

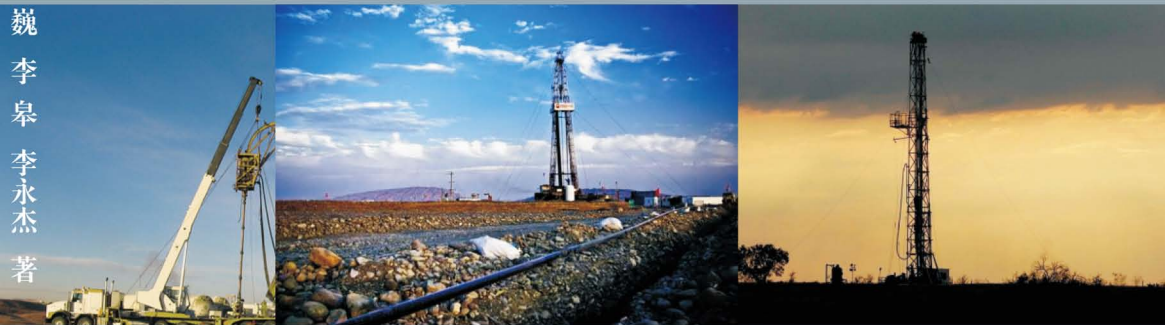
钻水平井岩屑运移规律研究

魏纳 郭柏云 宋巍 李皋 李永杰 著

# 钻水平井 岩屑运移规律研究

ZUAN SHUIPINGJING  
YANXUE YUNYI GUILÜ YANJIU

魏 纳 郭柏云 宋 巍 李 皋 李永杰 著



四川大学出版社



四川大学出版社

责任编辑:梁 平  
责任校对:赵 旦  
封面设计:米迦设计工作室  
责任印制:王 炜

### 图书在版编目(CIP)数据

钻水平井岩屑运移规律研究 / 魏纳等著. —成都:  
四川大学出版社, 2016. 1  
ISBN 978-7-5614-9296-3

I. ①钻… II. ①魏… III. ①水平钻井—岩屑—油气  
运移—规律—研究 IV. ①TE243

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 024744 号

### 书名 钻水平井岩屑运移规律研究

---

|      |                         |
|------|-------------------------|
| 著 者  | 魏 纳 郭柏云 宋 巍 李 皋 李永杰     |
| 出 版  | 四川大学出版社                 |
| 地 址  | 成都市一环路南一段 24 号 (610065) |
| 发 行  | 四川大学出版社                 |
| 书 号  | ISBN 978-7-5614-9296-3  |
| 印 刷  | 四川永先数码印刷有限公司            |
| 成品尺寸 | 148 mm×210 mm           |
| 印 张  | 3.875                   |
| 字 数  | 102 千字                  |
| 版 次  | 2016 年 3 月第 1 版         |
| 印 次  | 2016 年 3 月第 1 次印刷       |
| 定 价  | 20.00 元                 |

---

◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。

电话:(028)85408408/(028)85401670/  
(028)85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请  
寄回出版社调换。

◆网址:<http://www.scup.cn>

版权所有◆侵权必究

# 内容简介

水平井钻井技术已成为现代薄层油气藏勘探开发的重要手段，井眼净化效果不好可造成钻具摩阻扭矩增大，从而导致井下复杂，严重制约水平井延伸能力，因此深入研究水平井段岩屑运移机理以及岩屑动态运移规律对于合理设计钻井方案、优化钻井施工参数、保证安全钻进有重要实际意义。本书主要采用理论分析、地面可视化实验模拟以及 CFD 仿真模拟相结合的方法进行研究，形成了钻水平井的液固耦合流动理论及数学描述体系。本书主要研究了钻杆不旋转和钻杆旋转两种工况下水平井偏心环空的流场、岩屑运移轨迹的 CFD 仿真模拟、预测岩屑床高度以及钻井液临界返速的定量计算方法、水平环空岩屑运移可视化实验等工作。

该研究成果可有效指导制定水平井井眼净化方案以及钻水平井施工参数的优化设计，这对保证水平井安全钻进以及有效延伸水平井井眼均有积极意义。

# 作者简介

**魏纳**，1980—，男，副教授，博士。2011年毕业于西南石油大学油气井工程专业。现为西南石油大学石油工程学院流体热工教研室教师，“四川省海洋天然气水合物开发协同创新中心”行政秘书、学术委员会秘书，主攻海洋天然气水合物绿色钻采技术，油气储运工程、控压钻井、欠平衡钻井与气体钻井系列技术井下流动控制理论及实验评价法。主持与主研完成国家级课题20余项、油田协作科研项目20余项，发表国内外学术论文30余篇，出版专著及教材5部，获得省部级奖励1项、专利8项，登记注册软件2项。

**郭柏云**，1959—，男，教授，美国路易斯安那大学石油工程系终身教授、我国“千人计划”专家、四川省“百人计划”专家。长期从事石油及天然气开发领域的新技术研发工作，已在欠平衡钻井、深水钻井液开发、完井优化设计等研究领域取得卓越成就。其早期专著《欠平衡钻井气体体流量的计算》、与Lyons合著的《空气及气体钻井手册（第二版）》推进了国际气体欠平衡钻井技术的应用。

**宋巍**，1985—，男，硕士，工程师，2013年毕业于西南石油大学油气井工程专业。现工作于中石油冀东油田钻采工艺研究院，主要从事钻井工艺研究与钻井设计。主研完成国家级课题3项、油田协作科研项目5项，发表国内外学术论文3篇，获得专

利 2 项，登记注册软件 1 项。

**李皋**，1976—，男，博士，教授。现为西南石油大学石油工程学院钻井教研室教师，长期从事油气井工程方面研究。曾获国家发明专利 29 项、转件著作权 6 项、省部级科技奖励 8 项，发表论文 120 余篇，是四川省突出贡献专家、四川省学术与技术带头人后备人选。

**李永杰**，1964—，男，硕士，副教授。现为西南石油大学石油工程学院流体热工教研室教师，长期从事油气井工程方面热工研究。曾获国家发明专利 2 项、实用新型专利 4 项、中石油集团公司科技成果一等奖 1 项及二等奖 1 项、四川省科学技术进步三等奖 1 项、校级科技进步一等奖 1 项。

# 前 言

水平井钻井技术已成为现代薄层油气藏勘探开发的重要手段，井眼净化效果不好可造成钻具摩阻扭矩增大，从而导致井下复杂，严重制约水平井延伸能力，因此深入研究水平井段岩屑运移机理以及岩屑动态运移规律对于合理设计钻井方案、优化钻井施工参数、保证安全钻进有重要实际意义。

水平井钻进时井下实际工况为液固复杂介质耦合流动且井下流动无法实现可视化，造成对液固两相流动机理认识不清、数学描述不完善，因此本书中采用理论分析、地面可视化实验模拟以及 CFD 仿真模拟相结合的方法进行了相关研究，形成了钻水平井的液固耦合流动理论及数学描述。

本书主要研究内容如下：

(1) 研究了钻杆不旋转和钻杆旋转两种工况下水平井偏心环空的流场，进行了相关因素的敏感性分析，结合环空流场的 CFD 数值模拟，分析得出了水平环空的流场变化规律。

(2) 基于岩屑受力分析，建立了岩屑的运动方程，并进行了岩屑运移轨迹的 CFD 仿真模拟；在此基础上，研究了液固两相不同流型以及岩屑不同运移形式的内在机理，为分析岩屑床的形成条件奠定了理论基础。

(3) 提出了预测岩屑床高度以及钻井液临界返速的定量计算方法，并结合相关因素的敏感性分析得到了规律性认识，可为现

场制定水平井井眼净化方案提供理论支持。

(4) 进行了水平环空岩屑运移可视化实验,验证了环空岩屑的不同分布规律和运移规律;实验得到的钻井液临界返速低于理论模型计算结果,在钻杆不旋转和旋转两种工况下相对误差分别为 10.4%和 13.1%,说明本书中的理论模型可满足工程计算精度要求。

本书基于以上理论研究和实验研究,形成了水平井眼流场分析方法及数学描述、水平井偏心环空的岩屑运移理论及规律认识;通过地面可视化实验模拟验证了液固耦合流动理论及数学描述;最终,通过所得到的规律和认识形成了一套提高水平井井眼净化水平的措施。该研究成果可有效指导制定水平井井眼净化方案以及钻水平井施工参数的优化设计,这对保证水平井安全钻进以及有效延伸水平井井眼均有积极意义。

# 目 录

|                      |        |
|----------------------|--------|
| 第 1 章 概论             | ( 1 )  |
| 1.1 研究目的及意义          | ( 1 )  |
| 1.2 国内外研究现状          | ( 3 )  |
| 1.3 研究思路             | ( 10 ) |
| 1.4 研究内容             | ( 10 ) |
| 1.5 研究成果             | ( 11 ) |
| 第 2 章 破岩后岩屑粒径分布规律    | ( 13 ) |
| 2.1 岩屑颗粒的几何特征        | ( 13 ) |
| 2.2 牙轮钻头破岩机理         | ( 15 ) |
| 2.3 岩屑破碎机理分析         | ( 17 ) |
| 2.4 岩屑粒径分布室内实验       | ( 18 ) |
| 第 3 章 水平井环空流场计算模型    | ( 23 ) |
| 3.1 钻井液流变模式          | ( 23 ) |
| 3.2 钻杆不旋转时偏心环空流场计算模型 | ( 25 ) |
| 3.3 钻杆旋转时偏心环空流场计算模型  | ( 35 ) |
| 3.4 环空流场敏感性因素分析      | ( 47 ) |
| 第 4 章 水平井稀疏相岩屑运移机理研究 | ( 54 ) |
| 4.1 不同流态的钻井液携岩机理     | ( 54 ) |
| 4.2 水平井段岩屑运移规律       | ( 57 ) |
| 4.3 水平井段岩屑运移机理分析     | ( 68 ) |

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 第 5 章 水平井岩屑床动态运移研究 ..... | ( 77 ) |
| 5. 1 岩屑床高度计算模型 .....     | ( 77 ) |
| 5. 2 岩屑床高度敏感性因素分析 .....  | ( 83 ) |
| 5. 3 钻井液临界返速计算 .....     | ( 88 ) |
| 5. 4 水平环空岩屑运移可视化实验 ..... | ( 91 ) |
| 第 6 章 结论及建议 .....        | (104)  |
| 6. 1 结论 .....            | (104)  |
| 6. 2 建议 .....            | (105)  |
| 附    录 .....             | (106)  |
| 参考文献 .....               | (108)  |

# 第 1 章 概论

## 1.1 研究目的及意义

### (1) 水平井技术的发展

勘探开发难度的增加促使钻井新技术、新工艺不断涌现和发展，水平井钻井技术以其高储层发现率、高产能和低“吨油成本”等特点受到国内外钻井界的青睐，使用该方式完钻井数所占比例逐年增加，尤其是随着在裂缝性油藏、薄油藏以及低渗透油藏等非常规油藏取得成功应用后，这些油藏的动用程度得到了大大提高；同时在增产和提高采收率方面，水平井技术也起了举足轻重的作用，其稳定产能是直井的 2~5 倍，已逐步成为现代油气勘探开发的重要手段，成为各油田开发的主力<sup>[1,2]</sup>。

自 1863 年瑞士科学家首次提出水平井概念以来，美国 and 苏联等国家地区均开展了此方面的研究，其中以美国和加拿大水平井应用的数量最多、技术水平较高，从 2009 年中期开始，北美地区用于钻水平井的钻机数量超过了其他井型，使本已搁浅的储量得以充分开发，据统计，两国的水平井年完钻井数几乎呈指数增长。

我国水平井研究起步较晚，1964—1965 年间首先在四川碳

酸盐岩地层中成功钻成了磨—3井和巴—24井两口水平井。随着高效钻井液、先进测量仪器、长寿命马达和新型PDC钻头等技术的不斷应用,水平井技术取得了长足发展并日臻完善,从20世纪90年代开始在各油田推广应用。自从应用水平井技术以来,中石油在规模推广和应用效果等方面见到较好成效,钻井水平和速度不断提高,2011年油气田开发完钻水平井共计1018口。但总体来看,无论是应用规模还是反映技术水平的重要参数,与国外同行相比都有较大的差距。

### (2) 水平井的岩屑运移问题

水平井钻井技术固然有诸多优势,但水平井段岩屑运移问题就是其弊端之一,井眼净化不好可导致严重的钻井事故,因此应予以足够的重视。由于水平井段井身结构的特殊性(井斜角范围在 $90^{\circ}$ 左右),水平环空的岩屑在各种力综合作用下的运移轨迹与直井段有明显不同,当钻井液返速较低时岩屑易下落在井眼环空低边,逐渐堆积形成岩屑床,可导致一系列工程复杂问题。井眼清洗程度的好坏直接关系到一口井的成败,由于洗井不好而导致钻井事故的案例时有发生,比如南海西江24—A14井在钻至4502 m处由于井眼净化效果不好,钻进时发生了严重卡钻事故;四川某大斜度井钻至2288.87 m处由于卡钻导致填井侧钻等,造成了重大经济损失,该问题严重影响水平井技术的进一步发展和推广<sup>[3]</sup>。

岩屑床的存在给钻井施工带来诸多安全隐患,严重威胁安全钻进,主要体现在以下几个方面<sup>[4,5]</sup>:①岩屑床易导致钻具产生高摩阻高扭矩,甚至发生钻具扭断现象。中东DUKHAN油田平均每钻2口井至少扭断一次钻具。②岩屑床可导致机械钻速降低。由于岩屑床岩屑颗粒间排列结构疏松,易形成键槽造成托压,导致钻压不能全部作用于钻头上,同时使钻具上提下放阻力

增大,降低了钻进效率。③岩屑床易导致发生卡钻等事故,造成工程进度缓慢,钻井周期延长。④岩屑床也可导致测井工具入井难、下套管固井难、固井质量差等问题。DK304C 井 TLC 电测无法到底,下尾管到 2043.5 m 处固井发生粘卡尾管的原因就是由于岩屑床的黏滞作用。⑤由于在水平井段钻具不居中,岩屑被钻具反复碾压成更细的颗粒,增加了环空钻井液的固相含量,同时环空间隙减小,形成椭圆形井眼,易导致憋泵憋压。⑥岩屑床易使下部钻具产生泥包,导致憋钻。除此之外,如果在停泵前未充分循环钻井液,停泵后岩屑将下沉形成砂桥,造成砂堵,若继续钻进则会存在安全隐患。

因此,在充分认清水平井净化问题的基础上,需要结合水平井井身结构的特点全面研究和分析水平井环空岩屑运移规律及影响因素,该研究对合理设计钻井参数以及保证安全、优质、快速钻进有重要意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

#### (1) 液固两相流研究现状

液固两相流是指混合流体中液、固两相间存在动态相互作用的流动,主要特征是各相间存在大量质量交换和热量传递等。石油钻井工程中的环空岩屑运移问题属于液固两相流问题,循环钻井液的作用之一就是把钻进产生的岩屑及时从井底清除并携带出井口。但是由于钻井液中液固混合物的组成、结构等极具复杂性,导致诸如液固两相颗粒间的相互作用、液固边界条件等许多关键性问题还未形成统一标准,这些问题严重阻碍了液固两相流

研究的进展,已成为目前流体力学研究中最具有挑战性的前沿领域之一<sup>[6]</sup>。

从 20 世纪 40 年代末开始,国外学者开始进行岩屑运移的相关理论研究,主要是基于各种假设条件研究并建立了不同的液固两相流基本流动模型,各流型的特点简介如表 1—1 所示<sup>[7]</sup>。

表 1—1 液固两相流基本模型简介

| 类型     | 年代           | 模型       | 特点                           |
|--------|--------------|----------|------------------------------|
| 离散模型   | 20 世纪 40 年代末 | 单颗粒动力学模型 | 不考虑颗粒对流体的影响                  |
|        | 20 世纪 70 年代中 | 颗粒轨迹模型   | 考虑颗粒对流体的影响,考虑相间耦合,粗略考虑紊流扩散   |
| 连续介质模型 | 20 世纪 60 年代初 | 扩散模型     | 不考虑颗粒对流体的影响,相间相对运动等价于流体的扩散漂移 |
|        | 20 世纪 70 年代  | 单流体模型    | 部分考虑颗粒对流体的影响,不考虑相间相对运动       |
|        | 20 世纪 70 年代  | 多流体模型    | 全面考虑颗粒对流体的影响、相间相对运动及相间作用     |

在自然界和工程应用中液固两相流问题广泛存在,相应的研究方法也呈现多样化趋势,总体上可归纳为两种:宏观描述的连续介质方法和微观描述的动理方法。连续介质方法由物理学家欧拉提出的连续性假设,是进行宏观研究的一种方法,认为物质连续分布于所占空间,从液固两相流理论创立至今主要采用该方法进行相关研究;而基于微观单颗粒分析的动理学方法,不仅能精确描述单颗粒的微观信息,还可以统计平均颗粒运动的运动特性,从而建立颗粒相的连续介质守恒方程<sup>[8]</sup>。随着动理法在两相流研究中愈发成熟,在研究中也有一定的应用。

Wang 和 Ni (1991) 研究了液固两相在低浓度条件下的流动

特征<sup>[7]</sup>，根据动理学理论建立了形如两相流颗粒相一般形式的 Boltzmann 方程，如式 (1-1)：

$$\frac{\partial f}{\partial t} + U_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \frac{\partial (F_i f)}{\partial u_i} = \left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_c \quad (1-1)$$

式中：

$f=f(V_i, x_i, t)$ ——颗粒速度分布函数，是颗粒随机速度  $V_i$ 、空间坐标  $x_i$  以及时间  $t$  的函数；

$F_i$ ——单位质量颗粒所受的外力；

$\left( \frac{\partial f}{\partial t} \right)_c$ ——颗粒间碰撞对速度分布函数的影响。

## (2) 岩屑运移理论的发展现状

在过去几十年间，水平井技术得到大力推广，由于良好的井眼净化能力在保证安全钻进方面具有重要意义，因此水平井岩屑运移问题开始成为科研工作者研究的重点。国内外研究学者进行了大量关于水平井岩屑运移的相关实验以及基础理论研究工作，研究方法大致可分为两类：

①经验公式法。该方法通过量纲分析或半理论分析，在进行大量实验研究基础上对获得的实验数据进行关联，从而建立经验公式和半经验公式。此方法的最大弊端是研究结果只限于特定条件，不具有普遍应用性，但从宏观上对岩屑运移问题的定性研究有一定指导作用<sup>[9~12]</sup>。

②理论分析法。该方法根据物理学概念对岩屑颗粒进行力学分析，建立大量守恒方程式，然后作出各种假设对所建理论模型进行求解，最后根据计算结果分析钻井施工参数以及岩屑属性等因素对岩屑运移规律的影响<sup>[13~16]</sup>。

国外大多数学者普遍采用两层模型（固定岩屑床层和悬浮层）以及在此基础上发展的三层模型（固定岩屑床层、移动岩屑床层和悬浮层）描述环空岩屑不同的分布及运移规律，岩屑运移

分层模型示意图如图 1-1 所示。岩屑在环空中的分布状态主要由钻井液流动特征决定, Doron 等提出了根据固相和混合相的表观速度关系划分的流型图, 并在实验中验证了各流型之间的转变<sup>[17]</sup>。

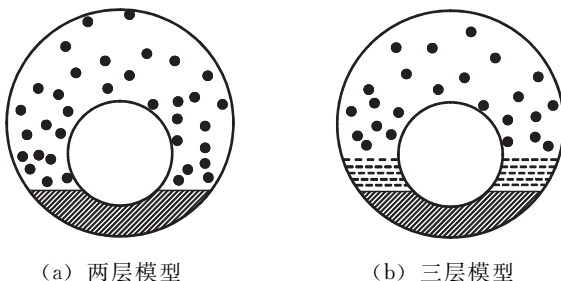


图 1-1 岩屑运移分层模型

在钻井液流速较大的情况下, 环空中的岩屑运移通常可以用两层模型来描述。Sobey 和 Gavignet 提出了一种描述大斜度井岩屑运移规律的两层模型<sup>[18]</sup>, 该模型假设岩屑沉积在井底并沿井底滑动, 上部为钻井液流动层, 根据液固两相的动量守恒建立描述岩屑床的运移数学模型, 重点分析了井斜角、钻井液黏度、钻杆偏心度、钻具尺寸、井眼尺寸、机械钻速和岩屑颗粒直径等因素对岩屑运移规律的影响。通过对比理论结果和实验结果得出以下结论: ①存在不形成岩屑床的钻井液临界返速; ②钻井液流速、钻杆偏心度、井斜角、钻具尺寸和井眼尺寸等参数对大斜度井岩屑的运移特征影响较大; ③由于在大斜度井段易形成岩屑床, 因此钻进时应尽量使用尺寸较大的钻杆, 减小环空面积以获取更大的钻井液返速, 进而提供更多的携岩能量。

随着钻井液流速增加, 两层模型不能描述岩屑在环空中的流动规律, 在该状态下固定岩屑床层中有一部分岩屑变成运动状态, 形成移动岩屑床, 这是与两层模型最大的差别。早期的研究

学者(如 Tomren 等)进行了该方面的相关理论研究<sup>[19]</sup>,证明环空中存在三层流动,包括固定岩屑床层、移动岩屑床层和悬浮层,同时 Ford J. T. 等通过实验研究也观察到在特定的钻井液流速范围内,环空内部的岩屑可呈现出不同的流动形式。

Doron 等根据钻井液-岩屑两相在水平井段和斜井段的质量守恒方程和动量守恒方程建立了描述岩屑运移规律的三层模型<sup>[20]</sup>,但是此模型未考虑环空流动、钻井液流变性以及岩屑滚动等因素,具有一定的局限性。

H. CHO 等人提出了一种用于计算大斜度井和水平井岩屑运移规律的方法<sup>[21]</sup>,该研究以提高岩屑运移效率为目的提出了如何合理设计钻井液排量,以及如何优化钻井液流变性的方法。该方法将整个井段分为三部分,然后对各井段分别采用不同的理论模型进行计算,水平井段(井斜角范围为  $60^{\circ}\sim 90^{\circ}$ )采用三层模型、大斜度井段(井斜角范围为  $30^{\circ}\sim 60^{\circ}$ )采用两层模型、近似垂直井段(井斜角范围为  $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ )采用直井岩屑运移模型。

除了钻井液返速及岩屑尺寸之外,钻杆旋转也对环空中岩屑运移起了重要作用,关于该问题的研究,国内外许多学者做过大量的实验研究<sup>[22,23]</sup>。Ozbayoglu 等通过实验研究认为:钻杆转速由 0 增至 40 r/min 时,岩屑床面积与环空总面积的比值由 49% 减至 25%,但转速增至 120 r/min 时,面积比值仅减小 20.5%,由此可以看出存在一个临界钻杆转速,超过此值后钻杆转速对环空岩屑运移的影响较小。Williams 和 Bruce 通过研究钻杆旋转对岩屑颗粒回收率的影响,得出如下结论:在钻杆旋转的情况下,岩屑的回收率较高,携岩效果好。Zeidler 通过研究发现:钻杆旋转可带动周围钻井液一起旋转,岩屑在离心力的作用下被携带至高速流动区,从而获取更大的动能,易运移出井口。Sifferman 研究了不同性能的钻井液对岩屑运移规律的影响,认为钻井液属于非牛顿流体,携岩能力随钻杆转速的增加而增加。

## 1.2.2 国内研究现状

影响岩屑运移规律最主要的因素是环空钻井液流动规律，从20世纪50年代开始国内许多学者先后开始研究牛顿流体在偏心环空中的流动问题；同时由于自重，钻杆在大斜度井及水平井环空中常呈偏心状态，至80年代研究重点逐步转向非牛顿流体在偏心环空的流动规律问题。此后逐步展开了大位移井及水平井井眼净化方面的研究<sup>[24~29]</sup>，其中代表性的成果如下。

1988年，岳湘安和陈家琅等基于流体基本运动方程，研究了幂律流体在偏心环空中轴向层流流场速度分布规律<sup>[30]</sup>，研究发现：幂律流体在偏心环空流动时速度分布不对称于环空几何中心，宽、窄间隙的速度最大值均偏向于钻杆。同年，刘希胜等推导了定向井幂律流体轴向定常层流流场分布公式、流量和压耗公式，然后利用定向井环空模拟装置测量模拟偏心环空层流流场和压耗，分析了流场的变化规律。以上研究为岩屑运移规律的研究工作提供了宝贵的理论支持。

1994年，王艳辉和罗平亚研究了水平井井眼岩屑床层移动的运动规律<sup>[31]</sup>，该研究以岩屑床层移运动的内在机理为切入点，根据岩屑颗粒微观运动的能量平衡和交换，建立了方程组得到了岩屑床层移动的本构关系、环空速度场分布、层移岩屑床厚度以及考虑层移床承压特点时环空摩擦特性的岩屑床流动阻力等。

1996年，汪海阁和刘希胜研究了水平井钻井液的携岩机理<sup>[32]</sup>，该研究主要通过石油大学钻井实验室的多功能环空模拟实验架的传感器获取实验数据，利用数据采集和分析系统研究了环空返速、岩屑粒径、钻杆偏心度、钻井液性能等对岩屑运移规律的影响；同时重点研究了水平井中岩屑颗粒的推移质运动和悬移质运动，并基于概率理论得出了岩屑各种运动形式间互相转化的概率。