

中关铁矿深孔注浆幕墙井间电阻率测试技术和效果评价

韩贵雷,于同超,刘殿凤,蒋鹏飞,王庆江,唐英杰

(华北有色工程勘察院, 石家庄 050021)

摘要: 矿山治水中所采用的帷幕注浆工法具有典型的隐蔽工程特点,因此,注浆效果的评价一直是该领域内的一个难题。中关铁矿深孔帷幕注浆工程利用井间电阻率测试技术对注浆效果进行了深入的研究,验证了该物探手段在帷幕注浆工程中应用的可行性和先进性。井间电阻率反演图清楚地表明:注浆前后地层电阻率由低到高的变化过程,说明止水达到了良好的效果;本文还结合注浆工程资料,系统地分析了注浆过程中钻孔单位注灰量及岩层透水率的变化过程,为井间电阻率测试技术的试验结果和帷幕墙止水效果的检验评价提供了旁证支持。

关键词: 帷幕注浆;矿山治水;井间电阻率探测;止水效果

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1672-4135(2009)01-0069-06

1 引言

实现矿产资源的合理开采,有效保护地下水资源环境,是现代采矿业必须达到的目标。矿山治水中的帷幕注浆法,是利用围岩裂隙充填高强度水泥形成止水帷幕墙,封闭矿体内外水循环,从而实现上述的目的有效手段^[1-2]。由于帷幕注浆工程具有典型的隐蔽工程特点^[2],帷幕注浆施工完成后,注浆质量好坏,防渗效果如何,均无法直接地评定,因此,帷幕注浆工程施工质量检查一直是人们研究关注的热点。近年来随着科学技术的飞速发展,地球物理勘探技术有了实质性的突破,并且在矿产、石油、水利等领域得到了广泛的应用^[3-6]。中关铁矿帷幕注浆工程施工质量的检验方法就是在这一领域中的有效实践范例。本次使用的井间电阻率成像物探测试技术是首次利用国外物探设备和国产软件相结合,对邯郸钢铁集团公司中关铁矿深孔帷幕注浆工程进行了探测,并结合注浆工程资料综合分析评价了帷幕注浆工程抗渗效果。研究表明,井间电阻率成像物探测试技术反映明显,表达直观,并可较准确地判别止水效果;深孔帷幕注浆施工过程参数及注浆效果综合分析结果为该方法提供了验证的旁证资料。

2 工程背景

邯郸钢铁集团公司中关铁矿位于河北省沙河市白塔镇中关村附近,北距邢台 30 km,南距邯郸 53 km,南北长 2 000 m,宽 800 m 左右。矿体平均厚度 38.0 m,最大厚度 193.06 m,埋深 300 ~ 720 m,总储量 9 345 万吨。帷幕注浆钻孔需穿越第四系、石炭二迭系、中奥陶统、燕山期闪长岩,其中包括蚀变灰岩带、断层带、破碎带等地质情况及水文情况复杂的关键地层,注浆施工难度大^[1]。

注浆帷幕设计厚度 $T = 10.0$ m,浆液扩散半径 $R = 8.0$ m,设计孔距 $D = 12.0$ m,注浆段平均长度 $L = 414$ m,采用分段注浆,每注浆段平均长度 30 m。注浆段钻孔直径采用 $\phi 110$ mm、 $\phi 91$ mm、 $\phi 75$ mm。注浆帷幕完工后的帷幕防渗性能指标 $Q \leq 2$ Lu (Lu 为透水率单位),帷幕形成后堵水率达 80%,透水系数小于 $K = 0.08$ m/d,质量要求高^[1]。

帷幕注浆工程由华北有色工程勘察院承担,注浆帷幕线设计南北长 1 140 m;东西最大宽度 890 m,平面上形成环形椭圆状展部的全封闭的帷幕,全长 3 397 m,由 270 个注浆孔,30 个观测孔,34 个检查孔,36 个加密孔,共 370 个钻孔构成,总进尺 201 906 米,注浆段全长 126 674 米,采用分段注浆,每注浆

收稿日期:2008-11-24 责任编辑:刘新秒

基金项目:国家自然科学基金面上项目“岩石破裂后再破裂的力学行为研究”(50774082)

作者简介:韩贵雷(1980-),男,河北保定人,助理工程师,硕士,现主要从事岩土工程方面的工作和研究。

段平均长度 30 m。注浆帷幕墙体底板需进入燕山期闪长岩隔水层,因此,最大设计孔深达 810 m。由于帷幕线较长,施工时将整个帷幕分为 3 个区段,每个区段均设有注浆搅拌站、输浆压力泵站和自动化输浆控制监测室。

为了检查帷幕注浆施工效果,在施工过程中对部分帷幕区段进行了物探测试和注浆效果综合分析,本次注浆效果检验区域为 K32 至 K225,共有注浆孔 79 个,其中 I 序注浆孔 16 个、II 序注浆孔 18 个、III 序注浆孔 45 个,平面控制长度 936.00 m,钻孔深度在 353.00 到 480.00 m 之间。

3 井间电阻率探测原理

电阻率与地层的岩性、岩石孔隙及孔隙中流体性质有直接的关系,因此,电阻率成像技术对于识别断层、破碎带、水体及地层透水情况等方面的问题具有特殊的意义^[3,4]。

井间电阻率成像技术是利用探测区周围各个不同观测点直流电源激发的电场所产生的电位或电位差的不同,来研究探测区域内介质电阻率的分布情况。一般是在一钻孔中按一定间距设置直流电源点,在另一钻孔中设置一定数量的接收点,依次激发电源点,在两钻孔之间产生相应的稳定电流场(图 1),从而反映地层电特性^[3,4]。

电阻率成像技术所利用的场源是直流电源所

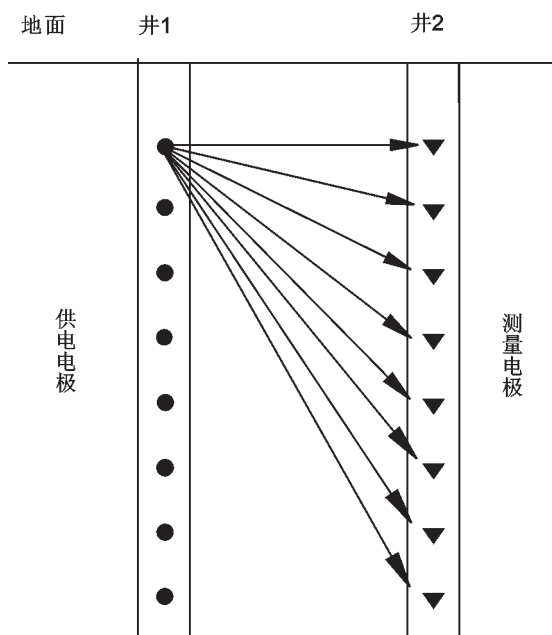


图 1 井间电阻测试示意图

Fig. 1 Diagram for cross-well resistivity test

产生的稳定电场,其基本理论基础是直流电场的基本方程,即介质中的欧姆定律和电流连续性方程^[9]。

$$\begin{cases} J = E / \rho \\ \nabla \cdot j = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: j 是电流密度矢量, ρ 是电阻率, E 是电场强度, E 满足:

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

由(2)式可以引入

$$E = -\nabla \varphi \quad (3)$$

从而可以得到电位的解

$$\nabla \cdot (\sigma \cdot \nabla \varphi) = 0 \quad (4)$$

$$\text{即: } \nabla \sigma \cdot \nabla \varphi + \sigma \cdot \nabla^2 \varphi = 0 \quad (5)$$

上面的方程将电位 φ 和未知的电阻率 ρ 联系起来,电阻率成像就是要由探测区域边界条件来确定内部的电阻率 ρ 的分布,即寻找方程(4)或(5)在一定边界条件下的解。

现场的井间测试得到的是一组庞大的数据,最终需要将这些数据进行图像重建,电阻率成像利用探测区域内各个不同方向观测的电阻率物理量来重构探测区内电阻率的实际分布^[7,8]。由于电阻率成像过程中,边界上的电位值是对电场分布范围内物性分布的整体反映量,而不是物性沿射线路径的线性积分。另外电流总是沿电阻率最小的路径流动,所以电阻率成像在图像重建方面难度较大,往往需要借助于计算机程序^[9,10]。

4 探测过程及结果

本次物探测试仪器由澳大利亚 JET 研发中心研制的多通道、全波形、全方位电阻率成像系统和国际领先的电阻率反演软件。该系统可用于地表、井-地、井-井勘探,能够实现全方位点法勘探,具有 64 道数据同时采集功能,大大提高采集的效率,并且数据采集量大,为实现更高的解释精度提供了科学依据,该仪器性能稳定、状态良好,确保了野外数据采集工作的质量。

4.1 探测过程

进行井间透视工作时,我们分别将两根带有 16 个电极(电极距为 8 m)的电缆放入两个待测的钻孔中(未下套管部分),来检测两个钻孔之间区域内地层电阻率的分布情况。分别在两个井中固定了两串电缆的位置后,做一次数据测量。一次测量可

达 120 m。如果井中需要测量的范围较大,就必须在测完一次数据后移动电缆的位置再进行测量,这样就可以覆盖整个待测的区域。

选择 W2 和 W3 两孔的测试结果为例,被探测区域内 W2 和 W3 两孔相距 60 m,之间有 4 个注浆孔。检测深度从 -100.0 m 标高算起,钻孔 W2 孔深 388 m,检测深度为 253.2 m;钻孔 W3 孔深 402 m,检测深度最大为 381.2 m。井间电阻率探测共进行 2 次,第一次安排在 W2 和 W3 注浆钻孔施工完毕后,但在其之间的注浆孔施工前;第二次安排在其间所有注浆孔分段注浆施工完成后,具有较强的对比意义。

4.2 探测结果分析

测试完毕后,首先对数据进行检查,并通过特殊的滤波处理,去除了一些离散性较大数据,最后对剩余的数据通过软件进行反演处理,得到如下图 2、图 3 所示的直观反映井间电阻率的反演图片。一般来说,高电阻的地层显示岩性较完整且含水、透水性能较差,色谱表达为逐渐变红;低电阻的地层显示岩性不完整,富含水或透水性能较好,色谱表达为逐渐变蓝;中间过渡色为岩性完整性较好。

图 2 为 W2 和 W3 注浆孔施工完毕且两孔间未进行其它孔注浆施工时的电阻率成果反演图片,根据图像的电阻率等值线分布可以明显看出,W2 和 W3 附近分布的高电阻率区表明:水泥浆液具有较好的扩散,并在该范围内排出岩层内的地下水,水泥浆同岩层形成较密实的帷幕墙体,起到较好的排水、堵水的效果;在 W2 和 W3 之间水泥浆液的扩散范围外,分布有较广泛的低电阻率区,反映了孔间的石灰岩岩层裂隙较大,连通性好。同时,可能局部存在水蚀蜂窝及溶洞等岩溶结构,并且在其中充水较多,形成较明显的低电阻通道。

图 3 为 W2 和 W3 之间 4 个后续注浆孔施工完毕后的探测结果。同图 2 对比后可以明显看出:后续注浆孔注浆前,W2 和 W3 之间的低电阻率区约占 80%以上(图 2 中蓝色部分),注浆后低电阻率区的电

阻率值明显升高(图中 3 中黄色部分),反映了注浆过程中岩层岩溶孔隙-溶隙结构被水泥浆液充填,岩层含水率降低,进而使得地层电阻率相对升高的过程。说明了注浆施工完成后能够在岩层中形成连续的水泥帷幕墙体。

在第一注浆段 150~280 m 的检测后发现,水泥帷幕墙体中仍有较大面积的低阻区(图 2 中蓝色部分),判断为注浆量不充分、地层裂隙发育弱或导通性较差、排挤地下水不够完全所造成的,从而形

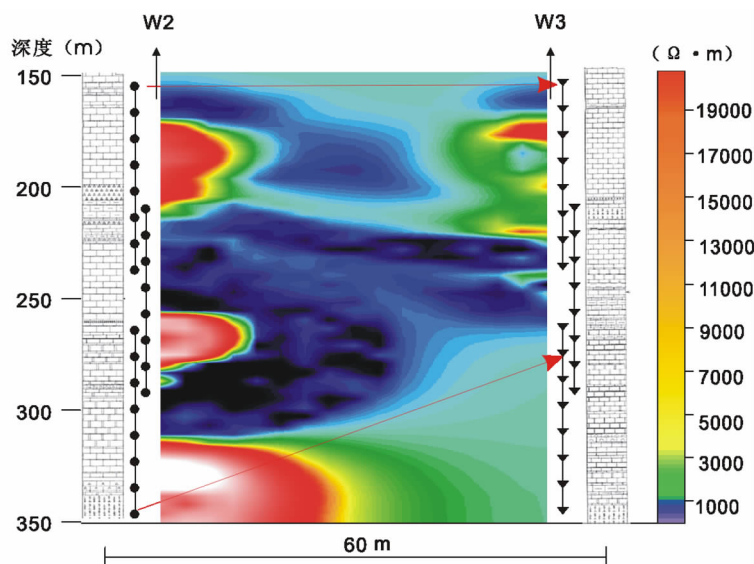


图 2 W2 和 W3 孔注浆完毕后井间电阻测试成果反演图

Fig. 2 Inversion picture of cross-well resistivity for the post grouting of the W2 and W3

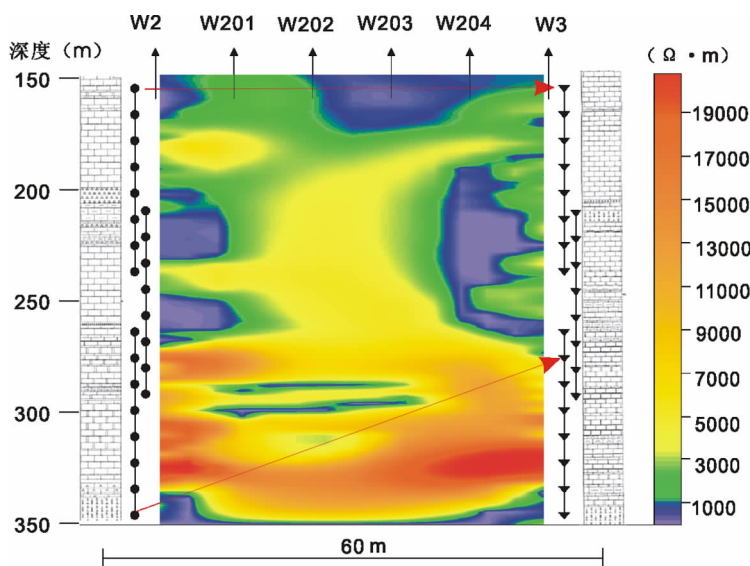


图 3 W2 和 W3 孔之间 4 个孔注浆后井间电阻测试成果反演图

Fig. 3 Inversion picture of cross-well resistivity for post grouting of the four holes between W2 and W3

成局部的残留水区。通过调整注浆压力、注浆量、注浆流速和注浆终结时间,第二阶段 280~350 m 的检测显示出 W2 和 W3 之间的高电阻区占了 90% 以上,证明裂隙及岩溶结构中水泥浆液充填较密实,帷幕墙体具有较好的堵水效果。

5 注浆效果综合分析

5.1 注浆效果叠加效应分析

表 1、2 为该区域内已终孔资料的统计结果,根据表中数据可以绘制出单位注灰量和透水率的频率曲线和频率累计曲线,如图 4 所示。

(1)单位注灰量迭加效应

由表 1 中数据可以看出该区域内各孔序之间单位注灰量具有明显的递减趋势,区域内 16 个 I 序孔总注灰量为 3 556.40 t,单位注灰量为 781.53

kg/m;18 个 II 序孔总注灰量为 1 169.00 t,单位注灰量为 235.76 kg/m;11 个 III 序孔总注灰量为 313.00 t,单位注灰量为 105.91 kg/m。II 序孔单位注灰量为 I 序孔的 30.2%,III 序孔单位注灰量为 I 序孔的 13.6%,III 序孔单位注灰量为 II 序孔的 44.9%。单位注灰量随着注浆过程递减,反映出随着注浆工程的进行,帷幕墙体逐渐形成的过程。I 序孔注浆地层为原始地层,奥陶系石灰岩为主要被注对象,在该地层中裂隙及岩溶结构发育,浆液具有较大的扩散范围,吃浆量大,对于 II、III 序孔来说,由于前序孔水泥浆液的封堵作用,后续孔浆液扩散范围明显减小,进而浆液注入量也明显减少,注浆效果具有明显的叠加效应。同时,由单位注浆量累计曲线图 4 (a)可以看出,I 序孔频率曲线大都集中在坐标的右边,说明,I 序孔注浆量较大的孔段出现频率较

表 1 钻孔单位注灰量成果分析
Table 1 Analysis on unit amount of plaster injection

孔序	总注灰量 (t)	单位注浆量 (kg/m)	总段数	单位注灰量分布区间						
				< 30	30~50	50~100	100~300	300~500	500~1 000	> 1 000
I	3556.4	781.53	136	21	3	13	31	16	19	32
II	1169.0	235.76	136	20	10	21	64	13	1	7
III	313.0	105.91	80	25	11	16	23	1	3	0

表 2 钻孔透水率成果分析
Table 2 Analysis on rock permeable rate

孔序	孔数	注浆段总长 (m)	平均透水率 (kg/m)	总段数	单位透水率分布区间				
					< 1	1~3	3~10	10~20	> 1 000
I	16	3 963.0	10.06	136	69	20	24	11	12
II	18	4 893.9	1.03	136	112	17	6	0	2
III	11	2 901.2	0.37	80	77	3	0	0	0

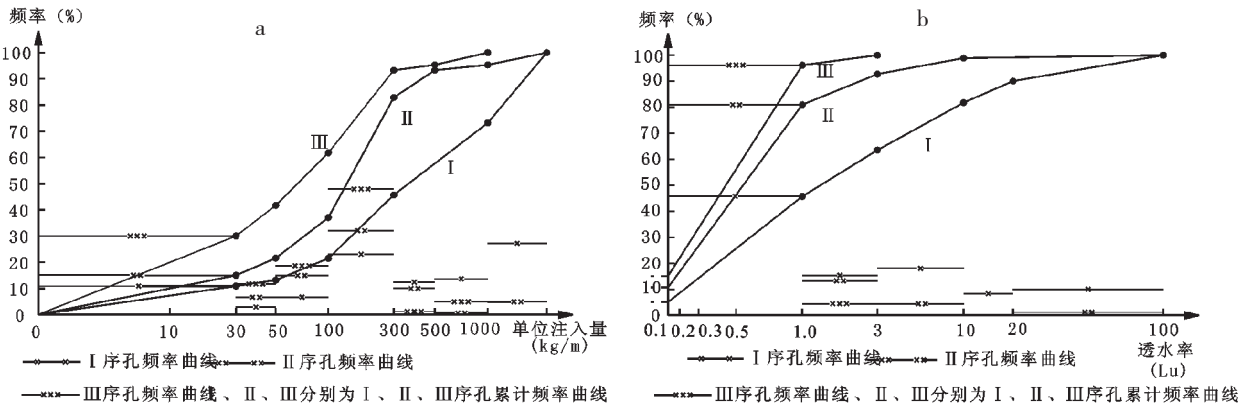


图 4 注浆过程成果频率分析图
Fig. 4 Frequency analysis of the grouting engineering data
a 单位注浆量频率分析; b 钻孔透水率频率分析

高,而后续孔注浆量较小的孔段出现频率较高,其中,Ⅲ序孔单位注灰量主要分布区间为0~300.00 kg/m,占总段数的93.2%,单位注灰量明显减少,注浆效果理想。

(2) 透水率迭加效应

表2注浆孔透水率的统计结果,表中数据表明,区域内Ⅰ序孔平均透水率10.06 Lu,表明原始地层裂隙发育,透水性强,经Ⅰ序孔注浆后,Ⅱ序孔平均透水率1.03 Lu,为Ⅰ序孔的10.2%;经Ⅰ、Ⅱ序孔两次注浆迭加后,Ⅲ序孔平均透水率0.37 Lu,透水率为Ⅰ序孔的3.68%,Ⅲ序孔中所有注浆段透水率均小于3 Lu,有95.9%的注浆段透水率小于1 Lu,具有良好的注浆堵水效果,各次序孔透水率频率曲线及累计曲线图更直观地反映了各次序孔之间透水率的递减关系,详见图4(b)。

5.2 注浆效果离散性分析

变异系数在岩土工程界常被用来对大量的实验结果进行统计分析。研究发现,将该参数引入帷幕注浆工程质量评价工作中具有直观的工程意义。因此,此次中关铁矿帷幕注浆效果成果分析研究过程中也引入了该参数。

通过对各序孔单位注灰量及透水率统计结果计算(计算过程见下式)求得的变异系数见表3。该表中数据反映各序孔单位注灰量和透水率之间的离散性。变异系数越小,说明各钻孔单位注灰量和透水性分布区间越集中,即反映了随着注浆工序的进行,地层裂隙由不均一向均一转变的过程。

计算公式:

$$\delta = \sigma / \mu \quad (6)$$

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i}{n} \quad (7)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \mu_i^2 - n\mu^2}{n-1}} \quad (8)$$

表3 单位注灰量和透水率离散性分析表

Table 3 Dispersion coefficient analysis of unit amount of plaster injection and rock permeable rate

注浆区段	单位注灰量离散系数	透水率离散系数
Ⅰ序孔	0.869	1.622
Ⅱ序孔	0.647	0.970
Ⅲ序孔	0.572	0.234

式中: δ 为变异系数; μ 为单位注灰量平均值; n 为数据个数; σ 标准差。

由表中数据可以看出,Ⅰ序孔透水率离散性较大,说明该区域原始地层裂隙分布差异性较大,地质情况复杂,岩层裂隙及其透水性不均一,注浆后离散系数变小,反映出注浆后地层中贯通裂隙被水泥封堵,透水性有所减小且较为均一,说明帷幕注浆的封堵效果理想。

6 结论

对邯钢集团中关铁矿帷幕注浆工程,采用井间电阻率成像技术探测及注浆施工综合分析研究得到了以下结论:

(1)首次采用井间电阻率成像物探技术对帷幕注浆施工质量进行探测,证明了该方法的可行性和先进性,同时取得了较好的技术效果。井间电阻测试成果反演图可以清晰地反映:注浆施工完成后,岩层中形成连续水泥幕墙体的综合效果,尤其是裂隙及岩溶结构中浆液充填的密实程度,也可以通过面积计算初步判断堵水率。

(2)通过注浆资料统计分析,单位注灰量及钻孔透水率具有明显的叠加递减效应,Ⅲ序孔单位注灰量为Ⅰ序孔的13.6%;Ⅲ序孔平均透水率0.37 Lu,为Ⅰ序孔的3.68%。综合计算结论是:堵水率 $\geq 80\%$,透水率 ≤ 2 Lu,满足业主提出的设计要求。

(3)采用地质数学理论对帷幕墙体注浆效果进行了分析,分析结果表明钻孔单位注灰量及透水率变异系数明显减小,Ⅲ序孔透水率离散系数为0.234。反映出浆后地层中贯通裂隙被水泥封堵,岩层透水性有不均匀性向均一的转变过程,说明帷幕注浆封堵达到了理想效果。

参考文献:

- [1] 邯钢集团沙河市中关矿业有限公司中关铁矿帷幕注浆工程施工设计[R]. 华北有色工程勘察院, 2008.
- [2] 孙钊. 大坝基岩灌浆. 北京: 中国水利水电出版社. [M]. 2004.
- [3] 栗建军, 孟凡顺. 套管井井间电阻率测井的原理及数值计算. 青岛海洋大学学报[J], 2003, (3): 287-292.
- [4] 李清松, 潘和平, 赵卫平. 井间电阻率层析成像技术进展. 工程地球物理学部[J], 2005, (10): 374-379.
- [5] 张东成, 钱运生. 井间测量技术及其应用现状. 勘探地球物理进展[J], 2004, 27: 402-406.
- [6] 冯锐, 李晓芹, 陶裕录, 等. 电阻率层析成像用于水文地质

- 勘探.地震学报[J], 1997, 19: 655–663.
- [7] Hiromasa Shima ,2D and 3D resistivity image reconstruction using crosshole data[J] . Geophysics , 1992 , 57 (10) : 1 270 – 1 281.
- [8] Daily W, Owen E. Cross2borehole resistivity tomography [J] . Geophysics , 1991 ,56 (8) : 1 228 – 1 235.
- [9] 董清华,朱介寿. 井间电阻率层析成像及其应用[J].地球物理, 1999, 16(5): 474–480.
- [10] 董清华. 井间电阻率层析成像的某些进展[J].地球物理学进展, 1997, 12(3): 77–89.

Effect Evaluation and Cross–well Resistivity Technology for the Deep–hole Curtain Grouting in the Zhongguan Fe Mine

HAN Gui-lei, YU Tong-chao, LIU Dian-feng, JIANG Peng-fei,

WANG Qin-jiang, TANG Ying-jie

(North China Engineering Investigation Institute, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Curtain grouting have typical characteristics of concealed engineering. It is a difficult problem for grouting effect evaluation. Using cross–well resistivity technology, the grouting effect of the Zhongguang mine was studied. Meanwhile advancement and feasibility of cross–well resistivity technology were proved. Inversion picture of cross–well resistivity shows pre– and post grouting for formation, the resistivity changed from low to high, curtain grouting got better results. Combined geophysical result with grouting engineering data, the changes of the unit amount of plaster injection and rock permeable rate were analysed. The results provided support for the test of cross–well resistivity and effect evaluation of water stop curtain grouting.

Key words: curtain grouting; mine water control; cross–well resistivity technology; effect evaluation of water stop