

# 关于远震 Pn 波列的实验研究 \*

高世玉 丁 山

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

## 摘 要

借助地震模型实验,讨论了深部的低速层力学性质及高速层厚度对地震波水平传播的影响;指出由软弱的低速层和坚硬的高速薄层组成的下部岩石层结构,有利于地震能量沿水平方向传播,是解释远距离上出现强的 Pn 及高速续至波的很可能的结构模式;也阐述了这种解释同已有的关于大洋中脊及大陆裂谷区域内岩石层下部流变学分层的研究结果相一致。

关键词 下部岩石层; Pn 及续至波列; 地震模型实验; 高速薄层厚度; 软弱低速层

## 1. 引 言

天然地震观测发现,高频的 Pn 波有时可以到达数千 km 的远距离(Talandier *et al.*, 1979). 人工地震长剖面记录还表明,在远震 Pn 初至后大约 2s 的时间段内,往往还出现若干列视速度相近的续至波(Kind, 1974; 胡鸿翔等, 1986). 本文将由 Pn 初至及这种高速续至波组成的波列简称“Pn 及续至波列”或“Pn 波列”,它们的特征给出了有关下部岩石层的重要信息。

70 年代以来,国内外地震学者对远震 Pn 波列的一系列特征十分关注,并用不同的下部岩石层模型进行解释. 例如,用上地幔低速层的导波解释 Pn 的远距离传播,用高速薄层的非均匀波说明它的续至,用速度梯度层的回折波模拟波列的强振幅等等. 总的看来,对于 Pn 波列丰富的高频成分、很强的续至波振幅、以及在上千 km 的距离内视速度几乎不变等观测事实,用现有的数学方法尚未能给出一致的解釋模式. 地震学家一直在寻找满意的解答。

作为探讨,本文借助地震模型实验,研究在均匀水平层状结构中产生远震强 Pn 波列可能的物理机理. 这将涉及高速层厚度及软弱的低速层对波传播的影响。

## 2. 地震模型实验

实验仪器及基本的实验方法在以前的论文里有所叙述(高世玉等, 1989). 图 1 给出实验模型及其介质声学参数. 用铝做高速介质,是考虑它对波的滞弹性吸收可以忽略,便于

\* 地震科学联合基金会资助项目; 国家地震局地球物理研究所论著 93A0001.

1991 年 7 月 20 日收到本文初稿, 1991 年 12 月 20 日决定采用。

研究因能量辐射而引起的地震波衰减;用黄蜡做低速介质,由于它可在实验室所能达到的温度下出现柔性.

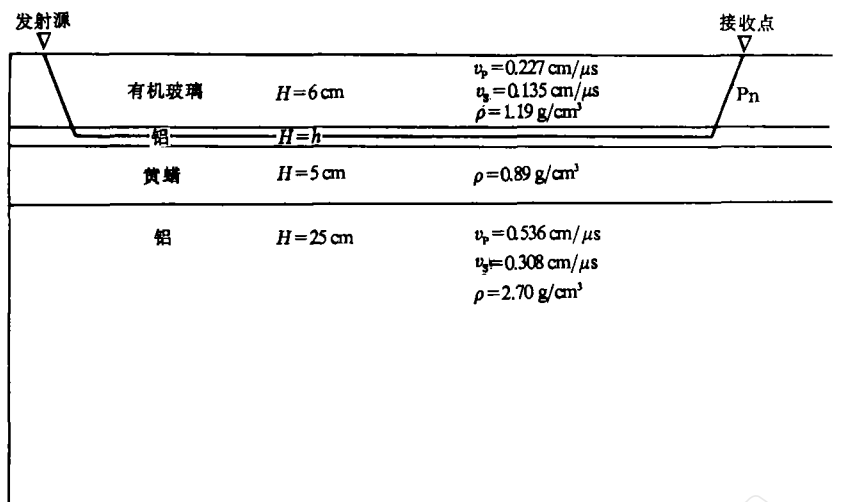


图 1 实验模型及其介质声学参数

在不同的温度下,测定了黄蜡块体的纵、横波速度和密度,并推算出相应的泊松比和剪切系数,图 2 表明它们对温度的单调函数关系.本实验中用温度改变来标志低速介质力学性质的变化.

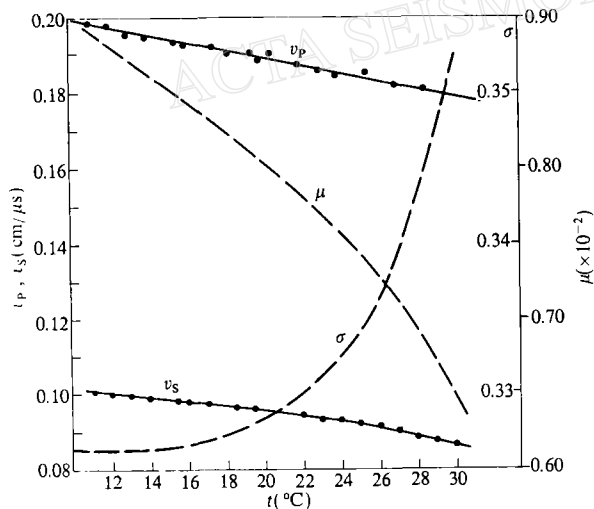


图 2 黄蜡的声学参数对温度的依赖

在本实验的温度范围内,其它材料声学参数的微小变化可不予考虑.

模型中高速介质铝的下方是低速度的黄蜡,铝的上方也填以厚度极薄(约 1 mm)的黄蜡使铝与有机玻璃紧密衔接.由高温下黄蜡的变软,模拟上地幔最顶部高速薄层的部分脱耦性质.接收距离  $x$  在 70–110 cm 范围内,即临界距离的 10–20 倍之间,这里能量在薄层中主要沿水平向传播.测得波的优势周期约 20  $\mu\text{s}$ ,在高速介质中相应的波长  $\lambda_h$  约 10 cm.

### 3. 高速层厚度对波传播的影响

实际观测中远距离  $P_n$  强的高速续至波,意味着上地幔最顶部的高速层是一个薄层.我们知道薄层首波是层内许多波叠加产生干涉的结果,它的强度与薄层厚度  $h$  (与波长  $\lambda_h$  之比)的关系比较复杂.

对高速层与低速层皆为固体介质且刚性衔接的情况,通常可用  $A = A_0 e^{-\alpha \cdot x}$  来描述首波振幅  $A$  随水平距离  $x$  的指数衰减规律.随着高速层的减薄,初始振幅  $A_0$  的值单调减小,同时衰减系数  $\alpha$ ,急剧增大,首波振幅沿水平距离的衰减变得十分强烈.

用弹性理论的计算方法表明,对厚度小于一个波长的莫霍界面高速层,其首波 Pn 的能量不足以远距离被观测.因而,常规解释中很难确定一个合适的高速层厚度,能同时说明远震 Pn 及其高速续至波的观测特征.

实际上,薄层首波强度对其厚度的依赖,与边界条件有很大关系.早期有关的理论工作,曾就薄层为自由表面以及与其它弹性介质耦合的情况,分别采用简谐模式和泄漏模式来研究.Шамина (1965) 则由实验指出,在滑动接触面情况下,薄层 ( $h/\lambda_h < 0.25$ ) 首波的振幅随层厚的减小反而增加.

本实验模型中的高速薄层处在不同程度的部分脱耦状态,更接近绝大部分地区下部岩石层的实际情况.

图 3 表示三种不同情况的记录剖面.图中用箭头指出了主要波组的特征波峰.图 3a 和图 3b 的记录剖面是在同样温度条件下由不同厚度高速层的模型得到.由两图的对比可见,不仅 Pn 波的强度要求高速薄层有足够的厚度,Pn 续至波的强度也与高速薄层厚度密切相关.

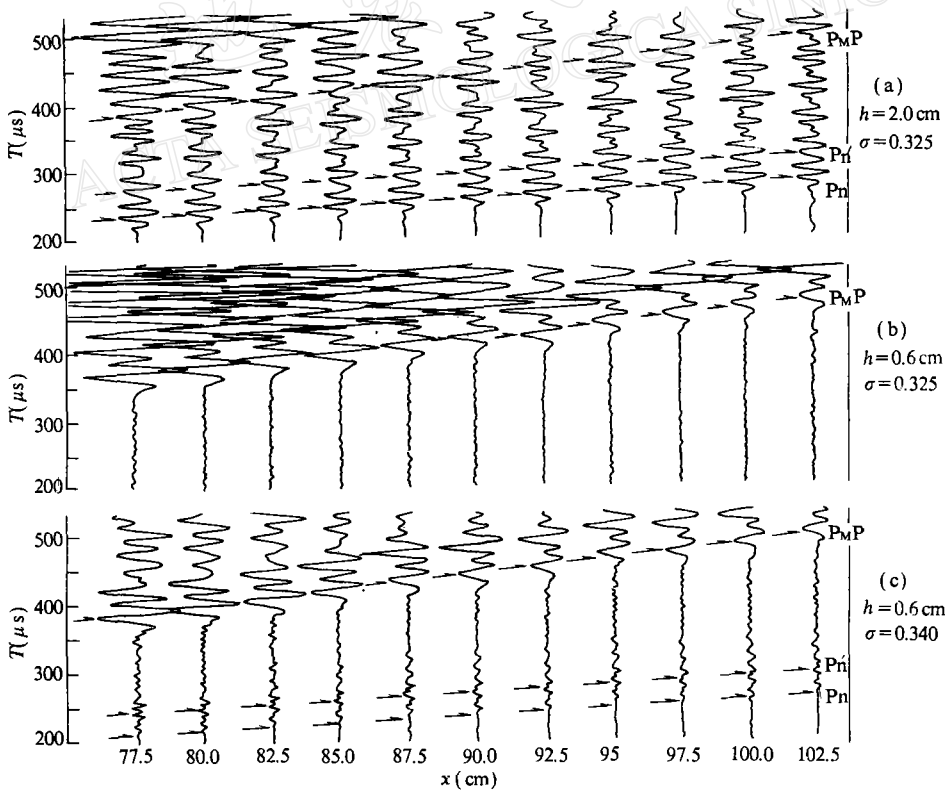


图 3 实验记录剖面图

图 4 粗略地给出当  $x = 85\text{cm}$  时 Pn 及续至波最大振幅  $A_m$  随高速层厚度的变化

图 4 中,对应大约为  $0.25\lambda_h$  的高速层厚度,  $P_n$  及续至波强度出现了极大值: 这种现象是由于在足够薄的高速层中存在波的干涉效应所致.

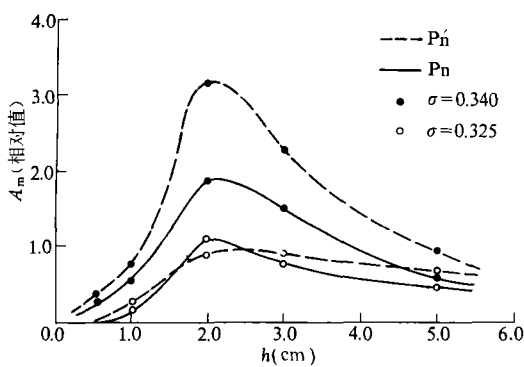


图 4  $P_n$  及续至波最大振幅随高速层厚度的变化

层而在下伏界面反射、折射等复杂本质的干涉波组.

图 4 中,对两种不同的低速层泊松比  $\sigma$ ,  $P_n$  及  $P_n'$  的振幅曲线在半波长范围内皆有明显差异,说明高速薄层的脱耦程度对  $P_n$  波列的强弱有至关重要的意义.

图 5 的记录波形,是将检波换能器固定在  $x=85\text{cm}$  处而仅改变实验温度得到. 观察  $200\mu\text{s}$  至  $800\mu\text{s}$  时间段内几个主要波组的振幅变化,可以得到一个十分有意义的结论: 伴随低速层的软化过程,首波波组与反射波组的能量比将显著增大.

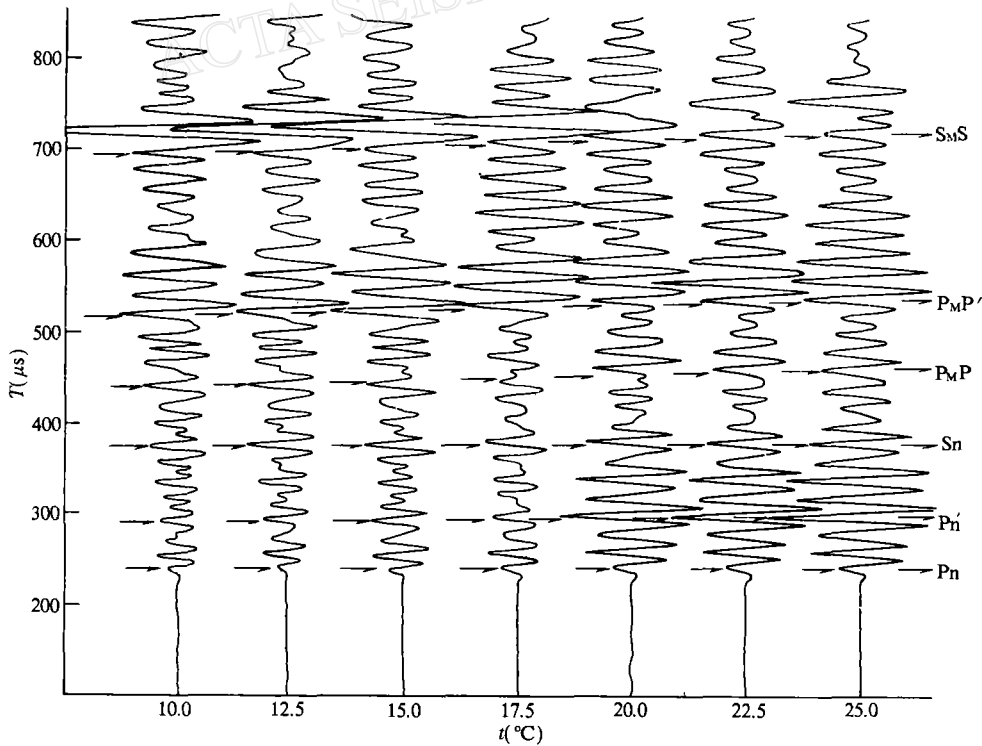


图 5 主要波组随低速层力学性质的变化

#### 4. 软弱的低速层对波传播的影响

图 3b 与图 3c 是对一个高速层极薄的模型分别在不同的温度下记录得到的. 前者由于低速介质的泊松比较低, 不仅测不到  $P_n$ , 也测不到  $P_n$  的续至. 图 3c 中出现了  $P_n$  波列. 这里续至波  $P_n'$  不会是非均匀波. 结合先前的研究结果 (高世玉等, 1989) 分析, 它是具有以均匀折射波和 PSP 转换波的形式通过薄

在物理解释上,薄层的干涉首波主要由介质的纵向应变产生;当周围介质是固体并且与薄层刚性接触,折射衰减的大部分是能量以横波形式漏进周围介质的结果;而低速层的流变性质将影响界面上能量的分配,显著地减少了在低速层中以横波形式传播和耗散的部分,更多的能量将沿高速层传播至远距离。

图 6 表明震中距越远, Pn 振幅对低速介质软弱性的反应越灵敏。

## 5. 讨 论

作者推断,当岩石层下部低速层的介质性质很软弱时,嵌于其中的高速薄层便在部分脱耦状态下成为一个很有效的波导,从而也成为远距离上产生足够强的 Pn 及续至波列的很可能的结构模式。

在 Ranalli *et al.* (1987) 所给出的几种岩石层流变学剖面中,对高地温的构造活动区,莫霍界面的坚硬层厚度就很薄,而且它两侧很厚的介质层具有显著的流变性质。

由地震学观测, Jorden *et al.* (1975) 和 El-Isa *et al.* (1987) 曾得到下部地壳泊松比高达 0.32–0.33 的例子。深部地壳的软弱层,通常解释为高热作用下玄武质岩石的部分熔融或脱水所引起。

在上地幔最顶部坚硬的超镁铁质岩层之下,通常也发现地震波速度的逆转层。而对于大洋中脊及大陆裂谷地区,上地幔顶部的低速层是以向上隆起、低密度、低电阻率为特征的巨大的枕状异常体。这种异常结构,被解释为软流圈物质大规模上涌及其在莫霍面之下的横向扩展所形成,或被解释为上涌的地幔物质与地壳物质的混合物,总之是显著的力学软弱层。

在某些地区,岩石层下部还出现含多个软弱低速层的叠层结构。Aki (1968) 推断的日本下部若干软的水平层,其 S 波速度低达 1.1 km/s。下部岩石层的叠层结构很可能意味着地质史上的多次构造事件。每次事件中上涌的高热流变物质将在重力场中进行分异,从而形成高速薄层和软弱低速层交互重叠的结构。

总而言之,岩石层下部软弱的低速层,多发现于现代构造活动强烈的大陆内部大型年青地堑系,及全球性的巨型海洋地堑系所覆盖的地区;正是在这样一些地区,人们得到了高频的 Pn 远距离传播和高速震相多重性的实例。本文的讨论揭示了两者间这种地区性联系的物理实质。

感谢曾融生教授的指导和林中洋研究员、胡鸿翔副研究员的帮助。

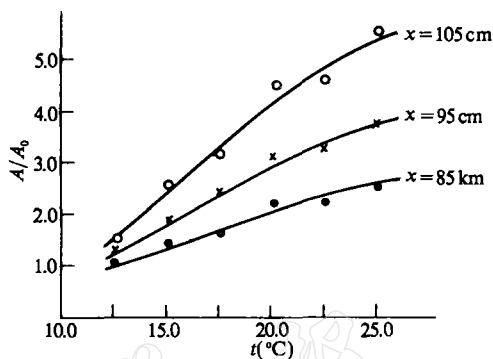


图6 对不同的接收距离 Pn 振幅随低速层力学性质的变化

## 参 考 文 献

- 高世玉、周勋、丁山、赵鸿儒、刘宝诚, 1989. 关于高速夹层的地震模型实验. 地球物理学报, **32**, 专辑 I, 1-10.
- 胡鸿翔、陈学波、张碧秀、宋文荣、肖志红、何正勤, 1986. 中国中原地区随县—安阳剖面深地震测深资料的解释. 地震学报, **8**, 37-49.
- Aki, K., 1968. Seismological evidences for the existence of soft thin layers in the upper mantle under Japan. *J. Geophys. Res.*, **73**, 585-594.
- El-Isa, Z., Mechie, J. and Prodehl, C., 1987. Shear velocity structure of Jordan from explosion seismic data. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, **90**, 265-281.
- Jorden, T. H. and Frazer, L. N., 1975. Crustal and upper mantle structure from SP phases. *J. Geophys. Res.*, **80**, 1504-1518.
- Kind, R., 1974. Long range propagation of seismic energy in the lower lithosphere. *J. Geophys.*, **40**, 189-202.
- Ranalli, G. and Murphy, D. C., 1987. Rheological stratification of the lithosphere. *Tectonophysics*, **132**, 281-295.
- Talandier, J. and Bouchon, M., 1979. Propagation of high frequency Pn waves at great distances in the Central and South Pacific and its implication for the structure of the lower lithosphere. *J. Geophys. Res.*, **84**, B10, 5613-5619.
- Шаминя, О. Г., 1965. Затухание головных волн от тонких слоев при жестком и скользящем контакте. *Физика Земли*, 3, 11-21.

地 震 学 报  
ACTA SEISMOLOGICA SINICA