

文章编号: 0253-3782(2005)03-0309-08

层裂对区域震相 Lg 波的影响^{*}

何永锋^{1, 2)} 陈晓非¹⁾ 张海明¹⁾

1) 中国北京 100871 北京大学地球与空间科学学院理论与应用地球物理研究所

2) 中国西安 710024 西北核技术研究所

摘要 地下核爆炸 Lg 波的激发机制, 目前尚未十分清楚. 普遍接受的观点是: 伴随层裂源的补偿线性矢量偶极源激发的 Rg 波的散射形成的 S 波, 是 Lg 波的最主要贡献因素. 本文利用频谱比方法, 结合合成理论地震图方法, 基于东哈萨克斯坦地区速度模型, 分析了东哈萨克斯坦地壳速度模型下的层裂对区域震相 Lg 波的影响, 并进一步分析了该地区的实际观测资料. 结果表明, 层裂时间函数对 Lg 波具有扇贝形调制作用; Lg 波振幅谱的低谷点源自于补偿线性矢量偶极(CLVD)源激发的 Rg 波. 这一结果也表明, 东哈萨克斯坦速度模型下的 Lg 波受层裂的调制作用, 与内华达试验区的 Lg 波是一样的, 进一步支持了 Patton 和 Taylor 的观点, 对于进一步理解及更好地利用 Lg 波具有重要理论指导意义.

关键词 频谱比 Lg 波 层裂 CLVD 源 低谷点

中图分类号: P315.02 **文献标识码**: A

引言

区域震相 Lg 波是一种短周期大陆地壳导波, 由于其稳定性较好, 近些年来被广泛用于地下核爆炸的识别与当量估计. 多数学者认为, 构造应力释放及层裂现象是地下核爆炸激发 S 波的最主要因素, 构造应力释放因素的作用程度与源区的介质构造有密切关系, 而且它多激发长周期面波, 对短周期 Lg 波影响很小(Wallace, 1991); 层裂目前被认为是地下爆炸 Lg 波的主要贡献因素, 而且在地下核爆炸强地面记录中可观测到层裂现象, 它是一种最简单的非线性二次源, 对于多数地下核爆炸的层裂过程, 伴随有逆倾滑断层形式的构造应力释放源, 这种源可以用补偿线性矢量偶极(compensated linear vector dipole, 缩写为 CLVD)源来描述. 实际上, 层裂激发的 CLVD 形式的构造应力释放是激发区域震相 Lg 波的主要因素(Gupta *et al*, 1992; Patton, Taylor, 1995; Gupta *et al*, 1997). Patton 和 Taylor(1995) 通过对美国内华达试验区数个震源深度相近, 层裂周期明显不同(0.2~3.0 s)的地下核爆炸资料的 Lg 波的分析, 得出结论:

1) 将具有不同层裂周期地下核爆炸产生的 Lg 波波谱叠加求平均(震级范围从 $M_b = 5.84 \sim 6.16$, 埋深范围从 564~610 m), 结果显示在 0.55 Hz 附近存在一低谷点(f_{null}), 表明 Lg 波谱低谷点 f_{null} 位置不随层裂周期的变化而变化; 将在不同方位上记录到的爆炸资料的 Lg 波谱叠加平均, 进一步显示该低谷点位置亦不随方位角变化.

^{*} 国家自然科学基金项目(40134010)资助.

2004-03-10 收到初稿, 2004-07-05 收到修改稿, 2004-09-17 决定采用.

2) 利用合成理论地震图方法, 分别取纯爆炸源、张裂源和 CLVD 源, 对该地区地下核爆炸激发的区域震相 Lg, Rg 波进行数值模拟研究. 结果表明: CLVD 源激发的 Rg 波和 Lg 波均具有低谷点特征, 且低谷点的位置仅由 CLVD 源的深度决定, 而爆炸源、张裂源的结果无低谷点存在.

这一结果有助于进一步认识地下核爆炸诱发的 Lg 波的生成机理, 以及 Lg 波波谱特征与震源的关系. 但这一结果是对美国内华达地区地下核爆炸事件的地震波资料分析得到的, 是否与该地区地质构造有关系, 或是否具有普适性, 尚需深入研究.

本文利用 Taylor 和 Denny(1989)提出的频谱比方法, 结合合成理论地震图方法, 分析了东哈萨克斯坦地壳速度模型下的纯爆炸源、张裂源及 CLVD 源对地下核爆炸区域震相的影响, 最后, 结合实际观测资料分析了东哈萨克斯坦地区地下核爆炸激发的区域震相 Lg 波和 Rg 波的特征. 结果表明, 同内华达试验区一样, 对东哈萨克斯坦介质速度模型而言, CLVD 源亦是激发 Lg 波的主要因素. 进一步支持了 Patton 和 Taylor (1995) 的观点, 结果对于进一步理解及更好地利用 Lg 波具有重要理论指导意义.

1 频谱比方法

首先介绍频谱比的数学框架, 实际上该方法为经验格林函数法 (Taylor, Denny, 1989). 在谱比中, 以正常埋深的地下核爆炸的 Lg 波波谱为分子, 过比例埋深的地下核爆炸的 Lg 波波谱为分母. 所谓“过比例埋深”是指爆炸装置的埋深相对于其当量而言大于正常埋深的情况. 过比例埋深的地下核爆炸的层裂效应很小, 在所考虑的频带范围内 (< 3.0 Hz), 可被近似为纯爆炸源. 它在波谱比中的作用相当于经验格林函数, 可消除传播路径、接收场地及记录仪器响应的影响. 因此, 波谱比的结果给出的主要是非爆炸源因素对 Lg 波的影响.

1.1 地下核爆炸的震源模型

描述地下核爆炸的震源模型主要有 3 种: 占主要成分的爆炸源、由层裂引起的张裂源和补偿线性矢量偶极源. 本文不考虑构造应力释放源的影响. 上述 3 种源在频率域内的矩张量可分别表示如下:

$$\text{爆炸源} \quad \mathbf{M}_e = M_0(\omega) \mathbf{I} \quad (1)$$

其中, \mathbf{I} 为单位张量; $M_0(\omega)$ 为地震矩时间函数谱, 与折合位移势 $\phi(\omega)$ 有如下关系 (Taylor, Denny, 1989):

$$M_0(\omega) = 4\pi(\lambda + 2\mu)\phi(\omega) \quad (2)$$

这里, λ 和 μ 为拉姆常数.

$$\text{张裂源} \quad \mathbf{M}_T = [\bar{u}(\omega)] A \mathbf{m}_T \quad (3)$$

式中, A 为张裂表面面积, $[\bar{u}(\omega)]$ 为垂直于张裂面的平均震源时间函数谱, \mathbf{m}_T 为张裂源矩张量:

$$\mathbf{m}_T = \begin{bmatrix} \lambda & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{补偿线性矢量偶极源} \quad \mathbf{M}_C = [\bar{u}(\omega)] A \mathbf{m}_C \quad (5)$$

式中, \mathbf{m}_C 为补偿线性矢量偶极源矩张量:

$$m_c = \begin{bmatrix} -(\lambda + 2\mu)/2 & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda + 2\mu)/2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda + 2\mu \end{bmatrix} \quad (6)$$

1.2 层裂源的波谱比表达式

正常埋深的地下核爆炸的震源过程主要包括两部分:描述爆炸本身的纯爆炸源和由爆炸引起的层裂源(如张裂源,或补偿线性矢量偶极源).利用线性叠加原理,正常埋深地下核爆炸的远场位移谱(垂向)可描述为

$$u(\omega) = \mathbf{G}(\omega, h_e) : \mathbf{M}_e(\omega) + \mathbf{G}(\omega, h_x) : \mathbf{M}_x(\omega) \quad (7)$$

式中,冒号表示内积计算. \mathbf{M}_e 为爆炸源矩张量, h_e 和 h_x 分别为爆炸源和层裂源的中心深度, \mathbf{G} 为垂直分量位移场对应的格林函数张量, \mathbf{M}_x 为描述层裂过程中二次源模型的矩张量, $x = T, C$ 分别代表张裂源和补偿线性矢量偶极源.相应地,作为经验格林函数的过比例埋深的地下核爆炸事件的远场位移(垂向)谱可描述为:

$$u^0(\omega) = \mathbf{G}(\omega, h_e^0) : \mathbf{M}_e^0(\omega) \quad (8)$$

如果这两个爆炸的位置接近且埋深相近,则有 $\mathbf{G}(\omega, h_e) = \mathbf{G}(\omega, h_e^0)$. 因此,它们的位移谱比为:

$$\frac{u}{u^0} = \frac{M_0(\omega)}{M_0^0(\omega)} + \frac{\mathbf{G}(\omega, h_x) : \mathbf{M}_x(\omega)}{\mathbf{G}(\omega, h_e^0) : \mathbf{M}_e^0(\omega)} \quad (9)$$

上式右边第一项为正常埋深爆炸的地震矩与过比例埋深爆炸的地震矩之比,第二项含有层裂源及过比例埋深爆炸源的格林函数.将式(1)、(2)、(3)或(5)代入(9),得

$$\frac{u(\omega)}{u^0(\omega)} = \frac{\phi(\omega)}{\phi^0(\omega)} + \frac{[\bar{u}(\omega)]A}{4\pi\phi^0(\omega)}\Gamma(\omega) \quad (10)$$

式中, $\Gamma(\omega)$ 为层裂源格林函数位移谱与爆炸源格林函数位移谱的比值,定义为

$$\Gamma(\omega) = \frac{\mathbf{G}(\omega, h_x) : \mathbf{m}_x}{(\lambda + 2\mu)\mathbf{G}(\omega, h_e^0) : \mathbf{I}} \quad (11)$$

当只考虑低于过比例埋深爆炸拐角频率的频带范围时,有近似公式(Patton, Taylor, 1995)

$$\phi^0(\omega) \cong (i\omega)^{-1}\phi_\infty^0 \quad (12)$$

ϕ_∞^0 为净折合位移势,不依赖频率.这样式(10)可简化为

$$\frac{u}{u^0} \cong \frac{i\omega\phi(\omega)}{\phi_\infty^0} + i\phi\omega[\bar{u}(\omega)]\Gamma(\omega) \quad (13)$$

其中, $\phi = A/(4\pi\phi_\infty^0)$ 为不依赖于频率的常数.式(13)可以反映谱比的基本特征,也就是反映了正常埋深事件的层裂的基本特征,是本文分析层裂与 Lg 波关系的重要公式.当 ω 取低频时,式(13)第一项近似为当量比值(Patton, Taylor, 1995),影响谱比的因素主要为层裂时间函数谱 $\Phi(\omega) = i\omega[\bar{u}(\omega)]$ 及 $\Gamma(\omega)$ 两项,我们分别分析这两项对谱比的影响.

1.3 层裂时间函数谱对谱比的调制

为分析方便,取 $\Gamma(\omega)$ 为正实数,式(13)的谱比特征就由 $\Phi(\omega)$ 的谱特征决定.通常层裂源时间函数(加速度)含有两个脉冲:第一个脉冲由爆炸冲击波及层裂起始构成;第二个冲击波由层裂物质下落拍击层裂面造成.两个脉冲之间是层裂物质自由落体运动过程,该自由落体过程所经历的时间定义为层裂周期.本文采用 Stump(1985)给出的描述层裂过程的源时间函数:

$$F_s(t) = I_s \dot{K}(t) - \frac{2I_s}{T_s} [K(t) - K(t - T_s)] + I_s \dot{K}(t - T_s) \tag{14}$$

$K(t)$ 为光滑阶跃函数：

$$K(t) = \begin{cases} \frac{9}{16} \left[1 - \cos \frac{\pi t}{t_{sr}} + \frac{1}{9} \left(\cos \frac{3\pi t}{t_{sr}} - 1 \right) \right] & 0 \leq t \leq t_{sr} \\ 1 & t > t_{sr} \end{cases} \tag{15}$$

$$\dot{K}(t) = \frac{9\pi}{16t_{sr}} \left[\sin \frac{\pi t}{t_{sr}} - \frac{1}{3} \sin \frac{3\pi t}{t_{sr}} \right] \quad 0 \leq t \leq t_{sr} \tag{16}$$

式中， t_{sr} 为层裂起始时间； m_s 、 I_s 和 T_s 分别为层裂质量、层裂冲量及层裂周期。

图 1 为取不同层裂起始时间不同层裂周期情况下的 $F_s(t)$ 函数。由 $F_s(\omega) = \omega^2 m_s [\bar{u}(\omega)]$ ，我们可以得到 $\Phi(\omega) = i\omega [\bar{u}(\omega)]$ 的频谱图，如图 2 所示。可看出，层裂源时间函数的正弦函数特征，决定了谱比 u/u_0 具有扇贝形特征，且其位置变化由层裂周期决定，层裂周期越大扇贝整体越往低频处转移。

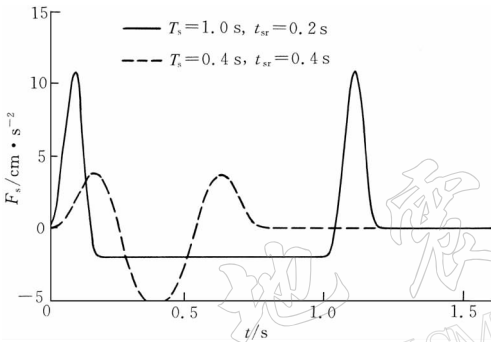


图 1 层裂等效点力时间函数

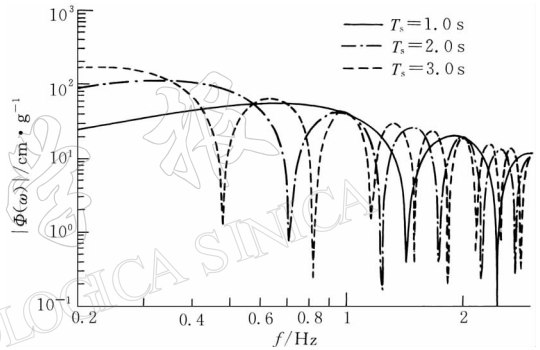


图 2 不同层裂周期的 $\Phi(\omega) = i\omega [\bar{u}(\omega)]$ 谱

1.4 $\Gamma(\omega)$ 对谱比的调制

从公式(11)可以看出， $\Gamma(\omega)$ 对谱比的影响主要由源的空间分布特征(由震源矩张量描述)控制。为考察层裂源空间分布对谱比的影响，我们将震源时间函数取为阶跃函数，源矩均取为 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，利用合成理论地震图方法计算不同震源产生的理论波形作为 $\Gamma(\omega)$ 的分子项，来具体分析 $\Gamma(\omega)$ 的特征。本文采用 Steven 速度模型(表 1)(McLaughlin *et al* , 1988)来计算理论地震图，该模型可以很好地模拟东哈萨克斯坦核试验场区的速度结构。

本文采用计算水平层状地球模型中理论地震图的方法(Chen, 1993, 1999; Chen, Zhang, 2001; Zhang *et al* , 2003)。该方法可以模拟全波场理论地震图，即它们能够模拟出给定时间窗内的所有震相。

以震源深度 $h=500 \text{ m}$ 为例，计算张裂源、爆炸源下震中距分别为 $\Delta=300 \text{ km}$ 、 $\Delta=20 \text{ km}$ 的理论地震波形，取相应的 Lg 波、Rg 波及其振幅谱，给出 $\Gamma(\omega)$ 随频率的变化情况，结果发现 $\Gamma(\omega)$ 无低谷点出现，如图 3 所示。

考察 CLVD 源的结果。同样以震源深度 $h=500 \text{ m}$ 为例，计算 CLVD 源、纯爆炸源下震中距分别为 $\Delta=300 \text{ km}$ 、 $\Delta=20 \text{ km}$ 的理论地震波形，取相应的 Lg 波、Rg 波及其振幅谱，并给出 $\Gamma(\omega)$ 随频率的变化情况，如图 4 所示。结果发现，Lg 波、Rg 波谱在 0.5 Hz 附近出现明显的低谷点，相同埋深情况下 Lg 波的低谷点频率与 Rg 波低谷点频率比较一致，

且低谷点频率仅由 CLVD 源深度及介质模型决定. 进一步分析表明, Lg 波、Rg 波谱低谷点频率随深度的变化规律是一致的.

表 1 Steven 速度模型

层序	深度/km	密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^3$	$v_s/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	$v_p/\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$	Q_s	Q_p
1	00.000	002.700	0002.790	0005.020	100.00	2000.0
2	2.0000	002.700	0003.000	0005.400	150.00	2000.0
3	3.0000	002.700	0003.300	0005.900	200.00	2000.0
4	5.4880	002.700	0003.400	0006.100	600.00	2000.0
5	16.464	002.702	0003.541	0006.308	525.00	2000.0
6	21.952	002.807	0003.703	0006.597	500.00	2000.0
7	27.440	002.858	0003.781	0006.736	450.00	2000.0
8	32.928	002.875	0003.807	0006.782	400.00	2000.0
9	38.492	002.879	0003.814	0006.795	350.00	2000.0
10	44.996	003.372	0004.573	0008.147	179.00	2000.0

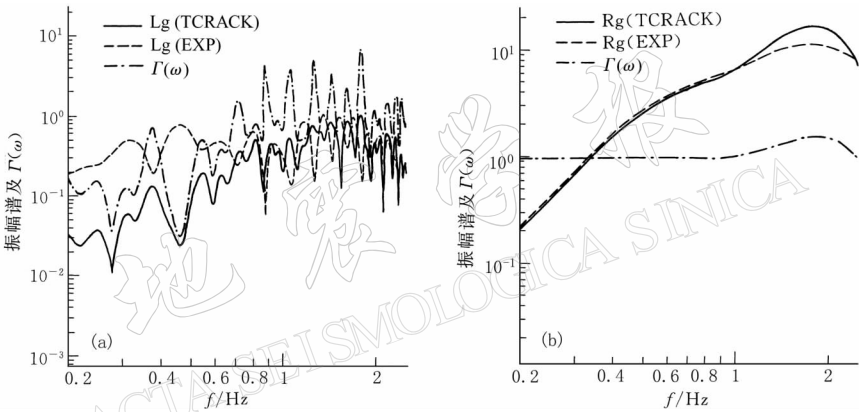


图 3 爆炸源(EXP)、张裂源(TCRACK)的 Lg 波谱和 Rg 波谱及 $\Gamma(\omega)$
(a) 震中距为 300 km 的结果; (b) 震中距为 20 km 的结果

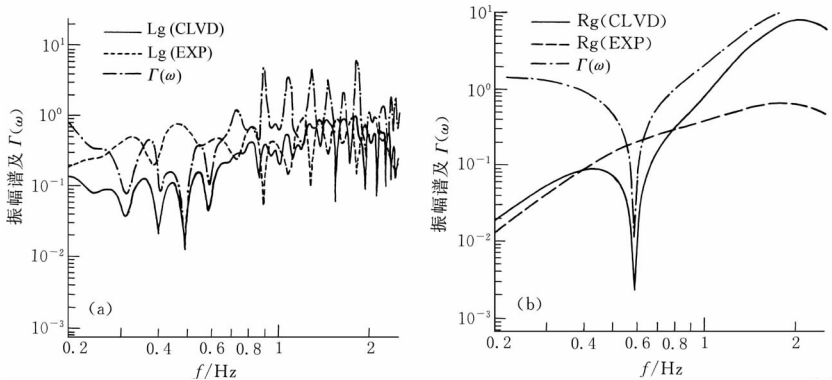


图 4 爆炸源(EXP)、CLVD 源的 Lg 波谱和 Rg 波谱及 $\Gamma(\omega)$
(a) 震中距为 300 km 的结果; (b) 震中距为 20 km 的结果

上述理论分析结果表明,东哈萨克斯坦地区速度模型下的地下核爆炸的 Lg 波,与内华达核试验场的结果一样,其波谱具有扇贝形及低谷点特征,其低谷点源自于 CLVD 源激发的 Rg 波. 这说明伴随地下核爆炸产生的层裂源是地下核爆炸 Lg 波的主要贡献因素.

2 东哈萨克斯坦地下核爆炸区域震相特征

上述分析结果表明,实际观测到的地下核爆炸的区域震相 Lg 波应具有扇贝形及低谷点特征. 我们对我国乌鲁木齐台站记录到的 3 次哈萨克斯坦地下核爆炸事件进行了分析,其代号分别为 880213, 880914 和 870606. 震中距约为 950 km, 震级分别为 $m_b=6.1$ 、 $m_b=6.0$ 和 $m_b=5.0$. 如图 5 所示,可看出 Lg 波发育得较好. 我们假设较小事件 870606 为纯爆炸源,将其作为经验格林函数,来反卷积另外两次较大事件 880213 和 880914 的 Lg 波,结果如图 6 所示(经 5 点平滑处理),可看出其频谱明显具有扇贝形特征,并且在箭头所指之处具有明显的低谷点;其扇贝形变化特征与 $T_s=2.8\text{ s}$ ($t_{sr}=0.2\text{ s}$) 的 $[\bar{u}(\omega)]$ 谱较好地吻合. 需注意到,两事件的低谷点位置都约在 $f_{\text{null}}=1.50\text{ Hz}$.

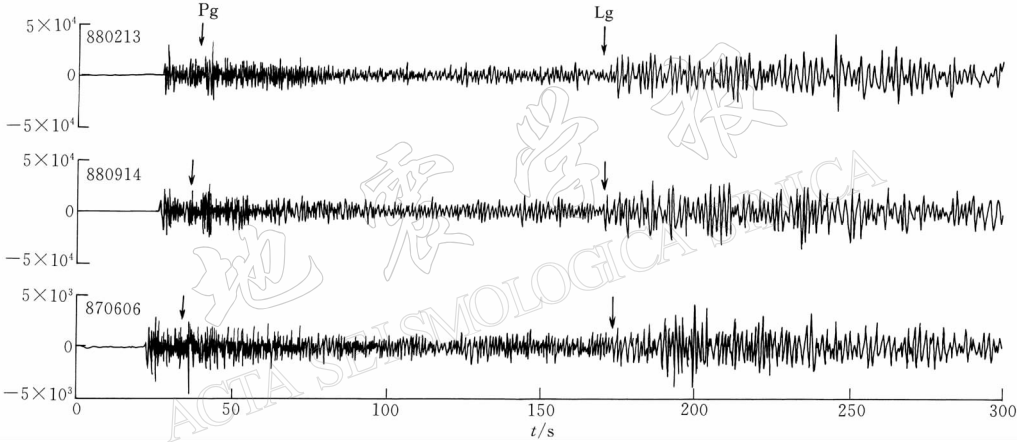


图 5 东哈萨克斯坦地下核爆炸垂向速度场地震波形(单位: counts)

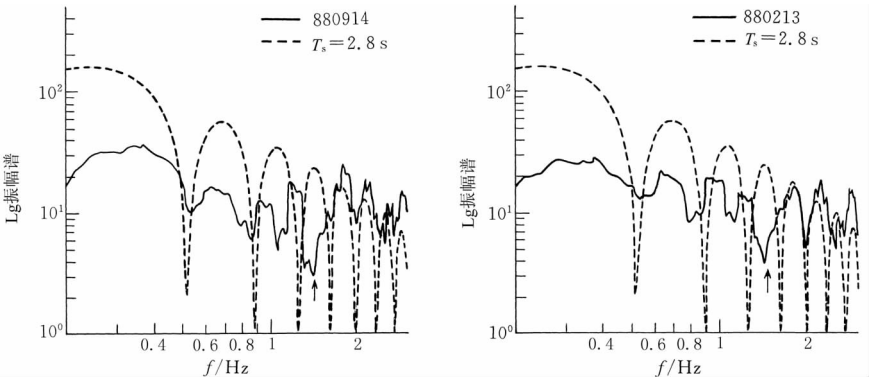


图 6 哈萨克斯坦地下核爆炸的 Lg 波谱比

可见,哈萨克斯坦试验区的地下核爆炸中的 Lg 波明显地受到层裂源时间函数及 CLVD 源的调制. 理论上讲, CLVD 源的深度一般为爆炸装置埋深的 1/3. 由 CLVD 源与

低谷点频率关系式 $H_{\text{CLVD}} = v/16f_{\text{null}}$ (Patton, Taylor, 1995), 取 $v=5.0$ km/s, 估计出这两次地下核爆炸的埋深都约为 600 m.

3 讨论

本文利用频谱比方法, 结合实际观测资料, 分析了东哈萨克斯坦地壳速度模型下的区域震相 Lg 波的特征. 结果表明, 地下核爆炸中的 Lg 波谱不仅具有层裂源时间函数的扇贝形特征, 而且出现不随层裂周期变化的低谷点. 其低谷点特征与 CLVD 源激发的 Rg 波谱的低谷点特征具有一致性, 而爆炸源和张裂源激发的 Rg 波谱在相应位置无低谷点出现. 这表明, 东哈萨克斯坦速度介质模型下, 与内华达试验区一样, CLVD 源是激发 Lg 波的主要因素. 实际情况可能是, CLVD 源激发的 Rg 波在爆炸源区附近散射, 形成 S 波, 并把低谷点遗传给 S 波, 具有合适慢度的 S 波陷俘于地壳中, 最后形成区域震相 Lg 波.

内华达和东哈萨克斯坦区域的地壳介质速度结构是有很大差别的, 本文采用的 Steven 速度模型地表速度较高, 而适合于内华达试验区的速度模型地表速度较低. 所以相同埋深的地下核爆炸, 两个区域的 Lg 波低谷点位置不同, 相同深度的东哈萨克斯坦区域的 Lg 波低谷点频率要明显比内华达区域的 Lg 波的低谷点频率高 (Gupta *et al*, 1997). 本文所得到的结果与这一结论是一致的.

任何一种识别判据都需要合适的震源理论基础来支持, 否则, 它的局限性可想而知. 了解 Lg 波如何受层裂效应的影响, 对于正确认识、应用 Lg 波具有重要意义.

参 考 文 献

- Chen X F. 1993. A systematic and efficient method of computing normal modes for multilayered half-space[J]. *Geophys J Int*, **115**: 391~409.
- Chen X F. 1999. Seismogram synthesis in multilayered half-space Part I. Theoretical formulations[J]. *Earthquake Research in China*, **13**: 149~174.
- Chen X F, Zhang H M. 2001. An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space at large epicentral distances[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **91**: 58~869.
- Gupta I N, Zhang T R, Wagner R A. 1997. Low-Frequency Lg from NTS and Kazakh nuclear explosions-observations and interpretation[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **87**: 1 115~1 125.
- Gupta I N, Chan W W, Wanger R A. 1992. A comparison of regional phases from underground nuclear explosions at East Kazakh and Nevada Test Sites[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **82**: 352~382.
- McLaughlin K L, Barker T G, Day S M, *et al*. 1988. *Effects of Depth of Burial on Explosion and Earthquake Regional Seismograms: Regional Discrimination and Yield Estimation*[R]. Jolla, California: S-CUBED Report SSS-R-88-9844.
- Patton H J, Taylor S R. 1995. Analysis of Lg spectral ratios from NTS explosions: Implications for the source mechanisms of spall and the generation of Lg waves[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **85**: 220~236.
- Stump B W. 1985. Constrains on explosive source with spall from nuclear source waveforms[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **74**: 361~378.
- Taylor S R, Denny M D. 1989. Regional discrimination between NTS explosion Western U S earthquakes[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **79**: 1 142~1 176.
- Wallace T C. 1991. Body wave observations of tectonic release[A]. In: Taylor S R, Patton H J, Richards P G eds. *Explosion Source Phenomenology*[C]. Washington D C: American Geophysical Union, **65**: 161~170.
- Zhang H, Chen X F, Chang S. 2003. An efficient method for computing synthetic seismograms for a layered half-space with sources and receivers at close or same depth[J]. *Pure Appl Geophys*, **160**: 467~486.

THE EFFECT OF SPALL ON Lg WAVES

He Yongfeng^{1, 2)} Chen Xiaofei¹⁾ Zhang Haiming¹⁾

1) School of Earth & Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2) North-west Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

Abstract: The generation mechanism of Lg wave from underground nuclear explosion is still not clear at present. The general viewpoint is that the S wave generated by the near-source scattering of explosion-generated Rg appears to be the primary contributor to the low-frequency Lg (0.2~2.0 Hz) from nuclear explosions. The viewpoint is supported by the analysis of regional data from several Yucca flats, NTS explosions by Patton and Taylor, who further indicated that the prominent low-frequency spectral null in Lg is due to Rg from a compensated linear vector dipole (CLVD) source. In this paper, the data from Kazakhstan Test Sites are investigated by a spectral ratio method. We have found that the spectral ratio of Lg waves is characterized by a spectral scalloping and a pronounced null, and the spectral null does not shift with spall dwell times, showing a strong dependence on shot depth and a very good agreement with those expected from Rg due to a CLVD source.

Key words: spectral ratio; Lg wave; spall; CLVD source; null