

引用格式: 齐宁, 马世鑫, 章泽辉, 等. 灰岩酸蚀裂缝软化区域力学特性与微观特征[J]. 油气地质与采收率, 2024, 31(3): 147-155.

QI Ning, MA Shixin, ZHANG Zehui, et al. Mechanical properties and microscopic characteristics of acid etching softening layer in limestone fractures[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 147-155.

灰岩酸蚀裂缝软化区域力学特性与微观特征

齐宁¹, 马世鑫¹, 章泽辉¹, 周顺明¹, 邹浩然¹, 李满亮²

(1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要: 碳酸盐岩储层常采用酸化压裂工艺进行改造, 酸蚀后岩石表面的微观结构被溶蚀破坏, 岩石力学特性发生显著变化, 进而影响最终的改造效果。为明确酸蚀对灰岩力学特性和微观孔隙结构变化的影响规律, 开展了酸蚀前后灰岩力学特性实验、表面形态特征扫描电镜研究和微观孔隙结构核磁共振表征。结果表明, 酸蚀后岩石表面出现了一定厚度的酸蚀软化层, 厚度约为 11.61 μm 。值得注意的是, 由于酸蚀软化层的存在, 灰岩抗压强度、弹性模量与表面硬度均降至酸蚀前的约 40%。酸蚀后表层岩石内部产生了大小不一的溶蚀孔洞, 并在溶蚀孔洞周边引发应力集中, 改变了酸蚀软化层的应力分布。在高闭合应力作用下, 溶蚀孔洞易于发生挤压变形或坍塌破坏, 这也是酸蚀软化层力学性质改变的主要原因。结合核磁共振 T_2 谱, 发现孔径尺寸在 1 nm~1 μm 的孔隙数量变化最大, 酸液溶蚀改变了灰岩软化层内部的孔隙结构, 进而显著影响酸蚀后岩石的力学性质。

关键词: 灰岩; 酸蚀软化; 孔隙特征; 力学特性; 酸压

文章编号: 1009-9603(2024)03-0147-09

DOI: 10.13673/j.pgre.202311036

中图分类号: TE341

文献标识码: A

Mechanical properties and microscopic characteristics of acid etching softening layer in limestone fractures

QI Ning¹, MA Shixin¹, ZHANG Zehui¹, ZHOU Shunming¹, ZOU Haoran¹, LI Manliang²

(1. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China; 2. Northwest China Petroleum Bureau, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang, 830011, China)

Abstract: Carbonate reservoirs are often stimulated by acidizing and acid fracturing techniques, but the microstructure of the rock surface is corroded and destroyed after acid etching, and the mechanical properties of the rock are changed significantly, which further affects the final stimulation effect. The experiment on the mechanical properties, the study on surface morphological characteristics by scanning electron microscopic (SEM), and the microscopic pore structure characterization by nuclear magnetic resonance (NMR) are carried out before and after limestone acid etching to clarify the influence of acid etching on the mechanical properties and microscopic pore structure changes of limestone. The results show that acid etching softening layers with a certain thickness of about 11.61 μm appear on the rock surface after acid etching. Remarkably, the compressive strength, elastic modulus, and surface hardness of limestone are all reduced to about 40% before acid etching due to the acid etching softening layers. Dissolved pores of different sizes are formed inside the rock surface after acid etching and stress concentration is induced around the dissolved pores, changing the stress distribution of the acid etching softening layers. Under high closure stress, the dissolved pores are easier to crush deformation or collapse failure, which is also the main reason for the change of mechanical properties of acid etching softening layers. According to the T_2 spectrogram of NMR, it is found that there is the largest change in the number of pores with pore sizes between 1 nm and 1 μm , and the acid dissolution alters the internal pore structures of the acid etching softening layers, hence further

收稿日期: 2023-11-18。

作者简介: 齐宁(1980—), 男, 山东梁山人, 教授, 博士, 从事采油工程领域的教学与科研工作。E-mail: qining@upc.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项“碳酸盐岩复合深度改造优化设计方法及配套技术研究”(2017ZX005030005), 山东省自然科学基金项目“基于蚓孔竞争机制的自转向酸蚀蚀蚓孔描述及动态酸化模拟研究”(ZR2017ME003)。

affecting the mechanical properties of rock after acid etching.

Key words: limestone; acid etching softening; pore characteristic; mechanical property; acid fracturing

深层碳酸盐岩储层常采用酸化压裂工艺改造,其主要目的就是形成具有一定承压能力的高导流裂缝^[1]。但在酸压改造过程中,受酸液溶蚀影响,裂缝壁面形貌、岩石孔隙结构及岩石力学特性发生显著变化^[2],岩石表面抗压强度降低,塑性增强,出现表层岩石软化的现象^[3]。在闭合应力的作用下,酸蚀裂缝软化区有着更低的嵌入强度,裂缝更易闭合,甚至丧失导流能力,影响酸压改造效果。

酸压改造效果与酸蚀后裂缝导流能力密切相关,酸蚀后裂缝导流能力的影响因素主要包括酸岩反应速率、酸蚀裂缝开度、非均匀刻蚀程度、闭合应力、岩石力学特性以及注酸排量、酸液用量等工艺参数。国内外学者围绕提高酸蚀裂缝导流能力开展了大量的研究工作^[4-10],BARTKO等通过酸液配方优化及酸压工艺优选获得非均匀刻蚀裂缝^[11]。WALSH发现地层压力和岩石非均质性会影响酸蚀后裂缝导流能力^[12]。周林波等通过交联酸/盐酸交替注入酸压工艺,改善了深层白云岩储层酸压裂缝壁面的非均匀刻蚀程度^[13]。李宪文等发现白云岩储层改造时,高浓度酸液更有利于改善非均匀刻蚀程度,获得高导流能力的酸压裂缝^[14]。牟建业等从裂缝粗糙表面形成机理角度,研究了裂缝表面渗透率分布、岩性分布、温度和氢离子扩散系数对酸蚀裂缝导流能力的影响^[15]。BEG等认为酸岩反应时间越长,岩石结构越脆弱,在闭合压力下越容易破碎,刻蚀程度越大,反而不一定能获得更高导流能力^[16]。戴一凡等发现,当闭合压力一定时,酸蚀时间越长,酸蚀裂缝面整体粗糙度越高,导流能力随酸蚀时间的增加而增大,酸蚀裂缝面粗糙度与导流能力呈正相关^[17]。张家栋等发现酸蚀后灰岩孔隙数量增多、孔径变大,随pH值的降低弹性模量与峰值抗拉强度降低、峰值应变增加、岩石的延性增强、岩石在单轴压缩实验中的破坏形式会发生改变^[18]。

酸压工艺对裂缝壁面进行非均匀刻蚀改造的同时,会降低岩石力学强度,进而导致裂缝在高闭合应力下部分闭合,甚至丧失导流能力。目前对于碳酸盐岩储层酸压改造岩石软化的研究较少,并未明确指出软化区域的厚度,酸蚀对岩石力学性质的影响规律认识尚不清楚。以灰岩储层为研究对象,开展不同酸蚀条件下裂缝软化区域力学特性研究,进一步定性描述酸蚀软化层在灰岩中的存在形态及其厚度,结合核磁共振实验深入分析岩石酸蚀前

后的孔隙结构变化,揭示灰岩软化区域孔隙结构与宏观力学性质的响应机制,为酸压优化设计提供理论指导。

1 实验器材与方法

1.1 实验材料与仪器

实验材料:盐酸(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),露头岩心($\Phi 2.50\text{ cm} \times 5.00\text{ cm}$,四川隆昌),岩样中主要矿物石英、方解石、铁白云石和黏土矿物含量分别为1.51%,91.19%,3.78%和3.52%,孔隙度为0.05%~0.12%,渗透率为0.32~0.90 mD。

实验仪器:TAW-100型天然气水合物三轴实验机;TESCAN VEGA4钨丝灯扫描电镜;MesoMR系列多功能核磁共振成像分析系统;SYF-3型酸岩反应旋转岩盘仪;XNY-PDPI型超低渗透率测试仪;HX-1000TM自动转塔显微硬度计;SHB-3循环水式多用真空泵。

1.2 酸蚀灰岩力学特性研究

在一定的条件下对岩样进行酸蚀处理,分析对比不同酸蚀条件下的岩心刻蚀形态,同时对酸蚀后及未酸蚀的岩样开展单轴抗压强度实验,记录岩样的破坏应力并计算抗压强度和弹性模量等参数,绘制应力-应变曲线,分析酸蚀作用对灰岩力学特性的影响,明确灰岩酸蚀前后的溶蚀形态和力学性质变化。

1.3 酸蚀灰岩维氏硬度测试

在相同条件下测定固定载荷和变载荷下酸蚀前后岩样的维氏硬度^[19],对比酸蚀前后岩样对抗塑性变形能力的变化,确定酸蚀软化层厚度。维氏硬度计算公式为:

$$HV = 0.189 \frac{F}{d^2} \quad (1)$$

压入深度可以通过测量压痕的对角线长度计算得到,压入深度与压痕对角线长度平均值的关系为:

$$h = \frac{d/2}{\tan 68^\circ} \quad (2)$$

需要注意的是,维氏硬度测试要求样品表面干净无杂质并尽量光滑平整,以确保测试结果的准确性。由于酸液的不均匀刻蚀作用,岩样酸蚀面凹凸不平,且覆盖有不溶物。因此在测试过程中应注意

避开表面的沟槽与不溶物。

维氏硬度测试根据所加载荷的不同分为单载荷与多载荷实验。其中单载荷实验选取载荷为 300 g, 保载时间为 10 s, 在白样与酸蚀后岩样表面选取 2 个点测量维氏硬度并取平均值, 对比酸蚀前后维氏硬度的变化。多载荷实验选取保载时间为 10 s, 载荷分别选取 25, 50, 100, 200, 300, 500 和 1 000 g, 分别在酸蚀后岩样表面的 7 个点测试维氏硬度及压入深度, 计算得到酸蚀软化层的厚度。随压入深度的增加, 压头会在某种载荷下穿过软化层与未受酸液影响的岩石接触, 此时测得的硬度会明显地增大。由于酸蚀后岩样表面适合进行维氏硬度测试的位置有限, 所以每个载荷仅选取 1 个位置加载。

1.4 酸蚀软化层表面形态特征研究

将酸蚀前后的岩样进行喷金镀膜, 然后用 TESCAN VEGA4 钨丝灯扫描电镜观察岩样形貌特征以及酸蚀软化层的存在形态。

1.5 酸蚀软化层微观结构研究

测定酸蚀前后岩样的 T_2 谱, 计算岩样的孔径分布^[20-28], 分析得到不同酸蚀条件对酸蚀软化层微观孔隙结构变化的影响规律。提出用孔径变化率表征酸蚀前后的孔径变化, 即与酸蚀前相比, 酸蚀岩样所有孔隙度分量增大的总和。

2 实验结果与讨论

2.1 酸蚀灰岩力学特性

实验结果如表 1、图 1 和图 2 所示。破碎后的岩样上形成垂直于上下端面的裂缝(图 1), 破坏形式基本呈现拉伸破坏, 酸蚀前后的破坏形式未发生变化。酸蚀后的岩样在天然裂缝区域出现了较多的溶蚀裂纹, 并形成了大量微缝隙, 导致岩心内部的力学性质极不稳定, 因此在外力载荷作用下, 其碎块较多且形貌复杂。

由图 2 可知, 酸蚀前后岩样的应力-应变曲线具

表 1 不同酸蚀条件的抗压强度与弹性模量

Table 1 Compressive strength and elastic modulus under different acid etching conditions

岩样编号	酸液质量分数/%	酸液用量/mL	酸蚀温度/°C	酸蚀压力/MPa	抗压强度/MPa	弹性模量/GPa
1#	/	/	/	/	72.4	33.8
2#	5	300	20	0.1	48.3	26.0
3#	10	300	20	0.1	43.1	24.7
4#	5	300	60	0.1	43.4	19.3
5#	5	300	20	5	44.9	22.6



图 1 酸蚀前后拉伸破坏形态

Fig.1 Tensile damage pattern before and after acid etching

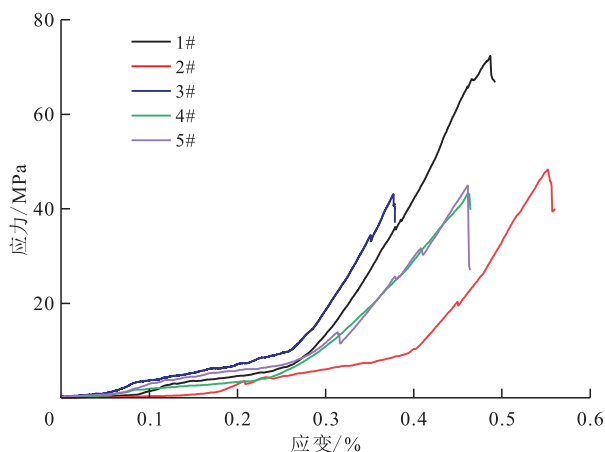


图 2 酸蚀前后岩样应力-应变曲线

Fig.2 Stress-strain curves of samples before and after acid etching

有相同趋势, 大致分为孔隙压密阶段、弹性阶段、屈服阶段与破坏后阶段, 部分岩样内部存在天然裂缝, 在应力-应变曲线中表现为应力小幅度减小, 但继续加载应力仍会升高, 说明未达到破坏应力。由于岩样内部存在天然裂缝以及酸蚀后产生的孔隙和裂缝, 在应力作用下裂缝逐渐闭合, 使得岩样具有一定的可压缩性, 因此应力-应变曲线存在小幅度波动。对比 1# 和 4# 岩样可知, 酸蚀后的岩样抗压强度下降了 40%, 弹性模量下降了 43%, 酸蚀对岩石的

力学性质影响显著。对比2#和5#岩样可知,随着压力增加,酸液在高压驱使下往岩心内部渗流,酸岩反应的面容比增大,整体的溶蚀量增加,破坏了岩样内部颗粒间的胶结强度,因此岩石的抗压强度与弹性模量相比于未加压条件降低。对比2#,3#,4#岩样可知,随酸液浓度与温度增加, H^+ 传质速度加快,酸岩反应更剧烈,酸液对岩心内部溶蚀程度增大,导致其抗压强度和弹性模量均有所降低。

2.2 酸蚀灰岩维氏硬度

单载荷实验 实验结果(图3,表2)表明,在实验过程中,当避开表面溶蚀特征明显的位置,在不同位置施加载荷时,得到的硬度仍存在一定差异,这是由于岩样经过酸蚀后,形成的软化层以及岩石矿物组分存在非均质性。酸蚀后岩样的维氏硬度降低了40%,可以观察到显著的酸蚀软化现象。

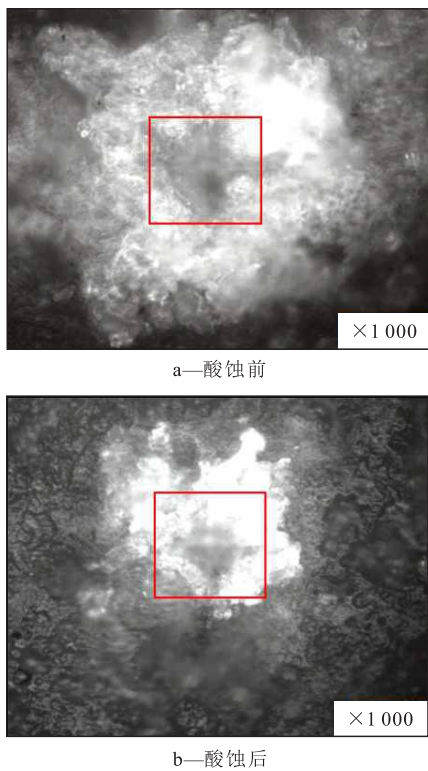


图3 酸蚀前后岩样维氏硬度压痕
Fig.3 Vickers hardness indentation before and after acid etching

表2 单载荷维氏硬度测试结果
Table2 Single-load Vickers hardness

岩样	对角线平均长度/mm	维氏硬度/ ($N \cdot mm^{-2}$)	平均维氏硬度/ ($N \cdot mm^{-2}$)
酸蚀前	0.039 97	348.2	355.95
	0.039 11	363.7	
酸蚀后	0.051 95	206.1	213.80
	0.050 11	221.5	

多载荷实验 由图4可以看出,使用小载荷(25, 50, 100, 200 g)加载,压入深度小于10.49 μm 时,岩样的维氏硬度存在波动,均值为218.02 N/mm^2 ;当使用大载荷加载,压入深度达到11.61 μm 后,岩样的维氏硬度出现明显上升,均值为285.72 N/mm^2 ,但仍小于未酸蚀岩样的硬度(355.95 N/mm^2)。由于岩石的非均质性与酸液的不均匀溶蚀,在小载荷加载时,软化层分布不均,不同位置硬度存在一定差异。但压入深度达到11.61 μm 后,硬度明显上升,这说明压头此时突破了软化层,由此可以确定该岩样的软化层厚度为11.61 μm 。

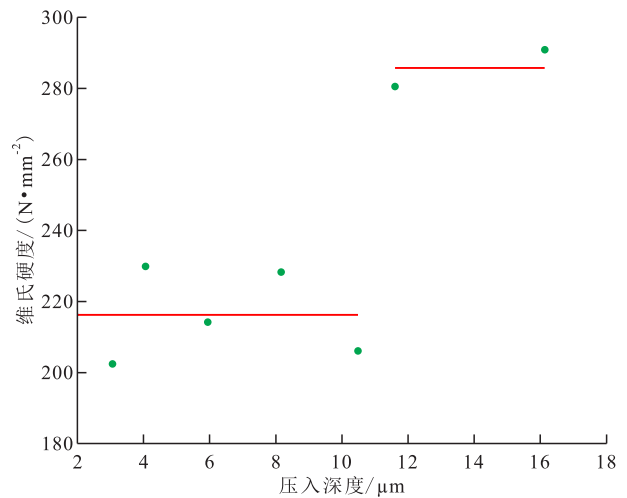


图4 压入深度与对应的维氏硬度
Fig.4 Pressing depth and corresponding Vickers hardness

在维氏硬度实际测量中,酸蚀面凹凸不平,压痕周围散落的岩石颗粒都会对测量结果产生影响。同时岩样表面适合进行维氏硬度实验的区域有限,每一级载荷只能选用1个点进行加载,且维氏硬度测量装置能选择的载荷有限,得到的结果存在一定的随机性,使用多载荷得到的软化层厚度精度有限,但此方法可以在一定程度上表征酸蚀软化层的厚度,为深层酸压改造工艺优化设计提供依据和支撑。

2.3 酸蚀软化层表面形态特征

从图5可以看出,酸蚀前的岩样表面非常致密,仅有少量的微孔隙,而酸蚀后的表层岩石内部产生了大小不一的溶蚀孔洞,并在溶蚀孔洞周边引发应力集中,改变了酸蚀软化层的应力分布。在高闭合应力作用下,溶蚀孔洞易于发生挤压变形或坍塌破坏,这也是酸蚀软化层力学性质改变的主要原因。

2.4 酸蚀软化层微观结构

由于岩样间孔隙结构存在差异,酸蚀前岩样的孔径分布曲线存在区别,只有对比同一块岩样酸蚀前后的孔径分布才有意义。提出利用孔径变化率

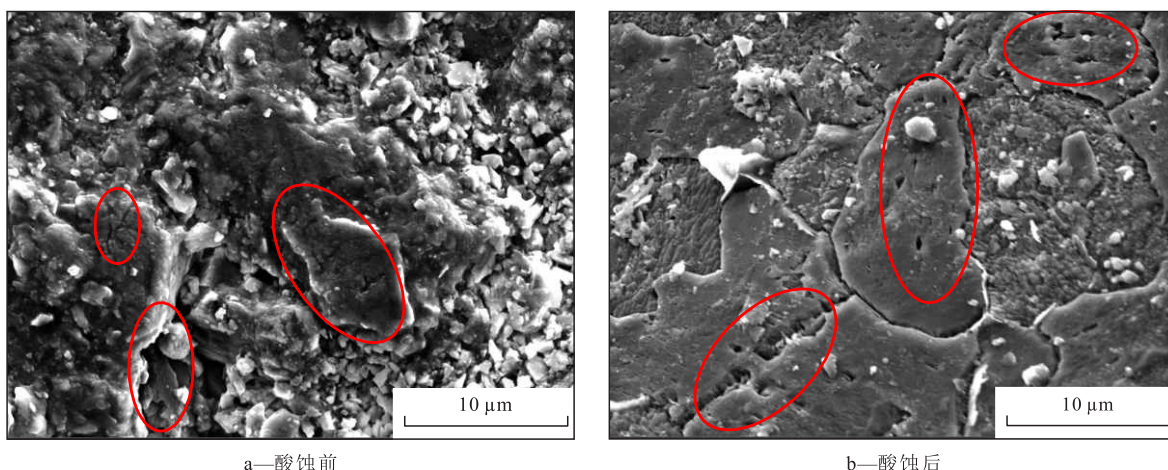


图5 酸蚀前后岩样表面形态
Fig.5 Surface morphology before and after acid etching

来表征酸蚀前后的孔径变化,孔径变化率是指酸蚀后所有孔隙度分量增大的总和。开展核磁共振实验得到岩样的 T_2 谱,分析岩样的孔径分布,计算得到孔径变化率,研究不同酸蚀条件对酸蚀软化层微观孔隙结构变化规律的影响。

2.4.1 温度对孔径变化规律的影响

从图6可以看出,岩样的孔径主要为纳米孔和微米孔2类,以中纳米孔、大纳米孔和小微米孔为主。在中低温(30,60℃)酸蚀条件下,纳米孔无明显变化,小微米孔有小幅增加,这是由于中低温条件下 H^+ 传质速度较小,酸岩反应速率较慢,同时也与岩样内初始孔隙结构分布有关。在高温(90,

120℃)酸蚀条件下,纳米孔数量减少,微米孔数量明显增加,这是因为高温下 H^+ 热运动加剧,酸蚀软化层中原来孔径较小的孔隙在经过酸蚀后不断扩大,或与其他孔隙连通形成孔径更大的孔隙,因此微米孔的孔隙度分量占比明显增加。

从图7可知,温度由30℃增大至120℃,孔径变化率由4.9%增加至6.5%,整体呈线性增长规律。说明随反应温度的升高, H^+ 热运动加剧, H^+ 传质速度加快,酸岩反应速率也随之加快,岩石溶蚀量增加,岩样中微米孔的孔隙度分量增大。

2.4.2 压力对孔径变化规律的影响

由图8和图9可以看出,随着压力增加,孔径变

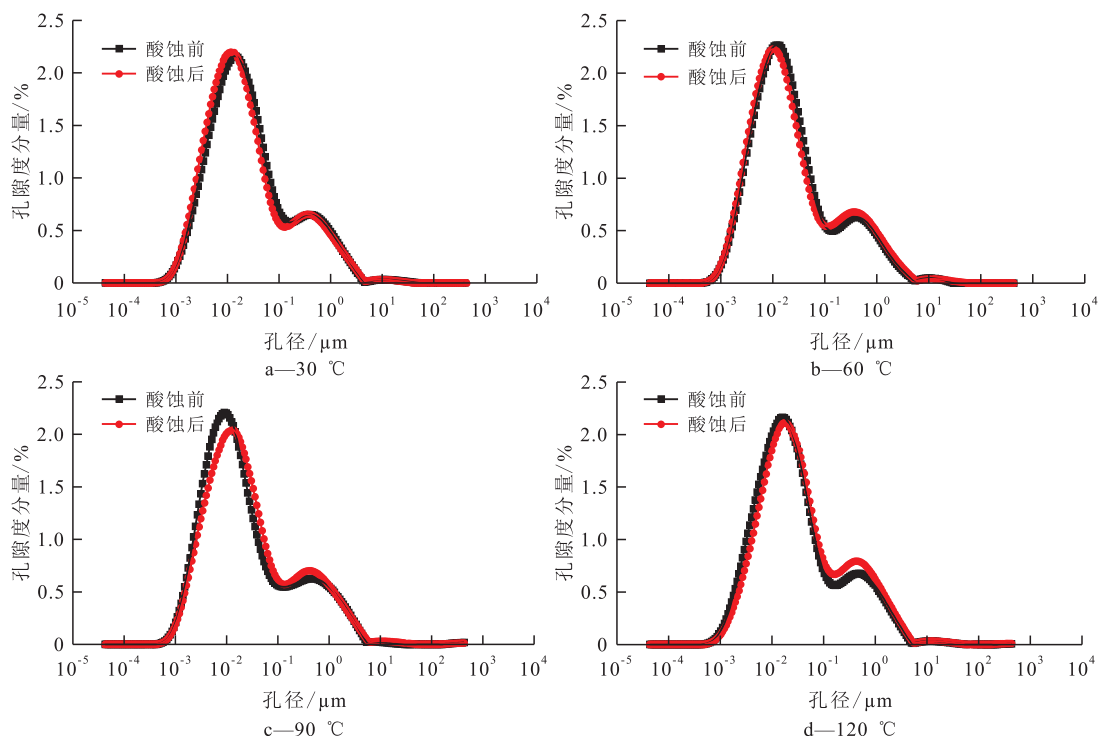


图6 不同温度下酸蚀前后孔径分布
Fig.6 Pore size distribution before and after acid etching at different temperatures

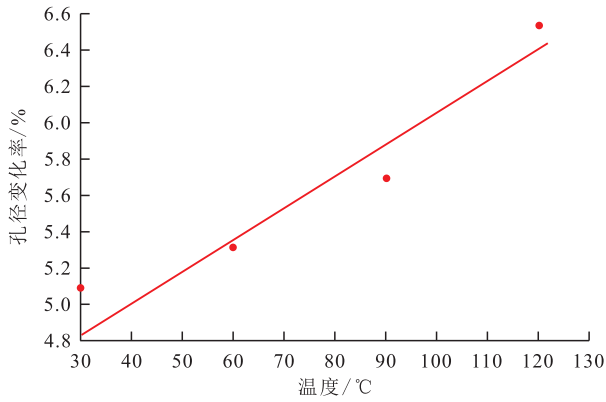


图7 孔径变化率随温度的变化
Fig.7 Variation of aperture rate with temperature

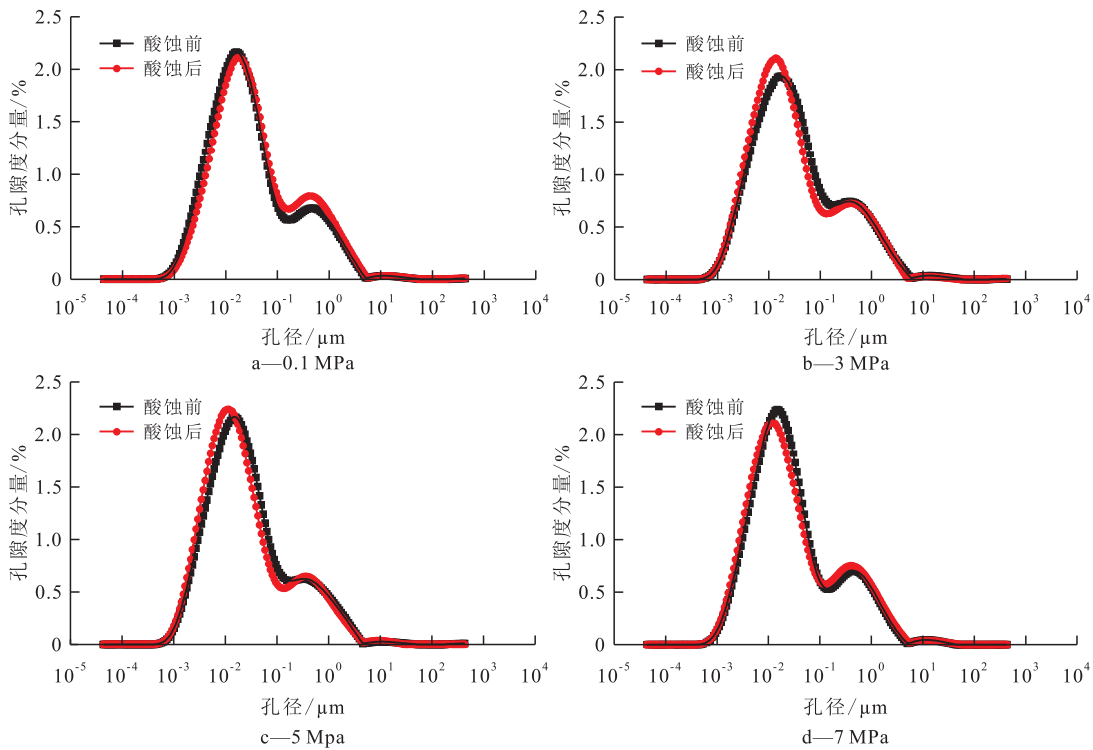


图8 不同压力下酸蚀前后孔径分布
Fig.8 Pore diameter distribution before and after acid etching at different pressures

3 结论

(1) 储层条件下, 温度和酸液浓度对岩石的力学性质具有显著影响。随着酸液浓度与温度的增加, H^+ 传质速度加快, 酸岩反应更剧烈, 酸液对岩样溶蚀程度增大, 岩石力学性质发生显著变化。与酸蚀前相比, 酸蚀后其最大抗压强度以及弹性模量均明显降低, 降幅约为40%。

(2) 酸蚀后的岩样维氏硬度急剧下降, 降幅约为40%, 岩石表面出现明显的酸蚀软化现象。当压入深度达到11.61 μm 后, 维氏硬度发生突变, 这反映了酸蚀软化层具有一定的厚度且承压能力大幅

化率降低, 当压力超过5~6 MPa时, 压力对酸蚀前后孔隙结构变化的影响逐渐减小, 这主要是因为压力超过该值时, 酸岩反应速率基本不受压力的影响。

2.4.3 酸液浓度对孔径变化规律的影响

从图10和图11可以看出, 酸液浓度的增大对酸岩反应速率有着显著影响, 纳米孔数量随之明显增加, 但当酸液质量分数超过8%时, 纳米孔的数量不再明显增加, 此时微米孔数量反而随着酸液浓度的增大而增多, 这主要是因为随着酸液浓度的增加, 更多小孔隙被酸液改造扩大, 或与其他小孔隙连通形成了大孔隙。

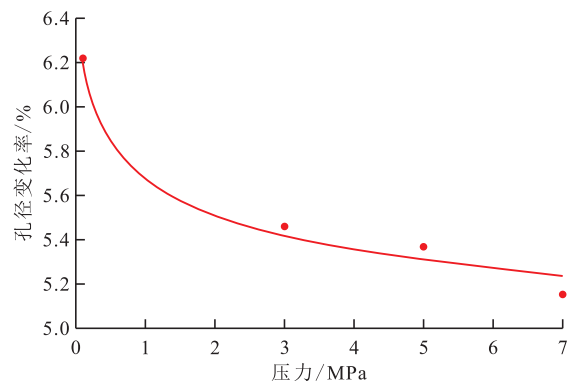


图9 孔径变化率随压力的变化
Fig.9 Variation of aperture rate with pressure

下降。在高闭合应力下酸蚀软化层更易于闭合, 甚至丧失导流能力, 因此在深层酸压改造时, 酸蚀软

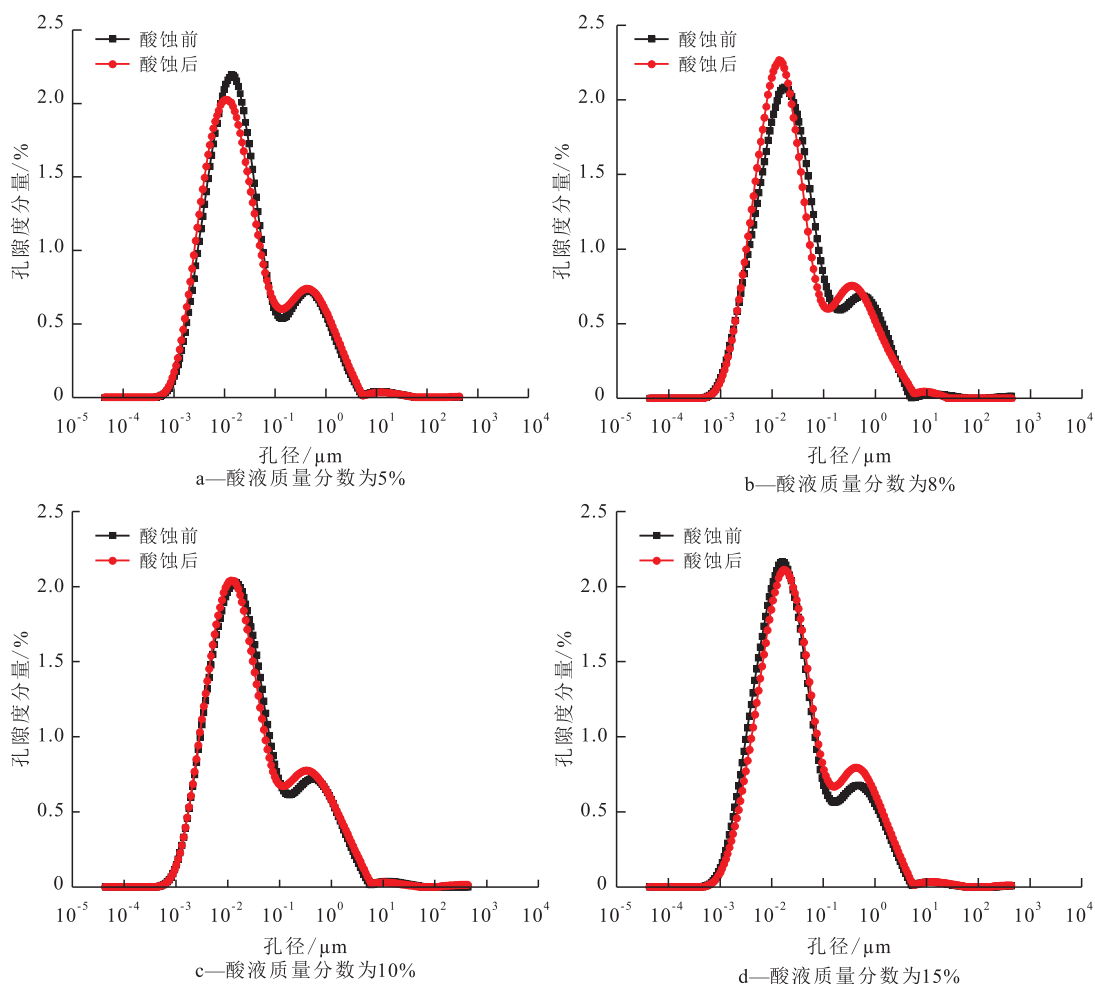


图 10 不同酸液浓度下酸蚀前后孔径分布

Fig.10 Pore size distribution before and after acid etching at different acid concentrations

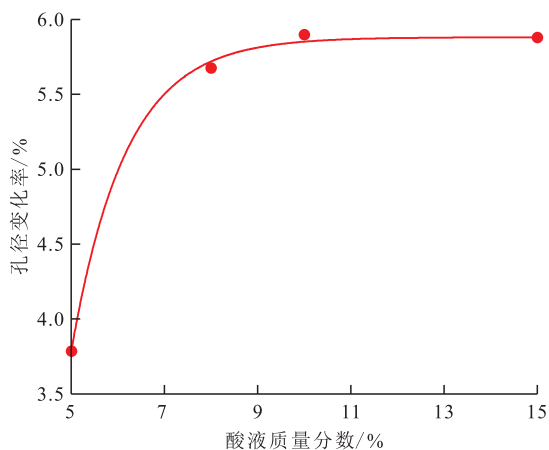


图 11 孔径变化率随酸液浓度的变化

Fig.11 Variation of pore size with acid concentration

化层是一个不可忽视的关键因素,会显著影响酸蚀裂缝导流能力。

(3)酸蚀后的表层岩石内部产生了大小不一的溶蚀孔洞,并在溶蚀孔洞周边引发应力集中,改变了酸蚀软化层的应力分布。在高闭合应力作用下,溶蚀孔洞易于发生挤压变形或坍塌破坏,这也是酸

蚀软化层力学性质改变的主要原因。结合核磁共振 T_2 谱,发现孔径尺寸在 $1\text{ nm}\sim 1\text{ }\mu\text{m}$ 之间的孔隙数量变化最大,酸蚀改变了灰岩软化层内部的孔隙结构,进而显著影响到酸蚀后的岩石力学性质。

符号说明

- d ——压痕的两对角线长度的平均值,mm;
- F ——施加的载荷,N;
- h ——压入深度, μm ;
- HV ——维氏硬度值, N/mm^2 。

参考文献

[1] 程利民,梁玉凯,袁辉,等.酸岩反应非均匀刻蚀程度的精细定量表征及其敏感性因素分析[J]. 油田化学, 2021, 38(2): 240-246.
CHENG Limin, LIANG Yukai, YUAN Hui, et al. Fine quantitative characterization of inhomogeneous etch degree of acid rock reaction and analysis of its sensitivity factors [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(2): 240-246.

[2] 余敏,寿建峰,沈安江,等.碳酸盐岩溶蚀规律与孔隙演化实验

- 研究[J].石油勘探与开发,2016,43(4):564-572.
- SHE Min, SHOU Jianfeng, SHEN Anjiang, et al. Experimental simulation of dissolution law and porosity evolution of carbonate rock [J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 564-572.
- [3] XU P, SHENG M, LIN T, et al. Influences of rock microstructure on acid dissolution at a dolomite surface [J]. Geothermics, 2022, 100: 102324.
- [4] 孙林,邹信波,李旭光,等.珠江口盆地惠州凹陷火山岩酸化可行性[J].油气地质与采收率,2022,29(2):145-154.
- SUN Lin, ZOU Xinbo, LI Xuguang, et al. Feasibility study on acidification of volcanic rocks in Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 145-154.
- [5] 齐宁,李柏杨,方明君,等.基于碳酸盐岩酸化溶蚀形态的酸液最优注入速度界限[J].中国石油大学学报:自然科学版,2017,41(5):117-122.
- QI Ning, LI Boyang, FANG Mingjun, et al. Injection rate optimization for acidizing process of carbonate rocks based on dissolution morphology [J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2017, 41(5): 117-122.
- [6] LAI J, GUO J, MA Y, et al. Effect of acid-rock reaction on the microstructure and mechanical property of tight limestone [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(1): 35-49.
- [7] 黄丹,伊向艺,杨哲,等.高灰质白云岩酸蚀改造机理研究[J].石油化工应用,2018,37(12):85-91.
- HUANG Dan, YI Xiangyi, YANG Zhe, et al. Research of acid etching stimulation in high-lime dolomite [J]. Petrochemical Industry Application, 2018, 37(12): 85-91.
- [8] 曲占庆,齐宁,王在强,等.低渗透油层酸化改造新进展[J].油气地质与采收率,2006,13(6):93-96.
- QU Zhanqing, QI Ning, WANG Zaiqiang, et al. Progress of acidizing techniques in low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(6): 93-96.
- [9] 庞铭,陈华兴,唐洪明,等.基于裂缝重构评价酸蚀对碳酸盐岩应力敏感性的影响[J].特种油气藏,2022,29(1):107-113.
- PANG Ming, CHEN Huaxing, TANG Hongming, et al. Evaluation of the effect of acid erosion on stress sensitivity of carbonate rocks based on fracture reconstruction [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(1): 107-113.
- [10] 崔波,冯浦涌,姚二冬,等.缓速酸段塞注入酸蚀裂缝的刻蚀形态及导流规律:以伊拉克F油田低孔渗碳酸盐岩储层为例[J].大庆石油地质与开发,2023,42(4):74-80.
- CUI Bo, FENG Puyong, YAO Erdong, et al. Etching geometry and conductivity of acid-etched fractures injected with retarded acid slug: taking low-porosity and low-permeability carbonate reservoir of F Oilfield in Iraq as an example [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2023, 42(4): 74-80.
- [11] BARTKO K M, NASR-EL-DIN H A, RAHIM Z, et al. Acid fracturing of a gas carbonate reservoir: the impact of acid type and lithology on fracture half length and width [C]. Denver, Colorado: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 2003.
- [12] WALSH J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract, 1981, 18(5): 429-43.
- [13] 周林波,宋志峰,张俊江,等.MX井深层白云岩储层非均匀酸化压裂技术[J].特种油气藏,2017,24(6):161-164.
- ZHOU Linbo, SONG Zhifeng, ZHANG Junjiang, et al. Non-uniform acid fracturing technology for deep dolomite reservoir in Well MX [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(6): 161-164.
- [14] 李宪文,侯雨庭,古永红,等.白云岩储层酸蚀裂缝导流能力实验研究[J].油气地质与采收率,2021,28(1):88-94.
- LI Xianwen, HOU Yuting, GU Yonghong, et al. Experimental study on conductivity of acid etched fractures in dolomite reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1): 88-94.
- [15] 牟建业,张士诚.酸压裂缝导流能力影响因素分析[J].油气地质与采收率,2011,18(2):69-71.
- MOU Jianye, ZHANG Shicheng. Influence factor analysis on acid pressure rips diversion capacity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2011, 18(2): 69-71.
- [16] BEG M S, KUNAKA O, GONG M, et al. A systematic experimental study of acid fracture conductivity [J]. SPE Formation Damage Control Symposium, 1998, 13(4): 267-271.
- [17] 戴一凡,侯冰.碳酸盐岩酸蚀裂缝面粗糙度与导流能力相关性分析[J].断块油气田,2023,30(4):672-677.
- DAI Yifan, HOU Bing. Correlation analysis between acid-etched fracture surface roughness and fracture conductivity in carbonate reservoir [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(4): 672-677.
- [18] 张家栋,杨泰华,龚建伍,等.酸性环境下含膏盐岩地层中石灰岩孔隙演化及力学特性关联性研究[J/OL].武汉大学学报:工学版,2024,1-15[2024-04-24].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20220913.1946.004.html>.
- ZHANG Jiadong, YANG Taihua, GONG Jianwu, et al. Study on the correlation between pore evolution and mechanical properties of limestone in gypsum-salt strata under acidic environment [J/OL]. Journal of Wuhan University: Engineering Edition, 2024, 1-15 [2024-04-24]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20220913.1946.004.html>.
- [19] 樊东黎.维氏和努氏显微硬度测量[J].热处理,2013,28(5):66-72.
- FAN Dongli. Vickers and Knoop hardness tests [J]. Heat Treatment, 2013, 28(5): 66-72.
- [20] 张超漠,陈振标,张占松,等.基于核磁共振 T_2 谱分布的储层岩石孔隙分形结构研究[J].石油天然气学报,2007,29(4):80-86.
- ZHANG Chaomo, CHEN Zhenbiao, ZHANG Zhansong, et al. Fractal characteristics of reservoir rock pore structure based on NMR T_2 distribution [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(4): 80-86.
- [21] 李扬,张凤生,李建玉,等.川中大安寨致密灰岩储层核磁共振 T_2 谱特征与解析[J].油气地质与采收率,2017,24(1):

- 11-18.
- LI Yang, ZHANG Fengsheng, LI Jianyu, et al. Characterization and evaluation of NMR T_2 spectrum of the tight limestone reservoir in the Daanzhai Formation, Central Sichuan Basin [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(1): 11-18.
- [22] 张钰祥,杨胜来,李强,等.应力对超深层碳酸盐岩气藏孔喉结构的影响[J].*油气地质与采收率*,2023,30(1):49-59.
- ZHANG Yuxiang, YANG Shenglai, LI Qiang, et al. Effect of stress on pore and throat structure of ultra-deep carbonate gas reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(1): 49-59.
- [23] MAYS T J. A new classification of pore sizes [J]. *Studies in Surface Science and Catalysis*, 2007, 160(7): 57-62.
- [24] 李楚雄,申宝剑,卢龙飞,等.松辽盆地沙河子组页岩孔隙结构表征——基于低场核磁共振技术[J].*油气藏评价与开发*, 2022, 12(3):468-476.
- LI Chuxiong, SHEN Baojian, LU Longfei, et al. Pore structure characterization of Shahezi Formation shale in Songliao Basin: Based on low-field nuclear magnetic resonance technology [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12(3): 468-476.
- [25] 白振强,王清华,宋文波.基于核磁共振的天然气驱储集层孔喉动用下限[J].*新疆石油地质*,2023,44(1):58-63.
- BAI Zhenqiang, WANG Qinghua, SONG Wenbo. Lower limits of pore throat producing in natural gas drive reservoirs based on nuclear magnetic resonance [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(1): 58-63.
- [26] 孙中良,李志明,申宝剑,等.核磁共振技术在页岩油气储层评价中的应用[J].*石油实验地质*,2022,44(5):930-940.
- SUN Zhongliang, LI Zhiming, SHEN Baojian, et al. NMR technology in reservoir evaluation for shale oil and gas [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2022, 44(5): 930-940.
- [27] 杜焕福,侯瑞卿,孙鑫,等.基于核磁共振的页岩孔隙结构特征研究[J].*非常规油气*,2023,10(5):38-47.
- DU Huanfu, HOU Ruiqing, SUN Xin, et al. Study on pore structure characteristics of shale based on NMR [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2023, 10(5): 38-47.
- [28] 卢振东,刘成林,臧起彪,等.高压压汞与核磁共振技术在致密储层孔隙结构分析中的应用:以鄂尔多斯盆地合水地区为例[J].*地质科技通报*,2022,41(3):300-310.
- LU Zhendong, LIU Chenglin, ZANG Qibiao, et al. Application of high pressure mercury injection and nuclear magnetic resonance in analysis of the pore structure of dense sandstone: A case study of the Heshui area, Ordos Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(3): 300-310.

编辑 经雅丽