

# 水力压裂过程中套管内流动冲蚀损伤规律研究

蒋 秀<sup>1</sup>, 张艳玲<sup>1</sup>, 王江云<sup>2</sup>, 屈定荣<sup>1</sup>

1. 中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院 山东青岛 266071

2. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: jiangx.qday@sinopec.com

引用: 蒋秀, 张艳玲, 王江云, 等. 水力压裂过程中套管内流动冲蚀损伤规律研究[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 48-54.

Cite: JIANG Xiu, ZHANG Yanling, WANG Jiangyun *et al.* Erosion pattern of flow field in casing during hydraulic fracturing [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 48-54.

**摘要** 油气田水力压裂施工时, 高速注入的压裂液会对套管内壁产生一定冲蚀损伤, 其中井筒造斜弯肘的冲蚀问题尤为严重。基于欧拉-拉格朗日多相流模型方法, 采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和改进的冲蚀模型对水力压裂过程中套管内的携砂压裂液多相流动及冲蚀过程进行了数值模拟, 研究了套管内部流场分布规律和压裂参数对套管冲蚀的影响规律。计算结果表明, 套管内各位置颗粒浓度分布基本一致; 从井口向井下压力逐渐降低, 在弯肘处压力明显降低, 压裂液流速接近峰值 30 m/s; 在竖直井与水平井相连接入弯处 45° 前位置出现了冲蚀破坏危险点, 冲蚀速率出现峰值。水力压裂过程中套管壁面平均冲蚀速率随平均砂比、压裂液排量及压裂砂平均粒径的增大而增大, 对套管壁面冲蚀影响最为关键参数是平均砂比, 其次是颗粒粒径和排量, 而压裂压力影响最小。在此基础上, 从井眼轨迹和套管设计、压裂工艺参数设置等方面提出了降低压裂过程套管冲刷磨损的优化建议。

**关键词** 水力压裂; 套管; 水平井; 冲蚀; 多相流

中图分类号: TE357

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.01.008

## Erosion pattern of flow field in casing during hydraulic fracturing

JIANG Xiu<sup>1</sup>, ZHANG Yanling<sup>1</sup>, WANG Jiangyun<sup>2</sup>, QU Dingrong<sup>1</sup>

1. Sinopec Research Institute of Safety Engineering, Qingdao, Shandong 266071, China

2. College of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay, Xinjiang 834000, China

**Abstract:** In hydraulic fracturing of oil field, the fluid injected at high speed will cause some erosion damage to the inner wall of casing, especially at the elbow. On the basis of Euler-Lagrange multi-phase flow model, the RNG  $k-\varepsilon$  turbulence model and modified erosion model were used for numerical simulation of multi-phase flow of sand-carrying fracturing fluids and relevant erosion in casing during hydraulic fracturing to highlight the patterns of flow field distribution in casing and impacts of fracturing parameters on casing erosion. The results show that different parts of casing have basically the same distribution pattern of particle concentrations. From wellhead to bottom-hole. Obvious pressure drop was observed at the elbow where the maximum flow rate of 30m/s was reached. The dangerous place where the erosion occurred was at the elbow of 45 degree. The average erosion rate in the casing increased with the increasing of the average sand ratio, the fracturing output and the average particle size. The most critical influencing factor of erosion was the average sand ratio, followed by the fracturing output and the average particle size, while the fracture pressure was the least. On this basis, the suggestions were made to decrease the erosion to the casing from the aspects of well trajectory and casing design, the setting of fracturing parameters and so on.

**Keywords:** hydraulic fracturing; casing; horizontal well; erosion; multiphase flow.

目前, 世界范围内页岩气藏的广泛开发极大的促进了水力压裂等增产技术的使用及进步<sup>[1-5]</sup>。水力压裂过程中, 套管内为携砂压裂液的多相管流状态, 高速注入的压裂液, 特别是支撑剂固体颗粒会对井口控制设备和井下套管壁面产生不同程度的冲蚀

磨损<sup>[6-11]</sup>, 冲蚀损伤逐步累积以致在潜伏期后形成破坏。水力压裂施工时, 套管在几十兆帕以上的内压下内壁极易发生屈曲变形促使压裂砂冲蚀作用更加突出<sup>[12-15]</sup>。套管壁面上冲蚀损伤部位可为腐蚀介质的驻留提供了有利条件, 可能促进局部腐蚀的

发生,加速壁厚减薄,使得套管剩余壁厚不能承受井筒压力发生内压破裂或外压失稳,最终使套管损坏,威胁页岩气井长周期稳定生产<sup>[16-17]</sup>。

压裂施工过程中高压、高排量及高含砂量在受内压发生屈曲的管柱内部形成复杂的多相流动及冲刷磨损现象对压裂施工的安全造成了重大的影响<sup>[18]</sup>。传统压裂套管设计将流体对管柱的作用简化为摩擦阻力施加在套管上来校核套管强度,实现对套管及接头尺寸的优化设计,忽略了压裂套管内部流态及冲刷磨损对结构的影响。为了抑制水力压裂中携砂压裂液对井筒管柱壁面造成的损伤,在套管材质抗冲蚀性能方面开展了大量的研究,提出了改进套管材质、优化井眼轨迹及压裂工况等改进方向<sup>[6-9]</sup>。然而,受限于套管内高达数十至上百兆帕的高压工作环境,传统试验方法很难对套管内部流体运动规律进行详细研究,严重制约了实际压裂过程中抑制套管冲蚀损伤的影响规律分析。因此,本文采用多相流数值模拟方法对水力压裂条件下的套管内的液固流动过程进行数值模拟分析,并采用文献实验数据修正后的冲蚀预测模型对压裂砂的冲蚀损伤作用进行分析,研究压裂套管内部流场分布规律和不同压裂工况条件下流动与冲蚀损伤的变化规律,分析井筒套管冲蚀损伤壁面减薄危险位置,并考察水力压裂参数对井筒套管结构稳定性及寿命影响规律,以为优化压裂套管设计及服务工况提供理论指导。

## 1 井筒套管几何模型及网格划分

受页岩气储层极低渗透率和页岩中主导垂直裂缝特性影响,传统竖井与垂直裂缝相交机率很小,因此需采用水平井和水力压裂增产技术<sup>[3,19]</sup>。图 1(a)为某页岩气开发井身结构示意图,一开和二开为竖井,三开为水平井,三开后套管尺寸为  $\Phi 139.7 \times 12.34$  mm。该井井眼轨迹如图 2 所示,井深 3 088.0 m,井斜  $78.2^\circ$ ,方位  $179.5^\circ$ ,垂深 2 900.54 m,闭合距 376.88 m;钻达 B 靶,井深 4 512.0 m,井斜  $63.80^\circ$ ,方位  $179.84^\circ$ ,垂深 3 268.40 m,闭合距 1 724.98 m。自井深 3 088.00 m(斜深)进入水平段,水平段长 1 424 m。由于水力压裂时水平井处有桥塞封堵,故本文主要研究竖井井及造斜弯肘段套管内携砂压裂液的流动与冲蚀过程。因此,对水平井处采用一个大矩形腔体对地层结构进行简化。图 1(b)所示的三维井眼轨迹建模采用六面体完全结构化方法进行网格划分,网格数为

2 564 572。

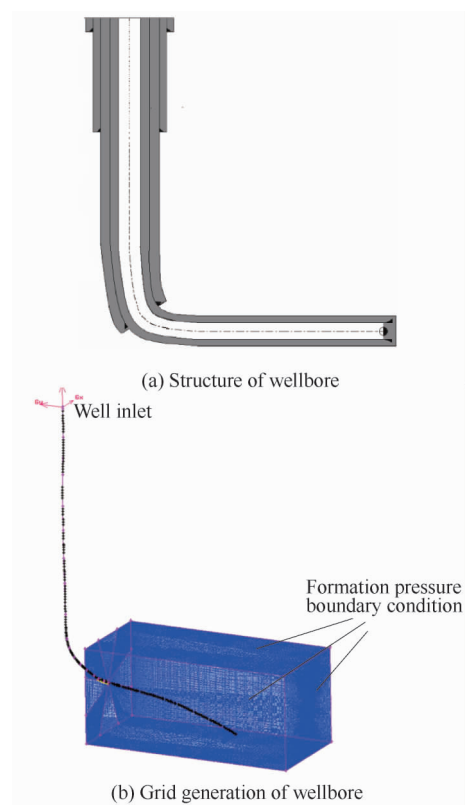


图 1 井身结构及网格划分

Fig.1 Structure and grid generation of wellbore

计算过程中,以实际井眼轨迹物理位置为坐标,套管入口为坐标原点,重力方向沿  $z$  轴负方向。图 2 为井眼轨迹投影剖面图。

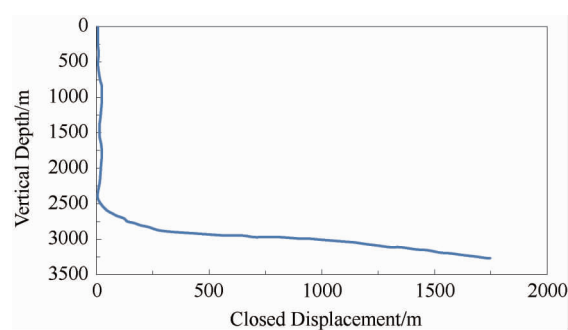


图 2 井眼轨迹投影剖面图

Fig.2 Projection profile of well trajectory

如图 2 所示,数值模拟计算区域包括从入口、竖井、水平井和水平井外围长方体模拟地层边界区域,并在入口和长方体地层边界区域施加相应的水力压裂工况。

## 2 数学模型

根据水力压裂过程中的液固多相体系物理现

象,分别建立水力压裂过程中套管内流动和冲蚀的湍流模型、多相流模型和冲蚀模型。

## 2.1 湍流模型

基于水力压裂时套管内液固多相体系不可压缩流动的假设,三维瞬时流动的基本方程可以表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x_j}\right) + S_\varphi \quad (1)$$

在计算过程中,采用能够较为准确地预测管流及局部突扩突缩管漩涡流动<sup>[20]</sup>的 RNG  $k-\varepsilon$  模型作为湍流模型<sup>[21]</sup>。

## 2.2 多相流模型

欧拉-拉格朗日多相流方法中离散相模型(Discrete Phase Model, DPM)能够对于颗粒浓度小于10%以内液固多相流中颗粒运动轨迹准确的刻画,并能与冲蚀理论预测模型相耦合,对水力压裂过程中套管内液固多相流冲蚀损伤过程进行预测。因此,在此选用 DPM 模型作为多相流模型。

## 2.3 冲蚀模型

冲蚀损伤作用的影响因素主要有颗粒粒径、颗

粒壁面冲击角及颗粒速度。冲蚀速率表达式为:

$$R_{\text{erosion}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{particles}}} \frac{m_p C(d_p) f(\alpha) V_p^{b(V_p)}}{A_{\text{face}}} \quad (2)$$

其中  $C(d_p)$ ,  $f(\alpha)$ ,  $b(V_p)$  三个函数关系依次对应上述冲蚀损伤作用的三个主要因素。三个函数在现有数值模拟方法中一般为常数设置,导致计算结果与实际发生了严重偏离情况。因此,基于冲蚀理论及实验数据对 Fluent 中冲蚀模型中的颗粒粒径、颗粒壁面冲击角及颗粒速度等模型参量进行了修正,并用于套管内高压液固流动冲蚀过程的数值模拟计算。

## 3 计算条件确定

井口按照 19 段水力压裂工况的压裂液排量施加速度入口边界条件,颗粒相按照实际各段水力压裂工况使用压裂砂的类型及砂比通过离散介质模型在井口抛射;水平井段外围用矩形几何体代表地层,并对其施加压力出口边界条件、模拟实际地层回压对水力压裂过程的影响(具体工况见表 1),其他壁面施加无滑移固壁的边壁条件。

表 1 水力压裂主要工况

Table 1 Main conditions of hydraulic fracturing

序号	出口总压力 /MPa	井口流速 /(m·s <sup>-1</sup> )	平均砂比 /%	混合密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	平均粒径 /μm	序号	出口总压力 /MPa	井口流速 /(m·s <sup>-1</sup> )	平均砂比 /%	混合密度 /(kg·m <sup>-3</sup> )	平均粒径 /μm
1	68.14	21.99	5.71	1 735.90	391.96	11	55.84	24.14	8.83	1 630.30	404.94
2	56.16	22.63	6.09	1 646.30	402.98	12	62.36	24.14	8.70	1 629.40	405.054
3	63.16	22.47	9.75	1 622.79	410.10	13	48.36	27.16	9.53	1 626.57	409.53
4	62.16	22.95	9.48	1 633.10	408.89	14	49.36	27.16	9.33	1 626.60	409.75
5	50.36	21.58	8.41	1 629.90	409.06	15	53.36	28.67	9.61	1 624.66	409.55
6	48.36	24.14	9.95	1 624.95	410.04	16	63.36	24.29	6.91	1 664.37	400.75
7	47.36	24.14	10.10	1 625.21	410.26	17	54.36	24.44	8.45	1 628.76	409.37
8	49.36	24.14	10.07	1 625.21	410.48	18	63.36	24.14	7.41	1 661.92	401.06
9	48.36	24.14	9.91	1 623.73	410.62	19	66.36	24.29	7.14	1 660.60	401.22
10	51.36	27.16	9.63	1 624.26	410.01						

## 4 水力压裂过程中套管内流动和冲蚀数值模拟分析

利用实验测量数据验证冲蚀模型的准确性,利用该模型进行数值模拟计算,分析了水力压裂过程中套管内速度场、压力场、颗粒浓度等物理场的分布,同时探究了压裂参数对井筒套管冲蚀影响规律。

### 4.1 冲蚀模型的验证

采用 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型、DPM 多相流模型和

改进的冲蚀模型对突扩突缩管道内的冲蚀过程进行数值模拟计算(图 3),并与实验测量数据<sup>[22]</sup>进行对比验证。

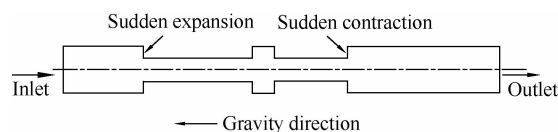
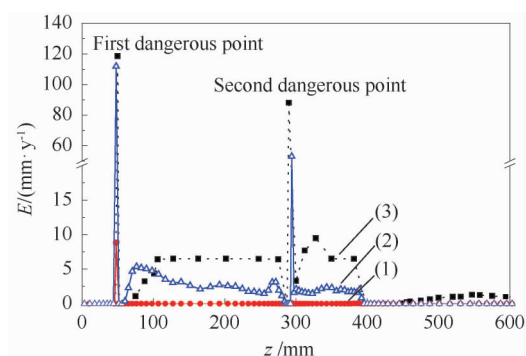


图 3 突扩突缩管几何结构示意图  
Fig.3 Schematic of sudden expansion and contraction tube

图 4 为突扩突缩管冲蚀速率模拟结果与实验数据对比。从图 4 可以看出,改进后的冲蚀模型的计算值与实验数据吻合较好,能够准确预报突缩和沟槽处的第一和第二冲蚀损伤危险点的位置及数值,并能较为准确的描述无突变结构管壁处的冲蚀速率变化趋势,具有较高的冲蚀预测精度,可以用于套管内携砂压裂液的液固多相流动和冲蚀过程的研究。



(1) Value of default erosion model; (2) Value of advanced erosion model; (3) Experimental data

图 4 突扩突缩管冲蚀速率模拟结果与实验数据对比  
Fig.4 Comparison of experimental and simulated erosion rates in sudden expansion and contraction tube

## 4.2 套管内流场分析

根据表 1 的 19 段压裂参数对套管内携砂压裂液流动冲蚀过程进行了计算,获得了全部流场信息。下面以第 15 段压裂过程计算结果为例对井筒套管内的基本流场进行分析。

### 4.2.1 速度场分析

图 5 为套管内不同位置处速度分布云图。

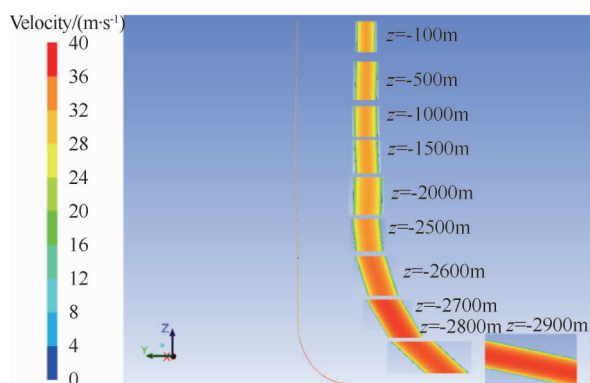


图 5 套管内不同位置处速度分布云图  
Fig.5 Contour of velocity distribution in the casing with depth

井眼轨迹为空间上竖直线段和空间大曲率造斜弯肘结构。最高速度量级约为 30 m/s,套管沿高度方向各位置速度云图对比可以发现,竖直井管段流

速相对较低,在造斜管段弯肘处流体发生转弯,同时压力和重力作用下,对流体逐渐加速,压裂液流速逐渐升高,接近峰值。

### 4.2.2 压力分布

图 6 为套管内不同位置处压力分布云图。图中所示最高压力量级约为 100 MPa,从井口向井下压力逐渐降低,在弯肘处压力降低更为明显,这与此处流速增加,压力能转换为动能,压裂液流速提高基本规律相一致。

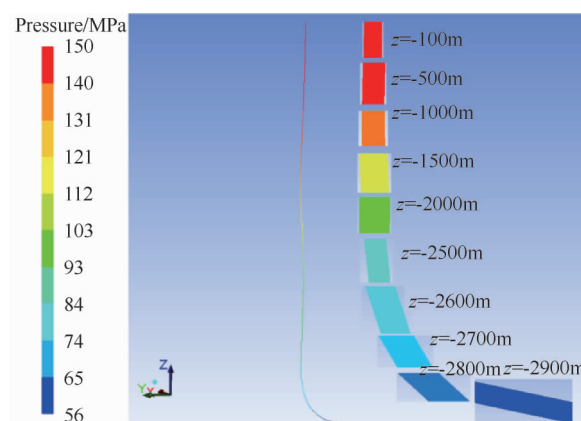


图 6 套管内不同位置处压力分布云图  
Fig.6 Contour of pressure distribution in the casing with depth

### 4.2.3 颗粒浓度分布

图 7 为套管内不同位置处颗粒浓度分布云图。

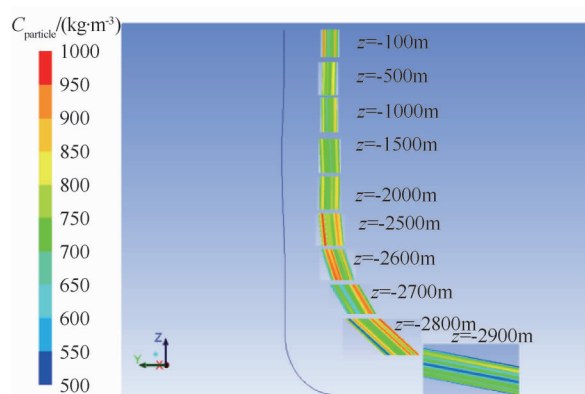


图 7 套管内不同位置处颗粒浓度分布云图  
Fig.7 Contour of particle concentration distribution in the casing with depth

可见套管内各位置颗粒浓度分布基本一致,下部水平井段开始位置颗粒浓度略高。这种较为均匀的颗粒浓度分布方式说明了压裂工况设计是合理的,且压裂液中固液比例较为合理,能够有效的运移支撑剂,在压裂段射孔裂缝处形成有效的支撑,并构成页岩气释放的通道。



#### 4.2.4 冲蚀速率分布

图8为套管内不同位置处颗粒冲蚀速率分布云图。在套管内井深位置 $z$ 分别为-100 m、-500 m、-1 000 m和-1 500 m处的竖直井段,流速变化不大,颗粒对壁面的冲蚀主要表现为剪切作用,对于套管这种韧性材料来说,低攻角的剪切冲蚀速率很小。随着井眼轨迹继续向下,竖直井出现一定的井斜,同时压裂液携砂产生加速作用,在竖直井中下段 $z$ 由-2 000 m、-2 500 m到-2 600 m位置冲蚀速率逐渐增大。在空间大曲率弯肘入弯处及45度之前位置管道外侧( $z=-2 700$  m处),冲蚀速率达到峰值,此外随着角度继续增大, $z$ 从-2 800 m到-2 900 m处,冲蚀速率开始逐渐降低。这也充分说明了,在竖直井与水平井相连接入弯处45度前位置出现了冲蚀破坏危险点。

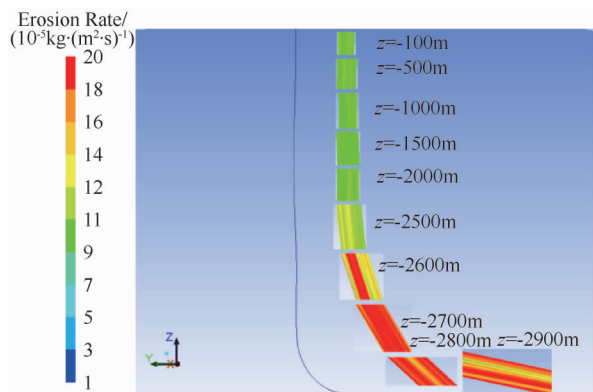


图8 套管内不同位置处冲蚀速率分布云图  
Fig.8 Contour of erosion rate distribution in the casing with depth

因此,为了减少井筒管柱的冲蚀损伤,在井眼轨迹设计中,要尽可能的减少轨迹的突变,使用缓和的造斜弯时来过渡竖直井和水平井的衔接段,在造斜段前半段套管外侧位置上增加一定的壁厚来抵御壁厚减薄引起的强度降低问题。

#### 4.3 压裂参数对井筒套管冲蚀影响规律分析

图9为不同压裂段停泵压力比较图,共有19段压裂工况数值。可见各压裂段停泵压力变化较大,变化范围约为24~45 MPa,说明此水平井压裂过程中地质条件并不均一,水力压裂时岩石形成裂缝所需压力不同。

图10为不同压裂段各种压裂砂用量变化。可见各压裂段30/50目和100目压裂砂使用量变化不大,40/70目压裂砂使用量变化最大。总砂量和平均砂比变化规律取决于40/70目压裂砂量值,该井

水力压裂时总体平均砂比变化较小,约在6%~10%之间波动。

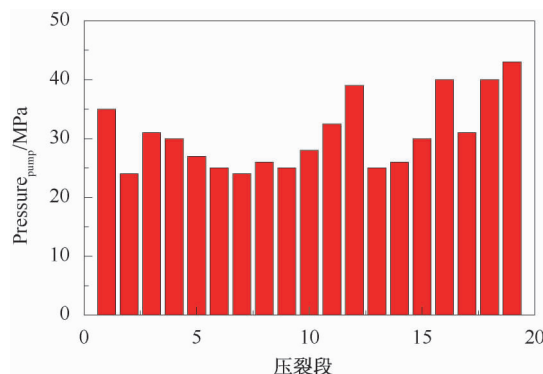


图9 不同压裂段停泵压力

Fig.9 Pressure of stop pumping at different fracturing segments

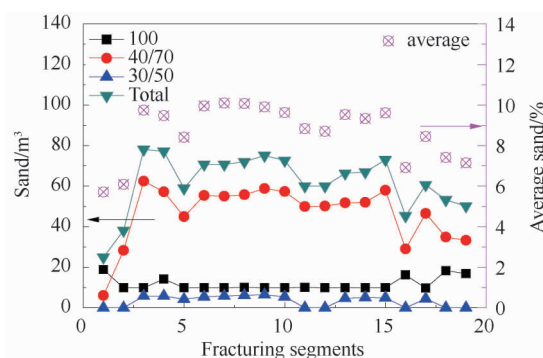


图10 不同压裂段的各种压裂砂用量、总砂量、平均砂比  
Fig.10 Amount of different fracturing sand and average sand concentration at different fracturing segments

图11为套管内不同压裂段压裂排量与冲蚀速率的变化规律。可见压裂施工排量在9~18 m<sup>3</sup>/min变化,压裂初期排量较小,中后期压裂排量达到峰值,随后逐渐下降趋于平稳。每段压裂施工时,最大排量的冲蚀速率都高于最小施工排量,冲蚀速率大小变化与各段压裂排量变化规律基本一致。

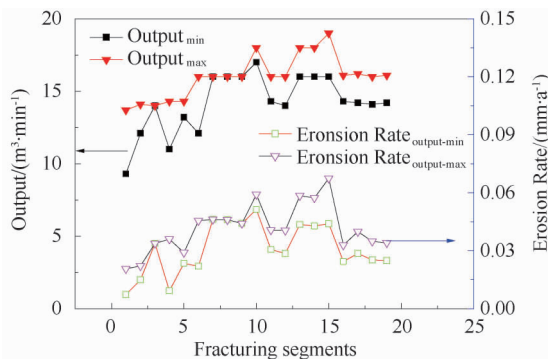


图11 不同压裂段的压裂排量及冲蚀速率变化  
Fig.11 Erosion rate of the wellbore wall with different fracturing output

图12为套管内不同压裂段的总砂量、平均砂比及冲蚀速率的变化。可见各压裂段,最大排量冲蚀速率和最小排量冲蚀速率的波动趋势与总砂量和平均砂比波动变化趋势一致,但是冲蚀速率的峰值位置所在第15段压裂段的总砂量并不是最高点,平均砂比接近峰值,结合图11中不同压裂段的压裂排量的冲蚀速率,第15段压裂时,排量处于峰值位置,导致此段压裂液携砂流速最高,对套管冲蚀损伤最大。

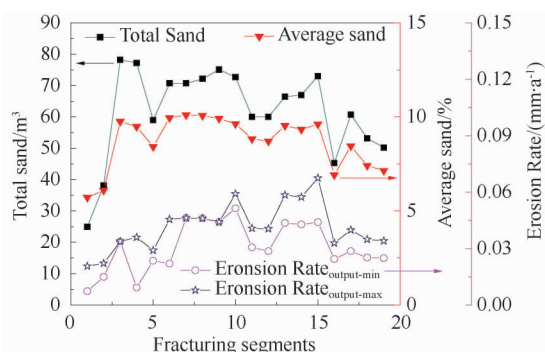


图12 不同压裂段的总砂量、平均砂比及冲蚀速率的变化  
Fig.12 Erosion rate of the wellbore wall with different the total sand amounts and average sand concentrations

因此,水力压裂过程中套管壁面平均冲蚀速率随平均砂比、压裂排量及压裂砂平均粒径增大而增大。对套管壁面冲蚀影响最为关键参数是平均砂比,其次是颗粒粒径和排量,而压裂压力影响最小。

在整体水力压裂工艺的允许范围内,尽量减少压裂液中的砂比可减少压裂砂对套管壁面的冲蚀损伤,也可以根据地层条件,通过合理的配比不同类型压裂砂的比例来降低支撑剂平均粒径,增强其流体跟随性,尽可能增加有限排量压裂液的压裂作用,减少携砂压裂液的冲蚀作用,可以有效的降低因携砂压裂液冲蚀导致套管壁面减薄对井筒套管稳定性及寿命的影响。

## 5 结论

(1)根据水力压裂井眼轨迹数据进行了4 km级别的全尺寸完全结构化几何建模,基于欧拉拉格朗日多相流模型方法,采用RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型和改进的冲蚀模型对典型页岩气井多段压裂过程进行了数值模拟计算,获得了不同压裂工况下全部液固多相流场量分布及冲蚀损伤规律。套管内各位置颗粒浓度分布基本一致;压裂压力从井口向井下压力逐渐降低,在弯头处压力降低更为明显;在套管造斜弯肘段,携砂压裂液在重力和井口泵压的作用下发生转弯,压裂液流速逐渐升高,接近峰值30 m/s;在

竖直井与水平井相连接入弯处45°前位置出现了冲蚀破坏危险点,冲蚀速率出现峰值。

(2)研究了压裂参数对套管冲蚀损伤的影响规律,水力压裂过程中套管壁面平均冲蚀速率随平均砂比、压裂排量及压裂砂平均粒径增大而增大。对套管壁面冲蚀影响最为关键参数是平均砂比,其次是颗粒粒径和排量,而压裂压力影响最小。

(3)建议尽可能的减少轨迹的突变,在造斜段前半段套管外侧位置上增加一定的壁厚,采用减少压裂液中的砂比,支撑剂的平均粒径及压裂液的排量等措施,降低对套管的冲刷磨损,有效的降低冲蚀壁面减薄对井筒套管稳定性及寿命的影响。

致谢:感谢中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院同意本文的发表。

## 参 考 文 献

- [1] 李阳,于永波,尹喜永.大庆低渗透油田增效压裂技术研究[J].特种油气藏,2005,12(2):65-67.  
LI Yang, YU Yongbo, YIN Xiyong. Study of extended fracturing technology for Daqing low permeability oilfield [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2005,12(2):65-67.
- [2] 田守增,李根生,黄中伟,等.水力喷砂射压裂机理与技术研究进展[J].石油钻采工艺,2008,30(1):58-62.  
TIAN Shouceng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei et al. Research on hydra jet fracturing mechanisms and technology [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2008, 30(1):58-62.
- [3] 蒋国盛,王荣璟.页岩气勘探开发关键技术综述[J].探矿工程,2013,40(1):3-8.  
JIANG Guosheng, WANG Rongjing. Review of key technology for shale gas exploration and development [J]. Exploration Engineering, 2013,40(1):3-8.
- [4] JIN X, SHAH S N, SHENG M. hydraulic fracturing model based on nonlinear fracture mechanics: theory and simulation [C]. SPE paper 159909 presented at SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, USA, 8-10 October,2012.
- [5] JIN X, SHAH S. Fracture propagation direction and its application in hydraulic fracturing [C]. SPE paper 163832 presented at SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, The Woodlands, Texas, USA, 4-6 February, 2013.
- [6] 卢斌,李臻,邹云.油井管柱抗冲蚀性能研究进展[J].化学工程与装备,2011,(10):159-160,  
LU Bin, LI Zhen, ZOU Yun. Research progress on erosion resistance of well tubing string [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2011,(10):159-160.
- [7] 卢斌.喷射式冲蚀实验装置研制及油井管柱抗冲蚀性能研究[D].西安:西安石油大学,2011.  
LU Bin. Design and manufacture of jet test machine for ero-

- sion and research on erosion-resistance behavior of oil well string [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2011.
- [8] 张昆. 油气管道冲刷腐蚀与防护对策研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- ZHANG Kun. Study on the erosion-corrosion of oil/gas pipeline and the protecting countermeasures [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [9] 周玉希. 基于腐蚀实验与寿命预测的页岩气井套管生产安全风险研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2015.
- ZHOU Yuxi. Study on safety risk of casing pipe production based on corrosion test and life prediction [D]. Chongqing: Chongqing University of Science and Technology, 2015.
- [10] 姜晓霞, 李诗卓, 李曙. 金属的腐蚀磨损[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 122-123.
- [11] 王凯. 油井管材料液固两相流体冲刷腐蚀研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- WANG Kai. Studies of erosion-corrosion for oil well pipe material in liquid-solid two-phase flow [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2013.
- [12] 李根生, 盛茂, 田守嶂, 等. 页岩气储层水平井与压裂工程基础问题探讨[J]. 科学通报, 2016, 61(26): 2883-2890.
- LI Gensheng, MAO Sheng, TIAN Shouceng *et al.* Key issues and investigation of horizontal well drilling and multi-stage fracturing in shale gas reservoir [J]. Chinese Science Bulletin, 2016, 61(26): 2883-2890.
- [13] 陈勉, 葛洪魁, 赵金洲, 等. 页岩油气高效开发的关键基础理论与挑战[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 7-14.
- CHEN Mian, GE Hongkui, ZHAO Jinzhou *et al.* The key fundamentals for the efficient exploitation of shale oil and gas and its related challenges [J]. Pet Drill Tech, 2015, 43(5): 7-14.
- [14] 张继信, 樊建春, 汪彤, 等. 压裂液对高压弯管冲蚀作用的数值分析[J]. 润滑与密封, 2013, 38(4): 27-31.
- ZHANG Jixin, FAN Jianchun, WANG Tong *et al.* Research on erosion wear of fracturing fluid on high pressure elbow [J]. Lubrication Engineering, 2013, 38(4): 27-31.
- [15] 练华章, 魏臣兴, 宋周成, 等. 高压高产气井屈曲管柱冲蚀损伤机理研究[J]. 石油钻采工艺, 2012, 34(1): 6-9.
- LIAN Huazhang, WEI Chenxing, SONG Zhoucheng *et al.* Erosion damage mechanism of buckled tubing in high pressure and high production gas wells [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(1): 6-9.
- [16] 张书进. 压裂管柱内固液两相流动特性及磨损机理研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2010.
- ZHANG Shujin. Research on solid-liquid flow character and erosion in hydraulic fracturing tubing [D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2010.
- [17] 孙丽丽. 水力压裂工况下典型材质损伤行为及机理研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2015.
- SUN Lili. Cavitation-abrasion behavior and damage mechanisms of typical materials in hydraulic fracturing [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2015.
- [18] 唐锋, 刘长雄, 彭睿, 等. 煤层气井压裂与套管损坏影响因素浅析[J]. 油气井测试, 2017, 26(5): 66-69.
- TANG Feng, LIU Changxiong, PENG Rui *et al.* Brief analysis of factors affecting fracturing and casing damage to coalbed methane well [J]. Well Testing, 2017, 26(5): 66-69.
- [19] 辛勇亮. 威远地区页岩气水平井压裂工艺技术研究[J]. 油气井测试, 2017, 26(2): 64-67.
- XIN Yongliang. Research of fracturing technology for shale gas horizontal well at Weiyuan area [J]. Well Testing, 2017, 26(2): 64-67.
- [20] 冯留海, 王江云, 毛羽, 等. 突扩突缩管内液-固冲蚀的数值模拟[J]. 石油学报(石油加工), 2014, 30(6): 1080-1085.
- FENG Liuhai, WANG Jiangyun, MAO Yu, *et al.* Numerical simulation of liquid-solid erosion in sudden expansion and contraction tube [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2014, 30(6): 1080-1085.
- [21] 郭胜江, 吴广庆, 陈国邦. 适用于回流区流体力学模拟计算的三种高雷诺数湍流模型的比较[J]. 制冷学报, 2005, 26(3): 26-29.
- GUO Shengjiang, WU Guangqing, CHEN Guobang. Comparison of three high-Reynolds-number models in recirculation zones for simulation of computational fluid dynamics [J]. Journal of Refrigeration, 2005, 26(3): 26-29.
- [22] POSTLETHWAITE J, NESIC S. Erosion in disturbed liquid/particle pipe flow: effects of low geometry and particle surface roughness [J]. Corrosion Engineering, 1993, 49(10): 850-857.

编辑 穆立婷

第一作者简介: 蒋秀, 女, 1976年出生, 博士, 高级工程师, 2005年毕业于中国科学院金属研究所材料学专业, 主要从事油气系统及CO<sub>2</sub>储运系统的设备腐蚀防护与安全方面的研究。电话: 0532-83786422, 13808971651; Email: jiangx.qday@sinopec.com。地址: 青岛市崂山区松岭路339号, 邮政编码: 266071。