

# Analysis and Treatment of Water Gushing Characteristics in Bottom Draw-out Tunnel Drilling-Based on the Case Study of a Coal Mine Accident

Xiangguo Feng

Zhengzhou Xianglong Geological Engineering Co., Ltd., Zhengzhou, Henan, 452370, China

## Abstract

To elucidate the formation mechanisms and root causes of drainage failures in coal mine floor drainage tunnels, this study investigates a floor drilling water inrush accident at a coal mine. Through integrated field surveys, theoretical analysis, and engineering case studies, we systematically examine the water inrush process, remediation procedures, and implementation outcomes, while conducting in-depth analysis of accident causes and failure mechanisms. The research reveals that the water source originated from Cambrian limestone karst fractured confined water. Mining activities triggered activation, expansion, and connectivity of floor fracture networks, forming composite water-conducting channels that sustained confined water influx into the tunnel. Guided by the comprehensive prevention principle of "detect, block, drain, discharge, and monitor" for floor water hazards, we propose targeted countermeasures incorporating accident lessons. These include optimizing sealing material techniques and quality assurance mechanisms, enhancing water control management systems, and improving technical support frameworks.

## Keywords

Coal mine safety; Floor water hazard; Borehole water inrush; Grouting treatment; Accident analysis; Water control management

## 底抽巷钻孔涌水特征分析与治理研究——基于某煤矿事故案例的深度剖析

冯相国

郑州祥隆地质工程有限公司, 中国·河南郑州 452370

## 摘要

为揭示煤矿底抽巷钻孔涌水灾害的形成机理与治理失效根源,以某煤矿底抽巷底板钻孔涌水事故为研究载体,采用现场勘查、理论分析与工程复盘相结合的方法,系统梳理涌水过程、治理流程及实施效果,深度剖析事故成因与治理失效机制。研究表明:本次涌水水源为寒武系灰岩岩溶裂隙承压水,工作面回采扰动引发底板裂隙网络活化、扩展与贯通,使多个施工钻孔形成复合型导水通道,导致承压水持续涌入巷道。基于底板水害“查、堵、疏、排、监”综合防治原则,结合事故教训提出针对性防控措施,优化封孔材料工艺与质量保障机制、完善防治水管理制度与技术支撑体系。

## 关键词

煤矿安全; 底板水害; 钻孔涌水; 注浆治理; 事故分析; 防治水管理

## 1 引言

随着煤炭资源开采逐渐向深部延伸,高承压水害已成为制约矿井安全高效开采的核心瓶颈之一。某煤矿底抽巷钻孔涌水事故,集中暴露出钻孔设计、施工封孔、质量验收、日常维护及应急处置等全流程的系统性缺陷,是研究底板钻孔水害形成机理、治理技术瓶颈及管理漏洞的典型工程案例。本文通过对该事故全过程进行深度复盘与剖析,明确涌水特征、水源属性及治理失效根源提出科学可行的防控对

策,旨在为提升深部矿井底板水害防治水平、保障煤炭资源安全高效开采提供技术支撑。

## 2 事故案例概况与涌水特征

2025年4月,该煤矿底抽巷开展收尾阶段物料回收作业时,作业人员发现底板注浆加固钻孔中2-验1孔出现涌水现象,初始涌水量达20m<sup>3</sup>/h,水质清澈、水压稳定,同时钻孔周边巷道岩壁出现多处淋水点,部分区域底板出现潮解现象。此时现场风、水管路已按计划拆除,应急供水、通风条件受限,现场指挥部紧急制定临时处置方案,组织人员铺设注浆管路实施堵水治理。后续隐患排查发现,该区域中2-2孔在竣工验收后曾出现过9m<sup>3</sup>/h的涌水现象,当时仅采

【作者简介】冯相国(1975—),男,中国河南洛阳人,助理工程师,从事煤矿灾害治理研究。

取临时封堵措施,未深入排查涌水根源及封孔质量缺陷,未彻底消除安全隐患。综合分析本次涌水事故,呈现出突发性强、涌水点分散、初始水量大、持续稳定性强的典型特征,给应急堵水治理工作带来极大挑战。

### 3 涌水治理过程与技术分析

#### 3.1 应急探查与初步治理

水源初步探查:结合钻孔布设位置、施工参数(方位角、倾角、孔深、套管下入深度及止水工艺等)进行全面核查,未发现钻孔设计与施工存在明显偏差;结合区域钻孔出水情况,呈现“部分钻孔终孔无水、部分钻孔持续出水”的不均匀特征,初步判定涌水水源为底板灰岩含水层水。但受应急条件限制,未能第一时间通过物探、连通试验等精准手段定位主要导水通道,导致初期治理缺乏针对性,为后续治理工作埋下隐患。

注浆准备与初期施工:4月27日至4月30日,现场完成注浆设备下井、管路连接及注浆材料筹备工作。5月1日起,针对中2-验1孔、中1-1孔、中1-验1孔、中1-4孔等出水及疑似出水点开展多点注浆作业,试图通过全面封堵控制涌水。

治理过程异常与关键发现:注浆作业期间,现场监测数据显示涌水量、注浆压力及注浆量呈现剧烈波动,同时邻近巷道底板出现明显鼓起变形(最大鼓起量达150mm),且存在严重浆液串流现象,表明底板岩层裂隙网络已形成贯通性导水通道。为精准定位核心导水通道,现场采用透孔试验、水位动态监测及连通性测试相结合的方法,最终确定中2-3孔为沟通深部寒武系灰岩水的核心导水通道。进一步分析表明,工作面采动扰动加剧了底板岩层裂隙的活化与扩展,使各钻孔通过次生裂隙相互连通,形成“钻孔-裂隙”复合型导水网络,导致涌水范围持续扩大。

#### 3.2 专项堵水方案制定、执行

方案技术设计:基于初步探查结果,结合《煤矿防治水细则》要求,制定专项堵水治理方案,核心治理思路为“先浅后深、重点突破、动态调控、分步验证”。具体实施流程为:首先对中2-3孔实施放水试验,精准测试涌水量、水压等水文参数;依据测试数据优化浆液配比(水灰比)及注浆参数;按“中2-2孔→中2-1孔→中2-3孔”的顺序实施分段注浆,先封堵浅部裂隙、加固巷道底板及二级套管以上层位,再集中力量封堵深部核心导水通道;注浆过程中同步监测底板变形量、注浆压力及涌水量变化,动态调整注浆参数。该方案针对性强、流程规范,符合复杂裂隙网络堵水治理的技术要求,同时也遵循了“三区”管理中缓采区需经勘查治理达标后方可恢复作业的原则。

现场执行与调整:方案执行过程中,因底板裂隙连通性强,出现严重浆液串流问题,无法按预设顺序注浆,现场被迫直接对中2-3孔强行注浆。后续又接连遭遇底板鼓起加

剧、钻孔周边漏水、注浆管路频繁堵塞、注浆泵损坏等故障,导致注浆作业多次中断,方案被迫反复临时调整,治理工作陷入被动。

治理效果与失效确认:本次集中堵水治理期间,仅中2-3孔单一钻孔就注入P.O42.5普通硅酸盐水泥57.3吨,累计注浆时长达72小时。但注浆结束静置48小时后,现场实测巷道淋水量仍维持在 $10\text{m}^3/\text{h}$ 左右,未达到“淋水点消失、涌水量控制在 $2\text{m}^3/\text{h}$ 以下”的治理标准,此次专项堵水治理宣告失效。治理过程充分暴露了复杂岩溶裂隙网络封堵的技术艰巨性,同时反映出施工单位对注浆过程的动态调控能力不足、应对复杂工况的应急处置水平欠缺等问题[1]。

### 4 涌水水源与事故原因深度剖析

#### 4.1 涌水水源确认

综合原始地质勘察资料、钻孔施工记录、涌水动态监测数据、注浆串浆范围及连通试验结果,采用“多源数据融合分析法”,最终精准判定本次涌水水源为寒武系灰岩岩溶裂隙承压水,水压值为 $3.2\text{MPa}$ ,水质类型为 $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ 型。工作面高强度回采产生的采动应力,超过底板岩层极限抗压强度,导致底板原始地质构造(裂隙、隐伏断层等)及钻孔施工形成的次生裂隙被活化、扩展并相互贯通,原本相对孤立的各钻孔通过复杂裂隙网络连成整体,最终形成以中2-3孔为核心、多钻孔协同导通的复合型导水通道,寒武系灰岩承压水沿该通道持续涌入底抽巷,形成稳定涌水。

#### 4.2 技术缺陷:注浆封堵失效的核心诱因

关键通道封堵不力:虽已精准定位中2-3孔为核心导水通道,但注浆过程中受浆液串流、管路堵塞、注浆泵损坏等突发故障干扰,注浆作业频繁中断,无法维持连续注浆状态。同时,现场对注浆压力(设计压力 $2.5\text{--}3.0\text{MPa}$ ,实际波动范围 $1.2\text{--}3.5\text{MPa}$ )与注浆流量的调控精度不足,导致浆液未能充分注入并弥散至深部岩溶裂隙网络,仅在钻孔周边形成局部封堵,核心导水通道未被完全封死,仍残留过水间隙,无法实现彻底堵水[2]。

浆液配比与工艺不当:未结合寒武系灰岩含水层水压、裂隙发育特征等水文地质条件,科学设计浆液配比及注浆工艺参数,现场操作人员仅凭经验随意调整浆液水灰比(设计水灰比 $1:1.2$ ,实际调整范围 $1:0.8\text{--}1:1.8$ )。浆液过稀时,流动性过强但凝结时间长,易被涌水冲刷带走,难以在裂隙内沉淀充填;浆液过稠时,流动性差、扩散半径小,易在钻孔及管路内凝结堵塞,无法渗透至深部细微裂隙,最终无法形成强度达标、密实度满足要求的结石体,难以实现有效封堵。

复注与质量检验机制缺失:普通硅酸盐水泥浆液存在收缩、析水沉降特性,注浆体凝固后易产生微小裂隙及空洞。但中2-3孔注浆结束后,未按规范要求实施二次及以上补浆加固作业,浆液沉降后在钻孔上部及裂隙顶端形成新的空洞与薄弱通道,产生“空腔效应”,导致堵水结构稳定性不足[3]。

### 4.3 管理漏洞：事故发生的根本土壤

过程监管松懈：钻孔施工（尤其是封孔关键工序）及注浆堵水作业期间，未严格执行“旁站监督”制度，现场技术指导与安全监管严重缺位。对施工人员是否按设计规范操作（如下套管深度、止水材料铺设、注浆压力控制、浆液配比执行等）缺乏有效管控，违规操作行为未能及时发现与纠正，导致钻孔封孔质量、注浆施工质量失控，为涌水事故发生埋下隐患。

质量验收流于形式：钻孔竣工验收环节，尤其是对涌水钻孔的封孔质量验收，缺乏科学有效的检测手段与严格的把关程序，未严格执行《煤矿井巷工程施工质量验收规范》要求。对中2-2孔验收后仍存在涌水的问题，未组织专业技术人员深入排查涌水根源及封孔质量缺陷，仅采取临时封堵措施后便判定验收合格并投入使用，未彻底消除安全隐患，为后续大规模涌水事故埋下重大伏笔。

## 5 基于底板水治理机理的防范措施研究

煤矿底板水害治理严格遵循“查清水文地质条件、源头治理为主、过程控制为辅、应急保障兜底”的综合防治机理，结合本次事故教训，从地质勘探、钻孔管控、封孔质量、制度建设等关键环节，提出系统化、针对性的防范改进措施，构建“技术+管理”双重防控体系，从源头遏制底板钻孔涌水事故发生。

### 5.1 强化钻孔全生命周期排查与动态监测

精细化地质勘探与钻孔设计：钻孔施工前，采用三维地震勘探、瞬变电磁勘探等综合物探手段，加密底板地质勘探点位，精准查明隔水层厚度、抗压强度、地质构造（断层、破碎带、陷落柱）及含水层富水性、水压、裂隙发育特征等关键参数，建立精细化水文地质模型。钻孔设计需主动避让构造薄弱带及含水层富水区，优化套管程序（增加套管下入深度、优化止水位置及止水工艺），采用“分级止水、分段封孔”设计，从源头降低钻孔沟通含水层的风险[4]。

### 5.2 构建科学封孔与质量保障体系

优化封孔材料与施工工艺：针对不同钻孔深度、不同含水层水压及裂隙发育条件，研发应用高性能复合注浆材料，优先选用超细水泥、化学浆液（如聚氨酯浆液）及添加膨胀剂、早强剂的水泥基复合材料，提升浆液流动性、渗透性、抗冲刷性及结石体强度与密实度。推广“两堵一注”、分段压力注浆、间歇式注浆等先进工艺，严格控制注浆压力、流量及浆液配比，确保浆液均匀弥散至裂隙网络，形成致密封堵结构。

建立强制复注与多元检验机制：对重要封堵钻孔（尤其是含水钻孔、穿层钻孔），强制执行二次及以上复注加固

程序，根据浆液性能科学设定复注间隔时间（首次注浆后24-48小时），填补浆液沉降形成的空洞及微小裂隙，确保封堵密实。封孔质量验收实行“多手段联合检验”制度，以压水试验为核心（关键指标：透水量 $\leq 0.5L/(min \cdot m)$ 、压力稳定性偏差 $\leq \pm 0.2MPa$ ），辅以钻孔电视、声波检测、钻孔取芯等方法，验收不合格的必须立即复注整改，直至达标后方可投入使用。

### 5.3 完善防治水管理制度与技术支撑

健全制度体系与责任落实：结合《煤矿防治水条例》《煤矿安全规程》要求，制定《矿井底板钻孔防治水管理实施细则》，明确地测、生产、安监、施工等部门及各岗位人员的具体职责，构建“横向到边、纵向到底”的责任体系。将钻孔施工、封孔质量、注浆治理、质量验收等关键环节纳入安全生产考核体系，强化制度执行力，对违规操作、监管缺位等行为严肃追责问责[5]。

提升注浆治理专业化水平：组建专业化注浆施工队伍，配备大流量、高压、耐磨损的先进注浆设备及精准监测仪器，定期开展设备维护与校准，确保设备性能稳定。注浆方案需基于详实的水文地质数据与动态监测结果精细化设计，明确浆液类型、配比、注入量、压力阈值及施工顺序，注浆过程中实时监测流量、压力及串浆情况，配备专业技术人员现场指导，提升动态调控能力，确保注浆效果。

## 6 结语

未来矿井底板水害防控工作，需聚焦精细化地质勘探与风险预判、钻孔施工标准化与智能化、高效注浆材料与工艺研发、严格的封孔质量检验制度及完善的责任体系构建四大核心，全面提升从业人员安全技术素质，形成“技术防控+管理管控”双重保障体系，才能有效应对深部开采面临的复杂水害威胁，筑牢煤矿安全生产底板防线。同时，需严格落实《煤矿防治水“三区”管理办法》要求，通过动态更新风险区域划分、强化分级管控措施，实现水害风险的精准防控。

### 参考文献

- [1] 国家矿山安全监察局. 煤矿防治水“三区”管理办法（矿安〔2022〕85号）[Z]. 2022.
- [2] 武强, 张传信, 刘天乐. 深部煤矿底板水害形成机理与防控技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1652-1665.
- [3] 顾大钊, 王双明, 范立民. 煤矿带压开采底板水害防控理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [4] 李木才, 李利平, 刘斌. 复杂岩溶裂隙水害注浆封堵材料与工艺研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(8): 1561-1573.
- [5] 煤矿安全规程编写组. 煤矿安全规程（防治水部分）[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2022.