

◀ 油气开采 ▶

doi:10.11911/syztjs.201406018

# 旋转射流联合沉砂筒解堵工艺关键参数研究

左伟芹<sup>1</sup>, 李雪莲<sup>2</sup>, 卢义玉<sup>3</sup>, 刘勇<sup>1</sup>

(1. 中原经济区煤层(页岩)气河南省协同创新中心(河南理工大学),河南焦作 454000; 2. 河南理工大学应用技术学院,河南焦作 454000; 3. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室(重庆大学),重庆 400030)

**摘要:**部分油气井因井漏失返而无法建立全井循环,传统解堵工艺难以解决此类油气井的堵塞,为此开展了旋转射流联合沉砂筒解堵工艺研究。旋转射流联合沉砂筒解堵工艺是利用油管将高压水输送至旋转喷头形成旋转射流,破碎井底堵塞物,堵塞物被上返液运送至一定高度,在环空液柱升高漏失量增大或停泵等因素影响下,堵塞物沉积在旋转喷头上方的沉砂筒内,随着沉砂筒起出带至地面。利用固液两相流体力学对堵塞物进行了受力分析,推导出不同类型的堵塞物上返所需流速的计算公式,并根据力矩平衡原理推导出了旋转喷头正向喷嘴水力参数计算公式。卧51井采用旋转射流联合沉砂筒解堵工艺进行冲砂解堵,15 min 冲砂进尺达9.98 m,解堵效果良好,表明该工艺可以较好地解决低压油气井堵塞的问题,为油气井解堵提供了新思路。

**关键词:**旋转射流 沉砂筒 局部循环 解堵 冲砂 卧51井

中图分类号:TE358 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2014)06-0092-05

## Key Parameters of Removing Blockage with Rotating Jets and Sand-Tubes

Zuo Weiqin<sup>1</sup>, Li Xuelian<sup>2</sup>, Lu Yiyu<sup>3</sup>, Liu Yong<sup>1</sup>

(1. Collaborative Innovation Center of Central Plains Economic Region for Coalbed/Shale Gas (Henan Polytechnic University), Jiaozuo, Henan, 454000, China; 2. Institute of Applied Technology, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan, 454000, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control (Chongqing University), Chongqing, 400030, China)

**Abstract:** Whole-well circulation could not be built up for some oil and gas wells due to low pressure, and easy circulation loss and traditional blockage removing could not be used to clean these wells. In this paper, a novel technique was implemented, which involved a new plug removal technology, in which high pressure water through an oil tube rotates the nozzle, and rotating jets were formed to break up the blocking-mass. The broken blocking-mass would move up in water drive. When the leakage increased or pumping stopped, the blocking-mass would deposit in the sand-tube above the rotating nozzle and be brought to the ground with the sand-tube. A forced analysis of the blocking-mass was studied by solid-fluid mechanics, and the return flow rates with different silt styles were presented. The equation for calculating hydraulic parameter of rotating nozzle was derived by the moment balance theory. This plug removal technology was applied in Well Wo-51, and the blocking-mass of 9.98 meters was cleared in 15 min. It showed that the removing blockage with rotating jet and sand-tube turned out to be an effective blockage removing method for wells with low pressure and easy circulation loss. It would provide a novel means to plug removal.

**Key words:** rotating jet; sand-tube; local-circulation; plug removal; sand washing; Well Wo-51

随着开采时间的延长,油气井会出现不同程度的堵塞,导致油气井产量快速下降。为有效提高油气藏最终采收率,必须采取有效的解堵措施确保油气井稳产或复产。近年来,国内外处理近井地带、解除地层堵塞的研究方法很多,如酸化法<sup>[1]</sup>、水力振动法<sup>[2]</sup>、超声波法<sup>[3]</sup>、电液脉冲法、气体压裂法、人工地震法等,在现场应用均取得了一定的效果<sup>[4-5]</sup>。但堵塞物中一般含有固体颗粒,特别是酸化解堵后形成的酸渣,用以上方法难以将这些脱落的堵塞物排出

地层,严重影响施工效果<sup>[6]</sup>。黄中伟等人<sup>[6]</sup>提出振

收稿日期:2014-03-31;改回日期:2014-10-07。

作者简介:左伟芹(1984—),男,湖北仙桃人,2007年毕业于重庆大学安全工程专业,2012年获重庆大学安全工程专业博士学位,讲师,主要从事高压水射流理论及其应用研究。

联系方式:zuoweiqin@163.com。

基金项目:河南理工大学博士基金“基于射流泵原理的井下深长孔新型排水排渣技术关键参数研究”(编号:B2013-009)及武汉大学水射流理论与新技术湖北省重点实验室开放课题“前混合磨料射流磨料颗粒运动规律研究”(编号:HBKLWJ-2014F04)联合资助。

荡-酸化深部复合解堵工艺,在排除脱落的堵塞物方面取得了较好的效果,但该工艺仅适用于能建立全井循环的油气井。随着油气田的开发,地层产生亏空,地层压力下降,许多油气井无法建立全井循环,限制了该工艺的应用。传统机械捞砂无需建立全井循环,但一次捞砂量小,孙永壮等人<sup>[7]</sup>对该工艺进行了改进,但对于板结的堵塞物或大颗粒脱落物依然没有很好的效果。对于无法建立全井循环的低压油气井,目前还没有较为合适的解堵工艺。为此,笔者提出了旋转射流联合沉砂筒解堵工艺,利用油管将高压水输送至旋转喷嘴形成旋转射流,旋转射流对井底堵塞物进行破碎,旋转喷头喷出的高压水在油管和套管之间的环空内上返,形成具有一定流速的上返液,破碎的堵塞物在上返液的作用下向上运动并超过沉砂筒的高度,在漏失量增大或停泵的情况下上返液流速降低,破碎的堵塞物开始沉降落入沉砂筒内,通过起出沉砂筒将破碎的堵塞物带至地面,形成了井底局部循环的解堵工艺。

## 1 局部循环解堵工艺原理及施工步骤

在油气田开发后期,受油井含水率高、地层压降大及单井产液量高与生产时段的注采不平衡等不利因素的影响,地层产生亏空,致使冲砂作业过程中时常出现工作液漏失现象,无法建立全井循环,导致一些传统解堵工艺无法实施。一些适用于低压油气井解堵的工艺存在一次捞砂量少、对板结堵塞物处理效果不好等问题。针对该问题,提出了局部循环解堵工艺,其工作原理如图 1 所示。

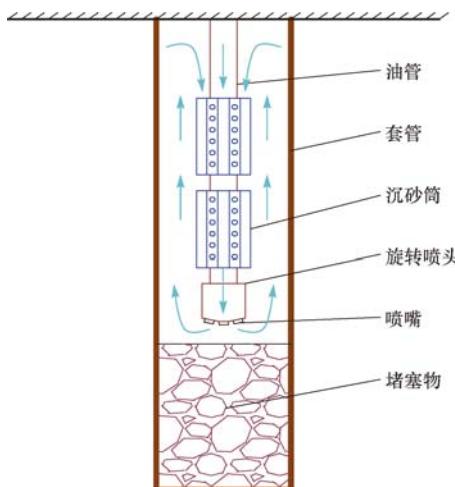


图 1 局部循环解堵工作原理示意

Fig. 1 Work principle of local-circulation plug removal

局部循环解堵装置由旋转喷头、沉砂筒组成。

根据堵塞段的长度估算堵塞物的体积,计算出所需沉砂筒的长度。根据堵塞物的种类及堵塞物的固结程度选择合适的工作泵压及流量,配备合适的旋转喷头。将沉砂筒和旋转喷头组成的解堵工具下至堵塞层位,经中心油管泵入工作液,利用旋转射流对井底堵塞物进行破碎,同时以合理的速度将解堵工具下放。解堵工具达到预定的解堵位置后,将解堵工具提升至初始堵塞的层位,重新对堵塞段进行清洗。根据堵塞物的种类及解堵效果,确定清洗的次数。清洗完毕后,将解堵工具提升至初始堵塞的层位,候砂沉淀,使上返的破碎物沉积在沉砂筒内。重新探测砂面,若未达到预期的解堵效果,则对堵塞段重新进行清洗。达到预期效果后,将解堵工具取出,清理沉砂筒内的破碎物,完成解堵作业。

## 2 局部循环工艺解堵机理

### 2.1 旋转射流解堵机理

局部解堵装置通过旋转射流对井底堵塞物进行破碎和清洗,具备传统高压水射流解堵的优点<sup>[8]</sup>。通过射流的反作用力推动旋转喷头的旋转,形成旋转射流,无需地面提供旋转动力。同时,地面作业车缓慢升降油管,使工具在射孔段既能上下移动、又能旋转,可对整个射孔段炮眼和井眼附近的地层进行全方位处理。通过调节动力喷嘴的相关参数及阻尼器的阻力,控制旋转速度为 100~400 r/min。旋转喷头每旋转一周,都有数道水射流作用于堵塞地层,使堵塞地层受到低频冲击力。在低频冲击力作用下,井底的水垫效应大大降低,提高了射流冲洗的效率,使井底堵塞物及地层孔隙内的杂质更加容易松动脱落。同时,可使地层产生疲劳微裂缝,随着水力波的深入作用,微裂缝不断扩大和延伸,从而增大地层的渗透率。

### 2.2 沉砂筒结构及收集原理

根据油层套管及油管的尺寸,选择合理尺寸的钢管作为沉砂筒。由现场试验效果可知,单根沉砂筒长度为 2.5~4.5 m 时,沉砂效果较好。沉砂筒与油管套在一起,将二者之间形成环空间隙的底部密封,沉砂筒侧面开窗并安装适宜孔径的钢丝网。沉砂筒与油管之间的环空作为承载破碎物的空间,工作液通过钢丝网流出沉砂筒。

由多根较短的沉砂筒组成的沉砂筒组具有以下

优点:1)缩短了沉砂路径和沉砂时间;2)增加了破碎物进入沉砂筒的通道,提高了收集的效率;3)长度可以根据实际需要任意组装,一次捞砂量大。

### 2.3 联合解堵机理

局部循环解堵工艺采用旋转射流对井底堵塞物进行破碎和清洗,采用沉砂筒收集破碎的堵塞物并将其运出地层。传统旋转射流解堵工艺直接通过上返的工作液将破碎的堵塞物带出地层,堵塞物需在上返液的作用下运行几千米的高度。在上返液流速一定的情况下,随着破碎物粒径的增大,破碎物上返速度变慢,使解堵时间增长;且在长距离的运移途中,大颗粒的破碎物易被狭小空间或凸台挡住,难以排出地层。

与传统旋转射流解堵工艺相比,该解堵工艺具有以下优点:1)解堵时只需建立局部循环即可,在低压油气井依然适用;2)通过沉砂筒收集破碎物,颗粒较大的破碎物虽然上返速度较慢,但它只需上返至第一节沉砂筒的高度(一般在5 m以内)即可,使该工艺在清理大颗粒的破碎物方面具有较大的优势;3)沉砂筒总长度一般为30~100 m,大大减小了破碎物上返的高度,缩短了解堵时间,减少了工作液的消耗,降低了对地层的污染。

## 3 上返液流速分析

局部循环解堵工艺的关键在于在井底以合理的流速建立局部循环。若上返流速过低,无法将堵塞物输送到一定高度,则无法实现解堵。若上返流速过大,所需工作液较多,对后期复产有一定的影响,无法完全体现出局部循环解堵工艺对后期复产影响小的优势。故针对不同种类的堵塞物建立不同流速的局部循环,为局部循环解堵工艺的实现及降低对后期复产的影响尤为重要。

为选择合理的流速,对环空上返流场中破碎的堵塞物进行受力分析。为简化起见,进行以下假设<sup>[9-10]</sup>:1)在上返的混合液中,破碎堵塞物的质量分数低于5%,按十分稀疏的固液两相流处理,不考虑破碎堵塞物之间的相互作用;2)由于按十分稀疏固液两相流处理,因此附加质量力、Basset力、Magnus力等忽略不计,只考虑重力、浮力和表面阻力。

根据以上假设,忽略破碎物加速的过程,破碎物受力平衡时的受力表达式为:

$$F_D + F_b = G \quad (1)$$

式中: $F_D$ 为表面阻力,N; $F_b$ 为浮力,N; $G$ 为重力,N。

表面阻力的计算公式为<sup>[11]</sup>:

$$F_D = 0.5 C_D \rho (v_f - v_s)^2 A \quad (2)$$

$$\text{其中 } C_D = \frac{24}{Re} \quad (Re < 0.2) \quad (3)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \sqrt{1 + \frac{3Re}{16}} \quad (0.2 < Re < 500) \quad (4)$$

$$C_D = 0.44 \quad (500 < Re < 100\,000) \quad (5)$$

式中: $\rho$ 为流体密度,kg/m<sup>3</sup>; $v_f$ 为工作液上返流速(向上为正),m/s; $v_s$ 为破碎物上返速度(向上为正),m/s; $A$ 为球最大截面积,m<sup>2</sup>; $C_D$ 为扰流阻力系数,Re为雷诺数。

将重力表达式、浮力表达式和式(2)带入式(1),整理得:

$$v_f = v_s + \sqrt{\frac{8Re}{3C_D} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}} \quad (6)$$

式中: $\rho_s$ 为破碎物密度,kg/m<sup>3</sup>。

要使破碎物按一定的速度上返,需保证 $v_s$ 大于0。当 $v_s$ 较小时,破碎物上返速度较慢,解堵效率不高,故应选择合理的 $v_s$ ,以获得较高的解堵效率。根据现场条件,选择主要清理对象的参数,计算出

$$\sqrt{\frac{8Re\rho_s - \rho}{3C_D}} \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \text{结合 } v_s, \text{ 得出合理的上返液流速。}$$

## 4 旋转喷头结构及其水力参数分析

旋转喷头作为局部循环解堵工艺的关键部件,其性能的好坏直接决定了该解堵工艺的解堵效率。因此,对其结构及水力参数进行了分析。

### 4.1 旋转喷头

旋转喷头的结构如图2所示。旋转喷头通过2组滚针轴承、推力球轴承实现主轴和壳体之间的定位与相对旋转,通过动环与静环组成端面密封,具有旋转密封泄漏量小、摩擦阻力小、使用寿命长等特点。喷头前部安装的正向喷嘴,分为轴心和周边2种,其中轴心喷嘴1个,周边喷嘴3个。周边的正向喷嘴与喷头轴心呈一定的偏转角度,射流喷出后产生的反作用力推动喷头前部旋转,形成旋转射流。旋转喷头的旋转动力来自水射流本身,其特殊结构使射流产生的反冲力充当了动力源,该反冲力与压力、流量有关,而它形成的扭矩取决于喷嘴的安装位置和角度。为了使射流不雾化,并延长在同一点的冲击时间,提高冲击破碎能力,必须将喷头转速控制

在一定范围内,故射流反冲力产生的动力矩与喷头的摩擦阻力矩必须达到平衡。

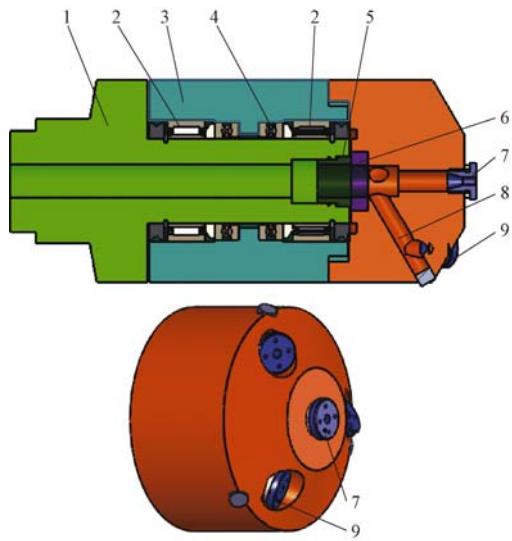


图 2 旋转喷头结构示意

Fig. 2 Structure of the rotating nozzle

1. 主轴; 2. 滚针轴承; 3. 外壳; 4. 推力球轴承; 5. 静环;
6. 动环; 7. 轴心正向喷嘴; 8. 正向喷嘴通道;
9. 周边正向喷嘴

## 4.2 喷头的摩擦阻力矩

分析旋转喷头的结构可知,产生摩擦阻力矩的主要是动静环接触面及轴承 2 个部位。

### 4.2.1 动静环接触面产生的摩擦阻力矩

摩擦阻力矩产生在密封静环和密封动环的接触面上,摩擦阻力矩的大小与密封静环和密封动环的材质、加工精度、接触面端面压力等有关。动静环受力如图 3 所示。

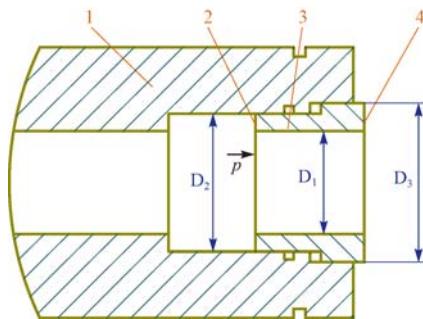


图 3 动静环受力分析

Fig. 3 Force on rotating and stationary seal ring

1. 主轴; 2. 高压流体推力作业面; 3. 静环; 4. 动静环接触面

高压流体推力为:

$$F = \frac{1}{4}\pi(D_2^2 - D_1^2)p \quad (7)$$

式中:  $F$  为高压流体推力,  $N$ ;  $D_2$  为主轴流道内径,  $m$ ;  $D_1$  为静环内径,  $m$ ;  $p$  为高压流体压力,  $Pa$ 。

动静环接触面压力为:

$$p_1 = \frac{F}{0.25\pi(D_3^2 - D_1^2)} \quad (8)$$

式中:  $p_1$  为动静环接触面压力,  $Pa$ ;  $D_3$  为静环外径,  $m$ 。

在静环密封端面微面积  $dS$  上作用的正压力为:

$$dF_N = p_1 dS \quad (9)$$

式中:  $S$  为动静环接触面积,  $m^2$ 。

单位微面积上产生的摩擦力为:

$$dF_f = f_f dF_N \quad (10)$$

式中:  $f_f$  为动静环接触面摩擦因数。

动静环接触面的摩擦阻力矩为:

$$M_f = \int_{D_1}^{D_3} 0.5 D dF_f \quad (11)$$

式中:  $D$  为微圆环的直径,  $m$ 。

### 4.2.2 推力球轴承产生的摩擦阻力矩

由图 2 可知,旋转喷头内部有 2 个滚针轴承和 2 个推力球轴承。滚针轴承主要防止主轴偏转,受到的作用力较小,故滚针轴承上产生的摩擦阻力矩可以忽略不计。高压流体对静环沿喷头轴线的推力经过传递,作用在推力球轴承上,故推力球轴承上的正压力与高压流体对静环的推力相等。推力球轴承上的摩擦阻力矩为:

$$M_q = f_q R_q \quad (12)$$

式中:  $f_q$  为推力球轴承摩擦因数;  $R_q$  为推力球轴承的半径,  $m$ 。

联立式(7)—(12),可得总摩擦力矩为:

$$M_{sum} = \frac{1}{12}\pi f_f p(D_3^2 - D_1^2) \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_3^2 - D_1^2} + \frac{1}{4}\pi f_q R_q (D_2^2 - D_1^2) p \quad (13)$$

## 4.3 喷头的动力矩

为保证正向喷嘴能提供旋转动力,需使正向喷嘴与轴心呈一定的距离  $r$  且与轴线呈一定的偏转角  $\theta$ 。

射流产生的反冲力为:

$$F_j = 1.57 d^2 \Delta p \quad (14)$$

式中:  $d$  为正向喷嘴直径,  $m$ ;  $\Delta p$  为喷嘴内外压差,  $Pa$ 。

射流提供的动力矩为:

$$M = nr F_j \sin \theta \quad (15)$$

式中: $n$ 为正向喷嘴(周边喷嘴)的数量; $r$ 为喷嘴距轴心的距离,m; $\theta$ 为喷嘴与旋转喷头轴心的偏转角,(°)。

根据动力矩和摩擦阻力矩的平衡关系,联立式(13)—(15),即可算出正向喷嘴的直径、安装位置及角度。

## 5 现场试验

卧 51 井位于卧龙河构造南轴东翼,1981 年 3 月 2 日完钻,产层中部井深 4 110.00 m。目前该井处于生产后期,由于油管入井时间长,可能存在腐蚀,管径偏大不利于后期携液,剩余储量较多,开采潜力大。更换油管作业、探砂面时,发现井底沉砂及碎石掩埋产层。利用式(6)计算出工作液流速为 1.6 m/s 时,能带动直径 8 mm 的破碎物以 1 m/s 的速度上返。该井套管内径为 157.0 mm,进行旋转射流联合沉砂筒解堵试验时所用油管外径 73.0 mm,沉砂筒外径 140.0 mm。

由式(6)的计算结果和该井的油套管参数可知,排量为 400 L/min 时,1 min 内能将直径 8 mm 的破碎物带至 60 m 的高度,满足现场施工的要求。在排量 400 L/min 条件下,经过 15 min 射流将掩埋产层段长达 7.85 m 的裸眼垮塌碎块和板结沉砂清除,冲出最大碎块的尺寸为 5 mm×8 mm,冲砂进尺达 9.98 m,超过产层底界 2.13 m。该井冲砂后,生产管柱顺利下入产层下部,解堵酸化后复产,目前产气量  $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

## 6 结 论

1) 旋转射流联合沉砂筒局部循环解堵工艺能彻底清洁井筒和近井地带地层的堵塞物,从根本上解决井下沉积物的堵塞问题,具有一次捞砂量大、解堵效率高等特点,是一种行之有效的低压气井井筒清洁技术。

2) 针对不同的堵塞物,推导出了环空内上返液流速的计算公式,可为旋转射流联合沉砂筒局部循环解堵工艺实施提供依据。

3) 对旋转喷头水力参数进行了分析,给出了正向喷嘴数量、直径、安装位置及角度等参数的计算公式,可为旋转喷头设计提供依据。

## 参 考 文 献

### References

[1] 张荣军,蒲春生.振动-土酸酸化复合解堵室内实验研究[J].石

油勘探与开发,2004,31(5):114-116,132.

Zhang Rongjun, Pu Chunsheng. Vibration-mud acidization treatment broken down experiment[J]. Petroleum Exploration and Development,2004,31(5):114-116,132.

[2] 梁春,李庆,焦亚凤.水力振动法处理油层技术的研究与应用[J].大庆石油地质与开发,2006,25(2):65-67.

Liang Chun, Li Qing, Jiao Yafeng. Research and application of hydraulic vibration for oil layer treatment[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2006,25(2):65-67.

[3] 朱继东,张建国,石爱霞,等.声波解堵综合配套技术研究[J].石油钻探技术,2006,34(1):59-61.

Zhu Jidong, Zhang Jianguo, Shi Aixia, et al. Comprehensive supporting technology for plug removal with sonic wave[J]. Petroleum Drilling Techniques,2006,34(1):59-61.

[4] 李伟翰,颜红侠,王世英,等.近井地带解堵技术研究进展[J].油田化学,2005,22(4):381-384.

Li Weihan, Yan Hongxia, Wang Shiying, et al. Developments in applications and researches of blockage removal technologies in near borehole zones for stimulating oil production[J]. Oilfield Chemistry,2005,22(4):381-384.

[5] 王羽曦.超短半径水平井钻井技术在注入井解堵中的应用[J].石油钻探技术,2013,41(5):89-92.

Wang Yuxi. Application of ultra-short radius horizontal well drilling technology in plugging removal in injectors[J]. Petroleum Drilling Techniques,2013,41(5):89-92.

[6] 黄中伟,李根生,刘全国,等.振荡-酸化深部复合解堵机理与应用[J].石油勘探与开发,2006,33(5):618-621.

Huang Zhongwei, Li Gensheng, Liu Quanguo, et al. Mechanisms and applications of removing blockage with oscillating jet and acid[J]. Petroleum Exploration and Development,2006,33(5):618-621.

[7] 孙永壮,杜丙国,邵宣涛.机械捞砂工艺研究[J].石油学报,2006,27(6):125-127,132.

Sun Yongzhuang, Du Bingguo, Shao Xuantao. Research on mechanical sand-bailing technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006,27(6):125-127,132.

[8] 李根生,马加计,沈晓明,等.高压水射流处理地层的机理及试验[J].石油学报,1998,19(1):96-99.

Li Gensheng, Ma Jiaji, Shen Xiaoming, et al. A study on mechanisms and effects of plug removal near wellbore with high pressure water jet[J]. Acta Petrolei Sinica,1998,19(1):96-99.

[9] 董长银,栾万里,周生田,等.牛顿流体中的固体颗粒运动模型分析及应用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(5):55-59,63.

Dong Changyin, Luan Wanli, Zhou Shengtian, et al. Analysis and application of model for solid particle movement in Newton fluid[J]. Journal of China University of Petroleum, Edition of Natural Science,2007,31(5):55-59,63.

[10] 陈建兵,王超,刘贵远,等.磨料射流切割套管技术研究及在海上弃井中的应用[J].石油钻探技术,2013,41(5):46-51.

Chen Jianbing, Wang Chao, Liu Guiyuan, et al. Casing cutting technology through abrasive water jet and its applications in offshore abandoned wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013,41(5):46-51.

[11] Douglas J F, Gasiorek J M, Swaffield J A. Fluid mechanics [M]. London: Mining Publishing House,1979:235-240.

[编辑 刘文臣]