

伊拉克格拉芙油田完井剪切球座问题分析

王福祥

中国石油集团长城钻探工程有限公司测试公司 北京 100101

通讯作者:Email:wflux_gwdc@cnpc.com.cn

引用:王福祥. 伊拉克格拉芙油田完井剪切球座问题分析[J]. 油气井测试,2022,31(6):49-53.

Cite: Wang Fuxiang. Analysis on the shearing ball seat for well completion in Graff Oilfield, Iraq [J]. Well Testing,2022,31(6):49-53.

摘要 伊拉克格拉芙油田的自喷井由于井况复杂和完井工艺多样,在投球坐封完井封隔器时,球座提前剪切或超压剪切的情况时有发生。通过分析完井球座上下受力情况,发现完井液密度差的变化会改变球座上部的静液柱压力,而地层的漏失会改变球座下部的井底压力,从而增加球座额外的载荷,影响球座销钉的实际剪切值。经现场 14 口井的施工数据统计分析,得出完井液密度大于、等于、小于相对地层压力梯度三种情况时对剪切球座的影响,提出减少作业工序衔接时间、改变剪切销钉的数量以及改善完井液性能等预防措施,减少了完井施工过程中球座的提前剪切和超压剪切事故的发生。

关键词 格拉芙油田;完井管柱;封隔器;投球坐封;球座剪切;地层压力梯度;完井液;数据统计

中图分类号:TE355 **文献标识码:**B **DOI:**10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.010

Analysis on the shearing ball seat for well completion in Graff Oilfield, Iraq

WANG Fuxiang

Well Testing Branch, Greatwall Drilling Company, Beijing 100101, China

Abstract: Due to the complex well conditions and various completion techniques of the blowout well in Graf Oilfield, Iraq, ball seat may be sheared ahead of time or overpressure sheared when the ball is pitched and the completion packer is being set. By analyzing the force on the upper and lower parts of the completion ball seat, it is found that the change in the density difference of completion fluid will change the hydrostatic column pressure at the upper part of the ball seat, and the leakage of the formation will change the bottom hole pressure at the lower part of the ball seat, thereby increasing the extra pressure load of the ball seat, which affects the actual shear value of the ball seat pins. Through statistical analysis of the construction data from 14 wells in the field, the influences of three kinds of conditions, namely, completion fluid density greater than, equal to or less than the relative formation pressure gradient, on the shear ball seat were obtained. Preventive measures such as reducing the connection time of the operation procedure, changing the number of shear pins, and improving the performance of the completion fluid were proposed, which help reduce the occurrence of premature shearing and overpressure shearing accidents of the ball seat during the completion construction.

Keywords: Graff Oilfield; completion string; packer; ball setting; ball seat shearing; formation pressure gradient; completion fluid; data statistics

在石油天然气开采作业中,需要下入完井管柱为油气流通提供通道。封隔器是油气井完井工具的重要组成部分,伊拉克格拉芙油田的完井封隔器主要有 Baker 公司的 HS 液压封隔器、Halliburton 的 PHL 液压封隔器等。其工作原理是从油管加压,液压推动活塞下行,当压力达到初始坐封值后,坐封的第一道剪切销钉被剪断,卡瓦被推出,支撑在套管壁上;继续加压到坐封压力,第二道剪切销钉被剪断,胶筒在活塞的推动下压缩膨胀,封隔器坐封完成,胶筒密封油套环空。泄压后,由于锁紧装置的锁紧作用,卡瓦仍处于扩张状态,胶筒也处于密封状态。该类封隔器的坐封方式均通过油管内加压的方式坐封,通常在下部装一个工作筒,通过钢丝工具下入一个单流阀或者堵塞器来实现封堵油管底部的目的,封隔器坐封后再通过钢丝作业打捞出单流阀或堵塞器进而保持油气流道的畅通。这种方法需要进行钢丝作业,从而增加现场工作量及作业时间。

剪切球座通过向球座投球对液压封隔器以下的管柱进行临时封堵。完井管柱坐到井口后,投入坐封球到油管,球落到球座后,向油管内施加相应

的压力,封隔器坐封。继续加压,剪掉球座后,将管柱底部打通并留下一个便于钢丝电缆作业工具起下的喇叭口,后期作业工具就可以无阻碍地从油管进入油管柱下方的套管中。该种类型球座的特点是剪切值在下井前很容易调节,且设计简单,作业时间短。格拉芙油田的完井管柱采用的就是该种类型的球座^[1]。

目前国内外对完井管柱的研究比较多,这些研究或专注于完井工艺^[2]、管柱设计^[3]或地层特性,或依赖某些数据分析方法对完井封隔器^[4],或井下安全阀^[5]等工具的现场使用提供技术见解。针对完井过程中剪切球座问题的研究^[6],多以新型球座的应用^[7-8]或者理论研究居多,对剪切球座现场问题的研究比较少。本文在考虑完井球座上下受力情况的基础上,分析完井液密度差的变化和地层的漏失情况对球座额外载荷的影响,结合油田现场作业施工,着重研究了完井液比重与相对地层压力梯度的不同关系对剪切球座的影响情况。

1 格拉芙油田完井管柱

伊拉克格拉芙油田位于伊拉克南部纳西里耶省,具有多层系、油气压力低、各层渗透率级差大、储层物性差异较大等特点,储层敏感性强,钻井液、压井液对储层影响较大。根据油田开发方案,采用完井、酸化、测试一趟管柱,在尽可能短的时间内完成完井、酸化、测试等工艺措施,达到多层酸化、分层测试、合层采油的目的^[9]。其典型酸化完井管柱结构见图 1。

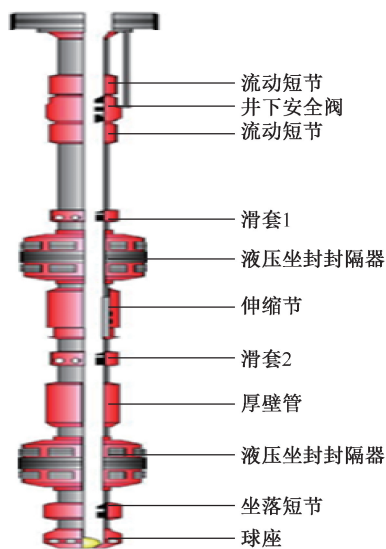


图 1 完井管柱示意图

Fig. 1 Well Completion String diagram

液压坐封完井封隔器通过管柱内打压操作坐封,管柱的密封通过向管柱内投入钢球密封球座实现。待封隔器坐封结束并向环空憋压验封合格后,继续对管柱增压将球座的销钉剪切,钢球和球座脱离,管柱落入井底,但是在完井作业期间,曾多次遇到过球座提前剪切,有时也会遇到球座剪切困难的情况。因此,对完井管柱中剪切球座进行受力分析,探究在完井施工过程中影响打压剪切球座的因素十分必要。

2 影响因素分析

在打压坐封封隔器的过程中,投球到位后,球座上的剪切销钉主要受球的自重和球上下流体的冲击载荷。假设直井工况,投球到位时钢球在向下的方向上受到自身重力、液柱压力和泵送压力,而钢球在向上的方向上则受到液体浮力、井底压力和销钉支撑力的影响(忽略液柱摩阻),因此得到钢球上下受力的平衡方程为^[6]

$$G + (\rho g H + \Delta P) \times \pi R^2 = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g + p_w \pi R^2 + N \quad (1)$$

式中: G 为钢球重力, N ; H 为球的垂直深度, m ; ΔP 为送球泵压, MPa ; ρ 为完井液密度, kg/m^3 ; R 为钢球的半径, m ; g 为重力加速度, m/s^2 ; p_w 为井底压力, MPa ; N 为销钉的支撑力, N 。

通过对已完成井施工过程的回顾,结合完井液密度、地层压力与实际泵压的数据总结分析,发现完井液密度差的变化和地层的漏失会对球座上下增加额外的载荷,进而影响球座销钉的实际剪切值。

2.1 地层漏失的影响

当封隔器坐封结束准备剪切球座时,油套环空已被封隔器密封,油管内部有钢球和球座密封。假设该地层发生漏失,就会导致球座下部压力下降而造成负压空腔,因此井底压力 p_w 则会降低。由公式(1)可知, p_w 降低,其他受力不变,球座上的压差就会增大,使得球座销钉的实际剪切压力会低于理论设计值,从而导致球座会提前剪切。

假定球座下部的漏失地层为直井段,则由于漏失造成的压力为^[6]

$$F_{\text{漏失}} = \rho g \frac{Q_g t D^2}{d^2} \quad (2)$$

式中: $F_{\text{漏失}}$ 为地层漏失对球座和剪切销钉造成的额外负压载荷, N ; Q_g 为地层漏失率, m^3/s ; t 为漏失持

续时间,s; d 为球座下部管柱的内径,m; D 为球座的外径,m。

2.2 完井液密度差的影响

下入完井工具期间,一般都会提前将井筒内替换成完井工作液,在打压坐封封隔器时一般会采用清水进行送球和剪切球座的施工。由于完井液的密度和清水相比较,所以泵入清水会降低井筒内实际完井液密度,由公式(1)可知,球座上部受力减小。因此球座入井越深,需要泵入的清水就越多,由此带来的实际完井液和设计完井工作液的密度差越大,密度差越大则球座上受到的额外负荷越大,导致球座销钉的剪切压力值会大于其理论设计

值,从而造成球座剪切困难。此密度差造成的向上的压力为^[10-11]

$$F_{\text{密度差}} = \Delta\rho gh \frac{\pi D^2}{4}$$

(3)

式中: $F_{\text{密度差}}$ 为完井工作液密度差对球座造成的额外负荷,N; $\Delta\rho$ 为球座上部完井工作液的密度差值,kg/m³; h 为球座上部静液柱的垂深,m。

3 现场数据分析

根据格拉芙油田已完成各井的施工报告,统计了现场 14 口井的球座剪切压力、完井液密度、地层压力、井深等作业数据如表 1 所示。

表 1 完井数据统计表
Table 1 Completion data statistical table

井号	初始坐封压力/MPa		最终坐封压力/MPa		球座剪切压力/MPa		压井液密度	地层压力/	井深 TVD/	地层压力	比值
	设计	实际	设计	实际	设计	实际	ρ (g/cm ³)	MPa	m	梯度 G	
Ga-HX	12.4	15.5	17.2	19.3	23.1	25.9	1.25	24.7	2 406.30	1.49	$\rho < G$
Ga-HX	12.4	13.8	17.2	18.6	23.1	26.9	1.25	22.5	2 454.60	1.33	$\rho < G$
Ga-HX	7.2	6.2	24.1	24.1	31.0	31.0	1.25	21.7	2 452.97	1.28	$\rho \approx G$
Ga-HX	12.4	14.5	17.2	18.6	26.2	23.4	1.25	19.9	2 451.46	1.18	$\rho > G$
Ga-HX	12.4	13.8	17.2	18.6	24.1	26.2	1.19	24.7	2 454.56	1.46	$\rho < G$
Ga-QX	12.4	13.8	17.2	18.6	24.1	24.1	1.25	20.2	2 347.00	1.25	$\rho \approx G$
Ga-QX	12.4	13.8	17.2	18.6	23.1	26.2	1.18	21.4	2 453.74	1.26	$\rho < G$
Ga-QX	12.4	13.8	17.2	18.6	23.1	26.2	1.19	20.4	2 341.51	1.26	$\rho < G$
Ga-EX	12.4	13.8	17.2	18.6	23.1	22.8	1.18	19.2	2 354.91	1.18	$\rho \approx G$
Ga-EX	12.4	13.8	17.2	18.6	23.1	21.7	1.18	18.7	2 331.51	1.16	$\rho > G$
Ga-EX	12.4	14.5	17.2	18.6	23.1	20.0	1.18	18.5	2 325.50	1.15	$\rho > G$
Ga-EX	12.4	14.5	17.2	20.7	25.9	25.9	1.18	19.7	2 385.51	1.19	$\rho \approx G$
Ga-EX	12.4	13.8	17.2	18.6	28.3	22.1	1.25	18.5	2 329.71	1.15	$\rho > G$
Ga-EX	12.4	12.4	17.2	20.7	28.3	24.1	1.18	18.6	2 362.51	1.14	$\rho > G$

由表 1 中的数据分析发现,在现场打压过程中球座的剪切压力值基本可以归纳为三种情况:球座剪切压力的设计值>实际值,设计值<实际值,设计值≈实际值。而相对应的完井液密度 ρ 和地层压力梯度 G 的关系也存在三种情况: $\rho > G$, $\rho < G$, $\rho \approx G$ 。

由此分析可知,当完井液密度大于地层压力梯度时,这样的井一般是漏失井,地层的漏失会造成球座下方形成负压空腔,一般情况下封隔器坐封压力不受影响,而剪切球座时由于球座上下存在负压差(地层压力与完井液柱压力差),这就降低了球座剪切所需的地面操作泵压。所以实际剪切球座时的泵压会小于设计的球座剪切值。

当完井液密度小于地层压力梯度时,由公式(1)知,为保持球座上下的压力平衡,必须增大 ΔP ,即相当于在井口附加一个回压。因此,坐封封隔器时的坐封压力需要加上井口压力,于是坐封操作压力值提高。剪切球座时,由于球座上下存在正压

差,这也提高了地面操作泵压。

当完井液密度与地层压力梯度相当时,球座上下保持压力平衡,地层不喷不漏,因此在地面操作的实际球座剪切压力值与理论设计值基本相匹配。

另外,根据现场施工数据对比分析发现,在打压坐封封隔器及剪切球座过程中,球座上部完井液存在的密度差对球座剪切压力值的影响较小。分析原因可能是样本统计的 14 口井的垂直深度相差不大,打压过程中泵入的清水量基本一致;而且投球之前井筒内是灌满的,加之液体的压缩性比较小,打压时需要泵入的清水量比较小,因此对井筒内完井液密度的影响有限。

综上分析,完井液密度与地层压力梯度的大小对球座剪切值的影响较大,在实际操作时要提前考虑,可以通过增加或者减少球座的剪切销钉数量来确定合适的球座剪切压力。现场使用的 HS 封隔器及球座的参数见表 2^[12-13]。

表 2 封隔器和球座的销钉剪切值
Table 2 Completion data statistical table

143 mm HS 封隔器	初始坐封 压力/MPa	最终坐封 压力/MPa	球座销钉 值/MPa
最小值	12. 4	17. 2	20. 7
附加 200 安全值	13. 8	18. 6	22. 1

由此可见,完井液比重与相对地层压力梯度之间存在的关系对剪切球座时可能发生的情况见表 3。

第一种情况,完井液密度大于地层压力梯度,

表 3 不同完井液密度与地层压力梯度的关系对剪切球座的影响
Table 3 The effect of the completion fluid density and the pressure gradient on ball seat shearing

完井液密度与地层 压力梯度关系	封隔器初始坐封 地面泵压/MPa	封隔器最终坐封 地面泵压/MPa	剪切球座的地 面泵压/MPa	可能发生的异常情况
$\rho>$ 地层压力梯度	13. 8	18. 6	$<22. 1$	球座提前剪切,封隔器未能完全坐封
$\rho=$ 地层压力梯度	13. 8	18. 6	22. 1	正常
$\rho<$ 地层压力梯度	$>13. 8$	$>18. 6$	$>22. 1$	球座剪切销钉困难或无法剪切,泵压超压

第二种情况,完井液密度等于地层压力梯度,地面泵压等于球座设计剪切值,属于正常情况。

第三种情况,完井液密度小于地层压力梯度,地面泵压大于球座设计剪切值,即出现了超压现象。如果设计球座剪切值较高,又受到井口采油树压力等级的限制,泵压不能相应提高,就出现球座无法剪切的情况。因此,在这种情况下,考虑选择封隔器坐封压力相对较低的封隔器,以及设计较低的球座剪切值。

4 建议

针对完井液密度和地层压力梯度等因素对完井时球座剪切值的影响分析可知,在完井打压剪切球座的过程中应注意以下几点^[14-16]:

(1)存在地层漏失的情况时,要求各工序紧密连接,尽量减少作业时间,尽可能的减少地层的漏失量。

(2)加入合适的添加剂改善完井液性能,减小完井液的漏失率。

(3)漏失井作业时,下完井管柱前应根据实际漏失情况,估算其对封隔器坐封压力及对球座剪切压力的影响,确定下井工具实际应装销钉的数量。

(4)完井液密度小于地层压力梯度时,要注意安装销钉的数量是否需要减少,因为地面操作泵压可能会高出设计值很多,所以要考虑地面管线及设备的试压应有额外的余量。如果在安全范围内的最高泵压还不能剪切球座,就需要下钢丝工具打开

若此时的地层压力系数大于等于 1,则可以通过调整完井液密度,使之与地层压力接近即可。若地层压力系数小于 1,完井液一般选择清水,往往伴随着井筒完井液的漏失,在老井完井过程中较为多见。此种情况,在封隔器坐封的过程中,地面泵压一般会小于设计的球座剪切值,坐封过程中球座会提前剪切;而且封隔器活塞做功时间短,有可能导致封隔器不能完全坐封,造成完井作业失败。因此,需准确预测地层压力并选择剪切值较高的球座,使之满足封隔器坐封程序要求。

上部滑套,用高密度完井液替一部分井筒内的原完井液,来适当增加完井液的平均密度,以此来降低剪切球座的实际操作泵压。或者选择通过钢丝作业下合适的工具(如盲锤)震击击落球座,亦可以采用下连续油管震击的方式将球座剪切。

致谢:感谢中国石油集团长城钻探工程有限公司测试公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 何子辰,张仕民,李晓军. 选择性完井管柱设计及应用[J]. 石油机械,2018,46(5):23-29.
HE Zichen, ZHANG Shimin, LI Xiaojun. Selective completion string design and application [J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(5): 23-29.

[2] 王克林,刘洪涛,何文. 库车山前高温高压气井完井封隔器失效控制措施[J]. 石油钻探技术,2021,49(2): 61-66.
WANG Kelin, LIU Hongtao, HE Wen. Failure control of completion packer in the high temperature and high pressure gas well of Kuqa piedmont structure[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(2): 61-66.

[3] 田敬元. 注水管柱失效分析及改进[J]. 海洋石油, 2018,38(2):27-31.
TIAN Jingyuan. Failure analysis and improvement of water injection string[J]. Offshore Oil, 2018, 38(2): 27-31.

[4] 王鹏. 高温高压完井封隔器工作行为仿真[D]. 西安:西安石油大学,2018.
WANG Peng. Simulation of working behavior of hphpt well completion packer[D]. Xi'an:Xi'an Shiyou University,2018.

[5] 刘威,杨松,买煜,等. 井下安全阀国内外研究现状与国

- 产化思考[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2018, 40(3): 164-174.
- LIU Wei, YANG Song, MAI Yu, et al. Reflection on domestic and foreign research status of subsurface safety valves and their domestication[J]. Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology), 2018, 40(3): 164-174.
- [6] 包陈义,李跃谦,鞠少栋,等. 完井剪切球座冲击失效分析及设计改进[J]. 中国海上油气, 2019, 31(1): 139-145.
- BAO Chenyi, LI Yueqian, JU Shaocong, et al. Impact failure analysis and design optimization of completion shear ball seat. [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(1): 139-145.
- [7] 钟林,冯桂弘,朱和明,等. 压裂球座结构优化分析及耐冲蚀研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 213-219, 228.
- ZHONG Lin, FENG Guihong, ZHU Heming, et al. Structural optimization analysis and erosion resistance study of frac ball seat[J]. Surface Technology, 2021, 50(6): 213-219, 228.
- [8] 郭岩宝,周玄黎,王浩. 几种投球滑套球座材料的冲蚀性能试验研究[J]. 石油机械, 2019, 47(3): 53-60.
- GUO Yanbao, ZHOU Xuanli, WANG Hao. Experimental study on erosion behaviors of several materials of sliding sleeve ball seat[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 53-60.
- [9] 苏洋. 伊拉克格拉芙油田 Mishrif 储层长筒取心技术[J]. 石油钻探技术, 2017(5): 31-36.
- SU Yang. Long-Barrel coring technique for the mishrif reservoir in the Garraf Oilfield Iraq[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2017, 45(5): 30-35.
- [10] 李永革. 基于 ANSYS-CFD 的滑套球座冲蚀分析[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(9): 42-44.
- LI Yongge. Analysis of packer stress of sleeve's ball seat based on ANSYS-CFD[J]. Oil Field Equipment, 2011, 40(9): 42-44.
- [11] 冯长青,张华光,赵粉霞. 分层压裂滑套与密封球受力分析研究[J]. 石油机械, 2013, 41(2): 75-78.
- FENG Changqing, ZHANG Huaguang, ZHAO Fenxia. Force analysis of layered fracture sliding sleeve and seal ball[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(2): 75-78.
- [12] 陈振,熊涛,杨延青. 可溶球座密封环密封性能分析与结构优化[J]. 工程设计学报, 2021, 28(6): 720-728.
- CHEN Zhen, XIONG Tao, YANG Yanqing. Sealing performance analysis and structure optimization of sealing ring of soluble ball seat[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(6): 720-728.
- [13] 邓宇丰,刘嘉玮,张辉,等. 随钻扩眼器球座的周边流场分析及参数优化[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2018, 45(2): 67-70.
- DENG YuFeng, LIU JiaWei, ZHANG Hui, et al. Flow field analysis and parameter optimization of a reamer nozzle and peripherals[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science Edition), 2018, 45(2): 67-70.
- [14] 本雅明·亚达利·贾马洛伊. 非常规 montney 储层的塞射孔、球座和单入口精确压裂性能回顾[J]. 石油勘探与生产杂志, 2021(11): 1155-1183.
- Benyamin Yadali Jamaloei. A review of plug-and-perforate, ball-and-seat, and single-entry pinpoint fracturing performance in the unconventional montney reservoir[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production, 2021(11): 1155-1183.
- [15] 刘杨,张华莲,陈俊文. 可回收封隔器密封结构的设计与试验研究[J]. 冲击与振动, 2020(1): 15.
- LIU Yang, ZHANG Hua Lian, CHEN Junwen. Design and experimental research on sealing structure for a retrievable packer[J]. Dynamics and Vibration Analysis of Oil and Gas Equipment, 2020(1): 15.
- [16] 李灏,李文霞,赵忠辉. TP149X 井球座未击落案例分析[J]. 石化技术, 2016, 23(2): 72-74.
- LI Hao, LI Wenxia, ZHAO Zhonghui. Analysis of not-knock-down cases of seat ball in TP149X well[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(2): 72-74.

编辑 方志慧

第一作者简介:王福祥,男,1988年出生,工程师,学士,2011年毕业于中国石油大学(华东)石油工程专业,,主要从事测试及钢丝完井相关技术服务工作。电话:010-59286531, 15306330590, Email: wfux.gwde@cnpc.com.cn。通信地址:北京市朝阳区安立路长城钻探工程有限公司测试分公司,邮政编码:100101。