基于物理约束重构的深部地热硬岩钻井提速综述

吴海东[1,2]，李　梦[1]，张二勇[1*]，李　宽[3]，Joseph Moore[2]，
Pengju Xing[2]，翁　炜[4]，吴金生[5]

（1.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心，天津 300309；2.犹他大学能源与地球科学研究所，美国 盐湖城 84112；3.中国地质科学院勘探技术研究所，天津 300399；4.北京探矿工程研究所，北京 100083；5.中国地质科学院探矿工艺研究所，四川 成都 611734）

摘要：深部地热与干热岩资源开发面临高温、高应力及结晶岩地层强非均质性等复杂工程条件，机械钻速低、钻头寿命短是制约其规模化开发的关键技术瓶颈，并直接推高钻井成本。深部地热钻井存在地层-钻头-钻具-钻井液-装备多系统耦合作用，工况参数安全边界难以预先精确设定；传统依靠经验调参或单一工艺优化的手段，无法从多耦合变量中识别制约钻进效率的主导约束因素。美国Utah FORGE等高温硬岩地热钻井项目发展出一套以钻头碎岩机理与机械碎岩比功为理论基础、以钻井系统动力学响应为判识依据的物理约束识别与重构提速方法，该方法在175～230 ℃花岗岩地层可实现20 m/h以上的机械钻速，钻头寿命300～800 m。本文系统梳理该方法的理论体系，以Utah FORGE、Fervo Energy、Geysers GDC-36井、瑞士GVL-1井为典型工程案例，提炼“参数阶梯加载-工况响应判识-针对性重构-迭代验证”标准化现场作业流程；结合中国共和盆地干热岩钻井实测资料，从钻压与转速的极限加载能力、下部钻具组合的动力学稳定性、地面装备的功率与排量配套等维度对比中美钻井系统性能差距，论证该技术体系在中国深部高温硬岩地热钻井中的适用条件与实施边界，为中国深部地热、深层-超深层硬岩钻探工程的科学化提速决策提供理论依据与工艺参考。

关键词：深部地热；干热岩；硬岩钻井；机械钻速；钻井提速；物理约束；机械碎岩比功；能量转化效率

中图分类号：P634；TE249　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0091-12

Review of ROP improvement for deep geothermal hard rock drilling based on physical-limiter redesign

WU Haidong[1,2]，LI Meng[1]，ZHANG Eryong[1*]，LI Kuan[3]，Joseph Moore[2]，
Pengju Xing[2]，WENG Wei[4]，WU Jinsheng[5]

(1. *Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin* 300309, *China*; 2. *Energy & Geoscience Institute, the University of Utah, Salt Lake City* 84112, *USA*; 3. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Tianjin* 300399, *China*; 4. *Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*; 5. *Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan* 611734, *China*)

Abstract: Deep geothermal and hot dry rock (HDR) development faces complex engineering conditions including high temperature, high in-situ stress, and strongly heterogeneous crystalline rocks; low rate of penetration (ROP) and high drilling investment remain the key technical bottlenecks constraining large-scale development. Deep geothermal drilling involves multi-system coupling of rock, bit, drill string, drilling fluid and surface equipment, and safe operating envelopes cannot be precisely predefined, so conventional empirical parameter adjustment or single-process optimization

收稿日期：2026-05-12；**修回日期**：2026-06-05　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.011

基金项目：国家重点研发计划项目（编号：2025YFF0519900）；中国地质调查局地质调查项目（编号：DD20231000809）

第一作者：吴海东，男，汉族，1989年生，正高级工程师，地质工程专业，博士，主要从事干热岩地热资源高效钻采研究工作，天津市东丽区东丽湖街道辉景道2号，wuhaidong@mail.cgs.gov.cn。

通信作者：张二勇，男，汉族，1978年生，正高级工程师，水工环地质专业，博士，主要从事水文水资源和干热岩勘查开发技术研究工作，天津市东丽区东丽湖街道辉景道2号，zeryong@mail.cgs.gov.cn。

引用格式：吴海东，李梦，张二勇，等.基于物理约束重构的深部地热硬岩钻井提速综述[J].钻探工程，2026，53(6)：91-102.

WU Haidong, LI Meng, ZHANG Eryong, et al. Review of ROP improvement for deep geothermal hard rock drilling based on physical-limiter redesign[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 91-102.

fail to identify the truly dominant constraint factors restricting penetration efficiency among the many coupled variables. In recent years, high-temperature hard-rock drilling projects such as Utah FORGE have progressively developed a "physical limiter identification and redesign" drilling performance improvement method, built on the physical foundations of bit-rock cutting mechanics and mechanical specific energy (MSE), with drilling-system dynamic response serving as the diagnostic basis; in granite rocks at 175～230 ℃, this method has achieved stable ROP above 20 m/h and single-run bit footage of 300～800 m. This paper systematically reviews the theoretical system of the method and, taking the Utah FORGE, Fervo Energy, and Geysers GDC-36 well together with the Swiss GVL-1 well as representative engineering cases, summarizes a standardized field workflow of "stepwise parameter loading-response-based diagnosis-targeted redesign-iterative verification." Combined with measured data of hot dry rock drilling in the Gonghe Basin, the performance gaps between Chinese and American drilling systems are analyzed in terms of ultimate WOB and RPM loading capacity, dynamic stability of bottom hole assembly (BHA), and surface equipment power and pump rate matching, and the applicable conditions and implementation boundaries of this technical system for deep high-temperature hard-rock geothermal drilling in China are discussed. The reviewed methodology and case analyses provide a theoretical basis and process reference for a theoretical basis and process reference for scientific decision-making of performance improvement in deep geothermal as well as deep and ultra-deep hard-rock drilling.

Key words: deep geothermal; hot dry rock; hard rock drilling; rate of penetration; ROP improvement; physical limiter; mechanical specific energy; energy conversion efficiency

0 引言

地热资源具有清洁、可再生、分布广泛等优势，理论潜力约为化石能源总量的30倍，是能源结构低碳转型和能源安全保障的重要战略资源[1-3]。随着浅层及中深层水热型地热资源逐步开发，地热利用正加速向温度更高、埋藏更深的干热岩等资源类型拓展。这类资源普遍赋存于高温、高应力、坚硬且强非均质的结晶岩地层，对钻井工程提出了更高的要求。

钻井工程是深部地热资源勘查与开发的核心环节，钻井成本通常占项目总投资的35%～60%，且随井深增加持续上升[4-5]。在高温硬岩条件下，机械钻速低、钻头寿命短、作业周期长等问题尤为突出，已成为制约深部地热规模化开发与商业化利用的核心瓶颈。深部地热钻井涉及地层-钻头-钻具-钻井液-装备等多系统耦合，井下温度、地应力、动力学响应、井底清洁、装备承载等多类因素同时作用、相互制约。长期以来，钻井提速主要依靠经验积累与试错式参数优化，深部高温硬岩工况下此类方法难以从众多耦合因素中识别真正限制效率提升的主导因素，提速效果不稳定，可复制性差。

近年来，基于物理机理的钻井提速方法在国外深部地热工程中取得显著进展。其思路并非提出新的钻井理论，而是回归钻井碎岩的物理本质，即钻头将输入机械能转化为岩石破碎能量，以“能量是否有效转化”作为分析复杂耦合系统的主线。该方法以钻头碎岩机理和机械碎岩比功(Mechanical Specific Energy，MSE)为基础理论，通过监测能量输入与钻进响应的关系，识别在当前工况下真正限制钻进效率提升的主导物理约束，进而对钻头结构、钻具组合、钻井液体系及作业流程进行针对性重构[6-7]。在美国犹他州地热能前沿瞭望台(Utah FORGE)项目中，花岗岩地层机械钻速提高至20 m/h以上，钻头寿命显著延长，成井周期缩短至原来的约40%。该思路随后在Fervo Energy等商业化项目中得到进一步验证，显示出良好的工程适用性与可复制性[8-9]。

在深部高温硬岩地热钻井方面，中国在山东、东南沿海、河北、山西、共和盆地等地进行了诸多工程实践，在钻进参数、耐高温钻井液、钻具组合、井下动力工具、定向钻井等方面取得了诸多进展[10-22]。但整体效率仍然偏低，平均机械钻速0.8～2.5 m/h，差距较明显。何种因素在何种条件下成为主导约束、如何识别并实施针对性重构等核心问题，仍缺乏面向工程应用的系统总结，制约了相关经验的推广。

针对上述问题，本文以Dupriest等[6-7]提出的物理约束识别与重构方法体系为分析框架，系统总结美国Utah FORGE、Fervo Energy、Geysers GDC-36井及瑞士GVL-1井等典型工程案例，并归纳深部硬岩钻井中机械钻速由高效增长转入受限状态的物理基础与主要限制因素，提炼“参数阶梯加载-工况响应判识-针对性重构-迭代验证”的工程实施逻辑；结合共和盆地等代表性工程资料，分析该方法在深部地热硬岩钻井工程条件下的适用性及边界，为中国深部地热及复杂硬岩钻井工程的提速路径选择与现场技术决策提供参考。

1　深部地热硬岩钻井提速的物理基础与工程判识

钻井过程的物理本质是将输入的机械能转化为岩石破碎能量。以钻头碎岩机理和机械碎岩比功为代表的基础物理理论，为刻画能量输入、传递与利用效率提供了统一尺度，这一尺度不依赖对各耦合变量的精确解析，而是把多变量复杂问题压缩到能量转化效率上，从而在复杂工况下抓住影响钻进效率的主要矛盾。本节综述Dupriest等[6-7]提出并发展的物理约束识别与重构方法的理论基础，归纳其工程判识思路。

1.1　碎岩机理

机械钻速（Rate of Penetration，ROP）取决于输入机械能能否有效转化为岩石破碎能量。钻压（Weight on Bit，WOB）主要控制切削齿对井底岩石的有效侵入深度（Depth of Cutting，DOC），转速（Revolutions per Minute，RPM）决定单位时间内的切削频率与切削路径长度[23-24]，如图1所示。在地层岩性、钻头结构及井下工况相对稳定的条件下，当新增WOB或RPM持续转化为更大的DOC或更高的切削速度时，ROP随参数增加而单调提升（图2[6]），此即“近线性响应区间”，其工程含义是：参数加载尚未触发显著能量损失或效率衰减，新增能量仍能稳定转化为破岩能量。该响应曲线可用于界定近线性区间与受限区间的判识依据[25]。

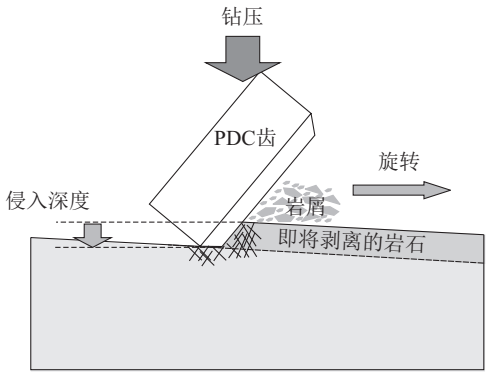

图1　钻井碎岩过程示意

Fig.1　Schematic diagram of the rock-cutting mechanism during bit-rock interaction

1.2　机械碎岩比功的工程意义及适用边界

机械碎岩比功（MSE）由Teale于1965年提出，表征破碎单位体积岩石所需的机械能[23]。MSE建立输入能量与ROP之间的联系，是钻井能效的量化指标。理论上破碎特定岩石需相对恒定的比能，实际钻井中，可通过式（1）由地面参数计算实时MSE，具备井下近钻头参数监测系统的钻井，可进一步获取消除钻杆传递损失的井下MSE。

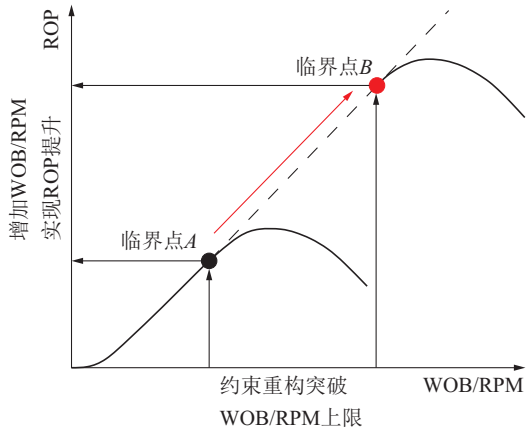

图2　ROP与WOB、RPM响应关系[6]

Fig.2　Response of ROP to WOB and RPM

$$E_{\mathrm{b}}=\frac{480TR}{D^2v_{\mathrm{m}}}+\frac{4P}{\pi D^2} \tag{1}$$

式中：E_{b}——机械碎岩比功，Pa；T——扭矩，N·m；R——转速，r/min；D——钻头直径，m；v_{m}——机械钻速，m/h；P——钻压，N。

工程上MSE的价值在于趋势判识。当WOB或RPM提高，ROP同步增加、MSE保持稳定或下降时，表明新增能量仍有效参与破岩；反之，ROP增长有限或下降而MSE持续升高，说明存在额外能量消耗，效率受约束。

1.3　深部硬岩钻井提速的主要物理约束类型

钻井参数加载过程中可能出现钻头磨损加剧、钻具涡动、黏滑、瞬时高扭矩、井底清洁恶化等异常[6,24]。这些异常在物理本质上可归结为两类机制：削弱切削齿的DOC，以及降低输入能量向破岩过程的传递效率。当某一机制占据主导地位时，系统即触及相应的物理约束（limiter），表现为ROP不再随参数增加而提升。本文归纳为以下五类。

（1）切削齿DOC受限。高强度、高弹性模量结晶岩中，钻头攻击性或WOB加载能力不足时，切削齿难以形成足够DOC。表征：低参数区间ROP随WOB上升，进一步加载后增幅迅速减弱，钻头磨损明显加剧。本质是新增能量未能转化为破碎岩石能量。

（2）钻井系统动力学稳定性受限。WOB、RPM或钻头攻击性达到一定水平后，可能出现黏滑、涡动、冲击振动及瞬时高扭矩等动力学异常，破坏齿-

岩稳定接触，能量以振动、摩擦及冲击形式耗散。表征：ROP波动加剧、扭矩不稳定、钻头损伤风险上升。

（3）工具承载与热稳定性受限。高温高载荷工况下，钻头、螺杆、稳定器及BHA承受更大力学载荷与热载荷，工具结构强度、抗冲击能力或耐温性能不足时，即便参数仍有提升空间也可能因工具失效而无法持续加载。表征：钻头磨损或损伤加快、寿命缩短、井下工具故障频发。

（4）井底压持与清洁效应受限。深部地热钻井中，为维持井壁稳定与井控安全，通常采用较高密度的钻井液，对低渗透结晶岩井底压持作用增强，岩屑不易脱离母岩，清洁效率降低，导致重复破碎与能耗增加。表征：高钻井液密度或水力不足时ROP受抑制，常与约束（1）、（2）耦合出现。

（5）高温下岩石-切削齿界面力学行为劣化。井底高温是深部地热钻井区别于常规油气钻井的显著特征。高温下结晶岩强度降低、脆性减弱、延性增强（脆-塑性转变多在300 ℃以上，但200 ℃即可观测到塑性力学性能的变化）[26-27]；PDC切削齿硬度与耐磨性下降，叠加齿-岩接触点摩擦生热与钻井液冷却减弱，热磨损加剧。表征：温度升高时MSE上升、ROP衰减，切削齿由崩齿转为热磨损与表面光滑化，寿命缩短，常与约束（1）、（3）耦合。

实际钻井中多种约束往往并存，主导性取决于工况及参数组合。工程判识应结合时间响应、多源信号及调整效果综合判断，不宜仅凭单一现象推断。图3[25]给出了不同主导约束下WOB、RPM与ROP的典型响应模式[6]。DOC受限时，初期ROP随WOB/RPM增长但很快趋于平缓；动力学稳定性受限时，ROP对RPM/WOB的响应表现为波动加剧甚至失稳；井底清洁或压持效应主导时，ROP对参数变化的响应整体受到抑制。

1.4 主导约束的现场判识原则

物理约束的现场判识是开展针对性重构的前提。深部高温硬岩钻井涉及多变量耦合，单一参数或现象难以反映系统全貌，需要基于多源信息进行综合判断，并结合可获取证据的完整性区分结论强度。

按证据完整性看，现场判识可分为三个层次：具备阶梯加载试验及MSE、振动、扭矩等高频响应数据并配合钻头/钻具起出检查时，证据较充分，可对主导约束作出较准确的判断；缺乏完整能效监测，但具备清晰的参数-钻速响应关系、异常工况记录及钻头磨损信息时，仍可形成稳健的工程判断；仅依靠跨井统计对比时，更适合趋势分析，不宜作单因素因果推断。

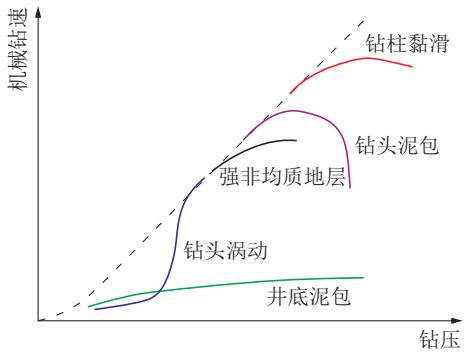

图3 不同主导物理约束下WOB、RPM与ROP的典型响应特征[25]

Fig.3 Typical response patterns of WOB, RPM, and ROP under different dominant physical limiters

多类异常同时出现时，主导约束判定可遵循：（1）时间一致性，即异常是否与ROP由高效区间转入受限区间同步出现；（2）多源一致性，即参数响应、振动/扭矩信号、工具状态等多类证据是否相互印证；（3）调整可重复性，即针对性调整后参数加载上限及ROP改善是否可重复。监测条件有限时，宜采用“优先关注”等审慎表述，避免基于单一现象作出强因果推断。

2 国际典型工程实践综述及共同规律

基于物理约束识别与重构的钻井提速方法已在多个深部地热硬岩钻井工程中得到应用[7-8,28-30]。各项目地质条件、井型结构与工程目标虽有不同，但提速过程均围绕主导物理约束的识别与针对性调整。从主导约束识别、重构措施、参数响应三方面对比Utah FORGE、Fervo Energy、Geysers GDC-36井及瑞士GVL-1井等案例，以提炼共性规律。

2.1 美国Utah FORGE项目

Utah FORGE项目是物理约束识别与工程重构方法系统化应用的代表性工程。其目标层为花岗岩类结晶岩，井深2500～3300 m，地层温度175～230 ℃，单轴抗压强度91～126 MPa[31-33]。项目初期钻井ROP 3.2 m/h，钻头及下部钻具组合磨损严重，WOB与RPM提升空间受限，表现出典型的受限区间特征。

现场采用阶梯加载试验配合MSE监测分析钻井参数与效率响应关系。如图4[6]所示，WOB逐级增加过程中，ROP在一定范围内近似线性增长；进一步提高RPM时ROP未见相应提升，而MSE明显升高，表明系统中存在额外能量耗散，钻进已由高效区

间进入受限区间。结合振动与钻头状态判断,该阶段主要受动力学稳定性及DOC不足的共同制约。

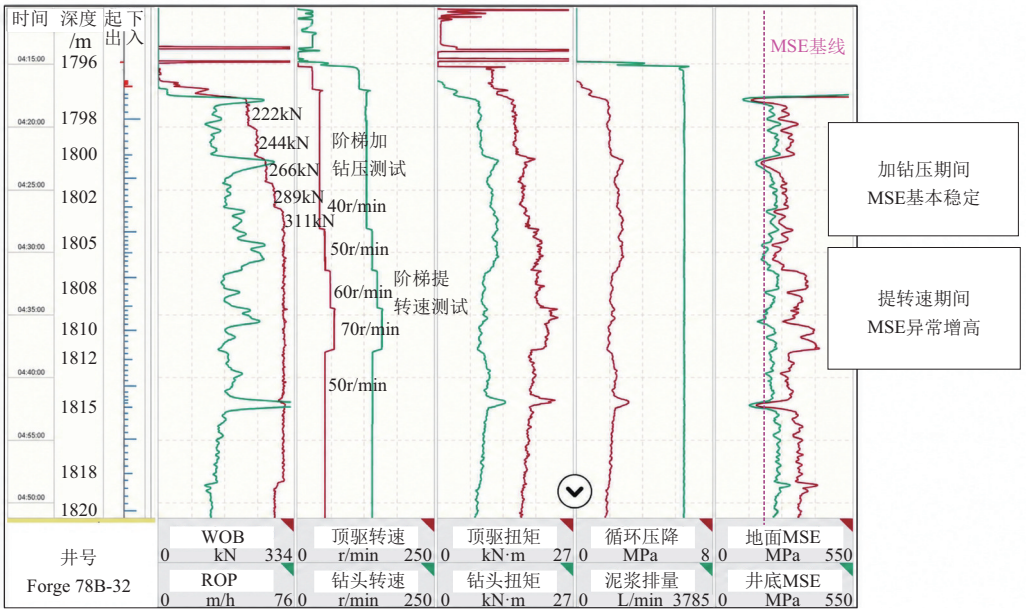

图4　Utah FORGE项目典型井段WOB、RPM阶梯试验中ROP与MSE响应特征[6]

Fig.4　Response of ROP and MSE during stepwise WOB and RPM tests in a representative section of the Utah FORGE

针对上述主导约束,项目未简单回调参数,而是围绕约束机制实施系统性工程重构,包括提高PDC钻头攻击性与结构强度、增强BHA刚度、采用清水钻井液减弱井底压持作用,并提升钻机与井下工具承载能力。重构后(表1、图5),WOB由122 kN提升为230～296 kN,RPM提高为180～212 r/min,平均ROP为9.25～20.21 m/h,钻头寿命显著延长[34-35]。

Utah FORGE案例表明,高温硬岩条件下钻进效率的显著提升并非来自于单一参数优化,而是依赖于主导物理约束的准确判识及围绕该约束的系统重构。其工程意义在于,通过"加载-判识-重构-再加载"的迭代流程,为单项工具或参数的改进提供方向指引,逐步拓展钻井系统的稳定高效工作区间。

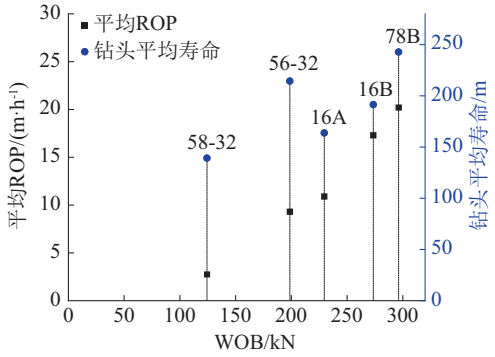

图5　Utah FORGE项目高温硬岩井段钻进效率统计

Fig.5　Drilling performance in high-temperature hard rock sections in the Utah FORGE

2.2　美国Fervo Energy项目

Fervo Energy项目紧邻Utah FORGE,是该方法从示范性工程走向商业化应用的代表[8-9,30]。该

表1　Utah FORGE项目在花岗岩类井段物理约束重构后钻进效率统计

Table 1　Drilling performance in granite sections after physical limiter redesign in the Utah FORGE

井　号	平均ROP/(m•h⁻¹)	平均进尺/m	平均WOB/kN	平均RPM/(r•min⁻¹)	排量/(L•s⁻¹)	钻机型号
58-32	3.20	139.2	122	162	28.2	Rig-10
16(A)78-32	10.64	163.8	230	212	38.2	Frontier Rig-16
56-32	9.25	214.4	213	200	44.3	Frontier Rig-16
78B-32	20.21	242.8	296	180	51.5	Frontier Rig-16
16(B)78-32	17.28	191.4	274	200	40.0	Frontier Rig-16

项目以大位移水平井为主，已在3个平台完成26口钻井施工，单井井身长度约4000 m，垂深约2500 m处开始造斜进行水平钻进，水平位移约1500 m，钻遇地层与Utah FORGE相同。项目在设计阶段即将基于物理约束识别与重构的提速流程纳入标准作业程序，通过持续的现场判识与分段调整，逐步提高钻头寿命、ROP和整井施工效率。

公开资料显示，该项目花岗岩地层水平段中，钻头寿命由早期平均约180 m提高至728 m，最高超过880 m（图6），平均ROP达到21.3 m/h，完钻周期由33.75 d缩短至16 d[8]。与Utah FORGE相比，Fervo Energy更强调流程的可复制性与工程组织效率，当钻头、BHA、钻机能力、井场作业方式与现场决策逻辑相互匹配时，物理约束重构可形成可复制的商业化工程路径。其关键在于将该方法纳入标准作业程序，从单井提速进一步走向工程组织级的可复制性。

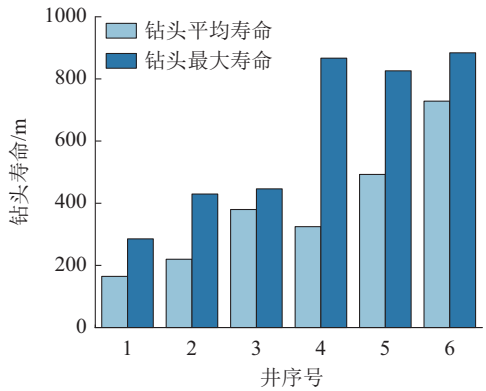

图6 Fervo Energy Cape Station项目钻头寿命逐步提升

Fig.6 Progressive improvement of bit footage in the Fervo Energy Cape Station geothermal project

2.3 美国Geysers GDC-36井

Geysers地热田是当前世界发电装机规模最大的地热田，储层裂隙发育，岩性非均质性强，漏失严重[29,36-38]。该地热田启动钻井提速技术验证项目，实施GDC-36定向井，完钻深度2810 m，地层与Utah FORGE差异较大：上部盖层为绿岩杂岩，下部热储层为热液蚀变且裂隙发育的硬质砂岩，混杂蛇纹岩、燧石等，1500 m以深地层温度＞232 ℃，单轴抗压强度250～280 MPa[39]。

GDC-36井引入基于物理约束重构的提速方法及硬岩PDC钻头。如图7所示，一开PDC钻头ROP较对照井提高400%，牙轮钻头提高140%；二开PDC钻头ROP提高700%；三开PDC钻头ROP提高70%[29]。因储层裂隙发育、漏失严重，三开转换为空气钻井，这与裂隙热储层强非均质地层导致的异常工况有关：井底产生强烈振动与瞬时高扭矩，致使PDC切削齿崩齿或断裂。该案例说明，物理约束重构方法不仅能用于推进参数加载，还能识别何时应停止推进参数、何时应将重点从提速转向风险控制，对于强非均质储层，动力学稳定性往往比DOC或ROP更早成为关键约束。

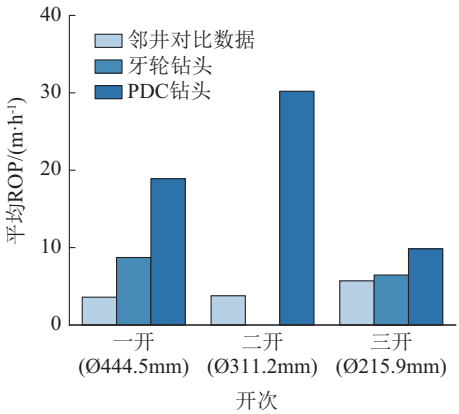

图7 Geysers地热田GDC-36井各开次不同钻头类型ROP对比

Fig.7 Comparison of mechanical ROP for different bit types across drilling sections in Well GDC-36 in the Geysers geothermal field

2.4 瑞士GVL-1深部地热井

GVL-1深部地热井位于瑞士西北部，完钻深度4041.5 m，井底岩性以片麻岩和花岗岩等结晶岩基底为主，单轴抗压强度达193 MPa[28]。文献未给出明确井底温度，据区域地温梯度估算井底地层温度135～160 ℃，属典型深层地热硬岩钻井工况。工程中通过MSE监测与WOB优化，识别出钻头早期磨损和振动是限制钻速提升的主要因素，据此重新选配钻头并逐步加大WOB。改进后均质结晶岩井段稳定钻速达到8～10 m/h（图8），较原方案提高约30%～50%，且MSE波动减小、钻头寿命延长。

2.5 国际案例综合分析

综合上述实践，深部地热高温硬岩钻井提速呈现四个共性：(1)提速关键不在参数极限化，而在于围绕主导约束的系统重构，钻头攻击性、BHA刚度、钻机能力与钻井液体系协同匹配是前提；(2)现场判识与迭代验证是方法核心；(3)方法适用性受地层均质性、监测条件与装备能力约束；(4)方法不仅

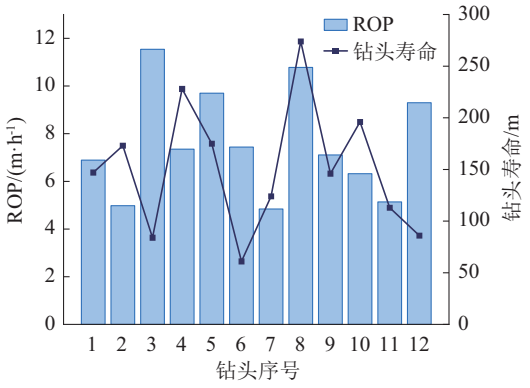

图8　瑞士GVL-1深部地热井物理约束重构后钻井参数

Fig.8　Drilling performance after physical limiter redesign in the deep geothermal well GVL-1 in Switzerland

服务提速，亦可识别稳定作业上限，复杂工况下界定参数边界与提速同等重要。

3　中国深部地热钻井现状与典型案例分析

3.1　深部地热硬岩钻井的总体水平

中国在深部地热与干热岩勘查开发领域已实施多项钻井工程，井深一般2500～4500 m，目标层多为花岗岩、花岗闪长岩等结晶基底岩石，井底温度普遍＞150 ℃，部分工程＞200 ℃[5,40]。典型工程包括：山东利津DR1井，完钻井深2500.58 m，井底温度109 ℃，Ø215.9 mm口径花岗岩井段平均ROP 0.89 m/h[41-43]；福建漳州HDR-1井，完钻井深4000.86 m，井底温度＞109 ℃，Ø215.9 mm口径花岗岩井段平均ROP 1.36 m/h[41-42,44]；河北马头营M-1井（完钻井深4502 m）、M-2井（完钻井深4500.82 m），井底温度＞150 ℃，储层为变质花岗闪长岩，M-1井ROP 1.0～1.7 m/h，M-2井经螺杆提速、采用粗径钻具、提升WOB、提高排量等措施，ROP提高至2.46 m/h[45-46]；共和盆地GR1井，完钻井深3705.42 m，井底温度＞200 ℃，Ø215.9 mm花岗岩井段平均ROP 1.30 m/h，钻头寿命86～95.7 m[10,47]；山西大同某干热岩勘探井2333～2500 m井段，牙轮钻头平均ROP 1.55 m/h，PDC钻头平均ROP 0.52～1.71 m/h[41]。

上述数据表明，中国深部地热钻井在花岗岩类硬岩中整体效率偏低：ROP集中于0.8～2.5 m/h，少数井段可短时达3.0～3.5 m/h，但难以长期维持；钻头单趟进尺普遍低于100 m，多数集中于40～80 m。表2汇总了中国典型深部地热钻井工程在花岗岩及类似硬岩中的关键指标，各工程地质条件虽异，但钻速、WOB加载能力与钻头寿命表现出一致性，反映了中国深部硬岩钻进效率受限并非个案，尚未形成面向高温高应力结晶岩的工程技术体系。

表2　中国典型深部地热钻井工程花岗岩井段钻进效率统计

Table 2　Drilling performance statistics of representative deep geothermal wells in granite

区域	井深/m	地层	ROP/(m•h⁻¹)	进尺/m	WOB/kN	RPM/(r•min⁻¹)	排量/(L•s⁻¹)	钻机型号
共和	≈4000	花岗岩	1.1～2.0	40～120	100～170	65～218	24～33	大庆130、ZJ50
马头营	≈4500	花岗岩	1.0～1.7	50～100	60～175	120～240	17～36	ZJ40
漳州	≈4000	花岗岩	1.2～2.5	60～90	90～150	～80		ZJ30
山西	＞2500	片麻岩	1.5～1.7	70～110	80～160			ZJ40
山东	＞2500	花岗岩	0.89	131.8	70	40～60		TSJ3000

注：表中钻进效率指标受地层条件、钻机型号、钻头规格及钻井液体系等多因素综合影响，其中钻机型号与装备能力差异是影响不同工程效率差异的重要因素之一（见3.3节）。

3.2　共和盆地干热岩钻井工程参数-效率响应特征

共和盆地干热岩钻井工程在井深、温度、岩性连续性及实施完整性等方面具有较好的代表性。该区花岗岩连续分布，单轴抗压强度＞200 MPa，4000 m井深井底实测温度达209 ℃，并在多口井中对不同钻头类型、参数组合及工艺配置进行了系统尝试[11,14,17,21-22,48-52]。该工程未布设MSE能效监测，但通过WOB、RPM、ROP及现场工况记录综合分析，仍可识别钻进效率由近线性转入受限状态的特征。各井三开Ø215.9 mm口径花岗岩井段钻进参数见表3。钻头类型优化、螺杆钻具应用及参数协同调整后，平均ROP由约1.16 m/h提高至1.73～1.97 m/h，最高钻速＞3.0 m/h，钻头寿命由不足50 m提高至近120 m，显示出阶段性改善效果。对应

地，WOB由100～120 kN提高至120～170 kN，RPM由约65 r/min提升至200 r/min以上（表3、图9）。

表3 共和盆地干热岩钻井花岗岩井段钻进参数

Table 3 Drilling performance of the Ø215.9 mm section in the third drilling interval of the Gonghe hot dry rock project

阶段	井号	平均ROP/(m•h^{-1})	钻头平均寿命/m	WOB/kN	RPM/(r•min^{-1})	排量/(L•s^{-1})	钻井液密度/(g•cm^{-3})
前期	GH-01	1.16	44.8	100～120	65	24～28	1.12～1.14
中期	GH-02	1.78	74.9	120～140	218	33	1.13～1.38
	GH-03	1.97	79	100～140	195～215	34	1.15～1.16
后期	GH-04	1.93	118.2	120～140	200	27～32	1.2～1.25
	GH-05	1.73	118.7	150～170	197～217	28～33	1.20～1.24

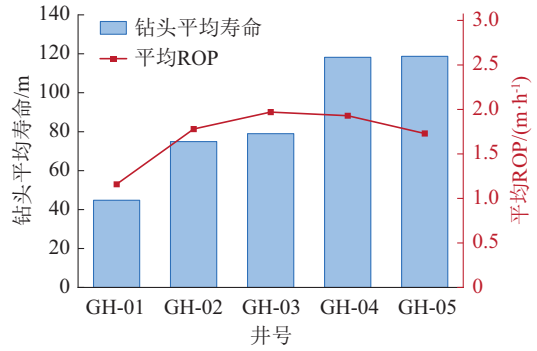

图9 共和盆地干热岩钻井工程花岗岩井段各井钻头寿命、ROP对比

Fig.9 Comparison of bit footage and ROP in granite sections of wells in the Gonghe HDR project

对比表3可知：从GH-01井到GH-02井、GH-03井，采用螺杆钻具，RPM由65 r/min提高至218 r/min，WOB由100～120 kN提高至120～140 kN，增幅约20%～40%，ROP由1.16 m/h提高至1.78 m/h，提升约53%；后续钻井（GH-04井、GH-05井）虽继续提高WOB、RPM并优化钻头，但ROP稳定在1.7～2.0 m/h，未出现与参数同步的进一步提升，表明钻井系统已由近线性响应区间进入受限区间。结合钻头磨损、井下工况及钻井液条件分析，该阶段可能主要受切削齿DOC不足及工具承载能力的共同制约：高密度钻井液增强井底压持，钻头攻击性与WOB加载能力不足以建立有效切削深度，RPM进一步提高也难以补偿。

该案例表明，即便缺乏MSE，仍可通过参数-效率响应与现场记录对主导约束作初步判识；但因多参数同步变化，结论更适合作工程趋势分析，不宜作严格单因素机制验证。

3.3 中外深部地热钻进效率对比

对比中国典型工程与美国Utah FORGE等项目可以看出，在相似花岗岩类坚硬地层条件下，国外项目在WOB 230～300 kN、RPM 180～220 r/min下，平均ROP可达20 m/h，钻头寿命普遍为300～800 m；而中国类似工程中，WOB多集中在80～170 kN，平均ROP为1～3 m/h，钻头寿命普遍＜100 m（见图10）。

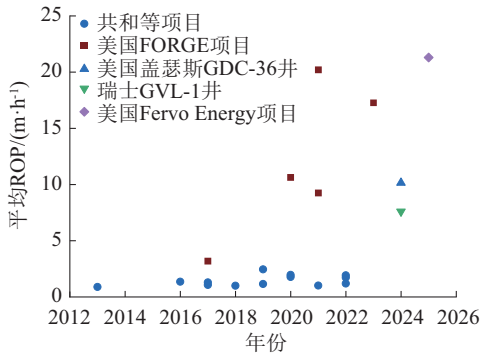

图10 中外深部地热硬岩钻井ROP对比

Fig.10 Comparison of ROP between domestic and international deep geothermal drilling projects

从参数水平与装备能力来看，中美存在明显差距。Utah FORGE 3200 m深井配3台1600 HP（1 HP≈745.7 W，下同）泥浆泵、97.8 kN·m顶驱，总功率4035 kW，WOB上限＞300 kN，相当于7000 m油气钻井装备。共和盆地等井深更大工程则使用常规5000 m钻机，配2台1300 HP泥浆泵、32 kN·m转盘，WOB上限＜180 kN，总功率2400 kW；部分近4000 m项目甚至配3000 m钻机，装备与井深匹配度偏低。这一差距背后反映的是单井预算与综合钻井成本的差距，中国综合成本远低于美国，限制了高功率钻机、高扭矩顶驱、高频监测系统的配置，进而限制方法的参数空间。

地层埋深、地应力、岩石强度等因素亦影响效

率,但当前数量级差异难以由单一地质因素解释。从物理约束角度看,根本差距更体现在钻井系统的高参数协同加载能力,即难以在高WOB、高RPM与大排量条件下长期稳定运行。

4　物理约束识别与重构方法在中国深部地热钻井条件下的适用性分析

4.1　方法应用的核心目标

该方法的核心目标不是追求瞬时最大ROP,而是在风险可控的前提下,通过"识别主要约束-调参-观察反馈-改进"循环,使钻井系统维持在稳定高效的工作区间。该方法在美国、瑞士等深部地热高温硬岩钻井中已显示出良好效果,但其有效实施需要更高功率的钻机与顶驱,以及高频井下参数采集与MSE实时监测。中国共和盆地等深部地热工程,面临井深更大、地应力更高、钻井液密度普遍更高,且钻机功率储备、泥浆泵排量及实时监测条件仍存在差距,难以直接照搬国外的高参数运行窗口。

结合中国实际工程条件,方法应用宜遵循:(1)由追求参数极值转向分阶段拓展有效工作区间;(2)由依赖单一指标转向基于多源证据综合判识;(3)由单参数优化转向"钻机-钻头-钻具-钻井液-作业流程"系统协同优化。其核心仍是以主导物理约束为主线组织工程决策。

4.2　现场判识与迭代验证流程

结合1.4判识原则,方法现场应用并非必须依赖实时MSE,核心流程可概括为参数加载-响应采集-证据判识-约束识别-针对性调整-再验证的迭代循环(图11)。

先根据井段岩性、井深、温度及井壁稳定风险划分作业区间,建立基准工况;对WOB与RPM实施小步长阶梯加载,同步记录ROP、扭矩、泵压、返速、振动及钻头磨损等信息;据ROP是否近线性增长及异常信号变化判断系统是否进入受限区间。进入受限区间后,按时间一致性、多源一致性及可重复性原则判识主导物理约束并针对性调整。调整后回调至安全区间重新加载验证,仅当高效区间得到可重复拓展方可进入下一轮参数加载。该流程将钻井提速由一次性参数试错转化为基于证据的迭代优化。

4.3　面向中国工程条件的分阶段应用路径分析

基于中国深部地热钻井工程特点,本文认为该方法应用宜采取"现有钻井平台优化-关键能力补强-系统协同升级"的分阶段路径,在现有条件下逐步提升WOB、RPM与排量的协同加载能力,避免一次性高功率体系建设的技术与经济风险。

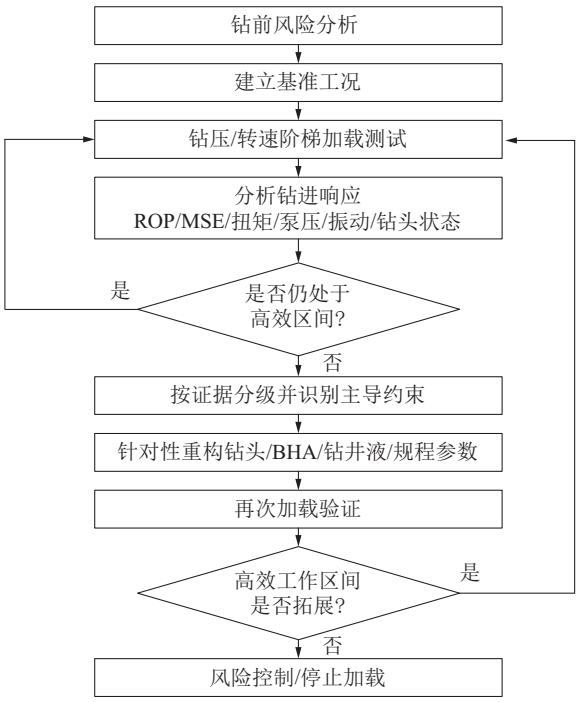

图11　物理约束识别与重构钻井提速实施流程

Fig.11　Workflow for physical-limiter identification and redesign in drilling performance improvement

第一阶段,在现有平台上开展低风险优化:规范参数阶梯加载及现场记录流程,优化钻头类型与喷嘴配置,改善井底清洁效率。重点是建立参数-响应基准关系,初步具备受限区间判识能力。

第二阶段,围绕已识别的主导约束开展针对性能力补强:DOC不足时,优先提升钻头攻击性与WOB加载能力;动力学异常时,优化BHA结构与刚度;工具寿命受限时,提升钻头及井下工具的耐温与抗冲击性能。该阶段应坚持"判识-调整-验证"迭代逻辑,不宜同时叠加多项措施。

第三阶段,在前期判识验证基础上,逐步推进系统协同升级,包括提升钻机功率、顶驱扭矩与泥浆泵能力,完善实时监测条件,目标是实现高参数工况下的稳定运行。

分阶段路径以主导物理约束为主线,逐步提升系统能力,而非跨越式参数提升。这一路径的推进不仅是技术问题,更涉及单井预算与综合钻井成本提升。装备升级与预算保障是中国深部地热钻井系统化提速的两项相互依存的支撑条件。

4.4 关键数据需求

该方法有效应用的关键在于现场数据体系完整性。建议加强WOB、RPM、扭矩、泵压、振动等高频参数采集，建立钻头磨损与寿命的标准化记录；具备条件的工程逐步引入实时或准实时MSE监测。随着中国钻井数据获取能力提升，物理约束判识将由工程推断逐步向定量分析发展，提高该方法的适用性与决策可靠性。

5 结论

(1)深部地热硬岩钻井是多系统耦合的复杂工程，基于物理约束识别与重构的方法，以钻头碎岩机理、机械碎岩比功等基础物理理论为分析主线，将多参数耦合问题压缩至“能量是否有效转化”这一维度，从而识别主要矛盾。

(2)Utah FORGE、Fervo Energy等工程实践表明，持续提速依赖于“参数阶梯加载-工况响应判识-针对性重构-迭代验证”的过程，而非单纯提高WOB或RPM。监测完善且装备能力足够时，在花岗岩类地层中可实现ROP＞20 m/h，钻头寿命300～800 m，强非均质及高漏失井段同样适用，重点在于识别稳定作业上限。

(3)工程资料表明，中国共和盆地、东南沿海等深部地热高温硬岩钻井总体仍处于较低效率区间，ROP1～3 m/h，钻头寿命多低于100 m。以共和盆地为代表的案例显示，通过钻头、参数与工艺协同优化可获得阶段性提升。

(4)类似工程中，中国与美国钻进效率的差异不仅受地质条件影响，更体现为钻井系统在高WOB、高RPM与高排量协同加载能力方面的差距。综合现有证据，DOC不足、动力学稳定性受限及工具承载能力不足是主要限制因素，井底压持与清洁效应的具体作用仍需结合实测数据进一步验证。

(5)中国应用物理约束识别与重构方法宜采取分阶段、基于证据的应用路径，以迭代循环为核心，在现有装备与监测条件下逐步拓展工作区间，避免直接照搬美国等高参数窗口。随着中国装备与监测水平提升，方法的判识精度将进一步提高，可为深部地热及深层、超深层硬岩钻井工程提供方法参考。

(6)中国深部地热高温硬岩钻进效率的突破性提升，不仅需引入物理约束识别与重构方法，更需在单井预算与装备配置上给予相应保障。

参考文献(References)：

[1] 曹锐，多吉，李玉彬，等.我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J].工程科学学报，2022，44(10)：1623-1631.
CAO Rui, DOR Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1623-1631.

[2] 许天福，文冬光，袁益龙.干热岩地热能开发技术挑战与发展战略[J].地球科学，2024，49(6)：2131-2147.
XU Tianfu, WEN Dongguang, YUAN Yilong. Technical challenges and strategy of geothermal energy development from hot dry rock[J]. Earth Science, 2024, 49(6): 2131-2147.

[3] 孙焕泉，方吉超，罗璐，等.干热岩型地热开发技术与发展方向[J].地学前缘，2026，33(4)：340-356.
SUN Huanquan, FANG Jichao, LUO Lu, et al. Development technologies and future directions for hot dry rock geothermal energy[J]. Earth Science Frontiers, 2026, 33(4): 340-356.

[4] 李根生，武晓光，宋先知，等.干热岩地热资源开采技术现状与挑战[J].石油科学通报，2022，7(3)：343-364.
LI Gensheng, WU Xiaoguang, SONG Xianzhi, et al. Status and challenges of hot dry rock geothermal resource exploitation technology[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(3): 343-364.

[5] 李根生，熊超，黄中伟，等.干热岩钻井技术发展现状与建议[J].石油学报，2026，47(1)：279-293.
LI Gensheng, XIONG Chao, HUANG Zhongwei, et al. Status and suggestions on hot dry rock drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2026, 47(1): 279-293.

[6] Dupriest F, Noynaert S. Drilling practices and workflows for geothermal operations[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: SPE, 2022: SPE-208798-MS.

[7] Dupriest F, Noynaert S. Continued advances in performance in geothermal operations at FORGE through limiter-redesign drilling practices[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition. Galveston: SPE, 2024: SPE-217725-MS.

[8] Singh A, Galban G, McClure M, et al. Designing the record-breaking enhanced geothermal system at Project Cape[C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Houston: Unconventional Resources Technology Conference, 2025: URTEC-4245311-MS.

[9] Akindipe D, Witter E. 2025 geothermal drilling cost curves update[C]//Proceedings of the 50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2025: SGP-TR-229.

[10] 谭现锋，王景广，郭新强，等.螺杆钻进工艺在青海共和干热岩GR1钻井中的应用[J].钻探工程，2021，48(2)：49-53.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, GUO Xinqiang, et al. Application of PDM drilling technology in Well-GR1 drilling in hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 49-53.

[11] 王跃伟，李宽，张恒春，等.液动潜孔锤用于干热岩钻进的优化与试验[J].钻探工程，2022，49(6)：36-41.
WANG Yuewei, LI Kuan, ZHANG Hengchun, et al. Optimi-

zation and test of hydraulic DTH hammers used in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):36-41.

[12] 刘畅,许洁,冉恒谦.干热岩抗高温环保水基钻井液体系[J].钻井液与完井液,2021,38(4):412-422.
LIU Chang, XU Jie, RAN Hengqian. An environmentally friendly high temperature water based drilling fluid for hot-dry-rock well drilling[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2021, 38(4):412-422.

[13] 谭现锋,王景广,赵长亮,等.涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用[J].水文地质工程地质,2021,48(1):195-202.
TAN Xianfeng, WANG Jingguang, ZHAO Changliang, et al. A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2021,48(1):195-202.

[14] 翁炜,吴烁,贺云超,等.高温硬岩受控钻进新技术、新方法及应用[J].地学前缘,2024,31(6):120-129.
WENG Wei, WU Shuo, HE Yunchao, et al. New technologies, methodology and application in directional high-temperature hard rock drilling-a critical review[J]. Earth Science Frontiers, 2024,31(6):120-129.

[15] 毛翔,王浩文.干热岩钻完井技术挑战及展望[J].地球科学前沿,2025,15(11):1498-1506.
MAO Xiang, WANG Haowen. Challenges and prospects of hot dry rock drilling and completion technology[J]. Advances in Geosciences, 2025,15(11):1498-1506.

[16] 高科,高红通,谭现锋,等.仿生异型齿钻头在干热岩钻探中的应用[J].吉林大学学报(地球科学版),2018,48(6):1804-1809.
GAO Ke, GAO Hongtong, TAN Xianfeng, et al. Application of bionic abnormal shape bit in dry rock drilling[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018,48(6):1804-1809.

[17] 李宽,施山山,张新刚,等.干热岩定向钻井关键技术研究与应用[J].钻采工艺,2024,47(5):7-14.
LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Xingang, et al. Research and application of key technology of directional drilling for hot dry rock[J]. Drilling & Production Technology, 2024,47(5):7-14.

[18] 李晓东,熊正强,邹志飞.高温环保钻井液研究及其干热岩钻探应用[J].地质论评,2024,70(S1):311-312.
LI Xiaodong, XIONG Zhengqiang, ZOU Zhifei. Research on high temperature and environmentally friendly drilling fluid and its application in HDR drilling[J]. Geological Review, 2024,70(S1):311-312.

[19] 谭现锋,张强,赵长亮,等.侧钻绕障技术在干热岩HDR-1井中的应用[J].钻探工程,2023,50(3):83-91.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAO Changliang, et al. Application of sidetracking to obstacle bypassing in hot dry rock well HDR-1[J]. Drilling Engineering, 2023,50(3):83-91.

[20] 王勇军,聂德久,袁宝宏,等.天阳盆地高温硬岩地热钻探PDC钻头的研究应用[J].钻探工程,2024,51(6):125-131.
WANG Yongjun, NIE Dejiu, YUAN Baohong, et al. Research and application of PDC bit for geothermal drilling in high temperature hard rock in Tianyang Basin[J]. Drilling Engineering, 2024,51(6):125-131.

[21] 张恒春,王稳石,李宽,等.KT178型取心钻具在共和干热岩钻井中的应用[J].钻探工程,2021,48(2):29-34.
ZHANG Hengchun, WANG Wenshi, LI Kuan, et al. Application of the KT178 core tool in Gonghe hot dry rock exploratory wells[J]. Drilling Engineering, 2021,48(2):29-34.

[22] 罗宏保,李俊萍,吴金生.高温硬岩空气潜孔锤钻头设计[J].钻探工程,2021,48(4):60-65.
LUO Hongbao, LI Junping, WU Jinsheng. Development of the air DTH hammer drilling bit for high temperature hard rock [J]. Drilling Engineering, 2021,48(4):60-65.

[23] Teale R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1965,2(1):57-73.

[24] 高德利,刘维,万绪新,等.PDC钻头钻井提速关键影响因素研究[J].石油钻探技术,2023,51(4):20-34.
GAO Deli, LIU Wei, WAN Xuxin, et al. Study on key factors influencing the ROP improvement of PDC bits[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023,51(4):20-34.

[25] Dupriest F. Comprehensive drill-rate management process to maximize rate of penetration[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio: Society of Petroleum Engineers, 2006:SPE-102210-MS.

[26] 程腾飞,陈晨,姜升,等.酸性水-岩作用下花岗岩孔隙结构与热-力学性能劣化机理的实验研究[J].钻探工程,2026,53(1):46-51.
CHENG Tengfei, CHEN Chen, JIANG Sheng, et al. Experimental study on the degradation mechanism of granite pore structure and thermo-mechanical properties under acidic water-rock interaction[J]. Drilling Engineering, 2026,53(1):46-51.

[27] 谭现锋,张强,战启帅,等.干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J].钻探工程,2023,50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):110-117.

[28] Garcia A, El-Alfy A, Noynaert S, et al. Limiter redesign workflow yields positive results in deep geothermal drilling in Switzerland[C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition. Stavanger: SPE, 2025:SPE-223784-MS.

[29] Raymond D, Schneider M, Su J, et al. Use of rig parameter data in bit constraint models for improved drilling performance at the Geysers[C]//59th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Santa Fe: American Rock Mechanics Association, 2025:ARMA-2025-0662.

[30] Fercho S, Matson G, McConville E, et al. Geology, temperature, geophysics, stress orientations, and natural fracturing in the Milford valley, UT informed by the drilling results of the first horizontal wells at the Cape modern geothermal project [C]//49th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2024:SGP-TR-227.

[31] Jones C, Simmons S, Moore J. Geology of the Utah Frontier Observatory for Research in Geothermal Energy (FORGE) Enhanced Geothermal System (EGS) site[J]. Geothermics, 2024,122:103064.

[32] Ramadan A, Gabry M A, Soliman M Y, et al. Utah FORGE: a decade of innovation-comprehensive review of field-scale advances (part 1)[J]. Processes, 2026,14(3):512.

[33] 张炜,王海华,翁炜,等.美国能源部地热钻井技术研发最新部署及干热岩开发示范创新实践[J].钻探工程,2024,51(3):1-8.
ZHANG Wei, WANG Haihua, WENG Wei, et al. The latest deployment of the U. S. Department of Energy's geothermal drilling technology R&D and innovative practices in the demonstration of hot dry rock development[J]. Drilling Engineering, 2024,51(3):1-8.

[34] McLennan J. Utah FORGE: Well 16A (78) -32 drilling data [R]. Salt Lake City: Energy and Geoscience Institute at the University of Utah, 2021.

[35] McLennan J. Utah FORGE: Well 16B (78) -32 drilling data [R]. Salt Lake City: Energy and Geoscience Institute at the University of Utah, 2023.

[36] Su J, Raymond D, Schneider M, et al. Physics-based limiter redesign and bit performance analysis at The Geysers[C]// 50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2025:SGP-TR-229.

[37] Edelman E C, Xing P, McLennan J, et al. Wellbore stability and mud loss management in geothermal drilling: optimizing mud weight to mitigate tensile wellbore fracturing at The Geysers, California[C]//59th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Santa Fe: American Rock Mechanics Association, 2025:ARMA-2025-0332.

[38] Xing P J, Edelman E, Vega-Ortiz C, et al. Evaluation of drilling performance at the Geysers with machine learning methods using geologic data[C]//50th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford: Stanford University, 2025: SGP-TR-229.

[39] Lutz S J, Walters M, Pistone S, et al. New insights into the high-temperature reservoir, northwest Geysers[J]. Transactions - Geothermal Resources Council, 2012,36:907-916.

[40] 文冬光,张二勇,王贵玲,等.干热岩勘查开发进展及展望[J].水文地质工程地质,2023,50(4):1-13.
WEN Dongguang, ZHANG Eryong, WANG Guiling, et al. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2023, 50(4):1-13.

[41] 谭现锋.干热岩高效钻井关键技术研究与应用[D].武汉:中国地质大学,2022.
TAN Xianfeng. Research and application of key technologies for high efficient drilling in HDR[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.

[42] 谭现锋,马哲民,段隆臣,等.复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(7):1-8.
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):1-8.

[43] 谭现锋,刘肖,王贵玲,等.利津干热岩型地热资源调查评价关键技术研究[J].地质学报,2020,94(7):2166-2176.
TAN Xianfeng, LIU Xiao, WANG Guiling, et al. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin[J]. Acta Geologica Sinica, 2020,94(7):2166-2176.

[44] 李亭昕,蔺文静,甘浩男,等.东南沿海干热岩资源成因模式探讨及勘查进展[J].地质力学学报,2020,26(2):187-200.
LI Tingxin, LIN Wenjing, GAN Haonan, et al. Research on the genetic model and exploration progress of hot dry rock resources on the southeast coast of China[J]. Journal of Geomechanics, 2020,26(2):187-200.

[45] 张云,高亮,刘现川,等.唐山马头营干热岩M-1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2022,58(1):176-186.
ZHANG Yun, GAO Liang, LIU Xianchuan, et al. Drilling technology of the M-1 well in hot dry rock of Matouying, Tangshan [J]. Geology and Exploration, 2022, 58 (1): 176-186.

[46] 张云,高亮,田增霞,等.唐山马头营干热岩M-2井钻井工艺[J].中国地质调查,2023,10(1):118-124.
ZHANG Yun, GAO Liang, TIAN Zengxia, et al. Drilling technology of well M-2 in Matouying dry hot rock of Tangshan [J]. Geological Survey of China, 2023,10(1):118-124.

[47] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai Province [J]. Geology and Exploration, 2018,54(5):1038-1045.

[48] Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, et al. The first power Generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. China Geology, 2022,5(3):372-382.

[49] Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, et al. Two stages power generation test of the hot dry rock exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, northeastern Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. China Geology, 2024,7(3): 409-421.

[50] 李宽,施山山,张恒春,等.共和盆地干热岩GH-05井钻井关键技术[J].钻探工程,2026,53(2):131-139.
LI Kuan, SHI Shanshan, ZHANG Hengchun, et al. Key technologies of well GH-05 drilling for hot dry rock in Gonghe Basin[J]. Drilling Engineering, 2026,53(2):131-139.

[51] 张德龙,郭强,杨鹏,等.地热井花岗岩地层钻进提速技术研究与应用进展[J].地质与勘探,2022,58(5):1082-1090.
ZHANG Delong, GUO Qiang, YANG Peng, et al. Progress in research and application of drilling speed-up technology for granite formation in geothermal wells[J]. Geology and Exploration, 2022,58(5):1082-1090.

[52] 叶成明,吴海东,金显鹏,等.共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价项目成果报告[R].北京:自然资源部中国地质调查局,2022.
YE Chengming, WU Haidong, JIN Xianpeng, et al. Project report on experimental development and evaluation of hot dry rock in Qiabuqia, Gonghe Basin[R]. Beijing: China Geological Survey, Ministry of Natural Resources, 2022.

(编辑 王跃伟)