

海上油气井测试射孔峰值压力预测方法

赵幸滨

中海石油(中国)有限公司上海分公司勘探部 上海 200335

通讯作者: Email: zhaoxb2@cnoc.com.cn

项目支持: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目“海上深层/超深层储层经济产能获取技术研究”(KJGG2022-0406)

引用: 赵幸滨. 海上油气井测试射孔峰值压力预测方法[J]. 油气井测试, 2024, 33(1): 14-18.

Cite: ZHAO Xingbin. Peak pressure prediction method for testing and perforating in offshore wells[J]. Well Testing, 2024, 33(1): 14-18.

摘要 为有效降低海上油气井射孔测试联作施工安全风险,以东海常用套管、油管、射孔枪、射孔弹组合为参考,建立了射孔管柱有限元数值模型。利用控制变量法,结合射孔峰值压力数值模拟结果,分析了总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间等参数与射孔峰值压力的相关性,在此基础上,通过多元非线性回归建立了射孔峰值压力的计算公式。利用2口井射孔实测压力结果对公式进行验证,射孔峰值压力相对误差分别为6.1%和9.8%,在合理误差范围内。该公式可用于射孔作业前的峰值压力预测,为现场及时作出安全决策提供指导和支持。

关键词 射孔联作测试;射孔峰值压力;总装药量;井筒初始压力;爆炸空间;有限元数值模型;多元非线性回归

中图分类号: TE353

文献标识码: B

DOI: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2024.01.003

Peak pressure prediction method for testing and perforating in offshore wells

ZHAO Xingbin

Department of Exploration of Shanghai Company, CNOOC(China)Co., Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: In order to effectively reduce the safety risks in combined perforating and testing process in offshore wells, a finite element numerical model of the perforation string was established based on the commonly used casing, tubing, perforating guns, and perforating charges in the East China Sea. By using the controlled variable method, together with the numerical simulation results of peak perforating pressure, the correlation between three parameters (total charge, initial wellbore pressure, and explosion space) and peak perforating pressure was analyzed. Then, an empirical formula for peak perforating pressure was developed through multivariate nonlinear regression. The formula was validated using measured perforating pressures in two wells, with relative errors of 6.1% and 9.8%, respectively, falling within a reasonable error range. This formula can be employed for predicting peak pressure before perforating operations, providing guidance and support for timely safety decisions on site.

Keywords: combined perforating and testing process; peak perforating pressure; total charge; initial wellbore pressure; explosion space; finite element numerical model; multivariate nonlinear regression

海上油气井广泛采用TCP+APR射孔联作测试工艺,在建立井筒与储层间渗流通道的同时,射孔弹爆炸瞬间释放到井筒内的动态载荷会对射孔管柱及测试工具产生强烈的冲击破坏作用,容易引发各种安全事故,如射孔枪炸裂、射孔管柱损坏、封隔器失效等。随着射孔工艺不断向高孔密、大药量、深穿透等方向发展,射孔冲击破坏效应愈加显著,如何有效降低射孔作业风险、提高现场射孔安全已成为作业管理及技术人员关注的焦点^[1-2]。

井下射孔压力问题涉及到井筒狭长密闭空间,

边界条件复杂,且伴随环空液体变形与井下管柱结构产生相互作用的流固耦合现象,理论计算及实验方法很难全面描述井筒压力的动态变化过程。当前进行相关分析多借助数值仿真模拟,该方法可以模拟射孔动态过程,并可随时读取射孔管柱不同位置的关键数据,从而为深入研究管柱安全性问题提供数据基础。陈华彬等^[3]建立了数值仿真模型,并通过聚能射孔实验进行了模型验证,建立了射孔环空压力的经验计算模型;杨航^[4]基于LS-DYNA软件,建立了包含射孔弹、射孔枪、油管、射孔液、套

管、水泥环、储层等单元的数值模型,分析了围压及岩石抗压强度对射孔段管柱应力变化的影响规律;窦益华等^[5-6]利用有限元数值分析,成功解释了某高温高压井射孔联作测试封隔器中心管损坏的原因,并进行了油套管强度相关影响因素分析;张文斌等^[7]进行了射孔瞬时井下冲击载荷压计算模型研究,并结合数值模拟方法分析了射孔长度、引爆间隔、总装药量、井底“口袋”深度等因素对冲击载荷的影响规律;张伟等^[8]、徐成^[9]建立了射孔管柱有限元数值模型,分析射孔爆炸过程管柱振动位移、加速度、等效应力等参数的变化规律,为管柱组合优化提供依据;李明飞等^[10]基于有限元软件的仿真结果获取了射孔管柱动力学数据,并结合射孔压力实测结果,对模型可靠性进行了验证。本文在前人研究基础上,聚焦射孔瞬时峰值压力预测,利用 ANSYS/LS-DYNA 软件进行了射孔管柱有限元数值模拟,分析影响射孔峰值压力的主要因素,并依此构建了峰值压力预测模型。模型简单易用,能够帮助现场作业快速判断井下受力峰值,为现场及时作出安全决策提供指导和支持,有利于避免井下事故的发生。

1 数值模型的建立

在确保数值模拟计算准确的前提下,为了降低模型的运算量,基于海上油管输送常用射孔系统,对射孔数值模型进行了合理简化。井下射孔系统一般包含封隔器、压力计托筒、油管、点火头、安全枪、减震器、射孔枪等组成部分,除封隔器以外,其它部分为相串联结构,可简化为一个整体,简化后的射孔系统如图 1 所示。

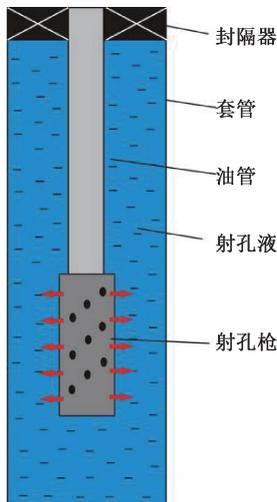


图 1 简化的射孔系统
Fig. 1 Simplified perforating system

以东海常规射孔井工况参数作为参考进行建模:套管外径 177.8 mm,壁厚 12.65 mm;射孔枪外径为 127 mm,壁厚 11 mm,盲孔厚度 4 mm,盲孔直径 40 mm;射孔弹药型罩直径 41 mm,装药高度 41.5 mm,锥角 60°,厚度 1.5 mm,罩顶弧度 80°,药型为 HMX,单颗装药量 45 g;射孔密度 16 孔/m,相位角 60°。

模型网格划分上,参考前人研究认识,枪管内的空气、环空射孔液、炸药及药型罩采用 Arbitrary-Lagrange-Euler(ALE)算法;油管、套管、射孔枪等采用 Lagrange 单元算法。炸药和药型罩之间,药型罩、射孔枪、套管与气体之间的接触采用 Surface to-Surf-Eroding(ESTS),即侵彻接触类型,三维数值模型局部网格划分如图 2 所示。

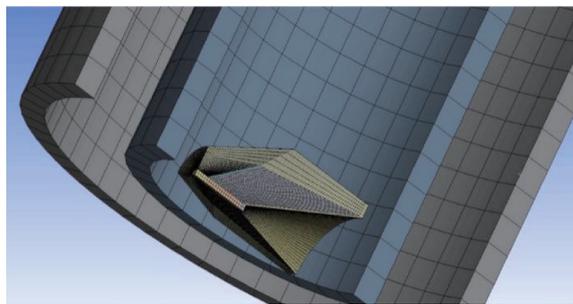


图 2 三维数值模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of 3D numerical model

基于建立的模型进行模拟计算,分别在射孔中部、底部及封隔器位置的井液单元提取压力随时间变化曲线(见图 3)。可以看出,射孔段作为爆炸源头,其峰值压力最大,随着压力波沿着井筒向上或者向下传播出现一定衰减,这与水下爆炸相关理论认识一致^[11-12]。

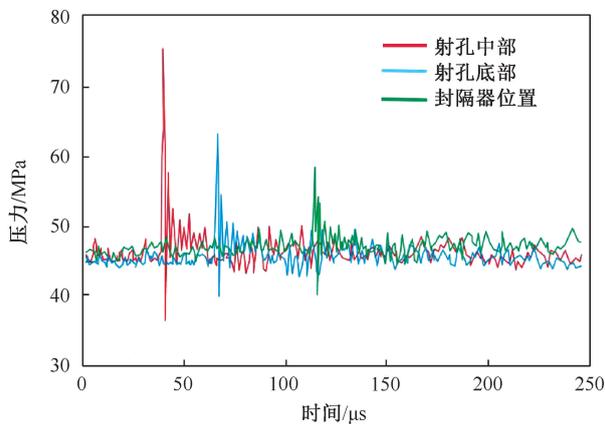


图 3 井筒不同位置提取的压力-时间变化曲线
Fig. 3 Pressure-time curves extracted at different positions of the wellbore

2 射孔峰值压力预测模型的建立

进行射孔峰值压力的预测,首先需要明确影响峰值压力的主要影响因素,参考密闭容器内炸药爆炸压力经验公式(式1),考虑射孔弹药置于密闭套管内,则密闭容器内射孔弹爆炸压力与炸药性质、总装药量、爆炸空间等因素密切相关^[13],即

$$P = \frac{f\omega}{V - \alpha\omega} \quad (1)$$

式中: P 为炸药爆炸压力,MPa; f 为火药力,J/kg; ω 为总装药量,kg; V 为容器容积,L; $\alpha = 0.001v$, v 为炸药比容,L/kg。

Cole水下爆炸经验公式(式2)则显示爆炸压力的大小与总装药量、目标与炸药装置间的距离有关,即

$$P = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^A \quad (2)$$

式中: K 、 A 为描述不同炸药性质的常数; W 为总装药量,kg; R 为炸药与目标间的距离,m。

从能量转换的角度出发,射孔过程中,部分能量消耗于穿透套管、水泥环及地层,剩余的能量则转化为井筒流体内能的增量,造成井筒压力升高(式3),压力大小与能量转化率、初始压力、总装药量、爆炸空间、炸药爆炸后气体摩尔质量等因素相关^[14],即

$$P = P_i + \varphi(\delta - 1) \frac{n}{V} \frac{m}{M} H \quad (3)$$

式中: P_i 为井筒初始压力,MPa; φ 为爆炸能量转化率; δ 为井筒液体的等效气液比; n 为射孔弹数量,颗; m 为单发射孔弹装药量,kg; M 为爆轰气体摩尔质量,g/mol; H 为爆炸热量,kJ/mol。

上述经验公式从不同的角度出发计算的射孔爆炸压力,考虑的因素有所不同,无法全面考虑实际井筒条件,直接用于井下射孔爆炸压力计算往往存在较大误差。但综合各经验公式可知,在射孔弹性能参数确定的情况下,总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间是决定射孔压力大小的重要因素。

利用控制变量方法,通过改变射孔总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间等参数,结合有限元数值模拟的射孔峰值压力结果,分析总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间等参数对射孔峰值压力的影响规律,进而建立射孔峰值压力计算公式,数值模拟参数具体设置范围见表1。

表1 用于数值模拟的参数设置

Table 1 Parameter setting for numerical simulation

射孔总装药量/kg	井筒初始压力/MPa	井筒爆炸空间/m ³
5	20	2
10	40	4
15	60	6
20	80	8
25	100	10

将提取的射孔峰值压力作为因变量,总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间作为自变量,建立相关性分析(见图4~图6)。结果显示,射孔峰值压力与总装药量呈正幂指数相关,与爆炸空间呈负幂指数相关,与井筒初始压力呈线性正相关。利用总装药量、井筒初始压力、井筒爆炸空间等参数进行射孔峰值压力的预测,采用于多元非线性模型进行拟合回归,得到的射孔峰值压力计算公式为

$$P_m = P_i + 0.085 \frac{W^{2.813}}{V^{0.772}} + 6.7 \quad (4)$$

式中: P_m 为射孔峰值压力,MPa; P_i 为井筒初始压力,MPa; W 为射孔总装药量,kg; V 为射孔爆炸空间,m³。

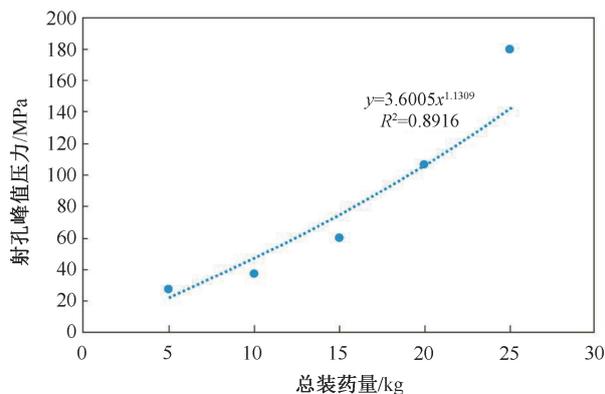


图4 射孔峰值压力与总装药量相关性

Fig. 4 Relationship between peak perforation pressure and total charge

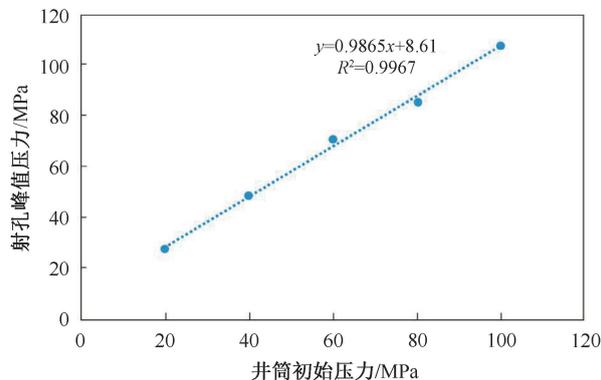


图5 射孔峰值压力与井筒初始压力相关性

Fig. 5 Relationship between peak perforation pressure and initial wellbore pressure

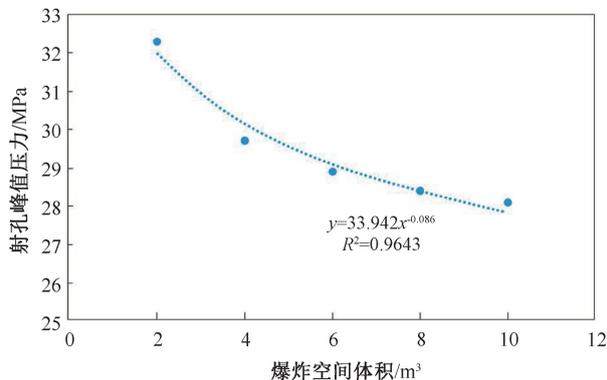


图6 射孔峰值压力与爆炸空间相关性
Fig. 6 Relationship between peak perforation pressure and explosion volume

3 应用分析

近几年,海上油气井测试开始在 TCP+APR 联作管柱的射孔枪底部安装射孔脉冲压力计,该压力计适应高压、高震击作业环境,压力数据采集速度可达 40000 点/s,可捕捉射孔瞬间井下压力变化^[15]。利用射孔脉冲压力计实测数据可以对射孔峰值压力预测模型进行有效验证。

A 井射孔段采用 177.8 mm 套管完井,射孔长度 23 m;选用 127 mm 射孔枪、16 孔/m;射孔弹单颗药量 45 g、共 356 发,药型为 HMX。实测射孔压力数据如图 7 所示,射孔前井筒初始压力约 49.5 MPa,射孔瞬时最高压力达到 91.7 MPa。

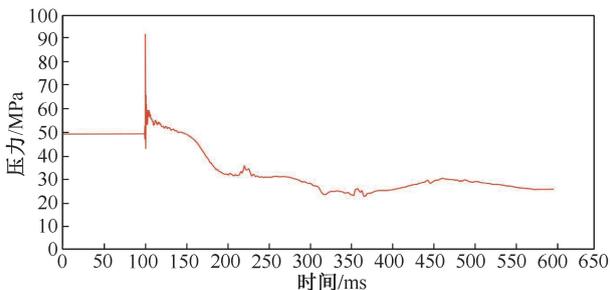


图7 实测 A 井射孔瞬时压力变化
Fig. 7 The measured instantaneous perforation pressure of well A

B 井射孔段采用 244.48 mm 套管完井,射孔长度 7 m;选用 177.8 mm 射孔枪、40 孔/m;射孔弹单颗药量 39 g,共 265 发,药型为 HMX。实测射孔压力数据如图 8 所示,射孔前井筒初始压力约 33.1 MPa,射孔瞬时最高压力达到 55.9 MPa。

结合 2 口井射孔实际参数,应用公式(4)计算射孔峰值压力,并与脉冲压力计实测结果进行对比(见表 2),计算的峰值压力相对实测峰值压力误差

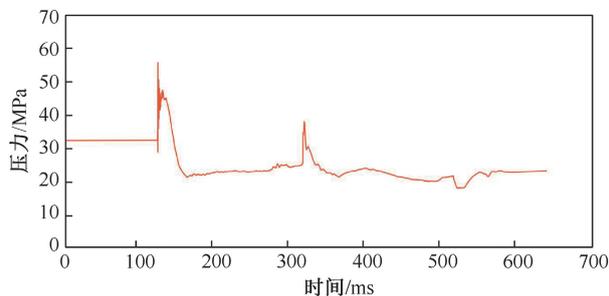


图8 实测 B 井射孔瞬时压力变化
Fig. 8 The measured instantaneous perforation pressure of well B

分别为 6.1% 和 9.8%,在工程可接受范围内,利用该公式进行射孔前的峰值压力预测具有一定参考意义。

表 2 现场测试结果与计算结果对比

Table 2 Comparison of measured results with calculated results

井名	总装药量/kg	井筒初始压力/MPa	井筒爆炸空间/m ³	实测峰值压力/MPa	计算峰值压力/MPa	相对误差/%
A	16.02	49.5	8.12	91.7	97.3	6.1
B	10.34	33.1	9.65	55.9	50.4	9.8

4 结论

(1)利用有限元数值模拟的方法进行了射孔峰值压力的分析,结果表明:射孔段作为爆炸的源头,峰值压力最大;压力波传播至井底及封隔器处时,峰值压力有所减小。射孔峰值压力与总装药量呈正幂指数相关,与爆炸空间呈负幂指数相关,与初始井筒压力呈线性正相关。

(2)建立了射孔峰值压力计算公式,经现场实测数据验证,误差在 10% 以内,属于合理范围,可用于射孔峰值压力的预测。

(3)本文数值模拟采用东海探井测试常用射孔弹型,默认相关性能参数不变,若射孔弹性能差异较大,可能造成预测值出现偏差,相关模型后续将进一步完善优化。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司上海分公司提供资料及技术支持。

参考文献

[1] 李明飞, 窦益华, 曹银萍, 等. 考虑套管边界和液柱高压的射孔液压力脉动规律分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(24): 189-196.

LI Mingfei, DOU Yihua, CAO Yiping, et al. Analysis of perforation liquid pressure pulsation law considering complex

- boundary conditions at the bottom of a well [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(24):189-196.
- [2] 周海峰, 马峰, 陈华彬, 等. 射孔段管柱动态载荷综合测试[J]. *测井技术*, 2014, 38(2):247-250.
ZHOU Haifeng, MA Feng, CHEN Huabin, et al. Comprehensive dynamic load test for the column in perforation section [J]. *Well Logging Technology*, 2014, 38(2):247-250.
- [3] 陈华彬, 陈锋, 唐凯, 等. 聚能射孔作用下环空压力测试与数值分析[J]. *测井技术*, 2019, 43(3):333-338.
CHEN Huabin, CHEN Feng, TANG Kai, et al. Test numerical analysis of annular pressure caused by shaped-charge perforation [J]. *Well Logging Technology*, 2019, 43(3):333-338.
- [4] 杨航. 考虑射孔负压和储层物性参数的射孔段管柱强度安全性分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2022:30-38.
YANG Hang. Strength safety analysis of the tubular string column in the perforating section considering the negative pressure perforating and the reservoir physical parameters [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2022:30-38.
- [5] 窦益华, 徐海军, 姜学海, 等. 射孔测试联作封隔器中心管损坏原因分析[J]. *石油机械*, 2007(9):113-115.
DOU Yihua, XU Haijun, JIANG Xuehai, et al. Analysis of the damage causes of the central tube of the perforation testing combined packer [J]. *China Petroleum Machinery*, 2007(9):113-115.
- [6] 窦益华, 李明飞, 张福祥, 等. 井身结构对射孔段油管柱强度安全性影响分析[J]. *石油机械*, 2012, 40(3):27-29.
DOU Yihua, LI Mingfei, ZHANG Fuxiang, et al. An analysis of the effect of the well bore structure on the strength safety of the tubing string at the perforation section [J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(3):27-29.
- [7] 张文斌, 谢胜, 卢齐. 射孔冲击载荷对射孔-酸化-测试联作管柱的影响分析[J]. *油气井测试*, 2016, 25(6):8-11, 73.
ZHANG Wenbin, XIE Sheng, LU Qi. Influencing analysis of perforation impact load on combined string of perforation-acidification-test [J]. *Well Testing*, 2016, 25(6):8-11, 73.
- [8] 张伟, 徐成, 李明飞, 等. 射孔段管柱瞬态响应及应力强度分析[J]. *石油机械*, 2017, 45(11):90-94, 110.
ZHANG Wei, XU Cheng, LI Mingfei, et al. Transient response and strength analysis of perforating string [J]. *China Petroleum Machinery*, 2017, 45(11):90-94, 110.
- [9] 徐成. 射孔段管柱动力响应模型建立及数值分析[D]. 西安: 西安石油大学, 2017.
XU Cheng. Numerical analysis and model establishment of dynamic response of perforating string [D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [10] 李明飞, 徐绯, 窦益华. 射孔管柱振动参数实测及其ALE数值仿真分析[J]. *应用力学学报*, 2019, 36(2):458-465, 515.
LI Mingfei, XU Fei, DOU Yihua. Measurement of perforating column vibration parameters and ALE-based numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2019, 36(2):458-465, 515.
- [11] COLE R H. *Underwater explosions* [M]. New Jersey: Princeton University Press, 1948.
- [12] 王振雄, 顾文彬, 陈江海, 等. 浅水中爆炸水底介质对水中冲击波峰值压力影响的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(4):243-248.
WANG Zhenxiong, GU Wenbin, CHEN Jianghai, et al. Experimental study on the influence of the bottom medium on the peak pressure of explosion shock waves in shallow water [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(4):243-248.
- [13] 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, 141.
CHEN Feng, CHEN Huabin, TANG Kai, et al. Influence of perforating impact load on the operating string and the countermeasures [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(5):61-65, 141.
- [14] DENG Q, ZHANG H, LI J, et al. Analysis of impact load on tubing and shock absorption during perforating [J]. *Open. Phys.* 2019, 17(1):214-221.
- [15] 林炳南, 赵洪涛, 徐杨, 等. TCP+APR 联作射孔负压值设计及校正方法[J]. *油气井测试*, 2022, 31(5):28-32.
LIN Bingnan, ZHAO Hongtao, XU Yang, et al. Design and correction of negative pressure value in TCP+APR testing [J]. *Well Testing*, 2022, 31(5):28-32.

编辑 陈晓微

第一作者简介: 赵幸滨, 男, 1986年出生, 工程师, 2009年毕业于中国石油大学(华东)资源勘察专业, 主要从事海上探井录井、测试等技术与管理方面工作, 电话: 021-22830095, 13816477227; Email: zhaoxb2@cnooc.com.cn。通信地址: 上海市市长宁区通斜路388号中国海油大厦, 邮政编码: 200335。