

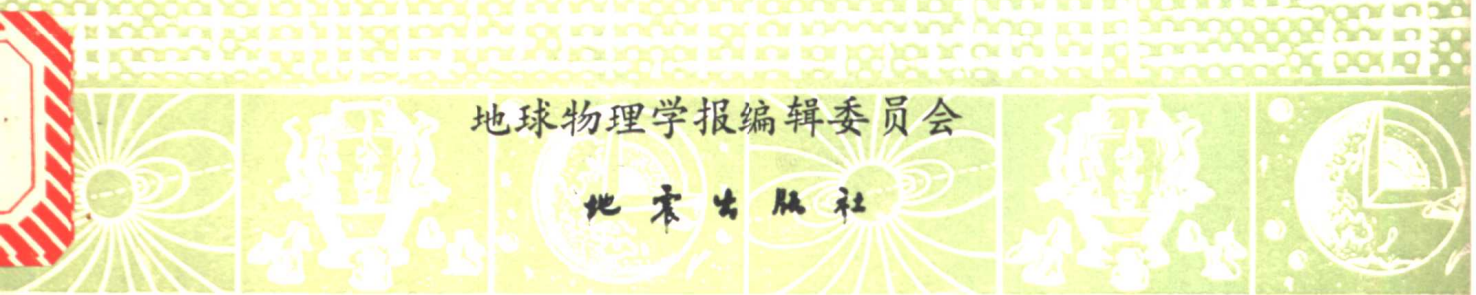
724352

# 实验地球物理研究文集



地球物理学报编辑委员会

地震出版社



# 地球物理学报

第32卷 专辑 I 1989

## 实验地球物理研究文集

地球物理学报编辑委员会编

地质出版社

1 9 8 9

# 实验地球物理研究文集

地球物理学报编辑委员会编

•  
地质出版社出版

北京海淀区民族学院南路9号

流研所印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

•  
787×1092 1/16 34印张 768千字

1989年12月第一版 1989年12月第一次印刷

ISBN 7-5028-0329-7/P·209

(718) 定价: 19元

# 地球物理学报

第32卷 专辑I

## 实验地球物理研究文集

### 目 录

|                                                       |                    |
|-------------------------------------------------------|--------------------|
| 关于高速夹层的地震模型实验.....                                    |                    |
| .....高世玉 周 勋 丁 山 赵鸿儒 刘宝诚 ( 1 )                        |                    |
| 高速薄层的非“屏蔽”性——赝潜波的模型实验研究.....                          | 王博文 赵鸿儒 ( 11 )     |
| 低速夹层地震模型内体波干涉现象及其分析方法.....                            | 汪 洪 赵鸿儒 ( 23 )     |
| 层状模型的超声波震相研究.....                                     | 戴 飒 蒋宏耀 赵鸿儒 ( 31 ) |
| 双层结构场地地震动的超声模拟技术.....                                 | 孙进忠 彭一民 赵鸿儒 ( 44 ) |
| 地震波的薄层分辨能力.....                                       | 史保平 蒋宏耀 ( 54 )     |
| 瑞利型槽波在层状“岩石—煤层—岩石”中的传播特性.....                         | 严寿民 ( 77 )         |
| 平面波在半圆柱表面空穴上散射的动态光弹实验研究.....                          | 钱德平 周铁英 ( 92 )     |
| 应用物理模型和数学模型研究逆掩断层地质构造.....                            |                    |
| .....姜绍仁 R.Sung S.Y.Wang S.S.Lee J.A.McDonald ( 101 ) |                    |
| 微处理机数据采集系统用于波传播动力特性的探讨.....                           |                    |
| .....陈根藻 李国治 徐植信 ( 109 )                              |                    |
| 非弹性频散与初动的隐伏效应.....                                    | 唐晓明 陈 颢 ( 119 )    |
| 地震波衰减变化的测量及其在地震预报中的应用.....                            | 唐晓明 陈 颢 ( 126 )    |
| 岩石破坏过程的降维现象.....                                      | 陈 颢 ( 132 )        |
| b值的实验研究 .....                                         | 许征宇 陈 颢 ( 144 )    |
| 华北地区五种岩石破裂前声发射b值的变化.....                              |                    |
| .....李纪汉 刘晓红 郝晋升 方亚如 蔡戴恩 耿乃光 ( 155 )                  |                    |
| 裂纹引起的各向异性介质中S波的分裂的实验研究.....                           | 彭成斌 陈 颢 ( 163 )    |
| 闭合裂纹面相互作用过程中的多点破裂现象及其分析.....                          |                    |
| .....李世愚 尹祥础 李 红 王 敏 ( 174 )                          |                    |
| 含非均匀体岩板中混合型裂纹扩展过程实验.....                              | 张之立 方 兴 ( 183 )    |
| 拼接岩板受压混合型裂纹扩展过程位移和应变场的光测实验.....                       |                    |
| .....张之立 方 兴 阎 虹 刘宝琛 蔺书田 ( 194 )                      |                    |
| 地震断层面上障碍体的实验研究.....                                   | 张 智 吴开统 ( 204 )    |

|                                       |     |                    |                    |        |
|---------------------------------------|-----|--------------------|--------------------|--------|
| 断层面上的障碍体与地震序列中的强余震·····               | 焦远碧 | 吴开统                | 张 智                | (211)  |
| 雁列式裂纹的相互作用及其稳定性·····                  | 杜异军 | 马 瑾                | 李建国                | (218)  |
| 动态应力腐蚀的实验研究·····                      |     |                    | 荣代波                | (232)  |
| 裂纹扩展过程中的变形场·····                      |     |                    | 姚孝新                | (237)✓ |
| 实验室中岩石破裂的变形前兆·····                    | 陈 颢 | 阎 虹                |                    | (246)  |
| 中等主应力对岩石破裂后承载能力的影响·····               | 许东俊 | 耿乃光                |                    | (253)  |
| 围压和孔隙压力作用下花岗岩的渗透性状·····               |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 张伯崇 | <i>C.A.Morrow</i>  | <i>J.D.Byerlee</i> | (260)  |
| 单轴压缩下填充物胶灌切口岩样的破裂特征·····              | 许昭永 | 舒燕华                | 包一峰                | (269)  |
| 花岗闪长岩的静疲劳破坏及其声发射的实验研究·····            |     |                    | 周仁德                | (275)  |
| 饱和水断层泥的原地大尺度摩擦实验·····                 | 许东俊 | 耿乃光                |                    | (284)  |
| 沂沭断裂带断层泥的摩擦滑动特征·····                  |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 耿乃光 | 刘晓红                | 郝晋升                | 李纪汉    |
| ·····                                 | 方亚如 | 蔡戴恩                | 明 亮                | (290)  |
| 三条断裂带断层物质的强度特征·····                   |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 王宝生 | 许秀琴                | 袁淑荣                | 刘天昌    |
| ·····                                 |     |                    | 马 瑾                | (299)  |
| 水对岩石粘滑特性的影响·····                      | 郭自强 | 施行觉                | 王其允                | (307)  |
| 周口店花岗闪长岩的熔融实验及其对地震研究的意义·····          |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 张友南 | 高 平                | 郭才华                | 宋瑞卿    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (313)  |
| 石灰岩在高压下的压缩率与相变·····                   | 鲍忠兴 | 何唐甫                | 俞汀南                | 张芝婷    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (322)  |
| 几种岩石在高压下密度的变化·····                    |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 程振炎 | 贺绍英                | 徐惠芬                | 鲍忠兴    |
| ·····                                 |     |                    | 俞汀南                | 张芝婷    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (330)  |
| 混凝土声波测强的模糊评价·····                     |     |                    | 朱正亚                | (339)  |
| 有损媒质半空间中散射体对电磁波散射的实验研究·····           |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 石长生 | 林德云                | 单清龙                | 李 江    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (347)  |
| 金属管线(片)对地电阻率影响的现场实验·····              |     |                    |                    |        |
| ·····                                 | 金安忠 | 李润贤                | 李言竹                | 贾茂才    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (357)  |
| 埋藏极化体视复电阻率谱的定量实验研究结果·····             |     |                    | 傅良魁                | 张虎豹    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (366)✓ |
| 钻孔电磁波法的室内模型实验·····                    |     |                    | 金鸣峰                | 王惠濂    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (377)  |
| 层状结构磁各向异性体的磁模拟实验和磁场特征·····            |     |                    | 余钦范                | (387)  |
| 人造样品的应力感应磁化率变化——它与磁性矿物成分及磁畴状态的关系····· |     |                    |                    |        |
| ·····                                 |     |                    | 郝锦绮                | 张天中    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (396)  |
| 岩石磁性组构的方向参数及与某些区域变质岩组的对比·····         |     |                    |                    |        |
| ·····                                 |     |                    | 贺绍英                | 孙世伟    |
| ·····                                 |     |                    | 张群章                | (406)  |
| 岩石剩余磁性与褶皱构造·····                      | 余钦范 | 沈佩芝                | 刁盛昌                | 陈德怀    |
| ·····                                 |     |                    |                    | (415)✓ |
| 短期粘滞磁化对剩磁测量的影响·····                   |     |                    | 许同春                | (423)✓ |
| 古地磁数据的非构造解释·····                      |     |                    | 许同春                | (436)✓ |
| 不列颠群岛石炭纪磁性地层的修正·····                  | 许同春 | <i>D.H.Tarling</i> |                    | (442)✓ |
| 四川峨眉、山西太原地区二叠纪的古地磁研究·····             | 马醒华 | 张正坤                |                    | (451)✓ |
| 重力在岩石层消减中的作用·····                     | 许天铭 | 刘文忠                | 陈 静                | (466)✓ |

## 评 述

- 地球物理学中物理模型实验的进展.....王铁男 赵鸿儒 李国治 郭铁栓 (477)✓  
电磁感应异常的实验室模型模拟.....胡文宝 H.W.Dosso (483)✓  
由岩石力学实验研究地震前兆.....耿乃光 (492)  
中国震前电磁波观测与实验研究进展.....毛福恩 (500)

## 短 论

- 变形速率由 $10^{-3}/s$ 至 $10^{-8}/s$ 时济南辉长岩的破裂过程.....  
.....张未风 傅祖强 赖德伦 阎 虹 姚孝新 (506)  
水压致裂过程中的裂缝扩展——用封闭压力确定最小水平应力.....  
.....刘建中 梁海庆 李自强 曹新玲 余建华 徐 昆 (512)  
岩石压电模数的测定与岩石压电性的特征.....姜 枚 王秀琨 王寅生 (518)  
岩石破裂时的电磁辐射.....孙正江 王丽华 陈显杰 (523)  
破碎大理岩热开裂引起的声发射.....席道瑛 谢 端 (527)  
交变退磁螺线管的改进.....魏青云 曹冠宇 (532)



# ACTA GEOPHYSICA SINICA

Vol. 32, Supplement I

## CONTENTS

|                                                                                                                                     |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Seismic Model Experiments on Embedded High Velocity Layers.....                                                                     |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Gao Shi-yu</i>                                                  |
| <i>Zhou Nun Ding Shan Zhao Hong-ru Liu Bao-cheng</i> ( 10 )                                                                         |                                                                    |
| On the Non-existence of "Masking Effect" of Thin High-velocity Layers—A Study of Modelling Experiment for Pseudo-diving Waves.....  | <i>Wang Bo-wen Zhao Hong-ru</i> ( 22 )                             |
| Interferential Behavior in Low Velocity Channel and Its Analysing Method—Model Seismic Investigations .....                         |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Wang Hong Zhao Hong-ru</i> ( 30 )                               |
| Study of Supersonic Wave Phases in Layered Medium Model.....                                                                        |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Dai Sa Jiang Hong-yao Zhao Hong-ru</i> ( 43 )                   |
| Ultrasonic Modelling Technique for Earthquake Ground Motion of the Site with Double Layer Structure.....                            |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Sun Jin-zhong Peng Yi-min Zhao Hong-ru</i> ( 53 )               |
| The Capability of Identifying Thin Layers by Seismic Waves .....                                                                    |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Shi Bao-ping Jiang Hong-yao</i> ( 76 )                          |
| The Propagation Characteristics of Rayleigh Channel Wave in a "Rock-coal—rock" Sequence.....                                        | <i>Yan Shou-min</i> ( 91 )                                         |
| Dynamic Photoelastic Studies on Scattering of Plane Waves from A Half-Cylindrical Surface Cave.....                                 |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Qian De-ping Zhou Tie-ying</i> ( 100 )                          |
| A Study of Geological Overthrust Structures by Using Physical Modelling and Numerical Modelling.....                                | <i>Jiang Shao-ren R.Sung S.Y.Wang S.S.Lee J.A.McDonald</i> ( 108 ) |
| Application of the Microcomputer-High Speed Data Acquisition System to the Study of the Dynamic Properties of Wave Propagation..... | <i>Chen Gen-meng Li Guo-zhi Xu Zhi-xin</i> ( 118 )                 |
| Inelastic Wave Dispersion and the Pedestal Effect of Wave Onset.....                                                                |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Tang Xiao-ming Chen Yong</i> ( 125 )                            |
| Measurement of Changes in Seismic Wave Attenuation and Its Application to Earthquake Prediction.....                                | <i>Tang Xiao-ming Chen Yong</i> ( 131 )                            |
| The Phenomena of Dimension Reduction in the Process of Rock Failure .....                                                           |                                                                    |
| .....                                                                                                                               | <i>Chen Yong</i> ( 143 )                                           |

- Experimental Research of  $b$ -Value.....*Xu Zheng-yu Chen Yong* (154)
- $b$ -Value Change of Acoustic Emission Before Rupture of Five Kinds  
of Rocks from North China.....*Li Ji-han Liu Xiao-hong*  
*Hao Jin-sheng Fang Ya-ru Cai Dai-en Geng Nai-guang* (162)
- An Experimental Study on the Shear Wave Splitting in Anisotropic  
Medium with Aligned-Cracks.....*Peng Cheng-bin Chen Yong* (173)
- Multiple-Fracture in the Interaction between the Flanks of Closed  
Crack.....*Li Shi-yu Yin Xiang-chu Li Hong Wang Min* (182)
- Experiment Study on the Propagation Processes of Mixed Mode Cracks  
in an Inhomogeneous Rock Plates.....  
.....*Zhang Zhi-li Fang Xing* (192)
- Optical Measurment of Displacement and Strain Field during Propa-  
gation Process of Mixed Mode Crack under Compression .....*Zhang*  
*Zhi-li Fang Xing Yan Hong Liu Bao-shen Lin Shu-tian* (203)
- An Experimental Study on the Effect of Barriers on the Development  
of Earthquake Fault.....*Zhang Zhi Wu Kai-tong* (209)
- Barriers on the Fault Plane and Strong Aftershocks of Earthquake  
Sequences.....*Jiao Yuan-bi Wu Kai-tong Zhang Zhi* (217)
- Interaction and Stability of En-echelon Cracks.....  
.....*Du Yi-jun Ma Jin Li Jian-guo* (230)
- Experimental Study on Dynamic Stress Corrosion.....*Rong Dai-lu* (236)
- The Deformation Field during Crack Growth.....*Yao Xiao-xin* (245)
- Deformation Precursor of Rock Failure in Laboratory .....  
.....*Chen Yong Yan Hong* (252)
- The Effect of Intermediate Principal Stress on the Load Bearing Capacity  
of Fractured Rock.....*Xu Dong-jun Geng Nai-guang* (259)
- The Permeable Behavior of Granite under Confining Pressure and Pore  
Pressure.....*Zhang Bo-chong C.A.Morrow J.D.Byerlee* (268)
- The Rupture Characteristics of Rock Samples with Cut Crack Filled  
by Epoxy Resin under Uniaxial Compression.....  
.....*Xu Zhao-yong Shu Yan-hua Bao Yi-feng* (274)
- Laboratory Study of Static Fatigue Failure and Acoustic Emission of  
Granodiorite.....*Zhou Ren-de* (283)
- The Large Scale Frictional Experiments in Situ on Saturated Gouge.....  
.....*Xu Dong-jun Geng Nai-guang* (289)
- Friction Sliding Characteristics of Gouge from Yishu Fault Zone.....  
.....*Geng Nai-guang Liu Xiao-hong Hao*  
*Jin-sheng Li Ji-han Fang Ya-ru Cai Dai-en Ming Liang* (298)
- The Natural Gouge Strength from Three Fault Zones..... *Wang Bao-*



|                                                                                                                                          |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>sheng</i> <i>Xu Xiu-qin</i> <i>Yuan Shu-rong</i> <i>Liu Tian-chang</i> <i>Ma Jin</i> ( 306 )                                          |
| The Effect of Water on Stick Slip of Rocks.....                                                                                          |
| ..... <i>Guo Zi-qiang</i> <i>Shi Xing-jue</i> <i>C.Y.Wang</i> ( 312 )                                                                    |
| Melting Experiment of Zhoukoudian Granodiorite and Its Implication<br>to Seismologic Study.....                                          |
| ..... <i>Zhang You-nan</i> <i>Gao Ping</i> <i>Guo Cai-hua</i> <i>Song Rui-qing</i> ( 321 )                                               |
| The Compressibility and Phase Transition of Limestone under High<br>Pressures .....                                                      |
| <i>Bao Zhong-xing</i> <i>He Tang-fu</i> <i>Yu Ting-nan</i> <i>Zhang Zhi-ting</i> ( 329 )                                                 |
| The Variation in Density of Several Kinds of Rocks under High<br>Pressure.....                                                           |
| ..... <i>Cheng Zhen-yan</i> <i>He Shao-ying</i> <i>Xu Hui-fen</i> <i>Bao Zhong-xing</i> <i>Yu Ting-nan</i> <i>Zhang Zhi-ting</i> ( 338 ) |
| Fuzzy Evaluation for Ultrasonic Strength Measurement of Concrete<br>.....                                                                |
| ..... <i>Zhu Zheng-ya</i> ( 346 )                                                                                                        |
| Experimental Research of Scattering Fields by a Buried Dielectric<br>Sphere in a Half-Space of Lossy Medium.....                         |
| ..... <i>Shi Chang-sheng</i> <i>Lin De-yun</i> <i>Shan Qing-long</i> <i>Li Jiang</i> ( 356 )                                             |
| The Effect of Metal Pipeline ( or Flake ) on Earth Resistivity Obser-<br>vation; Experiments in Situ .....                               |
| ..... <i>Jin An-zhong</i> <i>Li Run-xian</i> <i>Li Yan-zhu</i> <i>Jia Mao-cai</i> ( 365 )                                                |
| Some Experimental Results of Apparent Complex Resistivity Spectra<br>.....                                                               |
| ..... <i>Fu Liang-kui</i> <i>Zhang Hu-bao</i> ( 376 )                                                                                    |
| Model Experiment of Borehole Electromagnetic Method.....                                                                                 |
| ..... <i>Jin Ming-feng</i> <i>Wang Hui-lian</i> ( 386 )                                                                                  |
| The Features of Magnetic Field Caused by Anisotropic Magnetized<br>Bodies with Layered Structure.....                                    |
| ..... <i>Yu Qin-fan</i> ( 395 )                                                                                                          |
| Stress-Induced Susceptibility Changes of Synthetic Samples—Their<br>Magnetic Mineral Content and Domain State Dependences.....           |
| ..... <i>Hao Jin-qi</i> <i>Zhang Tian-zhong</i> ( 405 )                                                                                  |
| The Orientation of the Magnetic Fabric of Rock and Its Comparison<br>with Some Regional Metamorphic Fabric.....                          |
| ..... <i>He Shao-ying</i> <i>Sun Shi-wei</i> <i>Zhang Qun-zhang</i> ( 414 )                                                              |
| Remanent Magnetization of Rocks and Fold Structure .....                                                                                 |
| <i>Yu Qin-fan</i> <i>Shen Pei-zhi</i> <i>Diao Sheng-chang</i> <i>Chen De-huai</i> ( 422 )                                                |
| Effect of Short-term Viscous Magnetization on Remanence Measure-<br>ment.....                                                            |
| ..... <i>Xu Tong-chun</i> ( 435 )                                                                                                        |
| A Non-Tectonic Interpretation of Palaeomagnetic Data .....                                                                               |
| ..... <i>Xu Tong-chun</i> ( 441 )                                                                                                        |
| Revision of Carboniferous Magnetostratigraphy for British Isles .....                                                                    |

- .....*Xu Tong-chun D.H.Tarling* ( 450 )  
 Palaeomagnetic Study of Permian Rocks from Sichuan Emei Region  
 and Shanxi Taiyuan Region.....*Ma Xing-hua Zhang Zheng-kun* ( 465 )  
 Effects of Gravitational Body Force in the Process of Lithosphere  
 Subduction.....*Xu Tian-ming Liu Wen-zhong Chen Jing* ( 476 )

### Reviews

- The Development of Physical Model in Geophysical Science.....  
 .....*Wang Tie-nan Zhao Hong-ru Li Guo-zhi Guo Tie-shuan* ( 482 )  
 The Laboratory Analogue Modelling Method for Study on Electromag-  
 netic Induction Anomaly.....*Hu Wen-bao H.W.Dosso* ( 491 )  
 The Study on Earthquake Precursors by Experiments of Rock Mechanics  
 .....*Geng Nai-guang* ( 499 )  
 Progress in Field Observations and Laboratory Studies on Electro-  
 magnetic Waves Prior to Earthquakes in China.....*Mao Tong-en* ( 505 )

### Short Contributions

- The Fracturing Process of Jinan Gabbro with the Strain Rate Changing  
 from  $10^{-3}/s$  to  $10^{-2}/s$ .....*Zhang Lai-  
 feng Fu Zu-qiang Lai De-lun Yan Hong Yao Xiao-xin* ( 511 )  
 The Fracture Propagation during Hydraulic Fracturing—Determina-  
 tion of Minimum Horizontal Principal Stress from Shut-in Pressure  
 .....*Liu Jian-zhong Liang  
 Hai-qing Li Zi-qiang Cao Xin-ling Yu Jian-hua Xu Kun* ( 517 )  
 Measurement of Piezoelectric Modulus and Piezoelectric Character of  
 Rock.....*Jiang Mei Wang Xiu-kun Wang Yin-sheng* ( 522 )  
 Electromagnetic Emission in the Process of Fracture of Rocks.....  
 .....*Sun Zheng-jiang Wang Li-hua Chen Xian-jie* ( 526 )  
 Acoustic Emission of Fractured Marble due to Thermal Cracking.....  
 .....*Xi Dao-ying Xie Duan* ( 531 )  
 An Improved Design of Solenoid for Alternating Field Demagnetization  
 .....*Wei Qing-yun Cao Guan-yu* ( 533 )

# 关于高速夹层的地震模型实验\*

高世玉 周 勋 丁 山 赵鸿儒 刘宝诚

(国家地震局地球物理研究所, 北京)

(北京大学)

## 摘 要

用超声模型实验的方法, 研究了通过含高速夹层结构的弹性波性质。研究表明, 如果在低速度的介质内嵌入一高速夹层, 那么在弹性波记录中有可能展现丰富的信息(均匀波、非均匀波和PSP转换波等); 只有夹层厚度小于1/4主波长时, 才产生能够被观测到的非均匀波; PSP波的强度依赖于高速与低速介质的弹性参数对比, 在某些情况下, 它的振幅很大, 对不大于主波长的夹层厚度, 它的运动学特征与非均匀波很接近。并指出, 分析地球内部热状态和构造运动深部过程, 对于减小反演的非唯一性具有重要意义。

**关键词** 深地震测深, 高速夹层, 超声模型实验, 非均匀波, PSP转换波。

## 一、引 言

在某些地区的地壳内部或上地幔顶部, 往往存在高速层与低速层相穿插的叠层结构。由地震观测资料推断它们的几何构成与物质性质, 对探讨岩石圈的演化史具有重要意义。

由于叠层结构中的高速层或低速层一般较薄, 而且层之间还可能有物性状态的差异, 致使在揭示深部细结构的深地震测深记录剖面上, 出现不能用遵守射线定律的P波解释的震相。

为解释不符合射线定律的震相, 以往许多工作中都自然地引入非均匀波(inhomogeneous waves)的概念。如图1所示, 当弹性波由低速层I超临界入射到与高速层II的边界, 部分能量将作为非均匀波进入高速层, 其振幅 $A$ 随离开界面的垂直距离 $z$ 按指数律衰减, 即

$$A \sim \exp\left(-\frac{\omega}{c} \sqrt{1 - \frac{c^2}{\alpha_2^2}} z\right). \quad (1)$$

这里,  $\omega$  是波的角频率,  $c = \frac{\alpha_1}{\sin \gamma_1}$ ,  $\gamma_1$  为入射角,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  分别为层I与层II中的P波速度。

若高速层足够薄, 非均匀波可以在下部低速层II中继续传播, 这时也常被称为通道波(tunnel waves)。

Brekovskikh<sup>[1]</sup>和 Aki<sup>[2]</sup>从理论上阐述了非均匀波的存在; Richards<sup>[3]</sup>, Fuchs<sup>[4]</sup>和曾融生<sup>[5]</sup>的工作中, 广泛讨论了远震观测和爆破地震观测中的非均匀波。根据计算, 地球

\*地震学联合科学基金资助的课题。

本文1986年5月23日收到, 1987年12月11日收到修改稿。

内部的高速层在厚度不大于  $1/4$  地震主波长的情况下, 才能观测到它的通道波<sup>[4]</sup>。

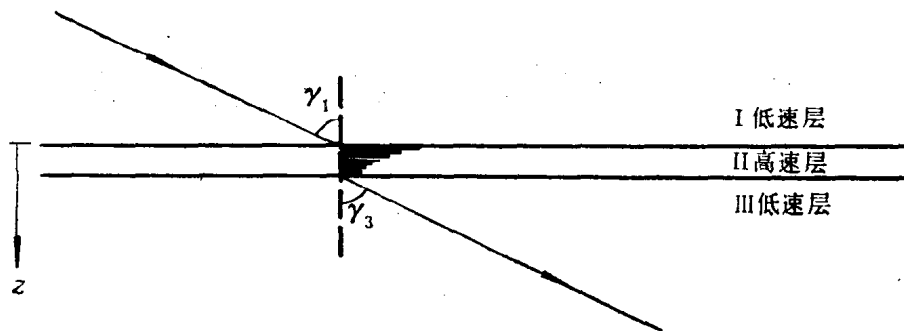


图 1 非均匀波传播示意图

但在有些地区的工作中发现, 如果将某些很强的续至波解释为非均匀波, 那么“高速层必须十分薄”的假设同来自这个高速层足够强的首波和反射波相矛盾, 如胡鸿翔<sup>[6]</sup>所讨论的资料, 看来非均匀波不是叠层结构特殊波场的唯一解释。

本文借助超声模型实验, 讨论了通过高速夹层结构的弹性波在波动起始时段的复杂性质, 对观测震相的准确分析判断, 与正确推断介质层的厚度及力学性质有机地相联系。

## 二、仪器及模型

实验中使用湘潭无线电厂生产的SYC-2型声波岩石参数测定仪; 接收的超声信号主频率为100kHz量级; 信号经瞬态波形采集器延迟, 由笔式记录器绘出波形。图2表示仪器系统方框图。部分图形由拍摄荧光屏上的波形显示得到。

所用换能器由锆钛酸铅压电陶瓷制成, 图3表示一个中心频率为240kHz的换能器在水中发射和接收的指向性。

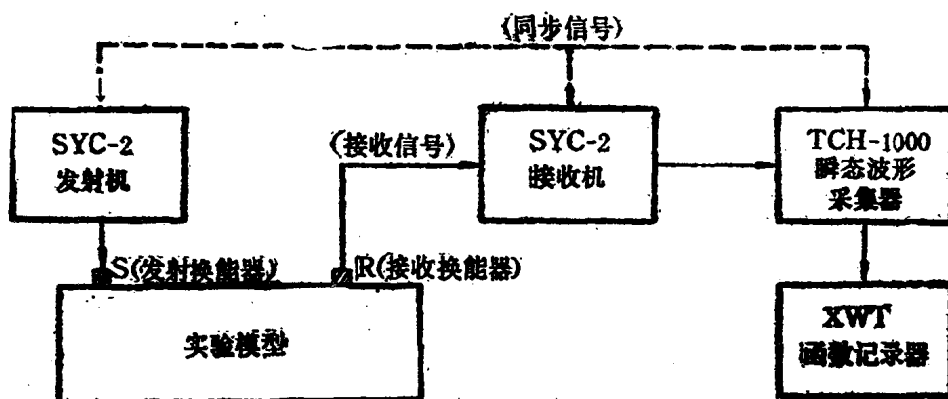


图 2 仪器系统方框图

用不同的固体、液体介质, 分别构成二维和三维模型。Oliver<sup>[7]</sup>指出, 若用薄板构成二维模型, 其纵波速度 $V_p$ 与拉梅常数 $\lambda, \mu$ 的关系可表述为 $V_p = \left[ \frac{4\mu(\lambda + \mu)}{\rho(\lambda + 2\mu)} \right]^{1/2}$ , 它略小于

三维纵波速度  $\alpha = \left( \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \right)^{1/2}$  ; 横波的二维速度  $V_s$  和三维横波速度  $\beta$  是等同的, 即  $V_s = \beta = \left( \frac{\mu}{\rho} \right)^{1/2}$ 。表1给出了模型介质的声学常数。

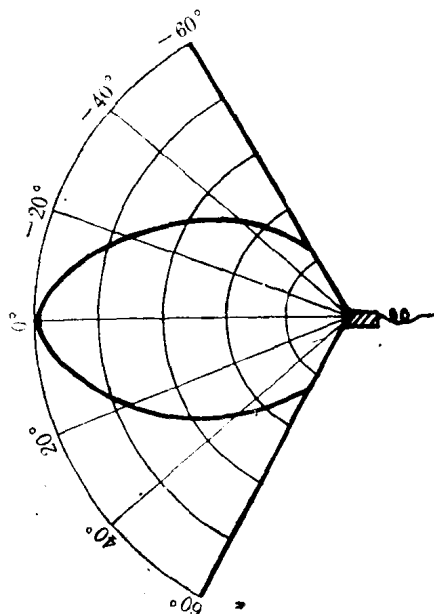


图 3 换能器的指向性

表 1 模型介质的声学常数

| 模型材料          | 速 度                 |                        |                       | 密 度<br>$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|---------------|---------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------------|
|               | $V_P$ (cm/ $\mu$ s) | $\alpha$ (cm/ $\mu$ s) | $\beta$ (cm/ $\mu$ s) |                                    |
| 有机玻璃          | 0.228               | 0.270                  | 0.135                 | 1.19                               |
| 胶 木           | 0.356               | —                      | 0.170                 | 1.27                               |
| 水             | —                   | 0.147                  | —                     | 1.00                               |
| 甘 油           | —                   | 0.194                  | —                     | 1.26                               |
| 环氧树脂          | 0.216               | 0.250                  | 0.104                 | 1.15                               |
| 环氧树脂<br>胶合石英砂 | 0.286               | 0.345                  | 0.117                 | 1.78                               |

本文研究了在低速介质中嵌入高速夹层的情况, 夹层厚度在0.03—2倍视波长范围内改变。由于我们特别关注岩石圈内部的某些低速层是否可能为 $\mu$ 值很小的软弱层, 故多数实验用水做低速介质, 水中 $\mu=0$ , 是低速层具有流动性的极端情况。

### 三、通过高速夹层的下行波

#### 1. 高速夹层对弹性波能量的分解

在均匀介质中的下行波只有直达波。当一水平的高速夹层嵌入发射点与接收点的中间位置, 弹性波能量将分别沿不同途径传播到达接收点, 形成记录图上的相应波列。

图4表示在二维固体模型上的观测。模型由0.6cm厚的胶木和有机玻璃板构成。低速层的层厚 $H_1=5.8\text{cm}$  ( $1.16\lambda_L$ )， $H_3=7.6\text{cm}$  ( $1.52\lambda_L$ )，高速层的层厚 $H_2$ 分别为0.6cm ( $0.12\lambda_L$ )，2.5cm ( $0.50\lambda_L$ )和4.0cm ( $0.80\lambda_L$ )。本文 $\lambda_L$ 表示在低速层中波的主波长。对二维固体模型，观测的 $\lambda_L$ 为5.0cm。

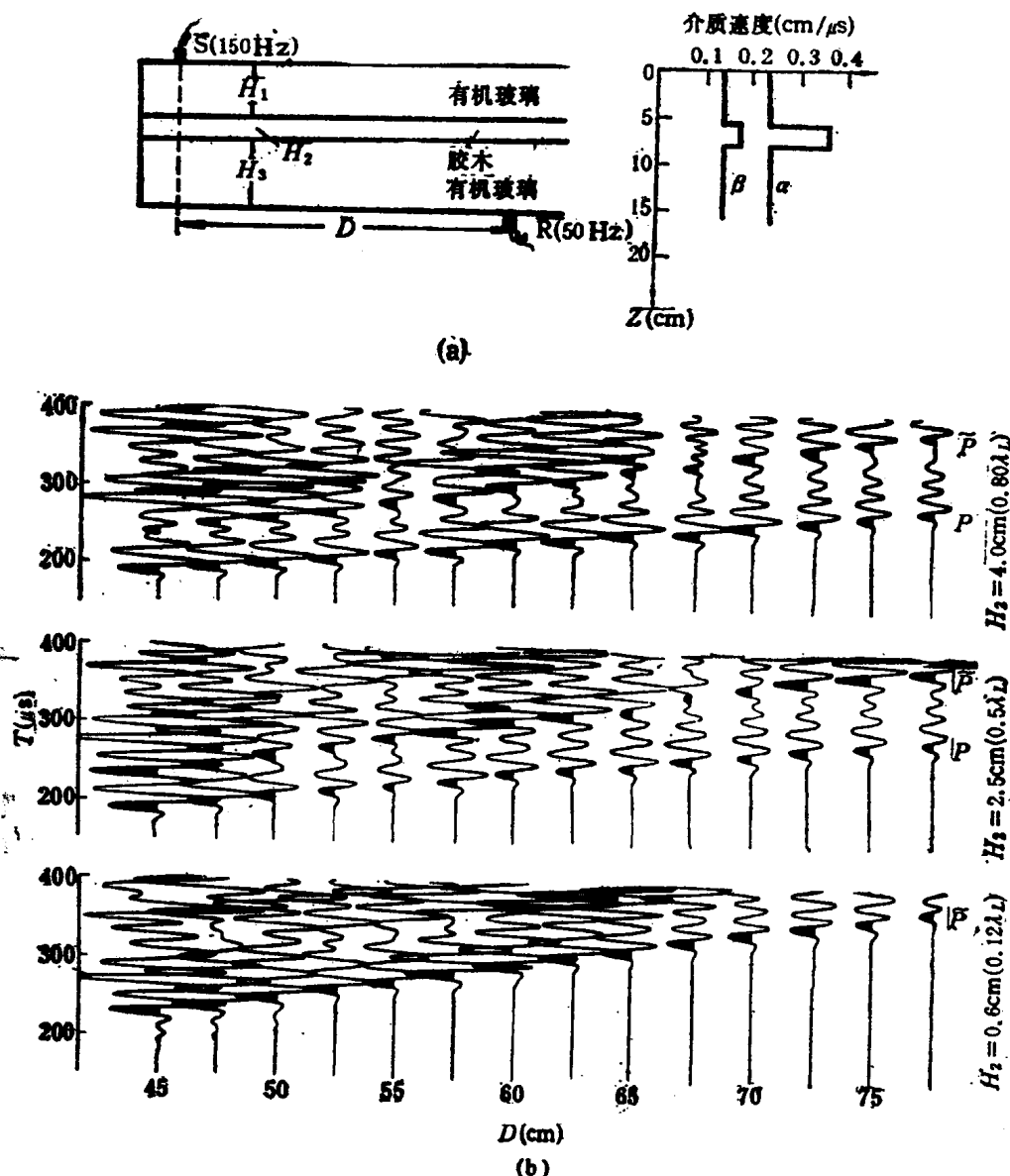


图4 在二维固体模型上观测下行波

(a) 实验模型： $S(150\text{kHz})$ ——发射换能器（中心频率150kHz）， $R(50\text{kHz})$ ——接收换能器（中心频率50kHz），以下各图表示法同；(b) 下行波记录图。

图5表示对三维模型的观测。水为低速介质，用有机玻璃板作为高速层。发射与接收换能器相向倾斜约 $45^\circ$ ，高速层厚度 $H_2$ 分别为0.1cm ( $0.11\lambda_L$ )和2.0cm ( $2.22\lambda_L$ )。对三维模型，观测的 $\lambda_L$ 为0.9cm。

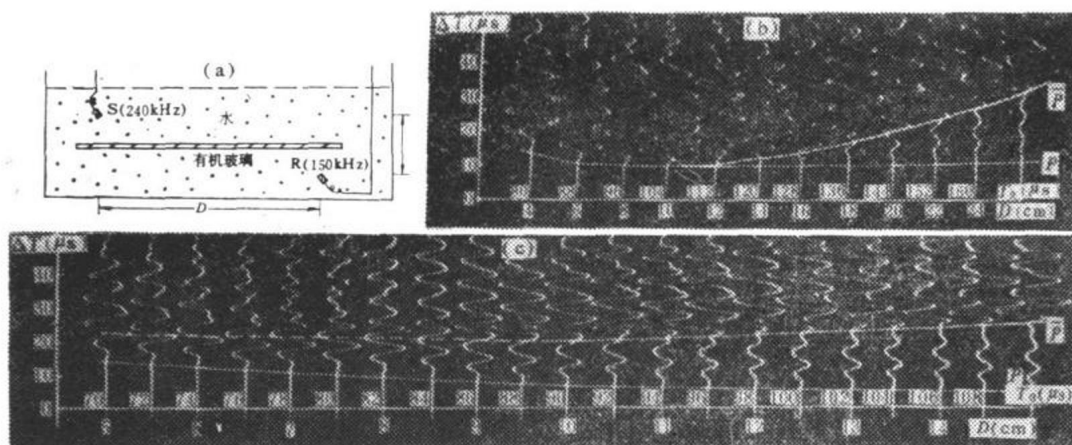


图 5 在三维液体-固体模型上观测下行波  
(a) 实验模型; (b) 下行波记录图 ( $H_2=0.1\text{cm}$ ,  $T=T_0+\Delta T$ );  
(c) 下行波记录图 ( $H_2=2.0\text{cm}$ ,  $T=T_0+\Delta T$ )。

由图4和图5可见, 在通过高速夹层下行波中, 都有视速度分别趋近高速层和低速层  $P$  波速度的初至和续至, 本文分别用  $P$  和  $\tilde{P}$  表示。 $P$  和  $\tilde{P}$  的相对强度与高速层的厚度  $H_2$  有关。对很薄的高速层, 远距离上观测不到初至  $P$ , 如图4b中  $H_2=0.6\text{cm}$  的情况。

## 2. 初至波 $P$ 和续至波 $\tilde{P}$ 的性质

对所有模型, 初至  $P$  的时距关系符合斯内尔定律:

$$\begin{aligned} T &= \frac{H_1}{\alpha_1 \cdot \cos \gamma_1} + \frac{H_2}{\alpha_2 \cdot \cos \gamma_2} + \frac{H_3}{\alpha_3 \cdot \cos \gamma_3}, \\ D &= H_1 \tan \gamma_1 + H_2 \tan \gamma_2 + H_3 \tan \gamma_3, \\ \frac{\sin \gamma_1}{\alpha_1} &= \frac{\sin \gamma_2}{\alpha_2} = \frac{\sin \gamma_3}{\alpha_3}. \end{aligned} \quad (2)$$

本文中  $H_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  和  $\gamma_i$  分别表示第  $i$  层介质的厚度、纵波速度、横波速度和射线与铅垂方向的夹角。

若高速层很薄, 在较远距离上接收的下行波初至实际上叠加了多次反射, 如图5所示,  $H_2=0.1\text{cm}$  的情况。为了区别于非均匀波, 本文统称遵守斯内尔定律的波为均匀波。这里  $P$  为均匀折射波。

下面着重对续至波  $\tilde{P}$  进行讨论。

图6表示对不同高速层厚度观测的下行波。实验模型与图5a相同, 只是将两换能器的轴向改为水平取向。由于如图3表示的换能器明显的指向性, 水平取向时便压制了射线更接近垂直向的均匀折射波的记录, 以便于对  $\tilde{P}$  的到时和振幅进行较精确测定。

由图6可见, 将两换能器的位置固定, 高速层的厚度  $H_2$  由0逐渐增加至  $2.0\text{cm}$ , 波的初动方向没有变化, 到时  $T$  连续而单调地增大, 故很容易将其判断为某一特定震相。但在实验精度范围内, 观测走时曲线可用非均匀波的近似时距表达式



$$\begin{aligned}
 T &= \frac{H_1}{\alpha_1 \cdot \cos \gamma_1} + \frac{H_2}{\alpha_2} + \frac{H_3}{\alpha_3 \cdot \cos \gamma_3}, \\
 D &= H_1 \tan \gamma_1 + H_3 \tan \gamma_3, \\
 \frac{\sin \gamma_1}{\alpha_1} &= \frac{\sin \gamma_3}{\alpha_3},
 \end{aligned} \quad (3)$$

和PSP转换波的时距表达式

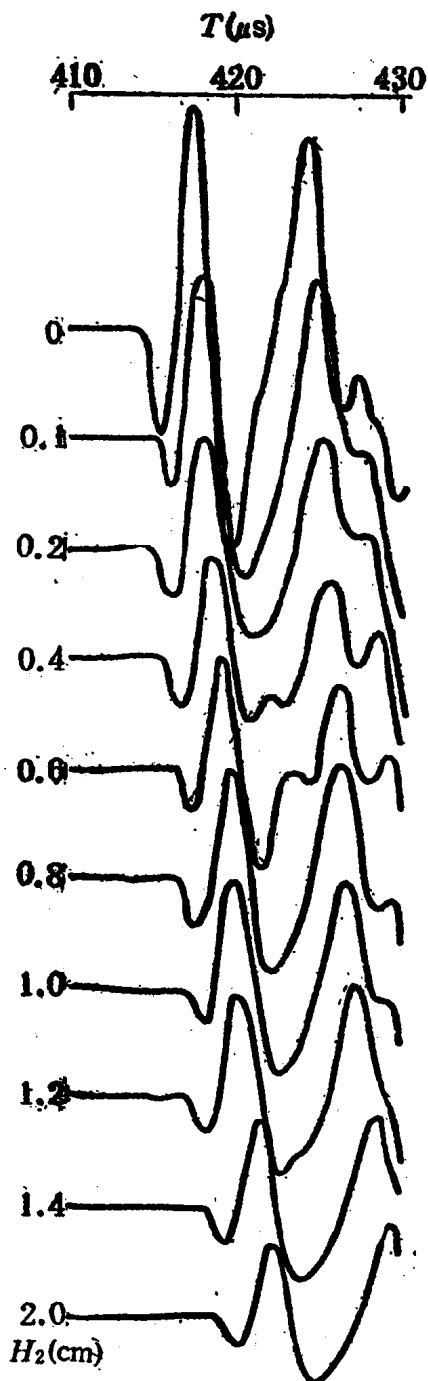


图6 对不同厚度高速层观测的下行波 $\tilde{P}$

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{H_1}{\alpha_1 \cdot \cos \gamma_1} + \frac{H_2}{\beta_2 \cdot \cos \gamma_2} + \frac{H_3}{\alpha_3 \cdot \cos \gamma_3}, \\
 D &= H_1 \tan \gamma_1 + H_2 \tan \gamma_2 + H_3 \tan \gamma_3, \\
 \frac{\sin \gamma_1}{\alpha_1} &= \frac{\sin \gamma_2}{\beta_2} = \frac{\sin \gamma_3}{\alpha_3}
 \end{aligned} \quad (4)$$

来拟合。仅从走时和初动判断不了波的性质。

图7给出 $\tilde{P}$ 的振幅随高速层厚度的变化曲线。观测时两换能器的水平距离 $D$ 为60cm,垂直距离为5cm。图7a表示用有机玻璃做高速层水平置于两换能器中间测得的振幅 $A$ 与没有高速层时的振幅 $A_0$ 之比。本文振幅取波的第一个谷至第一个峰的幅度值。图中以 $D$ 为参数的曲线一致地呈现开始迅速下降,而后稍微回升再缓慢衰减的特点。它不符合(1)式表达的非均匀波振幅按指数衰减的规律,也不符合图7c中Ивакин<sup>[8]</sup>由实验给出的PSP转换波振幅曲线特点,而是表现为两类曲线的叠加。如果以虚线I与虚线II分别代表非均匀波与PSP转换波,由于缺少对更薄高速层的实验数据,虚线I给出略高于非均匀波实际可能的值,而虚线II给出略低于PSP转换波实际可能的值。

图7b给出用环氧树脂层及塑料薄层取代上述有机玻璃层得到的振幅曲线并与之对比。塑料的 $P$ 波速度仅为 $0.12\text{cm}/\mu\text{s}$ ,按指数律迅速下降的曲线反映了非弹性衰减性质。而对应环氧树脂的曲线,也可表示为非均匀波(点线I')与PSP转换波(点线II')两类曲线的叠加,由于有更薄的高速层数据,实验结果有较高的可信度。

这样,图6中视速度趋近低速介质 $P$ 波速度的波动 $\tilde{P}$ 具有很不同的本质,对应不同的高速层厚度,它分别是非均匀波、PSP转换波或两者的相长叠加。

对应 $1/4$ 主波长的高速层厚度,即 $H_2/\lambda_L=0.25$ 时,点线I'的值约为0.1;虚线II的值虽约为0.3,但按照前述,它大于非均匀波实际可能的值。实验与计算结论相符合:对小于 $1/4$ 主波长厚度的高速层,产生的非均匀

波才能够被观测。

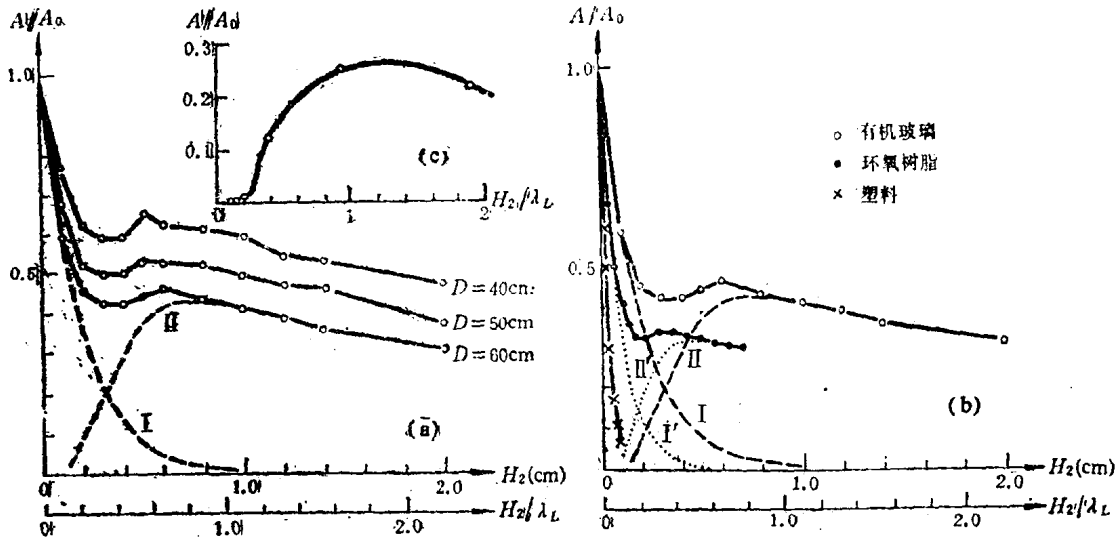


图 7 振幅随高速层厚度的变化

(a) 不同距离的振幅曲线; (b) 不同材料的振幅曲线; (c) PSP 振幅曲线 (Ивахин, 1956)。

用塑料薄膜与水隔开的甘油做高速层时, 由于没有转换波,  $\tilde{P}$  为单纯的非均匀波, 对应  $H_2 = 0.6\text{cm}$ , 测得  $A/A_0 \approx 0.05$ , 与图 7 中曲线 I 给出的量级一致, 因而也验证了关于图 7 中观测曲线的分析。

对图 4 表示的二维固体模型,  $\tilde{P}$  的振幅测量受初至  $P$  的干扰。通过对不同距离  $D$  观测的  $A/A_0$  值取平均, 基本上可消除初至的影响, 所得结果见图 8 曲线 I。如同对三维模型实验结果的分析, 根据振幅曲线的特点, 推断在二维模型上观测的很强的续至波  $\tilde{P}$  也分别为非均匀波、PSP 转换波或其叠加。不应仅根据走时特征将较厚高速层情况下的  $\tilde{P}$  误认为非均匀波。

用环氧树脂胶合石英砂取代图 4 中的胶木做高速层, 得到图 8 中曲线 II。对应较厚的层, 曲线 II 比曲线 I 低得多。可见对不同力学性质的材料, PSP 转换波的强度可有很大差别。

### 3. 讨论

实验表明, 固体高速夹层往往存在 PSP 转换波, 它与非均匀波不易区别。

介质边界上的纵波速度  $\alpha$ 、横波速度  $\beta$  和密度  $\rho$  的对比, 确定了超临界反射与转换的能量比, 其中介质的泊松比具有决定性的意义, 在物性状态不同的强间断面上, 有很强的转换发生。

Tatham<sup>[9]</sup> 对给定的海水-海底沉积界面, 用平面波公式计算了  $P-S-P$  两次转换的系数, 见图 9。它表明, 对  $35-80^\circ$  的入射角, 超临界入射的能量大部分在界面上转换, 而不是全反射了。本文的实验同 Tatham 的计算一致表明, 对某种参数对比的夹层结构, PSP 波的存在不容忽视。