

动态负压射孔形成的射孔孔道内涌流机理研究

咸玉席¹, 方正², 邵振鹏², 卢德唐¹, 毕全福³

1. 中国科学技术大学石油天然气研究中心 安徽合肥 230027

2. 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司 河北廊坊 065007

3. 中国石油集团西部钻探工程公司试油公司 新疆克拉玛依 834000

通讯作者: Email: yxian@ustc.edu.cn

项目支持: 国家重大科技专项“致密油气藏多尺度介质复杂结构井数值试井分析方法及应用研究”(2017ZX05009005-002)

引用: 咸玉席, 方正, 邵振鹏, 等. 动态负压射孔形成的射孔孔道内涌流机理研究[J]. 油气井测试, 2020, 29(1): 1-6.

Cite: XIAN Yuxi, FANG Zheng, SHAO Zhenpeng, et al. Study on the mechanism of surge flow in perforation channel generated by dynamic underbalance perforating [J]. Well Testing, 2020, 29(1): 1-6.

摘要 动态负压射孔可完全清理射孔孔道内压实带,但对清理的射孔孔道内压实带岩屑的介质难以有正确认识。对安装与未安装封隔器的动态负压射孔进行现场测试,分别得到动态压力曲线,研究二者动态负压变化特征。结果表明,安装封隔器的动态负压射孔中,动态压力负压值持续时间长,金属射流侵入油气储层形成的孔眼中,其介质是金属射流侵入岩石产生的高压气体;射孔孔道内携带碎屑及压实带岩屑进入到井筒中的涌流发生在井筒压力下降阶段。该研究可优化动态压力最小值,避免因动态压力差大导致井筒损坏。

关键词 动态负压射孔; 封隔器; 涌流介质; 射孔枪; 射孔孔道; 高压气体; 冲击波; 动态压力

中图分类号: TE353 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.01.001

Study on the mechanism of surge flow in perforation channel generated by dynamic underbalance perforating

XIAN Yuxi¹, FANG Zheng², SHAO Zhenpeng², LU Detang¹, BI Quanfu³

1. Oil and Gas Research Center, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

2. Well Testing Branch of CNPC Bohai Drilling Engineering Co., Ltd., Langfang, Hebei 065007, China

3. Western Drilling Engineering Company Test Oil Company, CNPC, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: Dynamic underbalance perforating can completely clean the compaction zone in the perforating tunnel, but it is difficult to correctly understand the medium for cleaning the compacted debris in perforation tunnel. The dynamic negative pressure with and without the packer were tested in the field and the dynamic pressure curves were obtained respectively to study the dynamic underbalance pressure changes. The results show that the dynamic pressure values lasts for longer time in the dynamic underbalance perforating with a packer. The medium can be inferred to be as the high pressure gas generated by the metal jet penetrating the rock of the oil and gas reservoir. the surge flow that carries debris and compacted debris into the wellbore occurs during the wellbore pressure drop phase. This study can be used to optimize the dynamic pressure minimum to avoid the wellbore damage under the high pressure difference.

Keywords: dynamic underbalance perforating; packer; surge medium; perforating gun; perforation tunnel; high pressure gas; shock wave; dynamic pressure

射孔是油气井完井的一项重要技术,可实现储层和井筒间流体沟通^[1-3]。常规射孔作业过程中,射孔弹引爆后的金属射流击穿套管、水泥环和油气藏岩石,在产生的射孔孔道内产生一定厚度的压实带“破碎区”,降低油气层在近井带区域的渗透率,甚至可能出现射孔孔道堵塞等不利于油气生产的

现象。斯伦贝谢公司首次提出利用负压射孔来清理射孔残片和压实带。静态负压射孔是将井筒内的液柱下降至一定深度,使其液柱压力低于地层压力,在射孔枪引爆后井筒和地层间形成一个大的压差以实现孔道清理^[4-6]。Walton I. C.等^[7]认为负压射孔产生的孔道清理由井筒内的最大负压差起主

要控制作用,并非由井筒内的初始压力值决定。后期,研究人员通过试验测试分析井筒内的瞬态射孔压力,认为前期研究没有考虑井筒内压力波动引起孔道内的涌流对孔道内岩石碎屑的清理作用,但不能完全将射孔孔道内的岩石碎屑清理干净。King G. E.等^[8]利用油管输送负压射孔装置对油气井进行负压射孔,并公布了现场测试数据。由于测试的油气井在动态负压射孔后又采用酸化措施。研究人员认为在近井段采用负压射孔可以将压实带清理干净,无需再进行酸化处理。Johnson A. B.等、Brooks J. E.等^[9-12]在负压射孔的基础上发展了动态负压射孔技术,认为在射孔中实现动态负压与初始井筒压力、油藏压力、射孔枪、射孔弹类型、井结构、油藏渗透率及油藏岩石强度相关。在射孔弹引爆期间和之后一段时间井筒内压力变化很大,压力震荡是由于射孔弹引爆和金属射流侵入井筒液体产生的^[13]。Behrmann L. A.^[14]认为射孔弹爆炸后的产物和井筒内的流体会侵入到金属射流侵彻油气藏岩石产生的孔道内,并引起渗透率的下降。而金属射流具有极高的速度(7 000~12 000/s)和温度,与油气藏岩石之间的侵彻作用十分复杂。在侵彻过程中射孔孔眼内金属射流初始碰撞岩石时具有高温(5 000 K)、高压状态(200 GPa),后续金属射流撞击岩石时的温度约为1 000 K,压力约为20 GPa^[15-16]。因此射孔孔眼内的压力高于井筒内的压力,爆炸后除金属射流以外的产物及井筒内的流体不能侵入到孔眼中。为进一步增大射孔孔眼与井筒内的压力差,实现将压实带清理出射孔孔道,将井筒内的液柱降至一定高度,实现负压射孔。杨子等^[17]采用经验公式计算方法计算出负压差最佳值,但未考虑实际操作压力值的影响。对于深井储层,并不一定适用负压射孔,对于孔隙度较低,正压射孔会严重污染地层,射孔碎屑会残留在射孔孔道内。候明明等^[18]研究了高温高压井射孔工艺技术,选择延时起爆方式和设置起爆压力与负压值相近,避免泄压时间过长而导致负压失败,但不能评价负压射孔对孔道清理的作用。在现场应用方面,赵金龙^[19]利用连续油管输送射孔装置进行井下射孔,并利用井下封井防止发生井口溢流、井涌和井喷现象,其根本目的不是为了控制射孔孔道负压值的持续时间。马金良等^[20]进行分层射孔,利用减震和泄压工具降低射孔产生的高压对二级射孔装置的影响,同样不是为了射孔孔道清理有效泄压作用。为

有效清理射孔孔道内的岩石碎屑,动态负压射孔受到极大的重视,但是其作用机理至今尚不明确。

近年来,动态负压射孔的研究主要集中在对动态负压射孔的物理模拟实验,测试动态负压的压力变化及对套管安全性的评估。但是,已有的动态负压射孔模型并不能全面地对整个射孔过程进行模拟。现场生产数据能够对射孔完井做出经验性效果评价,但不能给出准确的负压值和评估孔道的流通性。Jean R.和 Halleck P. M.等^[21-23]提出的射孔清洁模型能够给出负压值、地层渗透率和预测其孔道清洁效果。该模型认为附着在孔道壁上由岩石碎片和射孔残片组成的颗粒在超过最小达西流速的条件下由涌流携带出射孔孔道。为了进一步对涌流清洗孔道过程的理解,Halleck P. M.等^[24]分别在 Berea 砂岩和 Bedford 石灰岩岩心上进行了两次射孔流通性测试实验。实验结果表明,碎屑清洗是由射孔孔道末段岩层粉碎区中的碎屑发生着环绕着金属弹头的轴向流动进入到井筒中。可以确定,压实带的碎屑除了径向流的作用,还受到强烈的轴向涌流携带作用瞬时被冲洗出射孔孔道,但未给出涌流的介质是液体还是气体。

本文开展利用装有井下封隔器的动态负压射孔装置进行动态负压射孔并测试井筒内的动态压力,研究动态负压压力变化特征。并与未装有井下封隔器的动态负压射孔装置进行动态负压射孔的动态负压变化特征比较,确定射孔孔道内携带压实带碎屑的涌流介质。

1 动态负压射孔背景

Q-X 井采用油管输送式射孔枪进行动态负压射孔。Q-X 井为新钻竖井,井深为4 276.0 m,测试射孔深度为3 453.0~3 459.0 m,井下套管外径0.139 m,套管内压井液为清水,液柱高度为2140.0 m。

油藏地层性质为致密砂岩,孔隙度为5%~8%,渗透率为0.01~1.50 mD。射孔区间底部深度为3 459.0 m,厚度为6.0 m,射孔区间地层压力为35~41 MPa,射孔时井筒压力初始状态为正压29.7 MPa。射孔枪采用102式射孔枪,按60°相位角装配91发射孔弹,实际射孔长度为6 m。泄压腔安装在射孔枪的底部,同时在泄压腔内安装有射孔弹,该类型射孔弹的功能是实现泄压腔壁面盲孔进行开孔,并在开孔的过程中不破坏套管。高分辨率电子压力计安装在泄压腔的底部,用于监测射孔

弹引爆后产生的冲击波在井筒内的传播压力。在 Q-X 井内距离射孔枪顶部 66.21 m 位置处安装有一封隔器(表 1),用于分割套管内的液体。

表 1 Q-X 井动态负压射孔装置部件列表

Table 1 Parts list of dynamic negative pressure perforating device in Q-X Well

部件名称	内径/ mm	外径/ mm	深度/ m
油管	62	73	3 318.47
油管	62	73	3 338.58
反循环接头	—	108	3 338.91
油管	62	73	3 357.88
RD 阀	—	98	3 360.03
机械测压装置	—	98	3 361.84
STV	45	98	3 369.31
电子测压装置	—	98	3 370.86
液压旁通阀	45	98	3 380.25
安全接头	—	98	3 381.23
油管	62	73	3 390.73
转导接头	—	98	3 391.25
封隔器(1)	—	116	3 392.79
定中心器	—	112	3 392.99
减震器	—	102	3 394.09
管接头	—	98	3 394.74
油管	62	73	3 451.07
点火头(2)	—	89	3 453.00
射孔枪(3)	—	102	3 459.00
泄压腔(4)	—	102	3 463.02
电子测压装置(5)	—	98	3 464.12

2 动态负压射孔测试结果

利用连续油管输送安装有动态负压射孔装置到 Q-X 井射孔段进行动态负压射孔。

Q-X 井在试产阶段原油日产量为 44.47 m³,比采用常规射孔技术的邻井产量高 50%,可以推断井筒和射孔孔道间的压力差引起的涌流对碎屑(炸药残片和岩石碎片)起到了清理作用,消除因常规射孔孔眼附近区域存在“压实带”而导致渗透率下降的不利影响,同时提高射孔孔道的导流能力。图 1 给出了高分辨率电子压力计测试的压力曲线。可以发现,初始阶段测试压力为井筒内的液柱压力,约为 30 MPa。射孔弹引爆后射孔枪最底端位置射孔弹产生的爆炸波作用于射孔枪,射孔枪结构内的应力波通过射孔枪及泄压腔结构壁面向下方传播,由于高分辨率电子压力计紧密安装在泄压腔结构底部,会对电力压力计产生一个加速度,从而导致处于静压状态下的压力计产生与静压方向相反的

负压力值,静压力值与负压力值进行叠加,其叠加后的压力值在 15~18 MPa 之间震荡。井筒内液体冲击波向井下传播并与井底油嘴发生相互作用产生一个向上的反射波。当反射波与电压托筒接触发生反射,压力计测试的压力值升高至 19.5 MPa,由于液体中的应力波的传播衰减以及井筒内的液体未发生流动,所以才导致压力计测量的压力值未高于 30 MPa。

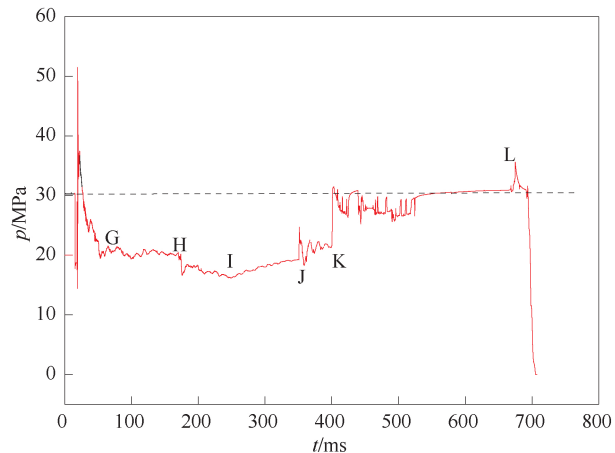


图 1 带封隔器油管传输动态负压射孔阶段压力曲线
Fig.1 Pressure curve of dynamic negative pressure perforating stage with packer tubing

射孔弹在射孔枪内以螺旋均匀方式布置,引爆后产生的高压气体进入到射孔枪与套管的环空区域,可近似作为一个空腔膨胀的爆炸源,高压气体作用于液体形成的冲击波在环空区域内传播,其传播速度可以利用(1)式计算得到^[25],即

u_s = 1.483 + 24.306lg(1 + $\frac{u_p}{5.19}$) (1)

式中: u_s 为水冲击波波速,km/s; u_p 为冲击波后流场速度,km/s。

u_p 是随着冲击波阵面压力变化的流畅速度,在井下难以测量,但是压力可以测量。利用(2)式可近似确定(1)式冲击波后流场速度,即

u_p = $\frac{p_w}{\rho_w u_s}$ (2)

式中: ρ_w 为水密度(可近似为不可压缩流体,取值 1),g/cm³; p_w 为水介质的冲击压缩应力,GPa。

射孔弹引爆后水介质的冲击压缩应力沿着井筒传播发生变化,可以近似取均值为 40 MPa。将(2)式代入(1)式可以得到环空区域中水的冲击波波速为 1 538 m/s。

第一个冲击压力峰值到最高压力峰值出现的时间间隔是 4.5 ms,传播距离是 6.9 m。根据表 1

中的射孔枪、动态负压装置及电压托筒的长度,确定电子测压装置到射孔枪段底部的距离 5.12 ~ 8.12 m 之间。因此,可以判断射孔段中间部分爆生气体作用环空区域液体产生的冲击波波阵面向井筒底部运动。

由于射孔枪顶部射孔段内的射孔弹引爆后产生的冲击压力也向下传播,传播距离约为 11 m,而图 2 中 AD 段的时间间隔为 7.2 ms,可以确定,在液体冲击压力下降的过程中,冲击压力又突然升高,达到压力峰值。达到 37.4 MPa(图 2 中 D 点)是由射孔枪顶部射孔段内的射孔弹引爆产生的冲击压力引起的。在冲击压力达到 D 点后,压力急剧下降。此时,环空区域中的液体在靠近泄压孔位置处,遇到泄压腔中的泄压边界而导致冲击压力急剧下降(图 2 中 DE 段)。压力曲线 EF 段表征的是环空区域中流体具有向泄压腔内流动的趋势。但是,由于环空区域中的流体具有很大的惯性,导致流体向井下运动。冲击波阵面后的流体在惯性作用和泄压腔的负压作用共同影响下,使电子测压装置测试的压力值出现震荡。冲击压力波在套管内传播至井底油嘴时发生反射,反射波经过电子测压装置而导致压力升高。FG 段为反射波引起的压力升高过程。反射波波阵面经过电子测压装置后,压力处于稳定(GH 段),但稳定时间极为短暂。此阶段泄压腔与套管环空区域内的流体向泄压腔内流动,从而导致在 H 点测到的压力值急剧下降。此时,由于封隔器的存在,套管内的流体处于负压状态,向井筒内流动,导致压力缓慢下降(HI 段)。由于射孔后引起的负压值低于地层压力值,导致地层流体通过射孔后形成的孔眼流进井筒,导致井筒内的压力缓慢升高,但仍然低于井筒初始液柱引起的静压力,使封隔器上、下两侧存在一个压力差。当封隔器将要进行解封时,测试得到的压力为 19.2 MPa(J 点),不考虑封隔器与电子测压装置之间的液柱重力,封隔器两侧的压力差为 10.5 MPa;当封隔器开始解封时,压力差引起压力液柱的压力波动;封隔器完全解封后,井筒将恢复初始压力状态。但在恢复过程中,存在约为 120 ms 的震荡过程。井筒内液体稳定后压力达到初始压力 29.7 MPa,将动态负压射孔枪提出井筒。由于动态负压射孔枪提出速度较快,电子测压装置产生一个加速度和液体的动态压力,导致测得的压力产生一个压力脉冲,其测得压力值达到 35.6 MPa(L 点)。

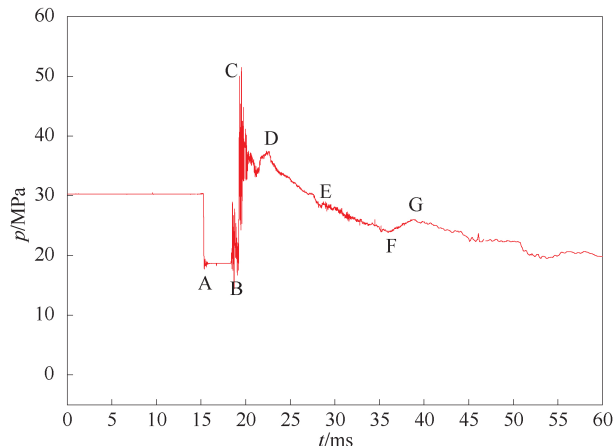


图2 带封隔器油管传输动态负压射孔阶段压力曲线
(图1局部放大图)

Fig.2 Pressure curve of dynamic negative pressure perforating stage with packer tubing
(Partial enlarged view of Fig. 1)

Q-X 井动态负压射孔是在一个近似封闭区域内进行的。通过测得动态压力曲线可以看出,负压持续时间达到 380 ms,并且在负压阶段压力上升幅度较小,证明地层中流体并未大量并瞬时的通过射孔孔道进入到井筒内。

为进一步证实油气储层中的流体在负压差下缓慢通过射孔孔眼流入到井筒内,对 Q 井进行动态负压射孔作业。储层射开厚度为 5.7 m,动态负压射孔装置并未安装有封隔器,测得动态压力曲线如图 3 所示。

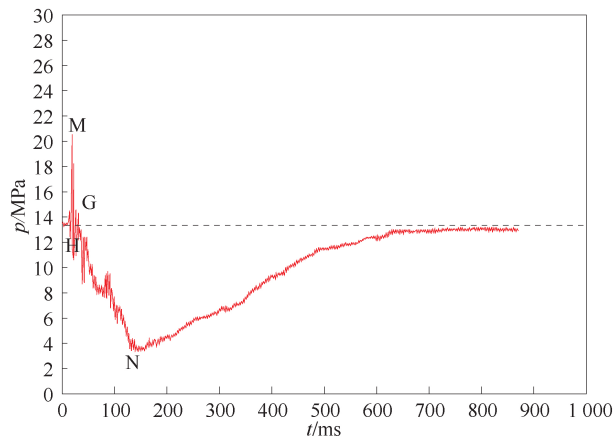


图3 无封隔器电缆传输动态负压射孔阶段压力曲线
Fig.3 Pressure curve of dynamic negative pressure perforating stage without cable packer transmission

通过图 3 可以看出,电子测压装置测得的动态压力曲线与图 1 中安装有封隔器的动态负压射孔中的压力曲线变化在初期变化趋势近似相同,但在后期完全不同。当动态负压值达到最小值后,压力缓慢上升,并逐渐恢复到初始状态。压力上升的主要

原因是井筒内的液柱波阵面经过测压装置后在上液柱的作用和部分地层流体流入到井筒内引起的压力逐渐恢复。

Q-X井动态负压射孔动态压力曲线显示,储层中流体流入到井筒导致压力升高幅值很小。因此,Q井中连通的液体引起的液柱压力是动态压力回升的主要原因。动态负压射孔中,对于不同的油藏地质条件,金属射流侵彻岩石产生的射孔孔道的长度可能不同,但导致孔道内体积差异与整个井筒内封闭体积相比很小,对动态压力变化的影响很小,可以不予考虑。

通过Q-X井和Q井的动态负压射孔压力曲线差异性比较,发现射孔孔眼中流入到井筒内的流体量很小,不足以引起高速流动的涌流携带岩石碎屑。可以推断,射孔孔眼内发生涌流是动态压力值达到最小值之前,这与Handren P. J.等^[26]认为射孔孔道内岩石碎屑清理程度与负压差的大小相关一致。动态负压射孔与正压射孔^[27-28]测得压力曲线特征差异性表现在压力曲线下降段的斜率不同,主要是由于环空区域内液体冲击波出现压力卸载,导致由爆生气体作用于液体界面形成的空腔急剧扩大,内部的压力值下降。射孔弹产生的金属射流侵彻油气储层后产生岩石碎屑压实带及高压气体,在射孔孔眼内高压气体在孔眼与井筒内压力梯度作用下使孔眼内壁卸载,压实带在压缩岩石卸载下出现脱离光滑壁面,并在高压气体涌流作用下携带出孔眼进入到井筒。

3 结论

(1)在安装有封隔器的动态负压射孔中,动态压力负压值持续时间长,揭示了金属射流侵彻油气储层形成的孔眼中介质不是油气储层流进的液体,而是由于金属射流侵入岩石产生的高压气体。

(2)动态负压射孔枪中的泄压腔通孔面积起到对射孔枪装置与套管环空区域内流体冲击波阵面的卸载作用,使波阵面及波阵面后的空腔压力下降,空腔内的低压力与射孔孔眼中的高压力形成负压差。

(3)射孔孔眼内涌流携带岩屑发生在动态负压射孔过程中的动态压力值达到最小值之前,因此可以优化动态压力最小值,防止因动态压力过小而导致井筒破坏。

致谢:本论文在研究过程中得到中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司的技术支持,并在撰写论文过程中给予指导,并帮助通过保密审查,在此表示衷心感谢。

参考文献

- [1] 袁吉诚.中国射孔技术的现状及发展[J].测井技术, 2002,26(5):421-425.
YUAN Jicheng. On the development of perforating technology in china[J]. Well Logging Technology, 2002, 26(5): 421-425.
- [2] 刘合,王峰,王毓才,等.现代油气井射孔技术发展现状与展望[J].石油勘探与开发,2014,41(6):731-737.
LIU He, WANG Feng, WANG Yucui, et al. Oil well perforation technology: Status and prospects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(6): 731-737.
- [3] 刘方玉,刘桥,蔡山.动态负压射孔技术研究[J].测井技术,2010,34(2):193-195.
LIU Fangyu, LIU Qiao, CAI Shan. Dynamic under-balanced pressure perforating technology and its application[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(2): 193-195.
- [4] HALLECK P M. Advances in understanding perforator penetration and flow performance [J]. SPE Drilling & Completion, 1997, 12(1): 19-26.
- [5] BEHRMANN L A. Underbalance criteria for minimum perforation damage [J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(3): 173-177.
- [6] WALTON I C. Optimum underbalance for the removal of perforation damage [J]. Lancet, 2000, 348(9023): 279-280.
- [7] WALTON I C, JOHNSON A B, BEHRMANN L A, et al. Laboratory experiments provide new insights into underbalanced perforating [C]. SPE 71642, 2001.
- [8] KING G E, ANDERSON A, BINGHAM M. A field study of underbalance pressure necessary to obtain clean perforations using tubing-conveyed perforating [J]. Journal of Petroleum Technology, 1986, 38(6): 662-664.
- [9] JOHNSON A B, BROOKS J E, BEHRMANN L A, et al. Reservoir communication with a wellbore: 6,598,682 [P]. 2003-6-29.
- [10] BROOKS J E, YANG W, GROVE B M, et al. Components and methods for use with explosives: 2003/0150646 [P]. 2003-8-14.
- [11] JOHNSON A B, BEHRMANN L A, YANG W, et al. Controlling transient underbalance in a wellbore: 2003/0089498 [P]. 2003-5-15.
- [12] BEHRMANN L A, HUGHES K, JOHNSON A B, et al. New underbalanced perforating technique increases completion efficiency and eliminates costly acid stimulation [C]. SPE 77364, 2001.
- [13] STUTZ H L, BEHRMANN L A. Dynamic under balanced perforating eliminates near wellbore acid stimulation in

- low-pressure webber formation [C]. SPE 86543, 2004.
- [14] BEHRMANN L A. Underbalance criteria for minimum perforation damage [J]. SPE Drilling & Completion, 1996, 11(3):173-177.
- [15] 向旭,赵世华,周伏虎. 石油射孔弹金属射流穿孔机理及金属粉末选用研究[J]. 测井技术, 2000, 24(6): 448-449.
XIANG Xu, ZHAO Shihua, ZHOU Fuhu. On perforating mechanism of jet in shaped charges and metal powder selection [J]. Well Logging Technology, 2000, 24(6): 448-449.
- [16] 陈光智,贺秋云,赵益秋. 高温高压高产气井测试技术在双探1井的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39(3): 31-33.
CHEN Guangzhi, HE Qiuyun, ZHAO Yiqiu. Application of HTHP and high production test technology in Shuangtan Well 1 [J]. Drilling and Production Technology, 2016, 39(3): 31-33.
- [17] 杨子,陈光峰,盛廷强,等. 负压射孔方式在海上油田探井测试中的应用于改进[J]. 钻采工艺, 2018, 41(4): 109-112.
YANG Zi, CHEN Guangfeng, SHENG Tingqiang, et al. Application and improvement of negative pressure perforation method in exploratory well of offshore oilfield [J]. Drilling & Production Technology, 2018, 41(4): 109-112.
- [18] 候明明,黄刚,张晓东. 高温高压井射孔工艺技术[J]. Well Testing, 2019, 28(3):14-20.
HOU Mingming, HUANG Gang, ZHANG Xiaodong. Perforating technology for high-temperature and high-pressure wells [J]. Well Testing, 2019, 28(3):14-20.
- [19] 赵金龙. 油管输送射孔井下封井技术研究[J]. 油气井测试, 2018, 27(3):46-51.
ZHAO Jinlong. Research on well sealing technology of tubing conveyed perforating [J]. Well Testing, 2018, 27(3):46-51.
- [20] 马金良,刘泽宇,李春宁,等. 一趟管柱分层射孔与水力泵排液联作技术[J]. 油气井测试, 2018, 27(2):22-26.
MA Jinliang, LIU Zeyu, LI Chunling, et al. Integration of layered perforation and flowback by hydraulic pump in one trip [J]. Well Testing, 2018, 27(2):22-26.
- [21] JEAN R, CREUSOT M R, FEUGAS D, et al. Viscous fluids characterize the crushed zone [J]. SPE Drilling and Completion, 1995, 10(3):198-203.
- [22] HALLECK P M, POYOL E, SANTARELLI F J. Estimating perforation flow performance from variation in indentation hardness [J]. SPE Drilling & Completion, 1995, 10(4):271-275.
- [23] OZGEN KARACAN C, GRADER A S, HALLECK P M. Mapping of permeability damage around perforation tunnels [J]. Journal Energy Resources Technology, 2001, 123(3):205-213.
- [24] HALLECK P M, KARACAN C O, HARDESTY J, et al. Changes in perforation - induced formation damage with degree of underbalance: Comparison of Sandstone and Limestone formations [C]. SPE 86541, 2004.
- [25] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:20-26.
- [26] HANDREN P J, JUPP T B, DEES J M. Overbalance perforating and stimulation methods for wells [C]. SPE 26515, 1993.
- [27] BEHRMANN L A, MCDONALD B. Underbalance or extreme overbalance [J]. SPE Production & Facilities, 1999, 14(3):187-196.
- [28] BAKKER E, VEEKEN K, BEHRMANN L, et al. The new dynamics of underbalanced perforating [J]. Oilfield Review, 2003, 15(4):54-67.

编辑 刘振庆

第一作者简介:咸玉席,男,1981年出生,博士,副研究员,2014年获中国科学技术大学博士学位,现主要从事爆炸力学、冲击动力学、油气勘探开发研究工作。电话:0551-63603674,15956912532;Email:yxxian@ustc.edu.cn。通信地址:安徽省合肥市蜀山区中国科学技术大学西区,邮政编码:230027。