

新型钻井技术——激光钻井的研究进展

甘云雁 陈 利

(中国石油大学(北京)石油天然气工程学院 北京 102249)

〔摘要〕 回顾了激光钻井的发展历程,综述了国外激光钻井实验室研究现状,包括激光破岩的机理、影响钻井效率的因素、作用后岩石物性的变化以及理想数学模型的建立。在分析激光钻井优缺点的基础上指出了该项技术下一步的研究方向。我国高功率激光技术研究已取得突破性成绩,因而在国内开展激光钻井技术研究前景广阔。

〔关键词〕 钻井 激光 高功率

〔中图分类号〕 TE242.9

〔文献标识码〕 A

〔文章编号〕 1000-7857(2005)03-0037-04

A NEW METHOD OF DRILLING OIL AND GAS WELLS ——LASER DRILLING

GAN Yun-yan CHEN Li

(School of Petroleum & Gas Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

Abstract: The history of the laser drilling was briefly reviewed. And, the present state of the experimental researches in the developed countries, including the mechanism of the laser energy, the factors that affect the drilling efficiency, the change of the rock properties and the numerical model for the laser drilling was summarized. Based on analyzing the advantages and disadvantages of this drilling method, the direction of the further research and its prospects for the research on the laser drilling in China were put forward.

Key Words: drilling, laser, high power

CLC Number: TE242.9

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)03-0037-04

油气钻井作为建立开采地下油气资源通道的唯一手段,在油气勘探开发过程中发挥着举足轻重的作用,它的进步推动着石油工业的发展。

随着钻井深度的不断加大,传统钻井方式的能量利用率越来越低,平均仅有 50%的时间用于钻进,20%的时间却

用于起下钻柱,剩下 30%的时间耗费在下套管和注水泥等其它操作上^[1]。这样就大大降低了油气井钻井质量、速度和效益。为了提高钻井效率、降低钻井成本,最主要的方法之一就是发展快速钻井技术。激光具有以下普通光所不可比拟的特性:(1)亮度极高(即功率密度大),比普通光强 10^6

收稿日期:2004-07-20

作者简介:甘云雁,女,1980~;北京市昌平区府学路中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,硕士研究生,从事油气田开发研究;

E-mail: ganyunyan2004@yahoo.com.cn

张士诚,男,1963~;北京市昌平区府学路中国石油大学(北京)石油天然气工程学院,主要从事油气田开发研究;E-mail:

wzsc@bjpeu.edu.cn

(3) 中型炉耐火试验, WGJ510C2 裸钢梁比 Q235 裸钢梁耐火极限的提高幅度高达 43.5%, WGJ510C2 钢比 Q235 钢的软化温度高出约 100~120℃, 随着防火涂料厚度增加, WGJ510C2 耐火极限增加的优势比 Q235 要明显。标准炉耐火试验的结果也表明, 裸露 WGJ510C2 钢梁的耐火极限比裸露 Q235 钢梁的耐火极限高出 44.4%, 这与中型炉的同类实验结果相当接近。在考虑建筑设计一级防火标准(150min)时, 试验结果表明, 同 Q235 钢相比, 使用 WGJ510C2 钢可以使薄型防火涂料节省 36.5%~50%, 厚型防火涂料可节省 26%。由此可见, 新钢种 WGJ510C2 的实际耐火性能明显优于普通建筑用钢 Q235。

(4) 室内加速循环腐蚀试验的结果表明, 经过 1 800h 加速循环腐蚀以后, WGJ510C2 的腐蚀率为 Q235 钢的 80%、为 Q345 钢的 71%, 即分别减少 20%和 29%。经过武汉 10 个月大气曝晒试验的结果也表明, WGJ510C2 的耐候性

能也明显优于 Q235 和 Q345。

(5) 该钢已成功应用于上海中国残疾人体育艺术培训基地和北京中国国家大剧院两大工程的建造, 且实用效果良好。

参考文献(References)

- [1] 李风, 覃文清. 钢结构防火保护——钢结构防火涂料[A]. 见: 上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C], 2001:60
- [2] 殷李革. 性能设计方法在钢结构建筑防火设计中的应用[A]. 见: 上海钢结构防火技术国际研讨会论文集[C], 2001:94
- [3] 陈晓, 秦晓钟. 高性能压力容器和压力钢管用钢[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999
- [4] 夏茂森, 蔡漳平, 刘江, 等. 塔桅结构用 JT245 耐大气腐蚀钢板的研制开发[A]. 见: 耐蚀金属材料第九届学术年会论文集[C]

(责任编辑 苏 青)

倍,适用于远距离传输,而且能量可在时间和空间上高度集中;(2)单色性好;(3)方向性好,在传播过程中,激光束的光斑很小,发散角可达 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 弧度;(4)相干性好^[2]。正是由于激光的这些特性,人们积极推进激光钻井技术研究,进军未来的钻井领域。

1 激光钻井技术的发展历程

从 20 世纪 60 年代末开始,美国国家科学基金会就启动了探寻高效破岩方法的庞大研究计划,研究了电子束、激光、水射流等 25 种破岩新方法。在中等强度岩石上进行破岩实验,结论表明:激光钻井破岩法是最易于实现且效率较高的方法之一^[3]。

20 世纪 70 年代初,在美国、法国、荷兰曾出现了用激光钻井和射孔的专利文献^[4-6,15]。那时人们对激光钻井的研究大多基于“将岩石矿物完全熔化,直接打出预想大小井眼”的假设上,预计所需能量相当大,加之当时激光技术水平有限,激光功率只有数千瓦,波长较长难以聚焦,成本较高,所以许多人怀疑激光钻井的可行性,甚至直到 1990 年,美国天然气协会仍认为激光钻井不可行^[1]。

随着激光技术的飞速发展,直至 1997 年,美国国会重新关注激光钻井技术并委托美国天然气工业协会、联合美国空军、陆军和科罗拉多矿业大学,提出了一项两年计划,一起探索如何把美国在 20 世纪 80~90 年代用于“星球大战”的激光技术用到石油工业钻井、完井上,此时激光钻井的可行性才得以证实。该阶段试验使用的是美军白沙导弹实验场的中红外高级化学激光器,试验结果表明激光钻井的理论速度可达 137.2m/h,是目前旋转钻井钻速的 100 倍以上^[7],并且证实了早期对激光钻井所需激光功率的计算值远远大于实验值。

1998 年,美国天然气工业协会、联合美国空军、陆军又启动了一项研究“激光钻井”的计划,研究激光钻井与完井,其直接研制产品是一台激光钻机,该计划预计用时 5 年,耗资 600 万美元。近年来,美国菲利普斯公司使用化学氧碘激光发生器进行了现场试验。实验结果表明:激光钻井 10 小时的钻井进尺,需要常规钻井钻 10 天^[8]时间。

2 激光钻井技术的研究成果

2.1 用于激光钻井的激光

美国军方研制的中红外高级化学激光(MIRACL)是用于储层岩石初期试验的第一种兆瓦级激光,其工作波长为 $3.4\mu\text{m}$,功率为 1.6MW^[9]。在接下来的研究中还用到了氧碘激光、二氧化碳激光和钕铝石榴石激光。

O'Brien 等人利用美国空军研制的化学氧碘激光对不同岩心在不同条件下进行了大量实验研究。氧碘激光工作波长为 $1.34\mu\text{m}$ 、功率为 7KW^[9]。它的能量衰竭慢,是一种高质量的激光,能成功地穿越近 50 万 m,与之相比油气井的 4 000~5 000m 就微乎其微了^[7]。该种中波型激光的精确性及波长范围有效地解决了钻井和完井过程中井控、侧钻和定向钻井等问题。

二氧化碳激光工作波长为 $10.6\mu\text{m}$ 、平均功率可达 1MW。可以用连续型和脉冲型两种模式传递能量,其最大的优点在于有较好的稳定性和可靠性^[1]。钕铝石榴石激光工作波长为 $1.06\mu\text{m}$ 、平均功率约为 1.6KW,是大多数实验室

研究所用激光^[10]。

用于激光钻井的激光种类有限,可供选择的还有一氧化碳激光、自由电子激光和氟化物激光等^[1]。

2.2 激光钻井的有关概念

2.2.1 比能

表示移除单位体积岩石所需要的能量(单位: KJ/cm^3),它是比较不同破岩方式效率的标准量之一。可表示为:

$$\text{比能} = \frac{\text{输入能量强度} \times \text{作用时间}}{\text{穿透岩石的深度}} = \frac{\text{输入的能量}(\text{KJ})}{\text{移除岩石的体积}(\text{cm}^3)}$$

2.2.2 岩石流动效率^[11]

用以表示近井地带受伤害的程度。

$$\text{岩石流动效率}(\text{CEF}) = \frac{\text{穿透带的有效渗透率}(K_p)}{\text{未受伤害带的理想渗透率}(K_i)}$$

若: $\text{CEF}=1$, 近井地带未受伤害; $\text{CEF}<1$, 近井地带受到不同程度的伤害; $\text{CEF}>1$, 近井地带得到改善。

2.2.3 二次作用

泛指岩石开始熔化后,所有引起激光作用于岩石能量损失的因素,它包括岩石矿物的重复熔化、井眼内矿物和气体的分解、裂缝的形成等。

2.3 激光钻井破岩机理

岩石的破碎和运移是油气井钻井、完井过程中的重要问题之一。因此研究激光钻井也应首先着眼于激光与岩石作用机理的研究。由于激光具有较强的单色性,其被地面发生器产生后,经光纤束传输至井下,通过井下透镜组聚焦放大后,可形成功率密度极高的光束。当其作用于岩石表面时,一部分能量被岩石吸收,其余都被反射和散射损失了。当岩石内的能量积累到一定程度、温度足够高时,就会发生一系列复杂的物理化学反应,如破碎、分解、熔化、气化等。

激光作用于岩石表面,当其功率较低时,大部分能量用于岩石热膨胀、产生裂缝以及矿物的分解,此时比能值较大。但随功率的增加,移除岩石的激光能量利用率也随之增加,此时比能值逐渐减小。在矿物开始熔化前的那一刻,比能值达到最小。功率继续增加后,由于热量在岩石中的扩散要比岩石从激光束中吸收能量容易得多、快得多,使岩石基质吸收的能量超过了扩散的能量,温度达到矿物熔点,岩石开始熔化,但由于二次作用的影响,比能值将会产生一个飞跃。由图 1 可以看到比能值随激光平均功率的变化关系^[12]。

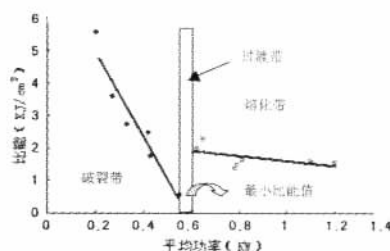


图 1 比能随平均功率变化图

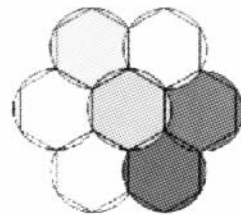


图 2 钻井工程中激光作用于岩石的模式

研究表明:比能值受岩石中石英含量、表面粗糙程度、颜色、颗粒胶结程度、岩性、激光参数等多种因素影响。石英含量越高、颗粒胶结越致密,岩石比能值就越大。不同种类的岩石有不同的一系列激光参数(激光束功率、能量、频率、脉冲宽度、作用时间等),使得比能值亦有所不同。

2.4 影响激光钻井效率的因素

2.4.1 激光类型的影响

激光钻井过程中,激光类型的选定尤为重要。激光发射类型可分为连续型和脉冲型。早期实验结果表明:使用脉冲型激光比连续型激光更能有效地移除岩石^[10]。在激光发射类型、波长、峰值功率、平均功率、强度相同的情况下,随着脉冲宽度和脉冲频率的增加,比能值将减小,但前者较后者对比能值的影响更大^[12]。

2.4.2 激光作用方式的影响

为了钻得预期大小的井眼,激光作用于岩石的模式采用如图 2^[3]所示的六边形,这样尽可能地增大了波及范围,减小了重叠面积,并且其轮廓也近似于圆,为将其用于传输能量至井底奠定了基础。

进一步的研究表明:由于岩心存在各向异性,使得激光水平入射岩心比垂直入射节省能量^[9]。

2.4.3 激光能量的损失

激光的能量除了被岩石吸收,消耗于破碎、熔化、气化岩石外,很大部分能量以反射、散射以及岩石矿物状态变化(熔化、气化、分解)引起的热效应、热膨胀形成裂缝等形式损失掉了。

(1)引起能量损失的两个现象 一是黑体辐射:岩石的温度很高时,自身也将变成辐射源;当岩石的温度超过了热量扩散范围,由于黑体辐射,部分能量将因岩石表面辐射而损失。二是等离子屏障:高功率激光能在岩石表面形成等离子屏障;等离子屏障反射、散射激光能量,从而大大减少了岩石表面所获得的能量^[1]。

(2)二次作用及防止方法 连续型激光或是脉冲频率较高的脉冲型激光作用于岩石时,如果破碎、熔化的岩石不能及时被清理,碳酸盐岩就会二次吸收部分激光能量而受热分解,这样势必加大激光的无效消耗。因此在激光钻井过程中,常用氮气伴随激光共同作用于岩石,防止岩屑回流从而阻隔激光与新鲜岩石作用,减少不必要的能量损失。

除此之外,形成裂缝也是激光能量损失的一种典型形式。研究表明:砂岩较页岩和石灰岩,更易形成裂缝;并且岩石中粘土、石英颗粒的含量越高,岩心的孔隙尺寸越小,就越容易形成裂缝。

2.5 激光作用后岩石物性的变化

激光钻井能使近井地带的孔隙度和渗透率增加。其中砂岩的渗透率变化最大,增加率可达 171%;页岩孔隙度增加幅度最大,作用后其值增加 7 倍。并且激光作用后岩石杨氏模量、体积模量和泊松比都有很大幅度的减小。然而剪切模量和压缩系数却有不同程度的增加。岩石流动效率由传统钻井的 0.65~0.85,增加到了 3.43~3.70^[11]。这些变化与岩石热物性和所含矿物类型相关。在高温下,由于颗粒之间的胶结物发生状态改变,粘土中的水分蒸发,砂岩地层产生裂缝、碳酸盐岩分解等,使得岩石孔隙体积变大、连通性改善,有利于油气的运移^[13]。

2.6 数学模型的建立

在大量实验研究基础上,考虑了激光钻井过程中最基本的热传递和流体的流动(传热、熔化和气化),Bjornaldalen 等人建立了基于以下 9 条假设的数学模型:(1)作用于岩石表面的激光束能量是轴对称分布的,且激光的能量不受传输距离的影响;(2)岩石表面与环境的对流换热取决于界面

的传热系数;(3)岩石表面的辐射热损失满足 Stefan-Boltzman 定律;(4)砂岩在平面上无限大,侧面边界不存在热传递;(5)物质移除以气化形式进行,不考虑熔化喷出;(6)所有的热物性参数与温度无关;(7)激光作用间隔时间足够长,使得产生的等离子屏障在脉冲间隙消失;(8)井眼内熔化流体不流动,流体内的温度分布呈线性变化;(9)激光作用于岩石表面后随即转变成热能,砂岩不能被透射。

该模型将激光与岩石的作用分为预热、熔化和气化 3 个过程,分别建立了能量方程。运用 Crank-Nicholson 方法求解,其中上一时刻和当前时刻的温度值通过隐式迭代方法求解。该数学模型基于很多假设,使得计算值与实际值之间存在差别,如:计算所得井眼直径略小于实际值;比能的计算值比实验值要高。但计算结果与实验结果具有相同的变化趋势,仍可用该数值模型来预测比能、钻速的变化以及熔化层^[14]。

3 激光钻井技术的优点及尚需解决的问题

3.1 激光钻井的优点

激光钻井相对于目前运用最广的旋转钻井具有以下优点:(1)更易穿透岩石,大大增加钻进速度;(2)从地表连续钻进至目的层,免去起下钻柱、更换钻头、打捞卡钻管段、注水泥的施工用时,并且钻进过程中,在井壁形成坚固的陶质层,从而免去了下金属套管的时间;(3)不需要钻头、套管等旋转钻井必不可少的构件和器材,从而大大减少了钻井成本;(4)地表到井底通过光缆连接,因此可运用井下电视或其它形式传感器迅速准确地将井底信息传到地面;(5)由于陶瓷井壁的存在,井内流体不能渗入地层污染周围环境或水源;(6)形成的陶质层井壁阻碍了地层流体流入井内,在一定程度上防止了井喷;(7)由于激光是直线传播的,从而能有效地控制井眼轨迹。

3.2 激光钻井技术尚需解决的问题

虽然激光钻井具有上述优点,但作为一种新型的钻井技术要得到实际的应用,仍有下列问题尚需要进一步研究。

3.2.1 复杂的地层条件

在实验室研究过程中,为了更好地模拟地层情况,研究人员将岩心浸泡在水、盐水、原油和天然气中,并对岩心施加水平、垂直方向的应力进行试验研究。结果表明:激光作用于浸泡在流体中的岩心时,比能值均大于作用于干燥岩心,即流体在激光作用岩石的过程中起到了阻碍作用,使得激光移除单位体积的岩石需要耗费更多的能量。激光作用于浸泡在流体中的岩石时会产生气体。该气体的量及组成也有待研究。虽然地层应力对比能值的大小几乎没有影响,但在地层条件下的应力、热量、流体浸泡三者共同作用下,比能值如何变化,还需进一步研究。由此可见,复杂的地层环境将对激光钻井技术的应用提出严峻的挑战。

3.2.2 井眼的清洗

由于二次作用的存在,为了提高激光能量的利用率,应及时清理堆积在井底的岩屑。如何在不影响钻进速度的条件下清洗岩屑,仍是目前较难解决的技术问题。

3.2.3 异常压力的控制

虽然激光钻井是否钻达油气层可由比能值的变化分辨出,但当钻达油气层或异常高压地层时,地层流体的大量涌入井内很有可能造成井喷。因此,激光钻井必须建立完善的

井控系统。

3.3.4 实验室研究与现场应用的差距

激光钻井技术的实验室研究已经取得了不少成果,但目前试验用岩石大小都在厘米级,激光作用时间也只是秒级,要将研究成果运用于钻井现场,并非只是简单的按比例放大问题。因此激光钻井样机的研制势在必行,然后在实际工程中做进一步的研究和改进,实现实验室成果在实际的工程中应用。

4 结语

激光钻井技术作为一种新型的钻井技术,从起步到现场应用,将是一个逐步完善的过程。虽然国外实验室对激光破岩的研究已经取得了可喜成果,但还只是刚刚起步。旋转钻井经过了百余年的发展,已经拥有了较为成熟的成套技术,如果将激光钻井和旋转钻井有机地结合起来,使其优势互补,也许能更快地促进钻井技术的发展。

尽管我国对激光钻井技术尚未进行系统的研究,但对高功率激光的研究已取得了巨大进展。1987年6月,1012W的高功率脉冲激光系统——“神光-I”装置,在中国科学院上海光学精密机械研究所研制成功。2002年12月,“神光-II”装置通过了国家验收,8束激光输出能量总和为6kJ/(1ns)或10TW(100ps),并有3KJ/(1ns)三倍频激光输出能力,该装置是迄今全国规模最大、世界上也为数不多的高功率钕玻璃激光装置,它的研制成功标志我国高功率激光科研和激光核聚变研究已进入世界先进行列^[16]。如今“神光-III”总体设计和关键技术研究已取得一系列高水平的成果,它将是一项跨世纪的巨型激光工程。与此同时,我国两种高功率连续波化学激光器——3.8 μm 的氟氘激光器和1.315 μm 短波长氯碘激光器的研究均取得突破性进展,达到了当前国际水平^[17]。

激光钻井技术将使钻井技术发生历史性变革,我国的高功率激光系统的研制已走在世界的前列,因此,我们也应尽早开展激光钻井的研究工作,使我国在新一代的钻井技术研究和应用领域占得先机。

(致谢:在本文撰写过程中得到了张士诚教授、邓金根教授和孙为教授的悉心指导,在此表示最真挚的感谢。)

参考文献(References)

[1] Graves R M, Brien D G O. StarWars Laser Technology Applied to Drilling and Completing Gas Wells [A]. In SPE, Annual

Technical Conference and Exhibition[C].New Orleans, Louisiana: SPE, 1998. SPE49259

[2] 周敦忠.光学[M].兰州:兰州大学出版社,1988

[3] Maurer W C. Advanced Drilling Techniques [M]. Tulsa ok: The Petroleum Publishing Company, 1980

[4] Winfield W Salisbury, Walter J Stiles. Earth boring apparatus employing high powered laser [P], PS4066138, 1978

[5] Stout D W. Laser drilling method and system of fossil fuel recovery[P], US 4113036, 1978

[6] Winfield W Salisbury, Walter J Stiles. Method and apparatus for perforation oil and gas well [P], US4199034, 1978

[7] D G O'Brien, R M Graves. StarWars Laser Technology for Gas Drilling and Completions in the 21st Century[A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Houston, Texas: SPE, 1999. SPE56625

[8] 郭永峰. 前景广阔的“激光钻井”[J]. 天然气工业, 2004,1:16

[9] Richard A Parker, Brian C Gahan. Laser Drilling: Effects of Beam Application Methods on Improving Rock Removal [A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Denver, Colorado: SPE, 2003. SPE84353

[10] Ramona M Graves, Anibal Araya. Comparison of Specific Energy Between Drilling With High Power Laser and Other Drilling Methods [A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition[C]. San Antonio, Texas: SPE, 2002. SPE77627

[11] S Batarseh, Brian C Gahan. Well Perforation Using High-Power Lasers [A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Denver, Colorado: SPE, 2003. SPE84418

[12] B C Gahan, Richard A Parker. Laser Drilling: Determination of Energy Required to Remove Rock[A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition [C]. New Orleans, Louisiana: SPE, 2001. SPE71466

[13] Brian C Gahan, Samih Batarseh. Improving Gas Well Drilling And Completion with High-Energy Lasers [A]. GTI Natural Gas Technologies Conference Orlando, Florida, 2002

[14] N Bjorndalen, H A Beihaj. Numerical Investigation of Laser Drilling[A]. In SPE, Annual Technical Conference and Exhibition [C]. Pittsburgh, Pennsylvania: SPE, 2003. SPE84844

[15] 韩常省. 激光钻井技术展望[J]. 西安石油学院学报(自然科学版), 2000,15(2): 38~40

[16] 高功率激光物理国家实验室[J]. 中国激光, 2003,30:600

[17] 范滇元. 中国激光技术发展回顾与展望 [A]. <http://www.33tt.com/article.php/22> 2004-3 (责任编辑 邱夜明)

·封面文字说明·

印度洋海啸给受灾地区造成重大生态破坏

2004年12月26日发生在印度洋海域8.9级大地震引发的强烈海啸,不仅使近30万生灵涂炭,还对印度尼西亚、斯里兰卡、印度、泰国、马来西亚、马尔代夫和孟加拉国等受灾国沿海地区的生态环境造成了巨大的破坏。有关专家实地考察灾区后认为,受灾区的生态环境破坏主要表现在以下4个方面。(1)土壤受损难恢复。海啸掀起的海水涌入沿海城镇、乡村,严重破坏了含有养分的大片表层土壤,这些含盐分极高的耕地将难以恢复耕种。(2)环境污染难治理。海啸还造成了灾区水井和城市水源的严重盐化,掀起的污

浊浪潮四处漫流,而工业与家庭污染物质被冲进水源与土壤中,进一步加重了环境污染。(3)海洋生态遭摧残。海啸使珊瑚礁、红树林和海洋鱼类受到严重摧残,引起了震中周围一些岛屿发生了地形变化,将对当地海洋生态产生负面影响。(4)海洋生物受侵害。以海龟为例,其许多种类最年幼的一代已被海啸带走,几乎所有适合海龟等动物产卵的海滩都消失了。

本期封面图片为印度尼西亚班达亚齐市某海滩受海啸袭击前后的对照图。