

深井工作面断层滞后突水机制与防治关键技术

翟明华¹, 刘人太^{1,2}, 沙 飞², 白继文²

(1. 山东能源集团有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心, 山东 济南 250061)

摘 要:针对煤矿深部岩体断层滞后突水具有隐蔽性、滞后性及防治难度大等特点, 结合王楼煤矿 3 采区 13301 工作面开采过程断层滞后突水治理工程, 在水文地质和水源探查分析的基础上, 研究了采动作用下断层滞后突水机理, 研发了一种低成本水泥基注浆材料, 能够保证工程突涌水治理需求, 与普通水泥材料相比, 节约了材料成本约 60%。将新型水泥基注浆材料应用于断层滞后突水治理工程, 结合注浆治理过程工作面涌水量变化及注浆效果关键评估技术, 现场裂隙发育形成的导水通道被拦截, 水力通道被阻断, 有效控制了工作面涌水量, 达到预期堵水效果。

关键词:深部岩体断层; 断层滞后突水; 注浆材料; 水害防治

中图分类号: TD12 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2017)08-0025-07

Mechanism and prevention and control key technology of hysteretic water inrush from fault of coal mining face in deep underground mine

Zhai Minghua¹, Liu Rentai^{1,2}, Sha Fei², Bai Jiwen²

(1. Shandong Energy Group Corporation Limited, Jinan 250014, China; 2. Research Center of Rock-Soil and Structure Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The hysteretic water inrush from a deep rock fault in a coal mine would have the concealed, hysteretic, high difficult prevention and control features, in combination with the hysteretic water inrush control engineering occurred from the fault during the mining process of No. 13301 coal mining face in No. 3 Mining Block of Wanglou Mine. Based on the analysis on the hydrogeologic and water source survey, the paper had a study on the hysteretic water inrush mechanism of the fault under the mining role. A low cost and effective cement base grouting material was researched and developed and could ensure the engineering control requirements of the mine water inrush. In comparison with the conventional cement material, the new cement base grouting material could save about 60% of the material cost. The new cement base grouting material could be applied to the hysteretic water inrush control engineering occurred from the fault. In combination with the water inrush variation of the coal mining face and the key evaluation technology of the grouting effect during the grouting control process, the water flow channels occurred by the site cracking development were intercepted and the hydraulic channels were sealed. Thus the water inrush volume was effectively controlled and the expected water sealing effect was reached.

Key words: deep rock fault; hysteretic water inrush from fault; grouting material; water disaster prevention and control

0 引 言

我国煤矿受水威胁面积、类型及水害威胁程度都是世界罕见的, 水害事故严重威胁着煤炭资源的安全开采^[1-3], 其中断层突水比较典型^[4-7]。采动影响下断层滞后突水因其特有隐蔽性及滞后性, 对矿

井安全开采造成很大威胁^[8-9]。目前, 国内外通过深部岩体断层滞后突水治理工程现场实例, 如何结合注浆治理材料性能测试、注浆技术可行性、注浆效果以及经济性的研究较少^[10-15]。采动影响下断层滞后突水治理的注浆材料选择需要从材料性能、技术可行性、注浆过程控制、治理效果、耐久性、经济

收稿日期: 2017-06-11; 责任编辑: 赵 瑞 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.08.005

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB036001)

作者简介: 翟明华(1960—), 男, 江苏徐州人, 教授级高级工程师, 博士, 现任山东能源集团有限公司总工程师。

引用格式: 翟明华, 刘人太, 沙 飞, 等. 深井工作面断层滞后突水机制与防治关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(8): 25-31.

Zhai Minghua, Liu Rentai, Sha Fei, et al. Mechanism and prevention and control key technology of hysteretic water inrush from fault of coal mining face in deep underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(8): 25-31.

性、环保性及现场特定地质条件等方面考虑^[16-20]。

笔者依托王楼煤矿断层滞后突水治理工程,分析水文地质,对水源进行探查,研究了采动下断层滞后突水机理,研发了一种低成本水泥基注浆材料,能够保证工程突涌水治理需求,与普通水泥材料相比,节约了材料成本60%。将新型水泥基复合注浆材料应用于断层滞后突水治理工程,通过注浆治理过程工作面涌水量变化及注浆效果关键评估技术,获得了较好注浆治理效果,研究成果对类似工程具有一定借鉴与指导意义。

1 断层滞后突水机制分析

1.1 工程概况

王楼煤矿 F21 断层组斜穿 13301 工作面,断层组内共揭示断层 8 处,断层落差 1.5~13 m,平均厚度约 80 m。13301 工作面推进 160~180 m 断层活化突水较缓慢(75 m³/h 缓慢升至 130 m³/h),工作面 180~230 m 断层活化突水迅速(130 m³/h 急速升至 800 m³/h)。13301 工作面开采过断层后,出现大量涌水,呈现明显滞后特点,为典型的煤矿断层滞后突水。

1.2 水源及突水通道分析

王楼煤矿井田水文观测孔分布如图 1 所示。侏罗系砂岩含水层平均厚度 455 m,距 3_上煤平均距离 135 m,厚度面积大,总体水量较大,很可能成为 3 煤顶底板砂岩充水水源。

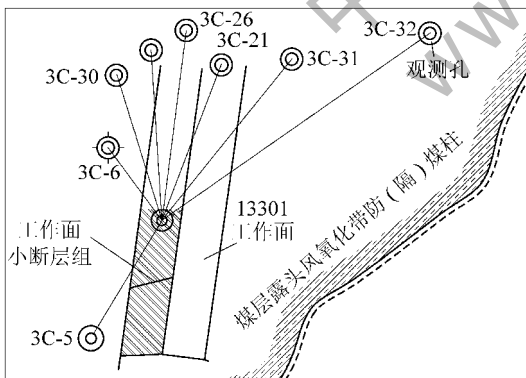


图 1 王楼煤矿井田水文观测孔分布

Fig. 1 Distribution of hydrological observation hole in Wanglou Mine

1) 水位监测。13301 工作面侏罗系砂岩地层内水文监测孔 3C-5、3C-31、3C-30 及 3C-21 水位如图 2 所示。由图 2 可知,除 3C-5 钻孔外其他 3 个孔水位均明显下降,出水前各孔水位均持续下降,但下降速度较明显;开始出水并增大过程中,各孔水位

下降速度增加;工作面水量逐渐稳定过程中,每个孔的水位降低速率减少,在某段范围呈现小幅波动,出现小幅上升现象,说明工作面突水水源的确是侏罗系含水层。

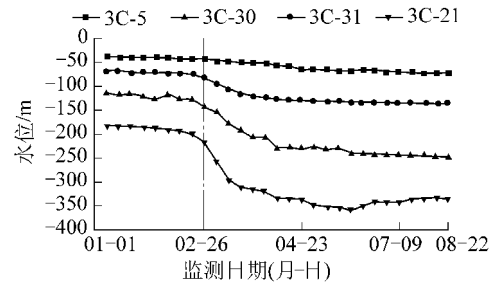


图 2 2013 年水文孔水位变化

Fig. 2 Water level change of hydrologic hole

2) 水压分析。针对 13301 工作面侏罗系含水层,监测突水过程水压变化,以 3 采区侏罗系水文孔为例,所采集数据如图 3 所示。

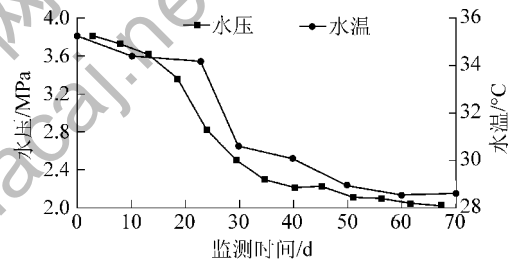


图 3 水压及水温监测

Fig. 3 Water pressure and water temperature monitoring

由图 3 水压变化可知,水压与图 2 中水位的数据变化存在同步性,突涌水前水压与水位变化较小;突水时工作面水量持续增大,水压持续降低;当涌水量基本稳定后,水压较低且不再急速减小,在较低范围保持微小变动。突水水温受地层温度影响,侏罗系含水层地层温度低于开采煤层地层温度,由图 3 水温变化可知,突水前期煤层主要以砂岩裂隙水为主,且所处深度岩体温度较高,突水前期侏罗系水温由于深部岩体温度影响而升高,总体水温降低程度较小,保持较高的水温;突水过程水温逐渐下降原因为,深部岩体因侏罗系水而降温,突涌水水温降低;急速突水时,工作面涌水量快速增加,突涌水水温降低较快,最终突水水温接近侏罗系含水层温度。

联合分析侏罗系含水层的水位、水压及突水温度的监测数据及变化规律,总结出王楼煤矿 13301 工作面突水水源主要为侏罗系含水层。侏罗系水导入工作面的通道可能有 3 种:①因 3C-4 孔封孔不良在采动影响下导水形成突水通道;②斜穿工作面

的小断层组因采动活化导水;③顶板隔水层薄弱带或裂隙密集带(包含采动裂隙带)。

1.3 断层滞后突水原因分析

结合王楼煤矿实际工程现场情况,断层滞后突水原因分析主要集中于突水3个阶段:断层阻隔水阶段(开采初始期)、断层裂隙萌生阶段(开采扰动期)及断层渗透弱化阶段(滞后突水期)^[5],如图4所示。开采初始期,断层两盘主要受压剪作用力,断层不具透水性能;断层裂隙萌生阶段,断层挖下盘时,卸荷作用等使断层充填结构松动,产生微裂(孔)隙,使断层具有一定的透水性能,少量侏罗系砂岩水渗入顶板临空面,产生一定量涌水;扰动裂隙萌生后,破碎岩体裂(孔)隙增大,初始渗水通道逐渐发展演化为贯穿连续的过水通道,渗透性的增大导致了工作面的涌水量不断增大,形成断层滞后重大突水灾害。

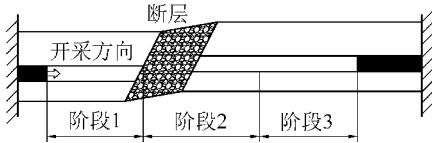


图4 断层滞后突水阶段分析

Fig. 4 Stage analysis for fault delayed water inrush

2 注浆堵水材料研发

2.1 试验方法

根据前期注浆材料性能研究工作经验,以王楼煤矿含水层注浆改造工程为依托,设计水泥-粉煤灰-黏土-膨润土注浆材料体系,膨润土主要用于改善材料体系的和易性,提高浆液长距离输送的稳定性,避免泵送过程浆液析水,通过前期试验确定膨润土加入量为1%。试验材料组分配比见表1。

表1 注浆材料组分质量配比

Table 1 Composition mass ratio of grouting materials

试样编号	各组分质量分数/%			
	水泥	粉煤灰	黏土	膨润土
1	100	0	0	0
2	15	85	0	0
3	20	80	0	0
4	30	70	0	0
5	45	55	0	0
6	60	40	0	0
7	15	79	4	1
8	15	75	9	1
9	20	75	4	1
10	20	70	9	1
11	30	65	4	1
12	30	60	9	1

所测试的注浆材料性能包括流动度、凝结时间、结石体抗渗特性、抗折强度、抗压强度及结石体微观形貌等性能。

1) 流动度测试:将截锥圆模水平置于玻璃板上并倒入新拌浆液,抹平上表面并提起截锥圆模,30 s后用直尺以正交方式测量浆液在玻璃板上的扩散直径,所取平均值即浆液初始流动度。

2) 凝结时间测试:采用净浆标准稠度及凝结时间测定仪,测定水泥基注浆材料的初凝时间及终凝时间。

3) 浆液结石体抗渗特性试验:成型上口径70 mm、下口径80 mm及高30 mm的试样,将一定养护龄期的试样进行涂蜡密封,并在HP4.0型抗渗仪上进行测试。

4) 强度测试:将试样制作成40 mm×40 mm×160 mm试块,放置于20℃水浴恒温养护箱中养护,测试7 d及28 d试块的抗折强度,并测试其相应龄期的单轴抗压强度。

2.2 试验结果与数据分析

1) 浆液流动度测试。流动度体现了注浆材料扩散性能,是浆液和易性重要衡量参数,浆液良好的流动度能够确保现场浆液较好的稳定性及可泵性。试验所测纯水泥浆液流动度为31.5 cm,密度为1.39 g/cm³,采用纯水泥浆液的技术参数作为参考,以评估复合注浆材料体系流动度是否达标。浆液流动度测试结果如图5所示。

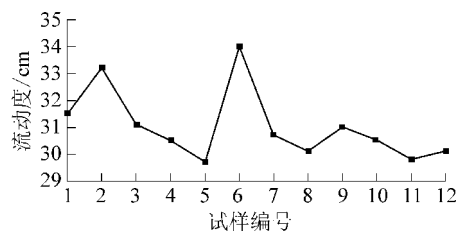


图5 水泥基复合浆液的流动度曲线

Fig. 5 Fluidity curve of cement-based grouting materials

图5中1号试样为纯水泥浆液,7—12号复合浆液存在黏土成分。由图5可知,除2号与6号试样外,其余复合浆液试样流动度范围为30~32 cm,所研发材料体系满足注浆工程对材料流动度的要求。

2) 凝结时间。浆液的凝结时间测试结果如图6所示。由图6可知,水泥基复合注浆材料的初终凝时间具有可控性及可操作性。凝胶时间符合采动作用下断层突水防治工程对胶凝时间的要求,同时可

根据注浆压力、注浆量及可泵性等要求,采用化学调凝外加剂,对水泥基复合注浆材料进行合理调控,能够满足工程特殊要求。

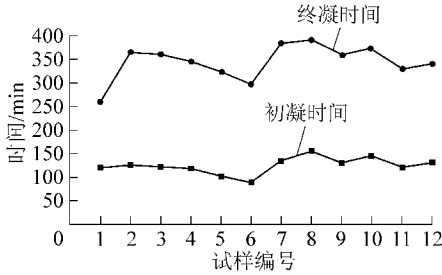


图6 水泥基复合浆液的初/终凝时间

Fig. 6 Curves of initial/final setting time of the cement-based composite grouting materials

3)浆液结石体抗渗特性。浆液结石体抗渗特性直接影响浆液对断层含水构造的充填及加固效果,直接决定了工作面开采后的涌水量,浆体结石体抗渗特性越高,含水构造渗漏水通道封堵越密实。水压设定为3 MPa,持续时间为24 h,所研发水泥基复合材料28 d 结石体抗渗性结果如图7所示。

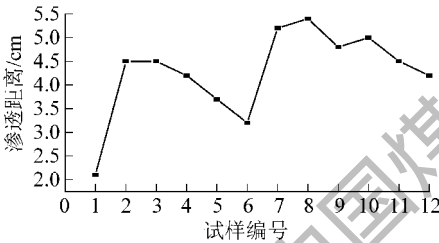


图7 水泥基复合浆液结石体抗渗性

Fig. 7 Anti-permeability performance of stone body of cement-based composite grouting materials

由图7可知,纯水泥结石体抗渗性最好,随着粉煤灰含量的增加抗渗性大幅度下降,随着黏土组分的加入,抗渗性有了显著的改善。相对水泥结石体的抗渗性,新材料体系抗渗性弱化了1倍,与注浆改造厚度相比,渗透高度5 cm可以忽略不计,能够满足工作需求。

4)浆液结石体强度。浆液结石体强度决定了材料注入后能否抵抗水压及围岩应力,同时决定了断层滞后突水注浆治理效果与注浆治理后岩体长期稳定性。3、7及28 d 龄期浆液结石体抗折强度如图8所示;7、28 d 龄期浆液结石体的单轴抗压强度如图9所示。

由图8可知,水灰比1:1 纯水泥浆结石体的28 d 强度为2.3 MPa,笔者所研发的水泥基注浆材料抗折强度随水泥含量的减少而明显降低。在

20%水泥、70%粉煤灰、9%黏土和1%膨润土复合时(10号),试样抗折强度为纯水泥结石体强度的50%。

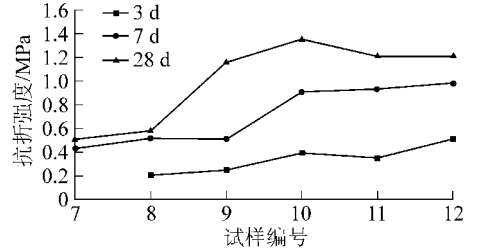


图8 水泥基复合浆液结石体抗折强度

Fig. 8 Flexural strength of stone body of cement-based composite grouting materials

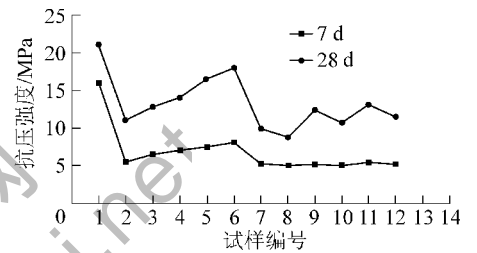


图9 水泥基复合浆液结石体抗压强度

Fig. 9 Compressive strength of stone body of cement-based composite grouting materials

由图9可知,所研发水泥基注浆材料抗压强度随水泥含量减少而显著降低;针对7—12号试样,其抗压强度进一步降低,这是由于黏土和膨润土含量增加对结石体强度降低作用明显,在能够保证浆液稳定性、泵送性及和易性同时,应尽量降低二者的掺量。

所研发注浆材料结石体7 d 抗压强度大部分约5 MPa,结石体28 d 抗压强度普遍高于10 MPa。王楼煤矿水压2.0~3.5 MPa,所研发注浆材料强度能够满足堵水注浆工程要求,水泥含量可采用20%~30%。可通过新型注浆材料的研发,降低强度富余量达到削减成本的目标。

5)经济成本测算。所研发10号注浆材料已应用于王楼煤矿注浆治理工程,累计应用1.5万t,断层滞后突水注浆治理效果良好。普通硅酸盐42.5R水泥材料成本按400元/t计算,所研发注浆治理材料降低了材料成本242元/t,降低成本363万元,降低材料成本60.5%,确保了王楼煤矿良好经济效益。

3 现场防治关键技术

3.1 现场注浆治理关键技术

13301工作面注浆孔布置如图10所示,王楼煤

矿 13301 工作面地面深长注浆孔分布为 1 号、2 号、3C-4、3C-5,治理目标地层为侏罗系砂岩含水层。现场注浆治理过程中,针对所研发注浆材料与普通 42.5R 硅酸盐水泥,开展了现场注浆治理试验,在定流量条件下研究其在 48 h 内注浆压力变化,分析其浆液和易性及压力-时间特性。现场浆液水灰比控制为 1.0 : 1.0~1.2 : 1.0,结果如图 11 所示。

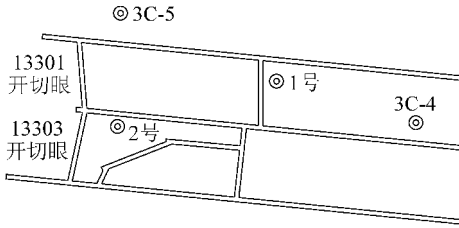
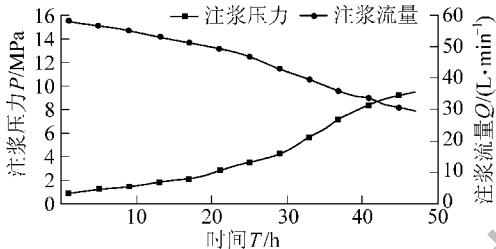
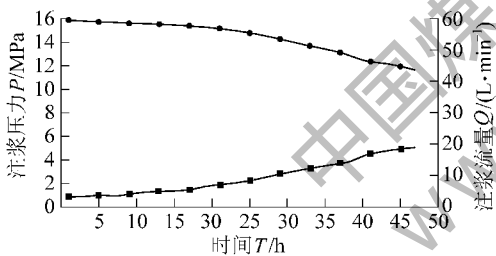


图 10 13301 工作面地面注浆孔布置

Fig. 10 Grouting hole placement of ground for the 13301 face



(a) 普通硅酸盐水泥浆注浆



(b) 水泥复合注浆材料注浆

图 11 浆液注浆 P-Q-T 曲线

Fig. 11 P-Q-T curves of grouting materials

由图 11a 可知,侏罗系含水层初期注浆阻力较小,0~10 h 内注浆压力提升缓慢,注浆流量较为稳定,随着水泥浆液水化反应,初期阶段范围内注入含水层浆液开始发生初凝,在水泥凝结固化及沉淀作用下,含水层裂隙逐渐被封堵,地层注浆阻力持续提高,注浆压力受此影响不断提高,注浆流量明显下降,进入 30 h 后,含水层受水泥浆液充填注浆影响下,注浆阻力快速升高,浆液注浆压力增长迅速,注浆流量快速下降,注浆试验结束时,水泥浆液尚未达到注浆终结压力,经数据分析可知,若地层不发生劈裂注浆产生新的注浆扩散通道,注浆压力将快速上升至注浆终压。

由图 11b 及现场注浆试验反馈可知,所研发水泥基复合注浆材料浆液和易性较好,在含水层注浆试验中注浆压力提升缓慢,注浆持续保持高流量,具有良好的可注性,注浆 48 h 后,现场试验结束时其注浆压力仍满足浆液高流量注浆需求。

综上所述,断层滞后突水注浆治理工程中,所研发水泥基复合注浆材料浆液注浆压力增长平缓且持续时间较长,达到注浆终压时,注浆量大于单液水泥浆液及水泥-粉煤灰浆液,能够满足浆液对含水层裂隙、节理、层理较密实充填,有助于提高目标地层隔水特性,注浆改造效果显著。单液水泥浆液注浆特性优于水泥-粉煤灰浆液。

3.2 注浆前后涌水量情况

王楼煤矿断层滞后突水注浆治理过程中,对注浆前后涌水量进行监测。以 13301 工作面为例,其涌水量变化如图 12 所示。

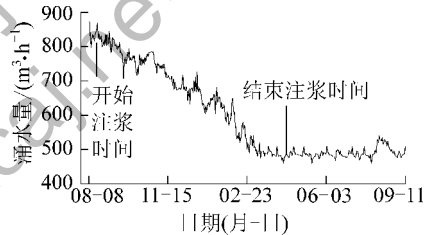


图 12 2013 年注浆治理期间涌水量变化

Fig. 12 Water flow variation during grouting treatment periods in 2013

由图 12 可知,王楼煤矿 13301 工作面突水发生后,涌水量达到 800 m³/h。从 2013 年 8 月注浆前期,断层带导水构造发育,地下水补给量大,注入浆液难以沉积封堵含导水构造,注浆治理效果不明显。随着多个地表钻孔开始注浆,尤其与工作面水力联系密切的 1 号及 3C-5 钻孔实施注浆工作,随着注浆量逐步提升,大量注浆浆液在含导水构造中凝结固化并发生沉淀封堵作用,促使导水裂隙逐渐封堵,涌水量逐渐减小。2014 年 3 月涌水量控制约为 480 m³/h。

涌水量稳定后,由于部分浆液受地下水冲刷作用影响,导致部分导水裂隙萌生扩展,涌水量有轻微回弹,开展了 2 号钻孔短期补充注浆工作,通过注浆治理,有效控制了工作面涌水量,堵水效果显著。

3.3 注浆效果关键评估技术

采用瞬变电磁法对 13301 工作面顶板进行了探测,以 13301 工作面初始开切眼位置为起点向外 860 m 内,测点间距 10 m,注浆前后分别进行探测。

注浆前后瞬变电磁探测结果分别如图 13a 和图 13b 所示。

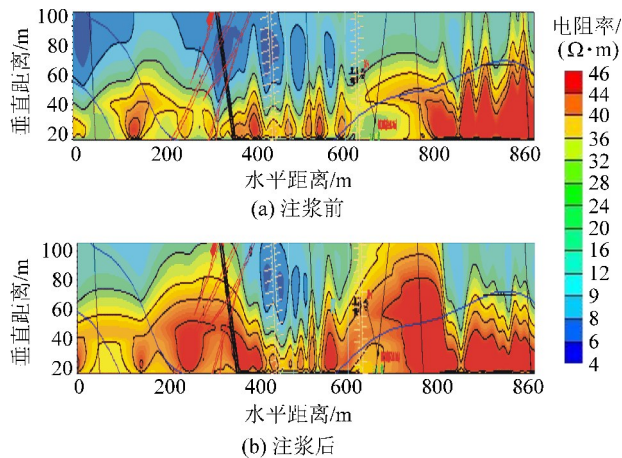


图 13 注浆前与注浆后 13301 工作面瞬变电磁分析

Fig. 13 Transient electromagnetic detection results of No.13301 face before and after grouting

如图 13a 所示,注浆工作进行前有 2 处电阻率低阻异常区,其中范围较大的是工作面 SF302 断层附近的 2 号异常和开切眼附近的 1 号异常,推断异常主要是因采动影响破坏煤层顶板,上侏罗系底部砂砾岩含水层与 13301 工作面发生水力联系。1 号异常从浅到深范围变化不大,2 号异常从浅到深范围逐渐增大,工作面顶板上方 60~80 m 高度段异常范围要大于顶板上方 0~60 m 高度段,视电阻率也相对较低,说明上侏罗系底部砂砾岩含水层富水性更强,2 号异常同时受采动影响及断裂构造影响异常范围较大,应作为该面防治水工作重点。

由图 13b 可知,注浆工作进行后,与注浆之前的瞬变电磁探测相比,低电阻区域明显减小。工作面 SF302 断层附近的 2 号异常基本消失,说明裂隙发育形成的导水通道被拦截,上侏罗系底部砂砾岩含水层与 13301 工作面的水力联系被阻断,侏罗系含水层改造工程取得了良好的效果。

4 结 论

1) 通过研究王楼煤矿断层活化致灾水源,探讨了采动作用下断层滞后突水机理,分析了断层滞后突水注浆治理存在的技术问题。

2) 研发了一种适用于深井岩体断层滞后突水注浆治理的新型水泥基复合注浆材料。所研发的注浆材料具有良好流动度、较长析水分层时间、较高抗渗性及抗压抗折强度,完全满足深部岩体断层滞后突水注浆工程需求,在工程中进行了成功应用,直接

节约材料成本 60% 以上。

3) 研究了断层滞后突水治理的关键技术。研发了深孔造孔与注浆控制关键技术、复合注浆材料制备与应用关键技术、深长钻孔远距离封孔分段注浆技术等一系列实用技术,解决了深部岩体含水构造深孔大规模注浆治理的瓶颈难题。

4) 采用物探、钻探及水文信息相结合的分析方法,对注浆后含水构造治理效果进行了评价,结果表明,说明裂隙发育形成的导水通道被拦截,水力通道被阻断,有效控制工作面涌水量,达到预期堵水效果。

参考文献 (References):

- [1] 靳德武. 我国煤矿水害防治技术新进展及其方法论思考[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(5): 141-147.
Jin Dewu. New development of water disaster prevention and control technology in China coal mine and consideration on methodology[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 141-147.
- [2] 杨天鸿, 唐春安, 谭志宏, 等. 岩体破坏突水模型研究现状及突水预测预报研究发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 268-277.
Yang Tianhong, Tang Chun'an, Tan Zhihong, et al. State of the art of inrush models in rock mass failure and developing trend for prediction and forecast of groundwater inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 268-277.
- [3] 钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945-1956.
Qian Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956.
- [4] 李青锋, 王卫军, 彭文庆, 等. 断层采动活化对南方煤矿岩溶突水影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 3417-3424.
Li Qingfeng, Wang Weijun, Peng Wenqing, et al. Influence of activation fault after coal extraction on coal mine karst water-inrush[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3417-3424.
- [5] 武强, 朱斌, 刘守强. 矿井断裂构造带滞后突水的流-固耦合模拟方法分析与滞后时间确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 93-104.
Wu Qiang, Zhu Bin, Liu Shouqiang. Flow-solid coupling simulation method analysis and time identification of lagging water-inrush near mine fault belt[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 93-104.
- [6] 孙明贵, 李天珍, 黄先伍, 等. 基于层状岩体渗流失稳条件的煤矿突水机理[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(3): 284-288.
Sun Minggui, Li Tianzhen, Huang Xianwu, et al. Mechanism of water inrush based on the instability of the seepage flow in rock strata[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2005, 34(3): 284-288.

- [7] 杨国勇,车灿辉,刘树才.突水断层水量预测的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,2010,27(3):351-358.
Yang Guoyong, Che Canhui, Liu Shucui. Numerical simulation of forecasting water inrush volume from fault[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2010, 27(3): 351-358.
- [8] 白继文,李术才,刘人太,等.深部岩体断层滞后突水多场信息监测预警研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2327-2335.
Bai Jiwen, Li Shucui, Liu Rentai, *et al.* Multi-field information monitoring and warning of delayed water bursting in deep rock fault[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2327-2335.
- [9] Li Shucui, Bai Jiwen, Liu Rentai, *et al.* Development and application research of grouting material in mine aquifer transformation [C]. Geo-China International Conference, Jinan, 2016: 126-134.
- [10] 李晓昭,罗国煜,陈忠胜.地下工程突水的断裂变形活化导水机制[J].岩土工程学报,2002,24(6):695-700.
Li Xiaozhao, Luo Guoyu, Chen Zhongsheng. The mechanism of deformation and water conduction of fault due to excavation in water inrush in underground engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(6): 695-700.
- [11] 李术才,张霄,张庆松,等.地下工程涌突水注浆止水浆液扩散机制和封堵方法研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(12):2377-2395.
Li Shucui, Zhang Xiao, Zhang Qingsong, *et al.* Research on mechanism of grout diffusion of dynamic grouting and plugging method in water inrush of underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(12): 2377-2395.
- [12] 阮文军,王文臣,胡安兵.新型水泥复合浆液的研制及其应用[J].岩土工程学报,2001,23(2):212-216.
Ruan Wenjun, Wang Wenchen, Hu Anbing. Development and application of new kind of cement composite grout [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 212-216.
- [13] 杜嘉鸿,张崇瑞,何修仁.地下建筑灌浆工程简明手册[M].北京:科学出版社,1998:38-64.
- [14] 刘人太,李术才,张庆松,等.一种新型动水注浆材料的试验与应用研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(7):1454-1459.
Liu Rentai, Li Shucui, Zhang Qingsong, *et al.* Experiment and application research on a new type of dynamic water grouting material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(7): 1454-1459.
- [15] Li Shucui, Sha Fei, Liu Rentai, *et al.* Investigation of viscous behaviour and strength of microfine-cement-based grout mixed with microfine fly ash and superplasticiser [J]. Advances in Cement Research, 2017, 29(5): 206-215.
- [16] 杨米加,陈明雄,贺永年.注浆理论的研究现状及发展方向[J].岩石力学与工程学报,2001,20(6):839-841.
Yang Mijia, Chen Mingxiong, He Yongnian. Current research state of grouting technology and its development direction in future [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(6): 839-841.
- [17] 沙飞,刘人太,李术才,等.运营期渗漏水隧道注浆材料适用性[J].中南大学学报:自然科学版,2016,47(12):4163-4172.
Sha Fei, Liu Rentai, Li Shucui, *et al.* Application on different types of cementitious grouts for water-leakage operational tunnels [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(12): 4163-4172.
- [18] 李术才,刘人太,张庆松,等.基于黏度时变性的水泥-玻璃浆液扩散机制研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2415-2421.
Li Shucui, Liu Rentai, Zhang Qingsong, *et al.* Research on C-S slurry diffusion mechanism with time-dependent behavior of viscosity [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2415-2421.
- [19] 宋振骥,郝建,汤建泉,等.断层突水预测控制理论研究[J].煤炭学报,2013,38(9):1511-1515.
Song Zhenqi, Hao Jian, Tang Jianquan, *et al.* Study on water inrush from fault's prevention and control theory [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1511-1515.
- [20] 李召峰,李术才,刘人太,等.富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(1):199-207.
Li Zhao Feng, Li Shucui, Liu Rentai, *et al.* Grouting reinforcement experiment for water-rich broken rock mass [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 199-207.