

瞬变电磁法用于检测与识别硐室爆破盲炮的可行性探讨

刘连生^{1,2}, 梁龙华^{1,2}, 吴吉洋³, 焦永斌^{1,2}, 陆哲祥^{1,2}

(1. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000; 2. 江西省矿业工程重点实验室, 江西赣州 341000; 3. 江西漂塘钨业有限公司, 江西赣州 341515)

[摘要] 应用瞬变电磁法对硐室爆破盲炮的检测与识别进行了可行性研究。试验时先确立电磁背景场, 然后在硐室中预置良性导体并测得电磁场后消除背景场, 在爆破后再次进行瞬变电磁测量。通过对比爆破前后预置良性导体涡流场的变化, 实现硐室爆破盲炮检测与识别的目的。试验结果表明, 当铝箱目标体埋深不超过 30 m 时, 瞬变电磁检测法可以明确地确定铝箱的位置; 当铝箱埋深超过 30 m 后, 铝箱形成的二次涡流场层次不明, 不能确定铝箱的埋深与位置。

[关键词] 瞬变电磁法; 硐室爆破; 盲炮检测与识别; 涡流场; 目标体

[中图分类号] TD235.45 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0107-06

1 前言

硐室爆破有“多、快、好、省”四大特点, 因而被广泛应用于工程实践^[1]。但由于其装药量大, 一旦产生盲炮, 对人员及设备安全和施工进度都将产生严重的影响。过去, 盲炮的检测与识别仅依靠肉眼观察和工程经验, 可靠性差, 无法准确地检测与识别出所有的盲炮。瞬变电磁法具有能检测地下隐蔽工程的特性^[2-4], 为盲炮的快速检测与识别提供了有效技术手段。本文应用瞬变电磁法在某地进行瞬变电磁法可行性探讨试验, 研究瞬变电磁法用于检测与识别硐室爆破盲炮的可行性。

2 瞬变电磁法原理

瞬变电磁法是一种无损高分辨率电磁探测技术, 利用探测的电导率数据成图, 可检测出地下埋藏的金属物体并提供相关信息^[5]。

瞬变电磁测量是利用不接地线圈(或称回线)向地下发射一次瞬变磁场, 通常是在发射线圈上供一个电流方波, 可在地下产生稳定的磁场分布, 当电流方波切断后, 地球介质将产生涡流, 其大小取决于地球介质的导电程度。该涡流不会立即消失, 它将有一个过渡过程, 过渡过程产生的磁场向地表传播, 通过地表的接收线圈把磁场的变化转化为感应电压的变化。

瞬变电磁法测深的原理可以用“烟圈”效应形象地加以阐明, 如图 1 所示, 地表接收的二次电磁场是地下感应涡流产生的, 其涡流以等效电流环向下并向外扩散, 形如“烟圈”。随着时间的推移, “烟圈”的传播与分布将受到地下介质的影响。这样从“烟圈”效应的观点看, 可得知早期瞬变电磁场是近地表感应电流产生的, 反映了浅部电性分布; 晚期瞬变电磁场主要是由深部的感应电流产生的, 反映了深部的电性分布。因此, 观测和研究大地瞬变电

[收稿日期] 2014-09-01

[基金项目] 中国有色金属工业协会与中国工程爆破协会联合资助重大科研专项(CSEBKY20100001); 江西省科技计划项目(20142BBE50008)

[作者简介] 刘连生, 1979 年出生, 男, 江西赣州市人, 副教授, 主要从事工程爆破理论与技术的教学与研究; E-mail: liulsjxust@163.com

磁场随时间的变化规律,可以探测大地电性的垂向变化,这是瞬变电磁测深的原理。

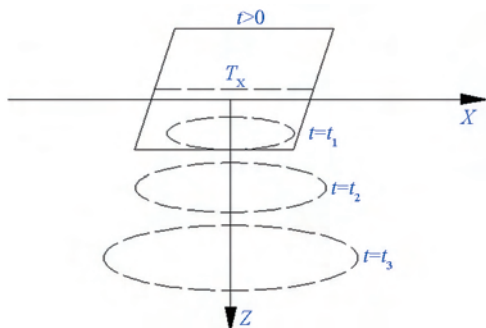


图1 等效电流环

Fig. 1 Equivalent current loop

注: X为地面, Z为测深, T_x 为发射线圈, t 为时间, t_1 、 t_2 、 t_3 分别表示涡流扩散的不同时间

瞬变电磁法工作过程可以分为发射、电磁感应和接收三部分。当发射线圈中的稳定电流被突然切断后,根据电磁感应理论,发射线圈中电流突然变化必将在其周围产生磁场,该磁场被称为一次磁场。一次磁场在周围的传播过程中,若遇到地下良性导体,将在该导体内部激发产生感应电流,又称为涡流或二次电流(见图2)。由于二次电流随时间变化,所以在其周围又产生新的磁场,称为二次磁场。由于良性导体内感应电流的热损耗,二次磁场大致按指数规律随时间衰减。二次磁场主要来源于良性导体内的感应电流,因此二次磁场可通过接收线圈来观测,通过对所观测的数据进行分析和处理,进而解释地下物体及相关物理参数。

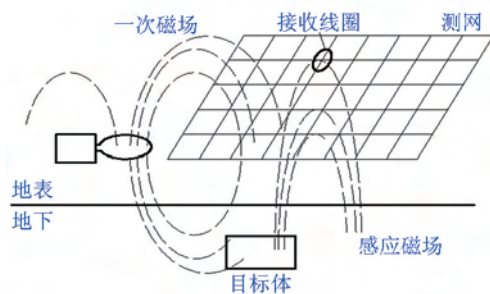


图2 瞬变电磁法工作原理示意图

Fig. 2 Working principle of transient electromagnetic method

根据法拉第电磁感应定律,当把绕有匝数为 N 、截面积为 S 的圆柱形螺线管线圈放置在随时间变化的磁场 $B(t)$ 中时,在线圈中就会产生感应电动势 $V(t)$,即

$$V(t) = -N \frac{d\phi(t)}{dt} = -q \frac{dB(t)}{dt} = -NS \cdot \frac{d\mu_0 n I(t)}{dt} \quad (1)$$

$$= -\frac{N^2 S}{l} \cdot \mu_0 \cdot \frac{dI(t)}{dt}$$

$$B(t) = \int_t^\infty [V(t)/q] dt \quad (2)$$

式中, $\phi(t)$ 为通过线圈的磁通量; μ_0 为真空导磁系数; n 为线圈密度; l 为螺线管长度; $I(t)$ 为产生的感应电流; q 为电场。

由此可见,瞬变电磁法中的一次磁场和二次磁场均可由线圈的感应电动势反映,因此,若将感应电动势进行数字化采集处理,即可得到二次场衰减曲线。可见,观测信号 $V(t)$ 正比于 $dB(t)/dt$,可以得到接收线圈所观测到的一次场信号 $V_1(t)$ 、二次场信号 $V_2(t)$ 及取样 $V_2(t)$ 的波形。

3 瞬变电磁法理论

均匀半空间表面上垂直磁偶极子源形成的瞬变场,根据考夫曼和凯勒给出的柱坐标系下频率域电磁场各个分量的表达式^[6-9]

$$E_\phi = -\frac{\rho M}{2\pi r^4} [3 - (3 - 3ikr - k^2 r^2) e^{ikr}] e^{-i\omega t} \quad (3)$$

$$B_z = \frac{9\mu M}{2\pi k^2 r^5} \left[1 - \left(1 - ikr - \frac{4}{9} k^2 r^2 + \frac{i}{9} k^3 r^3 \right) e^{ikr} \right] e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$H_r = \frac{\partial^2 A_z}{\partial r \partial z} \quad (5)$$

为了把式(4)转换成时间域,可利用下列积分

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} e^{ikr} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1 - \leftrightarrow \phi(u), & t > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中, $\phi(u)$ 为概率积分, $\phi(u) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \int_0^u e^{-t^2/2} dt$, $u = 2\pi r/\tau$, $\tau = \sqrt{2\pi \rho t \times 10^7}$ 。

将式(7)逐次对 r 求微分,可得

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} ikre^{ikr} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} u e^{-(u^2/2)} \quad (8)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (ikr)^2 e^{ikr} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = \sqrt{\frac{2}{\pi}} u^3 e^{-(u^2/2)} \quad (9)$$

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} (ikr)^3 e^{ikr} \frac{e^{-i\omega t}}{-i\omega} d\omega = -\sqrt{\frac{2}{\pi}} u^3 (u^2 - 1) e^{-(u^2/2)} \quad (10)$$

将式(6)~式(9)代入式(3),可得

$$E_\phi(t) = -\frac{3M\rho}{2\pi r^4} \left[\phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} u \left(1 + \frac{u^2}{3} \right) e^{-(u^2/2)} \right] \quad (11)$$

将式(8)~式(11)代入式(4)并对 t 求导,可得垂直分量(Z分量)的磁感应强度对时间的导数

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} = \frac{9M\rho}{2\pi r^5} \left[\phi(u) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-u^2/2} u \left(1 + \frac{1}{3}u^2 + \frac{1}{9}u^4 \right) \right] \quad (12)$$

式(3)~式(12)中, $M=ISN$ 为磁偶极子的磁矩; I 为电流; S 为线圈面积; N 为线圈匝数; ρ 为均匀半空间电阻率; r 为收发距。

4 瞬变电磁法试验

4.1 瞬变电磁法测量方案

本次试验采用的是在硐室中预置良性导体, 通过对比爆破前后预置良性导体涡流场的变化来进行检测。其试验方案包括以下五步: a. 在硐室中预置铝箱前, 在地面开展瞬变电磁测量, 确立背景场; b. 在硐室中预置铝箱后, 在地面开展瞬变电磁测量; c. 消除背景场, 突出预置铝箱的涡流场; d. 炸药爆破后, 在地面开展瞬变电磁测量; e. 对比炸药爆破前后预置铝箱的涡流场变化, 实现硐室爆破盲炮检测与识别的目的。

4.2 检测方法现场试验

本次现场试验的目的是研究预置铝箱随距离变化对瞬变电磁响应的影响规律, 以及通过改变铝箱与发射线圈和接收线圈的距离, 研究瞬变电磁法的分辨能力。

试验地点选择在某钨矿的 556 巷道, 该巷道长 110 m, 宽 2.0 m, 高 2.1 m, 岩性主要为变质岩, 中间夹杂石英脉和云母片岩; 该区岩石节理裂隙发育且含水, 巷道内有水流出, 浅层地表至巷道内岩性比较单一; 该区地表碎石较多且裸露有铁质水管, 能作为试验区的面积较小, 试验范围内无工业电干扰, 但距离试验区域方圆 300 m 内有 496 采矿坑口和空气压缩工作站高达 6 300 V 的工业电干扰, 对瞬变电磁仪检测属于强干扰源; 该区山势陡峭, 倾角大于 45°, 地表植被茂盛。矿井内有水流出, 无工业电干扰。试验地表情况见图 3, 巷道及其地面布测见图 4。

本次试验器材有高灵敏度感应器件、瞬态电磁仪一套、蓄电池若干、铝箱 6 个 (尺寸为 500 mm × 500 mm × 1 000 mm, 铝板厚为 2 mm), 如图 5 所示。

试验测点布置和目标体 (铝箱) 布置如图 6 和图 7 所示。试验中, 地表的接收线圈布置在高差分别为 15 m、30 m 和 55 m 的 3 个位置, 发射线圈的尺寸为 50 m × 70 m, 每检测一次铝箱不同埋深位置后,

发射线圈也相应地移动。



图 3 试验地表情况

Fig. 3 Testing ground conditions

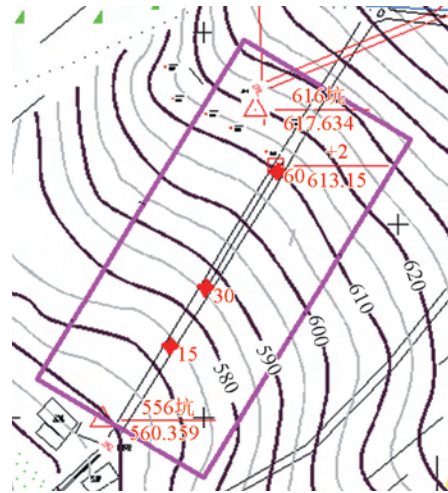


图 4 556 巷道及其地面布测平面示意图

Fig. 4 556 roadway and ground plane schematic layout measuring



图 5 试验用的铝箱

Fig. 5 Aluminum box of the test

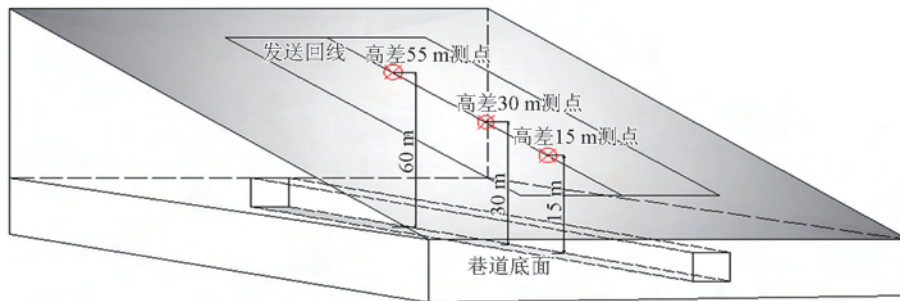


图6 瞬变电磁检测布置立体示意图

Fig. 6 Schematic of the three-dimensional transient electromagnetic detection arrangement

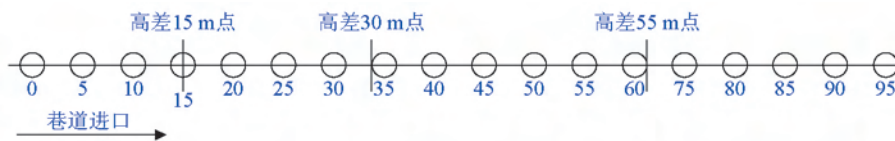


图7 铝箱在巷道内平面布置示意图

Fig. 7 Schematic of the aluminum box in the layout of the roadway

当检测铝板埋深为15 m,即高差为15 m时,铝板在巷道内从巷道口开始,每隔5 m检测一次,共检测8次。

当检测铝板埋深为30 m,即高差为30 m时,铝板在巷道内从距巷道口15 m开始,每隔5 m检测一次,到距巷道口55 m结束,共检测9次。

当检测铝板埋深为55 m,即高差为55 m时,铝板在巷道内从距巷道口40 m开始,每隔5 m检测一次,到距巷道口95 m结束,共检测12次。

4.3 现场试验结果分析

1)高差为15 m的铝板目标体位于15 m标高检测点正下方点位为15 m处。由图8可知,当铝箱埋深为15 m时,可以明显看到涡流场,且在埋深15 m的位置时,涡流场集中且中心有一明显低阻磁场,这就是铝箱的放置位置。从这个试验可以发现,当铝箱埋深较浅时,瞬变电磁仪可以很清楚地检测到铝箱在一次场作用下形成的二次涡流场,同时,也可以很清晰地显示出铝箱的埋设位置。

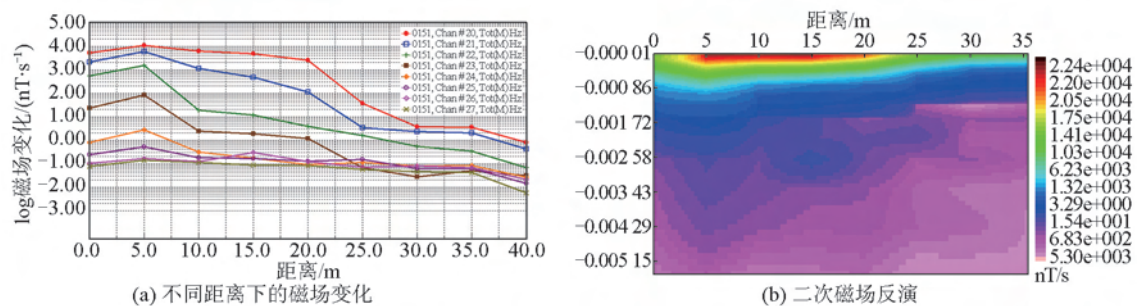


图8 高差15 m的瞬变电磁响应剖面图

Fig. 8 The cross-sectional view of transient electromagnetic response at 15 m

2)高差为30 m的铝板目标体位于30 m标高检测点正下方点位为30 m处。由图9可知,当铝箱埋深为30 m时,可以明显看到涡流场,与铝箱埋深为15 m形成的二次涡流场相比,虽然铝箱埋深30 m形

成的二次涡流场的层次没有15 m形成的分明,但还是可以在磁场的下部看到半个层次分明的二次涡流场。这可能是由于在30 m位置的巷道上方,裂隙水比较发育,由于裂隙水是低阻体,在裂隙水的影

响下形成了一个由裂隙水和铝箱共同形成的叠加二次涡流场,从而形成一个面积较大的不规则磁

场,而这半个层次分明的二次涡流场中心即为铝箱放置位置。

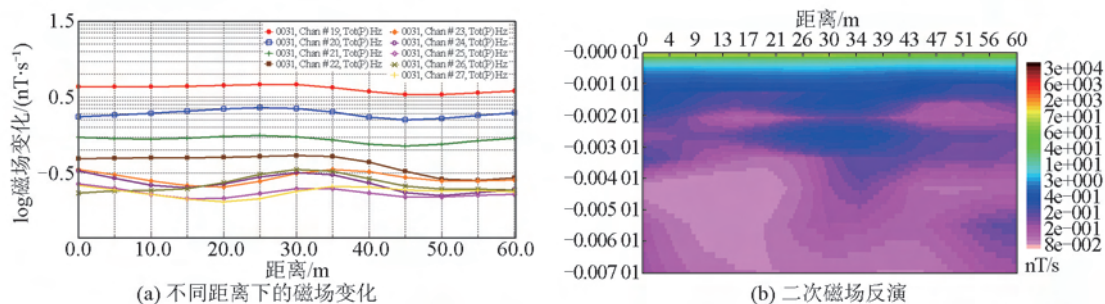


图9 高差30 m的瞬变电磁响应剖面图
Fig. 9 The cross-sectional view of transient electromagnetic response at 30 m

3)由图10可知,当铝箱埋深在55 m时,目标体在一次场的作用下形成了一个不太清晰的二次涡流场,而且涡流场层次不明,难以确定是否为铝箱在一次场的作用下形成的二次涡流场,同时也不能确定铝箱的埋深深度与位置。

药室的炸药无法完全装入药室,影响爆破效果。

5 结语

本文利用瞬变电磁法进行了硐室爆破盲炮检测与识别的可行性研究试验,可以得出以下结论。

1)通过现场试验发现,采用以较大体积铝箱为目标体的瞬变电磁法,在检测与识别埋深较浅的盲炮时是可行的,当盲炮的埋深较深时,这种方法就存在一定的局限性。

2)当目标体的埋深超过30 m后,瞬变电磁法难以准确地定位盲炮的位置。且当出现多个盲炮时无法分辨出盲炮的个数。

3)在工程实践中,铝箱的体积较大限制装药量,可能会影响爆破效果。测试过程复杂,不便于操作,且不能及时得出结果,测试中的干扰因素多。因此,瞬变电磁法用于硐室爆破盲炮检测与识别的实用性不强。

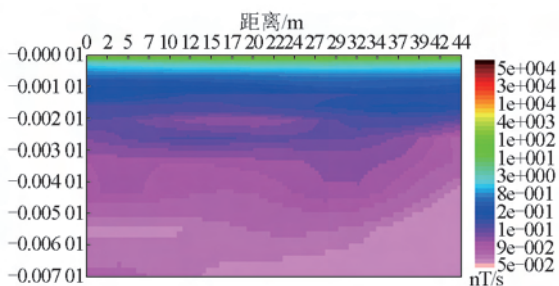


图10 高差55 m的瞬变电磁响应剖面图
Fig. 10 The cross-sectional view of transient electromagnetic response at 55 m

本次现场试验以大规模的铝箱作为目标体,在埋深不超过30 m时,可以产生比较鲜明的瞬变电磁异常,能较清晰地确定目标体以及目标体的埋深坐标,即瞬变电磁法可以检测与识别埋深不超过30 m的硐室爆破的盲炮位置;当埋深超过30 m后,铝箱形成的二次涡流场层次不明,不能确定铝箱的埋深深度与位置,即瞬变电磁法不能检测与识别埋深超过30 m的硐室爆破的盲炮位置。

要获得比较理想的试验结果,只有通过增大铝箱的体积才能实现。在试验中,6个铝箱的体积均为1.5 m³,如果继续增大铝箱体积,过大体积的铝箱将占有药室的一部分装药空间,很可能使加强装药

参考文献

- [1] 庙延钢, 栾龙发. 爆破工程与安全技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] 陈载林, 黄临平, 陈玉梁. 我国瞬变电磁法应用综述[J]. 铀矿地质, 2010, 26(1): 51-54.
- [3] 薛国强, 李 猷, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195-1200.
- [4] 林 君. 电磁探测技术在工程与环境中的应用现状[J]. 物探与化探, 2000, 24(3): 167-177.
- [5] 朴化荣. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社, 1990.
- [6] 李 猷. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
- [7] 王长清, 祝西里. 瞬变电磁场——理论和计算[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011.
- [8] Spies Brian R. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods [J]. Geophysics, 1989, 54(7): 872-888.

Feasibility study of the transient electromagnetic method for chamber blasting misfire detection and recognition

Liu Liansheng^{1,2}, Liang Longhua^{1,2}, Wu Jiyang³,
Jiao Yongbin^{1,2}, Lu Zhexiang^{1,2}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou, Jiangxi 341000, China; 3. Jiangxi Piaotang Tungsten Industry Co. Ltd., Ganzhou, Jiangxi 341515, China)

[Abstract] In this paper, transient electromagnetic method was used to carry out the feasibility study on the detection and recognition of chamber blasting misfire. First, an electromagnetic background field was established in the test; second, a benign conductor was preset in the chamber, and then the background field was eliminated after the electromagnetic field was measured; finally, the transient electromagnetic field was measured again after blasting; at last, the chamber blasting misfire was detected and recognized by comparing the change of vortex field of the preset benign conductor before and after blasting. The test results showed that: When the buried depth of aluminum box target was no more than 30 m, transient electromagnetic method can clearly identify the position of the aluminum box; when the buried depth of aluminum box was more than 30 m, the buried depth and position of the aluminum box was not sure due to the unknown level of secondary vortex field generated by aluminum box.

[Key words] transient electromagnetic methods; chamber blasting; misfire detection and recognition; vortex field; target