考虑层理效应的拓展虚内键(AVIB)本构及其在页岩水力压裂模拟中的应用

刘子寒 zihanliu@sjtu.edu.cn 张振南* zhennanzhang@sjtu.edu.cn Ahmad Ghassemi ahmad.ghassemi@ou.edu
上海交通大学 土木工程系

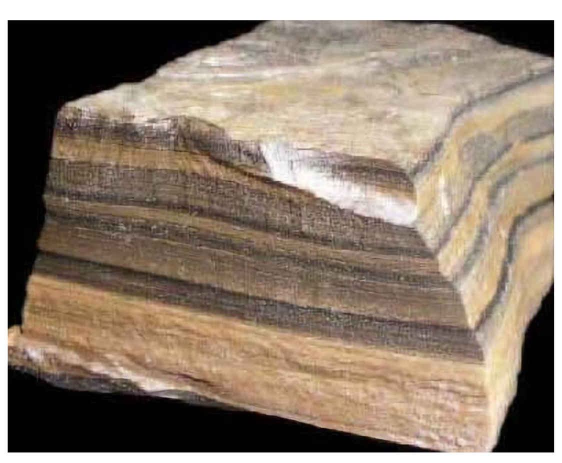
Highlight

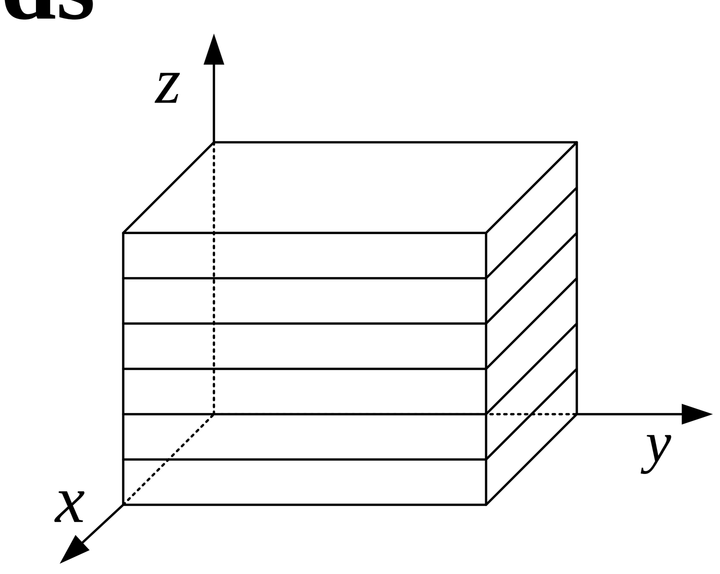
1. 将层理效应考虑到AVIB本构关系中
2. 该本构可以反映页岩的各向异性破裂特征

Introduction

页岩气赋存于页岩储层中，储量丰富。页岩储层非常致密，要提高油气产量，需要对其进行进行压裂改造。页岩不同于一般的岩石，其中含有大量的层理，这些层理使得页岩呈现典型的横观各向同性特征，并对水力裂缝扩展过程产生重要影响。然而在压裂模拟中，如何考虑页岩层理效应是一个非常困难的问题。

Methods





局部层理张量 $\bar{\boldsymbol{\Omega}}=\begin{bmatrix}0&0&0\\0&0&0\\0&0&\omega\end{bmatrix}$ 全局层理张量 $\boldsymbol{\Omega}=\mathbf{Q}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{\Omega}}\mathbf{Q}$

坐标变换矩阵 $\mathbf{Q}=\begin{bmatrix}\cos A & -\sin A & 0\\ \sin A\cos D & \cos A\cos D & -\sin D\\ \sin A\sin D & \cos A\sin D & \cos D\end{bmatrix}$

ξ方向的层理张量 $\omega(\boldsymbol{\xi})=\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\xi}$

虚内键分布密度 $D(\boldsymbol{\xi})=1-\lambda\omega(\boldsymbol{\xi})=1-\lambda\boldsymbol{\xi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\xi}$

$$C_{ijkl}=\frac{1}{V}\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\left(A\xi_i\xi_j\xi_k\xi_l+B\left(\delta_{ik}\xi_j\xi_l-\xi_i\xi_j\xi_k\xi_l\right)\right)\left(1-\lambda\boldsymbol{\xi}^{T}\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\xi}\right)\sin\theta\,\mathrm{d}\theta\,\mathrm{d}\phi$$

$$A=\frac{3E}{4\pi(1-2\nu)}\qquad B=\frac{3E(1-4\nu)}{4\pi(1+\nu)(1-2\nu)}$$

BP-AVIB弹性矩阵

$$\mathbf{D}=\begin{bmatrix}D_1 & D_2 & D_3 & 0 & 0 & 0\\ & D_1 & D_3 & 0 & 0 & 0\\ & & D_4 & 0 & 0 & 0\\ & \text{Symmetric} & & \frac{D_1-D_2}{2} & 0 & 0\\ & & & & D_5 & 0\\ & & & & & D_5\end{bmatrix}$$

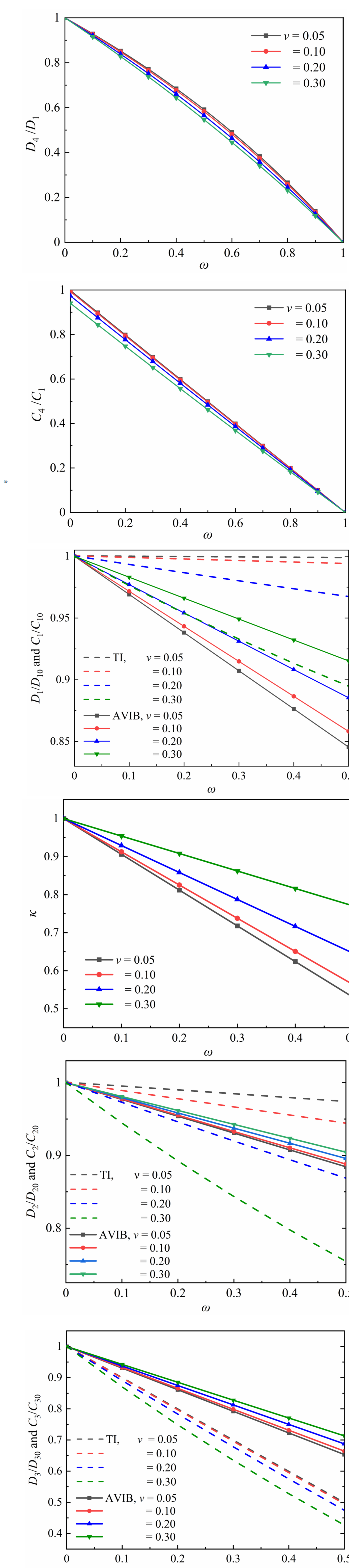
$$D_1=\frac{4\pi\left(21A+14B-3A\lambda\omega-4B\lambda\omega\right)}{105V}$$
$$D_2=-\frac{4\pi\left(A-B\right)\left(\lambda\omega-7\right)}{105V}$$
$$D_3=-\frac{4\pi\left(A-B\right)\left(3\lambda\omega-7\right)}{105V}$$
$$D_4=\frac{4\pi\left(21A+14B-15A\lambda\omega-6B\lambda\omega\right)}{105V}$$
$$D_5=\frac{2\pi\left(14A+21B-6A\lambda\omega-15B\lambda\omega\right)}{105V}$$

横观各向同性体弹性矩阵

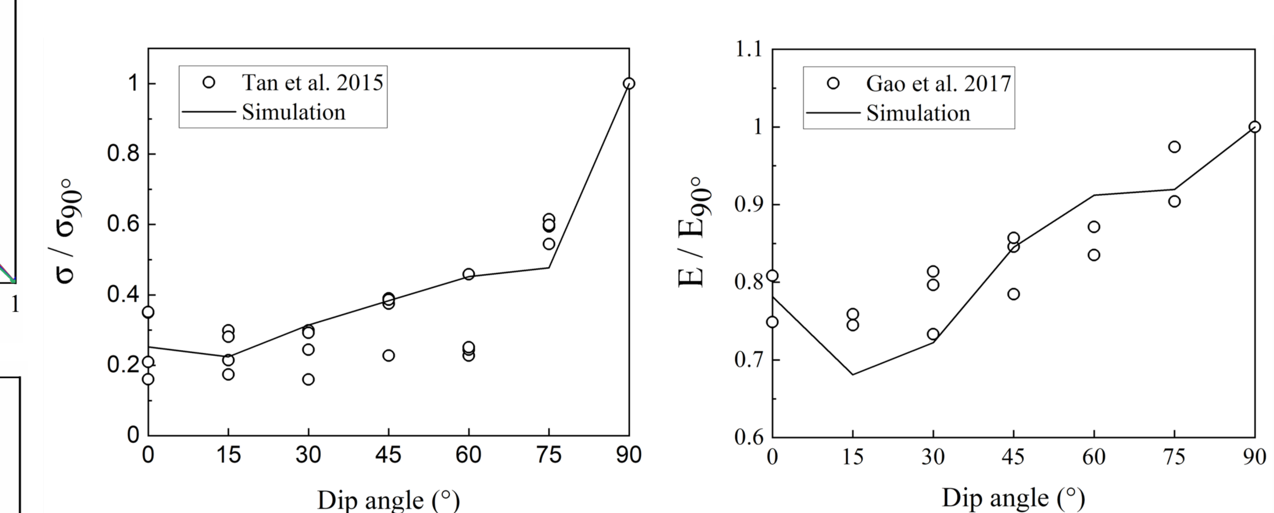
$$\mathbf{C}=\begin{bmatrix}C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 & 0\\ & C_1 & C_3 & 0 & 0 & 0\\ & & C_4 & 0 & 0 & 0\\ & \text{Symmetric} & & (C_1-C_2)/2 & 0 & 0\\ & & & & C_5 & 0\\ & & & & & C_5\end{bmatrix}$$

$$C_1=\frac{\left(1-\alpha\beta^2\nu_p^2\right)E_p}{\left(1+\nu_p\right)\left(1-\nu_p-2\alpha\beta^2\nu_p^2\right)},$$
$$C_2=\frac{\nu_p\left(1+\alpha\beta^2\nu_p\right)E_p}{\left(1+\nu_p\right)\left(1-\nu_p-2\alpha\beta^2\nu_p^2\right)}$$
$$C_3=\frac{\alpha\beta\nu_pE_p}{1-\nu_p-2\alpha\beta^2\nu_p^2},$$
$$C_4=\frac{\alpha\left(1-\nu_p\right)E_p}{1-\nu_p-2\alpha\beta^2\nu_p^2},$$
$$C_5=\frac{\kappa E_p}{2\left(1+\nu_p\right)}$$

Results/Discussion



Representation of shale anisotropy



Impact of BP on hydraulic fracture