

# 关井井涌余量在钻井工程设计中的应用浅析

伍 葳<sup>1</sup>, 魏云锦<sup>2</sup>, 郭建华<sup>1</sup>, 付 志<sup>1</sup>, 杨华建<sup>1</sup>

(1. 中国石油西南油气田公司工程技术研究院, 四川 成都 610000;

2. 中国石油西南油气田公司开发事业部, 四川 成都 610000)

**摘要:**目前陆上油气井钻井工程设计中井控部分主要包括井口装置、试压及常规作业中的井控要求等,并未涉及关井溢流量计算。因此,提出了在钻井工程设计中加入关井井涌余量,并给出一种关井井涌余量的计算方法。同时结合川渝地区A气田LJ-20井 $\phi 311.1\text{mm}$ 井眼钻进工况,就如何在钻井设计中增加关井井涌余量并在现场钻井发生溢流时辅助井控作业进行实例应用。计算结果表明,在给定井涌强度 $KI$ 值工况下,井眼越深则其井涌余量越小;同一井深条件下, $KI$ 值越大则其井涌余量越小。研究认为:在钻井工程设计中加入关井井涌余量是必要的,其能够有效判断现场溢流工况下进行关井作业是否安全;同时应进一步思考如何实现更具现场适用性的动态关井井涌余量值,以便更好地在地层压力难以精准预测的深部地层进行安全钻井。

**关键词:**溢流; 钻井工程设计; 关井井涌余量; 井涌强度

中图分类号:TE22

文献标识码:A

## Analysis of applying kick tolerance of shut-in in drilling engineering design

Wu Wei<sup>1</sup>, Wei Yunjin<sup>2</sup>, Guo Jianhua<sup>1</sup>, Fu Zhi<sup>1</sup> and Yang Huajian<sup>1</sup>

(1. Engineering Technology Research Institute, Southwest Oil and Gas Field Company, Chengdu, Sichuan 610000, China;

2. Development Division, Southwest Oil and Gas Field Company, CNPC, Chengdu, Sichuan 610000, China)

**Abstract:** Currently, the well control in the drilling engineering design of onshore oil and gas wells mainly includes wellhead device, pressure test and well control requirements in conventional operation, and does not involve the calculation of the overflow quantity of shut-in. In this paper, kick tolerance is considered to be added to the design above, and a calculation method of kick tolerance is given. Combined with the drilling condition of  $\phi 311.1\text{ mm}$  hole of well LJ-20 in gas field A in the Sichuan-Chongqing area, examples were applied to analyze how to add kick tolerance and assist the well control of overflow in drilling site. The calculation results showed that, with the given  $KI$  value, the deeper the hole was, the smaller the kick tolerance would be; while at the same depth, the kick tolerance also decreased with the increase of the  $KI$  value. Therefore, it is necessary to add the kick tolerance to the design. Thus, whether the shut-in operation with overflow is safe or not can be effectively judged. At the same time, further considering should be given to how to obtain the dynamic kick tolerance of shut-in which is more applicable in the field, so as to assist in safe drilling in the deep formations where pressure is difficult to be predicted accurately.

**Key words:** overflow, drilling engineering design, kick tolerance of shut-in, strength of kick tolerance

近年来国内石油公司勘探开发思路不断革新,愈发重视储层保护。因而一方面使得钻井液密度与地层孔隙压力差值呈缩小之势;另一方面,地层孔隙压力预测难以保证绝对精确,故而其存在不确定性,尤其是在国内油气资源增储上产的主战场——深部海相碳酸盐岩地层。实钻中地层孔隙压力大于设计

钻井液密度而引发溢流的情况频发,井控安全形势不容小觑。因此,如何从“工程源头”——钻井工程设计中加强对井控工作的把控就显得重要。提出在钻井工程设计中加入关井井涌余量的认识,并结合实例分析,得出关于关井井涌余量生产应用的若干结论和建议。

收稿日期:2018-09-26。

第一作者简介:伍葳(1989—),男,硕士,工程师,从事钻井工程设计及钻井科研工作。通讯地址:四川省成都市青羊区狮马路4号,邮政编码:610017。E-mail:399473027@qq.com

## 1 井涌余量

溢流应在各油田规定数量内发现并报警,且发现溢流显示应立即按关井操作规程迅速关井<sup>[1]</sup>。实钻中溢流关井后,现场工程师会获取控制溢流所需要的相关数据,并根据这些数据来确定能否安全完成关井和压井作业。这对成功进行井控作业,避免损坏井口装置、井筒套管及压破套管鞋处薄弱地层是必要的。

关于井涌余量(Kick Tolerance)的描述较多,其核心概念指井涌发生时能安全关井且循环压井过程中,以不压漏井筒内薄弱层段为前提,所允许进入井筒的最大溢流量<sup>[2-8]</sup>,是油气井钻井设计与施工作业中的一个重要参数,其表征溢流发生后,能否安全关井和压井过程中有多少剩余能力的量,也可认为是一个安全系数,表示关井和处理溢流的安全程度。井涌余量越大,越安全;越小,越危险<sup>[9]</sup>。其有两种表达方式<sup>[10-13]</sup>:一种是以密度单位表示的井涌余量 $K_i$ ,被定义为溢流发生后,允许的最大井底压力当量泥浆密度(即一定井深时不致压漏地层)与地层压力当量泥浆密度的差值;另一种是以体积单位表示的井涌余量 $KT$ ,即在给定井筒钻井液密度和实际地层压力下,能够实现将被污染钻井液循环出井筒而套管鞋处不发生破裂的最大气侵体积。

钻井作业过程中,需根据钻井作业参数的变化计算井涌余量是否满足常规井控作业。在南海深水钻井施工中,已将井涌余量更新数据纳入钻井设计与生产日报中以为下部井段钻进决策提供参考<sup>[14]</sup>。不同工况下,如关井、司钻法压井、工程师法压井及超重泥浆压井,均对应着不同的井涌余量值<sup>[15]</sup>。在特定工况下求出对应井涌余量,若 $K_i > 0$ 或 $KT > \Delta V$ (溢流体积,即循环罐多返量),则意味着能够在安全前提下顺利实施该作业。主要论述关井工况下井涌余量在钻井工程设计中的必要性。

## 2 关井井涌余量计算方法

选用最大气侵体质量 $KT$ 来表示关井井涌余量。计算中作以下假设:①工程背景选为直井段;②给定一组井涌强度 $KI$ ,即溢流时地层孔隙压力与原

井筒钻井液密度的差值为—组定值;③裸露地层薄弱点选为上开次套管鞋处<sup>[16]</sup>;④气体在井筒内以单相气柱形式存在,且为理想气体;⑤忽略温度变化、气体压缩因子、气体溶解度及滑脱效应等因素。

具体步骤如下:

1) 计算最大允许溢流气体高度 $H_{\max}$

发生溢流后关井,井筒与钻具环形空间内侵入一定高度气柱而达到“U形管”水力系统平衡,经环空与水眼两侧压力平衡等式可推出此时的最大气柱高度 $H_{\max}$ 为:

$$H_{\max} = \frac{MAASP - SIDPP}{0.0098\rho_{\text{钻井液}} - G_{\text{gas}}} \quad (1)$$

式中: $H_{\max}$ 为最大气柱高度,m; $\rho_{\text{钻井液}}$ 为钻井液密度, $g/cm^3$ ;  $G_{\text{gas}}$ 为气柱压力梯度,MPa/m;  $MAASP$ 为最大允许关井环空压力,MPa,  $MAASP = P_{\text{破裂}} - P_{\text{钻井液}} = (\rho_{\text{破裂}} - \rho_{\text{钻井液}}) \times D_{\text{管鞋}} \times 0.0098$ ;  $SIDPP$ 为溢流关井立压,MPa,  $SIDPP = P_{\text{地层}} - P_{\text{钻井液}} = (\rho_{\text{地层}} - \rho_{\text{钻井液}}) \times D_{\text{井深}} \times 0.0098 = KI \times D_{\text{井深}} \times 0.0098$ 。

2) 计算井底溢流气柱体积 $V_1$

求出井筒内气体高度后,则进一步可求得此时的气侵量:

$$V_1 = H_{\max} S_{\text{OH-BHA}} \quad (2)$$

式中: $V_1$ 为气侵量, $m^3$ ;  $S_{\text{OH-BHA}}$ 为井眼与底部钻具之间的单位长度环空容积, $m^3/m$ 。

3) 计算气柱顶部到达管鞋处溢流体积 $V'$

$$V' = H_{\max} S_{\text{OH-DP}} \quad (3)$$

式中: $V'$ 为气柱顶部到达管鞋处溢流体积, $m^3$ ;  $S_{\text{OH-DP}}$ 为井眼与钻杆之间的单位长度环空容积, $m^3/m$ 。

4) 计算溢流时地层孔隙压力 $P_{\text{地层}}$

$$P_{\text{地层}} = SIDPP + P_{\text{钻井液}} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{地层}}$ 为溢流时地层孔隙压力,MPa;  $P_{\text{钻井液}}$ 为钻井液液柱压力,MPa。

5) 计算气柱顶部到达管鞋处对应井底工况条件下最大气侵体积 $V_2$

根据理想气体状态方程( $PV = nRT$ )可以求出 $V_2$ :

$$V_2 = \frac{V' P_{\text{破裂}}}{P_{\text{地层}}} \quad (5)$$

式中: $V_2$ 为气柱顶部到达管鞋处对应井底工况条件下最大气侵体积, $m^3$ ;  $P_{\text{破裂}}$ 为上开管鞋处地层破裂压力,MPa。

6) 计算关井井涌余量 $KT$

$$KT = \min\{V_1, V_2\} \quad (6)$$

比较  $V_1$  与  $V_2$  大小,取较小值为该工况下的关井井涌余量  $KT$ ,即为溢流发生后为确保安全关井而允许地层气体进入井筒的最大侵入体积量。

### 3 设计实例

在给定井涌强度  $KI$  的前提下,通过上述计算我们能够得到钻井工程设计中每一开次钻进中不同深度对应的关井井涌余量。以川渝地区 A 气田 LJ-20 三开  $\phi 311.1$  mm 井眼钻进为例,对如何在钻井工程设计中加入关井井涌余量并指导实钻井控工作进行说明。

LJ-20 井为 1 口直井,其  $\phi 339.7$  mm 表层套管下至 850 m,下开次  $\phi 244.5$  mm 套管下至 2 311 m;设计下开次  $\phi 311.1$  mm 井眼钻进使用钻井液密度为  $1.08$  g/cm<sup>3</sup>;  $\phi 311.1$  mm 井眼钻进中底部钻具组合当量外径为  $\phi 215.9$  mm,钻杆外径为  $\phi 127$  mm,则对应单位长度环空容积分别为  $0.039$  m<sup>3</sup>/m、 $0.069$  m<sup>3</sup>/m;根据邻井资料,溢流后气柱压力梯度取为  $0.002 27$  MPa/m;  $\phi 339.7$  mm 表层套管管鞋处地层岩性主要为砂岩,通过试验得出管鞋处地层破裂压力当量密度为  $1.76$  g/cm<sup>3</sup>,则可进一步算出最大允许关井环空压力  $MAASP$  为  $5.65$  MPa。

对于井涌强度,结合区块邻井在该段所获取的实际地层压力资料,钻井设计中给定  $KI=0.06$  g/cm<sup>3</sup>,  $KI=0.12$  g/cm<sup>3</sup>,  $KI=0.16$  g/cm<sup>3</sup>。即假定溢流时地层孔隙压力与原井筒钻井液密度的差值分别为  $0.06$  g/cm<sup>3</sup>、 $0.12$  g/cm<sup>3</sup>、 $0.16$  g/cm<sup>3</sup>;对于深度,在三开钻进井段 850 ~ 2 311 m 之间间断选取若干点。通过相关计算公式得出不同  $KI$  值条件下三开钻进中不同深度的关井井涌余量,结果见表 1—表 3。

对结果进行平滑等数据处理作出图 1,可在设计中作三开钻进时的井深—关井井涌余量关系图。据此可以得出在 3 种  $KI$  值情况下,三开钻井中任一井深对应的关井井涌余量。由图 1 可知:某一给定  $KI$  值工况下,井眼越深,井涌余量逐渐变小。即随着三开钻进中进尺增加,井控风险逐渐增大。 $KI$  值越大,即井涌强度越高,相同条件下同一井深处的井涌余量越小。即溢流发生后关井取资料计算出的实际地层压力当量密度与原井筒钻井液密度之差越大,井控工作越严峻。

当三开钻进中发生溢流,关井取得立压值后,可

表 1  $KI=0.06$  g/cm<sup>3</sup> 工况下关井井涌余量值

Table 1 Kick tolerance value of shut-in as  $KI=0.06$  g/cm<sup>3</sup>

井深/ m	$SIDPP/$ MPa	$H_{max}/$ m	$V_1/$ m <sup>3</sup>	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$P_{地层}/$ MPa	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$KT/$ m <sup>3</sup>
914	0.54	613.94	24.19	38.89	10.23	55.73	24.19
1 067	0.63	603.16	23.77	38.21	11.93	46.93	23.77
1 219	0.72	592.38	23.34	37.52	13.64	40.33	23.34
1 372	0.81	581.60	22.92	36.84	15.34	35.20	22.92
1 524	0.90	570.82	22.49	36.16	17.04	31.09	22.49
1 676	0.99	560.04	22.07	35.48	18.75	27.73	22.07
1 829	1.08	549.26	21.64	34.79	20.45	24.93	21.64
1 981	1.17	538.48	21.22	34.11	22.16	22.56	21.22
2 134	1.26	527.70	20.79	33.43	23.86	20.53	20.53
2 286	1.35	516.92	20.37	32.74	25.57	18.77	18.77
2 311	1.36	515.15	20.30	32.63	25.85	18.50	18.50

表 2  $KI=0.12$  g/cm<sup>3</sup> 工况下关井井涌余量值

Table 2 Kick tolerance value of shut-in as  $KI=0.12$  g/cm<sup>3</sup>

井深/ m	$SIDPP/$ MPa	$H_{max}/$ m	$V_1/$ m <sup>3</sup>	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$P_{地层}/$ MPa	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$KT/$ m <sup>3</sup>
914	1.08	549.26	21.64	34.79	10.76	47.37	21.64
1 067	1.26	527.70	20.79	33.43	12.56	39.01	20.79
1 219	1.44	506.14	19.94	32.06	14.35	32.74	19.94
1 372	1.62	484.58	19.09	30.70	16.15	27.86	19.09
1 524	1.79	463.02	18.24	29.33	17.94	23.96	18.24
1 676	1.97	441.47	17.40	27.96	19.74	20.77	17.40
1 829	2.15	419.91	16.55	26.60	21.53	18.11	16.55
1 981	2.33	398.35	15.70	25.23	23.32	15.85	15.70
2 134	2.51	376.79	14.85	23.87	25.12	13.93	13.93
2 286	2.69	355.23	14.00	22.50	26.91	12.25	12.25
2 311	2.72	351.69	13.86	22.28	27.21	12.00	12.00

表 3  $KI=0.16$  g/cm<sup>3</sup> 工况下关井井涌余量值

Table 3 Kick tolerance value of shut-in as  $KI=0.16$  g/cm<sup>3</sup>

井深/ m	$SIDPP/$ MPa	$H_{max}/$ m	$V_1/$ m <sup>3</sup>	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$P_{地层}/$ MPa	$V_2/$ m <sup>3</sup>	$KT/$ m <sup>3</sup>
914	1.40	510.46	20.11	32.34	11.09	42.74	20.11
1 067	1.63	482.43	19.01	30.56	12.94	34.62	19.01
1 219	1.87	454.40	17.91	28.78	14.78	28.53	17.91
1 372	2.10	426.37	16.80	27.01	16.63	23.80	16.80
1 524	2.33	398.35	15.70	25.23	18.48	20.01	15.70
1 676	2.57	370.32	14.59	23.46	20.33	16.91	14.59
1 829	2.80	342.29	13.49	21.68	22.18	14.33	13.49
1 981	3.03	314.27	12.38	19.91	24.02	12.14	12.14
2 134	3.27	286.24	11.28	18.13	25.87	10.27	10.27
2 286	3.50	258.21	10.17	16.36	27.72	8.65	8.65
2 311	3.54	253.61	9.99	16.07	28.02	8.40	8.40

反推出当前地层孔隙压力当量密度,进一步得到实际 $KI$ 值。在图1选定该 $KI$ 值所对应曲线后,按照当前井深即可查到目前工况下的具体关井井涌余量值。再根据关井前的泥浆池多余返出量,即溢流量,可判断目前关井行为是否安全。同时根据该关井井涌余量,可初步判断下一步安全压井的可能性。比如,三开钻进至1 000 m时发生溢流,循环罐多返钻井液量为 $1.8 \text{ m}^3$ 。关井后测得立压值为 $0.59 \text{ MPa}$ ,推算出实际地层压力当量密度为 $1.14 \text{ g/cm}^3$ ,即 $KI$ 值为 $0.06 \text{ g/cm}^3$ 。由图1可知,在该工况条件下当井深为1 000 m时的关井井涌余量为 $23.6 \text{ m}^3$ ,大于此时的溢流量 $1.8 \text{ m}^3$ 。这证实了此次溢流发生后的关井行为是安全可行的,同时也初步表明后续安全完成压井作业的可能性。

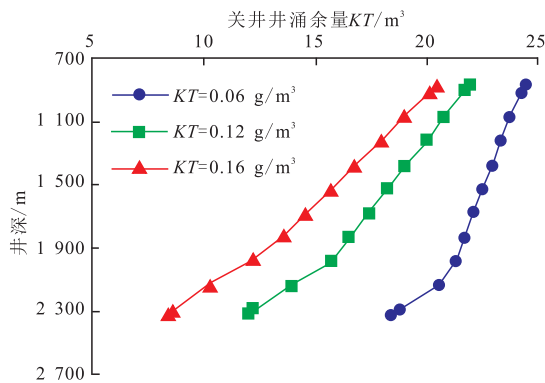


图1 LJ-20井 $\phi 311.1 \text{ mm}$ 井眼井深—关井井涌余量  
Fig. 1 Relation of well depth and kick tolerance of shut-in in  $\phi 311.1 \text{ mm}$  wellbore of well LJ-20

## 4 结论

1) 提出在陆上油气井钻井工程设计中加入关井井涌余量,并给出一种关于关井井涌余量的计算方法。

2) 通过LJ-20井 $\phi 311.1 \text{ mm}$ 井眼钻进实例示范如何运用钻井工程设计中关井井涌余量以判断和处理溢流,初步表明关井井涌余量在钻井工程设计中的必要性。

3) 通过选取若干组 $KI$ 值讨论了个别井涌强度情况下的井涌余量,不具有绝对的代表性。由于深部产层的地层压力具有较强不确定性,如何令 $KI$ 值动态化以针对现场具有普遍适用性,需要继续探索。

### 参考文献

[1] 石油钻井工程专业标委会. SY/T 6426—2005 钻井井控技术

规程[S].北京:石油工业出版社,2005.

- [2] SANTOS O L A, MENDES J R P, RIBEIRO P R. The development and application of a software to assist the drilling engineer during well control operations in deep and ultra deep waters[C]// paper SPE-81184-MS presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 27-30 April 2003, Port-of-Spain, Trinidad and Tobago.
- [3] SANTOS H M, CATAK E, VALLURI S. Kick tolerance misconceptions and consequences to well design[C]// paper SPE-140113-MS presented at the SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition, 1-3 March 2011, Amsterdam, The Netherlands.
- [4] UMAR L, YAP Y T, MURAD M S B A, et al. Dynamic multi-phase kick tolerance allows safe drilling which led to huge gas discovery in a HPHT exploration well in Malaysia[C]// paper IPTC-17460-MS presented at the International Petroleum Technology Conference, 19-22 January 2014, Doha, Qatar.
- [5] NORDIN N A, UMAR L, AZIZ I A B A, et al. Dynamic modeling of wellbore pressures allows successful drilling of a narrow margin HPHT exploration well in Malaysia[C]// paper SPE-155580-MS presented at the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, 9-11 July 2012, Tianjin, China.
- [6] REDMANN Jr K P. Understanding kick tolerance and its significance in drilling planning and execution[J]. SPE Drilling Engineering, 1991, 6(4): 245-249.
- [7] SANTOS O, ADASANI I, AZAR J J, et al. Determination of casing setting depth using kick tolerance concept[C]// paper SPE 30220-MS presented at the Petroleum Computer Conference, 11-14 June 1995, Houston, Texas, USA.
- [8] OHARA S, BOURGOYNE A T. Circulating kick tolerance for deep water drilling[C]// IADC, well control conference of the Americas, Caracas, Venezuela, 1998.
- [9] 陈平. 钻井与完井工程[M].北京:石油工业出版社,2009.
- [10] 郝希宁,苏峰,蒋世全,等.南海深水钻井井涌余量主控因素分析[J].石油钻采工艺,2015,37(1): 60-63.
- [11] 金业权,李成,吴谦.深水钻井密度井涌余量计算及应用[J].钻采工艺,2016,39(2): 23-26.
- [12] 金业权,李成,吴谦.深水钻井井涌余量计算及压井方法选择[J].天然气工业,2016,36(7): 68-73.
- [13] 陈彬,罗俊丰,叶吉华,等.深水井控成功实践与技术分析[J].石油钻采工艺,2015,37(1):129-131.
- [14] 钱锋,孔吉祥,唐小雯.深水钻井井身结构设计参数的选取[J].科学技术与工程,2014,14(13):162-165.
- [15] 刘凯.如何认识和计算井涌余量[J].西南石油学院学报,1990,12(1):37-44.
- [16] 郝俊芳.如何计算井涌余量[J].西南石油学院学报,1983,5(3):45-50.

(编辑 尹淑容)