



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406783

引用格式: 韦明吉, 李陈涛, 王旭东, 等. 基于PB-BBD响应面法优化内置钻头多维冲击器性能[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(18): 7597-7603.

Wei Mingji, Li Chentao, Wang Xudong, et al. Optimization of performance of multi-dimensional impactor with built-in drill bit based on PB-BBD response surface method[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(18): 7597-7603.

基于PB-BBD响应面法优化内置钻头 多维冲击器性能

韦明吉¹, 李陈涛¹, 王旭东², 刘洋阳¹, 夏成宇¹, 钱利勤^{1*}

(1. 长江大学机械工程学院, 荆州 434023; 2. 中石油西南油气田分公司页岩气研究所, 成都 610000)

摘要 目前从各类冲击器的现场应用看, 冲击器长度普遍约为1 m, 在与钻头连接使用时因增加了稳定器与钻头之间的距离, 造成钻具的预期斜率和钻头侧向力降低, 进而影响井下造斜效果, 而内置钻头多维冲击器可以有效解决这一问题。为了使内置钻头多维冲击器的性能能够实现最大化, 降低压耗, 采用PB(Plackett-Burman)筛选试验设计对冲击器内部参数进行了筛选试验, 得到各参数对工具性能影响由大到小排列为: 射流道宽度 > 入口面积 > 出口面积 > 振荡腔长度 > 双反馈流道宽度 > 附壁面曲率半径 > 劈间角, 再利用BBD(Box-Behnken design)响应面法对排名前三的显著影响参数进行深入分析, 得到内置钻头多维冲击器内部结构优化组合为入口面积为1 203.416 mm²、射流道宽度为14 mm, 出口面积为455 mm², 最后通过Fluent软件仿真验证了优化方法的有效性, 满足设计要求。

关键词 多维冲击; PB(Plackett-Burman)筛选试验设计; BBD(Box-Behnken design)响应面法; fluent仿真; 压耗
中图分类号 TE934; **文献标志码** A

Optimization of Performance of Multi-dimensional Impactor with Built-in Drill Bit Based on PB-BBD Response Surface Method

WEI Ming-ji¹, LI Chen-tao¹, WANG Xu-dong², LIU Yang-yang¹, XIA Cheng-yu¹, QIAN Li-qin^{1*}

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China;

2. Shale Gas Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, Petrochina, Chengdu 610000, China)

[Abstract] The length of the impactor is generally about one meter according to the current application of all kinds of impactors. As the existing impactor increases the distance between the stabilizer and the drill bit, it will cause the theoretical build slope and the lateral force of the drill bit to decrease when it is used in connection with the drill bit. This will in turn affects the drilling deviation section. In this regard, the multi-dimensional impactor with built-in drill bit can effectively solve this problem. Firstly, in order to maximize the performance of the multi-dimensional impactor with built-in drill bit and reduce the pressure loss, the PB (Plackett-Burman) screening test design was adopted to conduct screening tests on the internal parameters of the impactor. The effect of each parameter on the tool performance was as follows: Jet channel width > inlet area > Outlet area > length of oscillating cavity > width of double feedback channel > curvature radius of wall attached surface > wedge Angle. Then, BBD (Box-Behnken design) response surface method was used to provide an in-depth analysis of the top three significant impact parameters. The optimized combination of the internal structure of the multi-dimensional impactor with built-in drill bit was obtained as follows: the inlet area is 1 203.416 mm², the jet channel width is 14 mm, and the outlet area is 455 mm². Finally, the effectiveness of the optimization method was verified by the simulation of Fluent software, which met the design requirements.

[Keywords] multidimensional shocks; PB (Plackett-Burman) screening test design; BBD (Box-Behnken design) response surface method; fluent simulation; pressure drop

随着中国石油资源的大规模开发和经济的快速发展, 地层中的原油量逐渐减少, 难以满足当前的需求。因此, 石油钻探正逐渐从浅层向深层转移^[1]。然

而, 在深层钻探过程中, 常常会遇到硬度高、岩性复杂的地层, 这些地层不仅增加了钻井作业的难度, 也影响了钻井效率^[2-3]。特别是在面对硬度较大或中等硬

收稿日期: 2024-09-09 修订日期: 2025-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(52204001); 湖北省重点研发计划(2021BAA053)

第一作者: 韦明吉(2001—), 男, 壮族, 广西河池人, 硕士研究生。研究方向: 石油钻采管柱力学。E-mail: 2549962287@qq.com。

*通信作者: 钱利勤(1982—), 女, 汉族, 江苏苏州人, 硕士, 副教授。研究方向: 钻完井工具研发。E-mail: 441573083@qq.com。

度的粗颗粒非均质岩层时,钻头的破岩效率会显著下降。深层岩石通常硬度高、脆性强、抗压性强,因此,采用冲击式破岩技术成为必要^[4]。利用井下冲击器施加的周期性冲击力,可以促进岩石的剪切作用,扩展其裂纹,有效降低岩石的机械强度^[5],从而为聚晶金刚石复合片(polycrystalline diamond compact,PDC)钻头的旋转剪切作用创造有利条件。

目前对于井下冲击破岩主要由3种方式,分别为轴向冲击、扭力冲击以及复合冲击。在早期的石油钻井中,主要以研发轴向冲击器为主^[6],但是这类冲击器存在着工作时长短,无法适用于复杂的地层环境等弊端。后来随着科技的进步,研究的重点转向扭力冲击器^[7]和复合冲击器^[8-9],何超等^[10]分析了流体在工具内部的压力和速度分布规律以及对扭力冲击器性能的影响规律。Deen等^[11]在对当前扭力冲击器的研究中指出,扭力冲击器能有效缩短钻井时间并延长钻头使用寿命。陈东方等^[12]建立轴扭耦合冲击器性能参数数学模型,设计新型复合冲击器,同时实现周向和扭向两种功能,进一步提高钻头的破岩效率。

目前使用的冲击器长度普遍约为1 m,当其与钻头一起在斜井段作业时,会使得稳定器与钻头之间的间隔变大。这不仅减少了传统定向钻具组合的预期斜率和钻头侧向推力,还影响井下造斜效果^[13-14],而内置钻头多维冲击器^[15]可以有效解决这一问题。这种冲击器能够在不影响预定钻井斜率的情况下,实施复合冲击,从而提升钻井作业的效率。为了最大化内置钻头多维冲击器的效能并减少压力损失,现对冲击器的内部结构进行细致的优化。首先,通过PB(Plackett-Burman)设计方法筛选出对多维冲击器性能有显著影响的结构参数。随后,利用Box-Behnken响应面设计,对这些关键参数进行深入分析,以确定最佳的参数组合。最终,通过Fluent软件的数值模拟验证所提出优化方法的有效性,确保钻头性能的显著提升。

1 多维冲击器的结构及工作原理

如图1所示,钻头内置多维冲击器的内部结构主要有入口、射流道、冲击腔、劈尖、双反馈流道、出口1(正面)和出口2(背面)构成,其设计思路来源于高速流体的附壁效应^[16]。

如图2所示为内置钻头多维冲击器的工作原理图。钻井液从多维冲击器入口进入之后,通过射流道形成高速射流,射流冲击劈尖之后分流从出口1和出口2流出,由于附壁效应的影响,射流在短暂的稳定之后会向其中一侧偏转,直至贴合壁面,与此同时,该侧的反馈流道内流体流量增大,进而反作

用于射流道上促使高速射流向另一侧偏转,直至贴合壁面,接着另一侧的反馈流道内流体流量增大反作用于高速射流使其偏转直至贴合壁面,完成一个冲击周期。在持续注入钻井液下,多维冲击器形成周期性的冲击,作用于整个工具,形成轴向的冲击载荷。当钻井液从出口喷出时,会形成如图3所示。

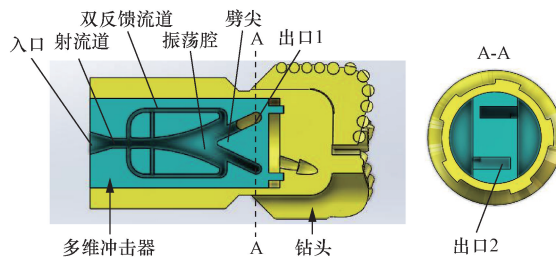


图1 内置钻头多维冲击器基本结构
Fig. 1 Basic structure of multi-dimensional impactor with built-in drill bit

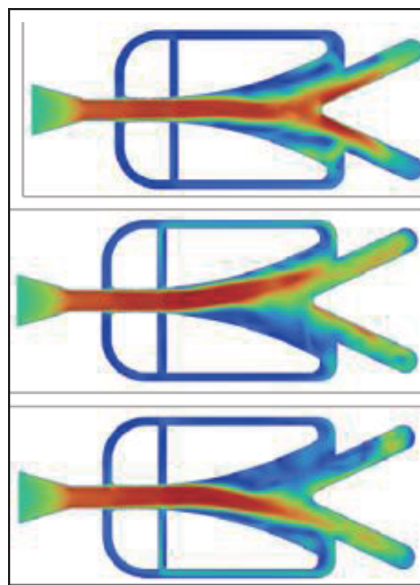
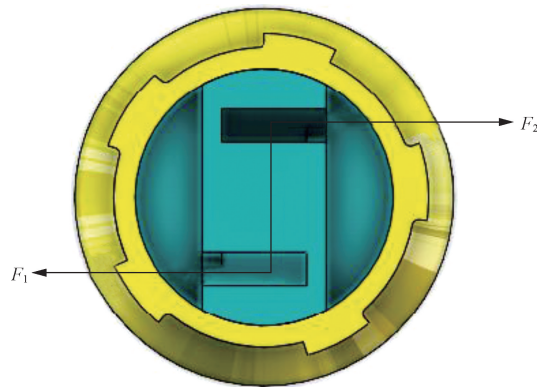


图2 多维冲击器的经典状态
Fig. 2 Classical state of multi-dimensional impactor



F_1, F_2 为力偶

图3 多维冲击器的出口

Fig. 3 Outlet of multidimensional impactor

的力偶,产生扭矩。在高速射流不断冲击切换下,两个出口也会产生周期性的扭转冲击并通过键传递至钻头,最后冲击器产生的轴向和扭转冲击传递至钻头实现复合冲击,提高钻井效率。

2 仿真模型的建立

内置钻头多维冲击器的性能主要体现在其平均压力消耗和振动频率上,这些性能指标在很大程度上受内部结构参数、钻井液的流量和密度的影响。本文研究主要集中对冲击器的内部结构参数进行优化分析,因此设定钻井液的流量为 30 L/s,密度为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。如图 4 所示,冲击器内部结构参数有:入口面积 S_1 、射流道宽度 l_1 、冲击腔长度 l_2 、双反馈流道宽度 l_3 、附壁面曲率 K 、劈间角 α 以及出口面积 S_2 。优化的目标是在确保多维冲击器的平均压降维持在 3 MPa 的同时,尽可能提高其冲击频率。

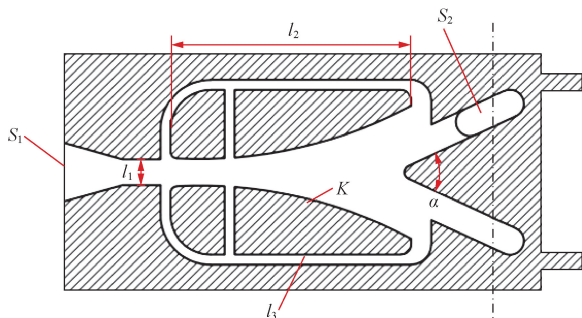


图 4 多维冲击器工具内部结构参数
Fig. 4 Internal structural parameters of the multi-dimensional impactor tool

2.1 流体域提取及网格划分

考虑到多维冲击器的内部流道的特殊形式以及方便后期的优化研究,根据实际情况通过 Solid-Works 建立多维冲击器三维模型,并经过 Workbench 2021 R2 软件对三维模型进行布尔运算获取工具流体域,同时对它进行仿真分析。

如图 5 所示,模型的流体区域主要采用以六面体网格为主导进行划分。在确保计算精度与效率之

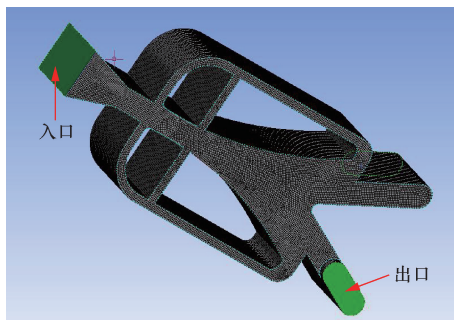


图 5 冲击器流体计算域
Fig. 5 Computational domain of impactor fluid

间取得平衡的前提下,经过网格无关性验证,最终确定网格尺寸为 1 mm。

2.2 边界条件设置

内置钻头多维冲击器内部流道结构复杂,流体流动状况处于非稳态过程,为湍流流动,为了保证仿真的收敛性和稳定性,结合工程应用经验采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型求解,该模型在工程计算中广泛使用,它能够提供较为准确的预测结果。流体密度依据常用的钻井液密度范围,设为 $1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,模型入口设置为速度入口,依据实际工况排量 30 L/s 计算入口速度大小,出口设置为压力出口,在入口处建立压力变换监测器,用于监测仿真过程中工具的压力变化情况。

3 多维冲击器优化设计

3.1 PB 试验设计筛选显著因素

PB (Plackett-Burman) 设计法^[17-19]是一种试验设计方法,用于筛选影响特定过程或系统的关键因素。这种方法最初由罗杰·普莱克特 (Roger Plackett) 和戴维·伯曼 (David Burman) 于 1946 年提出。Plackett-Burman 设计的原理是采用二进制因子水平,即每个因子采用两个水平,通常是低水平和高水平。这种方法的主要目的是在尽可能少的试验次数内识别最具影响力的因子,为后续更详细的试验设计提供指导。它特别适用于初步筛选中,当因子较多时,可以帮助研究人员迅速确定影响最大的因子。面对多维冲击器复杂的内部流道参数,为了降低计算量和试验成本,首先采用 PB 试验设计方法高效找出对冲击器性能有显著影响的关键因子。随后,针对这些关键因子进行深入优化,极大地减少了所需试验计算量并缩短了仿真分析的时间。

利用 Minitab22 软件设计 12 次 PB 试验,考察入口面积(A)、射流道宽度(B)、振荡腔长度(C)、双反馈流道宽度(D)、附壁面曲率半径(E)、劈间角(F)以及出口面积(G)对钻头内置多维冲击器平均压耗(Y_1)以及冲击频率(Y_2)的显著性影响,如表 1 所示,对每个因子取高(+)、低(-)两个水平。

表 2 为 PB 设计试验方案和结果,对表数据进行

表 1 PB 设计试验因子及水平

Table 1 PB design test factors and levels

变量	含义	低水平取值	高水平取值
A	入口面积/mm ²	1 100	1 300
B	射流道宽度/mm	12	16
C	振荡腔长度/mm	120	130
D	双反馈流道宽度/mm	4	6
E	附壁面曲率半径/mm	200	240
F	劈间角/(°)	45	55
G	出口面积/mm ²	440	470

表2 PB设计试验方案及结果
Table 2 PB design test scheme and results

序号	A	B	C	D	E	F	G	Y_1/Pa	Y_2/Hz
1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	3 857 456.651	16.243 2
2	1	-1	1	1	-1	1	-1	3 964 735.376	17.354 8
3	1	1	-1	1	-1	-1	-1	2 240 788.420	15.658 2
4	-1	1	1	-1	1	-1	-1	3 071 887.675	17.854 2
5	1	1	-1	1	1	-1	1	2 004 207.768	16.658 4
6	1	-1	-1	-1	1	1	1	3 427 321.773	18.258 7
7	-1	1	1	1	-1	1	1	2 939 647.942	17.865 2
8	-1	1	-1	-1	-1	1	1	2 407 949.749	16.525 9
9	-1	-1	1	1	1	-1	1	4 600 938.772	18.369 8
10	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	4 564 418.867	19.658 3
11	1	1	1	-1	1	1	-1	2 495 584.365	17.857 2
12	-1	-1	-1	1	1	1	-1	4 811 796.994	19.668 7

回归分析,以冲击器平均压耗 Y_1 为响应值,得到回归方程,即

$$Y_1 = 3\ 365\ 561 - 367\ 212A - 838\ 884B + 122\ 814C + 61\ 458D + 36\ 395E - 24\ 388F - 159\ 307G \quad (1)$$

表3为PB设计试验分析结果以及图6所示为各因子对平均压耗 Y_1 的标准效应值,各因子对工具的影响显著性可以通过 P 值 ($P < 0.05$ 为显著因子)和标准化效应值 H ($H > 2.776$ 为显著因子)反映,从表3可知,各参数因子对工具性能影响由大到

表3 PB设计试验分析结果

Table 3 Analysis results of PB design test

变量	F	P	显著性
A	62.86	0.001 4	显著
B	328.03	0.000 1	显著
C	7.03	0.056 9	不显著
D	1.76	0.255 2	不显著
E	0.62	0.475 9	不显著
F	0.28	0.626 4	不显著
G	11.83	0.026 3	显著

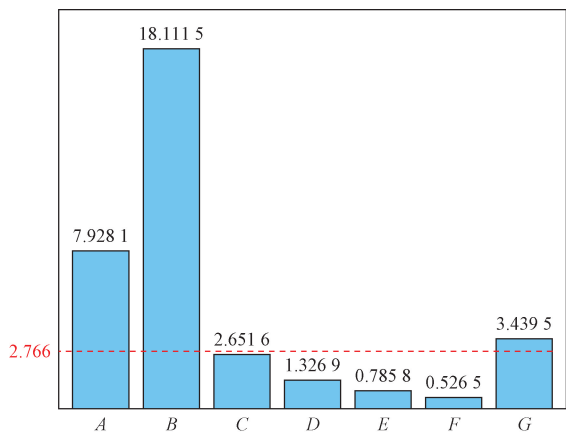


图6 平均压耗标准效应 parato 图

Fig. 6 Parato diagram of the standard effect of average pressure consumption

小排列为:射流道宽度 > 入口面积 > 出口面积 > 振荡腔长度 > 双反馈流道宽度 > 附壁面曲率半径 > 劈间角,其中入口面积、射流道宽度以及出口面积为显著因子,故后续 BBD (Box-Behnken design) 响应面法主要对这3个因子进行深入分析,其余非显著因素均设为中水平。

如图7所示,所有因子对工具冲击频率 Y_2 的标准效应值 H 均未超过 2.776 的阈值,这表明在方差分析中,这些因子对冲击频率的影响不显著。同时,由表2可知,冲击频率的数值都达到一个较优的水平。因此,在后续的优化工作中,主要将平均压耗 Y_1 作为主要的优化目标,并力求其达到最优值。

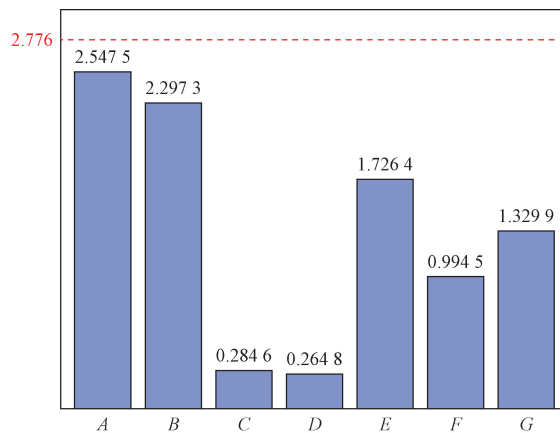


图7 工具冲击频率标准效应 parato 图

Fig. 7 Parato diagram of the standard effect of tool impact frequency

3.2 BBD 响应面法显著因素优化

基于PB试验的分析结果,选定振荡腔长度为 125 mm、双反馈流道宽度为 5 mm、附壁面曲率半径为 220 mm、劈间角为 50°作为固定参数。进一步对射流道宽度、入口面积和出口面积进行深入分析,同时以工具的平均压降 (Y_1) 和冲击频率 (Y_2) 作为

性能指标。采用 Design-Expert12 软件规划 BBD 响应面试验^[20-22]。对每个因子设置 3 个因素水平如表 4 所示。

表 5 为响应面试验的设计布局及其结果,利用数学分析软件对表中的试验结果进行方差分析,得到如表 6 所示响应面试验模型方差分析结果。

对表 5 数据进行回归分析,以冲击器平均压耗 Y_1 为响应值,得到回归方程为

$$Y_1 = 3.11 - 0.29B - 0.295A - 0.25G - 0.0225B^2 + 0.0275A^2 + 0.2625G^2 + 0.055BA - 0.025BG + 0.095AG \quad (2)$$

表 4 BBD 试验因素水平

Table 4 Levels of BBD test factors

水平	射流道宽度/mm	入口面积/mm ²	出口面积/mm ²
-1	12	1 100	440
0	14	1 200	455
1	16	1 300	470

表 5 BBD 设计方案及结果

Table 5 BBD design scheme and results

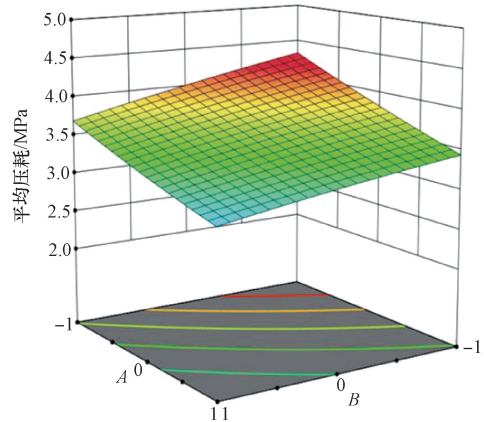
序号	B	A	G	Y_1 /MPa	Y_2 /Hz
1	0	1	-1	3.22	18.64
2	0	0	0	3.01	18.25
3	0	1	1	2.81	18.79
4	0	0	0	3.15	19.67
5	0	0	0	3.17	18.54
6	1	0	1	2.84	18.08
7	-1	0	-1	3.81	18.72
8	0	-1	1	3.39	16.60
9	-1	-1	0	3.67	18.02
10	1	-1	0	2.97	17.72
11	-1	0	1	3.46	18.64
12	-1	1	0	3.15	17.05
13	0	-1	-1	4.18	20.04
14	1	1	0	2.67	17.63
15	1	0	-1	3.29	18.66

表 6 BBD 设计方差分析

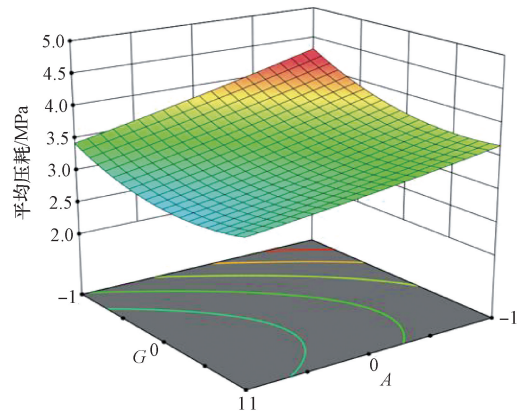
Table 6 Analysis of variance of BBD design

来源	自由度	离差平方和	均方	F	P
模型	9	2.181 29	0.242 366	12.09	0.007
B	1	0.672 80	0.672 800	33.57	0.002
A	1	0.696 20	0.696 200	34.74	0.002
G	1	0.500 00	0.500 000	24.95	0.004
B ²	1	0.001 87	0.001 869	0.09	0.772
A ²	1	0.002 79	0.002 792	0.14	0.724
G ²	1	0.254 42	0.254 423	12.70	0.016
BA	1	0.012 10	0.012 100	0.60	0.472
BG	1	0.002 50	0.002 500	0.12	0.738
AG	1	0.036 10	0.036 100	1.80	0.237
误差	5	0.100 20	0.020 040		
失拟项	3	0.085 00	0.028 333	3.73	0.219
纯误差	2	0.015 20	0.007 600		
合计	14	2.281 49			

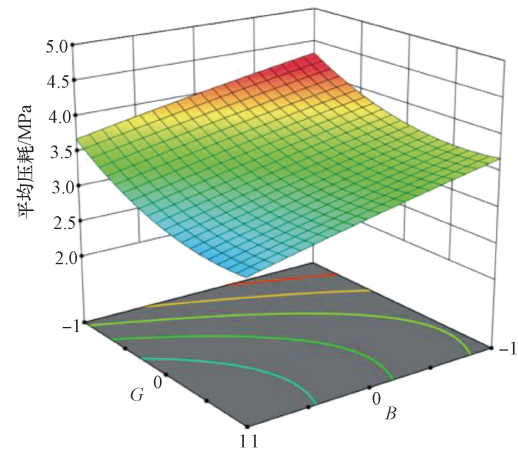
从表 6 可知,响应面试验模型的 $P = 0.007$, 远低于 0.01 的显著性水平,同时模型的修正决定系数 $R^2 = 0.956 1$, 这表明模型非常显著,拟合效果较好,能够有效地反映各影响因子与工具平均压耗之间的关联性。同时,失拟项的 $P = 0.219$, 高于 0.05, 说明模型的误差较低。通过 Design-Expert12 软件绘制的影响因子对平均压耗的三维响应曲面如图 8 所示。



(a) 射流道宽度与入口面积交互作用的响应面



(b) 入口面积与出口面积交互作用的响应面



(c) 射流道宽度与出口面积交互作用的响应面

图 8 影响因子对平均压耗的影响

Fig. 8 The influence of influencing factors on average pressure consumption

3.3 优化验证

利用上述分析结果,通过软件对多维冲击器影响显著因子进行进一步优化,预设工具压耗为 3 MPa,并设置冲击频率至最高值。经过优化,得到最优参数配置:出口面积为 455 mm²、入口面积为 1 203.416 mm²,射流道宽度为 14.68 mm。

得到最优参数配置后对冲击器内部结构参数进行相应调整,并利用 fluent 软件进行仿真分析,得到冲击器平均压降为 2.985 MPa,冲击频率为 19.79 Hz(满足优化目标),同时得到多维冲击器的轴向冲击为 23.46 kN、冲击扭矩为 547 N·m,均符合冲击器的设计要求。如图 9 所示,冲击器最大压耗为 3.92 MPa,最小压耗为 2.28 MPa,压力损失在合理范围内。仿真结果与预设结果的平均压降相近证明了模型的高预测准确性,采用 BBD 响应面法优化的多维冲击器工具压降模型显示出良好的准确性和可靠性。

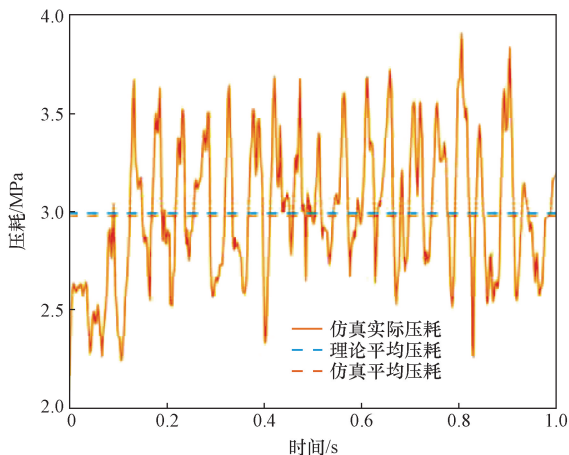


图9 内置钻头多维冲击器验证压降

Fig. 9 The influence of influencing factors on average pressure consumption

4 结论

(1)根据 PB 设计的筛选试验分析,确定内置钻头多维冲击器的关键结构参数包括射流道宽度、入口面积以及出口面积。试验数据表明,这 3 个参数对设备性能产生负效应影响,意味着当这些结构参数的数值减小,将导致工具的平均压耗增大。

(2)本文研究应用 BBD 响应面优化方法,针对 3 个关键参数进行了深入分析与优化。通过构建工具平均压降的拟合回归模型,以及绘制参数间交互作用的响应面图,揭示了这些参数如何共同影响工具的性能。优化后,推荐的射流道宽度为 14.68 mm,入口面积为 1 203.416 mm²,出口面积为 455 mm²。为了验证优化模型的准确性和可靠性,采用

Fluent 软件进行了数值仿真。仿真结果显示,优化后的模型性能稳定,且符合设计规范。

(3)通过 PB 设计筛选与 BBD 响应面相结合的方法,能准确找到对冲击器性能影响显著的相关参数,提高优化结果的可靠性和准确性,并且对显著参数进行深入分析,得到冲击器优化最佳参数。本文方法为冲击器在寻找最优结构参数提供了一种新的途径。

参 考 文 献

- [1] 何登发,贾承造,赵文智,等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1162-1172.
He Dengfa, Jia Chengzao, Zhao Wenzhi, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1162-1172.
- [2] 贾承造. 含油气盆地深层-超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1-12.
Jia Chengzao. Key scientific and technological problems of petroleum exploration and development in deep and ultra-deep formation[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science Edition), 2023, 47(5): 1-12.
- [3] 张春亮,王锦成,柯晓华,等. 磨损齿 PDC 钻头的切削性能试验[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43(1): 35-42.
Zhang Chunliang, Wang Jincheng, Ke Xiaohua, et al. Experimental study on working mechanics of PDC bit with worn teeth[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023, 43(1): 35-42.
- [4] 纪杰杰,李洪涛,吴发名,等. 冲击荷载作用下岩石破碎分形特征[J]. 振动与冲击, 2020, 39(13): 176-183, 214.
Ji Jiejie, Li Hongtao, Wu Faming, et al. Fractal characteristics of rock fragmentation under impact load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(13): 176-183, 214.
- [5] 高德利,刘维,万绪新,等. PDC 钻头钻井提速关键影响因素研究[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 20-34.
Gao Deli, Liu Wei, Wan Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 20-34.
- [6] 贾涛,徐丙贵,李梅,等. 钻井用液动冲击器技术研究进展及应用对比[J]. 石油矿场机械, 2012, 41(12): 83-87.
Jia Tao, Xu Binggui, Li Mei, et al. Research progress and application of contrast on hydraulic impactor for drilling [J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(12): 83-87.
- [7] Cui H, Li W, Xiao H, et al. Study on the influence of fluid pulsation on hydraulic impactor performance in drilling engineering[J]. Processes, 2023, 11(8). DOI: 10.3390/PR11082392.
- [8] 田家林,胡志超,张昕,等. 纵扭复合冲击工具动力学特性研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(7): 141-151.
Tian Jialin, Hu Zhichao, Zhang Xin, et al. Study on dynamic characteristics of longitudinal torsional composite impactor [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 141-151.
- [9] 刘书斌,倪红坚,张恒. 轴扭复合冲击工具的研制与应用[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(5): 69-76.
Liu Shubin, Ni Hongjian, Zhang Heng. Development and applica-

- tions of a compound axial and torsional impact drilling tool[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(5): 69-76.
- [10] 何超, 邓虎, 罗祝涛, 等. 扭力冲击器流体仿真优化与试验[J]. 钻采工艺, 2023, 46(4): 26-32.
He Chao, Deng Hu, Luo Zhutao, et al. Experiment of fluid simulation for torsion impactor [J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(4): 26-32.
- [11] Deen C A, Wedel R J, Nayan A, et al. Application of a torsional impact hammer to improve drilling efficiency [C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver: Society of Petroleum Engineers, 2011: 10-15.
- [12] 陈东方, 全兵, 肖新启, 等. 轴扭耦合冲击器结构与室内试验[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(1): 78-83.
Chen Dongfang, Quan Bing, Xiao Xinqi, et al. Structure design and laboratory testings of an axial & torsional coupling impactor [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 52(1): 78-83.
- [13] 张文平, 王恒, 孙德兴, 等. 近钻头冲击器对定向钻进中造斜率的影响规律[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 45-52.
Zhang Wenping, Wang Heng, Sun Dexing, et al. Effect of near-bit impactor on build-up rate in directional drilling [J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 45-52.
- [14] 王舸, 黄文君, 高德利. 滑动钻进造斜率预测与分析[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 139-144, 160.
Wang Ge, Huang Wenjun, Gao Deli. Prediction and analysis of build-up rate during sliding drilling [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 139-144, 160.
- [15] 李陈涛, 冯超, 王杰, 等. 内置钻头多维冲击器仿真与室内试验研究[J]. 石油机械, 2024, 52(11): 29-35.
Li Chentao, Feng Chao, Wang Jie, et al. Simulation analysis and laboratory test of multi-dimensional impactor with built-in drill bit [J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(11): 29-35.
- [16] 艾白布·阿不力米提, 刘永红, 庞德新, 等. 一种新型流体附壁自激式水力振荡器及其射流振荡特性[J]. 振动与冲击, 2022, 41(17): 193-203.
Abbu Abalimiti, Liu Yonghong, Pang Dexin, et al. A new type of fluid wall attached self-excited hydraulic oscillator and its jet oscillation characteristics [J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(17): 193-203.
- [17] 严德林, 黄雷, 邱婧, 等. PB 试验结合 BBD 响应面法优化纳豆 γ -聚谷氨酸发酵条件[J]. 食品工业科技, 2024, 45(1): 208-215.
Yan Delin, Huang Lei, Qiu Jing, et al. Optimization of the fermentation conditions of poly- γ -glutamic acid from natto by PB experiment combined with BBD response surface method [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 45(1): 208-215.
- [18] 赵重博, 王晶, 吴博, 等. 基于 PB 设计和 BBD 响应面法优化制天南星多糖超声辅助提取工艺及抗肿瘤活性研究[J]. 中国新药杂志, 2019, 28(9): 1139-1144.
Zhao Zhongbo, Wang Jing, Wu Bo, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction technology and anti-tumor activity of polysaccharide from araceae based on PB design and BBD response surface method [J]. Chinese Journal of New Drugs, 2019, 28(9): 1139-1144.
- [19] 蒋征, 王红, 吴启南. PB 试验结合 BBD 响应面法优化浮萍多糖的提取工艺研究[J]. 中药材, 2015, 38(6): 1283-1286.
Jiang Zheng, Wang Hong, Wu Qinan. Optimization of extraction process of duckweed polysaccharide by PB test combined with BBD response surface method [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2015, 38(6): 1283-1286.
- [20] 朱贺, 杨利明. 基于响应面法的固定翼无人机 V 形尾翼轻量化设计[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(25): 11002-11010.
Zhu He, Yang Liming. Lightweight design of V-tail for fixed-wing UAV based on response surface methodology [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(25): 11002-11010.
- [21] 姚周坤, 周思柱, 黄天成, 等. 基于相关性分析和响应面法的复合旋流器结构参数优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(11): 4479-4487.
Yao Zhoukun, Zhou Sizhu, Huang Tiancheng, et al. Structural parameter optimization of composite cyclone based on correlation analysis and response surface method [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 24(11): 4479-4487.
- [22] 吴欣袁, 田浩, 杨文领, 等. 基于响应曲面法的割缝筛管结构参数优化[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14555-14562.
Wu Xinyuan, Tian Hao, Yang Wenling, et al. Optimization of slotted screen structural parameters based on response surface method [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(34): 14555-14562.