理倾角从 0 增大至 90°时,页岩破裂压力先降低后升高,但整体呈下降趋势。2023 年巩泽文^[15]利用 RFPA-3D 模型模拟了硬、软煤层在不同主应力差下的裂缝扩展。Wang 等^[16]基于 PFC^{2D} 软件研究了不同开槽角度与注射压力下裂缝扩展特征。这些研究共同揭示了煤层裂缝网络形成的非线性规律及主控应力对裂缝演化的显著影响。

总体来看,水力压裂技术在改善煤层渗透性和提高瓦斯抽采效率方面效果突出。然而,煤层的裂缝扩展机理复杂,裂缝扩展范围、方向等较难控制,压裂参数优化方法缺乏通用性,不同地质条件下的适应性差异较大。未来应加强对复杂地应力与注水渗流多场耦合作用下裂缝演化机理的研究,发展适应不同煤岩性质的压裂工艺体系,并通过开发智能监测手段提高现场参数调控精度。

1.2 高压水射流割缝增渗技术

高压水射流割缝技术是一种利用高能流体切割煤岩体以形成卸压缝槽、提高渗透率的工程技术手段,其原理是通过高压泵将水流或混合介质加速至极高速度,冲击煤岩导致其发生破碎或裂缝扩展。该技术最早是俄罗斯人于 1830 年用大口径水射流冲开不稳定的砂质金矿石进行淘金作业,后被美国加利福尼亚金矿采用并逐步推广。研究人员发现,在增加射流压力的同时,还可以通过调节流体介质来增强射流的冲击力。20 世纪 70 年代以来,水射流的工作介质由原来的单一水介质发展到了固态磨料与水两相体系,传统的连续水射流也逐步演变为脉冲水射流、自激振荡水射流等。

目前,该技术已在多个煤矿瓦斯治理工程中取得成效。林柏泉等^[17]在平煤十二矿巷道中开展的高压磨料射流割缝试验表明,磨料射流可形成深 750 mm、高 35 mm 的割缝并贯通钻孔,使瓦斯浓度较未割缝提高 1~3 倍,割缝能力较纯水射流提升 50%,用水量降低 20%~30%;袁亮等^[18]在淮北矿区开展了定向水射流割缝现场试验,有效解决了高地应力煤层钻孔易塌孔、成孔难的难题;代志旭等^[19]在平顶山矿区进行的井下高压水力压裂试验表明,瓦斯抽放浓度提高了 2 倍、流量提高了 3.23 倍,瓦斯压力从 1.78 MPa 降至 0.39~0.55 MPa;李波等^[20]在首山一矿进行的高压水射流割缝试验表明,瓦斯平均抽采浓度从 16% 提升至 45%,流量从 2.4 m³/min 提升至 6.3 m³/min;刘德成等^[21]进行的高压水射流割缝试验表明,割缝钻孔的平均瓦斯抽采流量是普通钻孔的 1.56~2.52 倍,且抽采 16 天后瓦斯浓度仍维持在 30% 以上。这些工程试验均表明,高压水射流割缝可有效提升煤层透气性和瓦斯抽采效率。

在机理研究方面,Song 等^[22]通过数值模拟研究了硬煤巷道高压水射流割缝卸压效果,结果表明径向割缝可使垂直方向应力降低 52.28%,能量密度降低 71.24%,影响范围达 3 m;环形割缝卸压效果较弱,应力仅降低 6.72%,影响范围约 1 m;Zhang 等^[23]探究了喷嘴直径、射流压力、旋转速度及割缝时间对切割深度的影响,建立了割缝深度计算模型,得到了不同射流压力下的割缝深度及破岩阈值压力;张笃学等^[24]在青岗坪煤矿 42108 工作面开展了高压水射流卸压增透钻割一体化技术现场试验,结果显示该钻孔平均缝槽直径 0.33 m,百米钻孔抽采流量平均 0.191 m³/min,最大瓦斯抽采浓度 39%,抽采效果明显高于常规钻孔,在低渗透、高瓦斯、较硬煤体中具有可行性。这些研究从不同角度揭示了高压水射流过程中流固耦合效应与卸压增渗机理。

总体来看,高压水射流割缝技术因其高效性、灵活性与强定向性等优势,在应力集中或裂隙闭合程度高的深部煤层中表现出良好的适用性。然而,该技术在应用中仍面临割缝参数与煤岩结构匹配性差、水楔致裂机理不清、现场动态监测手段缺乏等问题。未来研究应致力于构建多场耦合作用的流固动力学模型,发展融合数值预测与现场实时反馈的参数优化方法,并推进智能化割缝装备的研发与集成应用,以实现该技术

在复杂煤层条件下的精准、高效应用。

1.3 水力冲孔增渗技术

水力冲孔增渗技术是利用高压水流在煤层中冲击形成孔洞和裂隙,从而实现煤体局部卸压、渗透性增强及瓦斯运移条件改善的一种水力改造手段,其基本原理是通过高压水流作用于煤岩体,使孔壁附近煤体产生塑性变形和剪切破坏,形成以冲孔为中心的应力释放区及裂隙渗流通道。图3展示了冲孔过程中孔周围煤体渗透率的演化规律,可以看出,随着冲孔深度与压力的增加,孔周围的应力显著降低,渗透性显著增强,从而有利于瓦斯运移。

水力冲孔技术最早于1965年在重庆南桐矿务局进行现场试验,取得良好瓦斯抽采效果。1968年苏联提出沿巷道周边开槽防突理论,为该技术发展提供了理论基础。20世纪80年代,美国广泛推广水力冲孔技术用于瓦斯增产,平均产气率提升3~20倍。进入21世纪后,国内对水力冲孔技术的现场应用研究不断深化。屈花荣^[26]开展了水力冲孔协同注气驱替强化瓦斯抽采技术现场试验,结果显示钻孔瓦斯最大抽采流量提高至 $0.0325\text{ m}^3/\text{min}$,最大抽采浓度提高至79.3%,且不同冲孔等效直径、注气压力和钻孔间距对增流及消突效果存在特定影响。温志强等^[27]在陕西韩城象山矿21511工作面进行的定向长钻孔水力冲孔试验表明,冲孔后单孔抽采量平均提升23.5%,有效抽采半径平均提高12.3%,且在抽采初期单孔抽采量提高高达68.2%。Yin等^[28]在云南曲靖及陕黔两地煤矿松软煤层开展了“水力扩张-水力冲孔”技术试验,通过低压流体对煤层预处理后再采用水力冲孔扩展裂隙网络,试验结果显示,不同坚固性系数煤层的增透面积分别为1.67、5.18和 9.58 m^2 ,抽采初期瓦斯压力下降速率是常规水力冲孔的1.81倍,渗透率提升6.6倍,改造后第27天时瓦斯抽采量与改造前的最大差值达 1013 m^3 。彭业升等^[29]在贵州糯东煤矿11702工作面的水力冲孔试验表明,采用9 m孔间距后,瓦斯抽采浓度从25%提升至85%,抽采流量从 $0.08\text{ m}^3/\text{min}$ 提升至 $0.35\text{ m}^3/\text{min}$,提升效果显著。李志强等^[30]在重庆天府三矿开展了底板穿层钻孔高压水射流卸压增渗试验,结果显示煤层渗透率增加90倍,瓦斯抽采率从17%提高至58%,抽采量增加4.8倍,有效抽采半径从不足0.1 m增至2.8 m,抽采达标时间缩短为6~9个月。秦贵成等^[31]在山西潞安古城煤矿N1305工作面进行的本煤层分段水力造穴试验表明,后退式造穴钻孔的瓦斯抽采半径达普通钻孔的2.58~5.88倍,抽采纯量提升至3.79倍,且240天后抽采半径仍持续扩大。

针对水力冲孔增渗技术的理论与模拟研究,当前主要聚焦于冲孔增渗过程中的应力演化、渗透率变化及流固耦合作用机理。Liu等^[32]基于等效裂隙煤体模型,引入塑性体积应变来量化煤体结构特征,建立了瓦斯渗流-地质力学耦合模型,并据此对原始煤层与受扰动煤层中的瓦斯流动规律分析认为,水力冲孔存在一个最优钻孔直径,在平煤八矿J-15-14140工作面进行的水力冲孔试验表明,采用最优钻孔直径(约1.0 m)后,平均瓦斯抽采纯流量从 $7.8\text{ m}^3/\text{d}$ 增至 $14.7\text{ m}^3/\text{d}$ (提升88%),瓦斯浓度从18.2%增至28.5%(提升57%),且巷道掘进中动力现象显著减少。Liu等^[33]通过引入并结合伯格马克-鲁斯(Bergmark-Roos equation, BR)方程与Perkins-Kern-Nordgren(PKN)模型,建立了描述水力冲孔形状的BR-PKN方程,并采用数值模拟方法分析了冲孔期间与冲孔后煤体渗透率的演化规律,发现冲孔形状为类椭球形,且孔周渗透率随与孔壁距离

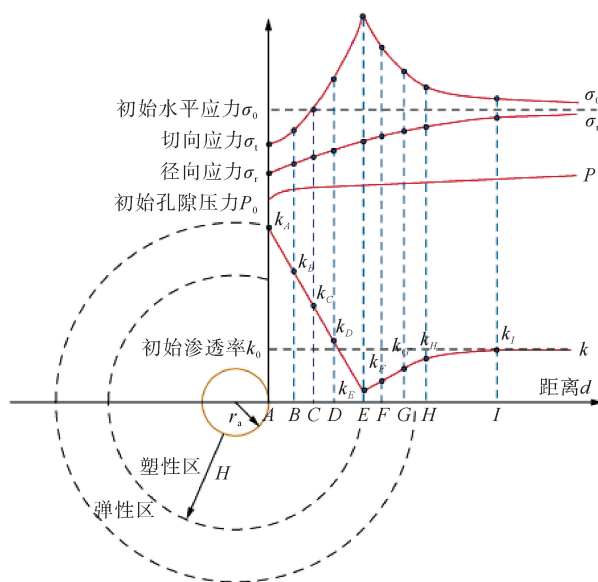


图3 水力冲孔孔洞附近煤体渗透率演化模型^[25]

Fig. 3 Evolution model of coal permeability around hydraulic flushing holes^[25]

的增加呈“先升高、后快速降低、最终趋于稳定”的变化趋势。刘厅等^[34]构建了卸压煤层多场耦合模型,分析了煤层残余瓦斯含量和残余瓦斯压力随冲孔出煤量的变化规律,并提出冲孔最优出煤量判定准则及方法,认为在满足抽采达标的前提下,应尽量减少冲孔出煤量以保证煤巷稳定、降低工程成本,为冲孔参数优化提供理论支撑。黄旭超^[35]综合考虑温度、压力对孔隙度、渗透率以及瓦斯流动对热传导的影响,建立了含瓦斯煤“热-流-固”三场全耦合数学模型,并结合新疆某矿煤层赋存条件进行了单孔抽采煤层气数值模拟试验,分析了湿度、压力对渗透率的影响,结果显示:湿度对煤层渗透率影响显著,且随温度升高而增大;瓦斯压力随抽采时间延长逐渐减小,且影响范围扩大。

水力冲孔因结构简单、设备轻便、适用范围广,逐渐成为深部低渗煤层增渗的重要技术手段之一,具有工艺简单、施工灵活、经济性好、效果显著等优势,特别适用于软煤层及冲击危险区的快速卸压与增渗改造。未来研究方向应聚焦于多物理场耦合机制的精细化建模、参数自适应控制与实时监测系统开发,以及基于大数据的智能优化算法,以实现冲孔过程的精准控制与持续增效。通过模型、监测和算法的协同融合,水力冲孔技术有望成为深部低渗煤层安全开采与高效瓦斯治理的核心手段之一。

总体而言,煤体水力造缝增渗技术是提升深部低渗煤层注水效果与灾害防治能力的关键途径,其三大主流技术——水力压裂、高压水射流割缝和水力冲孔各具特点:水力压裂凭借强张拉应力实现深层裂缝扩展,适用于坚硬致密煤层;水射流割缝通过动能切割形成可控裂缝形态,适合复杂脆性煤层;水力冲孔则利用冲蚀卸压快速构建孔裂缝网络,更适应松软层理发育煤层。然而,该技术体系仍面临裂缝网络可控性差、长期稳定性不足、多场耦合机制不明及智能调控能力欠缺等挑战。未来的研究应着重构建多尺度“力学场-渗流场-化学场-温度场”协同模型,揭示裂缝生成、渗流扩散及煤-水相互作用的耦合规律,发展智能实时调控技术,并探索水力-化学协同增渗新路径,为实现深部煤层安全高效开采提供支撑。

2 低渗煤层注水减阻技术

随着深部低渗煤层注水防灾与增渗技术的持续发展,研究者逐渐认识到注水阻力过大是制约煤层渗透效率的关键问题之一。煤体孔隙结构复杂、界面摩阻显著,加之高地应力与高温环境共同作用,使流体在注入过程中能量损耗严重。为改善流体输运性能、降低注水能耗,国内外学者在传统水力增渗技术的基础上引入化学减阻材料体系,通过调控流体流变特性与煤体界面行为,实现注水流态优化与摩阻降低^[36-37]。常见的减阻材料主要包括聚合物添加剂、表面活性剂以及复合型减阻剂三大类别。

2.1 聚合物添加剂减阻

20世纪70年代,美国最先提出利用长链聚合物抑制湍流能量耗散的理论,并在液体输送中取得显著减阻效果^[38]。早期研究多聚焦于石油输运领域,利用聚合物分子在水和油的界面形成一层类似薄膜的结构,能减小油滴表面张力,使原油更容易被水驱出。聚合物减阻剂是最早被引入煤层注水领域的化学助剂之一,其主要机理是通过高分子链的延展与缠结作用削弱流体的湍流强度,从而降低摩擦阻力。90年代后期,国内学者开始将该技术应用于煤层注水。王海林等^[39]用 Taylor-Couette 装置进行了聚合物溶液流动稳定性与减阻效果试验,结果表明质量分数 30×10^{-6} 聚合物可使临界泰勒数降至 60.65,质量分数 50×10^{-6} 时降至 48.47。

此后,研究重点逐步转向耐温、耐盐型聚合物体系。赵峰^[40]在多个油田进行现场试验表明,应用深部调驱结合注水调整技术后,采收率显著提高,单井产量稳步增长。如图4所示,聚合物分子在流体中由卷曲态逐渐向拉伸态过渡,形成沿流向取向排列的分子链结构,通过破坏湍流涡旋结构来实现减阻^[41]。聚合物链在流体中形成空间网络结构,活性剂分子吸附在煤

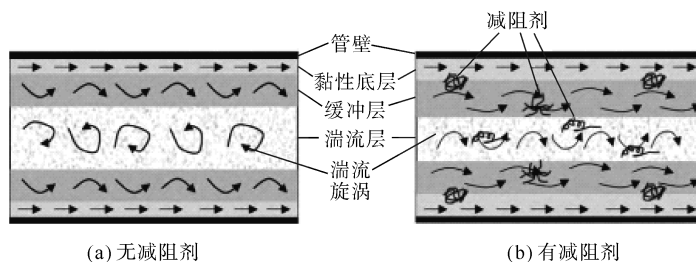


图4 聚合物减阻机理图

Fig. 4 Polymer drag reduction mechanism diagram

体表面,与聚合物结合形成复合滑移层,流体在界面处滑移流动,从而同时削弱湍流与黏附阻力^[42]。崔强等^[43]采用疏水单体 FW-2(物质的量比为 2:1 的丙烯酸十八酯与甲基丙烯酸十六烷基酯混合物)与丙烯酰胺、丙烯酸、2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸聚合得到水溶性疏水缔合聚合物减阻剂,室内减阻试验表明其具有良好的耐温、耐盐、耐剪切性能,疏水侧链分子内与分子间两种缔合方式提升了聚合物的流变性能,剪切速率的变化使得其缔合与解缔合处于动态平衡状态,聚合物表现出触变性。

近年来,学者们进一步探讨了聚合物溶液的减阻效果。如彭飞^[44]在环形管湍流条件下对四元两性疏水聚合物溶液进行了减阻性能试验,结果表明聚合物浓度为 0.3% 时减阻率可接近 70%。田伟^[45]在旋转圆盘装置中进行了聚合物 PEO 及其复合溶液的湍流减阻试验,发现最高减阻率可达约 80%。黄俊^[46]在旋转沟槽圆盘装置中开展了不同浓度聚丙烯酰胺溶液的湍流减阻试验,得到最大减阻率随浓度提升分别达 17% (1.25 g/L)、24.2% (2.3 g/L) 和 28.4% (3.8 g/L)。图 5 展示了聚合物分子在剪切作用下的形态变化与流场能量分布特征,其结构稳定性直接决定了减阻持续性^[47]。

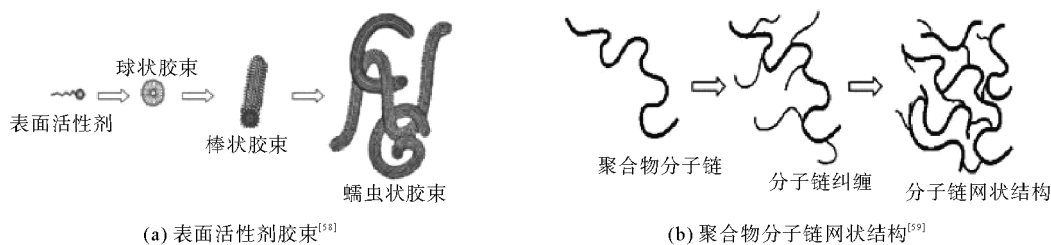


图 5 复配减阻体系微观结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of microstructure of drag reduction system

聚合物减阻剂在煤层注水中可显著降低流动阻力,但其性能稳定性受多种因素制约。在高温、高剪切等极端条件下,聚合物分子链易发生断裂或降解,导致减阻效率迅速衰减。同时,减阻剂分子在煤体孔隙内的吸附滞留与物理堵塞效应可能引起渗流通道收缩甚至堵塞,影响增渗效果的持续性。目前,相关研究多集中于实验室理想环境,对真实地层中应力-温度-压力多场耦合作用下减阻行为与失效机制的认识尚不充分。未来应聚焦于耐温抗剪切型聚合物的分子结构设计,结合多尺度模拟方法深入研究其降解动力学与复杂流动条件下的流变响应,以提升减阻材料在深部煤层环境中的工程适应性^[48]。

2.2 表面活性剂减阻

表面活性剂减阻通过调节液体表面张力与煤体润湿性降低流体与孔壁之间的摩擦,是近年来煤层注水领域的研究热点。如图 6 所示,表面活性剂分子在煤体孔壁上形成定向排列层,疏水基团与煤表面结合,亲水基团朝向液体,显著降低了界面能,促进了流体滑移流动^[49]。表面活性减阻剂可分为非离子型、阴离子型和阳离子

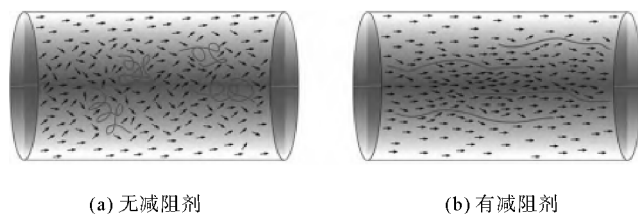


图 6 表面活性剂减阻原理

Fig. 6 Principle of drag reduction by surfactants

型三类,常见的有十二烷基硫酸钠、十二烷基苯磺酸钠、脂肪醇聚氧乙烯醚、椰油酰胺丙基甜菜碱、十六烷基三甲基溴化铵,等等。1988 年,Bewersdorff 等^[50]在德国多特蒙德大学进行了管道湍流实验,通过激光多普勒测速仪和黏度计测量,分别对十四烷基三甲基水杨酸盐溶液、十六烷基三甲基水杨酸盐溶液进行测量发现,阳离子表面活性剂溶液在临界剪切速率下黏度可增加 2.5 倍,并在最大减阻条件下速度剖面呈 S 形,随温度升高临界壁面剪切应力由 16.8 Pa 降至 6.2 Pa。

近年来国内学者对此也开展大量研究。安文博等^[51]在辽宁阜新平安矿进行了表面活性剂改性煤体试验发现,当阴离子表面活性剂十二烷基硫酸钠的质量分数为 0.5%、改性时间 48 h、温度 40 °C 时,煤体接触

角降至 7.15° , 煤体峰值强度由 26.9 MPa 降至 6.82 MPa, 弹性模量由 1 344 MPa 降至 240 MPa, 峰值应变由 0.015 7 增至 0.018 9。毕瑞卿等^[52]在七台河新兴矿 41061 工作面进行的煤层注水试验表明, 添加 0.2% 表面活性剂辛基酚聚氧乙烯醚 OP-10 后, 总粉尘降尘率从注纯水的 14.1%~29.8% 提升至 34.4%~60.8%, 平均降尘率达 47.6%。鲁聪颖等^[53]通过试验与分子动力学模拟, 定量测得氧乙烯(ethylene oxide, EO)数分别为 1、5、10 的不饱和的腰果酚聚氧乙烯醚(EO-1、EO-5 和 EO-10)的临界胶束浓度分别为 8.00×10^{-5} 、 1.25×10^{-4} 和 1.75×10^{-4} mol/L, 界面厚度分别为 7.7、10.1 和 15.4 Å (1 Å=0.1 nm), 并且发现吸附能随 EO 链长增加而增大的趋势。

此外, 近年来的研究进一步揭示了表面活性剂分子在孔隙尺度下的作用机制。通过分子动力学模拟发现, 吸附层厚度与流体剪切速率密切相关, 当流速升高时, 部分吸附层被破坏, 导致局部摩阻回升。赵帅等^[54]通过静态吸附试验研究了非离子表面活性剂在 5 种黏土矿物(沸石、蒙脱土、高岭土、绿泥土、伊利土)表面的吸附规律, 结果显示, 吸附量随碳链长度增加而增加(如十六烷基醇聚氧乙烯醚吸附量较高), 且十二烷基醇聚氧乙烯醚-7 在浓度大于 3 000 mg/L 时抗吸附效果最佳。

表面活性剂减阻材料在改善界面滑移与流体流动特性方面具有显著效果, 尤其适用于疏水性煤层的注水过程, 但其减阻性能受温度、离子强度和流速等多因素影响, 存在一定波动性。此外, 部分阴离子型表面活性剂可能对地下水环境造成潜在污染。采用生物基及生物表面活性剂替代传统石油基产品, 是实现工业与消费品领域“绿色转型”的重要趋势。这类新型材料并非简单的功能替代品, 而是具备更优环境相容性、可调控性与多功能集成特性的新一代解决方案^[55]。

2.3 复合体系减阻

为克服单一减阻剂耐温性差、作用机理单一的问题, 研究者提出“聚合物-表面活性剂”或“聚合物-纳米粒子”复合体系的概念。复合减阻剂通过多组分协同作用实现“湍流抑制+界面润滑”的双重减阻效果。Chai 等^[56]对十二烷基硫酸钠与不同类型聚丙烯酰胺混合水溶液进行试验发现, 由于阴离子十二烷基硫酸钠与阴离子聚丙烯酰胺之间存在强疏水相互作用和相同电荷产生的静电排斥作用, 二者构成的组合为最优减阻组合, 并且阴离子表面活性剂浓度为 0.3% 时减阻效果最佳, 尤其在高剪切速率条件下, 减阻率显著高于单一添加剂。江海峰等^[57]通过高温试验(最高达 210°C)发现, 纳米流体有效导热系数增幅随温度升高而降低, 例如 Cu 颗粒分散到基液 62# 导热油(TH62)的纳米流体在 120°C 、质量分数 2% 时增幅为 14.7%, 而 Cu 颗粒分散到基液正十四烷的纳米流体在 33°C 、质量分数 2% 时增幅达 40%。

尽管复合减阻剂在性能上优于单一组分, 但体系的组分配比、分子间相互作用及现场稳定性尚未形成系统理论。当表面活性剂浓度超过临界值时, 可能破坏聚合物分子链结构, 导致减阻效果削弱。此外, 体系复杂度高、现场制备困难也是工程应用的瓶颈。未来应加强对复合体系多组分协同机理的分子尺度研究, 建立基于流体力学与界面化学的耦合模型, 并发展智能配比与自动投加技术, 以实现减阻效果的实时优化^[58]。

综上所述, 化学减阻材料的应用推动了煤层注水技术从单一水力改造向“力学-化学”协同调控模式演进。聚合物减阻剂通过抑制湍流实现高效降阻, 适用于高压高速条件; 表面活性剂利用界面润湿与滑移效应改善煤体亲水性, 适用于复杂孔隙煤层; 复合型减阻剂则兼具二者优势, 在多应力环境下表现出更稳定的持久性能。然而, 当前研究仍面临机理研究依赖经验模型、材料在深部环境中稳定性不足、缺乏现场长期监测体系及煤层专用减阻剂研发滞后等挑战。未来应着力开发分子结构可控的智能减阻体系, 结合原位监测与数据驱动技术, 实现煤层注水过程的精准调控与可视化, 为煤层高效注水提供新范式。

3 低渗煤层注水润湿强化材料

深部低渗煤层中, 煤体表面具有较强疏水性、孔隙结构复杂且连通性差, 导致注入水难以在孔隙中有效铺展与渗透。润湿强化材料作为改善“煤-水”界面相互作用的重要手段, 可通过调节液体表面张力、煤体表面能和界面相容性, 提高液体在煤体中的扩散与滞留能力。近年来, 国内外学者围绕化学润湿改性、界面能调控和复合强化体系等方向开展了系统研究, 逐步形成以表面活性剂、无机纳米材料与复合润湿剂为核心的多层次材料体系。

3.1 化学润湿改性材料

化学润湿改性通过改变煤体表面官能团组成或调控液体界面张力,使“煤-水”接触角减小、煤体表面能提高,从而改善煤层注水润湿性,早期研究主要集中在表面活性剂体系。20 世纪 80 年代,国外学者首次利用阴离子型表面活性剂改善煤粉润湿性能,发现其可有效降低“水-煤”界面张力并提升液体扩散速度。进入 21 世纪后,国内学者针对深部煤层高灰分、高有机质含量特征,系统研究了不同类型表面活性剂的作用机理。林媛等^[59]在长焰煤试样上的接触角试验显示,非离子表面活性剂脂肪醇聚氧乙烯醚(AEO-9)处理后的接触角为 62.1° ,优于阴离子表面活性剂的 66.8° ;张建国等^[60]发现,表面活性剂聚乙二醇辛基苯基醚(Triton X-100)在质量分数为 1.5% 时润湿效果最优、沉降速度最快、接触角显著降低,且煤样芳香烃含量越高,Triton X-100 的润湿效果越好。

随着研究深入,研究者开始通过引入羟基、羧基、酰胺等含极性官能团的表面活性剂改善煤表面化学特性。郝景润等^[61]通过过滤试验测定不同表面活性剂(如 OP-10)对煤接触角和滤饼水分的影响发现,当 OP-10 浓度为 600 g/t 时,滤饼水分降低 3.64%,显著改善了煤的润湿性。图 7 展示了不同类型表面活性剂在煤表面形成吸附层的微观结构特征:分子在煤体表面定向排列,亲水基朝外,有效降低了界面能,使液体沿孔隙壁滑移流动^[62]。

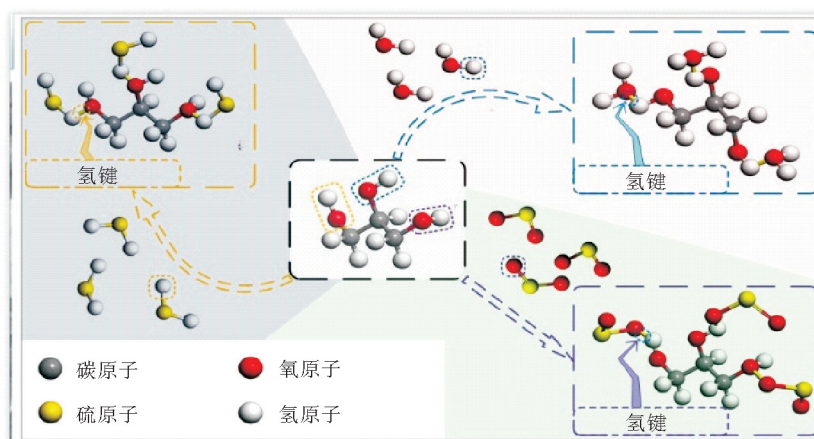


图 7 不同类型表面活性剂微观结构

Fig. 7 Microscopic structures of different types of surfactants

此外,部分学者探究了有机改性剂与无机助剂的协同作用。李振等^[63]利用烟台梁家煤矿长焰煤开展了高矿化度与表面活性剂 OP-10 耦合作用下的瓦斯解吸试验,结果表明:矿化度由 0 增至 20 g/L 时,OP-10 对煤体接触角的改善效果从 69.35%~91.78% 降至 14.05%~34.37%,瓦斯置换量降低 9.88%~11.1%,且在 2 MPa 压力下瓦斯解吸效果最佳。张雪洁等^[64]通过对 6 种不同变质程度煤样进行表面活性剂润湿性及瓦斯解吸试验,结果表明:顺丁烯二酸二仲辛酯磺酸钠(快 T)表面活性剂使煤表面接触角最大降低 65.75%,复配溶液(0.02% AEO-9+0.06% 6501+0.04% 快 T)表面张力降至 27.45 mN/m(降幅 65.1%),且瓦斯初期解吸量从干燥煤样的 0.72 mL/g 降至表面活性剂处理后的 0.18 mL/g,抑制效果显著。

尽管化学润湿改性材料在改善煤体表面亲水性方面效果显著,但仍存在两方面问题:其一,多种表面活性剂存在协同或拮抗作用,但复配规律尚不清晰;其二,部分表面活性剂在地下水中存在潜在环境污染风险。未来研究应着力深化界面化学作用机理研究,构建多组分润湿体系的协同理论模型,重点开发兼具可降解特性与耐盐性能的绿色润湿剂,为实现深部煤层复杂地质环境下的长效、稳定润湿改性提供材料基础与理论支撑^[65]。

3.2 物理与界面润湿调控材料

物理或界面调控型润湿强化材料主要通过改变煤体孔隙表面能分布、吸附层结构或液体动力学特征,来

增强液体在煤体中的扩散与滞留能力。近年来,纳米颗粒凭借其高比表面积与可调表面电性,成为润湿调控研究的重点方向。曾飞^[66]在玻璃、粉煤灰、乙烯-醋酸乙烯共聚物(ethylene vinyl acetate,EVA)薄膜、紫铜及粉煤灰/聚氨酯涂层等多类基材表面开展润湿调控试验,并取得从超亲水(接触角 $\approx 0^\circ$)到超疏水(最高接触角可达 172.9°)的可控调节效果。车道昌等^[67]在原子力显微镜(atomic force microscope,AFM)平台与XFG型变频挂槽式浮选机上开展润湿性调控后的石墨界面纳米气泡生成与浮选试验,结果显示回收率可由93.0%提升至98.9%。栗褒等^[68]在AFM测试平台上对不同润湿性调控后的石墨样品进行了固液界面水化膜测试,发现水化膜总厚度由0.07 nm增至16 nm,刺穿有序层所需能量最高可达 9.99×10^{-18} J。

早期研究主要采用二氧化硅、氧化铝等无机纳米颗粒。石钰等^[69]在分子动力学模拟试验中,研究了十六烷基三甲基溴化铵表面活性剂与 SiO_2 纳米颗粒复合体系对煤体润湿性的影响,结果显示,水分子的扩散系数从 $6.357 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 降至 $4.648 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,显著增强了煤体疏水性。柳先锋等^[70]试验表明,酸性 SiO_2 纳米流体(质量浓度2.0%, $\text{pH}=3$)使煤体接触角从 99.7° 降至 25.2° (降低 74.5°),瓦斯解吸量从6.960 7 mL/g提升至13.279 4 mL/g。近年来,碳基纳米材料,如石墨烯、碳纳米管等被引入煤层润湿体系。Arif等^[71]综述了中国多地煤样在“ CO_2 /水”体系下开展的接触角等润湿性试验,并给出了涵盖压力0.1~23.5 MPa、温度298~343 K、接触角 $0.8^\circ \sim 3.13^\circ$ 等范围的定量结果。

纳米材料凭借其超高比表面积与强界面活性,可显著增强煤体表面的亲水性及润湿效率,为煤层注水过程中的润湿强化提供了新的技术途径。然而,该技术的实际应用仍面临三方面挑战:一是纳米颗粒易发生团聚,导致其在水中分散性下降,影响润湿效果的稳定性;二是部分金属基纳米氧化物在高矿化度水环境中易发生沉降与失活,制约其在深部煤层条件下的长效使用;三是纳米材料的环境生物安全性及规模化应用成本问题尚未得到系统性解决。未来研究应聚焦于纳米颗粒表面改性技术与分散稳定机制,建立其在“煤-水”界面上的可控吸附理论模型,并探索纳米材料与传统化学润湿剂的复合协同路径,为实现高效润湿效果与生态环境安全的协同统一提供技术支撑。

3.3 复合与多功能润湿强化材料

为实现多机理协同增效,研究者提出“化学改性+物理调控”的复合润湿强化思路,通过将表面活性剂、聚合物与纳米颗粒等功能组分有机结合,在分子吸附、界面润滑与孔隙填充等多个层面产生协同作用。

Ahmad等^[72]在实验室条件下对含疏水缔合聚合物与二氧化钛纳米粒子的水基钻井液进行了线性膨胀试验和热滚动分散试验,结果显示,添加剂可显著降低页岩水化膨胀与分散度;Zhao等^[73]研究了“煤-水-氩气”界面润湿性,发现随温度($20 \sim 60^\circ\text{C}$)和氩气压力($0 \sim 7 \text{ MPa}$)升高,水的表面张力(每 10°C 下降 $1.4 \sim 1.9 \text{ mN/m}$)和煤-水接触角(每 10°C 下降 $1.1^\circ \sim 1.7^\circ$)均小幅下降,但润湿性整体变化微弱。Yi等^[74]开发的温敏型聚合物-表面活性剂复合材料在高温区形成吸附层稳定结构,在低温区则恢复流动性,实现动态调控。该体系为复杂地质条件下的自适应润湿强化提供了新思路。贺涛^[75]在湿滤除尘实验平台上对复合表面活性剂(椰油酰胺丙基甜菜碱/十二烷基硫酸钠)强化金属基湿式过滤除尘的抑尘性能进行测试显示,在椰油酰胺丙基甜菜碱与十二烷基硫酸钠的比例为3:2、浓度质量分数为0.25%、气液比0.4条件下,全尘与呼尘降尘效率分别达93.74%和73.37%。钱苏倩^[76]在Walker润湿试验、保水性测试以及重力落锤-马尔文粒径联合实验平台上,开展粘结-润湿复合抑尘剂对烟煤产尘特性的抑制试验发现,复合抑尘剂可使表面张力降至 41.02 mN/m 、渗透率较原煤下降达0.717%,能显著增大颗粒粘结、降低产尘粒径。邓海汶^[77]在直接接触式膜蒸馏装置中系统测试了界面聚合构筑的聚偏二氟乙烯/聚酰胺、聚偏二氟乙烯/聚磺酰胺、聚偏二氟乙烯/磺化聚酰胺复合蒸馏膜的抗盐垢与抗润湿性能,发现优化后的磺化聚酰胺复合膜在6 h运行中归一化通量仅降至0.71,产水侧电导率 $1.79 \mu\text{S/cm}$, 60°C 冲洗可恢复96%的膜性能。

复合与多功能润湿强化材料在性能上明显优于单一体系,兼具长效性与环境适应性,但其组分间相互作用机理复杂,配比优化缺乏统一标准,且现场制备与注入过程的稳定性仍需改进。未来应建立基于“煤-水-材料”三相界面的多尺度耦合模型,明确各组分作用路径,并结合分子动力学模拟与原位测试手段,探索智能自调型复合润湿体系的形成与演化机制。

总体而言,低渗煤层注水润湿强化材料的研究经历了从单一表面活性剂体系向多组分复合协同体系的

演进。化学润湿改性材料通过界面活性和官能团吸附作用,能有效降低煤体表面张力,显著改善高疏水性和孔隙封闭煤层的润湿性能;物理与界面调控材料利用纳米颗粒构建微尺度吸附层并调控煤体表面能分布,从而增强液体在孔隙中的铺展与滞留能力;复合与多功能润湿强化材料则在分子吸附、界面润滑及孔隙结构改造等多个层面实现协同增效,形成具有高效性、长效性及强环境适应性的润湿体系。尽管三类材料在作用机理和适用条件上各有侧重,但仍普遍存在界面吸附机制不明确、材料在复杂地质环境中稳定性不足、环境安全性与经济性评价体系不完善等共性问题。未来研究应聚焦于可降解、低毒型润湿材料的开发,深化多场耦合条件下“煤-水-材料”界面的动态演化机理研究,并探索具备智能响应能力的复合润湿材料体系,为实现润湿性能的自适应调控与长期稳定提供新路径。

4 结论与展望

本研究围绕深部低渗煤层注水增效技术,从煤体水力改缝增渗技术、注水减阻技术和润湿强化材料三个方面系统梳理了研究现状与关键问题。在煤体水力改缝增渗技术方面,使用水力压裂增渗、高压水射流割缝以及水力冲孔增渗等技术,可以在煤体内部构建多尺度裂隙体系,实现了注水由单一通道渗流向多通道网络渗流的转变,显著改善了煤层的整体渗透性与水体扩散能力;在注水减阻技术方面,通过研发聚合物减阻材料、表面活性剂减阻材料及复合减阻材料等,减小了液体与孔壁之间的阻力,扩大了煤层润湿的范围,降低了注水压力;在润湿强化材料方面,针对煤体表面强疏水、润湿性差的特征,开发了多种化学改性与功能助剂体系,如表面活性剂、界面调控剂和水锁解除剂等,以调节“煤-水”界面能状态,增强润湿能力并稳定渗流通道。同时,部分研究开始尝试将这些手段协同,通过复合作用实现煤层结构定向改造与润湿性能持续优化,从而在一定程度上突破了深部低渗煤层注水半径小、润湿不均及效果衰减快等瓶颈。

总体上说,水力造缝增渗技术揭示了深部条件下煤体应力重分布、裂隙扩展模式及渗透率演化规律,为改善煤体低渗特征提供了基础支撑;注水减阻技术从聚合物、表面活性剂及复合体系三类材料出发,探究了其流变调控与界面行为改善的作用机制,以及在深部高温、高剪切环境下的性能特点;润湿强化材料则从化学润湿改性、物理与界面调控材料及复合协同体系等方面阐述了“煤-水”界面能调控、表面润湿转变与孔隙液体铺展的影响规律。现有增效技术与材料在改善深部煤层渗流条件、提升注水效率方面已形成较为完整的技术体系,但在实际应用中仍存在适应性不足、关键作用机理不明确、现场响应难以定量评估等问题。因此,未来需在理论模型构建、试验方法创新以及材料-结构协同机制等方面开展深入研究。

1) 水力造缝增渗技术方面:研究需重点揭示深部高地应力、高温及复杂地质构造环境下,煤岩体裂隙网络从萌生、扩展、贯通到闭合全过程的多物理场耦合演化规律。应发展考虑地质力学条件、瓦斯压力、地温场及渗流场动态交互作用的精细化数值模型,实现对“增渗区三维形态演化-渗透率时变规律-增渗有效期”的精准模拟与预测。在工程实践层面,需系统优化水力冲孔参数、精准设计水力割缝布局,并研发新型裂隙导向与支撑技术,以增强人工裂隙网络的长期稳定性和导流能力。同时,应积极探索基于实时微震、电磁波或光纤传感数据的增渗效果动态反馈与智能调控方法,推动增渗技术从“静态设计”向“动态预测与自适应调控”的范式转变。

2) 注水减阻技术方面:研究重点应集中于开发新一代高性能减阻剂,系统探究聚合物、表面活性剂及纳米复合减阻体系在高温、高剪切应力等极端工况下的分子链稳定性、自修复能力及减阻性能衰减机制。需建立融合流变学特性、界面吸附行为及微观输运效应的“结构-性能-环境”多维度评价方法,阐明减阻剂在煤体复杂孔隙结构与动态应力扰动下的运移、滞留与失效规律,形成具有“高稳定性、超低用量”特征的新型智能减阻体系,并形成与之配套的井下高效注入工艺及设备,显著提升深部煤层注水的效率与经济性。

3) 润湿强化材料方面:应致力于构建“分子-孔隙-宏观”跨尺度润湿行为理论框架,深入揭示化学润湿剂、界面调控材料及纳米功能材料在“煤-水-气”多相界面的协同吸附、组装与作用机制,发展多场耦合条件下煤体表面润湿性动态演化的实时表征技术与理论模型。在材料研发上,应建立基于煤质特性、孔隙结构与地质条件的适配性智能筛选与效能预测系统,最终实现润湿强化材料从“普适性配方”到“因地层精准设计”的根本性跨越,为煤层注水的精准增效与安全开采提供核心技术支撑。

参考文献:

- [1] PATHEGAMA G R, ZHAO J, JU M H. Opportunities and challenges in deep mining: A brief review[J]. Engineering, 2017, 3(4): 546-551.
- [2] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
LIU Feng, CAO Wenjun, ZHANG Jianming, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1-15.
- [3] 杜建华, 边素素, 林立深, 等. 煤中可溶性有机质变化对其表面疏水特性的影响研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2022, 41(6): 50-60.
DU Jianhua, BIAN Susu, LIN Lishen, et al. Influence of changes in soluble organic matter in coal on its surface hydrophobicity[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2022, 41(6): 50-60.
- [4] LIU Z, ZHANG M M, YANG H, et al. Molecular simulation of the regulation mechanism of surfactant on microscopic chemical wetting of coal[J/OL]. Journal of Molecular Liquids, 2024, 404. DOI:10. 1016/j. molliq. 2024. 124896.
- [5] 孙四清, 李文博, 张俭, 等. 煤矿井下长钻孔分段水力压裂技术研究进展及发展趋势[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 1-15.
SUN Siqing, LI Wenbo, ZHANG Jian, et al. Research progress and development trend of staged hydraulic fracturing technology in long-borehole underground coal mine[J]. Coal Geology and Exploration, 2022, 50(8): 1-15.
- [6] 程卫民, 刘向升, 郭允相, 等. 综放工作面煤层混合式注水防尘技术[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(9): 38-42.
CHENG Weimin, LIU Xiangsheng, GUO Yunxiang, et al. Dust-proof technology with combined seam water injection for fully mechanized top coal caving mining face[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(9): 38-42.
- [7] 李宝发, 梁文勳, 胡高建, 等. 水力压裂增透技术在兴安煤矿的应用[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 159-162.
LI Baofa, LIANG Wenxu, HU Gaojian, et al. Application of hydraulic fracturing permeability improvement technology in Xing'an coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(7): 159-162.
- [8] HUANG B X, CHENG Q Y, ZHAO X L, et al. Using hydraulic fracturing to control caving of the hanging roof during the initial mining stages in a longwall coal mine: A case study[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2018, 28(6): 917-923.
- [9] 吴攀飞, 吕伟伟, 张宁宇, 等. 井下定向钻孔分段水力压裂防治坚硬顶板及裂隙带瓦斯抽采技术研究应用[J]. 煤炭技术, 2025, 44(11): 170-175.
WU Panfei, LYU Weiwei, ZHANG Ningning, et al. Research and application of gas extraction technology for preventing and combating hard top plate and fissure zone in downhole directional drilling and segmental hydraulic fracturing[J]. Coal Technology, 2025, 44(11): 170-175.
- [10] HU J, CAO J X, HE X Y, et al. Numerical simulation of fault activity owing to hydraulic fracturing[J]. Applied Geophysics, 2018, 15(3): 367-381.
- [11] 唐书恒, 朱宝存, 顾志丰. 地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 65-69.
TANG Shuheng, ZHU Baocun, YAN Zhifeng, et al. Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 65-69.
- [12] 闫天雨, 李玮, 李建冰, 等. 致密砂岩储层压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 当代化工, 2020, 49(1): 14-18.
YAN Tianyu, LI Wei, LI Jianbing, et al. Experimental study on the propagation pattern of fracturing cracks in tight sandstone reservoirs[J]. Contemporary Chemical Industry, 2020, 49(1): 14-18.
- [13] ZHAO H F, LIU C S, XIONG Y G, et al. Experimental research on hydraulic fracture propagation in group of thin coal seams[J/OL]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2022, 103. DOI:10. 1016/j. jngse. 2022. 104614.
- [14] ZHAO H, LIANG B, SUN W J, et al. Effects of hydrostatic pressure on hydraulic fracturing properties of shale using X-ray computed tomography and acoustic emission[J/OL]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 215. DOI:10. 1016/j. petrol. 2022. 110725.
- [15] 巩泽文. 基于RFPA-3D的煤层钻孔水力压裂裂缝扩展规律数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7310-7316.
GONG Zewen. Numerical simulation of crack propagation law of coal seam drilling hydraulic fracturing based on RFPA-3D[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(17): 7310-7316.
- [16] WANG K, ZHANG G D, DU F, et al. Simulation of directional propagation of hydraulic fractures induced by slotting based

- on discrete element method[J]. *Petroleum*, 2023, 9(4): 592-606.
- [17] 林柏泉, 吕有广, 李宝玉, 等. 高压磨料射流割缝技术及其在防突工程中的应用[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(9): 959-963.
LIN Baiquan, LÜ Youchang, LI Baoyu, et al. High-pressure abrasive hydraulic cutting seam technology and its application in outbursts prevention[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(9): 959-963.
- [18] 袁亮, 林柏泉, 杨威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(1): 45-49.
YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(1): 45-49.
- [19] 代志旭. 高压水力压裂技术在瓦斯综合治理中的研究与应用[J]. *煤炭工程*, 2010(12): 82-84.
DAI Zhixu. Research and application of high pressure hydraulic fracturing technology to mine gas comprehensive control[J]. *Coal Engineering*, 2010(12): 82-84.
- [20] 李波, 张城玮. 煤层瓦斯强化抽采水力增透技术综述[J]. *煤矿现代化*, 2018(1): 143-145.
LI Bo, ZHANG Chengwei. The summary of permeability improvement technologies by high pressure water for enhanced gas drainage in coal mines[J]. *Coal Mine Modernization*, 2018(1): 143-145.
- [21] 刘德成, 赵伟, 贾林林, 等. 高压水射流煤层割缝深度数值模拟与实验研究[J]. *能源与环保*, 2023, 45(10): 16-24.
LIU Decheng, ZHAO Wei, JIA Linlin, et al. Numerical simulation and experimental study on the depth of coal seam slotting by high pressure water jets[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(1): 16-24.
- [22] SONG D Z, WANG E Y, XU J K, et al. Numerical simulation of pressure relief in hard coal seam by water jet cutting[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2015, 8(4): 495-510.
- [23] ZHANG J G, WANG Y W, GE G L, et al. Calculation model of high-pressure water jet slotting depth for coalbed methane development in underground coal mine[J/OL]. *Applied Sciences*, 2019, 9(23). DOI: /10. 3390/app9235250.
- [24] 张笃学, 关景顺, 侯宝林, 等. 煤矿高压水射流卸压增透技术应用研究[J]. *能源技术与管理*, 2021, 46(4): 58-60.
ZHANG Duxue, GUAN Jingshun, HOU Baolin, et al. Application research on pressure relief and permeability improvement technology of high pressure water jet in coal mines[J]. *Energy Technology and Management*, 2021, 46(4): 58-60.
- [25] SHEN C M, LIN B Q, SUN C, et al. Analysis of the stress-permeability coupling property in water jet slotting coal and its impact on methane drainage[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 126: 231-241.
- [26] 屈花荣. 水力冲孔协同注气驱替强化瓦斯抽采技术及应用研究[J]. *煤炭工程*, 2025, 57(2): 106-114.
QU Huarong. Gas extraction enhancement technology with hydraulic flushing and gas-injection displacement[J]. *Coal Engineering*, 2025, 57(2): 106-114.
- [27] 温志强, 陈学习, 金霏阳. 高应力松软突出煤层定向长钻孔水力冲孔技术研究[J]. *煤炭技术*, 2024, 43(3): 154-159.
WEN Zhiqiang, CHEN Xuexi, JIN Feiyang, et al. Research on technology of directional long drilling combined with hydraulic punching for high stress soft outburst coal seam[J]. *Coal Technology*, 2024, 43(3): 154-159.
- [28] YIN W M, JING C, WU S C, et al. Gas extraction efficiency in soft coal seams through hydraulic dilation and hydraulic flushing technology[J]. *Energy and Fuels*, 2025, 39(25): 12043-12053.
- [29] 彭业升, 宋大钊, 何志龙, 等. 三软煤层水力冲孔布孔参数确定及优化[J]. *煤矿安全*, 2016, 22(3): 97-101.
PENG Yesheng, SONG Dazhao, HE Zhilong, et al. The parameters determination and optimization of hole arrangement to hydraulic flushing in the three soft coal seam[J]. *Coal Mine Safety*, 2016, 22(3): 97-101.
- [30] 李志强, 唐旭. 水射流卸压增渗及抽采瓦斯效果的渗流力学数值解[J]. *西安科技大学学报*, 2012, 32(4): 464-469.
LI Zhiqiang, TANG Xu. Stress relief and permeability increasing by water jet and numerical method of seepage mechanics equation for gas extraction effect[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2012, 32(4): 464-469.
- [31] 秦贵成, 李阳, 舒龙勇. 本煤层分段水力造穴钻孔抽采半径考察试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(8): 106-113.
QIN Guicheng, LI Yang, SHU Longyong. Investigation and experimentation research on extraction radius of segmented hydraulic cavitation borehole in mining-coalbed[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(8): 106-113.
- [32] LIU T, LIN B Q, FU X H, et al. Modeling coupled gas flow and geomechanics process in stimulated coal seam by hydraulic flushing [J/OL]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 142. DOI: 10. 1016/j. ijrmms. 2021. 104769.
- [33] LIU X, JIANG T X, LIN H X, et al. Morphological characteristics and permeability evolution of deep mine gas drainage boreholes[J/OL]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10. DOI: 10. 3389/feart. 2022. 906923.

- [34] 刘厅,林柏泉,赵洋,等.瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J].煤炭科学技术,2023,51(2):217-231.
LIU Ting,LIN Baiquan,ZHAO Yang,et al. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. Coal Science and Technology,2023,51(2):217-231.
- [35] 黄旭超.含瓦斯煤热-气-应力耦合模型的应用研究[J].煤炭科学技术,2018,46(增1):146-152.
HUANG Xuchao. Study and application on thermos-gas-mechanical coupling model of gas-bearing coal[J]. Coal Science and Technology,2018,46(S1):146-152.
- [36] WHITE C M,MUNGAL M G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,2008,40(1):235-256.
- [37] SABADINI E,ALKSCHBIRS M I. Drag reduction in polymer solutions based on splash visualization[J/OL]. International Journal of Fluid Mechanics Research,2021,48(6). DOI:10.1007/s00348-002-0404-0.
- [38] TOMS B A. Some observations on the flow of linear polymer solutions through straight tubes at large Reynolds numbers [C]//Proceedings of the 1st International Congress on Rheology,1949:135-141.
- [39] 王海林,李忠,朱均.聚合物添加剂对 Taylor-Couette 流的影响及减阻机理[J].润滑与密封,1999(2):31-32.
WANG Hailin,LI Zhong,ZHU Jun. Effect of polymer additives in Taylor-Couette flow and drag reduction mechanism[J]. Lubrication Engineering,1999(2):31-32.
- [40] 赵峰.深部调驱结合注水调整提高采收率技术研究与应用[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(1):10-12.
ZHAO Feng. Research and application of enhanced oil recovery by deep profile control and flooding combined with water injection adjustment[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality,2024,44(1):10-12.
- [41] VIRK P S. An elastic sublayer model for drag reduction by dilute solutions of linear macromolecules[J]. Journal of Fluid Mechanics,1971,45(3):417-440.
- [42] ZHAO M W,YAN X W,YAN R Q,et al. Synthesis and performance evaluation of water-in-water polymer drag-reducing agent[J/OL]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,2023,674. DOI:10.1016/j.colsurfa.2023.131935.
- [43] 崔强,张金功,薛涛.疏水缔合聚合物减阻剂的合成及流变性能[J].精细化工,2018,35(1):149-157.
CUI Qiang,ZHANG Jingong,XUE Tao. Synthesis and rheological properties of hydrophobic associated polymer as drag reducing agent[J]. Fine Chemicals,2018,35(1):149-157.
- [44] 彭飞.四元两性疏水聚合物的制备与流变学研究[D].上海:华东理工大学,2014.
PENG Fei. Study on the synthesis and rheology of a amphoteric hydrophobic quadripolymer[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology,2014.
- [45] 田伟.表面活性剂和高分子聚合物及其复合圆盘减阻实验研究[D].常州:常州大学,2021.
TIAN Wei. Experimental investigation on drag reduction of surfactant,polymer and their composite in a rotating disk apparatus[D]. Changzhou:Changzhou University,2021.
- [46] 黄俊.聚合物溶液沟槽壁面流动特性及旋转圆盘减阻实验研究[D].大庆:东北石油大学,2023.
HUANG Jun. Polymer solution groove wall flow characteristics and the experimental study of resistance reduction by rotating dices[D]. Daqing: Northeast Petroleum University,2023.
- [47] WARHOLIC M D,MASSAH H,HANRATTY T J. Influence of drag-reducing polymers on turbulence effects of Reynolds number,concentration and mixing[J]. Experiments in Fluids,1999,27(5):461-472.
- [48] MIN T,CHOI H,YOO J Y. Maximum drag reduction in a turbulent channel flow by polymer additives[J]. Journal of Fluid Mechanics,2003,492:91-100.
- [49] WANG G,WANG E M,HUANG Q M,et al. Experimental studies on the influence of sodium lauryl sulfate on seepage and wetting of water infusion of coalbeds[J/OL]. Fuel,2021,304. DOI:10.1016/j.fuel.2021.121355.
- [50] BEWERSDORFF H W,AULENDORF D. The behaviour of drag-reducing cationic surfactant solutions[J]. Colloid and Polymer Science,1988,266(10):941-953.
- [51] 安文博,王来贵.表面活性剂作用下煤体力学特性及改性规律[J].煤炭学报,2020,45(12):4074-4086.
AN Wenbo,WANG Laigui. Mechanical properties and modification of coal under the action of surfactant[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(12):4074-4086.
- [52] 毕瑞卿,程五一,陈学习.表面活性剂 OP-10 在煤层注水中的应用研究[J].矿业安全与环保,2018,45(5):42-46.

- BI Ruiqing, CHENG Wuyi, CHEN Xuexi. Study on application of surfactant OP-10 in coal seam water injection[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2018, 45(5): 42-46.
- [53] 鲁聪颖, 仲非, 袁振宇, 等. 表面活性剂界面化学实验改进: 实验与模拟融合的综合设计[J]. 大学化学, 2024, 39(3): 283-293.
- LU Congying, ZHONG Fei, YUAN Zhenyu. Experimental improvement of surfactant interface chemistry: An integrated design for the fusion of experiment and simulation[J]. University Chemistry, 2024, 39(3): 283-293.
- [54] 赵帅, 田雨, 郑皓轩, 等. 非离子表面活性剂在黏土矿物表面的吸附规律研究[J]. 应用化工, 2023, 52(9): 2728-2732.
- ZHAO Shuai, TIAN Yu, ZHENG Haoxuan, et al. Study on the adsorption law of non ionic surfactants on the surface of clay minerals[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(9): 2728-2732.
- [55] ROMERO VEGA G, GALLO STAMPINO P. Bio-based surfactants and biosurfactants: An overview and main characteristics[J/OL]. Molecules, 2025, 30(4). DOI: 10. 3390/ molecules30040863.
- [56] CHAI Y L, LI X W, GENG J F, et al. Mechanistic study of drag reduction in turbulent pipeline flow over anionic polymer and surfactant mixtures[J]. Colloid and Polymer Science, 2019, 297(7): 1025-1035.
- [57] 江海峰. 纳米流体有效导热系数理论模型及其中高温实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- JIANG Haifeng. Mathematical model and medium-high temperature experimental research of nanofluid effective thermal conductivity[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [58] 吕耀东. 聚合物/表面活性剂复配体系湍流减阻及失效机制的粗粒化分子动力学模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.
- LYU Yaodong. Coarse-grained molecular dynamic simulation study on the mechanism of turbulent drag-reduction and its failure of polymer/surfactant compound system[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2023.
- [59] 林媛, 师永杰, 亢志雄. 表面活性剂对煤润湿性影响的多尺度研究方法进展[J]. 物理化学进展, 2025, 14(2): 430-437.
- LIN Yuan, SHI Yongjie, KANG Zhixiong. Progress in multi scale research methods on the influence of surfactants on coal wettability[J]. Journal of Advances in Physical Chemistry, 2025, 14(2): 430-437.
- [60] 张建国, 刘依婷, 王满, 等. 基于分子动力学模拟的非离子表面活性剂对煤润湿性影响机制[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(5): 191-202.
- ZHANG Jianguo, LIU Yiting, WANG Man, et al. Influence mechanism of nonionic surfactant on coal wettability based on molecular dynamics simulation[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(5): 191-202.
- [61] 郝景润. 表面活性剂对煤润湿性的影响[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
- HAO Jingrun. Effect of surfactants on the wettability of coal[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016.
- [62] ZHANG Q T, WANG B, XING X Y, et al. Wetting characteristics and kinetic behavior of amphoteric ionic surfactant on the microscopic “solid-liquid” interface of coal: A case study[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 392: 123497.
- [63] 李振. 高矿化度对表面活性剂作用下煤层瓦斯解吸特性影响的实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI Zhen. Experimental study on the effects of high salinity on the desorption characteristics of coal seam gas under the action of surfactant[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [64] 张雪洁. 表面活性剂改性效应下煤岩表面润湿性及瓦斯解吸特征研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
- ZHANG Xuejie. Study on surface wettability and gas desorption characteristics of coal under surfactant modification effect [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [65] DUAN X Q, WANG W, REN F J, et al. Development and application of film-forming nano sealing agent for deep coal seam drilling[J/OL]. Processes, 2025, 13(3). DOI: 10. 3390/ pr13030817.
- [66] 曾飞. 基于界面协同设计的功能薄膜及其润湿性能调控[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2020.
- ZENG Fei. Wetting function regulation of thin films based on interface collaborative design[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2020.
- [67] 车道昌, 郭建英, 谢炎轩, 等. 润湿性调控界面纳米气泡生成及其对亲水性颗粒浮选的促进[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(8): 40-46.
- CHE Daochang, GUO Jianying, XIE Zhixuan, et al. The interfacial nano-bubbles generated by the wettability regulation and its promotion on the hydrophilic particles[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 40-46.

- [68] 栗褒,车道昌,郭建英,等.矿物表面润湿性调控对固液界面水化膜的影响[J].金属矿山,2023(3):135-139.
LI Bao,CHE Daochang,GUO Jianying,et al. Influence of surface wettability regulation on hydration films at the solid-liquid interface[J]. Metal Mine,2023(3):135-139.
- [69] 石钰,阳梦,薛俊华,等.表面活性剂-纳米颗粒复合体系对煤体润湿性影响研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(3):615-623.
SHI Yu,YANG Meng,XUE Junhua,et al. Study on the influence of surfactant-nanoparticles composite system on coal's wettability[J]. Journal of Mining and Safety Engineering,2022,39(3):615-623.
- [70] 柳先锋,李闯,聂百胜,等.酸性SiO₂纳米流体对煤体润湿性及瓦斯解吸的影响机理[J].煤炭学报,2025,50(7):3307-3321.
LIU Xianfeng,LI Chuang,NIE Baisheng,et al. Effect mechanism of acidic SiO₂ nanofluids on coal wettability and gas desorption[J]. Journal of China Coal Society,2025,50(7):3307-3321.
- [71] ARIF M,AWAN F U R,ZHANG H,et al. Coal wettability: A holistic overview of the data sets, influencing factors, and knowledge gaps[J]. Energy and Fuels,2024,38(16):15069-15084.
- [72] AHMAD H M,IQBAL T,KAMAL M S,et al. Influence of hydrophobically modified polymer and titania nanoparticles on shale hydration and swelling properties[J]. Energy and Fuels,2020,34(12):16456-16468.
- [73] ZHAO J J,LIN B Q,TIAN S X,et al. Wettability of the coal-water-Ar interface under coupled temperature and pressure conditions[J/OL]. Surfaces and Interfaces,2025,75. DOI:10.1016/j.surfin.2025.107770.
- [74] YI S X,YUAN M,LI B,et al. Optimization of acid modifier and its effect on the wettability of Guizhou anthracite[J/OL]. Scientific Reports,2025,15. DOI:10.1038/s41598-025-96938-z.
- [75] 贺涛.复合表面活性剂强化湿滤除尘器抑尘性能研究[J].陕西煤炭,2025,44(10):16-20.
HE Tao. Dust suppression performance of composite surfactant-enhanced wet scrubber[J]. Shaanxi Coal,2025,44(10):16-20.
- [76] 钱苏倩.粘结-润湿复合抑尘剂研发及抑制烟煤产尘特性实验研究[D].淮南:安徽理工大学,2025.
QIAN Suqian. Experimental investigation on bituminite dust suppression characteristics of bonding-wetting composite dust suppressant[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology,2025.
- [77] 邓海汶.基于界面聚合层的复合结构蒸馏膜抗盐垢与润湿效能及机制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.
DENG Haiwen. Anti-salt scaling and wetting efficacy and mechanism of composite structured distillation membranes based on interfacial polymerization layer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2025.

(责任编辑:齐敏华)

高应力隧道预应力梯度增阻让压锚杆(索) 支护性能试验研究

何廷全^{1,2}, 郭鸿雁³, 江星宏¹, 刘雪峰⁴, 张进鹏⁵, 贺敬平⁴

(1. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029; 2. 西南交通大学 计算机与人工智能学院, 四川 成都 611756;

3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司, 重庆 400067; 4. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271018;

5. 山东科技大学 资源学院, 山东 泰安 271002)

摘要:随着地下工程建设深度增大,地应力逐渐增加,由深部不良地质区域围岩应力集中和能量快速积聚等原因引发的围岩大变形和工程失稳越来越多。普通让压锚杆(索)让压量有限,难以适应高应力大变形围岩的让压吸能要求,极易发生破断;而高位恒阻让压支护结构虽然能实现大变形让压,但其初始让压敏感性较低,变形响应迟缓。本研究提出锚杆(索)协同的预应力梯度增阻让压支护方法,利用多级让压启动载荷构件组合,实现“低位-中位-高位”梯度增阻的高效让压。通过理论分析、数值模拟和工程应用,对比不同让压构件的让压效果和应力变化趋势,研究梯度增阻让压构件的力学特性。结果表明,不同尺寸的单泡让压构件在启动载荷和终止载荷上存在显著差异。在正交试验中各影响因素对让压构件性能的敏感性排序为:厚度>内径>高度>外径与中鼓直径比。对比发现,梯度增阻让压构件比恒阻让压构件具有更显著的让压效果和更均匀的应力变化趋势,展现出多级动态响应特性,避免了应力集中和构件响应迟滞的问题。该方法在塘达屯隧道试验段的应用效果显著,改善了围岩支护效果。

关键词:梯度增阻让压;高应力围岩;预应力;让压启动载荷;动态力学性能

中图分类号:TD353;U451

文献标志码:A

Experimental investigation on support performance of prestressed gradient resistance-increasing yielding anchor bolts/cables in high-stress tunnels

HE Tingquan^{1,2}, GUO Hongyan³, JIANG Xinghong¹, LIU Xuefeng⁴, ZHANG Jinpeng⁵, HE Jingping⁴

(1. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

2. College of Computer and Artificial Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

3. China Merchants Chongqing Communications Research and Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, China;

4. College of Water Resources and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;

5. College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an 271002, China)

Abstract: As the depth of underground engineering construction increases, the geostress increases gradually. Large deformation and instability of surrounding rock due to stress concentration and rapid energy accumulation in deep geological areas have become increasingly prevalent. With limited yielding capacity, conventional yielding anchor bolts/cables fail to meet the pressure-relief and energy-absorption requirements of high-stress large-deformation surrounding rock, leading to frequent fracture failures. Although high-position constant-resistance yielding support structures can accommodate large deformations, they have low initial yielding sensitivity and delayed deformation

收稿日期:2025-02-02

基金项目:广西科技计划项目(桂科 AB20238036);广东省科技计划项目(2021B1111610002)

作者简介:何廷全(1977—),男,广西岑溪人,正高级工程师,博士研究生,研究方向为岩土工程、公路建设与运营管理。

张进鹏(1992—),男,山东济宁人,副教授,博士,主要从事地下工程围岩控制和注浆材料研发方面的工作,本文通信作者。E-mail: zjpsdust@126.com