

基于数值模拟的储层岩石力学参数 预测模型分析及应用

牛贯非¹,李连崇¹,李明²,张潦源²,李爱山²

(1.大连理工大学 土木工程学院,辽宁 大连 116024; 2.中国石化胜利油田分公司 石油工程技术研究院,山东 东营 257000)

摘要:由于储层钻孔采样所获取的实际岩心数量有限,导致室内物理力学试验结果具有较大离散性,难以准确地标定储层岩石力学参数。为此,应用数值模拟方法,根据某油田取心样品的物理力学试验结果以及测井资料中不同埋深储层岩石的孔隙度,利用有限元分析软件RFPA^{2D}建立相应的数值模拟岩心,进而对不同孔隙度数值模拟岩心的弹性模量、应力峰值强度、残余应力强度及泊松比等岩石力学参数进行数值分析。将物理力学试验结果与数值模拟结果进行整体回归分析,得到以孔隙度为主变量的岩石力学参数预测模型。基于该预测模型,建立某油田储层三维水力压裂模型,探讨三维水力压裂裂缝的扩展形态,并将数值模拟试验与现场施工的压裂曲线进行对比,发现二者的压裂压力在变化趋势上基本一致,且压裂段的起裂压力与延伸压力相差也较小,验证了研究成果及方法的合理性和适用性。

关键词:数值模拟岩心 物理岩心 孔隙度 力学参数 回归分析 水力压裂

中图分类号:TE319

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2017)02-0073-07

Analysis and application on prediction model of reservoir rock mechanical parameters based on numerical simulation

Niu Guanfei¹, Li Lianchong¹, Li Ming², Zhang Liaoyuan², Li Aishan²

(1.School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian City, Liaoning Province, 116024, China; 2.Petroleum Engineering Technology Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

Abstract: The limited number of natural cores obtained by drilling and sampling results in great discreteness in experiment results of indoor physical and mechanical tests. Reservoir rock mechanical parameters are hard to be determined accurately. Therefore, according to physical mechanical experiment results of cores and reservoir porosity at various burial depths interpreted by logging data in certain oilfield, a finite element analysis software RFPA^{2D} was applied to build corresponding numerical simulation cores using numerical simulation method. The Young's modulus, stress peak strength, residual stress strength, Poisson's ratio and other rock mechanical parameters of cores with different porosities were analyzed. Regression analysis was done on the physical and mechanical experiment result and numerical simulation results. A prediction model was built with porosity as the main variable. Based on the prediction model, three-dimensional hydraulic fracturing model of the reservoir in certain oilfield was built and the configurations of the features were discussed. The fracturing curves predicted by the numerical simulation and those from the field operation were compared. It is shown that there is a good agreement between the simulation result of fracturing pressure and the actual one and there are few differences between the two in initiation pressure and propagation pressure of the fractured interval. The results and the method are rational and available.

Key words: numerical simulation core; physical core; porosity; mechanical parameter; regression analysis; hydraulic frac-

收稿日期:2016-12-12。

作者简介:牛贯非(1988—),男,河南平顶山人,在读硕士研究生,从事岩土工程数值模拟及水力压裂技术应用方面的研究。联系电话:13387868597, E-mail:dut2016ryan@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“软硬间互地层水力压裂裂缝三维延伸机理研究”(51479024),安徽省科技攻关计划项目“煤矿动力灾害事故智能预警防控技术与示范”(1604a0802109)。

turing

作为一种复杂的地质材料,岩石是非均质、不连续的多相复合体,内部发育大量不规则、跨尺度的孔隙,这些孔隙又可能被其他物质所充填,结构组成复杂,从而影响岩石材料的强度、弹性模量、泊松比、渗透性及储层产能等物理力学性质^[1-4]。准确认识和定量刻画岩石类材料的孔隙与岩石力学参数的关系及其演化特征,对于解决石油、采矿、冶金、土木和水力工程中的实际问题具有十分重要的意义。

中外学者对此已经进行了大量的研究,并取得了许多成果。刘晓丽等利用岩土工程分析软件GeoCAAS研究单轴压缩条件下岩石中孔隙缺陷的演化规律及其对岩石宏观力学强度的影响,初步探究了含多个随机缺陷岩石中缺陷体积含量与岩石强度的关系,并通过室内物理力学试验对其进行验证^[5]。邵维志等利用核磁共振测井技术描述储层岩石的孔隙半径,并且根据岩石压汞实验中的孔隙分布特征,参考实验室毛细管压力测量孔隙半径分级方法,研究储层岩石不同分级孔隙度与渗透率的关系^[6]。Li等总结出已有的多孔介质材料单轴强度与孔隙度的关系,在此基础上进行演绎和推广,得出单轴强度与孔隙度的关系式,并应用于陶瓷与混凝土等材料^[7]。Chen等基于Ryshkewitch, Schiller, Balshin和Hasselman提出的孔隙度—强度关系模型,讨论该理论模型的适用性,并利用水泥砂浆试件进行抗压强度、弯拉强度及劈拉强度试验来研究孔隙度与水泥砂浆试件力学性质之间的关系^[8]。Lian等对已有的关于多孔混凝土材料中孔隙度与混凝土强度的关系式进行论述,再由格里菲斯理论推导出一种新的数学模型来描述孔隙度与混凝土强度之间的关系,其研究成果与物理力学试验结果具有较好的一致性^[9]。Nambiar等也分别对泡沫混凝土和铝酸钙水泥浆材料中孔隙度与岩石强度的关系进行了研究^[10-11]。目前,对岩石类材料中孔隙与岩石力学性质的定量分析主要针对孔隙度与岩石强度的量化关系,与其他岩石力学参数的相关性研究却较少。为此,在前人研究成果的基础上,基于某油田取心样品的室内物理力学试验结果,利用有限元分析软件RFPA^{2D}建立不同孔隙度的数值模拟岩心,对其弹性模量、应力峰值强度、残余应力强度及泊松比等岩石力学参数进行数值分析,从细观力学角度对孔隙度与储层岩石力学参数之间的相关性进行较为全面地研究,以期对研究区进一步精细

分层压裂改造设计及注水技术研究奠定理论基础。

1 数值模拟岩心的建立及验证

储层岩石是一种典型的多孔介质,小范围的介质缺陷直接影响岩石的岩性和物性。岩石体本身所表现出来的非线性、非均质性、各向异性和非弹性也是其内部大量随机缺陷的聚集和扩展这一复杂过程的细观表征。对于孔隙介质的描述,迄今为止已有30多种描述参数^[12-13],其中应用最多的是孔隙的密度或体积百分数(孔隙度)、孔径及其分布、比表面积等,笔者采用孔隙度来刻画岩石内部存在的孔隙缺陷。在利用RFPA^{2D}软件建模时,在数值模拟岩心内部随机生成不同孔隙度的缺陷单元来表征真实的岩石材料,这些缺陷单元在数值模拟计算过程中作为破坏单元处理。

1.1 数值模拟岩心的建立

数值模拟岩心的建立是以物理岩心为标准。物理岩心来自某油田某油井埋深为3 139.6~3 219.3 m层段^[14]。受钻心扰动、原岩应力卸荷、天然孔隙和裂隙等因素影响,岩心取至地面后多呈碎块状。对碎块状岩心样品采取机械加工方式,加工成25 mm×50 mm的物理岩心。依据物理岩心将数值模拟岩心尺寸设定为25 mm×50 mm,网格划分为250×500,共计125 000个单元。数值模拟试验的加载方式为位移加载,加载至数值模拟岩心的应力达到峰值应力,然后下落至残余应力并稳定一段时间后停止。

为研究孔隙度对岩石力学参数的影响并探究孔隙度与岩石力学参数之间的关系,选取某油田6组孔隙度分别为0.1%,3%,6%,10%,13%和17%的岩心样品,建立数值模拟岩心并进行单轴压缩试验。6组不同孔隙度数值模拟岩心的弹性模量均为15 GPa,抗压强度为130 MPa,均质度为3,强度压拉比为10,内摩擦角为40°,泊松比和残余应力强度系数均为0.1。

研究结果^[15-16]表明,深层砂岩油藏储层岩石的平均孔隙半径大致为6~80 μm,结合数值模拟试算结果,确定数值模拟岩心随机生成孔隙的平均半径为50 μm。

需说明的是,将三维物理岩心等效简化为二维数值模拟岩心来研究储层岩石孔隙度与岩石力学参数的关系,这种研究方法是否合理,还需加以验证。

1.2 数值模拟岩心的验证

为验证已建立的数值模拟岩心,根据取心样品的物理力学试验结果设计如下试验方案。首先,对物理岩心的物理力学试验数据进行整合分析。然后,根据分析结果选取5组具有代表性的孔隙度分别为0.1%、6%、9%、13%和17%的物理岩心建立相应的数值模拟岩心;这5组物理岩心的应力峰值强度分别为108、85、72、63和65 MPa;弹性模量分别为15.14、14.13、13.35、12.39和11.32 GPa。对5组数值

模拟岩心进行数值模拟试验,得到相应孔隙度数值模拟岩心的应力峰值强度和弹性模量,并与物理力学试验结果进行对比。结果(图1)表明,5组不同孔隙度物理岩心与数值模拟岩心的应力峰值强度和弹性模量的偏差均很小,变化趋势也具有较高的一致性。因此,根据不同埋深储层岩石孔隙度建立的数值模拟岩心与物理岩心是等效的,通过数值模拟试验研究孔隙度与储层岩石力学参数之间的表征关系也是可行的。

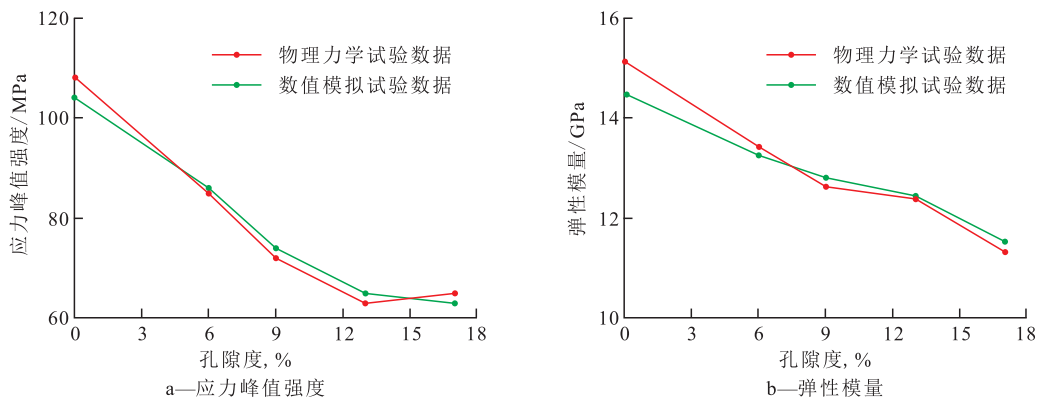


图1 物理岩心和数值模拟岩心的应力峰值强度和弹性模量对比

Fig.1 Comparison between plots of peak strength & Young's modulus vs. porosities of numerical simulation cores and physical cores

2 数值模拟试验结果分析

在研究岩石的物理力学特性方面,有限元分析软件RFPA^{2D}与其他数值分析软件相比具有明显的优势。该软件能够模拟岩石类脆性材料在应力作用下,细观尺度单元从破裂到裂缝萌生、扩展以及宏观破裂的整个过程,还可以获取岩石破裂过程中的应力—应变信息,得出相应的应力场和变形场的整个演化过程以及破裂过程中声发射的时空分布情况。

由孔隙度分别为0.1%、3%、6%、10%、13%和17%的数值模拟岩心的应力—应变曲线(图2)可以看出,随着孔隙度的增大,数值模拟岩心的应力峰值强度及对应的应变均逐渐降低,说明孔隙度越高,数值模拟岩心内部的孔隙数目越多,抗压性能也就越差,在较低荷载作用下即会有部分单元达到屈服强度而产生破裂,从而影响岩石的承载能力,且数值模拟岩心的破坏表现出一定的延性特征。而当孔隙度较低时,数值模拟岩心内部的孔隙较少,裂缝延伸能力弱,声发射能量容易积聚,数值模拟岩心的破坏表现出脆性特征。

以孔隙度为6%的数值模拟岩心为例,讨论破裂过程的最小主应力分布情况。由该数值模拟岩

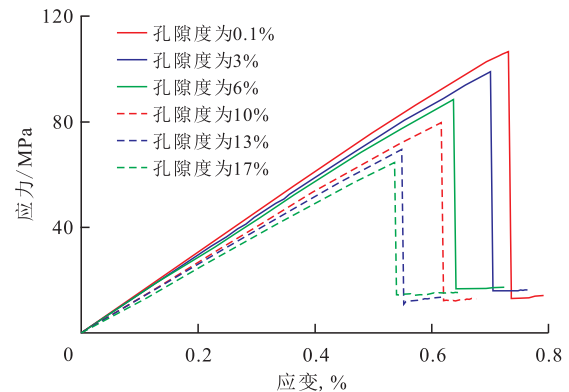


图2 不同孔隙度数值模拟岩心的应力—应变曲线

Fig.2 Stress and strain curves of six numerical simulation cores with different porosities

心破裂过程中的最小主应力分布特征(图3)可以看出,起初岩心的破裂不很明显,仅有很少部位出现裂纹萌生(图3a)。在第162步时,在岩心的顶部和右侧中下部接近表面的位置出现明显的裂纹扩展,并呈现相对贯通,裂纹尖端亮度也较高,说明该部分应力比较集中(图3b)。在第165步时,断续的破裂从2个部位不断扩展且已经接近连通,形成宏观裂缝(图3c)。在第168步时,裂缝连通,且顶部起裂处的裂缝出现分叉,形成宏观大型破裂(图3d)。最终岩心整体失稳破坏并完全失去承载能力,对应应力—应变曲线中最大的1次压力降。该数值模拟岩心的破坏模式及应力峰值强度与物理力学试验的

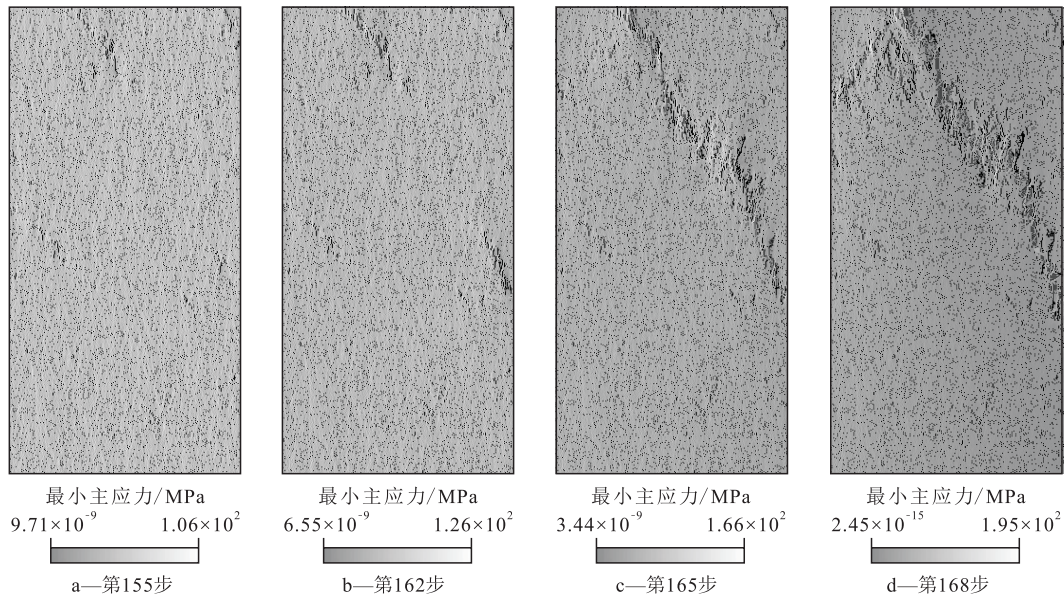


图3 孔隙度为6%的数值模拟岩心破裂过程中的最小主应力分布特征

Fig.3 Minimum principal stress distribution features in the failure process of numerical simulation core with 6% porosity

结果非常吻合。

3 储层岩石力学参数预测模型分析

由于研究区的取心井较少,岩心资料分散,导致物理力学试验中有效的取心样品数量偏少,试验数据离散性较大。因此,分析数值模拟试验和物理

力学试验数据时,将相关性较弱或离散性较大的数据剔除,然后对所有试验数据进行整体回归分析,得到以孔隙度为主变量的储层岩石力学参数预测模型,再利用测井资料中不同埋深储层的孔隙度来准确标定相应层位的岩石力学参数。

由储层岩石力学参数预测模型(图4)可以看出,随着孔隙度增大,岩石的应力峰值强度和弹性

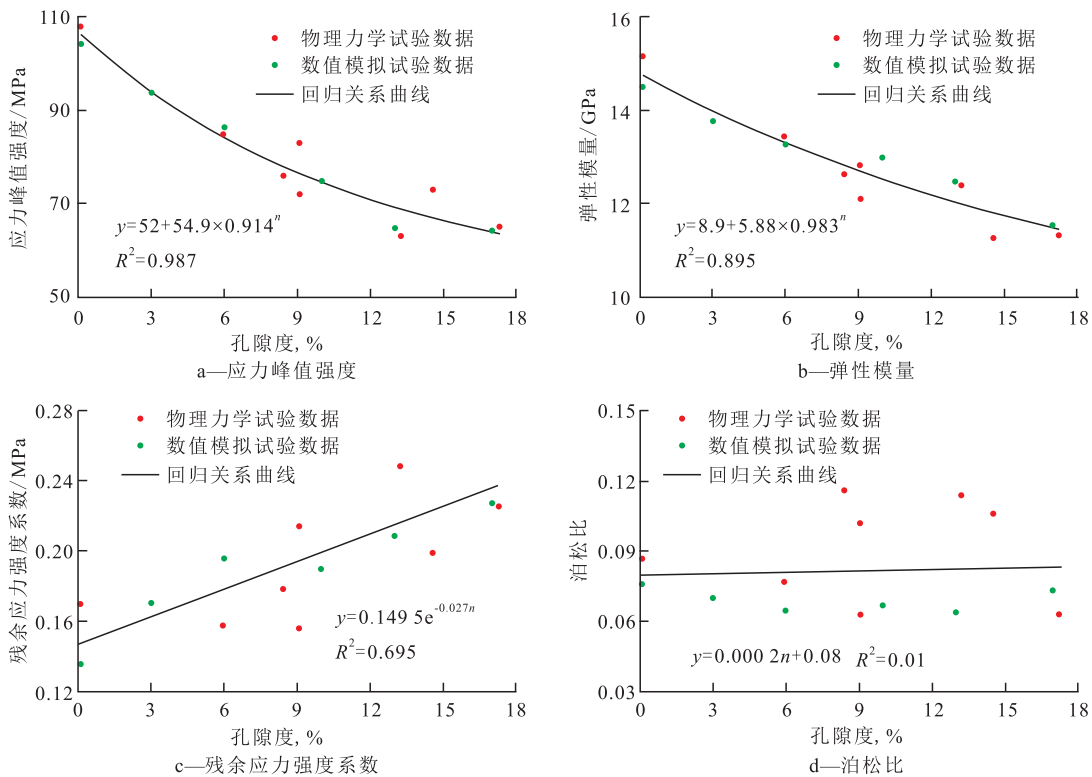


图4 储层岩石力学参数预测模型

Fig.4 Prediction model of reservoir rock mechanical parameters

模量均呈衰减趋势(图4a,4b),表明孔隙度对岩石的应力峰值强度具有很大的弱化作用。岩石的残余应力强度系数随孔隙度增大呈逐渐上升趋势,表明孔隙度越大,所表现出的塑性越明显(图4c),而泊松比与孔隙度并没有很明显的相关性,二者回归关系曲线的相关性也较差(图4d)。

4 工程应用

储层岩石力学参数的准确度是决定水力压裂模型质量的关键,也是决定水力压裂数值模拟试验成败的关键。为验证建立的岩石力学参数预测模型的适用性,根据研究区某油田的测井资料分析得到不同埋深储层岩石的平均孔隙度,代入岩石力学参数预测模型以标定相应埋深储层岩石的力学参数,进而对研究区储层进行精细建模,建立完整的水力压裂模型以进行数值模拟试验。

4.1 水力压裂模型的建立

水力压裂模型的尺寸为150 m×60 m×60 m,剖分为 5.4×10^5 个六面体等参元(图5)。其中,直井井眼位置与模型中轴线重合,①和⑨层分别为盖层和底层,厚度分别为19和20 m。②,④,⑥和⑧层分别对应实际地层电测解释的26,27,28和29号油层,厚度分别为2,8,2和4 m。③,⑤和⑦层为中间隔层,厚度分别为2,2和1 m。研究区发育典型的滩坝

砂岩薄互层油藏,隔层的厚度均较薄,压裂段高度为19 m。模型中岩体承受自重应力,边界条件取为底端竖向约束,X和Y方向施加的水平应力分别为81和65 MPa,顶端Z方向施加垂直方向的地应力,为72 MPa。模型设置符合水力压裂一般性假设,直井井筒方向与其中1个主应力方向一致,注入水压作用于封闭加压段的井眼内壁。

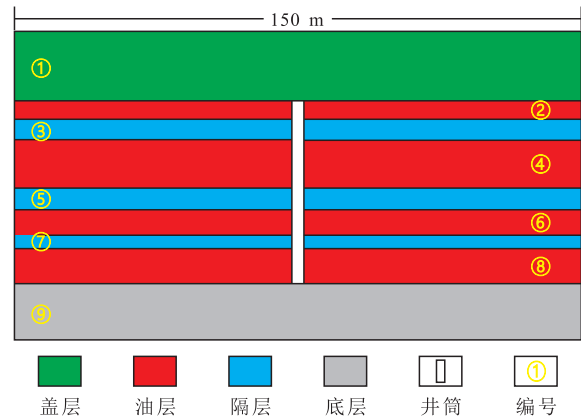


图5 水力压裂模型示意

Fig.5 Hydraulic fracturing model

依据研究区某油田的测井资料可以得到不同埋深储层岩石的平均孔隙度^[14],代入岩石力学参数预测模型即可确定相应埋深储层岩石的弹性模量、抗压强度、残余应力强度系数及泊松比,其他岩石力学参数根据物理力学试验结果选取。水力压裂模型的岩石力学参数见表1。

表1 水力压裂模型的岩石力学参数

Table1 Rock mechanical parameters for hydraulic fracturing model

编 号	弹性模量/GPa	抗压强度/MPa	强度压拉比	内摩擦角/(°)	泊松比	重度/(kN·m ⁻³)	残余应力强度系数	储水系数/(10 ⁻⁸ m ⁻¹)	渗透系数/(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	孔隙压力系数
①,⑨	15.00	130	10	40	0.1	26	0.15	0.09	4.96	0.95
③,⑤,⑦	14.52	106	10	40	0.1	26	0.15	0.09	4.96	0.95
②	13.29	64	20	40	0.1	24	0.10	190	14	0.95
④	13.52	68	20	40	0.1	24	0.10	180	12.1	0.95
⑥	13.44	66	20	40	0.1	24	0.10	95	12.6	0.95
⑧	13.36	65	20	40	0.1	24	0.10	150	13	0.95

4.2 应用效果分析

由不同压裂时间的水力压裂裂缝扩展形态(图6)可以看出,水力压裂模型的盖层和底层几乎未发生破坏,裂缝主要集中于压裂段地层。在初期注水阶段,井眼周围有明显的注入水压力场变化,随着注入水压力的增大,压裂液在地层中稳步扩展。由于压裂段属于低渗透地层,注入水压力始终随着裂缝进行传递,虽然不同生产层的裂缝扩展速度有所差别,但产生的裂缝均较平整、规则,无偏转、扭转现象。

由不同压裂时间水力压裂裂缝扩展过程的声发射空间分布(图7)可以看出,每1个球代表1次声发射,其中球的半径代表声发射释放能量的大小。在压裂初期,注入水压力不断上升,并在井筒周围不断渗透;第25步时,27号油层中的岩石开始发生破坏,其他油层和隔层没有明显变化(图7a);第28步时,27和29号油层开始形成水力压裂裂缝,26和28号油层也出现少量破坏单元,但油层之间的隔层均无明显破裂现象(图7b);至第34步时,水平最大主应力方向的裂缝扩展速度较快,水力压裂裂缝延

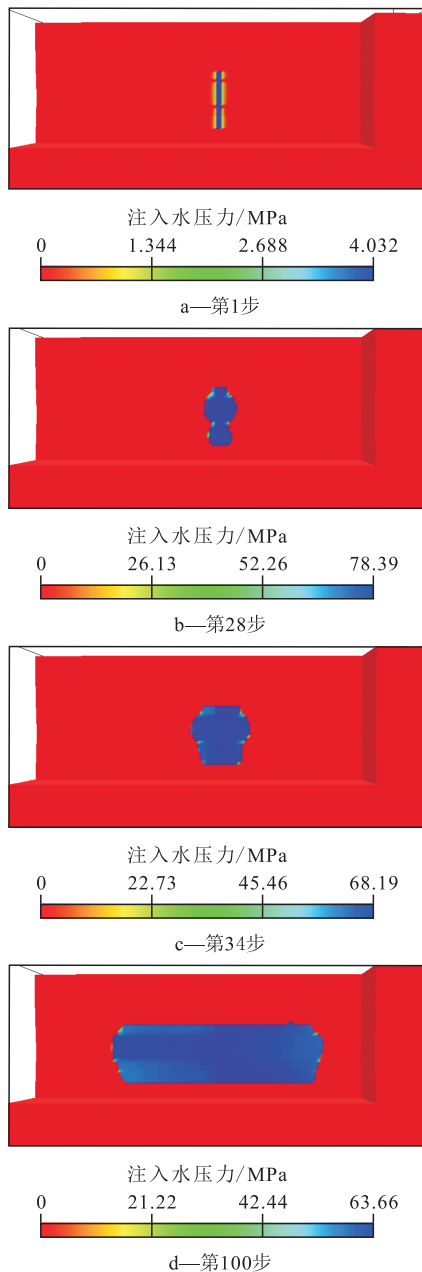


图6 不同压裂时间的水力压裂裂缝扩展形态

Fig.6 Configuration of hydraulic fracture at different fracturing times

伸长度达到一定距离后,该方向的裂缝扩展速度变缓,沿裂缝高度方向扩展明显,发生窜层,油层之间的隔层被大量破坏,压裂段油层和隔层逐渐连通(图7c);其主要原因为:虽然根据储层岩石力学参数预测模型计算得到的隔层与油层的岩石力学参数的差异较大,但总体上隔层较薄,阻隔能力差,薄隔层在上、下油层压裂裂缝的联合拉伸作用下,较易被完全拉开。随着压裂液的不注入,不同地层的裂缝在长度方向上持续延伸,延伸速度基本保持同步,裂缝高度基本控制在其上、下地层之间;在延伸方向上,水力压裂裂缝始终呈对称双翼形态扩展,成缝效果较好(图7d)。

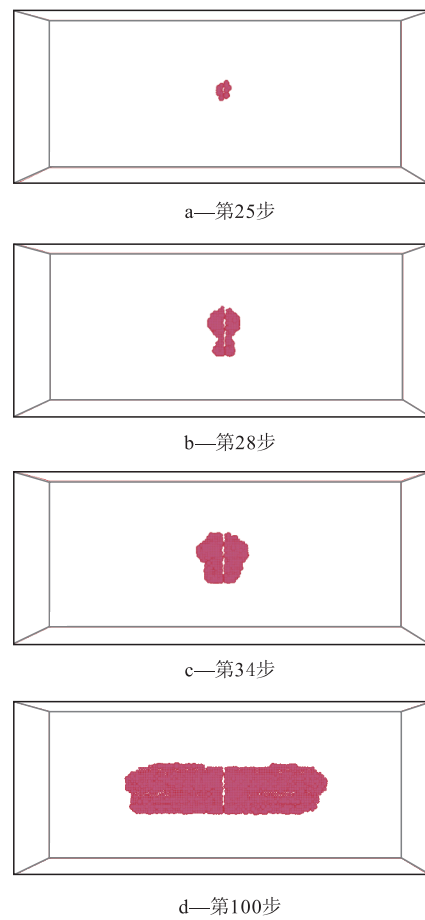


图7 不同压裂时间水力压裂裂缝扩展过程中的声发射空间分布

Fig.7 Spatial distribution of acoustic emission during fracture extension by hydraulic fracturing at different fracturing times

对比水力压裂模型数值模拟试验与现场施工的压裂曲线(图8)可以看出,二者的压裂压力在变化趋势上基本保持一致,且压裂段的起裂压力与延伸压力相差也较小。表明由储层岩石力学参数预测模型计算各地层岩石的力学参数并建立水力压裂模型进行数值模拟的研究方法及成果是合理且

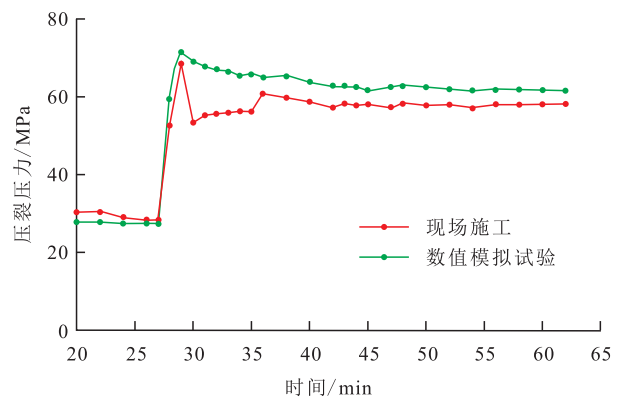


图8 水力压裂模型数值模拟试验与现场施工的压裂曲线对比

Fig.8 Comparison between fracturing curves of numerical test and on-site construction

适用的。

5 结论

综合利用物理岩心的物理力学试验结果、数值模拟岩心的数值模拟试验结果以及地质、测井等资料,建立基于数值模拟的储层岩石力学参数预测模型,进而根据测井资料中不同埋深储层的孔隙度来标定相应的岩石力学参数。建立的储层岩石力学参数预测模型以储层岩石的孔隙度为主变量,较为全面地分析了弹性模量、应力峰值强度、残余应力强度及泊松比等岩石力学参数,可以为进一步精细分层压裂改造设计和注水技术研究奠定理论基础和实践依据。将建立的储层岩石力学参数预测模型应用于工程实例,建立完整的三维水力压裂模型,初步探讨研究区储层水力压裂裂缝的扩展形态,并对比分析水力压裂模型数值模拟试验与现场施工的压裂曲线,发现二者压裂压力的变化趋势基本一致,且压裂段的起裂压力与延伸压力相差也较小,验证了该研究成果及方法的合理性和适用性。

参考文献:

- [1] 王蓬,王艳忠,操应长,等.东营凹陷盐家地区沙四段上亚段砂砾岩体岩石结构特征[J].油气地质与采收率,2015,22(3):34-41.
Wang Peng, Wang Yanzhong, Cao Yingchang, et al. Rock texture characteristics of sandy conglomerate in the upper fourth member of Shahejie Formation in Yanjia area, Dongying sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(3): 34-41.
- [2] 贺美邦,游俊,高凤英,等.岩石沉积学特征与岩石弹性参数的关系[J].油气地质与采收率,2016,23(1):61-67.
He Fubang, You Jun, Gao Fengying, et al. Relationship between rock sedimentary feature and its elastic parameters[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 61-67.
- [3] 刘书会,王长江,罗红梅,等.泥页岩岩石物理参数测试与分析[J].油气地质与采收率,2016,23(6):16-21.
Liu Shuhui, Wang Changjiang, Luo Hongmei, et al. Research on measurement and analysis of shale rock physical parameters[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 16-21.
- [4] 蒋裕强,刁昱翔,王猛,等.川西南部须二段储层岩石学特征对孔隙发育的影响[J].大庆石油地质与开发,2015,34(2):48-53.
Jiang Yuqiang, Diao Yuxiang, Wang Meng, et al. Influences of the petrologic characteristics on the pore development for Member Xu-2 reservoirs in the south of West Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(2): 48-53.
- [5] 刘晓丽,王思敬,王恩志,等.单轴压缩岩石中缺陷的演化规律及岩石强度[J].岩石力学与工程学报,2008,27(6):1195-1201.
Liu Xiaoli, Wang Sijing, Wang Enzhi, et al. Evolutionary rules of flaws in rock subjected to uniaxial compression and rock strength [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(6): 1195-1201.
- [6] 邵维志,解经宇,迟秀荣,等.低孔隙度低渗透率岩石孔隙度与渗透率关系研究[J].测井技术,2013,37(2):149-153.
Shao Weizhi, Xie Jingyu, Chi Xiurong, et al. On the relation of porosity and permeability in low porosity and low permeability rock [J]. Well Logging Technology, 2013, 37(2): 149-153.
- [7] Li L, Aubertin M. A general relationship between porosity and uniaxial strength of engineering materials [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 30(4): 644-658.
- [8] Chen Xudong, Wu Shengxing, Zhou Jikai. Influence of porosity on compressive and tensile strength of cement mortar [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40(1): 869-874.
- [9] Lian C, Zhuge Y, Beecham S. The relationship between porosity and strength for porous concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(11): 4294-4298.
- [10] Namibiar E K K, Ramamurthy K. Models for strength prediction of foam concrete [J]. Materials and Structures, 2008, 41(2): 247-254.
- [11] Matusinovic T, Sipusic J, Vrbos N. Porosity-strength relation in calcium aluminate cement pastes [J]. Cement and Concrete Research, 2003, 33(11): 1801-1806.
- [12] 刘培生.多孔材料引论[M].北京:清华大学出版社,2004.
Liu Peisheng. Introduction to porous materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [13] Boer R. Reflections on the development of the theory of porous media [J]. Applied Mechanics Reviews, 2003, 56(6): 27-42.
- [14] 李连崇,李天娇,牛贯非,等.基于大尺度数值岩心的压裂裂缝模拟测试研究报告[R].大连:大连理工大学,2015.
Li Lianchong, Li Tianjiao, Niu Guanfei, et al. Research report on numerical tests of hydraulic fracture based on large-scale numerical cores [R]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [15] 郝振宪,付晓燕,肖曾利.深层砂岩油藏注水开发储层孔隙结构变化规律[J].地球物理学进展,2013,28(5):2597-2604.
Hao Zhenxian, Fu Xiaoyan, Xiao Zengli. Law of pore structure variety in deep section sandstone reservoir during waterflooding development [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(5): 2597-2604.
- [16] 曹涛涛,宋之光,刘光祥,等.氮气吸附法—压汞法分析页岩孔隙、分形特征及其影响因素[J].油气地质与采收率,2016,23(2):1-8.
Cao Taotao, Song Zhiguang, Liu Guangxiang, et al. Characteristics of shale pores, fractal dimension and their controlling factors determined by nitrogen adsorption and mercury injection methods [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 1-8.

编辑 邹澍滢