

水泥环孕育机理及其压裂工况下密封力学分析

张承武^{1,2}, 武月荣^{1,2}, 王坤^{1,2}

1. 中国石油川庆钻探工程有限公司工程技术研究院 陕西西安 710018

2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室 陕西西安 710018

通讯作者: Email: sxzcw@126.com

项目支持: 中国石油集团科研项目“集团公司侧钻井技术示范与推广”(2019D-4209)

引用: 张承武, 武月荣, 王坤. 水泥环孕育机理及其压裂工况下密封力学分析[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 6-13.

Cite: ZHANG Chengwu, WU Yuerong, WANG Kun. Cement ring gestation mechanism and seal mechanical analysis with fracturing conditions[J]. Well Testing, 2024, 33(1): 6-13.

摘要 在油气井压裂过程中, 压裂液的高压和降温作用存在破坏水泥环密封性的风险, 对于多级压裂或者重复压裂, 井筒压力和温度的交替作用加剧了水泥环的破坏, 影响多级压裂的效果。研究了水泥环的孕育机理, 利用有限元软件对套管—水泥环—地层系统进行了全尺寸等效建模和力学仿真, 对多级压裂水泥环的变形和破坏规律进行了定量分析。结果表明, 井下水泥环的先环境压力不同于养护压力, 应当归属于水泥环的材料属性; 压裂时水泥环表现为环向拉应力破坏, 且内侧比外侧更容易破坏; 压裂停泵时, 水泥环残余变形导致一界面产生剥离应力, 如果剥离应力大于一界面的粘结强度, 一界面将出现剥离破坏; 提高水泥石的抗拉强度和降低弹性模量可提升水泥环的密封性能。该分析为油气井水泥材料的研究提出改进方向, 为多级压裂的参数优化提供参考。

关键词 水泥环; 密封性; 孕育机理; 多级压裂; 全尺寸建模; 力学分析; 剥离应力; 完整性分析

中图分类号: TE357 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.002

Cement ring gestation mechanism and seal mechanical analysis with fracturing conditions

ZHANG Chengwu^{1,2}, WU Yuerong^{1,2}, WANG Kun^{1,2}

1. Technology & Engineering Research Institute CCDC, Xi'an Shaanxi 710018, China

2. National Engineering Laboratory of Low-Permeability Oil & Gas Fields Exploration and Development, Xi'an Shaanxi 710018, China

Abstract: High pressure and cooling of fracturing fluid produce the risk of destroying the sealability of cement sheath in the process of oil and gas well fracturing. Alternating effect of casing pressure and temperature exacerbates the destruction of cement sheath for multi-stage fracturing or refracturing. It will affect the effect of multistage fracturing. It studied the gestation mechanism of cement sheath, and the full-scale equivalent modeling and mechanical simulation of the casing-cement sheath-formation system are carried out by the finite element software. It quantitatively analyzed the deformation and failure rules of multistage fracturing cement ring. The results show that the inborn environmental pressure of downhole cement sheath is different from maintenance pressure, that should be attributed to material properties of cement sheath; during fracturing, the cement sheath exhibits hoop tensile stress failure, and the inside is easier to break than the outside; when fracturing stops, the residual deformation of cement sheath causes peeling stress at the first interface, if the peel stress is greater than the bond strength of the first interface, the first interface will be stripped; increasing tensile strength and reducing elastic modulus can improve sealability of cement sheath. This analysis provides the improvement direction for the research of cement materials in oil and gas wells and provides reference for parameter optimization of multistage fracturing.

Keywords: cement sheath; sealability; inoculation mechanism; multistage fracturing; full-size modeling; mechanical analysis; peel stress; integrity analysis

压裂是低渗油气藏开发的必需手段, 对于致密油气藏、煤层气、页岩气等非常规油气资源, 多级压裂是油气田高效开发的主要途径^[1]。但是, 压裂时层间串通和生产过程环空带压等迹象表明, 水泥环

的密封性可能被破坏。水泥环失封会影响多级压裂效果。因此, 很多学者开展了压裂工况下水泥环的密封性研究。目前, 国内外水泥环研究主要体现在力学理论的数学建模、物模实验和有限元仿真方

面^[2-3]。这些研究对分析套管—水泥环—围岩系统的变形特性和水泥环的破坏机理具有较好的参考价值,但国内外学者或者用外层套管代替围岩^[4],或者用固定的围压代替围岩约束^[5],没有真实模拟井下的实际工况。本文通过分析水泥环孕育形成过程的材料特性和力学环境,应用有限元软件,模拟套管—水泥环—围岩全尺寸等效模型,还原井下水泥环孕育形成过程的力学效应,对多级压裂水泥环的变形和破坏规律进行了定量分析,从而为油气井水泥材料的研究提出改进方向,为多级压裂的参数优化提供参考。本文是研究压裂时水泥环的密封完整性,讨论对象是产层处的单层套管—水泥环—地层系统。

1 水泥环力学分析的几点说明

在水泥环力学分析之前需对相关的概念进行说明和界定。

1.1 养护压力与围压

井下水泥环从注水泥到候凝之后的整个孕育过程中,始终处在井下压力和井下温度环境中。钻井形成井眼的过程中,近井地层构造应力被破坏,地应力重新分布,井壁的应力是钻井泥浆的液柱压力。固井注水泥时井壁和套管外壁的压力是水泥浆的液柱压力^[6]。这是水泥环孕育之初的原始压力。在水泥候凝过程中,随着水泥水化的进行,由于水泥浆的不稳定沉降、高渗地层滤失桥堵、水化反应体积收缩、胶凝网架挂壁等因素,导致水泥出现失重现象,水泥环的环境压力会逐渐减小,甚至出现负压。水泥失重严重时可能导致水泥环出现微环隙或微裂缝,可采取井口憋压、膨胀水泥或弹性水泥等措施进行补偿^[7-8]。

水泥硬化定型之前的环境压力是水泥孕育过程施加的,属于先天环境压力。随着水化过程的进行,在失重因素影响下和失重补偿措施作用下,这个先天环境压力在不断变化,无法确定最终数值,所以不能用水泥浆的液柱压力模拟先天环境压力。水泥硬化之后的环境压力是水泥石定型之后施加的,属于后天环境压力,这个后天环境压力取决于残余的先天环境压力和后期的围岩蠕动,也无法确定最终数值,所以也不能用原始地层压力模拟后天环境压力。实验室制作水泥环时模拟井下水泥环硬化定型前所受的先天环境压力叫养护压力。制作好的水泥环测试力学性能时模拟井下水泥环硬

化定型后所受的后天环境压力叫围压。

实际井下水泥环的先天环境压力是从水泥浆状态就开始存在,且随着水化过程的进行而变化。实验室制作的水泥环,一般是在常压下进行水泥配浆,凝结成型后才施加养护压力^[9],这种半程养护压力与井下水泥环的全程先天环境压力是不同的。水泥的水化过程是一个凝胶颗粒和晶体颗粒从游离态到凝结态的演变过程。颗粒之间的水相也是从自由水到束缚水的演变过程。水泥水化是一个复杂的物理化学过程,微观粒子的结合方式比较复杂。不管颗粒之间的结合方式如何,颗粒之间的结合强度总是取决于颗粒之间的最大间隙(见图1)。

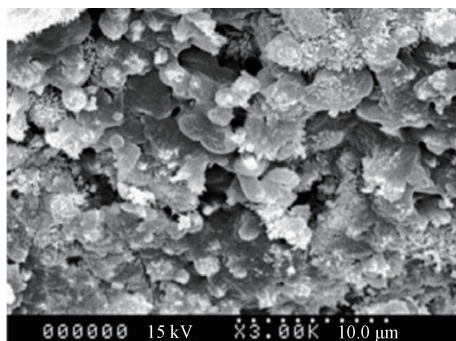


图1 水泥的微观结构

Fig.1 Microstructure of cement

实际固井过程中,水泥的环境压力从液浆状态就存在,在凝结之前颗粒呈游离态,压力充盈在颗粒周围,此压力对颗粒的作用是平衡的,不引起颗粒间距的改变,所以不增大颗粒间的结合力(见图2a)。如果水泥凝结后才施加养护压力(即半程养护),养护压力是机械外压,对水泥有压实作用,颗粒的间距减小,颗粒间的结合力增大,这种养护压力可以提高水泥石的胶结强度(见图2b)。

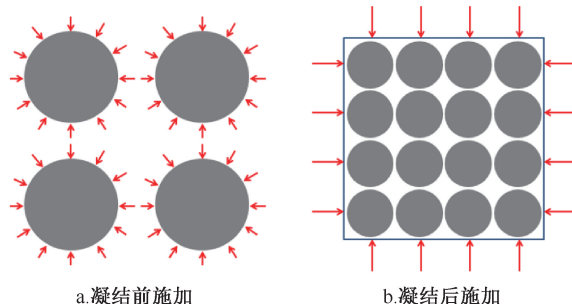


图2 养护压力作用效果

Fig.2 Effect of maintain pressure

先天环境压力对硬化定型后水泥环的畸变能没有影响,因此,井下水泥的原始压力对水泥环的强度影响不大,而实验室的半程养护压力对水泥石

强度有显著影响。因此,养护压力建议全程模拟井下水泥的压力。如前所述,这个养护压力很难取值(从液浆状态开始加载,随着水泥失重而减少,又随着失重补偿和地层蠕变而增加)。既然井下水泥的原始压力对水泥环的强度影响不大,半程养护压力又不能真实模拟井下水泥环的孕育环境,建议不考虑养护压力,因为硬化定型前的环境压力不管对水泥石的性能有无影响,都是水泥环孕育的先天条件,应该视作硬化后水泥石的材料属性,此时的环境压力无论如何,均视作硬化定型后水泥环力学分析的零压力基准^[10]。

压裂时井筒加载造成套管和水泥环鼓胀引起的地应力变化是主要围压载荷,这个地应力变化是地层对井筒压力的一个自适应作用,是一个变化值,称之为被动围压。而实验室水泥环力学测试所施加的围压大多简单地选取固定值,叫作主动围压,这是不科学的。

有些学者认为围压可显著提高水泥石的抗压强度^[11],这是有特定条件的,对于立方块水泥石,在三向压应力作用下,可以显著提高水泥石的抗压强度。实际水泥环所受的应力从环向、径向、轴向进行考量,三向应力并不全是压应力,在套管内压作用下,套管径向膨胀,引起水泥环和近井地层的径向外移,水泥环的径向产生压应力,环向产生拉应力,这时的抗压强度反而不及单轴抗压强度,抗拉强度也不及单轴抗拉强度^[12]。如图3所示,在某一套管内压作用下,考察Y轴主应力,则5435节点为拉应力(环向),3400节点为压应力(径向)。

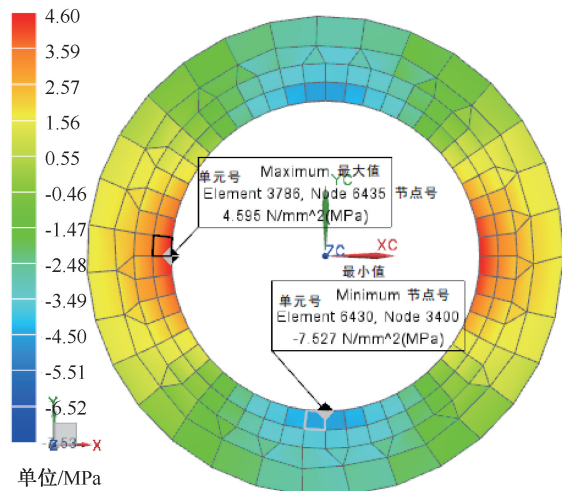


图3 某套压作用下水泥环的应力分布

Fig. 3 Cement sheath stress under a casing pressure

1.2 养护温度

实验室制作水泥环时模拟井下水泥环形成过程的环境温度叫水泥养护温度。井下水泥环的环境温度主要来源于井下的地层温度和水泥水化热。同理,水泥的养护温度也应该从液浆状态开始施加,也视作水泥环的材料属性。本文在进行水泥环受力分析时,环境温度只考虑因井筒作业引起的温度变化。压裂时套管内高速注入低温的工作液,水泥环的热量通过高导热的套管传导给低温的工作液,水泥环内外两侧形成较大的温度差,加上套管与水泥环、地层的导热速率和热膨胀率差别较大,从而产生温度应力^[13]。

1.3 假设条件

综上所述,本研究的基本条件假设如下:

(1)实际井下水泥的原始压力对水泥环的强度没有明显影响,可以选用无养护压力条件下制作的水泥石参数。

(2)水泥环力学分析时,取水泥环硬化定型时的环境压力为零基准压力,取终凝时套管—水泥—地层系统的环境温度为基准温度。

(3)自然状态下和井下压力下模型的结构尺寸略有差别^[14],但力学效应考察的是应力或应变,这个微小差别对系统的应变几乎没有影响,因为应变是模型尺寸的微小量(1%以内),模型尺寸的微小差别对应的应变是高阶小量,可以忽略。

(4)因为是针对水泥环的研究,套管的载荷只要不超出其弹性极限,只需考察套管载荷增量对系统的力学效应,因此,套管取自然状态参数。地层选取在原始地应力围压下实验得到的力学参数。

2 模型尺寸优化

为了选取合理的模型尺寸,下面对模型的尺寸进行优化。

2.1 模型构成

压裂时向套管内注入高压液体,经射孔炮眼穿过水泥环,进入地层,把地层压出裂缝。压裂载荷只作用于产层井段套管,产层以上套管一般被封隔器隔开,不承受高压。所以,本文研究的对象是产层附近的单层套管—水泥环—地层系统(地层为砂岩)。水泥环密封力学分析的目的就是确保水泥环对多级压裂的密封隔离。

以往的物模实验,地层围岩或者用钢管代替,或者用橡胶管代替,都与井下实际围岩相差甚远。

钢管刚性太大,弹性模量是地层的 10 倍以上,橡胶的刚性又太小,弹性模量不足地层的 1/10。也有少数采用水泥石代替围岩,水泥石和砂岩地层的弹性模量比较接近,但是模拟围岩的水泥环尺寸又不能制作太大,因此,仍不能充分反映井下实际情况。

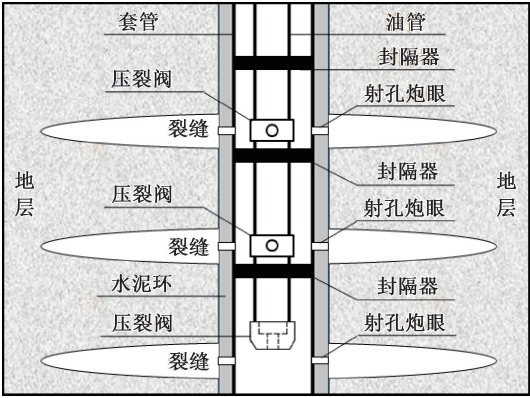


图 4 多级压裂示意图

Fig. 4 Multi stage fracturing diagram

也有学者也进行了有限元数值模拟研究,但模型参数都是既定的,没有见到模型参数优化过程。不管是数值模拟还是物模实验,完全模拟井下真实尺寸不太现实,为了使模拟结果更接近真实,本文对系统模型参数进行优化,达到与全尺寸模型相等的效果,这里称之为全尺寸等效建模。

2.2 初步建模

利用 Unigraphics NX 软件(简称 UG NX)先建立一个初步的系统模型。模型参数初步选取见表 1。暂不考虑温度的影响。套管压力取长庆油田压裂的可能最大值 50 MPa。套压是相对初始环境压力下的压力增量。

表 1 套管-水泥环-地层系统初步模型参数
Table 1 Coarse parameters of casing-cement sheath-formulation

构件	外径/ mm	内径/ mm	长度/ mm	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (g·cm ⁻³)
套管	139.7	124.3		206	0.30	7.9
水泥环	216.0	139.7	500	9	0.21	1.8
地层	316.0	216.0		25	0.23	2.5

再利用 UG NX 集成的 ANSYS 软件进行有限元仿真,求解器选择 NX NASTRAN,零组件建模、网格划分、求解和后处理过程见图 5。一、二界面网格配对关系均为重合粘结。

套管—水泥环—地层在轴向一定范围内压力载荷、温度场和环境约束基本是一致的,因此模型轴向长度选取一小段即可,在进行力学仿真时必需施加一定的约束。根据该模型的特点,宜选择模型

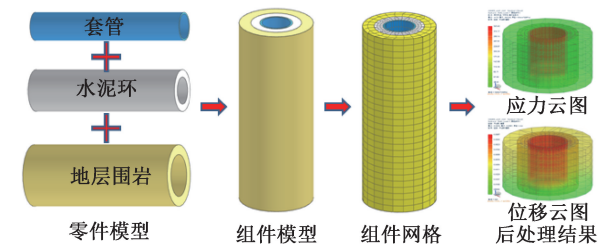


图 5 系统建模及仿真流程

Fig. 5 Process of system modeling and simulation

两端为固定约束,但两端约束会对模型的力学响应产生影响,距两端越远影响越小,选择模型中部(轴向)为考察目标,当模型达到一定长度,两端约束对模型中部的影响减小至 0,模型不宜过长,模型越长,仿真难度就越大。因此需要探索模型轴向尺寸的一个最小值,使模型中部的力学响应不受两端约束的影响。

根据初步建模仿真结果可知,压裂时套管—水泥环—地层系统径向为压应力,环向为拉应力,位移总是径向的,应力和位移从内到外逐渐衰减。当径向尺寸达到一定值后,应力和位移基本衰减至 0。表明更远端的地层对研究目标没有影响。因此,需要探索模型径向尺寸的一个最小值,使模型外侧的应力和位移基本衰减至 0。

2.3 模型参数优化

2.3.1 轴向尺寸优化

先保持模型径向尺寸不变,地层的壁厚暂取较小值 50 mm(地层的壁厚越小,两端约束对考察目标的影响越大,越能说明问题),逐渐增大轴向尺寸进行仿真对比(见表 2)。

表 2 不同轴向尺寸模型内外侧的应力和位移
Table 2 Stress and displacement of model in various axial size

序号	模型尺寸/ mm	应力/MPa		位移/mm	
		内侧	外侧	内侧	外侧
1	φ316×500	342	8.7	0.098	0.052
2	φ316×600	341	8.4	0.098	0.051
3	φ316×700	339	8.2	0.097	0.050
4	φ316×800	338	7.9	0.097	0.049
5	φ316×900	337	7.7	0.096	0.049
6	φ316×1 000	336	7.6	0.096	0.048
7	φ316×1 100	336	7.6	0.096	0.048
8	φ316×1 500	336	7.6	0.096	0.048

从上表可以看出,当轴向尺寸增大到 1 000 mm 以后,数值趋于稳定值。换言之,当长度大于 1 000 mm 以后,可忽略两端约束对考察目标的影响。所以,模型轴向长度优化为 1 000 mm,图 6 为

1 000 mm 模型的力学响应云图(模型中部横截面)。

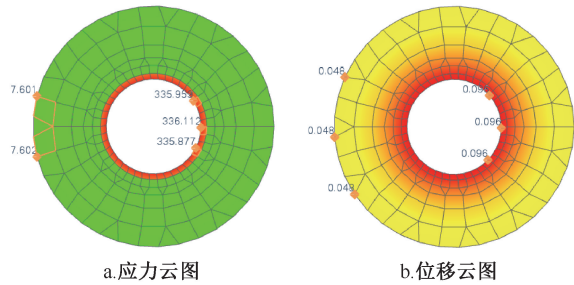


图 6 模型长 1 000 mm 时应力(MPa)和位移(mm)分布
Fig. 6 Stress(MPa) and displacement(mm) of 1 000 mm model

2.3.2 围岩外径优化

模型轴向尺寸固定在最优值 1 000 mm,逐渐增大围岩外径进行仿真对比(见表 3)。套管压力仍取较大值 50 MPa。

表 3 不同围岩外径时模型的应力和位移
Table 3 Stress and displacement of model in different diameter

序号	围岩厚/ mm	模型尺寸/ mm	应力/MPa		位移/mm	
			内侧	外侧	内侧	外侧
1	50	φ316×1 000	336	7.6	0.096	0.048
2	100	φ416×1 000	321	4.2	0.092	0.034
3	200	φ616×1 000	309	1.3	0.090	0.026
4	500	φ1 216×1 000	305	0.48	0.088	0.010
5	1 000	φ2 216×1 000	303	0.097	0.087	0.003

由上表看出,随着围岩壁厚的增大,围岩外侧的应力和位移迅速减小,当围岩壁厚达 1 000 mm 时,外侧的应力和位移几乎为 0,即套压对 φ2 216 mm 以外的围岩的影响可以忽略不计,因此,围岩的壁厚优化为 1 000 mm。

综上所述,最终模型参数优化见表 4。

表 4 套管-水泥环-地层系统最终参数表
Table 4 Final parameters of casing-cement sheath-formulation

构件	外径/ mm	内径/ mm	长度/ mm	弹性 模量/ GPa	泊松 比	密度/ (g·cm ⁻³)	抗压 强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa
套管	139.7	124.3		206	0.30	7.9	380	
水泥环	216.0	139.7	1 000	9	0.21	1.8	38	3.5
地层	2 216.0	216.0		25	0.23	2.5	50	5.0

2.3.3 温度的影响

将温度场以温度预载荷的形式添加到结构分析主模型的子工况下,各构件热力学参数见表 5,并设定地层原始温度为 80 ℃,地面温度为 20 ℃,压裂时低温压裂液将目标井段的井筒温度降至 40 ℃。

表 5 套管-水泥环-地层系统热力学参数
Table 5 Thermodynamic parameters of casing-cement sheath-formulation system

构件	热传导系数	比热	热膨胀系数
	W/(kg·K)	J/(kg·K)	10 ⁻⁶ /K
套管	45	461	13
水泥环	0.98	837	11
地层	1.59	1 256	10.5

模型尺寸仍为 φ2 216 mm×1 000 mm。利用 NX NASTRAN 求解器的热分析模块建立温度预载荷子工况,添加至结构分析主模型进行求解,模型的温度场见图 7,外侧为 77.7 ℃,接近地层原始温度。

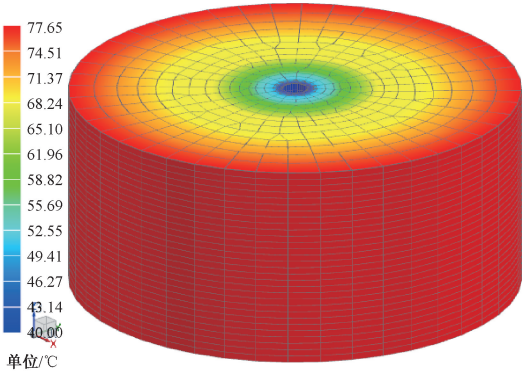


图 7 模型的温度云图
Fig. 7 Temperature cloud chart of model

仿真结果表明,压裂时套管内注入的低温压裂液对套管—水泥环—地层系统有降温冷缩作用,对系统的应力及位移都有明显影响,内外侧位移均有一定的减小,内侧应力有明显增大(见表 6)。

表 6 有无温度场模型的应力和位移对比
Table 6 Comparison of stress and displacement of model with or without temperature field

序号	载荷形式	应力/MPa		位移/mm	
		内侧	外侧	内侧	外侧
1	仅压力载荷	303	0.097	0.087	0.003
2	仅温度载荷	125	0.102	-0.020	-0.049
3	温度压力载荷	371	0.095	0.066	-0.033

3 水泥环密封完整性分析

水泥环密封失效包括本体破坏和一、二界面破坏两个方面,一界面指套管与水泥环界面,二界面指水泥环与地层界面^[15]。

3.1 水泥环本体破坏的套管压力

整个模型的应力和位移云图色谱范围较大,水泥环的云图色谱很窄,不易观察,本文研究核心目标为水泥环,因此,为了精细分析水泥环,后文只显示水泥环的色谱云图。

压裂时水泥环径向受压,环向受拉,且水泥石的抗拉强度远小于抗压强度,所以,水泥环本体的破坏形式是抗拉开裂。图 8 为 50 MPa 套压下水泥环的应力云图,考察 Y 轴主应力,正的为拉应力(环向应力,内侧 8.82 MPa,超出抗拉强度 3.5 MPa,外侧 3.16 MPa,未超出抗拉强度),负的为压应力(径向应力,内侧-9.07 MPa,外侧-5.08 MPa,均未达到水泥的抗压强度 38 MPa)。

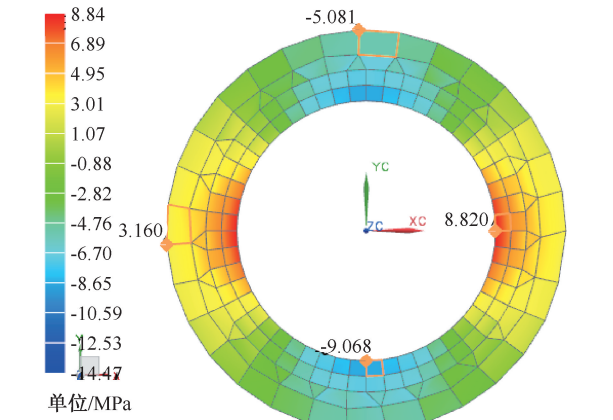


图 8 50MPa 套压下水泥环的应力云图
Fig.8 Stress of cement sheath with 50MPa casing pressure

应力和位移均沿径向衰减,说明随着套压的升高,本体先从内侧开裂。为此,逐步升高套压,摸索水泥环本体的起始破坏套压和完全破坏套压。仿真结果表明,当套压达到 22 MPa 时,水泥环内侧应力达到抗拉强度 3.5 MPa,即水泥环的起始破坏对应的套压为 22 MPa。当套压升至 53 MPa 时,水泥环外侧的应力达到抗拉强度 3.5 MPa。说明水泥环本体完全破坏对应的套压为 53 MPa。

水泥环的应力随弹性模量和泊松比的不同而不同^[16]。图 9 为保持其它参数不变,水泥环应力随弹性模量的变化趋势,径向压应力和环向拉应力均随弹性模量的减小而减小。说明降低弹性模量可以显著减小水泥环的应力。对于 50 MPa 的套压,要使最大拉应力小于抗拉强度 3.5 MPa,弹性模量需降低 5GPa 以下。

由此可见,降低弹性模量和提高抗拉强度是提高水泥环承载能力的有效途径,可以通过添加纤维增强水泥环的抗拉强度^[17]。

3.2 一界面破坏的原因分析

水泥环的变形为弹性和塑性变形的复合变形,应力较小时以弹性变形为主,应力较大时塑性变形比例增大^[18]。套压卸载后,套管和水泥环的弹性变形很快得以恢复,但水泥环的塑性变形部分却不可

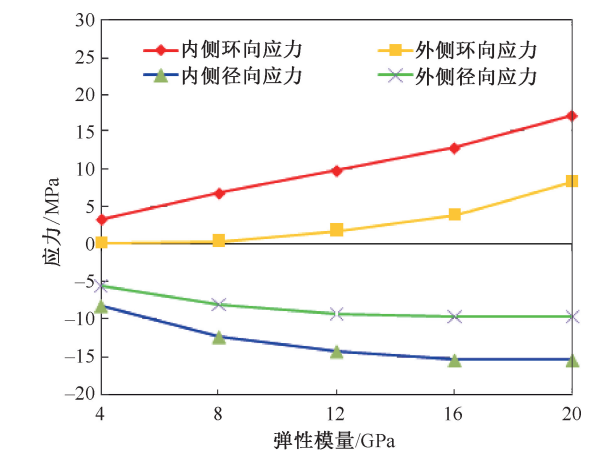


图 9 水泥环应力随弹性模量的变化
Fig.9 Stress of cement sheath change with elastic modulus

恢复,一界面产生剥离趋势的拉应力。

仍以套压 50 MPa 为例,水泥环的位移如图 10,内侧为 0.061 mm。后文分析水泥环的变形指的均是内侧位移。

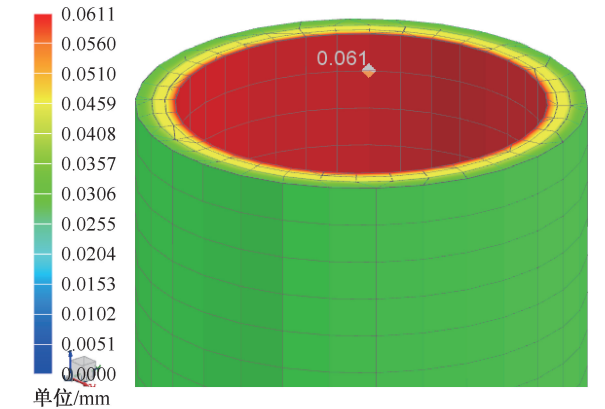


图 10 套压 50 MPa 时水泥环的位移云图
Fig.10 Displacement chart of cement sheath with 50 MPa casing pressure

该水泥环在 50 MPa 下的塑性变形占总变形的 1/3,残余变形为 0.020 mm。为了模拟卸载时套管弹性恢复与水泥环之间的脱离应力,直接将压力作用于水泥环的一界面,使水泥环产生 0.020 mm 的变形,这时一界面产生 1.96 MPa 脱离应力,如果一界面的胶结强度低于 1.96 MPa,一界面就发生剥离。

分析一界面剥离的最低套压。研究的水泥环的界面粘结强度为 1.5 MPa,按上述方法反推卸压时水泥环的残余变形为 0.016 mm。0.016 mm 的塑性变形对应原始总变形为 0.048 mm,用 0.048 mm 的原始总变形反推,对应的套管压力为 26 MPa,即套管压力达到 26 MPa 以上时,塑性变

形引起的界面剥离应力达到粘接强度 1.5 MPa,即界面开始破坏。

如果套管压力较低,只要有塑性变形,即使单次加载卸压一界面没有超出粘结强度,但多次加载,累积塑性变形可能会导致一界面剥离^[19-20]。

一、二界面的粘结强度就是水泥环的抗拉强度,但由于钻井泥浆的影响,会在一界面残留一薄层泥浆薄膜^[21],降低了一界面的粘结强度;在二界面残留一定的泥饼,降低了二界面的粘结强度。由于地层的材料特性与水泥环差别不大,因此地层与水泥环界面处变形基本一致,即二界面几乎没有剥离应力,是否剥离主要看泥饼的影响。

4 结论

(1)水泥环形成的先天环境是水泥环孕育的先天因素,对硬化定型后水泥环的畸变能没有影响,应当归属于水泥环的材料属性。硬化定型后的水泥环进行力学分析时,载荷施加不用考虑归属于材料属性的先天环境,只需考虑养护定型后的环境增量。

(2)压裂时水泥环表现为环向拉应力破坏,由内而外应力逐渐减小,即随着套压的增加,水泥环内侧先破坏。控制套压,使内侧拉应力小于水泥环的抗拉强度,可保障水泥环本体无破坏。

(3)压裂停泵时,水泥环残余变形导致一界面产生剥离应力,如果剥离应力大于一界面的粘结强度,一界面将出现剥离破坏。二界面剥离应力很小,是否剥离主要看泥饼的影响。

本研究适用于产层段的单层套管—水泥环—地层系统,为油气井水泥材料的研究提出改进方向,为多级压裂的参数优化提供参考。

致谢:衷心感谢中国石油集团川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院相关领导及同事在论文编写过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] 邹才能, 杨智, 张国生, 等. 常规-非常规油气“有序聚集”理论认识及实践意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 14-27.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Conventional and unconventional petroleum “orderly accumulation”: Concept and practical significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(1): 14-27.
- [2] 袁军, 冯进, 刘华为, 等. 套管-水泥环-地层完备系统

力学模型解析解及有限元分析[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2015, 12(1): 52-56.

YUAN Jun, FENG Jin, LIU Huawei, et al. The mechanical model of analytical solution for a complete system of casing-cement sheath-formation and its finite element analysis[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(1): 52-56.

- [3] 吴健. 固井水泥环密封完整性研究[D]. 武汉: 长江大学, 2014: 37-42.

WU Jian. Research on the cement sheath seal and integrity [D]. Wuhan: Yangtze University, 2014: 37-42.

- [4] 张林海, 刘仍光, 周仕明, 等. 模拟压裂作用对水泥环密封性破坏及改善研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(13): 168-172.

ZHANG Linhai, LIU Rengguang, ZHOU Shiming, et al. Investigation on sealing failure and improving of cement sheath under simulated staged fracturing [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(13): 168-172.

- [5] 卢亚锋, 郑友志, 余朝毅, 等. 基于水泥石实验数据的水泥环力学完整性分析[J]. 天然气工业, 2013, 33(5): 77-81.

LU Yafeng, ZHENG Youzhi, SHE Chaoyi, et al. Analysis of cement sheath mechanical integrity based on the experiment data of cement paste[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(5): 77-81.

- [6] 程小伟, 刘开强, 李早元, 等. 油井水泥浆液-固态演变的结构与性能[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1287-1292.

CHENG Xiaowei, LIU Kaiqiang, LI Zaoyuan, et al. Structure and properties of oil well cement slurry during liquid-solid transition[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1287-1292.

- [7] 李娟, 郭辛阳, 步玉环, 等. 膨胀水泥预防压裂井中水泥环的力学破坏研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(4): 43-46.

LI Juan, GUO Xinyang, BU Yuhuan, et al. Investigation on preventing mechanical failure of cement sheath in fractured wells by expanding cement [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(4): 43-46.

- [8] 刘小利. 储气库井柔性水泥浆体系适应性评价实验[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 11-14.

LIU Xiaoli. Adaptability evaluation experiment of flexible cement slurry system[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(3): 11-14.

- [9] 王磊, 曾义金, 张青庆, 等. 高温环境下油井水泥石力学性能试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 88-95.

WANG Lei, ZENG Yijin, ZHANG Qingqing, et al. Experimental study on mechanical properties of oil well cement under high temperature [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2018, 42(6): 88-95.

- [10] 王博. 非均匀的地应力下水泥环结构完整性规律分析[D]. 大庆:东北石油大学, 2015:48-53.
WANG Bo. Factors and laws on cement sheath structure integrity under non-uniform crustal stress[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015:48-53.
- [11] 周甲佳. 高强高性能混凝土多轴应力状态下力学性能试验和理论研究[D]. 南京:东南大学, 2015:63-68.
ZHOU Jiajia. Experimental and theoretical study on behavior of high strength and high performance concrete under multi-axial loads[D]. Nanjing: Southeast University, 2015:63-68.
- [12] 刘洋, 严海兵, 余鑫, 等. 井内压力变化对水泥环密封完整性的影响及对策[J]. 天然气工业, 2014, 34(4): 95-98.
LIU Yang, YAN Haibing, YU Xin, et al. Negative impacts of borehole pressure change on cement sheath sealing integrity and counter measures[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 95-98.
- [13] 席岩, 李军, 柳贡慧, 等. 瞬态力-热耦合作用下水泥环完整性分析[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(4): 417-423.
XI Yan, LI Jun, LIU Gonghui, et al. Analysis on cement sheath integrity under transient thermo-mechanical coupling effect[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(4): 417-423.
- [14] 杨志伏. 基于水泥凝固过程的油井结构应力分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013:79-82.
YANG Zhifu. The stress analyses of oil well structures based on cement solidification process[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013:79-82.
- [15] 史玉才, 管志川, 席传明, 等. 基于水泥环完整性分析的许用套管内压力解析计算方法[J]. 天然气工业, 2017, 37(7): 89-93.
SHI Yucai, GUAN Zhichuan, XI Chuanming, et al. An analytical method for the calculation of allowable internal casing pressure based on the cement sheath integrity analysis[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 89-93.
- [16] 李明忠, 管建平. 固井水泥环受内压时的弹塑性变形数值模拟[J]. 承德石油高等专科学校学报, 2017, 19(4): 24-28.
LI Mingzhong, GUAN Jianping. Numerical simulation on elastic-plastic deformation of cement sheath under inner pressure condition[J]. Journal of Chengde Petroleum College, 2017, 19(4): 24-28.
- [17] 李明, 刘萌, 杨元意, 等. 碳酸钙晶须与碳纤维混杂增强油井水泥石力学性能[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 94-100.
LI Ming, LIU Meng, YANG Yuanyi, et al. Mechanical properties of oil well cement stone reinforced with hybrid fiber of calcium carbonate whisker and carbon fiber[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 94-100.
- [18] 梁思明, 魏亚. 硬化水泥净浆微观结构对微观徐变及力学性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(2): 181-188.
LIANG Siming, WEI Ya. Influence of microstructure on micro creep and mechanical properties of hardened cement paste[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(2): 181-188.
- [19] 赵效锋, 管志川, 廖华林, 等. 交变压力下固井界面微间隙产生规律研究[J]. 石油机械, 2015, 43(4): 22-27.
ZHAO Xiaofeng, GUAN Zhichuan, LIAO Hualin, et al. Study on cementing interface micro-annulus generation rules under alternating casing pressure[J]. China Petroleum Machinery, 2015, 43(4): 22-27.
- [20] 刘仍光, 张林海, 陶谦, 等. 循环应力作用下水泥环密封性实验研究[J]. 钻井液与完井液, 2016, 33(4): 74-78.
LIU Rengguang, ZHANG Linhai, TAO Qian, et al. Experimental study on airtightness of cement sheath under alternating stress[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2016, 33(4): 74-78.
- [21] 杨振杰, Astou Oawane, 杨强, 等. 固井水泥环微间隙与微裂缝的模拟试验方法[J]. 天然气工业, 2015, 35(9): 77-82.
YANG Zhenjie, Astou Oawane, YANG Qiang, et al. Simulation test methods for cementing sheath micro-clearance and micro-crack[J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(9): 77-82.

编辑 方志慧

第一作者简介:张承武,男,1972年出生,高级工程师,2005年获得陕西科技大学机械制造及自动化专业硕士学位,现从事试油压裂及井下工具研究工作。电话:13609293518, Email:sxzcw@126.com。通信地址:陕西省西安市未央路151号,邮政编码:710018。