



脉状裂隙导水型岩溶陷落柱高压注浆机理及应用

钱自卫 鹿存金 巩起立 吴现帅 王炳柱

引用本文：

钱自卫, 鹿存金, 巩起立, 等. 脉状裂隙导水型岩溶陷落柱高压注浆机理及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 292–303.
QIAN Ziwei, LU Cunjin, GONG Qili. Mechanism and application of high pressure grouting in karst collapse column with vein-like water channel[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 292–303.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2024-0616>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤层底板隐伏陷落柱突水机理及工程应用

Water inrush mechanism and engineering application of concealed collapse column in coal seam floor
煤炭科学技术. 2024, 52(S2): 142–152 <https://doi.org/10.12438/est.2022-1364>

叠层多分支水平井精准建造陷落柱堵水塞技术

Technology of accurately constructing collapse column water plugging plug in laminated multi branch horizontal wells
煤炭科学技术. 2022, 50(7): 244–251 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a8271762-7c31-444a-a722-f7a9ab2d4ba9>

深部高地应力巷道组合锚索高压注浆技术研究

Study on high-pressure grouting technology with combined anchor and cable under high ground stress roadway
煤炭科学技术. 2020, 48(12) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/52f7d592-479a-4e5f-9e62-6983e9a9e572>

西南岩溶矿区采动影响下溶洞对导水裂隙发育规律研究

Research on the development law of karst caves on water conducting fractures under the influence of mining in Southwest Karst Mining Areas
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 106–117 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0409>

煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术

Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor
煤炭科学技术. 2023, 51(7): 15–23 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2023-0493>

岩溶裂隙发育地层帷幕注浆材料性能及适用性研究

Study on performance and applicability of curtain grouting materials in karst fractured stratum
煤炭科学技术. 2020, 48(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/75ec48c9-e210-447e-b999-3f51f9564063>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

地球科学与工程



钱自卫, 鹿存金, 巩起立, 等. 脉状裂隙导水型岩溶陷落柱高压注浆机理及应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 292-303.

QIAN Ziwei, LU Cunjin, GONG Qili, et al. Mechanism and application of high pressure grouting in karst collapse column with vein-like water channel[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 292-303.

移动扫码阅读

脉状裂隙导水型岩溶陷落柱高压注浆机理及应用

钱自卫¹, 鹿存金¹, 巩起立², 吴现帅³, 王炳柱¹

(1. 中国矿业大学 资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116; 2. 河南能源鹤壁煤业(集团)有限责任公司第九煤矿, 河南 鹤壁 458000;
3. 中矿地科技术研究院(江苏)有限公司, 江苏 徐州 221000)

摘要: 岩溶陷落柱在我国华北煤田广泛发育, 已引发多起矿井严重突水事故, 开展陷落柱导水特征及注浆机理研究, 对于保证煤炭资源安全开采具有现实意义。本研究根据陷落柱导水通道特征、陷落柱柱体结构形式及探查钻孔出水特征, 结合典型陷落柱探查及治理案例, 在传统的松散间隙导水、微细孔裂隙渗透导水模式基础上, 总结提出了陷落柱脉状裂隙导水的新模式, 给出了此类陷落柱的水害致灾形式。研究发现此类陷落柱柱体一般较为密实, 软硬碎石组合不均匀分布, 碎岩部分间隙未被破碎泥化物、砂、矿物结晶所充填, 残存不规则扁平裂隙状或近似圆孔集中导水通道; 初步分析认为柱体的不均匀性致使空隙渗流及结晶的差异是此类陷落柱形成的主要原因。开展了脉状裂隙导水型陷落柱透明可视化注浆模型试验, 直观观测了单孔高压注浆对多个导水通道的治理过程, 并结合相关理论, 提出了涉及孔道渗流注浆、劈裂注浆及裂隙挤密闭合等复合形式的脉状裂隙导水型陷落柱高压注浆机理, 以实现单注浆孔对多条脉状裂隙导水通道的综合控制。研究成果在埋深超过600 m、奥灰水压7.67 MPa、平面面积达到5 200 m²的鹤煤九矿9-6导水陷落柱的注浆治理中应用。依据相关标准设计了注浆控制段跨度, 通过巷道揭露及钻孔出水情况可表征陷落柱的脉状裂隙导水特征, 设计采用井下对抄布孔、分层布孔、分段注浆等实现了对注浆区域的全覆盖, 分析注浆压力响应曲线可指示浆液的渗流、劈裂、挤密等过程, 通过串浆情况、物探及微震监测、注水试验分析综合评判了陷落柱的治理效果, 目前受陷落柱影响工作面已安全回采。研究成果为脉状裂隙导水型陷落柱的治理提供了理论及技术支撑。

关键词: 岩溶陷落柱; 脉状导水通道; 高压注浆; 复合注浆机理

中图分类号: TD745 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2025)08-0292-12

Mechanism and application of high pressure grouting in karst collapse column with vein-like water channel

QIAN Ziwei¹, LU Cunjin¹, GONG Qili², WU Xianshuai³, WANG Bingzhu¹

(1. School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. No.9 Coal Mine, Henan Energy Hebi Coal Industry (Group) Co., Ltd., Hebi 458000, China; 3. Research Institute of Mining Geology (Jiangsu) Co., Ltd., Xuzhou 221000, China)

Abstract: Karst collapse column is widely developed in north China coal field, which is a serious defect of coal measure strata and has caused many serious water inrush disasters. It is of practical significance to study the characteristics of water conduction and grouting mechanism of collapse column for ensuring the safe mining of coal resources. According to the characteristics of collapse column water channel, the structure form of collapse column and the characteristics of exploration borehole water, combined with typical investigation and treatment cases of sink column, on the basis of the traditional mode of loose gap water conduction and micro-pore fracture infiltration

收稿日期: 2024-05-10 策划编辑: 常 琦 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.12438/cst.2024-0616

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1805490); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2020ZDPYMS11)

作者简介: 钱自卫(1986—), 男, 安徽蒙城人, 副教授, 博士(后)。E-mail: 15896427691@163.com

water conduction, a new mode of vein fracture water conduction of collapse column is summarized and proposed, and the form of water damage caused by such collapse column is given. It is found that the column body of this kind of collapse column is generally dense and distributed by the combination of hard and soft gravel, but the distribution is not uniform. The gap of the broken rock is not filled by the crushed mud, sand and mineral crystallization, and there are irregular flat fissure or approximately round hole concentrated water channels. The primary analysis shows that the main reason for the formation of such collapsed columns is the difference of porous flow and crystallization caused by the inhomogeneity of the columns. The transparent and visual grouting model test of the vein fissure water-guiding collapse column was carried out, and the treatment process of single-hole high-pressure grouting on multiple water guiding channels was visually observed. Combined with relevant theories, the high-pressure grouting mechanism of the vein fissure water-guiding collapse column involving the composite forms of porous grouting, split grouting and fissure squeezing and sealing was proposed. In order to realize the comprehensive control of the single grouting hole on the water channel of multiple vein cracks. The research results have been applied to the grouting treatment of 9–6 water-guiding collapse column in Hemei nine Mine, which is buried more than 600 m, has a water pressure of 7.67 MPa and a plane area of 5 200 m². According to relevant standards, the span of grouting control section is designed, and the water conductivity characteristics of the vein fracture of the collapse column can be characterized by the exposure of the roadway and the water discharge from the drilling. The design adopts the matching holes, layered holes and segmentation grouting to achieve full coverage of the grouting area, and the analysis of the grouting pressure response curve can indicate the process of seepage, splitting and compaction of the slurry. The treatment effect of the subsidence column is evaluated comprehensively through the grouting situation, geophysical exploration, microseismic monitoring and waterflood test analysis. The working face affected by the subsidence column has been safely mined. The research results provide theoretical and technical support for the treatment of the vein fracture water-conducting collapse column.

Key words: Karst collapse column; vein-like water channel; high pressure grouting; compound grouting mechanism

0 引言

岩溶陷落柱是我国华北煤田广泛发育的一种极富区域特色的地质现象,是煤系下伏灰岩中溶洞顶部覆岩发生塌陷所形成的不规则柱状或锥状陷落体^[1]。陷落柱多根植于厚层状灰岩层中,柱体可作为强导水通道沟通富水灰岩,最大突涌流量可达2 053 m³/min(1984年,范各庄矿2171综采工作面)^[2],已引发数十起严重采掘突涌水事故,其中造成淹井的有十余起,陷落柱突水已成为煤矿最严重的灾害形式之一^[1]。

针对我国华北煤田陷落柱的特殊地质环境及岩体结构,尹尚先、武强、王家臣、许进鹏等学者从地质条件、发育及分布规律、突水模式、探查等多方面开展了大量研究,取得了一系列重要成果^[1–10]。相关研究认为华北陷落柱在中生代后期华北地台形成以后开始发育,多数在燕山期由于失去相应的水动力条件而结束发育^[11];陷落柱多根植于奥陶系及寒武纪灰岩,形成于古(或现代)岩溶径流带上^[1]。目前我国揭露的岩溶陷落柱总数已超过10 000个^[12–13],其中90%左右集中分布在山西汾河沿岸和太行山东麓的一些煤田内。华北各煤矿区实际揭露统计发现,陷落柱平面形状各异,其中以椭圆状最多;剖面形状呈不规则状者居多,柱体高度、大小各异,中心轴复杂多变^[1–3,5,14–16]。陷落柱突水模式分为顶底部突水和侧壁突水模式,以及薄板理论、剪切破坏理论、厚

壁筒突水和压裂突水等4种子模式,并已建立了各子模式突水判据^[1,7,17]。目前陷落柱探查主要采用基础地质分析、物探、化探、钻探等多方法综合进行。

从目前揭露的众多陷落柱资料分析,华北煤田的陷落柱95%以上不导(含)水,只有不到0.5%形成突水灾害^[1,18]。根据陷落柱充填物质特征、压实胶结程度以及导水性,可将其划分为全充水强导水型、边缘充水导水型和不导水或微弱导水疏干型等3种类型,在地下水系统中相应地概括为垂向管道、主干裂隙或垂向越流介质、隔水体或无影响介质^[1]。注浆是目前陷落柱治理的主要手段,其防治机理主要是截断贯通渗流通道,已在多个导水型陷落柱水害预防及突水灾害的治理中成功应用。陷落柱注浆治理方案一般根据陷落柱的导水形式及治理质量要求综合确定,比如针对全充水或导水型陷落柱采用巷道截流、直接封堵、“止水塞”、“三段式”、“穿裙带帽”、返流注浆、引流注浆、区域治理等技术方法,封堵陷落柱导水通道;边缘导水型陷落柱可以采用放水疏干或注浆封堵加固边缘裂隙的方法进行治理^[1,19–25]。另外,随着近年定向钻探技术在煤矿水害治理领域广泛应用,大幅提高了陷落柱探查与治理的效率及效果^[25–27]。

注浆压力为浆液渗流扩散提供动力,是影响注浆效果的重要因素。根据相关注浆规程,矿山预注浆压力一般为静水压力的2~4倍^[28],但对于可注性较差的孔隙、微细裂隙、密实破碎岩体注浆压力往往

会快速升高至设计终压,单孔注浆量偏小,需通过加密布孔以达到注浆效果。随着近年注浆装备能力的提升及实践经验的积累,高压注浆被逐步应用,大幅提升了注浆量及治理效果。比如平朔井工一矿19108工作面2号陷落柱注浆终压达到静水压力的10倍以上^[29];潘集二矿12123工作面隐伏陷落柱治理核算至注浆目的层的注浆终压达到14 MPa^[29];某矿Ⅱ21026工作面采用近水平孔钻进技术对其隐伏陷落柱进行预注浆治理,注浆压力达到15~25 MPa^[30];宜昌高峰磷矿4条立井、钟祥莲花山磷矿3条立井工作面分段预注浆治理破碎岩体注浆终压均超过30 MPa;上述案例注浆均起到理想治理效果。总体看来,当前陷落柱注浆治理工艺技术已基本成熟,但对陷落柱注浆浆液运动规律与作用机理的研究较少^[31],对于高压注浆机理缺乏研究。虽然部分矿井通过超前预注浆实现了采掘通过陷落柱,但陷落柱内部充填物性质及导水模式复杂多变,注浆扩散过

程控制难度极大,陷落柱注浆治理理论研究远滞后于工程实践。

河南鹤煤九矿9-6陷落柱规模较大,根部的奥灰水压高,为导水性陷落柱,在探查及注浆治理过程中,发现该陷落柱导水形式具有特殊性。本研究基于该陷落柱导水形式提出了脉状裂隙导水的新模式,以此制定并实施了高压注浆治理方案,分析了相关机理,可为类似陷落柱水害防治提供借鉴。

1 陷落柱柱体脉状裂隙导水模式及机理

1.1 陷落柱导水模式

陷落柱柱体不同导水模式如图1所示,根据陷落柱导水与否,可分为不导水陷落柱及导水陷落柱;根据已探测、揭露的陷落柱柱体的出水形式,其导水模式可分为松散间隙导水型、微细孔裂隙渗透型、脉状裂隙导水型等3种形式。

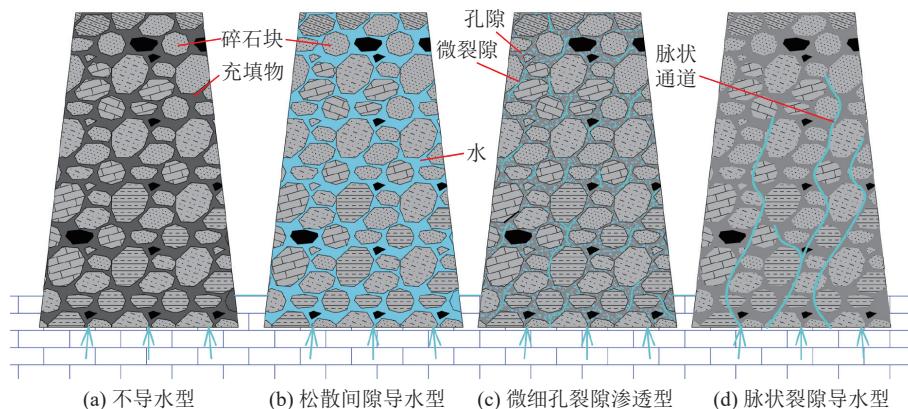


图1 陷落柱柱体导水模式示意
Fig.1 Schematic diagram of water conduction mode of karst collapse column

1) 松散间隙导水型陷落柱的柱体一般以硬岩碎块为主,岩石水稳定性较好,岩块之间充填物相对较少,陷落柱导水性强。一旦误揭或隔水层厚度不足时易引发重大突水灾害,比如2010年内蒙古骆驼山煤矿16煤大巷陷落柱,初始突水流量激增,造成淹井^[32]。微细孔裂隙渗透型陷落柱柱体一般由破碎较为严重的碎石组成,硬岩碎块含量较高,柱体压实性较好,呈现未胶结或半胶结成岩状态,微细孔裂隙较发育。探巷揭露陷落柱多呈现大面积淋水状,主要致灾模式为随着渗透持续,柱体内颗粒流失,渗透性逐渐增大,发生渗流转换,并最终演化为水害事故,比如2017年安徽淮南潘集二矿12123工作面巷道底板隐伏陷落柱出水流量变化符合此类陷落柱突水的基本特征^[26]。两类陷落柱探查钻孔出水特征如图2所示,

钻孔刚进入松散间隙导水型陷落柱时出水量急速增大,继续钻进水量缓慢增加,且多伴随钻孔喷涌现象;微细孔裂隙渗透型陷落柱随着探孔进入柱体深度增大钻孔出水量增加,但钻孔整体水量较小。

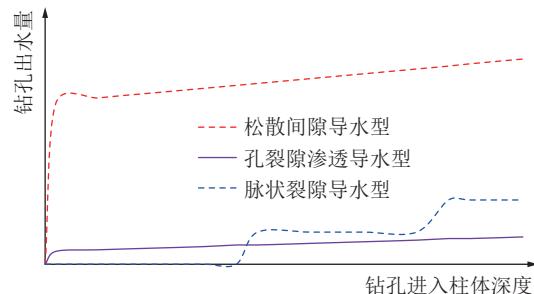


图2 不同导水模式陷落柱探查钻孔水量变化曲线
Fig.2 Water flow rate of collapse column exploration borehole with different water conduction modes

2) 脉状裂隙导水型陷落柱的柱体介于松散孔隙型与不导水型柱体结构形式之间, 柱体一般较为密实, 软硬碎石组合分布, 但分布不均匀, 碎岩部分间隙未被破碎泥化物、砂所充填, 残存不规则扁平裂隙状或近似圆孔集中导水通道, 此类通道一般延伸较长, 但横向宽度较小, 类似脉状。巷道揭露此类柱体多出现集中出水点, 钻孔探测此类柱体时当沟通导水通道则出现突然性出水现象, 继续钻进如未沟通其他通道, 则钻孔水量一般较稳定(图2)。当采掘揭露陷落柱时, 往往表现为出水流量逐渐增大, 集中出水通道被冲刷扩展, 并最终演化为突水事故。比如1997年江苏徐州张集煤矿21号煤轨道下山揭露陷落柱初期的集中出水及后期的水量变化基本符合脉状裂隙导水型陷落柱的水害演化特征^[33]。脉状裂隙导水型陷落柱较其他两类导水型陷落柱的突涌水危险性更大, 其他两类陷落柱柱体富水相对均匀, 当前物探、钻探手段均能较好控制, 并针对性地采取防治措施; 而脉状导水型陷落柱富水性不均, 探查钻孔及物探手段存在无法探查出脉状导水通道的工况, 误判陷落柱的导水状态, 后期采掘揭露导水通道可能引发突涌水事故。

陷落柱的导水模式也可能是上述模式的复合形式。另外, 根据其他学者的研究成果, 陷落柱横向、纵向也呈现一定的分带特征^[5,34], 主要受制于应力(柱体、边界影响带、非影响带)及柱体岩层整体冒落特性, 比如厚层状的硬岩、软岩组合, 即同一陷落柱在纵向上可能存在不导水、孔隙型导水及脉状通道导水等多个分带。

1.2 脉状裂隙导水型陷落柱成因探讨

陷落柱体内充填物及其状态特征对陷落柱的导水性影响极大, 充填物的特征决定了导水通道, 也间接地限制了其一定条件下的导水性^[1,12]。图3为鹤煤九矿9-6陷落柱高位巷道揭露柱体图片, 该陷落柱整体较密实, 弱胶结, 柱体孔洞裂隙发育, 延伸距离大, 直径可达100 mm以上, 为典型的脉状裂隙导水型陷落柱。如图4可见9-6陷落柱相对微细空隙被次生的方解石结晶充填, 渗透性大幅减弱。根据9-6陷落柱揭露情况, 结合该陷落柱的地质条件, 分析认为脉状裂隙导水型陷落柱成因为: 陷落柱形成初期, 柱体空隙发育及连通性存在不均匀性, 为沟通各含水层的主要通道。在长期的渗流过程中, 由于导水性的差异, 相对弱渗的空隙通道阻渗性较强, 渗流速度慢, 隙间方解石结晶, 渗透性逐渐减弱(图4); 而相对畅通的空隙通道阻渗性差, 水逐渐向主要脉

状通道汇集, 水流速度快, 孔壁方解石结晶能力差, 最终形成脉状导水的模式。



图3 巷道揭露9-6陷落柱空洞发育情况
Fig.3 Cavity development in the collapse column

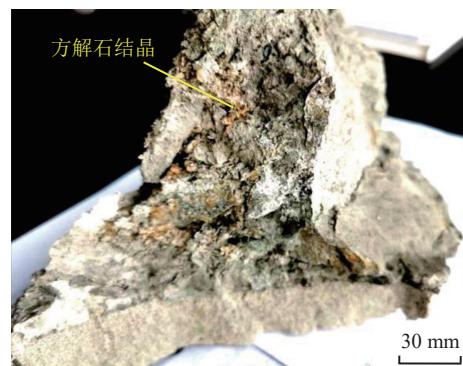


图4 9-6陷落柱柱体空隙次生方解石结晶充填
Fig.4 9-6 collapse column void is filled with calcite crystals

2 脉状裂隙导水通道高压注浆机理

2.1 脉状导水通道注浆模型试验

为研究脉状裂隙导水型岩溶陷落柱的注浆机理, 设计了透明化试验系统, 开展了该类陷落柱高压注浆演示试验, 以此揭示脉状裂隙导水型陷落柱高压注浆机理。

1) 试验系统。脉状导水通道注浆试验系统如图5所示, 包括注浆系统、压力监测系统、观测系统、陷落柱模型及管路。陷落柱模型由厚度为20 mm的透明亚克力板制作, 整体呈梯形状, 内部装样厚度27 mm、高710 mm、底边长380 mm、顶边长235 mm。采用鹤煤九矿9-6陷落柱柱体试样经进一步破碎制作陷落柱材料, 模型材料中预设开度为4 mm的多条脉状裂隙, 模型底部100 mm段采用粒径为0.5~2.0 mm的粗砂模拟岩溶含水层。

注水系统由HK-400型微量注射泵及注射器组成, 通过设定注射器活塞推进速率来设定注浆流量。注浆压力监测系统由压力变送器及数据采集仪组成, 压力传感器的量程为0~250 kPa, 精度0.01 kPa; 数据采集仪器型号为MIK-R5001D型18通道的自动

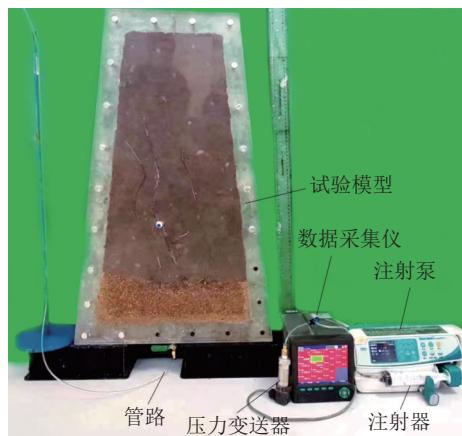


图 5 陷落柱注浆试验系统
Fig.5 Collapse column grouting test system

数据采集仪; 压力传感器通过量测注射器内在压力

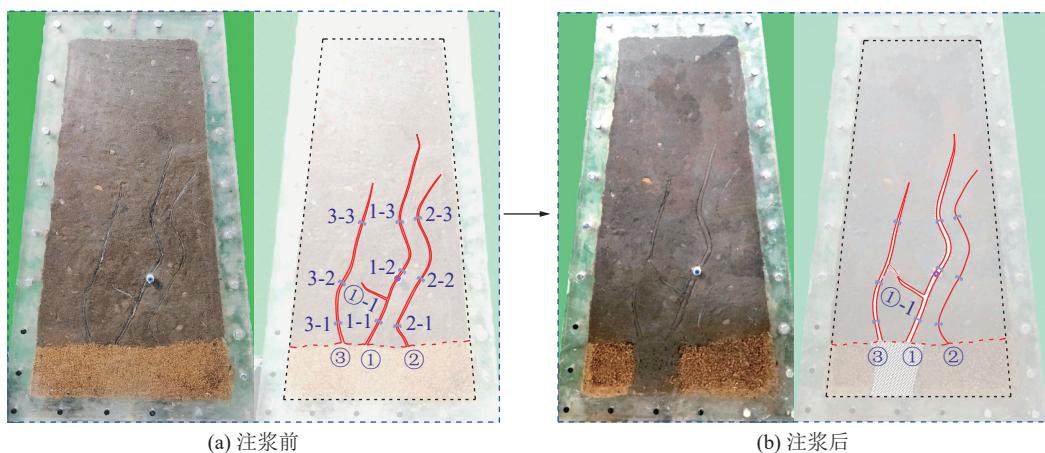


图 6 注浆前后导水通道对比
Fig.6 Comparison of water channel before and after grouting

如图 6 所示, 每条裂隙通道设置 3 个开度观测点, 注浆过程中每 30 s 测量一次各点的变化量。试验过程中注浆压力变化及各监测点的变形曲线如图 7 所示, 注浆初始阶段注浆压力缓慢增加, 裂隙通道①被填充并开始扩张, 在试验进行至 410 s, 注浆压力升高至 49.8 kPa 时迅速降低, 现场观测发现通道①-1 发生劈裂沟通了通道③, 随着通道③逐渐被注浆充填, 注浆压力快速回升并继续增大, 通道②及周围岩土体被进一步挤密压缩。注浆结束后裂隙通道①扩张了约 4.5 mm, 裂隙通道②被挤密闭合, 裂隙通道③扩张了约 2.0 mm。通过注浆模型试验发现, 脉状导水通道陷落柱高压注浆同时存在孔道渗流注浆、劈裂注浆及裂隙挤密闭合等复合形式。

2.2 脉状导水通道高压注浆机理

脉状裂隙导水型陷落柱注浆治理的最理想效果是所有通道导水能力消失, 可为通道的浆液充填、通

来监测注浆压力; 试验观测通过摄像机进行。管路采用外径为 4.0 mm 透明硅胶管。

试验时陷落柱模型竖直放置, 先对模型进行注水使其充分饱和, 采用定流量方式进行注浆试验, 流量为 25 mL/min, 注浆压力采集频率为每秒一次。

2) 试验结果分析。脉状裂隙导水通道注浆前后对比如图 6 所示, 在注浆初期, 浆液在与注浆管直接沟通的裂隙通道①内渗流; 随着注浆压力提高, 在裂隙通道①-1 裂隙的尖端发生劈裂, 从而沟通裂隙通道②, 浆液则沿着劈裂裂隙进入裂隙通道③对其进行充填, 并且浆液沿着裂隙通道向下方含水层渗透; 与此同时随着注浆压力的提高, 裂隙通道①内浆液积聚, 通道扩张, 产生挤密效应, 造成邻近的裂隙通道②被压缩闭合。

道分段堵塞或闭合。当前岩土体静压注浆机理主要有渗透(流)注浆、劈裂注浆、挤密注浆等 3 种, 注浆机理如图 8 所示。渗透(流)注浆为低压注浆, 主要针对孔隙、裂隙发育的岩土体; 当注浆压力超过岩土体的主应力及黏聚力之和时, 被注岩土体将发生劈裂, 浆液沿着劈裂通道渗流, 最终以浆脉的形式加固岩土体; 当浆液渗流扩散受到限制, 黏稠的浆液在高注浆压力作用下产生聚集, 将对周边岩土体产生挤密加固作用。

采用裂隙低压渗流注浆治理脉状裂隙导水型陷落柱质量无法保障, 主要是容易残留脉状通道, 考虑到工程成本及工期, 又不可能通过超高密度钻孔进行全部脉状通道控制。根据模型试验成果及现场工程实践, 总结提出采用高压注浆方式进行脉状导水通道治理, 主要涉及孔道渗流注浆、劈裂注浆、裂隙挤密闭合及渗透注浆复合机理。

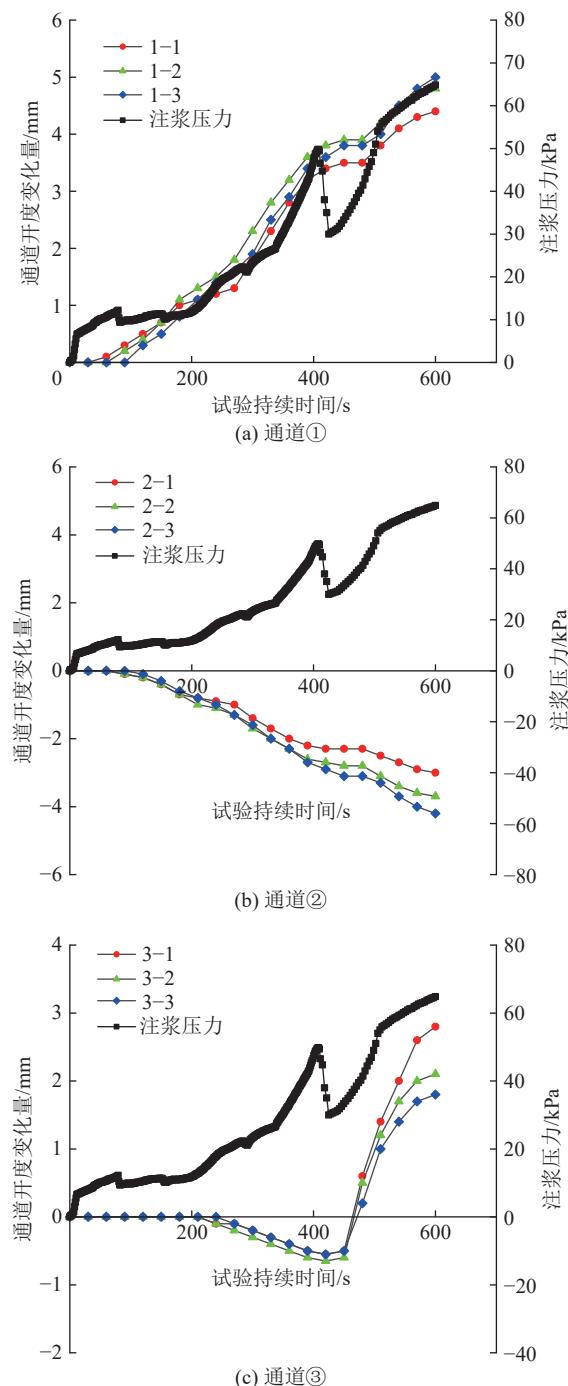


图 7 试验过程注浆压力及监测点裂隙开度的变化曲线

Fig.7 Deformation curves of grouting pressure and each monitoring point during grouting

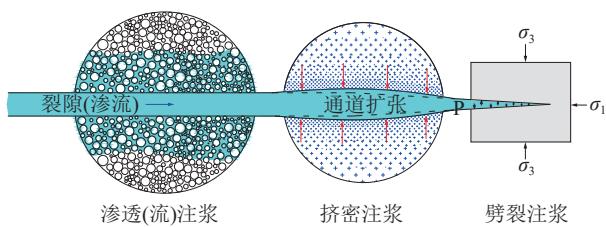


Fig.8 Schematic diagram of grouting mechanism of rock and soil mass

脉状导水通道高压注浆机理如图9所示,假设陷落柱柱体内有多条互不连通脉状导水通道,当注浆孔施工导通导水通道①,则在注浆初期,浆液在通道①内渗流,此阶段注浆压力较低;随着浆液流动距离增大,注浆压力升高,当压力超过陷落柱最小主应力时,在通道的尖端则发生劈裂效应,比如通道①-1发生劈裂扩展后沟通通道③,浆液则沿着劈裂隙进入通道③,进而实现了对导水通道③的治理;与此同时随着注浆压力的提高,通道①内浆液积聚并扩张,对通道围岩将产生附加压缩应力,产生挤密效应,以造成与其相近的通道②被压缩闭合;注浆后期浆液还会沿着通道①、③进入底部含水层,在含水层中渗透扩散;以此实现同时对多条脉状导水通道治理的目标。

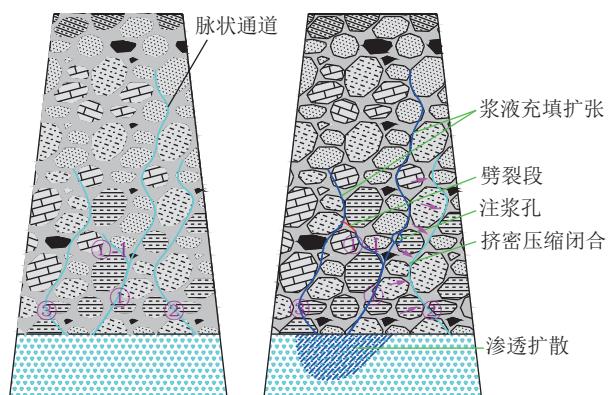


图 9 脉状裂隙导水通道高压注浆机理示意

Fig.9 High-pressure grouting mechanism of water channel in veined fissure

3 现场应用及效果

3.1 陷落柱概况

9-6 岩溶陷落柱为鹤壁煤业第九煤矿在3103工作面下底抽巷道掘进时发现,巷道揭露位置陷落柱与围岩界限明显,界面位置岩层无倾角变化,陷落柱柱体较密实,有少量裂隙及较大孔洞发育(图10),整体呈弱胶结,潮湿。后经过进一步探查,该陷落柱平面呈椭圆状,在主采二₁煤层赋存范围为短轴47 m,长轴141 m,剖面为梯形,中心轴近垂直,界面倾角约75°。陷落柱平面位置如图9所示,9-6陷落柱约一半区域位于3103工作面内。

3.2 地质条件

据图11所示的910-3钻孔柱状,陷落柱位置二₁煤层下距奥陶系岩溶裂隙含水层173.44 m,奥灰水压7.67 MPa,钻孔探查发现陷落柱柱体有导通奥灰水的现象。9-6陷落柱与F115、F2断层伴生,但根

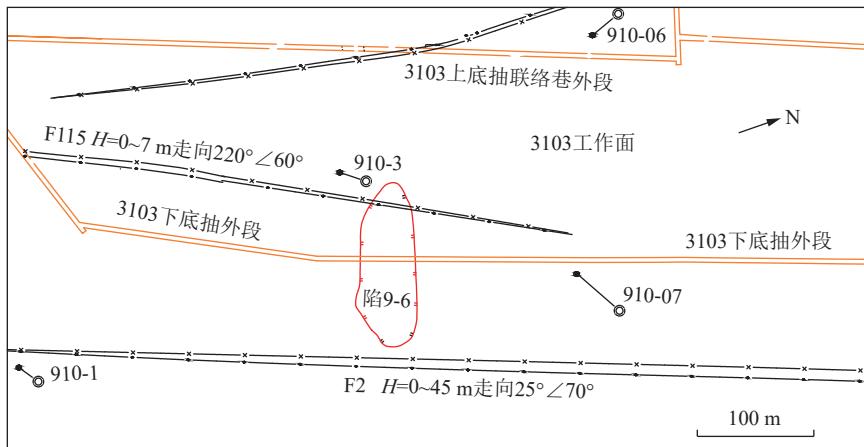


图 10 9-6 陷落柱平面位置
Fig.10 9-6 Plane position of karst collapse column

据巷道揭露情况 F115 断层陷落柱对应位置柱体未见二次错断现象,说明陷落柱发育于断层形成之后。

系统	组段	柱状	深度/m	岩石名称
二叠系 P	山西组	.....	601.60	砂质泥岩、泥岩
		.....	609.16	二 ₁ 煤
		.....	630.45	中粒砂岩
石炭系 C	太原组	.....	642.97	一 ₉ 煤
		.....	658.90	一 ₈ 煤
		.....	747.45	泥岩、砂岩、灰岩
		.....	753.84	L2石灰岩
		.....	765.20	一 ₁ 、 ₂ 煤、泥岩、灰岩
		.....	782.60	灰岩、铝质泥岩
			
		.....		石灰岩
奥陶系 O	峰峰组	.....	

图 11 910-3 号地质孔柱状图
Fig.11 histogram of geological hole No. 910-3

鹤煤九矿井田整体呈单斜构造,断裂构造发育,前期已发现 5 个陷落柱。矿井主要开采二₁煤层位于二叠系下统山西组 (P₁sh), 煤层开采底板主要受奥灰高承压水害威胁。1980 年在该矿 123-2 采面遇断层突水淹井,最大突水量 68.20 m³/min。鹤煤九矿位

于太行山东麓的太行山与华北平原沉降带之间过渡地带,隶属华北板块(内)南部的安鹤煤田,该煤田已发现陷落柱 100 余个^[11,16]。1965 年煤田内的安阳铜冶矿 103 工作面下平巷施工期间曾发生陷落柱突水致使矿井被淹,最大突水量 23.30 m³/min^[16]。

3.3 钻孔探查及注浆治理

9-6 陷落柱根置奥灰含水层水压达 7.67 MPa,且前期探查发现柱体有导通奥灰现象。3103 工作面设计在陷落柱治理后直接推采通过陷落柱,对探查的精确性及治理的质量要求高。

3.3.1 治理段长

采用注浆构建“止水塞”的总体方案进行陷落柱水害防治。根据《煤矿防治水细则》的规定,带压底板构造影响区域突水系数需 $\leq 0.06 \text{ MPa/m}$,以此计算底板隔水层厚度不小于 127.8 m;另外,细则规定完整地段突水系数需 $\leq 0.1 \text{ MPa/m}$,计算底板隔水层厚度不小于 76.7 m。考虑到回采过程中底板破裂,加固段布置于下段,确定加固段跨度为二₁煤底板以下 50~130 m 段,加固段长 80 m,符合完整地段突水系数要求(认为加固后陷落柱改造为完整岩体),加固段起始于底板 130 m 以上段,总跨度符合构造影响区域突水系数要求。

3.3.2 探查及注浆钻孔

以井下巷道作为钻场布置探查及注浆钻孔,平面布孔间距 30 m,纵向布孔间距 25 m,预设浆液有效扩散距离为 20 m,能够满足形成交圈的要求。在 3103 工作面下底抽巷布置 6 个钻场,分立于陷落柱两侧,采用两侧对抄方式布孔,纵向上分 3 个层次,可同时对陷落柱体及边界影响带进行探查及治理,合计施工钻孔 57 个,钻孔深度 137~245 m。布孔立体效果如图 12 所示。

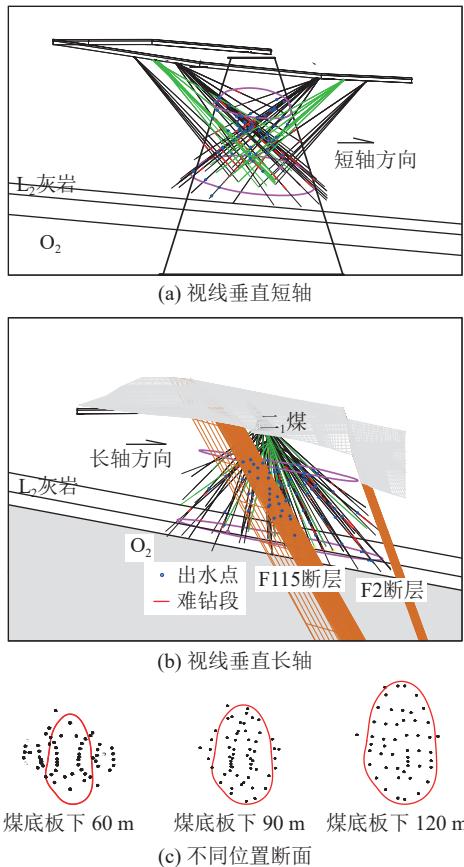


图 12 9-6 陷落柱探查及注浆治理钻孔布置

Fig.12 Borehole design for 9-6 collapse column exploration and grouting treatment

3.3.3 高压注浆

1) 注浆顺序。采用分层次、分段注浆工艺,先施工最高层次的左1、右1钻场钻孔,对陷落柱治理段的上段进行治理,再施工左3、右3钻场钻孔,治理下段,最后施工左2、右2钻场钻孔,进行补注及检查注浆效果。注浆钻场布置如图13所示。

2) 分段注浆。考虑到钻孔较长,为保证注浆效果及施工安全,采用了单孔分段注浆工艺。左1、右1钻场钻孔分3段施工,第1段进入陷落柱10 m左右进行首次注浆,治理上段陷落柱的边界区域;再延伸施工至距离对侧陷落柱边界约10 m位置,进行二次注浆,主要治理陷落柱柱体;3次注浆施工穿过陷落柱10 m左右,进行陷落柱下段边界及L₂灰岩治理。其余钻孔分两段施工,首次钻孔至进入陷落柱10 m进行初次注浆,二次钻进至设计孔深进行复注。分段注浆设计如图13所示。

3) 注浆压力。地面布置制浆、注浆站,采用高压输浆管路输送至井下钻孔直接注浆。采用高压注浆,注浆孔口终压不小于15 MPa,多数注浆孔孔口注浆终压可达到20 MPa以上。

4) 注浆材料。选用普通硅酸盐水泥浆液,水泥型号P·O 42.5,浆液水灰比1.5:1~3:1。当陷落柱边缘及巷道跑浆时,适当添加水玻璃进行控制。合计注水泥2 973 t,单孔注浆量3.0~525.1 t不等。

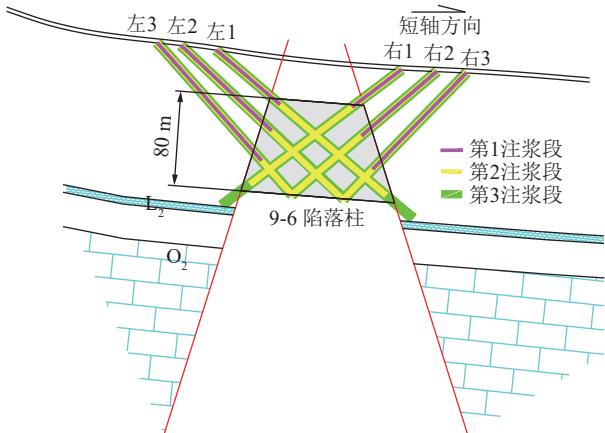


图 13 注浆钻场布置及分段注浆顺序设计

Fig.13 Grouting drilling site and grouting construction sequence design

3.4 陷落柱脉状导水特征

通过钻孔出水情况可表征陷落柱的导水特征,合计57个钻孔,其中出水钻孔45个,出水量小于5 m³/h钻孔31个,水量在5~10 m³/h钻孔5个,水量大于等于10 m³/h钻孔9个,单孔最大出水量200 m³/h。

3.4.1 水源分析

2₁煤底板主要含水层为奥灰、中粗砂岩层及L₂灰岩,3个含水层水质类型不同,根据钻孔出水水质分析数据可确定出水水源。根据钻孔水质分析对比,确定陷落柱柱体内钻孔控制范围的顶层部分出水点水源来自奥灰,说明奥灰水至少已经导通进入2₁煤底板下50 m范围内。另外,根据水压测试钻孔出水水源为奥灰水则水压一般超过3 MPa,多孔在6 MPa左右,其他出水水源水压一般小于2 MPa。

3.4.2 导水通道特征

图14为典型钻孔水量随深度变化的曲线,陷落柱内钻孔出水量随着孔深呈现阶梯状增长,符合脉状导水通道出水特征,即钻孔揭露脉状导水通道后,钻孔水量会急速增加,之后保持相对稳定,待揭露下一个脉状通道水量再突然增加。钻孔成孔后疏放奥灰水源的钻孔出水水量一般保持稳定,其他水源钻孔水量缓慢衰减。

陷落柱钻探过程中,出现钻进速率低于柱体内正常段1/5的难钻进段,抱钻严重,返水不畅,主要为泥质陷落充填物。难钻段及钻孔出水点位置如

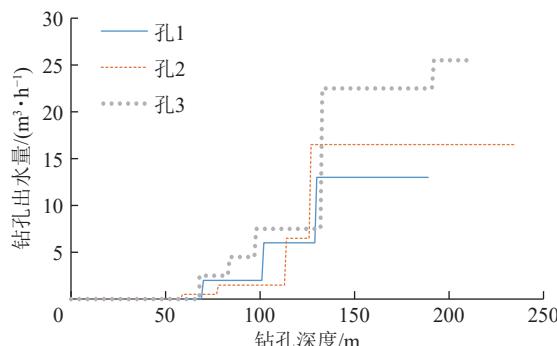


图 14 典型钻孔出水量变化

Fig.14 Variation of Water flow rate from typical boreholes

图 12 中的标示,出水点及极难钻进段主要位于柱体中部区域,陷落柱边界出水点较少,说明导水通道主要位于柱体内部。单孔出水点与难钻段分布整体无明显对应关系,难钻段出水点相对较少,主要由于难钻段多为泥质物,抗变形能力弱,残存导水通道的可能性低。另外,横向对比可见,3103 工作面面外区域陷落柱柱体的难钻段及出水点明显多于面内区域,可能与 F115、F2 断层发育有关。

3.5 脉状导水通道的高压注浆及效果

3.5.1 注浆压力响应

分析注浆压力响应曲线可指示浆液的渗流、扩散、劈裂等过程。如图 15 所示的典型注浆压力随着注浆时间亦呈阶梯状增大,大致分为 3 个阶段,I 阶段注浆压力缓慢增加,此阶段浆液在初始导水通道中渗流;II 阶段初始通道被注浆充填,注浆压力增速加快,注浆压力超过柱体劈裂压力时,浆液发生劈裂扩散;III 阶段注浆压力增速减慢,指示劈裂通道沟通了另一导水通道,浆液渗流进入新通道。

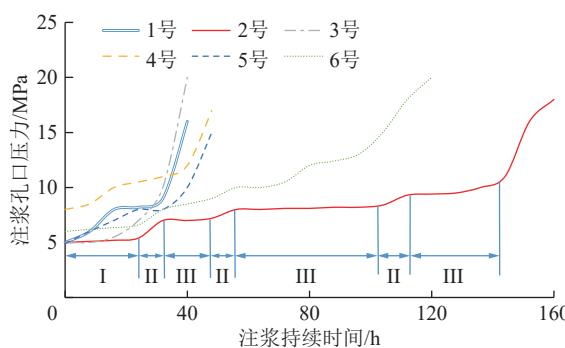


图 15 典型陷落柱钻孔注浆压力响应曲线

Fig.15 Pressure response curve of typical drilling grouting

如图 15 所示,单孔注浆必包含 I、II 阶段,并可能包含多个 II、III 阶段。另外,注浆压力曲线劈裂过程并无完整岩石劈裂所示的压降过程,主要由于陷落柱柱体物质胶结差,黏聚力小所致。陷落柱首次劈裂压力在 7~8 MPa。注浆过程中多个原无水力联

系的钻孔之间串浆,浆液在上部巷道陷落柱边缘多处集中返浆,均指示劈裂现象的发生。

3.5.2 单孔注浆量与钻孔水量

钻孔出水量与其揭露导水通道的大小及连通性密切相关,钻孔在导水通道内低压注浆的注浆量与钻孔水量呈正相关。9-6 陷落柱单孔注浆量与钻孔出水量关系如图 16 所示,总体看注浆量随着钻孔水量的增加有增大趋势,但关联性不明显,多孔水量较小,甚至不出水,仍然注入大量水泥浆液,主要因为采用高压注浆方法,柱体劈裂沟通了新的导水通道及导水通道高压扩展所致。在单孔注浆过程中,发现周边已施工的钻孔在未与注浆钻孔串浆的情况下,水量逐渐减小,并最终消失的现象,此现象验证了高压注浆产生附加压缩应力致使临近导水通道闭合是现实存在的。

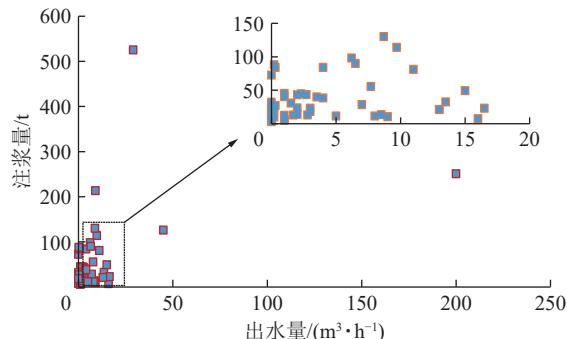


图 16 单孔注浆量与钻孔出水量关系

Fig.16 Relationship between grouting amount and Water flow rate of borehole

3.5.3 注浆治理效果

采用高压注浆,浆液扩散综合涉及渗流、劈裂、挤密等机理,且在 9-6 陷落柱治理时通过注浆压力、注浆量、水量等分析均有所指示,单孔起到了对多条脉状导水通道综合治理的效果。

注浆过程中钻孔之间串浆明显,最大水平距离超过 100 m,钻孔向上与巷道串浆最大距离超过 80 m,说明浆液最大扩散距离能够满足设计要求。钻孔注浆过程中,采用地球物理方法及微震监测对浆液的扩散进行全程监测,指示富水异常区消失,浆液扩散距离较远,有效扩散范围能够满足设计要求。

注浆结束后,在止水塞体内布置注水试验孔 8 个,进行高压注水试验^[35],注水压力响应曲线如图 17 所示,孔口注水压力均快速增长至 9.5 MPa 以上,换算至止水塞中部位置注水压力超过 10.4 MPa,奥灰水压为 6.9 MPa,即说明注浆后止浆塞的劈裂压力可达到奥灰水压 1.5 倍。目前矿井 3103 工作面已

回采完成,未发生陷落柱突涌水现象,说明注浆起到理想治理效果。

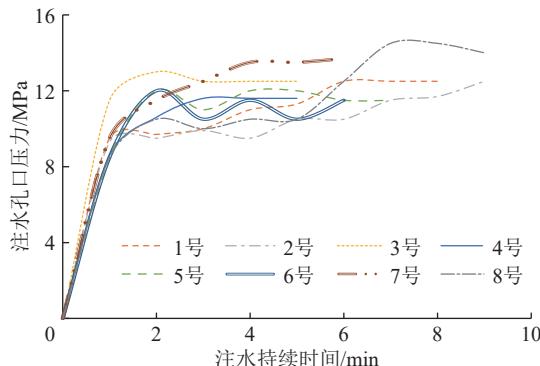


图 17 注水试验压力响应曲线

Fig.17 Pressure response curves of water injection test

4 结 论

1) 根据陷落柱导水通道特征及陷落柱柱体结构形式,结合典型陷落柱探查及治理案例,总结提出了陷落柱脉状裂隙导水的新模式。该类陷落柱富水性不均,较其他导水型陷落柱探查难度大,突涌水危险性高。初步分析认为柱体空隙渗流及次生矿物结晶差异是陷落柱脉状裂隙导水的主要成因。

2) 考虑到脉状裂隙导水型陷落柱低压渗流注浆质量难以控制,基于模型试验成果及相关理论,提出了涉及孔道渗流注浆、劈裂注浆及裂隙挤密闭合等复合形式的脉状裂隙导水型陷落柱高压注浆机理,可实现单孔对多条脉状裂隙导水通道的综合治理。

3) 脉状裂隙导水型陷落柱高压注浆技术在鹤煤九矿 9-6 高承压陷落柱止水塞注浆构建中进行应用,分析注浆压力响应曲线可指示浆液的渗流、劈裂、挤密等过程;通过串浆情况、物探及微震监测、注水试验分析综合反映陷落柱治理效果较好。目前 3103 工作面已回采完成,未发生陷落柱突涌水现象。

参考文献(References):

- [1] 尹尚先,连会青,刘德民,等.华北型煤田岩溶陷落柱研究 70 年:成因·机理·防治[J].煤炭科学技术,2019,47(11):1-29.
YIN Shangxian, LIAN Huiqing, LIU Demin, et al. 70 years of investigation on Karst collapse column in North China Coalfield: Cause of origin, mechanism and prevention[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(11): 1-29.
- [2] 尹尚先,徐斌,刘德民,等.我国华北煤田岩溶陷落柱预测研究[J].煤炭科学技术,2016,44(1):172-177.
YIN Shangxian, XU Bin, LIU Demin, et al. Study on location prediction of paleo-Karst sinkholes in northern China coalfields[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 172-177.
- [3] 尹尚先,武强,王尚旭.北方岩溶陷落柱的充水特征及水文地质模型[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):77-82.
YIN Shangxian, WU Qiang, WANG Shangxu. Water-bearing characteristics and hydro-geological models of karstic collapse columns in North China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 77-82.
- [4] 曾一凡,武强,赵苏启,等.我国煤矿水害事故特征、致因与防治对策[J].煤炭科学技术,2023,51(7):1-14.
ZENG Yifan, WU Qiang, ZHAO Suqi, et al. Characteristics, causes, and prevention measures of coal mine water hazard accidents in China[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 1-14.
- [5] 牛磊,武强,李博.基于内部结构概化的华北型煤田岩溶陷落柱分类[J].煤田地质与勘探,2015,43(3):56-60.
NIU Lei, WU Qiang, LI Bo. Classification of karst collapse columns in North China coalfields based on the generalized model of inside structure of the columns[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(3): 56-60.
- [6] 王家臣,李见波.预测陷落柱突水灾害的物理模型及理论判据[J].北京科技大学学报,2010,32(10):1243-1247.
WANG Jiachen, LI Jianbo. Physical model and theoretic criterion of the forecast of water inrush caused by collapse columns[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(10): 1243-1247.
- [7] 许进鹏.陷落柱活化导水机理研究[D].青岛:山东科技大学,2006.
XU Jinpeng. Study of the mechanism about karst collapse column reactivation-induced water-conducting[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [8] 高小伟.煤矿隐伏地质异常体地孔瞬变电磁法三分量探测技术[J].煤炭科学技术,2025,53(1):237-245.
GAO Xiaowei. Three-component detection technology of down-hole TEM for hidden geological anomalies in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 237-245.
- [9] 刘伟韬,赵吉园,霍志超,等.泥石浆型复杂破碎岩体非线性渗流数学模型与实验研究[J].煤炭科学技术,2024,52(5):46-59.
LIU Weitao, ZHAO Jiyuan, HUO Zhichao, et al. Study on a mathematical model and experiments for nonlinear seepage in complex crushed rocks with mud-rock slurry[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(5): 46-59.
- [10] 张勃阳,林志斌,吴疆宇,等.侧限条件下陷落柱破碎岩体的渗流特性研究[J].采矿与安全工程学报,2020,37(5):1045-1053.
ZHANG Boyang, LIN Zhibin, WU Jiangyu, et al. Seepage characteristics of broken rock inside collapse column under application of lateral limited uniaxial compression[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(5): 1045-1053.
- [11] 尚克勤.华北地区岩溶陷落柱成因探讨[J].中州煤炭,1988,10(5):14-18.
SHANG Keqin. Discussion on the cause of karst collapse column in North China[J]. Zhongzhou Coal, 1988, 10(5): 14-18.
- [12] 付君华.太原西山煤田陷落柱空间形态特征及其成因分析[J].山西煤炭,2020,40(1):91-96.

- FU Junhua. Spatial morphological characteristics and genesis of collapse column in Xishan Coalfield in Taiyuan [J]. Shanxi Coal, 2020, 40(1): 91–96.
- [13] 许光泉, 张海涛, 周继生, 等. 华北煤田岩溶陷落柱及其突水研究综述及展望 [J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 259–275.
- XU Guangquan, ZHANG Haitao, ZHOU Jisheng, et al. Study and prospect of karst collapse columns and their water inrush in the coalfield of North China [J]. Carsologica Sinica, 2022, 41(2): 259–275.
- [14] 赵金贵, 郭敏泰, 李文生. 西山煤田岩溶陷落柱柱体形态与组构特征 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2389–2398.
- ZHAO Jingui, GUO Mintai, LI Wensheng. Morphological and fabric characteristics of Karst collapse pillars in Xishan coalfield [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2389–2398.
- [15] 李毅. 任楼煤矿导水陷落柱压水探查方法及应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LI Yi. Exploration method and application of waterpressure in the collapse column of water diversion in Renlou coal mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [16] 郭启琛. 西曲井田陷落柱发育规律及主控因素分析 [J]. 煤炭技术, 2023, 42(12): 22–26.
- GUO Qichen. Analysis of developmental regularity and major controlling factors of collapse columns in Xiqu coal field [J]. Coal Technology, 2023, 42(12): 22–26.
- [17] 李昂, 李远谋, 刘朝阳, 等. 煤层底板隐伏陷落柱突水机理及工程应用 [J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(S2): 142–152.
- LI Ang, LI Yuanmou, LIU Zhaoyang, et al. Water inrush mechanism and engineering application of concealed collapse column in coal seam floor [J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(S2): 142–152.
- [18] 李振华, 徐高明, 李见波. 我国陷落柱突水问题的研究现状与展望 [J]. 中国矿业, 2009, 18(4): 107–109.
- LI Zhenhua, XU Gaoming, LI Jianbo. Research status and outlook of water-inrush from collapse column in China [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(4): 107–109.
- [19] 谢治刚, 孙贵, 隋峰堂, 等. 基于层次分析法的地面区域治理目的层位优化选择 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(3): 201–211.
- XIE Zhigang, SUN Gui, SUI Fengtang, et al. Optimum selection of target strata of ground regional treatment based on analytic hierarchy process [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(3): 201–211.
- [20] 王崇智, 邹光华, 李永鹏, 等. 止水塞建造技术在综放面过陷落柱中的研究与应用 [J]. 华北科技学院学报, 2023, 20(1): 29–32.
- WANG Chongzhi, ZOU Guanghua, LI Yongpeng, et al. Research and application of water stop plug construction technology in the subsidence crossing column of fully mechanized top coal caving face [J]. Journal of North China Institute of Science and Technology, 2023, 20(1): 29–32.
- [21] 安丰存, 杜海鹏, 冯辉, 等. “衰退—死亡”型陷落柱综合探查治理及发育特征研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56(1): 57–62.
- AN Fengcun, DU Haipeng, FENG Hui, et al. Comprehensive exploration management and development characteristics of decline-death type collapse column [J]. Coal Engineering, 2024, 56(1): 57–62.
- [22] 张腾滕. 山西离柳矿区导水陷落柱井下定向注浆治理 [J]. 中国煤炭地质, 2024, 36(1): 57–62.
- ZHANG Tengteng. Directional grouting treatment of water-flowing collapse column in liliu mining area of Shanxi Province [J]. Coal Geology of China, 2024, 36(1): 57–62.
- [23] 董书宁, 李智, 郑士田, 等. 煤层底板导水通道钻孔超前探查与多元信息识别技术 [J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(7): 15–23.
- DONG Shuning, LI Zhi, ZHENG Shitian, et al. Advanced drilling detection and multi-information identification of water-conducting channel of coal floor [J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 15–23.
- [24] 武程亮, 滕子军, 张瑞廷, 等. 山东霄云煤矿陷落柱突水治理实践 [J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 161–169.
- WU Chengliang, TENG Zijun, ZHANG Ruiting, et al. Treatment of water gushing from the collapse column in Xiaoyun Coal Mine of Shandong province [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 161–169.
- [25] 田干, 南生辉, 林旭东, 等. 基于定向水平钻陷落柱综合探查与阻水塞立体建造技术 [J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(2): 168–175.
- TIAN Gan, NAN Shenghui, LIN Xudong, et al. Comprehensive exploration of collapse column and three-dimensional construction technology of water plug based on directional horizontal drilling [J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(2): 168–175.
- [26] 高耀全, 方刚, 闫兴达. 邢东煤矿深部区域奥灰水害探查治理技术 [J]. 煤矿安全, 2021, 52(5): 87–95.
- GAO Yaoquan, FANG Gang, YAN Xingda. Exploration and control technology of Ordovician limestone water hazard in deep area of Xingdong Coal Mine [J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(5): 87–95.
- [27] 丁同福, 汪敏华, 刘满才, 等. 叠层多分支水平井精准建造陷落柱堵水塞技术 [J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 244–251.
- DING Tongfu, WANG Minhua, LIU Mancai, et al. Technology of accurately constructing collapse column water plugging plug in laminated multi branch horizontal wells [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 244–251.
- [28] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 煤矿井巷工程质量验收规范: GB 50213—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [29] 黄辅强, 孙国忠. 平朔井工一矿导水陷落柱注浆加固治理技术 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(4): 51–54.
- HUANG Fuqiang, SUN Guozhong. Grouting stabilization governance technology of water flowing subsided column in Pingshuo No. 1 Underground Mine [J]. Coal Engineering, 2018, 50(4): 51–54.
- [30] 王威. 水平孔钻进结合高压注浆治理导水陷落柱技术 [J]. 内蒙古煤炭经济, 2016(16): 99–100.
- WANG Wei. Technology of horizontal hole drilling combined with high pressure grouting to treat water-conducting collapse column [J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2016(16): 99–100.
- [31] 鹿存金. 不同导水模式陷落柱注浆浆液运动与减渗加固机理研

- 究及应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- LU Cunjin. Investigation of mechanism of grout movement and seepage reduction reinforcement in karst collapsed column with different water-conducting modes and its application[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [32] 刘奇, 陈卫忠, 袁敬强, 等. 基于渗流-侵蚀理论的岩溶充填介质注浆加固效果评价 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 572–580.
- LIU Qi, CHEN Weizhong, YUAN Jingqiang, et al. Evaluation of grouting reinforcement effect for karst filling medium based on seepage-erosion theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(3): 572–580.
- [33] 李大敏. 张集煤矿隐伏陷落柱突水快速治理 [J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(8): 31–33.
- LI Damin. Rapid control of water inrush from concealed collapse column in Zhangji Coal Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2000, 28(8): 31–33.
- [34] 李见波, 许延春. 承压水渗流条件下预防陷落柱突水力学模型及应用 [J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(2): 217–224.
- LI Jianbo, XU Yanchun. Mechanical model of the collapse column water inrush prevention considering the confined water seepage and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2016, 45(2): 217–224.
- [35] 钱自卫, 黄震, 张蕊, 等. 基于高压注水试验的断层破碎带渗透特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1834–1841.
- QIAN Ziwei, HUANG Zhen, ZHANG Rui, et al. Permeability characteristics of fracture zone by high-pressure water injection tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(10): 1834–1841.