

# 液氮应用于干热岩钻探的可行性探讨

黄雪琴, 孟庆昆

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**干热岩是一种清洁、可再生的地热资源,其开发需通过钻井实现。分析了目前干热岩常规钻探技术面临机械钻速慢、井下工具和钻井液性能不稳定、易发生复杂井下事故等挑战,讨论了液氮在干热岩钻探中的应用前景。认为液氮在干热岩钻探过程中具有破岩效率高、有效提高干热岩热能提取效果、解决钻井液不耐高温和井漏问题等优势,并提出了液氮在干热岩钻探过程中的工具耐低温性能、液氮携岩规律和效果、井筒压力控制、钻进参数优化、井壁稳定性等关键技术问题。

**关键词:**干热岩;钻井;液氮;破岩

**中图分类号:**P634;P314 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)02-0022-04

**Feasibility Study on Application of Liquid Nitrogen in Hot Dry Rock Drilling/HUANG Xue-qin, MENG Qing-kun**  
(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Hot dry rock can be obtained by drilling, which is a kind of clean and reproducible geothermal resources. By analyzing the difficult challenges faced by current conventional hot dry rock drilling technology such as slow rate of penetration, unstable performances of downhole tools and drilling fluid and frequent complicated downhole accidents, the discussion is carried out on the application prospects of liquid nitrogen in hot dry rock drilling. It is concluded that liquid nitrogen has advantages of high efficiency in rock breaking, effective improvement of the hot energy extraction, solving high temperature tolerance and well leakage for hot dry rock drilling. The paper puts forward some key technologies of low temperature performance of drilling tools with liquid nitrogen, regulation and effects of carrying cuttings by liquid nitrogen, wellbore pressure control, drilling parameters optimization and well wall stability in hot dry rock drilling.

**Key words:** hot dry rock; drilling; liquid nitrogen; rock breaking

干热岩是指埋深数千米、内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体,岩体温度一般在 150~650℃,是一种储量巨大、清洁、可再生的地热资源。目前世界上普遍通过增强型地热系统开采干热岩资源,即采用钻井的方法钻一口井作为注水井,钻一口或多口井作为生产井,利用人工压裂或天然裂缝连通注水井和生产井,从注水井注入冷水,利用生产井开采蒸汽、高温水用于发电和热水利用,再将冷却水注入地下进行循环<sup>[1-3]</sup>。干热岩资源能源供应价格主要由钻井和人工储层建造费用决定<sup>[4]</sup>。由于干热岩温度高、岩性复杂、可钻性差,干热岩钻探面临严峻的挑战,急需新型破岩技术实现干热岩的高效开发。因液氮具有极低温度、低粘度、与液体接近的密度、高导热系数等特殊性质,可在一定程度上解决干热岩钻探技术难题。本文重点讨论液氮在干热岩钻探的应用前景,为干热岩高效开发提供参考。

## 1 干热岩常规钻探技术

干热岩开发通常采用钻井的方法,即钻一口井

作为注水井,钻一口或多口井作为生产井。目前国内主要采用水井钻机钻进干热岩井,其特点是钻柱转速高、钻机结构紧凑、钻台高度较低<sup>[5]</sup>。干热岩钻井过程与油气钻井基本相似,通常包括:利用钻头、钻具等工具破碎岩石,在井壁与套管之间注入水泥浆进行固井以及运用巨型水力压裂法建造人工储层,同时预防与处理钻井事故等<sup>[6]</sup>。相比常规油气钻井,干热岩钻井面临的主要挑战如下。

### 1.1 岩石硬度大,机械钻速慢

干热岩主要岩性为变质岩和结晶岩,较常见的干热岩为黑云母片麻岩、花岗岩、花岗闪长岩等<sup>[7]</sup>。岩石单轴抗压强度一般在 200 MPa 以上,岩石硬度大、研磨性强、可钻性极差<sup>[8-10]</sup>。采用常规钻井技术钻进,破岩效率低,机械钻速慢,钻井周期长。

### 1.2 地层温度高,井下工具和钻井液性能不稳定

在常规油气钻井中,地层温度超过 150℃则认为高温井。在高温环境下,钻头、井下动力钻具、随钻测量仪器等易出现性能不稳定、工作寿命短等问题<sup>[11]</sup>。目前钻井液耐高温能力约 260℃,而普遍

收稿日期:2017-09-11

作者简介:黄雪琴,女,壮族,1984年生,博士研究生,油气井工程专业,研究方向为油气井钻井工艺新技术新方法,北京市海淀区学院路20号910信箱,huangxueqin1204@163.com。

认为干热岩储层温度在 350 °C 以上才具有工业开发价值<sup>[12]</sup>。在高温作用下,钻井液及处理剂容易发生性能改变甚至降解失效,难以发挥正常的循环、护壁和携岩等功能。因此,干热岩钻井过程中井下工具和钻井液的性能面临着严峻挑战。

### 1.3 易发生复杂井下事故

干热岩一般天然裂缝、裂隙、断层较发育,钻进过程中钻井液漏失严重。如在西藏羊八井 ZK201 井钻进时,钻井液在钻进井段几乎全部漏失<sup>[12]</sup>。在高温下,钻井液抑制性和封堵性受影响,难以维持井壁围岩稳定,极易发生坍塌掉块等,造成卡钻事故,固井、完井过程中还易出现套管挤毁等现象<sup>[13]</sup>。

因此,需要一种新型钻井技术解决上述技术难题。液氮具有极低温度、低粘度、接近于液体的密度、高导热系数,通过高压喷射至岩石表面后,可在岩石内部产生较大的热应力和射流冲击作用,对岩石有明显的致裂效果,实现高效破岩。因此,利用液氮替代常规钻井液钻进干热岩具有一定的应用前景。

## 2 液氮在干热岩钻探中的应用前景

### 2.1 液氮物理性质(见表 1)

表 1 液氮物理性质

物理性质	条 件	参 数
密度	0.101 MPa	808.5 kg/m <sup>3</sup>
粘度	临界温度-146.96 °C	28.5×10 <sup>-6</sup> mPa·s
表面张力	温度-153 °C	0.65×10 <sup>-3</sup> N/m
导热系数	临界温度-146.96 °C; 临界压力为 3.39 MPa	0.0356 W/(m·k)

液氮是一种密度略小于水、无色无臭、性能稳定、不可燃的液体,临界温度为-146.96 °C,临界压力为 3.39 MPa,在大气压下温度为-195.8 °C,三相点温度为-210.00 °C。液氮具有良好的传热性能,表面张力极小,容易进入到大于其分子体积的空间内。液氮是一种性能优越的制冷剂,与物体接触时,会使物体温度迅速降低,从而在物体内部产生较大的热应力。

### 2.2 液氮在干热岩钻探中的破岩机理

与常规钻探技术不同,液氮与岩石接触时会在岩石内部产生热应力,对岩石产生致裂效果。此外,液氮在环空上返过程中逐渐气化携带岩石,起到净化井眼和携岩作用。与常规钻井技术相同的是,液氮经喷嘴高速喷射时,对岩石产生射流冲击作用;液氮和钻井液对岩石的破岩效果只是起辅助作用,还

需要联合钻头机械破岩。

#### 2.2.1 热应力致裂

干热岩温度 150~650 °C,而液氮的临界温度为-146.96 °C。液氮与干热岩接触后,在大温差作用下,岩石温度迅速降低,在岩石内部产生较大的热应力,岩石塑性降低、脆性增大,促进岩石微裂纹产生和扩展。液氮对岩石损伤致裂效果方面,国内外学者开展了相关的理论和实验研究。早在 1990 年时,就有学者提出利用液氮替代常规的水基压裂液来对煤层进行改造<sup>[14]</sup>。McDaniel 等<sup>[15]</sup>通过实验发现煤岩在液氮低温作用下破碎成小立方块,且当煤岩孔隙内含水时,破碎效果更加明显。Rassenfoss<sup>[16]</sup>通过室内实验研究发现,液氮能够使混凝土岩样表面产生明显的裂缝。徐红芳<sup>[17]</sup>通过计算表明,液氮在岩石内部产生的热应力要远远大于常规压裂液造成的热应力,压裂效果优于常规压裂液。蔡承政等<sup>[18-21]</sup>通过室内实验研究表明,液氮低温作用能够加剧岩石损伤程度,页岩和煤岩渗透率最大增幅分别达到了 177.27% 和 93.55%;煤岩抗压强度和轴向峰值应变最大降幅分别达到了 33.74% 和 20.61%。干燥大理石岩样经液氮处理后有新的微裂隙产生,大理石岩样经液氮处理前、后的 SEM 扫描照片分别如图 1 和图 2 所示。根据岩石断裂力学理论<sup>[22]</sup>,在钻头切削作用下,岩石中的微裂隙不断扩展、连通、甚至断裂,有助于提高破岩效率。

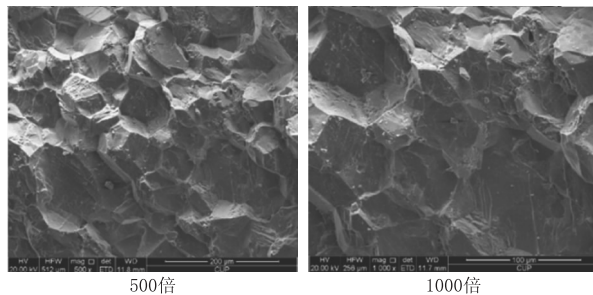


图 1 大理石岩样初始条件下 SEM 扫描照片

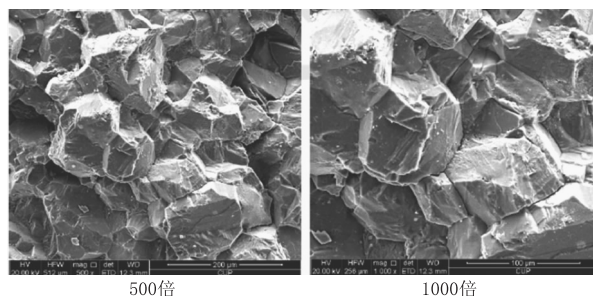


图 2 干燥大理石岩样经液氮降温处理后 SEM 扫描照片

#### 2.2.2 射流冲击作用

与常规钻探技术相同,液氮也需要经过钻头喷嘴节流作用,形成高速射流,对岩石产生显著的冲击破岩效果。由于液氮密度和粘度均比水小,在相同的喷嘴压降下,液氮射流的动能更大,能量衰减更小,能够产生优于水射流的冲击效果。蔡承政<sup>[18]</sup>通过数值模拟表明,在相同喷嘴压降条件下,液氮射流轴线初始速度比水射流高 25.13 m/s;在距离喷嘴出口 200 mm 处,水射流的轴线速度仅有 0.71 m/s,为初始速度的 0.3%;而此处液氮射流速度为 61.35 m/s,为初始速度的 23.44%。

### 2.2.3 液氮气化携岩

与常规钻井液相同,高压液氮经钻头喷嘴节流后以高速射流方式作用于井底,给予井底岩屑很大的冲击力,使岩屑快速离开井底,保持井底干净。液氮粘度比常规钻井液粘度低,在井筒内易达到紊流状态,有助于携岩。常规钻井液是依靠一定的泵排量循环携带岩屑,在环空携岩过程中不发生相变。而液氮是一种温度极低的液体,在环空上返过程中逐渐气化,体积膨胀,将岩屑携带至井口。

### 2.2.4 联合钻头机械破岩

液氮对岩石热应力和射流冲击力致裂,只起到辅助破岩的作用,还需要联合钻头机械破岩,才能够有效提高破岩效率。高温岩体地热钻井的机械破岩方式主要有 3 种:冲击破岩、切削破岩、冲击-切削复合破岩。冲击破岩方式适用于不超过 150 °C 的低温坚硬岩体钻井;切削破岩方式适合于 300 °C 以上的高温岩体钻井;冲击-切削复合钻进方式兼有二者特点,适合于 150~300 °C 的中温岩体钻井<sup>[12]</sup>。根据钻进区块的干热岩温度,采取相应的机械破岩方式。

## 2.3 液氮在干热岩钻探中的优势

### 2.3.1 破岩效率高

液氮与岩石接触后在岩石内部产生较大的热应力,使岩石孔隙结构遭到损伤破坏,岩石孔隙体积和渗透率增大,峰值应力降低,有利于岩石破碎。同时,高压液氮在钻头喷嘴的节流作用下形成的高速射流,能产生优于水射流的冲击效果。液氮在环空上返过程中逐渐气化,密度逐渐降低,能维持较小的环空压力,减少压持效应,提高机械钻速。因此,液氮在大温差作用下对干热岩的热应力致裂作用、液氮喷射时产生的射流冲击力以及较小的环空压力,联合钻头机械力破岩,能够有效提高干热岩破岩效率。

### 2.3.2 有效提高干热岩热能提取效果

采用常规钻井液钻进干热岩储层时,钻井液中

的固相颗粒在压差作用下,很容易进入储层中堵塞孔隙喉道,泥浆滤液也会侵入到储层中,堵塞孔隙喉道,增加冷水的流动阻力,导致冷水不能充分与干热岩接触吸收热量。液氮中不含固体颗粒,在利用液氮钻进干热岩储层时,不存在孔隙喉道被堵塞的情况。相反,液氮表面张力极小,容易进入储层的微小孔隙和微裂缝,增大储层孔隙度和渗透率,促进裂缝的形成和扩展<sup>[18]</sup>。冷水在储层中的流动性增大,有利于冷水渗入干热岩裂缝中吸收热量,增强换热效果。因此,液氮能够有效提高干热岩热能提取效果。

### 2.3.3 解决钻井液不耐高温和井漏问题

在高温条件下,常规钻井液及处理剂容易发生性能改变甚至降解失效。与常规钻井液不同,液氮在环空上返过程中,吸收井壁岩石部分热量,同时液氮的液柱压力降低,液氮逐渐发生气化,体积膨胀,流速增加,有助于强化携岩效果。液氮密度 808.5 kg/m<sup>3</sup>,产生的压力梯度比正常地层压力梯度低,能有效降低漏失风险。

## 3 液氮在干热岩钻探中的关键技术

尽管液氮在干热岩钻探中具有破岩速度快、有效提高干热岩热能提取效果、解决钻井液不耐高温和井漏问题等技术优势,但也存在一定的技术问题,如工具耐低温性能、携岩规律和效果、井筒压力控制、钻井参数优化及井壁稳定性等。

### 3.1 工具耐低温性能

液氮温度极低,要求地面管线、钻杆、钻头等工具具有良好的耐低温性能。据资料记载,液氮曾在油气储层压裂现场应用,如 McDaniel 等<sup>[15]</sup>采用特制的地面管线和井口,并使用玻璃钢油管作为施工管柱,成功将液氮压裂技术应用于 5 口井中,压裂后初期最大日产量约是压裂前 1.22~6.48 倍。Grundmann 等<sup>[23]</sup>采用不锈钢井口、玻璃钢油管等装置,成功将液氮压裂技术应用于 Devonian 页岩地层中的一口生产井中,压裂后该井产量比另一口采用氮气压裂技术的井高 8% 左右。目前未见到液氮应用于钻探施工现场的相关报道,为了实现液氮在干热岩钻井中的广泛应用,需对工具在低温条件下的性能做进一步研究。

### 3.2 携岩规律和效果

与常规钻井液不同,液氮在环空上返过程会发生吸热气化,体积膨胀,理论上流速增加,携岩效果增强。但在钻井过程中,井口到井底的温差较大,液

氮的密度和粘度变化也较大,实际携岩规律和效果需进一步研究。近年来,国内外学者对超临界 CO<sub>2</sub> 携岩规律做了大量研究<sup>[24-25]</sup>,但研究成果是否适用于液氮还需要进一步验证。

### 3.3 井筒压力控制

当钻遇正常压力或异常高压地层时,因地层压力比液氮液柱压力高,地层孔隙中的流体易流入井筒,严重时发生井喷事故。常规钻井技术通常对钻井液进行加重或采用欠平衡钻井工艺控制井底压力。因液氮惰性极强,对加重材料要求低,现有加重材料基本能符合要求,但液氮加重技术以及液氮气化后与加重材料的相容性有待进一步研究;也可采用欠平衡钻井技术控制井筒压力。

### 3.4 钻进参数优化

与常规钻井液不同,液氮会发生气化、对岩石具有热应力致裂效果等。不管是采用常规的旋转切削钻井技术还是旋转冲击钻井技术,为了实现液氮在干热岩中的安全、高效钻进,需要研究在钻头与液氮耦合作用下,根据干热岩温度、地层硬度等实际情况,对钻压、转速、液氮排量等参数进行优化。

### 3.5 井壁稳定性

传统钻井液环境中,井壁失稳主要是由水化作用引起的,单纯的力学坍塌的可能性较小。液氮中不含水,无水化作用。液氮对岩石具有致裂效果,理论上在未受到外力扰动情况,发生严重井壁垮塌的可能性较小,但仍需要对液氮在钻探过程中的井壁稳定性进行研究。

## 4 结论及建议

干热岩是一种储量巨大、绿色、可再生的地热能源,其开发需通过钻井实现。由于干热岩温度高、岩性复杂、可钻性差,因此,干热岩常规钻井技术面临机械钻速慢、井下工具和钻井液性能不稳定、易发生复杂井下事故等挑战。由于液氮具有极低温度、低粘度、与液体接近的密度、高导热系数等特殊性质,在干热岩钻井中具有如下优势:破岩效率高、有效提高干热岩热能提取效果、解决井漏和钻井液不耐高温问题等。目前液氮钻进干热岩技术仍处于探索阶段,建议针对液氮钻进干热岩过程中的工具耐低温性能、液氮携岩规律和效果、井筒压力控制、钻进参数优化、井壁稳定性等关键技术问题做进一步研究,实现液氮在干热岩中的安全、高效钻进。

## 参考文献:

- [1] 康玲,王时龙,李川.增强地热系统 EGS 的人工热储技术[J].机械设计与制造,2008,(9):141-143.
- [2] 梁松彬.增强型地热发电技术及发展前景[J].能源工程,2012,(5):30-32.
- [3] 谭现峰,王浩,康凤新.利津陈庄干热岩 GRY1 孔压裂试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(10):230-233.
- [4] 冉恒谦,冯起赠.我国干热岩勘察的有关技术问题[J].地热能,2011,(3):3-8.
- [5] 贾军,张德龙,翁炜,等.干热岩钻探关键技术及进展[J].科技导报,2015,33(19):40-44.
- [6] 王建学,等.钻井工程[M].北京:石油工业出版社,2007.
- [7] 彭新明.我国干热岩地热资源钻采工艺浅议[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(S1):167-169.
- [8] 曾义金.干热岩热能开发技术进展与思考[J].石油钻探技术,2015,43(2):1-7.
- [9] 苏长寿,阴文行,冯红喜,等.液动潜孔锤技术应用于干热岩钻井的可行性探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(3):14-16,26.
- [10] 赵福森,张凯.青海贵德 ZR1 干热岩井钻进工艺研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(2):18-23,35.
- [11] 周策,罗光强,李元灵,等.GRY-1 型超高温干热岩底层钻孔测斜仪研制及应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):44-48.
- [12] 邵保平,赵金昌,赵阳升,等.高温岩体地热钻井施工关键技术研究[J].地热能,2012,(4):3-11.
- [13] 刘伟莉,马庆涛,付怀刚.干热岩地热开发钻井技术难点与对策[J].石油机械,2015,43(8):11-15.
- [14] 于忠仁.利用液化气体的水力压裂法控制煤层性质和状态[J].煤矿安全,1990,(7):48-51.
- [15] McDaniel B W, Grundmann S R, Kendrick W D, et al. Field Applications of Cryogenic Nitrogen as a Hydraulic Fracturing Fluid[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, 1997.
- [16] Rassenfoss S. In Search of the waterless fracture[J]. Journal of Petroleum Technology, 2013, 65(6):46-52.
- [17] 徐红芳.适用于页岩气开发的液化氮气汽化压裂技术[D].河北秦皇岛:燕山大学,2013.
- [18] 蔡承政.液氮低温致裂岩石机理与射流流场研究[D].北京:中国石油大学(北京),2015.
- [19] 位江巍.液氮对岩石强度及物性影响试验研究[D].北京:中国石油大学(北京),2015.
- [20] 蔡承政,李根生,黄中伟,等.液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验[J].中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(4):98-103.
- [21] 蔡承政,李根生,黄中伟,等.液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究[J].岩土力学,2014,35(4):966-971.
- [22] 杨甘生.冲击回转碎岩机理探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(2):19-21.
- [23] Grundmann S R, Rodvelt G D, Dials G A, et al. Cryogenic Nitrogen as a Hydraulic Fracturing Fluid in the Devonian Shale[C]//SPE Eastern Regional Meeting, Pittsburgh, Pennsylvania, 1998.
- [24] 沈忠厚,王海柱,李根生.超临界 CO<sub>2</sub> 钻井水平井段携岩能力数值模拟[J].石油勘探与开发,2011,38(2):233-236.
- [25] 宋维强,王瑞和,倪红坚,等.水平井段超临界 CO<sub>2</sub> 携岩数值模拟[J].中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(2):63-68.

致谢:本文得到了中国石油大学(北京)黄中伟教授的帮助,在此表示感谢。