

超声波在颗粒孔隙介质中的吸收和散射衰减测量

周浩^{1*} 符力耘² 贾小平³

1 中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081; 2 中国石油大学(华东) 青岛 266580; 3 Institut Langevin Paris 75005

声波、弹性波在非均匀介质中的衰减过程是声学、地震学中一个非常重要的研究议题。一般而言, 声波、弹性波的衰减主要由散射衰减和吸收衰减两部分构成。散射衰减表征的是, 由于介质的不均匀, 均匀波向非均匀波转化而造成的衰减。吸收衰减则表征的是, 由于介质的非弹性性质, 介质振动的机械能转化为内能的过程。通过研究声波、弹性波在非均匀介质中的衰减过程, 可以推测非均匀介质中波的统计性质, 并进一步推测介质的物理性质(Wu, 1985)。在非均匀介质中传播的波的理论描述, 则既可以由波动方程表示, 也可以经进一步推导, 由辐射传输方程予以描述(Sato et al., 2012)。辐射传输方程相对于波动方程而言, 其对散射体的具体形状大小不再有严格的要求, 而通过平均自由程等参数表征波的散射和吸收衰减作用(van Rossum and Nieuwenhuizen, 1999)。

由于辐射传输方程描述了波的整体散射过程, 其在弱散射极限情况下, 与经典的单次散射模型一致; 在强散射极限情况下, 与扩散方程一致(Sato, 1993)。换言之, 辐射传输方程既可以应用于弱散射介质, 又可应用于强散射介质。在实际情况下, 非均匀介质的平均自由程等参数往往是未知的。对于特定频率的声波、弹性波而言, 我们往往很难确定波在介质中是处于弱散射情形或强散射情形, 还是介于二者之间。在这种情况下, 需要根据接收到的波形信号, 选择合适的理论模型用于推测介质的物理性质。

在本研究中, 我们首先针对干燥颗粒孔隙介质(7.4mm 长, 30mm 直径的柱体, 由直径为 0.6~0.8mm 的玻璃珠构成), 干燥、饱水页岩(7.1cm 长, 2.5cm 直径的柱体)开展了超声脉冲传输实验。其中, 针对页岩样品, 我们测量了干燥、饱水样品在不同压力(围压)下的透射声波波形。基于点源各向同性辐射传输方程, 即:

$$E(\mathbf{x}, t) = G(\mathbf{x}, t) + v_0 g_0 \iiint \int_{-\infty}^{+\infty} G(\mathbf{x} - \mathbf{x}', t - t') dx' dt', \quad (1)$$

可以求得其 3 维解析解(Sato et al., 2012), 其中,

$$G(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{4\pi v_0 r^2} H(t) \delta\left(t - \frac{r}{v_0}\right) e^{-(v_0 g_0 + b)t},$$

v_0 表示介质的背景速度, $r=|\mathbf{x}|$, g_0 为介质对的散射系数, b 为介质的吸收系数。依据点源辐射传输方程的解析解, 即:

$$\begin{aligned} \bar{E}(\bar{r}, \bar{t}) = & \frac{1}{4\pi v_0 \bar{r}^2} H(\bar{t}) \delta(\bar{t} - \bar{r}) e^{-(1+b)\bar{t}} + \frac{1}{4\pi v_0 \bar{r}^2} K\left(\frac{\bar{t}}{\bar{r}}\right) H(\bar{t} - \bar{r}) e^{-(1+b)\bar{t}} \\ & + \frac{1}{4\pi^2 \bar{r}} \int \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{ik}{2\pi} \frac{\bar{G}^{FL}(-k, -i\omega)^3}{1 - \bar{G}^{FL}(-k, -i\omega)} d\omega dk, \end{aligned} \quad (2)$$

可以进一步求得平面波源的解。

根据透射波形，通过统计平均能量-时间包络曲线，并应用辐射传输方程的平面波解，可通过拟合预测介质的散射和吸收衰减。图 1 展示了应用辐射传输方程预测弹性波在颗粒介质中的散射和吸收平均自由程（平均自由程 $L=Qv_0/\omega$ ， Q 为吸收或散射品质因子， ω 为圆频率）。如图所示，辐射传输方程（RTE）的理论预测曲线与之前 Jia(2004)的扩散方程预测曲线吻合得很好，同时也与实验波形的平均能量-时间曲线相吻合。值得一提的是，颗粒介质的统计平均能量是通过搅拌和压实同一套颗粒介质得到的 60 组波形叠加而得。时间统计平均能量则是使用的 Mean-square (MS) envelope (Sato et al., 2012)，由一个特定的波形求得。MS 能量和统计平均能量的一致性也印证了使用时间统计平均方法的可行性，而这是进一步评估页岩衰减的基础。

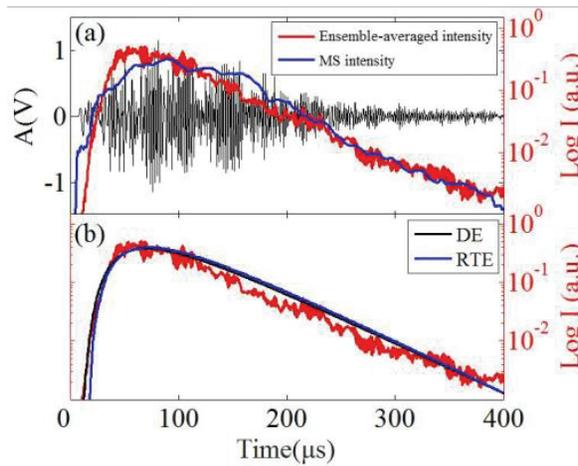


图 1. 颗粒介质中的透射波形与统计平均强度及平均自由程预测。(a)透射波形信号（黑色线），统计平均能量（红色线），以及时间统计平均能量（Mean-square (MS) envelope）（蓝色线）。(b)利用扩散方程（DE）和辐射传输方程（RTE）拟合求解散射和吸收平均自由程。

根据页岩的波形和 MS 能量-时间曲线，应用 RTE 的平面波解，可以预测页岩在不同压力下的散射和吸收衰减，如图 2 所示。由图可见，不同压力下岩石的散射和吸收特性是不同的。以 5MPa 下饱水页岩为例，岩石的透射波体现出明显的扩散波的特征，即峰值能量出现在直达波之后，能量随着时间的增大先增大后减小。对于 5MPa 下的干燥页岩而言，透射波则表现出更贴近于弱散射波特征，即能量随时间逐渐减弱。然而，我们并不能确定页岩在这些压力下是否确切地处于弱散射或强散射情形。可见，RTE 平面波解更适宜在这些条件下应用，以预测页岩的衰减特性。

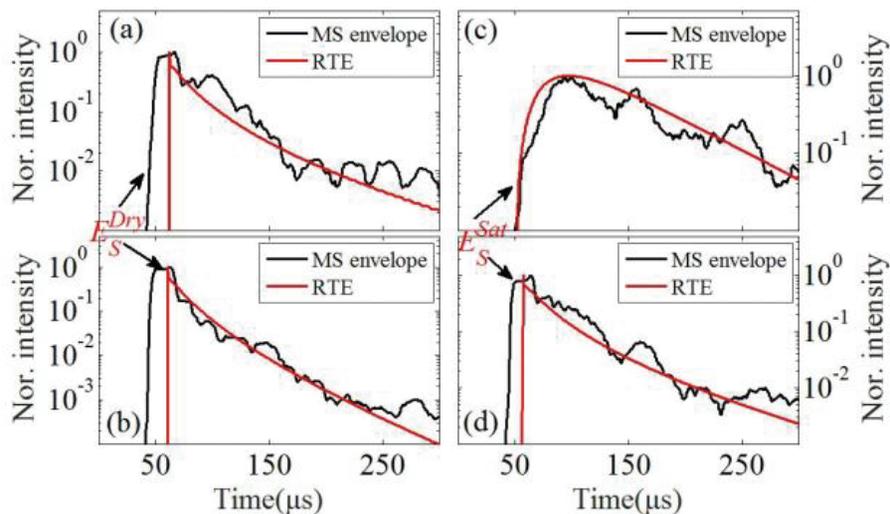


图 2. 不同压力下页岩的散射与吸收衰减预测。

此页岩在不同压力下的吸收和散射衰减如图 3 所示。如图所示，对于干燥页岩而言，弹性波的衰减

主要以吸收衰减为主，且吸收衰减随着压力的增大而增大；散射衰减较弱，其随着压力的增大而减小。对于饱水页岩而言，弹性波的衰减主要以散射衰减为主，散射衰减随着压力的增大而减小；吸收衰减相对较弱，与压力呈现出较为复杂的相关性，即，吸收衰减先随着压力的增大而减小，然后随着压力的增大而增大。干燥和饱水页岩中超声波衰减的压力相关性主要与页岩的含水率有关。在干燥条件下，页岩中依然存在着少量的吸附水，介于页岩粘土矿物颗粒间或粘土矿物内。当超声波在页岩中传播时，这些吸附水将起到润滑的作用，导致相邻颗粒间的摩擦 (Brunet et al., 2008)，这是吸收衰减随压力增大的原因。在页岩饱水后，粘土吸水后变软，声波阻抗降低，页岩的非均匀性加剧，导致散射衰减急剧增强。另外，由于页岩发育一定量的裂缝，其能诱发一定量的 squirt-flow 衰减 (Gurevich et al., 2010)，导致吸收衰减在低压力段内随着压力的增大而减小。

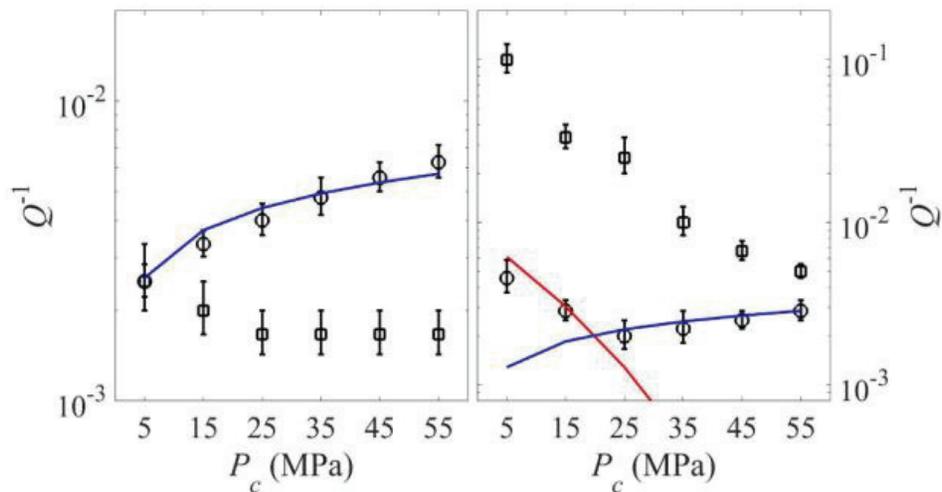


图 3. 不同围压下干燥和饱水页岩的本征和散射衰减。

参考文献

- Brunet, T., X. Jia, and P. Mills, 2008, Mechanisms for acoustic absorption in dry and weakly wet granular media.: *Physical Review Letters*, 101, 138001.
- Gurevich, B., D. Makarynska, O. B. De Paula, and M. Pervukhina, 2010, A simple model for squirt-flow dispersion and attenuation in fluid-saturated granular rocks: *Geophysics*, 75, N109-N120.
- Jia, X., 2004, Codalike multiple scattering of elastic waves in dense granular media.: *Physical Review Letters*, 93, 154303.
- Sato, H., 1993, Energy transportation in one- and two-dimensional scattering media: Analytic solutions of the multiple isotropic scattering model: *Geophysical Journal International*, 112, 141-146.
- Sato, H., M. C. Fehler, and T. Maeda, 2012, *Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth*: Springer, 496.
- van Rossum, M. v., and T. M. Nieuwenhuizen, 1999, Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion: *Reviews of Modern Physics*, 71, 313.
- Wu, R.-S. (1985), Multiple scattering and energy transfer of seismic waves separation of scattering effect from intrinsic attenuation. theoretical modelling, *Geophysical Journal International*, 82 (1), 57-80.