

高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩研究

王文蔚¹, 蔡 灿^{1,2,3*}, 曹文洋⁴

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川 成都 610500; 2. 油气装备教育部重点实验室, 四川 成都 610500; 3. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 4. 宝鸡石油机械有限责任公司, 陕西 宝鸡 721000)

摘要: 高压水射流在对井底进行清理的同时可显著提高钻进速度, 使钻井效率得到大幅提高。然而当前高压水射流与PDC钻头联合破岩的研究主要集中于以PDC齿为基本切削单元进行分析, 无法完整反映高压水射流对整个PDC钻头工作时的影响。因此本文以PDC钻头单刀翼整体作为基本切削单元, 并基于SPH-FEM(Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Method)方法建立了高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩数值模型, 通过切削力和射流破碎坑尺寸验证了模型的可靠性, 模型与实验误差仅为9.29%。此外, 基于该数值模型, 通过切削力、岩石应力场、岩石应变场和井底流场对高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩机理进行了分析。该方法基本能够反映高压水射流对整个PDC钻头的影响, 验证了高压水射流对PDC钻头破岩与携岩能力的增强。

关键词: 高压水射流; PDC单刀翼; 联合破岩; SPH-FEM; 数值模型

中图分类号: TE921; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0077-08

Study on combined rock-breaking and rock carrying by high-pressure water jet and PDC single blade

WANG Wenwei¹, CAI Can^{1,2,3*}, CAO Wenyang⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China; 2. Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Ministry of Education, Chengdu Sichuan 610500, China; 3. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu Sichuan 610500, China; 4. Baoji Oilfield Machinery Co., Ltd, Baoji Shaanxi 721000, China)

Abstract: High-pressure water jet can not only clean the bottom of wells but also significantly enhance the drilling speed, thus substantially improving the drilling efficiency. At present, however, the research on the combined rock-breaking of high-pressure water jet and PDC (Polycrystalline Diamond Compact) bits mainly centers on analyzing with PDC cutters as the basic cutting unit. This approach fails to comprehensively reflect the impact of high-pressure water jet on operation of the overall PDC bit. Therefore, in this study, the entire PDC single blade is regarded as the basic cutting unit. A numerical model for the combined rock-breaking of high-pressure water jet and PDC single blade is established using the SPH-FEM (Smooth Particle Hydrodynamics-Finite Element Method). The reliability of the model was verified by the cutting force and the size of the water jet fracture pit, and the error between the model and the experiment was only 9.29%. Furthermore, based on this numerical model, the rock-breaking and rock-carrying mechanism of the high-pressure water jet and PDC single blade was analyzed through cutting force, rock stress field,

收稿日期: 2025-09-02; **修回日期:** 2025-09-23 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2025.S1.012

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“深井高压气体射流辅助钻井破岩机理及携岩特性研究”(编号:42472383); 四川省科技教育联合基金面上项目(编号:25LHJJ0072); 四川省科技计划项目(编号:21MZGC0089); 中国博士后第67批面上基金(编号:2020M673285); 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放基金“高压CO₂射流-非平面齿复合破岩机理及喷嘴布置设计研究”(编号:PLN2022-37)

第一作者: 王文蔚, 男, 汉族, 1999年生, 博士研究生, 机械工程专业, 研究方向为智能钻井装备技术, 四川省成都市新都区新都街道新都大道8号, 15108380201@163.com。

通信作者: 蔡灿, 男, 汉族, 1988年生, 副研究员, 博士生导师, 石油矿场机械专业, 博士, 研究方向为智能射流装备研发、射流破岩及喷射钻井装备技术、高压CO₂射流理论及钻完井应用技术等, 四川省成都市新都区新都街道新都大道8号, cainia10@163.com。

引用格式: 王文蔚, 蔡灿, 曹文洋. 高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 77-84.

WANG Wenwei, CAI Can, CAO Wenyang. Study on combined rock-breaking and rock carrying by high-pressure water jet and PDC single blade[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 77-84.

rock strain field and bottom hole flow field. This method can basically reflect the influence of high-pressure water jet on the entire PDC bit, and verify the enhancement of the rock-breaking and rock-carrying capacity of the PDC bit by high-pressure water jet.

Key words: high-pressure water jet; PDC single blade; combined rock breaking; SPH-FEM; numerical model

0 引言

当前,高压水射流可有效提高机械工具的钻速,降低切削齿的温升,延长刀具寿命,实现钻井提速的效果^[1],因此多位学者对其进行了大量的研究,并且相关成果在实际应用中取得了显著的效果^[2-3]。

张文华等^[4]建立了高压水射流-机械齿联合破岩数值模型,对高压水射流辅助机械破岩过程进行了研究,结果表明联合破岩的破岩效率约为高压水射流和机械齿分别破岩之和的2倍。对于高压水射流的数值模拟,SPH方法受到了广泛的应用^[5-7]。该方法通过建立粒子水射流冲击岩石的动力学模型,得到了“损伤-累积损伤-破坏-累积损伤-破坏”的岩石破碎过程^[8]。CFD(Computational Fluid Dynamics)和DEM(discrete element method)在模拟钻井过程的研究中也得到了较为广泛的应用。罗金武等^[9]以岩屑滞留比作为携岩指标,采用CFD-DEM耦合方法对PDC钻头井底携岩特性进行了研究,得到了PDC钻头最优水力结构。但该研究将岩屑简化为球形,导致与真实钻井情况有些许出入。杨显鹏等^[10]根据真实岩屑模型反演得出其3D模型特征,开展了基于真实岩屑模型的高压CO₂射流辅助携岩研究,证实了球形与真实岩屑在携岩过程中的差异,进一步优化了PDC钻头水力结构参数。

上述研究主要以PDC齿为基本切削单元进行分析,然而以PDC齿作为切削最小单元无法反映高压水射流对整个钻头的联合增强作用,目前国内外也尚未开展过高压水射流对单刀翼整体破岩影响的相关研究。因此,本文针对上述研究空白,开展了高压水射流-PDC单刀翼联合破岩实验和数值模拟研究,基于SPH-FEM(Smoothed Particle Hydrodynamics-Finite Element Method)方法建立了高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩数值模型,并以此分析高压水射流-PDC单刀翼联合破岩机理。上述研究有助于进一步理解高压水射流辅助PDC钻头提速机理,同时可为PDC钻头水力优化提供一定的理论指导。

1 高压水射流-PDC单刀翼联合破岩携岩数值模型

1.1 高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩模型理论

高压水射流可有效降低其打击区域周围PDC齿的切削力,清理齿前岩屑和缓解PDC齿温升。然而,考虑成本原因实验无法具体研究联合破岩的总体参数,且实验无法从应力、应变等方面进一步研究高压水射流增强破岩机理。因此本文基于SPH-FEM方法对高压水射流-PDC单刀翼联合破岩过程进行研究,SPH模拟高压、高速状态下的水射流,岩石则采用FEM模型,从岩石应力场、切削力、应变等多个方面对联合破岩机理进行分析,以实现高压水射流辅助PDC单刀翼破岩技术提供理论支持。

SPH法使用随机分布插值点的核近似方法,通过对相邻粒子的值进行积分或求和来计算每一个粒子的属性。通过罚分法实现SPH和FEM的耦合^[11],因此其接触通过关键字ERODING_NODE_TO_SURFACE进行设置。罚分法的原理类似于在SPH粒子和FEM面之间放置一个弹簧,以便限制SPH粒子的穿透深度,因此在每个时间点都会判断粒子是否穿透有限元模型表面,并根据穿透深度在SPH粒子和FEM表面之间设置一个表面接触力,模拟SPH粒子对FEM所施加的外力。

1.2 高压水射流-PDC单刀翼联合破岩数值建模

首先建立如图1所示的SPH-FEM耦合数值模型。岩石模型和PDC单刀翼模型采用FEM方法建模,高压水射流采用SPH方法建模。同时,为了简化模型提高计算效率,将岩石模型由实验的方形简化成了圆筒形(半径55 mm,壁厚8 mm),并且仅考虑其中一半。建立相应模型后,分别对其进行网格划分,其中PDC单刀翼由于是刚体模型故采用四面体网格划分,岩石模型和射流模型采用六面体网格划分,并对井底岩石网格进行加密以提高计算精度,加密后的网格单元尺寸为0.5 mm×0.5 mm,划分完成后所有模型网格总数为630000±20000。

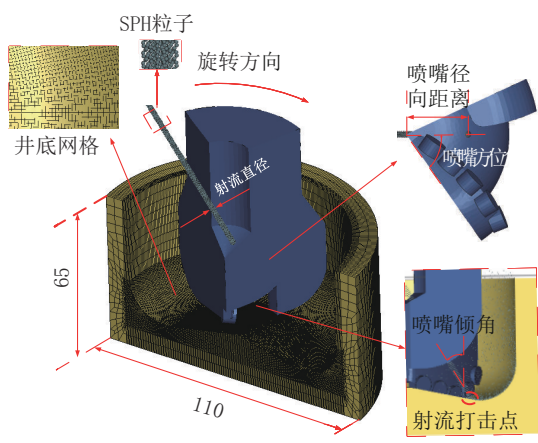


图1 高压水射流—PDC单刀翼联合破岩数值模型

本次数值模拟总共分为3个过程:压入过程、切削过程和联合破岩过程,首先PDC单刀翼向下运动吃入岩石一定深度,然后以固定转速旋转切削岩石,最后给予高压水射流一定初速度,使其与PDC单刀翼共同完成联合破岩过程。在模拟过程中,PDC单刀翼旋转速度与实验刀翼转速保持一致,设置为0.1 rad/s。

由于实验采用的岩样为砂岩,故岩石模型采用关键字MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE (HJC模型),该模型材料主要采用拉应力破坏、拉伸应变破坏和剪切应变破坏三种破坏标准适用于模拟岩石中的损伤和裂缝生成,同时可以较好地描述岩石在高速冲击以及侵彻下的力学行为^[6,12]。砂岩模型参数及定义如表1所示。

岩石的归一化等效应力为:

$$\sigma^* = \frac{\sigma}{f_c} = [A(1-D) + BP^{*N}][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)] \quad (1)$$

式中: σ ——实际等效应力; f_c ——岩石准静态单轴抗压强度; P^* ——归一化静水压力; $\dot{\epsilon}^*$ ——无因次应变率; D ——岩石的损伤系数,由等效塑性应变和塑性体积应变累积而成,其公式为:

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (2)$$

式中: $\Delta \epsilon_p$ ——等效塑性应变; $\Delta \mu_p$ ——塑性体积应变; D_1, D_2 ——材料常数; T^* ——归一化最大静水拉应力。

水射流模型由于存在大变形和高压等问题,故采用SPH方法来对其进行模拟,分别采用关键字MAT_NULL和EOS_GRUNEISEN定义其材料模型和状态方程。接触设置需对刀翼-岩石、射流-刀

表1 砂岩模型参数

序号	参数项	参数值
1	密度 ρ_t /(g/mm ³)	2.3×10^{-3}
2	剪切模量 G /MPa	1.189×10^4
3	归一化内聚强度 A	0.32
4	归一化压力硬化 B	1.76
5	应变率系数 C	0.0127
6	压力硬化指数 N	0.79
7	单轴抗压强度 f_c /MPa	32.5
8	最大静水拉应力 T /MPa	2.35
9	准静态临界应变率 ϵ_0/s^{-1}	1
10	断裂塑性应变 EF_{min}	0.00465
11	归一化最大强度 SF_{max}	0.07
12	破碎压力 P_{crush} /MPa	26.3
13	破碎体应变 μ_{crush}	0.00167
14	锁定压力 P_{lock} /MPa	800
15	锁定体应变 μ_{lock}	0.00167
16	损伤常数 D_1	0.013
17	损伤常数 D_2	1
18	压力常数 K_1 /MPa	8.1×10^4
19	压力常数 K_2 /MPa	-9.1×10^4
20	压力常数 K_3 /MPa	8.9×10^4
21	失效类型 F_s	0.8

翼和射流-岩石之间的接触分别进行设置。由于刀翼为刚体,因此射流于刀翼之间的接触设置为点面接触设置。为了实现岩石在模拟中的破碎效果,将刀翼和射流对岩石的接触设置为侵蚀表面-表面接触和侵蚀节点-表面接触。在边界条件方面,参照实验条件利用SPC_SET关键字对岩石进行固定和约束,同时将岩石除上表面外的其他表面设置为非反射边界,以模拟真实地层中的切削情况。

在数值模拟中,对射流初始条件的设置并非直接添加射流压力条件,而是需要先将射流压力转化为射流速度,再对水射流的初始条件进行设置。为此需要测量出不同泵压下所对应的射流速度,本次研究中通过测量射流连续喷射一段时间后水箱中的液位变化来间接计算喷嘴出口处的射流流速,得到多组泵压条件下喷嘴出口处的射流流速,汇总后如表2所示。

对上表所得的数据进行拟合可得射流压力与射流速度对应关系计算式: $y=3.325x+72.432$,拟合直线如图2所示。

表2 不同泵压下的喷嘴出口流速

射流压力/MPa	射流速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
10	105.35
20	141.24
30	170.17
40	203.86
50	240.29

1.3 高压水射流-PDC单刀翼联合破岩数值模型验证

完成数值模型的建模后,还需要对其可靠性进行验证。本次实验通过对课题组自主研发的高压射流-PDC齿联合破岩实验平台进行改进,实现高压射流-刀翼联合破岩功能,并分别通过切削力和破碎坑形貌两方面对数值模型进行验证。

1.3.1 实验设备概述

该实验系统主要包括增压系统、联合破岩实验

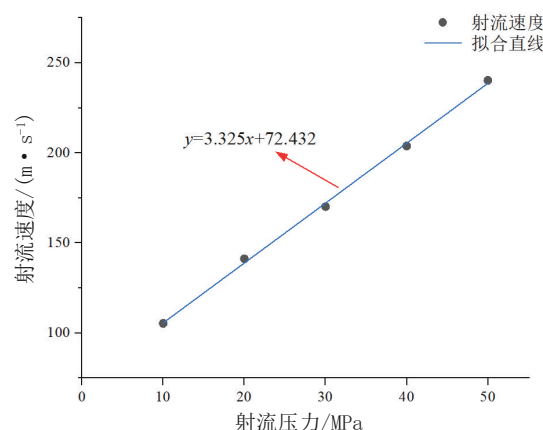


图2 射流压力-射流速度拟合直线图

平台、控制和数据采集系统,最高可将流体增压至60 MPa,同时控制系统可精确控制岩石架的升降以及切削速度,整套实验系统示意图如图3所示。

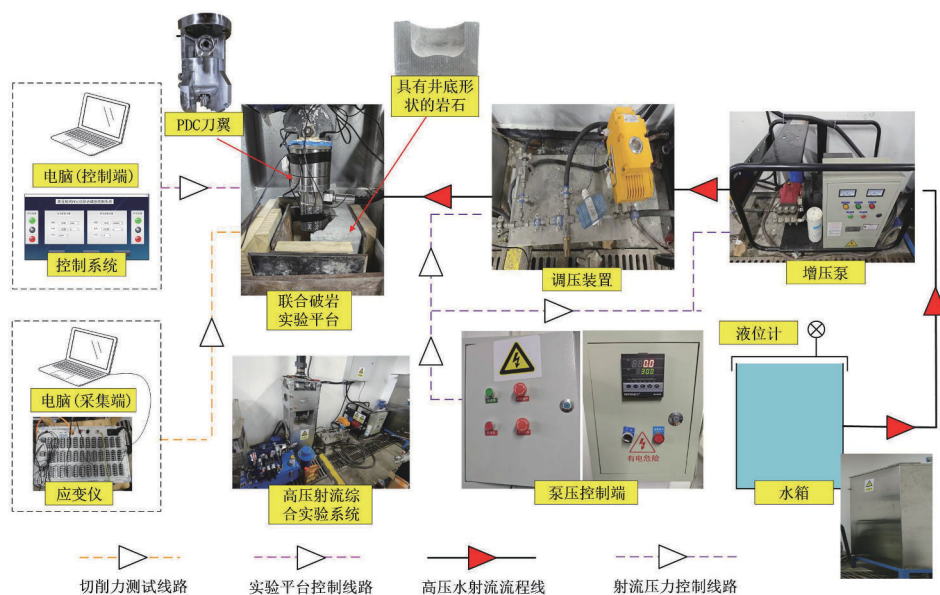


图3 高压射流综合实验系统

1.3.2 实验与模型验证方案

基于上述的联合破岩实验系统,本文开展了高压水射流-PDC单刀翼联合破岩实验,在实际钻井过程中,切削力是直接反映切削齿与岩石关系的评价指标。实验所采用的测试手段是在PDC齿上粘贴应变片,通过测量应变片的应变,将其转换成切削力。应变片粘贴示意图如图4所示,应变片沿PDC齿轴线方向粘贴,因此在实验过程中,只能测

得沿PDC齿轴线方向上的合力。需要对该合力进行分解以得到切向力 F_t 和轴向力 F_n 。

由于应变片布线槽的存在,实验采用的PDC单刀翼仅在内锥区、鼻部区和外锥区3个区域布置了3个PDC齿。在本次数值模拟中,应变片布线槽处布置有两个PDC齿,即PDC单刀翼沿内锥区、鼻部区和外锥区分别布有5个齿,若将5个PDC齿设置为单独的部件,在添加SPH粒子后单个模型计算时间

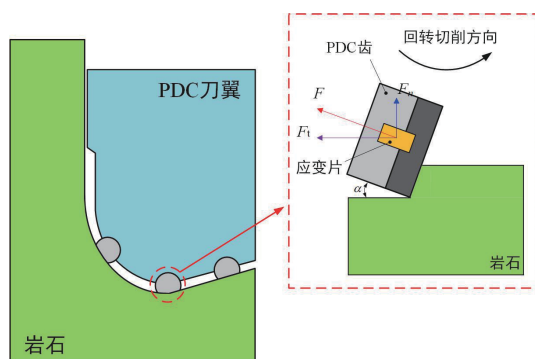


图4 PDC单刀翼破岩过程中的切削力测量

将会呈指数级增长。同时,本次模拟着重于研究高压水射流对PDC单刀翼整体的影响,因此将上述5个PDC齿设置为了同一个部件。在数值模拟过程中,主要分析PDC单刀翼的总切削力,在验证模型时,通过将数值模型中应变片布线槽处的两个齿移除,以便使数值模型和实验的PDC单刀翼保持一致,并在相同条件下对比无射流切削时的平均切削力大小。

1.3.3 模型验证结果

图5为相同条件下的切削实验和数值模拟切向力对比,其中实验所得的平均切向力为288.29 N,数值模拟得到的平均切向力为261.5 N,误差为9.29%,此处误差主要是由于钻头在切削过程中切削力频繁出现较大波动,因此最终实验与模型的平均切削力存在一定误差。此外,实验采用的是将应变片贴在PDC齿上进行检测,由于PDC齿的刚度和弹性模量极高,会导致切削力传递至应变片时会被部分吸收或衰减,这导致了测量到的切向力曲线波动有所减弱,也更加平滑。而数值模拟过程中的切向力曲线波动十分明显,可以显著观察到切削齿在破岩过程中岩石的破坏过程,有助于进一步分析高压水射流增强PDC单刀翼破岩机理。

除了切削齿对岩石的破坏以外,高压水射流在联合破岩过程中也起到了重要的作用,因此同样需要单独对水射流破岩过程进行验证。由于实验过程中无法直接测出射流打击点处的岩石受力,因此从射流破碎坑深度和宽度两方面来对射流破岩过程进行验证。如图6所示,射流压力为40 MPa,喷嘴直径为2 mm,喷嘴倾角为0°时,高压水射流所形成的破碎坑宽度为4.5 mm,深度为6.7 mm。由实验可知,相同条件下实验得到的破碎坑宽度和深度

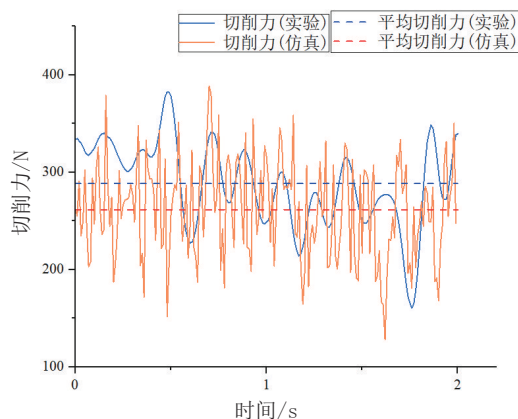


图5 实验与数值模拟平均切削力大小对比

分别为5 mm和7.4 mm,误差分别为10%和9.5%。因此该数值模型总体可靠性较高,可用于开展进一步分析。

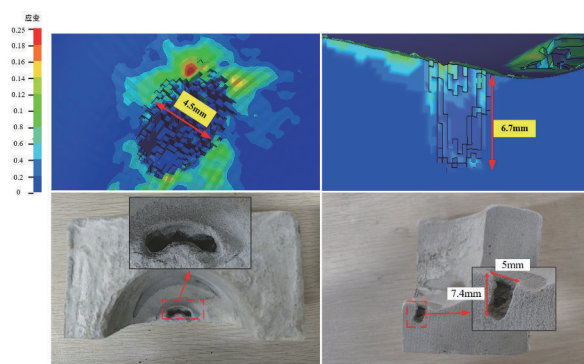


图6 高压水射流破碎坑尺寸补充对照

2 高压水射流—PDC单刀翼联合破岩与携岩特性模拟分析

联合破岩过程中,水射流对PDC单刀翼的增强机理较为复杂,涉及到多个方面,本文从切削力、岩石应力场、岩石应变场和井底流场等方面对联合破岩机理进行分析。

2.1 联合破岩切削力分析

切削力可以直接反映出切削齿与岩石相互作用关系,如图7所示为单刀翼切削破岩与联合破岩切削力对比图。首先,从切削力局部放大图可分析出PDC单刀翼的切削破岩过程主要分为:挤压阶段、小规模破碎阶段和大规模破碎阶段。图中黄色线段部分(AB段)为挤压阶段,此阶段从PDC齿刚接触岩石至岩石刚好产生小规模破碎,切削力呈上升状态直至顶点,此时齿刃处的岩石产生裂纹形成

了小碎块,因此切削力会沿着红色线段部分(BC段)产生小幅下降。由于此时岩石尚未产生大规模破碎,在BC段形成的小碎块会被PDC齿进一步粉碎形成压实核,对其后方的岩石继续产生挤压作用,因此切削力下降至C点后会上升(CD段),这段时间岩石裂纹发展更加充分,当切削力上升至D点时,岩石产生大规模破碎,导致切削力大幅降低(DE段),完成一次切削过程。

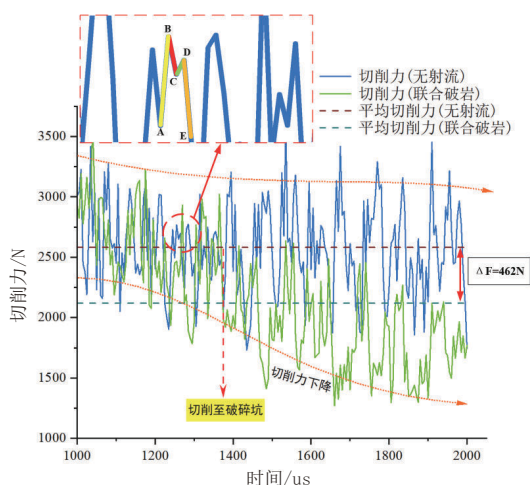


图7 有无射流下刀翼切削力对比

通过对比单刀翼破岩和联合破岩切削力曲线图可知,联合破岩过程中平均切削力明显低于单刀翼破岩。单刀翼破岩过程中,平均切削力为2581 N,而联合破岩的平均切削力为2119 N,降幅达到了17.9%,说明高压水射流可有效辅助PDC单刀翼破岩。由于高压水射流在刀翼前方对岩石产生冲击作用,在联合破岩初始阶段,切削力波形会有整体下移的趋势,这是由于在高压水射流的冲击作用下,该区域的岩石表面会产生一定的应变。虽然此时尚未形成明显的破碎坑,但后续切削齿在破岩时,是在已产生应变岩石的基础上开始切削,因此切削力会有明显的减小。同时,在联合破岩中后期,高压水射流会在刀翼切削路径上形成明显的破碎坑,当刀翼切削至这些预先形成的破碎坑时,切削力曲线会出现明显的下降趋势,形成图中类似波谷的区域,这有助于缓解高压水射流冲击区域PDC齿的磨损。

2.2 岩石应力应变场分析

图8为联合破岩过程中的岩石应力场。在高压

水射流打击之初(200 us),岩石尚未发生明显破坏,此时射流全部作用于岩石表面,因此在射流冲击点处的岩石会产生较大的应力场,有利于破碎坑的形成。当射流冲击一段时间后(1200 us),岩石表面会由于冲击作用产生破碎坑,此时破碎坑内(即射流冲击处)的岩石应力场有所减弱,而在破碎坑周围会有明显的应力场,与刀翼破岩时所形成的岩石应力场进行叠加,增大破岩范围。

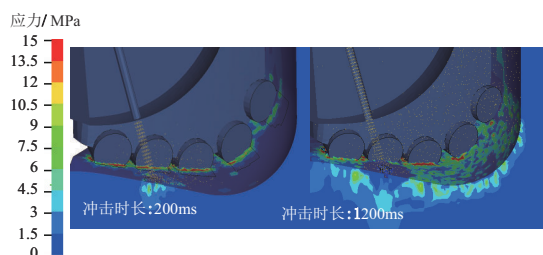


图8 联合破岩过程中的岩石应力场

此外,在PDC钻头钻进的过程中,地应力会随着钻进深度的增加而显著增大,同时井底岩石还受到钻井液的静水压力,导致机械钻速急剧降低,岩石强度有所增强。在钻头破岩区域,由于井底的几何形状,使得上述应力得到进一步增大,致使破岩过程所受到的阻力大幅提高,钻进效率降低^[13]。而高压水射流可通过在井底开槽来实现井底应力的卸载:破碎坑切断了井底中心和井壁处岩石的连接,切断了水平地应力的传递,由破碎坑内的流体静压力代替水平地应力。由于水平地应力远大于静水压力,使得破碎坑周围的岩石出现应力集中现象,大幅降低破岩难度^[14],如图8(1200 us)所示。同时由于射流的溅射作用,从井底中心至井壁,井底岩石表面都会存在因射流不断反射而形成的应力场,虽然反射后的射流速度有所衰减,无法在冲击处形成破碎坑,但其有利于已有破碎坑的进一步扩张。

由联合破岩过程中的岩石应变场也可看出,在射流冲击之初,冲击点处的岩石应变更大,同时伴随着破碎坑的形成,如图9所示。在井底产生破碎坑后,坑内的应变极小,坑洞周围岩石的应变则非常大,这意味着破碎坑有继续扩张的趋势。另一方面,破碎坑周围产生的应变与刀翼切削齿周围的岩石应变区出现贯通,便于该处岩石的进一步切削。

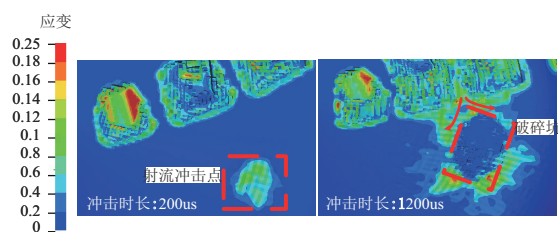


图9 联合破岩过程中的岩石应变场

2.3 井底流场分析

在PDC钻头切削破岩的过程中,岩屑会不断从基岩脱离,若没有及时有效的清理手段,岩屑会不断堆积在PDC齿前,容易提高切削齿温升和产生二次破碎降低能量利用率。高压水射流除了辅助刀翼进行破岩以外,其形成的井底流场还可辅助井底携岩。射流粒子的速度矢量在一定程度上可以反映出射流的流向,为进一步分析井底射流流场,提取出联合破岩过程中某时刻的粒子运动信息,并进行插值得到井底射流流场速度等值图,如图10所示。高压水射流在冲击至井底岩石后,会产生明显的分离效应,即在周围形成冲击区,冲击区的流体会分别向两侧流动:其中一部分流体流向井眼中心形成井底漫流,另一部分流向井壁协助岩屑上返排出。同时,在该射流倾角(15°)下,流向井眼中心的粒子明显少于流向环空区的粒子。

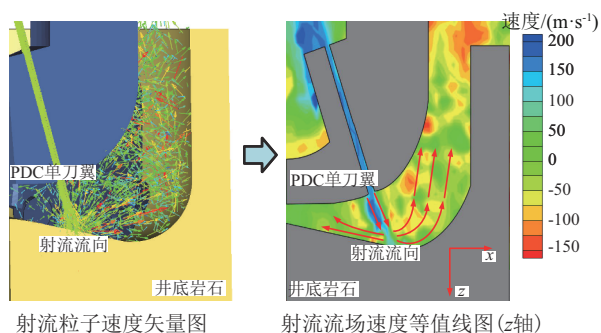


图10 联合破岩过程中流场分布(z轴方向)

在钻井过程中,井底漫流是清除井底岩屑和净化井底的主动力,合适的井底漫流可保证井底处于低岩屑堆积状态,有效提高钻头机械钻速^[15-16]。图11为联合破岩过程中x方向的流场分布,从图中可验证前文的分析:当射流打至井底后,一部分流体会以井底漫流的形式流向井眼中心,另一部分则会流向井壁后上返至环空部分。对井底漫流开展进一步分析可知,其中流向井眼中心的射流无法有效

将岩屑运移至环空,相应的岩屑容易滞留在井底,不利于井底的净化。井底流场速度等值线图展示了不同区域的流体速度,在射流打击点附近流场速度较高,最高可达150 m/s,高速漫流还可对井底岩石表面造成进一步的剪切作用,也更有利于运移大块岩屑。同时可以看出,在射流冲击点以下也有一部分流体朝着中心流动,其原因是因为射流在喷射的过程中伴随着刀翼旋转,射流会因为惯性作用沿着刀翼旋转的方向产生一定的移动,此外刀翼的几何形状也会约束该部分流体,迫使其沿着旋转方向移动。

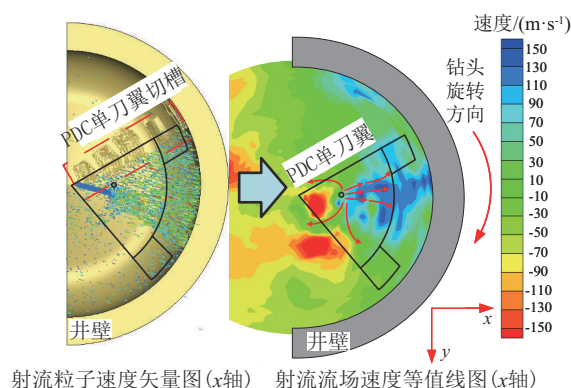


图11 联合破岩过程中流场分布(x轴方向)

由于射流喷射至井底后会与钻头的旋转产生耦合作用,因此在y轴方向会有一定的速度,其分界线大致位于喷嘴位置,如图12所示。该部分流体可及时清理PDC单刀翼切削齿前方形成的岩屑,避免岩屑的二次破坏造成能量损失。同时,通过井底流场速度等值图可以看出,井底流场在y轴方向的速度要小于在x轴方向的速度,即井底漫流的速度会更加集中于射流冲击方向。对钻井过程进行分析,由于携岩过程中井底流场需要将岩屑运移至PDC单刀翼外的上返流道位置,使其处于被举升的状态,因此x方向流速更快,有利于使井底岩屑尽快上返排出。若y轴方向速度过大,会导致岩屑尚未被平移至井壁处时就被迅速运移至其他刀翼的切削齿处,反而干扰了钻进过程。

3 结论

本文在之前对高压水射流辅助PDC齿破岩研究的基础上,以PDC钻头单刀翼整体作为基本切削单元,并基于SPH-FEM(Smoothed Particle

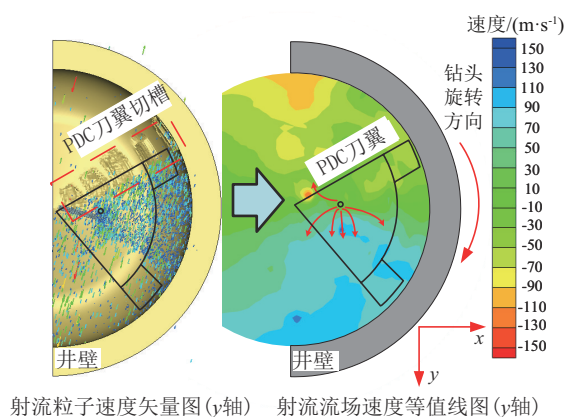


图12 联合破岩过程中流场分布(y轴方向)

Hydrodynamics-Finite Element Method)方法建立了高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩数值模型,通过切削力和射流破碎坑尺寸验证了模型的可靠性,模型与实验误差仅为9.29%。此外,基于该数值模型,通过切削力、岩石应力场、岩石应变场和井底流场等方面对高压水射流-PDC单刀翼联合破岩与携岩机理进行了分析,单刀翼破岩过程中,联合破岩的平均切削力降幅达到了17.9%,岩石应力应变场以及井底流场的模拟结果验证了高压水射流可有效辅助PDC单刀翼破岩,也证明了该分析及数值模拟方法基本能够完整反映高压水射流对整个PDC钻头的影响。

参考文献:

- [1] 李根生,沈忠厚.高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展[J].石油勘探与开发,2005(1):96-99.
- [2] 蔡灿,曹文洋,谢全功,等.高压射流辅助钻井技术研究现状及发展趋势[J].天然气工业,2023,43(8):116-126.
- [3] Cai C, Yang X P, Gao C, et al. Intense cooling during composite rock breaking of high-pressure CO₂ jet-polycrystalline diamond cutter[J]. SPE Journal, 2022, 27(4): 2525-2540.
- [4] 张文华,汪志明,于军泉,等.高压水射流-机械齿联合破岩数值

模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2005(23):4373-4382.

- [5] Wu Z, Yu F, Zhang P, et al. Micro-mechanism study on rock breaking behavior under water jet impact using coupled SPH-FEM/DEM method with Voronoi grains[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2019, 108: 472-483.
- [6] Li H S, Liu S Y, Xu P P. Numerical simulation on interaction stress analysis of rock with conical picks[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 85: 231-242.
- [7] Chen X Y, Cao T, Yu K A, et al. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressure-dominated jet mill bit[J]. Petroleum Science, 2020, 17: 1602-1615.
- [8] Ren F, Fang T, Cheng X. Study on rock damage and failure depth under particle water-jet coupling impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2020, 139: 103504.
- [9] 罗金武,况雨春,张锐,等.基于CFD-DEM耦合的水平井PDC钻头水力结构研究[J].工程设计学报,2020,27(5):636-644.
- [10] 杨显鹏,涂杰,蔡灿,等.基于非球形岩屑的高压CO₂喷射钻井携岩试验研究[J].钻探工程,2024,51(S1):90-95.
- [11] Liu X, Liu S, Ji H. Numerical research on rock breaking performance of water jet based on SPH[J]. Powder Technology, 2015, 286: 181-192.
- [12] Cai C, Zhang P, Xu D, et al. Composite rock-breaking of high-pressure CO₂ jet & polycrystalline-diamond-compact (PDC) cutter using a coupled SPH/FEM model[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(5): 1115-1124.
- [13] Chen X Y, Cao T, Yu K A, et al. Numerical and experimental investigation on the depressurization capacity of a new type of depressure-dominated jet mill bit[J]. Petroleum Science, 2020, 17: 1602-1615.
- [14] Wang H J, Liao H L, Wei J, et al. Stress release mechanism of deep bottom hole rock by ultra-high-pressure water jet slotting[J]. Petroleum Science, 2023, 20(3): 1828-1842.
- [15] 熊继有,袁其骥,邓明川,等.三牙轮钻头井底漫流速度计算探讨[J].西南石油学院学报,2000(4):44-47.
- [16] Menegbo E K, Charles E, Dosunmu A. Evaluation of cuttings transport in well annulus using power law model[C]//SPE Nigeria Annual International Conference and Exhibition. SPE, 2019: D033S027R011.

(编辑 王文)