

基于 Taguchi 方法的计数式全通径压裂滑套优化设计

赵传伟¹, 李 云², 李国锋¹, 董恩博¹, 孙浩玉¹

(1. 中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院, 山东东营 257017; 2. 中石化胜利石油工程有限公司技术装备处, 山东东营 257001)

摘 要:针对全通径压裂滑套中内滑套的动作压力不能满足现场施工要求的问题,对内滑套的结构参数进行了优化,以期在保证内滑套结构强度的同时提高内滑套的动作压力。利用 Plackett-Burman 设计法筛选了影响内滑套动作压力的显著影响因子,采用 Taguchi 方法优化了显著影响因子,通过方差分析确定了最优参数组合。采用数值模拟及室内模拟试验方法评价了内滑套优化前后的性能,得到了最优参数组合:筋宽角 18.0°,筋长 170.0 mm,筋厚 5.5 mm,筋锥角 89.5°,爪倾角 115.0°,爪锥角 65.0°。数值模拟得出,内滑套动作压力由 4.8 MPa 增大到了 7.5 MPa,内滑套在运动过程中所受的最大应力由 992.0 MPa 增大到了 1 101.0 MPa,但仍小于材料的许用应力;室内试验得出,内滑套动作压力由 5.1 MPa 提高到了 7.9 MPa,满足现场施工要求。研究结果表明,应用 Taguchi 方法优化的计数式全通径压裂滑套结构参数合理。

关键词: Taguchi 方法; Plackett-Burman 设计; 全通径; 压裂滑套; 结构参数; 优化设计

中图分类号: TE934+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2017)01-0097-07

Design Optimization of Full Bore Stimulation Sleeves with Ball Drop Counting using the Taguchi Method

ZHAO Chuanwei¹, LI Yun², LI Guofeng¹, DONG Enbo¹, SUN Haoyu¹

(1. Drilling Technology Research Institute of Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257017, China; 2. Technology and Equipment Department of Sinopec Shengli Oilfield Service Corporation, Dongying, Shandong, 257001, China)

Abstract: In this paper, the structural parameters of sliding sleeves were optimized to ensure initiating pressure of internal sliding sleeve satisfy the requirements of field operations. In addition to strength enhancement of inner sliding sleeves, initiating pressures can be effectively increased in the proposed optimized design. Major factors that may affect the initiating pressure of internal sliding sleeve were identified by using the Plackett-Burman design method, then major influence factors were optimized based on the Taguchi method. The optimal combination of parameters was determined through variance analysis. Performance of the internal sliding sleeve before and after optimization were investigated through numerical simulation and experimental tests. The optimized parameters included angle of bracket width, 18°; bracket length, 170 mm; bracket thickness, 5.5 mm; cone angle of bracket, 89.5°, dip angle of jaw, 115° and the cone angle of jaw, 65°. The numerical simulation results showed that the initiating pressure of the internal sliding sleeve is enhanced from 4.8 MPa to 7.5 MPa. At the same time, the maximum stress of moving the internal sliding sleeve is increased from 992 MPa to 1 101 MPa, which is still below the allowable stress of the sleeve material. Experiment tests showed that the initiating pressures of an internal sliding sleeve is enhanced from 5.1 MPa to 7.9 MPa to meet field operation requirements. The results showed that the Taguchi method could be used as a reliable method in structural optimization of full bore stimulation sleeve of ball drop counting type.

Key words: Taguchi method; Plackett-Burman design; full bore; stimulation sleeve; structure parameter; design optimization

体积压裂技术已成为低渗透、超低渗透油气藏开发的有效手段^[1-7]。目前国外主要采用簇式滑套和复合桥塞进行体积压裂,其缺点是压裂后井筒内会残留球座或桥塞,易导致油气井堵塞和低液现象,无法开展二次改造等作业,需要将球座和桥塞钻除,这样会延长施工周期,增加作业成本^[8-9]。为此,国外开展了全通径分段压裂技术研究。全通径分段压裂技术的

收稿日期:2016-07-13;改回日期:2016-12-14。

作者简介:赵传伟(1986—),男,山东青州人,2009年毕业于中国石油大学(华东)机械设计制造及其自动化专业,2014年获中国石油大学(华东)机械设计及理论专业博士学位,胜利石油管理局在站博士后,主要从事完井工具及工艺研究工作。E-mail: zcw860204@163.com。

基金项目:中石化石油工程技术服务有限公司科技攻关项目“多簇无限级压裂固井工具研制”(编号:SG1307-01K)、胜利石油管理局博士后项目“计数式多簇全通径压裂滑套研制”(编号:GKB1512)联合资助。

核心工具是全通径分段压裂滑套,对于全通径分段压裂滑套的研究国内尚处于研发及室内试验阶段。

全通径分段压裂技术具有施工速度快、压裂规模大、压裂后井眼全通径、能有效提高体积压裂效果的优点^[10]。目前,在不下内管进行作业的情况下,实现全通径压裂的工具主要有带可溶球座的投球式滑套、可溶桥塞以及无线射频识别(RFID)滑套等^[11]。然而,可溶滑套或桥塞存在溶解时间不易控制、溶解过程中材料强度降低等问题;RFID滑套具有成本较高、滑套打开成功率较低的缺点。因此,笔者研制了计数式全通径压裂滑套。前期研究表明,全通径压裂滑套中内滑套的结构参数影响着压裂球驱动内滑套运动所需压力(即内滑套动作压力)的大小。在初步设计的内滑套结构参数条件下,通过室内模拟试验测得的内滑套动作压力较小,施工过程中可能会由于排量冲击、管柱振动等因素导致内滑套提前动作,进而影响下级滑套的打开。因此,需要优化内滑套的结构参数,提高内滑套的动作压力。但在增大动作压力的同时,内滑套动作过程中所受

的最大应力也在增大,即内滑套的安全性降低。如何合理地设计内滑套的结构参数,在保证内滑套安全性较高的情况下,其动作压力也能满足现场施工要求,是研制计数式全通径压裂滑套的难点之一。目前,与此相关的研究尚未有报道。为此,笔者提出采用 Taguchi 方法优化内滑套的结构参数,以期在保证内滑套结构强度的同时增大其动作压力。

1 计数式全通径压裂滑套结构及工作原理

1.1 压裂滑套的结构

计数式全通径压裂滑套主要由上接头、外滑套、内滑套、开关、弹簧、可复位球座、活塞、支撑座及下接头组成,如图 1 所示。其中,外滑套内壁有凹槽,内滑套由上卡爪和下卡爪组成。该滑套适用排量为 3~15 m³/min,具有压裂级数不受限制、无需下内管、无需钻除作业即可实现管柱内全通径的优点。

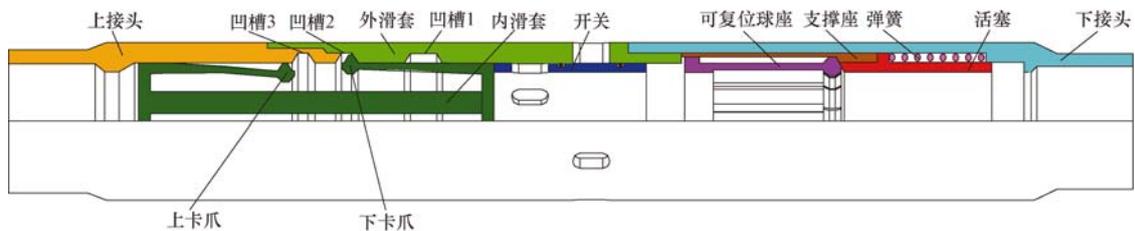


图 1 计数式多簇全通径压裂滑套结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of full bore stimulation sleeve of ball drop counting type

1.2 压裂滑套的工作原理

以计数式全通径压裂滑套第一级压裂作业为例,结合图 1 来说明该压裂滑套的工作原理。井口投放 1 个压裂球,当压裂球到达上卡爪时被卡住,压力升高,在压差作用下压裂球推动内滑套向右运动,下卡爪从凹槽 2 中移出并沿径向聚拢,同时上卡爪进入凹槽 3 中。此时,压裂球释放并落到下卡爪上,压力再次升高,压裂球推动内滑套向右运动,上卡爪从凹槽 3 中移出,同时内滑套也推动开关向右移动。当开关接触到可复位球座时,推动其一起继续向右移动,迫使可复位球座右端沿径向闭合并成为一个完整球座,弹簧也被压缩。当上卡爪进入凹槽 2 中、下卡爪进入凹槽 1 中时,压裂球被释放,落到可复位球座右端时被卡住,此时开关上的通孔与外滑套上的通孔对齐,管内外相通。继续加压,可复位球座右端接触活塞并推动活塞一起向右移动,弹簧进一步

被压缩。当活塞右端接触下接头时,可复位球座不再移动,继续加压,压裂球坐封,可对地层进行压裂。同理,当投第 2 个同尺寸压裂球时,打开第 2 级压裂滑套,可压裂第 2 层段;当投第 3 个同尺寸压裂球时,可压裂第 3 层段;当投第 n 个同尺寸压裂球时,可压裂第 n 层段。所有层段都压裂完成后,井口泄压,每级滑套中的可复位球座在弹簧回复力的作用下复位, n 个压裂球被释放,可落到井底或者返排到井口。

在卡爪聚拢后形成的泄露面积一定的情况下,影响内滑套动作压力的主要参数有筋宽角 α 、筋长 l 、筋厚 t 、筋锥角 β 、爪倾角 γ 及爪锥角 δ ,如图 2 所示。前期研究得出,满足现场施工要求的条件为:内滑套动作压力要大于 5.6 MPa,且小于滑套打开压力 10.0 MPa;内滑套在运动过程中所受的最大应力要小于其材料(60Si2CrVA)的许用应力 1 167.0 MPa。通过单因素试验研究,初步确定 6 个参数的值分别为: $\alpha = 17.0^\circ$, $l = 160.0$ mm,

$t=5.5\text{ mm}$, $\beta=89.5^\circ$, $\gamma=120.0^\circ$, $\delta=65.0^\circ$ 。通过室内模拟试验测得该条件下内滑套动作压力为 5.1 MPa, 不能满足现场施工要求。因此, 需要对内滑套的结构参数进行优化, 以期在满足强度要求的同时进一步提高内滑套的动作压力。



图 2 影响计数式全通径压裂滑套内滑套动作压力的主要参数

Fig. 2 Major parameters that affect the initiating pressure of internal sliding sleeve in the full bore stimulation sleeve of ball drop counting type

2 优化设计方法

为减少不必要的试验与计算, 剔除不显著的影响因子(参数), 同时得到较满意的结果, 首先采用 Plackett-Burman 设计方法筛选影响内滑套动作压力的显著影响因子, 然后基于 Taguchi 方法优化显著影响因子, 通过方差分析确定最优参数组合。

2.1 Plackett-Burman 设计方法

Plackett-Burman 设计方法是一种针对因子数量较多, 且各因子对响应的显著性不确定而采用的筛选试验设计方法^[12-13]。该方法主要对每个因子取 2 个水平进行分析, 通过比较各个因子 2 个水平的差异与整体的差异来确定因子的显著性^[14]。该方法基于非完全平衡块原理, 能以最少的试验次数估计出主要的影响因子, 从众多的考察因子中快速、有效地筛选出最重要的几个因子。与目前常用的部分因子试验和随机平衡试验相比, 该方法筛选重要因子最高效、准确^[15]。因此, 笔者采用 Plackett-Burman 设计方法筛选内滑套动作压力显著的影响因子。

2.2 Taguchi 方法

采用 Taguchi 方法进一步优化 Plackett-Burman 设计筛选出显著影响因子。Taguchi 方法是一

种低成本、高效益的质量工程方法, 它强调要通过设计提高产品质量, 而不是通过检验。Taguchi 方法的基本思想是把产品的稳健性融入到产品设计和制造过程中, 通过控制源头质量来抵御大量的下游生产或顾客使用中的噪声或不可控因素的干扰^[16-17]。其设计步骤为^[18-19]: 1) 确定优化参数及优化目标; 2) 每个优化参数取 3 个水平; 3) 选择正交试验表, 安排试验; 4) 利用有限元分析软件计算响应值; 5) 根据优化目标得到参数最优值, 进一步进行有限元分析及试验研究, 验证分析结果。

2.3 数值计算

基于显式动力学方法^[20-21]模拟压裂球推动内滑套运动的过程, 计算用于 Plackett-Burman 设计和正交试验设计中响应值(内滑套动作压力及其运动过程中所受的最大应力)。经过合理简化后的计数式全通径压裂滑套的三维仿真模型如图 3 所示。

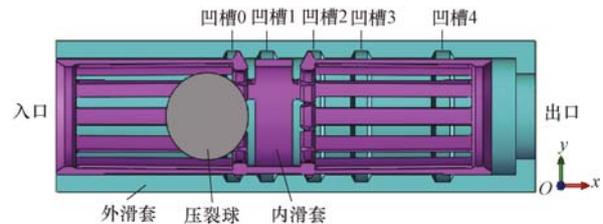


图 3 计数式全通径压裂滑套的三维仿真模型

Fig. 3 3D simulation model for full bore stimulation sleeve of ball drop counting type

图 3 中, 内滑套、外滑套及压裂球所用材料的弹性模量为 206 GPa, 泊松比为 0.3; 静摩擦因数取 0.3, 动摩擦因数取 0.2。

分步施加载荷: 1) 在内滑套的左端面施加沿 x 轴的位移载荷 0.009 m, 使仿真模型中的上卡爪从凹槽 0 中移出, 而下卡爪仍在凹槽 2 中; 2) 在压裂球的左半球面施加随时间递增的压力载荷, 最大载荷为 9.0 MPa。

外滑套的左端面施加全约束, 位于 xOy 平面内的所有面施加对称约束。在压裂球压力较高的半球面上施加随时间递增的压力载荷, 最大载荷为 9.0 MPa; 外滑套的左端面施加全约束; 计算时间设定为 0.14 s。

3 优化结果与讨论

3.1 显著影响因子的筛选

在初步确定内滑套结构参数的基础上, 为每个

因子取 2 个水平,称为高水平(+1)和低水平(-1)。各因子的水平取值见表 1。

表 1 Plackett-Burman 设计的因子与水平

Table 1 Factors and levels of the Plackett-Burman design

因子		水平	
编号	参数	低水平(-1)	高水平(+1)
A	$\alpha/(\circ)$	14	18
B	l/mm	160	180
C	t/mm	4	6
D	$\beta/(\circ)$	89.7	89.5
E	$\gamma/(\circ)$	115	125
F	$\delta/(\circ)$	60	70

待优化参数有 6 个,因此采用试验次数为 12 的 Plackett-Burman 设计,试验安排及通过数值计算得到的响应值见表 2(其中, Y_1, Y_2 分别代表内滑套的动作压力 p 和内滑套在运动过程中所受的最大应力 σ_{\max})。

表 2 Plackett-Burman 设计试验及结果

Table 2 Experiment and relevant results of the Plackett-Burman design

序号	A	B	C	D	E	F	Y_1	Y_2
1	-1	1	1	1	-1	1	5.50	954
2	1	1	-1	1	1	-1	6.45	1451
3	-1	-1	1	1	1	-1	5.70	1151
4	1	-1	1	1	-1	1	5.10	1391
5	-1	1	-1	-1	-1	1	4.80	774
6	1	1	1	-1	1	1	5.00	987
7	1	-1	-1	-1	1	1	4.50	1179
8	-1	-1	-1	1	1	1	5.30	1036
9	-1	1	1	-1	1	-1	6.40	1329
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3.90	1029
11	1	-1	1	-1	-1	-1	3.40	951
12	1	1	-1	1	-1	-1	3.95	940

采用 t 检验法检验因子的显著性,显著性水平取 0.05,对应标准化效应 $t=2.571$ 。图 4(a)为以内滑套动作压力 p 为响应的标准化效应 Pareto 图。从图 4(a)可以看出,因子 A,C 和 F 对于 p 表现为正效应,因子 B,D 和 E 则具有负效应。根据标准化效应大小,这 6 个因子对 p 的影响顺序依次为 $E > A > B > C > D > F$ 。因子 E,A 和 B 的标准化效应大于 2.571,表现为显著。图 4(b)为以内滑套在运动过程中所受的最大应力 σ_{\max} 为响应的标准化效应 Pareto 图。从图 4(b)可以看出,A 和 B 的标准化效应大于 2.571,表现为显著。但 A 对于 σ_{\max} 表现为

正效应,B 则表现为负效应。

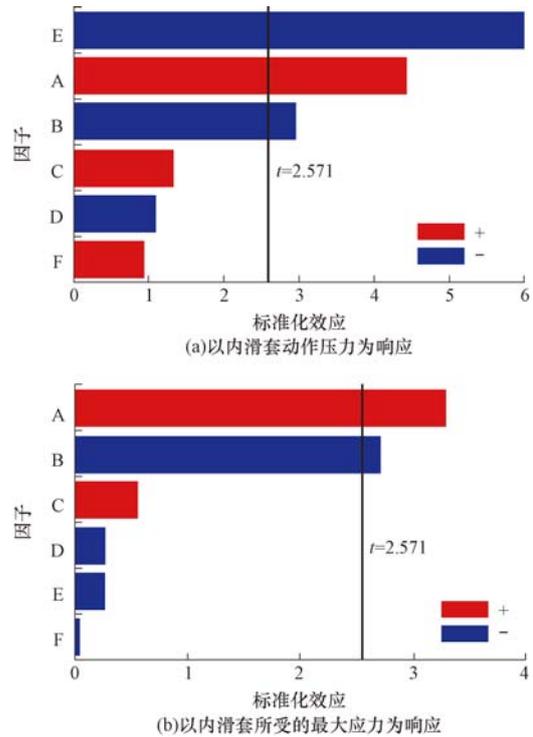


图 4 不同响应的标准化效应 Pareto 图

Fig. 4 Pareto charts for standardized effects with different responses

综上所述,爪倾角 γ 、筋宽角 α 及筋长 l 是影响内滑套动作压力的显著因子; α 和 l 是影响内滑套运动过程中所受最大应力的显著因子。确定 γ, α 及 l 为影响显著因子进行进一步研究。此外, α 对 p 和 σ_{\max} 均表现出正效应,这说明增大 α 有利于提高 p , 但 σ_{\max} 亦增大。 l 对 p 和 σ_{\max} 均表现出负效应,这说明减小 l 有利于提高 p , 但 σ_{\max} 亦增大。

3.2 显著影响因子的优化

3.2.1 因子水平取值及正交试验设计

以初始值为中心点,再为 3 个显著影响因子各取 2 个水平,见表 3。

表 3 3 个显著影响因子的水平取值

Table 3 Levels of three remarkable affecting factors

水平	因子		
	$\alpha/(\circ)$	l/mm	$\gamma/(\circ)$
1	14	160	115
2	16	170	120
3	18	180	125

选择 $L_9(3^4)$ 的正交试验表,试验安排及数值计算结果见表 4。其中,非显著影响因子保持初始值

不变。

表 4 正交试验设计及结果

Table 4 Design and results of orthogonal experiments

序号	A	B	E	Y ₁	Y ₂
1	1	1	1	7.80	1 075
2	1	2	2	4.85	781
3	1	3	3	3.80	743
4	2	1	2	5.45	1 014
5	2	2	3	4.70	841
6	2	3	1	6.40	779
7	3	1	3	6.90	1 146
8	3	2	1	8.20	951
9	3	3	2	5.80	793

3.2.2 均值分析

响应值平均值的计算式为：

$$K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (1)$$

式中：K 为响应值的平均值；n 为正交试验的次数；Y_i 为对应正交试验次数的响应值。

下面计算参数改变时对某一响应计算结果的平均值。例如，计算因子 A 水平 2 下响应 Y₁ 的平均值，其计算式为：

$$K_{A2}(Y_1) = \frac{1}{3} [Y_1(4) + Y_1(5) + Y_1(6)] \quad (2)$$

同理，可计算出所有因子各水平下响应 Y₁ 和响应 Y₂ 的平均值，结果见表 5 和表 6。

表 5 不同水平下响应 Y₁ 的平均值

Table 5 Mean values of Y₁ at different levels

水平	A	B	E
1	5.483	6.417	7.467
2	5.517	5.917	5.367
3	6.967	5.333	5.133
δ	1.483	1.383	2.333
排序	2	3	1

表 6 不同水平下响应 Y₂ 的平均值

Table 6 Mean values of Y₂ at different levels

水平	A	B	E
1	869.7	1 081.7	938.3
2	878.0	857.7	862.7
3	963.3	771.7	910.0
δ	93.7	310.0	75.7
排序	2	3	1

由表 5 和表 6 可知，使内滑套动作压力 p 最大的组合是 [A3, B1, E1]，使内滑套在运动过程中所

受最大应力 σ_{max} 最小的组合是 [A1, B3, E2]。同时使 p 和 σ_{max} 最优的组合不能直接确定。为此，笔者进行方差分析，以评估变量的相对重要性，并确定最优组合。

3.2.3 方差分析

首先要计算离差平方和。例如，因子 A 对响应 Y₁ 的离差平方和 SS_A(Y₁) 为：

$$SS_A(Y_1) = 3 \sum_{i=1}^3 [K_{A_i}(Y_1) - K(Y_1)]^2 \quad (3)$$

同理，可求得因子 B 和 C 对响应 Y₁ 的离差平方和 SS_B(Y₁) 及 SS_C(Y₁)、因子 A, B 和 C 对响应 Y₂ 的离差平方和 SS_A(Y₂)、SS_B(Y₂) 及 SS_C(Y₂)。不同因子对不同响应的离差平方和见表 7。

表 7 不同因子对不同响应的离差平方和

Table 7 Sum of squares of deviations of different factors of different responses

因子	Y ₁ 离差平方和	Y ₁ 影响比重, %	Y ₂ 离差平方和	Y ₂ 影响比重, %
α/(°)	4.304	25.2	16 125	9.0
l/(°)	2.894	16.9	153 672	86.1
γ/(°)	9.909	57.9	8 769	4.9
总计	20	100	178 566	100

由表 7 可知：筋宽角 α、爪倾角 γ 对内滑套动作压力 p 的影响要大于对 σ_{max} 的影响，筋长 l 对 p 的影响要小于对 σ_{max} 的影响。根据内滑套在满足强度要求的条件下，p 要尽量大的设计要求，可确定最优组合为 [A3, B2, E1]。按照上述优化设计方法，最终确定最优参数组合为：筋宽角 18.0°，筋长 170.0 mm，筋厚 5.5 mm，筋锥角 89.5°，爪倾角 115.0° 和爪锥角 65.0°。

4 优化前后内滑套性能对比

分别按照优化前后的内滑套结构参数建模，并根据上述数值计算方法求解内滑套动作压力及其运动过程中所受的最大应力，计算结果见表 8。

为了评价结构参数优化后内滑套的性能，对内滑套结构参数优化前后的计数式多簇全通径压裂滑套进行了室内模拟试验。试验介质为清水，主要试验设备及仪表包括钻井泵（流量 35 L/s，压力 13.6 MPa）、φ114.3 mm 计数式多簇全通径压裂滑套、压力表、电磁流量计、液罐、阀门 V₁ 和 V₂、上变扣（410 钻杆扣转 φ114.3 mm 公扣）和下变扣（φ114.3 mm 母扣

转 411 钻杆扣)。下变扣中的带孔隔板用于阻拦从压裂滑套出口排出的压裂球,防止压裂球堵塞阀门 V_2 。试验流程如图 5 所示。

试验时,通过拆装上变扣,每次放置一个压裂球于压裂滑套入口处。压裂球推动内滑套运动的过程中,压力表示数会先变大后减小,记录此过程中的最大值作为每次投球时内滑套的动作压力。共放置 5 个压裂球后,打开开关,取 5 次的平均值作为内滑套动作压力。试验结果见表 8。

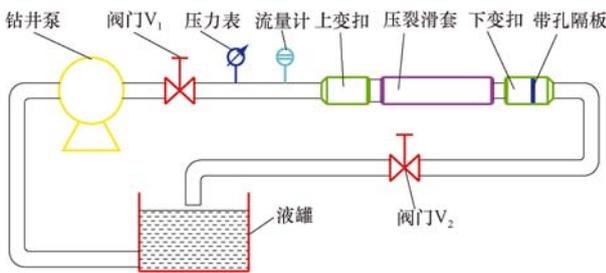


图 5 计数式多簇全通径压裂滑套室内模拟试验流程

Fig. 5 Flow chart of laboratory experiments for full bore stimulation sleeve of ball drop counting type

表 8 计数式多簇全通径压裂滑套优化前后的性能参数

Table 8 Performance parameters before and after optimization for full bore stimulation sleeve of ball drop counting type

条件	p/MPa		σ_{\max}/MPa
	计算	试验	
优化前	4.8	5.1	992
优化后	7.5	7.9	1 101

由表 8 可知:按数值计算得到的结果,优化后内滑套的动作压力由 4.8 MPa 增大到了 7.5 MPa,内滑套所受的最大应力由 992.0 MPa 增大到了 1 101.0 MPa,但仍小于材料的许用应力 1 167.0 MPa;按室内模拟试验得到的结果,优化后内滑套的动作压力由 5.1 MPa 增大到了 7.9 MPa,满足了现场施工要求。由此可知,应用 Taguchi 方法优化的内滑套结构参数合理。

5 结 论

1) 爪倾角、筋宽角及筋长是影响内滑套动作压力的显著因子,筋宽角和筋长是影响内滑套运动过程中所受最大应力的显著因子。

2) 筋宽角对内滑套动作压力及其在运动过程中所受的最大应力均表现出正效应,即增大筋宽角,两者都会增大;筋长对内滑套动作压力及其在运动

过程中所受的最大应力均表现出负效应,即减小筋长,两者都会增大。

3) 数值计算和室内模拟试验结果均表明,当筋宽角、筋长、筋厚、筋锥角、爪倾角及爪锥角分别为 18.0° 、170.0 mm、5.5 mm、 89.5° 、 115.0° 和 65.0° 时,内滑套的动作压力能够满足现场施工要求,说明应用 Taguchi 方法优化内滑套结构参数是可行的,且优化结果合理。

4) 采用 Taguchi 方法优化内滑套结构参数时,因子的水平取值是离散的,因此所得参数组合未必是最优解,如何在优化过程中实现因子在一定的水平范围内连续取值,是今后的主要研究方向。

参 考 文 献

References

[1] DESHPANDE K M, SIMPKINS D R, GANDIKOTA R V, et al. Fracturing completion system optimization through advanced hydraulic modeling[R]. SPE 160552, 2012.

[2] 薛承瑾. 页岩气压裂技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2011, 39(3): 24-29.
XUE Chengjin. Technical advance and development proposals of shale gas fracturing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(3): 24-29.

[3] YUAN F, PALMER C, BLANTON E, et al. Improved efficiency of multi-stage fracturing operations; an innovative pressure activated toe sleeve[R]. SPE 172971, 2015.

[4] 姜龙燕, 荀小全, 王楠, 等. 致密油藏直井体积压裂非稳态产能评价模型[J]. 断块油气田, 2015, 22(1): 82-84.
JIANG Longyan, XUN Xiaoquan, WANG Nan, et al. Non-steady state productivity evaluation model of volume fracturing for vertical well in tight oil reservoir [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(1): 82-84.

[5] 赵崇镇. 新场气田须五致密气藏缝网压裂技术[J]. 石油钻探技术, 2015, 43(6): 70-75.
ZHAO Chongzhen. Network fracturing technology applied to Xu 5 tight gas reservoirs in the Xinchang Gas Field [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2015, 43(6): 70-75.

[6] 安杰, 刘涛, 范华波, 等. 鄂尔多斯盆地致密油滑溜水压裂液的研究与应用[J]. 断块油气田, 2016, 23(4): 541-544.
AN Jie, LIU Tao, FAN Huabo, et al. Research and application of slippery water fracturing fluid for tight oil in Ordos Basin [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(4): 541-544.

[7] 白晓虎, 齐银, 陆红军, 等. 鄂尔多斯盆地致密油水平井体积压裂优化设计[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(4): 83-86.
BAI Xiaohu, QI Yin, LU Hongjun, et al. Optimization design for volume fracturing of horizontal wells in tight oil reservoir of Ordos Basin [J]. Oil Drilling & Production Tecnology, 2015, 37(4): 83-86.

[8] ABRAMS M E, CHURCHER P L, PILAND J, et al. From the

- laboratory to the field; successful multistage horizontal fracturing design and implementation in tight sandstones in the Anadarko Basin[R]. SPE 173379, 2015.
- [9] 戴文潮, 秦金立, 薛占峰, 等. 一球多簇分段压裂滑套工具技术研究[J]. 石油机械, 2014, 42(8): 103-106.
- DAI Wenchao, QIN Jinli, XUE Zhanfeng, et al. Research on one ball-activated multiple sleeves per stage for multistage fracturing[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(8): 103-106.
- [10] 秦金立, 吴姬昊, 崔晓杰, 等. 裸眼分段压裂投球式滑套球座关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 52-56.
- QIN Jinli, WU Jihao, CUI Xiaojie, et al. Key technology on ball-activated sleeve for open hole staged fracturing[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 52-56.
- [11] 秦金立, 戴文潮, 万雪峰, 等. 无线射频识别技术在多级滑套压裂工具中的应用探讨[J]. 石油钻探技术, 2013, 41(3): 123-126.
- QIN Jinli, DAI Wenchao, WAN Xuefeng, et al. Application of radio frequency identification in multistage fracturing sleeve tools[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(3): 123-126.
- [12] PRIYADHARSHINI S D, BAKTHAVATSALAM A K. Optimization of phenol degradation by the microalga chlorella pyrenoidosa using Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. Bioresource Technology, 2016, 207: 150-156.
- [13] 肖文生, 崔俊国, 刘健, 等. 直驱采油用永磁同步电机削弱齿槽转矩优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(1): 173-180.
- XIAO Wensheng, CUI Junguo, LIU Jian, et al. Optimization study for reducing cogging torque in permanent magnet synchronous motor used for direct-drive oil pumping[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(1): 173-180.
- [14] MA L, WANG L, TANG J, et al. Optimization of arsenic extraction in rice samples by Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 283-288.
- [15] 梅乐和, 胡升, 许静, 等. 纳豆枯草杆菌的筛选和纳豆激酶发酵条件优化[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(10): 1355-1360.
- MEI Lehe, HU Sheng, XU Jing, et al. Screening of bacillus subtilis natto and optimization of nattokinase fermentation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(10): 1355-1360.
- [16] 于奎刚, 金隼, 来新民. 基于 Taguchi 的柔性薄板装配夹具稳健设计[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(12): 1941-1945, 1949.
- YU Kuigang, JIN Sun, LAI Xinmin, et al. A fixture locating robust design method of compliant sheet metal assembly based on Taguchi method[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2009, 43(12): 1941-1945, 1949.
- [17] CUI J, XIAO W, WANG L, et al. Optimization design of low-speed surface-mounted PMSM for pumping unit[J]. International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics, 2014, 46(1): 217-228.
- [18] 兰志勇, 杨向宇, 王芳媛, 等. Taguchi 方法在内嵌式正弦波永磁同步电机优化设计中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 37-42.
- LAN Zhiyong, YANG Xiangyu, WANG Fangyuan, et al. Application for optimal designing of sinusoidal interior permanent magnet synchronous motors by using the Taguchi method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 37-42.
- [19] 张代胜, 张旭, 王浩, 等. 基于 Taguchi 方法的动力总成悬置系统稳健优化[J]. 汽车工程, 2014, 36(4): 475-480, 514.
- ZHANG Daisheng, ZHANG Xu, WANG Hao, et al. Robust optimization of powertrain mounting system based on Taguchi method[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(4): 475-480, 514.
- [20] 谷长春, 石明全. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰撞过程的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4621-4624.
- GU Changchun, SHI Mingquan. Numerical simulation of high-velocity impact with ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4621-4624.
- [21] 万小鹏, 龚伦, 赵美英, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的飞机机翼前缘抗鸟撞分析[J]. 西北工业大学学报, 2007, 25(2): 285-289.
- WAN Xiaopeng, GONG Lun, ZHAO Meiyong, et al. A method for calculating anti-bird impact capability of an aircraft wing using ANSYS/LS-DYNA software[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(2): 285-289.

[编辑 令文学]