

碎裂钻井技术及其在地热钻井中的应用前景分析

白占学, 郑秀华, 于进洋

(中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083)

摘要: 地热资源储量丰富, 分布广泛, 开发前景广阔。但是在现有地热钻井技术条件下进行地热开发的周期长、成本高, 所以亟待钻井技术的突破使巨大的地热资源得到经济有效地开发。碎裂钻井技术是一种采用了新的钻井原理的钻井技术, 其能够有效地解决常规钻井过程中经常遇到的诸如在坚硬地层中进尺慢等棘手问题, 一旦得到商业化应用, 将会对地热资源经济有效地开发产生革命性的影响。在分析常规钻井技术存在的问题的基础上, 介绍了碎裂钻井技术的工作原理及碎岩机理, 阐明了其优缺点, 为该技术在地热钻井中的应用研究提供参考。

关键词: 地热钻井; 碎裂钻井; 井下燃烧器

中图分类号: P634 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2013)02-0081-04

Analysis on the Spallation Drilling Technique and Its Application Prospect in Geothermal Drilling/BAI Zhan-xue, ZHENG Xiu-hua, YU Jin-yang (School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: There are plenty of geothermal resources widely distributing with broad prospects for development. A new principle of drilling has been introduced in spallation drilling; it can resolve the knotty problems such as slow penetration rate often encountered while drilling in hard rocks. As soon as the technology is put in commercial application, it will have revolutionary consequences for the exploitation of geothermal resources. Based on the analysis on the problems in the traditional drilling technology, the working mechanism of spallation drilling is introduced; the advantages and disadvantages are described. It will provide references to the application of spallation drilling in geothermal development.

Key words: geothermal drilling; spallation drilling; flame-jet spallation device

0 引言

多年来, 世界上 95% 以上的钻探(井)工程都是采用硬质合金钻进、金刚石钻进、牙轮钻进等常规的机械碎岩钻井方法^[1]。这些方法在钻进地热井时主要有以下 2 个缺点:

(1) 进尺慢。常规钻井方法在钻进油气钻井中常遇到的松散、沉积地层时常表现良好, 进尺速度能达到 30 m/h, 然而在钻遇花岗岩、铁燧岩等坚硬岩层时, 进尺速度就会明显降低^[2]。

(2) 费用高。采用常规的旋转钻井方法钻进地热井时, 所需费用至少是石油井的 2~4 倍, 占地热开发总成本费用的 30%~60%, 而且随着深度的增加, 所需费用会显著地而且是非线性的增长。以美国数据为例, 地热井花费随深度成指数形式增长, 这正是由于进尺速度慢和频繁的更换钻头所致, 如图 1 所示^[3~6]。

尤其是对于井深超过 4000 m 的中低温地热资源的钻井, 采用常规钻井方式的钻井周期长、成本高的缺点显得更加明显, 这就在一定程度上限制了地

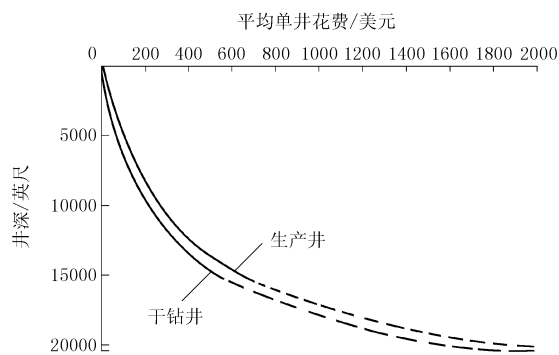


图 1 钻井费用随深度变化曲线

热资源的开发利用。随着技术的进步, 当前已出现了非传统的利用物理场能量来破碎岩石的新方法, 并进入了可实施阶段, 碎裂钻井技术就是其中之一。预计在不远的将来, 这类非传统的钻井方法将得到广泛的应用, 并成功的降低地热井的钻井成本。

1 碎裂钻井技术

碎裂钻井是采用高温火焰迅速加热井底岩体局部表面, 使其因热膨胀而碎裂成薄片并脱离母岩的

收稿日期: 2012-11-01; 修回日期: 2013-01-30

作者简介: 白占学(1986-), 男(汉族), 河北沧州人, 中国地质大学(北京)工程技术学院在读硕士, 地质工程专业, 主要学习与研究方向为地热资源的勘探与开发, 北京市海淀区学院路 29 号, laobai0726@163.com。

一种新的钻井技术。表1^[7]对碎裂钻井技术和常规钻井技术进行了比较。

表1 碎裂钻井与常规钻井的比较

钻井方式	能量传输	岩石破碎	岩屑清理	井控	井底稳定性的维持	井眼保护
常规钻井	在钻机驱动下,通过转盘、钻柱等的旋转将能量传递到井底	通过牙轮或切削钻头破碎井底岩石	(1) 钻井泥浆; (2) 压缩空气	防喷器和泥浆自重	(1) 泥浆的静水压力; (2) 化学处理剂	钢套管并水泥固井
碎裂钻井	主要是化学制品(燃料剂和氧化剂)	在较大的温差和不均匀膨胀作用下破碎岩石	(1) 燃烧作用; (2) 压缩空气	防喷器	无	同上

经研究证明,在诸如花岗岩等坚硬地层钻进时,采用碎裂钻井技术的进尺速度是采用常规钻井技术的5~10倍。美国洛斯阿拉莫斯国家实验室于1985年在新墨西哥州的芬顿山地区的花岗岩地层进行了试验,试验结果显示,采用碎裂钻井技术钻井的进尺速度为6~7.5 m/h,而采用常规钻井技术钻井的进尺速度则只有1.2~3 m/h。

而且,由于碎裂钻井中的井下燃烧器在钻井过程中并没有与井底岩层接触,因此避免了因摩擦而造成的损坏,减少了更换井下设备的时间,进而缩短了钻井周期并大幅度减少了钻井费用。

井下燃烧器是碎裂钻井系统的最重要的设备。上部设备通过管线给位于钻柱下端的井下燃烧器输送燃料、氧化剂以及冷却水等,使其能够顺利工作。产生的岩石碎屑和燃烧产物一起被清除出井眼,必要时需注入压缩空气来辅助清理孔底杂物。

2 井下燃烧器结构分析

碎裂钻井系统中的井下燃烧器就像是一个喷气发动机,在其内部产生的高温火焰流高速地喷出并作用于井底岩石。井底表层岩石在高温高速火焰流的作用下发生碎裂,其发生碎裂的原因主要有以下2点:(1)井底表面岩石与更深层的岩石之间存在较大的温度差,从而引起井底表层岩石产生裂隙进而碎裂成碎片;(2)由于组成井底岩石的不同矿物的热膨胀系数不同,因此在温度变化时,不同矿物的尺寸变化也不同,从而导致井底岩石产生了破碎。现有的一种典型的井下燃烧器的结构如图2所示。

图2为燃烧器在井底工作时的示意图。燃料和氧气分别通过各自的管道进入燃烧室接触燃烧,产生的火焰流高速的通过燃烧室的下端喷嘴处,并作用于井底中心的作用点位置。在火焰流的作用下,井底表层岩石温度在短时间内迅速升高,到达一定值后发生碎裂,产生的碎片猛烈的脱离母体岩石。冷却水通过管道被送入井底并从出口处排出,对岩石碎片和燃烧剩余物加以冷却,使其降低到安全的温度并随钻井流体一起排出井口。

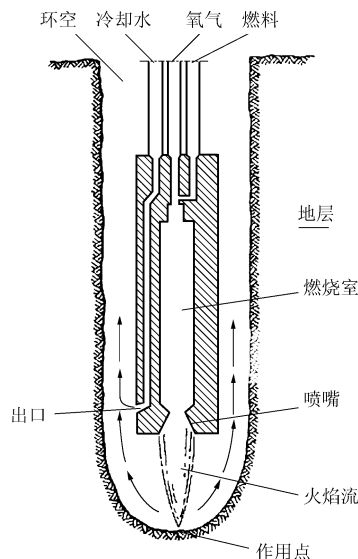


图2 井下燃烧器剖面示意图

但是,由于现有井下燃烧器只能产生单一火焰流,导致碎裂岩石所需能量全部来源于此,所以工作时容易造成作用点处温度过高,进而产生一些不利影响;另外,在钻进深井时,井底压力往往比较大,现有井下燃烧器难以平衡过大的井底压力,容易造成井下事故。波特等人对其进行了改进,设计了如图3所示的井下燃烧器^[8]。

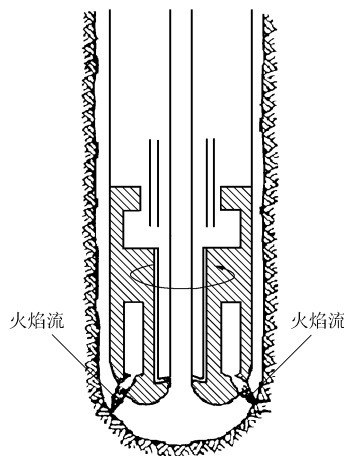


图3 改进后的井下燃烧器的剖面示意图

这种新的设计主要有以下几处改进:其一,燃烧室中有一个中空的中心轴;其二,环绕中心轴有多个

喷嘴,而不是原有设计中的一个喷嘴;其三,有多个冷却水通道,与喷嘴形成一一对应的关系;其四,喷嘴和燃烧室均可以绕轴旋转;其五,在外围加装了封隔器等设备,以便能较好地控制井底压力情况。

3 碎岩机理研究

多年来,陆续有人对碎裂钻井的碎岩机理进行了研究。其中,普雷斯頓是第一个比较完整的描述了碎裂钻井碎岩机理的人。他提出了碎裂发生的2个基本条件:(1)被加热的面积必须足够小,以便造成较大的温度梯度;(2)被加热区域温度升高的速度要足够快,以便使被加热区域在应力释放前能够达到足够高的温度。碎裂钻井的井底碎岩过程如图4所示^[9]。

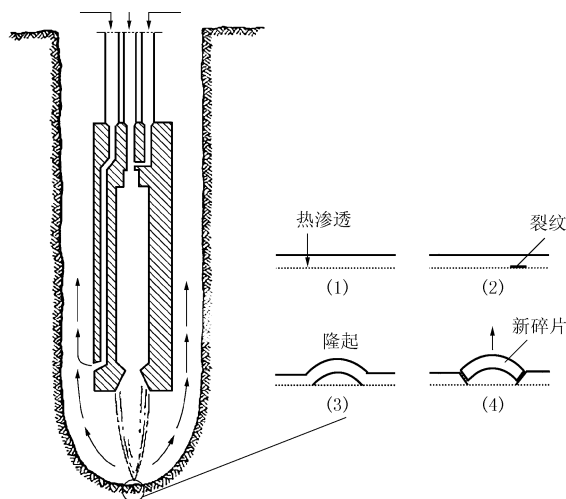


图4 井底碎岩过程示意图

对井底岩石表层的局部迅速进行加热导致了应力集中,这些因热膨胀而产生的应力作用于靠近井底岩层表面的微小裂隙处,使裂隙沿着平行井底岩层表面的方向发展,形成附着于岩层表面的薄片并逐渐隆起,到达一定程度后应力会突然释放,导致薄片迅速地弹出岩层表面。

以普雷斯頓等人的研究为基础,特斯特等人提出了一套解释碎裂钻井的理论。如果假定受热岩石为半无限体,平行于岩石表面的压应力(σ_{xx} 和 σ_{yy})随温度的升高成正比例的变化,如下式所示:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \beta_r E \Delta T / (1 - \nu) \quad (1)$$

式中: β_r ——岩石的线性膨胀系数; E ——岩石的线性模量; ΔT ——温度变化量; ν ——泊松比。

但是式(1)只是对岩石压应力进行了研究,并没有给出岩石产生碎裂时的关键条件。韦伯指出井底表层岩石的碎裂破坏受微小裂隙的分布、作用于裂隙处的应力大小、应力作用面的面积等多种条件

的影响。他提出的累积失效概率分布公式为:

$$G(\sigma) = 1.0 - \exp\left[-\int_0^V \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m dV\right] \quad (2)$$

式中: σ ——岩石中的压应力; σ_0 ——岩石抗压强度; m ——均匀因数; V ——应力作用下的样品体积。

系数 σ_0 和 m 依岩石样品而定,必须通过实验得出。

特斯特等人对韦伯统计理论进行了进一步的研究,这套新的理论基于以下几个主要假定:

(1)碎片都是在压应力作用下通过相同的机理形成的;

(2)热扩散只是进入到岩层表面以下很短的距离,因此热应力状态不受钻孔形状的影响;

(3)传统的板梁弯曲理论可以用来描述碎片剥离母岩时的状态;

(4)韦伯分布描述了碎片的岩石强度的多种多样的变化。

为了确定公式(2)中的压应力,需要知道应力分布情况。而要想根据公式(1)确定应力分布情况,必须先确定岩石表面的温度曲线。温度场由下式确定:

$$k_r \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -u_r \frac{\partial T}{\partial x} (\rho C_p)_r \quad (3)$$

式中: k_r ——岩石热传导率; u_r ——钻进速度; $(\rho C_p)_r$ ——岩石的容积热容量。

碎裂发生时,假定表面温度为 T_s ,整理式(3)则可得:

$$T = (T_s - T_{i0}) \exp(-u_r x / \alpha_r) + T_{i0} \quad (4)$$

式中: T_{i0} ——当 x 无穷大时,岩石的温度; α_r ——岩石的热扩散系数, $\alpha_r = k_r / (\rho C_p)_r$ 。

碎片在脱离母体前可近似地认为是一个底面半径为 $C_L x / 2$ 的锥形,所以碎片体积的变化可转化为碎片厚度的变化,有:

$$dV = (1/3) \pi (C_L x / 2)^2 dx \quad (5)$$

式中: C_L ——碎片的纵横比(直径/厚度); x ——碎片顶端距母体岩石表层的距离。

应力分布 σ_s 可由式(1)求得, $\Delta T = T - T_{i0}$ 可由式(4)得到, G 可取为0.5。则式(2)变为:

$$0.693 = \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_0}\right)^m \frac{\pi C_L^2}{4} \int_0^\infty x^2 \exp\left(-\frac{m u_r}{\alpha_r} x\right) dx \quad (6)$$

岩石表面的热通量 Q_r 可由式(4)求得:

$$Q_r = -k_r \left(\frac{dT}{dx}\right)_{x=0} = (\rho C_p)_r u_r (T_s - T_{i0}) \quad (7)$$

联立式(6)和式(7),可得以下热通量公式:

$$Q_r = (\rho C_p)_r \left(\frac{1-v}{\beta E} \right) \sigma_0 \left(\frac{2 \times 0.693}{\pi C_L^2} \right)^{\frac{1}{m}} \left(\frac{m u_r}{\alpha_r} \right)^{\frac{1}{m}} u_r \quad (8)$$

同样的,联立式(7)和式(8)可得出岩石表面碎裂时的温度:

$$T_s = T_{i0} + \left\{ \left(\frac{Q}{\rho C_p} \right)_r^3 \left[\frac{(1-v)\sigma_0}{\beta E} \right]^m \cdot \frac{2 \times 0.693}{\pi C_L^2} \cdot \left(\frac{m}{\alpha_r} \right)^3 \right\}^{\frac{1}{m+3}} \quad (9)$$

如果已知了岩石特性,可根据式(7)~(9)求得相应的参数。但是必须假定纵横比 C_L 。对于大多数碎片来说, C_L 的值在 8~15 之间。特斯特等人根据式(8)估算出的岩石碎裂时的温度一般在 400~550 °C 之间^[10]。

4 碎裂钻井优缺点

4.1 优点

(1)进尺快。当钻进诸如花岗岩的坚硬地层时,预测进尺速度能达到 100 ft/h (30.5 m/h)。布朗工程公司于 1985 年在花岗岩地层钻探了一口超过 1000 ft (305 m/h) 深的井,平均进尺速度达到了 52 ft/h (15.86 m/h)。而如果采用牙轮钻头钻进芬顿山地区的花岗岩地层时,最大进尺速度只有 12 ft/h (3.66 m/h)。

(2)设备磨损少。由于井下燃烧器并没有与井底岩层直接接触,所以磨损少,相比于常规钻井方式中钻头的使用寿命,井下燃烧器的寿命要长。同时由于钻杆柱没有旋转,所以也减少了对钻杆的磨损,延长了钻杆的使用寿命。

(3)能够灵活地改变孔径大小。用碎裂钻井方法钻井,不同的进尺速度产生不同的孔径,可以通过改变进尺速度的大小来改变孔径的大小。

(4)控制井斜。由于碎裂钻井的钻杆柱不需要旋转,所以减少了井下设备与井壁间的直接接触,而且井下燃烧器承受的上部压力小,进而减少了井斜现象的发生。

4.2 缺点

(1)适用范围有限,受地层条件限制。目前,碎裂钻井技术还只是在针对气体环境的研究试验中取得了比较好的效果。在液体环境中试验碎裂钻井方法时,首要的任务也应该是排出井下液体对火焰流的干扰,而且尚没有非常有效地解决办法,应是一个重要的研究方向。

(2)燃烧器结构复杂。井下燃烧器中输送燃料、氧化剂、冷却水的通道应相互独立,这就使得燃烧器的结构比较复杂。

(3)容易发生井下着火现象。在有些井中,井中会含有烃类等易燃气体。在这种状况下,即使是常规钻井方法也容易造成井下着火现象,而碎裂钻井发生井下着火现象的可能性更大。一旦发生井下着火现象,会对井下设备造成损坏。

(4)钻井效果受岩石类型影响明显。目前碎裂钻井技术只是在诸如花岗岩等坚硬地层取得了较好的效果。虽然研究人员正努力使碎裂钻井技术适用于更多岩石类型,但是适用范围的局限性仍是限制碎裂钻井技术广泛应用的重要原因。整体来讲,具有较低的导热系数和较高的热膨胀率的岩石比较适合采用碎裂钻井方法。

5 结语

就目前来讲,碎裂钻井技术尚不成熟,而且试验显示在适用范围方面仍有很大的局限性,即目前它只是在花岗岩、铁燧岩等坚硬的结晶质岩石地层体现出了明显的优越性。但是这并不妨碍碎裂钻井技术有广泛的应用前景。据勘查资料所知,大量的地热资源蕴藏于坚硬地层中,采用常规钻井技术很难使其得到经济有效地开发。随着技术的进步,总有一天碎裂钻井技术会在技术成熟度、适用范围等方面有较大的突破,并对经济有效地开发地热资源产生深远的影响。

参考文献:

- [1] 鄢泰宁,丁祥发,李邵军. 非传统钻进方法——热能碎岩的原理及其初步实践[J]. 探矿工程, 1999, (3): 39-41.
- [2] Armstead, H. C. H. and J. W. Tester. Heat Mining[M]. London: E. F. N. Spon, 1987.
- [3] 李敦宝,周韶光. 地热生产井钻井技术[J]. 国外地质勘探技术, 1982, (4): 4-9.
- [4] J. W. Tester, et al. The Future of Geothermal Energy[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006: 189-190.
- [5] J. W. Tester, et al. Economic Predictions for Heat Mining: A Review and Analysis of Hot Dry Rock (HDR)[R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- [6] M. M. Newsom, et al. The Terra-Drill Program[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1976.
- [7] K. G. Pierce, et al. Advanced Drilling Systems Study[R]. Albuquerque: Sandia National Laboratory, 1996.
- [8] Robert M. Potter, et al. Continuous Drilling of Vertical Boreholes by Thermal Processes: Including Rock Spallation and Fusion[P]. United States Patent No. 5,771,984, Jun 1998.
- [9] Tobias Rothenfluh. Spallation Drilling for Deep Heat Mining[R]. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2007: 7-8.
- [10] Chad R. Augustine, et al. Hydrothermal Spallation Drilling and Advanced Energy Conversion Technologies for Engineered Geothermal Systems[D]. Cambridge: Department of Chemical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2009: 25-33.