

降低射孔爆轰伤害的超深探井测试管柱安全控制措施

曾小军^{1,2}, 任文希¹, 黄靖富², 贺秋云², 李明飞³

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院 四川成都 610500

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司试修公司 四川成都 610051

3. 西安石油大学机械工程学院 陕西西安 710065

通讯作者: Email: huangjf_ccde@cnpc.com.cn

项目支持: 中国石油天然气集团公司项目“230 °C/140 MPa 抗硫试油测试关键装备研制”(2021ZG09)

引用: 曾小军, 任文希, 黄靖富, 等. 降低射孔爆轰伤害的超深探井测试管柱安全控制措施[J]. 油气井测试, 2024, 33(3): 25-31.

Cite: ZENG Xiaojun, REN Wenxi, HUANG Jingfu, et al. Safety control measures for ultra-deep exploration well test string to reduce perforation explosion damage[J]. Well Testing, 2024, 33(3): 25-31.

摘要 国内超深探井试油采用射孔-测试联作工艺, 超深井小井眼射孔易出现封隔器下部管柱及封隔器中心管弯曲和断裂等井下复杂情况。根据气体克拉柏龙方程和爆轰气体能量公式, 导出射孔爆轰井底和封隔器处最大峰值压力计算公式; 根据管柱力学屈曲理论和材料力学弯曲理论, 导出射孔段管柱的弯曲应力计算公式; 结合峰值压力下的活塞效应, 导出射孔冲击载荷作用下管柱的应力计算公式, 判断管柱的强度安全。根据射孔段管柱力学分析成果, 采用改变管柱组合、调整工具下入顺序、加入双向减震器、分段延时射孔等技术, 建立了超深探井测试管柱安全控制措施。以 LX1 井为例, 实测了管柱震动加速度, 上、下高速压力计实测上、下峰值分别为 100、150 m/s² 和 60、80 m/s², 相差 40%~50%, 说明双向减震器可以起到减震降噪的作用。经多口超深井探井现场应用, 验证了安全控制措施的可靠性。

关键词 安全控制措施; 超深探井; 测试管柱; 射孔; 冲击载荷; 爆轰; 损伤

中图分类号: TE257

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.03.005

Safety control measures for ultra-deep exploration well test string to reduce perforation explosion damage

ZENG Xiaojun^{1,2}, REN Wenxi¹, HUANG Jingfu², HE Qiuyun², LI Mingfei³

1. SouthWest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China

2. China Petroleum Group Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd, Chengdu, Sichuan 610051, China

3. Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract: In domestic ultra-deep well testing, the perforation-testing combined process is utilized. However, in ultra-deep wells with small boreholes, issues such as bending and fracture of the lower part of the casing and the center tube of the isolation packer are prone to occur. Based on the gas Clapeyron equation and detonation gas energy formula, we derived a calculation formula for maximum peak pressure at the bottom of the well and at the isolation packer due to perforation detonation. Additionally, using tubular string bending mechanics theory and material bending theory, we derived a calculation formula for bending stress in perforated section tubular strings. By combining piston effects from peak pressures, we also derived a stress calculation formula for tubular strings under impact loads to assess their strength safety. Building upon results from mechanical analysis of perforated section tubular strings, technical measures were established for safe control of test tubular strings by altering string combinations, adjusting tool insertion sequences, adding bidirectional shock absorbers, and implementing segmented delayed perforations. Taking LX1 well as an example; measured acceleration of tubular string vibration was 100 m/s² (upper) and 60 m/s² (lower), while high speed pressure gauge measurements showed upper peaks at 150 m/s² and lower peaks at 80 m/s² - indicating a difference between them ranging from 40% to 50%. This demonstrates that bidirectional shock absorbers can effectively reduce vibration-induced losses. After being applied across multiple ultra-deep well exploration sites these measures have been validated for reliability in ensuring safety controls.

Keywords: safety control measures; ultra deep exploration well; test pipe string; gun perforation; impact load; detonation; injuries

射孔-测试联作技术从 2000 年应用至今, 在四川盆地累积应用超 500 余井次, 成功率达到 90% 以

上。但随着勘探开发向纵深发展,射孔-测试联作工艺出现了封隔器下部管柱永久弯曲和断裂、封隔器中心管断裂等井下复杂情况^[1-3]。

陈峰等^[4-5]针对超深井射孔过程产生的动态载荷对作业管柱的影响问题,采用理论经验公式和有限元分析软件,开展了不同射孔管柱长度、管柱厚度以及距离约束端长度等管柱力学模拟分析,总结出了有效缓解射孔管柱冲击的方法。蔡履忠等^[6]采用瞬态动力学理论和有限单元法,结合管柱动力学模型,成功分析水平井管柱在冲击载荷作用下的动态响应问题。

窦益华、李明飞等^[7-9]考虑高温高压超深井的实例,紧密结合单井井身结构、管柱结构及作业特点,摸索出一套试油管柱力学计算步骤,在该计算方法下,经井下管柱力学计算,安全系数大于1.6的井,未发生一起管柱事故。LIANGJIE MAO等^[10]重点研究射孔管柱的动态行为和失效分析。首先建立了耦合横向、纵向和扭转震动的射孔管柱动力学分析模型。采用有限元法将射孔管柱离散为梁单元,以某油田井为例,证明了模型的正确性。讨论了射孔管柱在爆炸载荷作用下的实际动态行为。分析了射孔参数和管柱结构对射孔管柱安全性能的影响。邓桥^[11]针对射孔工况下井筒安全问题展开了相关研究工作,采用数值模拟方法、静力学结合动力学分析,研究了不同射孔条件下管柱及封隔器动态响应过程和射孔管柱系统可靠性等方面的问题。

李海涛等^[12]对过程中,采用故障树分析法,建立了射孔测试联作行为可靠性概率评价模型,得出了关键部件对射孔测试联作系统可靠性的影响。曾志军等^[13]针对高温高压井管柱变形、断裂问题,分析了压力、温度变化和流体流动引起的各种效应对井下测试管柱受力和变形的影响,建立了井筒内温度、压力随井深变化的预测模型。何新兴等^[14]针对射孔管柱的断裂失效问题,以实例失效井为研究对象,提出异常现象的可能因素,得出提高射孔管柱的控制措施。揭志军等^[15]通过室内物理试验,验证了射孔水泥环损伤分析数值模型的有效性,并在此基础上,基于正交试验方法设计数值模拟方案,定量分析了水泥环损伤的影响因素及其影响规律。为避免射孔爆轰过程中所产生的问题,深井试油测试^[16-17]曾尝试“先下管柱射孔,再下管柱酸化-测试”工艺,该工艺在封隔器坐封前对气层进行射孔,通过增大射孔安全距离来避免射孔爆轰对管柱的

安全影响。

上述研究为射孔管柱强度安全性分析及断裂失效因素提供了经验,但研究以普通井居多,超深井失效断裂因素的研究较少,为此,针对射孔段并筒瞬时峰值压力开展理论分析,计算分析封隔器和射孔中心处的压力,以管柱力学屈曲理论和螺旋屈曲的临界荷载公式为基础,结合材料力学弯曲理论,导出射孔段管柱的弯曲应力分析公式,结合峰值压力下的活塞效应产生的应力,导出射孔冲击载荷作用下管柱的应力分析公式,从而判断管柱的强度安全。在深井射孔-测试联作中,通过现场实践针对射孔爆轰冲击载荷造成封隔器以下管柱损坏现象进行理论分析,总结与优化射孔管柱安全控制措施,开展射孔爆轰理论分析和主动减震技术攻关,优化相关标准规范,助推射孔管柱安全控制措施更加成熟可靠。

1 射孔井底压力与冲击载荷分析及管柱强度安全性分析

导致深井射孔爆轰压力及损伤增加的主要影响因素包括,深层地层的致密性高,射孔瞬时地层能量吸收较小;井筒容积小,能量扩散的空间有限;深层地层射孔弹的装药量增加,射孔爆炸能量增加,如JT1井装药量由45 g增加至60 g。射孔爆轰预测手段通常仅考虑瞬时冲击载荷,射孔爆炸瞬时对管柱的破坏,未考虑与射孔液压力脉动的双重作用下试油测试管柱将会承受更大损坏。

根据射孔弹聚能射流原理,将射孔爆轰过程分为两个阶段进行考虑。第一阶段是炸药爆轰瞬时阶段,聚能射孔弹药型罩微元运动到射孔弹中线,即压垮过程^[18]。高速金属射流形成后,先穿透套管,然后射穿固井水泥环,最终侵彻油气藏储层岩体,此过程可近似认为炸药在自由液体中的爆炸,爆炸时封隔器下部管柱受到高能量爆轰产物的冲击作用。第二阶段是爆轰产物在井筒有限空间剧烈波动,形成射孔液压力的阶段,爆炸后在装药和金属罩之间交界处,生成的爆轰产物以超快的速度向四周扩散,并剧烈地压缩周围的流体,使射孔液的温度,压力和密度骤然上升,形成初始气体压缩波,对管柱产生冲击作用,称为射孔瞬间管柱受到的冲击载荷^[19]。

管柱受到的冲击载荷是引爆射孔弹后直接产生的,相比假设冲击载荷数值作用到管柱上,该方法更能真实反映井下射孔后管柱的受力状况,包括射孔弹起爆后沿管柱的冲击载荷以及爆轰产物导

致的井筒空间压缩形成的压力波对管柱的作用,得到的结论误差相对较小^[20]。

针对射孔段井筒瞬时峰值压力开展理论分析,计算分析封隔器和射孔段中心处的压力。将压力转换为作用在射孔段管柱上的冲击载荷,如图1所示,分析冲击载荷作用下的射孔段管柱的强度安全性。

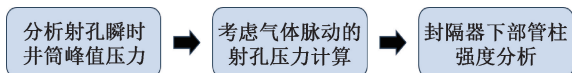


图1 基于射孔爆轰效应的管柱强度分析流程

Fig. 1 Process of pipe strength analysis based on perforation detonation effect

1.1 射孔瞬时井筒峰值压力分析

在收集并分析射孔弹炸药爆轰参数基础上,需要对射孔段瞬时井筒峰值压力开展分析,计算分析封隔器和“口袋”中心处的压力。

根据爆轰瞬时状态可将爆炸瞬间的理想气体状态方程引用以描述爆炸瞬间的首要状态,通过下述参数进行描述:爆压压强 p_{jv} 、爆温温度 T_{jw} 以及爆容体积 $n \times V_{jv}$ 。考虑到射孔瞬间会产生爆轰气体的快速扩散,将第二状态参数设置为温度 $T_b + 273$;根据射孔瞬间爆轰气体扩散的实际运动状态,假定射孔段长度 L_j 、人工井底与射孔段底部间距的二分之一 L_d (该距离应小于等于射孔段长度) 以及上部筛管段 L_s (上部筛管段需大于射孔段长度的二分之一) 的空间均被爆轰产生的气体充满,由此求得爆轰瞬间井底爆轰气体体积为

$$V_b = \frac{\pi}{4} d_c^2 (L_j + L_d + L_s) \quad (1)$$

式中: d_c 为内径, mm; L_j 为射孔段长度, m; L_d 为人工井底与射孔段底部间距的二分之一, m; L_s 为上部筛管段, m。

假定射孔爆轰过程中的峰值压力为 p_b , 将相应参数代入理想气体状态方程,推导出射孔爆轰瞬间峰值压力计算公式为

$$p_b = \frac{4 \times p_{jv} \times n V_{jv} \times (T_b + 273)}{\pi T_{jw} d_c^2 (L_j + L_d + L_s)} \quad (2)$$

式中: p_b 为爆轰峰值压力, MPa; p_{jv} 为炸药爆压, MPa; V_{jv} 为炸药爆容, m^3 ; T_b 为井底温度, $^{\circ}C$; T_{jw} 为爆温, $^{\circ}C$ 。

射孔-测试联作管柱受力如图2所示,射孔段处套管外径 D_c 、内径 d_c ,射孔段油管外径 D_t 、内径 d_t ,射孔段长度 L_j ,射孔弹数量 n ,井底温度 T_b ,井底的初始压力 p_0 。

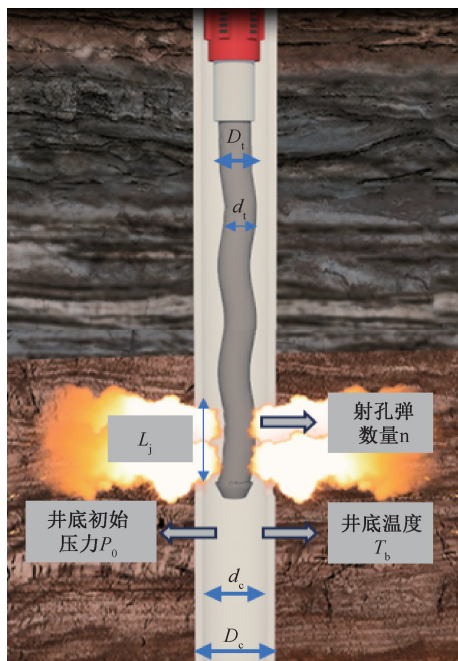


图2 射孔-测试联作管柱受力图

Fig. 2 Structure diagram of perforating-test combined operation drill string force

1.2 封隔器和井底“口袋”处射孔压力分析

聚能射孔爆轰后,产生的爆生气体随着压井液上升而继续膨胀,压力随之降低,当压力降到等同于井底流体的静压力时,在惯性的作用下使其继续上升,导致爆生气体过度膨胀。此时,内压比井底平衡压力低,上部压井液开始向下运动并压缩爆生气体,致使其收缩、压力增大。同时,爆生气体过渡压缩,使得其内压比井底平衡压力高,直到气体压力制止爆生气体压缩,状态达到新平衡时,第一次气泡脉动循环结束。第一次循环完成时,由于气泡内压会大于井底的静压,就达到了第二次膨胀和压缩的脉动过程产生的条件。封隔器处和“口袋”中心处的压力在第一次脉动过程中的某一时刻达到峰值。

当前聚能射孔弹炸药通常是各种成分组成的复合药剂,材料属性发生变化。利用爆轰气体能量公式,将其转化为常规炸药进行压力脉冲分析,即

$$E_j = \frac{p_1 V}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_0}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (3)$$

式中: E_j 为爆生气体能量, J; p_1 为爆轰压力, MPa; p_0 为作用层位处静压力, MPa; V 为爆生气体体积, m^3 ; k 为绝热指数,单原子气体取 1.66,双原子气体取 1.41。

有边界条件下,第一次压力脉动幅度最大,对管柱产生损伤最大。距爆点中心 L 处,当爆炸深度

大于临界爆深(当 $p_L > p_{max}$ 时取 $p_L = p_{max}$),则爆生气体脉动产生最大压力 p_L 为

$$p_L = 8.32(\sqrt[3]{E_j/L}) \quad (4)$$

式中: p_L 为距离爆点 L 处爆生气体脉动产生的最大压力,MPa; L 为所求压力处与爆点间距离,m。

1.3 射孔冲击载荷下射孔段管柱强度安全性分析

根据上式(4)计算射孔瞬间时刻封隔器处的压力 p_f 以及口袋处的压力 p_k 。射孔瞬间开口油管受到向上的冲击载荷 F_c 为

$$F_c = \frac{\pi}{4} p_k (D_i^2 - d_i^2) \quad (5)$$

根据螺旋屈曲的临界荷载公式为

$$F_{ch} = 5.82mq_e - (p_i A_i - p_o A_o) \quad (6)$$

其中 $m = \sqrt[3]{\frac{EI}{q_e}}$, $q_e = q + p_i A_i - p_o A_o$ 。

式中: E 为管材弹性模量,MPa; I 为管柱横截面惯性矩, mm^4 ; q 为每米长度管柱在空气中的重量, N/m ; p_i 为管内流体压力,MPa; p_o 为管外流体压力,MPa; p_i 为管内流体密度, kg/m^3 ; p_o 为管外流体密度, kg/m^3 ; A_i 为管柱内圆面积, mm^2 ; A_o 为管柱外圆面积, mm^2 。

由上式(5)及(6)式得,若 $F_c > F_{ch}$,则管柱在冲击载荷的作用下会发生螺旋屈曲,此时管柱所受弯矩为 $M_j = F_c(d_c - D_i)/4$,管柱外壁处的弯曲正应力为

$$\sigma_M = \frac{32M_j D_i}{\pi(D_i^4 - d_i^4)} \quad (7)$$

轴向冲击载荷产生的轴向应力 $\sigma_N = p_k$,若 $\sigma_M + \sigma_N < \sigma_s$,则管柱发生螺旋屈曲,但是此时管柱上应力小于其屈服强度,所以是非永久变形;若 $\sigma_M + \sigma_N \geq \sigma_s$,则管柱发生螺旋屈曲,此时管柱上应力大于其屈服强度。

2 超深探井测试管柱安全控制措施

在深井射孔-测试联作中,通过现场实践针对射孔爆轰冲击载荷造成封隔器以下管柱损坏现象进行理论分析,采取多种安全控制措施,成果较为明显。主要分为两类:

(1)在井筒环境及施工工艺可以进行调整

- ①通过改变管柱组合,来提高管柱的整体强度。
- ②不影响施工的前提下,调整管柱结构,即调整工具下入井筒的位置顺序,提升有效减震距离。

(2)井筒环境及施工工艺限制,不能对原有管

柱及施工工艺调整

采取减少爆轰效益影响的工艺技术,即在封隔器下部管柱中加入双向减震器,采用分段延时射孔等技术。主要控制措施策略如图3所示。

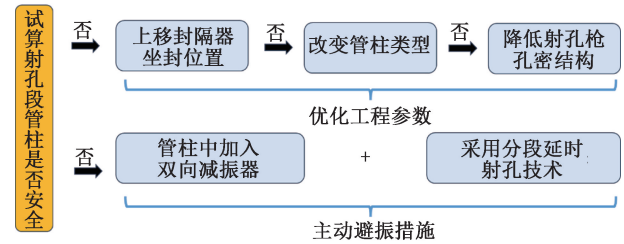


图3 射孔爆轰安全控制措施控制程序图

Fig.3 Control procedure diagram of perforating detonation safety control measures

2.1 优化工程参数降低射孔爆轰损伤的措施

依据自主研发的射孔段管柱强度安全性分析软件,需要提供单井的射孔弹参数、射孔参数、油套管管参数、封隔器参数、施工参数、储层参数等初步设计参数,试算射孔段管柱的安全系数。根据初步计算的结果,如果安全系数不满足要求,则需进行一系列的调整,以提高安全系数。

(1)上移封隔器坐封位置,扩大爆轰压力的扩散体积。增加封隔器与射孔枪顶界的长度,通过上述计算分析,可以通过增加口袋长度来降低射孔冲击载荷的突变压力,推荐射孔段上端和封隔器的距离不超过300m为宜,继续上移封隔器位置,对提高安全系数作用有限。

(2)改变管柱组合形式,提高管柱的整体强度。推荐封隔器与射孔枪之间宜选用110SS、壁厚7.0mm以上油管,接头、短接强度不小于油管本体强度。如110SS钢级仍不满足要求,可再次提高管柱材料钢级,如将壁厚6.45mm的P-110钢级油管换为Q-125钢级油管,可以提高射孔段管柱的安全系数约1.2倍。

(3)降低射孔枪射孔孔密,降低射孔爆轰能量。在确保储层压裂过流不受影响的情况下,降低射孔孔密,如将20孔/m降到16孔/m,降低射孔爆轰能量,减少射孔对射孔段管柱的损伤。

2.2 两种主动的减震措施

加双向减震器降低向上冲击对管柱的损伤。在封隔器下部管柱中加入双向减震器,通过射孔瞬间数据实采显示,射孔后管柱首先受到向上压缩的冲击,之后井筒压力下降同时在管柱自重作用下,管柱受到向下拉伸的冲击。管柱中加入双向减震器将有效缓解吸收管柱轴向上的拉压冲击载荷。

采用分段延时射孔技术降低爆轰瞬时的能量,减少损伤。该技术可以避免高压条件下射孔冲击载荷叠加影响,提高管柱安全系数。现场实践表明,两层射孔厚度相差不大时,建议优先对上层射孔;两层射孔厚度相差较大时,建议优先对射孔段较短段进行射孔;两层物性相差较大,压力恢复时间差异大,建议优先对恢复时间快的井段进行射孔。

3 超深探井测试管柱安全控制措施应用实例

通过射孔段管柱强度安全校核结合控制措施,深井测试管柱现场应用中未发生管柱破坏的复杂问题。以 LX1 井为例,该井是 1 口重点风险勘探井,采用射孔-酸化-测试联作工艺。目的为探索川西北地区茅口组-吴家坪组台缘滩相储层含气性,开辟规模勘探新领域的一口风险探井,为后期区域研究分析提供资料。

3.1 LX1 井井况分析

层位为吴家坪组,射孔井段套管内径 $\phi 144.14$ mm,射孔井段 6 990.00 ~ 6 995.00 m、7 015.00 ~ 7 035.00 m,射孔厚度 25 m,压井液密度 1.8 g/cm^3 。射孔枪技术参数:121 射孔枪,孔密 16 孔/m,装药量 45 g/发,相位 60° 。管柱结构(自上而上):88.9 mm 油管挂+88.9 mm 油管(内径 64.72 mm)+88.9 mm 油管(内径 69.84 mm)+127 mm APR 工具组合+168.2 mm RTTS 封隔器+98 mm 筛管+88.9 mm 油管(内径 69.84 mm)+73 mm 减震器+73 mm 射孔枪组。详细的管柱结构图如图 4 所示。



图 4 LX1 井管柱组合图

Fig. 4 Well LX1 pipe assembly diagram

3.2 LX1 井的安全控制措施及效果

使用射孔段管柱强度安全性分析软件,初步分析初始设计射孔段管柱的强度安全。LX1 井采用钢级 110ss 壁厚 6.45 mm 油管与初始封隔器坐封位置,经测算,不能满足安全系数要求。因此通过调整油管壁厚至 9.53 mm,增加了管柱整体强度和刚度;上移封隔器坐封位置,将封隔器坐封位置与射孔顶界位置由 180 m 调整至 295 m,扩大了能量的释放空间,减少射孔冲击载荷对射孔管柱的损伤。LX1 井射孔酸化测试联作技术采用了提高管柱强度与上移封隔器坐封位置的控制措施,射孔酸化测试作业完成后成功取出测试管柱,封隔器下部未发生失稳,工艺效果良好。

另外,LX1 井在射孔枪上部两根油管上部配置了双向减震器,减震器上部安装了上压力计,减震器下部安装下压力计,并实测了压力和管柱的震动加速度,如图 5 和图 6 所示。

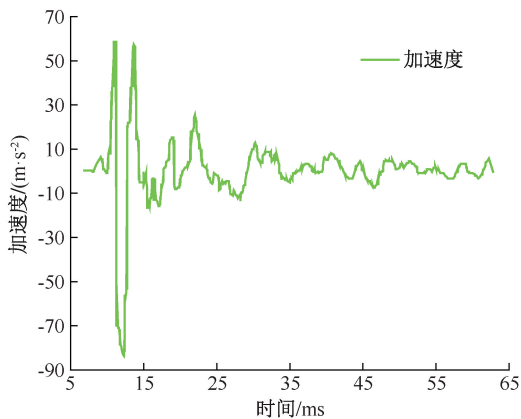


图 5 LX1 井上压力计实测加速度图

Fig. 5 Acceleration measured by pressure gauge in well LX1

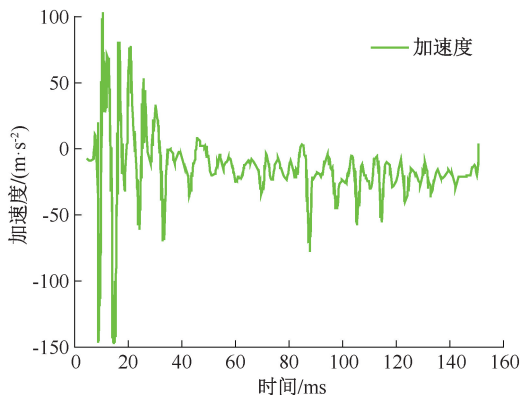


图 6 LX1 井下压力计实测加速度图

Fig. 6 Acceleration measured by pressure gauge in well LX1

由图 5 和图 6 可以看出,下压力计在减震器之

下,爆轰瞬时,减震器对上压力计起不到减震效果,所以实测结果上下峰值分别为100和150,上压力计在减震器之上,爆轰瞬时,减震器对下压力计起到减震效果,所以实测结果上下峰值分别为60和80,相差40%~50%左右,说明双向减震器减震效果明显,可以起到减震降损的作用。

深井超深井射孔-测试联作工艺安全控制措施指导了22井次的射孔-测试联作顺利实施,其中19井次通过改变油管类型、优化减震器、上移封隔器位置、分段延时射孔提升了安全系数。其中JT1井采用分级射孔引爆方式,降低射孔冲击载荷;PS2井采用采用双向减震工艺,有效缓解了爆轰下的管柱运动加速度;PS7井通过调整封隔器坐封位置,保障了在1.30~1.40 g/cm³工作液下射孔作业过程中油管安全。因此通过开展射孔爆轰理论分析和主动减震技术攻关,优化相关标准规范,可以助推该项技术更加成熟可靠。

4 结论

(1)在准确计算爆轰参数的基础上,将爆轰参数计算得到的爆温、爆压、爆容视为第一状态,将爆轰后爆生气体的扩散作为第二状态,根据气体克拉伯龙方程,导出射孔爆轰井底的最大峰值压力分析公式。依据井底峰值压力,利用爆轰气体能量公式,将其转化为常规炸药进行压力脉冲分析,建立爆轰引起的封隔器处峰值压力的分析方法。

(2)根据管柱力学屈曲理论和螺旋屈曲的临界荷载公式,结合材料力学弯曲理论,导出射孔段管柱的弯曲应力分析公式,结合峰值压力下的活塞效应产生的应力,导出射孔冲击载荷作用下管柱的应力分析公式,判断管柱的强度安全。

(3)以四川盆地某超深探井LX1井为例,在射孔枪上部两根油管上部配置了双向减震器,减震器上部安装了上压力计,减震器下部安装下压力计,并实测了压力和管柱的震动加速度,上、下高速压力计实测结果上、下峰值分别为100、150 m/s²和60、80 m/s²,相差40%~50%左右,说明双向减震器可以起到减震降损的作用。

(4)根据本文射孔段管柱力学分析成果,结合现场实践验证,分别采用:改变管柱组合,来提高管柱的整体强度;调整工具下入井筒的位置顺序,提升有效减震距离;在封隔器下部管柱中加入双向减震器,采用分段延时射孔等技术,建立了超深探井

测试管柱安全控制措施。

致谢:本文在撰写过程中,川庆钻探试修公司的各位同事,尤其是现场的同事给与大力的支持和帮助,提供了宝贵的现场第一手资料和数据,也要感谢导师给与的指导和修改完善。同时也要感谢西安石油大学相关老师提供的技术支持。

参考文献

- [1] 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.
- [2] BATARSEH S I, SAN-ROMAN-ALERIGI D, ALOBAID O M. Laser Gun: The Next Perforation Technology[J]. The Saudi Aramco Journal of Technology, 2019 (Summer): 2-12.
- [3] 骆劲羽,杨晓勇,张鹏,等.射孔压裂封隔一体化压裂管柱的改进[J].油气井测试,2021,30(5):50-54.
LUO Jinyu, YANG Xiaoyong, ZHANG Peng, et al. Improvement of perforation, fracturing and packer integrated fracturing string[J]. Well Testing, 2021, 30(5): 50-54.
- [4] 陈锋,陈华彬,唐凯,等.射孔冲击载荷对作业管柱的影响及对策[J].天然气工业,2010,30(5):61-65.
CHEN Feng, CHEN Huabin, TANG Kai, et al. Influence of perforating impact load on the operating string and the counter measures [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(5):61-65.
- [5] 陈锋,杨登波,唐凯,等.油气井射孔技术现状及发展探析[J].测井技术,2021,45(1):1-7.
CHEN Feng, YANG Dengbo, TANG Kai, et al. Current status and development analysis of perforating technology in oil and gas well [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(1): 1-7.
- [6] 蔡履忠,赵焜,薛世峰,等.射孔作业过程管柱结构动态响应分析[J].石油矿场机械,2015,44(5):26-30.
CAI Lvzhong, ZHAO Xuan, XUE Shifeng, et al. Dynamic response analysis of string structure during perforating process[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(5): 26-30.
- [7] 窦益华,张福祥.高温高压深井试油井下管柱力学分析及其应用[J].钻采工艺,2007,30(5):17-20.
DOU Yihua, ZHANG Fuxiang. Mechanical analysis of well testing down-hole string in deep well with hthp and its application[J]. Drilling & Production Technology, 2007, 30(5): 17-20.
- [8] 李明飞,康兵辉,王桥,等.典型工况下完井管柱伸缩管力学分析及安全性评价[J].石油钻采工艺,2022,44(1):37-42.
LI Mingfei, KANG Binghui, WANG Qiao, et al. Mechanical

- analysis and safety evaluation on telescopic tube contained in completion string undertypical working conditions [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(1): 37-42.
- [9] 李明飞, 徐绯, 窦益华. 爆轰冲击载荷作用下射孔段管柱动态损伤分析[J]. 震动与冲击, 2019, 38(18): 185-191.
LI Mingfei, XU Fei, DOU Yihua. Dynamic response analysis of a perforated pipe string under detonation impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(18): 185-191.
- [10] MAO, LIANGJIE, JUAN ZHANG. Dynamic behavior and failure analysis of perforating string under explosive load [J]. Engineering Failure Analysis, 2022, 136, 106222.
- [11] 邓桥. 射孔工况下井筒安全性分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
DENG Qiao. Safety analysis for downhole wellbore during perforating[D]. China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [12] 李海涛, 韩岐清, 张国辉, 等. 射孔与测试联作管柱可靠性评价[J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 96-98.
LI Haitao, HAN Qiqing, ZHANG Guohui, et al. Reliability evaluation for the combined operation string of perforating and testing[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(7): 96-98.
- [13] 曾志军, 胡卫东, 刘竟成, 等. 高温高压深井天然气测试管柱力学分析[J]. 天然气工业, 2010, 30(2): 85-87.
ZENG Zhijun, HU Weidong, LIU Jingcheng, et al. A mechanical analysis of the gas testing string used in HTHP deep wells[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2): 85-87.
- [14] 何新兴, 陈建波, 刘洪涛, 等. 射孔管柱断裂失效分析及其控制措施[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 222-226.
HE Xinxing, CHEN Jianbo, LIU Hongtao, et al. Perforation string fracture failure analysis and its control measures [J]. Well Logging Technology, 2021, 45(2): 222-226.
- [15] 揭志军, 韩耀图, 唐英才, 等. 射孔侵彻过程固井水泥环损伤影响因素分析[J]. 石油矿场机械, 2019, 48(6): 15-20.
JIE Zhijun, HAN Yaotu, TANG Yingcai, et al. Analysis of influencing factors of cementing ring damage during perforation and penetration [J]. Oil Field Equipment, 2019, 48(6): 15-20.
- [16] 中国国家标准化委员会. 油气井聚能射孔器材性能试验方法:GB/T 20488-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-34.
- [17] 中国国家标准化委员会. 油气井聚能射孔器材通用技术条件:GB/T 20489-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1-14.
- [18] 卢熹, 王树山, 马峰, 等. 爆炸冲击作用下射孔管柱动力学响应试验[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(33): 53-56.
LU Xi, WANG Shushan, MA Feng, et al. Dynamic responses test of perforating string section under explosion impact[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(33): 53-56.
- [19] 陈华彬, 陈峰, 唐凯, 等. 射孔对油层套管动态力学研究进展[J]. 测井技术, 2016, 40(5): 650-653.
CHEN Huabin, CHEN Feng, TANG Kai, et al. Dynamic mechanical study on reservoir casing perforation progress [J]. Well Logging Technology, 2016, 40(5): 650-653.
- [20] 尹长城, 王元勋. 冲击载荷下的石油测试管柱减震系统的数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2007, (10): 8-10.
YIN Changcheng, WANG Yuanxun. Numerical analysis of oil testing pipe shock absorber system under Impact load [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, (10): 8-10.

编辑 穆立婷

第一作者简介:曾小军,男,1981年出生,高级工程师,2005年获得中国石油大学(华东)石油工程专业学士学位,2021级西南石油大学硕士研究生在读,现从事试油测试工艺技术研究与技术管理工作。电话:18981052750,Email:zengxj_sc@cnpc.com.cn。通信地址:四川省成都市成华区龙潭寺街道华泰路42号,邮政编码:610050。