

· 矿井物探 ·

稳态瑞利波勘探的探测深度及影响因素分析

夏宇靖 (煤炭科学研究院西安分院 710054)

摘要 稳态瑞利波勘探所能达到的勘探深度是众多使用者越来越关心的话题。作者依据瑞利波勘探的基本原理和多年的实践经验,对影响勘探深度的各种因素,包括岩层的平均速度 v_R 、使用的最低频率 f_{\min} 、震源能量、各种地质因素、耦合因素等一一作了分析,并列举了多种条件下勘探深度的实际数据。指出综合运用合理参数,进一步提高对小异常的识别能力,有可能在目前基础上把瑞利波方法的勘探深度再提高一步。

关键词 瑞利波 勘探深度 影响因素

中国图书资料分类法分类号 P631.44

作者简介 夏宇靖 男 51岁 硕士 高级工程师 地震勘探

1 引言

稳态瑞利波方法自引进日本GR-810仪器起,已在我国许多地区得到广泛应用,并促进我国在仪器研制、资料处理、方法应用方面有了许多进展,使其迅速发展成为浅层工程地质勘察中的一种有效的手段。其定量解释的准确性、对洞穴反映的敏感性和强抗干扰能力越来越受到使用者的青睐。但同时,它有限的勘探深度常常在许多时候限制了它的应用,也使许多物探工作者十分关注这一点。根据多年的实践,笔者拟对与此有关的各种因素作一初步分析,并指出可能进一步扩大勘探深度的途径。

2 勘探深度的基本理论

瑞利波勘探方法目前使用的有效波,是瑞利型面波的垂直分量。它的衰减规律如图1所示。在一个波长的深度时,该分量的振幅已降至地面振幅的10%~15%,而瑞利波能量的90%以上都集中在一个波长的深度范围内。这就决定了在目前的技术水平下,瑞利波方法的勘探深度将以一个波长的距离为限。

稳态瑞利波仪器在确定勘探深度时采用半波长理论,即将勘探深度点确定在 $\lambda/2$ (λ 为波长)处,并以该点为中心特征点来代表以一个波长距离为高度、以检波器之间距离为底面直径的圆柱体内介质的平均性质。这种理论符合几何中心的理论,并和大多数实验结果吻合。相应的勘探深度公式为:

$$D = \frac{\lambda}{2} = \frac{v_R}{2f}$$

式中 D —— 勘探深度;

λ —— 波长;

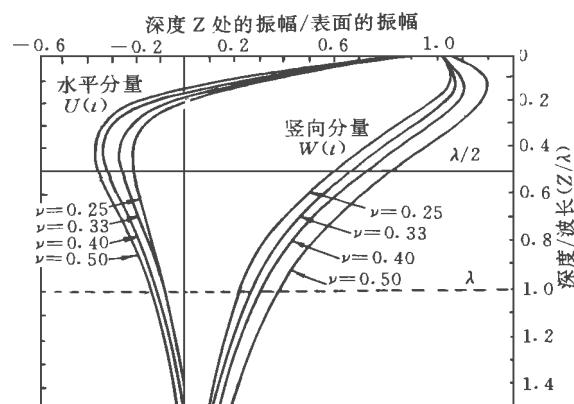


图1 瑞利波衰减规律示意图

f —— 频率;

v_R —— 平均速度。

可见, 瑞利波勘探深度主要取决于 v_R 和 f 。

3 影响因素

3.1 瑞利波平均速度 v_R

瑞利波传播的平均速度 v_R 是由地下地层及其组合构成状况决定的。对某一固定频率而言, 它是一个恒量, 即对应地下不同深度, 它有相应的稳定值。

而影响岩层中瑞利波传播速度的主要因素是岩性。一般地说, 不同岩性的岩层具有不同的速度范围, 宏观上可以依据速度大致确定岩性。但实际上, 由于受到多种因素的影响, 如埋深条件、致密程度、孔隙含水度等, 同一类岩性的岩层往往具有较宽的速度范围, 往往和其它岩层的速度范围交叉或部分重叠。所以, 只凭速度一个参数准确确定岩性是困难的。同样, 几种不同的岩性组合也完全可能得到类似的瑞利波平均速度 v_R 。

这样, 在相同仪器因素条件下, 勘探深度就主要取决于勘探区内岩层的状况: 在基岩出露或松软覆盖层较薄的地区, v_R 相对较高, 可以达到较大的勘探深度; 而对松软岩层或疏松黄土厚度较大的地区, v_R 相对较低, 勘探深度就比较浅。

例如, 假定使用的最低频率 f_{\min} 为 3 Hz, 在 v_R 只有 50~60 m/s 的淤泥中, 根据(1)式, $D = 8 \sim 10$ m; 而在一般粘土中 $v_R = 100 \sim 250$ m/s, $D = 17 \sim 42$ m; 在比较坚硬的岩层中, v_R 可达 1 500 m/s 以上, 勘探深度可能达 250 m 以上, 相差十分悬殊。可见, v_R 对深度的影响是巨大的。

3.2 频率 f_{\min}

根据(1)式, 在 v_R 不变的条件下(如每次实测, 该点处对应的各深度的 v_R 值已完全由地下地质条件确定), 勘探深度与使用的瑞利波频率成反比, 换言之, 在某一测点的最大勘探深度 D_{\max} , 完全取决于能够使用的最低频率 f_{\min} 。

除以上两个主要影响勘探深度的因素之外, 在实际勘探中, 还存在一些具体的影响因素, 其中有些与因素 v_R 有联系。

3.3 震源能量

震源是激发瑞利波的主体, 其能量的大小决定着检波器接收到的瑞利波信号强度。因而首先必须

激发出足够强度的波, 保证在低频状态激震时, 一个波长深度范围内的介质能有足够幅度的振动。否则, 震源能量过小, 激发的振动过于微弱, 即使频率再低, 也难激起一个波长深度内介质的振动, 自然也就接收不到深处的振动信息。

3.4 地质因素

影响勘探深度的地质因素是与 v_R 有关的因素。在勘探实践中, 尤以覆盖层厚度、松软程度、基岩的坚硬与完整程度、地下空洞、砂砾层、松散砂等使波能急剧衰减的因素影响最大。同时, 震源与地表的耦合状况也是一个与地表条件有关的影响因素。

3.4.1 覆盖层厚度及松软程度

黄土覆盖层厚度和松软程度对勘探深度有极大影响, 往往成为不同地区勘探深度的决定因素。这主要是由于黄土覆盖层具有相对较低的瑞利波传播速度。松软、疏松的黄土, 瑞利波波速可低至 50~70 m/s, 一般也仅在 100~250 m/s 左右。所以它的存在使近地表的 v_R 值偏低, 难以达到较大的勘探深度。而且黄土覆盖层厚度越大、质地越松软, 勘探深度将越小。由(1)式及勘探实践, 在厚层黄土层中, 0~20 m 范围内, 一般 $v_R \leq 250$ m/s, 20~50 m 范围内, 由于压力较大, 黄土质地较致密, v_R 可能超过 250 m/s, 甚至达到 350~400 m/s。尽管如此, 勘探深度也只有 40~50 m ($D = 250/(2 \times 3) = 42$ m)。

在地表覆盖层中, 速度最低的是海边或填海造地形成的淤泥层, 最低速度可达 40~50 m/s, 一般也只在 50~120 m/s 之间, 用最低的勘探频率(2.5~3 Hz), 也只能探测到 25 m 左右。而且, 淤泥的含水程度对勘探深度的影响很大。在过饱和含水淤泥中, 穿透 5~10 m 厚的淤泥层都很困难。较为干燥的淤泥层, 速度可达松散黄土水平, 即 100~180 m/s, 相应的勘探深度可达 30~40 m。

3.4.2 基岩坚硬程度与完整程度

基岩中, 瑞利波速度较高, 勘探深度较大。但基岩种类很多, 从泥岩、页岩、粉砂岩、砂岩到灰岩、花岗岩、玄武岩等, 致密程度与坚硬程度有明显差别, 致使瑞利波速度差异很大。从最低的 350~400 m/s, 直至 2 000~3 000 m/s, 勘探深度至少都超过 50 m, 甚至达到 200 m 以上。

基岩中的瑞利波速度, 除受其类型及坚硬程度影响之外, 还与基岩的完整程度有关。所谓完整程度

主要指两种情况：一是基岩中裂隙发育程度及含水程度；二是指天然或人工对基岩完整性的破坏，包括断层破碎带、矿山人工爆破扰动、空洞引起的冒落和垮塌等。所有这些不完整因素和充水的影响，都在不同程度上使岩层的波速降低，导致勘探深度变浅。

3.4.3 能量衰减程度

从图 1 可以看出，对于不同泊松比 ν 的岩层，瑞利波垂直分量的能量衰减虽有近似的总体趋势，但其衰减速率是不尽相同的。衰减快的地层，将因能量过早耗损而达不到更大的勘探深度。

需要指出的是，在勘探实践中，发现有几类岩层或地质体会以比正常衰减快得多的速度消耗瑞利波的能量，较明显地降低勘探深度。这包括松散的砂砾石层、松散砂及地下空洞等。一般认为，在这些岩层或地质体中，会发生较强的漫反射或强反射，损失较多的能量。实际上，这类岩层、地质体的厚度越大，埋深越浅，带来的能量衰减越严重。

3.4.4 震源与地表的耦合因素

稳态瑞利波勘探，震源通过底盘直接与地面接触，这种接触条件，称耦合因素。其影响往往超过人们的预计，必须给予足够的重视。

耦合的基本要求是平整、均匀、坚固。接触面完全水平，以保证震源垂直振动，得到能量最强的垂直分量；均匀是保证整个底盘与地表充分耦合，震源激发出的不同频率的波动能够准确无误地传向地下；坚固，是要求耦合地面有一定强度，既不因振动造成震源扭斜，也不会因接触面过软而吸收过多的振动能量。

耦合条件不好，会引起三方面的问题。一是地表的杂填土等，大量吸收和衰减振动能量，降低勘探深度；二是接触面不平，会把需要的整体面接触变成点接触，产生次生震源，影响传播频率的准确性，干扰对深层的探测；三是松软的耦合面，不仅会降低表层 v_R 值，还会随振动频率的降低出现倾斜和不稳定现象，大大降低勘探的深度和准确性。

实践中，为保证实现上述的耦合要求，常用石膏粉加强耦合。石膏稠浆很快凝固成坚硬的基座，成为一种良好的耦合环境。

3.5 观测系统因素

震源与检波器的位置关系，称瑞利波勘探的观测系统。它有两个要素：一是偏移距，即震源与第一

道检波器的间距，通常为 $0.5 \sim 2.5$ m；二是道间距，即两道检波器的间距，通常为 $0.5 \sim 2$ m。

对勘探深度影响较大的因素是偏移距。主要根据这样一种理论：瑞利波在激发和传播过程中，随距离由近及远，在地表的瑞利波能量有一个从生成、生长到逐渐衰减的过程。在瑞利波最发育的地段接收，有可能获得最大能量，从而达到较大的勘探深度。反之，过近或过远，能量都比较弱，会降低勘探深度。

图 2 的实验结果有助于证实这种理论：分别距震源 $1, 4, 6$ 及 $6, 10, 15, 20$ m 布置道间距分别为 1 m 和 2 m 的两道检波器，用同样的仪器参数做接收试验，结果，最初随偏移距的加大，勘探深度也逐渐加大，然后又呈减小趋势。

4 勘探深度的实例

表 1 给出了不同地区勘探实践中有关勘探深度及各种有关因素的实例。这些实例较好地证实了上述各种分析结果。

5 结语

在目前使用 GR-810 仪器的条件下，影响勘探深度的主要因素是该区覆盖层及地下地质状况。一般地区深度可超过 50 m；条件较好的地区，深度可达 100 m 以上，甚至 200 m 以上。对某一地区可能达到的最大勘探深度，可以凭经验事先概略估计，但最终的结果仍需通过前提试验最终确定。

在实际勘探工作中，如能根据勘探目的层深度选择相应的震源、改善耦合条件、综合运用合理的仪器参数和观测系统参数，并在此基础上提高资料分

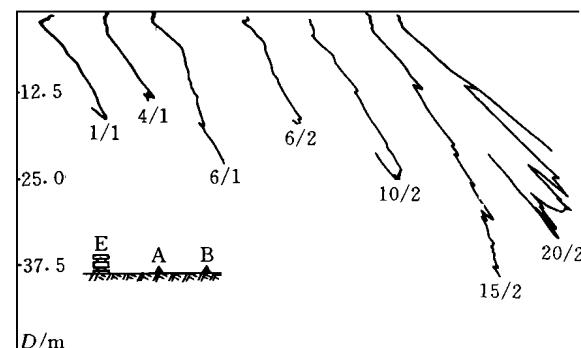


图 2 偏移距与勘探深度试验结果图
(图中数字为 EA / AB)

表1 实例

参数	南坳乡	大同挖金湾	大同姜家湾	韩城电厂	珠海白藤湖
	1994年11月	1990年	1990年8月	1995年9月	1991年4月
平均勘探深度/m	90	96	130	240	50
最大勘探深度/m	95	96	145	250	60
黄土覆盖层厚度/m	<10	25~30	0	0~1	1~2
偏移距 EA/m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
道间距 AB/m	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
基岩岩性	石炭二叠系 煤系	石炭二叠系 煤系	煤系基岩 直接出露	石炭二叠纪煤系砂岩、 粉砂岩、页岩、泥岩	淤泥
震源类型	250L	250L	250L	250L	250L
耦合条件	石膏	石膏	石膏	石膏	石膏
最低使用频率/Hz	7.6	9.865	6.018	4.8	2.5

续表1

参数	柏井勘探	柏井质检	冶西质检	门头沟
	1993年1~3月	1994年11月	1995年1~3月	1994年3~6月
平均勘探深度/m	95	70	110	60
最大勘探深度/m	138	82	136	70
黄土覆盖层厚度/m	10~30	7~12	4~7	第四系 5~30
偏移距 EA/m	1.0	1.0	1.0	1.0
道间距 AB/m	1.0	1.0	1.0	1.0
基岩岩性	石炭二叠系砂岩、 粉砂岩、页岩、泥岩	同左	同左	侏罗系煤系砂岩、 粉砂岩、页岩、泥岩
震源类型	250L	250L	250L	250L
耦合条件	石膏	石膏	石膏	石膏
最低使用频率/Hz	5.0±	6.17	8.7	8.7

析和解释水平,特别是提高对深部小异常的识别能力,就有可能在目前基础上把瑞利波方法的勘探深

度再提高一步。

(收稿日期 1996-07-12)

INVESTIGATION DEPTH AND INFLUENCE FACTOR ANALYSIS OF STEADY-STATE RAYLEIGH WAVE EXPLORATION

Xia Yujing (Xi'an Branch of CCRI)

Abstract The investigation depth at where the steady-state Rayleigh wave exploration could be arrived is a topic with which the numerous users are more and more concerned. Starting from the basic principle of Rayleigh wave exploration and practical experiences for many years, in this paper the various factors which have influence on the exploration depth, including the mean velocity v_R of rock beds, the used lowest frequency f_{min} , source energy, various geologic factors, coupled factors and so on are analyzed one by one, and the example data of exploration depth under various conditions are listed. It is pointed out that utilizing comprehensively the rational parameters and further increasing the recognition capacity for small anomalies, the current exploration depth of Rayleigh wave method could be increased.

Keywords Rayleigh wave; exploration depth; influence factors