

文章编号: 1001-1986(2011)04-0064-03

煤层中瑞利型导波的能量分布

杨小慧, 李德春, 于鹏飞

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了研究瑞利型导波在煤层中的能量分布规律, 理论推导了 3 层对称弹性介质中瑞利波的频散曲线方程以及瑞利型导波的能量分布方程; 绘制振幅深度分布曲线。研究表明, 煤层中传播的瑞利型导波其能量主要集中在煤层中, 且其能量在煤层中分布遵循一定的规律, 即: 瑞利型导波的 x 分量的能量关于煤层中心偶对称, 且煤层中心能量最强; z 分量关于煤层中心奇对称, 且煤层中心能量最小。

关键词: 瑞利型导波; 频散方程; 振幅深度分布

中图分类号: P315 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2011.04.016

Amplitude-depth distribution of Rayleigh channel wave

YANG Xiaohui, LI Dechun, YU Pengfei

(School of Resources and Earth Sciences, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The goal of this paper is to study the distribution of Rayleigh channel wave in coal seam. The paper has inferred the dispersion function of three symmetric modes and the amplitude-depth function. It has also plotted the amplitude-depth curves. It is indicated that the energy of Rayleigh mainly focus in the coal seam and its distribution follows some law.

Key words: Rayleigh channel wave; dispersion function; amplitude-depth distribution

影响煤矿开采的地质问题大部分是勘探阶段遗漏的小构造、小褶曲、陷落柱、冲刷带与石化、煤层分叉与合并、煤层厚度变薄、岩浆侵入、溶洞、老空等。在地面勘探阶段, 发现小构造常常是困难的。而槽波地震勘探是利用在煤层中激发和传播的导波, 在煤矿井下煤巷或工作面内沿煤壁顺煤层安置震源及检波器, 从水平方向探测煤层中的断层等不连续性, 解决了煤矿开采过程中小构造探测的问题。

煤层中的导波分为勒夫型槽波和瑞利型槽波两类。由于勒夫型槽波比较简单, 其特性研究已成熟, 而瑞利波比较复杂, 目前研究较少, 所以, 本文重点研究瑞利型导波在煤层中的传播规律。

1 煤层中瑞利型导波的频散方程

设上下弹性半空间有厚度为 $2d$ 的一个煤层, 坐

标原点置于煤层中心面上, z 轴垂直向下, y 轴垂直纸面(图 1)。为了简单, 设上下半空间具有相同性质, 其弹性参数为 $\mu_1\rho_1V_{s1}V_p$, 煤层参数为 $\mu_2\rho_2V_{s2}V_{p2}$ 。

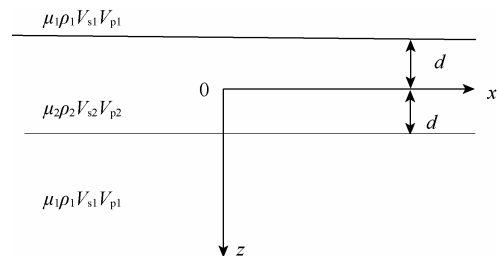


图 1 三层对称介质模型

Fig. 1 Three symmetry layers model for the channel wave dispersion computation

取 SV 波和 P 波的满足势函数如下^[1]:

$$\begin{cases} \varphi_1 = Ee^{\alpha_1(z+d)}e^{i(kx-\omega t)} \\ \varphi_2 = (A\sinh\alpha_2z + B\cosh\alpha_2z)e^{i(kx-\omega t)} \\ \varphi_3 = Ge^{-\alpha_1(z-d)}e^{i(kx-\omega t)} \end{cases} \quad \begin{cases} \psi_1 = Fe^{\beta_1(z+d)}e^{i(kx-\omega t)} \\ \psi_2 = (C\sinh\beta_2z + D\cosh\beta_2z)e^{i(kx-\omega t)} \\ \psi_3 = He^{-\beta_1(z-d)}e^{i(kx-\omega t)} \end{cases} \quad \begin{cases} -\infty < z < -d \\ -d \leq z \leq d \\ d < z < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(49404053)

作者简介: 杨小慧(1987—), 女, 江苏南通人, 硕士研究生, 从事地球物理专业方面的研究。

$$\text{其中 } \alpha_i = \left[K^2 - \left(\frac{\omega}{V_{pi}} \right)^2 \right]^{1/2}; \beta_i = \left[K^2 - \left(\frac{\omega}{V_{si}} \right)^2 \right]^{1/2};$$

A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 、 H 均为未知常数; ω 为圆频率; 波数 $k = \omega/c$ 。

利用下面边界条件^[2]:

$$\begin{bmatrix} -iksh\alpha_2d & \beta_2sh\beta_2d & -ik & \beta_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_2ch\alpha_2d & ikch\beta_2d & -\alpha_1 & -ik & 0 & 0 & 0 & 0 \\ B_2ch\alpha_2d & -A_2sh\beta_2d & -B_1\rho_nV_{sn}^2 & A_1\rho_nV_{sn}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -D_1sh\alpha_2d & -C_2sh\beta_2d & -\rho_nD_2 & -C_1\rho_nV_{sn}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2ikch\alpha_2d & -2\beta_2sh\beta_2d & -ik & -\beta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\alpha_2sh\alpha_2d & 2iksh\beta_2d & \alpha_1 & -ik \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2B_2sh\alpha_2d & -2A_2sh\beta_2d & B_1\rho_nV_{sn}^2 & A_1\rho_nV_{sn}^2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2D_1ch\alpha_2d & 2C_2ch\beta_2d & -\rho_nD_2 & C_1\rho_nV_{sn}^2 \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

$$\text{其中 } \rho_n = \frac{\rho_1}{\rho_2}; V_{sn} = \frac{V_{s1}}{V_{s2}}; A_1 = (k^2 + \beta_1^2);$$

$$A_2 = (k^2 + \beta_2^2); B_1 = 2ik\alpha_1; B_2 = 2ik\alpha_2; C_1 = 2ik\beta_1;$$

$$C_2 = 2ik\beta_2; D_1 = (2k^2 - \omega^2/V_{s2}^2); D_2 = (2k^2V_{sn}^2 - \omega^2/V_{s2}^2)。$$

利用式(3)即可解出频率 f 和归一化相速度 C_R

之间的关系, 即为频散方程。

2 瑞利导波位移的计算

已知 x 分量位移 u 和 z 分量位移 w 的表达式如式(4)和式(5):

$$\begin{cases} u_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial x} - \frac{\partial \psi_1}{\partial z} = ik\varphi_1 - \beta_1\psi_1 & -\infty < z < -d \\ u_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial x} - \frac{\partial \psi_2}{\partial z} = ik\varphi_2 - \beta_2(Cch\beta_2z + Dsh\beta_2z) & -d \leq z \leq d \\ u_3 = \frac{\partial \varphi_3}{\partial x} - \frac{\partial \psi_3}{\partial z} = ik\varphi_3 + \beta_1\psi_3 & d < z < \infty \end{cases}; \quad (4)$$

$$\begin{cases} w_1 = \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial \psi_1}{\partial x} = \alpha_1\varphi_1 + ik\psi_2 & -\infty < z < -d \\ w_2 = \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} + \frac{\partial \psi_2}{\partial x} = \alpha_2(Ach\alpha_2z + Bsh\alpha_2z) + ik\psi_2 & -d \leq z \leq d \\ w_3 = \frac{\partial \varphi_3}{\partial z} + \frac{\partial \psi_3}{\partial x} = -\alpha_1\varphi_3 + ik\psi_3 & d < z < \infty \end{cases} \quad (5)$$

将频散曲线上的点代入式(3), 并令待定系数 $A=1$, 即可得出其他 7 个待定系数。则 式(1)为已知表达式, 再将式(1)代入式(4)和式(5), 即可得到 Rayleigh 波的 x 分量和 z 分量的振幅深度分布。

3 瑞利导波的振幅深度分布分析

3.1 理论计算瑞利导波的振幅深度分布

设地层参数如表 1, 将各参数代入式(4)和

式(5), 即可计算出煤层中瑞利型导波的振幅深度分布(图 2—图 5)。

表 1 对称三层模型参数
Table 1 Parameters of symmetric model

模型	层厚/m	ρ_n	V_s	V_p
上围岩	$-\infty$	2.5	1 800	2 808
煤层	3	1.25	900	1 710
下围岩	∞	2.5	1 800	2 808

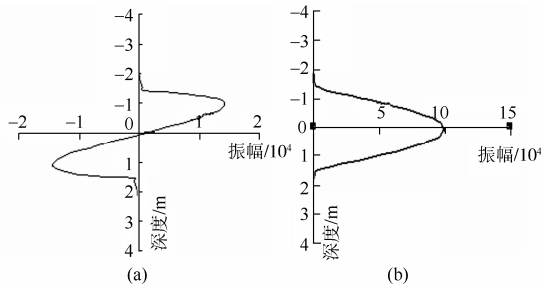


图 2 槽波基阶振幅-深度分布曲线

Fig. 2 Amplitude-depth distribution curves for Rayleigh wave(fundamental order)
a—R 波 x 分量；b—R 波 z 分量

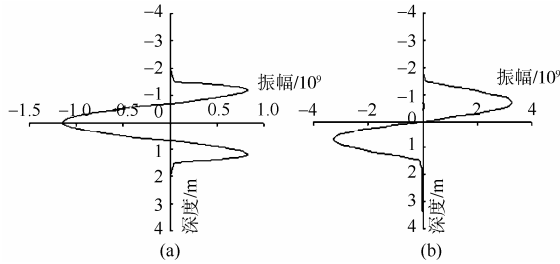


图 3 槽波一阶振幅-深度分布曲线

Fig 3 Amplitude-depth distribution curves for Rayleigh wave(first order)
a—R 波 x 分量；b—R 波 z 分量

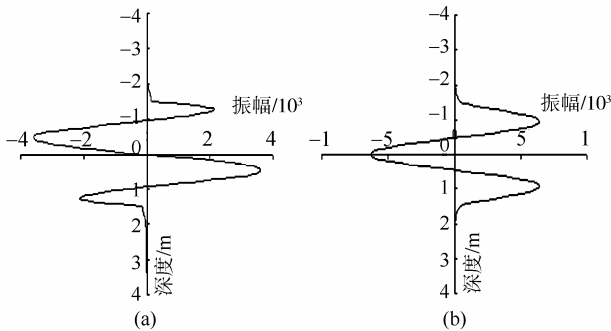


图 4 槽波二阶振幅-深度分布曲线

Fig. 4 Amplitude-depth distribution curves for Rayleigh wave(second order)
a—R 波 x 分量；b—R 波 z 分量

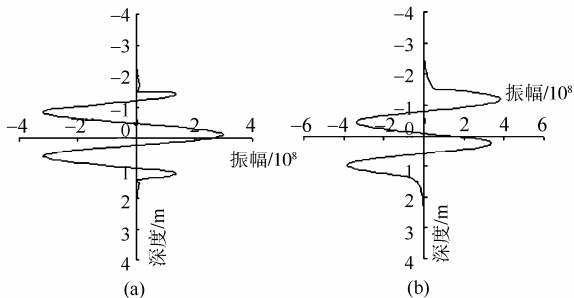


图 5 槽波三阶振幅-深度分布曲线

Fig. 5 Amplitude-depth distribution curves for Rayleigh wave(third order)
a—R 波 x 分量；b—R 波 z 分量

比较图 2—图 5，可以得到如下结论：瑞利型导波的能量集中在煤层中，这充分验证了瑞利型导波的

波导特性。一阶和三阶瑞利导波能量较基阶和二阶的强，这说明了一阶和三阶较基阶和二阶发育。一阶和三阶瑞利导波的 x 分量的能量关于煤层中心成偶对称，在煤层中心能量最大；而 z 分量的能量关于煤层中心成奇对称，在煤层中心能量最小。

3.2 理论合成煤层中瑞利型导波的能量分布

正演模型中地层结构如表 1，测线沿 z 方向布置，道间距为 0.1 m，上下围岩各布置 10 个检波器，沿着 z 的正方向，道号依次增大。正演煤层中的瑞利型导波的能量分布记录如图 6。

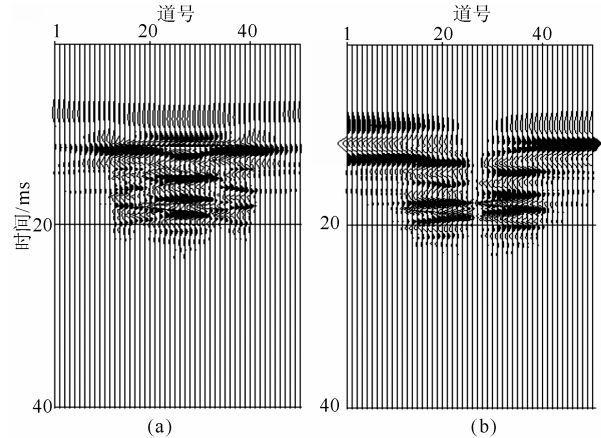


图 6 正演模拟的对称模型的振幅深度分布

Fig. 6 Amplitude-depth distribution section of Rayleigh wave
a— x 分量；b— z 分量

图 6 充分验证了图 2—图 5 的结论：瑞利导波的能量主要集中在煤层中间，且 x 分量关于煤层中心偶对称，而 z 分量关于煤层中心成奇对称。这正好说明了理论计算中出现的一阶和三阶能量比基阶和二阶强的现象，也充分验证了实际中瑞利型导波的一阶和三阶较基阶和二阶发育。

4 结 论

瑞利型导波的能量集中在煤层中，不向围岩扩散。一阶和三阶瑞利型导波较基阶和二阶发育。瑞利型导波的 x 分量的能量关于煤层中心偶对称，且煤层中心能量最强； z 分量关于煤层中心奇对称，且煤层中心能量最小。

参考文献

- [1] 刘天放, 李志响. 矿井地球物理勘探[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- [2] 杜世通. 地震波动力学[M]. 东营: 石油大学出版社, 1996.
- [3] 刘天放. 槽波地震勘探[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1994.
- [4] RADER D, SCHOTT W, DRESEN L, et al. Calculation of dispersion curves and amplitude-depth distributins of Love Channel waves in horizontally-layered media[J]. Geophysical Prospecting, 1985, 33: 800-816.
- [5] GUU J Y. Studies of seismic guided waves: the continuity of coal seams[D]. Denver: Doctor Thesis, Colorado School of Mines, 1975.