

中等固结砂岩出砂机理与规律实验研究

刘伟^{1,2*}, 闫新江^{3*}, 林海⁴, 周宝⁵, 刘小刚⁶, 邓金根^{1,2}

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028

4 中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300459

5 中石油塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000

6 中海石油(中国)有限公司, 北京 100010

* 通信作者, liuwei@cup.edu.cn, yanxj3@cnooc.com.cn

收稿日期: 2021-03-01

国家自然科学基金面上项目(52074313)资助

摘要 油气井出砂是油气藏开采面临的一个重要的挑战, 给正常生产带来极大的影响。在各类砂岩储层中, 具有一定胶结强度的中等固结砂岩出砂机理及出砂规律尚不清楚, 制约了这类储层的出砂临界条件和出砂速率准确预测。本文利用一种中等固结砂岩露头, 在单、三轴实验的基础上, 设计开展了不同变形破坏阶段的卸载实验及应力和流体渗流共同作用下的出砂模拟物理实验, 揭示了中等固结砂岩的出砂机理、出砂规律以及产出物特征。研究表明: 中等固结砂岩的出砂临界条件是孔眼周围岩石在应力集中作用下进入残余变形阶段, 此时孔眼周围形成宏观剪切裂缝, 裂缝面相对滑移错动破坏裂缝面附近的颗粒胶结, 形成可供产出的离散砂, 剪切裂缝的扩展连通产生尺寸较大的掉块, 与裂缝面上的离散砂共同为出砂提供物质来源。出砂量与孔眼周围应力集中造成的破坏范围大小成正比。流体拖曳力的作用是将剪切破裂形成的固相产物运移产出, 对最终的出砂量影响较小, 只影响出砂速率。粒度测试结果表明, 中等固结砂岩产出砂中存在由多个砂粒聚集在一起的相对直径较大的颗粒, 产出砂粒度中值比原始地层砂大2~3倍, 在防砂参数设计优化时应予考虑。本文的研究结果能够为构建中等固结砂岩出砂定量预测模型以及防砂参数优化设计提供依据。

关键词 中等固结砂岩; 出砂模拟实验; 出砂机理; 出砂特征; 出砂临界条件

Experimental investigation of sand production in moderately consolidated sandstones

LIU Wei^{1,2}, YAN Xinjiang³, LIN Hai⁴, ZHOU Bao⁵, LIU Xiaogang⁶, DENG Jinggen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China

4 CNOOC Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300459, China

5 PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China

6 CNOOC Limited, Beijing 100010, China

引用格式: 刘伟, 闫新江, 林海, 周宝, 刘小刚, 邓金根. 中等固结砂岩出砂机理与规律实验研究. 石油科学通报, 2021, 01: 67-78

LIU Wei, YAN Xinjiang, LIN Hai, ZHOU Bao, LIU Xiaogang, DENG Jinggen. Experimental investigation of sand production in moderately consolidated sandstones. Petroleum Science Bulletin, 2021, 01: 67-78. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.006

Abstract Sand production has long been a challenging problem which may cause a series of problems for petroleum production. Among various types of sandstones, sand production from moderately consolidated sandstones is still less understood in terms of the mechanism and the influencing factors. This greatly limits the precise prediction of the critical sand production conditions and the sand production rate. In this paper, with a moderately consolidated sandstone, in addition to the conventional uniaxial and tri-axial compression tests, unloading tests after loading to different deformation stages and sand production, physical model experiments under different stress and fluid flow conditions have been conducted to investigate the mechanism of sanding as well as the characteristics of the produced sands from the moderately consolidated sandstone. The results show that the necessary condition for sand production from moderately consolidated sandstones is that the rock around the wellbore or perforation deforms into the residual plastic deformation stage under the effect of stress concentration, leading to localized shear fractures around the wellbore or perforation. Discrete sands are generated during the formation of shear fractures due to destruction of cementation of the grains on the shear fracture, which is further enhanced by relative slippage of the fracture surfaces. Intersection of conjugate shear fractures near the surface of wellbore or perforation will also generate debris of relatively large size. Both these discrete sands and debris form the material source of sand production. The quantity of produced solids has been observed to be proportional to the confining stress applied at the external surface of the samples. It is also demonstrated that fluid flow only serves to transport the produced solids which have been generated from failure of the rock around the wellbore or perforation, thus the flow rate is of marginal effect on the quantity of produced solids, although it indeed influences the rate of the production of solids. It has also been observed that many of the sand particles produced from the moderately consolidated sandstone are composed of several bonded sand grains, thus the mean particle size of the produced sands is 2~3 times larger than that of the virgin sands of the moderately consolidated sandstones. This needs to be considered in the sand proof design. The results in this paper are anticipated to be beneficial for establishing models for quantitative prediction of sand production from moderately consolidated sandstone as well as for optimization of the sand proof design.

Keywords moderately consolidated sandstones; sand production experiment; sanding mechanism; sanding characteristic; sanding critical condition

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.01.006

0 引言

出砂一直是困扰砂岩油气藏开采的主要技术难题之一,容易引发井下和地面设备磨蚀,缩短油气井寿命,降低油气井产量乃至迫使油气井关井停产^[1-2]。揭示储层出砂机理与出砂规律是完井方式选择以及防砂完井参数优化设计不可或缺的基础^[3]。根据固结程度,砂岩储层岩石大致可按单轴抗压强度(UCS)划分为未固结/弱固结砂岩(UCS<10 MPa)、中等固结砂岩(10<UCS<50MPa)以及固结高强度砂岩(UCS>50MPa)^[4,5]。生产实践表明,正常生产压差条件下,固结高强度砂岩储层孔眼周围岩石能够保持完整而不破坏,出砂风险较小^[4-5]。未固结/弱固结砂岩储层在油气生产过程中出砂一般不可避免,研究主要着重于揭示完井参数、储层物性参数与生产参数对储层出砂的影响规律^[4,6-11],从而为设计有效的防砂措施提供理论基础。国内外的物理模拟实验研究表明,疏松砂岩油藏颗粒胶结弱、成岩性差,孔眼附近岩石在钻采扰动后大多处于松散状态^[8],特别是疏松砂岩稠油热采井,在蒸气作用下,储层岩石砂粒之间的胶结几乎破坏殆尽^[7,12],出砂机理表现为这些离散砂粒在流体拖曳力作用下克服颗粒间的摩擦力和胶结作用

而发生拉伸破坏,自井眼或射孔表面剥落,随后运移至井筒内,因此影响出砂的因素主要包括储层岩石胶结强度、地层流体黏度、储层渗透率和流体渗流速度或生产压差^[8,12]。针对这类储层,国内外学者通过分析单个砂粒的受力状态,建立了出砂临界生产压差预测理论^[1,13-15]。这些理论均假设孔眼周层岩石未固结或在钻完井扰动下已经发生剪切破坏而处于塑性状态,已具备出砂必要的物质基础,随着生产压差和相应的流速达到临界值,砂粒即在流体拖曳力作用下被产出。临界生产压差的大小仅与地层强度有关,而与原始地层应力大小无关。

中等固结砂岩介于未固结/弱固结砂岩与固结高强度砂岩之间,国内外学者利用中等固结砂岩厚壁筒岩样开展的出砂物理模拟实验结果表明,井底流压降低造成孔眼内壁应力集中引发剪切破坏是出砂的先决条件,流体流动仅起到将砂粒运移至井筒的作用^[3,16-20]。目前国内外普遍采用弹性力学或孔隙介质弹性力学理论预测孔眼周围的应力状态,然后结合一定的出砂准则计算出砂临界条件。最常见的是将储层岩石峰值强度作为破坏和出砂条件^[21-22],然而由此计算的临界生产压差明显低于实验实测结果。部分学者采用等效塑性应变作为岩石剪切破坏程度的指标,以孔眼周围等

效塑性应变达到某一临界值作为储层出砂准则^[18-19],然而对于塑性应变达到临界值与出砂之间的关系认识尚不清楚。另外一些研究人员则采用物模实验实测的厚壁筒(TWC)强度替代岩石峰值强度作为出砂准则,从而隐含考虑孔眼周围岩石在出砂前的非线性弹性和塑性变形^[23-25]。除了临界生产差压预测,目前出砂速率定量预测已经成为中等固结砂岩出砂研究的重要方面,其中以冲蚀模型为代表^[26-28],认为孔眼周围岩石进入一定的塑性状态后达到出砂条件,通过假定冲蚀速率与塑性应变、流速的关系,基于孔隙介质弹塑性力学理论建立出砂速率定量预测模型。应该认识到,岩石应力达到峰值强度仅说明岩石开始发生破坏,并不一定代表已经形成了可供产出的离散砂,目前对于中等固结砂岩在什么条件下形成了可供产出的离散砂而不仅仅是发生了破坏并无深入的理解,对于形成的离散砂数量与地应力、井底压力、流体流速之间的关系并无明确的认识,制约了中等固结砂岩出砂临界条件和出砂速率的准确预测。此外,中等固结砂岩破坏过程中形成的离散砂特征,如大小和粒度分布,是防砂方式选择与参数设计的重要依据,然而现有的研究也并未予以足够的关注。

本文利用一种中等固结砂岩露头,综合开展常规单、三轴岩石力学实验以及不同变形破坏阶段的卸载实验,揭示中等固结砂岩剪切破裂过程中产生离散砂粒的时机与特征,在此基础上设计和开展应力和流体渗流共同作用下的出砂模拟物理实验,并通过CT扫描、电镜观察及粒度测试等方法,揭示中等固结砂岩的出砂机理、出砂规律以及产出物特征,为研究中中等固结砂岩储层孔眼破坏机理及出砂预测模型构建提供进一步的理论依据。

1 实验材料与实验方法

1.1 实验材料与岩样制备

实验所使用的岩样为采自四川盆地自贡地区的一种黄褐色露头砂岩,如图1(a)所示。基于X射线衍射仪的全岩分析结果显示该砂岩主要成分为石英(94.1%)和方解石(5.9%),属于钙质胶结,岩石固结程度中等。孔隙度为17.85%~20.25%,渗透率82.78~182.33 mD。

为开展单、三轴岩石力学实验及不同变形破坏阶段的卸载实验,加工制备了如图1(b)所示的直径25 mm、长度50 mm的标准岩心柱。

出砂模拟实验所用厚壁筒岩样如图1(c)所示,试

样外径为95 mm、长度120 mm,内孔直径20 mm、深度80 mm,顶部未钻穿,保留40 mm。为确保内孔居于试样中心,制备时将露头大块岩心固定,先钻取一个内径为20 mm,深度为80 mm的孔,再用内径为95 mm的取芯钻头在同一位置钻取高120 mm岩样。

1.2 岩石力学实验方法

为揭示中等固结砂岩的力学特性,剪切破裂面的形成时机以及破裂面产物特征,本文除开展常规单、三轴岩石力学实验外,还设计开展了自不同变形破坏阶段的卸载实验。实验过程中采用的加卸载应力路径示意图如图2所示,其中设置了5个卸载点,分别是峰值强度前、峰值强度点、峰值强度后、残余强度前、残余强度点。

1.3 出砂物理模拟实验方法

本文设计和开展的出砂物理模拟实验中的出砂单元构型如图3所示。实验所用的厚壁筒岩样置于直径

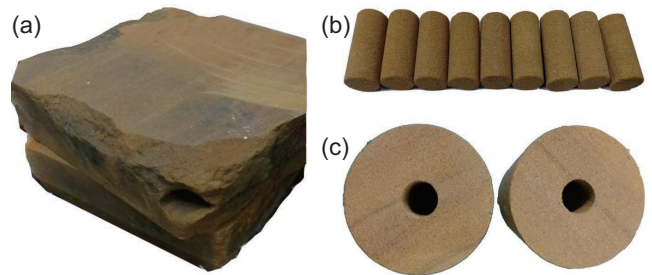


图1 (a) 实验所用的露头砂岩; (b) 岩石力学实验试样; (c) 出砂模拟实验厚壁圆筒试样

Fig. 1 (a) Outcrop sandstone used in the experiments; (b) Samples for rock mechanical tests; (c) Thick hollow cylinder samples for sanding experiments.

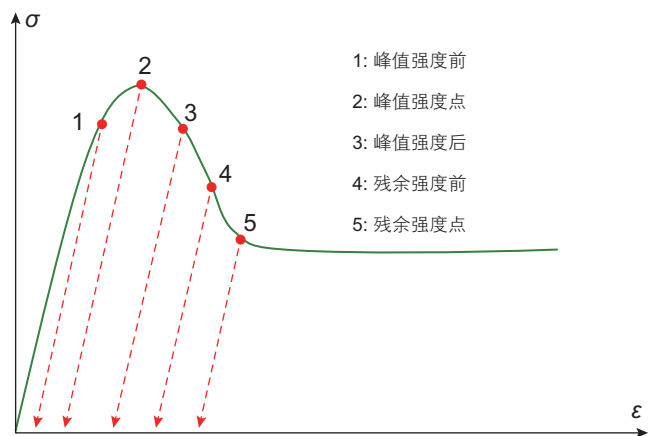


图2 岩石力学测试不同变形破坏阶段的卸载路径示意图

Fig. 2 Unloading paths from different stages of deformation and failure during the rock mechanical tests

为 100 cm 的下部底座，在岩样与底座的外部套好热缩套后，向热缩套与岩样外表面之间的环空以及岩样上表面充填抗压陶粒，陶粒厚度约为 3~4 mm，然后将上端盖装配于陶粒顶端，加热热缩套使出砂单元处于密封状态。实验开始前，将上述出砂单元安装于如图 4 中所示的 TAW-1000 深水孔隙压力伺服系统的围压腔内。实验过程中该系统能够对出砂单元施加围压(0~80 MPa)和轴压(0~120 MPa)，以满足试样发生破坏所需的应力条件。加载的同时，通过外部连接的 SP3010 型高压高精度双柱塞输液泵从图 3 中所示的注入口提供流量稳定的液流，流体注入后通过岩样顶部以及岩样和热缩套之间环空的高渗透砾石层，随后沿

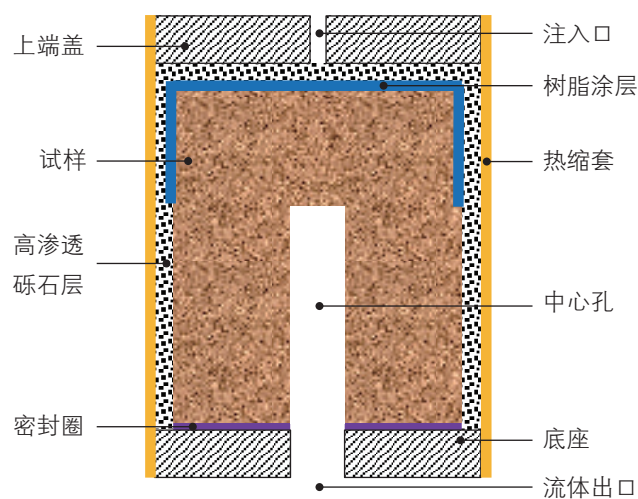


图 3 出砂物理模拟实验中的出砂单元构型

Fig. 3 Configuration of the sanding cell in the sanding experiments

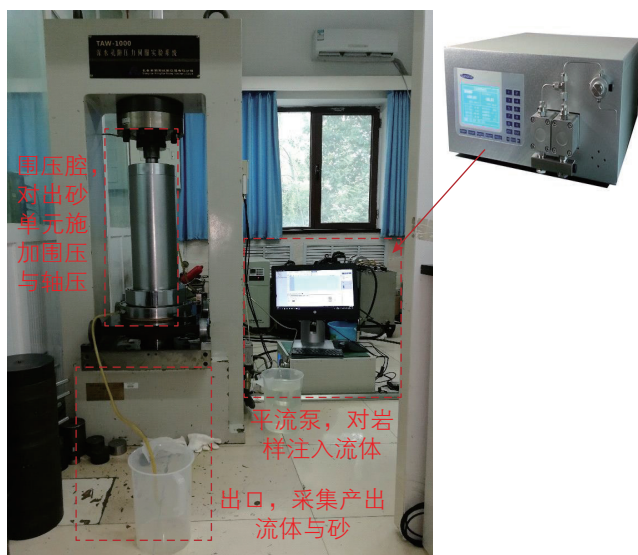


图 4 出砂物理模拟实验装置

Fig. 4 Sanding experiment setup

向流入岩样的中心孔，以模拟地层流体在储层中的流动。如图 3 和图 4 所示，出口处通过软管连接，使用量筒在固定时间间隔将流出的流体和产出固相物质进行收集。实验中的采用的流体为 10# 白油(室温下黏度为 10 mPa·s)。

出砂实验结束后采用马尔文激光粒度分析仪对产出物进行粒度测试，该设备测量的粒度范围为 0.02~2000 μm。采用 GE Brivo CT385 医用 16 排 CT 对实验后的厚壁筒试样进行扫描，刻画孔眼内壁的岩石破坏形貌特征，该设备的可视空间分辨率 0.30 mm。采用日立台式电镜 TM3030Plus 观察产出砂粒的微观特征，该设备的放大倍数为 15~60 000 倍。

2 实验结果与分析

2.1 中等固结砂岩岩石力学特性与剪切破裂面产物特征

本文所采用的中等固结砂岩单、三轴岩石力学实验测试结果见表 1，应力—应变关系如图 5 所示。单轴压缩测试结果显示，该砂岩试样的弹性模量为 3.98~4.2 GPa，泊松比为 0.25~0.26，峰值强度为 18.89~19.27 MPa，属于中等固结砂岩。图 5 中 5 MPa、7.5 MPa 和 10 MPa 围压条件的常规三轴测试结果表明，该中等固结砂岩在围压下表现出塑性变形特征，在差应力作用下经历了典型的弹性变形阶段、峰前塑性变形阶段、应变软化阶段，最终达到残余变形阶段。5 MPa 围压下岩石的峰值强度为 48.67~49.07 MPa，10 MPa 围压下岩石的峰值强度为 66.81~67.36 MPa。试验后的部分试样如图 6 所示，从图中可以看到，试样主要发生了剪切破裂，实验后的试样中形成与轴线呈一定夹角的椭圆形剪切裂缝面，随围压升高，破裂面与轴线夹角增大，剪切破裂面长轴长度减小。

表 1 中等固结砂岩试样单、三轴岩石力学测试结果

Table 1 Results of the uniaxial and tri-axial tests on the moderately consolidated sandstone

编号	围压 /MPa	弹性模量 /GPa	峰值强度 /MPa	残余强度 /MPa	残余强度 /峰值强度
M1	0.00	4.20	19.27	—	—
M4	0.00	3.98	19.24	—	—
M7	0.00	4.01	18.89	—	—
M3	5.00	7.39	48.67	23.30	0.48
M6	5.00	7.24	49.07	27.48	0.56
M8	7.50	6.20	60.10	30.00	0.50
M5	10.00	7.37	66.81	43.75	0.65

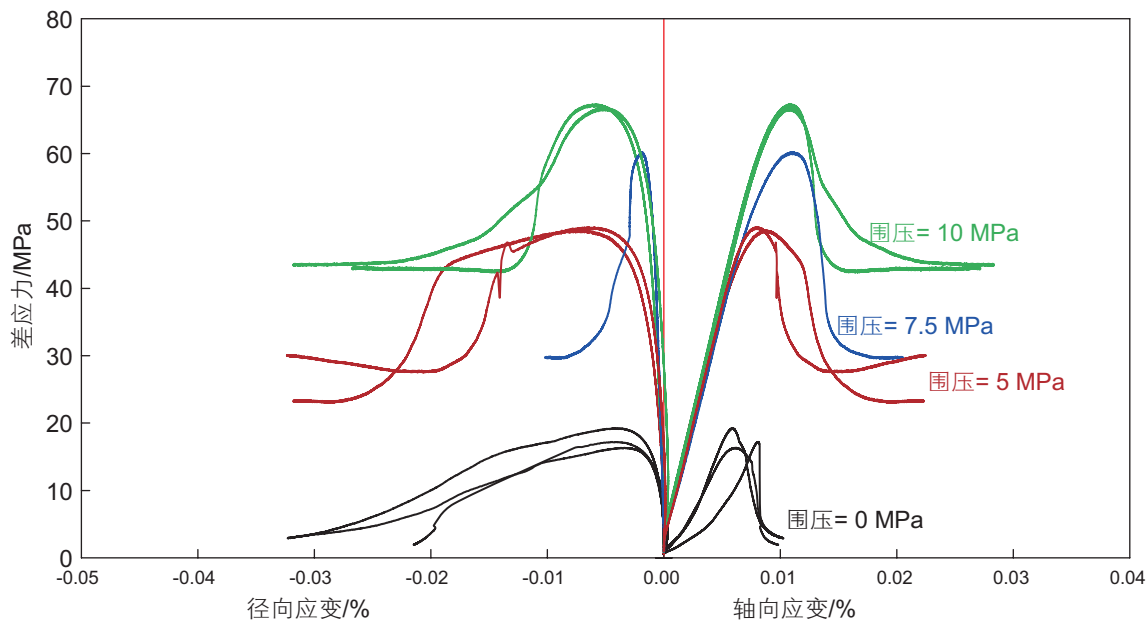


图 5 中等固结砂岩单轴、三轴应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves from the uniaxial and tri-axial tests on the moderately consolidated sandstone

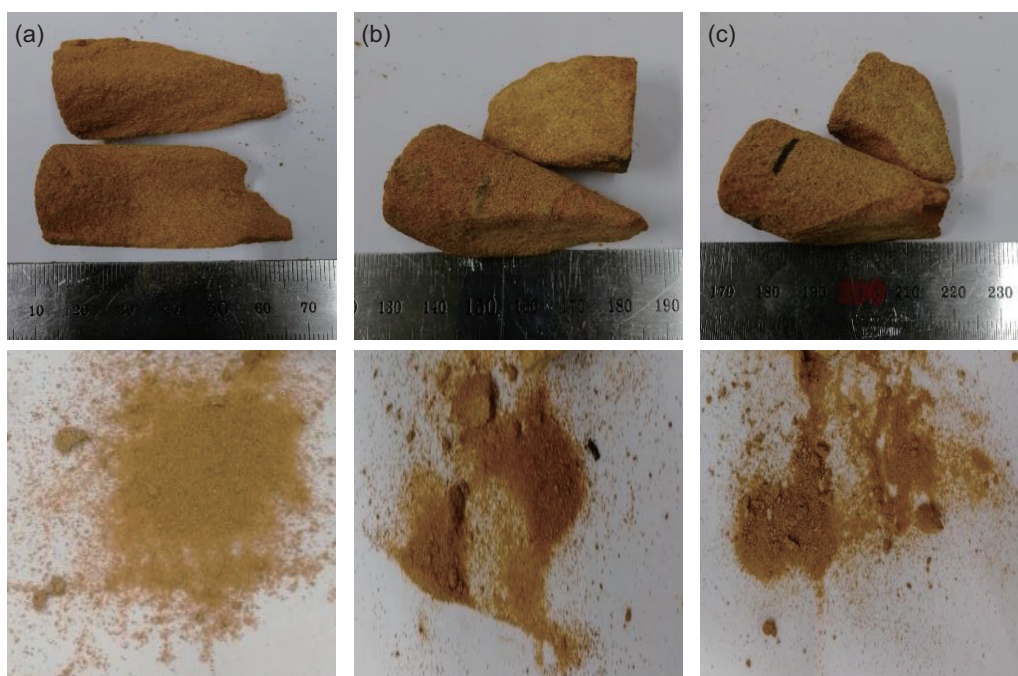


图 6 中等固结砂岩单轴、三轴试验后的岩样及剪切破裂面产物: (a) 单轴; (b) 5 MPa 围压; (c) 10 MPa 围压

Fig. 6 Moderately consolidated sandstone samples as well as debris from the shear fracture surfaces after mechanical tests: (a) uniaxial; (a) 5 MPa confining pressure; (a) 10 MPa confining pressure

从图 6 可以到，中等固结砂岩剪切破裂过程中由于胶结破坏和摩擦效应，在裂缝面上形成了一定量的离散砂和少量的碎块，裂缝面两侧的基质岩块仍然较为完整。剪切破裂面产出离散砂激光粒度测试结果见图 7，其中原始砂为试样经过分散处理后的颗粒，结果显示原始地层砂的粒度中值 D50 为 69.2 mm，剪切破裂面产出

砂粒度中值 D50 约为 183.9~230.0 mm，为原始地层砂粒度中值的 2.6~3.3 倍。其原因在于剪切破裂面形成及摩擦过程中，尽管大部分砂粒间的胶结遭到破坏，但仍有部分颗粒间的胶结未遭破坏，见图 8 中的破裂面产出砂扫描电镜观察结果，存在数个颗粒团聚的现象，因此粒度中值比原始地层砂的粒度中值高。

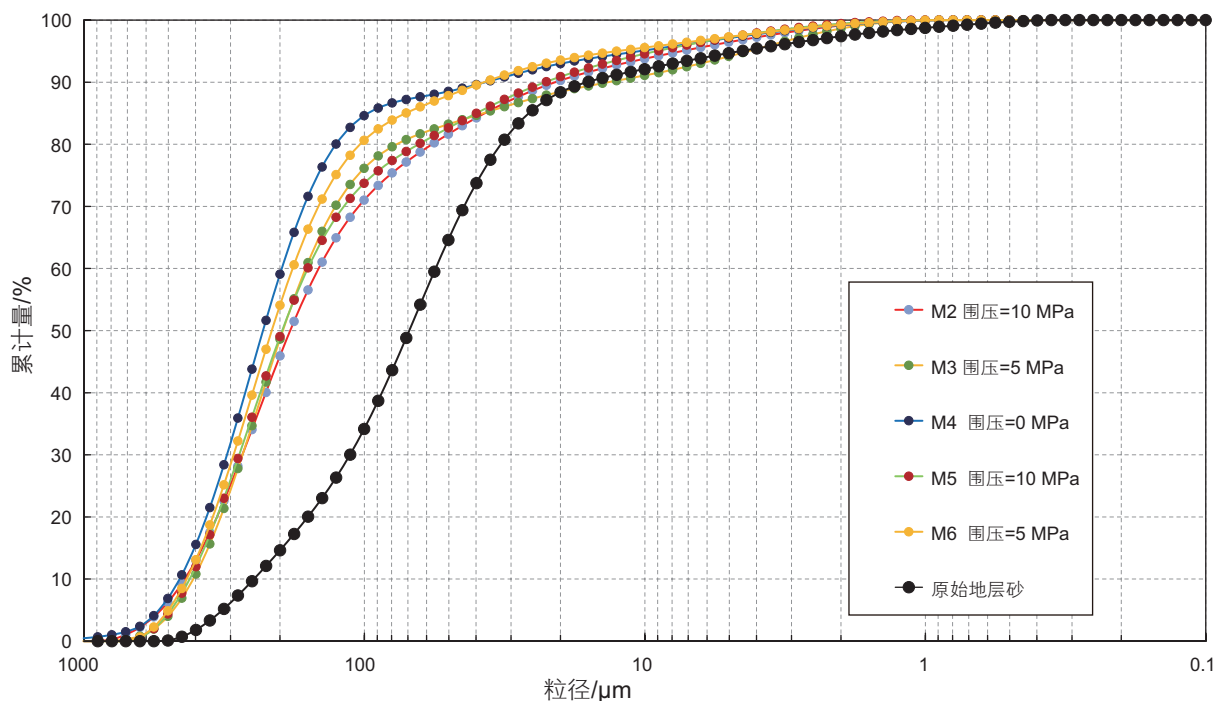


图7 中等固结砂岩单轴、三轴剪切破裂面产出砂与原始地层砂粒度分布

Fig. 7 Grain size distribution of the sands generated from the shear fracture surfaces and the virgin sands of the moderately consolidated sandstone

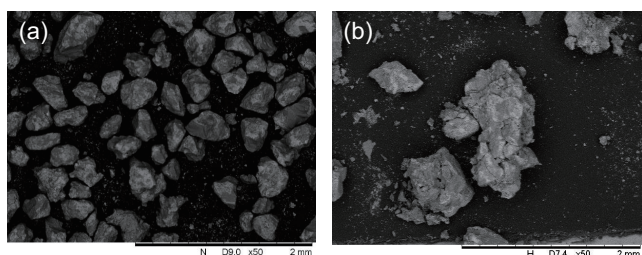


图8 中等固结砂岩(a)原始地层砂与(b)单轴、三轴剪切破裂面产出砂扫描电镜图

Fig. 8 SEM images of (a) the virgin sands and (b) sands generated from the shear fracture surfaces

上述单、三轴实验结果显示中等强度砂岩剪切破裂过程中在破裂面上形成离散砂,为出砂提供物质基础。为了在构建出砂临界条件预测模型时合理确定出砂准则,需要进一步明确剪切破裂面是在变形破坏过程的哪一阶段产生的。图9与图10分别给出了10 MPa围压条件下,不同变形破坏阶段卸载实验得到的应力应变曲线以及相应实验后的岩样。从图9可以看到,各岩样应力应变曲线在卸载前一致性较好,表明岩样较为均质,峰值强度大约为67 MPa。从图10卸载后的岩样可以看到,岩样应力状态到达峰值破坏点及其前后附近时(图10(a)~(c))岩心仍然较为完整,尚未形成宏观剪切破裂面。应力状态处于应变软化、但尚未达到残余变形阶段时(图10(d)),岩心出现了一

条粘连缝,然而岩心表观上整体性仍然较好,裂缝面之间胶结已经遭到一定程度的破坏,然而尚未形成离散砂。应力状态达到和进入残余变形阶段后(图10(e)、(f)),岩心出现宏观剪切裂缝,且裂缝面间发生了显著的相对滑移错动,进一步破坏了裂缝面附近的颗粒胶结,形成了数量可观的离散砂。

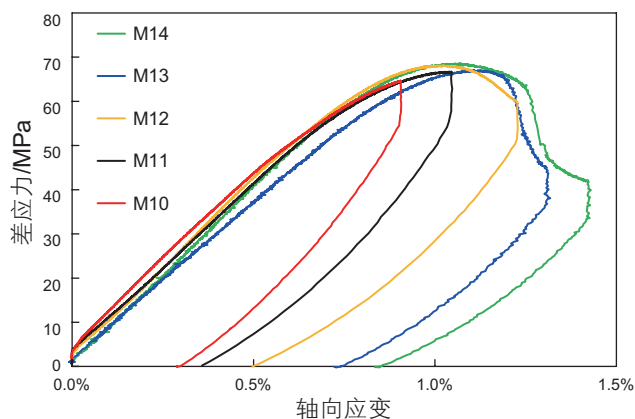


图9 中等固结砂岩沿不同变形破坏阶段的卸载的应力应变曲线

Fig. 9 Stress-strain curves from rock mechanical tests of the moderately consolidated sandstone with unloading from different stages of deformation and failure

2.2 中等固结砂岩出砂物理模拟实验结果

为研究应力与流体对中等固结砂岩出砂过程的影响,开展了8组对比实验,具体实验条件见表2。其中编号D1至D5的岩样,开展了不同围压加载水平的出砂模拟实验,流体流速为100 mL/min。编号D6至D8岩样在给定围压的情况下,首先在200 mL/min流速下开展实验20~30 min观察出砂情况,随后提升流速至300 mL/min。

图11所示为出砂模拟实验中形成和搜集的固相产物

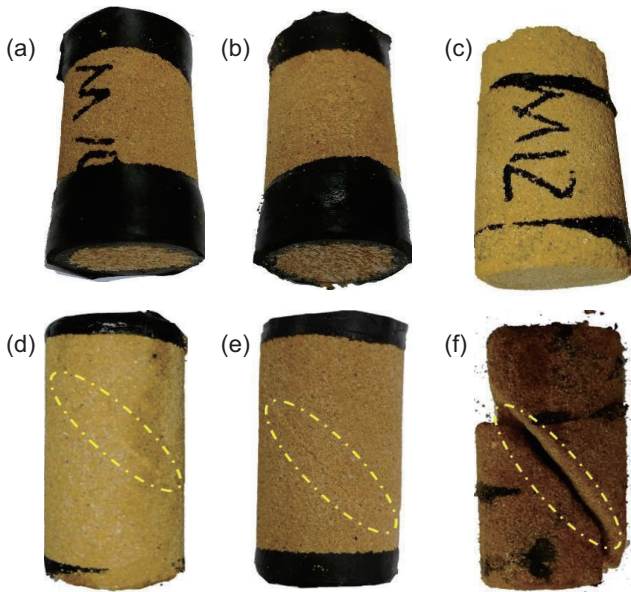


图10 中等固结砂岩沿不同加卸载应力路径实验后的岩样: (a) M10; (b) M11; (c) M12; (d) M13; (e) M14; (f) M5(进入残余变形阶段后卸载)

Fig. 10 Moderately consolidated sandstone samples after rock mechanical tests with unloading from different stages of deformation and failure: (a) M10; (b) M11; (c) M12; (d) M13; (e) M14; (f) M5

表2 中等固结砂岩出砂物理模拟实验条件

Table 2 Settings of the sanding experiments of moderately consolidated sandstones

实验变量	试样编号	围压/MPa	流速/(mL/min)
围压	D1	42	100
	D2	43	100
	D3	44	100
	D4	45	100
	D5	46	100
流速	D6	42	200~300
	D7	44	200~300
	D8	46	200~300

物,其中图11(a)是不同时刻随流体携带产生的离散砂,经过石油醚清洗后晾干见图11(b)。实验结果表明,在应力集中作用下,孔眼周围发生破坏的区域较大时,不仅产生离散砂,还产生了尺寸较大的掉块,由于实验装置出口处的软管管径为10 mm,这部分尺寸较大的掉块被滞留在试样的孔眼内,实验结束后搜集并进行称量,见图11(c)与图11(d)。本文中实验过程中流体携带出的砂称为产出砂,通过在实验过程中定期收集能够得到产出砂质量随时间的变化规律,而滞留在孔眼内的掉块在实验结束后收集并使用石油醚清洗、自然干燥。

2.2.1 不同围压条件下的出砂实验结果

图12所示为不同围压条件下,累计产出砂量随时间变化的实验结果。岩样D1的实验中,围压加载至40 MPa时开始通入流体,流体流速为100 mL/min,出口端无出砂现象,持续增大围压至42 MPa时才观察到出砂现象,此后保持围压不变直至实验结束。从实验结果来看,随着时间增加,出砂速率经历了增加—平稳—减小的过程,0~10 min内出砂速率增加,10~20 min内出砂速率保持平稳,20~30 min内出砂速率逐渐减小至零,30 min后累计出砂量几乎不再增加。岩样D2~D5均在围压加载至40 MPa时开始通入流体,随后围压分别增大至43~46 MPa并保持不变直至实验结束,总体上看,出砂量随时间的变化规律基本类似,出砂速率经历增加—平稳—减小至零的过程。围压越

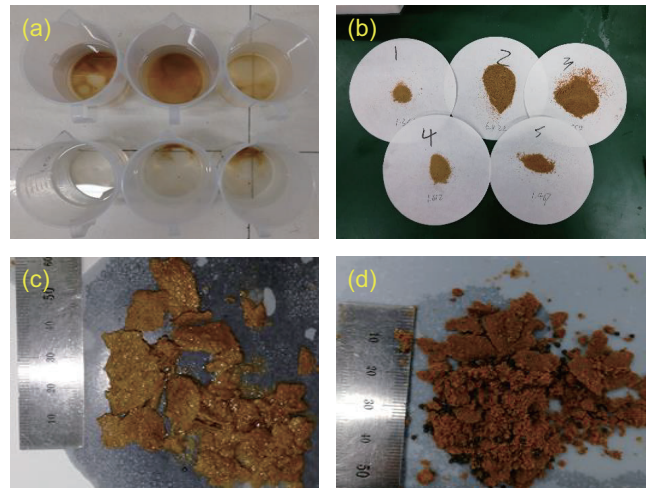


图11 (a) 出砂模拟实验不同时刻的产出砂; (b) 清洗、烘干后的产出砂; (c) 滞留在孔眼内的片状掉块; (d) 滞留在孔眼内的掉块及堵塞物

Fig. 11 (a) Produced sand at different time instances; (b) Produced sand after washing and drying; (c) Flaky pieces trapped within the hole of the TWC samples. (d) Pieces and plugs trapped within the hole of the TWC samples

高, 出砂持续时间越长, 最终累计产出砂量大致上随着围压增加而增加。其中, 岩样D2与D3的实验中, 由于掉块大量堵塞在孔眼内, 流体携带出的累计产出砂质量低于围压较低D1试样, 但是包含产出砂与堵塞在孔眼内的掉块的固相产出物总质量随围压增高而增加(见图13)。

出砂实验结束后, 将孔内残余物收集后, 对孔眼破坏情况进行直接观察和CT扫描, 结果如图14所示。可以看到, 围压为42 MPa时, 内孔周围仅出现小规模

破坏, 内孔两个部位沿着内孔轴线方向出现连续的崩落现象, 形成了不规则的破坏区域; 随围压升高, 孔眼周围出现连续崩落区域增大, 形成的空腔体积增大, 垂直于孔眼方向上形成近似对称的破坏区域, 破坏区域呈“V”形; 当围压为46 MPa时, 孔眼扩大至试样直径的一半, 如图14(e)所示。

2.2.2 不同流量条件下的出砂实验结果

除了围压直接影响岩石的变形破坏与出砂, 另一个可能影响出砂的因素为流体流速。本文进一步开

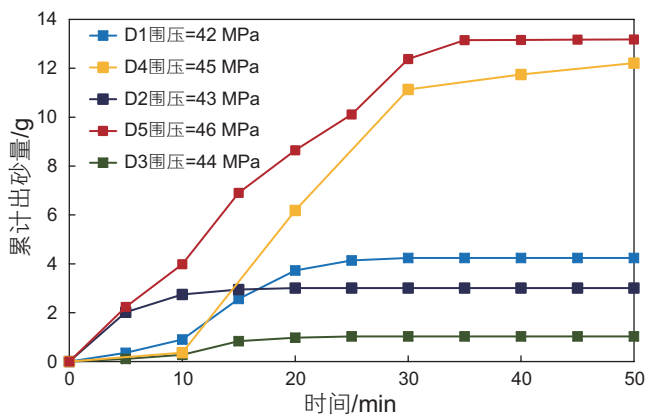


图12 不同围压下产出砂质量—时间关系

Fig. 12 Mass of produced sand versus time under different confining pressures

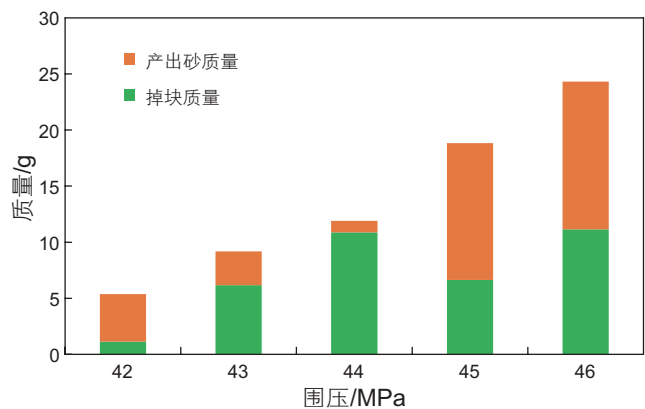


图13 不同围压条件下的固相产出物质量

Fig. 13 Mass of produced solids under different confining pressure

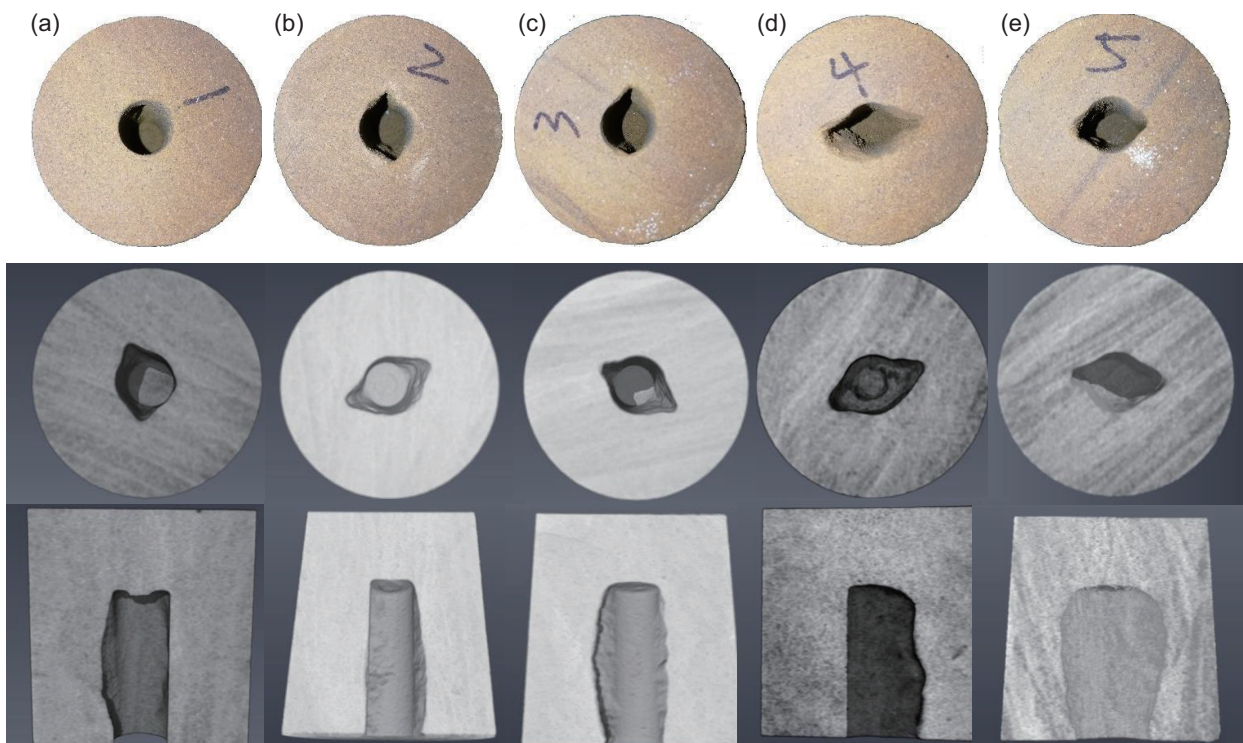


图14 不同围压条件下孔眼破坏情况: (a) D1; (b) D2; (c) D3; (d) D4; (e) D5

Fig. 14 Failure of the inner hole under different confining pressure: (a) D1; (b) D2; (c) D3; (d) D4; (e) D5

展了固定围压条件下变化携砂流体流速的实验。实验中采用的 200 mL/min 和 300 ml/min 流量对应的孔眼表面流速分别为 6.63×10^{-4} m/s 和 9.95×10^{-4} m/s，换算成 8-1/2” 裸眼井单位长度井段产量为 38.8 m³/d 和 58.3 m³/d，显著高于正常的实际油井产量。

图 15 所示为试样 D6~D8 的出砂量随时间变化情况。岩样 D6 实验结果见图 15(a)，围压加载至 40 MPa 开始通入流体，缓慢增大围压至 42 MPa 开始出砂，保持围压不变，携砂流体的初始流量为 200 mL/min，可以看到实验初期结果与流量为 100 mL/min 的结果类似，随着时间增加，出砂速率逐渐降低至接近零，30 min 时将流量提升至 300 mL/min，新增出砂量非常少，累积出砂质量几乎没有增加。岩样 D7 实验结果见图 15(b)，20 min 时出砂速率已基本将至零，随后将携砂流体流速提升至 300 mL/min，累计出砂质量开始少量增加，40 min 后出砂速率再次减少至零。岩样 D8 实验结果见图 15(c)，25 min 时出砂速率已基本降至零，随后将携砂流体流速提升至 300 mL/min，累计出砂质量开始少量增加，55 min 后出砂速率再次减少至

零。从上述实验结果来看，即便在远高于正常油井实际产量的流速条件下，并未出现持续的出砂现象，流体流动仅能将孔眼周围已经发生破坏形成的离散砂产出，而不能将砂粒从未破裂的岩石基质上进行剥落，中等固结砂岩出砂先决条件是由于孔眼破坏产生了可供产出的离散砂。

2.2.3 出砂实验产出物特征分析

中等固结砂岩出砂实验固相产出物包括残留在孔内的掉块、由于掉块堵塞在孔眼的离散砂及被流体携带出孔眼的产出砂。为观察产出砂粒度分布特征，对产出砂进行了激光粒度测试，使用电子显微镜对出砂模拟实验产出砂微观特征进行观察。将中等固结砂岩进行分散处理得到的原始地层砂与产出砂粒度分布进行对比，结果见图 16。原始地层砂粒度中值 D50 约为 76.1 μm，产出砂的粒度中值 D50 在 200~274 μm 之间，即产出砂粒度中值为原始地层砂粒度中值的 2.6~3.6 倍。扫描电镜下观察到出砂实验产出砂中存在与三轴压缩实验破裂面离散砂类似的颗粒团聚现象，见图 17。针对中等固结砂岩储层，应考虑产出砂的粒

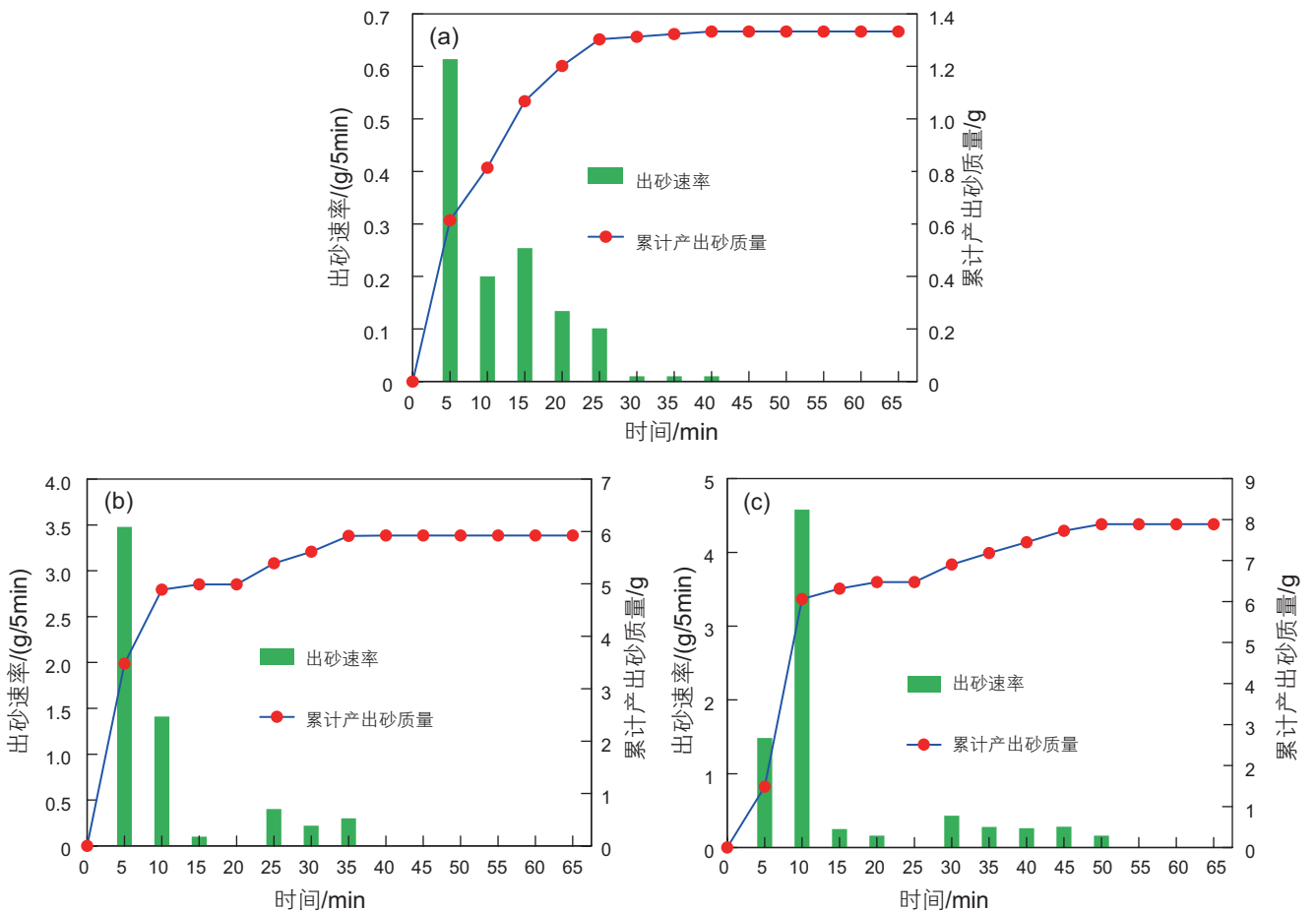


图 15 不同流量条件下出砂量随时间变化：(a) D6；(b) D7；(c) D8
 Fig. 15 Mass of produced sand versus time: (a) D6; (b) D7; (c) D8

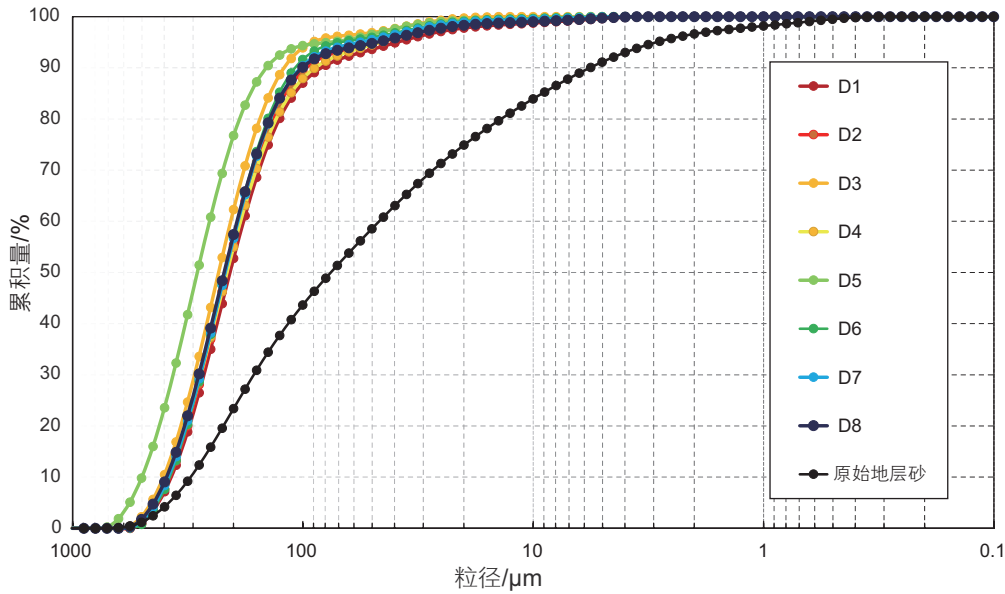


图 16 中等固结砂岩出砂模拟实验产出砂粒度分布

Fig. 16 Grain size distribution of the produced sands from sanding experiments of the moderately consolidated sandstone

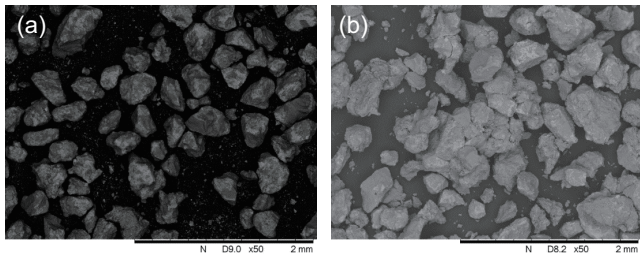


图 17 中等固结砂岩 (a)原始地层砂与 (b)出砂模拟实验产出砂扫描电镜图

Fig. 17 SEM images of the virgin sands and the produced sands from sanding experiments of the moderately consolidated sandstone

度特征值，而不是原始地层砂的粒度特征值进行防砂参数优化设计。

3 实验结果讨论

本文的出砂实验中，当围压不高于 40 MPa 时，即使持续注入流体，出口端也无离散砂产出，当围压高于 42 MPa 时，开始出现出砂现象，但一段时间后出砂速率逐渐降至零，累计出砂量不再增加，即便提升流体速度也不会出现持续出砂现象，说明中等固结砂岩颗粒之间胶结良好，仅靠流体拖曳力难以将颗粒之间的胶结破坏而使颗粒从岩石基质上剥落，中等固结砂岩出砂过程中的产出物来源于孔眼周围岩石在高应力条件下的剪切破坏。如图 18 所示，孔眼周围应力水平以及岩石强度决定了破坏区域的大小及产出物总质量，流速对于总产出物质量并不是控制因素，产出物总质

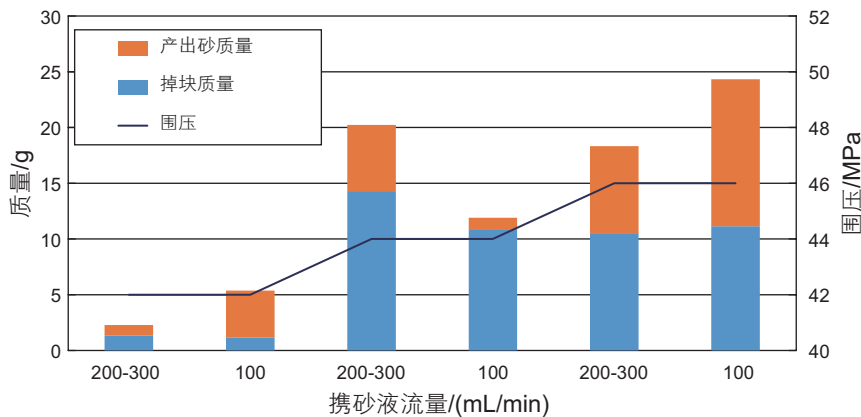


图 18 不同围压、流速条件下的出砂量对比

Fig. 18 Comparison of the mass of produced sand for different confining pressures and flow rates

量总体上受围压控制,围压越大,岩样破坏区域越大,产出物总质量越大。剪切破坏过程中,孔眼周围共轭剪切破裂面连通时会形成尺寸相对较大的掉块(见图11(c)、(d))及离散砂,共同为中等强度砂岩出砂提供物质来源。剪切破坏区域形成后,若应力状态不再改变,岩样会进入稳定状态,不会持续出砂。

单、三轴岩石力学试验证实了中等强度砂岩剪切破裂过程中破裂面上会形成离散砂,为出砂提供必要的物质基础。而加载至不同变形破坏阶段再卸载后的岩样观察结果进一步明确,中等固结砂岩应力状态达到峰值强度仅代表损伤开始,此时尚未形成宏观破裂面和离散砂,只有当应力状态达到残余变形阶段后,岩心内部才出现明显剪切裂缝,且裂缝面间由于相对滑移错动破坏了裂缝面附近的颗粒胶结,形成了数量可观的离散砂。因此,将孔眼周围岩石应力状态达到峰值强度作为出砂准则显然是不恰当的。考虑均匀围压下孔眼周围大约2倍的应力集中系数,按照摩尔库伦强度准则估计,围压达到单轴强度一半时孔眼周围岩石应力状态即达到峰值强度,而这显然远低于本文中实际出砂的临界围压(42 MPa)。从本文的实验结果来看,在构建中等固结砂岩出砂临界条件预测模型时,将孔眼周围岩石进入残余变形阶段作为出砂准则更为合理。

4 结论

本文通过对一种中等固结砂岩露头开展单、三轴

岩石力学实验以及应力和渗流共同作用下的出砂模拟实验,揭示了中等固结砂岩的出砂机理、出砂规律以及产出物特征,为研究中等固结砂岩储层孔眼破坏机理及出砂预测模型构建提供进一步的理论依据。得到以下结论:

(1)中等固结砂岩出砂过程分为两步。井眼或孔眼周围应力状态达到岩石的临界破坏条件,岩石发生剪切破坏,共轭剪切破裂面连通时形成较大尺寸较大的掉块,同时形成离散砂,共同为中等强度砂岩出砂提供物质来源;剪切破坏区域形成后,孔眼周围岩石应力状态弱不再发生改变,储层岩石会再次进入稳定状态,不会持续出砂。

(2)具有一定胶结强度的中等固结砂岩储层出砂量由孔眼周围岩石的力学特性及应力状态决定,流体的作用只是将产生的离散砂携带出孔眼,流速影响出砂速率,不影响最终的出砂量。

(3)中等固结砂岩出砂临界条件为岩石应力状态达到残余变形阶段,岩石出现明显剪切裂缝,裂缝面间由于相对滑移错动破坏裂缝面附近的颗粒胶结,形成可供产出的离散砂。

(4)中等固结砂岩产出砂中存在由多个颗粒聚集在一起的相对直径较大的颗粒,因此产出砂的粒度中值比组成岩石的原始地层砂大,在防砂参数设计优化时应考虑这一特点。

参考文献

- [1] 周建良,李敏,王平双. 油气田出砂预测方法[J]. 中国海上油气·工程, 1997, 9(4): 26-36. [ZHOU J, LI M, WANG P. Sanding prediction method of oil & gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 1997, 9 (4): 26-35]
- [2] 王玉纯,顾宏伟,张晓芳. 油层出砂机理与防砂方法综述[J]. 特种油气藏, 1998, 5(4): 63-66. [WANG Y, GU H, ZHANG X. Review of sanding mechanism and sand proof method [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 1998, 5(4): 63-66.]
- [3] 范兴沃,李相方,关文龙,等. 国内外出砂机理研究现状综述[J]. 钻采工艺, 2004, 27(3): 57-58. [FAN X, LI X, GUAN W, et al. Research on sand production mechanism at home and abroad [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27(3): 57-58.]
- [4] HEILAND J C, FLOR M E. Influence of rock failure characteristics on sanding behavior: Analysis of reservoir sandstones from the Norwegian Sea [C]. SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control, 2006.
- [5] 闫新江,曹砚锋,刘书杰,等. 海上中等强度砂岩出砂预测研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2019, 16 (4): 44-48. [YAN X, CAO Y, LIU S, et al. Sand prediction of medium strength sandstones in offshore oilfields [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2019, 16 (4): 44-48.]
- [6] 吴军,李广军,丁万成,等. 克拉玛依浅层稠油藏出砂规律及防砂技术[J]. 钻采工艺, 2004, 27(4): 56-58. [WU J, LI G, DING W, et al. Sand law and sand control technique of shallow heavy oil reservoir in kelamayi oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2004, 27 (4): 56-58.]
- [7] 刘铁岭,沈和平. 稠油油藏热采井出砂机理模拟实验研究[J]. 江汉石油学院学报, 2004, 26 (3): 83-84. [LIU T, SHEN H. Experimental research on sanding of thermal recovery heavy oil reservoirs [J]. Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2004, 26 (3): 83-84.]
- [8] 吕广忠,张建乔,孙业恒. 疏松砂岩油藏出砂机理物理模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(3): 67-73. [LV G,

- ZHANG J, SUN Y. Physical simulation of sanding production mechanisms in unconsolidated sandstone reservoirs [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2005, 13(3): 67–73.]
- [9] 董长银, 闫切海, 周博, 等. 弱胶结储层微观出砂形态与出砂机理可视化实验模拟研究 [J]. *石油钻采工艺*, 2020, 42 (2): 227–235. [DONG C, YAN Q, ZHOU B, et al. Visual experimental simulation on microscopic sand production morphologies and mechanisms in weakly consolidated reservoirs [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(2): 227–235.]
- [10] 李萍, 邓金根, 王利华, 等. 疏松砂岩出砂临界流量试验研究 [J]. *断块油气田*, 2010, 17 (6): 748–750. [LI P, DENG J, WANG L, et al. Experimental study on sand production critical flow rate for unconsolidated sandstone [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2010, 17 (6): 748–750.]
- [11] 邓金根, 王利华, 李萍, 等. 中等胶结储层气井出砂临界流量实验测试技术 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 33 (3): 178–182. [DENG J, WANG L, LI P, et al. The sand production critical flow test technology of gas well in moderate cemented formation [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2011, 33 (3): 178–182.]
- [12] 林日亿, 李兆敏, 陆杏英, 等. 稠油热采出砂机制试验研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35 (4): 123–128. [LIN R, LI Z, LU X, et al. Experimental study on sand production mechanism of heavy oil thermal recovery [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35 (4): 123–128.]
- [13] BRATLI R K, RISNES R. Stability and failure of sand arches [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1981, 21 (2): 236–248.
- [14] RISNES R, BRATLI R K, HORSRUD P. Sand stresses around a wellbore [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1982, 22 (6): 883–898.
- [15] WEINGARTEN J, PERKINS T. Prediction of sand production in gas wells: Methods and Gulf of Mexico case studies [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1995, 47 (7): 596–600.
- [16] MORITA N. Field and laboratory verification of sand-production prediction models [J]. *SPE Drilling & Completion*, 1994, 9 (4): 227–235.
- [17] TRONVOLL J, FJAER E. Experimental study of sand production from perforation cavities [J]. *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts*, 1994, 31(5): 393–410.
- [18] ANTHEUNIS D, VRIEZEN P, SCHIPPER B, et al. Perforation collapse: Failure of perforated friable sandstones [C]. *SPE European Spring Meeting*, 1976.
- [19] MORITA N, WHITFILL D, FEDDE O, et al. Parametric study of sand-production prediction: Analytical approach [J]. *SPE Production Engineering*, 1989, 4 (01): 25–33.
- [20] 王伟庆, 邹丽萍, 郭津. 疏松砂岩储层出砂机理和保护措施——以太平油田和尚店油田为例 [J]. *油气地质与采收率* [J], 2003, 10 (3): 69–73. [WANG W, ZOU L, GUO J. Mechanism and production in loose sandstone reservoirs-Taking Taiping and Shangdian oilfield as examples [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2003, 10 (3): 69–73.]
- [21] YI X, VALKÓ P, RUSSELL J. Effect of rock strength criterion on the predicted onset of sand production [J]. *International Journal of Geomechanics*, 2005, 5 (1): 66–73.
- [22] 王德新, 侯明勋. 油层出砂预测模型研究 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2000, 24 (5): 17–19. [WANG D, HOU M. Study on prediction model for sand production in oil reservoir [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2000, 24 (5): 17–19.]
- [23] VEEKEN C, DAVIES D, KENTER C, et al. Sand production prediction review: Developing an integrated approach [C]. *SPE annual technical conference and exhibition*, 1991.
- [24] WILLSON S, MOSCHOVIDIS Z, CAMERON J, et al. New model for predicting the rate of sand production [C]. *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, 2002.
- [25] VAZIRI H, XIAO Y, PALMER I. Assessment of several sand prediction models with particular reference to HPHT wells [C]. *SPE/ISRM Rock Mechanics Conference*, 2002.
- [26] PAPAMICHOS E, VARDOULAKIS I, TRONVOLL J, et al. Volumetric sand production model and experiment [J]. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 2001, 25 (8): 789–808.
- [27] PAPAMICHOS E, VARDOULAKIS I. Sand erosion with a porosity diffusion law [J]. *Computers and Geotechnics*, 2005, 32 (1): 47–58.
- [28] PAPAMICHOS E. Erosion and multiphase flow in porous media: Application to sand production [J]. *European journal of environmental and civil engineering*, 2010, 14 (8–9): 1129–1154.