

旋转喷枪喷嘴参数优选研究

曹海燕

(中国石化中原油田分公司石油工程技术研究院,河南 濮阳 457001)

摘要:旋转喷枪是一种用于冲洗井下射孔炮眼和管壁的新型工具,其关键设计是喷嘴,包括用于直喷冲洗的直喷喷嘴和用于推动喷枪旋转的动力喷嘴。根据水力学理论计算,初步得到两种喷嘴的数量、孔眼直径及动力喷嘴的相位角,然后通过模拟井下套管内的旋转实验研究优选出最佳的喷嘴参数。研究表明,设计 2 个孔眼直径为 2.5 mm、相位角为 40°的动力喷嘴和 2 个孔眼直径为 4 mm 的直喷喷嘴的旋转喷枪能够满足现场应用需求。

关键词:旋转喷枪;直喷喷嘴;动力喷嘴;水力学计算;实验优选

中图分类号:TE931 **文献标志码:**A

Study on optimization of nozzle parameters of rotary spray gun

CAO Haiyan

(Petroleum Engineering Technology Research Institute of Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang 457001, China)

Abstract: A rotary spray gun is a new tool for flushing borehole perforations and pipe walls. Its key design is nozzles, including direct spray nozzles for direct spray flushing and power nozzles for rotating the spray gun. According to the calculation of hydraulic theory, the dimensions of nozzles were obtained initially, including the numbers and hole diameters of two kinds of nozzles and the phase angle of the power nozzles, and then the optimal nozzle parameters were selected by simulating the rotation experiment in the downhole casing. The results show that the rotary spray gun design of two power nozzles with a 2.5 mm hole diameter and a phase angle of 40° and two direct-injection nozzles with a 4 mm hole diameter can meet the requirements of field applications.

Key words: rotary spray gun; direct injection nozzle; rotated power nozzle; hydraulic calculation; experimental optimization

旋转喷枪是一种新型井下水力喷射工具,工作时连接在射孔枪下端,以旋转喷射的方式强力清洗射孔后的炮眼,也可用于旋转清洗套管内壁^[1-3]。众多科技工作者研制了各具特色的井下旋转射流清洗工具,如吉林油田的水力喷射解堵器^[4]、江汉机械研究所的旋转射流除垢工具^[5]、中国石油大学(北京)的旋转射流多孔喷嘴^[6]等,其旋转射流部分均设置在工具的底端,下部无法连接其它工具,而现有的射孔枪只能连接在管柱末端。为解决此矛盾,设计了一种两端设有连接接头的旋转喷枪工具,可分别连接输送管柱和射孔枪。

1 旋转喷枪原理

旋转喷枪主要由中心管、旋转套、减阻套和下接头组成(见图1)。中心管的下端与下接头螺纹密封连接,旋转套和减阻套套装在中心管上;喷嘴设

置在旋转套上,包括直喷喷嘴和动力喷嘴。入井时,中心管的上端与投送管柱连接,下接头与射孔枪串连接。工作时,由于中心管和旋转套之间采用径向非接触式密封^[1],漏失量极小,所以井口泵送的液体主要从直喷喷嘴和动力喷嘴处流出,作用在动力喷嘴上的液流形成旋转扭矩促使旋转套旋转,通过直喷喷嘴的液流形成较大射流冲击力清洗孔眼和套管内壁。由此可见,旋转喷枪的设计核心是动力喷嘴和直喷喷嘴的尺寸参数。

收稿日期:2019-03-18;改回日期:2019-04-05。

作者简介:曹海燕(1986—),高级工程师,现从事油田开发井下工具的研发和现场推广工作。E-mail:wn917@126.com。

基金项目:国家科技重大专项《高含硫气藏安全高效开发技术》之课题《高含硫气藏改善储层动用状况工程技术研究》(课题编号:2016ZX05017-002)。

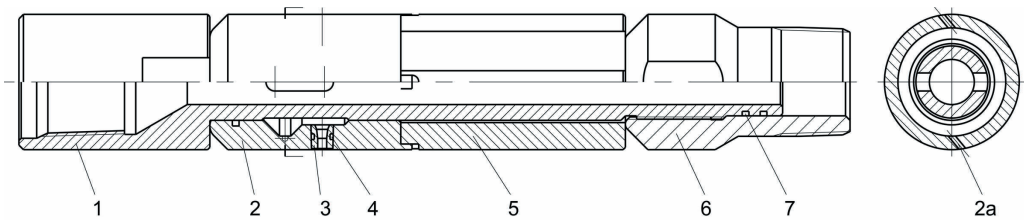


图1 旋转喷枪结构

1.中心管;2.旋转套;2a.动力喷嘴;3.直喷嘴;5.减阻套;6.下接头;4、7.“O”型密封圈

2 水力学理论计算

喷嘴的孔眼大小不仅影响射流喷出速度,还影响喷嘴处管内外压差,该压差与连续油管内的摩阻压降损失叠加影响整个管柱的承压能力,所以通过水力学理论确定连续油管型号及最大施工排量后,初步设定满足施工要求的直喷嘴和动力喷嘴的孔眼直径及数量。

2.1 确定连续油管型号及最大施工排量

连续油管的型号及地面施工排量直接影响施工摩阻压降损失 ΔP ,而现场作业要求连续油管最大工作压力 70 MPa,可通过计算对比确定出合适的连续油管型号及地面施工排量,PTT 和 QT 连续油管制造厂家推荐摩阻压降损失 ΔP 计算公式如下:

$$\Delta P = \frac{4fL\rho v^2}{D} \tag{1}$$

式中, f 为摩阻因子; L 为连续油管长度,m; ρ 为液体密度, kg/m^3 ; v 为管内液体速度, m/s ; D 为连续油管内径,m。

根据现场现有的连续油管型号,施工排量范围 0.3~0.6 m^3/min ,按照普光气田连续油管施工长度 6 000 m 计算得到摩阻压降损失(见表 1)。

按照现场作业要求连续油管最大工作压力 70 MPa 的要求,从表 1 的计算结果可以得出 $\varnothing 31.75$ mm 和 $\varnothing 38.1$ mm 型号连续油管不能用于施工作业, $\varnothing 44.45$ mm 连续油管最大施工排量为 0.35 m^3/min , $\varnothing 50.8$ mm 连续油管最大施工排量为 0.5 m^3/min 。

2.2 确定喷嘴孔眼直径

喷嘴的直径与施工排量和出口速度有关:

$$\frac{Q}{60} = \frac{\pi d_{\text{当量}}^2 v}{4C_d} \tag{2}$$

其中, Q 为地面施工排量, m^3/min ; C_d 为喷嘴流量系数,取值 0.85; $d_{\text{当量}}$ 为喷嘴当量直径,mm; v 为

喷嘴出口速度,最小取值 150 m/s。计算得到允许施工排量 0.3~0.5 m^3/min 范围下喷嘴当量直径取值(见表 2)。

表 1 不同工况下摩阻压降损失

施工排量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	液体粘度/ $\text{mPa} \cdot \text{s}$	各型号连续油管的摩阻压降损失/MPa			
		$\varnothing 31.75$ mm	$\varnothing 38.1$ mm	$\varnothing 44.45$ mm	$\varnothing 50.8$ mm
0.3	2	211	79	37	21
	5	253	94	45	25
	8	278	104	49	27
0.35	2	278	104	49	27
	5	334	123	59	33
	8	367	137	65	36
0.40	2	353	132	63	35
	5	424	158	75	42
	8	466	174	83	46
0.45	2	437	163	77	43
	5	525	196	93	52
	8	557	215	102	57
0.45	2	437	163	77	43
	5	525	196	93	52
	8	557	215	102	57
0.50	2	528	197	94	52
	5	634	237	112	62
	8	697	260	123	69
0.55	2	627	234	111	62
	5	753	281	133	74
	8	827	309	147	81
0.60	2	733	274	130	72
	5	881	329	156	87
	8	967	361	171	95

表 2 不同施工排量下喷嘴的最大当量直径

施工排量/(m ³ ·min ⁻¹)	d _{当量} /mm
0.3	6.01
0.35	6.49
0.4	6.94
0.45	7.36
0.5	7.76

根据上述计算结果,初步设计旋转喷枪的动力喷嘴的孔眼直径为 2 mm,数量 4 个,直喷喷嘴的孔眼直径为 4 mm,数量 2 个,计算当量直径为 6.93 mm,符合表 2 的要求,施工排量在 0.4~0.5 m³/min 范围内。

3 旋转模拟实验优选动力喷嘴参数

旋转喷枪的旋转速度主要由动力喷嘴产生的旋转力矩决定,与动力喷嘴的数量、孔眼直径和相位角有关。由于通过简单的水力学理论计算得到的旋转速度数据和实际差别可能很大,所以设计了旋转模拟实验及实验装置,通过加工不同参数的动力喷嘴的旋转喷枪进行旋转模拟实验,根据实验的结果来确定动力喷嘴的设计参数。

3.1 实验装置及实验介绍

旋转模拟实验装置主要由透明实验套管及直立控制部件、旋转喷枪提挂短节、枪身高度控制固定部件、接泵弯头、盛水箱以及支架等组成(见图 2)。

实验时,将装置按图示结构安装完毕,接泵打压模拟旋转喷射,用 MONARCH(蒙那多)PLT200 手持式转速表测量旋转套的转速,观察记录泵压、排量、转速。更换旋转喷枪或者不同喷嘴的旋转套重复上述步骤,直至完成动力喷嘴的参数优选。

3.2 实验结果及分析

旋转喷枪的旋转速度主要取决于作用在动力喷嘴上的液流产生的旋转力矩,即液流作用在动力

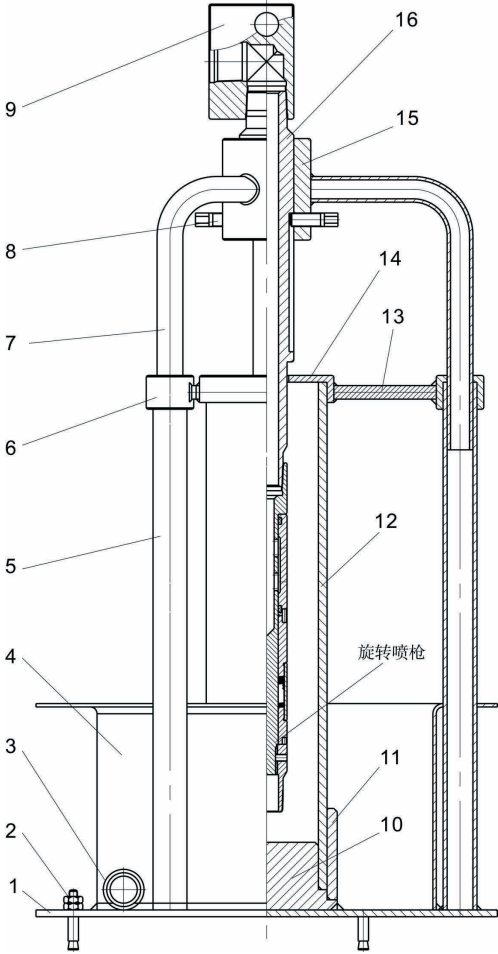


图2 旋转模拟实验装置

- 1.底板;2.地脚膨胀螺丝;3.出水管;4.水箱侧板;5.支架立柱;
6.立柱套;7.旋转喷枪支架腿;8.定位顶丝;9.接泵弯头;10.套管底座;
11.套管下固定套;12.透明套管;13.支架辐条;14.套管上固定套;
15.旋转喷枪枪托;16.旋转喷枪提挂短节

喷嘴上的旋转力和相位角产生的力臂的乘积,而旋转力与动力喷嘴的孔眼直径和数量相关,力臂与动力喷嘴的相位角相关。根据上述关系,实验中多次调整动力喷嘴的参数直至满足现场应用要求(见表 3)。

表 3 旋转实验结果及分析

实验序号	喷嘴参数	排量/(m ³ ·min ⁻¹)	泵压/MPa	转速/(r·min ⁻¹)	结果分析
1	4个 2 mm、90° 相位角的动力喷嘴, 2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.05~0.3	2~17	0	旋转力过小,故下次试验调大喷嘴直径
2	4个 3 mm、90° 相位角的动力喷嘴, 2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.2	2	300~400	喷嘴当量直径 8.25 mm,超出允许范围,故下次试验减少喷嘴个数
3	2个 3 mm、90° 相位角的动力喷嘴, 2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.2	2	180	喷嘴当量直径 7.07 mm,仍偏大,故下次试验喷嘴直径改小为 2.5 mm;又转速较大,所以又设计了不同的相位角
		0.26	2	520	
		0.3	2	700	

续表 3 旋转实验结果及分析

实验 序号	喷嘴参数	排量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	泵压 / MPa	转速 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	结果分析
4	2个 2.5 mm、40° 相位角的动力喷嘴,2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.2	5	148~160	
		0.25	7	180~220	
		0.31	9.5	245~262	
		0.35	11	275~302	
		0.4	13	310~332	
	2个 2.5 mm、50° 相位角的动力喷嘴,2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.2	5	215~237	
		0.25	7	246~275	
		0.3	9.5	301~334	
		0.35	11	337~359	
		0.4	13	388~402	
	2个 2.5 mm、60° 相位角的动力喷嘴,2 个 4 mm 的直喷喷嘴	0.2	5	421~443	
		0.25	7	487~502	
		0.3	9.5	556~581	
		0.35	11	620~653	
		0.4	13	686~715	

第 2、3、4 次实验时,旋转喷枪均是一开泵就实现旋转,且转速迅速稳定下来。从上表可以看出,转速不仅随着排量的增加而增大,而且随着动力喷嘴的相位角的增大而增快。并且 2 个 2.5 mm、40° 相位角的动力喷嘴,2 个 4 mm 的直喷喷嘴的旋转喷枪在 0.4 m^3/min 排量下转速基本在 300 r/min 左右。所以优选出动力喷嘴的参数为孔眼直径 2.5 mm、数量 2、相位角 40°。

随后对该喷嘴参数的旋转喷枪进行了清洗套管模拟实验,在透明套管内侧涂抹 0.5~1 mm 厚水泥,喷枪旋转后水泥层被迅速冲掉(见图 3),满足清洗管壁的要求。



图3 清洗套管模拟实验

4 现场应用

普光气田 P101-3 是第一口试验井,该井已投产井段成功实施了喷酸及两级射孔作业,此次射孔枪的性能参数略低于投产时的射孔枪参数,施工时旋转喷枪的喷射排量达 0.2~0.45 m^3/min ,措施前油压 10.8 MPa,日产气 27.42 $\times 10^4$ m^3 ,措施后油压 12.3 MPa,日产气 27.48 $\times 10^4$ m^3 ,有效降低了产出气从地层流入井筒的阻力,初步验证了旋转喷枪对射孔炮眼的清洗效果,能够满足现场应用要求。

参考文献:

[1] 李根生,沈忠厚,彭烨. 自动旋转喷嘴的理论研究[J]. 石油学报,1995,16(4):148-153.

[2] 黄中伟,李根生,罗洪斌,等. 水平井防砂管内旋转射流冲砂解堵机理与实验[J]. 石油钻采工艺,2008,30(3): 93-96.

[3] 代成建. 小直径旋转喷枪酸化解堵技术研究[D].北京: 中国石油大学,2016.

[4] 谢敏,张凤,林其勇,等. 一种水力喷射解堵技术的研究与应用[J]. 石油钻采工艺,2011,33(1):95-97.

[5] 吕维平,刘菲,盖志亮,等. 连续管旋转射流油管除垢技术研究和应用[J]. 石油机械,2014,42(5):80-83.

[6] 李敬彬,李根生,黄中伟,等. 新型旋转射流多孔喷嘴流场的分析[J]. 流体机械,2015(7):32-36.

(编辑 韩 枫)