

气井水力旋转射流清砂技术及其应用

谭宏兵¹ 李长忠² 郑莉¹ 林盛旺² 刘松³ 向禄勋³

1. 中国石油西南油气田公司采气工程研究院 2. 中国石油西南油气田公司开发部 3. 川庆钻探工程有限公司川东钻探公司

谭宏兵等. 气井水力旋转射流清砂技术及其应用. 天然气工业, 2011, 31(10): 61-63.

摘 要 在不同阶段、不同井况的井筒清洁施工作业中, 虽然现有的常规水力冲砂、机械捞砂、化学解堵 3 大类井筒清洁技术取得了较好的应用效果, 但由于各项工艺技术和工具自身的局限性, 不能完全满足目前低压气井清砂作业的需要。为此, 研制了带整体式旋转喷头和具有滤水、防挂卡功能的大直径沉砂筒的水力旋转射流清砂工具, 形成了低压气井水力旋转射流清砂工艺技术。现场应用结果表明: 在井下建立了局部循环, 漏失量小, 对产层回压小; 作业管柱不受限制; 沉砂筒长度可根据需要任意组合, 一次捞获量大; 能彻底清洁井筒和近井地带产层裂缝, 从根本上解决了井下沉积物的堵塞问题。

关键词 低压气井 井筒 清洁 水力旋转射流技术 现场 应用

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2011.10.014

1 现有井筒清洁技术的适应性

常规水力冲砂技术一般可分为清水冲砂、低密度泡沫冲砂、暂堵冲砂等, 其优点是一次冲砂量大, 工艺简单, 但对套管壁的清洁作用有限, 同时在低压气井中冲砂时漏失量大甚至井漏失返, 因此主要应用于压力系数近于或大于 1 的气井冲砂作业。

机械捞砂技术中的绳索式、吸入式捞砂工具没有旋转动力, 对井下板结沉砂捞取效果很差, 一次捞获量小, 而可旋转式捞砂工具由于受现场条件限制, 多数时候不具备实施旋转钻进的条件, 不能对套管壁产生很好的清洁作用, 因此主要应用于沉砂量较小的低压气井清砂作业。

化学解堵可不动管柱、不停产进行油管内解堵作业, 但不能对井筒内的沉砂及板结沉积物没有机械清除功能, 不能从根本上解决井下沉积物的堵塞问题, 有时甚至会将沉积物挤入产层堵塞裂缝, 因此主要应用于因缓蚀剂、起泡剂等附着在油管内壁形成堵塞的生产气井。

2 水力旋转射流清砂工具研制

水力旋转射流清砂工具由旋转射流清砂喷头及沉

砂筒组成, 其结构示意图如图 1 所示。工作原理: 地面泵车间断注入修井液, 通过工作管柱传输到井下的水力旋转射流冲砂头并驱动其产生旋转喷射, 高压液流束破碎、冲散井壁、井下沉积物并使其随液流上返至一定高度, 停止供液后沉积物沉淀在沉砂筒内起钻捞出。

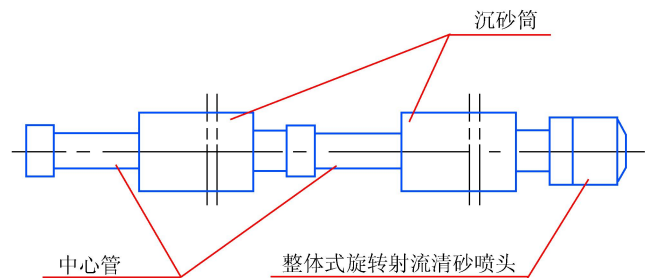


图 1 水力旋转射流清砂工具结构示意图

2.1 旋转射流清砂喷头

旋转射流清砂喷头是将一组喷嘴偏置于旋转轴上, 水射流反冲力因偏心而形成驱动喷头旋转的扭矩, 从而推动喷头自行旋转。因此喷嘴性能的好坏直接影响到清砂能力, 喷嘴的数量、直径、安装角度及工况直接影响到旋转动力。目前, 高压水射流在油气钻采工程中已经得到一定程度的应用, 但是还存在一些关键的技术难题, 高压射流喷嘴的结构设计就是其中的重

要问题之一^[1]。喷嘴是高压水射流技术中获得高能量利用率的关键因素之一,其结构的合理与否直接影响高压水射流能量利用率及冲蚀效果的好坏。

2.1.1 喷嘴直径、数量的确定

喷嘴孔径的大小直接影响到水射流的压力、出口速度和喷嘴的流量。在喷嘴出口截面内外两点间应用伯努利方程,忽略两点之间的高度差,可得出关系式:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{w^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{w^2}{2} \quad (1)$$

式中 p_1 、 p_2 分别为喷嘴内外静压力,MPa; ρ 、 ρ 分别为喷嘴出口截面内外流体密度,kg/m³; w 、 w 分别为喷嘴内外平均流速,m/s。

由连续性方程可得

$$\rho w A_1 = \rho w A_2 \quad (2)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为喷嘴出口内外截面积,m²。

假设 $\rho = \rho$,由于喷嘴外直径(d_2)远远大于喷嘴内直径(d_1),联立式(1)、(2)得喷嘴出口流速为:

$$u = 44.7 \sqrt{\Delta p} \quad (3)$$

式中 Δp 为喷嘴内外静压差,MPa。

由式(3)得到出口流量为:

$$Q = \rho u A = 2.1 \rho d^2 \sqrt{\Delta p} \quad (4)$$

得到喷嘴当量直径为:

$$d_d = 0.69 \sqrt{\frac{Q}{\mu \sqrt{\Delta p}}} \quad (5)$$

喷嘴直径为:

$$d = d_d / \sqrt{n} \quad (6)$$

式中 Q 为流量,m³/s; μ 为流量系数,取值 0.90~0.92; d_d 为喷嘴当量直径,m; d 为喷嘴直径,m; n 为喷嘴数量。

根据设定的现场条件,将 Q 、 Δp 带入式(5)、(6)中,得出喷嘴数量与直径的关系如表1所示。

表1 喷嘴数量与直径的关系表

喷嘴数量/个	3	4	5
喷嘴直径/mm	5.0	4.5	4.0

若喷嘴直径过大,打击力过于集中,清洗效率不高,而喷嘴数量过多,射流间容易造成干涉,旋转喷头加工难度大,因此选取取4个直径为4.5 mm的喷嘴,使打击力均匀分布,射流相互间不会产生干涉。

2.1.2 喷嘴形状的选择

在水射流应用系统中喷嘴直径一般很小,而液体注入管路直径比较大,如果把喷嘴与高压管路直接连

接起来,会使出口前阻力损失加大,从而降低了喷嘴出口处的压力^[2],同时还会出现短管出流中在短管内部的漩涡低压区^[3]。显然,最佳的喷嘴形状应尽量与喷嘴出口处的流线保持一致,使流束连续均匀收缩而不在喷嘴内部产生漩涡分离区,达到最大的速度系数和流量系数^[4]。喷嘴按内孔截面的形状可分为圆锥形喷嘴、圆锥收敛型喷嘴和流线型喷嘴,根据加工容易、流量系数尽可能大的原则选择了圆锥收敛型喷嘴。

2.1.3 数值模拟和室内实验

运用 Fluent 对 9 组选定的圆锥收敛型喷嘴进行数值模拟实验,得出喷嘴性能随内部结构变化趋势,然后在性能较优的喷嘴附近再选择 16 组喷嘴进行数值模拟。模型计算区域选取见图 2。网格划分:由于模型计算区域不大,为了加快网格划分速度,采用一次性划分网格,全部采用四边形网格,共划分 48 225 个网格。

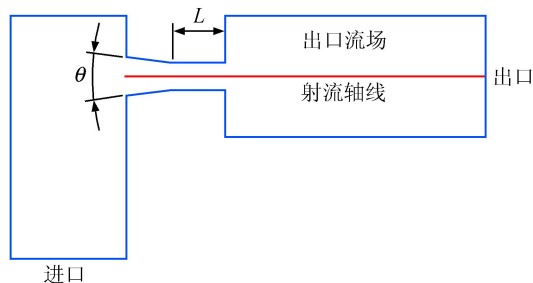


图2 模型计算区域选取图

数值模拟结果显示性能较好的喷嘴为 $L_2 \theta \sim L_4 \theta$ 的 9 组喷嘴(表 2)。

表2 喷嘴性能随内部结构变化趋势数值模拟结果表

收敛角/(°)	L_1 /mm	L_2 /mm	L_3 /mm	L_4 /mm
θ	$L_1 \theta$	$L_2 \theta$	$L_3 \theta$	$L_4 \theta$
θ	$L_1 \theta$	$L_2 \theta$	$L_3 \theta$	$L_4 \theta$
θ	$L_1 \theta$	$L_2 \theta$	$L_3 \theta$	$L_4 \theta$
θ	$L_1 \theta$	$L_2 \theta$	$L_3 \theta$	$L_4 \theta$

选取数值模拟得出的最优的 9 组喷嘴参数加工成不锈钢喷嘴,运用 3DPV 对喷嘴出口流场进行测试,测试结果表明 $L_3 \theta$ 喷嘴出口流场速度最大,速度场分布较为理想,喷嘴黏性应力和雷诺应力分布均较好。

用抗震压力表和数显式高压流量计测试 9 组不锈钢喷嘴在 5、10、15 MPa 测试压力下的流量,得出其流量系数,测试结果表明 $L_3 \theta$ 喷嘴流量系数最高。

9 组喷嘴在转速 200 r/min 的条件下,对水泥试件进行旋转冲蚀实验,测试不同喷嘴旋转冲蚀深度与时间的关系,其结果表明 $L_3 \theta$ 喷嘴冲蚀能力最强。

在泵压 20 MPa、冲蚀时间 5 min、纯水射流且试件周围充满陶粒的情况下进行的套管冲蚀试验,表明旋转射流对套管能起到很好的清洁作用,不会引起套管壁厚减薄更不会射穿套管。

2.1.4 整体式旋转射流喷头

旋转喷头初期设计为分体式,但因转速无法控制,过高的转速容易导致射流严重雾化,丧失了应有的冲击力,同时影响旋转密封的寿命,产生心轴卡死现象,并且产生啸声,引起喷头、管柱的剧烈振动。因此研制了整体式旋转喷头:①采用随泵压增高阻力增大的阻尼机构自动控制转速;②射流打击力分布均匀且相互间不干扰,清洁效果好;③选用耐磨损的进口轴承并采用高压水间隙密封机构,密封可靠,使用寿命长。

按照转速可控制、较低泵压下能产生旋转、清洁效果好、使用寿命长的原则,通过计算旋转阻力矩、射流反冲力和射流反冲力矩,确定了喷嘴的安装方式及安装角度(图 3)。

2.2 沉砂筒

综合考虑工作环境、总体性能要求、加工难度等因

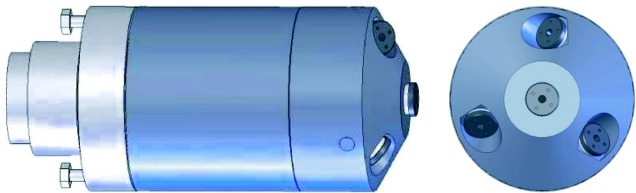


图 3 整体式旋转射流喷头图

素,研制了具有抗 H₂S 腐蚀、滤水、防挂卡功能的大直径沉砂筒。根据沉砂高度、地层压力、沉砂空间和装配、下入要求,中心管单级长度控制在 5~5.5 m,沉砂筒长度设计为 2.5、4.5 m 两种长度,沉砂筒总长度控制在 60~100 m,采用多级组合,便于除砂清洗。

3 应用效果

水力旋转射流清砂技术在井漏失返不能建立全井循环、其他清砂技术无法实施的 2 口井进行了 3 井次的现场应用,成功恢复 2 口井产能,取得了很好的应用效果(表 3)。

表 3 现场应用情况统计表

井号	作业井段/m	应用条件	作业内容	试验效果
W51	4 110~4 130	152.4 mm 裸眼,压力系数 0.21,井漏失返,不能建立全井循环。作业管柱 $\varnothing 73$ mm 油管	清砂	耗时 1 h、消耗清水 20 m ³ 将掩埋产层段达 7.85 m 的裸眼垮塌碎块和板结沉砂清除,冲砂进尺达 9.98 m,超过产层底界 2.13 m,生产管柱下入产层下部
	3 758~3 762	$\varnothing 177.8$ mm 套管内,井筒堵塞,作业管柱 88.9 mm 钻杆	清砂	井下落鱼头被缓蚀剂等沉积物掩埋 4 m,耗时 2 h 清洁至鱼头,捞获黑色黏稠物 5 L,井筒内 4 m 沉积物清除,为继续打捞创造了有利条件
W94	3 793~3 848	$\varnothing 177.8$ mm 套管射孔压力系数 0.16,井漏失返,不能建立全井循环。作业管柱 $\varnothing 88.9$ mm 钻杆	清砂 清洗射孔 井段	对产层以下井段进行旋转射流清砂,对射孔井段 3 793~3 809 m 反复清洗 3 次,消耗冲砂液 5 m ³ ,捞获黑色黏稠沉积物(主要为缓蚀剂夹杂部分锈渣)130 L

4 结论及建议

- 1)水力旋转射流清砂技术在井下建立局部循环,漏失量小,对产层回压小,适用于低压气井井筒清洁作业。
- 2)作业管柱不受限制,油管、钻杆均可。
- 3)沉砂筒长度可根据需要任意组合,一次捞获量大。
- 4)高压旋转射流能彻底清洁井筒和近井地带产层裂缝,可从根本上解决井下沉积物的堵塞问题。
- 5)该工艺技术是一种行之有效的低压气井井筒清洁技术,可在类似井的修井作业中进行推广应用。

参 考 文 献

[1] 李根生,熊伟,宋剑,等.高压水射流深穿透射孔产能影响

因素[J].石油钻采工艺,2006,28(4):60-63.
[2] 阴妍,鲍久圣,段雄.磨料水射流切割工艺参数的实验研究[J].机械设计与制造,2007,44(4):107-109.
[3] ODENTHAL HANS-JURGEN, PFEIFER HERBER,LE-MANOWICA LNA,et al.Simulation of the submerged energy nozzle-mold water model system using laser-optical and computational fluid dynamics methods[J].Metallurgical and Materials Transactions B, 2002,33(2):163-172.
[4] 赵艳萍,卢义玉,葛兆龙,等.应用于油气钻采的磨料水射流喷嘴的优化设计与实验研究[J].流体机械,2010,38(10):1-6.

(修改回稿日期 2011-08-02 编辑 韩晓渝)