

文章编号:1009-9603(2021)02-0127-08

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.016

深层致密砂岩气藏干湿交替诱发气井出砂实验模拟

康毅力¹,邵佳新¹,游利军¹,黄恒清¹,张震²,张翔宇³

(1.西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川成都610500;2.中国石油塔里木油田分公司,新疆库尔勒841000;3.中国石化胜利油田分公司纯梁采油厂,山东滨州256505)

摘要:塔里木盆地库车坳陷深层致密砂岩气藏天然裂缝发育,处于高温高压和高地应力的封闭环境,地层水矿化度高,局部存在超低含水饱和度特征,部分气井生产中经常伴随不同程度的出砂现象,严重干扰气井正常生产。选用库车坳陷某深层致密砂岩气藏岩样,实验模拟含水饱和度升降的干湿交替过程,监测岩石动态力学参数及应力敏感系数变化。结果表明,干湿交替后深层致密砂岩气藏岩样的动态杨氏模量和泊松比均显著降低,深层致密砂岩气藏基块岩样和裂缝岩样的应力敏感系数分别为0.50~0.89和0.43~0.45,应力敏感程度分别为中等偏弱—强和中等偏弱。分析认为:①气体钻进过程(干化过程),地层孔隙压力释放改变近井地带应力、气体冲蚀裂缝面和盐析产生的结晶应力会降低岩石强度,诱发出砂。②气液转换钻完井过程(干湿交替过程),干湿交替、酸液溶蚀、裂缝面摩滑和含水饱和度变化引发的黏土矿物吸水与脱水和类球状风化对岩石裂缝面砂粒的剥落都会弱化岩石强度。③裂缝面脱落的砂粒对裂缝起到支撑作用,可弱化裂缝应力敏感程度。深层致密砂岩气藏开发过程应减少干湿交替轮次和液相侵入量,难以避免进入的液相要快速返排,防止液体弱化岩石强度,压裂过程加入纤维以防止支撑剂返吐,并结合适度出砂措施和绕丝筛管防砂工艺控制气藏出砂。

关键词:深层;致密砂岩;气藏;干湿交替;出砂;应力敏感性;塔里木盆地

中图分类号:TE343

文献标识码:A

Experimental simulation of sand production induced by dry-wet alternation in deep tight sandstone gas reservoirs

KANG Yili¹, SHAO Jiixin¹, YOU Lijun¹, HUANG Hengqing¹, ZHANG Zhen², ZHANG Xiangyu³

(1.State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610500, China; 2.Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang, 841000, China; 3.Chunliang Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Binzhou City, Shandong Province, 256505, China)

Abstract: Natural fractures are developed in deep tight sandstone gas reservoirs in Kuche Depression of Tarim Basin, which are in the enclosed environment with high temperature, high pressure, and high crustal stress. Formation water has high salinity and local ultra-low water saturation. Some gas wells often encounter sand production to different extents, which seriously disturbs the normal production of gas wells. A sample of deep tight sandstone gas reservoir in Tarim Basin was selected in our experiment, in which the dry-wet alternation of the rising and falling of water saturation was simulated and the changes in dynamic mechanical parameters and stress sensitivity coefficient of rock were monitored. The results show that for the rock samples of deep tight sandstone gas reservoirs, the dynamic Young's modulus and Poisson's ratio take a dive after dry-wet alternation. The stress sensitivity coefficients of base rock samples and fractured rock samples are respectively 0.50-0.89 and 0.43-0.45, indicating their moderately weak-strong and moderately weak stress sensitivity. According to analysis, in gas drilling (drying), the release of formation pore pressure could change near-well stress, and the crystal stress caused by salting-out and fracture surface of gas washout could reduce rock strength and induce sand produc-

收稿日期:2020-10-09。

作者简介:康毅力(1964—),男,天津蓟县人,教授,博士,从事储层保护理论与技术、非常规天然气和油气田开发地质等方面的教学与研究工作。E-mail:cwctkyl@163.com。

基金项目:四川省科技计划项目“保护储层并改善优势天然裂缝导流能力的钻井预撑裂缝堵漏基础研究”(2018JY0436),非常规油气层保护四川省青年科技创新研究团队项目“页岩气层氧化协同水力压裂减量增渗方法研究”(2021JDTD0017)。

tion. In well completion after gas-liquid conversion (dry-wet alternation), the water absorption and dehydration of clay minerals caused by dry-wet alternation, acid denudation, frictional sliding of fracture surface and change in water saturation as well as the spalling of sand grains from fracture surface by spheroidal weathering could reduce rock strength. Sand grains falling off the fracture surface will support the fracture and reduce its stress sensitivity. In the development of deep tight sandstone gas reservoirs, dry-wet alternation rounds and liquid intrusion should be reduced. The inevitable liquid should be drained back in time to prevent it from reducing rock strength. Fiber should be added in fracturing to avoid proppant reflux. At the same time, sand production should be controlled with reasonable sand production measures and sand control technology of wire-wrapped screens.

Key words: deep reservoir; tight sandstone; gas reservoir; dry-wet alternation; sand production; stress sensitivity; Tarim Basin

世界范围非常规致密型气藏已成功商业化开发利用,勘探开发技术已经取得跨越式发展。深层致密砂岩气藏等天然气资源逐渐成为勘探开发的新目标和重点领域^[1]。塔里木盆地库车坳陷深层致密砂岩气藏具有基块致密、天然裂缝发育及高温、高压和高地应力的特征^[2-3],部分深层致密砂岩气藏还具有高地层水矿化度、局部存在超低含水饱和度现象^[4-6]。

以塔里木盆地库车坳陷深层致密砂岩气藏为例, DB-W908井经历四开气体钻开气藏后使用水基压井液,压井后五开继续气体钻进,然后又进行酸压的过程。气体钻开深层致密砂岩气藏过程中,由于高速气流循环使得近井地带水分蒸发,产出的天然气还会携带气藏气态水,进一步降低近井地带气藏含水饱和度。在气体钻进结束后、或中途测试后以及处理井下复杂情况时,一般会转换为水基工作液压井并钻进,或恢复气体钻进。即使使用液体钻开气藏,也将面临压井、酸化和酸压等过程而增加气藏含水饱和度。气体钻进过程中,气藏含水饱和度和度骤降,而后续水基工作液侵入气藏又使得近井地带气藏含水饱和度骤增。深层致密砂岩气井完井和生产作业过程中,气藏含水饱和度的这种剧烈变化现象,被称为干湿交替^[7]。气体钻开气藏后使用水基工作液交替作业,或是气藏生产过程中汽化携液引起的地层水蒸发现象,使岩石经历干湿交替,有可能加剧岩石的再变形和再破坏进程^[8]。岩石力学及工程地质学者研究指出,岩样在含水与干燥状态下的岩石强度存在明显差异^[9],且纵横波速变化显著^[10],经历过干湿交替的岩石更容易在较低的应力状态下发生裂纹扩展^[11],随着干湿交替轮次的增加,岩石强度的弱化加剧^[12-13]。

前人对近地表层降雨和边坡水位升降等引发的干湿交替对岩石强度的作用研究较多,即干湿交替自身对岩石强度的影响。在高温、高压、高地应力致密气藏中,除了干湿交替自身弱化岩石强度

外,重点关注了干湿交替过程中酸压、高速气流、应力释放、高地层水矿化度和黏土矿物等对岩石强度弱化的作用。疏松砂岩油气藏岩石胶结性差,油气开采过程中近井地带的出砂现象较为普遍。然而,深层致密砂岩气藏岩石颗粒胶结程度强,出砂机理与疏松砂岩差别较大,且出砂机理复杂。深层致密砂岩气藏出砂现象已逐渐引起关注,尤其是经历复杂干湿交替变化的气井表现更为突出,仅有极少数学者提出几种可能的诱因^[14-15]。为此,笔者将系统开展深层致密砂岩气藏岩样与不同类型液体作用的干湿交替实验,监测实验前后岩样的纵横波传播速率并计算动态力学参数,同时开展干湿交替前后应力敏感性评价实验。在此基础上,分析干湿交替诱发深层致密砂岩气藏出砂机理,探讨其对气井生产的影响,并提出控制出砂的技术措施和建议。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

实验岩样取自塔里木盆地库车坳陷 DB 深层致密砂岩气藏。平均埋深为 5 000 m,温度为 136~145 ℃,压力为 79.46~83.49 MPa,最大和最小水平主地应力分别为 148.39 和 125.70 MPa,部分地层水矿化度高达 200 000 mg/L。岩石类型以岩屑砂岩和砂砾岩为主,胶结类型主要为孔隙式、孔隙-基底式,颗粒接触关系主要为线接触。分析储层岩石学特征,其中石英含量为 57.2%~81.7%,平均为 68.2%;钾长石含量为 2%~14%,平均约为 10.2%;斜长石含量为 1%~10%,平均约为 5.5%。全岩及黏土矿物分析结果显示,研究区块储层的石英含量较高,平均达 79.5%,黏土矿物的平均含量为 5.4%,以伊利石及伊/蒙间层为主,含少量绿泥石和高岭石。研究区构造核心区储层孔隙度为 1%~14%,基块渗透率为 0.004~0.1 mD。裂缝线密度为 0.7~1.47 条/m,平均约为 1 条/m。选取 8 块岩样开展干湿交替和应力敏

感性评价实验, 岩样的基础物性参数如表1所示。

表1 岩样基础物性参数及干湿交替液体类型
Table1 Basic physical parameters of rock samples and types of dry-wet alternating liquids

编号	长度 (mm)	直径 (mm)	质量 (g)	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	干湿交替液体类型	岩样类型
DB-1	52.05	24.98	56.23	2.78	0.056 91	高密度有机盐工作液	基块
DB-2	50.50	25.10	55.00	2.56	0.051 18	高密度有机盐工作液	
DB-3	50.25	24.89	56.35	14.23	0.065 32	模拟地层水	
DB-4	50.56	25.22	55.98	15.56	0.072 54	模拟地层水	
DB-5	100.76	25.01	57.59	4.92	0.086 07	模拟地层水	裂缝
DB-6	100.50	25.11	57.08	4.64	0.081 04	模拟地层水	
DB-7	100.34	25.17	57.99	3.81	380.139 2	模拟地层水	
DB-8	100.26	25.15	56.23	3.65	406.894 2	模拟地层水	

实验用水为根据研究区地层水配制的模拟地层水, 总矿化度为 209 237.52 mg/L, 其中 NaHCO₃, Na₂SO₄, NaCl, KCl, MgCl₂ 和 CaCl₂ 的质量浓度分别为 563.24, 649.22, 185 905.74, 12 441.50, 3 524.50 和 6 153.32 mg/L。

1.2 实验方法

1.2.1 干湿交替实验

深层致密砂岩干湿交替实验的具体步骤包括:
①对岩样进行洗盐和烘干等预处理, 岩样 DB-1 和 DB-2 使用高密度有机盐工作液开展干湿交替实验, 岩样 DB-3 和 DB-4 使用模拟地层水开展干湿交替实验。利用 SCMS-J 型声电测试系统(由 SCMS-J 型声电测试仪、岩心夹持器和数据采集系统构成)测定干岩样在围压为 3 MPa 下的纵横波传播速率。
②将模拟地层水溶液过滤后分别盛入 200 mL 的烧杯内, 岩样一端置于 60 °C 干燥环境中, 另一端置于溶液中, 在 60 °C 下加热 12 h(图1)。
③利用 SCMS-J 型声电测试系统测定干湿交替后岩样在围压为 3MPa 下的纵横波传播速率。
④通过测定的纵横波传

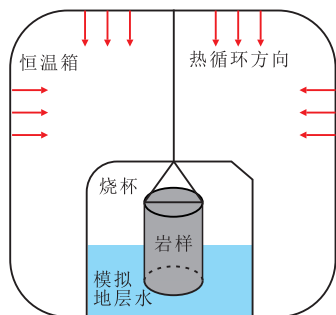


图1 深层致密砂岩干湿交替实验模拟示意

Fig.1 Simulation of dry-wet alternation experiment with samples of deep tight sandstone gas reservoir

播速率计算岩样干湿交替前后的动态杨氏模量和动态泊松比^[8]。其计算式分别为:

$$E = \rho V_s^2 \left(\frac{3V_p^2 - 4V_s^2}{V_p^2 - V_s^2} \right) \quad (1)$$

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2)$$

1.2.2 应力敏感实验

深层致密砂岩气藏普遍具有天然裂缝发育等特点, 孔隙是主要的储集空间, 裂缝是重要的渗流通道, 钻完井及生产过程中裂缝的渗透能力变化直接影响着深层致密砂岩气藏的单井产气量。开采过程中地层压力衰竭导致裂缝面滑移、破坏产生破碎岩石骨架颗粒, 裂缝面的砂粒极有可能影响深层致密砂岩气藏的应力敏感性。考虑井筒内干湿交替环境变化设计实验, 具体实验步骤为: ①对岩样进行洗盐和烘干等预处理, 将岩样 DB-5—DB-8 均切割为两半, 一半开展应力敏感实验, 另一半干湿交替后开展应力敏感实验。②将预先处理好的岩样放入岩心夹持器, 在 40 MPa 围压下进行岩样预处理。③测试有效应力为 3, 5, 10, 20, 30, 35, 40, 50 和 55 MPa 条件下的岩样渗透率, 采用应力敏感系数法^[14]进行应力敏感程度评价, 当敏感系数为 [0, 0.05], (0.05, 0.3], (0.3, 0.5], (0.5, 0.7], (0.7, 1] 和大于 1 时, 损害程度分别为无、弱、中等偏弱、中等偏强、强和极强。应力敏感系数计算公式为:

$$S_s = \frac{1 - \left(\frac{K_i}{K_0} \right)^{\frac{1}{3}}}{\lg \frac{\sigma_i}{\sigma_0}} \quad (3)$$

2 实验结果与分析

2.1 干湿交替实验

当干湿交替的液体为高密度有机盐工作液时, 岩样 DB-1 和 DB-2 的动态杨氏模量和动态泊松比整体均呈现降低趋势(图2), 干湿交替过程产生裂缝是引起岩样动态力学参数降低的主要原因。岩样 DB-1 的动态杨氏模量和岩样 DB-2 的动态泊松比分别在 3~4 和 2~3 轮次回升, 这可能是盐析产生的结晶盐在裂缝中生长而改变了纵横波的传播速率所致。当干湿交替的液体为模拟地层水时, 岩样 DB-3 和 DB-4 的动态杨氏模量和动态泊松比依然整体呈现降低趋势(图2)。岩样 DB-3 和 DB-4 的动态泊松比在 3~4 轮次降幅较大, 这表明岩样内的裂

缝可能发生了扩展和贯通。岩样DB-3在第5轮次干湿交替后岩石强度弱化(图3a),岩样端面掉落了大量岩屑(图3b)。

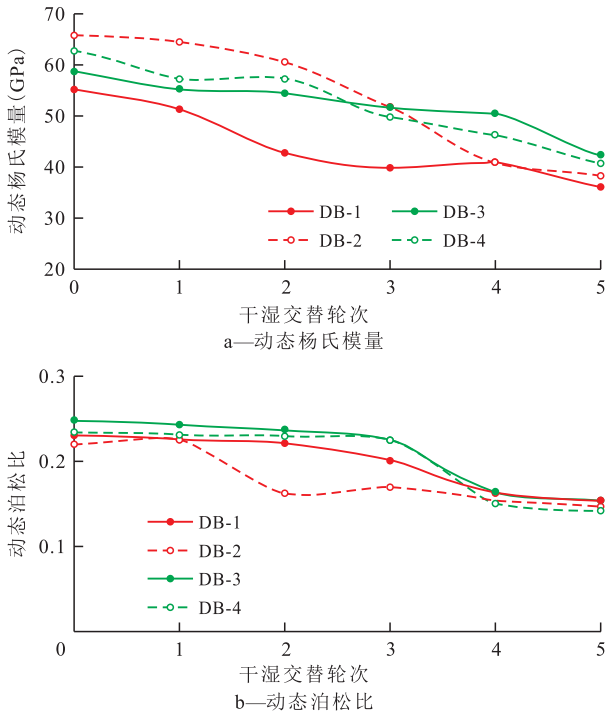


图2 不同液体多轮次干湿交替深层致密砂岩岩样动态杨氏模量和动态泊松比变化

Fig.2 Changes of dynamic Young's modulus and dynamic Poisson's ratio of samples of deep tight sandstone gas reservoir with different liquids and multiple rounds of dry-wet alternation



a—岩石强度弱化



b—掉落岩屑

图3 岩样DB-3第5轮次干湿交替后岩样端面状态变化

Fig.3 Changes of end face state of sample DB-3 after fifth dry-wet alternation

2.2 应力敏感实验

应力敏感性评价结果表明(表2),深层致密砂

岩基块岩样的应力敏感系数为0.50~0.89,应力敏感程度为中等偏弱—强,裂缝岩样的应力敏感系数为0.43~0.45,应力敏感程度为中等偏弱,深层致密砂岩气藏基块岩样的应力敏感程度大于裂缝岩样。干湿交替后基块岩样的应力敏感程度增加,裂缝岩样的应力敏感程度降低。

表2 应力敏感实验结果对比

Table2 Comparison of experimental results of stress sensitivity

岩样 编号	岩样 类型	应力敏感系数		应力敏感程度	
		未发生干湿交替	干湿交替	未发生干湿交替	干湿交替
DB-5	基块	0.50	0.73	中等偏弱	强
DB-6	基块	0.89	0.92	强	强
DB-7	裂缝	0.43	0.38	中等偏弱	中等偏弱
DB-8	裂缝	0.45	0.42	中等偏弱	中等偏弱

3 干湿交替诱发深层致密砂岩气藏出砂机理

3.1 气体钻井及生产阶段

3.1.1 地层孔隙压力释放改变近井地带应力分布

气体钻井钻开气藏后,由于井筒处于负压状态,孔隙与井筒间存在较大的压力差,尤其是钻遇高压产层时,高速气流产出时对裂缝面的岩石颗粒产生拖拽力,导致岩石颗粒脱落^[16]。气体钻进过程钻遇高压含气裂缝时,气体会通过基块孔喉和裂缝等通道产出,强烈的耦合作用使近井地带应力分布和岩石力学性质处于变化中,随着气体产出,这种动态变化程度也逐渐加剧,同时导致近井地带地层岩石强度降低。气体钻进过程井底岩石的压力主要来自气体压力和地应力(垂向地应力、最大水平主地应力和最小水平主地应力)。研究区天然裂缝发育,裂缝内可能封闭高压气体。气体钻进过程钻遇含气裂缝,井筒与裂缝接近时,裂缝面的周向应力和径向应力差值增大,岩石发生压剪和压剪-拉伸破坏^[17]。当井筒附近的岩石强度不足以抵抗圈闭高压气体和破坏时,将会导致小规模“岩爆”,天然气和岩石碎屑从气藏中一起喷出^[18]。除此之外,高速气流本身会对井壁形成冲蚀,井壁的岩石微粒被剥落,引起井底出砂。

3.1.2 盐结晶诱发致密砂岩裂缝萌生和延伸

随着干湿交替轮次的增加,岩样侧面出现大量结晶盐(图4)。在蒸发泵作用下,岩样顶端孔隙水的盐度逐渐增大,岩样内部出现结晶盐(图5)。结晶盐会沿着粒间孔缝积聚生长、附着在伊/蒙间层等亲水性黏土矿物表面层状生长^[4]。干湿交替过程

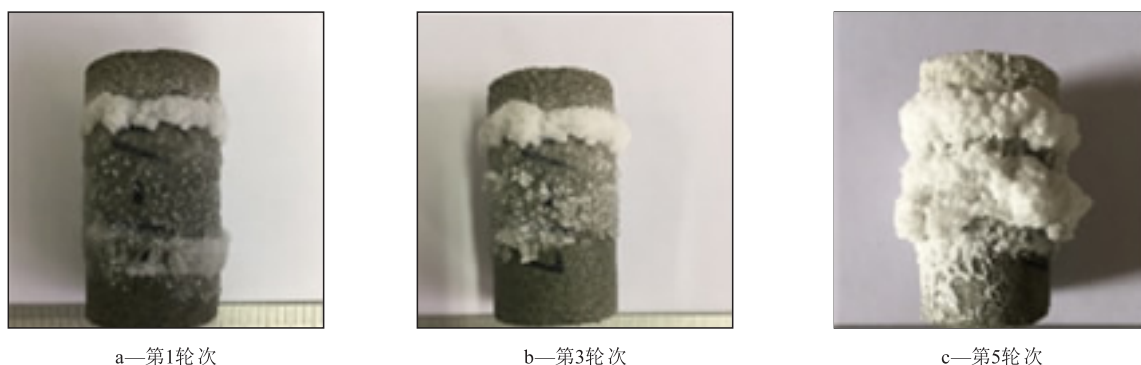
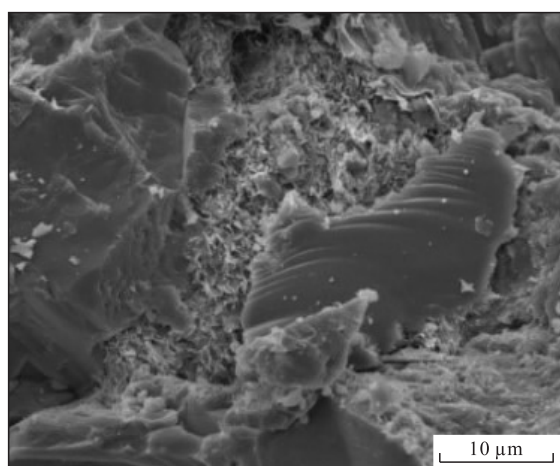
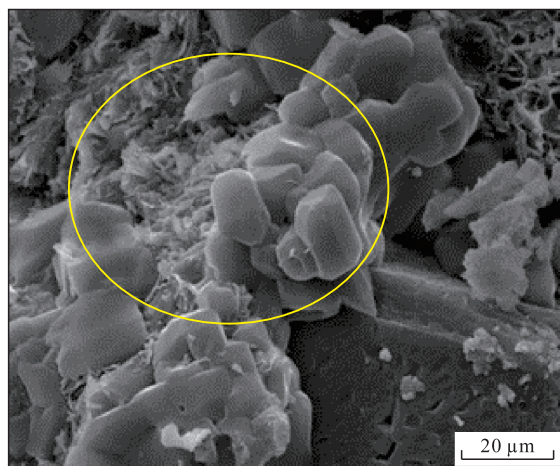


图4 不同轮次干湿交替后岩样侧面的盐析现象

Fig.4 Salting out on sides of rock sample after different rounds of dry-wet alternation



a—干湿交替前



b—干湿交替后

图5 多轮次干湿交替前后岩样扫描电镜观测结果

Fig.5 SEM images of rock samples before and after multiple rounds of dry-wet alternation

中,无机盐在孔隙或微裂缝中结晶时,结晶盐的生长将受到孔隙空间的限制,从而对孔隙或裂缝面产生压力,即结晶应力,研究显示多孔介质中结晶应力极易诱发介质损伤^[19-20]。盐析对深层致密砂岩的损害形式包括裂缝面的岩屑剥落和裂缝网络的扩展^[21],最终导致岩石强度降低。近井地带气体流速

快,汽化携液作用将加速裂缝内盐析,导致近井地带约5 m范围易发生盐析^[22-23]。

气藏生产阶段,近井地带附近会形成压降漏斗,气体从远离井筒的位置逐渐流向井筒过程中温度会降低,但由于垂直方向的地温梯度及水平方向热流作用,近井地带的温度变化幅度很小,因此将该过程近似为等温降压过程。深层致密砂岩气藏具有局部超低含水饱和度特征,高毛管压力使得高矿化度地层水运移强烈^[24],在近井地带形成的压降漏斗范围内,等温条件下压力降低,液态水会向气相蒸发,引起近井地带气藏发生盐析。

3.2 气液转换钻完井

3.2.1 干湿交替轮次增加岩石强度降低

岩样一端与液体接触,另一端暴露在干燥环境中,岩样顶端孔隙水强烈蒸发时,底端液体通过毛管压力不断地运输至岩样顶端,使得暴露在干燥环境中的一端不断地进行干湿交替,此过程类似于“蒸发泵”作用机制^[25]。干湿交替后岩石强度测试结果表明,岩石强度的降低主要是由于干湿交替诱发岩样内部萌生裂缝,干湿交替轮次的增加促进裂缝的扩张、贯通,使岩样在较低应力下发生裂缝的扩展^[10,26]。裂缝的存在为水分蒸发和渗吸增加输运通道,破坏了岩样完整性。岩样脱水过程中,裂缝面失去较多水分,加速了裂缝的扩展加深^[24]。压裂液和酸液随着裂缝的扩展逐渐侵入天然裂缝,会增加裂缝内孔隙压力,裂缝内有效正应力降低,裂缝面间摩擦阻力减小,促使裂缝面发生摩擦滑^[27]。岩样经过液体浸泡后,裂缝面间微凸体强度减弱,在裂缝面摩擦过程中发生屈服破坏,导致部分骨架颗粒脱落。

3.2.2 黏土矿物吸水与脱水降低岩石颗粒胶结强度

深层致密砂岩气藏天然裂缝发育,水力裂缝沟通天然裂缝形成的新裂缝网络,将加速液相侵入速

率,使裂缝面两侧基块含水饱和度升高^[28]。含水岩石的裂缝扩展速率是干燥岩石扩展速率的2~3倍^[29],且裂缝尖端孔隙水压力的增加会加速裂缝的扩展,引起岩石强度降低。黏土矿物是致密砂岩的重要胶结物,水基工作液侵入使得储层含水饱和度增加,黏土矿物吸水后膨胀分散,使得岩石颗粒胶结程度弱化。在高速循环气流和气藏高温的双重作用下,气藏含水饱和度降低过程中黏土矿物中的吸附水脱出,使得黏土微粒间的结合力弱化,进而降低岩石颗粒的胶结强度。酸压过程中,酸液侵入会溶蚀致密砂岩的岩石骨架颗粒(石英、长石)和胶结物(黏土矿物等),降低岩石强度使得岩石颗粒脱落,同时也会增加气藏的含水饱和度。

3.2.3 类球状风化剥落裂缝面岩石颗粒

球状风化是风化过程中岩石裂隙开裂的同时形成椭球状岩核,并且岩核在后续风化中产生完整的同心壳并继续剥落的过程^[30]。该过程一般分为裂缝形成及扩展、岩核形成和同心壳分层剥落三个阶段^[31]。深层致密砂岩气藏天然裂缝发育,气体钻井导致井筒附近地应力重新分布,地应力的扰动促使天然裂缝发生扩展。酸压过程中,随着孔隙压力的增加,天然裂缝易发生剪切错动或张性破坏,形成复杂裂缝网络,气液转换钻完井引发的多轮次干湿交替也会加剧裂缝的扩展贯通,形成大尺度的交错风化裂隙。高速气流在裂隙边界产生剧烈的剥离作用,使得岩核逐渐形成,酸压过程中水基工作液侵入使得黏土矿物吸水膨胀,而黏土矿物膨胀会加速椭球状岩核的形成。岩核形成以后,黏土矿物的膨胀还会产生应力拱作用,黏土矿物总膨胀率只需达到0.25%就会产生拱形开裂,使得同心壳逐层剥落。

4 干湿交替现象及控砂方法

4.1 不同阶段的干湿交替现象

深层致密砂岩气藏岩石颗粒胶结程度强,岩石基于拉伸破坏产出的地层砂主要为裂缝内的地层微粒和附着于裂缝面的骨架砂或岩屑,而非疏松砂岩中的骨架砂;支撑剂返吐也会成为气藏出砂的来源。研究区深层致密砂岩气井累积出砂井数从2013年的2口井增加到2016年的26口井,鉴于此探讨研究区深层致密砂岩气藏完井及生产阶段的干湿交替现象。

完井阶段干湿交替现象 以塔里木盆地库车坳陷某深层致密砂岩气藏为例,四开采用气体钻开

气藏后使用压井液,压完井后五开继续气体钻进,然后进行酸化压裂。气体钻井后使用工作液引发近井地带产生干湿交替现象。富含有机盐的工作液在储层高温条件下返排时会蒸发,从而发生干湿交替及其引发的流体浸泡和少量盐析现象。

生产阶段干湿交替现象 随着气藏气体产出,近井地带在高温低压状态下地层水蒸发剧烈,从而在近井地带气藏与井筒内发生干湿交替。生产后期,随着气体不断产出,边底水会发生锥进,导致近井地带气藏出现干湿交替现象,同时在进行注气补偿地层能量的过程中,汽化携液作用也会引发干湿交替现象。干湿交替诱发裂缝萌生和扩展,在干湿交替及其盐析产生的结晶应力作用下会导致岩石强度降低。

4.2 针对干湿交替诱发出砂的控砂方法

分阶段抓主要矛盾 完井阶段干湿交替主要是由于酸压过程中液相侵入气藏提供“湿”的来源,气体钻井的气体循环是“干”的主要诱因。应减少干湿交替轮次和工作液的使用,及时返排工作液。而在生产过程中,随着气体不断产出,边底水会发生锥进现象,边底水的锥进提供“湿”的主要来源。气体产出时的汽化携液与气藏高温是“干”的主要诱因。应合理控制生产压差,避免近井地带岩石被压碎而出砂。

优化工作液用量并减少滞留液量 气体钻开及后续完井作业应精细设计工作流体,尽量减少高对比度干湿交替轮次。在深层致密砂岩气藏岩样的相对渗透率曲线中,存在某一含水饱和度区域,在该区域内气、水两相均无法发生有效流动,该区域被定义为狱渗区。近井地带工作液侵入气藏将造成含水饱和度升高,导致近井地带气藏含水饱和度上升至狱渗区含水饱和度范围内,影响气、水渗流能力。因此持续使用水基工作液,也要及时返排,促进返排,尽力降低滞留液量。

防止压裂支撑剂返吐 压裂液返排速度过快会导致支撑剂回流返吐,使得裂缝的导流能力降低。利用纤维控砂工艺使悬浮携砂能力和支撑剂固定能力增强。压裂液中加入硬纤维在砂体中分布形成三维网状结构,增大砂体强度,或是在压裂液中加入软纤维,形成细粉砂结合体,提高细粉砂的临界流速,从而起到稳砂固砂作用。

适度出砂与防砂工艺结合 适度出砂主要包括两个方面,第一是出砂量的适度。深层致密砂岩气藏生产过程中有效应力增大,引起裂缝闭合,而干湿交替导致岩石强度降低,使得裂缝面的砂粒脱

落^[32],适度的出砂可对裂缝形成自支撑,保持裂缝的导流能力。第二是出砂粒径的适度。根据气藏砂的粒径及分布频率,有选择地阻止大于或者等于某一粒径的气藏砂随流体的运移,并通过这些砂的堆积,形成滤砂屏障,进而阻挡较小粒径的气藏砂随流体运移,在形成滤砂屏障以前允许更小粒径的气藏砂随气运移,从而达到防止一定粒径气藏砂产出的目的。同时采用绕丝筛管控制深层致密砂岩气藏出砂。

5 结论

气体钻进过程中,地层孔隙压力释放改变近井地带应力、气体冲蚀裂缝面和盐析产生的结晶应力都会对岩石强度产生不同程度的损伤。

气液转换钻完井过程中,干湿交替、裂缝面摩擦、酸液溶蚀和含水饱和度变化引发的黏土矿物吸水与脱水和类球状风化对岩石裂缝面的剥落都会弱化岩石强度。

干湿交替后裂缝岩样应力敏感程度降低,干湿交替诱发砂粒脱落对裂缝形成支撑而弱化裂缝应力敏感程度,使裂缝保持导流能力。

减少干湿交替轮次和液相侵入量,难以避免进入的液相要快速返排,防止酸液的过渡溶蚀作用。压裂过程加入纤维以防止支撑剂返吐,采用绕丝筛管控制气藏出砂。

气体钻井引发深部岩体封闭应力释放使深层致密砂岩气藏出砂成为一种必然现象,而干湿交替成为深层致密砂岩气藏出砂的一个新机理,为研究深层致密砂岩气藏出砂机理提供新思路。

符号解释

- E ——动态杨氏模量, GPa;
 i ——测试点序号;
 K_0 ——初始有效应力 σ_0 对应的渗透率, mD;
 K_i ——各测试点的有效应力 σ_i 对应的渗透率, mD;
 ν ——动态泊松比, f;
 V_p ——致密砂岩纵波传播速率, km/s;
 V_s ——致密砂岩横波传播速率, km/s;
 S_s ——应力敏感系数, f;
 ρ ——致密砂岩密度, g/cm³;
 σ_0 ——初始有效应力, MPa;
 σ_i ——各测试点的有效应力, MPa。

参考文献

[1] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特

征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 173-187.

ZOU Caineng, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Types, characteristics, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.

[2] 李谨, 王超, 李剑, 等. 库车坳陷北部迪北段致密油气来源与勘探方向[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(4): 485-497.

LI Jin, WANG Chao, LI Jian, et al. Source and exploration direction of tight oil and gas in the Dibe section of northern Kuqa depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(4): 485-497.

[3] 陈美伊, 陈守田, 吉庆生, 等. 库车坳陷泥岩盖层脆韧性破裂特征数值模拟[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 28-35.

CHEN Meiyi, CHEN Shoutian, JI Qingsheng, et al. Numerical simulation of the brittle-ductile fracture characteristics of the mudstone caprock in Kuche Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 28-35.

[4] 游利军, 王哲, 康毅力, 等. 致密砂岩孔渗对盐析的响应实验研究[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 866-872.

YOU Lijun, WANG Zhe, KANG Yili, et al. Experimental investigation of pore-permeability characteristics change caused by salt precipitation in tight sandstone gas reservoirs [J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(6): 866-872.

[5] 杨克兵, 王连君, 刘懿, 等. 阵列声波测井评价致密砂岩气层含气性[J]. 断块油气田, 2019, 26(4): 486-490.

YANG Kebing, WANG Lianjun, LIU Yi, et al. Gas-bearing properties evaluation of tight sandstone gas reservoir by array acoustic logging [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 486-490.

[6] 郑军, 阎长虹, 夏文俊, 等. 干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增1): 3 051-3 056.

ZHENG Jun, YAN Changhong, XIA Wenjun, et al. Experimental study of influence of drying and wetting cycles on bearing capacity of improved soil by CMSC soil stabilized agent [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28 (Supplement1): 3 051-3 056.

[7] 徐千军, 陆杨. 干湿交替对边坡长期安全性的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(7): 1 021-1 024.

XU Qianjun, LU Yang. Effect of alternate wetting and drying on the long term stability of slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1 021-1 024.

[8] 熊健, 黄林林, 刘向君, 等. 高温影响下页岩岩石的声学特性实验研究[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2019, 41(6): 35-43.

XIONG Jian, HUANG Linlin, LIU Xiangjun, et al. An experimental study on the effect of high temperature on the acoustic properties of the shale [J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2019, 41(6): 35-43.

[9] MOHAMED A Kassab, ANDREAS Weller. Study on P-wave and S-wave velocity in dry and wet sandstones of Tushka region, Egypt [J]. Egyptian Journal of Petroleum, 2015, 24(1): 1-11.

[10] 姚华彦, 朱大勇, 周玉新, 等. 干湿交替作用后砂岩破裂过程实时观测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 329-336.

- YAO Huayan, ZHU Dayong, ZHOU Yuxin, et al. Real-time observation and analysis of fracturing process of sandstone under cyclic drying and wetting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(2): 329-336.
- [11] 房娜, 张占女, 程明佳, 等. 基于不同裂缝发育程度下周期注水注采参数优化研究[J]. *特种油气藏*, 2019, 26(1): 131-135.
FANG Na, ZHANG Zhannü, CHENG Mingjia, et al. Injection-production parameter optimization study of cyclic water injection at different development levels of fractures [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2019, 26(1): 131-135.
- [12] LIU Xinrong, WANG Zijuan, FU Yan, et al. Macro/Microtesting and damage and degradation of sandstones under dry-wet cycles [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, (1): 1-16.
- [13] YANG Xiangtong, JIN Xiaochun, ZHANG Yang, et al. Investigating the fundamental mechanisms governing solid production in superdeephottight gas reservoirs and exploring potential solutions [C]. Dubai: SPE Technical Conference and Exhibition, 2016.
- [14] 张杜杰, 康毅力, 游利军, 等. 超深致密砂岩储层裂缝壁面出砂机理及其对应力敏感性的影响[J]. *油气地质与采收率*, 2017, 24(6): 72-78.
ZHANG Dujie, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Mechanisms of sand production from fracture wall and its effect on stress sensitivity in ultra-deep tight sandstone reservoirs [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2017, 24(6): 72-78.
- [15] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. *钻井液与完井液*, 2005, 22(3): 1-4.
LAN Lin, KANG Yili, CHEN Yijian, et al. Discussion on evaluation methods for stress sensitivities of low permeability and tight sandstone reservoirs [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2005, 22(3): 1-4.
- [16] 孟英峰, 吴苏江, 陈星元, 等. 邛崃1井氮气钻井事故分析(I)——构成事故的重要事件[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 125-134.
MENG Yingfeng, WU Sujiang, CHEN Xingyuan, et al. Analysis on the nitrogen drilling accident of Well Qionglai1, western Sichuan Basin (I): Major inducement events [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 125-134.
- [17] 罗成波, 蒋祖军, 李皋, 等. QL1井井底突发性岩爆动力学机理及动态演化过程[J]. *石油学报*, 2020, 41(2): 244-252.
LUO Chengbo, JIANG Zujun, LI Gao, et al. Dynamic mechanism and dynamic evolution process of abrupt bottom-hole rock burst in Well QL1 [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 244-252.
- [18] 孟英峰, 罗成波, 李皋, 等. 气体钻井突发性井壁失稳动力演化机理及试验研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(5): 64-69.
MENG Yingfeng, LUO Chengbo, LI Gao, et al. Dynamical evolution mechanism of sudden wellbore instability in nitrogen gas drilling and experimental research [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(5): 64-69.
- [19] WINKLER E M, SINGER P C. Crystallization pressure of salts in stone and concrete [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1972, 83(11): 3 509-3 514.
- [20] RIJNIEERS L A, HUIJINK H P, PEL L L, et al. Experimental evidence of crystallization pressure inside porous media [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(7): 1-4.
- [21] GEORGE W Scherer. Stress from crystallization of salt [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 34(9): 1 613-1 624.
- [22] LE D H, MAHADEVAN J. Productivity loss in gas wells caused by salt deposition [J]. *SPEJ*, 2011, 16(4): 908-920.
- [23] 肖娜, 李实, 林梅钦. 延长油田CO₂驱过程中无机盐沉积规律[J]. *断块油气田*, 2018, 25(1): 85-88, 92.
XIAO Na, LI Shi, LIN Meiqin. Inorganic salt precipitation law in process of CO₂ flooding in Yanchang Oilfield [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(1): 85-88, 92.
- [24] 游利军, 康毅力. 裂缝性致密砂岩气藏水相毛管自吸调控[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(1): 79-85.
YOU Lijun, KANG Yili. Aqueous capillary imbibition behavior management in fractured tight gas reservoirs [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(1): 79-85.
- [25] HSÜK J, SIEGENTHALER C. Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem [J]. *Sedimentology*, 1969, 12(1/2): 11-25.
- [26] 梅丹, 胡勇, 王倩. 裂缝对气藏储层渗透率及气井产能的贡献[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(5): 769-772.
MEI Dan, HU Yong, WANG Qian. Experimental study on fracture contribution to gas reservoir permeability and well capacity [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019, 41(5): 769-772.
- [27] 王剑波. 页岩储层缝面摩擦滑动特性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 61-62.
WANG Jianbo. Study on frictional sliding characteristics of fracture surface of shale reservoir [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 61-62.
- [28] MEREDITH P G, ATKINSON B K. Stress corrosion and acoustic emission during tensile crack propagation in Whin Sill dolerite and other basic rocks [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1984, 21(5): 1-21.
- [29] BRUNO M S, NAKAGAWA F M. Pore influence on tensile fracture propagation in sedimentary rock [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1991, 28(4): 261-273.
- [30] ROYNE A, JAMTVEIT B, MATHIESEN J, et al. Controls on rock weathering rates by reaction-induced hierarchical fracturing [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 275(3/4): 364-369.
- [31] EPPES M C, MCFADDEN L D, WEGMANN K W, et al. Cracks in desert pavement rocks: Further insights into mechanical weathering by directional insolation [J]. *Geomorphology*, 2010, 123(1/2): 97-108.
- [32] 康毅力, 张杜杰, 游利军, 等. 裂缝性致密储层工作液损害机理及防治方法[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2015, 37(3): 77-84.
KANG Yili, ZHANG Dujie, YOU Lijun, et al. Mechanism and control methods of the working fluid damages in fractured tight reservoirs [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2015, 37(3): 77-84.