瞬变电磁法探测超高水材料注浆治理采空区效果

张永超[1,2,3],贾新果[1,2,3],陈 凯[1,2,3]
(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 安全分院,北京 100013; 2. 煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;
3. 北京市煤矿安全工程技术研究中心,北京 100013)

摘 要: 为研究瞬变电磁法检测采空区超高水材料注浆治理效果的可行性,采用 1D 正演得到了采空区注浆前后的瞬变电磁响应数据,并对其进行了反演。结果表明: 根据注浆前采空区充水性的不同,充水与不充水情况下注浆后二次场感应电压的最大增幅分别约为 40%或 100%,反演后相应的视电阻率至少降低 20%。在华北某矿采空区超高水材料注浆治理效果检测中: 证实了注浆前后视电阻率的变化特征与理论结果相符,以视电阻率降低 20%为边界推断的有效注浆区域基本准确,证实该方法是可行有效的。

关键词: 瞬变电磁法; 超高水材料; 采空区; 注浆; 检测
中图分类号: P618.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2017)03-0174-05

TEM inspecting of goaf treatment effect with grouting super high water material

Zhang Yongchao[1,2,3], Jia Xinguo[1,2,3], Chen Kai[1,2,3]
(1. *Mine Safety Technology Branch, China Coal Research Institute, Beijing* 100013 *China*; 2. *State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing* 100013 *China*; 3. *Beijing Mine Safety Engineering Technology Research Center, Beijing* 100013 *China*)

Abstract: In order to study the feasibility of TEM inspecting the effect of goaf treatment with grouting super high water material, 1D forward modeling was used to obtain the TEM response data before and after grouting, then the data was inversed. The result showed that there were obvious differences between before and after, after grouting the max amplification of secondary field induced voltage would be about 40% or 100% depending on whether goaf had been water-accumulating or not before, the corresponding apparent resistivity would decrease more than 20% after inversion. The practice at a coalmine of North China showed that the change features of apparent resistivity between before and after grouting coincided with the theoretical result, the effective grouted area inferred by the boundary whose apparent resistivity had decreased more than 20% was basically accurate, this method was feasible and effective.

Key words: TEM; super high water material; goaf; grouting; inspecting

0 引 言

随着近年来国内经济的迅速发展,采空区成为工程建设中经常遇见的问题,为避免它引起的不均匀地表变形对其上部建(构)筑物造成破坏,需在施工前对其进行治理。常用的采空区治理方案为注浆充填,由于该方法的隐蔽性,对其效果进行检测十分必要。钻探、物探、压水试验、地表变形监测是常用的方法,物探因具有效率高、可实现大面积检测的优点被广泛使用,结合其他检测手段一起可以实现"点面结合"的立体检测[1]。常用的物探检测手段有高密度电法[2-3]、瞬态瑞雷波法[2,4]、地质雷达法[5]、瞬变电磁法[2]、音频大地电磁法[6]、跨孔地震波 CT[1,4]、跨孔电磁波 CT[1,4]等,然而前人的研究主要集中在基于水泥粉煤灰材料的采空区注浆治理效果检测上。相对于水泥粉煤灰材料,超高水材料具有结实率高(接近 100%)、易输送、扩散范围易控制、凝固时不析水[7-8]等优点,逐步被应用于采矿工程[9-10]和矿山地质灾害的防治,譬如防灭火[11]、采空区充填治理[12-13]等。因此,对超高水材料采空区

收稿日期: 2016-11-28; **责任编辑:** 曾康生 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2017.03.031
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404139)
作者简介: 张永超(1983—),男,河南焦作人,硕士,助理研究员。Tel: 18600345718, E-mail: 120460817@qq.com
引用格式: 张永超,贾新果,陈 凯,等.瞬变电磁法探测超高水材料注浆治理采空区效果[J].煤炭科学技术,2017,45(3):174-178,100.
Zhang Yongchao, Jia Xinguo, Chen Kai. TEM inspecting of goaf treatment effect with grouting super high water material[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(3): 174-178, 100.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

注浆治理效果的检测,成为地球物理工作者所面临的现实性研究内容问题。

不同于水泥粉煤灰浆液凝固后电阻率中等的特性[3],超高水材料浆液凝固后体积含水率可达 95% 以上[7-8],其电阻率更低,实测电阻率小于 5 Ω·m。瞬变电磁法具有不存在一次场背景干扰、无高阻屏蔽效应、无静态效应、地形影响小,特别是对低阻敏感等优点[14-15]。因此,以瞬变电磁法为手段,笔者从理论出发研究了瞬变电磁法检测超高水材料注浆效果的可行性,并分析其在实际工程的应用效果。

1　瞬变电磁法原理简介

瞬变电磁法(简称 TEM)利用一个不接地的回线源(也可以用接地线源)向地下发射脉冲电磁波作为激发场源,根据法拉第电磁感应定律,脉冲电磁波结束以后,大地在激发场的作用下,内部会产生感生的涡流。电流关断后激发的新磁场(称为"二次场")可以等效为一系列水平圆环状线电流形成的磁场,这些电流环可看作以一定角度从发射回线向下、向外扩散的"烟圈"。地下电阻率越低,二次场信号越强;在其时间特性中,延时较小的信号反映浅部地层信息,延时较大的信号反映深部地层信息,时间的早晚与探测深度具有一定的对应关系。根据相关理论,地面瞬变电磁晚期视电阻率的计算式为[16]

$$\rho_\tau = \frac{\mu_0}{4\pi t}\left[\frac{2\mu_0 SNsn}{5t(V/I)}\right]^{2/3} \tag{1}$$

式中: ρ_τ 为视电阻率; μ_0 为磁导率; S 为发射框面积; N 为发射框匝数; s 为接收框面积; n 为接收框匝数; t 为衰减时间; V/I 为归一化二次场感应电压。

"烟圈"沿倾斜锥面其向下传播的速度为[16]

$$v = \frac{2\sqrt{\rho}}{\sqrt{\pi\mu_0 t}} \tag{2}$$

式中: v 为传播速度; ρ 为电阻率。

2　采空区注浆前后电阻率变化特征

煤层采空后,原有的应力平衡被破坏,上覆岩层会产生一定高度的垮落带、断裂带(简称"两带")。由于存在大量空洞和断裂,采空区及"两带"的电阻率与正常岩层有明显的差异。注浆之前,采空区及"两带"不(弱)充水时,其电阻率会高于正常岩层;而采空区及"两带"充水时,其电阻率会低于正常岩层。

注浆之后,由于采空区被超高水材料充填,其电阻率应有如下变化: 不(弱)充水采空区的视电阻率会明显降低; 充水采空区的积水被均匀充填的浆液代替,其视电阻率的均一性得到改善。

3　电磁响应理论特征

鉴于采空区注浆前后电阻率变化特征,笔者构建了相应的一维地质模型,研究瞬变电磁法对超高水材料注浆前后采空区的电磁响应特征,从理论上分析 TEM 法检测注浆效果治理效果的可行性,并为实际工程提供理论依据和指导。

根据研究区域的岩石物性参数,建立不充水采空区、充水采空区以及采空区注浆后 3 个模型,如图 1 所示。模型由地表至深部共分为 5 层,分别为: 整体移动带、断裂带、垮落带、采空区以及底板。采空区埋深 200 m,高 4 m。顶底板围岩电阻率 ρ_1、ρ_4 均为 100 Ω·m。测区上覆岩层坚硬程度为中硬,根据《"三下"采煤规程》的"两带"发育高度经验公式,设垮落带高 12 m,断裂带高 $h_2 = 28$ m。整体移动带高 $h_1 = 160$ m。3 个模型中整体移动带和底板的厚度和电阻率保持不变,为能表征突出不同,图 1 只显示深度 120~230 m 的部分。

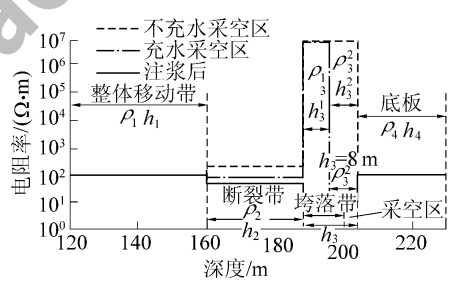


图 1　模型示意

Fig. 1　Sketch map of models

不充水采空区模型如图 1 中的虚线所示: 采空区不充水时,断裂带的电阻率为围岩的 2~4 倍[17-18],故设其电阻率 $\rho_2 = 200$ Ω·m; 垮落带和采空区的电阻率与空气接近,视为一体,故设其高度 $h_3 = 16$ m,电阻率 $\rho_3 = 10^7$ Ω·m。

采空区充水模型如图 1 中点划线所示: 采空区充水时断裂带一般为导水通道,其电阻率略低于正常岩层,取 $\rho_2 = 80$ Ω·m; 设采空区及垮落带整体充水率为 50%,则上部空气层的电阻率 $\rho_3^1 = 10^7$ Ω·m、高 $h_3^1 = 8$ m,下部水层的视电阻率为 $\rho_3^2 = 10$ Ω·m、高 $h_3^2 = 8$ m。

注浆后,由于超高水材料的填充,断裂带的电阻率会低于正常岩层,设为 $\rho_2 = 50$ Ω·m,垮落带和采空区的电阻率设为 $\rho_3 = 10$ Ω·m,如图 1 中的实线所示。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

正演时参数选择如下: 发射框边长 300 m,接收线圈等效面积 200 m^2,中心回线装置,在 10^{-5} ~ 10^{-1} s 内进行指数等间隔采样 60 个时间门。

上述 3 个模型的二次场响应如图 2 所示,横轴代表衰减时间,纵轴代表归一化的二次场感应电压。前期 3 条曲线基本重合,反映了 3 个模型浅部有相同的地电结构; 但在 3×10^{-3} s 后,曲线开始逐渐分离,且不论采空区是否充水,注浆后的二次场感应电压在 10^{-3} ~ 10^{-2} s 的时间段内较注浆前都有明显的提升,这表明理论上 TEM 法可用于检测超高水材料注浆效果; 10^{-2} s 后,3 条曲线又逐渐趋于重合,反映了 3 个模型深部有相同的地电结构。

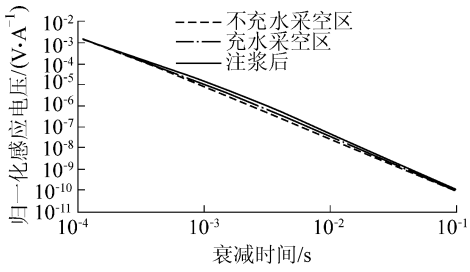


图 2　瞬变电磁响应曲线对比

Fig. 2　Comparison of curves different models' TEM response

由注浆后二次场感应电压相较注浆前的增幅(图 3)可见: 不充水采空区注浆后的增幅(最大 100%)大于充水采空区注浆后的增幅(最大 40%)。根据式(2),烟圈在电阻率较高的不充水采空区中扩散更快,因此不充水采空区增幅的峰值对应的时间(约 2×10^{-3} s)也早于充水采空区(约 2.8×10^{-3} s)。

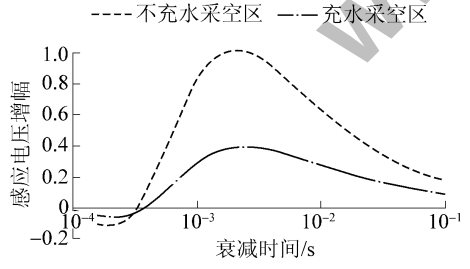


图 3　注浆后的二次场感应电压增幅

Fig. 3　Secondary induced voltage's amplification of different models

图 4 为正演数据经全程视电阻率计算[19]和时深转换后得到的视电阻率-深度曲线。3 条曲线在约 200 m 深度的极值点反映了注浆前后的电性变化: 注浆前不充水采空区的极值为极大值,约 95 Ω·m; 充水采空区的极值为极小值,约 75 Ω·m; 注浆后的极值为极小值,约 60 Ω·m,与注浆前相比降幅至少为 20%。

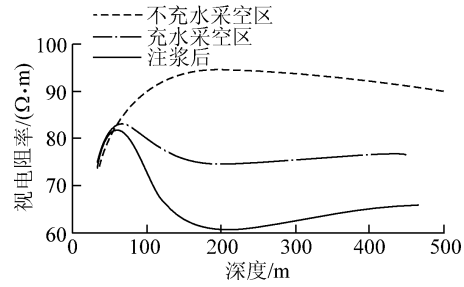


图 4　视电阻率-深度曲线对比

Fig. 4　Comparison diagram of $\rho-h$ curves

4　应用实例

为检验 TEM 检测采空区超高水材料注浆治理效果的有效性,笔者将其应用在华北某煤矿工业广场下伏采空区注浆治理项目中。

4.1　工程概况

由于产业升级改造的需要,某矿需将原工业广场迁建至新场地,而新场地周边有多个工作面形成的采空区,为保证新场地的地基稳定,煤矿决定对采空区进行超高水材料注浆治理。

为检测注浆效果,分别于注浆前和注浆后 45 d 各进行了 1 次瞬变电磁法探测。由于场地条件所限,仅在 2307 工作面及周边进行了探测,2307 工作面分层开采 2 号煤层,煤层倾角约 20°,采深 200 ~ 250 m,累计采厚 4.5 ~ 4.6 m。数据采集选用 Protem57 瞬变电磁仪,发射线框为 300 m×300 m,通过试验选择的重复频率为 6.25 Hz,发射电流 15 A,上述参数在典型条件下的探测深度大于 300 m,盲区小于 30 m; 测网网格 20 m×20 m,个别测点根据现场条件进行一定的偏移,共布置 72 个测点。

4.2　地质概况

未受采动影响时,据钻孔和测井资料,从 2 号煤层底板至地表的地层分布及其物性参数为: 二叠系下统山西组厚 50 ~ 70 m,该层砂岩和煤占比较大,电阻率 400 ~ 1 200 Ω·m; 二叠系下统下石盒子组厚约 50 ~ 70 m,中下部以砂质泥岩为主,电阻率约 200 Ω·m,顶部则为细粒砂岩,电阻率约 400 Ω·m; 二叠系上统上石盒子组厚 60 ~ 80 m,下部为中粒砂岩,电阻率较高,为 400 ~ 800 Ω·m,中部为砂质泥岩,电阻率最低,约 100 Ω·m,上部以粉砂岩、砂质泥岩为主,电阻率为 100 ~ 200 Ω·m; 第四系厚 20 ~ 30 m,岩性为砂质黏土和砾石,电阻率较高,约 300 Ω·m。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

4.3　资料分析

S5 线注浆前后的视电阻率断面对比如图 5 所示，注浆前煤层底板附近的视电阻率较低，表明采空区充水，附近的 SY09 孔钻孔电视的结果证实了这种推断。注浆之后，地表以下 30 m 区域内视电阻率明显降低，推断有浆液渗漏到第四系松散层，与现场多处发生冒浆的现象吻合; 标高+90—+145 m 处的视电阻率也有一定程度的降低，根据地质资料该层位大体上位于二叠系上统上石盒子组的下部和二叠系下统下石盒子组上部，岩性主要以砂岩为主，孔隙断裂较发育，注浆后浆液填充部分孔隙，使该地层的视电阻率整体上有一定下降; 注浆前 2 号煤层底板处整体的视电阻率为 6～8 Ω·m，注浆后降为 4～6 Ω·m。虽然绝对降幅不大但相对降幅超过 25%，此外注浆前视电阻率最低(4 Ω·m) 的部分仅集中于煤层底板下倾方向的 100 号测点，注浆后其范围扩大，沿煤层的视电阻率横向均一性明显改善，推断该处浆液充填效果较好。

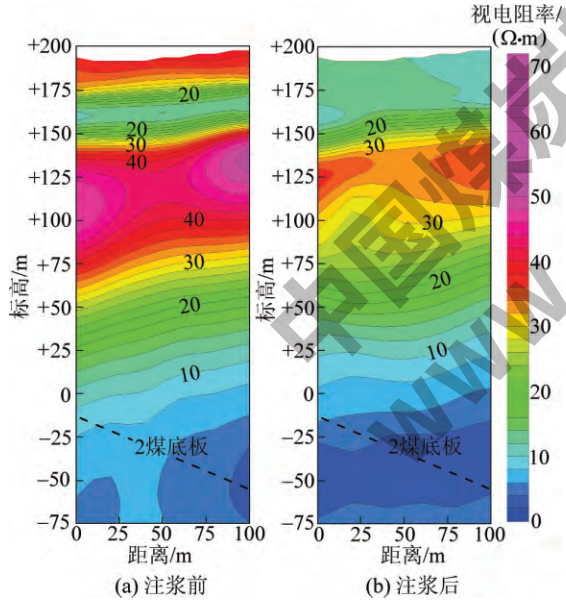


图 5　S5 线注浆前后视电阻率断面对比

Fig. 5　Comparison of apparent resistivity section of Line S5 before and after grouting

S12 线注浆前后视电阻率断面对比如图 6 所示。注浆前煤层附近的视电阻率较高，推断此处的采空区无(弱) 积水，测线上 SY03 孔的钻孔窥视也未观测到完整的积存水面。注浆后的视电阻率变化特征整体上与 S5 线相似，但采空区处的视电阻率性质由高阻转为低阻，前后变化非常明显; 同时，沿煤层的视电阻率均一性明显改善，由此可推断浆液对采空区的充填效果良好。测线附近的 YZ02 钻孔岩心也验证了物探结果，由图 7a 可见超高水材料对砂岩的孔隙断裂进行了部分充填，图 7b 则可见垮落到采空区的岩石间充填着超高水材料。

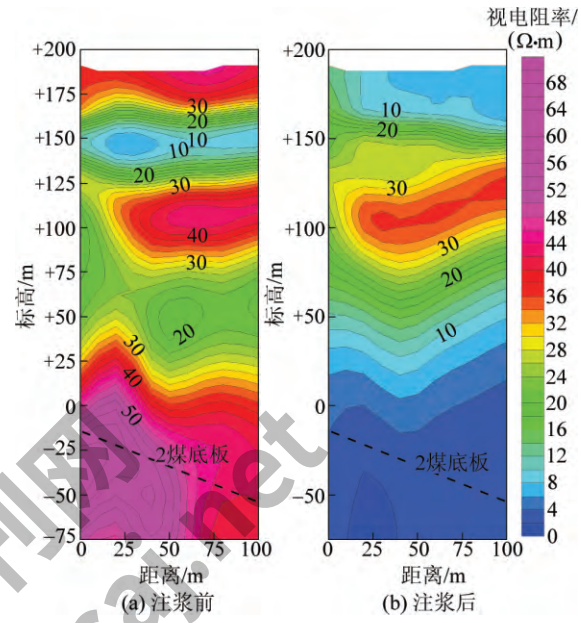
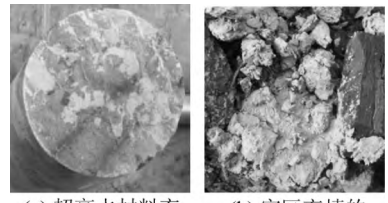


图 6　S12 线注浆前后视电阻率断面对比

Fig. 6　Comparison of apparent resistivity section of Line S12 before and after grouting



(a) 超高水材料充填砂岩孔隙裂隙　(b) 空区充填的超高水材料

图 7　YZ02 钻孔岩心照片

Fig. 7　Rock core's phto of hole YZ02

4.4　结果验证

将注浆前后煤层底板处视电阻率的差值除以注浆前的视电阻率，得到注浆前后煤层底板视电阻率变化率，其正值表示注浆后视电阻率降低，负值表示升高，其分布如图 8 所示。根据前述的正演结果，一般情况下在注浆效果良好的区域，可将视电阻率降低 20%以上的区域作为有效的浆液填充区域，其边界线如图 8 中Ⅰ线。S5、S6 线的煤层下倾方向的测点由于注浆前采空区的充水率较高，因此注浆后视电阻率变化不大; S7、S8 线处在第 1 次物探完成之后架设了注浆所需的电力线，第 2 次物探时该处干扰较大，因此部分区域的视电阻率不降反升。

根据浆液扩散试验结果，结合注浆后钻孔取心

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

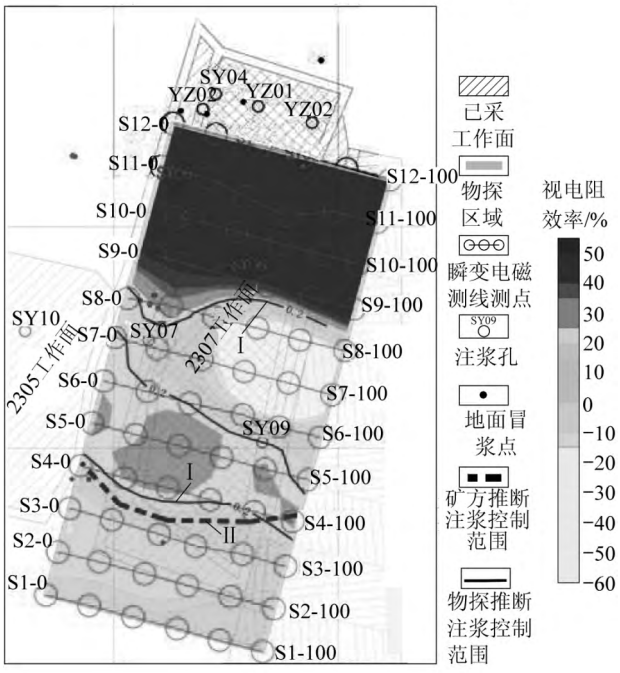


图 8　注浆前后煤层底板视电阻率变化率分布

Fig. 8　Distribution of seam floor's apparent resistivity change rate before and after grouting

结果综合确定的有效注浆区域边界如图 8 中的Ⅱ线。排除 S5～S8 线受特殊因素影响的区域外，物探推断的有效注浆区域与其基本吻合。

5　结　　论

1) 理论研究表明：一般情况下，注浆后的二次场感应电压较注浆前增幅大于 40%，视电阻率降幅大于 20%，不充水采空区的视电阻率降幅大于充水采空区，采用 TEM 检测采空区超高水材料注浆治理效果在理论上是可行的。

2) 检测实践则表明：在有效注浆区域，注浆后的视电阻率较注浆前会有不同程度的降低、视电阻率沿煤层的横向均一性明显改善；物探推断的有效注浆区域与浆液扩散试验以及钻探综合确定的结果基本吻合，验证了该方法的可行性和有效性。

3) 鉴于采空区注浆治理工程上的隐蔽性、复杂性，还需进一步研究采空区注浆充填率和视电阻率变化之间的关系。

参考文献(References)：

[1] 何　鑫.新建东都—平邑铁路路基下伏采空区注浆效果检测研究[D].成都：西南交通大学，2013.

[2] 张　波，王万顺，范运岭，等.高速公路下伏采空区治理工程质量检测方法研究[J].中国煤田地质，2004，16(5)：57-61.
Zhang Bo，Wang Wanshun，Fan Yunling，*et al*. A study on quality inspection methodology of goaf harnessing engineering under expressway [J]. Coal Geology of China，2004，16(5)：57-61.

[3] 陈子龙.高密度电法检测岩溶路基注浆效果模型试验研究[D].成都：西南交通大学，2014.

[4] 张　璇.南钦线采空区注浆处理效果综合物探检测方法研究[D].成都：西南交通大学，2014.

[5] 刘　强.京沪高速铁路路基岩溶浅埋段注浆效果检测与评判方法试验研究[D].北京：北京交通大学，2009.

[6] 李学良，李树志，侯金波.EH-4 电导率成像系统在采空区注浆效果检测中的应用[J].煤矿安全，2012，43(11)：139-142.
Li Xueliang，Li Shuzhi，Hou Jinbo. Application of EH-4 conductivity imaging system in detection of grouting effects in goaf area [J]. Safety in Coal Mines，2012，43(11)：139-142.

[7] 丁　玉，冯光明，王成真.超高水充填材料基本性能试验研究[J].煤炭学报，2011，36(7)：1087-1092.
Ding Yu，Feng Guangming，Wang Chengzhen. Experimental research on basic properties of superhigh-water packing material [J]. Journal of China Coal Society，2011，36(7)：1087-1092.

[8] 冯光明，丁　玉，朱红菊，等.矿用超高水充填材料及其结构的实验研究[J].中国矿业大学学报，2010，39(6)：813-819.
Feng Guangming，Ding Yu，Zhu Hongju，*et al*. Experimental research on a superhigh-water packing material for mining and its micromorphology [J]. Journal of China University of Mining & Technology，2010，39(6)：813-819.

[9] 周　振，冯光明，张　明，等.超高水材料分段阻隔式充填开采研究[J].中州煤炭，2011(2)：16-18.
Zhou Zhen，Feng Guangming，Zhang Ming，*et al*. Research on subsectioned-obstructing filling mining method with super high-water material [J]. Zhongzhou Coal，2011(2)：16-18.

[10] 陈朋磊.超高水充填开采顶板离层规律研究[J].中州煤炭，2015(10)：70-73.
Chen Penglei. Studyon law of roof abscission layer during mining face filling with high-water [J]. Zhongzhou Coal，2015(10)：70-73.

[11] 段文超，冯光明，陈鸿旭，等.超高水材料在巷道防灭火中的应用[J].中国煤炭，2012，38(7)：92-95.
Duan Wenchao，Feng Guangming，Chen Hongxu，*et al*. Application of ultra-high water retaining material on fire prevention and extinguishment in roadway [J]. China Coal，2012，38(7)：92-95.

[12] 冯光明，孙春东，王成真，等.超高水材料采空区充填方法研究[J].煤炭学报，2010，35(12)：1963-1968.
Feng Guangming，Sun Chundong，Wang Chengzhen，*et al*. Research on goaf filling method with super high water material [J]. Journal of China Coal Society，2010，35(12)：1963-1968.

[13] 冯光明，贾凯军，尚宝宝. 超高水充填材料在采矿工程中的应用与展望[J]. 煤炭科学技术，2015，43(1)： 5-9.
Feng Guangming，Jia Kaijun，Shang Baobao. Application and prospect of super-high-water packing material in mining engineering [J]. Coal Science and Technology，2015，43(1)： 5-9.

(下转第 100 页)

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

effect of enhanced coalbed methane drawing by injection gas under coal mine [J] .Journal of Chongqing University: Natural Science, 2011,34(4):72-77.

[7] 秦学成,段永刚,谢学恒.煤层气井产气量控制因素分析 [J] .西南石油大学学报: 自然科学版,2012,34(2):99-104.
Qin Xuecheng,Duan Yonggang,Xie Xueheng,*et al*.Controlling factor analysis of gas production rate in coalbed gas well [J] .Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012,34(2):99-104.

[8] 赵　群,王红岩,李景明,等.快速排采对低渗透煤层气井产能伤害的机理研究 [J] .山东科技大学学报: 自然科学版,2008,27(3):27-31.
Zhao Qun,Wang Hongyan,Li Jingming,*et al*.Study on mechanism of harm to CBM well capability in low permeability seam with quick drainage method [J] .Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2008, 27(3): 27-31.

[9] 娄剑青.影响煤层气井产量的因素分析 [J] .天然气工业,2004.24(4):62-64.
Lou Jianqing.Factors of influencing production of coalbed gas wells [J] .Natural Gas Industry,2004,24(4):62-64.

[10] 任　岚,赵金洲,胡永全,等.水平裂缝井压后产量影响因素分析 [J] .西南石油大学学报: 自然科学版,2010,32(4):77-81.
Ren Lan,Zhao Jinzhou,Hu Yongquan,*et al*.Affecting factor analysis of productivity for horizontally fractured wells [J] .Journal of South-west Petroleum University: Science & Technology Edition, 2010,32(4):77-81.

[11] 陈振宏,王一兵,孙　平.煤粉产出对高煤阶煤层气井产能的影响及其控制 [J] .煤炭学报,2009,34(2):229-232.
Chen Zhenhong,Wang Yihing,Sun Ping.Destructive influences and effectively treatments of coal powder to high rank coalbed methane production [J] .Journal of China Coal Society,2009,34(2): 229-232.

[12] 陈　刚,秦　勇,杨　青,等.不同煤阶煤储层应力敏感性差异及其对煤层气产出的影响 [J] .煤炭学报,2014,39(3):504-509.
Chen Gang,Qin Yong,Yang Qing,*et al*.Different stress sensitivity of different coal rank reservoir permeability and its effect on the coalbed methane output [J] .Journal of China Coal Society,2014, 39(3):504-509.

[13] 王早祥,兰文剑.煤层气井煤粉产生机理探讨 [J] .中国煤炭,2012,38(2):95-97.
Wang Hanxiang,Lan Wenjian.Discussion on formation mechanism of coal powder in coalbed methane well [J] .China Coal,2012,38(2):95-105.

[14] 张芬娜,綦耀光,徐春成,等.煤粉对煤层气井产气通道的影响分析 [J] .中国矿业大学学报,2013,42(3):428-435.
Zhang Fenna,Qi Yaoguang,Xu Chuncheng,*et al*.Analysis of the impact of gas production channel for coalbed methane well by pulverized coal [J] .Journal of China University of Mining & Technology,2013,42(3): 428-435.

[15] 魏迎春,曹代勇,袁　远,等.韩城区块煤层气井产出煤粉特征及主控因素 [J] .煤炭学报,2013,38(8):1424-1429.
Wei Yingchun,Cao Daiyong,Yuan Yuan,*et al*.Characteristics and controlling factors of pulverized coal during coalbed methane drainage in Hancheng area [J] .Journal of China Coal Society, 2013,38(8): 1424-1429.

[16] 吴财芳,张晓阳.煤层气井排采过程中渗透率动态变化研究进展 [J] .煤炭科学技术,2016,44(6):7-13.
Wu Caifang,Zhang Xiaoyang.Study progress of permeability dynamic variation in drainage process of coalbed methane well [J] .Coal Science and Technology,2016,44(6):7-13.

(上接第 178 页)

[14] 解海军.煤矿积水采空区瞬变电磁法探测技术研究 [D] .北京: 中国地质大学(北京),2009.

[15] 梁建刚.瞬变电磁勘察煤田采空区的可行性分析 [D] .长沙: 中南大学,2009.

[16] 刘树才,岳建华,刘志新.煤矿水文物探技术与应用 [M] .徐州: 中国矿业大学出版社,2005.

[17] 于师建,程久龙.覆岩断裂带电阻率响应特征 [J] .岩土工程学报,2000,22(3):336-339.
Yu Shijian,Cheng Jiulong.The resistivity responses characteristic in the overbreak zone of cover strata [J] .Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2000,22(3):336-339.

[18] 程久龙,于师建.覆岩变形破坏电阻率响应特征的模拟实验研究 [J] .地球物理学报,2000,43(5):699-706.
Cheng Jiulong,Yu Shijian.Simulation experiment on the response of resistivity to deformation and failure of overburden [J] .Chinese Journal of Geophysics,2000,43(5):699-706.

[19] 白登海,Meju Maxwell A,卢　健,等.时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算 [J] .地球物理学报,2003,46(5):122-129.
Bai Denghai,Meju Maxwell A,Lu Jian,*et al*.Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method [J] .Chinese Journal of Geophysics,2003, 46(5):122-129.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net