

力学所页岩气水力压裂中固-液界面切应力研究获进展

我国页岩气储量丰富，已探明的页岩气储量居世界首位。但其储层呈低孔隙度、低渗透率的物性特征，需要更有效的水力压裂，用以改善页岩气在岩石中的渗透性，因而开采难度远大于其他国家。目前，我国水力压裂技术的基本难题是如何在页岩中形成大规模的交联裂纹网络，同解吸附和驱替配合，将页岩气快速地开采出来。

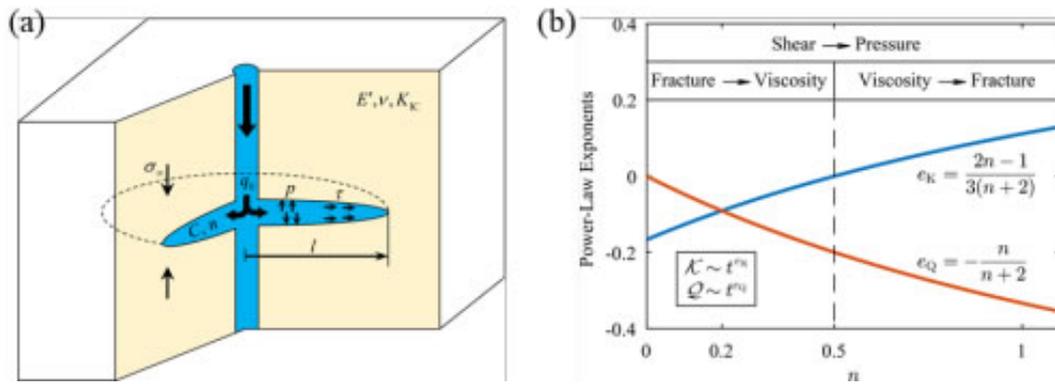
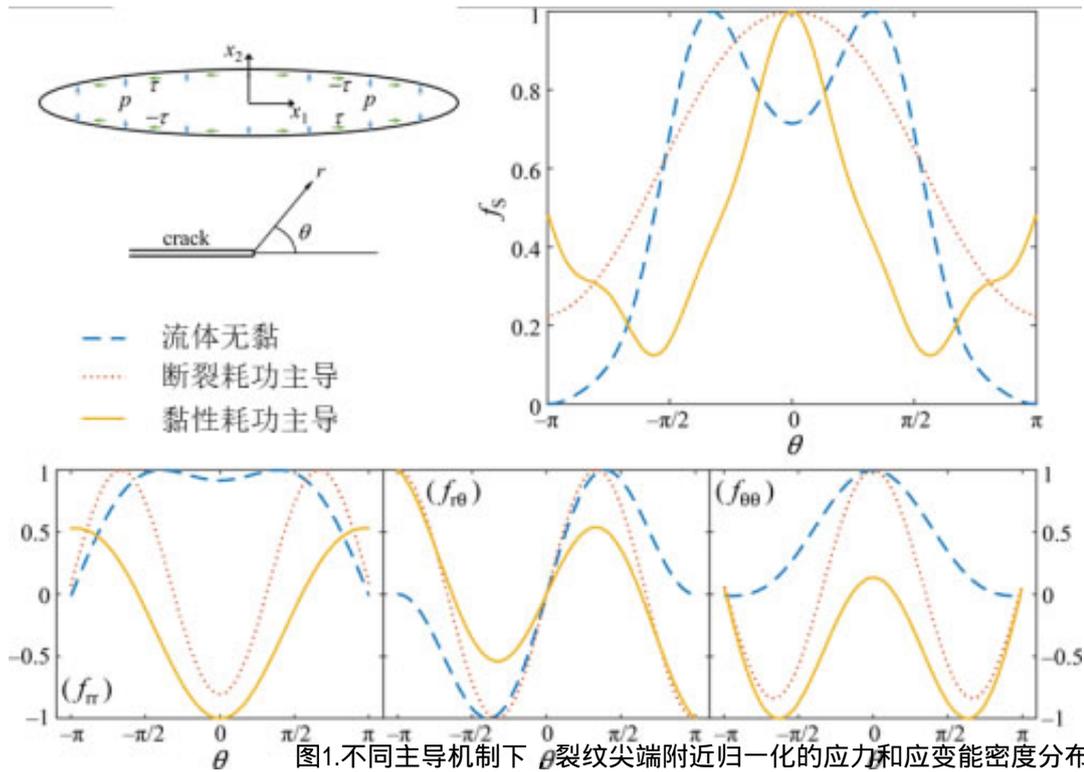
近日，中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室赵亚溥团队围绕水力压裂中岩石-压裂液的固-液界面切应力，开展了针对裂纹扩展规律的研究工作，发现压裂液黏性流动在固-液界面产生的切应力对裂纹扩展规律有重要影响。这一发现解释了井筒压强实测值远高于传统模型预测值的现象，可以用于指导压裂液的选取和压裂方式的优化，具有重要的应用价值。

业内普遍认为压裂液压强在整条裂纹基本保持不变，仅在裂纹尖端附近出现骤降。在理论分析中，研究人员也发现压强在裂纹尖端具有奇异性，且奇异性强度与裂纹扩展主导机制（岩石断裂耗功、压裂液黏性耗功主导机制）有关。在压裂液黏性耗功主导机制下，经典线弹性断裂力学的 $-1/2$ 阶奇异性消失，裂纹尖端流体压强的奇异性为 $-1/3$ 阶，固体应力奇异性也为 $-1/3$ 阶，这是由固-液两相的应力匹配引起。而通过力的平衡可知，切应力的奇异性强于压强，所以需要切应力的影响开展详细研究。

据此，该研究通过裂纹尖端的应力奇异性对固-液界面上的切应力进行了定性分析。研究人员通过裂纹尖端应力和位移的渐近性质，并结合新建立的位移和应力场边界积分方程开展研究，发现切应力有导致裂纹闭合的趋势；常用的应力强度因子和能量释放率的计算方法需要引入切应力的修正；裂纹扩展存在潜在的失稳现象，并且通过裂纹尖端附近应力场和应变能密度，得到切应力使裂纹有垂直于裂纹面开裂的趋势。这些发现从理论上证明可以通过控制压裂参数，使裂纹扩展出现失稳现象，为水力压裂形成裂纹网络提供了新思路。在此基础上，研究人员针对常见的碟形水力压裂裂纹建立了固-液界面耦合全应力的幂律流体水力压裂模型，并修正了基于应力强度因子的裂纹扩展判据，该模型可以拓展为常用的二维和准三维水力压裂模型，提供快速、准确的水力压裂设计和模拟方案。进一步研究发现，在压裂液黏性流动耗功与岩石断裂耗功相比可忽略情况下，切应力导致更长、更窄的裂纹以及更高的井筒压强，并且过高的切应力使裂纹在井筒和裂纹尖端处同时存在潜在的失稳现象；存在固-液界面上的压强和切应力、岩石断裂耗功和压裂液黏性流动耗功两对主导机制，且主导机制在压裂过程中发生转变，转变方向与幂律型压裂液的流性指数有关。这些发现解释了井筒压强实测值远高于传统模型预测值的现象，为压裂液的选取和压裂流量的控制提供了方向。

以上研究工作深入探索了固-液界面切应力对水力压裂过程中应力奇异性 and 主导机制的重要影响，为解决页岩气开采中存在的基本难题提供了新思路。

相关研究成果发表在ASME Journal of Applied Mechanics上。该研究得到了国家自然科学基金石油化工联合基金，中科院创新交叉团队项目、前沿科学研究重点计划项目、战略性先导科技专项等的资助。



原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/120046.html>