

基于非球形岩屑的高压CO₂喷射钻井携岩试验研究

杨显鹏^{1,2}, 涂杰^{1,2}, 蔡灿^{1,2,3,4*}, 曾琪^{1,2}, 魏怀洲^{1,2}, 蒲治成⁵, 陈浩^{1,2}

(1. 西南石油大学高压射流理论与应用技术实验室, 四川成都 610500;

2. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 3. 油气装备教育部重点实验室, 四川成都 610500;

4. 油气藏地质及开发工程全国重点实验室(西南石油大学), 四川成都 610500;

5. 中国东方电气集团公司, 四川成都 610500)

摘要: 在非常规储层开采中, 欠平衡气体钻井技术克服了传统钻井钻速低、建井周期长和效率低等缺点, 而气体钻井技术在深部地层钻进时井底高效携岩是制约上述问题的关键之一。由于气体钻井携岩研究中多采用球形代替真实非球形岩屑, 忽略岩屑非球形轮廓对岩屑运移的影响, 致使井底喷射携岩特性不准确。为此, 本文采用PDC钻头切削砂岩所得真实岩屑制得非球形岩屑, 搭建PDC钻头高压CO₂喷射携岩试验平台, 探究岩屑球形度 φ 、喷射压力、钻头转速和岩屑体积对携岩的影响。结果表明: 非球形岩屑上升时轴向速度波动大, 且其启动速度快于球形岩屑, 但速度衰减更快; 随着岩屑球形度 φ 值的增加, 岩屑在井筒内的轴向速度先减小后增加, 当 φ 值在0.6~0.65范围内岩屑轴向速度降低导致运移效率变差; CO₂喷射压力增加对岩屑轴向速度增加显著, 在距离井底35 mm处岩屑轴向速度增幅可达221%; 钻头转速增加使得靠近井底段的岩屑运移速度提升显著, 当钻头转速在70~80 r/min范围内, 平均运移速度稳定在11.88 m/s, 携岩效果较好; 岩屑轴向速度随岩屑体积的增加呈现先减小后增大的趋势。上述研究系统阐明了PDC钻头喷射钻井携岩特性, 为CO₂等气体喷射钻井技术应用提供了理论基础。

关键词: 非常规储层; 欠平衡气体钻井; 喷射携岩; 岩屑球形度; PDC钻头

中图分类号: TE248; P634.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)S1-0090-06

Experimental study of rock cutting-carrying for high-pressure CO₂ jet drilling based on non-spherical rock cuttings

YANG Xianpeng^{1,2}, TU Jie^{1,2}, CAI Can^{1,2,3,4*}, ZENG Qi^{1,2}, WEI Huaizhou^{1,2}, PU Zhicheng⁵, CHEN Hao^{1,2}

(1. High Pressure Jet Theory and Application Technology Laboratory, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

3. Key Laboratory of Ministry of Education for Oil and Gas Equipment, Chengdu Sichuan 610500, China;

4. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan 610500, China;

5. Dongfang Electric Corporation, Chengdu Sichuan 610500, China)

Abstract: In unconventional reservoir exploitation, underbalanced gas drilling technology overcomes the shortcomings

收稿日期: 2024-07-30; 修回日期: 2024-08-13 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.S1.013

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目“超临界CO₂循环喷射压裂作用下干热岩储层缝网形成与增渗机理研究”(编号:52004236); 国家自然科学基金重点项目“海相页岩水平井超临界二氧化碳压裂机理与一体化模拟研究”(编号:52234003); 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:PLN202237); 四川省科技厅创新创业苗子工程重点项目“干热岩井超临界CO₂射流-PDC齿复合破岩机理及配套钻头设计”(编号:2021JDRC0114)

第一作者: 杨显鹏, 男, 汉族, 1998年生, 助理讲师, 硕士, 主要从事高压气体射流理论、射流辅助钻井破岩技术、智能流体机械装备等领域的研究工作, 四川省成都市新都区新都大道8号, yangxianpeng2020@163.com。

通信作者: 蔡灿, 男, 汉族, 1988年生, 副研究员, 硕士生导师, 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大道8号, cainia10@163.com。

引用格式: 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.

YANG Xianpeng, TU Jie, CAI Can, et al. Experimental study of rock cutting-carrying for high-pressure CO₂ jet drilling based on non-spherical rock cuttings[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 90-95.

of conventional drilling such as low drilling speed, long well construction period and low efficiency, and one of the key constraints to the gas drilling technology is the high efficiency of rock cuttings transport at the bottom of the well when drilling in deep formations. Since the gas drilling rock cuttings transport research mostly adopts spherical instead of real non-spherical rock cuttings, ignoring the influence of non-spherical contour on rock chip transport, resulting in the inaccurate characteristics of bottomhole jetting rock cuttings transport. In this paper, the non-spherical rock cuttings are produced by cutting sandstone with a PDC drill bit, and a PDC drill bit and high-pressure CO₂ jetting test platform are set up to investigate the effects of the sphericity φ of the rock cuttings, the jetting pressure, the rotational speed of the drill bit, and the volume of the rock cuttings on the rock transport. The results show that: the axial velocity of the non-spherical rock cuttings fluctuates greatly when they rise, and their start-up speed is faster than that of the spherical rock cuttings, but the velocity decays faster; with the increase of the value of φ , the axial velocity of the rock cuttings decreases and then increases in the wellbore, and the axial velocity of the rock cuttings decreases and causes the poor transport efficiency when the value of φ is in the range of 0.6~0.65; the axial velocity of the rock cuttings increases significantly with the increase of the CO₂ injection pressure, and the increase of axial velocity of rock cuttings at the distance of 35 mm from the bottom of the well can reach 221%; the increase of drill rotational speed increases the axial velocity of rock cuttings significantly close to the bottom of the well, and the average velocity is stable at 11.88 m/s when the rotational speed of the drill bit is in the range of 70~80 r/min, which shows a better effect of rock carrying; the axial velocity decreases and then increases with the increase of rock cuttings' volume. The above study systematically elucidates the rock-carrying characteristics of PDC bit jet drilling, and provides a theoretical basis for the application of CO₂ and other gas jet drilling technologies.

Key words: unconventional reservoir; underbalanced gas drilling; jetting rock cutting-carrying; rock cuttings' sphericity; PDC drill bit

0 引言

当前,油气资源的勘探开发处在向深部地层推进以及常规油气藏向非常规油气藏的过渡阶段,PDC钻头在深部地层钻进中暴露出钻进速度低、钻探周期长和储层伤害等缺点^[1-3]。欠平衡气体钻井技术对于解决深部难钻地层存在的效率低下问题具有较好的效果,但欠平衡空气钻井技术存在着井底燃爆风险较大、喷嘴低喷射压力的破岩及携岩效率差等问题^[4]。二氧化碳(CO₂)流体作为欠平衡气体钻井中常用的流体之一,在钻井破岩方面已取得成功应用,但携岩效率低的问题仍然突出。研究人员为此展开了大量工作,相关的试验研究主要集中于钻头水力结构优化^[5],喷嘴以及射流参数优化^[6-9]和岩屑的运移特性^[10-12],试验研究指出:钻杆的旋转、钻井液的排量、喷嘴数量相邻刀翼的间隔宽度、喷嘴与流道槽的组合是影响岩屑运移的主要因素。数值模拟技术方面,研究人员在模拟PDC钻井井底喷射流场时,发现调整喷嘴角度可显著改善井底流场分布^[13],并且指出了井底存在三个影响岩屑上返的区域^[14];在模拟岩屑输送的泡沫流时,研究了泡沫质量、泡沫注入速度、井斜、管道偏心和管道旋转对钻屑输送效率的影响^[15]。然而,钻井过程中产生的岩屑形状极大多数都为非球形,上述研究忽略了

岩屑非球形轮廓对岩屑运移的影响,普遍采用球形或规则外形颗粒^[16-19]代替真实岩屑进行研究,致使喷射钻井携岩特性研究不准确。

因此,本文考虑岩屑形状对岩屑运移的影响,设计了非球形岩屑,设计并搭建CO₂喷射钻井——PDC钻头携岩试验平台,采用试验探究了喷射压力、钻头转速、岩屑体积、岩屑形状等参数对CO₂喷射钻井时PDC钻头携岩影响规律,为CO₂等气体喷射钻井技术应用提供了理论基础。

1 试验介绍

1.1 试验平台介绍

图1所示为PDC钻头——高压气体携岩试验平台,由高压水射流与应用技术实验室自主研发,该试验平台还可开展井底流场温压环境等研究。试验平台主要由高压CO₂气体生成装置、试验井筒和钻头、岩屑、钻头旋转控制装置、岩屑速度监测系统及温压传感器信号采集系统组成。试验所用井筒如图2所示,由筒体、上盖、底盖组成。井筒内径120 mm、筒内高度250 mm、壁厚25 mm。井筒侧面布置两列共8个压力传感器,一列温度传感器,各传感器之间间隔为40 mm。在井筒外侧安装有4个自主研发的岩屑速度监测感应装置用于检测岩屑

在井筒内各个区域的运移速度,该装置与井底轴向距离依次为35、75、115、155 mm,用于实时监测岩屑轴向速度。

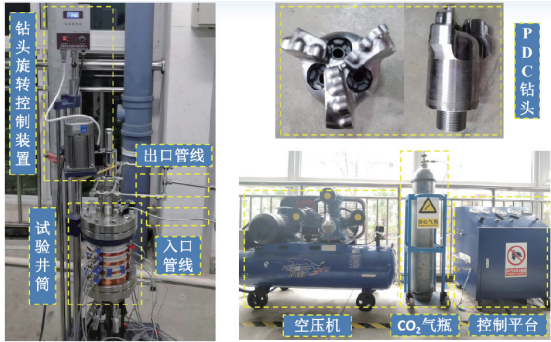


图1 PDC钻头-高压气体喷射携岩试验平台

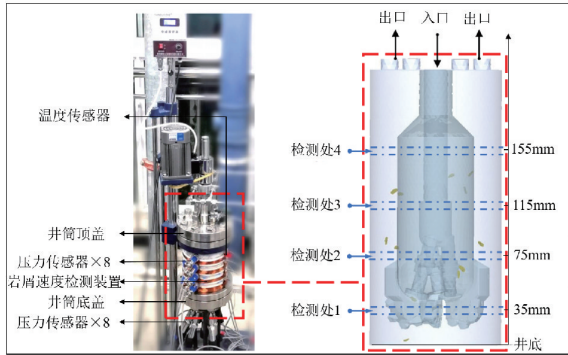


图2 试验井筒

本次试验选取10个PDC钻头旋转切削砂岩所得的典型岩屑样本为模型,进行PDC钻头-CO₂喷射携岩试验。使用3D扫描技术对选取的典型岩屑样本逐一进行扫描,并建模得到10个PDC钻头切削的真实岩屑形状模型。扫面所得岩屑模型及完善修补模型如图3所示。

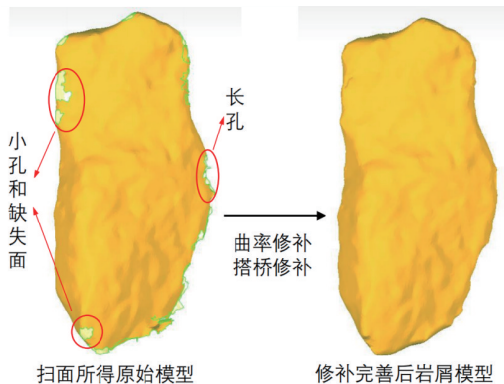


图3 非球形岩屑模型建模示意

由于实际岩屑颗粒形状的多样性,常以球形度 φ 来度量不规则颗粒形状的差异程度^[20],圆形球体 $\varphi=1$,其他非球形颗粒为 $0<\varphi<1$ 。10个真实岩屑模型的 φ 值如图4所示,该部分岩屑 φ 值范围为0.56~0.71。

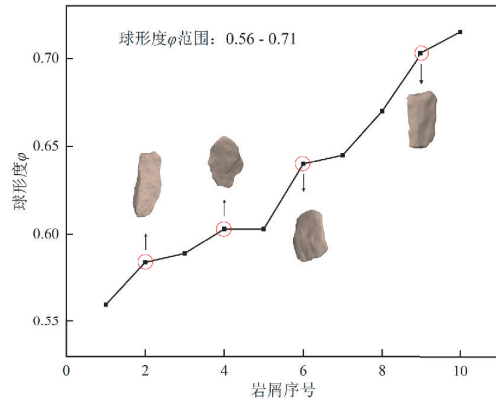


图4 真实岩屑 φ 值分布

1.2 试验方案

试验方案见表1。其中,编号1为基本组;编号为1~3、4~6、7~9、10~12的试验组各组球形度分别为0.564、0.603、0.640和0.704用于研究岩屑体积对携岩的影响;编号13~24的组是与编号1~12的组依次对应的球形岩屑实验组,用于研究同体积同密度的球形与非球形岩屑携岩规律;25~27组为喷射压力对比组;28~34组为钻头转速对比组。

1.3 试验数据处理

试验开始前需将井筒井盖拆卸,把岩屑样本放置在井筒内,并调整钻头转速至指定转速。通入高压CO₂气体,开始试验和试验数据采集。岩屑速度则是基于信号峰值与时间的差的关系算得,如式(1)所示:

$$v = L / \Delta t \quad (1)$$

式中: v ——岩屑轴向速度; L ——信号峰值; Δt ——时间差。

2 试验结果分析

为研究CO₂气体喷射钻井岩屑颗粒在井底各区域的运移情况,结合岩屑速度监测装置测得的距离井底35、75、115、155 mm处岩屑轴向速度,研究不同喷射压力、钻头转速、球形度等参数影响下的携岩特性影响规律。

2.1 球形岩屑与非球形岩屑对比分析

为研究球形与非球形岩屑在PDC钻头CO₂喷射钻井携岩中的差异,选取4个非球形真实岩屑形

表1 实验设计方案

编号	喷射压力/ MPa	钻头转速/ (r·min ⁻¹)	φ 值	岩屑体积/ mm ³
1	20	70	0.584	670
2	20	70	0.584	340
3	20	70	0.584	150
4	20	70	0.603	645
5	20	70	0.603	380
6	20	70	0.603	150
7	20	70	0.640	240
8	20	70	0.640	150
9	20	70	0.640	87
10	20	70	0.704	290
11	20	70	0.704	150
12	20	70	0.704	100
13	20	70	1	670
14	20	70	1	340
15	20	70	1	150
16	20	70	1	645
17	20	70	1	380
18	20	70	1	150
19	20	70	1	240
20	20	70	1	150
21	20	70	1	87
22	20	70	1	290
23	20	70	1	150
24	20	70	1	100
25	10	70	0.584	670
26	30	70	0.584	670
27	40	70	0.584	670
28	20	0	0.584	670
29	20	20	0.584	670
30	20	40	0.584	670
31	20	60	0.584	670
32	20	80	0.584	670
33	20	90	0.584	670
34	20	100	0.584	670

状样本,球形度 φ 分别为 0.584、0.603、0.640 和 0.704,以及 4 个与之同体积、密度的球形岩屑样本,共 4 组球形与非球形岩屑试验对比组(编号 3、6、8、11、15、18、20、23),喷射压力为 20 MPa,钻头转速固定为 70 r/min,试验结果见图 5。

四组实验中,非球形岩屑样本在井筒内的整体

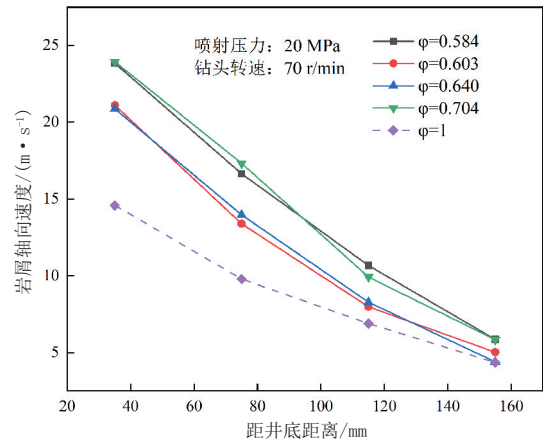


图5 非球形岩屑样本与对应球形岩屑样本运移对比

轴向上升速度大于其同体积同密度的球形岩屑样本。例如,在距离井底 35、75、115 和 155 mm 处,球形度 φ=0.584 的非球形岩屑的轴向速度分别是球形岩屑样本轴向速度的 1.6、1.7、1.5 和 1.3 倍;而球形度 φ=0.603 的岩屑,其上升速度为对应球形岩屑的 1.45、1.37、1.16、1.15 倍。从图中还可以看出,非球形岩屑在井底的上升的启动速度较快,在经过 35 mm 监测点后,其轴向速度下降较快,而球形岩屑速度下降相对缓慢,当岩屑运移至距离井底 155 mm 处时,两种岩屑轴向速度较为接近。

2.2 岩屑球形度影响分析

编号 3、6、8、11 组试验结果如图 6 所示。随着岩屑 φ 值的增加,岩屑在井筒内的轴向速度先减小后增加。球形度 φ 值在 0.6~0.65 范围内时,岩屑轴向速度较小,PDC 钻头 CO₂ 喷射钻井携岩效率较差。由于岩屑球形度 φ 值的差异导致的岩屑轴向速度的差异大小在井筒内各区域也是不同的,在距离井底 35、75、115 和 155 mm 处,岩屑轴向最大速度较最小速度同比增加了 14.7%、29.3%、33.7% 和 33.0%。可见,当岩屑运移离井底越远,球形度 φ 对其轴向运移速度影响越大。

2.3 喷射压力影响分析

编号 1、25~27 组的试验结果如图 7 所示,随着喷射压力由 10 MPa 增加到 40 MPa,井筒内各区域位置岩屑轴向速度均逐渐增加。在 PDC 钻头刀翼之间的流道槽和环空的交界处(距离井底 35 mm 处到 75 mm 处),岩屑轴向速度有较大衰减。喷射压力为 10、20、30 和 40 MPa 时,岩屑在该段区域轴向速度衰减了 54.8%、45%、34.5% 和 33.7%。随着喷

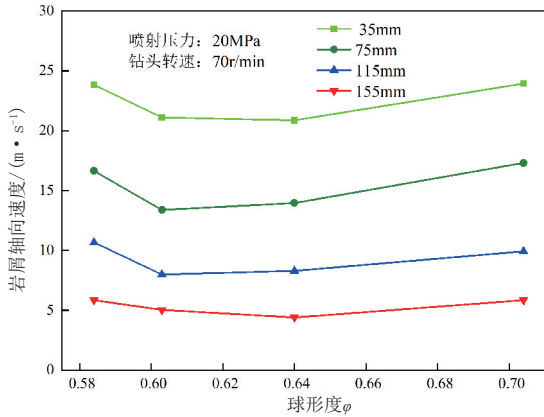


图6 岩屑轴向速度随球形度变化曲线

射压力的增加,近井底(35 mm)处岩屑轴向速度增幅最大,可达221.4%;在远离井底(155 mm)处,岩屑轴向速度增量最小。

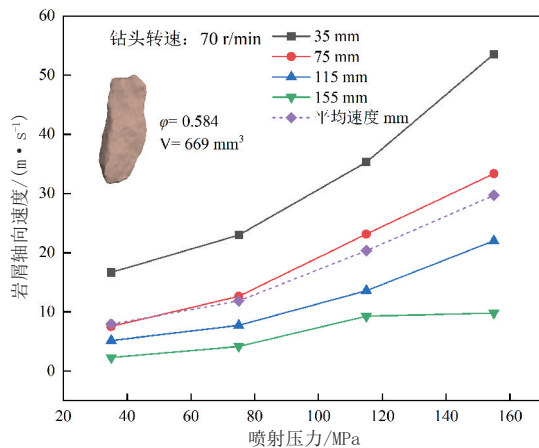


图7 不同喷射压力下各监测点监测的岩屑轴向速

从图7还可以看出,在同一钻头转速下,岩屑在井筒内平均轴向速度随着喷射压力增加而增加。当喷射压力由20 MPa增加至30 MPa时,岩屑轴向速度增加最为显著,增速达71.3%。喷射压力由10 MPa增至20 MPa及由30 MPa增至40 MPa时,岩屑平均轴向速度增速分别为49.9%和46.0%。

2.4 钻头转速影响分析

编号1、28~34组试验结果如图8所示,当岩屑越靠近井底时,钻头转速的变化对岩屑轴向速度的影响越大;在距离井底35 mm处,岩屑在钻头转速为70 r/min时轴向速度最大为22.9 m/s,相比在0 r/min时轴向速度时增加了69.9%;在距离井底155 mm处,钻头转速为70 r/min时较0 r/min时,岩屑

轴向速度仅增加了19.9%。井筒内岩屑平均轴向速度在钻头转速为0~60 r/min区间内随转速增加而增加;在70~80 r/min区间内,岩屑平均轴向速度达到峰值且保持平稳;在80~100 r/min区间内,岩屑轴向速度随着转速增加而减小。该组试验表明,钻头转速在70~80 r/min范围内,PDC钻头携岩效果较好,岩屑上升较快;且钻头旋转时较无旋转时,携岩效果增加显著。

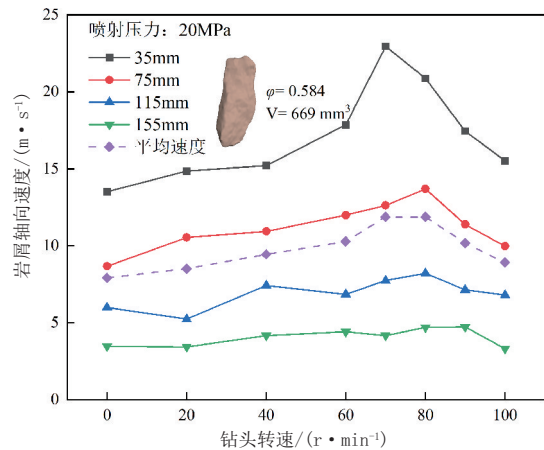


图8 井筒内各区域岩屑轴向速度随转速变化曲线

2.5 岩屑体积影响分析

编号1~3组试验结果如图9所示。随着岩屑体积的增加,该组岩屑样本在井筒内轴向速度呈先减小再增加的趋势,在距离井底155 mm处,岩屑轴向速度受体积大小影响十分显著,最大轴向速度较最小轴向速度同比增加了52.5%;在距离井底35 mm处,岩屑运移速度受体积影响最小,最大轴向速度较最小轴向速度同比增加了34.7%;井筒中间两个监测点75 mm、115 mm处,分别为44.3%和39.5%。该结果表明,岩屑轴向速度受体积变化影响随着运移距井底距离的增加而增强。

3 结论

在PDC钻头CO₂喷射钻井携岩试验研究中,分析了岩屑球形度、喷射压力、钻头转速、岩屑体积对PDC钻头CO₂喷射钻井携岩的影响规律。

(1)非球形岩屑较对应同体积同密度球形颗粒,真实岩屑上升时轴向速度波动较大;非球形岩屑的轴向启动速度快于球形岩屑;非球形岩屑在启动后,其轴向速度较球形岩屑衰减更快,特别是当

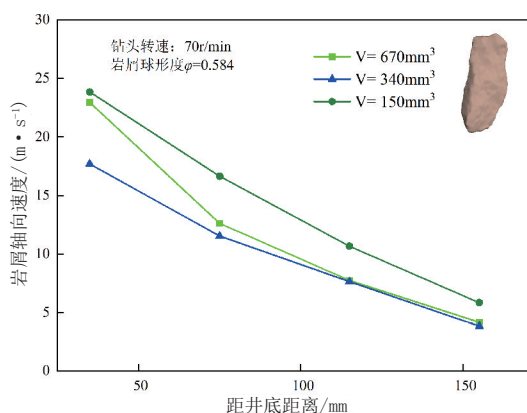


图9 $\varphi=0.584$ 岩屑轴向速度随岩屑体积变化曲线

岩屑由PDC钻头流道槽运移至井筒环空段时,其轴向速度衰减最为显著。

(2)随着岩屑 φ 值的增加,岩屑在井筒内的轴向速度先减小后增加,球形度 φ 值在0.6~0.65范围内时,岩屑轴向速度较小,PDC钻头CO₂喷射钻井携岩效率较差;且当岩屑运移离井底越远,球形度 φ 对其轴向运移速度影响越大。

(3)CO₂喷射压力增加对岩屑轴向速度增加显著,在距离井底35 mm处,岩屑轴向速度随喷射压力增加而增加的幅度最大;在距离井底35 mm到75 mm处,即钻头流道槽和环空的交界处,岩屑轴向速度有较大衰减,10、20、30和40 MPa时,岩屑轴向速度在该段区域内分别衰减了54.8%、45.0%、34.5%和37.7%。

(4)当岩屑越靠近井底,钻头转速的变化对岩屑轴向速度的影响越大;岩屑在钻头转速为70 r/min时轴向速度最大为22.9 m/s相比在0 r/min时轴向速度时增加了69.9%;在距离井底155 mm处,钻头转速为70 r/min较0 r/min时,岩屑轴向速度仅增加了19.9%。钻头转速在70~80 r/min范围内,PDC钻头CO₂喷射钻井携岩效果较好,岩屑上升较快。

(5)岩屑体积增加对岩屑轴向速度影响显著,轴向速度随岩屑体积增加先减小后增加,在距离井底35 mm处最大轴向速度较最小轴向速度同比增加34.7%,在距井底155 mm处同比增加52.5%。

参考文献:

[1] 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,(8):116-126.

- [2] 苏义脑,路保平,刘岩生,等.中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J].石油钻采工艺,2020,42(5):527-542.
- [3] 李根生,王海柱,沈忠厚,等.超临界CO₂射流在石油工程中应用研究与前景展望[J].中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(5):76-80,87.
- [4] 蔡灿,高超,王海柱,等.高压CO₂射流-PDC齿复合破岩流场及携岩增强机理[J].天然气工业,2021,41(10):101-108.
- [5] Guo B Y, Liu G F. Applied Drilling Circulation Systems[M]. Elsevier Science, 2011.
- [6] Kendall H.A., Goins W. C. Design and operation of jet bit programs for maximum hydraulic horsepower[J]. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 1960,219:238-250.
- [7] 陈修平,邹德永.基于泥包最小化的PDC钻头水力参数优选[J].特种油气藏,2014,21(4):142-144.
- [8] Lim, Kien Ming. Bit Hydraulics analysis for efficient hole cleaning[C]. SPE Western Regional Meeting, Anchorage, Alaska, 1996.
- [9] Mensa-Wilmot, Fear M. G. Innovative technology improves penetration rates of PDC bits in shales drilled at great depth with weighted water based mud systems[C]. IADC/SPE Drilling Conference, Dallas, Texas, 2002.
- [10] 牟艳宇.钻具旋转对造斜段岩屑运移的影响规律研究[D].大庆:东北石油大学,2011.
- [11] Ozbuyoglu E M, Saassen A, Sorgun M. Effect of pipe rotation on hole cleaning for water-based drilling fluids in horizontal and deviated wells[R]. SPE 114965, 2008.
- [12] Nazari T., Hareland G., Azar J.J. Review of cuttings transport in directional well drilling: Systematic approach[C]. SPE Western Regional Meeting, Anaheim, California, 2010.
- [13] Crouse R, Chia R. Optimization of PDC bit hydraulics by fluid simulation[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Nevada, 1985.
- [14] 黄红梅,翟应虎,王辉,等.实体PDC钻头流场数值模拟与实验验证[J].中国石油大学学报(自然科学版),2005,29(3):49-52.
- [15] Vaziriet E, Simjoo M, Chahardowli M, et al. Application of foam as drilling fluid for cuttings transport in horizontal and inclined wells: A numerical study using computational fluid dynamics[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2020,194:107325.
- [16] Mohammadreza E, Crapper, OoiMartin, et al. Numerical and experimental study of horizontal pneumatic transportation of spherical and low-aspect-ratio cylindrical particles[J]. Powder Technology, 2016,293:48-59.
- [17] 王晓月.颗粒形状对振动筛分数值模拟影响规律的研究[D].泉州:华侨大学,2017.
- [18] Chen Qianyi, Ting Xiong, ZhangXinzhuo, et al. Study of the hydraulic transport of non-spherical particles in a pipeline based on the CFD-DEM[J]. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2020,14(1):53-69.
- [19] TohmeTohme, MagaudPascale, BaldasLucien. Transport of non-spherical particles in square microchannel flows: A review[J]. Micromachines, 2021,12(3):277.
- [20] Bouwman Anneke M, Bosma Jaap C, VonkPieter, et al. Which shape factor (s) best describe granules[J]. Powder Technology, 2004,(146):66-72.

(编辑 王文)