

酸液腐蚀对海相碳酸盐岩力学参数的影响研究

高可攀

(中国石化华北油气分公司勘探开发研究院, 郑州 450006)

摘要: 酸液腐蚀导致岩石力学强度改变, 进而引发油气开发过程中的井壁失稳问题。然而, 酸液腐蚀对不同岩性岩石的影响程度不同。笔者以四种不同岩性的海相碳酸盐岩为研究对象, 进行酸液腐蚀前后的力学强度开展实验测试, 研究酸液腐蚀对不同岩性碳酸盐岩力学参数的影响及机理分析。结果表明: ①不同岩性的海相碳酸盐岩受酸液腐蚀的程度不同。白云岩被腐蚀程度明显小于灰岩被腐蚀程度。岩心尺寸越小, 被腐蚀程度越大。②白云岩的硬度普遍高于灰岩, 腐蚀后的白云岩硬度依旧高于灰岩。酸液腐蚀后的碳酸盐岩的硬度整体出现降低的现象, 且硬度的降低程度与酸液腐蚀程度无明显关系。酸液腐蚀后的岩心依旧保持着较高的脆性。③酸液腐蚀后抗张强度改变量表现出云质灰岩最为显著, 灰岩次之, 白云岩改变量较小。灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩抗张强度的相对增量分别为 26.84%、81.63%、10.92%、35.7%。灰岩的抗张强度受酸液腐蚀的影响较大, 白云岩抗张强度受酸液腐蚀影响较小。此研究内容为解决井壁失稳等问题提供了实验依据。

关键词: 碳酸盐岩; 酸蚀百分比; 力学强度; 硬度; 抗张强度

中图分类号: TE21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.09

0 引言

近年来中国的碳酸盐岩气藏勘探开发呈现出快速发展的态势, 特别是在塔里木、鄂尔多斯和四川盆地, 碳酸盐岩气藏已经成为陆上开发有前景的气藏类型^[1]。然而碳酸盐岩气藏不仅开采难度巨大, 且在开采过程中会出现产量递减快、重浆对储层堵塞和污染, 井壁稳定性等方面的问题。研究酸液腐蚀对碳酸盐岩力学参数的影响尤为重要, 其中, 抗张强度和硬度是岩石的两个重要的力学参数。酸液腐蚀过程中碳酸盐岩力学性质的变化规律是影响井壁稳定性的关键因素, 且碳酸盐岩具有内部结构复杂及较强的非均质性的典型特征^[2-7]。在钻井过程中, 酸液腐蚀导致岩样力学特性的变化, 影响井壁稳定,

进而影响钻井过程中安全问题。抗张强度和硬度等力学性质一直是国内外专家学者研究的热点^[8-11]。丁乙等^[12]针对川南地区龙马溪页岩地层的井壁失稳问题, 研究了酸液腐蚀的作用时长对页岩的弹性模量、泊松比、抗张强度等力学性质的影响, 发现裂缝是流体侵入的主要通道, 且随着流体的侵入, 页岩岩石的整体强度减弱, 从而影响井壁稳定。吴文等^[13]研究了孔隙对白云岩力学强度特性的影响研究, 发现在某一围压作用下, 岩石的强度随着孔隙度的增加而减少; 在相同孔隙度的岩石, 应力偏量(三轴峰值应力)随着围压的增加而增加。高彦芳等^[14]研究了温度对油砂力学性质的影响, 发现不同地区油砂的力学性质受温度的影响程度存在明显差异, 其中 Cold Lake 和克拉玛依油砂的力学性质受温度影响较大。周忠亚^[16]通过对酸液反应前后岩石力

收稿日期: 2023-11-21

第一作者: 高可攀(1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事岩石物理、岩石力学及核磁测井等研究, E-mail: 474011928@qq.com。

学参数分析评价,发现酸液腐蚀后页岩的三轴抗压强度、弹性模量和泊松比都降低的规律。韩向义等^[17]从弹性模量及岩石脆性的角度开展了页岩气储层脆性预测。倪苏黔等^[18]从干一酸侵蚀角度探讨白砂岩损伤过程中岩体的物理力学参数的演化规律。以上研究多为研究砂岩、页岩等岩性,对孔隙结构复杂的碳酸盐岩的力学性质研究较少,且没有考虑酸液腐蚀程度对碳酸盐岩力学性质的影响。因此,针对以上问题,通过室内实验模拟,研究酸液对不同岩性碳酸盐岩的腐蚀程度以及酸液腐蚀对碳酸盐岩力学强度的影响及机理分析。

1 岩样特征及酸蚀程度

1.1 实验岩心制备

为考虑岩性与酸液腐蚀作用对海相碳酸盐岩力学强度的影响,本实验选取了四种不同岩性的碳酸盐岩(灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩)分别在原岩及酸蚀作用后进行力学试验测试。实验岩心主要取自野外露头,取芯过程中对岩石进行宏观描述,选出四种岩性岩石,露头岩石见图 1。为了避免岩石试样的离散性,在加工试样时,岩性相同的岩样均取自同一块岩石的相邻部位。为尽可能保持岩样的原有状态及一致性,同种岩性样品均取自同一块比较完整的大岩块。岩样制备:首先制作压入硬度实验岩样,将岩心加工为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 小圆柱体。保证试样两端光滑、平行(平行度小于 0.01 mm)且于中轴垂直(角度偏差不大于 0.05°)。其次制作抗张实验岩样,岩心尺寸为 $\Phi 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱体。保证试样两端光滑、平行(平行度小于 0.01 mm)且于中轴垂直(角度偏差不大于 0.05°)。岩石加工均在刚性岩心钻取机、切割机及打磨机床上进行,加工过程中应避免产生裂缝。制备实验岩心照片见图 2。

实验选取 48 块四种不同岩性的碳酸盐岩岩心,分别对不同岩性的岩心进行孔隙度渗透率测试以及密度测试。通过试验获取岩心的基础物性,其中,灰岩的平均孔隙度为 0.8% ,平均渗透率为 0.00081 mD ,平均密度为 2.68 g/cm^3 ;云质灰岩的平均孔隙度为 1.7% ,平均渗透率为 0.00089 mD ,平均密度为 2.67 g/cm^3 ;微粉晶白云岩的平均孔隙度为 1.2% ,平均渗透率为 0.00089 mD ,平均密度为 2.77 g/cm^3 ;藻黏结白云岩的平均孔隙度为 1.4% ,平均渗透率为 0.00088 mD ,平均密度为 2.75 g/cm^3 。四种岩

性的碳酸盐岩均为低孔、低渗的致密岩心。



图 1 野外露头取芯照片

Fig. 1 Outdoor outcrop rock photos



图 2 制备岩心照片

Fig. 2 Preparation of core photos

1.2 酸液腐蚀实验

酸液配方主要依据工区现场的实际需求进行配置,酸液配方的具体成分包括:稀盐酸、蒸馏水、缓蚀剂(液)、缓蚀剂(固)、铁离子、助排剂、胶凝剂。酸液作用方式为浸泡,主要步骤包括真空负压、酸液注入、高压浸泡。

具体的实验过程如下:将四种岩性的岩心分为两组,第一组进行原岩硬度、抗张试验,第二组进行酸液腐蚀并测试腐蚀后的硬度及抗张强度。对第二组岩心进行酸液浸泡腐蚀,酸液腐蚀过程为:根据配方配制足量酸液。将需要腐蚀岩心放入真空器皿中抽真空 24 h,抽至负压后,将配制的酸液倒吸至真空器皿中至完全浸泡实验岩心,按照工程实际,酸液浸泡时间为 4 h,取出岩心,观察岩心表面结构变化并拍照。观察发现,岩心表面被明显腐蚀,且出现变形、软化的现象。其中,不同碳酸盐岩的岩性用 A、B、C、D 表示,分别代表灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩。酸液腐蚀前的岩心按照岩性加实验名称加 1、2、3 进行编号,腐蚀后的岩心按照岩性加实验名称加 4、5、6 进行编号。酸液对碳酸盐岩

腐蚀程度用酸蚀质量百分比来表征,酸蚀质量百分比计算见公式(1)。其中, m_1 为原岩质量, m_2 为腐蚀后岩心质量。

$$\omega = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1} \right) \times 100\%$$

(1) 表 1、表 2、图 3、图 4。

表 1 硬度试验岩心酸蚀程度

Tab.1 Corrosion degree of hardness test core

岩心编号	原岩质量/g	腐蚀后质量/g	绝对增量/g	质量酸蚀百分比/%
A-YD-1	26.71	23.68	-3.03	-11.34
A-YD-2	26.54	23.12	-3.42	-12.89
A-YD-3	26.48	23.25	-3.23	-12.20
B-YD-1	26.83	21.79	-5.04	-18.78
B-YD-2	26.96	22.19	-4.77	-17.69
B-YD-3	26.79	22.34	-4.45	-16.61
C-YD-1	27.74	25.83	-1.91	-6.88
C-YD-2	27.84	25.98	-1.86	-6.68
C-YD-3	27.93	24.87	-3.06	-10.95
D-YD-1	27.27	23.26	-4.01	-14.70
D-YD-2	26.00	23.51	-2.49	-9.57
D-YD-3	27.39	23.76	-3.63	-13.25

表 2 抗张试验岩心酸蚀程度

Tab.2 Corrosion degree of tensile test core

岩心编号	原岩质量/g	腐蚀后质量/g	绝对增量/g	质量酸蚀百分比/%
A-KZ-1	135.57	123.13	-12.44	-9.17
A-KZ-2	133.85	123.85	-10	-7.47
A-KZ-3	136.30	125.93	-10.37	-7.60
B-KZ-1	135.46	112.30	-23.16	-17.09
B-KZ-2	135.31	114.38	-20.93	-15.46
B-KZ-3	135.57	113.10	-22.47	-16.57
C-KZ-1	139.85	130.94	-8.91	-6.37
C-KZ-2	140.02	132.11	-7.91	-5.64
C-KZ-3	140.25	130.55	-9.7	-6.91
D-KZ-1	136.67	127.65	-9.02	-6.59
D-KZ-2	139.20	129.28	-9.92	-7.12
D-KZ-3	138.49	126.72	-11.77	-8.49

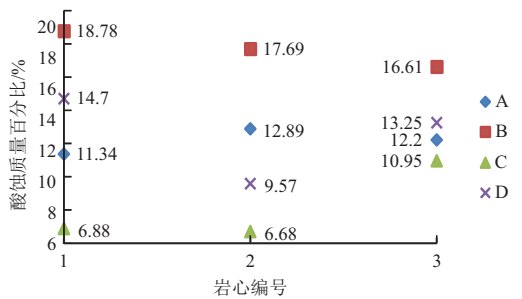


图 3 硬度试验岩心酸蚀质量百分比

Fig. 3 Percentage of core acid corrosion in hardness test

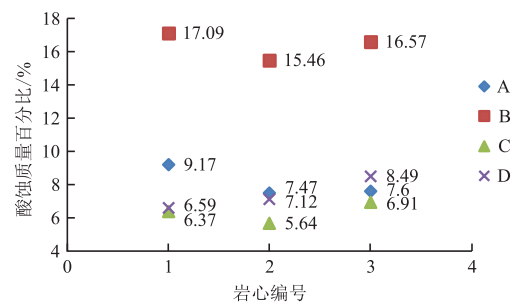


图 4 抗张试验岩心酸蚀质量百分比

Fig. 4 Percentage of core acid corrosion in tensile test

硬度测试试验岩心:灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩的平均酸蚀质量百分比分别为12.14%、17.69%、8.17%、12.51%。抗张强度测试试验岩心:云质灰岩的酸蚀程度最为显著,平均酸蚀程度分布在15%左右;灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩的酸蚀程度较小,且都在10%以下。通过对比可以发现,白云岩受酸液的腐蚀程度明显小于灰岩被腐蚀程度,且岩心受腐蚀程度与岩心尺寸也有关系。其中,硬度试验岩心的尺寸较小,抗张强度试验岩心的尺寸较大。可以看到,硬度试验岩心的平均酸蚀质量百分比为12.63%,抗张试验岩心的平均酸蚀质量百分比为9.54%。表明岩心的尺寸越小,酸蚀程度越大。这是因为岩心存在尺度效应,小尺度岩心的表面积也相对较小,大尺度岩心的表面积较大,在酸液腐蚀的过程中,酸液沿岩心表面逐渐腐蚀岩心,表面积小的更容易被腐蚀。因此,尺寸小的岩心被腐蚀程度相对更高,反之亦然。

2 碳酸盐岩骨架强度研究

2.1 碳酸盐岩硬度试验方法

岩石骨架强度是决定岩石整体强度的重要因素,本节采用压入硬度法评价岩石骨架强度以及酸液作用对其强度的影响。岩石硬度是反映岩石软硬,钻井难易程度的重要指标。如果钻井液能在保持井壁稳定前提下,快速降低岩石硬度提高破岩效率,既可以大幅度提高钻井速度,从而降低钻井成本,加快勘探开发过程。硬度是反映岩石抵抗工具侵入破坏的能力的参数。本研究采用史氏压入硬度

测定方法,将岩样放入硬度仪,在一定的压力下,由一定形状的压头压入并破碎岩石,通过记录岩石破坏时所施加的压力和压头的面积来测定岩石的硬度。岩石硬度实验仪器见图5。

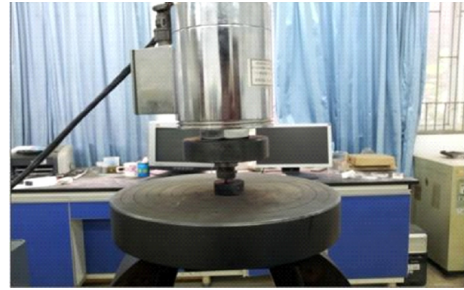


图5 岩石硬度试验仪器

Fig. 5 Rock hardness tester

岩石的硬度 P 为岩样破坏时接触面上单位面积的载荷,岩石硬度计算见公式(2)。

$$P = \frac{F}{S} \quad (2)$$

F 为岩样产生破坏时压头的载荷; S 为压头的面积。

本文硬度实验岩心选取四种岩性海相碳酸盐岩共24块,每种岩性数量6块。灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩分别对应A、B、C、D。将各种岩性岩心平均分为两组,保证实验岩心的物性相近,第一组进行原岩的硬度试验,第二组岩心进行酸液腐蚀后的硬度试验。

2.2 碳酸盐岩硬度试验结果分析

四种岩性的原岩岩心及酸液腐蚀前后的岩心骨架强度对比如表3,图6所示。

表3 酸液腐蚀前后岩心硬度
Tab. 3 Core hardness before and after acid corrosion

岩性	岩心编号	原岩/MPa	岩心编号	腐蚀后/MPa	绝对增量/MPa	相对增量/%
灰岩	A-YD-1	937.29	A-YD-4	403.56	-533.73	-56.9
	A-YD-2	502.60	A-YD-5	277.33	-225.27	-44.8
	A-YD-3	513.36	A-YD-6	313.63	-199.73	-38.9
云质灰岩	B-YD-1	552.41	B-YD-4	550.45	-1.96	-0.04
	B-YD-2	541.54	B-YD-5	328.84	-212.7	-39.3
	B-YD-3	477.13	B-YD-6	364.98	-112.15	-23.5
微粉晶白云岩	C-YD-1	1 037.10	C-YD-4	856.92	-180.18	-17.4
	C-YD-2	680.89	C-YD-5	642.43	-38.46	-5.65
	C-YD-3	746.29	C-YD-6	512.23	-234.06	-31.4
藻黏结白云岩	D-YD-1	1 075.39	D-YD-4	551.93	-523.46	-48.7
	D-YD-2	925.40	D-YD-5	510.39	-415.01	-44.8
	D-YD-3	627.59	D-YD-6	545.62	-81.97	-13.6

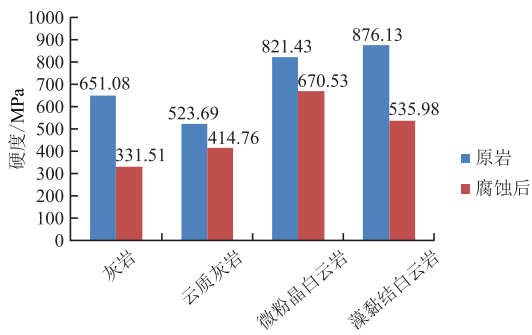


图 6 酸液腐蚀前后岩心硬度对比

Fig. 6 Hardness comparison before and after acid corrosion

由表可知:灰岩原岩的平均硬度为 651.08 MPa, 腐蚀后灰岩的平均硬度为 331.51 MPa;云质灰岩的平均硬度为 523.69 MPa, 腐蚀后云质灰岩的平均硬度为 414.76 MPa;微粉晶白云岩的平均硬度

为 821.43 MPa, 腐蚀后微粉晶白云岩的平均硬度为 670.53 MPa;藻黏结白云岩的平均硬度为 876.13 MPa, 腐蚀后藻黏结白云岩的平均硬度为 535.98 MPa。对于原岩及腐蚀后的岩心,白云岩的硬度普遍高于灰岩,即白云岩的骨架强度高于灰岩。通过图 6 对比分析,酸液腐蚀后碳酸盐岩整体的硬度均降低,即腐蚀后岩心的骨架强度降低。其中,灰岩骨架强度降低率为 46.87%;云质灰岩骨架强度降低率为 20.95%;微粉晶白云岩骨架强度降低率为 18.15%;藻黏结白云岩骨架强度降低率为 35.7%。

2.3 酸液腐蚀前后骨架强度变化分析

为了研究酸液腐蚀程度对岩石骨架强度的影响以及酸液腐蚀前后骨架强度变化的机理。分析酸液腐蚀程度与骨架强度变化之间的关系及相关性。碳酸盐岩酸液腐蚀程度及骨架强度变化如表 4 所示。

表 4 酸液腐蚀前后岩心硬度及腐蚀程度

Tab. 4 Core hardness, corrosion degree before and after acid corrosion

岩性	岩心编号	原岩质量/g	腐蚀后质量/g	绝对增量/g	质量酸蚀百分比/%	硬度相对增量/%
灰岩	A-YD-4	26.71	23.68	-3.03	-11.34	-56.9
	A-YD-5	26.54	23.12	-3.42	-12.89	-44.8
	A-YD-6	26.48	23.25	-3.23	-12.20	-38.9
云质灰岩	B-YD-4	26.83	21.79	-5.04	-18.78	-0.04
	B-YD-5	26.96	22.19	-4.77	-17.69	-39.3
	B-YD-6	26.79	22.34	-4.45	-16.61	-23.5
微粉晶白云岩	C-YD-4	27.74	25.83	-1.91	-6.88	-17.4
	C-YD-5	27.84	25.98	-1.86	-6.68	-5.65
	C-YD-6	27.93	24.87	-3.06	-10.95	-31.4
藻黏结白云岩	D-YD-4	27.27	23.26	-4.01	-14.70	-48.7
	D-YD-5	26.00	23.51	-2.49	-9.57	-44.8
	D-YD-6	27.39	23.76	-3.63	-13.25	-13.6

灰岩的平均酸蚀质量百分比为 12.14%, 硬度的平均相对增量为 -46.87%;云质灰岩的平均酸蚀质量百分比为 17.69%, 硬度的平均相对增量为 -46.87%;微粉晶白云岩的平均酸蚀质量百分比为 8.17%, 硬度的平均相对增量为 -18.15%;藻黏结白云岩平均酸蚀质量百分比为 12.51%, 硬度的平均相对增量为 -35.7%。通过对比四种不同岩性岩心的质量酸蚀百分比以及酸液腐蚀前后硬度的相对增量,可以看到,酸蚀后的骨架强度都出现了不同程度的降低,然而骨架强度与酸蚀程度并没有出现很好的相关性,这是因为由于海相碳酸盐岩较为致密,酸液浸泡过程中酸液仅能与岩样表层发生作用,

使表层溶蚀、软化。对于硬度测试来讲,载荷作用方式为点载荷,因此,表层的软化比如导致硬度的降低,但是酸蚀可能使得岩心变形的位在岩心的边缘,对于点载荷作用的岩心圆形表面影响不大,也就是说酸液腐蚀的程度并没有通过点载荷作用的硬度数据表现出来,硬度表现出了酸液作用后岩心的软化程度而并非变形程度。在点载荷的作用下,酸液腐蚀前后的岩心都保持着较高的脆性,酸液腐蚀前、后岩心硬度实验的载荷位移曲线如图 7、图 8 所示。腐蚀后的岩心破裂时,位移明显左移。在破裂时,载荷曲线垂直下降,表明岩石的脆性较高。

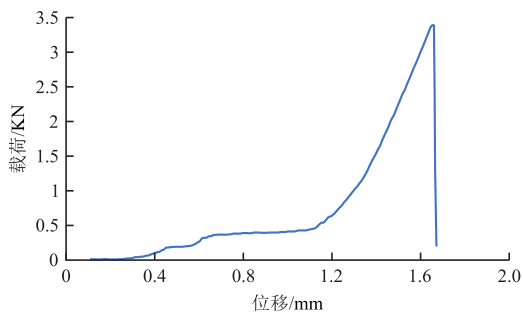


图7 灰岩硬度载荷位移图(原岩)

Fig. 7 Load-displacement diagram of limestone hardness (original rock)

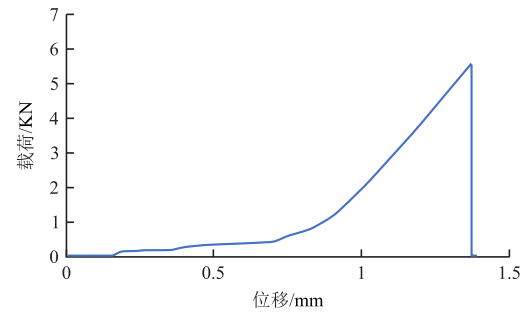


图8 灰岩硬度载荷位移图(腐蚀后)

Fig. 8 Load-displacement diagram of limestone hardness (after corrosion)

3 碳酸盐岩抗张强度研究

3.1 碳酸盐岩抗张强度试验方法

岩石抗张强度是指岩石在单轴拉力作用下达破坏时的极限强度,在数值上等于破坏时的最大拉应力。岩石力学实验室常采用巴西劈裂法测定岩石的抗张强度,试件的形状用的最多的是圆柱体。把加工好的短圆柱状岩石试件置于压力机的承压板上,沿着圆柱体直径方向施加集中载荷,试件受力后会沿着受力的直径方向劈开。根据弹性力学理论,沿着施加集中力 P_c 的直径方向产生近似均匀分布

的水平张应力,因此,只需用试件破坏时的最大压力 P_{max} 代替上式中的 P_c 即可得到岩石的抗张强度 (σ_t)。岩石抗张实验仪器见图 9。

岩石抗张强度计算见公式(3)。

$$\sigma_t = \frac{2P_{max}}{\pi DL} \quad (3)$$

P_{max} 为岩样产生破坏时的最大压力; D 为岩样的直径; L 为岩样的长度。

笔者选取四种岩性海相碳酸盐岩共 24 块,每种岩性数量 6 块。灰岩、云质灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩分别对应 A、B、C、D。将各种岩性岩心平均分为两组,第一组进行原岩的抗张强度试验,第二组岩心进行酸液腐蚀后的抗张强度试验。

3.2 碳酸盐岩抗张强度试验结果分析

分别对原岩及酸液腐蚀后岩心进行抗张强度测试,得到四种岩性的原岩岩心及酸液腐蚀前后的岩心抗张强度对比如表 5,图 10 所示。

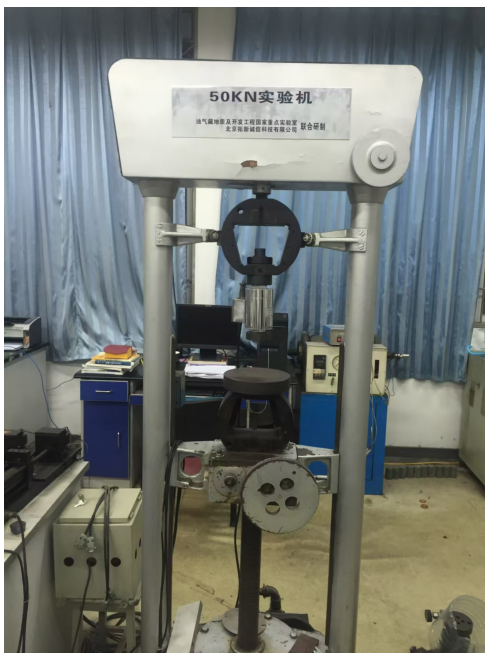


图9 岩石抗张试验仪器

Fig. 9 Rock tensile tester

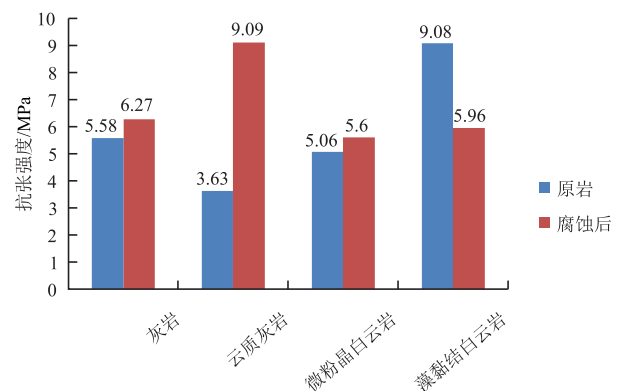


图10 酸液腐蚀前后抗张强度对比

Fig. 10 Tensile strength comparison before and after acid corrosion

表 5 酸液腐蚀前后岩心抗张强度

Tab. 5 Tensile strength before and after acid corrosion

岩性	岩心编号	原岩/MPa	岩心编号	腐蚀后/MPa	绝对增量/MPa	相对增量/%
灰岩	A-KZ-1	7.14	A-KZ-4	5.16	-1.98	-27.73
	A-KZ-2	5.45	A-KZ-5	3.74	-1.71	-31.37
	A-KZ-3	4.14	A-KZ-6	9.92	5.78	139.61
云质灰岩	B-KZ-1	3.20	B-KZ-4	3.54	0.34	10.62
	B-KZ-2	4.73	B-KZ-5	4.86	0.13	2.75
	B-KZ-3	2.95	B-KZ-6	9.78	6.83	231.52
微粉晶白云岩	C-KZ-1	4.82	C-KZ-4	5.6	0.78	16.18
	C-KZ-2	5.10	C-KZ-5	6.14	1.04	20.39
	C-KZ-3	5.26	C-KZ-6	5.06	-0.2	-3.80
藻黏结白云岩	D-KZ-1	5.20	D-KZ-4	5.04	-0.16	-3.07
	D-KZ-2	13.02	D-KZ-5	7.96	-5.06	-38.86
	D-KZ-3	9.02	D-KZ-6	4.88	-4.14	-45.89

由表可知:灰岩原岩的平均抗张强度为 5.58 MPa,腐蚀后灰岩的平均抗张强度为 6.27 MPa;云质灰岩的平均抗张强度为 3.63 MPa,腐蚀后云质灰岩的平均抗张强度为 9.09 MPa;微粉晶白云岩的平均抗张强度为 5.06 MPa,腐蚀后微粉晶白云岩的平均抗张强度为 5.6 MPa;藻黏结白云岩的平均抗张强度为 9.08 MPa,腐蚀后藻黏结白云岩的平均抗张强度为 5.96 MPa。对于腐蚀后的岩心,灰岩的抗张强度普遍高于白云岩。通过图 10 对比分析,酸液腐蚀后碳酸盐岩的抗张强度除了藻黏结白云岩有所

外降低,其余岩性岩心的抗张强度均有所提高。其中,灰岩抗张强度的相对增量为 26.84%;云质灰岩抗张强度的相对增量为 81.63%;微粉晶白云岩抗张强度的相对增量为 10.92%;藻黏结白云岩抗张强度的相对增量为 35.7%。

3.3 酸液腐蚀前后抗张强度变化分析

为了研究酸液腐蚀程度对岩石抗张强度的影响以及酸液腐蚀前后抗张强度变化的机理。分析酸液腐蚀程度与骨架强度变化之间的关系及相关性。碳酸盐岩酸液腐蚀程度及抗张强度变化如表 6 所示。

表 6 酸液腐蚀前后岩心抗张强度及酸蚀程度

Tab. 6 Tensile strength, corrosion degree before and after acid corrosion

岩性	岩心编号	原岩质量/g	腐蚀后质量/g	绝对增量/g	质量酸蚀百分比/%	抗张强度相对增量/%
灰岩	A-KZ-4	135.57	123.13	-12.44	-9.17	-27.73
	A-KZ-5	133.85	123.85	-10	-7.47	-31.37
	A-KZ-6	136.30	125.93	-10.37	-7.60	139.61
云质灰岩	B-KZ-4	135.46	112.30	-23.16	-17.09	10.62
	B-KZ-5	135.31	114.38	-20.93	-15.46	2.75
	B-KZ-6	135.57	113.10	-22.47	-16.57	231.52
微粉晶白云岩	C-KZ-4	139.85	130.94	-8.91	-6.37	16.18
	C-KZ-5	140.02	132.11	-7.91	-5.64	20.39
	C-KZ-6	140.25	130.55	-9.7	-6.91	-3.80
藻黏结白云岩	D-KZ-4	136.67	127.65	-9.02	-6.59	-3.07
	D-KZ-5	139.20	129.28	-9.92	-7.12	-38.86
	D-KZ-6	138.49	126.72	-11.77	-8.49	-45.89

可以看到不同岩性岩心被酸液腐蚀程度不同,且酸蚀程度越大,抗张强度改变量越大。其中,云质灰岩的酸蚀程度最为显著,平均分布在 15% 左右;灰岩、微粉晶白云岩、藻黏结白云岩的酸蚀程度较

小,且都在 10% 以下。抗张强度改变量也表现出云质灰岩最为显著,灰岩次之,白云岩改变量较小。也就是说灰岩的抗张强度受酸液腐蚀的影响较大,白云岩的抗张强度受酸液腐蚀影响较小。为了深入探

究酸液腐蚀程度对碳酸盐岩的影响以及出现抗张强度增大现象的原因。同时考虑同组相同岩性岩石抗张强度改变量的差异,其中,灰岩、微粉晶白云岩存在平均抗张强度增量正负相反情况。因此,选取酸液腐蚀后抗张强度同时显著增大的云质灰岩以及酸液腐蚀后抗张强度同时减小的藻黏结白云岩在抗张试验过程中的载荷位移图进行对比分析。

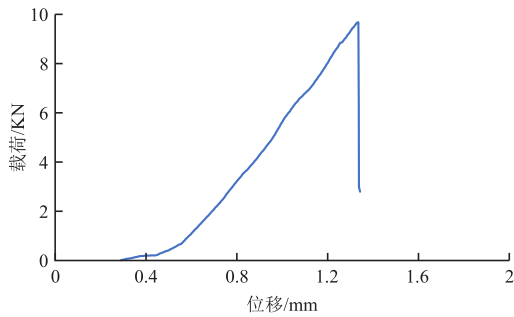


图 11 云质灰岩载荷位移图(原岩)
Fig. 11 Load displacement diagram of cloud limestone (original rock)

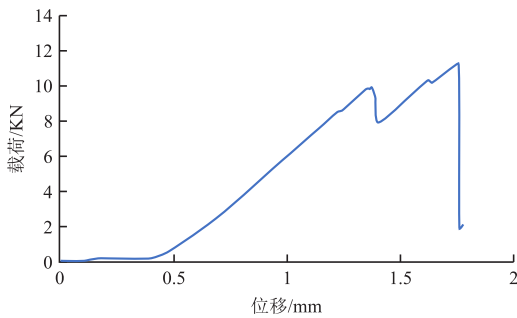


图 12 云质灰岩载荷位移图(腐蚀后)
Fig. 12 Load displacement diagram of cloud limestone (after corrosion)

对比分析酸液腐蚀前后云质灰岩的载荷位移曲线,可以看到,云质灰岩原岩随着载荷的增加,在达到峰值强度之前曲线迅速增加,达到峰值之后迅速跌落,保持着高脆性;酸液腐蚀后岩心随着载荷的增加,在达到峰值强度之前,曲线出现了先上升后下降再上升的过程,且过程为曲线,表现出塑性变形。说明酸液腐蚀对云质灰岩的影响较大。对于藻黏结白云岩来讲,原岩即酸液腐蚀后的载荷位移曲线均表现出峰值之前迅速增加,峰值之后快速跌落的性质,没有软化现象,说明酸液腐蚀对藻黏结白云岩的影响较小。受酸液腐蚀影响明显的岩心,抗张强度均出现了增大的情况,出现这种现象的原因是所测试的不同岩性试样渗透率较低,酸液浸泡过程中酸液

仅能与岩样表层发生作用,使表层溶蚀、软化。导致抗张强度测试时,作用于巴西圆盘的载荷由线载荷转变为面载荷,最大破坏载荷增大,从而表现为测得的抗张强度增大。巴西劈裂原理图如图 15 所示。为了更直观地看到酸液腐蚀后岩心的腐蚀程度,图 16 为云质灰岩酸液腐蚀前后的岩心照片,可以明显看到,腐蚀后的岩心表现软化变形,类似于圆台状,在进行巴西劈裂试验时,作用于巴西圆盘的线载荷转变为面载荷。其次,测试试样的存在非均质性,自身抗张强度差异大,也是导致抗张强度增大的原因。

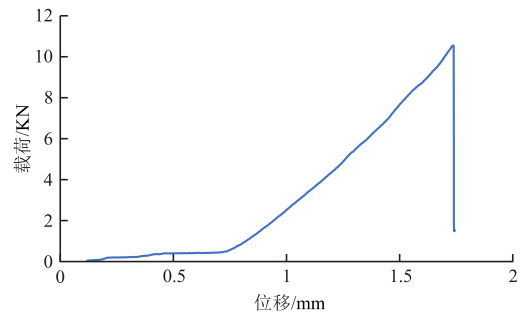


图 13 藻黏结白云岩载荷位移图(原岩)
Fig. 13 Load displacement diagram of algal caked dolomite (original rock)

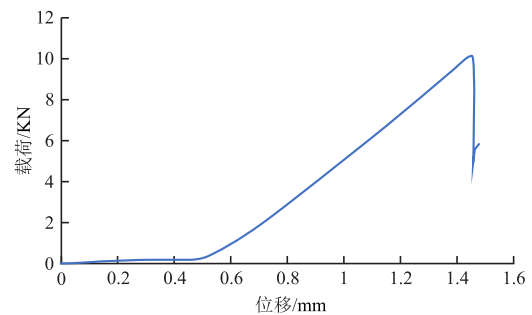


图 14 藻黏结白云岩载荷位移图(腐蚀后)
Fig. 14 Load displacement diagram of algal caked dolomite (after corrosion)

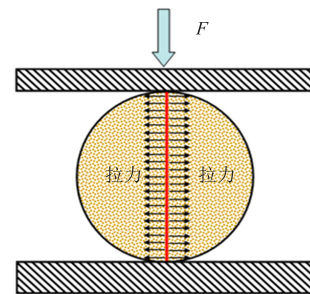


图 15 巴西劈裂原理图
Fig. 15 Brazilian fracturing schematic

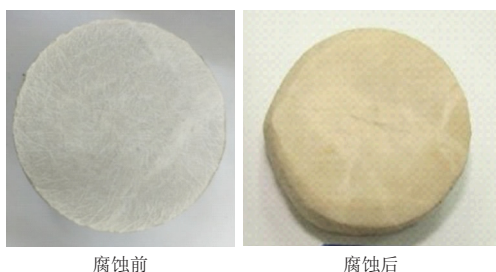


图 16 酸液腐蚀前后云质灰岩岩心

Fig. 16 Cloudy limestone cores before and after acid corrosion

4 结论

1) 不同岩性的海相碳酸盐岩受酸液腐蚀的程度不同。整体来讲,白云岩被腐蚀程度明显小于灰岩被腐蚀程度。且酸液腐蚀程度与岩心尺寸也有关系,岩心尺寸越小,被腐蚀程度越大。

2) 白云岩的硬度普遍高于灰岩,即白云岩的骨架强度高于灰岩,腐蚀后的白云岩硬度依旧高于灰岩。酸液腐蚀后的碳酸盐岩的硬度整体出现降低的现象,且硬度的降低程度与酸液腐蚀程度无明显关系。酸液腐蚀后的岩心依旧保持着较高的脆性。

3) 酸液腐蚀后抗张强度改变量表现出云质灰岩最为显著,灰岩次之,白云岩改变量较小。也就是说灰岩的抗张强度受酸液腐蚀的影响较大,白云岩抗张强度受酸液腐蚀影响较小。酸液腐蚀后碳酸盐岩的抗张强度除了藻黏结白云岩有所外降低,其余岩性岩心的抗张强度均有所提高。

参考文献:

[1] 贾爱林, 闫海军, 郭建林, 等. 不同类型碳酸盐岩气藏开发特征[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 914-923. JIA A L, YAN H J, GUO J L, et al. Development characteristics for different types of carbonate gas reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 914-923. (In Chinese)

[2] 高彦芳, 陈勉, 林伯韬, 等. 稠油油藏 SAGD 微压裂阶段储层压缩系数研究: 以新疆风城陆相储层重 1 区齐古组为例[J]. 石油科学通报, 2017, 2(2): 240-250. GAO Y F, CHEN M, LIN B T, et al. Study on compressibility during micro-fracturing in continental ultra-heavy oil sand reservoirs—Taking the Qigu formation of Xinjiang Fengcheng oilfield Z1 block for instance[J]. Petroleum Science Bulletin, 2017, 2(2):

240-250. (In Chinese)

[3] DOAN D H, DELAGE P, NAUROY J F, et al. Microstructural characterization of a Canadian oil sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(10): 1212-1220.

[4] YUAN X S, DOU S J, ZHANG J, et al. Consideration of geomechanics for in situ bitumen recovery in Xinjiang, China[C]//All Days. June 11-13, 2013. Calgary, Alberta, Canada. SPE, 2013: SPE 165414.

[5] AGAR J G, MORGENSTERN N R, SCOTT J D. Shear strength and stress—Strain behaviour of athabasca oil sand at elevated temperatures and pressures [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1987, 24(1): 1-10.

[6] 蒋昱州, 徐卫亚, 王瑞红. 角闪斜长片麻岩流变力学特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 339-345. JIANG Y Z, XU W Y, WANG R H. Rheological properties of amphibole plagioclase gneiss[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 339-345. (In Chinese)

[7] 张治亮, 徐卫亚, 王如宾, 等. 含弱面砂岩非线性黏弹塑性流变模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 2634-2639. ZHANG Z L, XU W Y, WANG R B, et al. Study of nonlinear viscoelasto-plastic rheological model of sandstone with weak plane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(1): 2634-2639. (In Chinese)

[8] 闫云明, 李恒乐, 郭士礼. 紫红色泥岩三轴蠕变力学特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(6): 88-92. YAN Y M, LI H L, GUO S L. Experimental study on creep mechanical characteristics of aubergine mudstone under three-dimensional stress conditions [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(6): 88-92. (In Chinese)

[9] 王军保, 刘新荣, 刘俊, 等. 砂岩力学特性及其改进 Duncan-Chang 模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2388-2397. WANG J B, LIU X R, LIU J, et al. Mechanical properties of sandstone and an improved Duncan-Chang constitutive model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(12): 2388-2397. (In Chinese)

[10] 金文辉, 井翠, 文冉, 等. 基于叠前岩石力学参数反演的三维地应力预测研究—以长宁区块页岩气为例[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(01): 11-25. JIN W H, JING C, WEN R, et al. Three-dimensional in-situ stress prediction based on pre-stack rock mechanics parameter inversion: A case study of shale gas in Changning block[J]. Computing techniques for Geophysical and Geo-

- chemical exploration, 2024, 46(01):11-25. (In Chinese)
- [11] 武东生, 孟陆波, 李天斌, 等. 灰岩三轴高温后流变特性及长期强度研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 183-191.
WU D S, MENG L B, LI T B, et al. Study of triaxial rheological property and long-term strength of limestone after high temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl 1): 183-191. (In Chinese)
- [12] 丁乙, 张安东. 川南龙马溪页岩地层井壁失稳实验研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(15): 25-28.
DING Y, ZHANG A D. Experiment research of borehole instability of shale in longmaxi formation of South Sichuan [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(15): 25-28. (In Chinese)
- [13] 吴文, 王贵宾, 冒海军. 白云岩力学强度特性的孔隙影响研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3709-3714.
WU W, WANG G B, MAO H J. Investigation of porosity effect on mechanical strength characteristics of dolostone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3709-3714. (In Chinese)
- [14] 高彦芳, 陈勉, 林伯韬, 等. 温度对油砂力学性质的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2520-2535.
GAO Y F, CHEN M, LIN B T, et al. Thermal influences on mechanical properties of oil sands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11): 2520-2535. (In Chinese)
- [15] 刘向君, 罗平亚. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
LIU X J, LUO P Y. Rock mechanics and petroleum engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004. (In Chinese)
- [16] 周忠亚. 酸液对深层页岩力学特性的影响规律研究[J]. 江汉石油职工大学学报, 2023, 36(4): 11-14.
ZHOU Z Y. Study on the influence of acid fluid on the mechanical properties of deep shale [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2023, 36(4): 11-14. (In Chinese)
- [17] 韩向义, 阎建国, 朱斗星, 等. 叠前弹性参数反演在龙马溪组页岩脆性预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(03): 337-344.
HAN X Y, YAN J G, ZHU D X, et al. Application of pre-stack elastic parameter inversion in the prediction of Longmaxi formation shale's brittleness [J]. Computing techniques for Geophysical and Geochemical exploration, 2018, 40(03): 337-344. (In Chinese)
- [18] 倪苏黔, 徐颖, 葛进进, 等. 干-酸侵蚀下深地白砂岩动静态损伤特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(10): 2528-2539.
NI S Q, XU Y, GE J J, et al. Dynamic and static damage characteristics of deep-earth white sandstone under dry-acid erosion [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(10): 2528-2539. (In Chinese)

Investigation on the influence of acid corrosion on the mechanical strength of Marine carbonate

GAO Kepan

(Exploration and Development Research Institute, Sinopec North China Company, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: Acid corrosion leads to changes in rock mechanical strength, leading to wellbore instability during oil and gas development. However, the impact of acid corrosion on rocks of different lithology varies. This article takes four types of marine carbonate rocks with different lithologies as the research object, conducts experimental tests on the mechanical strength before and after acid corrosion, and studies the impact of acid corrosion on the mechanical parameters of carbonate rocks with different lithologies and the mechanism analysis. The experimental results indicate that: ① Marine carbonate rocks of different lithologies are subject to different degrees of acid corrosion. The degree of dolomite corrosion is less than that of limestone. The smaller the core size, the more corroded it is. ② The hardness of dolomite is generally higher than that of limestone. The hardness of carbonate rocks corroded by acid solution decreases, and the degree of hardness decreases has no apparent relation with the degree of acid corrosion. The core of the corroded acid remains brittle. ③ The change of tensile strength after acid corrosion is most apparent in the dolomite limestone, followed by the dolomite. The relative increases in tensile strength of limestone, cloudy limestone, microcrystalline dolomite, and algae-bound dolomite are 26.84%, 81.63%, 10.92%, and 35.7%, respectively. The tensile strength of limestone is greatly affected by acid corrosion, while the tensile strength of dolomite is less affected by acid corrosion. This study provides the experimental basis for solving the problem of borehole instability.

Keywords: carbonate; percent etch; mechanical strength; hardness; tensile strength