

仰孔中声波法测试围岩松动范围的孔内堵水技术

蒲成志¹, 张春阳^{2,3}, 黄永恒²

(1. 南华大学 核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中南大学 资源与安全工程学院,
湖南 长沙 410083; 3. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘 要: 声波法是现场测试巷道围岩松动破坏范围最常用的技术。基于声波法在裂隙发育围岩仰孔中进行巷道围岩松动圈厚度现场测试时的不足, 提出将耦合水封闭在探头有效测试范围内的设计思路, 并据此设计孔内堵水方案, 研制出一种新的孔内堵水装置, 并将其应用在金川深部矿区巷道围岩松动圈厚度测试工作中, 测试结果表明: 这种孔内堵水装置使得钻孔内耦合水集中在探头所处钻孔长度范围内, 因而能够有效控制耦合水在钻孔内的渗流面积与散失速率, 进而达到测试工作中探头被耦合水完全包裹的目的, 使得声波信号的稳定性满足测试要求。工程实例表明: 采用孔内堵水技术的设计方法在复杂围岩条件及测试环境下测试围岩破坏范围具有普遍实用性及可行性。

关键词: 仰孔; 松动圈厚度; 孔内堵水技术; 声波测试技术

中图分类号: TD26 **文献标识码:** B

The Water Plugging Technology in Drilling During the Measurement of Thickness of Loosen Zone by Using Acoustic Testing Technique in Upward Slant Drilling

PU Cheng-zhi¹, ZHANG Chun-yang^{2,3}, HUANG Yong-heng²

(1. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;

2. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

3. School of Resources and Environment Engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan, Hubei 430070, China)

Abstract: Acoustic testing technique is the most commonly used method on the testing of thickness of loosen zone on site. Under the condition of fracture development surrounding rock, when the field testing of thickness of loosen zone was made in the upward slant drill-

收稿日期: 2014-10-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51404179); 湖南省博士生科研创新基金资助项目(CX2012B072)

作者简介: 蒲成志(1986-), 男, 山东阳谷人, 南华大学核资源工程学院讲师, 博士。主要研究方向: 岩土工程。

ing, the deficiency of acoustic testing technique would appear, based on which, it was proposed that the coupling water was closed in the effective testing length of probe. Then the solution of water plugging in drilling was designed. According to this solution, a new kind of water plugging device was designed. Afterward, it was used in the testing of thickness of loosen zone in the surrounding rock of roadway on the deep area of Jinchuan. Testing results showed that: by using this kind of water plugging device, the coupling water was concentrated around the extent of probe in the drilling. Therefore, the seepage area and speed of coupling water could be controlled effectively. Then the aim was attained that probe was completely encapsulated by the coupling water. Also, the stability of acoustic signal could meet the requirement of testing work. The example of engineering indicated that the design of water plugging device in drilling has universal practicability and feasibility during the testing of thickness of loosen zone in complex surrounding rock condition and testing environment.

key words: upward slant drilling; the thickness of loosen zone; the water plugging technology in drilling; acoustic testing technique

围岩松动圈范围是指巷道开挖应力重新分布后巷道周边出现裂隙至塑性变形而形成的应力降低区^[1],它是进行巷道围岩稳定性评价和支护设计的重要依据^[2].有关松动圈的理论研究,国内外开展的较多^[3];从自然平衡拱学说至冒落拱理论;从弹塑性变形假设到松动圈支护理论,这些都不离不开对围岩松动范围的确定.而确定松动圈范围的方法主要有现场测试法,数值算法及理论分析法^[4].中国矿业大学借助于国家“八五”科技攻关计划,研制出用于煤矿巷道的“超声波围岩松动圈测试仪”,并将其推广应用到其它领域^[5];宋宏伟^[6]基于脉冲电磁波在岩石介质中的传播规律,提出地质雷达测试围岩松动圈的方法,并将其成功应用在煤矿综采放顶煤工作面巷道围岩松动圈测试工作中;靖洪文^[5]基于声波法在膨胀性软岩巷道中的应用局限性,基于钻孔摄像测试技术,研制了全景数字摄像及图像处理系统;张平松^[7]则介绍了利用地震波进行巷道围岩松动圈测试与解析的原理和方法技术,并通过现场实践,说明了单孔检层与跨孔CT方法是一种有效的围岩松动圈测试方法.陈建功^[8]根据弹性力学理论,考虑巷道围岩的动静力作用,提出围岩破碎区半径的求解方法,并结合残余强度理论,利用塑性区的应力计算公式,得到围岩松动区半径的理论解.于永江^[9]采用损伤力学与统计理论的单元本构模型,基于RFPA^{2D}分析软件,研究了深部岩体中圆形巷道围岩松动圈的形成机理.

然而,目前巷道围岩破坏范围的现场测试工作中,仍然以水做耦合介质的声波测试法最为常用.但是在复杂围岩条件及测试环境下,由于现有

耦合水堵漏技术的缺陷,影响了其测试结果的稳定性,尤其是在仰孔中进行测试工作时,需要对钻孔全长进行封堵,当围岩较为破碎时,则很难保证钻孔中的耦合水充盈情况满足测试要求,进而影响测试结果的稳定性和准确性,这一不足极大限制了声波测试技术在现场的推广应用.

基于现有声波测试技术设备在复杂围岩条件及测试环境下的不足,本文对测试过程中的堵水技术进行了改进,提出孔内堵水的设计思想,设计了一种新的孔内堵水装置,解决了声波法测试技术在复杂围岩条件及测试环境下的不足.并通过在金川深部矿区巷道围岩的测试结果,证明孔内堵水技术在裂隙发育围岩条件下的上向钻孔中,仍能保证钻孔内耦合水量满足声波测试技术的要求.表明孔内堵水技术的设计方法在复杂围岩条件及测试环境下测定围岩松动圈范围具有普遍实用性及可行性,具有较强的推广价值与现实意义.

1 声波法测试围岩破坏范围原理

若视岩体为弹性体,根据弹性介质中波动理论,应力波波速如式(1)所述^[10]:

$$v_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

式中: v_p 为纵波波速;

E 为岩体弹性模量;

ρ 为岩体密度;

μ 为岩体泊松比.

根据式(1)可以看出:声波波速与介质性质密切相关.波速随介质裂隙发育、弹性模量降低、声阻抗增大而降低,随应力增大、密度增大而增

加. 因此,对同一性质围岩岩体来说,测得的声波波速高则围岩完整性好,波速低说明围岩存在裂隙,围岩发生了破坏.

图 1 所示为单孔一发双收探头测试工作示意图,发射探头在钻孔中发射声波,在孔壁周围产生滑行波沿着钻孔壁传播,在测试过程中,当首波传播到接收探头 1 时,将超声波转换成电能,使控制器翻转,计数门开启,计数器开始计时. 当滑行波继续传播到接收探头 2 时,控制器翻转回来,将计数门关闭,计数器停止计数,显示声波在接收探头 1 与接收探头 2 之间岩体中传播的时间读数 t , 根据下式计算声波波速 v 为:

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta T} = \frac{L_2 - L_1}{t} \tag{2}$$

式中: L_1 为接收探头 1 到发射探头的距离;

L_2 为接收探头 2 到发射探头的距离;

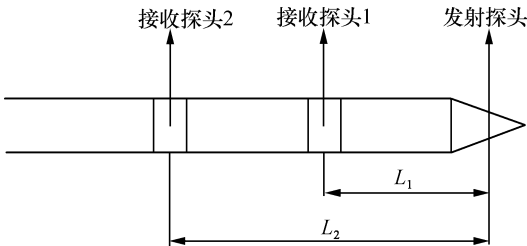


图 1 单孔一发双收探头结构示意图

Fig. 1 The diagram of probe with one transmitter and two receivers in single-hole

2 孔内堵水技术

由于声波测试技术的原理简单,操作方便,使得声波法成为围岩松动圈测试技术中最常用的一种方法. 但该方法在测定仰孔围岩质量时存在如下缺点:因为探头和岩石之间需要水耦合,如果测孔中的裂隙较发育,孔中水散失严重,孔口堵水时,当测试孔底范围内围岩质量时,需要对钻孔全长注水,并保证耦合水的充盈状态满足测试要求,因此,现有堵水技术难以保证测试全过程中探头与孔壁间充满耦合水. 所以现有孔口堵水的声波测试技术在围岩质量较差、裂隙较发育巷道中测试仰孔围岩质量时,测试结果的准确性难以保证.

为改进声波法在仰孔中的测试环境,根据现有声波法测试环节中的不足,提出孔内堵水的改进技术方案. 当采用孔内堵水时,由于将堵水器置于紧靠接收探头 2 (图 1 所示) 的下方位置,在现有测试设备中,探头间距设计一般为 20 cm,加上探头自身

的长度及过渡长度,孔内堵水时,耦合水充满钻孔长度维持在 50 ~ 60 cm 范围时即可满足测试要求,从而改进了孔口堵水时需要钻孔全长注水的不足.

当采用孔内堵水技术时,由于将耦合水集中在钻孔中有效测量范围内,使得耦合水散失情况仅发生在钻孔的特定长度内,在对测试工作没有意义的钻孔长度上没有耦合水的存在,同样没有耦合水散失现象发生,由此最大限度提升了耦合水利用率;另一方面,通过降低耦合水满注长度,有效减小了耦合水渗流面积,并显著降低了耦合水渗透水头,据此,根据达西渗透定律,孔内堵水技术能够有效降低耦合水散失速率,确保在探头有效测量长度范围内,探头与孔壁间耦合水量满足测试要求.

改进后的孔内堵水技术装置图如图 2 所示.

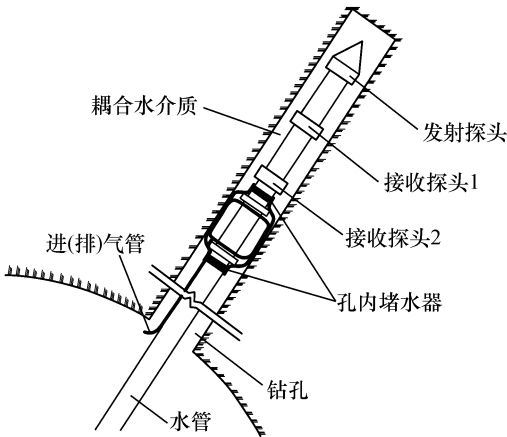


图 2 孔内堵水技术装置示意图

Fig. 2 The installation pictures of water plugging technology in the drilling

根据图 2 所示孔内堵水装置图,当测试钻孔底部围岩质量时,由于孔内堵水器随探头一起伸入钻孔内,此时孔内堵水相较孔口堵水具有明显优势:耦合水满注长度显著减小. 由于松动圈分界层往往处于钻孔深处范围内,在钻孔底部进行测试工作时能够保证耦合水满足测试条件要求,对于准确获得测试数据至关重要. 当采用孔口堵水时,由于钻孔大部分长度处于松动圈范围内,围岩松散破碎,透水能力强,加上钻孔全长注水提供的较大水头压差,使得耦合水渗流速度增大,此时难以保证探头所处位置耦合水量达到测试工作要求.

将孔口堵水装置置于孔内时,由于耦合水扩散长度较小,这样可以有效减少钻孔注水量,提高仰孔测试效率,但是同时带来了如下技术问题:

1) 孔壁摩擦作用使堵水器橡胶气囊成为易损材

料;且由于堵水装置与孔壁的摩擦作用,容易发生橡胶气囊堆叠而增大探头顺利进出钻孔的难度;

2) 声波法测试精度受钻孔直径影响,即探头与孔壁间空隙越小,测试精度越高.

而这两个技术问题相互矛盾:为减小孔壁摩擦,保护堵水器,需要增大孔径;为提高测试精度,需减小孔径.为解决这两个技术问题,对孔内堵水器做如图 3 所示的精细化设计.

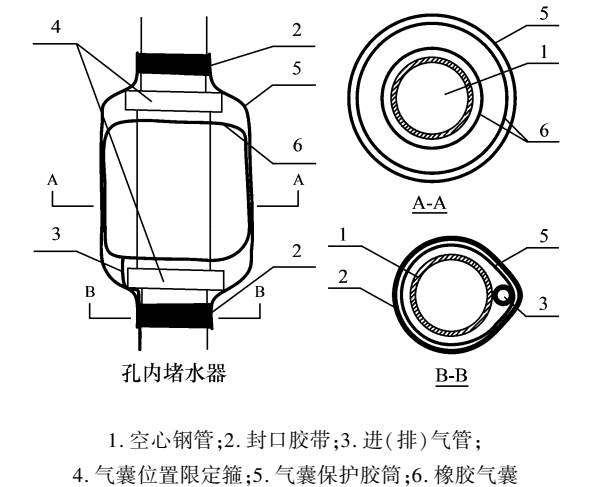


图 3 孔内堵水器细观结构

Fig. 3 The micro structure of water plugging device in the drilling

图 3 所示为孔内堵水器的细观构造图. 气囊位置限定箍(4)与气囊保护胶筒(5)的设置,可以有效保护孔内堵水器在孔内移动时因与孔壁摩擦而影响测试工作. 其中气囊保护胶筒的设置,目的是防止孔内堵水器随探头向孔内插入(或向孔外拔出)时因孔壁摩擦而损坏橡胶气囊;气囊位置限定箍的设置,目的是将气囊固定在特定位置,并将气囊保护胶筒两端绑扎在气囊位置限定箍外侧,防止孔内堵水器在钻孔内移动时气囊因与孔壁摩擦而堆叠. 为尽可能减小孔内堵水器对钻孔直径的影响,气囊位置限定箍的凸起高度应在有效防止气囊堆叠的前提下尽可能的减小.

为保证孔内堵水器能够顺利进出钻孔,测试前需对钻孔进行清空,除去孔壁浮石,防止卡孔.

3 工程应用实例

金川矿体的开采活动已进入深部围岩环境. 由于矿体的形成与区域内地质构造活动密切相关,因此高地应力成为深部矿区典型特征. 由于巷道围岩收敛变形大,持续时间长,表现出显著蠕变

变形特性,使得巷道围岩的长期稳定性成为制约矿区发展的主要因素. 而有效的支护方案设计是保持巷道长期稳定的关键.

失稳巷道支护体收敛变形特征显示:双层喷锚网支护体中锚杆与支护结构整体向巷道净空收敛,锚固端钢板垫保持完好. 这表明锚杆在双层喷锚网支护体中并没有发挥锚固作用,由于锚杆因无法有效锚固而不能提供足够预锚力,导致巷道围岩应力持续向深部转移,造成围岩破坏范围逐渐扩大,从而导致巷道围岩持续收敛变形. 因此,进行深部巷道围岩破坏范围测定,据此设计合理的支护参数是有效抑制松动圈内扩、巷道持续收敛变形的有效措施.

基于中科智创研发的 RSM-7 型声波测试仪,采用本文提出的孔内堵水技术,对 978 探矿道巷道围岩破坏范围进行了现场测定工作.

实验巷道埋深接近 750 m,而选定测试位置位于矿区内 F4 断层影响带上,观察揭露掌子面围岩节理发育情况,围岩呈规则碎块结构,节理纵横分布极其密集,后方爆落堆积岩石呈碎块状,测试过程中,掌子面未封闭围岩上不时有碎块冒落. 据此可以综合判断,测试围岩质量差,节理发育,测试环境复杂.

结合课题前期研究成果,设计测试钻孔长度为 2.8 m,并根据探头外径尺寸,为方便探头进出测试钻孔,选择 $\Phi 42$ mm 钎头打设钻孔,并设计钻孔位置分布在拱顶、斜向 45° 、拱脚及底脚处(如图 4 所示),据此可以全面掌握巷道全断面围岩破坏情况.

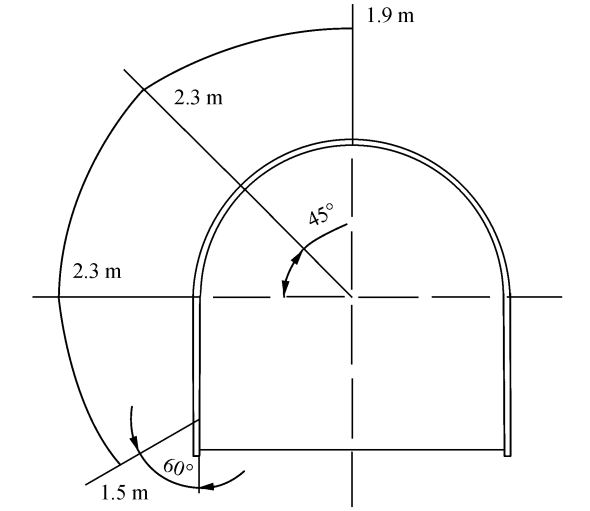


图 4 978 探矿道松动圈测试结果示意图
(钻孔深度为 2.8 m)

Fig. 4 The diagram of testing result of loosen zone on 978-prospecting way

测试过程中,由内而外逐孔进行测试工作.仰孔测试时,将探头送至钻孔底部后,开启水阀送水,同时向孔内堵水器中充气,待水流顺孔下泄速率显著减弱时停止充气,并观察测试仪声波曲线状态,待其稳定后,保存数据,后停水、排气,然后将探头拔出钻孔一定长度(本次测试设计20 cm),进行下一测点的测试工作.

测试工作完成后,基于仪器自带数据分析程序,将保存波形文件进行处理后,可以得到不同测点处的声波速率,然后将同一钻孔内、不同测深处的声速与孔深相对应,根据声速变化情况分析测试结果.

图4所示为测试结果示意图,在仰孔中的测试结果表明,孔内堵水技术有效改善了孔口堵水的测试环境,提高了测试信号的稳定性(见图5),表明采用孔内堵水时探头长度范围内耦合水充盈状态良好.

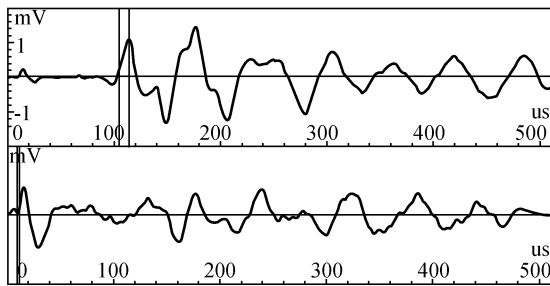


图5 顶部钻孔探头入孔2.45 m时接收探头信号

Fig. 5 The acoustic signal at the depth being 2.45 m in the top drilling

4 结 论

1) 声波法因为其测试原理简单,操作方便,成为现场测试巷道围岩松动破坏范围最常用的技术.但是由于测试过程中需要耦合水充满探头与孔壁间隙,其在裂隙发育围岩及仰孔测试环境中的应用受到极大限制.采用孔内堵水技术将耦合水封闭在探头有效测试范围内,能够有效减小耦合水渗流面积与散失速率,解决复杂环境下声波测试技术的应用受限问题;

2) 为避免孔内堵水装置在测试工作中因与孔壁摩擦而损坏或堆叠,影响测试工作的进行,在保证测试精度不受影响的前提下,通过外设高弹性气囊保护套筒与固定金属箍,并限制金属箍外径小于探头外径,成功对其进行了细部结构的精细化设计;

3) 为验证孔内堵水技术在裂隙发育岩体中测试仰孔围岩质量的可行性与实用性,基于RSM-7型声波测试仪,将其应用在金川深部矿区巷道围岩松动圈厚度测试工作中.测试结果表明,孔内堵水技术能够很好的解决复杂围岩条件及测试环境下声波法无法正常进行测试工作的不足.

参考文献:

- [1] 辛亚军,勾攀峰,贡东风,等.非软顶底板煤巷锚杆支护及围岩松动规律[J].采矿与安全工程学报,2012,29(2):203-208.
- [2] 董方庭,郭志宏.巷道围岩松动圈支护理论及应用技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [3] 郭亮,李俊才,张志铨,等.地质雷达探测偏压隧道围岩松动圈的研究与应用[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):3009-3015.
- [4] 钱自卫,姜振泉,曹丽文,等.基于围岩松动圈理论的井筒壁后防渗注浆技术研究[J].煤炭学报,2013,38(2):189-193.
- [5] 靖洪文,李元海,梁军起,等.钻孔摄像测试围岩松动圈的机理与实践[J].中国矿业大学学报,2009,38(5):645-649.
- [6] 宋红伟,王闯,贾颖绚.用地质雷达测试围岩松动圈的原理与实践[J].中国矿业大学学报,2002,31(4):370-373.
- [7] 张平松,刘盛东,吴荣新,等.峒室围岩松动圈震波探测技术与应用[J].煤田地质与勘探,2003,31(1):54-56.
- [8] 陈建功,贺虎,张永兴.巷道围岩松动圈形成机理的动静力学解析[J].岩土工程学报,2011,33(12):1964-1968.
- [9] 于永江,张哲,王来贵,等.深部岩体圆形巷道围岩松动圈形成机理数值试验研究[J].力学与实践,2008,30(6):64-67.
- [10] 陈成宗.工程岩体声波探测技术[M].北京:中国铁道出版社,1990.