

准噶尔盆地大有3井区井井子沟组储层水敏机理分析

张 杨¹, 廖天琪², 王宇新¹

¹新疆互盈企业管理有限公司, 新疆 乌鲁木齐

²四川申和新材料科技有限公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年2月10日; 录用日期: 2025年3月4日; 发布日期: 2025年3月18日

摘要

针对准噶尔盆地大有3井区井井子沟组储层非均质强、具有潜在水敏性及压裂开发整体产油效果不佳的问题, 弄清该区块储层水敏作用机理为选择合适工作液提供指导显得尤为重要。本文开展水岩作用实验、岩石力学特性分析, 根据水岩作用垮塌程度将岩样分为三类: 不垮塌(I类)、缓速垮塌(II类)和快速垮塌(III类), II类和III类岩样均属于软岩范畴。针对三类典型岩样开展了岩样矿物组成及含量分析、岩样微观结构分析及可溶盐分析等, 实验结果表明: (1) 黏土矿物总含量高(伊蒙混层含量高, 且蒙脱石占比高)是引起水敏的根本; (2) 胶结疏松、以粒间溶孔为主或构造缝发育、填隙物中(铁)泥质含量高且可溶盐含量高等与岩样垮塌程度呈正相关, 对于III类岩样快速崩解分析认为是多重因素耦合作用造成。

关键词

软岩, 水 - 岩作用, 崩塌, 弱胶结, 水敏机理

Water Sensitivity Mechanism of P_{2jj} Formation Reservoir in Dayou-3 Well Block, Junggar Basin

Yang Zhang¹, Tianqi Liao², Yuxin Wang¹

¹Drilling and Completion Department of Xinjiang Huying Management Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

²Sichuan Shenhe New Materials Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: Feb. 10th, 2025; accepted: Mar. 4th, 2025; published: Mar. 18th, 2025

Abstract

For the problems of strong heterogeneity, potential water sensitivity and poor overall oil production

文章引用: 张杨, 廖天琪, 王宇新. 准噶尔盆地大有 3 井区井井子沟组储层水敏机理分析[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(1): 73-82. DOI: 10.12677/jogt.2025.471009

effect of fracturing development in the formation in Dayou-3 well block of Junggar basin, it is particularly important to clarify the reservoir water sensitivity mechanism in this block to provide guidance for selecting appropriate working fluid. In this paper, laboratory experiment of water-rock interaction and analysis of rock mechanical property were carried out. According to the collapse degree of water rock interaction, the rock samples are divided into three categories: not collapsed (Class I), slowly collapsed (Class II) and rapidly collapsed (Class III). Both Class II and Class III rock samples belong to the category of soft rock. Through the analysis of mineral composition and content, microstructure and soluble salt of rock samples for three types of typical rock samples, the experimental results show that (1) The high total content of clay minerals (high content of montmorillonite mixed layer and high proportion of montmorillonite) is the fundamental cause of water sensitivity; (2) The degree of rock collapse is positively correlated with loose cementation, mainly intergranular dissolved pores or developed structural fractures, high content of (iron) mud and soluble salts in the filling material. For the rapid disintegration analysis of Class III rock samples, it is believed to be caused by the coupling effect of multiple factors.

Keywords

Soft Rock, Water-Rock Interaction, Collapse, Weak Cementation, Water Sensitive Mechanism

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

新疆互盈企业管理有限公司大有区块二叠系中统井井子沟组是互盈公司规模开发阶段的重点上产层位，目前使用常规水基压裂液 + “平台井、密切割、工厂化”规模化开发过程中发现上述区块整体产油效果不佳，提产试验井效果相对较好，但呈现投产初产较好、产量递减快、单井 EUR 小的特点，未达到预期产量目标，分析其受储层敏感性影响较大。大有井井子沟组储层岩性以(含砂)砾岩、砂质砾岩为主(75%)，少量砂岩，砂岩类型为岩屑砂岩。该储层部分岩心呈现弱胶结、遇水易泡散等特征，具有潜在水敏性。岩石浸泡易垮塌现象常见于软岩工程应用中[1]-[6]，特别是高亲水黏土矿物含量复杂岩性的凝灰岩中，对于凝灰岩的力学性质、崩解前后岩石表面微观结构、软岩变形行为、黏土化学反应等方面国外开展系统性研究[7]-[13]。王剑等人[14]对盐北地区下乌尔禾储层敏感性进行分析，并给工程和评价提供了有效的地质依据，但对于大有 3 井区井井子沟组储层岩芯除黏土水化膨胀外，还呈现有崩解特性，为此需要弄清楚该区储层水敏作用机理，为该储层改造时压裂液选择提供理论依据显得尤为重要。

笔者选取大有 3 井区井井子沟组 26 种不同井不同层位的岩样作为研究对象，通过开展岩石力学特性分析、水岩作用实验，并定性及定量地分析岩矿组成、微观结构及可溶盐等因素对岩样水敏机理分析，为该储层开发过程压裂液选择提供指导意义。

2. 实验部分

2.1. 实验试剂与仪器

主要试剂：准噶尔盆地大有 3 井区井井子沟组取岩样(26 个，岩芯编号 1#~26#)；去离子水(自制)。

主要仪器：精密电子天平(ESJ200-4，沈阳龙腾电子有限公司)；恒温箱(XU250，佛山市高明温雅精密烤箱有限公司)；干燥器(240 mm，成都市科龙化工试剂厂)；数显点荷载测定仪(STDZ-3，献县金晟试验仪器厂)；电感耦合等离子体原子发射光谱仪 ICP-AES (HKYT-799，北京华科易通)；扫描电镜(TESCAN-

VEGA\LMU, 捷克泰思肯); 多功能 X 射线衍射仪(AXS D8 Discover, 德国布鲁克); 偏光显微镜(59XC-P, 上海光学仪器厂); 广口瓶等玻璃仪器(成都科龙化工试剂厂)。

2.2. 实验方法

2.2.1. 水岩作用浸泡实验

将岩样(30.00~40.00 g)与自来水按质量比 1:3 放入 250 mL 广口烧瓶中, 确保自来水完全浸没岩样, 盖上瓶盖, 开始计时, 记录岩样初始状态并拍照, 将装有岩样的广口烧瓶轻放于 80℃ 烘箱中, 静置 30 d, 观察岩样状态(剥落、垮塌状态、溶液颜色等)随时间变化情况。本文根据岩样垮塌程度将岩样分为六类, 分别为不垮塌(0 级)、轻微垮塌(I 级)、弱 - 中垮塌(II 级)、中等垮塌(III 级)、中强垮塌(IV 级)、完全垮塌(V 级)。

2.2.2. 岩样点荷载实验方法

通过切割加工岩样尺寸满足: 最短边长 30~50 mm, 加荷点间距与最短边之比 0.3~1.2。将岩样(或浸泡后岩样)在 105℃ 条件下烘干 12 小时, 置于干燥器内冷却至室温备用。采用数显点荷载测定仪参照 DZ/T 0276.23-2015《岩石物理力学性质实验规程第 23 部分岩石点荷载强度实验》实验方法测试计算岩样单轴抗压强度(R_c)。

岩石单轴饱和抗压强度 R_c 可通过实测的岩石点荷载强度指数($I_{S(50)}$)换算求得。

$$R_c = 22.82 I_{S(50)}^{0.75}$$

式中 R_c 为单轴饱和抗压强度, MPa; $I_{S(50)}$ 为岩样点荷载强度指数, MPa。

$R_c < 5$ 为极软岩, $R_c = 5\sim 15$ 为软岩, $R_c = 15\sim 30$ 为较软岩, $R_c = 30\sim 60$ 为较坚硬岩, $R_c > 60$ 为坚硬岩。

2.2.3. 可溶盐测试方法

常温条件下, 准确称取 20 g ± 0.2 g 目标岩样, 浸泡于盛有 100 mL 去离子水中的广口瓶中, 浸泡 10 min、1 天、7 天后, 过滤得到滤液, 采用离子检测设备 ICP-AES 测试岩样滤液离子浓度。

2.2.4. 岩样矿物组成及含量分析

参照标准 SY/T 5163-2018 沉积岩中黏土矿物和常见非黏土矿物 X 射线衍射分析方法测试方法对岩样黏土矿物组成及含量测试分析。委托廊坊市尚艺岩矿检测技术服务有限公司分析测试。

2.2.5. 岩样微观结构测试

参照标准 SY/T 5162-1997 岩石样品扫描电子显微镜分析方法及标准 SY/T 5368-2016 岩石薄片鉴定对岩石物性、孔隙结构特征、矿物组成及相对含量分析测试。

3. 实验结果与分析

3.1. 水岩作用现象

选取大有 3 井区井井子沟组储层 26 个不同井不同层位岩样, 按照上述水岩作用实验方法考察了不同岩样水岩作用随时间的变化情况, 实验结果如图 1 所示。从图 1 中可以看出, 该储层岩样遇水发生了不同程度的垮塌现象, 说明该储层非均质强, 仅有 30% 左右岩块在浸泡 30 d 内未发生垮塌, 超过 60% 岩样发生不同程度垮塌, 且大部分在 24 h 内完全崩解。其中, 12#、14# 和 24# 岩样崩解最为严重, 在几分钟内就达到中等垮塌甚至完全垮塌(如图 2 所示), 崩解形态包括分散砂砾颗粒、碎块、片状或层状等, 浸泡液呈不同颜色浑浊液(浅红色、浅黄色及浅灰色等)。从水岩作用现象分析认为, 该储层岩样与常规黏土水

化膨胀引起水敏作用机理不同, 岩样不仅涉及黏土水化膨胀, 而出现不同程度垮塌现象, 故后续将选取几种典型岩样开展敏感性分析。

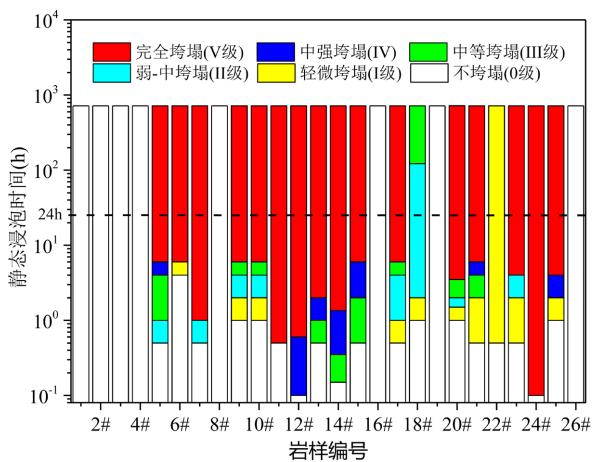


Figure 1. Changes in soaking state of rock samples over time (30 d)
图 1. 岩样浸泡状态随时间变化情况(30 d)

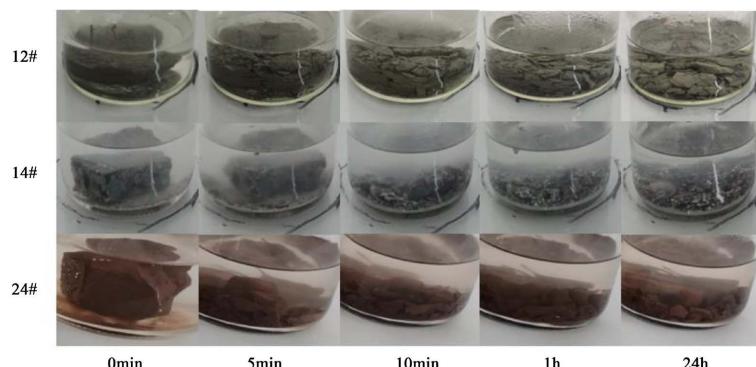


Figure 2. State of rock block over time (24 h)
图 2. 岩块随时间变化状态(24 h)

3.2. 岩石力学特性测试

从水岩作用结果可知, 该储层主要特征岩样不同程度垮塌。岩石遇水垮塌常见于软岩中, 严重影响施工作业。对于压裂作业而言, 储层岩石力学特性对压裂施工是否顺利及复杂缝网形成对产量影响具有重要的意义。由于岩块非均质性强、部分岩块胶结弱, 本文采用(通过)点荷载测试单轴抗压强度[15][16], 并依据 GB 50218-94 工程岩体分级标准对该储层岩样进行分类, 实验结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出, 所研究岩样中以软岩为主(占 70%左右), 较硬岩和较软岩各占 15%。结合水岩作用结果可知, 较硬岩和较软岩在浸泡 30 d 内未发生垮塌, 而软岩全部发生垮塌, 只是呈现不同崩解程度而已。

对于未垮塌较硬岩和较软岩长时间水岩作用劣化后, 其力学特性也会发生明显变化, 为此对比考察了浸泡前后岩样单轴抗压强度的变化情况, 结果如图 4 所示。经过长时间水岩作用, 浸泡 30 d 后岩样抗压强度都明显降幅达到 20%~40%, 较硬岩较较软岩下降幅度小。分析认为对于非软岩类, 岩石经长时间浸泡, 水分子缓慢渗入孔缝中, 一定程度上引起黏土矿物水化膨胀, 导致岩石软化, 抗压强度降低[17][18]。

综上所述,通过水岩作用实验及岩石力学特性分析,根据水化垮塌程度初步分为三类: I类: 不垮塌(浸泡 30 d 无明显变化的岩样)、II类: 缓速垮塌(浸泡 1 h 开始垮塌的岩样)及 III类: 快速垮塌(浸泡 5 min~10 min 开始垮塌岩样)。为了进一步弄清三类岩块垮塌的根本原因,本文选取三类共 9 种典型岩样(I类: 1#、8#、19#, II类: 6#、18#、20#, III类: 12#、14#、24#)开展岩样敏感机理分析。

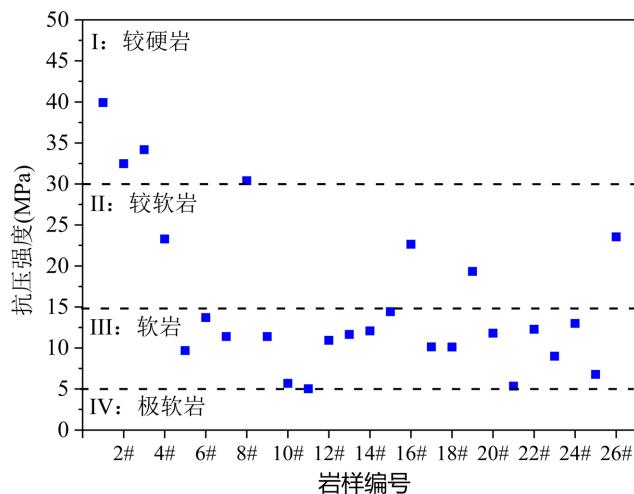


Figure 3. Distribution of compressive strength data of rock samples
图 3. 岩样抗压强度数据分布图

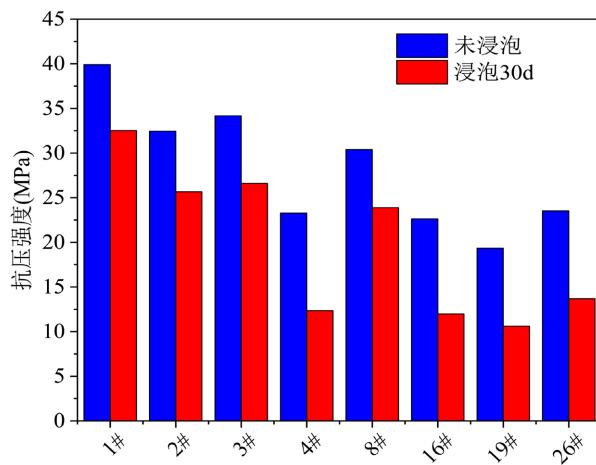


Figure 4. Changes in compressive strength of non collapsing rock samples soaked in clean water
图 4. 清水浸泡不垮塌岩样抗压强度变化

3.3. 岩样垮塌原因分析

3.3.1. 岩样矿物组成及含量分析

亲水性黏土矿物类型及高含量是引起水敏主要因素,故对几种典型岩样进行黏土矿物总量及相对含量测试,结果如表 1 所示。从表 1 中可以看出,整体黏土矿物总含量较高,最高达 37.9%,主要伊蒙混层为主(伊蒙混层微观结构如图 5 所示),且蒙脱石混层占比含量较高。蒙脱石类矿物由于晶格取代较多的负电荷,在其周围吸附等电量的阳离子,水化阳离子给黏土带来厚的水化膜,是蒙脱石体积膨胀,其体积增大可达原来的 20 倍,当黏土矿物颗粒充分与水接触,因其片微晶体结构往往发生卷曲,岩石对水的

毛细管吸附由于亲水的片层状结构而变得十分迅速。

典型岩样垮塌情况与黏土矿物含量关系如图 6 所示。从图中可以看出，黏土矿物总含量与垮塌无必然相关性。I 类部分岩块较 II 类岩块黏土矿物总含量高，但未出现垮塌，说明除了亲水黏土矿物影响，还有其他诸如岩石孔缝结构、胶结强度、碎屑岩储集空间类型、填隙物组成、可溶盐等因素的影响[19]-[21]。

Table 1. Typical rock sample clay mineral composition and content analysis results

表 1. 典型岩样黏土矿物组成及含量分析结果

岩样	黏土矿物总量(%)	黏土矿物相对含量(%)				混层比 S, %
		I/S	I	K	C	
1#	6.5	66	16	8	10	70
8#	16.1	54	4	9	33	62
19#	18	68	23	5	4	55
6#	8.6	43	15	25	17	65
18#	9.2	66	25	4	5	55
20#	9.4	76	7	9	8	56
14#	29.1	81	5	6	8	93
12#	29.8	73	7	9	11	84
24#	37.9	81	10	4	5	72

注：I/S-伊蒙混层，I-伊利石，K-高岭石，C-绿泥石。

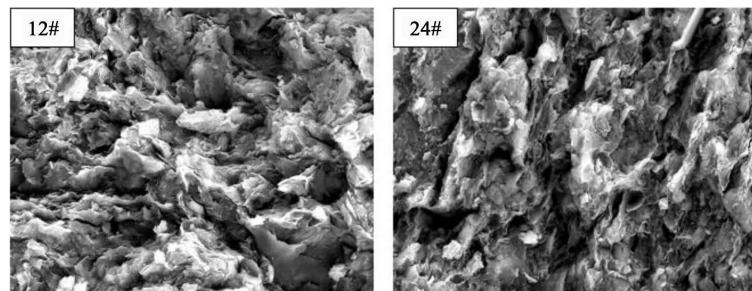


Figure 5. Typical rock sample scanning electron microscopy image (4500 times)
图 5. 典型岩样扫描电镜图像(4500 倍)

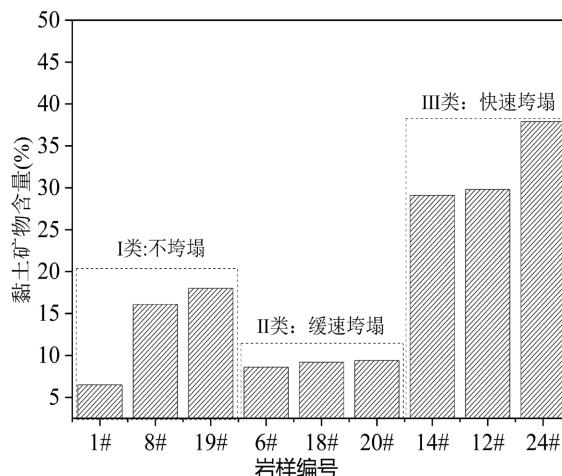


Figure 6. Relationship between rock sample collapse and clay mineral content
图 6. 岩样垮塌与粘土矿物含量的关系

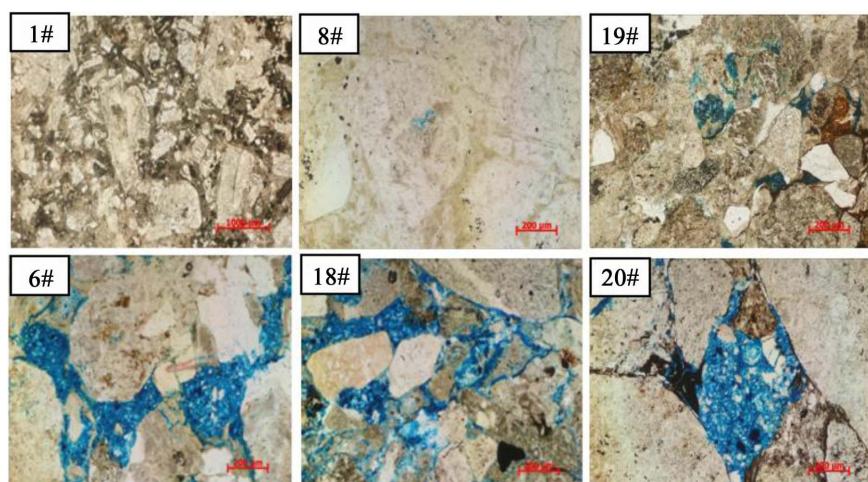
3.3.2. 岩样微观结构分析

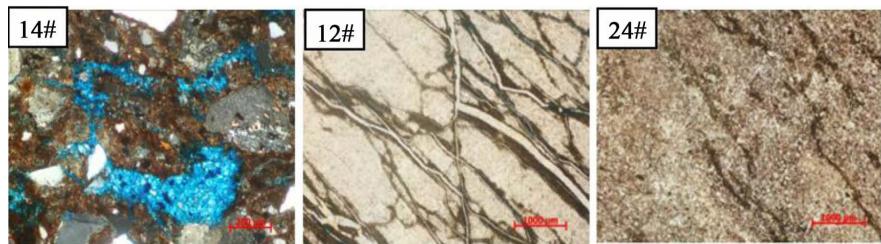
上述三类典型岩样岩性及物性分析见表2所示。从表2中可以看出，三类岩样主要差异在胶结类型、胶结程度、碎屑岩储集空间类型、孔隙总数、碎屑凝灰岩成分占比及填隙物(胶结物)中泥质或铁泥质含量等，胶结强度越弱、以粒间溶孔为主或构造缝发育、砂砾碎屑岩中凝灰岩含量越高及填隙物中(铁)泥质含量越高，岩样水岩通垮塌越严重。从第III类岩样微观结构分析来看(如图7所示)，砂砾碎屑岩具有以凝灰岩为主(大于70%)，以粒间溶孔为主且微裂缝发育、胶结弱等特征，分析认为：该类岩样以粒间溶孔为主或裂缝十分发育，为水分子快速渗透进入提供了主要的通道，自由膨胀时微裂缝与微孔隙增加，在水在毛管压力下，沿裂缝和孔隙岩石内快速扩散，进入岩层片结构时大量新的微孔隙和微裂缝产生，为水的进一步渗入提供了新的通道，水最终进入岩石亲水片层结构内，由于片间距离微小，亲水的层片间毛管压力较大，导致强烈的毛细吸水现象，吸水后水层楔入及片发生卷曲，片间距增大并产生大量孔隙和裂缝，宏观上表现为迅速崩解。此外，第III类岩样，除了裂缝或孔隙发育外，填隙物(胶结物)中的泥质或铁泥质含量也较高(3%~8%)，填隙物遇水泥化也是导致岩样崩解原因之一。

Table 2. Microstructure characteristics and composition analysis of typical rock samples

表2. 典型岩样微观结构特征及组成分析

岩样 编号	岩样 类型	岩性	接触方式	胶结类型	胶结程 度	碎屑岩储集 空间类型	孔隙 总数	砾石、砂质 中凝灰岩成 分占比, %	填隙物中 (铁)泥质 含量, %
1#	I类	深灰色砾岩	胶结接触	基底型	致密	/	15	28	/
8#		灰白色砂砾 岩	胶结接触	基底型	致密	粒内溶孔	54	32	/
19#		灰色砂砾岩	胶结接触	基底型	致密	粒间溶孔	72	26	0.3
6#	II类	褐色砂砾岩	点-线接触	孔隙-压 嵌型	中等	粒间溶孔	204	58	1
18#		褐灰色砂砾 岩	线-点接触	压嵌-孔 隙型	中等	粒间溶孔	293	62	2
20#		红褐色砂砾 岩	点-线接触	孔隙-压 嵌型	中等	粒间溶孔	49	45	2
14#	III类	灰色细砾岩	点-线接触	孔隙-压 嵌型	疏松	粒间溶孔	257	92	8
12#		深灰色砾岩	线接触	压嵌型	疏松	构造缝	159	74	3
24#		褐色砂砾岩	线接触	压嵌型	疏松	构造缝	/	88	5





(1#岩样孔隙不发育, 凝灰结构, 火山屑以晶屑为主; 8#岩样凝灰结构, 孔隙不发育; 19#岩样为砾石结构, 孔隙不发育; 6#岩样为大量溶蚀孔隙; 18#岩样以粒间溶孔为主; 20#岩样为粒间溶孔、碳酸盐溶蚀孔隙; 14#岩样为大量溶蚀孔隙; 12#岩样为泥质结构, 裂缝发育, 未填充; 24#岩样为泥质结构, 泥质氧化铁浸染, 裂缝发育。)

Figure 7. Typical microstructure of rock sample

图 7. 典型岩样微观结构

3.3.3. 可溶盐分析

对于凝灰岩而言, 其崩解原因还有可能是胶结物中的可溶盐引起。为此, 研究了 III 类岩样不同浸泡时间浸泡液溶出离子类型及含量, 实验结果如图 8 所示。从图 8 中可以看出, III类岩样崩解速度非常迅速, 10 分钟内基本完全崩解, 且浸泡液呈不同色泽浑浊状态(如图 2 所示)。岩样溶出离子中 Ca^{2+} 浓度高, 其次是 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} , 溶出 K^+ 、 Na^+ 浓度最低, 说明 III 类岩样中方解石、白云石、钙质胶结物、铁矿(泥质)含量高。在水 - 岩作用中, 方解石、白云石、铁矿发生溶蚀反应, 生成高岭石等次生矿物, 造成岩石矿物颗粒受力过程中不均匀张拉, 促进次生孔隙、裂缝产生, 同时钙质胶结物发生溶解、溶蚀等作用, 水 - 岩物理、化学作用使得浸泡液离子浓度变化, 岩石内部微观结构发生改变, 最终导致岩石力学性质劣化[22]。

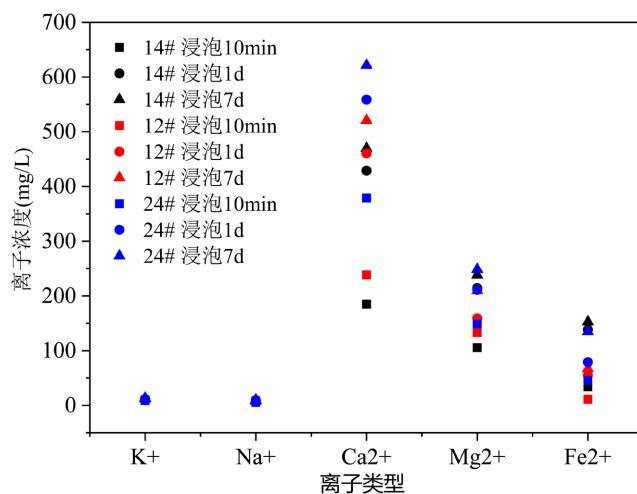


Figure 8. Comparison of ion concentration in aqueous solution of rapidly collapsed rock samples at different soaking times

图 8. 快速垮塌岩样不同浸泡时间水溶液离子浓度对比

3.3.4. 储层水敏机理分析

根据前述对不同类型岩样垮塌影响因素对比分析可知, 岩样垮塌程度是由矿物组成及含量和微观结构等多因素共同决定的(如图 9 所示), 特别是第 III 类岩样, 黏土矿物总含量高、胶结疏松、以粒间溶孔为主或构造缝发育、填隙物中(铁)泥质含量高且可溶盐含量高等多因素耦合作用造成迅速崩解。其敏感机

理为：岩石与水接触时，因毛细管效应自吸作用，水沿着层理面或裂隙进入岩石内部，黏土矿物膨胀使颗粒间黏结力降低，胶结作用减弱，加速了微孔隙的扩展、延伸和贯通，提高岩石裂隙发育；钙质胶结物的溶蚀、溶解，各类岩石矿物水-岩物理化学作用使得岩石矿物颗粒软化、分解，导致岩石微观颗粒结构逐渐松散，抗压强度降低；岩石中可溶性物质随着水分子运动进入浸泡液中，导致溶液中离子浓度发生变化，次生矿物、离子等向外运移使得岩石孔隙、裂隙进一步发育，微裂隙和微孔隙表面具有较大的表面能，吸附水分子而减少的一部分能量转化为力学破坏能，这种力学破坏能起着楔裂作用，楔裂压力可以促使裂隙向纵深发展，破坏岩石结构联接，使岩石易于发生变形和破坏，促进岩石迅速坍塌。

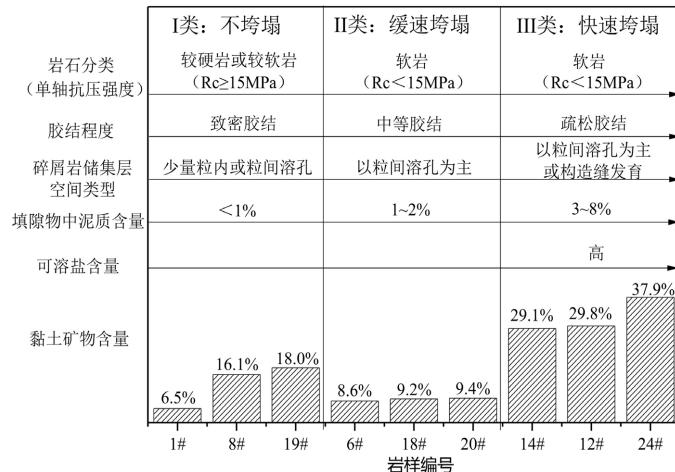


Figure 9. Relationship between rock sample characteristics and disintegration
图9. 岩样特性与崩解性的关系

4. 结论

- (1) 大有3井区井井子沟组储层大多属于膨胀性软岩，从水岩作用关系来看，非均质强，表现出不同程度垮塌现象。
- (2) 黏土矿物总含量高(伊蒙混层含量高，且蒙脱石占比高)是引起水敏的根本，而胶结疏松、以粒间溶孔为主或构造缝发育、填隙物中(铁)泥质含量高且可溶盐含量高等因素影响岩样崩解速率和垮塌程度，III类岩样快速崩解是由多重因素叠加效应所致。
- (3) 定性或定量分析填隙物中可溶盐离子类型及含量、黏土矿物含量类型及高低，在一定程度上可指导防膨防塌压裂液体系的选择。

参考文献

- [1] 冯启言, 韩宝平, 隋旺华. 鲁西南地区红层软岩水岩作用特征与工程应用[J]. 工程地质学报, 1999, 7(3): 266-271.
- [2] 杨春和, 冒海军, 王学潮, 等. 板岩遇水软化的微观结构及力学特性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2090-2098.
- [3] 郑明雄. 澜沧老厂铅矿凝灰岩膨胀垮塌机制及防塌钻井液研究[D]: [博士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [4] 姜德义, 张军伟, 陈洁, 等. 岩盐储库建腔难溶夹层的软化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(5): 865-873.
- [5] 纪洪广, 蒋华, 宋朝阳, 等. 弱胶结砂岩遇水软化过程微观结构演化及断口形貌分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(4): 994-999.
- [6] 赵福登. 兰州地铁深基坑红砂岩崩解特性试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.
- [7] Yoshinaka, R., Osada, M. and Tran, T.V. (1996) Deformation Behaviour of Soft Rocks during Consolidated-Undrained

Cyclic Triaxial Testing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **33**, 557-572. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(96\)00025-3](https://doi.org/10.1016/0148-9062(96)00025-3)

- [8] Martin, R.J., Noel, J.S., Boyd, P.J. and Price, R.H. (1997) Creep and Static Fatigue of Welded Tuff from Yucca Mountain, Nevada. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **34**, 190.e1-190.e17. [https://doi.org/10.1016/s1365-1609\(97\)00179-2](https://doi.org/10.1016/s1365-1609(97)00179-2)
- [9] Gray, M.B., Stamatakos, J.A., Ferrill, D.A. and Evans, M.A. (2005) Fault-Zone Deformation in Welded Tuffs at Yucca Mountain, Nevada, USA. *Journal of Structural Geology*, **27**, 1873-1891. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.01.018>
- [10] Salve, R., Wang, J.S.Y. and Doughty, C. (2002) Liquid-release Tests in Unsaturated Fractured Welded Tuffs: I. Field Investigations. *Journal of Hydrology*, **256**, 60-79. [https://doi.org/10.1016/s0022-1694\(01\)00519-4](https://doi.org/10.1016/s0022-1694(01)00519-4)
- [11] Topal, T. and Sözmen, B. (2003) Deterioration Mechanisms of Tuffs in Midas Monument. *Engineering Geology*, **68**, 201-223. [https://doi.org/10.1016/s0013-7952\(02\)00228-4](https://doi.org/10.1016/s0013-7952(02)00228-4)
- [12] Chen, T.C., Yeung, M.R. and Mori, N. (2004) Effect of Water Saturation on Deterioration of Welded Tuff Due to Freeze-Thaw Action. *Cold Regions Science and Technology*, **38**, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2003.10.001>
- [13] Ma, L. and Daemen, J.J.K. (2006) An Experimental Study on Creep of Welded Tuff. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **43**, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.07.002>
- [14] 王剑, 周基贤, 刘明, 等. 准噶尔盆地盐北地区下井井子沟组储层敏感性形成机理及评价[J]. 非常规油气, 2018, 5(1): 28-34.
- [15] 朱效嘉. 软岩的水理性质[J]. 矿业科学技术, 1996, 24(3): 46-50.
- [16] 朱效嘉. 膨胀性软岩[J]. 矿业科学技术, 1997(1): 26-33.
- [17] 胡玉, 邓华锋, 李建林, 等. 水-岩作用下砂岩微观结构变化特性及机理研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(2): 265-273, 281.
- [18] 王瑞红, 王宇轩, 蒋昱州, 等. 水岩作用下裂隙岩体变形特性试验研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(5): 136-142.
- [19] 刘鹤. 软岩崩解特性试验研究与分析[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [20] 宋朝阳, 纪洪广, 曾鹏, 等. 西部典型弱胶结粗粒砂岩单轴压缩破坏的类相变特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(5): 1027-2036.
- [21] 张嘉凡, 程树范, 王焕, 等. 西部弱胶结软岩微观结构及水理特性试验[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 116-121.
- [22] 邓华锋, 原先凡, 李建林, 等. 浸泡作用下砂岩断裂力学特性及劣化机理[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2014, 39(1): 108-114.