

大型复杂采空区注浆效果检测方法研究*

彭永良^{①②} 胡卸文^① 宋大各^① 何鑫^①

(^①西南交通大学地球科学与环境工程学院 成都 610031)

(^②中铁济南工程技术有限责任公司 济南 250022)

摘要 大型复杂采空区由于具有分布范围广、多层、厚度及埋深不等和周围岩性复杂等特点,导致其注浆质量检测难度较大,目前尚无可靠的系统检测方法。结合某采空区注浆工程实践,对浆液结石体的电阻率进行了现场试验,得到了浆液结石体的视电阻率 ρ 范围为 $93 \sim 130 \Omega \cdot m$,与采空区及围岩均有较大差异。运用电测深法和电磁波 CT 对采空区注浆前后进行检测,发现注浆后浅部 $0 \sim 30m$ 范围内,视电阻率普遍得到降低且变得相对均匀稳定;深部低阻异常在注浆后电阻率也得以减弱,且均匀范围明显扩大;电磁波吸收系数在 $40 \sim 70m$ 范围内得到提高约 25% 。钻探取心发现,多数孔内可见注浆结石体;检测孔的后期注浆中,10个孔的注浆量均不大于周围相邻4个孔的注浆量平均值的 15% 。对以上检测结果分析可知:采空区在物性特征上表现为较低的电磁波吸收系数,注浆以后升高;地下水位之上的采空区表现为较高的电阻率,注浆之后降低,地下水位以下的采空区则反之。注浆前后采空区物探差异明显,本段落采空层的浆液充填效果较好,几种检测方法的结果具有良好的对应关系。同时表明,采用全域检测的电测深和局部详查的电磁波 CT 相结合的物探方法,与钻探取心结果及检测孔后期注浆数据进行分析对比,可以对大型复杂采空区注浆效果进行有效检测和评价,可为类似采空区提供借鉴。

关键词 采空区 电测深 电磁波 CT 注浆效果

中图分类号:P631.3 **文献标识码**:A

INSPECTION METHOD FOR GROUTING EFFECT IN TREATING LARGE COMPLICATED CAVITIES DUE TO MINING

PENG Yongliang^{①②} HU Xiewen^① SONG Dage^① HE Xin^①

(^①Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

(^②Zhongtie Jinan Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250022)

Abstract Complicated cavities with wide distribution, multi-layers, variable thicknesses and depths as well as the complex surrounding lithology, result in difficulties on their grouting effect test. Therefore, there is no reliable testing system at present. Based on cavities grouting practice, the resistivity of the slurry stones is tested and the apparent resistivity ρ range of $93 \sim 130 \Omega \cdot m$ has a great difference quantity from cavities and surrounding rocks. Cavities are tested by sounding method and electromagnetic wave CT before and after grouting, showing that: after grouting, in shallow range of $0 \sim 30m$, the apparent resistivity generally is reduced and becomes relatively uniform and stable; low resistivity abnormality in deep range is mitigated with expanded uniform range; electromagnetic wave absorption coefficient increased by about 25% in $40 \sim 70m$ range. Core drilling indicates that, grouting slurry stone

* 收稿日期:2012-10-20;收到修改稿日期:2013-05-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40972175), NSFC-云南联合基金重点项目(U1033601),中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11ZT14)资助.

第一作者简介:彭永良,主要从事工程地质、环境地质、岩土工程方面的勘察设计、施工与研究. Email: pengyl2007@sohu.com

is visible in most boreholes, and 10 detecting holes' grouting volume is not more than 15% of the adjacent four holes grouting average. The above test results show that: the cavities have lower electromagnetic wave absorption coefficient, which rises after grouting; cavities above the water table have high resistivity, which come down after grouting, and cavities below the water table have totally reverse attribute. Before and after grouting the cavities have great difference on the properties, showing the grouting quality is very good and there is a good correspondence between the results of several detection methods. The result indicates that, by comparing with drilling results and detection-hole grouting data, geophysical method of overall electrical sounding detection and partial detailed electromagnetic wave CT, can effectively detect complicated cavities grouting effect. The achievement can be drawn on in other similar cavities.

Key words Complicated cavities, Electrical sounding, Electromagnetic CT, Grouting effect

1 引言

随着我国高速铁路、公路的大量修建,不可避免地会遇到早期煤层开采等活动形成的采空区,工程中一般采用注浆法进行治理。采空区注浆处理属于隐蔽工程,因此采用哪些检测方法对注浆效果进行有效的质量评价就显得非常重要。目前主要检测方法既有钻孔取心等直观方法,也有如直流电法、电磁波 CT、地震波 CT、声波测试等无损物探方法^[1~5]。由于传统的钻孔检测方法属一孔之见,检测范围小,且检测费用高,因此不能单独对注浆效果进行质量评价,常结合其他各种物探手段进行综合检测。但因不同物探方法也有不同的适用范围和检测精度,到目前为止,在采空区的治理效果评价方面,还没有形成成熟可靠的系统检测方案^[6]。特别像本工程所遇到的多层开采,且分布区域及深度范围都较大的复杂采空区的注浆加固效果评价方面,更无成功经验可循。

目前,采空区注浆加固常用检测方法的特点如下:(1)钻孔取心:钻探取心观察浆液结石体是最有效、直观的定量检测方法,适用范围很广,但由于地质体的各向异性和不均匀性,使得注浆加固的充填区域和方向具有不确定性,因此钻孔取心观察具有一定的偶然性,且造价较高。(2)工程物探:物探方法种类繁多,但都以定性为主,且单一的物探方法往往很难对采空区处治情况进行准确判断,根据场地地质条件,采用几种物探手段的可靠经济优化组合对同一工程进行探测,相互配合,发挥各种物探方法的优越性,可以获得满意的效果及精度。(3)压水试验:通过注浆前后压水试验反映出的单位吸水量和渗透系数的变换情况,对注浆充填效果进行间接评价。(4)变形观测:施工中和施工后的沉降观测

可以为采空区治理效果提供直观的评价资料,但时间跨度长。

因此,在采空区检测领域,今后的发展方向为:由施测过程简单、检测范围广的物探方法作为主导,结合检测效果直接,但施测难度较大的钻探方法判释,并辅助以压水试验、复注试验和沉降观测等手段的综合检测方法。

某新建铁路全长 60.13km,在 DK1+360~DK3+700 内有长期开采的多层、复杂煤层采空区,跨度达 2.16km,采空区分布有 4~5 层,已引起多处地面塌陷、下沉和房屋变形,对铁路建设和运营构成严重威胁,因此对采空区进行注浆加固处理^[7,8]。通过对沿线路长约 2km 采空区注浆效果检测的实践表明,采用全域检测的电测深和局部详查的电磁波 CT 相结合物探手段,与准确的钻探取心及检测孔注浆量统计、分析对比综合方法,对大型复杂采空区注浆效果检测是可行的。

2 场区采空区分布及注浆状况

2.1 地质结构及采空区分布

场区地表为第四系(Q₄)黏性土,厚度一般 10m,下伏上侏罗统蒙山组(J₃)红褐色砂岩和太原组(C₃)含煤地层,以深灰色页岩和浅灰色砂岩为主,其中可采煤层为 9[#]、11[#]、13[#]、15[#]、17[#]层。各煤层均已大面积开采,平均厚度在 0.4~2.0m 之间。煤层开采方式一次采全高,多为长臂式开采,少量采用房柱式或刀柱式开采、矸石回填的方法。

2.2 采空区注浆处理概况

采空区采用钻孔注浆方式充填采空区空洞和基岩裂隙,截断地表水与地下水、注浆范围内外之间的

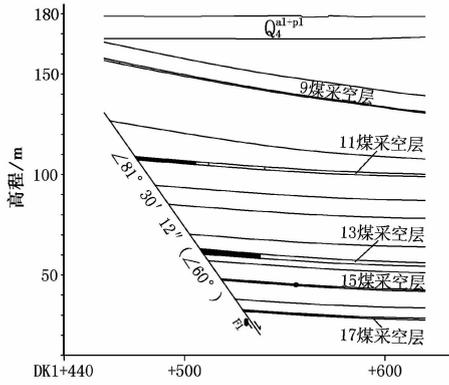


图1 路基下伏采空区分布断面示意图

Fig. 1 Cavities distribution map

水力联系,防止采空区变形而引起地面沉降和塌陷。

注浆治理宽度为线路中心至线路两侧采空区影响范围,治理深度在 DK1+480 ~ DK2+200、DK2+200 ~ DK3+522 段分别为 13[#]、15[#] 煤底板完整基岩以下 1.0m。全段最大处理深度 180.20m,路基范围内钻孔排距、孔间距均为 15m,路基坡脚外至治理边界排距、孔间距均为 20m,相邻排孔交错布置,最外一排钻孔为帷幕孔,孔间距 10m (图 2)。

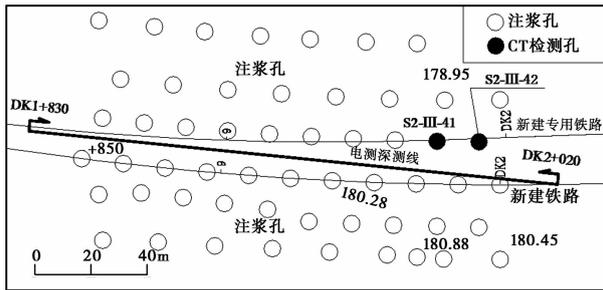


图2 物探及钻孔野外工作布置平面示意图

Fig. 2 Sketch map of geophysical exploration and drilling field work layout

浆液使用水泥、粉煤灰为主的混合浆液,粉煤灰占 70% ~ 85% (质量),水泥占 15% ~ 30%,水灰质量比为 0.6:1 ~ 1.5:1,水泥强度不低于 C32.5。

注浆钻孔穿越多层煤层采空区,采用下行式分段注浆工艺,即从上往下逐层进行施工,先进行浆液自流。在孔口位置 0.3MPa 的终注压力下,连续注浆 15min 内平均速率不大于 20L·min⁻¹ 并达到稳定时,终止注浆。

2.3 注浆场地介质地球物理特征

为准确了解浆液进入采空区后凝固特点,在现场对浆液凝固的结石体进行了电阻率随时间变化测

试,将实测数据与围岩地球物理特征进行对比,以确定检测浆液充填效果。

将现场施工所用的浆液注入到事先挖好的探槽中,探槽深度 85cm,然后分别在 1、2、3、10d 以及 1 和 3 个月测试结石体电阻率随时间变化 (图 3)。前 3d 因浆液还未充分凝固,所测得电阻率都很低;注浆后 30d 后,接近真值;注浆 90d 后,电阻率稳定在 130Ω·m。

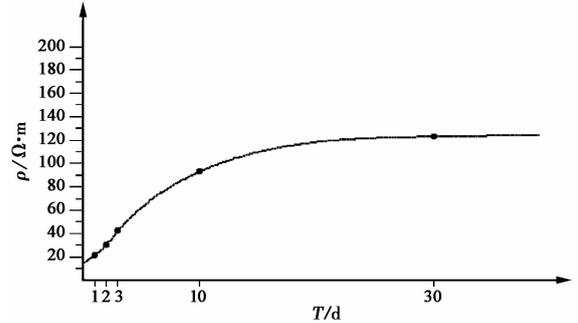


图3 现场结石体电阻率随时间变化曲线

Fig. 3 Resistivity curve of grout stone body changes with time

将现场采集的浆液结石样本制成标准试样,在室内进行饱水状态下电阻率测定,结果电阻率 ρ 为 91.6 ~ 94.4Ω·m。因此可知浆液结石体干燥状态下电阻率值为 130Ω·m,饱水状态下电阻率为 93Ω·m。

根据上述测试结果,并参考常见岩石的电阻率值^[9-16],可得出场区各介质物性参数 (表 1)。

表1 场区物性参数统计成果表

Table 1 Field physical parameters statistical table

岩性名称	电阻率常见值/Ω·m	电阻率变化范围/Ω·m
第四系粉质黏土	35	22 ~ 55
第四系砂土(中细砂)	96	80 ~ 115
泥岩	35	24 ~ 55
砂岩	140	96 ~ 175
页岩	42	35 ~ 65
灰岩	380	220 ~ 600
充填溶洞	95	80 ~ 130
浆液结石体	110	93 ~ 130
未充填采空区	65	45 ~ 85
煤层	20	10 ~ 35

从表 1 中可见:

(1) 第四系粉质黏土、砂土(中细砂)与基岩存在电阻率、地震波速差异。

(2) 各岩性层间存在物性差异。一般泥岩、页岩、煤层电阻率相对较低,为 10 ~ 55Ω·m; 砂岩、灰

岩电阻率相对较高,为 $220 \sim 600 \Omega \cdot \text{m}$; 充填溶洞及采空区显示相对低阻,为 $45 \sim 130 \Omega \cdot \text{m}$ 。

(3) 充填岩溶、采空区、煤层电性及波速均显示相对低,相互间区分较为困难。

3 野外施测方法

如前所述,采空区物探检测采用电测深法和电磁波 CT 相结合的方法,并在灌浆前后分别进行一次探测。然后通过现场钻探取心验证,并对检测钻孔后期注浆量进行观测。测区内共分 4 段,下面以典型的第二测区段 DK1+850 ~ DK2+400 为例进行说明。

3.1 物探野外工作布置

由于场区基岩为页岩、砂岩、泥岩及灰岩,局部夹煤层。岩性变化大、夹层多。采空区主要位于煤层中,厚度一般小于 3m,埋深不等。根据如此复杂的地层和采空区,为提高物探方法的解译精度,野外工作具体布置如下。

3.1.1 电测深

作为全局范围检测的电测深在每个测区内沿线路左侧 5m 覆盖整段,采用密点距(5m)、密极距($\Delta AB/2 = 2 \sim 20\text{m}$, $MN/2 = 1\text{m}, 15\text{m}, 20\text{m}$)进行检测。供电极距 $AB/2 = 3 \sim 402.5\text{m}$, 勘察深度约 130m。电测深仪器选用 DZD-6 型多功能电法仪,为提高接收效果,施测时对 M、N 电极进行加注泥浆处理。AB 极供电电压 $>450\text{V}$ 。勘察现场实时绘制电测深曲线,对异常处或有问题时及时做检查观测。为避免因地层各向异性给电测深解释工作带来困难,野外施工时电测深跑极方向与测线方向保持一致。开工和收工时均做漏电检查。

3.1.2 电磁波 CT

电磁波 CT 检测在每个测区段均布设一对检测孔,DK1+850 ~ DK2+400 段 CT 孔为 S2-III-42 与 S2-III-43,孔深 99m,孔间距约 17m。

电磁波 CT 测量仪器选用中国地质科学院物化探所地下物探室研制的 JW-5Q 型地下电磁波 CT 仪,采集频段选用 4 ~ 12Hz 和 12 ~ 32Hz 段,发射、接收点距均为 1m。

3.2 检测孔野外工作布置

钻探检测孔主要集中在路基两侧 50m 范围内布设,重点布设在线路中心和对铁路路基影响较大

的位置,兼顾帷幕孔检测和物探 CT 需要。孔深主要根据采空区处理深度确定,使钻孔穿透至最深的注浆处理采空层的底板基岩。根据相关规范,检测孔数控制在总注浆孔数量的 3% ~ 5%。本次一共布设 39 个孔,测区 DK1+830 ~ DK2+400 第二段检测孔布置如表 2 所示。

表 2 检测孔布置一览

Table 2 The detection pore distribution table

孔号	位置	设计孔深/m	检测部位
S2-SJ-1	DK1+930.1 左 24.7	160	路基中心
S2-SJ-2	DK1+970.2 左 25.2	125	路基中心
S2-SJ-3	DK1+890.2 右 26.3	140	路基中心
S2-SJ-4	DK2+037.1 左 24.1	105	路基中心、CT 验证孔
S2-SJ-5	DK2+091.3 左 62.6	115	路基左侧边界
S2-SJ-6	DK2+262.3 左 40.2	120	路基中心
S2-SJ-7	DK2+201.2 左 42.1	115	路基中心
S2-SJ-8	DK2+357.0 左 41.4	110	路基中心
S2-SJ-9	DK2+110.2 右 28.4	95	路基中心
S2-SJ-10	DK2+265.0 右 29.7	95	路基中心
S2-SJ-11	DK2+396.6 右 29.9	85	路基中心
S2-SJ-12	DK1+970.4 右 26.3	135	路基中心

4 资料分析与解释

4.1 电测深

野外试验结果显示,测区电测深曲线类型以 H、KH 型为主,H 点为土石分界点(图 4)。其中表层含砾粉质黏土、砂土、碎石土在等 ρ_s 断面图上为紧靠地面相对平缓且呈波浪形起伏的相对高阻等值线;在等 ρ_s 断面图上中间相对低阻的等值线反映了上部砂岩、页岩、泥岩互层;其下的相对高阻等值线形态则反映了砂岩、页岩、泥岩及灰岩的起伏。

根据上述电测深曲线特征点、 ρ_s 断面等值线的梯度变化及起伏形态并结合 ρ_s 值大小,可初步划分土、石分界线,再根据正反演计算^[13, 14]确定基岩顶板埋深。

(1) 浅层 9 煤采空区在注浆前为以砂充填和空洞为主的高阻反映,注浆后 ρ_s 平均降了 33 ~ 110 $\Omega \cdot \text{m}$; 局部地段如 DK1+900、DK2+180 附近,基岩裂隙发育且含水,电阻较低,注浆后裂隙被水泥粉煤灰浆充填,视电阻率平均上升了 15 $\Omega \cdot \text{m}$ 。

(2) 中部 11 煤采空区注浆前同样为以砂充填和空洞为主的高阻区,注浆后视电阻率下降了 3 ~ 22.9 $\Omega \cdot \text{m}$ 。局部地段 DK1+880、DK1+940、DK2+000、

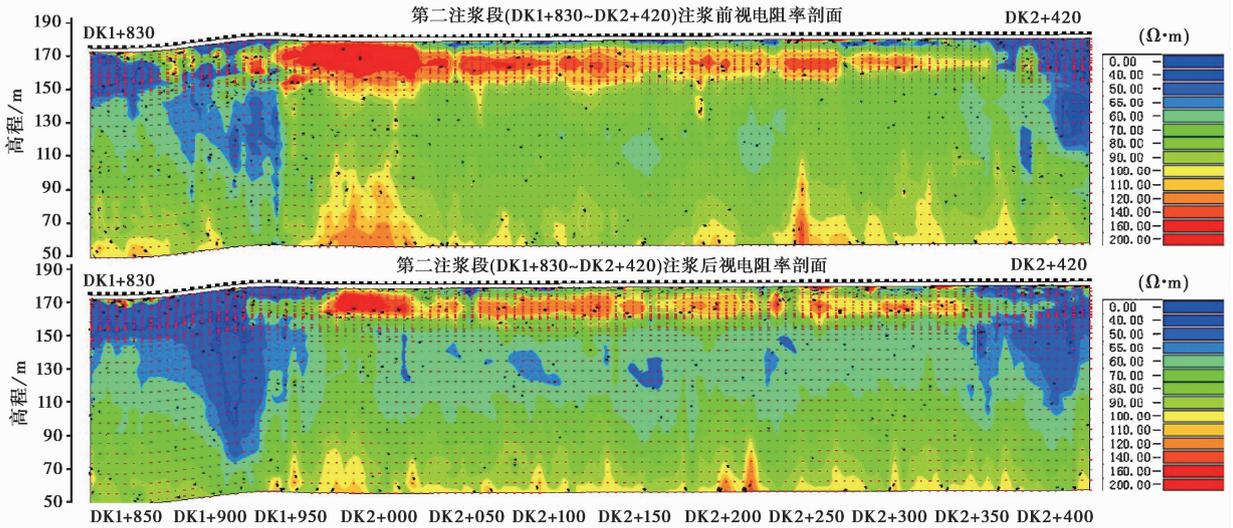
图4 注浆前、后电测深 ρ_s 剖面图Fig. 4 The electrical sounding ρ_s profile before and after grouting

表3 注浆前、后9煤层视电阻率变化统计

Table 3 The apparent resistivity change table of 9 coal seam before and after grouting

里程	DK1+830	880	900	930	950	970	990	DK2+000	DK2+010	DK2+020	
注浆前	视电阻率1	36.1	121	32.5	119	181	247	248	201	75.9	63.4
	视电阻率2	38.5	140	30.6	147	150	309	458	282	123	104
	视电阻率3	39.9	97.4	25.7	147	161	344	438	288	176	145
注浆后	视电阻率1	33.3	35.4	45.6	63.3	63.7	80.7	90.5	86.5	29.7	28.9
	视电阻率2	35.3	37.4	46.1	66.2	68.3	91.9	112	105	44.3	42.4
	视电阻率3	34.6	38.4	43.8	63.6	68.8	112	130	118	69.7	66.2
注浆前后电阻率变化值	-3.8	-82.4	15.6	-73.3	-97.1	-205.1	-270.5	-153.8	-77.1	-58.3	
注浆前后电阻率平均变化	-3.8	-40.6					-112.8				
注浆前后分段变化情况	原为裂隙发育区,注浆后电阻率下降	原为采空裂隙发育区,注浆后电阻率下降						原为采空裂隙发育区,注浆后电阻率下降			

DK2+180附近为电阻较低的基岩裂隙发育,注浆后电阻率上升了 $1.8 \sim 9\Omega \cdot m$ 。

(3)较深部13煤采空区中以砂充填和空洞为主的高阻区。在注浆后电阻率下降了 $5.6 \sim 19\Omega \cdot m$ 。局部地段如DK1+830、DK1+940、DK2+020、DK2+060、DK2+220、DK2+380附近基岩裂隙发育区,注浆后电阻率上升了 $4.6 \sim 33.8\Omega \cdot m$ 。

总体看,测区浅部 $0 \sim 30m$ 范围内,经过注浆视电阻率普遍得到降低且变得相对均匀稳定;DK1+900~DK1+930段深部低阻异常在注浆后电阻率也得以降低,且范围明显扩大;DK1+970~DK2+340浅部、深部高阻异常明显降低,中深部电阻率值也明显降低;DK2+340~DK2+400段电阻率值在注浆后得到进一步明显降低,且范围有所扩大。

电测深结果证明测区DK1+830~DK2+020范围内采空区总体注浆效果较好。

4.2 电磁波CT

配合上述电测深检测结果,电磁波CT资料解释同样以DK1+830~DK2+020段中S2-III-42与S2-III-43孔对间勘探剖面为例,从图5和表4可见:

(1)注浆前浅层 $H < 70m$ 范围内电磁波吸收系数相对较低,该低吸收异常为采空区和砂岩层的反映,经过注浆,在 $H = 40 \sim 70m$ 范围内电磁波吸收系数得到提高约25%,说明在 $H = 40 \sim 70m$ 范围内注浆明显,原采空区已得到较好充填加固;

(2) $H = 70 \sim 95m$ 范围内电磁波吸收系数较高,说明此范围内无采空区,高吸收异常是页岩和泥岩

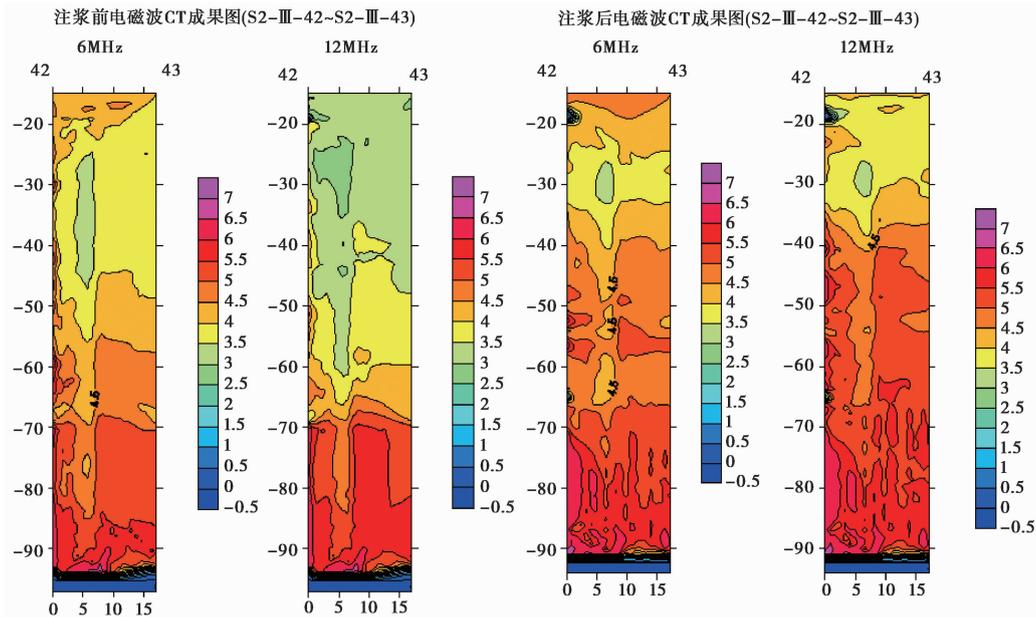


图5 注浆前、后电磁波 CT 成果图

Fig. 5 The electromagnetic CT results before and after grouting

表4 注浆前、后电磁波吸收系数变化统计

Table 4 The electromagnetic wave absorption coefficient change statistics before and after grouting

S2-III-42 ~ S2-III-43			
深度 /m	注浆前电磁波吸收系数	注浆后电磁波吸收系数	变化情况
28	2.5 ~ 4	3.5 ~ 4	1
40	3 ~ 4	4.5 ~ 5.5	1.5
50	2.5 ~ 4.5	4 ~ 5.5	1.5
62	3.5 ~ 5	4 ~ 6.5	1

层的反映。

电磁波 CT 结果同样证明在测区 DK1+830 ~ DK2+020 局部范围内对采空区的注浆治理效果较好,其结果与电测深资料基本一致。

4.3 钻探

钻探是验证采空区及其他围岩裂隙中是否存在注浆结石体,同时观察钻孔钻进中是否有掉钻等异常情况发生,从而判断采空层及其他部位是否充填饱满。

从注浆结石体的钻孔取心情况(表5)可见,在多数孔内可钻到结石体,说明在该位置采空层的浆液充填效果较好。按采空区层位表明11煤和13煤的注浆效果最好,达到80%以上,9煤和15煤的处理效果稍差。钻探过程中少数孔进尺较快,但无明

显掉钻卡钻等情况,说明场区内整体注浆效果良好,仅深部稍差。钻探取心结果同样证明该区注浆效果良好,并且验证了电测深和电磁波 CT 检测结果的一致性及其可靠性。

4.4 检测孔后期注浆量统计

各取心检测孔在成孔之后,又及时进行了后注浆处理,注浆参数均与注浆孔相同(表6)。

根据《铁路工程地基处理技术规程》(TB10106-2010)的要求,检测孔的后期注浆量应不大于周围相邻4个孔的注浆量平均值的15%,若注浆量偏高,则说明周围4个孔的注浆充填效果不够理想。通过检测,本测区段10个注浆验证钻孔,注浆量均符合规范要求,合格率为100%,说明整体注浆效果较好。

5 结论

(1)采空区在物性特征上表现为较低的电磁波吸收系数,注浆以后升高;地下水位之上的采空区表现为较高的电阻率,注浆之后降低,地下水位以下的采空区则反之。运用电测深和电磁波 CT 进行检测时,具有良好的对应关系。

(2)适于全局普及及检测的电测深与局部详查的电磁波 CT 相结合物探方法,可作为先行手段能够快速有效地实现对具有岩性复杂、多层开采、深度较

表5 钻孔取心验证结果
Table 5 Drilling core results

孔号	里程	9 煤钻探结果	11 煤钻探结果	13 煤钻探结果	15 煤钻探结果
S2-SJ-1	DK1+930.1 左 24.7	15.2 ~ 16.0m 煤层	65.4 ~ 65.8m 结石体	109.2 ~ 110.4m 进尺过快	—
S2-SJ-2	DK1+970.2 左 25.2	—	64.4 ~ 64.8m 结石体	98.6 ~ 96.4m 浆液结石体	—
S2-SJ-3	DK1+890.2 右 26.3	—	49.5 ~ 51.5m 进尺过快	96.0 ~ 97.5m 进尺过快	—
S2-SJ-4	DK2+037.1 左 24.1	—	无采空区	96.0 ~ 99.0m 进尺过快	—
S2-SJ-5	DK2+091.3 左 62.6	—	61.3 ~ 63m 破碎带	89.6 ~ 90.3m 结石体	—
S2-SJ-6	DK2+262.3 左 40.2	—	52 ~ 53.2m 结石体	90.4 ~ 92m 回填砂	92 ~ 93.8m 进尺过快
S2-SJ-7	DK2+201.2 左 42.1	—	49.7 ~ 50.4m 结石体	无采空区	96 ~ 97m 进尺过快
S2-SJ-8	DK2+357.0 左 41.4	—	42.2 ~ 43.4 煤层巷道	无采空区	86.7 ~ 87.5m 结石体
S2-SJ-9	DK2+110.2 右 28.4	—	45.0 ~ 46.2m 进尺过快	74.5 ~ 76.3m 结石体	—
S2-SJ-10	DK2+265.0 右 29.7	—	无采空区	63.2 ~ 64.2m 结石体	82.5 ~ 83.8m 进尺过快
S2-SJ-11	DK2+396.6 右 29.9	—	无采空区	58 ~ 59.3m 结石体	76.5 ~ 78.5 煤屑充填砂
S2-SJ-12	DK1+970.4 右 26.3	—	43.6 ~ 44.6m 结石体	无	115.7 ~ 117.6m 充填砂

表6 检测孔后期浆量统计
Table 6 Detection hole grouting quantity statistics

检测孔 孔号	实际孔深 /m	相邻4孔的注浆量/m ³				平均值的 10%	检测孔注浆量 /m ³	验证结果
		1	2	3	4			
S1-SJ-7	135.3	389.3	449.8	411.9	606.0	46	19.75	符合要求
S2-SJ-1	165.3	285.0	237.0	281.0	50.0	21	12.44	符合要求
S2-SJ-4	99	395.4	398.9	116.5	92.1	25	7.48	符合要求
S2-SJ-5	115.3	331.6	300.5	151.0	417.4	30	7.44	符合要求
S2-SJ-6	98	451.3	402.0	397.0	413.8	42	19.28	符合要求
S2-SJ-7	97.5	649.8	451.2	397.9	367.2	47	16.75	符合要求
S2-SJ-8	102.1	83.5	521.9	400.2	273.5	32	10.93	符合要求
S2-SJ-9	94.4	360.6	358.8	375.8	305.8	35	9.08	符合要求
S2-SJ-10-1	94.6	458.7	412.1	402.2	349.1	41	14.99	符合要求
S2-SJ-11	85	302.1	291.2	318.7	408.9	33	5.06	符合要求
S2-SJ-12	129	55.0	788.0	216.0	1661.0	68	9.56	符合要求

大的大型复杂采空区注浆效果检测评价。

(3) 钻探取心和检测孔后期注浆观测作为后行手段,虽具有破坏性、局部性及成本高等缺点,但可与2种物探方法相结合,在验证物探结果可靠性的同时,可以更为准确地反映采空区注浆效果。

(4) 实践证明,采用电测深和电磁波 CT 物探手段与钻探取心和钻孔后期注浆观测相结合的综合方法,所得结果均一致反映该区注浆效果良好,表明作为大型采空区注浆效果检测是可行、可靠的。

参 考 文 献

[1] 张志沛,刘旭,徐汉民,杨俊生. 煤矿采空区注浆工程质量检测的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(5): 604 ~ 606.
Zhang Zhipai, Liu Xu, Xu Hanmin, Yang Junsheng. Experiment-

tal studies on grouting quality examination of gob of coalmine. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(5): 604 ~ 606.

- [2] 刘长武,陆士良. 水泥注浆加固对工程岩体的作与影响[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 454 ~ 458.
Liu Changwu, Lu Shiliang. Reinforcement effect of cement grouting on engineering rock mass. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 454 ~ 458.
- [3] 童立元,刘松玉,方磊. 高速公路下伏采空区治理质量监控技术试验研究[J]. 公路交通科技, 2002, 19(6): 52 ~ 56.
Tong Liyuan, Liu Songyu, Fang Lei. Study on inspection techniques applying to mined-out area treatment involved expressway project. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(6): 52 ~ 56.
- [4] 张兴磊,夏建军,刘增强. 地质雷达在探测浅部采空区指导注浆中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2001, 29(8): 13 ~ 16.
Zhang Xinglei, Xia Jianjun, Liu Zengqiang. Geological radar ap-

- plied to detect shallow goaf and guide grouting operating. *Coal Science and Technology*, 2001, **29**(8): 13 ~ 16.
- [5] 王文龙. 孔中电磁波透视在煤窑采空区勘探中的应用实例[J]. *物探与化探*, 1999, **23**(4): 314 ~ 316.
Wang Wenlong. The application of borehole electromagnetic wave fluoroscopy to the exploration of mined-out areas of coal pits. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 1999, **23**(4): 314 ~ 316.
- [6] 童立元, 刘松玉, 邱钰, 方磊. 高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, **23**(7): 1198 ~ 1202.
Tong Liyuan, Liu Songyu, Qiu Yu, Fang Lei. Current research state of problems associated with mined-out region under expressway and future development. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(7): 1198 ~ 1202.
- [7] 彭永良, 胡卸文, 宋大各, 张立, 郑永翔, 孙敏辉. 复杂采空区注浆效果物探检测方法研究[J]. *水文地质与工程地质*, 2011, **38**(5): 38 ~ 42.
Peng Yongliang, Hu Xiewen, Song Dage, Zhang Li, Zheng Yongxiang, Sun Minhui. Test study of geophysical method on grouting quality evaluation in complicated cavities. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, **38**(5): 38 ~ 42.
- [8] Peng Yongliang, Hu Xiewen, Zhang Li, Zheng Yongxiang. Application test study of grouting quality evaluation of complicated cavities using comprehensive geophysical methods[A]. 2011 International Conference on Fuzzy Systems and Neural Computing (FSNC2011)[C]. Hong Kong: 2011, 464 ~ 469.
- [9] 张守恩, 葛宝堂. 水文及工程地球物理勘探[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1997, 3 ~ 9, 122 ~ 124.
Zhang Shouen, Ge Baotang. *Hydrology and Engineering Geophysical Exploration*. Beijing: Press of China University of Mining and Technology, 1997, 3 ~ 9, 122 ~ 124.
- [10] MB 布林, 吴晖. 地球物理勘探概论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1983, 52 ~ 57.
M B Dobrin, Wu Hui. *Introduction to Geophysical Prospecting*. New York: McGraw-Hill, 1976.
- [11] 周天福. 物探[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1992, 8 ~ 10.
Zhou Tianfu. *Engineering Geophysical Prospecting*. Beijing: China Waterpower Press, 1992, 8 ~ 10.
- [12] 孙学阳. 电法勘探在红会三矿探测采空区中的应用[J]. *黑龙江科技学院学报*, 2007, **3**(1): 137 ~ 140.
Sun Xueyang. Application of electric method in detection of work-out section in Honghuiisan coalmine. *Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology*, 2007, **3**(1): 137 ~ 140.
- [13] 陈仲候, 王兴泰, 杜世汉. 工程与环境物探教程[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
Cheng Zhonghou, Wang Xingtai, Du Shihan. *Engineering and Environmental Geophysical Tutorials*. Beijing: Geological Publishing House, 1993.
- [14] 吴以仁. 钻孔电磁波法[M]. 北京: 地质出版社, 1981.
Wu Yiren. *Electromagnetic Method*. Beijing: Geological Publishing House, 1981.
- [15] 李永涛, 陶喜林, 余建河, 彭新发, 杨富强. 井间电磁波 CT 技术在长江大堤岩溶探测中的应用[J]. *CT 理论与应用研究*, 2009, **18**(1): 55 ~ 62.
Li Yongtao, Tao Xilin, Yu Jianhe, Peng Xinfu, Yang Fuqiang. Application of cross-borehole electromagnetic computerized tomography in karst detection along Yangtze river levee. *CT Theory and Applications*, 2009, **18**(1): 55 ~ 62.
- [16] 周熙襄, 钟本善, 等. 电法勘探数值模拟技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1986.
Zhou Xixiang, Zhong Benshan, et al. *Electrical Prospecting Numerical Simulation Technology*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1986.