

钻井高效破岩新进展*

熊继有¹ 钱声华¹ 严仁俊² 唐嘉贵³

李福德² 吴华² 肖仁斌² 黄桢²

(1.“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室·西南石油学院

2. 四川石油管理局 3. 中国石化集团滇黔桂石油勘探局)

熊继有等. 钻井高效破岩新进展. 天然气工业, 2004; 24(4): 27~29

摘要 钻井工程作业要破碎厚达数千米厚的岩石, 其破岩效率的主要影响因素是井下地层岩石性质、破岩工具和方法。文章对岩石性质进行了基本分析, 进行了喷嘴射流水力冲蚀辅助破岩门限压力的实验研究。提出了在现有旋转钻井方式下, 钻头的机械破岩、喷嘴射流的水力辅助破岩和降低井底压差是提高钻井破岩效率的三个重要途径。分别阐述了它们能够提高钻井速度的机理、方法、关键技术和研究方向。同时介绍了激光钻井和电热能钻井新方法的研究与发展趋势。

主题词 钻井 岩石特性 高效破岩 工具 方法 发展趋势

旋转钻井地层岩石破碎特性分析

钻井作业要破碎井底岩石, 钻头是破碎井底岩石的主要工具, 地层岩石的物理力学性质及岩石矿物学性质是钻井破岩工具设计及钻头选型的必要条件。尤其是钻井的井眼是竖长的圆柱形小孔, 长径比达十万分之几, 同时受高温高压的作用, 研究难度大。主要是研究岩石的稳定(非本文研究内容)和岩石破碎效率问题。

1. 岩石物理力学性质

二十世纪80年代末, 我国根据国内外研究方法, 结合钻井地层岩石的自身特点和满足钻井的基本要求, 选择了泥岩、砂岩、灰岩和花岗岩四类岩石作为分类标准岩样。在室内进行了可钻性、抗压强度、抗拉强度、硬度、弹性模量、塑性系数、研磨性、渗透率和孔隙度十个物理力学性质标准岩样的实验研究^[1]。在钻头设计及选型方面起到了重要作用。

由于钻井地层岩石埋藏深, 成因类型、结构和构造特征的差异, 岩石是各向异性体, 组织不均匀, 属于不连续体。所以岩石含有一些强度较弱的晶界(高孔隙区), 软弱夹杂, 原生裂隙及局部滑移等, 岩石多为多孔介质。描述多孔介质应力关系方程是

Terzaghi 方程^[2]。它反映了岩石的物理性质和强度特征。

$$\sigma_t = \mu p + \sigma(1 - \varphi) \quad (1)$$

式中: σ_t 为垂直方向上的应力(总应力), MPa; μ 为孔隙流体压力, MPa; φ 为孔隙度, %; σ 为平均应力(颗粒间应力或垂直方向分力), MPa。

2. 喷嘴射流水力冲蚀辅助破岩分析

为了弄清喷嘴射流辅助钻井破岩的关系和影响因素, 进行了标准岩样水力冲蚀辅助破岩的实验研究。实验结果表明^[3], 喷嘴射流对岩石均有辅助破岩作用, 岩石的强度、孔隙度和井底压差是影响辅助破岩的重要因素。破岩效率与强度特征和井底压降成反比, 与物理特性成正比。实际上, 岩石的强度综合反映了岩石的物理力学性质, 重点以岩石的抗压强度和井底压差辅助破岩的实验结果进行统计分析, 得出了射流辅助钻井破岩的门限压力计算式。

$$p_j = 0.26 p_p + \Delta p^{1.23} \quad (2)$$

式中: p_j 为射流压力, MPa; p_p 为岩石抗压强度, MPa; Δp 为井底压差, MPa。

3. 破岩效率分析

对钻井而言, 破岩效率的实质是提高机械钻速, 而影响机械的因素很多。主要有地层岩石性质、钻

* 本文系四川省高校省级重点实验室“岩石破碎学与钻头研究室”(西南石油学院)资助项目(省室 008)和国家自然科学基金资助项目, 重大研究计划(编号: 90210022)。

作者简介: 熊继有, 教授, 1951年生; 长期从事油气井工程、岩石力学、水射流理论与应用技术研究。地址: (610500) 四川省成都市新都区。电话: (028) 83032923。

井机械参数和水力参数三种,由通用钻速方程形式得知:

$$v_t = \frac{131.27}{5.62^A \times 60^B \times 1.026^C \times e^{1.15D}} W^A \cdot N^B \cdot HEI^C \cdot e^{DfW} \quad (3)$$

式中: v_t 为机械钻速, m/h; A 为钻压指数, 无因次; B 为转速指数, 无因次; C 为地层水力指数, 无因次; W 为比钻压, t/cm; N 为转速, r/min; HEI 为钻头比水功率, kW/cm²; D 为钻井液密度差, g/cm³; H 为平均井深, m。

综合分析结果,除地层岩石客观因素外,钻井高效破岩方法应从三个方面研究:一是机械破岩;二是射流辅助破岩;三是降低井底压差。

旋转钻井高效破岩方法

钻井是油气藏开发中投资大、风险高的工程,钻井工程费用占勘探开发成本的 50% 以上。提高破岩效率是降低成本的最佳途径。

1. 机械高效破岩方法

在旋转钻井中,机械破岩是主导方式,研制适合所钻地层的高效破岩工具是最重要的。

(1) 新型高效钻头。新型钻头(包括牙轮钻头和 PDC 钻头)要适合于岩性变化不大地层和井下动力钻具的应用条件。2001 年休斯克里斯坦森公司生产的 BD536PDC 钻头创造了一次下井钻深 6994 m 的世界纪录;史密斯公司生产 M91P PDC 钻头创造了 202.6 m/h 机械钻速的世界纪录。钻头研制的关键技术是高转速,抗冲击载荷,切削齿和水力系统的创新和改进,并根据油气田特殊地层和钻井方式开发配套的新型钻头。

(2) 旋冲钻具。它是现有旋转钻进和冲击式钻进相结合的一种钻井方式。冲击载荷是一种加速很大的动载荷,其显著特征是作用时间短,岩石接触应力瞬时可达极大值。这时岩石不易产生塑性变形而脆性增加,这种冲击载荷的瞬时作用和应力集中的特性,有利于岩石中裂纹的扩展而形成体积破碎,从而提高破岩效率。对硬地层,研磨性强和硬塑性地层提高机械钻速十分显著。研制的关键技术是能够研制出适应大流量、高泵压和长寿命的冲击器。

2. 射流辅助钻井破岩方法

随着高压水射流技术在钻井工程中的应用,如喷射钻井技术使钻井速度翻番。射流辅助钻井破岩的关键技术是产生高效射流的方法。

(1) 井下增压器(泵)。美国 S. D. Veenhuizen 等

人率先把高压泵送到井下,紧靠钻头上。通过井下高压泵增压高达 100 MPa 以上的超高压射流,在 90 年代末进行了两次井下现场实验,机械钻速提高 2 倍左右,每次下井工作最多 50 h 就失效。中国石油天然气集团公司勘探开发研究院经过近十年的研究,在室内实验研究中取得了突破性进展,主要难点是寿命问题。但这项技术始终是钻井高效破岩的一个重要研究和发展方向。研制的关键技术是增压结构与使用寿命有效配合的井下超高压泵。

(2) 井下它激增压装置。这种装置是利用井下环空流体的液柱压力作为激励源,实现井下它激振荡增压。当具有一定速度的流体流入共振腔室后,在腔室的上游区域由于紊动射流的强烈卷吸,加上环空流体引入的激励扰动作用。若它激扰动波与自激扰动波有合适的相位关系或激励振荡频率与自激振荡频率匹配就形成它激振荡增压。由此可见,实现井下它激振荡增压主要依靠三种作用方式:①射流的卷吸作用;②共振腔反馈负压区的形成作用;③环空流体压力的它激作用。用自己设计的井下它激增压装置的初步实验结果表明,它激振荡装置射流的动压力比自激振荡射流的动压力提高 2 倍。增压方法先进,结构简单。研制的关键技术是共振腔室结构参数和流体参数有效配合的装置设计。

3. 降低井底压差提高破岩效率的方法

降低井底压差就是钻井过程中的环空液柱压力小于地层孔隙流体压力。这样就消除了由于压差作用增加了岩石的强度和塑性,以及岩屑的“压持效应”,从而提高破岩工具吃入和剪切切削岩石的效率,提高了机械钻速。

(1) 欠平衡钻井技术。欠平衡钻井技术是采用井筒负压的钻井技术,是降压差提高机械钻速最有效的方法。但它需要附加配套的设备,成本较高,所以仅广泛用于低压低渗透油气层井段的保护,全井采用较少。

(2) 水力脉冲装置。这种吸入式压力脉冲装置^[4]是在钻头上,井底局部产生负压。利用钻井液作为驱动力带动井下马达,可产生较大的动能,用一个循环阀使流动瞬时中断,井底局部产生一个吸入压力脉冲降低井底压差。这个井底负压流场就改变了岩石的破碎力学性质,降低了岩石强度,高速排除井底岩屑,瞬时脉冲射流起到了较大的辅助破岩作用,提高了机械钻速。研制的关键技术是装置循环阀和运动部件的寿命,以及大流量脉冲频率的控制技术。这种装置目前有几种结构在研究中。

新型钻井破岩方法

由于现有旋转钻井方式在提高机械钻速的能力方面是有限的,全新的钻井破岩方法打破了常规旋转钻井破岩方式。研究工作者提出了全新的钻井破岩方法。

1. 激光钻井破岩新方法

激光是60年代迅速发展起来的一项新兴技术,在工业、国防等领域的应用日益显示其优越性。1997年开始,美国天然气研究所与美国国防部合作,把激光技术应用于钻井破岩的可行性、成本、利益及环境影响进行了探讨。随后进行了专项研究^[5],项目由天然气研究所负责管理,由科罗拉多矿业学院主承包,参加单位有美国空军和陆军、麻省理工学院、雷克伍德工程公司和菲利普斯石油公司。主要研究目标有五个:①确定从激光技术中可获取的数据量;②评价应用激光技术进行钻井和完井的可能性和局限性;③确定需要解决的激光钻井研究领域;④定量评价激光钻井所能得到的好处,如提高机械钻速,减少钻井装置日费,降低套管要求及提高安全性和经济效益等;⑤弄清激光—岩石—流体之间相互作用的实验研究。

实验取得了鼓舞人心的结果,用六种岩石进行了100多块岩石样品的激光穿透实验,激光能穿透所有类型的岩石。研究的关键技术是激光器功率发生、效率和传输能力。

2. 电热能钻井新方法

俄罗斯采用热熔法^[6]用特殊材料做成的高温“钻头”压在井底岩石表面,通过热作用使岩石成分的团聚状态发生改变,导致其岩石熔化。热熔法钻井过程的效果主要取决于岩石的温度和热物理性质。圣彼得堡矿业学院用新型耐热合成材料制成的高温“钻头”,在砂岩钻孔模拟实验中取得了突破性

进展。岩石在高温熔流下发生破碎的机理是一个比较复杂、有待于深入研究的热动力效应问题。研究的关键技术是热动力效应——岩石和特殊钻头的研制。

结 论

(1)旋转钻井方式下,影响机械钻速的主要因素是地层岩石的物理力学性质、矿物成分、机械参数、水力参数和井底压降五个方面。

(2)旋转钻井高效破岩的方法是机械破岩、射流辅助破岩和降低井底压差的有效配合。

(3)开展钻井特殊地层段岩石物理力学性质研究,岩石矿物成分鉴定分析,以及岩石—射流—破岩相互作用关系研究是旋转钻井高效破岩的重要研究内容。

(4)激光钻井和电热能钻井新方法是改变钻井高效破岩方法的研究与发展方向。

参 考 文 献

- 1 张先普等. 石油钻井岩石破碎标准岩样选择. 西南石油学院学报, 1990;12(3)
- 2 李培超等. 地下各种压力之间的关系式的修正. 岩石力学与工程学报, 2002;21(10)
- 3 Xiong Jiyou, Liao Rongqing. A study on resistance of standard rock to scouring rock chushing by nozzle jet in oil drilling, the international symposium on rock mechanics and environmental geotechnology. Chongqing. 1997
- 4 美国专利: U. S. 6237701. 1998
- 5 Gahan B C *et al.* Laser drilling: determination of energy required to remove rock. SPE 71466
- 6 鄢泰宁等. 俄罗斯电热能钻井、固井和地层压裂方法的应用. 国外油田工程, 2003;19(2)

(收稿日期 2003-09-28 编辑 钟水清)