



中国科学引文数据库 (CSCD) 来源期刊  
全国中文核心期刊  
美国《化学文摘》(CA) 收录期刊  
俄罗斯《文摘杂志》(AJ) 收录期刊  
EBSCO学术数据库收录期刊 (美)  
AAPG协会期刊出版平台收录期刊 (美)  
中国科技论文统计源期刊  
RCCSE中国核心学术期刊

## 冲砂洗井技术研究现状及发展趋势

冯定 王高磊 巨亚峰 罗有刚 孙巧雷 侯学文

## Research Status and Development Trends in Sand Washing and Well Cleaning Technologies

FENG Ding, WANG Gaolei, JU Yafeng, LUO Yougang, SUN Qiaolei, HOU Xuewen

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023050>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 连续油管打捞砂埋节流器技术研究与现场试验

Research and Field Tests of Coiled Tubing Fishing Technology for Sand-Buried Throttles

石油钻探技术. 2021, 49(5): 108–113 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021067>

##### 智能钻井技术研究现状及发展趋势

Intelligent Drilling Technology Research Status and Development Trends

石油钻探技术. 2020, 48(1): 1–8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020001>

##### 渤海油田可反洗测调一体分层注水工艺

An Improved Integrated Reverse Washing, Measuring and Adjusting Zonal Water Injection Process in the Bohai Oilfield

石油钻探技术. 2020, 48(3): 97–101 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020016>

##### 录井装备技术现状及发展探讨

Status Quo and Development Exploration of Mud Logging Equipment

石油钻探技术. 2018, 46(2): 115–119 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018004>

##### 中国石化海外油气田钻井完井技术现状与发展建议

Drilling Completion Technologies of Sinopec Overseas Oilfields: Status Quo of Technology Development Suggestions

石油钻探技术. 2018, 46(5): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018128>

##### 国内外地下储库现状及工程技术发展趋势

Present State of Underground Storage and Development Trends in Engineering Technologies at Home and Abroad

石油钻探技术. 2017, 45(4): 8–14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.201704002>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2023050

引用格式：冯定，王高磊，巨亚锋，等。冲砂洗井技术研究现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 1-8.

FENG Ding, WANG Gaolei, JU Yafeng, et al. Research status and development trends in sand washing and well cleaning technologies [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 1-8.

## 冲砂洗井技术研究现状及发展趋势

冯 定<sup>1,2</sup>, 王高磊<sup>1,2</sup>, 巨亚锋<sup>3</sup>, 罗有刚<sup>3</sup>, 孙巧雷<sup>1,2</sup>, 侯学文<sup>1,2</sup>

(1. 长江大学机械工程学院, 湖北荆州 434023; 2. 湖北省油气钻完井工具工程技术研究中心, 湖北荆州 434023; 3. 中国石油长庆油田分公司油气工艺研究院, 陕西西安 710018)

**摘要:** 冲砂洗井过程中, 冲砂液携带地层砂上返时, 受重力影响容易二次沉积, 造成砂卡、砂堵。特别是深井、超深井冲砂洗井, 由于井眼轨迹复杂, 携砂液摩阻增大, 导致施工压力升高甚至超出冲砂洗井设备的承载能力。上述情况下, 常规冲砂洗井技术难以顺利实施, 作业风险高, 而低压漏失井由于地层压力低、易漏失, 冲砂洗井作业时冲砂液漏失严重, 携砂能力下降, 冲砂洗井效率降低, 甚至无法将砂冲出。但随着国内外冲砂洗井技术不断进步和发展, 上述冲砂洗井作业难题逐步得到解决。为推动我国冲砂洗井技术的进步, 从冲砂洗井工具的结构、工作原理、技术特点以及发展趋势等方面对国内外冲砂洗井技术的研究现状进行了综述, 并结合我国冲砂洗井的特点, 指出了国内冲砂洗井技术的发展趋势, 以期促进我国冲砂洗井技术的发展。

**关键词:** 冲砂; 洗井; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: TE28; TE252

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0001-08

## Research Status and Development Trends in Sand Washing and Well Cleaning Technologies

FENG Ding<sup>1,2</sup>, WANG Gaolei<sup>1,2</sup>, JU Yafeng<sup>3</sup>, LUO Yougang<sup>3</sup>, SUN Qiaolei<sup>1,2</sup>, HOU Xuewen<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 2. Hubei Engineering Research Center for Oil & Gas Drilling and Completion Tools, Jingzhou, Hubei, 434023, China; 3. Oil and Gas Technology Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi, 710018, China)

**Abstract:** In the process of sand washing and well cleaning, when the sand washing fluid carries the formation sand upward, the formation sand can easily be re-deposited under the influence of gravity, resulting in sand sticking and sand plugging. For deep wells and ultra-deep wells, sand washing and well cleaning face complicated wellbore trajectories, larger friction for sand-carrying fluid, and increased construction pressures, where the construction pressure can even exceed the carrying capacity of sand washing and well cleaning equipment. Thus it is difficult to smoothly implement conventional sand washing and well cleaning technologies, and the operation risk is high. Due to the low formation pressure and leak-proneness in low-pressure absorption wells, the sand washing fluid leaks seriously during sand washing and well cleaning operations, and the sand carrying capacity decreases, resulting in reduced sand washing and well cleaning efficiency and even failure to flush out the sand. The continuous improvement of sand washing and well cleaning technologies in China and abroad has effectively solved the above-mentioned difficulties in sand washing and well cleaning operations. In order to promote the sand washing and well cleaning technologies in China, the status of sand washing and well cleaning technologies in China and abroad was reviewed in terms of the structure, working principle, technical characteristics, and development trends of sand washing and well cleaning tools. Suggestions for the development trends of sand washing and well cleaning technologies in China were proposed by considering the characteristics of sand washing and well cleaning in China, so as to promote the development of sand

收稿日期: 2022-04-23; 改回日期: 2023-05-15。

作者简介: 冯定 (1963—), 安徽东至人, 1984 年毕业于江汉石油学院矿场机械专业, 1996 年获武汉工业大学机械学专业硕士学位, 2006 年获中国石油大学 (北京) 机械设计及理论专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事石油机械及井下工具设计、诊断及动态仿真等方面的教学与科研工作。系本刊编委。E-mail: fengd0861@163.com。

基金项目: 湖北省技术创新专项 (重大项目) “智能油气钻采井眼轨迹控制工具研究” (编号: 2019AAA010) 和湖北省中央引导地方科技发展专项 (编号: 2017ZYYD006) 资助。

washing and well cleaning technologies in China.

**Key words:** sand washing; well washing; research status; development trends

开采疏松砂岩油气藏过程中常常面临出砂问题,冲砂洗井过程中,地层砂上返时容易二次沉积,造成砂卡、砂堵;深井、超深井进行冲砂洗井时,由于井眼轨迹复杂,携砂液摩阻增大;低压漏失井具有地层压力低、孔隙度高、渗透性强等特点,进行冲砂洗井作业时,冲砂液漏失严重,携砂能力下降,冲砂洗井效率低<sup>[1-2]</sup>。当井筒内出现出砂、结垢、地层漏失等复杂情况,采用常规段冲砂洗井技术已不能满足生产需要,急需开展冲砂洗井技术与冲砂工具的优化研究<sup>[3-5]</sup>。目前,国外进行冲砂洗井技术服务的公司有 Halliburton 公司<sup>[6]</sup>、Baker Hughes 公司<sup>[7]</sup>、日本越南石油公司<sup>[8]</sup>、Weatherford 国际公司<sup>[9]</sup>、Schlumberger 公司<sup>[10]</sup>以及 GRIFCO 国际公司等,国内也研制了负压射流冲砂洗井工具、一体式多级封隔冲砂装置和新型水平井抽砂泵等多种冲砂洗井工具,并形成了配套技术。为推进我国冲砂洗井技术的进步,笔者重点介绍了国外公司的冲砂洗井工具和配套技术,总结出发展趋势和攻关方向,以期指导国内冲砂洗井技术的研究。

## 1 冲砂洗井原理

进行常规冲砂洗井作业时,将冲砂管柱下至冲砂界面后,从冲砂管柱泵入高压冲砂液,高压冲砂液对沉积砂床进行冲洗,冲散的砂粒流化后形成混砂液,经由冲砂管柱和套管之间的环空上返至地面,通过上提冲砂管柱实现一次下钻,完成冲砂洗井作业,如图 1 所示。



图 1 冲砂洗井作业示意

Fig.1 Sand washing and well cleaning operation

## 2 国外冲砂洗井技术

目前,国外提供冲砂洗井技术服务的公司主要有 Halliburton、Baker Hughes、Schlumberger 和 GRIFCO 等,这些公司的冲砂洗井工具种类繁多,有普通多喷嘴冲砂洗井工具、高压旋转射流冲砂洗井工具、负压冲砂洗井工具以及冲砂压裂集成式水力喷枪等工具,这些冲砂洗井工具均支持针对特定井况的定制服务。

### 2.1 Halliburton 公司冲砂洗井技术

#### 2.1.1 CoilSweep 冲砂洗井技术

CoilSweep 冲砂洗井技术由旋流冲砂工具(见图 2)、流体系统和清砂设计软件 3 部分组成。旋流冲砂工具整合了 Halliburton 连续油管的专业知识和流体技术,旨在解决大尺寸井眼段、斜井或水平井的出砂问题,实现最佳清砂效果<sup>[11]</sup>。该工具有 2 组侧向射流喷嘴,向下的射流喷嘴能够清除较硬的堆积砂屑,射流喷嘴和喷嘴间距经过优化设计,能够促进井底组件周围形成湍流,确保砂屑在冲砂喷嘴处向上移动,提高井筒中冲砂液的携砂能力。CoilSweep 冲砂洗井技术可以提供 4 种不同的冲砂作业流体,根据井况,针对常规井眼冲砂、低压漏失井清砂或者二者兼具的情况,精确定制冲砂作业工艺。清砂设计软件 InSite for Well Intervention Software 支持对油井冲砂程序进行全面建模,根据井况优化最佳的冲砂作业参数,最大限度地减少冲砂作业次数冲砂作业间距,从而实现高效冲砂洗井作业。

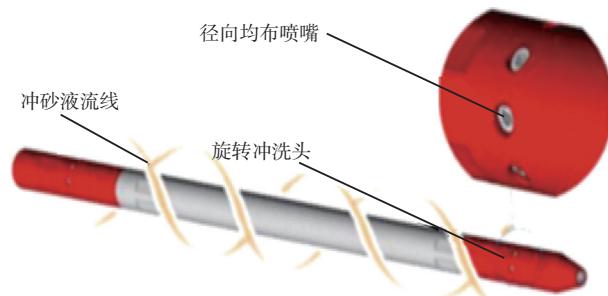


图 2 CoilSweep 旋流冲砂工具

Fig.2 CoilSweep rotating jet sand washing tool

#### 2.1.2 HydraBlast Pro 低速旋转冲砂工具

HydraBlast Pro 低速旋转冲砂工具由马达总成、齿轮减速器和喷射头组成(见图 3),通过专用的设

计软件优化泵速、冲砂行程速度、冲砂头喷嘴配置等, 用于去除套管或油管内堆积的砂屑和有机物。根据井况和砂屑的性质, 定制喷射头, 让喷射头比传统的自由旋转冲砂工具旋转得更慢, 获得更长的停留时间和更高的冲砂效率, 通过一次作业即可完成全井冲砂。与固定式和自由旋转式冲砂工具相比, 该冲砂工具能够集中高压进行射流冲砂作业, 旋转速度缓慢, 可以最大限度地延长接触时间, 可定制冲砂喷射头(目前有侧向喷射头和前向喷射头), 其与冲砂作业设计软件配合, 能够在各种井身结构的井中进行冲砂作业, 且冲砂效率高。

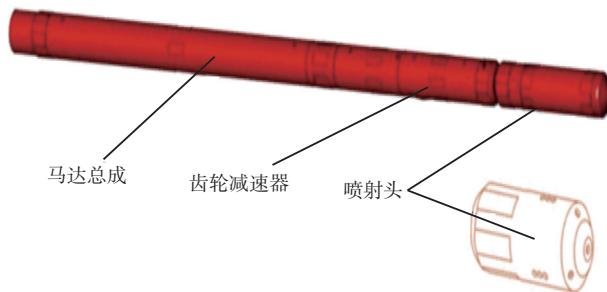


图 3 HydraBlast Pro™低速旋转冲砂工具  
Fig.3 HydraBlast Pro low-speed rotating sand washing tool

## 2.2 Baker Hughes 公司冲砂洗井技术

### 2.2.1 Tornado 连续油管冲砂洗井技术

Baker Hughes 公司的 Tornado 连续油管(CT)冲砂洗井技术是一种强大、灵活有效的连续油管(CT)井筒冲砂技术, 该技术不受井眼形状和井眼轨迹的限制, 可以与各种井下工具(标准冲砂喷嘴、电机、磨机或旋转射流工具)灵活配合, 即使对井底胶结的井底碎屑(如地层碎屑、井底细砂、射孔和铣削碎屑等), 仍然能够获得较好的冲洗效果<sup>[12-13]</sup>。

Tornado 冲砂工具能够单独实现向前射流和向后射流, 开始冲砂时, 先通过向前喷射冲砂液分解沉积的砂柱, 使砂柱在冲洗头后方沿井眼形成砂床; 完成砂柱冲洗后, 通过闭合换向结构, 使冲砂液向后喷射, 冲洗移动后的砂床, 通过上提下放管柱, 进行冲砂作业, 将砂屑全部冲洗至地面(见图 4)。Tornado 冲砂工具搭载 Baker Hughes 公司的 CIRCA 建模软件, 通过绘制冲砂过程中砂屑运移到井口的过程, 可以生成优化后的冲砂解决方案(包括所需的流速、循环时间、冲砂工具配置和冲砂工具行程速度)。将 CIRCA 软件与优化的冲砂工具相结合, 能够完成常规冲砂无法完成的冲砂作业。Tornado 连续油管(CT)冲砂洗井技术采用的冲砂工具经过

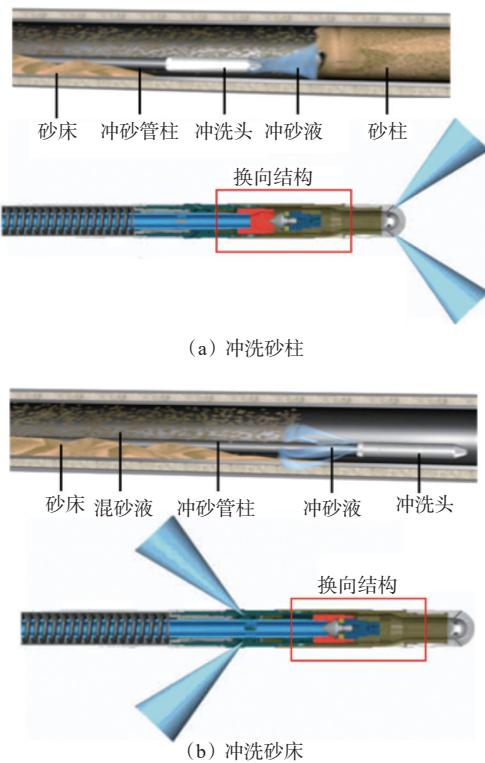


图 4 Tornado 冲砂工具作业示意

Fig.4 Operation of Tornado™ sand washing tool

现场验证, 其冲砂效果优良。

### 2.2.2 Sand-Vac, Well-Vac, Tele-Vac 冲砂洗井技术

Baker Hughes 公司的 Sand-Vac、Well-Vac 和 Tele-Vac 冲砂洗井技术将同心连续油管(CCT)与井下喷射泵相结合, 通过喷射泵喷嘴喷射冲砂液, 在冲砂工具前端产生局部负压区, 在压差作用下冲砂液和其携带的砂屑被吸入负压区, 清除常规循环冲砂作业无法处理的超低压井筒中的砂屑, 如图 5 所示<sup>[14]</sup>。在 Well-Vac 模式下, 通过增加局部压降, 实现从储层抽吸冲砂液、钻井液、压裂液和酸液等

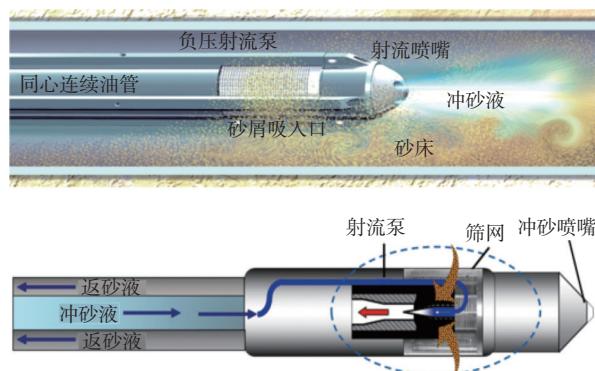


图 5 同心连续油管负压射流泵冲砂作业示意

Fig.5 Sand washing operation of negative-pressure jet pump with concentric coiled tubing

其他液体。在 Sand-Vac 和 Well-Vac 模式下, 液体回流进入喷射泵扩散器并从喷嘴喷射出去恢复压力, 将混砂液通过同心连续油管(CCT)环空泵送至地面。向前和向后射流使砂屑流化, 流化后的砂屑被吸入筛网, 通过同心连续油管(CCT)环空泵送至地面。该冲砂洗井技术使用单相流体, 与循环硝化流体相比, 可简化砂屑运移过程, 降低冲砂作业成本。

### 2.3 Schlumberger 公司冲砂洗井技术

#### 2.3.1 常规连续油管(CT)冲砂洗井工具

Schlumberger 公司有 2 种标准连续油管(CT)冲砂洗井工具, 用于出砂油气井中的冲砂洗井作业: 其中一种冲砂洗井工具的底部有 4 个射流喷嘴, 根据现场作业要求可以从不同直径的射流喷嘴中选择合适的射流喷嘴, 作业压力可达 68.9 MPa; 另一种冲砂洗井工具用于高温高压油气井冲砂洗井作业, 其抗拉强度为 141.4~544.1 kN, 其冲砂喷头有前向喷嘴和侧向喷嘴, 该喷嘴设计可以提高大斜度井的冲砂能力。根据射流强度可以将 2 种冲砂洗井工具可以分为大流量、常规冲洗强度, 大流量、高冲洗强度, 小流量、常规冲洗强度和小流量、高冲洗强度 4 种类型, 冲砂洗井工具的长度和喷嘴数量可以根据现场作业要求进行定制。

#### 2.3.2 Jet Blaster 连续油管(CT)冲砂洗井工具

Jet Blaster 连续油管(CT)高压射流冲砂洗井工具与 Jet Advisor 清砂除垢软件、CoilCADE 连续油管(CT)设计和评估软件配合, 可以进行井筒清洗作业, 包括冲砂、油管除垢、防砂筛管清洗以及近井筒表皮去除<sup>[15]</sup>。Jet Blaster 连续油管(CT)高压射流冲砂洗井工具具有快速、经济、高效等特点, 可以替代常规冲砂洗井工具、容积式冲砂泵和其他冲砂设备。根据具体的砂床和井况, 可以利用 Jet Advisor 软件优化 Jet Blaster 冲砂洗井工具的配置、连续油管(CT)管柱组合, 利用 CoilCADE 软件模拟井下流体是否能够将沉积物携带至地面。

Jet Blaster 冲砂洗井工具产生的高能射流可以轻松破碎胶结的砂床, 有利于携砂液上返。该工具的冲洗半径不受工具几何形状的限制, 不仅可以用于冲砂作业, 还可以对复杂、精细结构的井下工具(井下筛网、气举心轴和滑套等)进行无损清洗。此外, 模块化的设计可针对特定工况进行定制作业。Jet Blaster 冲砂洗井工具采用硬质合金喷嘴、润滑密封的重型轴承, 可以在 177 °C 高温下工作, 能够适应井下恶劣的环境。该冲砂洗井工具通过降低旋转接头和喷嘴的能量损失来提高冲洗能力, 冲砂效率

不受井深影响, 可用于大多数油井的冲砂洗井作业。

### 2.4 GRIFCO 国际公司冲砂洗井技术

#### 2.4.1 常规连续油管(CT)冲砂洗井工具

常规连续油管(CT)冲砂洗井工具有圆头冲砂洗井工具、风暴冲砂洗井工具和多喷嘴冲砂洗井工具(见图 6)。圆头冲砂洗井工具是一种常规冲砂洗井工具, 只有斜向和轴向喷嘴, 结构简单, 可以通过井筒内缩径的位置。风暴冲砂洗井工具内部包含一个螺杆, 当液体流经工具内部的螺旋流道时, 液体在工具内部高速旋转, 高速旋转的液体通过喷嘴流出时, 形成旋流冲洗效果; 该工具的喷嘴为耐冲蚀喷嘴, 喷射方向向下, 喷射范围广。多喷嘴冲砂洗井工具具有斜向、轴向和径向喷嘴, 用来清洗油管和套管的内壁, 通过喷射液体, 实现井筒内壁清洁。多喷嘴冲砂洗井工具可以根据需求打开或堵上需要的喷嘴, 每个喷射孔搭配最合适直径的喷嘴, 实现斜向、轴向和径向的喷射。上端扣型、喷射孔的位置和喷嘴的直径可以根据需求进行定制。

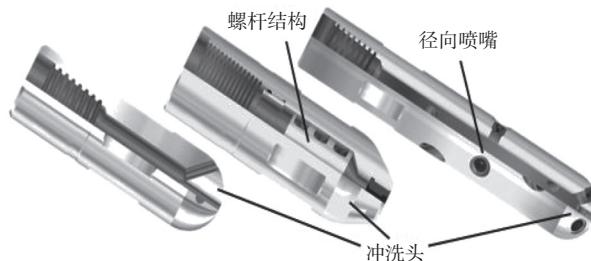


图 6 常规连续油管(CT)冲砂洗井工具

Fig.6 Conventional coiled tubing (CT) sand washing and well cleaning tool

#### 2.4.2 旋转射流冲砂洗井工具

旋转射流冲砂洗井工具主要依靠射流冲击力使喷嘴旋转, 其采用碳化钨喷嘴, 通过调节泵压控制喷嘴的转速, 喷嘴转速最高可达 300 r/min, 可以实现全方向喷射, 达到高效冲砂的目的, 主要用于清洁油管内部和循环冲砂作业, 也可用于辅助连续油管起下(见图 7)。低速旋转冲砂洗井工具是一种高压旋转冲砂洗井工具, 其通过特殊的旋转控制机构实现较低转速下的旋转冲砂洗井作业, 高压喷嘴提供强大的冲砂洗井能力, 可以冲洗井底沉砂而不损坏油管, 内部特殊的旋转控制机构可以将喷嘴的转速控制在 30~200 r/min, 承压 35 MPa, 最大流量可达 400 L/min, 适用于井况较为复杂情况下的连续油管清洗作业, 更换合适的喷嘴还可以利用其进行喷砂切割作业。



图 7 旋转射流冲砂洗井工具

Fig.7 Rotating jet sand washing and well cleaning tool

#### 2.4.3 冲砂压裂集成式冲洗工具及文丘里捞砂工具

冲砂压裂集成式冲洗工具集成了连续油管接头、喷枪和冲洗工具,利用其可进行冲砂、气举作业,需要进行射孔时只需在地面投球,将冲洗部分封堵后即可进行射孔、定向酸化等作业,喷枪的冲洗方向可定制,可根据工况调整射孔喷嘴的直径。文丘里捞砂工具(见图 8)用于打捞井内的砂屑,其可与钻井液、氮气泡沫等介质配合,其喷嘴可以根据泵排量调整。该工具的承屑腔内安装一个砂屑过滤网,可以防止砂屑堵塞文丘里管,通过延长承屑筒长度可以增加携带砂屑的体积。进行清砂作业时,流体从文丘里捞砂工具喷嘴喷出,在工具的腔内形成真空,从工具底部吸入携砂流体,携砂流体由承屑筒内部的滤网过滤,过滤后的流体进入文丘里捞砂工具吸入腔内再次循环,砂屑留在承屑腔内部的承屑筒中随工具带出井外。



图 8 文丘里捞砂工具

Fig.8 Venturi sand fishing tool

### 3 国内冲砂洗井技术

笔者通过统计调研文献中冲砂洗井现场作业案例发现<sup>[16-36]</sup>,国内主要应用射流泵负压冲砂技术进行冲砂作业,较少应用泡沫流体冲砂技术和旋转射流冲砂技术(见图 9),说明我国对于集成式冲砂洗井技术的研究存在不足,且目前尚未开发出与冲砂洗井作业软件配套的设备。下面,笔者简要介绍一些国内经过现场作业验证的冲砂洗井工具的结构、工作原理、主要技术参数等。

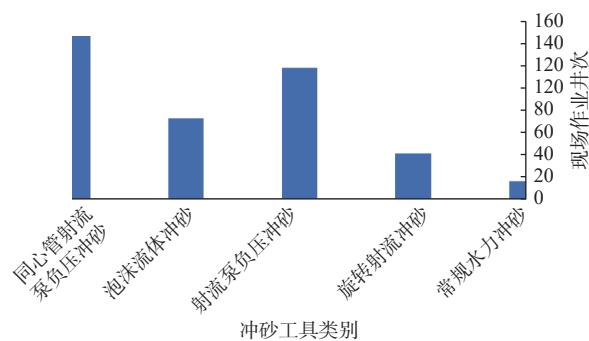


图 9 冲砂洗井现场作业分类统计

Fig.9 Histogram of classification statistics of on-site operations of sand washing

#### 3.1 负压射流冲砂洗井工具

中石油煤层气有限责任公司工程技术研究院基于射流泵工作原理设计研制了一种负压射流冲砂洗井工具。该工具由特制射流泵、冲砂喷嘴、井下封隔器和延长密封管等组成<sup>[35]</sup>(见图 10)。射流泵的喷嘴、喉管和扩散管可根据工况选择其尺寸规格。井下封隔器连接在同心管上端,用于阻隔冲砂液进入低压储层,冲砂液从其桥式机构进入同心管外环空,封隔器承压能力 40 MPa。延长密封管采用普通油管加工而成,用于在下冲砂管柱过程中调解同心管内外管的长度差,最大调解长度为 2 m。水平井利用该冲砂洗井工具顺利完成冲砂作业,并且有效解决了易漏失井段的冲砂问题。



图 10 负压射流冲砂工具

Fig.10 Negative-pressure jet sand washing and well cleaning tool

#### 3.2 一体式多级封隔冲砂工具

为了对定点喷砂射孔后的筛管进行分段冲砂作业,中国石油大港油田分公司石油工程研究院研发设计了一体式多级封隔冲砂工具。该工具主要由上接头、中心管、四级封隔皮碗、顶丝和导向头组成(见图 11),通过四级封隔皮碗实现分隔密封,上接

头与中心管为一个整体,四级封隔皮碗通过螺纹连接在中心管外部,受压缩后封隔皮碗与上接头外径保持一致,采用顶丝防止中心管与封隔皮碗、导向头之间产生相互转动。一体式多级封隔冲砂工具下至冲砂位置后通过喷砂射孔建立冲砂循环通道,可分段清洗筛管外部的砂粒,能够有效避免在上提管柱过程中发生砂卡,提高长筛管冲砂作业成功率。4口水平井采用该工具成功冲砂,显著降低了作业成本、缩短了作业时间,提高了经济效益。

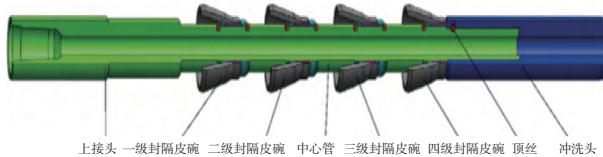


图 11 一体式多级封隔冲砂工具

Fig.11 Integrated multi-stage isolation sand washing tool

### 3.3 新型水平井抽砂泵

为了解决冲砂施工中因地层漏失造成砂粒无法顺利返至地面的问题,减少冲砂液对地层的二次污染,西安科采能源装备有限公司研制了一种新型水平井抽砂泵。该抽砂泵由泵和旋流底阀组成(见图 12),不用泵车进行循环冲砂,依靠油管上下反复移动把砂粒吸入油管中,通过提出油管将砂粒带到地面,达到对井筒清砂的目的。采用该抽砂泵进行抽砂作业时,先下旋流底阀,旋流底阀上面接油管或加厚油管,其长度根据井下砂柱高度而定,油管内孔容积在能够装下井筒中砂粒的基础上,再加长 100 m,油管柱连接好后接上抽砂泵,再在抽砂泵上接油管,直至旋流底阀接触砂面。与直井抽砂泵相比,水平井抽砂泵改进了游动凡尔和固定凡尔,将“球-球座”式的凡尔改为“弹簧-半球连杆-球座”式的凡尔,能够适应水平井作业环境,可完成 400 m 长水平段的抽砂作业。该捞砂泵的砂铲尺寸略小于本体尺寸,抽砂管柱下井、起出不会遇阻,从而确保不会卡钻。

### 3.4 国内典型应用案例

兴隆台潜山构造井深大多为 4 500~4 700 m,井眼轨迹复杂,不仅增加了作业管柱的井内摩阻,而且降低了修井设备和工具的性能,实施常规冲砂洗井作业风险高,效果不佳。该构造的马古 6-6-12 井地层压力高,压裂所用支撑剂致密,压裂后采取反循环和正循环冲洗井内的支撑剂,未能见效,严重影响了油井正常生产。针对这种情况,采用水力喷射冲砂技术进行冲砂,由于油管喷射速度较慢,于

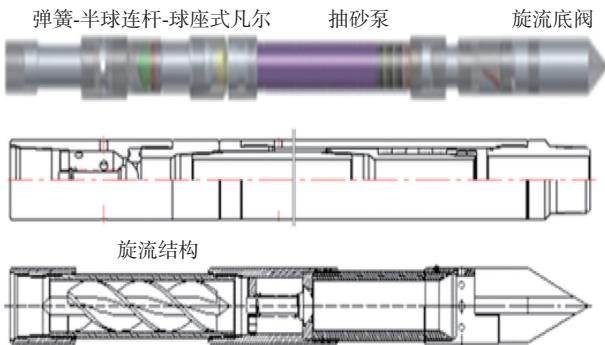


图 12 新型水平井抽砂泵及其剖视图

Fig.12 New horizontal well sand pump and its sectional view

是安装喷嘴,将压力能转换为速度能,喷嘴喷出的水像水刀一样,击碎井底凝固砂柱、砂床,并将其顺利携带至地面。马古 6-6-12 井进行水力喷射冲砂作业仅 12 h,人工井底就由井深 4 455 m 增至井深 4 587 m,作业后日产原油 35 t、天然气 9 121 m<sup>3</sup>。水力喷射冲砂技术的成功应用解决了辽河油田深井冲砂的难题,为深井实施压裂提供了保障。

赵州桥油田的赵 57-10X 井,因地层出砂严重造成物性好的 34 号油层经常砂埋,产量不稳定。该井地层漏失严重,导致常规冲砂、捞砂无效,无法解决砂埋油层的问题。于是,应用暂堵冲砂工艺进行冲砂解堵,成功解除砂埋油层,同时缓解了地层出砂。暂堵冲砂工艺操作简便,即在进行冲砂作业时用冲砂液将暂堵剂携带至井筒,随着冲砂液进入漏失地层,在压差作用下封堵漏失层炮眼以及高渗通道,在近井地带形成滤饼,降低冲砂液继续向地层的漏失量,从而在井筒中建立起循环,保证冲砂作业正常进行。赵 57-10X 井实施暂堵冲砂工艺后日增液 4.7 m<sup>3</sup>、日增油 3.4 t,将长期砂埋 34 号油层的潜能彻底释放。

## 4 冲砂洗井技术发展趋势

从现有冲砂洗井技术及冲砂洗井工具调研情况可以看出,目前市场推出的新型冲砂洗井工具主要集中在集成化、模块化,软件化、动态化以及针对特殊井况的冲砂洗井工具定制化、智能化服务上,它们的发展将主要集中在以下几个方面:

1)冲砂洗井工具集成化、模块化。集成后的冲砂洗井工具可以一趟钻完成多种作业,能够实现各项作业既协调统一又互不干扰。模块化冲砂洗井工具在常规作业时可进行冲砂、气举,通过更换喷嘴还可应用于喷砂切割作业,需要进行射孔时只需在

地面投球,将冲洗部分封堵后可进行射孔、压裂、定向酸化等作业。集成化冲砂洗井工具能够降低作业成本、缩短作业时间,显著提高油田经济效益。

2)冲砂洗井工具定制化、智能化。标准冲砂洗井工具的设计符合大多数油田的作业条件,同时兼具成本效益,但油田冲砂洗井作业常常会面临各种挑战,为适应苛刻的井况,如大直径井筒冲砂作业、高温高压深井冲砂作业、低压漏失井冲砂作业等,目前国外 Halliburton 公司、Baker Hughes 公司 Schlumberger 公司和 GRIFCO 国际公司等可以通过分析油井的状况,定制冲砂洗井工具。由于支持冲砂定制服务,在满足油田特殊作业需求时,具有更高的可靠性和灵活性。

3)冲砂洗井工具与冲砂洗井设计软件配套。目前国外与冲砂洗井冲砂工具配套的软件支持对油井冲砂程序的全面建模,可以根据井况优选最佳的流体和作业参数(泵速、冲砂行程速度和冲砂头喷嘴配置等),可以最大限度地减少冲砂作业次数和间距,实现高效冲砂作业。国内目前仍未研发出较为系统和完整的与冲砂工具配套的软件,与国外相比还存在差距,需要开展这方面的研究。

## 5 结束语

国外冲砂洗井工具及配套技术设施已较为完善,通过技术攻关和自主研发,国内冲砂洗井技术已具备有效解决油田出砂的能力,但仍面临许多技术难题,在配套软硬件研发、高效冲砂作业、特殊井况定制解决方案等方面仍存在较大提升空间。通过研发冲砂洗井工具,国内已经具备解决冲砂洗井作业中深度深、冲砂井段超长、高压低渗、低压漏失等难题的能力,建议进一步完善优化并推广应用,以满足出砂油气田高效冲砂作业的需求,在冲砂洗井工具集成化、定制化,冲砂作业过程智能化等方面进行技术攻关,逐步优化并完善冲砂洗井技术的各个模块,不断增强其高效性,创新研究出具有独立自主知识产权的冲砂洗井技术体系,真正实现冲砂洗井的自主化和智能化。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 杜宇成,陈文康,李小龙,等.一种复式旋流冲洗工具:CN201822019569.9[P].2019-06-28.  
DU Yucheng, CHEN Wenkang, LI Xiaolong, et al. A compound swirl flushing tool: CN201822019569.9[P]. 2019-06-28.
- [2] 王高磊,周兰,冯定.一种反循环正冲砂式水平井旋流冲砂工具:CN20220218531.7[P].2021-06-11.  
WANG Gaolei, ZHOU Lan, FENG Ding. A kind of reverse circulation positive sanding type horizontal well swirl sanding tool: CN20220218531.7[P]. 2021-06-11.
- [3] 张仕民,韩月霞,刘书海,等.水平井、大位移井连续管高效清砂技术进展[J].石油机械,2012,40(11):103-107.  
ZHANG Shimin, HAN Yuexia, LIU Shuhai, et al. Technological progress in CT high-efficiency sand washing in horizontal holes and extended reach wells[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(11): 103-107.
- [4] 张好林,李根生,黄中伟,等.水平井冲砂洗井技术进展评述[J].石油机械,2014,42(3):92-96.  
ZHANG Haolin, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Progress of horizontal hole sand flushing technology[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(3): 92-96.
- [5] 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.
- [6] THAWATTHUKOOL P, TOEMPROMRAJ W, SOMPOPSART S, et al. The first CT fiber-optic digital implementation in Asia Pacific to support real-time perforation depth correlations and enhance wellbore cleanout efficiency in horizontal well, Thailand[R]. SPE 191102, 2018.
- [7] RAHIMOV K, SMITH S. Cleaned out a mile of formation sands in a highly deviated wellbore with a new coiled tubing real time down-hole measurement system[R]. OTC 25008, 2014.
- [8] GIANG H T, TRUNG C D, NAYAK J R. A new approach to wellbore sand cleanout using electric-line technology[R]. SPE 170470, 2014.
- [9] SAMVELOVA M, PRIATNA O, KRISTANTO T, et al. First remedial sand control treatment case study from Sumandak field in Malaysia[R]. OTC 26657, 2016.
- [10] KEONG A, HANSEN A, HANSEN B, et al. Overcoming challenges and increasing efficiency for coiled tubing wellbore cleanout and perforation in a subhydrostatic gas injector well with real-time downhole measurement[R]. SPE 202451, 2020.
- [11] KHANDELWAL N, CHANDAK R, MAKKAR A, et al. Big bore balanced sand cleanout in HP/HT gas well: An amalgamation of an innovative fluid system and engineering[R]. SPE 184808, 2017.
- [12] RAHIMOV K, SMITH S D, GATHMAN B, et al. Well revival due to sand control failure-case history of cleaning out a mile of sand and live well perforation[R]. SPE 177341, 2015.
- [13] RODRIGUEZ S M D, PIÑERO L D, SMITH S D, et al. Hard fill removal combining vacuuming technology and intelligent coiled tubing leads to injection: A case study in Azerbaijan[R]. SPE 177389, 2015.
- [14] KOTHARI N, ABABOU M, RAO S, et al. Concentric coiled tubing technology for well cleaning and evaluation in complex horizontal wells: A 3 wells case study from heavy oil field, Kuwait[R]. SPE 194249, 2019.
- [15] PUTRA KOESNIHADI J B, WIJOSENO D A. Coiled tubing sand cleanout at low-bottomhole-pressure, large-diameter-casing, and long-horizontal-well applications in deepwater West Seno Field[R].

- SPE 153224, 2012.
- [ 16 ] 陈建国, 王占珂. 水眼冲砂工艺技术 [J]. 石油钻采工艺, 1993, 15(4): 27–31.  
CHEN Jianguo, WANG Zhanke. Water-hole sand washing technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1993, 15(4): 27–31.
- [ 17 ] 高健, 曲昌学, 刘伟, 等. 下冲防砂工具的研制及现场试验 [J]. 石油机械, 2002, 30(8): 37–38.  
GAO Jian, QU Changxue, LIU Wei, et al. Development and field test of downflushing sand control tool[J]. China Petroleum Machinery, 2002, 30(8): 37–38.
- [ 18 ] 宋明春. 大庆油田吐砂井连续冲砂工艺技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2007.  
SONG Mingchun. Research on consecutive sand washing technology for vomit wells of Daqing Oilfield[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2007.
- [ 19 ] 李松岩, 李兆敏, 孙茂盛, 等. 水平井泡沫流体冲砂洗井技术研究 [J]. 天然气工业, 2007, 27(6): 71–74.  
LI Songyan, LI Zhaomin, SUN Maosheng, et al. Horizontal well sand-cleanout with foam fluid[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(6): 71–74.
- [ 20 ] 顾文萍, 陈碧波, 苏德胜, 等. 水平井普通油管旋流连续冲砂工艺技术 [J]. 石油机械, 2007, 35(9): 104–106.  
GU Wenping, CHEN Bibo, SU Desheng, et al. The cyclone continuous sand-washing technology for common tubing in horizontal hole[J]. China Petroleum Machinery, 2007, 35(9): 104–106.
- [ 21 ] 刘扬, 郑刚, 朱国亮, 等. 漏失井冲砂工艺管柱研究与现场试验 [J]. 石油机械, 2008, 36(10): 67–68.  
LIU Yang, ZHENG Gang, ZHU Guoliang, et al. Study of sand-washing string in absorption well and its field test[J]. China Petroleum Machinery, 2008, 36(10): 67–68.
- [ 22 ] 张勇. 反循环平行管水力喷射冲砂泵 [J]. 石油机械, 2009, 37(11): 66–67.  
ZHANG Yong. Development of the reversing parallel hydraulic jet sand-washing pump[J]. China Petroleum Machinery, 2009, 37(11): 66–67.
- [ 23 ] 甘泉泉, 刘少胡, 管锋, 等. 水平井段工具内脉冲射流冲砂技术 [J]. 石油钻采工艺, 2019, 41(4): 549–554.  
AN Quanquan, LIU Shaohu, GUAN Feng, et al. In-tool pulsed jet sand washing technology used in horizontal sections[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2019, 41(4): 549–554.
- [ 24 ] 谭宏兵, 李长忠, 郑莉, 等. 气井水力旋转射流清砂技术及其应用 [J]. 天然气工业, 2011, 31(10): 61–63.  
TAN Hongbing, LI Changzhong, ZHENG Li, et al. A hydraulic swirling jet for sand-washing in borehole cleaning of gas wells[J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(10): 61–63.
- [ 25 ] 付刚旦, 王晓荣, 赵粉霞, 等. 低压低产气井连续油管冲砂试验及分析 [J]. 断块油气田, 2007, 14(1): 77–79.  
FU Gangdan, WANG Xiaorong, ZHAO Fenxia, et al. Test and analysis of coiled tubing sand washing for gas well[J]. Fault-Block Oil & Gasfield, 2007, 14(1): 77–79.
- [ 26 ] 叶光辉, 鲁明春, 朱涛, 等. 连续管氮气泡沫冲砂技术在涩北气田的应用 [J]. 石油机械, 2012, 40(11): 70–72.  
YE Guanghui, LU Mingchun, ZHU Tao, et al. Application of the CT nitrogen foam sand washing technology in Sebei Gasfield[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(11): 70–72.
- [ 27 ] 谢斌, 赵云峰, 田志宏, 等. 同心管射流负压冲砂技术研究与应用 [J]. 石油机械, 2013, 41(8): 83–86.  
XIE Bin, ZHAO Yunfeng, TIAN Zhihong, et al. Research and application of concentric tube jet negative pressure sand washing technology[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(8): 83–86.
- [ 28 ] 管恩东. 低压漏失井自吸式连续冲砂技术配套装置的研制与应用 [J]. 特种油气藏, 2022, 29(5): 161–165.  
GUAN Endong. Development and application of self-priming continuous sand flushing technology supporting device for low-pressure absorption wells[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2022, 29(5): 161–165.
- [ 29 ] 张康卫, 李宾飞, 袁龙, 等. 低压漏失井氮气泡沫连续冲砂技术 [J]. 石油学报, 2016, 37(增刊2): 122–130.  
ZHANG Weikang, LI Binfei, YUAN long, et al. Nitrogen foam continuous sand flushing technology in low pressure loss wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(supplement2): 122–130.
- [ 30 ] 罗达. 锦 45 区块水平井负压冲砂机理及实验研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2016.  
LUO Da. Jin 45 Block horizontal well pressure sand washing mechanism and experimental study[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2016.
- [ 31 ] 李刚. 水平井同心管射流负压冲砂技术研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
LI Gang. Research on concentric tube jetting and negative pressure sand washing technology in horizontal well[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [ 32 ] 李蕴航. 欢 127 水平井冲砂研究与应用 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.  
LI Yunhang. Study and application of sand blasting technology in horizontal well of Huan 127[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [ 33 ] 陈悦. 辽河油田水平井套管内自动换向连续冲砂技术的研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.  
CHEN Yue. Study on continuous sand washing technology of automatic reversing in Liaohe Oilfield horizontal well casing[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [ 34 ] 冯治峰, 梁永恒, 张楠, 等. 一种新型连续负压清砂工具设计与应用 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(6): 132–133.  
FENG Zhifeng, LIANG Yongheng, ZHANG Nan, et al. Development and application of a new continuous negative pressure sand cleaning tool[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(6): 132–133.
- [ 35 ] 郭智栋, 方惠军, 刘新伟, 等. 煤层气井负压连续冲砂工艺技术的研发 [J]. 天然气工业, 2018, 38(增刊1): 123–128.  
GUO Zhidong, FANG Huijun, LIU Xinwei, et al. Development of negative pressure continuous sand washing technology for coalbed methane wells[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(supplement1): 123–128.
- [ 36 ] 王思凡, 张安康, 胡东锋. 连续油管打捞砂埋节流器技术研究与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 108–113.  
WANG Sifan, ZHANG Ankang, HU Dongfeng. Research and field tests of coiled tubing fishing technology for sand-buried throttles[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 108–113.