◀专题论文▶

基于Fluent-EDEM耦合模型的取芯工具携岩规律*

杨柳青 刘 彬 姚坤鹏
（川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院）

杨柳青，刘彬，姚坤鹏. 基于Fluent-EDEM耦合模型的取芯工具携岩规律［J］. 石油机械，2025，53（10）：79-85，131.

Yang Liuqing，Liu Bin，Yao Kunpeng. Cuttings carrying behavior of coring tools based on Fluent-EDEM coupling model［J］. China Petroleum Machinery，2025，53（10）：79-85，131.

摘要：为提升超深井岩心取芯作业中岩屑的携带效率，围绕取芯工具在复杂工况下的携岩性能展开研究。综合考虑取芯工具规格、岩屑粒径、钻进速度、钻井液黏度及取芯工具外筒外环空间隙等关键参数，基于Fluent-EDEM耦合方法构建了多种规格取芯工具的三维数值模型，对岩屑在环空中的运动行为进行了仿真分析。研究结果表明：钻进速度对携岩效率影响显著，适当提高钻进速度可增强岩屑输送能力；在岩屑粒径较小时，提高钻井液黏度有利于提升携岩效率，但在粒径较大时该效应减弱；岩屑粒径增大会降低携带效率，但因单位时间生成岩屑数量减少，整体上对携岩亦可产生一定促进作用；增大外环空间隙可拓宽岩屑流通通道，有助于岩屑排出，但需权衡流速降低所带来的负面影响。研究结果明确了各参数对携岩效率的影响机制，并提出了取芯工具结构优化的方向和建议，可为后续超深井高效取芯提供参考。

关键词：取芯工具；携岩效率；岩屑粒度；钻进速度；钻井液黏度；Fluent-EDEM耦合模型
中图分类号：TE921 **文献标识码：**A DOI：10.12473/CPM.202505056

Cuttings Carrying Behavior of Coring Tools Based on Fluent-EDEM Coupling Model

Yang Liuqing Liu Bin Yao Kunpeng
（*CCDC Drilling & Production Technology Research Institute*）

Abstract: To improve cuttings carrying efficiency in coring operation of ultra-deep wells, the cuttings carrying performance of coring tools under complex conditions was studied. Considering the key parameters such as coring tool specification, cuttings size, rate of penetration, drilling fluid viscosity and annular clearance of coring tool outer barrel, a 3D numerical model of various specifications of coring tools was constructed based on the Fluent-EDEM method to simulate the movement behavior of cuttings in the annulus. The study results show that the rate of penetration has a significant effect on the cuttings carrying efficiency, and appropriately increasing the rate of penetration can enhance the cuttings transport capacity. When the cuttings size is small, increasing the drilling fluid viscosity is favorable for improving the cuttings carrying efficiency, but when the cuttings size is large, the effect is weakened. An increase in cuttings size would reduce the carrying efficiency, but due to a decrease in the number of cuttings generated per unit time, the cuttings carrying capacity is conversely promoted to some extent as a whole. Increasing the outer annular clearance can broaden the cuttings flow channel and contribute to the discharge

* 基金项目：中国石油天然气集团有限公司川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院项目“万米超深井取芯工具及钻头性能评价”（QZT-2cy-2024-J5-780）。

of cuttings, but the negative impact of reduced flow velocity needs to be balanced. The study results clarify the influence mechanism of various parameters on the cuttings carrying efficiency, put forward the direction and suggestions for the structural optimization of coring tools, and provide references for the subsequent efficient coring of ultra-deep wells.

Keywords: coring tool; cuttings carrying efficiency; cuttings size; rate of penetration; drilling fluid viscosity; Fluent-EDEM coupling model

0　引　言

随着油气资源勘探开发向深层和超深层延伸，岩心获取作为地质分析与储层评价的重要手段，其取芯质量直接影响后续的地质解释和工程决策。在超深井环境下，地层温压条件极端，钻井液性能变化显著，给取芯作业带来了诸多技术挑战。其中，岩屑的高效携带问题是影响取芯效率和岩心完整性的重要因素之一。传统取芯工具在深井作业中常面临岩屑堵塞、携带能力不足、环空流动不畅等问题，严重制约了深部地层取芯的作业质量与效率。因此，深入研究超深井工况下取芯工具的携岩机制，并针对关键影响参数进行定量分析与优化，具有重要的工程意义和应用价值。

为提高取芯效率与岩心质量，众多学者从取芯工具结构优化、保压保温功能增强、提高携岩效率等方面开展了深入研究。LU C. H. 等[1]设计了一种新型双管强制保真取芯工具，通过合理的结构设计和室内试验验证，显著提升了软弱破碎地层的岩心完整性。DENG Z. Q. 等[2]提出了具有挡环结构的取芯钻头，有效改善了行星探测中低取芯率的问题。WANG X. G. 等[3]研发了具备保压、隔热、密封功能的深井煤气层取芯工具，通过温度模拟试验实现了岩心在高温高压下的有效保存。GUO D. 等[4]设计了保压能力达 70 MPa 的 IPP 取芯系统，利用 CFD 模拟与现场试验验证了其在高压环境下的取芯能力。PENG J. L. 等[5]面向极端高温条件下的取芯难题，提出了 SCT 系统与热管理模块 TMS，有效提升了井下工具的运行时间与可靠性。

除了工具结构优化外，针对岩屑在井筒中的运移与携带问题也进行了大量研究。王志亮等[6]对悬浮式铝合金钻杆和新型脉冲射流钻杆进行对比分析，证明新型钻杆可显著提升岩屑搬运能力，改善井眼清洁度。赵佳乐等[7]提出复合旋流井眼净化结构，并基于 CFD-EDEM 耦合模拟分析了叶片数目、钻井液排量及粒径对携岩效率的影响，四叶片结构的效率提高近 30%。冯永存等[8]聚焦裂缝封堵过程中的颗粒运移规律，揭示了“桥堵”机制下封堵效率与颗粒参数之间的关系。郭亮等[9]研究了旋转导向工具环空掉块的流动规律，指出钻井液排量和密度的提升有助于掉块运移，降低卡钻风险。魏建平等[10]分析了磨料质量分数对水射流破岩效果的影响，发现优化质量分数比单纯提高射流压力更具经济性与效率。邵兵等[11-12]从非球体岩屑出发，分析了其在水平井和扩径段的沉积与运移特性，指出片状颗粒含量超过 10% 会显著降低携岩效果。王泽等[13]在深水环境下研究洋流对岩屑运移距离的影响。魏纳等[14]探讨了不同扩径结构在水合物层钻井过程中的携岩能力，认为圆弧扩径效果最佳，为特殊环境下的携岩优化提供了参考。

综上所述，当前针对取芯工具结构设计、保压隔热性能优化以及岩屑携带能力提升等方面的研究成果丰富，为深层及超深层井取芯提供了多样化技术支撑。然而，已有研究多聚焦于单一结构或特定工况下的性能优化，尚缺乏对多参数耦合作用下岩屑迁移机制的系统性分析。为此，笔者结合取芯工具类型、岩屑粒径、钻进速度、钻井液黏度以及工具环空结构等关键因素，构建 Fluent-EDEM 耦合模型，深入探讨多变量条件下岩屑搬运特性，旨在为超深井高效稳定取芯提供理论支撑与参数优化依据。

1　数值模拟

1.1　携岩理论方程

在模拟计算中，模型为瞬态计算，采用 k-ε 湍流模型，主相为钻井液，离散相为岩屑颗粒。控制方程[15]的连续性方程、动量方程为：

$$\frac{\partial(\varphi_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}})}{\partial t}+\nabla\cdot(\varphi_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}})=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\varphi_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}})}{\partial t}+\nabla\cdot(\varphi_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}})=-\nabla p+\nabla\cdot(\mu_{\mathrm{f}}\varphi_{\mathrm{f}}\nabla\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}})-\varphi_{\mathrm{f}}\rho_{\mathrm{f}}\boldsymbol{g}-S \tag{2}$$

式中：ρ_{f} 为钻井液密度，kg/m^3；t 为运动时间，s；$\boldsymbol{u}_{\mathrm{f}}$ 为流体速度，m/s；φ_{f} 为流体体积分数，无量纲；p 为钻井液压力，MPa；μ_{f} 为钻井液黏度，Pa·s；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，m/s^2；S 表示动量汇，Pa/m。

黏性系数方程为：

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\rho\boldsymbol{u}_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\eta_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial x_i}\right)-\rho\varepsilon \tag{3}$$

$$\rho\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}+\rho u_k\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}=\frac{\partial}{\partial x_k}\left[\left(\eta+\frac{\eta_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k}\right]+\frac{c_1\varepsilon}{k}\eta_t\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial \boldsymbol{u}_j}{\partial x_i}\right)-c_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中：ρ为流体（钻井液）密度，kg/m^3；k为湍流动能，m^2/s^2；$\boldsymbol{u}_i$、$\boldsymbol{u}_j$为流体不同方向运动速度，m/s；η为流体黏度，Pa·s；η_t为湍流黏度，Pa·s；ε为湍流功能耗散率，m^2/s^3；系数c_1、c_2和常数σ_k、σ_ε取值分别为1.44、1.92和1.0、1.3。

固体颗粒在空间坐标系中的运动主要由平动和转动2种运动方式构成，颗粒的运动可以看作两者的叠加。颗粒运动方程为：

$$\begin{cases} m_i\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{v}_i}{\mathrm{d}\tau}=\sum \boldsymbol{f}_i \\ I_i\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{\omega}_i}{\mathrm{d}\tau}=\sum \boldsymbol{T}_i \end{cases} \tag{5}$$

式中：m_i、$\boldsymbol{v}_i$、I_i、$\boldsymbol{\omega}_i$分别是颗粒i的质量（kg）、运动速度（m/s）、转动惯量（kg·m^2）和角速度（rad/s）；$\sum \boldsymbol{f}_i$是颗粒i所受的总作用力，N；$\sum \boldsymbol{T}_i$是颗粒间的碰撞对颗粒i产生的扭矩的总和，N·m；τ为作用时间，s。

当颗粒i同颗粒j发生碰撞时，作用在颗粒i上的扭矩可由下式计算：

$$\boldsymbol{T}_{ij}=\boldsymbol{R}_i\times\boldsymbol{f}_{ij,c} \tag{6}$$

式中：$\boldsymbol{R}_i$是由颗粒i的质心指向接触点的向量，m；$\boldsymbol{f}_{ij,c}$是颗粒i、j的接触力，N。

如果在同一时刻有k_i个颗粒与颗粒i接触，则颗粒i所受的总扭矩为$\sum_{i=1}^{k_i}\boldsymbol{T}_{ij}$。

1.2　数值模型建立以及参数设置

考虑到岩屑粒度、钻进速度和钻井液黏度这3个关键参数对取芯工具携岩能力的影响，建立了4种不同规格的取芯工具几何模型，如图1a所示，并对取芯工具工作过程中钻井液的携岩能力进行评估；图1b为ø172 mm取芯工具的流道简化三维模型，主要由环空入口和出口、流孔、中部流道和钻头流道组成；图1c和图1d为在EDEM中生成的岩屑颗粒模型。

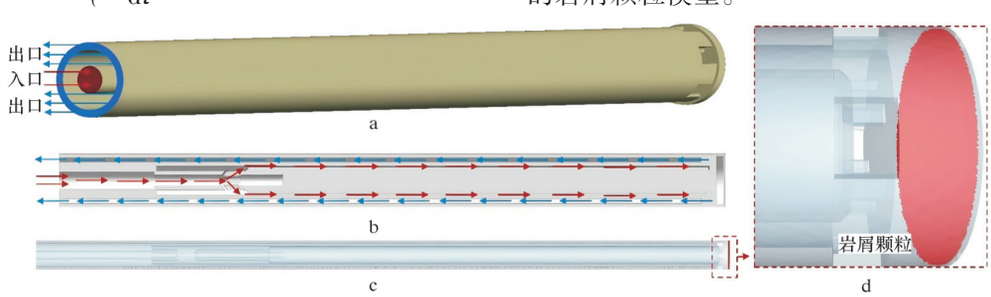


图1　取芯工具流道模型

Fig. 1　Flow channel model of coring tool

Fluent-EDEM耦合仿真方法需要先通过ANSYS软件对钻具的几何结构进行网格划分，然后将网格导入EDEM进行耦合分析。在EDEM中，设置了岩屑粒径、岩屑总质量以及岩屑颗粒之间的相互作用等参数，生成了指定数量的岩屑颗粒模型；在Fluent中设置了钻井液的黏度、密度、排量等参数。取芯工具的关键携岩参数如表1所示。

2　结果和分析

2.1　钻井液黏度对携岩效率的影响

在超深井取芯作业过程中，钻井液黏度是影岩屑运移能力的重要参数之一。这里针对4种不同的取芯工具（ø121、ø140、ø172、ø203 mm）进行携岩效率分析，研究钻井液黏度对携岩效率的影响。计算参数参见表1。

表1　取芯工具携岩参数

Table 1　Cuttings carrying parameters of coring tool

参数名称	参数值
取芯工具直径/mm	121、140、172、203
岩屑粒径/mm	1.5、2.0、2.5、3.0
钻进速度/(m·h^{-1})	0.8、2.1
钻井液黏度/(Pa·s)	0.020、0.075、0.100

图2~图5分别展示了ø121、ø140、ø172和ø203 mm取芯工具在不同钻井液黏度下的携岩效率。试验结果表明，钻进速度对携岩效率的影响显著：当钻进速度为0.8 m/h时，井底的剩余岩屑体积分数远低于2.1 m/h的情况。这是因为较高的

钻进速度会在单位时间内产生更多的岩屑颗粒，从而大幅增加钻井液的携岩难度。

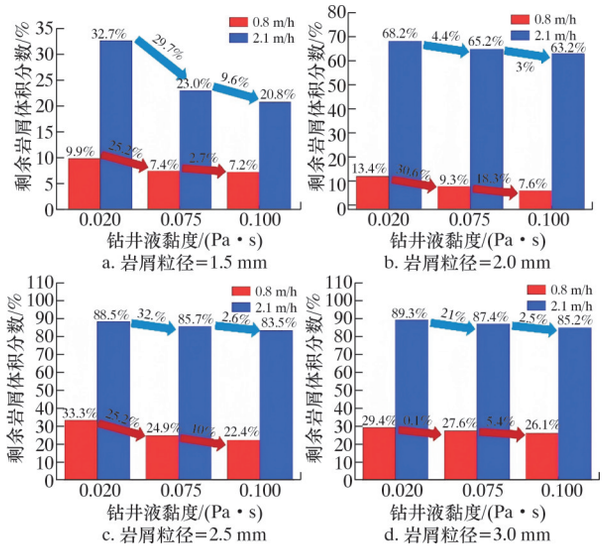


图 2　ø121 mm 取芯工具不同钻井液黏度下的携岩效率

Fig. 2　Cuttings carrying efficiency of ø121 mm coring tool at different viscosities

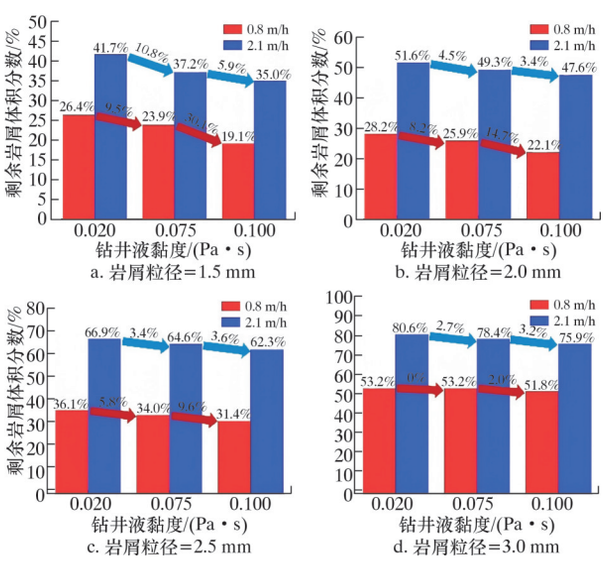


图 3　ø140 mm 取芯工具不同钻井液黏度下的携岩效率

Fig. 3　Cuttings carrying efficiency of ø140 mm coring tool at different viscosities

从整体趋势来看，提高钻井液黏度能够有效降低剩余岩屑体积分数，最大降幅可达 36%。这是由于较高的黏度可以增强钻井液对岩屑的悬浮能力，防止岩屑在井底或井壁沉积，从而更高效地将岩屑携带出井筒。然而，钻井液黏度对携岩效率的影响因岩屑粒径不同而存在差异。对于小粒径岩屑（如 1.5 mm），黏度增加对携岩效率的提升效果显著，剩余岩屑体积分数明显降低。对于大粒径岩屑（如 3.0 mm），黏度变化对携岩效率的影响较小。因为大粒径岩屑自重较大，难以通过

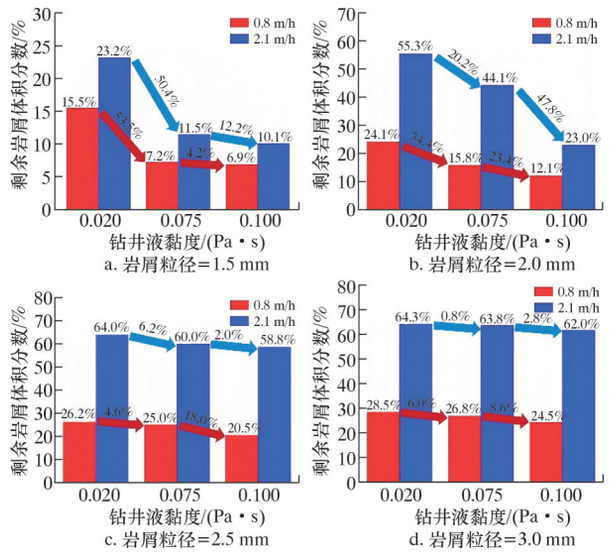


图 4　ø172 mm 取芯工具不同钻井液黏度下的携岩效率

Fig. 4　Cuttings carrying efficiency of ø172 mm coring tool at different viscosities

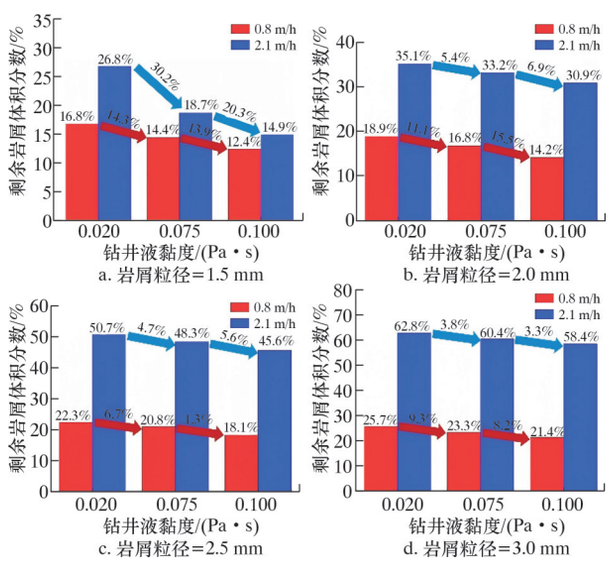


图 5　ø203 mm 取芯工具不同钻井液黏度下的携岩效率

Fig. 5　Cuttings carrying efficiency of ø203 mm coring tool at different viscosities

黏度调整实现有效悬浮。

计算结果表明，钻进速度和钻井液黏度对携岩效率的影响具有显著差异：钻进速度的影响更为关键，较高的速度（如 2.1 m/h）会大幅增加岩屑生成量，导致携岩难度上升；而较低速度（0.8 m/h）能有效减少井底岩屑堆积。钻井液黏度的优化对小粒径岩屑（1.5~2.0 mm）效果显著，黏度提高可降低剩余岩屑体积分数达 36%；但对大粒径岩屑（2.5~3.0 mm）作用有限，因其自重较大，难以通过黏度调整改善悬浮效果。因此，在实际钻井作业中，应优先控制钻进速度以减小携岩载荷，同时根据岩屑粒径分布调整钻井液黏度。

2.2　岩屑粒径对携岩效率的影响

岩屑粒径是影响取芯工具携岩能力的关键因素之一，直接关系到岩屑的悬浮、运移及沉积规律。取芯过程中，钻进产生的岩屑粒径通常受地层性质、钻头结构、钻井液性能及钻进参数等多重因素影响，不同粒径的岩屑在钻井液中的运移行为存在显著差异。这里计算了 ø121、ø140、ø172 和 ø203 mm 这 4 个不同的取芯工具在不同岩屑粒径下的携岩效率，结果如图 6~图 9 所示。

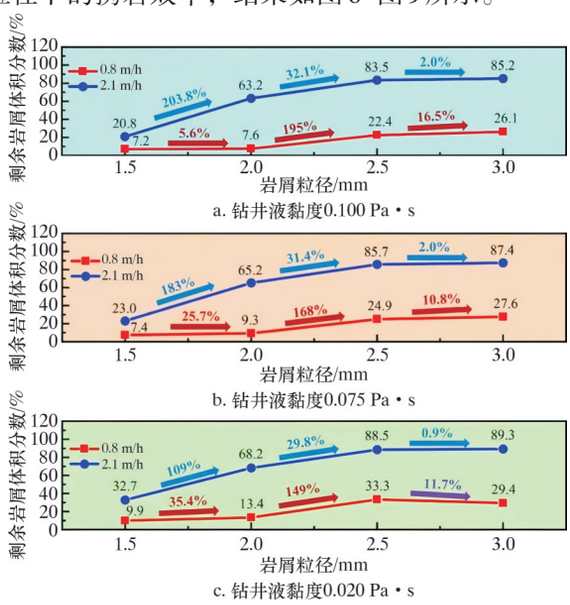


图 6　ø121 mm 取芯工具在不同岩屑粒径下的携岩效率

Fig. 6　Cuttings carrying efficiency of ø121 mm coring tool at different cuttings sizes

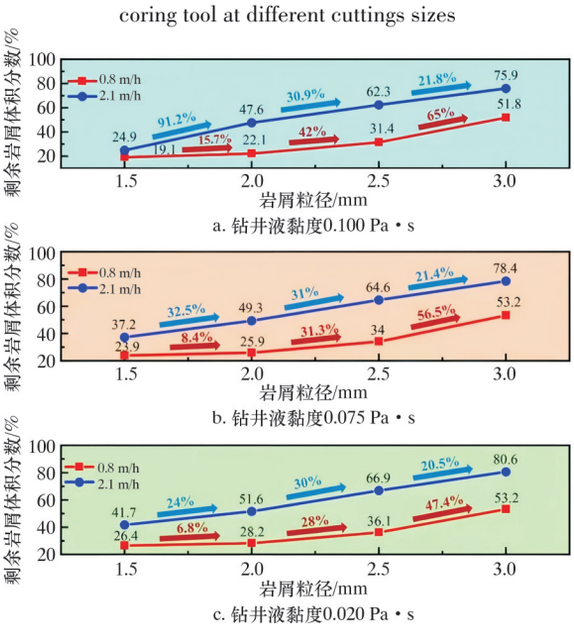


图 7　ø140 mm 取芯工具在不同岩屑粒径下的携岩效率

Fig. 7　Cuttings carrying efficiency of ø140 mm coring tool at different cuttings sizes

整体趋势表明，随着岩屑粒径增大，剩余岩屑体积分数上升，携岩效率降低，这是因为较小粒径

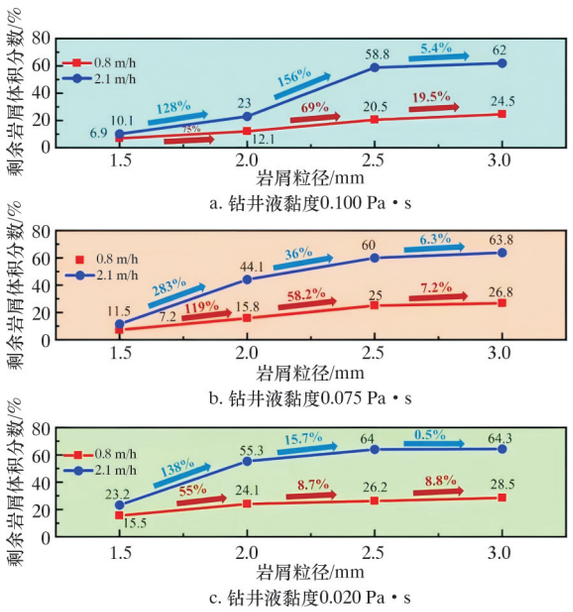


图 8　ø172 mm 取芯工具不同岩屑粒径携岩效率

Fig. 8　Cuttings carrying efficiency of ø172 mm coring tool at different cuttings sizes

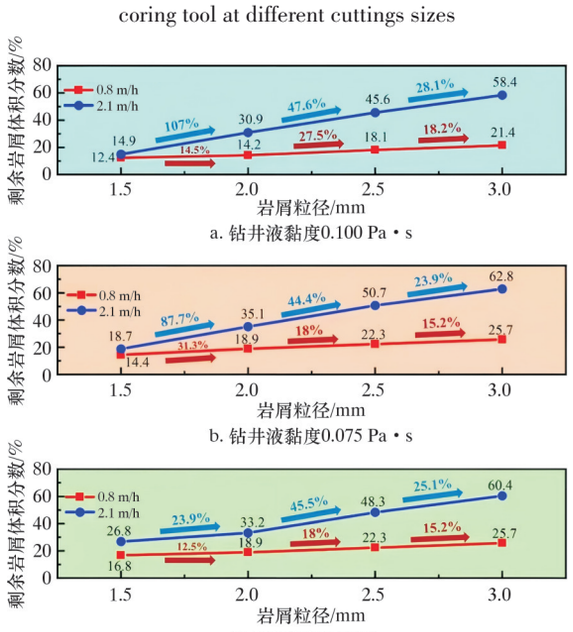


图 9　ø203 mm 取芯工具不同岩屑粒径携岩效率

Fig. 9　Cuttings carrying efficiency of ø203 mm coring tool at different cuttings sizes

的岩屑更容易随钻井液流动，从而提高携带效果。然而，在钻进速度 0. 8 m/h、钻井液黏度 0. 020 Pa·s 的特定工况下，当岩屑粒径从 2. 5 mm 增至 3. 0 mm 时，剩余岩屑体积分数反而下降 11. 7%（ø121 mm 取芯工具），携岩效率有所提升。这一现象的原因是，在单位时间岩屑总体积恒定的情况下，粒径增大会导致岩屑颗粒数量呈指数减少，从而降低了钻井液的携岩负荷，使得大颗粒反而更容易被有效携带。基于上述研究结论，建议在实际取芯作业中可以通过控制钻头结构、转速等参数使产生的岩屑颗

粒粒径尽量小，这样能避免出现岩屑堵塞的情况。

2.3　外环空间隙对携岩效率的影响

研究表明，取芯工具外环空间隙是影响携岩效率的关键因素之一。图 10~图 13 展示了 ø121、ø140、ø172 和 ø203 mm 这 4 种取芯工具在不同环空间隙下的携岩效率计算结果。图 10 显示，ø121 mm 取芯工具的外环空间隙从 4 mm 增加到 7 mm 时，剩余岩屑体积分数降低了 6.2%，这表明增大环空间隙能拓宽岩屑流动通道，从而提高携岩效率。图 11 表明，ø140 mm 取芯工具的外环空间隙从 6.00 mm 增加到 11.75 mm 时，剩余岩屑体积分数在间隙达到 8.00 mm 时降低了 12.1%，之后趋于稳定；说明对于 ø140 mm 取芯工具而言，8.00 mm 的环空间隙即可达到最佳携岩效率。图 12 和图 13 分别展示了 ø172 mm 和 ø203 mm 取芯工具的测试结果。这两款工具的剩余岩屑体积分数均呈现先升高后降低的趋势。具体来看，ø172 mm 取芯工具在 15.2 mm 间隙时剩余岩屑体积分数最大，携岩效率最差；而在 10.2 mm 间隙时携岩效率最佳。ø203 mm 取芯工具则在 13.15 mm 间隙时携岩效率最差，在 19.15 mm 时携岩效率最高。这些结果表明，适当增大环空间隙可以拓宽岩屑流动通道，有利于岩屑排出；但过大的间隙会降低钻井液流速，反而会对携岩效率产生不利影响。

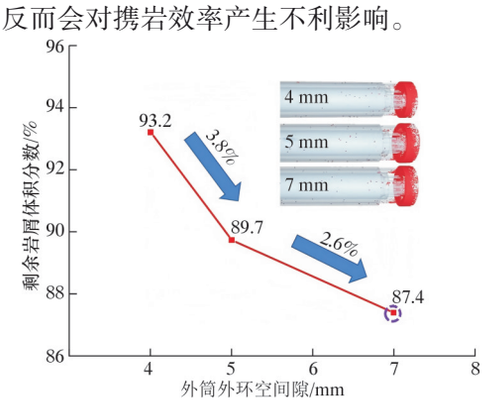


图 10　ø121 mm 取芯工具外环空间隙对携岩效率的影响

Fig. 10　Influence of annular clearance of ø121 mm coring tool on cuttings carrying efficiency

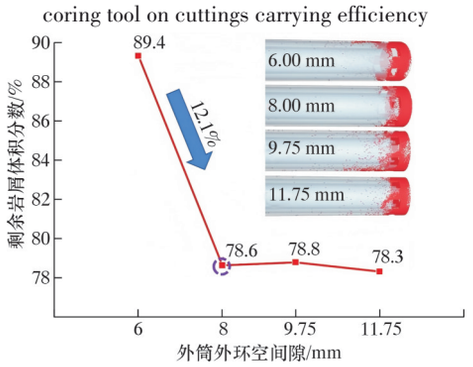


图 11　ø140 mm 取芯工具外环空间隙对携岩效率的影响

Fig. 11　Influence of annular clearance of ø140 mm coring tool on cuttings carrying efficiency

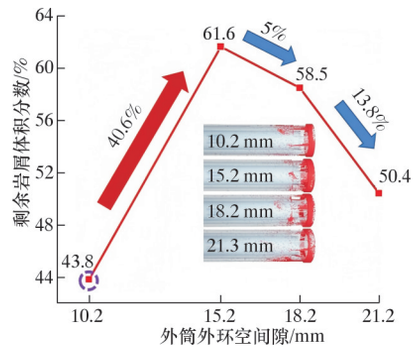


图 12　ø172 mm 取芯工具外环空间隙对携岩效率的影响

Fig. 12　Influence of annular clearance of ø172 mm coring tool on cuttings carrying efficiency

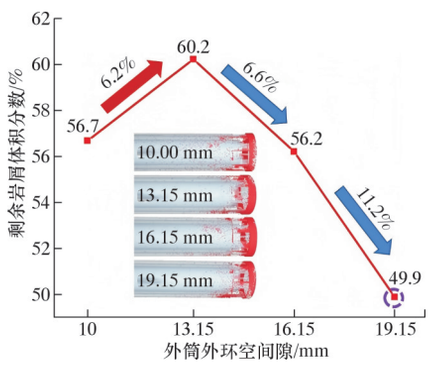


图 13　ø203 mm 取芯工具外环空间隙对携岩效率的影响

Fig. 13　Influence of annular clearance of ø203 mm coring tool on cuttings carrying efficiency

3　现场取芯验证

为了验证有限元分析的准确性，选取 ø172 mm 取芯工具针对提探 XX1 井、资 XX9 井等 4 口井进行数据收集，分别从黏度、粒径、环空 3 个维度对携岩效率进行统计，结果如表 2 所示。

表 2　携岩试验数据

Table 2　Cuttings carrying experimental data

序号	井号	井眼直径/mm	钻井液漏斗黏度/s	岩屑粒径/mm	钻头类型	排量/(L·s^{-1})
1	提探 XX1 井	323.8	48	2.0~3.5	PDC	22~25
2	资 XX9 井	215.9	48	2.0~3.5	PDC	22~25
3	资 XX8 井	215.9	60	2.0~3.5	PDC	22~25
4	镇探 XX3 井	215.9	61	1.0~2.0	金刚石	22~25

根据统计：提探 XX1 井与资 XX9 井相比，环空尺寸增加了 275%，在相同的钻井参数条件下，提探 XX1 井携岩效率远低于资 XX9 井，出现了岩屑沉积堵心的情况，收获率不到 51%；资 XX9 井和资 XX8 井钻井参数基本一致，钻井液漏斗黏度相差 12 s，整体携岩效率相差不大，钻进扭矩基本相同，岩心收获率均在 90% 以上；资 XX8 井和镇探 XX3 井分别采用 PDC 和天然金刚石取芯钻头，

由于破岩方式不同，产生的岩屑粒径相差 1 mm 以上，实际取芯钻进过程中，由于大颗粒岩屑携岩效率问题，资 XX8 井出现了不同程度的钻具憋扭情况。上述 4 口井的实际应用分析，进一步验证了模拟分析结果与现场应用情况基本一致，能为现场取芯参数的优化提供一定的借鉴。

4　结　论

（1）对比钻进速度为 2.1 m/h，钻进速度为 0.8 m/h 的携岩效率具有显著的提升。主要原因是较低的钻进速度在单位时间内会生成较少的岩屑体积，需要带出的岩屑量减少。

（2）提高钻井液黏度可有效增强岩屑悬浮能力，钻井液黏度对小粒径岩屑的携岩效果改善显著，最大可提升 36% 的携岩效率。但是岩屑粒径增大后，钻井液黏度对携岩效率的影响会变小。

（3）岩屑粒径与携岩效率呈现非线性关系。总体上，较小粒径岩屑更易被携带，但在特定工况（0.8 m/h，0.02 Pa·s）下，当粒径从 2.5 mm 增至 3.0 mm 时，由于粒径增大会导致颗粒数量减少，携岩效率反而出现较小的提升。

（4）外环空间隙存在最优设计值。适当增大间隙可改善携岩效果，但过大会降低钻井液流速。ø121、ø140、ø172 和 ø203 mm 取芯工具的最佳环空间隙分别为 7.00、8.00、10.20 和 19.15 mm。

参　考　文　献

[1] LU C H, ZHANG T, FAN J X. Truth-preserving coring tool for broken and soft mineral stratum [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2011, 2: 109-115.

[2] DENG Z Q, TIAN Y, TANG D W, et al. A new planetary exploration coring bit design and its performance tests research [C]//2013 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Yinchuan, China: IEEE, 2013: 252-257.

[3] WANG X G, ZOU D Y. Research on thermal insulation technology of coal bed methane coring tool [J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2020, 29 (12): 10707-10711.

[4] GUO D, XIE H P, GAO M Z, et al. In-situ pressure-preserved coring for deep oil and gas exploration: design scheme for a coring tool and research on the in-situ pressure-preserving mechanism [J]. Energy, 2024, 286: 129519.

[5] PENG J L, TIAN Z B, DENG C, et al. Durable and reliable thermal management system with superior temperature uniformity for sidewall coring tool in extreme thermal environments [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 51: 102635.

[6] 王志亮，陈锟，张震，等. 新型钻杆的携岩原理研究与数值仿真分析 [J]. 工程设计学报，2021，28 (5)：602-614.
WANG Z L, CHEN K, ZHANG Z, et al. Study on cuttings carrying principle and numerical simulation analysis of new drill pipe [J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28 (5): 602-614.

[7] 赵佳乐，任连城，王圣林，等. 旋流井眼净化工具携岩性能影响因素研究 [J]. 重庆科技学院学报（自然科学版），2021，23 (5)：64-69.
ZHAO J L, REN L C, WANG S L, et al. Research on influencing factors of rock carrying performance of swirl wellbore purification tool [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2021, 23 (5): 64-69.

[8] 冯永存，马成云，楚明明，等. 刚性颗粒封堵裂缝地层漏失机制数值模拟 [J]. 天然气工业，2021，41 (7)：93-100.
FENG Y C, MA C Y, CHU M M, et al. Numerical simulation on the mechanism for rigid particle plugging of leakage in fracture formations [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41 (7): 93-100.

[9] 郭亮，肖杰，尹虎，等. 旋转导向工具环空掉块运移规律数值模拟 [J]. 石油机械，2022，50 (12)：1-9.
GUO L, XIAO J, YIN H, et al. Numerical simulation for the migration law of falling blocks in the annulus of rotary steerable tool [J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50 (12): 1-9.

[10] 魏建平，王梦园，杨恒，等. 磨料质量分数对预混合磨料水射流破岩效果的影响 [J]. 煤炭学报，2023，48 (1)：251-262.
WEI J P, WANG M Y, YANG H, et al. Influence of abrasive mass fraction on the effect of premixed abrasive water jets on rock breaking [J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48 (1): 251-262.

[11] 邵兵，闫怡飞，毕朝峰，等. 基于计算流体力学与离散单元法并行计算的煤层气井大粒径岩屑运动规律初探 [J]. 科学技术与工程，2017，17 (15)：42-47.
SHAO B, YAN Y F, BI Z F, et al. Primary research on movement of big-size cuttings in coal-bed methane wells by parallel computing using coupled CFD-DEM [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (15): 42-47.

[12] 邵兵，闫怡飞，毕朝峰，等. 基于CFD-DEM耦合模型的大粒径非常规岩屑颗粒运移规律研究 [J]. 科学技术与工程，2017，17 (27)：190-195.
SHAO B, YAN Y F, BI Z F, et al. Migration of irregular cuttings particles in big size by CFD-DEM coupled simulation model [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17 (27): 190-195.

（下转第 131 页）