

文章编号: 0253-2697(2016)08-1053-08 DOI:10.7623/syxb201608012

# 连续油管带筛管侧钻多分支井双重环空携岩能力实验

韩 树 李根生 黄中伟 田守增 宋先知 杨睿月

(中国石油大学石油工程学院 油气资源与探测国家重点实验室 北京 102249)

**摘要:**连续油管带筛管喷射侧钻多分支井钻完井一体化技术具有快速、高效、低成本钻完井的特点,可实现一趟管柱同时完成连续油管喷射钻井和割缝筛管完井。为研究该技术所特有的连续油管外套割缝筛管的双重管柱对岩屑运移的影响,实验研究了不同筛管割缝参数和钻井条件下环空内岩屑床高度、岩屑体积分数及携岩率的分布规律。分析结果表明,与单一连续油管环空相比,连续油管带筛管喷射侧钻分支井双重管柱环空具有过流面积小、环空局部流速高的特点,在较高的机械钻速下仍能保证良好的井眼净化能力,岩屑运移效率可提升 56.94%~72.28%;随着排量增大,携岩效果提升最明显;为增强双重管柱的携岩能力,宜选取短缝长、窄缝宽、低缝密和高缝单元中缝数的筛管。

**关键词:**连续油管;筛管;双重环空;岩屑运移;实验研究

**中图分类号:**TE243 **文献标识码:**A

## Experiments on cuttings transport efficiency in dual annulus with Slotted Liner Sheathing Coiled Tubing in jetting multi-branch well

Han Shu Li Gensheng Huang Zhongwei Tian Shouceng Song Xianzhi Yang Ruiyue

(State Key Laboratory of Petroleum Resource & Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** Slotted Liner Sheathing Coiled Tubing (SLSCT) used for jetting drilling multi-branch well, can synchronize the jet drilling and liner running in one trip, so as to achieve rapid and efficient drilling and completion with low cost. To study the influences of SLSCT dual-pipes in this technology on cuttings transport, a series of laboratory experiments were conducted to investigate the height of cuttings bed, cuttings volume fraction and cuttings transport efficiency distribution laws under different slotted liner parameters and drilling conditions. The analysis indicated that compared with traditional coiled-tubing annulus, SLSCT was characterized by small flow area and high local flow rate of annulus, which can guarantee favorable wellbore cleaning efficiency under high ROP conditions, thus leading to a 56.94%~72.28% increase in cuttings transport efficiency. With the increase of pumping rate, cuttings transport effect improves most significantly. To enhance the cuttings transport efficiency of dual-pipes, slotted liner should be selected with short slot length, narrower slot width, low slot density and higher slot concentration.

**Key words:** coiled tubing; slotted liner; dual annulus; cuttings transport; experimental research

**引用:**韩树,李根生,黄中伟,田守增,宋先知,杨睿月.连续油管带筛管侧钻多分支井双重环空携岩能力实验[J].石油学报,2016,37(8):1053-1060.

**Cite:** Han Shu, Li Gensheng, Huang Zhongwei, Tian Shouceng, Song Xianzhi, Yang Ruiyue. Experiments on cuttings transport efficiency in dual annulus with Slotted Liner Sheathing Coiled Tubing in jetting multi-branch well[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(8): 1053-1060.

水平井钻井技术可有效改善低渗、致密油勘探开发的经济性<sup>[1]</sup>。连续油管带筛管喷射侧钻多分支井钻完井一体化技术<sup>[2]</sup>是近年提出的一种低成本、高效率的新型多分支井钻完井方法。该技术侧钻分支井眼时将筛管套在连续油管上,形成双重管柱进行钻进,完成侧钻后分离连续油管与筛管,上提连续油管,将筛管留

在井眼,从而实现一趟管柱同时完成喷射侧钻分支井眼和筛管完井。常规连续油管在定向钻井时,由于钻柱不旋转,环空底部易堆积形成岩屑床,甚至有卡钻的风险。据统计近 1/3 的卡钻事故与井眼净化效率相关,因卡钻造成的事故复杂,会浪费近 70% 的作业时间<sup>[3]</sup>。而该技术在钻进过程中,双重管柱环空的岩屑

**基金项目:**国家重大科技专项(2011ZX05037-001)资助。

**第一作者:**韩 树,男,1993 年 1 月生,2015 年获中国石油大学(北京)石油工程专业学士学位,现为中国石油大学(北京)硕士研究生,主要从事油气井工程方面的研究。Email:zhongshiyouhanshu@163.com

**通信作者:**李根生,男,1961 年 9 月生,1983 年获华东石油学院钻井工程专业学士学位,1988 年获石油大学(北京)油气井工程专业博士学位,现为中國石油大学(北京)教授、博士生导师,主要从事油气钻井和完井工程方面的研究。Email:ligs@cup.edu.cn

运移效率与单一连续油管钻井有较大不同。此外,岩屑颗粒的沉积容易增加连续油管与筛管分离时的困难,因此有必要对双重环空条件下岩屑运移的效率进行研究。

国内外学者已对常规连续油管钻水平井岩屑运移模型和规律进行了大量研究。Kelessidis等<sup>[4]</sup>对连续油管钻水平井、大斜度井携岩所要求的流动形态和最小悬浮速度进行了实验。Sifferman等<sup>[5]</sup>在全尺寸装置下研究了斜井中环空携岩影响因素的交互作用。王治中等<sup>[6]</sup>通过井筒携砂试验装置模拟了一定砂粒配比,不同井型下的岩屑粒径与流量关系。汪志明等<sup>[7]</sup>在考虑静止层与悬浮层的扩散关系基础上建立了2层岩屑传输模型。马东军等<sup>[8]</sup>建立了管内转向径向水平井携岩模型。宋先知等<sup>[9]</sup>建立了微小井眼水平井岩屑运移的混合漂移模型,并采用CFD对影响携岩效率的因素进行了模拟。此外,3层岩屑运移模型作为一种发展较早的模型被广泛接受<sup>[10-12]</sup>。但对于双重管柱在钻井过程中的携岩规律、筛管型号等因素的影响情况,目前尚未见到研究与报道。笔者自行设计了连续油管带筛管双重管柱携岩实验系统,以携岩率、环空岩屑体积分数及岩屑床高度为标准,参考2001—2010年墨西哥湾采用同一连续油管钻井装备的6口相似BHA侧钻井<sup>[13]</sup>参数,对不同排量、机械钻速、岩屑粒径下不同型号筛管的携岩能力影响进行了实验研究。

## 1 实验

### 1.1 双重管柱实验装置及参数设计

实验装置包括高压柱塞泵、多功能实验架、水箱、岩屑添加装置、固液分离器、模拟井筒、连续油管、不同型号割缝筛管、不同目数石英砂、高速摄影机等。图1是连续油管带筛管环空携岩能力实验流程示意图。液体软管依次连接柱塞泵、水箱和固液分离器,环空返排速度由泵转速进行控制换算。岩屑添加装置置于井筒

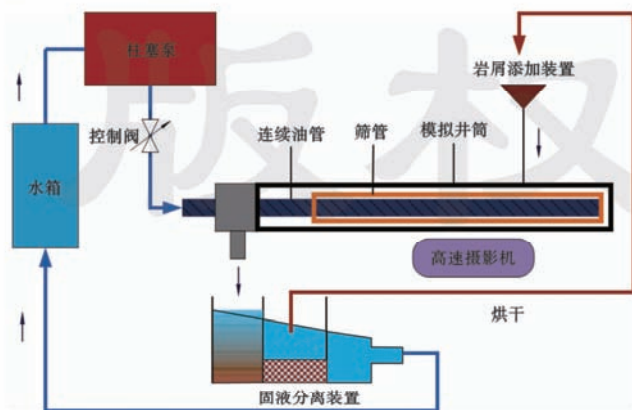


图1 实验流程示意

Fig. 1 Schematic of the experimental process

液流返排段,通过改变岩屑注入速度模拟不同的机械钻速。环空中的岩屑运移用于模拟连续油管带筛管实验情况。固/液分离器可分离岩屑与液体,岩屑可重新回收利用。实验现象通过高速摄影机进行捕捉。

在割缝参数设计上,50~80 mm的缝长可保证较高的生产指数<sup>[14]</sup>。Bennion等<sup>[15]</sup>发现由于超细颗粒的存在,筛管割缝堵塞是不可避免的,因此不建议筛管的缝宽小于或等于岩屑粒径。筛管割缝加工如采用机械方式,缝宽约0.6 mm<sup>[16]</sup>。现场中大港油田女MH2井和女MH3井<sup>[17]</sup>均采用水平井割缝筛管完井的方式,其割缝参数为:缝宽 $0.55 \pm 0.05$  mm,缝长80 mm,矩形直缝;对于煤层气开发应用,56%的煤粉颗粒<sup>[18]</sup>大小为40~80目(0.18~0.43 mm),为防止割缝堵塞<sup>[19]</sup>和打开煤层结构稳定,Huang等<sup>[20]</sup>指出筛管缝宽与颗粒直径之比应低于10。考虑到过流面积<sup>[21,22]</sup>和机械强度<sup>[23]</sup>,采用0.5 mm、0.6 mm作为实验中测试筛管缝宽。实际采用的筛管割缝参数设计可以根据储层的出砂情况进行对应调整。

实验结合工程实际,采取控制法研究各参数对井眼净化能力的影响,实验参数组合见表1。

### 1.2 实验材料

表2、表3给出了实验材料的具体参数,模拟岩屑采用4~80目的石英砂,不同目数的石英砂均采用平均粒径的形式表述,根据API钻井液固相颗粒砂类的目数分类标准,涵盖了部分细砂和全部中、粗砂的岩屑等级。模拟岩屑在粒径和密度上均接近实际钻井岩屑<sup>[24]</sup>,力求与现场真实情况相近。由于实际钻井过程中岩屑颗粒的复杂性和多变性,在目前的实验条件下,难以开展实际工况下的物理模拟实验,即难以模拟真实不均质岩屑颗粒的运移规律。即使可开展实验,也难以涵盖到所有的岩屑特征。因此,根据本文的实验用砂,采取以下步骤定性、定量分析具有代表性分布的岩屑颗粒是可行的。

### 1.3 实验步骤

- (1) 连接管线,安装各接头,调试各仪器,模拟井筒内放入双重管柱;
- (2) 启动柱塞泵,稳定排量,循环至水流稳定,无气泡;
- (3) 称取岩屑质量,3 min内向装置中添加平均粒径0.64 mm的岩屑;
- (4) 岩屑颗粒运移稳定时(通常为加砂时间的1/2以上),分别测量筛管与连续油管砂床稳定段2处湿周,停泵后采用相同的标准再次测量2处湿周;
- (5) 烘干运移岩屑,称取质量;
- (6) 在不同的参数条件(排量、岩屑粒径、岩屑注

入速度)下重复以上各步骤。

根据实验不同型号筛管以及不安装筛管的情况,重复以上各步骤。如无特殊注明,默认参数为:泵排量为 0.047 m<sup>3</sup>/min,岩屑平均粒径为 0.64 mm,机械钻速为 12.02 m/h。

1.4 实验测算物理量

1.4.1 机械钻速

实验中的机械钻速是通过控制一定质量岩屑的加砂时间模拟,换算得到机械钻速  $v_{pc}$  为:

$$v_{pc} = m_0 / A_{ws1} \rho t \tag{1}$$

1.4.2 岩屑床高度

岩屑注入过程中,待井筒流动稳定时,在井筒中,随机找 4 个测点,量取岩屑床的湿周  $l_1, l_2, l_3, l_4$ 。其中取筛管段 2 点,连续油管段 2 点。采用取平均值的方法,利用偏心环空的几何关系折算得到岩屑床高度  $h_c$ (图 2),该指标可以反映岩屑在环空中的堆积性:

$$h_c = R_{wb} - R_{wb} \cos\left(\frac{90l_c}{\pi R_{wb}}\right) \tag{2}$$

表 1 连续油管带筛管环空携岩能力实验参数

Table 1 Experimental parameters of cuttings transport efficiency of SLST

排量/ (m <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	岩屑平均粒径/ mm	机械钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	缝长/ mm	缝宽/ mm	缝密/ (条·m <sup>-1</sup> )	缝单元 中缝数/条
0.041,0.044,0.047, 0.05,0.053,0.056	0.64	12.02	80 60,70	0.5,0.6 0.6	150	1
0.047	0.64	7.21,9.02,18.03, 24.05,36.07	80 60,70	0.5,0.6 0.6	150	1
0.047	0.30,1.43, 2.18,3.56	12.02	80	0.5	150	1
			80	0.6	100	1
			60,70	0.6	150	1,3,5

表 2 岩屑颗粒参数

Table 2 Parameters of cutting grains

编号	目数	平均粒径/mm	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
1	4~8	3.56	2.85
2	8~10	2.18	2.85
3	10~20	1.43	2.85
4	20~40	0.64	2.85
5	40~80	0.30	2.85

表 3 实验管材参数

Table 3 Parameters of experimental pipes

名称	钢级/材质	外径/mm	内径/mm	长度/m
连续油管	J55	25.4	20.4	2.5
割缝筛管	J55	38.1	32.1	1.6
模拟井筒	有机玻璃	70.0	60.0	2.1

1.4.3 携岩率

规定时间内出口端的岩屑质量为  $m_1$ 。定义规定时间的携岩率  $\eta$ ,该指标可以反映在各参数组合条件下岩屑运移效率:

$$\eta = m_1 / m_0 \tag{3}$$

1.4.4 环空岩屑体积分数

岩屑铺满井筒后整个井筒内含岩屑质量  $m_2$ ,并以此计算环空岩屑体积分数  $\phi$ ,该指标可以反映在各参数组合条件下井眼净化效率:

$$\phi = m_2 / \rho V \tag{4}$$

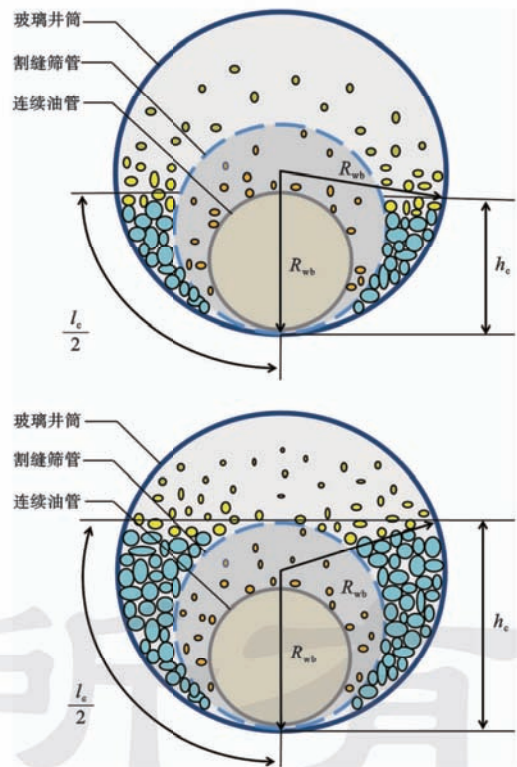


图 2 岩屑床高度折算方法

Fig. 2 Method of determining cuttings bed height

2 实验结果及分析

2.1 岩屑颗粒运移形式

图 3—图 5 为泵排量 0.047 m<sup>3</sup>/min,机械钻速 12.02 m/h

条件下,高速摄影记录的不同粒径岩屑在井筒与筛管之间环空的运移,其中缝长为80 mm,缝宽为0.6 mm,缝密为150条/m,缝单元中缝数为1。观察记录图3—图5发现,随着岩屑粒径减小,岩屑自重减小,岩屑的运移形式也由跃移层、静止层的2层结构转为携岩效率更高的由悬浮层、跃移层、静止层组成的3层结构。当岩屑启动时,由于颗粒的表面均被薄水包围,需要克服颗粒间薄膜水的附加压力,表现为颗粒与颗粒之间的黏结力,这种黏结力随岩屑粒径的增大而减小。实验中当排量大于 $0.048\text{ m}^3/\text{min}$ 时,岩屑的黏结力影响更小,岩屑的运移形式更多的取决于岩屑自重。在排量 $0.047\text{ m}^3/\text{min}$ 的条件下,平均粒径为 $0.30\text{ mm}$ 的小粒径岩屑堆积密度较大,粒间黏结力使得岩屑的滞留

效应更加明显。平均粒径 $0.64\text{ mm}$ 的岩屑粒间黏结力和自重更小,少量颗粒形成悬浮层。较大平均粒径为 $1.43\text{ mm}$ 的岩屑虽然黏结力更小,但由于自重较大,只能形成2层结构。

图6为常规连续油管与双重管柱岩屑分布示意图。与常规连续油管相比,割缝筛管与连续油管之间亦存在环空,若岩屑粒径小于筛管缝宽,岩屑将进入该区域。筛管与连续油管前端有分离器相连,后端有橡胶密封圈封闭,因此岩屑一旦进入筛管与连续油管之间的密闭环空内,将不能运移出装置,形成砂堵层。同时通过实验现象观察到,由于筛管与井筒之间的环空液体紊流程度比连续油管与筛管之间的环空强,大部分砂粒运移出井筒,进入砂堵层内部的砂子数量比较有限,不会发生堵塞。但砂堵层会使完井时连续油管与筛管之间分离的摩阻增大,其过量堆积将导致完井质量降低,甚至完井失败。

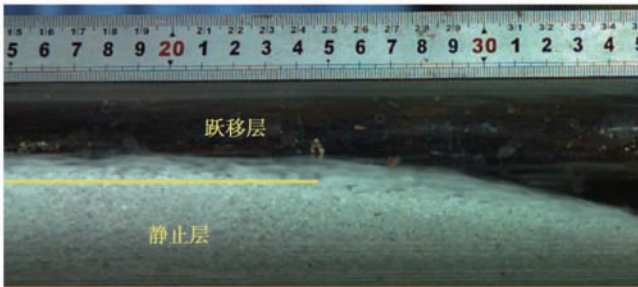


图3 平均粒径 1.43 mm 岩屑运移  
Fig. 3 Transport of cuttings with the average particle size of 1.43 mm

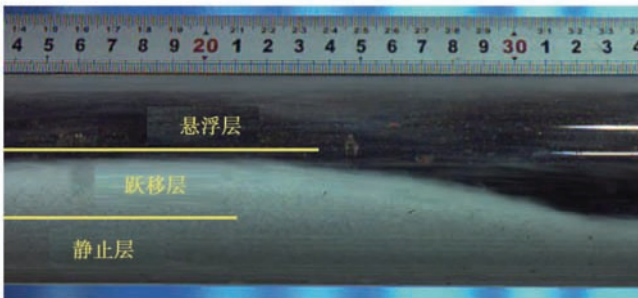


图4 平均粒径 0.64 mm 岩屑运移  
Fig. 4 Transport of cuttings with the average particle size of 0.64 mm

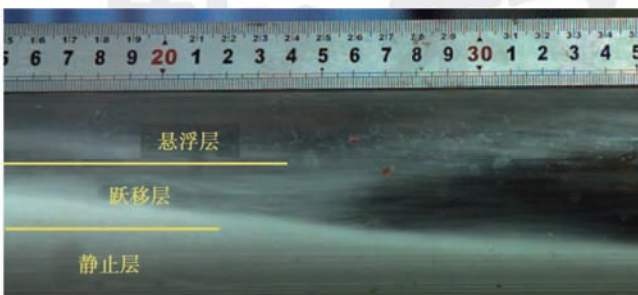


图5 平均粒径 0.30 mm 岩屑运移  
Fig. 5 Transport of cuttings with the average particle size of 0.30 mm

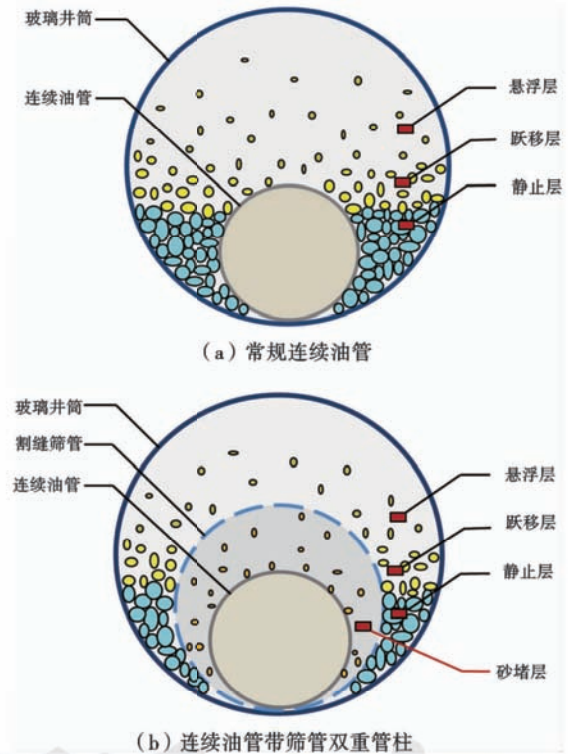


图6 双重管柱4层岩屑运移示意  
Fig. 6 Four-layer modeling for cuttings transport in dual-pipes

2.2 泵排量的影响

对比了不同排量下各管柱的携岩率关系(图7)。由图7可知,随着排量的增加,各管柱携岩效率均明显提升。这是由于排量升高使得环空上部具有更大的高速流核区,增加了流体的紊流程度,位于环空下部相对狭小区域的岩屑更易克服沉降阻力。带有筛管的双重管柱相比于单一连续油管,拥有更小的环空过流面积,在相同的排量下,具备更大的环空流速,因此双重管柱携

岩效率明显高于单层连续油管。排量从  $0.041 \text{ m}^3/\text{min}$  增大到  $0.056 \text{ m}^3/\text{min}$ ，双重管柱携岩效率最大可提升 28.93%，相较于连续油管可提升 56.94%~67.05%。此外，随着排量的升高，不同割缝参数的双重管柱携岩效率趋于一致，说明相较于割缝参数，排量对岩屑运移的影响更大。因此，排量的增加以及筛管的加入有利于提升岩屑运移能力。实验还对各筛管的临界排量进行了研究，临界排量是在环空中的岩屑产生初期就被运移出井筒的流量，即不能形成稳定的岩屑床。实验条件下，各筛管的临界排量为  $0.0648 \text{ m}^3/\text{min}$ 。

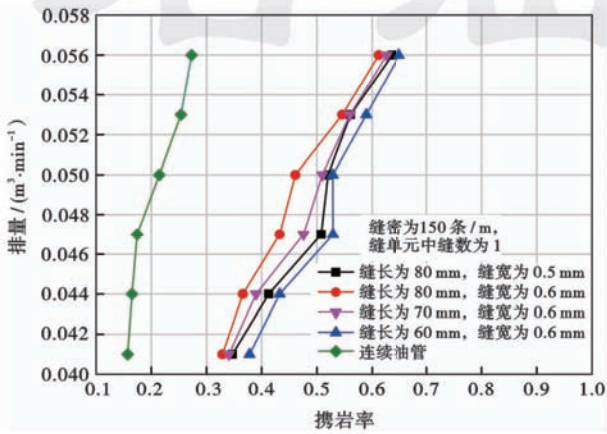


图 7 各型号筛管及连续油管的携岩率与排量的关系  
Fig. 7 Relationship between pumping rate and cuttings transport efficiency of various SLST and traditional coiled tubing

图 8、图 9 描述了岩屑环空体积分数以及岩屑床高度随排量的分布情况。结合携岩率曲线，当排量较小时，在相同缝长条件下，缝宽为 0.6 mm 的筛管环空体积分数高于缝宽为 0.5 mm 的筛管，但缝宽为 0.6 mm 筛管的环空岩屑床却更低。这是由于更多的岩屑通过割缝进入砂堵层，影响了井筒与筛管间的环空岩屑总量，导致实际岩屑床高降低。同理，相同缝宽条件

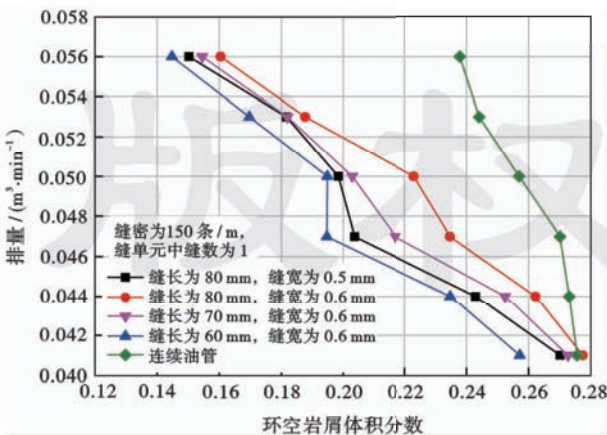


图 8 各型号筛管及连续油管环空岩屑体积分数与排量的关系  
Fig. 8 Relationship between pumping rate and annulus cuttings volume fractions of various SLST and traditional coiled tubing

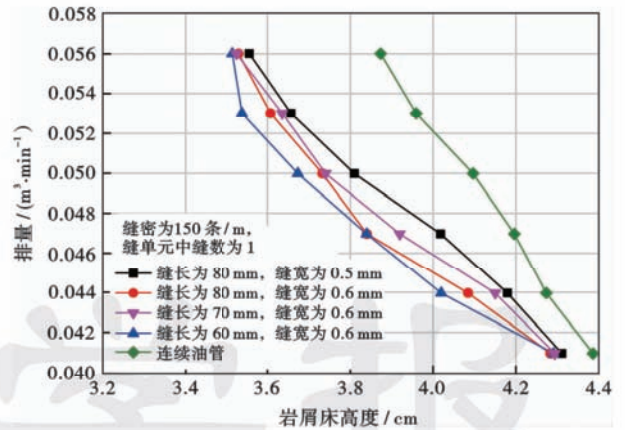


图 9 各型号筛管及连续油管环空岩屑床高度与排量的关系  
Fig. 9 Relationship between pumping rate and annulus cuttings bed heights of various SLST and traditional coiled tubing

下，缝长为 70 mm 的筛管环空体积分数低于缝长为 80 mm 的筛管，但岩屑床更高。缝长为 60 mm 的筛管，由于拥有较高的携岩率，受环空砂量限制，岩屑床最低。

实验中，单一连续油管环空过流面积比双重管柱提升 37.53%，增加相同排量，环空返速更低，因此环空岩屑体积分数和岩屑床高度稳定。此外，在  $0.041 \text{ m}^3/\text{min}$  低排量和  $0.056 \text{ m}^3/\text{min}$  高排量下，各筛管岩屑环空体积分数和岩屑床高度趋于一致。这是由于在低排量下，环空流动受筛管的影响减小，并且进入砂堵层的岩屑数量有限，而高排量增大了环空流速与紊流程度，更多的岩屑以 3 层模型的形式运动，受筛管型号影响更小。

### 2.3 机械钻速的影响

连续油管水平井钻井过程中钻柱不旋转，岩屑床过高将增大钻井时的摩阻，不利于提升钻速。图 10—图 12 反映了不同机械钻速对各型号筛管携岩率、环空岩屑体积分数及岩屑床高度的影响。结果显示，窄缝宽、短缝长筛管更有利于井眼净化。当机械钻速较低时，各型号筛管的环空岩屑体积分数、岩屑床高度差别小，携岩率高。随着机械钻速提高，各型号筛管岩屑床高、环空岩屑体积分数呈近似线性增加，筛管缝参数的影响逐渐减小。

实际钻井过程中要求尽可能提升钻速，缝宽过窄、缝长过短也不利于提高产量，因此应确定合理的岩屑床高度，以利于钻进过程中克服岩屑颗粒与筛管外壁之间的摩阻，从而保证井眼净化效率与作业进度。单一连续油管环空过流面积较大，岩屑床高提升不明显，双重管柱由于环空过流面积较小，始终保持较高的岩屑运移能力和较低的岩屑床高。对比实验结果发现，连续油管带筛管双重管柱下的岩屑运移效率比单一连续油管可提高 57.48%~72.28%。

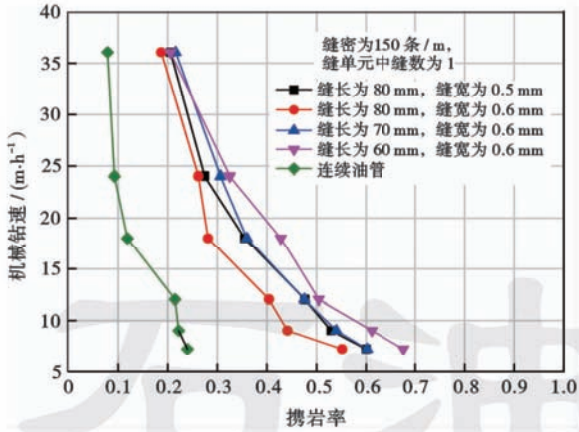


图 10 各型号筛管及连续油管的携岩率与机械钻速的关系  
Fig. 10 Relationship between ROP and cuttings transport efficiency of various SLSCT and traditional coiled tubing

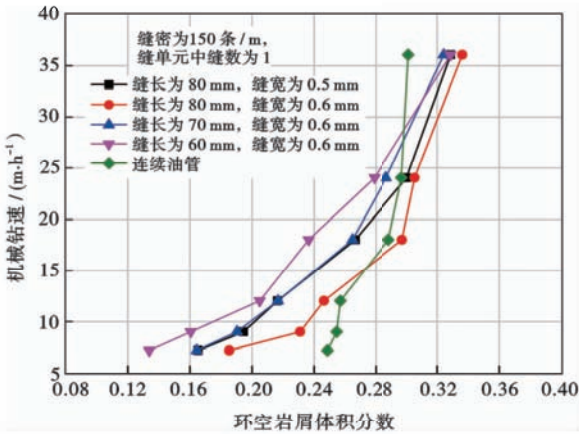


图 11 各型号筛管及连续油管的环空岩屑体积分数与机械钻速的关系  
Fig. 11 Relationship between ROP and annulus cuttings volume fractions of various SLSCT and traditional coiled tubing

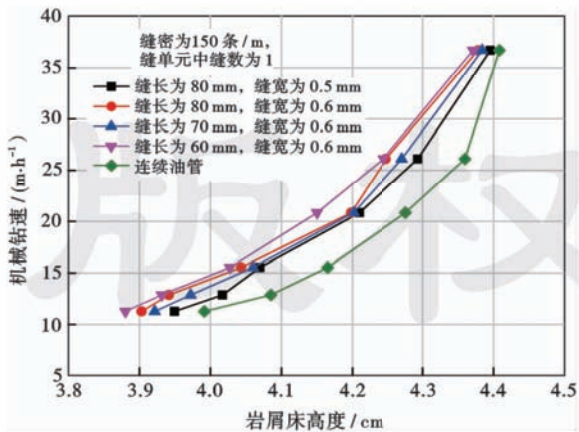


图 12 各型号筛管及连续油管的环空岩屑床高度与机械钻速的关系  
Fig. 12 Relationship between ROP and annulus cuttings bed heights of various SLSCT and traditional coiled tubing

### 2.4 筛管缝长、缝宽的影响

图 13 反映了不同岩屑粒径条件下筛管缝长、缝宽对携岩率的影响。实验结果表明,筛管缝长越短、缝宽越窄,越有利于携岩效率提升。当岩屑平均粒径为 0.30 mm 时,颗粒间黏结力过大,环空的运移较低;当岩屑平均粒径为 0.64 mm 时,0.047 m<sup>3</sup>/min 的实验排量能完全克服颗粒间黏结力,岩屑粒径与筛管缝宽相接近,既不容易进入砂堵层,也不易于沉积形成较高的静止床,双重管柱与单一连续油管的携岩率均达到最高;平均粒径在 0.64~1.43 mm 时,颗粒之间的黏结力降低,更多的岩屑采取跃移、滑移的形式运动,保持了较高的携岩率;当平均粒径超过 1.43 mm 后,吸附作用更小,但大粒径却导致自重过大,岩屑在环空堆积效应明显。

不同粒径下,携岩率与缝长、缝宽的拟合关系式为:

$$\eta = -0.00238l_{sl} - 0.01733D_s + 0.67595 \quad (R^2 = 0.8415) \quad (5)$$

$$\eta = -0.13112l_{sw} - 0.02315D_s + 0.57848 \quad (R^2 = 0.9013) \quad (6)$$

实际作业中,钻屑颗粒大小不一,筛管割缝越宽,更多的钻屑将进入砂堵区,降低运移效率,因此缝宽不宜过大。

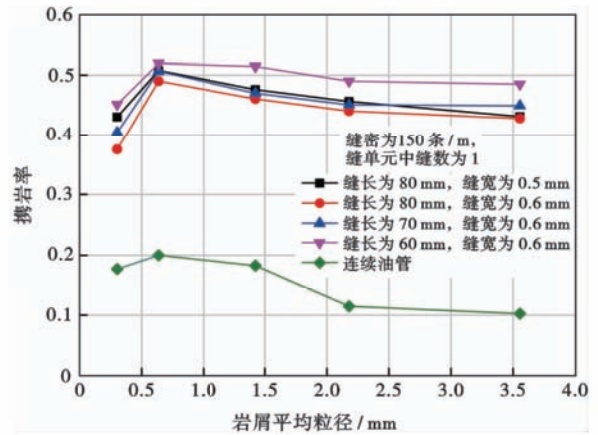


图 13 不同缝长、缝宽的筛管携岩率与岩屑粒径的关系  
Fig. 13 Relationship between grain sizes and cuttings transport efficiency of SLSCT with various slot lengths and widths

### 2.5 筛管缝密、缝单元中缝数的影响

图 14 分别对比了 100 条/m 和 150 条/m 缝密筛管与缝单元中 1 条、3 条和 5 条的缝数筛管在不同粒径下的携岩率。结果表明,缝密越低,缝单元中缝数越高,携岩率越高。当缝参数相同时,随着岩屑粒径的增加,岩屑进入砂堵层的概率减小,颗粒间黏结力降低,当排量足以克服黏结力时,携岩率达到最大,曲线初期的快速增长也与该理论相吻合。随着岩屑粒径进一步增大,虽然岩屑不能通过割缝,黏结力更低,但岩屑自

重过大,此前悬浮运移的岩屑改为滚动、跃移的运动形式,携岩率降低。当缝密相同时,缝单元中缝数越高,环空中的紊流程度提升,岩屑颗粒间由于相互作用、碰撞,使得颗粒进入砂堵层的概率降低,携岩率提高。

不同粒径下,携岩率与缝密、缝单元中缝数的拟合关系式为:

$$\eta = -0.0069d_s - 0.04175D_s + 0.6233 \quad (R^2 = 0.913) \quad (7)$$

$$\eta = 0.00876n_s - 0.02989D_s + 0.49955 \quad (R^2 = 0.908) \quad (8)$$

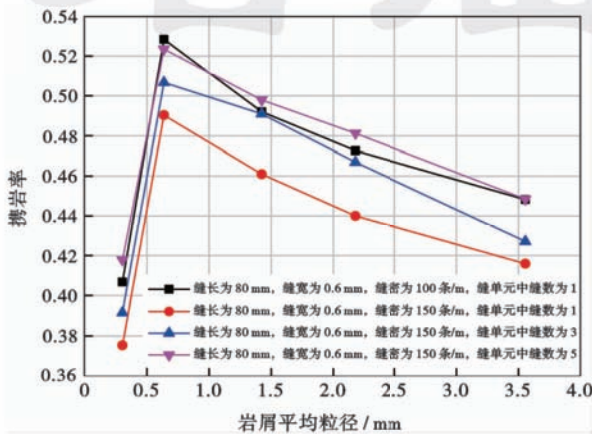


图 14 不同缝密、缝单元中缝数的筛管携岩率与岩屑粒径的关系  
Fig. 14 Relationship between cuttings grain sizes and cuttings transport efficiency of SLSCT with various slot density and slot concentrations

### 3 结 论

(1) 连续油管带筛管双重管柱环空有效过流面积更小,筛管的加入有利于井眼净化。实验条件下,短缝长(<60 mm)、窄缝宽(<0.5 mm)、低缝密(<100 条/m)、高缝单元中缝数(>5)的割缝筛管在携岩上更具优势,岩屑运移效率可比单一连续油管高 56.94%~72.28%。

(2) 岩屑可通过割缝进入连续油管与筛管之间,形成砂堵层。实验中粒径适中的岩屑(0.80~1.30 mm)黏结力和自重较小,可形成运动速度较高的悬浮层和跃移层,不易进入砂堵层,有较高的运移效率。

(3) 排量对双重管柱的携岩效果影响较显著,排量越高,环空紊流程度越大,井眼净化效率越高;双重管柱条件下采用较高的机械钻速,依然能保证其井眼净化效率。

符号注释:  $v_{pc}$ —单位时间的岩屑注入量,表示单位时间内的钻头进尺, m/h;  $\rho$ —岩屑密度, kg/m<sup>3</sup>;  $m_0$ —总注入岩屑质量, kg;  $A_{wsl}$ —井筒与筛管之间的环

空截面积, m<sup>2</sup>;  $t$ —注入岩屑时间, h;  $l_1$ 、 $l_2$  为筛管段不同位置处岩屑床的湿周, cm;  $l_3$ 、 $l_4$  为连续油管段不同位置处岩屑床的湿周, cm;  $h_c$ —岩屑床高度, cm;  $R_{wb}$ —井筒内径, cm;  $l_c$ —平均岩屑床湿周, cm;  $\eta$ —携岩率;  $m_1$ —出口端的岩屑质量, kg;  $\phi$ —环空岩屑体积分数;  $m_2$ —井筒内岩屑质量, kg;  $V$ —井筒与筛管之间的环空总体积, m<sup>3</sup>;  $D_s$ —平均岩屑粒径, mm;  $l_{sl}$ —筛管缝长, mm;  $l_{sw}$ —筛管缝宽, mm;  $d_s$ —筛管缝密, 条/m;  $n_s$ —筛管缝单元中缝数;  $R^2$ —判定系数。

### 参 考 文 献

- [1] 张君峰, 毕海滨, 许浩, 等. 国外致密油勘探开发新进展及借鉴意义[J]. 石油学报, 2015, 36(2): 127-137.  
Zhang Junfeng, Bi Haibin, Xu Hao, et al. New progress and reference significance of overseas tight oil exploration and development[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 127-137.
- [2] Yang Ruiyue, Huang Zhongwei, Li Gensheng, et al. Slotted liner sheathing coiled tubing—a new concept for multilateral jetting in coalbed methane wells and laboratory tests of tubular friction performance[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 26: 1332-1343.
- [3] Hopkins C J, Leickensring R A. Reducing the risk of stuck pipe in the Netherlands[R]. SPE 29422, 1995.
- [4] Kelessidis V C, Mpandelis G E. Flow patterns and minimum suspension velocity for efficient cuttings transport in horizontal and deviated wells in coiled-tubing drilling[R]. SPE 81746, 2003.
- [5] Sifferman T R, Becker T E. Hole cleaning in full-scale inclined wellbores[J]. SPE Drilling Engineering, 1992, 7(2): 115-120.
- [6] 王治中, 邓金根, 孙福街, 等. 井筒砂粒运移规律室内模拟实验研究[J]. 石油学报, 2006, 27(4): 130-132.  
Wang Zhizhong, Deng Jingen, Shun Fujie, et al. Experimental study on sand grain migration in wellbore[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4): 130-132.
- [7] 汪志明, 张政. 大斜度井两层稳定模型岩屑传输规律研究[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(4): 8-11.  
Wang Zhiming, Zhang Zheng. Study on cuttings transportation tendency of the dual layer stabilizing model in highly inclined well [J]. Oil Drilling & Production Technology, 2003, 25(4): 8-11.
- [8] 马东军, 李根生, 郭瑞昌, 等. 管内转向径向水平井携岩规律数值模拟[J]. 石油机械, 2013, 41(11): 6-10.  
Ma Dongjun, Li Gensheng, Guo Ruichang, et al. Numerical simulation of the cuttings-carrying law in radial horizontal well[J]. China Petroleum Machinery, 2013, 41(11): 6-10.
- [9] 宋先知, 李根生, 王梦抒, 等. 连续油管钻水平井岩屑运移规律数值模拟[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(2): 28-32.  
Song Xianzhi, Li Gensheng, Wang Mengshu, et al. Numerical simulation on cuttings carrying regularity for horizontal wells drilled with coiled tubing [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(2): 28-32.

- [10] Nguyen D, Rahman S S. A three-layer hydraulic program for effective cuttings transport and hole cleaning in highly deviated and horizontal wells[R]. SPE 36383, 1996.
- [11] Hyun C, Subhash N S, Osisanya S O. A three-segment hydraulic model for cuttings transport in horizontal and deviated wells[R]. SPE 65488, 2000.
- [12] Li Y, Bjorndalen N, Kuru E. Numerical modelling of cuttings transport in horizontal wells using conventional drilling fluids [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2013, 46(7): 103-107.
- [13] Taylor J L, Bouska R, Silva R, et al. Effect of bicenter Bit BHA design on BHA behavior[R]. SPE 128203, 2010.
- [14] Tang Yula, Ozkan E, Kelkar M, et al. Performance of horizontal wells completed with slotted liners and perforations[R]. SPE 65516, 2000.
- [15] Bennion D B, Gupta S, Gittins S, et al. Protocols for slotted liner design for optimum SAGD operation[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(11): 21-26.
- [16] 李根生, 翟应虎. 完井工程[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2013.  
Li Gensheng, Zhai Yinghu. Well completion engineering[M]. Dongying: China University of Petroleum Industry Press, 2013.
- [17] 齐月魁, 刘艳红, 常青, 等. 水平井割缝筛管完井技术应用[J]. 钻采工艺, 2000, 23(5): 98-100.  
Qi Yuekui, Liu Yanhong, Chang Qing, et al. completion technology application of horizontal well slotted pipe[J]. *Drilling Production Technology*, 2000, 23(5): 98-100.
- [18] Han Guoqing, Ling Kegang, Wu Huaxiao, et al. An experimental study of coal-fines migration in coalbed-methane production wells [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 1542-1548.
- [19] 董长银, 隆佳佳, 王登庆, 等. 防砂水平井旋转水射流解堵工艺参数优化实验[J]. 石油学报, 2013, 34(4): 759-764.  
Dong Changyin, Long Jiajia, Wang Dengqing, et al. Experiment of parameters optimization for plug removal by rotating jet flow in sand-control horizontal wells[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(4): 759-764.
- [20] Huang Zhongwei, Li Gensheng, Yan Xiangzhen, et al. Comparison experiment on steel and non-steel slotted screen pipes used in coalbed methane wells[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(4): 522-527.
- [21] Furui K, Zhu D, Hill A D. A comprehensive model of horizontal well completion performance[R]. SPE 84401, 2005.
- [22] 杨睿月, 黄中伟, 李根生, 等. 煤层气水平井割缝筛管优化设计[J]. 煤炭学报, 2014, 39(11): 2269-2275.  
Yang Ruiyue, Huang Zhongwei, Li Gensheng, et al. Optimization design for the geometry parameters of slotted liner in coalbed methane horizontal wells [J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(11): 2269-2275.
- [23] 尹飞, 高宝魁, 高宏. 基于 ANSYS 的割缝筛管应力分析和结构优化[J]. 石油矿场机械, 2011, 40(6): 8-10.  
Yin Fei, Gao Baokui, Gao Hong. Stress analysis and structure design of slotted screen with ANSYS[J]. *Oil Field Equipment*, 2011, 40(6): 8-10.
- [24] 易先中, 王利成, 魏慧明, 等. 钻井岩屑粒径分布规律的研究[J]. 石油机械, 2007, 35(12): 1-4.  
Yi Xianzhong, Wang Licheng, Wei Huiming, et al. Study of the size distribution of drill cuttings[J]. *China Petroleum Machinery*, 2007, 35(12): 1-4.

(收稿日期 2015-12-10 改回日期 2016-06-02 编辑 宋宁)

版权所有