

钻探与注浆在矿井灰岩水害治理中的应用研究

贾俊杰

河南省资源环境调查三院有限公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要: 为解决某煤矿煤采区底板灰岩水害威胁, 保障矿井安全高效开采, 本文以该区域 II 7 孔组地面区域探查治理工程为研究对象, 系统阐述钻探施工、压水试验、注浆治理全过程质量控制, 结合地质录井、水文观测、构造揭露及注浆效果验证数据, 综合分析底板含水层水文地质条件与治理成效。治理后奥陶系灰岩最大突水系数 0.0945 MPa/m , 小于临界值 0.1 MPa/m 。研究证实, 高压分段注浆可有效充填地层裂隙与断层带, 显著提升底板隔水层稳定性, 为类似矿井灰岩水害治理提供技术参考。

关键词: 煤矿防治水; 底板灰岩水害; 地面定向钻探; 压水试验; 注浆加固

Application Research of Drilling and Grouting in Mine Limestone Water Hazard Treatment

Jia Junjie

Henan Province Resources and Environment Survey Third Institute Co., Ltd., China Henan Zhengzhou 450000

Abstract: To address limestone water hazards in the floor of a coal mining area and ensure safe and efficient mining operations, this study focuses on the exploration and remediation project of the II7 borehole group in the surface region. It systematically outlines quality control measures throughout the drilling construction, water pressure testing, and grouting treatment processes. By integrating geological logging data, hydrological observations, structural exposure analysis, and grouting effectiveness verification results, the study comprehensively evaluates the hydrogeological conditions of the floor aquifer and treatment outcomes. Post-treatment measurements show that the maximum water inrush coefficient of Ordovician limestone reaches 0.0945 MPa/m , significantly below the critical threshold of 0.1 MPa/m . Research confirms that high-pressure staged grouting effectively fills stratum fractures and fault zones, substantially enhancing the stability of floor waterproofing layers. These findings provide technical references for limestone water hazard management in similar mining operations.

Keywords: Coal mine water prevention and control; Floor limestone water hazard; Surface directional drilling; Water pressure test; Grouting reinforcement

0 引言

我国华北型煤田普遍受底板奥陶系、太原组灰岩岩溶水威胁, 高水压、富水性强、导水构造隐蔽等特点易引发突水事故, 严重制约煤矿安全生产。随着开采深度增加, 底板隔水层承受水压持续升高, 传统井下治理手段存在施工风险高、治理范围有限、效果难以验证等短板。地面区域定向钻探 + 高压注浆治理技术具有治理范围大、安全性高、可精准靶向构造带等优势, 已成为深部煤层底板水害防治的核心技术^[1]。

某煤矿煤采区受 F109、F104 等断层切割, 地层产状复杂, 底板 C39 灰、奥灰含水层富水性及导水性不均一, 突水风险突出。本文依托该采区 II 7 孔组地面探查治理工程, 从钻探施工质量、压水试验评价、注浆过程控制、治理效果验证等维度开展系统研究, 明确水文地质条件与治

理关键参数, 评估防治水效果, 为矿井安全回采提供地质保障与技术支撑。

1 工程概况

1.1 地质与水文地质条件

某煤矿煤采区地层走向近南北, 倾向东, 倾角 $5 \sim 15^\circ$, 平均 7° 。区域内构造以断层为主, 共揭露 F104、F109、F93-1 等 11 条断层, 其中 F109 正断层为主要控水性构造, 走向 NW, 倾向 SW, 落差 $5 \sim 15 \text{ m}$, 倾角 $70 \sim 75^\circ$, 延展长度 3510 m , 切割 1 煤至奥灰地层, 是底板水导升的潜在通道。

含水层主要为太原组 C39 灰含水层与奥陶系灰岩含水层, 富水性中等~强, 水压高, 与煤层底板间距小, 突水系数接近临界值。隔水层以砂质泥岩、泥岩为主, 局部受构造影响完整性差, 需通过注浆加固提升隔水性能^[2]。

1.2 工程施工概况

Ⅱ 7 孔组工程于 2023 年 12 月 23 日开工，2024 年 12 月 24 日野外竣工，历时 367d。完成 1 个主孔、15 个水平分支孔，总钻探工程量 9038.55m，其中一开 429.91m、二开 461.94m、三开水平段 8146.70m。采用“导向马达 + MWD 无线随钻测斜”定向钻进技术，分支孔间距≤ 58m，遵循“跳打”施工原则，实现注浆效果自我验证。工程核心目标为探查底板水文地质条件、充填裂隙与断层带、降低突水风险，确保奥灰含水层突水系数≤ 0.1MPa/m。

2 钻探施工质量控制

2.1 钻孔轨迹与跟层（深）控制

采用三级套管固井工艺，一开下入 Φ244.5mm 石油套管 429.91m，二开下入 Φ177.8mm 石油套管 891.85m，固井水泥均为 P·O42.5 水泥，保障孔壁稳定与分层止水。三开水平段采用无固相泥浆，泥浆比重 1.03~1.09g/cm³，粘度 32~45s，含砂量 0.1%~0.2%，避免封堵地层裂隙。

轨迹控制方面，所有分支孔水平偏差≤ ±2m，最大偏差 1.81m（Ⅱ 7-11 孔），满足定向精度要求。为满足突水系数评价标准，采用“局部跟深 + 全孔跟深”结合工艺，各分支孔跟层（深）率 100%，精准靶向 C39 灰底板砂岩含水层与 F109 断层带，确保治理层位全覆盖^[3]。

2.2 地质录井与水文观测

施工期间开展岩屑录井、自然伽马录井、钻时录井、钻井液录井四位一体综合监测。共采集岩屑 9028 个，随钻伽马录井每 2~5min 采集 1 组数据，钻时录井 9034 次，精准识别灰岩、砂岩、泥岩、煤等岩性界面。其中灰岩自然伽马值 < 40API，砂岩 40~60API，泥岩 80~110API，岩性识别准确率 100%。

简易水文观测共监测水位 86 次、涌水量 130 次、泥浆消耗量 1608 次。前期施工的 Ⅱ 7-1、Ⅱ 7-3 孔呈泥浆消耗状态，最大消耗量 2.40m³/h；后期施工孔受注浆影响转为涌水状态，最大涌水量 2.88m³/h，证实前期注浆有效充填地层裂隙，提升地层水压。

2.3 钻孔质量评价

一、二开孔深误差率分别为 0.23‰、0.22‰，三开孔深误差率最大值 0.60‰，均符合规范要求。岩屑录井、水文观测数据连续可靠，钻孔结构、轨迹精度、固井质量全面满足设计与合同要求，为后续注浆治理提供坚实基础。

3 压水试验质量评价

压水试验是评价地层渗透性、指导注浆参数设计的核心手段，本次工程分注前、注后两次开展，共完成压水试

验 40 次，其中注前 20 次、注后 20 次。

3.1 注前压水试验

注前压水遵循“小泵量起步、逐级加压”原则，压力稳定时长≥ 30min，水压≥ 含水层最大静水压力 2 倍。Ⅱ 7 孔组注前单位吸水率 0.00049~0.00151L/(min·m·m)，平均 0.00081L/(min·m·m)，整体渗透性较弱。其中 Ⅱ 7-11 孔第一段吸水率最高（0.00151L/(min·m·m)），与该孔段砂岩裂隙发育相关；Ⅱ 7-11 第三段、Ⅱ 7-12 第二段吸水率较低（0.00049L/(min·m·m)），地层相对致密。所有注前压水试验稳压达标，质量合格。

3.2 注后压水试验

注浆完成后开展注后压水试验，稳定时长均≥ 30min。注后单位吸水率 0.00021~0.000737L/(min·m·m)，较注前显著下降，降幅 8.15%~68.60%，其中 Ⅱ 7-14 孔降幅最大（68.60%）。注后吸水率远低于设计限值 0.01L/(min·m·m)，直接证实注浆浆液有效充填地层孔隙与裂隙，大幅降低地层渗透性。

为直观对比注浆前后地层渗透性变化，将典型分支孔注前、注后单位吸水率统计如下表 1。

表 1 Ⅱ 7 孔组典型分支孔注前与注后单位吸水率对比

孔号	注前单位吸水率 (L/(min·m·m))	注后单位吸水率 (L/(min·m·m))	下降幅度 (%)
Ⅱ 7-1	0.000577	0.00053	8.15
Ⅱ 7-2	0.00100	0.00047	53.00
Ⅱ 7-3	0.00087	0.00042	51.72
Ⅱ 7-11	0.00151	0.000737	51.19
Ⅱ 7-14	0.00086	0.00027	68.60
Ⅱ 7-15	0.00119	0.00057	52.10

由表 1 可见，注浆后各孔单位吸水率均出现明显下降，裂隙充填与封堵效果显著，达到防治水治理预期。

4 注浆治理工程质量控制

4.1 注浆材料质量管控

注浆材料采用 P·S·A32.5 矿渣硅酸盐水泥，符合 GB175-2007、GB175-2023 标准。实施全流程质量管控：运输管控拍照记录车牌、封签与时间；重量管控三方过磅签字，净重误差≤ 3‰；水质管控造浆用水 pH=7.7，SO₄²⁻=14.5mg/L；检测管控第三方送检 77 次，合格率 100%。

4.2 注浆施工控制

采用高压分段注浆工艺，注浆结束标准执行三控原则：终压达标、终量≤ 60L/min 且稳定≥ 30min、注后吸水率≤ 0.01L/(min·m·m)。施工中自动计量与人工测量双管控，每 30min 检测浆液比重，确保配比稳定。

Ⅱ 7 孔组累计注入水泥浆 61711.81m³、水泥 33697.199t，单位吸浆量 3.72t/m。注浆量呈现“前期大、后期小”规

律，各分支注浆情况如表二，先期施工的Ⅱ7-3、Ⅱ7-11、Ⅱ7-13孔吸浆量大，后期相邻孔受充填影响吸浆量显著降低，证实浆液扩散有效覆盖治理区域，无空白盲区，见表2。

4.3 构造段注浆治理

工程共9个分支孔揭露F109断层，钻遇井深1285~1907.3m。断层段注浆采用高压复注工艺，终压达13.0~16.87MPa，有效充填断层破碎带。注浆后断层段吸水率较注浆前下降51.19%~68.60%，泥浆消耗量无异常，证实断层带导水性得到根治。

5 注浆治理效果验证

5.1 岩屑验证

后续钻孔岩屑中普遍观测到水泥碎屑，最小可见距离34.34~39.47m，平均扩散半径36.91m，大于设计孔间距

表2 各分支注浆情况表

孔号	注浆段（m）	全孔段（m）	注浆量（m³）	水泥量（t）	注浆段单位吸浆量（t/m）	全孔段单位吸浆量（t/m）	分支孔单位吸浆量（t/m）
Ⅱ7-1	416.06	416.06	1141.01	512.703	1.23	1.23	1.23
Ⅱ7-3	503.00	545.15	4539.50	2598.129	5.17	4.77	5.17
Ⅱ7-14	669.00	707.15	4136.00	2332.505	3.49	3.30	3.49
Ⅱ7-2	376.06	471.15	3644.32	1917.392	5.1	4.07	5.10
Ⅱ7-15	347.50	366.65	1944.80	976.582	2.81	2.66	2.81
Ⅱ7-13	572.00	830.15	8446.50	4555.364	7.964	5.49	7.96
Ⅱ7-11（第一次）	244.11	290.73	4955.32	3457.224	14.16	11.89	8.66
Ⅱ7-11（第二次）	325.00	615.73	5076.32	2920.627	8.99	4.74	
Ⅱ7-11（第三次）	295.62	911.35	1904.32	1111.985	3.76	1.22	
Ⅱ7-12（第一次）	600.00	634.49	533.32	239.954	0.4	0.38	0.58
Ⅱ7-12（第二次）	298.06	932.55	527.32	277.81	0.93	0.30	
Ⅱ7-5	381.04	703.55	1880.22	871.302	1.58	1.24	2.29
Ⅱ7-9（加固）	318.85	318.85	323.32	215.635	0.68	0.68	1.58
Ⅱ7-9	1030.85	1030.85	3560.62	1912.716	2.69	1.86	
Ⅱ7-7	394.00	864.81	1846.52	830.793	2.11	0.96	2.11
Ⅱ7-10（第一次）	429.98	490.47	277.42	124.813	0.29	0.25	4.43
Ⅱ7-10（第二次）	288.18	778.65	6140.78	3057.02	10.61	3.93	
Ⅱ7-4	378.73	624.85	1524.32	830.513	2.19	1.33	2.19
Ⅱ7-6	382.55	778.53	6429.06	3509.429	9.17	4.51	9.17
Ⅱ7-8	384.73	930.15	2880.82	1444.703	3.76	1.55	3.76

表3 各分支孔最大突水系数表

孔号	隔水层厚度（m）	水压（MPa）	最大突水系数（MPa/m）	孔深（m）
Ⅱ7-1	83.41	7.81	0.094	1193.00
Ⅱ7-3	84.82	7.92	0.093	1334.00
Ⅱ7-14	79.05	7.47	0.0945	940.00
Ⅱ7-2	81.47	7.41	0.091	1260.00
Ⅱ7-15	81.08	7.46	0.092	911.00
Ⅱ7-13	84.12	7.65	0.091	1150.00
Ⅱ7-11	81.87	7.48	0.091	938.48
Ⅱ7-12	81.94	7.48	0.091	926.50
Ⅱ7-5	101.36	8.20	0.081	1487.00
Ⅱ7-9	82.25	7.40	0.090	891.85
Ⅱ7-7	98.76	8.28	0.084	1627.09
Ⅱ7-10	83.26	7.51	0.090	952.34
Ⅱ7-4	93.94	8.07	0.086	1404.08
Ⅱ7-6	95.33	8.19	0.086	1552.31
Ⅱ7-8	96.01	8.35	0.087	1716.74

58m 的 1/2, 证实浆液扩散均匀, 治理区域无死角。

5.2 水文动态验证

注浆期间, 周边水文观测孔水位波动幅度小, 无异常升高, 表明注浆未与深部含水层发生水力联系, 治理范围精准可控, 各分支孔施工过程中泥浆消耗与涌水状态变化可清晰反映注浆充填效果, 各孔受注段注浆后单位吸水率在 $0.00021 \sim 0.000737 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 之间, 满足关于注后受注段钻孔单位吸水率不大于 $0.01 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m} \cdot \text{m})$ 的技术要求。

5.3 突水系数评价

依据《煤矿防治水细则》, 采用突水系数法评价治理效果: $T=P/M$ 式中: T —突水系数 (MPa/m); P —实际水压 (MPa); M —隔水层厚度 (m)。

各分支孔最大突水系数如表三, 计算得出, 治理后奥陶系灰岩最大突水系数 $0.0945 \text{ MPa}/\text{m}$ (Ⅱ 7-14 孔), 小于临界值 $0.1 \text{ MPa}/\text{m}$, 所有孔段均达标, 底板隔水层安全性大幅提升, 见表 3。

5.4 综合效果评价

钻探质量轨迹精准、录井可靠、固井达标; 注浆质量材料合格、工艺规范、参数达标; 治理效果裂隙与断层充填密实, 渗透性显著降低, 突水风险消除; 工程结论 Ⅱ 7 孔组探查治理工程质量合格, 达到设计目标^[4]。

6 结语

此煤矿 Ⅱ 7 孔组地面定向钻探工程施工质量优良, 15

个分支孔轨迹偏差 $\leq 1.81 \text{ m}$, 跟层 (深) 率 100%, 综合录井与水文观测数据真实可靠, 精准揭示区域地质与水文地质条件, 共揭露 F109 断层 1 条, 9 个分支孔钻遇, 构造位置与地震解释吻合。注前、注后压水试验规范完成, 注后单位吸水率远低于设计限值, 地层渗透性大幅下降, 注浆充填效果显著。高压注浆有效充填 C39 灰底板砂岩裂隙与 F109 断层破碎带, 浆液扩散半径满足设计要求, 治理后奥灰突水系数 $\leq 0.0945 \text{ MPa}/\text{m}$, 符合安全开采标准。地面区域定向钻探 + 高压注浆技术可有效治理深部煤层底板灰岩水害, 具有安全性高、治理范围广、效果可验证等优势, 适合华北型煤田推广应用。

参考文献:

- [1] 国家矿山安全监察局. 煤矿防治水细则[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.
 - [2] 煤炭工业勘察设计协会. 煤矿床水文地质工程地质勘查规范[S]. 2020.
 - [3] 王经明等. 华北型煤田底板灰岩水害防治理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
 - [4] 李术才等. 煤矿深部开采底板水害超前探测与注浆加固技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(S2): 389-410.
- 作者简介: 贾俊杰 (1995.02-), 男, 汉族, 河南洛阳市新安人, 本科, 助理工程师, 研究方向: 地质钻探、煤矿水害治理。