

天水地震区深源岩石在 1000MPa 高压下的状态参数特征

谢原定 邵顺妹 周建国

(国家地震局兰州地震研究所, 兰州 730000)

摘要 本文重点介绍了天水地震区产出的深源岩石在 1000MPa 高压下, 测得的岩石的密度、纵横波速度和计算的波阻抗随压力的变化。发现不同时期产出的不同种类的深源岩石, 它们的高压状态参数值变化范围很窄。压力上升到 400MPa 以后, 岩石的密度、纵横波速度的变化很小, 几乎观测不到其变化。本文简单地讨论了岩石在 400MPa 以上高压状态下, 上述参数值变化不大的原因, 并对 400MPa 压力下取得的高压状态参数值做了实用误差分析, 结果表明: 在不考虑温度情况下, 该压力下获得的状态参数值在实际应用中完全可以代替更高压力状态下(400MPa—2000MPa)的测量值。因此 400MPa 特征压力下取得的岩石状态参数值对人工地震测深解释和重力解释仍是有参考意义的。

关键词: 深源岩石; 高压状态参数; 岩石压力试验

鉴于当前地球物理勘探中的观测误差和解释中的选取误差直接影响其解释结果。为了深入研究天水地震区的深部地壳结构, 提高天水地震区地球物理综合解释质量。我们从天水地震区实地采集了一些深源岩石标本, 对其岩矿和化学成份做了鉴定和分析, 并测得了岩样在 1000MPa 高压状态下, 它们的密度、弹性波速度随压力的变化, 用所测结果计算了高压下岩石的波阻抗。

1 天水地震区深源岩石标本的岩矿特征

这里所指的深源岩石, 主要指幔源型的超基性、基性岩。从实地采集到的岩样, 通过手标本和薄片的鉴定: 武山鸳鸯镇获得的岩样定名为变纯橄榄蛇纹岩; 礼县马泉北获得的岩样定名为方沸石橄榄玄武岩; 清水县城南获得的岩样定名为斜长角闪石; 天水市利桥获得的岩样定名为细碧岩。它们所在的构造单元、构造部位、样品的岩性特征和化学成份, 分别见图 1⁽¹⁾、表 1 和表 2。

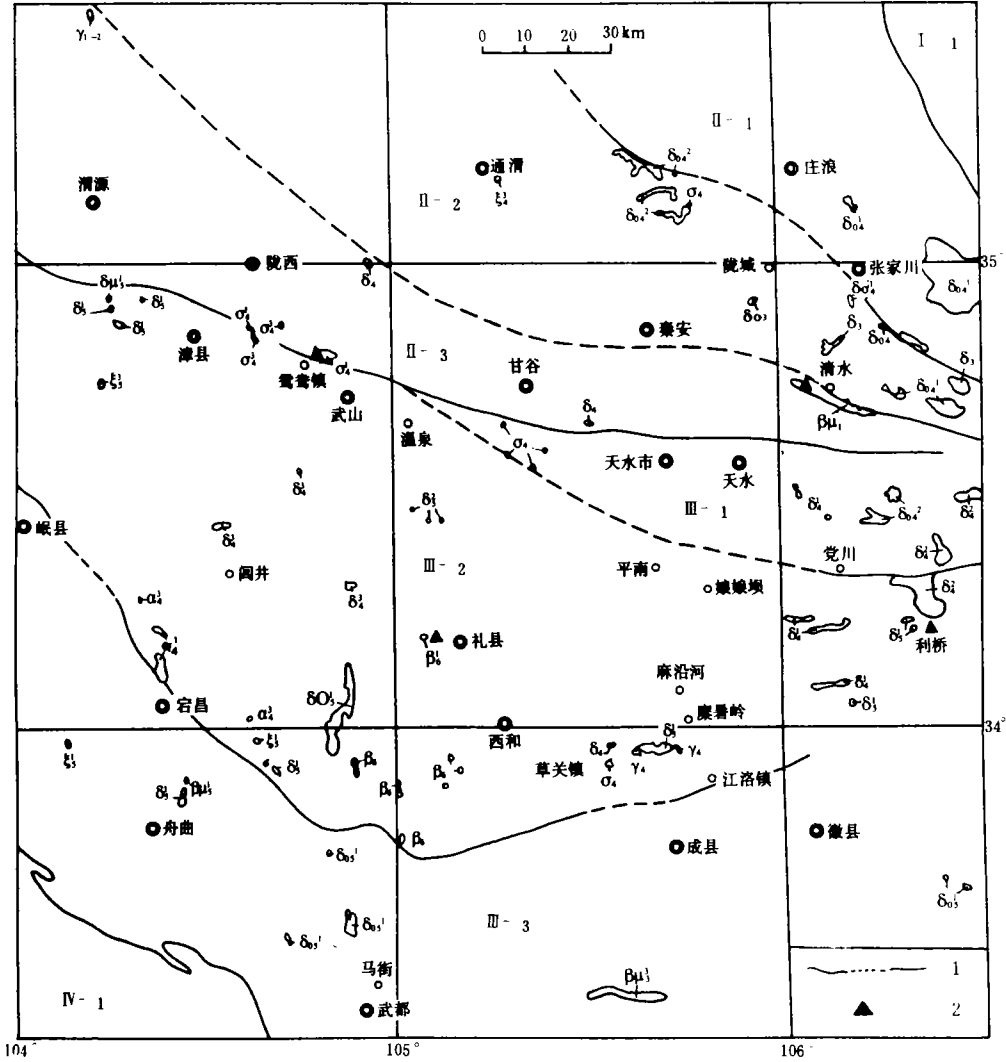


图 1 天水地震区深源岩石与大地构造分布图

1. 构造单元分界线; 2. 采样点及编号; I-1: 鄂尔多斯台缘褶皱带;
 I-1: 北祁连优地槽褶皱带; I-2: 祁连中间隆起带; I-3: 南祁连褶皱带;
 II-1: 北秦岭加里东褶皱带; II-2: 礼县柞水华力西冒地槽褶皱带;
 II-3: 南秦岭冒地槽褶皱带; IV-1: 巴颜喀拉褶皱带; r_{1-2} : 太古代一元古代
 基性、超基性岩; β_{1-5} : 古生代早期基性、超基性岩; σ_{1-3} : 古生代晚期基性、
 超基性岩; δ_{1-3} : 中生代早期基性、超基性岩; σ_3 : 中生代晚期基性、超基性岩; δ_1^1 、
 ζ_5^1 、 δ_{05}^1 : 中生代早期中性岩浆岩; δ_1^3 、 ζ_4^3 、 δ_4^2 、 δ_04^2 、 δ_1^1 、 δ_04^1 : 古生代晚期中性岩浆
 岩; β_6 新生代火山岩; α_1^3 、 ζ_1^1 : 古生代晚期火山岩

Fig. 1 The distribution of deep-seated rocks and earth structure in Tianshui earthquake region.

表1 天水地震区深源岩石岩性特征

| 岩石标本产地及编号 | 岩性 | 代号 | 时代 | 构造单元 | 结构 | 构造 | 矿物成分及含量 | 岩相 |
|-------------|----------|--------------|--------|------|-----------------|-------|--|-----|
| 甘肃武山县鸳鸯镇 01 | 变纯橄榄蛇纹岩 | σ_1^3 | 晚古生代晚期 | I-3 | 变晶结构 局部网状结构 | 块状构造 | 蛇纹石含量 80--90%，磁铁矿含量 5-10% | 侵入相 |
| 甘肃礼县马泉 02 | 方沸石橄辉玄武岩 | β_6 | 新生代 | II-2 | 斑状结构 杏仁结构 | 杏仁状构造 | 单斜辉石含量 50--55%，方沸石含量 20--30%， 铁矿磁铁矿含量约 10--15%， 铁橄榄石含量 5--8% | 喷发相 |
| 甘肃清水县 03 | 斜长角闪岩 | β_{13} | 早古生代 | I-3 | 等轴粒状结构 | 块状构造 | 斜长石含量 40--45%，角闪石含量 40--50% | 侵入相 |
| 甘肃天水利桥 04 | 细碧岩 | σ_5^3 | 中生代晚期 | II-2 | 网状结构 全自形粒状结构 | 块状构造 | 钠长石含量 40--50%，绿泥石含量 10--15%， 碳酸盐含量 10--20%，沸石含量 5--10%， 磁铁矿含量 2% | 侵入相 |

注：矿物标本与高压状态下参数测量试件使用同一块岩石标本

表2 岩石标本化学成份

| 岩石标本名称及编号 | 产有 | 化 学 分 析 (%) | | | | | | | | | | |
|-------------|----------|-------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|-------|------|
| | | SiO | FeO | AlO | CaO | MgO | PO | MnO | TiO | KO | NaO | 灼失 |
| 变纯橄榄蛇纹岩 01 | 甘肃武山县鸳鸯镇 | 38.86 | 4.84 | 0.65 | 0.75 | 38.85 | | 0.067 | 0.01 | 0.036 | 0.033 | |
| 方沸石橄辉玄武岩 02 | 甘肃礼县马泉 | 42.30 | 12.37 | 10.34 | 12.23 | 11.02 | 0.82 | 0.12 | 2.91 | 3.20 | 2.45 | 2.26 |
| 斜长角闪岩 03 | 甘肃清水县 | 50.12 | 10.77 | 15.29 | 10.12 | 6.37 | 0.13 | 0.17 | 0.01 | 0.60 | 1.85 | 3.00 |
| 细碧岩 04 | 甘肃天水利桥 | 49.33 | 8.98 | 14.14 | 7.87 | 7.17 | 0.21 | 0.17 | 1.01 | 0.75 | 1.85 | 7.94 |

2 天水地震区深源岩石在 1000MPa 高压下的密度、纵横波速度、波阻抗随压力的变化特征

岩石样品的实验结果，均由国家地震局地球物理研究所实验室提供。实验采用的设备和方法见文献[2]。岩石试件大小，均加工成直径为 Φ_{25} 、高 55mm 的园柱体，上下两端面偏离平行的误差小于 0.01mm。

实验测得了四种岩石样品在升压过程中压力达到 1000MPa 的体应变 ϵ_v 、纵波速度 V_p 和横波速度 V_s ，在此基础上计算出了不同压力下的密度 ρ 、纵波阻抗 ρV_p 和横波阻抗 ρV_s ，其数值均列于表 3。它们随压力的变化，由图 2 至图 7 曲线给出。

表3 不同压力下的体应变 ϵ_v 、密度 ρ 、纵横波速度 V_p 、 V_s 和波阻抗 ρV_p 、 ρV_s

| 压力 1000MPa | 参数 | 武山鸳鸯镇变纯 橄榄蛇纹岩 | 礼县北京方沸石 橄榄玄武岩 | 清水县斜长角 闪岩 | 天水利桥细 碧岩 |
|---------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------|
| | | 01 | 02 | 03 | 04 |
| 0 | ϵ_v | ---- | ---- | ---- | ---- |
| | ρ | 2.57 | 3.07 | 2.79 | 2.98 |
| | V_p | 6.34 | 6.41 | 5.93 | 6.59 |
| | ρV_p | 1.69 | 1.97 | 1.65 | 1.96 |
| | V_s | 4.15 | 4.24 | 3.59 | 4.17 |
| | ρV_s | 1.11 | 1.30 | 1.00 | 1.24 |
| 50 | ϵ_v | 0.92 | 0.74 | 0.92 | 0.83 |
| | ρ | 2.672 | 3.072 | 2.793 | 2.982 |
| | V_p | 6.42 | 6.48 | 5.99 | 6.75 |
| | ρV_p | 1.72 | 1.99 | 1.67 | 2.01 |
| | V_s | 4.28 | 4.30 | 3.69 | 4.23 |
| | ρV_s | 1.14 | 1.32 | 1.03 | 1.26 |
| 100 | ϵ_v | 1.85 | 1.47 | 1.75 | 1.56 |
| | ρ | 2.675 | 3.075 | 2.795 | 2.985 |
| | V_p | 6.49 | 6.56 | 6.05 | 6.91 |
| | ρV_p | 1.74 | 2.02 | 1.69 | 2.06 |
| | V_s | 4.38 | 4.37 | 3.76 | 4.36 |
| | ρV_s | 1.17 | 1.34 | 1.05 | 1.28 |
| 200 | ϵ_v | 3.50 | 2.85 | 3.41 | 3.03 |
| | ρ | 2.679 | 3.079 | 2.80 | 2.989 |
| | V_p | 6.57 | 6.64 | 6.12 | 7.00 |
| | ρV_p | 1.76 | 2.04 | 1.71 | 2.09 |
| | V_s | 4.45 | 4.44 | 3.81 | 4.36 |
| | ρV_s | 1.19 | 1.37 | 1.07 | 1.30 |
| 300 | ϵ_v | 5.16 | 4.22 | 4.97 | 4.41 |
| | ρ | 2.684 | 3.083 | 2.804 | 2.993 |
| | V_p | 6.65 | 6.72 | 6.19 | 7.09 |
| | ρV_p | 1.78 | 2.07 | 1.73 | 2.12 |
| | V_s | 4.60 | 4.52 | 3.87 | 4.43 |
| | ρV_s | 1.23 | 1.39 | 1.09 | 1.32 |
| 400 | ϵ_v | 6.82 | 5.51 | 6.54 | 5.69 |
| | ρ | 2.688 | 3.087 | 2.808 | 2.997 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.26 | 7.18 |
| | ρV_p | 1.80 | 2.10 | 1.76 | 2.15 |
| | V_s | 4.60 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.24 | 1.39 | 1.10 | 1.34 |
| 500 | ϵ_v | 8.48 | 6.79 | 8.10 | 6.98 |
| | ρ | 2.693 | 3.091 | 2.813 | 3.001 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.27 |
| | ρV_p | 1.81 | 2.10 | 1.78 | 2.18 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.26 | 1.41 | 1.10 | 1.34 |
| 600 | ϵ_v | 9.95 | 8.26 | 9.66 | 8.26 |
| | ρ | 2.697 | 3.096 | 2.817 | 3.005 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.27 |
| | ρV_p | 1.82 | 2.11 | 1.78 | 2.18 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.26 | 1.41 | 1.10 | 1.34 |
| 700 | ϵ_v | 11.42 | 9.54 | 11.23 | 9.45 |
| | ρ | 2.701 | 3.10 | 2.821 | 3.008 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.27 |
| | ρV_p | 5.82 | 2.11 | 1.79 | 2.19 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.26 | 1.41 | 1.11 | 1.34 |
| 800 | ϵ_v | 12.89 | 10.82 | 12.79 | 10.69 |
| | ρ | 2.705 | 3.104 | 2.826 | 3.012 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.27 |
| | ρV_p | 1.82 | 2.11 | 1.79 | 2.19 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.27 | 1.41 | 1.11 | 1.34 |

| 压力 1000MPa | 参数 | 武山鸳鸯镇变纯 橄榄蛇纹岩 | 礼县北泉方沸石 橄榄玄武岩 | 清水县斜长角 闪岩 | 天水利桥细 碧岩 |
|---------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------|
| | | 01 | 02 | 03 | 04 |
| 900 | ϵ_v | 14.36 | 12.11 | 14.35 | 11.82 |
| | ρ | 2.709 | 3.108 | 2.831 | 3.016 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.72 |
| | ρV_p | 1.82 | 2.11 | 1.79 | 2.19 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.27 | 1.41 | 1.11 | 1.35 |
| 1000 | ϵ_v | 15.83 | 13.39 | 15.92 | 13.01 |
| | ρ | 2.713 | 3.112 | 2.835 | 3.019 |
| | V_p | 6.73 | 6.80 | 6.33 | 7.27 |
| | ρV_p | 1.83 | 2.12 | 1.79 | 2.22 |
| | V_s | 4.68 | 4.55 | 3.92 | 4.46 |
| | ρV_s | 1.27 | 1.42 | 1.11 | 1.35 |

注：各参数的单位分别为： $\epsilon_v(\times 10^{-3})$ ； $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ ； $V_p(\text{km}/\text{s})$ ； $\rho V_p(\times 10^6\text{g}/\text{cm}^2\text{s})$ ； $V_s(\text{km}/\text{s})$ ； $\rho V_s(\times 10^6\text{g}/\text{cm}^2\text{s})$

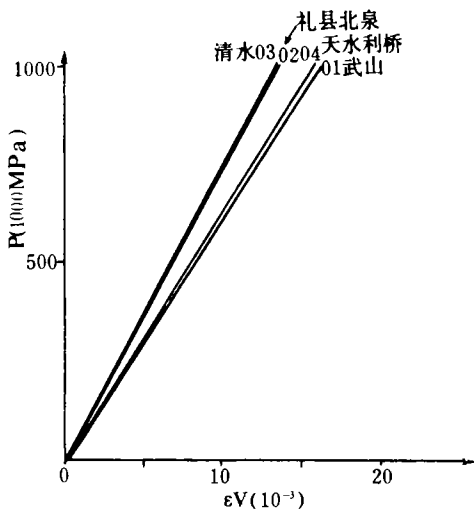


图 2 岩石的体应变曲线
Fig. 2 Rock strain curve.

从图 2 上可以看出：岩石的体应变随压力的增加都呈一条直线。压力在较低时，岩石随压力变化的曲线弯曲都不明显。这和国内华北地区和西北其它地区所测深源岩石的结果接近^(2,5,6)。表明这类岩石的裂纹孔隙度很低，裂纹闭合压力很小。从图 5 上可以看出，岩石的密度随压力的变化不大，几乎呈一条平行于压力轴的直线。这和上述所测体应变曲线弯曲很小，反映岩石裂纹孔隙度低，裂纹闭合压力小是一致的。从图 4 至图 5 可以看出。几种岩石在加压的初始阶段，少于 400MPa 时，岩石的纵波速度 V_p 和横波速度 V_s 随压力的上升，波速有所增加，而当压力上升到 400MPa 以后，波速随压力的增加就很快趋于稳定。根据国家地震局地球物理所以往类似的实验结果分析，这种稳定现象是

由于 400MPa 以后，波速随压力变化的速率太低，而目前波速测量的精度在 400MPa—1000MPa 压力范围内难以测出这种变化。若要测出这种变化，认为还需要更高精度的设备，把由 1000MPa 扩展到几个 1000MPa 去测试，才能测得这种变化。Critensen 曾经在 3000MPa 压力下实测到波速在岩石内的变化速率为 $0.01\text{km}/\text{s} \cdot 100\text{MPa}^{(3)}$ 。即压力每上升 100MPa，波速仅增加 1/100。

另外从图 3 至图 7 还可以看出。岩石的密度、波速和波阻抗随压力的变化并不是完全成正变关系。实际测得：有的岩石密度大的，纵波速度反而小；岩石密度小的，纵波速度反而大。纵波速度大的

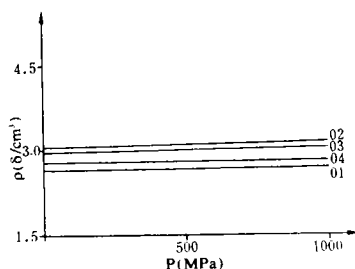


图 3 不同压力下岩石的密度
Fig. 3 Rock density under different pressures.

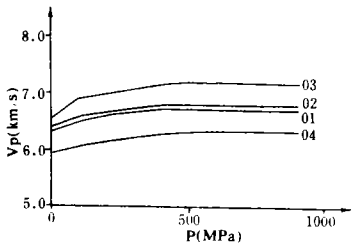


图 4 不同压力下岩石的纵波速度

Fig. 4 P wave speed under different pressures.

岩石,不一定横波速度大;纵波速度小的,不一定横波速度小。波阻抗也一样。这表明岩石密度的大小并不是弹性波速度和波阻抗大小的唯一决定因素。据 D. Shimosuru 的研究^[4]:岩石的孔隙度、含水量和晶粒指向性等因素都对波速有较大的影响。因此不同压力下的波速值最好是实际测量,而不能简单地依赖于所测岩石的密度和弹性模量值去计算。不同压力下的波阻抗值的计算值也一样,一定要建立在密度和波速实测值的基础上进行计算,这样所得的波速和波阻抗值才具有岩石产出地区的代表性。从图 6 至图 7 还可以看出:按上述实测岩石密度和弹性波速度计算的波阻抗随压力的变化,4 种深源岩石比较接近,反应这 4 种深源岩石的界面速度比较接近。因此用这个特征可以区分天水

地震区地壳内的深源岩石和非深源岩石的界面,进而得到深源岩石的埋藏深度。

3 讨论

在人工地震测深解释中,一般认为界面埋深的误差,主要由各种波的到时测定上覆层以及界面速度的不准所引起。据文献^[8]提出:根据以往的工作估计,象 Pg 波到时的测定误差 < 0.02s。上覆层平均速度的选取误差 < 0.2km/s,界面速度的选取误差 < 0.02km/s,这三项误差可以造成界面埋深的累计误差 0.5km 左右。其它 P_n ; P_m ; P_2' ; P_3' ; P_4' ; P_m' 诸波同样也会有类似的误差。按照 Cristensen 实验室测定波速在岩石内的变化率 $0.01\text{km/s} \cdot 100\text{MPa}$ 推算,压力由 400MPa 升到 3000MPa,其波速累计增长值不过是 0.26km/s,比上述

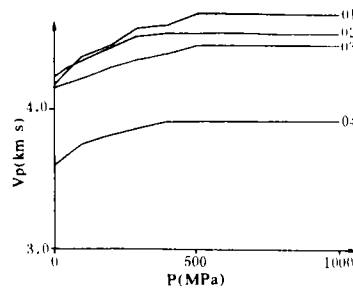


图 5 不同压力下岩石的横波速度

Fig. 5 S wave speed under different pressures.

三项误差之和还少一个系数。因此在不考虑温度条件下,用 400MPa 状态下取得的波速值和计算的波阻抗完全可以代替更高压力状态下的测量值去解释莫霍面上的地壳结构。

为了研究天水地震区高压状态下深源岩石的测定结果,我们还收集了国内外其它地区的深源岩石的测定结果与其比较,发现天水地震区测量的深源岩石的波速比我国华北、西北其它地区测量的结果普遍偏高,见表 4^[2,5,6]。而且样品测量值的变化范围窄。比美国大陆测得的深源岩石结果也要偏高,见表 5^[7]和表 6^[7]。

这表明构造发展史不同的构造地区产出的深源岩石,

实验测得的高压状态参数值是不同的。因此在使用各构造地区深源岩石的高压状态参数值时,彼此不能兼用,只有测得实地采集的标本而且构造发展史相同的同类岩性,在做深部地

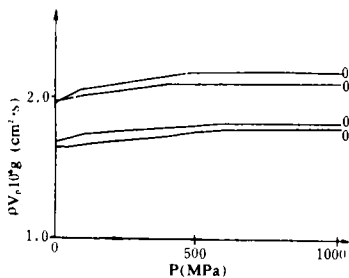


图 6 不同压力下岩石的纵波阻抗

Fig. 6 P wave resistance under different pressures.

壳结构和地质解释时才具有可比性。

4 结论

(1)天水地震区的深源岩石的测试结果表明:深源岩石加压到 400MPa 以后,岩石的密度和波速的变化率很小,加压到 3000MPa 推算的波速增长值仍比地震波到时的测定误差、上覆层平均速度的选取误差、界面速度的选取误差之和少一个系数。因此采用 400MPa 围压下测得的岩石状态参数值,用来解释地表至莫霍面深度上的地壳结构是可行的。

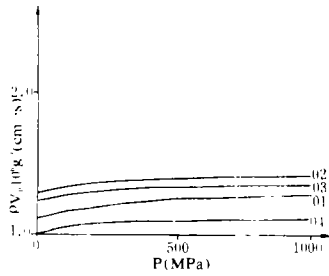


图 7 不同压力下岩石的横波阻抗
Fig. 7 S wave resistance under different pressures.

表 4 中国大陆岩浆岩不同压力下的体应变、密度、纵横波速度和波阻抗

| 压力 1000MPa | 参数 | 金蛇 纹川岩 | 阿山布蛇 尔依拉纹 金吞克岩 | 张墩 家榄口岩 | 张玄 家武口岩 | 宣玄 武化岩 | 济辉 长南岩 | 华辉 长县岩 | 阿山尔辉 尔秀汗长 金沙吉岩 | 宣云长 化母 黑闪岩 | 宣石 化闪岩 辉长 | 华花 岗阴岩 | 天里岗 山坤 巴花岩 |
|---------------|--------------|-----------|----------------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|----------------------|------------------|-----------------|-----------|------------------|
| 0 | ϵ_v | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- | ---- |
| | ρ | 2.65 | 2.63 | 3.27 | 3.12 | 2.82 | 3.04 | 3.02 | 2.91 | 2.96 | 2.75 | 2.63 | 2.61 |
| | V_p | 5.97 | 5.91 | 6.11 | 5.77 | 5.35 | 6.47 | 5.99 | 6.13 | 5.33 | 4.63 | 5.14 | 4.83 |
| | ρV_p | 1.58 | 1.55 | 2.00 | 1.80 | 1.51 | 1.97 | 1.81 | 1.78 | 1.58 | 1.27 | 1.35 | 1.26 |
| | V_s | 3.26 | 3.31 | | | | | 3.44 | 3.45 | | | 2.68 | 2.60 |
| | ρV_s | 0.843 | 0.871 | | | | | 1.04 | 1.00 | | | 0.705 | 0.679 |
| 100 | ϵ_v | 2.20 | 2.20 | | | | | 1.00 | 0.98 | | | 2.38 | 2.90 |
| | ρ | 2.66 | 2.64 | | | | | 3.03 | 2.91 | | | 2.64 | 2.62 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | | | | | 6.72 | 6.80 | | | 5.94 | 5.76 |
| | ρV_p | 1.68 | 1.68 | | | | | 2.04 | 1.98 | | | 1.59 | 1.51 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.13 | 4.13 | | | 3.69 | 3.63 |
| | ρV_s | 1.05 | 1.04 | | | | | 1.25 | 1.20 | | | 0.974 | 0.951 |
| 200 | ϵ_v | 3.98 | 3.98 | 1.40 | 2.82 | 3.30 | 2.00 | 2.00 | 1.96 | 3.50 | 6.11 | 4.25 | 5.00 |
| | ρ | 2.66 | 2.64 | 3.27 | 3.13 | 2.83 | 3.05 | 3.04 | 2.92 | 2.97 | 2.77 | 2.64 | 2.62 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | 6.46 | 6.15 | 5.86 | 7.02 | 6.83 | 6.90 | 6.20 | 5.58 | 6.11 | 5.90 |
| | ρV_p | 1.68 | 1.68 | 2.11 | 1.92 | 1.66 | 2.14 | 2.09 | 2.01 | 1.84 | 1.55 | 1.61 | 1.55 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.24 | 4.25 | | | 3.87 | 3.82 |
| | ρV_s | 1.05 | 1.04 | | | | | 1.29 | 1.24 | | | 1.02 | 1.01 |
| 400 | ϵ_v | 6.60 | 6.58 | 2.80 | 5.62 | 6.50 | 4.00 | 4.00 | 3.92 | 6.50 | 10.2 | 7.00 | 8.10 |
| | ρ | 2.67 | 2.65 | 3.27 | 3.14 | 2.84 | 3.06 | 3.04 | 2.92 | 2.98 | 2.78 | 2.65 | 2.63 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | 6.50 | 6.15 | 5.86 | 7.05 | 6.89 | 6.90 | 6.28 | 5.80 | 6.11 | 5.90 |
| | ρV_p | 1.68 | 1.68 | 2.13 | 1.93 | 1.66 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.87 | 1.61 | 1.62 | 1.55 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.24 | 4.25 | | | 3.90 | 3.85 |
| | ρV_s | 1.06 | 1.04 | | | | | 1.29 | 1.24 | | | 1.03 | 1.01 |
| 600 | ϵ_v | 8.68 | 8.60 | 4.20 | 8.55 | 9.84 | 6.00 | 4.00 | 3.92 | 9.40 | 13.6 | 9.50 | 10.5 |
| | ρ | 2.67 | 2.65 | 3.28 | 3.15 | 2.85 | 3.06 | 3.04 | 2.92 | 2.99 | 2.79 | 2.66 | 2.64 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | 6.52 | 6.15 | 5.86 | 7.05 | 6.89 | 6.90 | 6.28 | 5.80 | 6.11 | 5.90 |
| | ρV_p | 1.68 | 1.68 | 2.14 | 1.94 | 1.67 | 2.16 | 2.09 | 2.01 | 1.88 | 1.62 | 1.63 | 1.56 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.24 | 4.25 | | | 3.90 | 3.85 |
| | ρV_s | 1.06 | 1.04 | | | | | 1.29 | 1.25 | | | 1.04 | 1.02 |

| 压力 1000MPa | 参数 | 金蛇 纹川岩 | 阿山布蛇 尔依拉纹 金吞克岩 | 张橄 家榄 口岩 | 张玄 家武 口岩 | 宣玄 武 化岩 | 济辉 长 南岩 | 华辉 长 县岩 | 阿山尔辉 尔旁汗长 金沙吉岩 | 宣云长 化母 黑闪岩 | 宣石 化闪岩 辉长 | 华花 岗 阴岩 | 天里岗 山坤 巴花岩 |
|---------------|--------------|-----------|----------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------------|------------------|-----------------|---------------|------------------|
| 800 | ϵ_v | 10.8 | 10.7 | | | | | 8.00 | 7.84 | | | 12.0 | 12.9 |
| | ρ | 2.68 | 2.66 | | | | | 3.05 | 2.93 | | | 2.66 | 2.64 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | | | | | 6.89 | 6.90 | | | 6.11 | 5.90 |
| | ρV_p | 1.69 | 1.69 | | | | | 2.10 | 2.02 | | | 1.63 | 1.56 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.24 | 4.25 | | | 3.90 | 3.85 |
| | ρV_s | 1.06 | 1.05 | | | | | 1.29 | 1.25 | | | 1.04 | 1.02 |
| 1000 | ϵ_v | 12.9 | 12.8 | | | | | 10.0 | 9.80 | | | 14.5 | 15.2 |
| | ρ | 2.68 | 2.66 | | | | | 3.06 | 2.94 | | | 2.67 | 2.65 |
| | V_p | 6.31 | 6.35 | | | | | 6.89 | 6.90 | | | 6.11 | 5.90 |
| | ρV_p | 1.69 | 1.69 | | | | | 2.11 | 2.03 | | | 1.63 | 1.56 |
| | V_s | 3.96 | 3.94 | | | | | 4.24 | 4.25 | | | 3.90 | 3.85 |
| | ρV_s | 1.06 | 1.05 | | | | | 1.30 | 1.25 | | | 1.04 | 2.02 |

注: $\epsilon_v (\times 10^{-3})$; $\rho (\text{g/cm}^3)$; $V_p (\text{km/s})$; $\rho V_p (\times 10^3 \text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s})$; $V_s (\text{km/s})$; $\rho V_s (\times 10^3 \text{g}\cdot\text{cm}^2/\text{s})$

表 5 蛇纹岩不同压力下的平均密度、平均纵波速度

| 样 品 分 组 | 平 均 密 度 | 压力 P MPa 纵波 速度 km/s | 0.1 | 100 | 200 | 400 | 600 | 1000 |
|------------|------------|------------------------------|-----|-------|----------|------|------|------|
| | | | 1 | 2.614 | V_{p1} | 5.6 | 5.67 | 5.73 |
| 2 | 2.601 | V_{p2} | 4.7 | 6.46 | 6.59 | 6.70 | 6.75 | 6.80 |
| 3 | 2.710 | V_{p3} | 5.8 | 6.02 | 6.08 | 6.15 | 6.21 | 6.31 |
| 4 | 2.798 | V_{p4} | 6.4 | 6.51 | 6.57 | 6.67 | 6.74 | 6.84 |

表 6 基性岩(辉长岩、苏长岩、辉绿岩)不同压力下的平均密度、平均纵波速度

| 压 力 P(MPa) | 0.1 | 100 | 200 | 400 | 600 | 1000 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 平均密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ | 2.989 | 2.994 | 2.997 | 3.004 | 3.011 | 3.024 |
| 平均纵波速度 $V_p(\text{km/s})$ | 6.44 | 6.83 | 6.86 | 6.91 | 6.94 | 6.99 |

(2)通过对比研究,不同构造地区采集的岩石标本,实验测得的高压状态参数值是不同的。因此在参照各地区深源岩石的高压状态参数值时,又须对标本作产出构造和构造发展史的具体分析,只有构造发展史相同的构造地区,所得同类岩性测量值,用来解释深部地壳结构和地质才具有可比性。

(3)实际测得天水地震区不同构造发展时期产生的深源岩石其高压状态参数值接近。因此可直接使用这个特征,来查明天水地震区地壳内的深源岩石和非深源岩石的界面,获得深部地壳结构。

(本文 1993 年 9 月 15 日收到)

参考文献

- 1 黄汲清. 中国大地构造图(1:400 万). 北京: 科学出版社, 1979.
- 2 郝晋升, 等. 华北地区典型岩石在一万巴压力下的密度和弹性波速度的实验研究. 地震学报, 1985, 7(3): 276—284.
- 3 Cristensen N I. Compressional wave velocities in possible mantle rocks to pressures of 30 kilobars. J. G. R., 1974, 79: 407—412.
- 4 D Shimozuru. Elasticity of rocks and some related geophysical problem. Jap. J. Geophys., 1960, 2: 1—85.
- 5 郝晋升, 等. 西北地区地壳典型岩石高压下的状态参数. 第一届高温高压岩石力学学术讨论会论文集. 北京: 学术期刊出版社, 1988.
- 6 高龙生, 葛焕称. 中国大陆岩石标本在高压下的弹性波速度的初步研究. 地球物理学报, 1975, 18(1): 26—38.
- 7 Birch F. The velocity of compressional wave in rocks to 10 kilobars part 1 and part 2. J. G. R. 1960 and 1961, 65 and 66: 1083—1102 and 2199—2241.
- 8 梁中华, 等. 天水地震区地壳浅层速度构造. 西北地震学报, 1991, 13(增刊): 16—20.

**THE CHARACTERISTICS OF DEEP—SEATED ROCK'S STATE PARAMETERS IN
TIANSHUI EARTHQUAKE REGION UNDER HIGH PRESSURE UP TO 1000MPa**

Xie Yuanding, Shao Shunmei, Zhou Jianguo

(Earthquake Research Institute of Lanzhou, SSB, Lanzhou 730000)

Abstract

In this paper, we discussed mainly the variation of the rock density, S & P wave speed and calculated wave resistance with the pressure up to 1000MPa. These deep—seated rocks were collected in Tianshui earthquake region. It was found that the state parameters of different kinds of deep—seated rocks, which didn't form at the same time, changed very little under high pressure. After the pressure up to 400 MPa, the variation of the rock density and S & P wave speed almost can't be found. We simply discussed the reasons of the phenomenon. and made practical error analysis on the parameters under 400 MPa pressure. The result shows that, without considering temperature, the state parameters which were gained under 400 MPa pressure can completely replace the parameters under higher pressure (400 MPa—2000MPa) in practical application. so the rock state parameters (under 400 MPa characteristic pressure) are still significant for the artificial deep seismic sounding explanation and gravitation explanation.

Key Words: Deep-seated rock; High-pressure state parameter; Rock compression test