
地质地球所揭示陆相页岩细观力学各向异性及破裂面粗糙度特征

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/10612.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

我国页岩类型丰富，海相、陆相和海陆过渡相等不同沉积环境的页岩均较为发育且分布广泛，油气资源储量可观，具有很好的勘探开发前景。受沉积、成岩及构造作用的影响，页岩发育显著的层理结构，导致同一页岩在不同方向上呈现出不同的物理、化学等性质，即页岩具有各向异性。国内外学者针对页岩力学特性的研究表明，页岩的力学各向异性是其固有属性，对页岩油/气开采过程中井壁的稳定性和储层改造的力学响应有直接影响。然而，目前已有研究多集中于海相页岩，且主要是基于宏观尺度（ $> 10\text{ mm}$ ）或是微观尺度（ $< 0.1\text{ mm}$ ）的力学试验，而对于细观尺度（ $0.1 - 10\text{ mm}$ ）的页岩力学行为研究较少，这使得不同尺度之间的页岩力学特性难以建立直接、连续地联系。此外，页岩破裂面粗糙度类似于储层压裂改造形成的裂缝网络复杂程度，与页岩油/气的开采效率有紧密的联系。相关学者在研究中常采用粗糙度这一指标来评价储层压裂改造的效果，但局限于不同压裂方案的效果对比，对于破裂面粗糙度和力学特性之间的内在关联鲜有考虑。

针对上述问题，中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程院重点实验室博士生黄北秀，在导师、副研究员李丽慧、研究员李晓的指导下，采用微型拉伸台-光学显微镜（MTI-LM）细观实时加载-观测-采集试验系统（图1），对鄂尔多斯盆地南缘延长组长7段陆相页岩开展了细观尺度下不同层理角度（最大压应力和层理面之间的夹角，范围为 $0^\circ - 90^\circ$ ）的单轴压缩试验研究。通过综合分析MTI-LM系统同步采集的力学试验数据和全程样品变化图像，结合破裂面粗糙度定量化表征以及微米CT在位（in-situ）单轴压缩扫描图像，系统研究了陆相页岩在细观尺度下的单轴压缩强度、裂缝扩展特征、破坏模式以及破裂面粗糙度随层理角度变化的差异性。

研究取得以下认识：（1）陆相页岩的细观压缩强度和平行层理裂缝（bedding-parallel fractures）占总裂缝长度的百分比随层理角度呈反向波动趋势（图2），即在强度越高的页岩中平行层理扩展的裂缝占比越低；（2）陆相页岩的细观压缩强度、破坏时间、破裂面粗糙度随层理角度的变化具有一致性（图3），即在恒定加载速率下，强度越高的页岩，其破坏时间越晚，最终形成的破裂面越粗糙；（3）非均质的矿物成分和结构使页岩在压缩破坏过程中产生不同大小和数量的岩桥（图4），可能是导致页岩细观力学各向异性的内在原因。

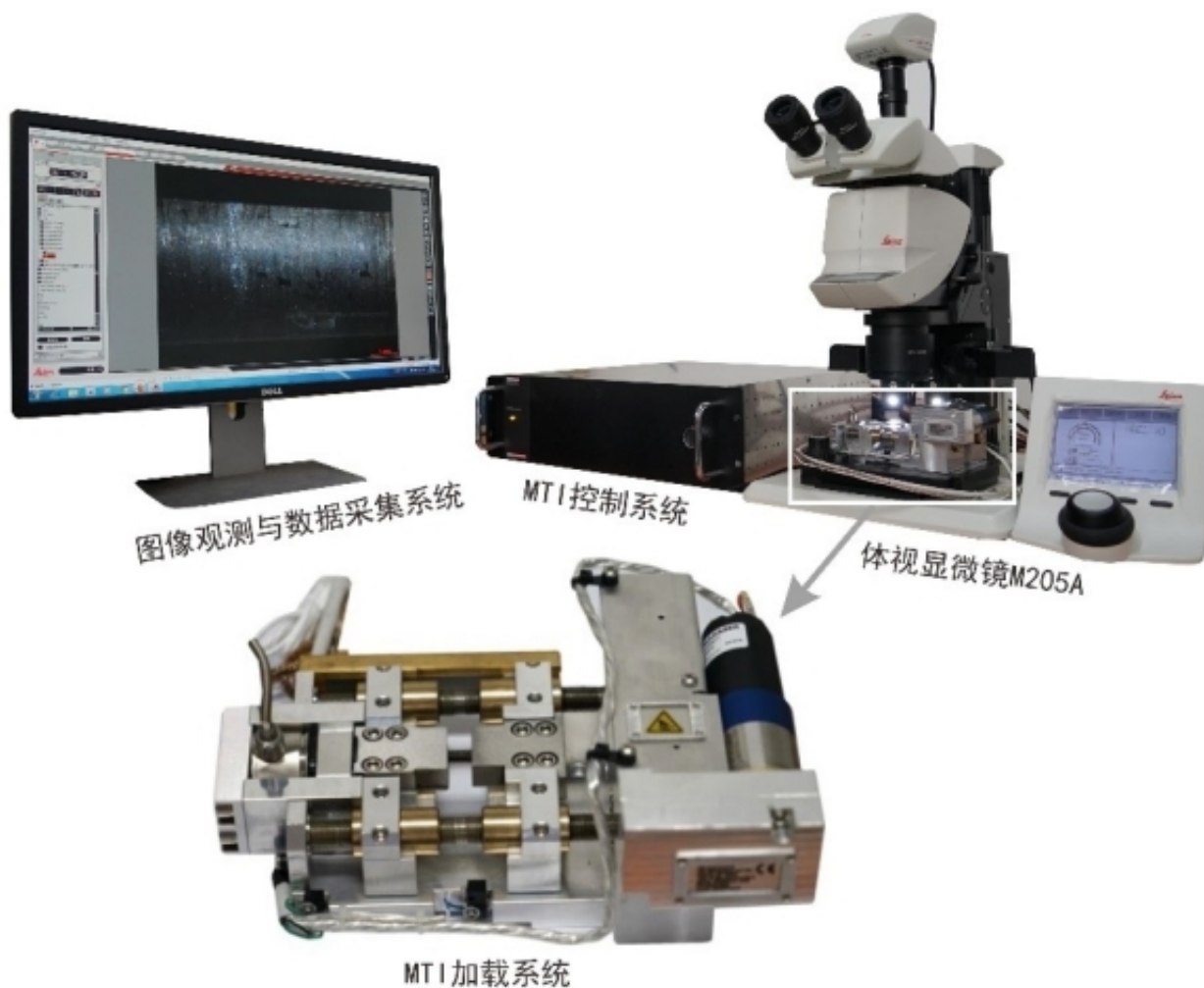


图1.微型拉伸台-光学显微镜（MTI-LM）细观实时加载-观测-采集试验系统

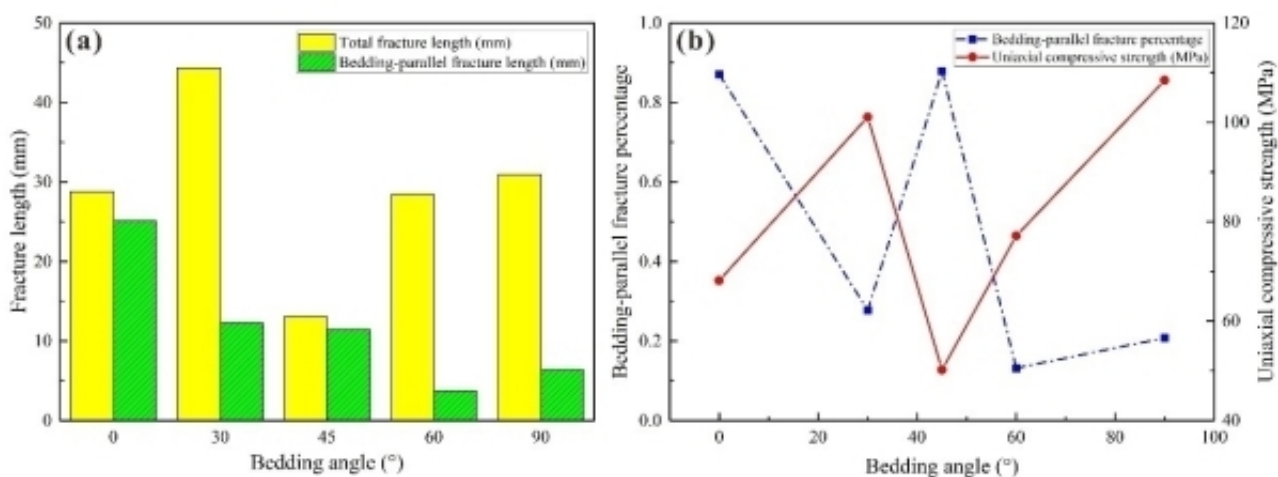


图2.不同层理角度的页岩裂缝长度及平行层理裂缝百分比分布图。(a) 总裂缝长度（黄色）和平行层理裂缝长度（绿色）随层理角度的变化，层理角度为 0° 和 45° 的页岩中的裂缝主要与层理面平行， 60° 和 90° 的页岩中的裂缝主要与层理面交叉， 30° 的页岩则二者兼有；(b) 平行层理裂缝百分比（蓝色点划线）和单轴抗压强度（红色实线）随层理角度的变化，二者呈现出反向波动的趋势。

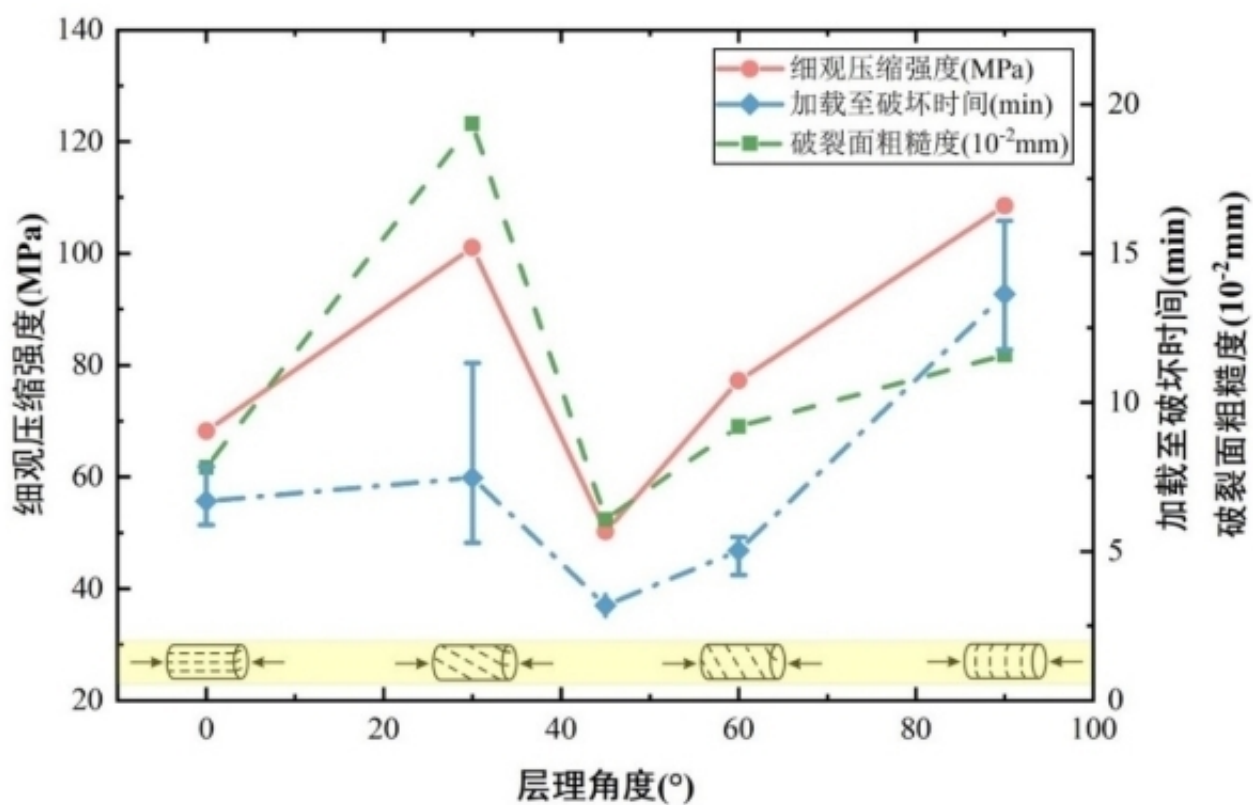


图3.页岩细观压缩强度、破坏时间、破裂面粗糙度随层理角度的变化曲线。随着层理角度的变化，三者呈现出较好的各向异性一致性。

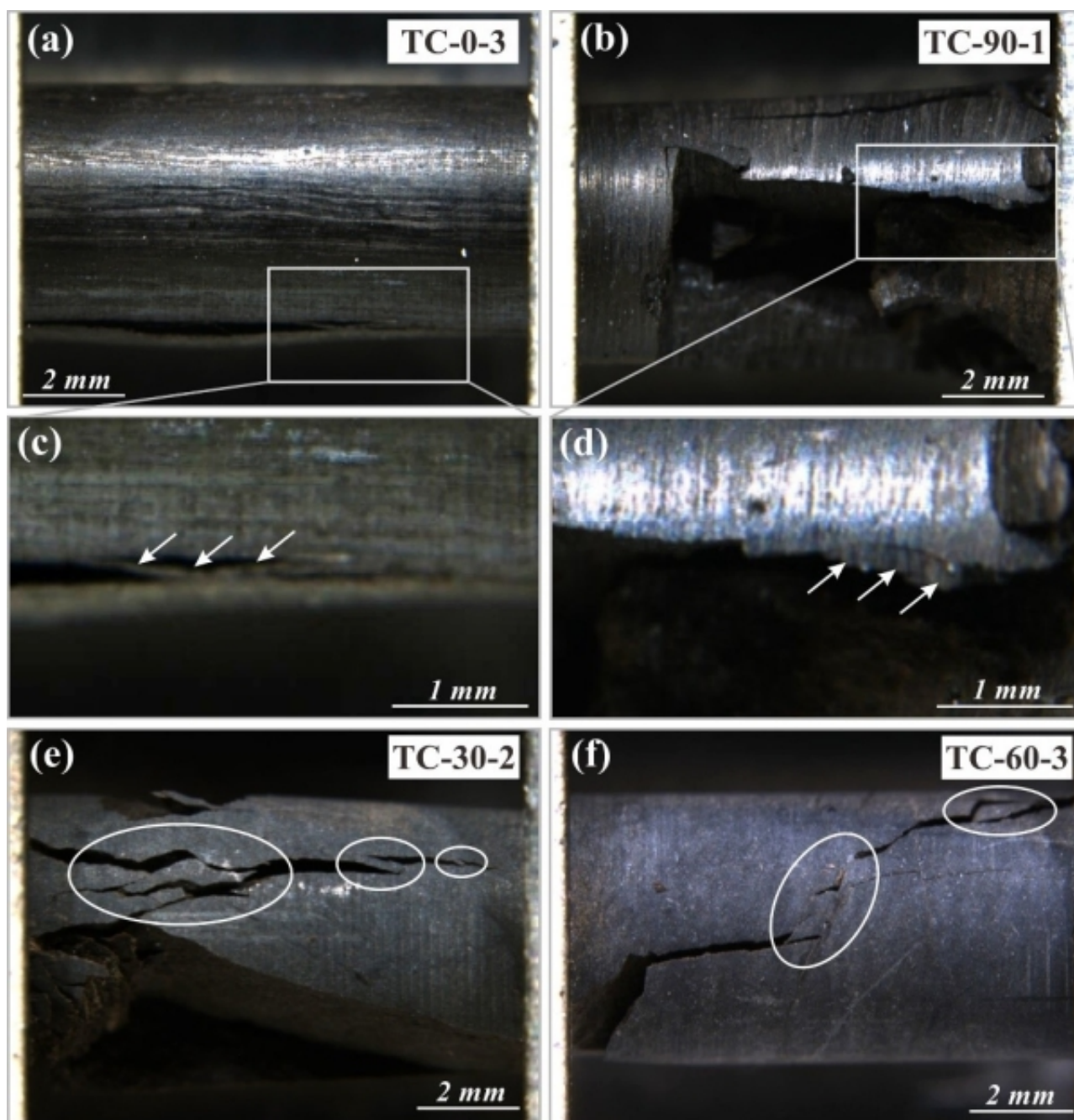


图4.页岩细观单轴压缩试验后不同层理角度的样品中的岩桥。(a, b) 0° 样品TC-0-3和 90° 样品TC-90-1中模糊的小岩桥，如矩形框所示；(c, d) 为(a) 和(b) 局部放大的岩桥，如白色箭头所示；(e) 30° 样品TC-30-2中显著的大小不一的岩桥，如白色椭圆形所示；(f) 60° 样品TC-60-3中的中等大小的岩桥。

该研究增进了对细观尺度的页岩力学各向异性的理解，为后期建立页岩不同尺度的力学特性之间的关系提供了实验基础。同时，为优化页岩油/气开采方案以形成复杂裂缝网络提供了新思路，可考虑通过寻找页岩强度-破坏时间-破裂面粗糙度的平衡点，从而获得页岩气开采成本和产气量的最优解。

研究成果发表在 *JGR: Solid*

Earth

上。研究工作受到中科院战略性先导科技专项（B类）、国家自然科学基金项目和中科院地质地球所重点部署项目等的资助。

[论文链接](#)

研究团队单位：地质与地球物理研究所

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](#)转发