

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.201406010

油气钻井组合式破岩技术研究

张正禄^{1,2}, 刘运荣^{1,2}, 胡琼^{1,2}, 任小玲^{1,2}

(1. 中石化石油机械装备重点实验室, 湖北武汉 430070; 2. 中石化石油工程机械有限公司石油机械研究院, 湖北武汉 430070)

摘要:为了提高钻井效率,对油气钻井组合式破岩技术进行了深入研究,摩擦热-机械破岩、微波-机械破岩、激光-气体机械破岩等新型组合破岩技术较常规机械破岩方法能明显提高破岩效率,但也有各种技术瓶颈需要突破,距工业化应用还存在一定距离,机械破岩仍是高效破岩的主体。在研究岩石热物理特性、空气钻井装备工具、高温材料等的基础上,提出燃烧热能-机械能综合破岩方法是最有发展前景的新型破岩方法。采用燃烧热能-机械能综合破岩,双壁钻杆及双通道水龙头提供燃料通道,耐热材料用于研制高温钻头,高温造壁器将破岩形成的井眼井壁玻璃化,可实现深井和超深井钻井,并保护储层。

关键词:破岩方法 机械破岩 热能 岩石强度 燃烧热能

中图分类号:TE122.14 文献标识码:A 文章编号:1001-0890(2014)06-0049-04

Integrated Rock-Breaking Methods in Well Drilling

Zhang Zhenglu^{1,2}, Liu Yunrong^{1,2}, Hu Qiong^{1,2}, Ren Xiaoling^{1,2}

(1. Sinopec Key Laboratory of Petroleum Mechanical Equipment, Wuhan, Hubei, 430070, China; 2. Institute of Sinopec Oilfield Equipment Corporation, Wuhan, Hubei, 430070, China)

Abstract: This paper introduces integrated rock-breaking methods, such as frictional heat-mechanical, microwave-mechanical, and laser-gas rock-breaking, which are more efficient compared to conventional rock breaking methods. Due to technical bottlenecks of each method, they are not ready for industrial application, so mechanical rock-breaking is still the principle method at present. Based on the research on the present development of thermal properties of rock, air drilling equipment and heat-resistant materials, the author considered thermal-mechanical rock-breaking method would be the most promising approach. In this method, fuel could be provided through dual-wall drill pipe and swivel, and high-temperature bit could be produced from heat-resistant material. High temperature can vitrify the borehole wall in deep and super deep well drilling, and protect reservoirs.

Key words: rock-breaking method; mechanical rock-breaking; thermal energy; rock strength; heating power

破岩技术是矿业、土木、交通和军事等行业工程领域的核心技术,其中对钻井破岩技术的研究一直围绕“优、快、省”和“健康、安全、环境”展开。20世纪80年代以来,针对常规机械破岩方式存在机械磨损严重、提高破岩效率能力有限的缺点,在完善机械破岩方法的同时,探索了一些破岩新方法^[1],包括激光破岩、等离子通道钻井破岩和电热熔破岩等热能破岩方法及综合破岩方法。

笔者重点研究了机械能组合破岩、摩擦热-机械破岩、微波-机械破岩、激光-气体机械破岩等组合破岩方法的技术研究现状,并根据热作用对岩石性能的影响提出了燃烧热能-机械破岩技术,从岩石热物理特性、空气钻井装备工具、高温材料研究现状等方面分析了其可行性和需要解决的关键问题。

1 机械能组合破岩方法

机械能破岩是利用地面设备和/或井下动力钻具产生的能量来破碎岩石,破岩效率受地层岩石性质、钻井方式、钻井工艺参数、破岩工具等的影响,需要合理优化组合地面设备和井下动力钻具,有效利用机械能量破岩。

收稿日期:2013-08-21;改回日期:2014-07-26。

作者简介:张正禄(1965—),男,四川成都人,1986年毕业于西南石油学院钻井工程专业,高级工程师,主要从事油气钻井新技术研究和新产品开发工作。

联系方式:(027)52307627,1556034483@qq.com。

基金项目:中国石化集团基础前瞻性项目“井壁陶瓷化钻井技术可行性研究”(编号:JP13051)资助。

通常,在岩石性能、钻井方式确定的条件下,破岩能力增强,破岩效率提高。为提高机械钻速,在常规破岩方法的基础上增加了辅助破岩能量,如水力辅助破岩技术(如高压喷射、超高压喷射技术、脉冲射流技术等)^[2-4]、旋冲钻井技术^[5]、共振钻井技术^[6]、粒子冲击钻井^[7]、脉冲水炮技术等。水力辅助机械能破岩的实质是增加井底能量辅助破岩和改善清岩效果,与该技术配套研发了射流式井底增压装置和新型双流道高效破岩钻头,并已在现场推广应用。冲击旋转钻井是在普通旋转钻头上部接一个冲击器,为钻头提供冲击力来破碎岩石。在冲击作用下,岩石不易产生塑性变形,表现为脆性增加,岩石易形成大体积破碎,提高破岩速度。共振破岩是通过调节破岩工具冲击频率,使其与正钻地层裂缝传播的“自然频率”基本相同,以实现高效破岩的目的。

此外,可以利用井底降压工具(如涡流降压工具、脉冲降压工具和射流泵降压工具等)降低井底压力,从而减少岩屑的压持效应和重复破裂,尽量实现井底欠平衡条件,提高机械破岩效率^[8-10]。

2 摩擦热-机械破岩方法

摩擦热-机械破岩(简称热-机械破岩)方法是利用机械破岩过程中切削元件与岩石摩擦产生的摩擦热能和冲洗液流经岩石时的骤冷作用在岩石表面和内部生成新裂隙,同时扩展原有裂隙,从而降低岩石的强度和切削阻力,提高破岩效率。

采用的热机钻头主要包括热摩擦元件和硬质合金切削元件,两者均匀分布在钻头底部(见图 1)。

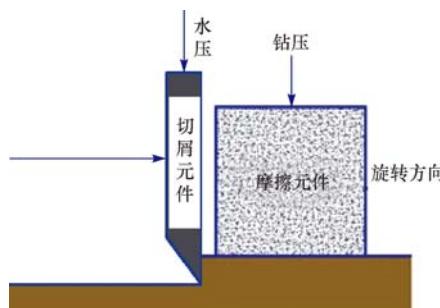


图 1 热-机械破岩机理示意

Fig. 1 Sketch of rock-breaking mechanism by thermal-mechanical energy

钻进时,摩擦过程与切削过程相对独立。摩擦元件经由钻杆传递钻机的立轴压力进行摩擦生热,将岩石加热至 600 ℃以上,以降低岩石强度;切削元件的压力来自冲洗液作用在堵头上所形成的水泵压

力^[11]。冲洗液经由水龙头、钻杆水眼流入热机钻具外管,经由内外管之间的环形空间最终流到井底,起到冷却和弱化岩石、冷却钻头和携带岩屑的作用。

俄罗斯全俄勘探技术研究所现已解决了如何产生摩擦热能和耐磨、耐高温材料等问题,成功设计了一系列取心式热机钻头和全面破碎热机钻头等,形成了热机碎岩工艺技术。采用常规钻机、热机钻具、热机钻头和可钻性级值为 6 的岩石进行热机破岩试验,结果表明,钻进过程中平均机械钻速 1.7 m/h,最高钻速达 3.0 m/h。该研究所将该破岩工艺应用到钢筋混凝土结构的钻孔工程中,取得了很好的效果。

热-机械破岩技术大幅度提高了硬质合金或金刚石钻头的碎岩速度,扩大了可钻性范围,可以广泛应用于地质钻探、油气井钻探以及坑道、隧道掘进等领域。其下一步研究的重点是优选钻头摩擦元件和切削元件的材料、完善钻具结构、探索钻进不同岩层时的热-机械破岩工艺^[12]。

3 微波-机械破岩方法

微波-机械破岩是利用微波加热岩体,改变其物理热性,降低岩石强度。为验证微波对岩石强度的影响,加拿大麦吉尔大学采用加州玄武岩、佛蒙特州花岗岩、萨德伯里苏长岩、中国玄武岩 4 种岩样进行了试验。试验过程中能明显观察到岩样在微波作用下出现裂缝甚至融化(见图 2)。试验结果证明,微波作用后的岩石抗拉强度和无侧限抗压强度均有所降低,降低程度和降低速率取决于微波功率的大小、岩石与微波的接触时间和岩石的微波功率吸收密度等因素^[13]。



图 2 微波作用下岩石熔化情况

Fig. 2 Rock melting under the microwave

微波-机械破岩中采用的旋转切割钻头主要包括切削齿和微波发生器(见图 3),2 组以上切削齿和微波发生器均布在钻头底部,微波发生器主要由变压器和磁控管等组成。在微波辅助破岩钻进中,微波发生器通电,变压器升高电压,磁控管产生一定频率的微波。岩体经微波作用后,内部偶极子部排列无序且做布朗运动,产生的内摩擦热使岩石温度迅

速升高,产生内应力使岩体强度下降^[14]。随后,钻头切削齿对岩石进一步破坏,钻井液将岩石颗粒及时地冲离岩体。

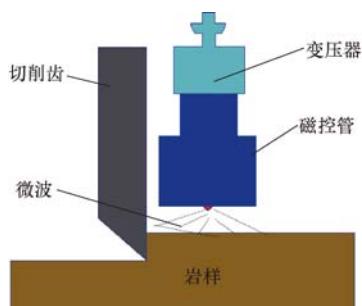


图 3 微波辅助破岩钻头结构示意

Fig. 3 Sketch of rock-breaking bit with microwave

微波辅助破岩试验结果表明^[15],经微波作用后花岗岩温度达 1 093 ℃,钻进速度是岩体温度为 25 ℃时的 3 倍以上。试验结束后钻头磨损很小,可忽略不计。由于钻头温度保持低温,钻头硬合金刃片的铜焊未发生破坏,所有的钻头均保留良好的工作状态。但对微波破岩技术的经济性还要进一步验证,尚未进行工业化应用。

4 激光-气体机械破岩

激光-气体机械破岩是在空气钻井用钻头的中心轴处设置一个激光头,将气体钻井中岩石内外压差的拉应力、激光照射岩石产生较高的局部热应力和钻头高速冲击力产生的局部应力三者结合,增强岩石裂缝扩展能力,从而提高破岩效率^[16-17]。激光-气体机械钻头如图 4 所示^[18]。

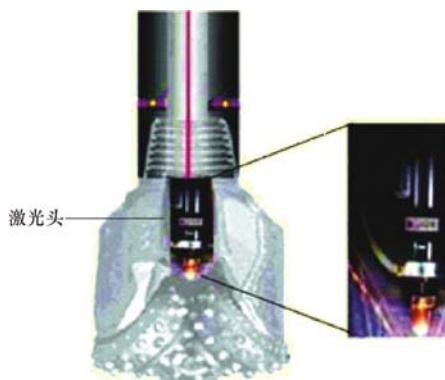


图 4 激光-气体机械钻头

Fig. 4 Laser-aero mechanical bit

在钻进过程中,高能激光在钻头与岩石接触前照射热裂新岩石面,激光照射所产生的温度场可以降低岩石强度,扩展裂缝、干燥及汽化矿物质,再进

行机械能破岩。随后,循环的空气或惰性气体冷却井下激光元件,并将岩石碎屑携带至井口。

激光-气体机械破岩具有机械钻速快、钻头磨损小、钻头寿命长、起下钻时间短等优点,完全适用于气体钻井。为了实现工业化应用,需要研究解决高压差及局部高温下井底岩石特性的变化、高能激光的产生和传输、多激光头-牙轮钻头的研制、激光头的保护与多束激光开闭组合方式等问题。

5 燃烧热能-机械破岩方法

为了提高机械能的破岩效率,提出了摩擦热-机械、微波-机械、激光-气体破岩等综合破岩方法,但都处于探索试验阶段,由于各种原因没有进行工业化应用。目前已进入工业化成熟应用的机械能破岩仍是高效破岩的主要方式。

分析综合破岩方法可知,对于导热系数较小、抗拉强度和抗剪强度较低的岩石,热作用能够在其内部产生较大的温度梯度,形成一定的热冲击力,导致岩石脆性破坏,且大多数岩石随温度的升高其抗压强度呈下降趋势。在激光辅助破岩过程中,热能作用还能使岩石成分的团聚状态发生改变,导致其熔化,形成具有结实孔壁的圆柱形通道,达到造壁的目的。因此,将热能与机械能结合的综合破岩方法,对于提高破岩效率、稳定井壁、保护储层具有积极意义,其技术可行性主要体现在以下方面:

1) 空气钻井技术已趋于成熟。通过地面燃气/助燃气系统、双壁水龙头和双壁钻杆,能够实现向井下特殊高温钻头输送燃气和助燃气,并能将部分岩屑上返至地面,建立安全、有效的循环系统。

2) 耐高温材料已应用于高温钻头。目前合成的耐热材料能耐温 2 500 ℃甚至更高^[19],已成功应用于电热熔钻井,使高温钻头的研制成为可能。

3) 结合火焰焊枪技术,采用钻头内燃烧,燃烧热能-机械能综合破岩的温度为 2 200~2 500 ℃。燃气和助燃气在特殊高温钻头内燃烧产生的高温气流高速喷向岩石,迅速形成井眼。另外,岩石导热系数低,表面温度迅速升高,与更深层的岩石形成较大的温度梯度,产生热破坏,岩石强度下降,甚至热破岩,随后高温钻头切削低强度的岩石,可以提高钻进速度。

4) 结合已有的电热熔造壁技术^[20],可将钻头本体加热至 1 300 ℃。若利用热能,在钻头本体上设置造壁器,高温造壁器紧贴已形成的井眼壁面将其玻璃化,形成坚固、光滑的井壁,井壁稳定,更容易

实现深井和超深井钻井,并且井筒与地层被陶瓷层隔绝,有利于保护储层。

燃烧热能-机械破岩方法需要开展特殊钻头内燃烧机理研究(包括速度场、温度场、燃烧流动过程)、钻头内部绝热冷却技术研究(包括防辐射涂层、高温隔热涂层和气膜冷却技术)、特殊钻头切削齿材料研究、造壁器结构优化及模拟试验研究、陶瓷化井壁保护储层及稳定性试验研究、燃烧热能-机械能复合破岩机理研究、燃烧热能-机械能钻井关键装备研究、钻进时复杂多相流研究以及钻进燃爆危险性研究等。

6 结 论

- 1) 目前,机械破岩仍是高效破岩的主体,为提高破岩效率,多与射流辅助破岩、降低井底压差等技术措施配合使用。
- 2) 摩擦热能-机械、微波-机械、激光-气体等新型综合破岩钻井技术处于探索阶段,室内试验证明其能有效提高破岩效率,但还有各种技术瓶颈需要突破,离推广应用还有一定距离。
- 3) 热能-机械能综合碎岩方法是最有发展前景的新型破岩方法,特别是燃烧热能-机械能综合碎岩方法。目前国内外开展的相关研究较少,需要进一步加强。

参 考 文 献

References

- [1] 王德余,李根生,史怀忠,等.高效破岩新方法进展与应用[J].石油机械,2012,40(6):1-6.
Wang Deyu, Li Gensheng, Shi Huaizhong, et al. Progress of the high-efficiency rock-breaking method[J]. China Petroleum Machinery, 2012, 40(6): 1-6.
- [2] 张海平,索忠伟,陶兴华.液动射流式冲击器结构设计及试验研究[J].石油机械,2011,39(7):1-4.
Zhang Haiping, Suo Zhongwei, Tao Xinghua. The structural design and experimental study of the jet-type hydro-hammer [J]. China Petroleum Machinery, 2011, 39(7): 1-4.
- [3] 辛建华.水力脉冲空化射流技术在非常规钻井中的应用[J].油气藏评价与开发,2012,2(3):70-78.
Xin Jianhua. Application of hydraulic pulse cavitating jet technology in unconventional well drilling[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2012, 2(3): 70-78.
- [4] 付加胜,李根生,史怀忠,等.水力脉冲空化射流钻井技术适应性分析[J].石油钻采工艺,2012,34(5):10-14.
Fu Jiasheng, Li Gensheng, Shi Huaizhong, et al. Analysis on adaptability of hydraulic pulse cavitating jet drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2012, 34(5): 10-14.
- [5] 秦晓庆,刘伟,李丽,等.旋冲钻井技术在川西硬地层的应用[J].断块油气田,2013,20(4):505-507.
Qin Xiaoqing, Liu Wei, Li Li, et al. Application of rotary percussion drilling technology in hard formation of western Sichuan[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2013, 20(4): 505-507.
- [6] 李玮,闫铁,张杨,等.一种共振钻井装置:中国,CN202249765U[P]. 2012-05-30.
Li Wei, Yan Tie, Zhang Yang, et al. A resonant equipment for drilling: China, CN202249765U[P]. 2012-05-30.
- [7] 伍开松,古剑飞,况雨春.粒子冲击钻井技术述评[J].西南石油大学学报:自然科学版,2008,30(2):142-149.
Wu Kaisong, Gu Jianfei, Kuang Yuchun. Comment on particle impact drilling technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2008, 30(2): 142-149.
- [8] 杨宝刚,陈大祺,张伟,等.涡流式水力降低压差机制及现状[J].科技导报,2012,30(23):67-73.
Yang Baogang, Chen Daqi, Zhang Wei, et al. Depressurization mechanism of the vortex methods and its current development status[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(23): 67-73.
- [9] 孙伟良.钻头分流降低井底压力机理的研究[D].北京:中国石油大学(北京)石油工程学院,2012.
Sun Weiliang. Mechanism study on the bottomhole pressure reduction by drilling fluid shunt on bit[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), College of Petroleum Engineering, 2012.
- [10] 袁光宇.射流泵降低井底压差工具研究现状及性能分析[J].石油钻探技术,2012,40(4):76-80.
Yuan Guangyu. Current status of research and performance analysis of depressurization tools for jet pump[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(4): 76-80.
- [11] 赵建康,张祖培,孙友宏,等.摩擦热-机械碎岩技术的研究应用现状及新进展[J].探矿工程:岩土钻掘工程,2001,28(增刊1):166-168.
Zhao Jiankang, Zhang Zupei, Sun Youhong, et al. Research and progress of frictional heat-mechanical energy rock fragmentation technology[J]. Exploration Engineering: Rock & Soil Drilling and Tunneling, 2001, 28 (supplement 1): 166-168.
- [12] 吴景华.摩擦热-机械能联合碎岩理论与工艺的研究与实践[D].长春:吉林大学建设工程学院,2005.
Wu Jinghua. Research and application of friction heat-mechanical energy rock fragmentation theory and technology [D]. Changchun: Jilin University, College of Construction Engineering, 2005.
- [13] Hassani F, Nekoovaght P M, Radziszewski K E, et al. Microwave assisted mechanical rock breaking[R]. ISRM 3791, 2012.
- [14] 李文成,杜雪鹏.微波辅助破岩新技术在非煤矿的应用[J].铜业工程,2010,27(4):1-4.
Li Wencheng, Du Xuepeng. Application of microwave-assisted rock breaking in metalmines[J]. Copper Engineering, 2010, 27(4): 1-4.
- [15] Ferri H, Peter R, Jacques O. Microwave assisted drilling and its influence on rock breaking a view[R]. ISRM 0071, 2008.
- [16] 徐依吉,周长李,钱红彬,等.激光破岩方法研究及在石油钻井中的应用展望[J].石油钻探技术,2010,38(4):129-134.
Xu Yiji, Zhou Changli, Qian Hongbin, et al. The study of laser rock breaking method and its application in well drilling [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(4): 129-134.
- [17] Bazargan M, Madani A, Sharifi H, et al. Utilization of laser in petroleum drilling industry[R]. IPTC 17019, 2013.
- [18] Pooniwala S. Lasers: the next bit[R]. SPE 104223, 2006.
- [19] 肖为宏,汤慧萍.难熔金属材料与工程应用[M].北京:冶金工业出版社,2012:12-20.
Yin Weihong, Tang Huiping. Refractory metal and application [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2012: 12-20.
- [20] 汪晓峰,张祖培,陈晨.热熔钻进新技术[J].岩土工程技术,2002,17(2):123-125.
Wang Xiaofeng, Zhang Zupei, Chen Chen. A new drilling technique-subterrene drills[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2002, 17(2): 123-125.