

根据含超压气体裂隙震源模式 讨论 P 波初动符号的分布

王智培

(四川省绵阳市水利电力建筑勘察设计研究院, 绵阳 621000)

摘要 利用含超压气体裂隙震源模式^[1]分析研究了 P 波初动符号的分布. 根据理论推导, 不同倾角含超压气体裂隙可分别形成 P 波初动符号的四象限分布图象和圆、椭圆、抛物线、双曲线等圆锥曲线形 P 波节线. 按节线形状和失稳方式进行了地震分类. 所推论的初动 P 波、S 波振幅分布规律和地形变特征都与实际相符.

关键词 震源模式 P 波初动 超压气体 扁薄透镜裂隙

1 引言

P 波初动符号的四象限分布, 曾被作为构造地震由岩层弹性断裂错动形成从而有别于火山地震的有力证明. 地幔岩层在高温下呈塑性, 在高压下不可能产生弹性断裂错动, 但中深源地震及个别火山和爆炸地震, 同样出现 P 波初动符号的四象限分布. 而且还发现了有些天然地震的 P 波节线呈圆、椭圆、双曲线等圆锥曲线形态. 对此用断层说难以说明, 所以作者拟换一个角度进行探讨.

既然岩石受推压(爆炸)产生的初动 P 波都是压缩波, 受拉张(空洞陷落)产生的都是膨胀波, 那么两种波同时存在, 是否是由于地震时压缩和膨胀震源的并存呢? 作者利用“含超压气体裂隙震源模式”^[1]对地震的 P 波初动符号的分布特征进行了分析.

2 含超压气体裂隙震源模式的力学模型

含超压气体裂隙为充满压力超过围压的地幔气体的宏观裂隙^[1]. 气体压力超过裂隙两壁的围压, 使其张开, 形成极其扁薄的透镜体. 忽略厚度, 理想的含超压气体裂隙为一圆面. 过圆心且垂直于圆面的直线称轴线, 裂隙内轴线在两壁之间的长度称轴长. 据分析, 半径为数十公里的含超压气体裂隙, 其轴长可能仅 1 m 左右.

2.1 一般模型

在水平展布的含超压气体裂隙内, 气体的压力使上覆岩层向上拱曲, 而其下部岩层则不受影响, 因此裂隙张开形成底部平坦, 上部凸起的透镜形, 可以一垂直向上的力作为其力源.

对于沿垂直面展布的含超压气体裂隙, 气体压力同时推压两壁围岩, 使裂隙张开成双凸透镜形. 可用从裂隙圆心, 沿轴线向外的一对大小相等方向相反的力作为其力学模型. 此模型与

本文 1996 年 4 月 22 日收到, 1996 年 5 月 20 日收到第一次修改稿, 1997 年 9 月 15 日收到第二次修改稿.

作者简介: 王智培, 男, 1942 年 1 月 8 日生, 陆地水文专业高级工程师, 业余从事地震成因研究.

单力偶力学模型相当.

如考虑到裂隙失稳瞬间, 裂隙圆周处围岩受牵拉并在围压作用下将向裂隙圆心移动(图 1a), 则其力学模型如图 1b 所示. 此模型与双力偶力学模型相当.

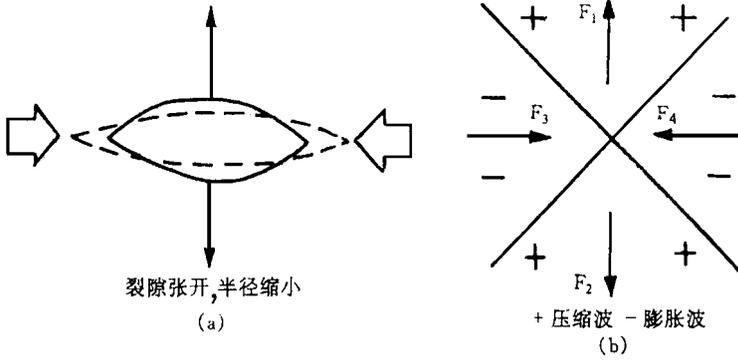


图 1 垂直含超压气体裂隙平面示意图

Fig.1 Plane sketch showing vertical crack containing hyperpressure gas.

(a) 震源模式; (b) 震源力学模型及 P 波初动分布

2.2 受力圆面力学状态

对于使裂隙张开的气体压力的作用, 用圆心处沿轴线向外的一对大小相等方向相反的力 F_1 和 F_2 表示. 对于裂隙圆周处围岩向圆心位移的作用, 用圆周上沿径向指向圆心的均布荷载 f 表示, 见图 2.

3 P 波辐射图象与初动符号分布类型

对于一般的双力偶等力学模型, 其 P 波初动符号呈四象限分布(图 1b)是显而易见的. 但是这些模型不能解释圆锥曲线形 P 波节线的形成. 因此, 本文用含超压气体裂隙的力学模型进行分析.

根据勒夫^[2]的推导, 若以力作用点为原点, 其与测站 S 之间的距离 R 很大时, 变化的力 $K(t - \frac{R}{V_p})$ 在 S 点引起的纵波位移为:

$$u = \frac{L}{4\pi\rho V_p^2 R^2} K(t - \frac{R}{V_p}) \tag{1}$$

其中

$$L = \alpha x + \beta y + \nu z \tag{2}$$

式中 x, y 和 z 为台站座标; α, β 和 ν 为力在 x, y 和 z 轴上的方向余弦; V_p 为纵波速度; ρ 为介质密度.

假定测站位于图 2 中所示的 F_1 一侧空间内, 这样 F_2 作用点距测站将比 F_1 远(因为实际 F_1 和 F_2 的作用点分别位于裂隙两壁围岩上). 裂隙内的气体和裂隙之外岩石的弹性模量有显著差异, 这样在边界处地震波产生强烈反射. 所以由 F_2 力产生的地震波到达测站的时间比 F_1 力产生的地震波迟, 同时在测站产生的位移也较小, 只可部分抵消 F_1 的作用. 另外在圆面上

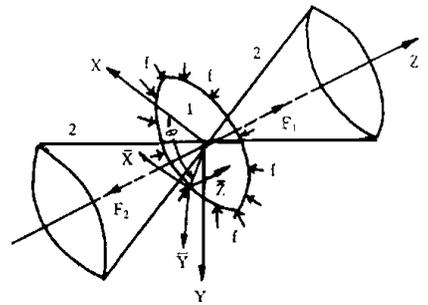


图 2 含超压气体裂隙的力学状态及圆锥形 P 波节面示意图

Fig. 2 Sketch showing mechanics state of crack containing hyperpressure gas and conical nodal plane of P wave.

1 裂隙力学状态; 2 圆锥形 P 波节面

作一垂直于圆心与测站的连线的直径,此直径将圆面分为两部分,相应于近测站半圆上的每一微分圆弧上的力 f ,在另外半圆上均有大小相等方向相反的力与之对应,而后者距测站较远,也只能部分抵消前者的作用.因此,在测站处 F_1 取较小值,用 F'_1 代替;在近测站半圆上 f 取较小值,用 f' 代替. F'_1 和 f' 取常数.

以圆心为原点,作直角坐标系,见图2,使 z 轴与 F'_1 一致. F'_1 的方向余弦为: $\alpha=0, \beta=0, \nu=1; \alpha x + \beta y + \nu z = z$.

设受力圆半径为 r ,任一半径与 x 轴的夹角为 θ .作用于微分圆弧 $ds = r d\theta$ 上的均布荷载 f' 的合力为 $f' ds = f' r d\theta$. 取合力作用点,即 ds 的中点为座标原点,设其与测站的距离为 R ,作直角坐标系 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, 其 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 轴分别与 x, y, z 轴平行. 则有 $\bar{x} = x - r \cos\theta; \bar{y} = y - r \sin\theta; \bar{z} = z$, 可得 $\alpha \bar{x} + \beta \bar{y} + \nu \bar{z} = -x \cos\theta - y \sin\theta + r$. 设 R 在 x, y 平面上投影与 x 轴的夹角为 φ , 根据(1)式和(2)式可得各力在测站产生的初动位移为:

$$u = \frac{1}{4\pi \rho V_p^2} \left\{ \frac{z}{R^2} F'_1 - f' r \int_{\varphi - \frac{\pi}{2}}^{\varphi + \frac{\pi}{2}} \frac{x \cos\theta + y \sin\theta - r}{R^2} d\theta \right\} \quad (3)$$

由数学证明可知, $x \cos\theta + y \sin\theta = \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \cos(\theta - \varphi)$, 其中 $\text{tg}\varphi = \frac{y}{x}$, 代入(3)式得:

$$u = \frac{1}{4\pi \rho V_p^2} \left\{ \frac{z}{R^2} F'_1 - f' r \int_{\varphi - \frac{\pi}{2}}^{\varphi + \frac{\pi}{2}} \frac{\cos(\theta - \varphi) - \frac{r}{\sqrt{x^2 + y^2}}}{R^2} d\theta \right\} \quad (4)$$

对于远场测站有 $R \gg \frac{r}{\sqrt{x^2 + y^2}}$, $R \approx R$, 近似地推得:

$$u = \frac{1}{4\pi \rho V_p^2 R^2} [F'_1 z - 2f' r \sqrt{x^2 + y^2}] \quad (5)$$

对于 P 波节面上的点有 $u = 0$, 可推得:

$$F'_1 z - 2f' r \sqrt{x^2 + y^2} = 0 \quad (6)$$

若设 $a = \frac{1}{2f' r}; c^2 = \frac{1}{F'_1}$ 则有

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0 \quad (7)$$

(7)式正是以 z 轴为中心轴,顶点在原点的圆锥曲面方程式.由(5)式可知, $\sqrt{x^2 + y^2} < \frac{F'_1 z}{2f' r}$ 时, u 为正; $\sqrt{x^2 + y^2} > \frac{F'_1 z}{2f' r}$ 时, u 为负,所以圆锥曲面内为压缩波区,之外为膨胀波区.

同理,在 F_2 一侧 P 波节面也为圆锥曲面,与 F_1 一侧的圆锥曲面对称分布,如图2所示.

以上假设 $r \rightarrow 0$ 所作简化有一定近似性.根据更直观的分析, P 波初动节面应为双截头圆锥曲面,如图3所示.

从理论上分析,含超压气体裂隙失稳瞬间,轴线增长,半径缩短.沿轴线上围岩的离源运动幅度最大,随距离的加大运动幅度渐减.圆周处围岩有最大的向源运动,随与轴线距离的减小运动幅度渐减.其间必存在离源和向源运动幅度均为零的无振节线.围岩的离源运动发出压缩波,向源运动发出膨胀波.在理想的均匀介质中,不考虑波的干涉.纵波波前扩展过程中,节线也沿裂隙壁法线向外传播.由于裂隙呈凸透镜形,圆形节线的法线形成圆锥面,但顶点不在裂

隙中心, 而形成如图 3 所示的双截头圆锥曲面形 P 波节线.

取双截头圆锥节面顶圆圆心为 O (即含超压气体裂隙中心), 其距地表深度 $H=20\text{ km}$, 顶圆半径 $r=16\text{ km}$, 圆锥母线与轴线夹角 $\alpha=45^\circ$, 过 O 的水平面截出一个球冠 (采用地球半径 $R_0=6371\text{ km}$). 以 O 为震源球心, 含超压气体裂隙 (即节面顶圆) 倾角分别取为 $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ$ 和 90° , 作出 P 波节线 (即节面与球冠的交线) 的投影平面图 (球极投影法), 见图 4. 从图中看出, P 波节线分别呈圆和近似椭圆、抛物线、双曲线以及垂直相交直线形. 图 4 中各圆内的点为裂隙轴线出射地面点.

对于圆锥曲面形 P 波节线, 其地面 P 波节线的形式完全相同, 只是圆和椭圆的面积更小.

4 讨论

4.1 P 波初动符号分布图象与地震分类

含超压气体裂隙失稳方式有: (1) 围岩应力达极限强度, 岩石破坏出现应力反弹, 裂隙附近应力骤降, 裂隙内气体的压力产生使裂隙突然张开的冲击力; (2) 裂隙扩展过程中, 遇贯通地表的断裂或空洞, 高压气体猛烈释放, 裂隙内气体压力锐减, 围压产生使裂隙猛然闭拢的冲击力. 本文前面讨论的均为第一种失稳方式, 第二种失稳方式的力学模型与第一种相同, 但各力的方向相反.

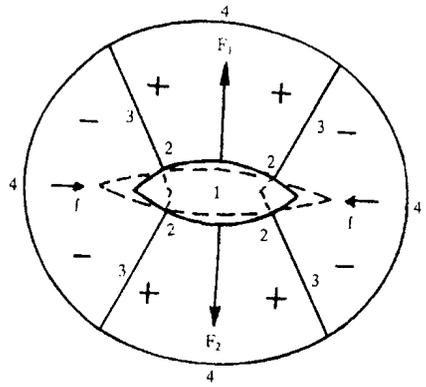


图 3 双截头圆锥曲面形 P 波节面剖视图

Fig. 3 Sketch showing nodal plane of P wave in the shape of the double-fruncated cone surface.

- 1 含超压气体裂隙; 2 圆形振动节线;
- 3 双截头圆锥曲面形 P 波节线; 4 波前;
- + 压缩波前区; - 膨胀波前区.

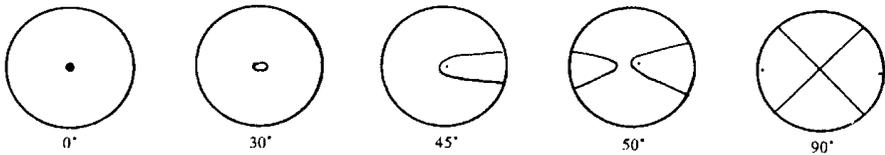


图 4 不同倾角含超压气体裂隙 P 波节线

Fig. 4 The nodal lines of the P wave of the cracks containing hyperpressure gas with different dip angles.

裂隙失稳方式及其所对应的 P 波节线形状如图 5 所示. 图 5 中 2 至 6 为第一种失稳方式, 8 至 12 为第二种失稳方式, 裂隙倾角分别为 $0^\circ, 22^\circ 30', 45^\circ, 67^\circ 30'$ 和 90° . 由图 5 可以看出, 它们的 P 波节线分别为圆、近似椭圆、抛物线、双曲线 (两支很近可看作四象限形) 和垂直相交直线 (对称四象限形). 1 和 7 地震分别为爆炸和空洞陷落地震.

4.2 地面初动 P 波和 S 波振幅变化规律

由含超压气体裂隙失稳时的力学状态分析, 其轴向振动是主要的, 径向振动是次要的. 因而以下称圆锥节面内的 P 波为主要 P 波, 之外的为次要 P 波. 沿裂隙轴线主要 P 波振幅最大, 向 P 波节面渐减为零. 次要 P 波在裂隙所在平面最大, 也向 P 波节面渐减为零. S 波振幅变化规律正好相反. 按理想情况推测, 主要 P 波振幅应以裂隙轴出射点最大, 等振幅线围绕此点呈环状分布, 在 P 波节线处振幅渐减为零. S 波振幅则以 P 波节线处最大, 向两旁渐减.

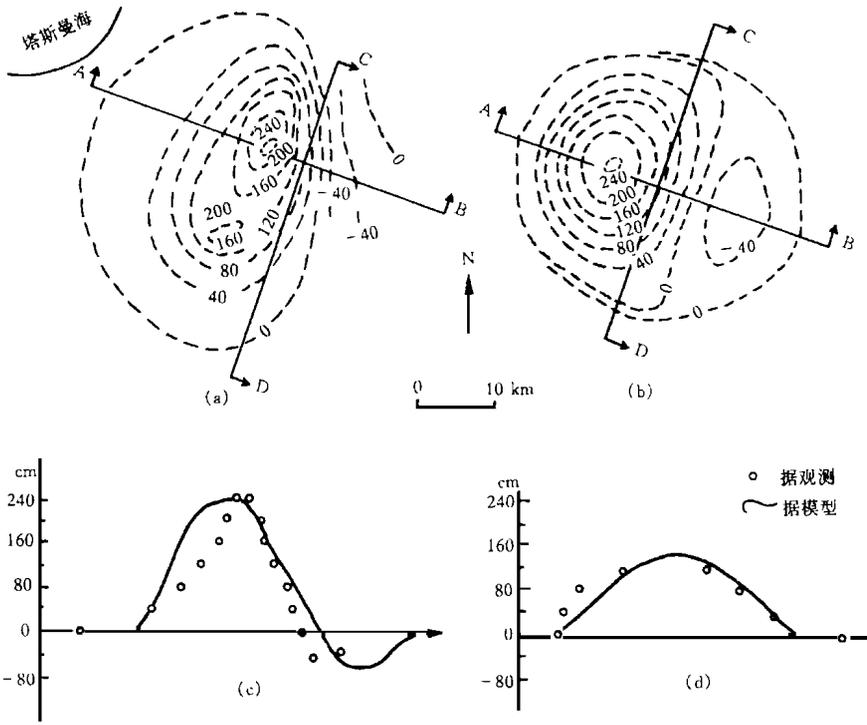


图6 伊南加华 1968 年 5 月 24 日 7 级地震前地面隆起高度(cm)分布图
 Fig. 6 The distribution map of ground uplift before the Inangahua M7.0 earthquake on May 24, 1968.
 (a) ; (b) ; (c) A-B 剖面; (d) C-D 剖面

对于含超压气体裂隙震源模式，

- 1 . , 1993, 13(1): 10~21.
- 2 . : , 1977. 172~204.
- 3 . : , 1984. 19, 135.
- 4 , . : , 1980, 2(3): 321~330.
- 5 . : , 1978. 72.

**STUDY ON THE DISTRIBUTION OF THE FIRST MOTION MARK
OF P WAVE BY USING THE SEISMIC SOURCE MODEL
OF CRACK CONTAINING HYPERPRESSURE GAS**

WANG Zhipei

(*The Exploring and Designing Institute of Water Conservancy, Power and Building, Mianyang 621000*)

Abstract

By using the seismic source model of crack containing hyperpressure gas^[1], the distribution of the first motion mark of P wave is studied. According to the deduction, the cracks containing hyperpressure gas with different inclination can form the distribution pattern in four-quadrants of first motion mark of P wave and the nodal lines of P wave in the shape of conic section, such as circle, ellipse, parabola and double-curve etc. . According to the shape of nodal lines of P wave and type of instability, the earthquakes are classified. The distribution feature of first motion amplitude of P and S waves and the feature of ground deformation etc. deduced correspond with practice.

Key words Seismic source model, P wave first motion, Hyperpressure gas, Thin lens crack