

基于视电阻率法测试技术的 隧道围岩松动圈测定

刘蒙¹, 唐海^{1*}, 马谕杰¹, 耿世明¹, 潘永康², 星晓金², 武俊博²

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国核工业华兴建设有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要:隧道围岩松动圈厚度大小是评价围岩稳定性和设计合理支护方案的重要参数和依据,如何快速且无损地探测出围岩松动圈范围至关重要.通过采用瞬变电磁仪视电阻率测试方法,对试验隧道围岩松动圈进行了探测,结果表明:松动圈厚度在 1.68~2.25 m,属于大松动圈.同时,结合现场地质状况,以松动圈厚度大小为依据,判定围岩类别为 IV~V 类.最后,以松动圈厚度大小和围岩类别为依据,设计支护方案,经后期监测,隧道变形小,验证了该方案合理可靠.

关键词:围岩松动圈;瞬变电磁;视电阻率;围岩分级;联合支护

中图分类号:TU455 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2022)04-0058-07

Measurement of Loose Zone of Tunnel Surrounding Rock Based on Apparent Resistivity Method

LIU Meng¹, Tang Hai¹, Ma Yujie¹, Geng Shiming¹, Pan Yongkang², Xing Xiaojin², Wu Junbo²

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. China Nuclear Industry Huaxing Construction Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The thickness of surrounding rock loose zone of tunnel is an important parameter and basis to evaluate the stability of surrounding rock and make a reasonable support scheme. How to detect the range of surrounding rock loose zone quickly and nondestructively is very important. By using the test method of apparent resistivity of transient electromagnetic instrument, the loose zone of surrounding rock of the test tunnel is detected. Results show that the thickness of the loose zone is between 1.68~2.25 m, which belongs to large loose zone. At the same time, combined with the site geological conditions and based on the thickness of the loose zone, the surrounding rock is determined as class IV~V. Finally, based on the thickness of loose zone and the category of surrounding rock, the support scheme is designed. After later monitoring, the tunnel deformation is small, and the scheme is reasonable and reliable.

Keywords: loose zone of surrounding rock; transient electromagnetic; apparent resistivity; surrounding rock classification; combined supporting

目前,常见的围岩松动圈厚度大小测试方法有声波法、地质雷达法、地震波法、电阻率法、钻孔成像法和多点位移计法等.声波法是目前应用最广泛的一种方法,技术成熟,操作容易,但由于需要钻孔并用水做耦合剂,所以只适用于岩性比较好、破碎程度较低的隧道或硐室^[1],不然在钻孔过程中容易塌孔,或者由于岩体过于破碎,导致水流失过快从而无法与围岩耦合.其他几种方法也各有缺点,如地质雷达法仪器贵,

收稿日期:2021-10-25

基金项目:湖南省教育厅科学研究资助项目(20A196)

*通信作者, E-mail: tanghai707298@163.com

成本高;地震波法分析比较困难;钻孔成像法仪器贵,操作过于繁琐;多点位移计法工作量大,测量周期较长,精度不高^[2-3]。除地质雷达法外,其他几种方法均需要钻孔,而在钻孔过程中会产生动荷载,围岩在动荷载的扰动下,其松动圈厚度会随着扰动的出现而发生变化,造成测量值与实际值偏差过大。而视电阻率法无需钻孔,不会对围岩产生扰动,可以实现无损检测,同时具有操作简单,可以实时测试,测量时间短,速度快等优点。因此,可以通过瞬变电磁仪探测获取围岩的视电阻率值,根据视电阻率值来区分松动圈与塑性区的边界,确定松动圈的大小,判别出围岩类别,从而提出安全可靠的支护方案。本文根据视电阻率松动圈测试方法,测定了某个隧道的松动圈,并根据测定的松动圈范围设计了支护方案。为视电阻率方法在松动圈的测试中提供借鉴并推动视电阻率方法在工程中的应用。

1 松动圈测试技术

1.1 围岩松动圈形成机理

围岩松动圈的大小是分析隧道稳定性以及提出合理支护方式的一个关键因素。隧道在掘进前,受三向应力作用,岩体处于应力平衡状态;隧道掘进后,会导致围岩卸荷回弹以及应力重新分布,隧道周边径向应力下降为零,三向应力状态变成两向应力,同时环向应力集中。此时,如果集中应力不断发展并逐渐超过围岩强度,那么离巷道周边最近的围岩开始破坏,并随着集中应力的增加,破坏逐步向深部发展,当发展到一定的深度后,围岩会形成新的三向应力平衡状态,破坏便不会再产生^[4-5]。通常将围岩中产生的松弛破碎区定义为围岩松动圈。松弛破碎区之外,是塑性区和弹性区,如图1所示。

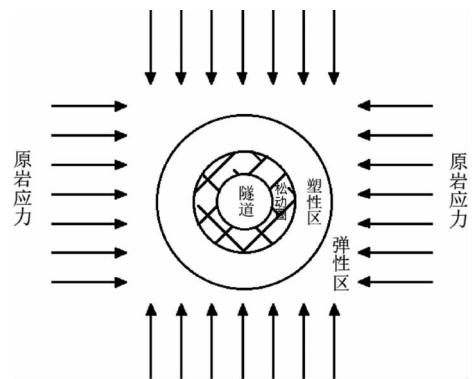


图1 围岩松动圈

1.2 测试原理

电阻率是岩石一个重要的电性参数^[6],视电阻率法测试围岩松动圈是以围岩导电性强弱的不同为基础。许多学者认为,在岩石电阻率方面,岩性^[7]、孔隙率^[8]、含水量^[9-10]、温度^[11]、破裂^[12]对岩石电阻率的影响较大,在前4项条件变化不大的情况下,破裂程度的大小是影响电阻率的主要因素^[6]。根据岩石电阻率的骤变情况,判别松动圈与塑性区的分界是完全可行的。松动圈范围内的岩体非常破碎,导致孔隙率很高,因此电阻率高;而松动圈之外的塑性区和弹性区,岩体完整致密,所以电阻率就低。

试验采用中煤科工集团重庆研究院自主研发的YCS-40矿用本安型瞬变电磁仪作为探测工具。瞬变电磁仪工作原理如图2所示。YCS-40通过发射线圈向围岩发射一次脉冲磁场,在一次脉冲磁场间歇期间利用接收线圈测量围岩介质引起的二次感应涡流磁场^[13],从而达到探测介质视电阻率的目的,最后对采集得到的数据进行软件分析并反演成图获得围岩松动圈的大小。值得注意的是,视电阻率并不是只与岩石的电阻率有关,它除了受岩石电阻率的综合影响外,还与岩石的分布状态、电极排列等具体情况有关。但总的来说岩石电阻率产生的影响占据了主要部分,仅依据电阻率所呈现出的规律就可以满足判别围岩松动圈厚度的条件,所以并没有把岩石的分布状态、电极排列等具体情况所造成的影响考虑在内。

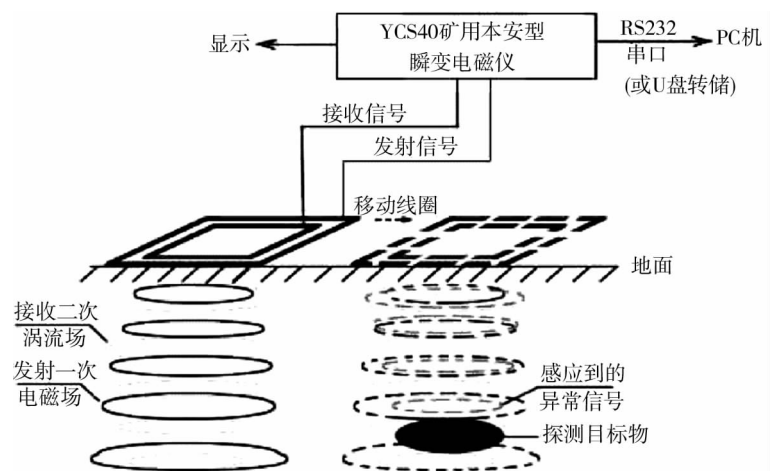


图2 瞬变电磁仪工作原理

但总的来说岩石电阻率产生的影响占据了主要部分,仅依据电阻率所呈现出的规律就可以满足判别围岩松动圈厚度的条件,所以并没有把岩石的分布状态、电极排列等具体情况所造成的影响考虑在内。

2 工程实例

2.1 地质条件

试验隧道围岩状况以棕红色为主,岩性为含砾粗砂岩与砂砾岩等.砾石以花岗岩砾为主,变质岩砾与石美砾次之;碎屑结构为主,偶见泥质结构;构造以(斜)层理构造为主.风化裂隙较发育,局部结构部分破坏,多为泥钙质胶结,岩芯呈短柱状或碎块状.单孔 RQD(岩芯质量指标)值为 29.30~72.43,加权平均值为 46.68,岩石质量差.

2.2 现场布置

该隧道开挖断面净尺寸为 4.0 m×5.2 m(宽×高),开挖面积为 20.8 m²,掘进后两帮和顶板就需要及时进行支护,以防止隧道冒顶.而支护需要立型钢钢架、钢筋网片和打入锚杆,这些金属设施在瞬变电磁仪探测中能产生很强的瞬变电磁响应,有研究表明在隧道支护后的地方采用重叠回线组合测量时,比裸岩区域的瞬变电磁响应高几倍^[14],所以在实测时应尽量避免已经完成支护的地方,同时在可能受影响的地方做好标记,以便在资料解释时排除此类影响.

为了能够不受金属影响并准确探测出隧道围岩松动圈的厚度大小,探测试验应在钻爆掘进后,且支护尚未进行前开展.为了提高测量精确度,借鉴了易帅^[15]采用瞬变电磁仪测试松动圈厚度的方法,测量前用 4 根 1.5 m 长的木棍把柔性线圈固定成边长为 1.5 m×1.5 m 的正方形.然后分别在隧道距离掌子面 1~4 m 处左右侧、顶板处紧贴岩壁各布置一条测线,线圈在每条测线上不重叠的采集 2 次数据,每次 1.5 m,共 3 m 长,探测示意图如图 3 所示.

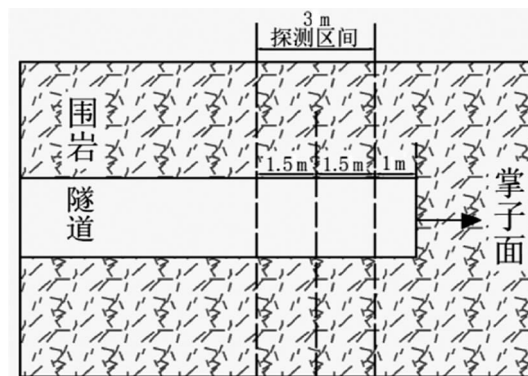


图 3 探测示意图

现场探测步骤如图 4 所示.探测步骤:(1)现场组装线圈和发射电源;(2)两名工作人员把线圈紧贴岩壁放置;(3)采集数据.采集完数据后,为了计算视电阻率,使用 YCS-40 矿用本安型瞬变电磁仪自带的数
据处理软件 MSD-2010,然后采用 Surfer8.0 软件绘制成等值线图.



图 4 探测步骤

2.3 可行性验证

为探讨视电阻率大小与岩层组成的内在关系,验证瞬变电磁仪探测围岩松动圈的可行性,分别通过卷

尺和瞬变电磁仪对一处粗骨料堆进行堆放高度测试对比.如图5所示,粗骨料堆由直径大于5 mm的碎石构成,两侧用砖墙围挡,粗骨料堆底部为C20素混凝土地面层.



图5 粗骨料

首先通过卷尺对粗骨料堆进行了高度测量,结果显示粗骨料堆高度约为2.5 m.其中,现场通过用铁锹从上向下挖掘粗骨料堆,发现高度在2~2.5 m时的粗骨料较为干燥,这是由于此处粗骨料接近外部自然环境,大量水分被自然蒸发,所以含水低;而高度在0~2 m时的粗骨料,由于埋藏在底部,不与外部自然环境接触,水分很少被自然蒸发,所以含水高,较为潮湿.另经查看堆料地坪设计施工图,得知粗骨料堆底部的素混凝土层厚度为0.25 m.随后通过瞬变电磁仪对粗骨料堆进行探测,经过探测和软件分析后,视电阻率等值线图如图6所示.

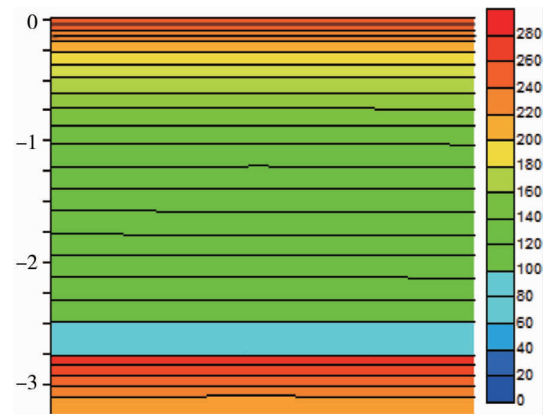


图6 粗骨料视电阻率等值线

从图6中可以看到,0~-0.5 m内(此处对应的是粗骨料堆2~2.5 m高度)等值线较密集,视电阻率由高到低逐渐下降,其原因是该区域内粗骨料水分较少,比较干燥;而-0.5~-2.5 m内(此处对应的是粗骨料堆0~2 m高度)等值线较均匀且视电阻率较稳定,这是由于该区域内粗骨料含水较多,比较潮湿.根据文献[9]的研究:同一种形态的物质其电阻率会随着含水率的增加而降低,随着含水率的降低而增加.这与粗骨料堆0~-2.5 m所展现的特征相吻合;-2.5~-2.75 m这一范围视电阻率骤降,此处应为25 cm厚C20素混凝土地面层,这是由于素混凝土层内密度很高,内部空间较粗骨料堆而言完整密实,且几乎不含水分;-2.75 m之后应为原地面层,由土和碎石组成,孔隙率变大,所以等值线又重新密集起来且视电阻率增大.因此可将视电阻率骤降之前的0~-2.5 m视为粗骨料堆的高度,粗骨料堆的高度约为2.5 m.

利用瞬变电磁仪能够探测物质的视电阻率这一特点,对粗骨料堆进行了探测.结果表明,空隙较多的粗骨料堆视电阻率值较高,而相比之下完整密实的素混凝土层视电阻率值较低.将此结果运用到探测隧道围岩上,岩性差、破碎程度高的围岩视电阻率值应该较高,而岩性好、破碎程度低的围岩视电阻率值应该较低.通过卷尺和瞬变电磁仪的厚度测试对比,两者的结果比较接近,同为2.5 m左右,说明用瞬变电磁仪探测围岩松动圈是可行的.

2.4 测试结果分析

首先对隧道内一处未进行仰拱初支的底板进行试验.底板视电阻率等值线图如图7所示.图7中0~-0.2 m区域内等值线分布非常密集,视电阻率最高,该区域内视电阻率值保持在200以上,推测可能是因为该区域由淤泥和碎石块组成,并未到达岩石层,经后期现场原地挖掘,正如推测所言,经过0.2 m厚的淤泥碎石块层后才到达岩石层;-0.2~-2.1 m区域内等值线不再像之前那样密集,逐渐变得稀疏且视电阻率值逐渐下降,区域内视电阻率平均值为100左右,原因是随着埋深的不断增加,进入围岩松动圈范围内,围岩破碎程度逐渐降低;-2.1 m以后,等值线消失,视电阻率较低,此区域内岩石不再破碎,具有一定的完整性,已到达围岩塑性区范围内.此次试验说明,松动圈范围内围岩的视电阻率不会保持在一个定值,而是随

着围岩破碎程度的降低而降低;而围岩松动圈之外,岩体具有一定的完整性,所以其视电阻率几乎保持不变.根据视电阻率等值线图,-0.2~-2.1 m 处等值线密集、视电阻率高,符合松动圈内的岩石特征,可将这一区域作为围岩松动圈范围.

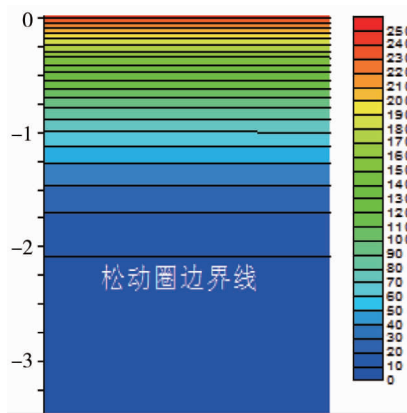


图 7 底板视电阻率等值线

随后,分别在隧道内 3 个不同里程断面处进行了松动圈范围的测试,里程桩号分别为 K0+667 m~K0+670 m,K0+700 m~K0+703 m,K0+758 m~K0+761 m,得到不同里程断面的松动圈厚度.图 8 为 K0+667 m~K0+670 m 处视电阻率等值线图.从视电阻率等值线图中可以清晰地看到左侧松动圈厚度为 2 m,右侧松动圈厚度为 1.95 m 左右,顶板松动圈厚度为 2.1 m 左右.根据此前的地震波法超前地质预报,此处为断层破碎带与影响带,断层内主要为断层泥、断层角砾及碎裂砂岩、泥岩、页岩、灰岩等,岩体极破碎,呈角砾碎石状松散结构,易塌方.同时,参考董方庭^[16]提出的围岩分类方法(见表 1),判断出此处围岩类型为 V 类围岩.

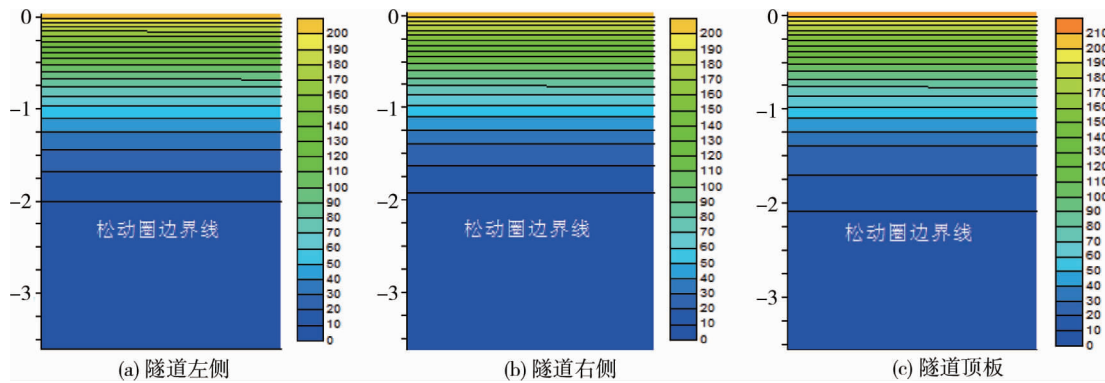


图 8 K0+667 m~K0+670 m 处视电阻率等值线

表 1 隧道围岩松动圈分类

围岩类别	分类名称	围岩松动圈/cm
小松动圈	I 稳定围岩	0~40
中松动圈	II 较稳定围岩	40~100
	III 一般围岩	100~150
大松动圈	IV 一般稳定围岩(软岩)	150~200
	V 不稳定围岩(较软围岩)	200~300

图 9a 为 K0+700 m~K0+703 m 处左侧视电阻率等值线图,松动圈厚度约为 2.18 m 左右;图 9b 为右侧视电阻率等值线图,松动圈厚度约为 2.1 m 左右;图 9c 为顶板视电阻率等值线图,松动圈厚度接近 2.25 m.根据此前的地震波法超前地质预报,此处为断层破碎带与影响带,断层内主要为断层泥、断层角砾及碎裂砂岩、泥岩、页岩、灰岩等,岩体极破碎,呈角砾碎石状松散结构,易塌方.同时,参考表 1 内容,判断出此处围岩类型为 V 类围岩.

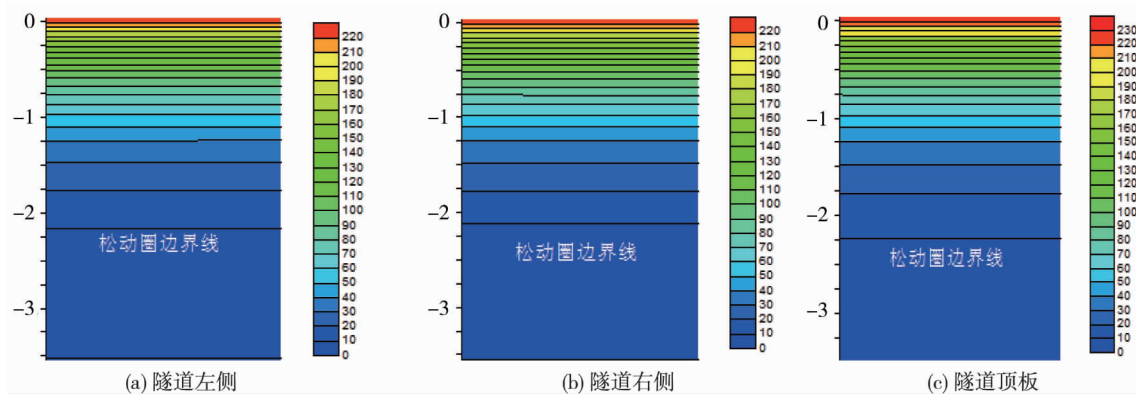


图 9 K0+700 m~K0+703 m 处视电阻率等值线

图 10a 为 K0+758 m~K0+761 m 处左侧视电阻率等值线图,松动圈厚度为 1.75 m;图 10b 为右侧视电阻率等值线图,松动圈厚度约为 1.68 m;图 10c 为顶板视电阻率等值线图,松动圈厚度约为 1.77 m.根据此前的地震波法超前地质预报,此处为砂岩夹泥岩、砾岩,弱风化,节理发育,呈块状、碎石状镶嵌结构或碎石状压碎结构,易塌方掉块.同时,参考表 1 内容,判断出此处围岩类型为 IV 类围岩.

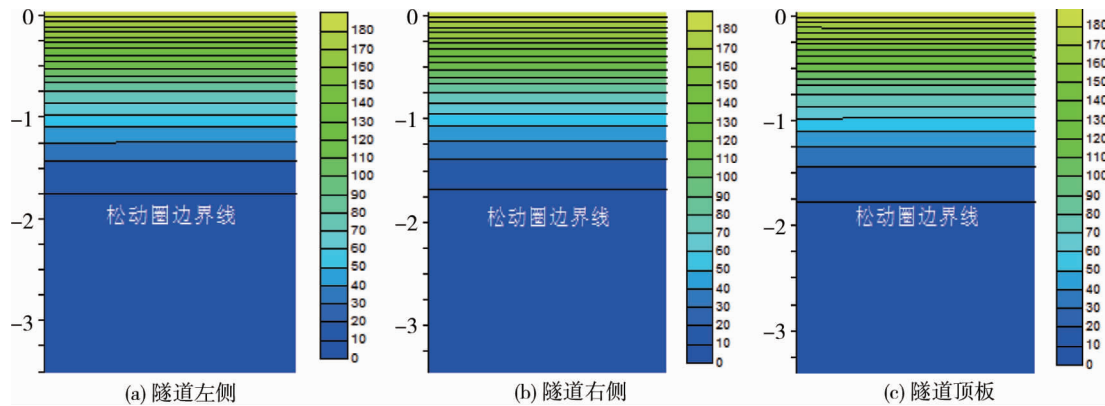


图 10 K0+758 m~K0+761 m 处视电阻率等值线

3 支护方案

董方庭^[16]指出:松动圈扩展过程中产生的碎胀力及其所造成的有害变形是隧道支护的主要对象;围岩松动圈尺寸越大,隧道收敛变形也越大,支护越困难.因此对于大尺寸的松动圈,在设计支护方案时应充分考虑其扩展过程中产生的碎胀力及收敛变形.

对隧道内 3 个不同里程断面处围岩松动圈进行测试,3 处的围岩松动圈厚度在 1.68~2.25 m,都大于 1.5 m,属于大松动圈^[17],围岩类别为 IV, V 类.根据围岩松动圈的实际厚度,对现场 IV, V 类围岩区域采用了不同的钢架锚喷网联合支护.具体支护参数见表 2.

表 2 支护参数

衬砌类型	预留变形量/cm	支护方案										
		C25 喷射混凝土		钢筋网		锚杆			型钢钢架			
		设置部位	厚度/cm	设置部位	网格间距/cm	钢筋规格	设置部位	间距(环×纵)/m	长度/m	设置部位	钢架类型/mm	间距/m
V	8	全环	24	全环	15×15	φ6	拱墙拱顶	1.5×0.6	3.0	全环	I18 型钢	0.6
IV	5	全环	20	全环	15×15	φ6	拱墙拱顶	1.5×1.0	2.6	全环	I16 型钢	1.0

后期采用收敛计监测隧道变形,监测数据显示这 3 处的隧道左侧、右侧和顶板的收敛速率均小于 0.02 mm/d,属于稳定隧道^[18-19].由此说明该支护方案是安全合理可靠的,采用此支护方案对隧道进行支

护,现场隧道围岩无垮落或大变形现象.

4 结论

1)岩体内部较破碎时,视电阻率值明显偏高,等值线密集;岩体内部较为完整时,视电阻率值较低,等值线稀疏.因此,通过视电阻率值高低骤变来确定围岩松动圈厚度是可行的.

2)使用瞬变电磁仪对隧道爆破开挖后围岩的松动圈厚度进行监测,确定了围岩松动圈厚度分别为1.95~2.1 m,2.1~2.25 m,1.68~1.77 m,其围岩类别分别为V类,V类,IV类围岩.

3)根据围岩类别,确定了不同的钢架锚喷网联合支护方案,经后期变形监测,收敛速率在合理的范围内,隧道变形小,支护可靠.

参考文献:

- [1] 吴涛,戴俊,杜美利,等.基于声波法测试技术的巷道围岩松动圈测定[J].煤矿安全,2015,46(1):169-172.
- [2] 徐坤,王志杰,孟祥磊,等.深埋隧道围岩松动圈探测技术与数值模拟分析[J].岩土力学,2013,34(s2):464-470.
- [3] 贾颖绚,宋宏伟.巷道围岩松动圈测试技术与探讨[J].西部探矿工程,2004(10):148-150.
- [4] 宋宏伟,郭志宏,周荣章,等.围岩松动圈巷道支护理论的基本观点[J].建井技术,1994(z1):3-9.
- [5] 黄锋,朱合华,李秋实,等.隧道围岩松动圈的现场测试与理论分析[J].岩土力学,2016,37(s1):145-150.
- [6] 许宏发,钱七虎,王发军,等.电阻率法在深部巷道分区破裂探测中的应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):111-119.
- [7] 白铭波,霍军鹏,雷鹏翔.TEM反演技术在浅埋煤层烧变岩水勘查中的应用[J].煤炭技术,2020,39(6):54-56.
- [8] 嵇艳鞠,王艳,林君,等.利用瞬变电磁技术进行地下水资源勘察[J].工程勘察,2005(6):64-67.
- [9] 张流,黄建国,高平.水对岩石变形过程中电阻率变化的影响[J].地震,2003(1):8-14.
- [10] 郭跃辉,雷东记,张玉贵,等.水力压裂煤体复电阻率频散特征试验研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):198-202.
- [11] 邓少贵,范宜仁,段兆芳,等.多温度多矿化度岩石电阻率实验研究[J].石油地球物理勘探,2000(6):763-767.
- [12] TOMECKA-SUCHON S, RUMMEL F. Fracture-induced resistivity changes in granite[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,1992,29(6):583-588.
- [13] 苏晋辉.瞬变电磁仪三维探测技术在采空区富水性中的应用[J].能源技术与管理,2017,42(4):164-165.
- [14] 牟义,邱浩,牛超,等.多源干扰条件下瞬变电磁法电性响应规律研究[J].地球物理学进展,2019,34(6):2493-2502.
- [15] 易帅.多次爆破荷载下巷道围岩松动圈的扩展规律[D].湘潭:湖南科技大学,2018.
- [16] 董方庭,宋宏伟,郭志宏,等.巷道围岩松动圈支护理论[J].煤炭学报,1994,19(1):21-32.
- [17] 靖洪文,孟庆彬,朱俊福,等.深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J].采矿与安全工程学报,2020,37(3):429-442.
- [18] 李志强,苏建孝,韩武学.回采巷道煤帮锚杆支护问题探讨[J].矿山压力与顶板管理,1998(1):52-55.
- [19] 冯超,范公勤.崔家沟煤矿巷道围岩变形规律研究[J].工矿自动化,2018,44(11):95-99.