

# 干热岩钻探井控技术研究

张德龙, 翁炜, 贾军, 黄玉文, 冯美贵

北京探矿工程研究所, 北京 100083

**摘要** 干热岩地层通常为火成岩, 地层可钻性差、温度高, 钻探过程中容易发生漏失、井喷、井涌等事故。中国干热岩钻探井控技术及装备略显不足。为满足干热岩钻探高温井控需要, 保障施工安全, 分析了干热岩钻探地层温度、压力与井喷的关系。针对干热岩钻探特点, 设计了旋转防喷器及配套控制系统, 该旋转防喷器具有结构简单、耐高温、高转速、操作简单等特点。应用该旋转防喷器可有效改善干热岩钻探工作环境, 降低钻探风险, 确保施工安全。

**关键词** 干热岩钻探; 高温井控; 旋转防喷器; 控制系统

**中图分类号** P634

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.006

## Well control techniques in hot dry rock drilling

ZHANG Delong, WENG Wei, JIA Jun, HUANG Yuwen, FENG Meigui

Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China

**Abstract** Hot dry rock formations are usually igneous rock with poor drillability and high temperature. Circulation loss, blowout, well kick and other drilling accidents occur frequently in hot dry rock drilling. Domestic well control techniques and equipment cannot meet the requirement of hot dry rock drilling. To satisfy the need of high-temperature well control and guarantee construction safety, this paper analyzes the relationship between the formation temperature, pressure and blowout and designs a high-speed rotary blowout preventer and control system with simple structure and high-temperature capacity, which can improve the drilling efficiency and reduce drilling risks.

**Keywords** hot dry rock drilling; high-temperature well control; rotary blowout preventer; operating system

随着中国高温地热资源开发工作的不断推进, 干热岩资源开发逐渐提上日程。在干热岩钻探过程中, 地层孔隙压力通常低于环空液柱压力, 容易引发井喷, 主要有以下两种情况: 一是在钻井液从井底上返过程中, 压力降低导致钻井液瞬间汽化, 汽化后钻井液液柱压力进一步降低, 进而引发更深层次的钻井液汽化和压力下降, 最终引发井喷; 二是钻井液大量漏失导致环空压力瞬间下降, 从而引发井喷<sup>[1]</sup>。在发生井涌时必须迅速采取井控措施, 一旦失去控制, 大量流体瞬间涌入井筒将会引发井喷, 大量的高温钻井液、地层流体

和高温气体(有时含有有毒气体)喷出地表, 轻则造成一定的经济损失, 重则导致人员伤亡、设备损毁、环境污染等重大事故。在美国的内华达州、夏威夷的干热岩钻探施工过程中均发生过重大井喷事故<sup>[2,3]</sup>。

井控就是采用一定的方法平衡地层孔隙压力, 防止地层流体进入井内, 或使地层流体有控制地进入井筒并将其循环到地面, 保证钻井作业安全顺利<sup>[4]</sup>。目前中国的井控设备和措施大多针对石油钻井, 在干热岩钻探领域对井控技术、设备的重要性的认识略显不足。这种情况下, 为保证钻进施工

收稿日期: 2015-08-21; 修回日期: 2015-08-31

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(12120114025101)

作者简介: 张德龙, 工程师, 研究方向为钻探工程, 电子信箱: tgszdl@126.com; 翁炜(通信作者), 高级工程师, 研究方向为钻探工程, 电子信箱: wengw77@163.com

引用格式: 张德龙, 翁炜, 贾军, 等. 干热岩钻探井控技术研究[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 45-48.

顺利开展,保证现场作业人员的生命财产安全,促进中国干热岩资源开发、开展干热岩钻探井控技术及装备研究具有重要意义。

## 1 干热岩钻探井控技术现状

### 1.1 井控技术现状

目前,国外干热岩钻探井控设备通常选用闸板防喷器,部分选用了安全高效的旋转防喷器(RBOP)作为主要井控设备;而中国干热岩钻探工作处于起步阶段,一般选用闸板防

喷器作为井控设备,部分钻井施工现场没有配备井控设备,旋转防喷器基本没有应用,原因主要有:1)旋转防喷器价格昂贵;2)现有旋转防喷器主要针对石油钻井,规格尺寸大,无法满足干热岩钻探需要(表1<sup>[5,6]</sup>);3)耐温能力低,现有防喷器工作温度通常不超过150℃,而干热岩钻探井底温度通常高于150℃,一旦发生井喷事故,现有的防喷器难以达到井控要求;4)额定转速低,国内干热岩钻探通常选用水文水井钻机,工作转速通常高于200 r/min,而现有旋转防喷器最大转速不高于200 r/min。

表1 国内外主要旋转防喷器性能指标对比

Table 1 Comparison of parameters of major RBOPs at home and abroad

产地	型号	动压/MPa	静压/MPa	最大转速/(r·min <sup>-1</sup> )	高度/mm	通径/mm	胶芯数量
美国	Shaffer 低压型	3.5	7	200	914	280	1
	Shaffer 高压型	21	35	200	1244	280	1
	Williams 7100 型	17.5	35	100	1764	180	2
	Pruitt 508	7	20	150	1555	180	2
中国	FX28-35	17.5	35	100	1444	280	1

对比分析可以发现,国内相关技术及设备明显落后,且对井控重要性认识明显不足。因此,针对干热岩钻探特点,研制结构简单、转速高、尺寸小、成本低、耐温能力高的井控设备具有良好的现实意义和市场前景。

### 1.2 干热岩钻探井控设备选型

井口装置的选择主要考虑地层孔隙压力、钻机底座高度、地层流体类型等因素。根据高温地热钻井压力、温度特点以及钻井、完井需要,井口装置自下而上的顺序为:套管头、钻井四通、单(双)闸板防喷器、旋转防喷器、地面管汇等(图1)。

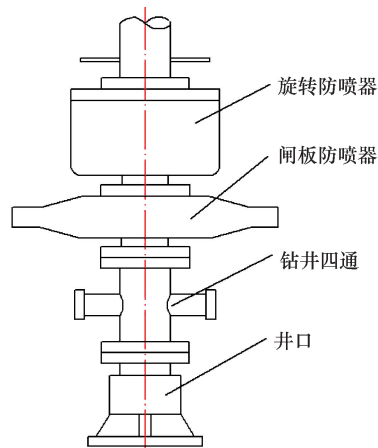


图1 井口设备示意

Fig. 1 Well control devices

防喷器优选和组合应考虑的因素主要有:井的类别、地层压力、套管尺寸、地层流体类型、人员技术状况、工艺技术要求、气候影响、交通条件、物资供应状况及环境保护要

求等<sup>[4]</sup>。总之,应能实现压力控制,确保钻井安全和节省钻井费用。根据干热岩钻探压力、温度特点及钻井、完井需要,防喷器组可选取单(双)闸板防喷器、旋转防喷器配合使用。

## 2 新型旋转防喷器设计

目前旋转防喷器广泛应用于石油钻井工程,其工作基本原理是靠胶芯与管柱之间的过盈配合实现密封<sup>[7]</sup>,其特点是承压能力高,不足之处在于体积重量大、工作转速低、胶芯耐温能力低。

干热岩钻探的特点是钻进转速高、钻井液循环温度高、钻进设备规格尺寸小。现有旋转防喷器受体积、重量、成本等因素限制,不适用于干热岩钻探。本文针对干热岩钻探特点研制了一套体积小、重量轻、工作转速高、耐温能力好的旋转防喷器,其结构原理如图2所示。

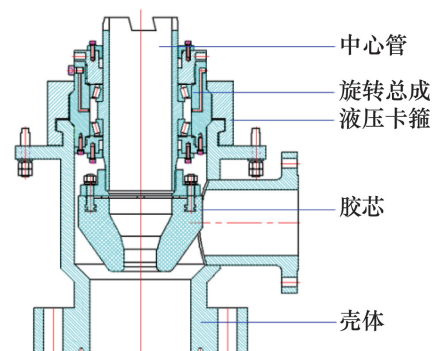


图2 旋转防喷器结构

Fig. 2 RBOP structure

## 2.1 参数设计

1) 工作温度。干热岩地层温度通常在 200℃ 以上<sup>[9]</sup>, 考虑到钻井液循环温度变化, 为确保钻井作业安全进行, 旋转防喷器的耐温性能应不低于 200℃。

2) 额定转速。石油钻井的井眼尺寸较大, 钻进工作转速通常在 200 r/min 以下; 干热岩钻探井眼尺寸相对较小, 所采用的钻机转速较高, 正常钻进时通常不低于 200 r/min。结合地质钻探设备特点, 通过调研分析确定旋转防喷器最高工作转速不低于 300 r/min。

3) 额定压力。水的饱和蒸汽压力随着温度的变化而变化, 在 200℃ 条件下, 水的饱和蒸汽压为 1.555 MPa。此外, 在钻进过程中当环空钻井液液柱压力低于井底压力时, 旋转防喷器通常会承担一部分压力, 因此为了满足钻井需要, 旋转防喷器旋转工作压力设计为 3.5 MPa, 静止压力设计为 7.0 MPa。

4) 通径尺寸设计。根据干热岩钻井及完井需要, 旋转防喷器主通径设计为 346 mm, 中心管通径设计为 180 mm。

## 2.2 结构设计

根据现有旋转防喷器的使用情况及存在的问题, 分析总结研制旋转防喷器可能存在的几大难点可知, 旋转防喷器研制成功与否, 关键在于密封胶芯和单动旋转总成的设计。

1) 密封胶芯及密封形式设计。目前, 密封胶芯主要有锥状环形胶芯辅助自封方式和球形胶芯可编程控制器压力密封两类<sup>[9]</sup>。锥状环形胶芯结构简单、寿命长; 球形胶芯的优点是可密封一定范围内不同尺寸的钻具, 但需要一个单独的液压源, 其密封压力通过控制液压的工作压力而改变, 并且结构较复杂。综合分析以上 2 种密封方式的优缺点, 考虑国内实际生产状况以及旋转防喷器压力级别相对较低的情况, 选用结构简单的锥形胶芯, 如图 3 所示。为便于安装和拆卸, 胶芯与中心管之间采用法兰连接方式。

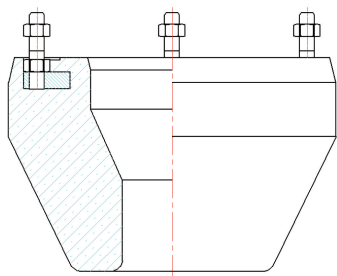


图3 密封胶芯结构

Fig. 3 Structure of RBOP seal

2) 壳体设计。壳体是旋转防喷器的关键部件, 在工作时内部承受高压泥浆, 上部要与旋转总成外壳体相连, 内部包含中心管、胶芯等部件, 侧面需开通孔以保证钻井液畅通循环, 考虑生产操作和检修的需要, 初步确定壳体的结构形式为: 底座采用 API 标准法兰形式, 与旋转总成外壳体相连的部分设计成卡箍连接, 如图 2 所示。

根据新型旋转防喷器的工作使用要求可知, 壳体在工作过程中主要承受井内 3.5 MPa 的高压泥浆, 在设计时将其视为承受 5.0 MPa 静压的异形压力容器。在设计壳体时其设计原则与压力容器基本一致。

3) 底座法兰设计。对法兰连接的基本要求是密封可靠, 以保证旋转防喷器能长期安全工作; 同时也要求其结构简单和拆装方便等。壳体采用铸造加工出来, 所以确定底座法兰的结构形式为整体法兰(图 4), 加工时与壳体一起铸出, 这种结构能保证壳体和法兰同时受力, 提高整体结构强度。

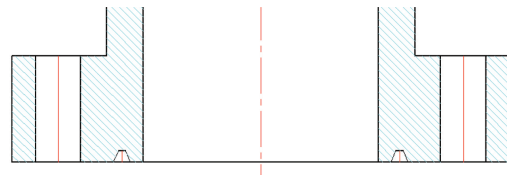


图4 旋转防喷器底座法兰

Fig. 4 Structure of RBOP bottom flange

4) 中心管设计。作为旋转防喷器的关键部件, 在工作过程中, 中心管随着方卡瓦总成、旋转总成、密封胶芯一起旋转, 并且承受较高的内压。中心管的壁厚尺寸非常重要, 必须对其进行强度校核。

对于空心旋转轴, 其计算公式为:

$$d = 21.68 \sqrt{\frac{M^2 + (\varphi T)^2}{\sigma_{-1p}}} \times \frac{1}{\sqrt[3]{1-a^4}} \quad (1)$$

式中,  $d$  为轴的直径;  $M$  为轴在计算截面上所受弯矩;  $T$  为轴在计算截面上所受扭矩;  $\varphi$  为根据扭应力变化性质而定的校正系数。

5) 旋转总成设计。按照从上到下的顺序, 旋转总成包括方卡瓦总成、轴承总成、密封胶芯等。轴承总成主要包括轴承、密封、充当轴承座的内外筒体以及其他辅助零件。工作时由方钻杆驱动方卡瓦总成, 进而与中心管一起旋转, 带动轴承旋转。轴承采用两组调心推力滚子轴承, 既承担轴向力, 同时承担径向不平衡受力。

6) 高温高压旋转动密封设计。旋转动密封采用挠曲型唇状密封, 平均密封压力 14 MPa, 转速 600 r/min, 工作寿命 1450 h, 完全能够满足现场需要。

## 3 旋转防喷器控制系统设计

旋转防喷器控制系统的主要作用有两点: 一是控制防喷器卡箍的打开关闭功能, 二是为轴承提供润滑和降温<sup>[9,10]</sup>。

1) 卡箍的控制。本文研制的控制系统采用齿轮泵, 以蓄能器作为备用油源; 为确保卡箍的锁紧和安全, 油缸控制回路加双向液压锁, 双向节流阀; 为了安装、拆卸方便, 所有管路连接均采用快速接头。

2) 循环润滑。循环润滑的功能油源为齿轮泵, 可以空循

环启动泵,回油通过节流给齿轮腔建立背压,冷却器采用电机驱动,可以手动启停,也可以设定温度实现自动启动、停止控制。

3) 参数监测。该套控制系统可实时检测系统压力、油缸拉力、工作温度等参数显示。

4) 系统应具备远程控制功能,卡箍打开与关闭、润滑启动与停止、冷却风扇启动与停止等所有动作均可实现远程控制,有效降低了操作难度及劳动强度。

#### 4 结论

1) 中国干热岩资源开发速度日益加快,而配套钻井技术及装备较为落后,应针对干热岩钻探特点开展高温地热近平衡/欠平衡钻井工艺研究,研发配套井控设备及井下工具。

2) 在国外高温干热岩钻井过程中已经将旋转防喷器作为必要的井控设备,中国尚无旋转防喷器应用案例,为确保钻井安全、提高钻井效率,应加大旋转防喷器研发和推广应用工作。

3) 针对干热岩钻探特点研制了一种结构简单、操作方便的旋转防喷器,可为中国干热岩钻探提供井控技术及装备支持。

#### 参考文献(References)

- [1] Finger J, Blankenship D. Handbook of best practices for geothermal drilling[M]. New Mexico: Sandia National Laboratories, 2010.  
[2] Anderson I. Blowout blights future of Hawaii's geothermal power[J].

New Scientist, 1991, 131: 17.

- [3] Meier U, Ernst P L. Drilling and completion of the Urach III HDR test well[C]. The International Conference on Geothermal Drilling and Completion Technology, Hannover, Germany, January 21-23, 1981.  
[4] 杨庆理. 石油天然气钻井井控[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008.  
Yang Qingli. Oil and gas well control[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.  
[5] 罗宁根. FX28-35型旋转防喷器的研制[J]. 海洋石油, 2003, 23(12S): 106-110.  
Luo Ninggen. The design and manufacture of FX28-35 type of rotating blowout preventer[J]. Offshore Oil, 2003, 23(12S): 106-110.  
[6] 赵金洲, 张桂林. 钻井工程技术手册[M]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2011: 843-852.  
Zhao Jinzhou, Zhang Guilin. Handbook of drilling engineering[M]. 2nd ed. Beijing: China Petrochemical Press Co., Ltd., 2011: 843-852.  
[7] 金迅. 旋转控制头工作机理研究及结构设计[D]. 成都: 西南石油大学, 2004: 3.  
Jin Xun. Research and design of rotary control head[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2004: 3.  
[8] Brown D. The US hot dry rock program-20 years of experience in reservoir testing[C]. World Geothermal Congress, Florence, Italy, May 18-31, 1995.  
[9] 张慧. 新型旋转防喷器的设计研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2007.  
Zhang Hui. Research and design of new type rotating blowout preventer [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2007.  
[10] 万秀琦. 旋转防喷液压控制系统研制[D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2008.  
Wan Xiuqi. Research and development of RBOP hydraulic control system[D]. Shandong: China University of Petroleum, 2008.

(责任编辑 王媛媛)

#### ·学术动态·



### 中国科协第3期青年科技创新沙龙在西安举办

2015年9月9日,由中国科协常委会青年工作专委会、中国科协组织人事部主办,围绕中国实施制造强国战略“中国制造2025”展开的第3期青年科技创新沙龙在西安举办。西安交通大学教授林京主持沙龙,30余位一线科研人员与会交流。

西安交通大学机械工程学院院长、中国工程院院士卢秉恒作“智能装备的创新途径”主题报告,西安电子科技大学原校长、中国工程院院士段宝岩作“大射电望远镜与天文视察、深空探测”主题报告。

在互动环节,西安电子科技大学综合业务网理论与关键技术国家重点实验室主任高新波、西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室主任李涤尘、西安电子科技大学智能感知与图像理解教育部重点实验室主任焦李成、西北工业大学材料学院“长江学者”特聘教授刘峰、西安交通大学航空航天学院院长申胜平、西安交通大学“腾飞人才计划”特聘教授陈雪峰分别作“基于三元空间融合的模式识别新范式”、“3D打印——创新与创业的利器”、“当深度学习遇到大数据”、“纳米晶材料中相变和晶粒长大共生现象”、“电化学耦合的理论分析与计算”、“机械装备智能故障诊断”学术报告。

详见中国科协网<http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/16653183.html>。