◀钻井技术与装备▶

长水平段连续管动态冲砂工具及试验研究*

刘彦平[1] 祝 叶[2] 廖 丽[1] 曹根培[1] 王 引[1] 章志轩[1]
（1. 中国石油集团青海油田油气工艺研究院 2. 中石油江汉机械研究所有限公司）

刘彦平，祝叶，廖丽，等. 长水平段连续管动态冲砂工具及试验研究［J］. 石油机械，2026，54（10）：20-28.

Liu Yanping，Zhu Ye，Liao Li，et al. Design and experimental study on CT-conveyed dynamic sand-washing tool for long horizontal sections［J］. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：20-28.

摘要：长水平段井筒冲砂作业普遍面临井眼轨迹复杂、管柱摩阻高、携砂液漏失严重及砂粒易二次沉降等技术难题，导致常规工艺冲砂效率低、清洗不彻底，易引发砂卡、砂堵等井下复杂情况，严重制约深层水平井修井作业效率与施工安全。针对上述瓶颈问题，基于流体力学理论与液-固两相流机理，研发高效动态冲砂技术，旨在提升长水平段井筒冲砂效果与作业可靠性。研究以涡流冲洗工具为核心装备，通过多喷嘴角度布局优化与结构参数精细化设计，构建高强度扰动涡旋场，显著增强冲砂液对沉积砂粒的悬浮、扰动及携砂能力。采用数值计算与室内试验相结合的方法，系统分析不同井斜角、排量及工艺参数下的动态冲砂作业性能，优选出适配深层水平井的工具结构与作业参数。研究结果表明，在7 000 m井深条件下，当量直径6 mm、9喷嘴（3底6侧）的工具结构表现最优，冲砂效率较常规工艺提升3~5倍，在井斜角90°的水平段冲砂效果最为突出。现场应用结果显示，该技术可有效降低井下风险，作业周期缩短60%以上，井筒清洗更彻底，解决了深层长水平段冲砂作业的关键技术难题。该技术突破了传统冲砂工艺的局限，形成了一套高效、安全的动态冲砂技术体系，可为深层水平井及复杂结构井修井作业提供可靠技术支撑，对提升油气井生产保障能力具有重要应用价值。

关键词：连续管；长水平段；高速射流；涡流冲洗工具；动态冲砂；井斜角
中图分类号：TE925 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202506008

Design and Experimental Study on CT-Conveyed Dynamic Sand-Washing Tool for Long Horizontal Sections

Liu Yanping[1] Zhu Ye[2] Liao Li[1] Cao Genpei[1] Wang Yin[1] Zhang Zhixuan[1]
（1. *Oil & Gas Technology Research Institute*, *PetroChina Qinghai Oilfield Company*; 2. *Jianghan Machinery Research Institute Limited Company of CNPC*）

Abstract: Sand-washing operations in long horizontal sections are generally challenged by complex wellbore trajectories, high pipe-string friction, severe loss of sand-carrying fluid, and easy re-sedimentation of sand particles. These problems lead to low efficiency and incomplete cleaning in conventional processes, and readily cause downhole complexities such as sand sticking and sand plugging, which seriously restrict the workover efficiency and operational safety of deep horizontal wells. To address these bottlenecks, an efficient dynamic sand-washing technology was developed based on fluid dynamics theory and liquid-solid two-phase flow mechanisms, aiming to

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司重大技术推广专项“全系列连续管作业技术推广”（2022ZT01）；中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“200 ℃/105 MPa连续管钻磨/射流作业工具研制”（2020B-4018）；中国石油天然气集团有限公司股份项目“涩北气田40亿立方米稳产压舱石示范工程研究”（2023YQX10310）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

improve the sand-washing effect and operational reliability in long horizontal sections. The vortex washing tool was adopted as the core equipment, and through multi-nozzle angle layout optimization and refined design of structural parameters, a high-intensity disturbed vortex field was established, significantly enhancing the capacity of the washing fluid to suspend, disturb, and carry sand particles. A combination of numerical simulation and laboratory testing was used to systematically analyze the dynamic sand-washing performance under different hole inclination angles, flow rates, and process parameters. Finally, the optimal tool structure and operating parameters suitable for deep horizontal wells were determined. The results show that at a well depth of 7,000 m, the tool with an equivalent diameter of 6 mm and 9 nozzles (3 bottom nozzles and 6 side nozzles) exhibits the best performance, with the sand-washing efficiency 3-5 times of conventional processes, especially in the horizontal section with an inclination angle of 90°. Field application results demonstrate that this technology effectively reduces downhole risks, shortens the operation cycle by more than 60%, and provides more thorough wellbore cleaning, thus solving the key technical problems of sand washing in deep long horizontal sections. This technology breaks through the limitations of conventional sand-washing processes and forms an efficient and safe dynamic sand-washing system, which provides reliable technical support for workover operations in deep horizontal wells and complex-structure wells, and has great significance for ensuring the productivity of oil and gas wells.

Keywords: coiled tubing (CT); long horizontal section; high-velocity jet; vortex washing tool; dynamic sand washing; hole inclination angle

0　引　言

我国页岩油等非常规油气资源开发已进入规模化阶段，长水平段水平井与超深井（6 000~7 000 m）成为增储上产的关键井型[1]。但在长期开采过程中，产层出砂、压裂支撑剂回流及井壁稳定性变差等因素会促使地层细砂持续进入井筒；同时部分区块原油含蜡量较高、地层易结垢，砂砾易与蜡/垢产物在井筒低洼处、套管接箍处及水平段底部发生堆积与胶结，使环空有效过流面积逐步缩小，严重时诱发砂卡、砂埋与管柱失效，显著降低油井生产效率甚至造成停产[2-3]。因此，如何在保护储层的前提下高效清理井筒沉砂并恢复通径，是超深长水平段开发绕不开的工程难题。

传统井筒清理多采用刮削/机械打捞等方式，对胶结砂-蜡-垢复合沉积物的适应性较差，且往往需要起下管柱、压井作业，作业周期长且易对储层带来额外伤害风险[3-4]。相比之下，连续管射流清理技术凭借可带压作业、连续起下、工艺灵活等特点，在水平井冲砂洗井中应用日益广泛[5-7]；特别是以高速水射流/旋流射流为核心的动态冲洗方式，能够通过局部强剪切与旋流扰动底部砂床，从而改善环空携砂条件[7-8]。近年来现场实践也表明，配合专用喷射/旋流工具，连续管干预可在不压井条件下完成复杂井筒的局部清理与解堵，具备较好的工程经济性[9]。但随水平段长度增长（>1 500 m）与井深加深至7 000 m级，冲砂难度急剧恶化：一方面水平段砂粒受重力沉降持续形成岩屑床，常规低速层流难以将其整体启动[10-11]；另一方面超长管柱带来更大的沿程摩阻与扭矩，冲砂液在远端压力损失显著，携砂能力被压缩，而循环压耗又会挤占射流可用水功率，使得常规喷嘴在超深小间隙环空里往往冲得动但带不走，无法扰动岩屑床层[11-12]。

围绕上述矛盾，已形成了若干主流冲砂洗井技术路线，各有适用范围与短板：①常规密闭连续冲砂作业成本较低，但水力冲击力有限、返砂慢、作业时间长，对中深层以上相对清洁井况尚可，对长水平段致密砂床能力不够[5, 13]；②泡沫流体冲砂携砂能力强、对低压/易漏失层更友好，但其制氮/配液地面装备规模大、成本高，且泡沫流变与井筒热-压耦合更复杂，现场推广受限[14]；③同心连续管负压冲砂可借助负压抽吸提高上返速度、提升效率，但装置复杂、管柱下入与密封要求高，对小间隙超深井眼的兼容性不强[15]；④连续管动态冲砂（射流冲洗）以相对简单的工具配套获得更强的局部扰动与携砂启动能力，被认为更契合长水平段、超深井的作业窗口与经济性要求[7, 16-17]，因此将其作为主线技术路径。然而，要实现其在超深工况下的精准设计与效能预测，仍需深入厘清环空携砂效率与岩屑床最小启动流速的内在机制。目前，学界多将此类问题归结为倾斜/水平井筒内的多相流动与颗粒-流体耦合

问题，并从临界流速、岩屑床层厚度及流体剪切机制层面构建了相应的约束框架[18]。

在动态冲砂工具中，涡流（旋流）冲洗工具因无复杂运动副、结构可靠、可在环空形成较大范围的切向/轴向复合流场，被广泛用于打碎砂床和强化近壁携砂[19-20]。国外学者对涡流冲洗工具开展结构优化与环空携砂效率的数值分析，研究结果表明，螺旋导流结构与叶片几何形状会显著改变近壁切向速度分布与能量转换效率，从而影响对低侧沉积物的再悬浮效果[21]。国内学者基于CFD对不同喷嘴布局、喷距与倾角组合进行筛选，给出多喷嘴环形射流+前向冲扫组合功能的优选区间与流场演化规律[20, 22]。李敬彬等[23]通过多孔自旋射流喷嘴设计，在一定倾斜角/切向角范围内提升壁面覆盖均匀性。盖志亮等[19, 24]在工具前端引入收敛型喷嘴或导流结构，延长射流等速核并增强近底剪切，从而提高清理效率。但总体来看，现有研究多数仍以中深层、较短水平段、相对理想环空几何为对象，导致外推到极限工况时常出现扰动覆盖不足、工具压降分配不合理、整体携砂启动阈值偏高的问题[12, 22, 24]。

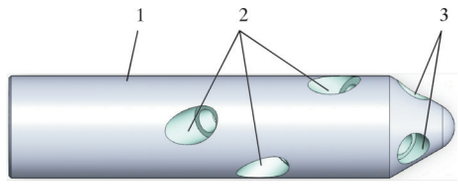
为此，笔者以ø73.0 mm（2⅞ in）油管配合ø44.4 mm（1¾ in）连续管、井深约7 000 m的典型超深长水平段为工程背景，针对涡流冲洗工具的喷嘴当量面积/布置方式、射流倾角等关键参数开展优选，并通过室内动态冲砂可视化试验，分析不同井斜角、排量和工艺参数下的动态冲砂作业性能，优选出适配深层水平井的工具结构与作业参数，以期为动态冲砂技术在超深页岩油水平井的高效应用提供更贴近真实工况的参数依据。

1　涡流冲洗工具结构设计与模拟

水平井井身结构特殊，水平段较长，砂砾沉积底部不易清理，采用常规水力冲砂技术需要进行多次冲砂作业，清砂效率低，除砂效果差，针对这一问题设计了涡流冲洗工具。

1.1　工具工作原理

涡流冲洗工具结构如图1所示，由壳体、前向喷嘴和侧向喷嘴3部分组成。该工具利用其壁面设置的多喷嘴结构产生高压射流。射流以特定切向角度冲击井筒壁面，在环空内形成高强度涡旋场，产生大范围扰动。前向射流主要作用于工具正前方区域，为连续管上提提供动态冲砂能力；侧向射流则主要产生切向速度分量，共同形成覆盖井筒环空的涡流，使砂粒充分悬浮并被携带出井筒，从而实现高效冲砂并有效防止砂卡。



1—壳体；2—前向喷嘴；3—侧向喷嘴。

图1　连续管涡流冲洗工具结构示意图

Fig. 1　Schematic structure of the CT-conveyed vortex washing tool

1.2　结构参数优化设计

结构参数设计的核心目标是确保射流具有足够的能量使砂粒悬浮并携带出井筒。设计流程首先基于砂粒沉降特性确定最小工作排量，进而计算射流冲击力、水功率等关键水力参数，最终以此为依据优化喷嘴的尺寸与空间布局。

1.2.1　水力参数计算

计算砂粒下沉速度的方法有牛顿-雷廷格计算法、莫尔计算法、斯笃克计算法、刘希圣推导法及模拟试验法。为了获得较为准确的计算结果，这里采用牛顿-雷廷格计算法、莫尔计算法、斯笃克计算法三者计算后的平均值作为砂砾的沉降速度。

牛顿-雷廷格法计算沉降末速度的公式：

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}=\left[\frac{4}{3}d_{\mathrm{s}}\frac{(\rho_{\mathrm{s}}-\rho_{\mathrm{l}})}{\rho_{\mathrm{l}}\cdot c_{\mathrm{d}}}\boldsymbol{g}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}$为悬浮于冲砂液之中的砂砾沉降末速度，m/s；$d_{\mathrm{s}}$为砂砾直径，m；$\rho_{\mathrm{s}}$为砂砾的密度，g/cm^3；$\rho_{\mathrm{l}}$为冲砂液的密度，g/cm^3；$\boldsymbol{g}$为重力加速度，取9.81 m/s^2；$c_{\mathrm{d}}$为阻力系数，雷诺数在500~10^{5}之间取0.5。

莫尔计算法的沉降末速度计算公式：

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}=0.295\left[d_{\mathrm{s}}\frac{\rho_{\mathrm{s}}-\rho_{\mathrm{l}}}{\rho_{\mathrm{l}}}\boldsymbol{g}\right]^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

斯笃克计算法的沉降末速度计算公式：

$$\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}=\frac{2r^2(\rho_{\mathrm{s}}-\rho_{\mathrm{l}})}{9\eta}\boldsymbol{g} \tag{3}$$

式中：r为砂砾半径，m；η为冲砂液的黏度，kg/（m·s）。

在玉门油田用石英砂与水进行模拟试验，试验结果表明：当$\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}/\boldsymbol{v}_{\mathrm{t}}$=1.6~1.7时，砂粒在上升液流中呈悬浮状态，而当液流上升速度稍增加时，砂粒便开始上升，因而保证将砂粒带出地面的条件是$\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}/\boldsymbol{v}_{\mathrm{t}}\geq 2$。其中，$\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}$为液体上返速度，m/s；$\boldsymbol{v}_{\mathrm{t}}$为砂粒在冲砂液中的自由下沉速度，m/s。

此时，冲砂洗井作业所需最小工作排量为：

$$Q = \pi\left(r_1^2 - r_2^2\right)v_1 \tag{4}$$

式中：Q为冲砂洗井作业所需最小工作排量，m^3/s；r_1为套管半径，m；r_2为连续管半径，m。

根据油田现场调研情况，以粒径380~830 μm石英砂为研究对象，以清水作为冲砂液，则砂粒密度ρ_s=2 650 kg/m³，冲砂液密度ρ_l=1 000 kg/m³，砂砾直径d=0.425 mm，阻力系数c_d=0.44。计算得临界沉降速度v_t=0.32 m/s，结合环空返速要求$v_l/v_t \geq 2$，确定最小排量Q_{min}=270 L/min。

1.2.2　喷嘴结构参数设计

喷嘴射流冲击力为：

$$\boldsymbol{F}_j = 2CA_0\Delta p_b \times 10^6 \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{F}_j$为喷嘴射流冲击力，N；C为喷嘴流量系数，无量纲，与喷嘴阻力系数有关，通常小于1；A_0为喷嘴出口截面积，m^2；Δp_b为喷嘴进出口压差，MPa。

喷嘴射流水功率为：

$$N_b = \frac{0.5 \times 10^{-6}Q^3}{C^2A_0^2} \tag{6}$$

式中：N_b为喷嘴射流水功率，W。

喷嘴当量直径为：

$$d_{ne} = \sqrt[4]{\frac{8.1 \times 10^{-10}Q^2}{C^2\Delta p}} \tag{7}$$

式中：d_{ne}为喷嘴当量直径，m。

基于上述计算，针对ø73.0 mm油管（内径62.0 mm）进行优化。为保证射流覆盖范围和冲击强度，将喷嘴设计为9个，直径2 mm，其当量直径为6 mm。具体布局如图2所示：底部布置3个前向喷嘴，主要用于产生直接冲击和向前携砂的动力；侧面周向布置6个侧向喷嘴，其功能核心是产生强烈的切向流动，形成覆盖环空的涡旋场。通过计算发现，喷嘴距离越大，喷嘴之间的扰动越小，对壁面的冲击范围越大。综合考虑出口速度与冲击面积，确定侧向喷嘴的间距为25 mm。

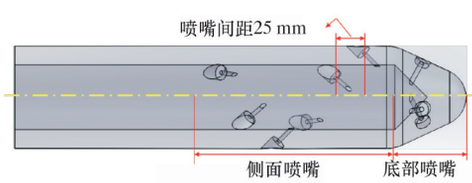


图2　涡流冲洗工具结构示意图

Fig. 2　Schematic structure of the vortex washing tool

1.3　流场数值模拟

利用SolidWorks自带的流体计算模块对涡流冲洗工具流场进行数值模拟，可以得到如图3所示的流线图和流场示意图。由图3可以发现，前向射流冲击区速度达180 m/s，侧向射流形成切向速度分量，环空涡旋场平均速度1.2 m/s，满足携砂要求；多喷嘴结构的360°灵活布置保证高速射流全覆盖，前后向喷嘴极大增加了扰动范围，形成涡旋场高效携砂，能够有效提高作业效率。

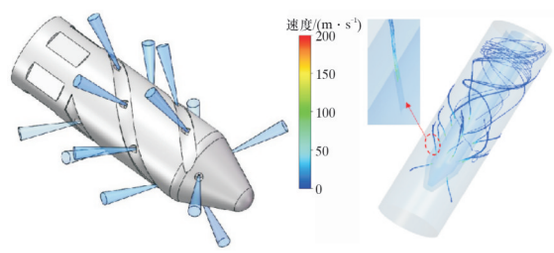


图3　涡流冲洗工具流场和流线示意图

Fig. 3　Flow field and streamline of the vortex washing tool

2　动态冲砂室内测试试验

2.1　连续管动态冲砂工艺流程

连续管动态冲砂技术利用连续管泵入冲砂，经过冲砂工具增压后产生高压射流冲击井底沉积岩屑，上提连续管使得悬浮砂砾经环空由冲砂液携带至地面。连续管动态冲砂技术设备安装简单，可快速作业，支持带压作业，洗井效率高，可快速高效完成冲砂洗井作业。连续管动态冲砂工艺过程包括下入连续管，同时使用朝下的高速射流工具进行循环直至井底，然后保持连续管不动开始静态冲砂，随后上提连续管冲砂，如图4所示。对于条件恶劣的冲砂工况，在一次下钻过程中，可根据需要多次重复下入沉砂区间至目标深度并进行冲砂作业。

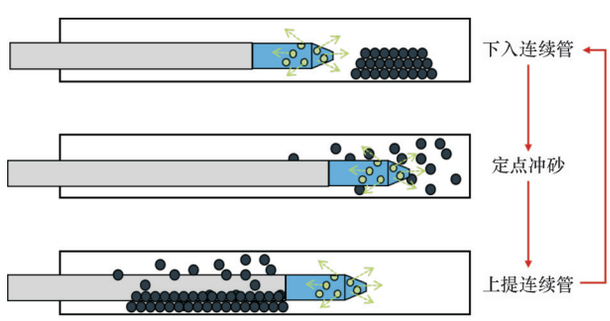


图4　动态冲砂作业工艺流程图

Fig. 4　Process of dynamic sand-washing operation

为了充分验证涡流冲洗工具的冲砂作业能力，通过开展动态冲砂室内测试试验，确定不同井斜角下的冲砂效果。

2.2　试验装置与参数

本次试验采用大型多功能油气井流体力学试

验装置。初始砂床高度为50%外管内径或相当质量的砂量，冲砂流体介质为清水，固体砂砾为粒径0.38~0.83 mm压裂砂，对比涡流工具与常规工具在30°、45°、65°、90°井斜角下的冲砂效果。由于涡流冲洗工具内径小、喷嘴内径小，压耗较大，经过实测，泵最大排量只能达到300 L/min。据此，本次试验仅开展了300 L/min排量下不同井斜角的冲砂试验。

试验装置及流程如图5所示。具体流程如下：开泵，开注砂器，流体携砂通过蓝色线路成床；打开绿色线路冲洗管路，冲洗完毕后回收砂子并称重；通过红色线路上提冲砂，上提完毕后，回收砂子并称重；下入内管冲洗环空残留砂子并称重。

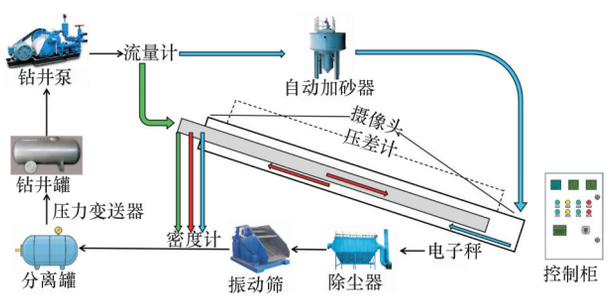


图5　试验装置及流程图

Fig. 5　Test apparatus and flow chart

2.3　试验结果与分析

2.3.1　冲砂效率评价标准分析

现阶段有以下几种方法能够在试验过程中评价冲砂效率：单位排量携砂量、返排液含砂量、残留砂量及分布等。然而单位排量携砂量和返排液含砂量的操作过程较为复杂，残留砂量称重操作简单方便，可以直观反映冲砂效果。残留砂量称重的评估方式需要排除时间对结果的影响。由于本次试验针对的是动态冲砂作业过程，该作业中最关键的一个操作就是上提连续管冲砂。区别于定点冲砂，在室内试验中，管柱长度一定，确定上提连续管的速度即可确定冲砂时间，因此不考虑冲砂时间对冲砂效果带来的影响，仅监测单次上提连续管后管内残留砂量即可。

另外，采用残留砂质量而非残留砂质量百分比作为评估标准。这是因为对于偏心环空，制约砂子冲蚀速度进而影响内管最大上提速度的主要是环空底部部分砂子，与初始砂床总量关系不大。本次测试，初始砂量变化较小，绝大部分都在28~34 kg范围内，残留砂质量与初始砂总量关系不大，这也在试验中得到证实，如表1所示。

为保障试验结果的统计可靠性，本研究中对

表1　不同初始砂量冲洗后残留砂量

Table 1　Residual sand volumes after washing under different initial sand volumes

井斜角/(°)	排量/(L·min^{-1})	上提速度/(m·min^{-1})	初始砂总量/kg	冲出砂总量/kg	残留砂总量/kg
90	300	3.6	33.25	33.05	0.20
90	300	3.6	29.80	29.60	0.20
45	300	2.4	30.85	29.70	1.15
45	300	2.4	26.90	25.80	1.10
45	300	2.4	34.20	33.10	1.10

表1所列的每一种井斜角–排量–上提速度组合条件下的试验均进行了重复操作。每组条件在初次测试的基础上，至少重复3次有效试验，表1中所列数据为同组多次试验所得残留砂量的算术平均值。通过对重复试验数据的分析发现，在井斜角90°的条件下，残留砂量数值本身很小，其标准偏差（SD）小于0.05 kg，显示出极高的重复性。在井斜角45°的条件下，残留砂量略高且波动稍大，但其相对标准偏差（RSD，即标准偏差与平均值的比值）普遍控制在8%以内，表明数据具有良好的一致性，均值能够可靠地表征该工况下的冲砂效果。这种重复性验证和误差分析确保了后续以残留砂量作为评价结论的可靠性。

根据以上分析，决定采用残留砂质量作为冲砂效果评价方法。部分试验结果由于目视无残留或残留量太少（一般小于0.1 kg），没有冲洗称重，其残留砂量判定为0，即完全冲洗干净。

2.3.2　不同井斜角对常规冲砂结果的影响

不同井斜角时残留砂质量随上提速度的变化如图6和图7所示。从图6可以看出，同一上提速度下，残留砂量随井斜角减小先增加后减小。90°、65°和55°井斜角试验结果都比较接近，尤其是内管上提速度比较低时。内管上提速度较高时，同一上提速度下45°和30°井斜角残留量要小于其他井斜角结果，尤其是30°井斜角，排量越小，差别越大。

产生这一现象存在2种影响机制，即重力分量的临界转变和环空流场的不均匀性。

在井斜角为55°~90°时，岩屑重力在井筒径向的分力（法向分力）随井斜角的增大而增大，导致颗粒更易沉积于环空低边。当井斜角接近65°时，重力径向分力达到峰值，而轴向拖曳力分量减弱，形成最稳定的岩屑床，此时岩屑床表面颗粒受流体拖曳力作用较小，难以启动滚动或悬浮，因此残留砂量较高。当井斜角减小至30°~45°时，

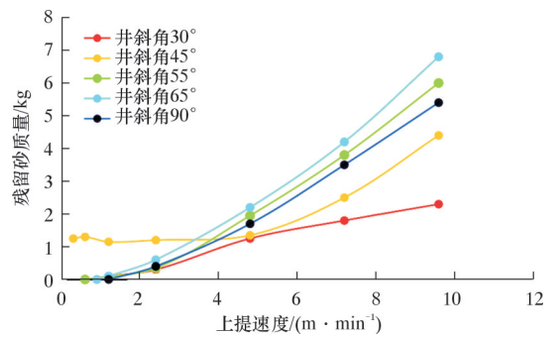


图6　不同井斜角时残留砂量随上提速度变化图(常规冲砂工具)

Fig. 6　Residual sand volume vs. lifting velocity at different inclination angles (conventional sand-washing tool)

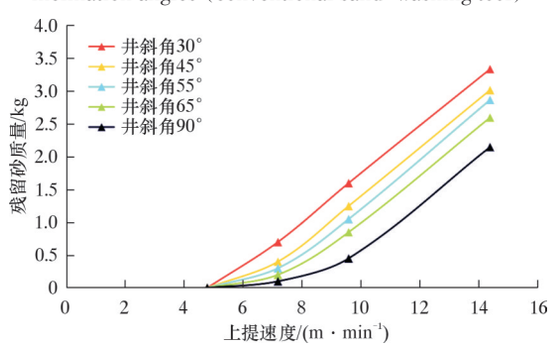


图7　不同井斜角时残留砂量随上提速度变化图(涡流冲洗工具)

Fig. 7　Residual sand volume vs. lifting velocity at different inclination angles (vortex washing tool)

重力在轴向的分力（切向分力）显著增大，岩屑床稳定性降低，颗粒更易在流体拖曳力和重力切向分力耦合作用下沿井筒下滑，形成“岩屑床失稳效应”，从而岩屑残留量减少。

环空流场的不均匀性表现为，在大斜度井段（>45°）易形成偏心环空，导致钻井液在环空高边流速高、低边流速低。低边流体的低剪切速率削弱了对岩屑的携带能力，尤其在65°井斜角时，低边流场滞流区最显著，岩屑床厚度最大。小井斜角时，环空流速分布相对均匀，且重力切向分力促进颗粒轴向运动，因此相同排量下残留量更低。

从图7可以看出，同一上提速度下，涡流冲洗工具动态冲砂作业后残留砂量随井斜角减小而增加。对比同一井斜角下常规冲砂工具与涡流冲洗工具作业后的残留砂量可以看出，涡流冲洗工具的冲砂效率明显高于常规冲砂工具，上提速度也能得到大幅度提升，其提升效果在水平井段最大，随井斜角减小而减小。

试验结果表明，涡流冲洗工具通过侧向和底部喷嘴的联合作用，将环空携砂液的轴向流动转化为周向剪切扰动。这种扰动流场可以破坏环空低边滞留区，使得流体动能均匀传递至井壁附近。如前所述，本次试验在环空内管全偏心的工况下进行，常规冲砂时，偏心环空低边流速较低，而涡流冲洗工具造成的周向扰动能够产生离心力迫使流体向低边扩散，提升低边剪切速率。同时扰动流场增强了对沉积砂粒的卷吸能力，使岩屑床表层颗粒更易脱离床体进入主流区。在大井斜角区（>65°），重力法向分力主导颗粒沉降，离心举升力可抵消其部分重力法向分力，使颗粒更易悬浮；在小井斜角区（<45°），重力切向分力促进砂粒轴向滑动，离心力作用相对减弱，增效幅度降低。同时，由于大井斜角区环空易形成层流边界层，常规冲砂需依赖高排量突破临界雷诺数（Re>2 000）。涡流工具通过扰动流场提前诱发紊流转捩，增强动量传递；小井斜角区流体自身紊流强度较高，涡流的附加紊流能量占比减小，故增效幅度收窄。

2.3.3　不同冲砂工艺效果对比

通过对比定点循环冲砂、常规动态冲砂和带涡流冲洗工具动态冲砂这3种工艺的冲砂效果（见图8），可以得出明确的定量结论：在90°井斜角条件下，带涡流冲洗工具的动态冲砂效率最高，完全冲洗干净用时24 s，相较于常规动态冲砂用时32 s提升25.0%，相较于定点循环冲砂用时609 s显著提升96.1%；在30°井斜角条件下，虽然整体冲砂效率因重力影响有所下降，但带涡流工具的工艺仍保持优势，完全冲洗干净用时35 s，比常规动态冲砂（用时70 s）和定点循环冲砂（用时612 s）分别提升了50.0%和94.3%。具体对比如表2所示。

表2　不同冲砂工艺效果对比

Table 2　Performance of sand-washing processes

冲砂工艺	冲砂时间/s	
	井斜角90°	井斜角30°
定点循环冲砂	609	612
常规动态冲砂	32	70
带涡流工具动态冲砂	24	35

对比定点循环冲砂、常规动态冲砂和带涡流冲洗工具动态冲砂这3种不同冲砂工艺可以看出，连续管不上提仅依靠流体循环冲砂效果最差，带涡流冲洗工具的动态冲砂效果最好；连续管上提对冲砂效果的提升，水井段要优于井斜角30°井段。

定点循环冲砂状态下，环空流体呈稳定层流分布，受重力影响，钻井液在井眼高边流速高，而低边形成近零流速滞流区。岩屑在重力法向分力作用下沉积于低边，颗粒启动需克服静摩擦力，此时流体动能不足，尤其在大井斜角（55°~65°）

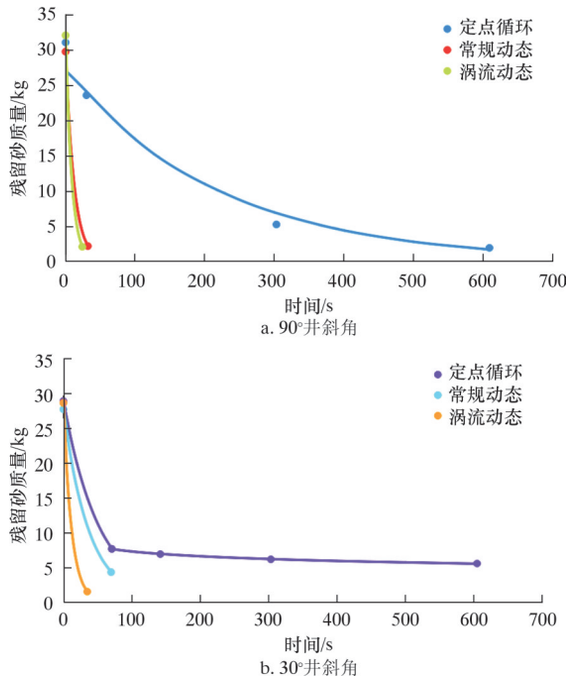


图 8　不同冲砂工艺冲砂效果对比图

Fig. 8　Comparison of sand-washing effects of different processes

段重力法向分力最大，岩屑床稳定性极高，冲砂所需时间更长，冲砂效率差。

常规动态冲砂状态下，连续管上提产生机械搅动，管柱直接扰动岩屑床，破坏颗粒间黏结力，同时管壁移动诱导环空产生瞬态高压射流，提升低边剪切速率。此效应在水平段（90°）最显著，重力切向分力趋近于0，岩屑床失稳阈值低，轻微扰动即可引发整体滑移；在井斜角为30°时，重力切向分力较大，岩屑易沿井壁下滑，上提扰动易被重力轴向分量抵消。

涡流冲洗工具在环空能够形成扰动流场，产生的周向剪切力破坏低边滞流区，提升低边剪切速率，扰动形成的二次环流将底部砂砾卷吸至高流速区，显著提高砂砾启动和运移效率。

3　现场应用

为验证涡流冲洗工具在长水平段动态冲砂作业中的效果，于2022年开展了2口典型井的现场试验。试验重点评估了工具在长水平段内的砂床清除与防砂卡能力。

第一口井人工井底4 298. 7 m，水平段长1 802. 0 m，在压裂后出现严重砂堵。采用涡流冲洗工具进行连续管动态冲砂作业，其在长水平段内形成的高效涡旋扰流，有效悬浮并携带出沉积砂粒，成功解决了水平段的砂埋问题，使作业周期从17. 5 d大幅缩短至5~7 d。

第二口井人工井底 4 055. 64 m，水平段长1 500. 00 m。前期采用常规方法作业7次起下未能通过2 900 m处卡点。启用涡流冲洗工具后，其产生的大范围扰动有效冲散了水平段起始部位2 900~3 110 m井段的致密砂堵，仅用3次起下即突破卡点并额外加深200 m，高效解除了近井口部位的砂堵障碍。

现场应用结果表明，涡流冲洗工具在1 500 m以上长水平段中，能有效解决砂床沉积和局部砂堵难题，并大幅缩短作业时间。这2口井的成功应用，验证了该工具解决长水平段冲砂核心难题的有效性，为其未来应用于更深、更复杂的井况奠定了坚实的实践基础。

4　结　论

（1）涡流冲洗工具利用工具壁面设置的喷嘴形成高压射流，多数量多角度布置的喷嘴结构有助于在环空内产生大范围高强度扰动，满足动态冲砂工艺，实现高效冲砂。涡流冲洗工具主要应用于大直径井段、大斜度段或水平段清理，多喷嘴前后向射流动态冲砂，能够有效防止沉砂、砂卡。

（2）按照水力参数计算公式，根据连续管压耗、最小携岩速度、喷嘴射流速度等要求，涡流冲洗工具当量直径确定为6 mm。设计为9个、直径2 mm喷嘴，其中底部喷嘴3个，侧面喷嘴6个。综合考虑出口速度与冲击面积，确定侧面喷嘴的间距为25 mm。

（3）涡流冲洗工具动态冲砂作业后残留砂量随井斜角减小而增加，涡流冲洗工具的冲砂效率明显优于常规冲砂工具。

（4）对比定点循环冲砂、常规动态冲砂和带涡流冲洗工具动态冲砂这3种不同冲砂工艺，带涡流冲洗工具的动态冲砂效果最好，冲砂效果的提升，水井段要优于井斜角30°井段。

参　考　文　献

[1]　胡强法，朱峰，吕维平，等. 中国石油连续管作业技术进展及发展建议［J］. 石油科技论坛，2022，41（3）：77-85.
Hu Qiangfa，Zhu Feng，Lü Weiping，et al. Suggestions on CNPC coiled tubing service technology development［J］. Petroleum Science and Technology Forum，

2022，41（3）：77-85.

[2] 高森，杨红斌，苏敏文. 连续管水平段套管内冲砂试验与效果评价［J］. 石油机械，2019，47（5）：117-124.
Gao Sen，Yang Hongbin，Su Minwen. Sand washing test and evaluation in horizontal cased hole using coiled tubing［J］. China Petroleum Machinery，2019，47（5）：117-124.

[3] 费节高，王金刚，袁军，等. 低压水平井连续管过油管氮气泡沫冲砂解堵工艺技术研究与应用［C］//2024 油气田勘探与开发国际会议，2024：1101-1107.
Fei Jiegao，Wang Jingang，Yuan Jun，et al. Research and application of nitrogen foam sand washing and plugging removal technology for coiled tubing through tubing in low pressure horizontal wells［C］//2024 International Conference on Oil and Gas Field Exploration and Development，2024：1101-1107.

[4] 魏志刚. 连续油管在油田水平井井下冲砂作业中的技术工艺创新设计与应用研究［J］. 石化技术，2026，33（2）：211-213.
Wei Zhigang. Research on the innovative design and application of coiled tubing technology in downhole sand washing operations for horizontal wells in oil fields［J］. Petrochemical Industry Technology，2026，33（2）：211-213.

[5] 盖志亮，刘洪翠，辛永安，等. 连续管冲砂洗井技术的应用［J］. 石油机械，2017，45（2）：78-82.
Ge Zhiliang，Liu Hongcui，Xin Yongan，et al. Application of sand flushing and washing technology using coiled tubing［J］. China Petroleum Machinery，2017，45（2）：78-82.

[6] 赵金，赵星，蔡鹏，等. 连续管多孔喷嘴射流工具研制与清洗参数优化［J］. 石油钻探技术，2023，51（3）：83-89.
Zhao Jin，Zhao Xing，Cai Peng，et al. Development of coiled tubing jet tools with multi-hole nozzles and cleaning parameter optimization［J］. Petroleum Drilling Techniques，2023，51（3）：83-89.

[7] 钟银，陈述，赵玉红，等. 旋转射流除垢作用机理的数值模拟研究［J］. 石油机械，2025，53（7）：112-121，148.
Zhong Yin，Chen Shu，Zhao Yuhong，et al. Numerical simulation study on the descaling mechanism of high-pressure swirling jet［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（7）：112-121，148.

[8] Cortés C B，Sanchez M，Hampson R. Sand clean out with coiled tubing and the use of a special sand clean out tool：a case study in depleted wells in Colombia［C］// the ADIPEC，2023：SPE-216158-MS.

[9] 曾永锋，陈伟华，景永鹏，等. 长庆页岩油水平井动态冲砂工艺及实施［J］. 石油机械，2025，53（增刊1）：29-33，39.
Zeng Yongfeng，Chen Weihua，Jing Yongpeng，et al. Dynamic sand-washing technology and implementation in horizontal shale oil wells of Changqing oilfield［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（S1）：29-33，39.

[10] 罗有刚，解永刚，王尚卫，等. 长水平井旋流冲砂工具设计与仿真分析［J］. 石油机械，2025，53（1）：62-67.
Luo Yougang，Xie Yonggang，Wang Shangwei，et al. Design and simulation analysis of cyclone sand flushing tool for long horizontal wells［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（1）：62-67.

[11] 邹长虹，宋权，王永康，等. 低压天然气水平井连续油管气液混相钻冲砂模型的建立与应用［J］. 钻采工艺，2024，47（5）：88-93.
Zou Changhong，Song Quan，Wang Yongkang，et al. Establishment and application of mathematical model of gas-liquid miscible drilling sand flushing for coiled tubing in low pressure natural gas horizontal wells［J］. Drilling & Production Technology，2024，47（5）：88-93.

[12] Al-Shargabi M，Davoodi S，Wood D A，et al. Hole-cleaning performance in non-vertical wellbores：a review of influences，models，drilling fluid types，and real-time applications［J］. Geoenergy Science and Engineering，2024，233：212551.

[13] 张云驰，王丙刚，李清涛，等. 基于 Fluent 的连续油管冲砂喷头性能仿真［J］. 机械工程师，2022（3）：99-100，103.
Zhang Yunchi，Wang Binggang，Li Qingtao，et al. Performance simulation of coiled tubing wash tool based on Fluent［J］. Mechanical Engineer，2022（3）：99-100，103.

[14] 于龙，谢翔，张志伟，等. 连续管氮气泡沫冲砂技术在新疆油田的应用［J］. 焊管，2024，47（7）：45-49.
Yu Long，Xie Xiang，Zhang Zhiwei，et al. Application of coiled tube nitrogen foam sand washing technology in Xinjiang oilfield［J］. Welded Pipe and Tube，2024，47（7）：45-49.

[15] 贾夏，廖华林，胡强法，等. 基于双指标评价的负压冲砂射流泵排出压力影响研究［J/OL］. 石油机械，2026，54（2）：85-91. www.syjxzz.com.cn.
Jia Xia，Liao Hualin，Hu Qiangfa，et al. Influence of discharge pressure on jet pump in negative-pressure sand washing based on a dual-index collaborative evaluation system［J/OL］. China Petroleum Machinery，2026，54（2）：85-91. www.syjxzz.com.cn.

［16］ 谈建平，姚本春，刘建新，等. 非金属连续管水平井冲砂工具设计研究［J］. 石油化工高等学校学报，2020，33（3）：86-90.
Tan Jianping， Yao Benchun， Liu Jianxin， et al. Design and research of sand washing tool for horizontal wells with nonmetallic coiled tubes［J］. Journal of Petrochemical Universities， 2020， 33（3）： 86-90.

［17］ 王金刚，费节高，周娟，等. 连续管过油管氮气泡沫冲砂工艺技术研究与应用［J］. 石油机械，2025，53（增刊1）：105-110.
Wang Jingang， Fei Jiegao， Zhou Juan， et al. Research and application of through-tubing coiled tubing nitrogen foam flushing technology ［J］. China Petroleum Machinery， 2025， 53（S1）： 105-110.

［18］ Fonseca S H， Serrano D， Villacres C， et al. Methodology to remediate and evaluate surface flowline capacity with coiled tubing cleanouts［J］. SPE Production and Operations， 2022， 37（3）： 13.

［19］ 盖志亮，刘家炜，李绪宜，等. 连续管多孔射流工具流场分析与试验研究［J］. 石油机械，2025，53（增刊1）：12-19.
Ge Zhiliang， Liu Jiawei， Li Xuyi， et al. Flow field analysis and experimental study on coiled tubing multi-orifice jet tool ［J］. China Petroleum Machinery， 2025， 53（S1）： 12-19.

［20］ 李敬彬，黄中伟，魏秀丽，等. 井底围压对高压水射流的影响规律研究［J］. 石油机械，2021，49（4）：18-25.
Li Jingbin， Huang Zhongwei， Wei Xiuli， et al. Study on the influence of bottom hole confining pressure on high-pressure jetting techniques［J］. China Petroleum Machinery， 2021， 49（4）： 18-25.

［21］ Zhang Yiqun， Hu Zhaowen， Wu Xiaoya， et al. Study on structure optimization and cuttings removal efficiency of a vortex cuttings cleaner［J］. SPE Journal， 2023， 28（4）： 14.

［22］ 徐超，刘力红，杜鹏，等. 基于高压水射流的自进式喷头设计及试验探究［J］. 机械工程与自动化，2022，（6）：16-18.
Xu Chao， Liu Lihong， Du Peng， et al. Design and experimental investigation of self-propelled nozzles based on high-pressure water Jets ［J］. Mechanical Engineering & Automation， 2022， （6）： 16-18.

［23］ 李敬彬，程康，胡静茹，等. 水力喷射径向水平井回灌增注特性可视化试验研究［J］. 流体机械，2023，51（11）：1-8.
Li Jingbin， Cheng Kang， Hu Jingru， et al. Visual experimental study on the recharge enhancement characteristics of radial jet drilling technology ［J］. Fluid Machinery， 2023， 51（11）： 1-8.

［24］ 刘家炜，胡强法，吕维平，等. 高围压对锥直型喷嘴射流性能影响的试验研究［J］. 流体机械，2024，52（12）：8-15，100.
Liu Jiawei， Hu Qiangfa， Lü Weiping， et al. Experimental study on the effect of high confining pressure on the jet performance of conical straight nozzle［J］. Fluid Machinery， 2024， 52（12）： 8-15， 100.

第一作者简介：刘彦平，高级工程师，生于1972年，2012年毕业于常州大学石油工程专业，现从事井下工具研发、连续管冲砂作业、油田开发等方面的研究工作。地址：（736200）甘肃省酒泉市。email：liuyapqhjx@petrochina. com. cn。

通信作者：祝　叶，工程师。email：zhuyedr@cnpc. com. cn。

修改回稿日期：2026-06-18

（本文编辑　刘　锋）