

# 强构造活动带干热岩储层测井评价技术

李 进, 李海燕, 刘俊东, 郝丽萍, 郭祥光,  
卓 坤, 徐锦峰, 徐 陈

(中国石油集团测井有限公司天津分公司, 天津 300280)

**摘 要:** 建设干热岩增强型地热系统, 其核心技术是通过水力压裂改造热储层, 形成“四通八达”的裂缝网络, 提高注采过程中的热交换能力, 实现在不具备经济价值的高温热储层中采集能量的目的。测井评价技术可以详细描述热储层岩性、基础物性以及裂缝发育特征, 在干热岩开发中发挥着重要作用。笔者结合多维高精度成像测井, 通过分析有利于提高地层导流能力、热交换能力的敏感因素, 提出了定量表征热储层先天裂缝空间分布和后天力学拓展能力的评价方法, 在干热岩热储品质和工程品质精细评价的基础上, 形成了一套基于多参数融合的优势岩相综合评价技术。该技术不仅提升了热储层的地质认识, 而且为增强型地热系统后期压裂开发方案制定提供了有效的技术支持。

**关键词:** 干热岩; 热储品质; 工程品质; 多参数融合; 优势岩相划分

**中图分类号:** P314 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2025.01.08

## 0 引言

地热资源是一种新型、可持续供应的清洁型能源。地热资源勘探开发是将地球作为一个热库, 通过对埋藏于地壳深处, 温度高于 150℃ 的高温岩体中部署一注多采的勘探孔, 采用裂缝激发技术, 从地面向井眼中注入低温流体。在温度差异以及水力改造作用下, 高温岩石发生收缩、破裂、剪切位移等现象, 形成了“四通八达”的裂缝连通网络。在此过程中, 低温流体由井眼流经地层微裂缝, 与高温岩相充分接触, 将热量携带回地表, 实现地热发电等效益开发的目的。早在 20 世纪 70 年代末, 西欧发达国家相继开展了地热资源的研究和开发工作。较为成功的有法国的 Soultz EGS 项目和德国的 Landau EGS 发电示范项目。“十二五”期间, 我国开始启动干热岩资源的研究、调查工作<sup>[1]</sup>。2017 年《地热能开发

利用“十三五”规划》发布以来, 我国地热资源的勘查开发与综合利用走上了规范、可持续的道路。西藏、山西、海南、福建、青海等地高温地热资源的开发已被视为促进碳中和的重要方式<sup>[2]</sup>。

到目前为止, 经过持续的实践与探索, 中国在干热岩勘探开发领域取得了一定成果, 形成了一套干热岩型地热资源勘查方法, 提交了多个中型低温地热田和中型中高温地热田, 为地热资源的开发利用提供了关键依据。然而, 由于干热岩储层地质条件复杂, 具有明显的“四高”特点, 即高温、高硬度、高应力和高研磨性, 这给储层改造带来了巨大挑战。为此, 需要采用更先进的技术和方法来应对这些挑战, 以推动干热岩资源的有效开发和利用。针对该现状, 笔者通过充分发挥地球物理探测的作用, 重点以强构造活动带地热勘探井的地球物理资料为主线, 揭示了地热资源的地物特征, 在干热岩热储品质和工程品质精细评价的基础上, 形成了一套基于多参

收稿日期: 2023-11-23

基金项目: 中国石油集团测井有限公司科学研究与技术开发项目(CNLC2022-9C04)

第一作者: 李进(1987—), 女, 硕士, 二级工程师, 主要从事测井资料解释评价工作, E-mail: lijing@cnpc.com.cn.

数融合的优势岩相综合评价技术,提升了热储层的地质认识,同时为后期压裂开发方案制定提供有效的技术支持。

## 1 研究靶区特征

国内强构造活动带型干热岩资源主要分布在青藏高原地区。图 1 为目标靶区地质构造图。受亚欧板块和印度洋板块的挤压,新生代以来青藏高原逐渐隆升,周边岩浆活动频繁,局部岩浆底侵,形成了良好的干热岩地热资源活跃区域。张森琦等<sup>[3]</sup>对靶区地质概况进行了研究,区块基底

基本呈现东浅西深特征,基底主体以侵入年龄 224 Ma~248 Ma 的中晚三叠世浅灰色黑云母花岗闪长岩、二长花岗岩、花岗岩为主,温度最高可达 216 °C/4 200 m;基底上部主要为早中三叠世隆务河组、中三叠世古浪堤组和中晚三叠世花岗岩,埋深在 950 m~1 450 m 不等;基底中下部为古生界—元古界变质岩系。上覆盖层主要由古近—新近纪西宁组、中新世咸水河组、上新世临夏组 and 早中更新世共和组的中厚层泥岩夹中厚层粉砂岩组成,地层完整性较好,仿佛一条热毯包裹着热储层,隔热保温性能高,为干热岩的二次聚热提供了有利条件<sup>[4]</sup>。

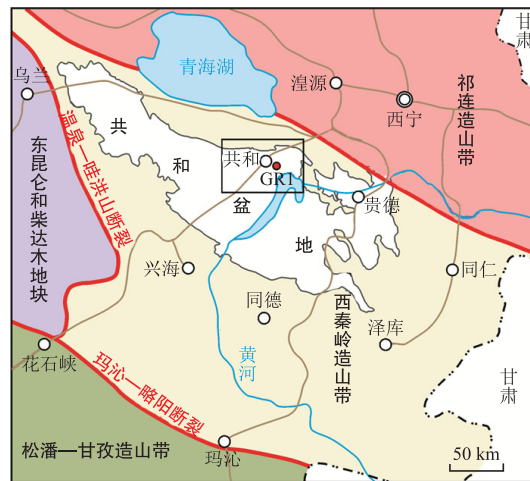


图 1 青海高原靶区地质构造图

Fig. 1 Geological structure map of the target area on the Qinghai Plateau

## 2 测井资料采集及解释

测井数据现场采集作业由中国石油集团测井有限公司承担,通过 5700 及 logIQ 成像数控测井仪,录取了包括自然伽马能谱测井在内的常规测井资料,以及多极子阵列声波测井、井周声波成像测井、微电阻率扫描成像测井、方位远探测声波测井等多域高精度成像测井资料。井温测井在连续一周关井状态下测量,为地温场的评价提供了依据<sup>[5]</sup>。

针对干热岩基底地质及岩石物理特征的测井资料基础解释主要包括地层岩性识别、基础物性评价、裂缝拾取及产状分析、地应力参数计算等四方面。结合不同岩石矿物组成表现出的放射性含量的差异,常规测井可以进行纵向热储岩性的划分。结合不同储层类型声学、电学特征,声、电扫

描成像测井技术可实现对近井眼地带岩体基础物性和裂缝发育程度的精细评价。通过远端反射体信号的探测与处理,远探测声波测井技术可针对以井眼为中心,半径 40 m 以内地层的井旁远端缝的发育情况进行评价。交叉偶极技术采用正交偶极发射,在纵波、横波、斯通利波三波的提取及处理基础上,可进行目标岩体工程力学参数、地应力和各向异性的评价。图 2 为 GHX 井裂缝及地应力评价成果图。从电成像图上可以看出,该井段各向异性强,天然缝和诱导缝发育,诱导缝走向为北东—南西向,指示现今最大水平主应力方位。声成像显示明显的井眼崩落,方位为北西—南东向,同样指示现今最大水平主应力为北东—南西向。另外,通过三井径拟合椭圆井眼短轴方位为北东—南西向,指示的主应力方位与身电成像评价结果一致。

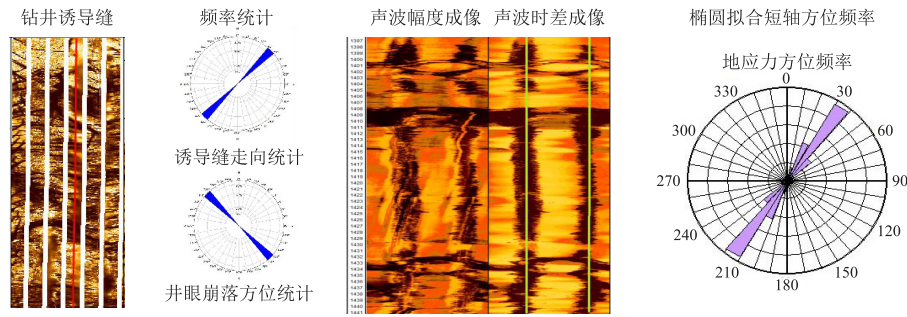


图2 GHX井裂缝及地应力评价成果图

Fig. 2 GHX well fracture and in-situ stress evaluation result diagram

### 3 基于生热率分析的热储层优势岩性判别

稳定的热源是干热岩地热资源勘探开发的首要控制因素。张超等人<sup>[1-2]</sup>基于放射性生热率和热流配分比数据对青藏高原地热资源成因机制进行了研究,构建了地壳花岗岩放射性生热与壳内熔融层供热双重作用下的联合成因模式。其中,壳内熔融层供热为地热资源提供了稳定的热源基础。高放射性生热,主要来源于花岗岩地层中放射性生热元素铀、钍、钾的异常富集,作为附加热源提供热补给作用。岩体放射性生热率计算方法有很多,笔者主要采用1976年Rybach L提出的公式来计算<sup>[6-7]</sup>:

$$\delta = 0.01\rho \cdot 0.01\rho(Cu + 2.56CTh + 3.48CK) \quad (1)$$

式中, $\delta$ 为岩石生热效率; $\rho$ 为岩石密度; $Cu$ 为岩石放射性铀含量; $CTh$ 为岩石放射性钍含量; $CK$ 为岩石放射性钾含量。

中新世一中晚更新世沉积岩构成的上覆盖层由于风化、搬运作用导致部分放射性元素损失,含量较低。下部中晚三叠世侵入花岗岩热储层主要由花岗闪长岩、(黑云母)花岗岩、二长花岗岩组成的复式岩体,造岩矿物以石英、斜长石、正长石和黑云母为主,

放射性元素含量明显高于上覆盖层。其中石英铀含量在2.2 g/t~2.4 g/t,自然伽马约为5 API。正长石中钾、钍含量较高,钾含量约6.74%~14.07%,自然伽马约235 API~275 API。黑云母铀含量可达26 g/t~48 g/t,自然伽马约235 API~275 API。黑云母二长花岗岩黑云母和正长石含量高,自然伽马呈高值特征,钍含量低,而铀含量较高,TH/U数值低于钍铀比基线(0.9),平均生热率为11  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,是最佳优势高温岩体;二长花岗正长石含量高,自然伽马为中高值,钍、铀含量相对较低,TH/U数值高于钍铀比基线,生热率次之,平均为6  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,为较好的优势高温岩体。花岗闪长岩相对前两者,生热率最低,平均为4  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,对地热资源的热补给作用最不明显。结合以上地球物理特征分析,笔者利用自然伽马曲线、能谱测量TH/U曲线对地层纵向优势岩相进行了判别,图3为研究区GHX井纵向优势岩相判别分析图,其中3 644 m~3 651 m、3 661 m~3 720 m为以黑云母二长花岗岩为主的最佳优势高温岩体,平均放射性生热率12  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ,3 720 m~3 775 m为以二长花岗岩为主的较好的优势高温岩体,平均放射性生热率8.5  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。

表1 花岗岩造岩矿物岩石物理特征值

Tab. 1 Physical characteristic values of granite rock-forming minerals

矿物名称	铀 g/t	钍 g/t	钾 %	钍铀比	自然伽马 (API)
石英	2.2~2.4	0.5~10		0.2~4.5	5
斜长石	0.2~5.0	0.5~3.0	0.3~1.6	0.1~15	4~57
钾长石	0.2~3.0	3.0~7.0	6.74~14.07	1~35	235~275
黑云母	26~48	0.5~50	5.42~8.1	0.01~2	200~350

注:本表格数据来源于21届测井年会《干热岩测井综合评价技术》。

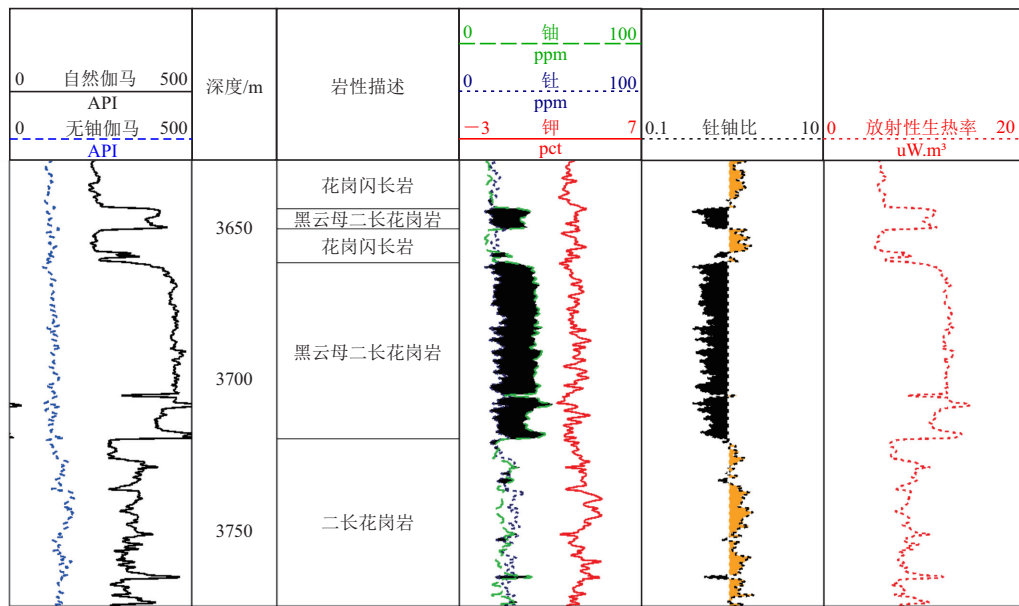


图3 GHX井纵向优势岩相判别分析图

Fig. 3 Vertical advantage lithofacies discrimination analysis diagram of GHX well

#### 4 基于裂缝分布定量表征的热储品质研究

地热资源开发的核心技术是通过采用一注多采、冷注热采的方式,利用水力压裂刺激地层、扩展地层裂缝网络,提高地层换热效率,实现提取地层内部热量的目的。研究发现,孔隙度和渗透率是影响地热系统开发的内在关键属性。孔隙度反映岩石的开发空间,渗透率可以衡量岩石中流体流动的难易程度。由于地热储层一般具有致密、相对不透水的特征,仅依靠基质孔隙难以形成高效的渗流通道<sup>[8]</sup>。只有当地层发生破裂形成导流裂缝,改善储层渗透率,才能保障地热流体的流动性。

干热岩在高温高压下岩体会发生热破裂行为,使体积扩容,产生大量裂缝,构成了后期增强型地热系统注采开发的主要换热通道。因此准确认识天然裂缝对增加有效换热面积至关重要,具体表现在,天然裂缝密度越高,热储层孔隙度越大,岩体破碎程度越高。同时,裂缝产状与地应力方向息息相关,不仅间接反映裂缝形成的原因,而且还会影响到后期改造形成裂缝网络的连通性。比如,构造缝走向与现今最大水平主应力方向相同,往往具有组系性强、方位稳的特征,压裂改造后容易发展成规模较大的渗流网络<sup>[9-10]</sup>。溶蚀缝多受成岩改造作用影响,走向变化明显,压裂改造后对渗透作用的影响较小。笔

者结合地球物理测井技术中微电阻率扫描成像测井技术、远探测声波测井技术对近井眼以及以井眼为中心、半径40 m以内的井旁远端缝发育密度进行评价,定量表征热储层岩体破裂程度,具体见式2。利用裂缝走向与最大水平主应力方向夹角表征裂缝发育产状,具体见式3。

$$f = \frac{\phi}{\sqrt{Jz^2 + Jp^2}} \quad (2)$$

式中: $f$ 为岩体破裂系数; $\phi$ 为常规测井补偿声波测井评价基质孔隙度值; $Jz$ 为微电阻率扫描成像测井评价井周裂缝发育密度; $Jp$ 为远探测声波测井评价井旁裂缝发育密度。

$$\omega = \text{abs} \left[ \left( \sum_{i=1}^t h_i \times f_i \right) - \alpha \right] \quad (3)$$

式中: $\omega$ 为裂缝走向因子,表征裂缝走向与最大水平主应力方向的夹角; $h_i$ 为裂缝统计玫瑰图中某范围的裂缝走向; $f_i$ 为裂缝统计玫瑰图中某范围的频率占比; $t$ 为裂缝统计玫瑰图中总份额; $\alpha$ 为测井评价最大水平主应力方向。

研究发现,天然裂缝在压剪状态下形成错位的有利角度是 $30^\circ$ <sup>[11]</sup>。定义 $\gamma$ 为优势走向参数,计算公式见式4。当天然裂缝走向与最大水平主应力呈现 $30^\circ$ 左右的夹角时, $\gamma \geq 1$ ,这种情况下有助于后期获得最大压裂缝网面积<sup>[12]</sup>;当天然裂缝走向与最大水平主应力夹角远超 $30^\circ$ 时, $0 < \gamma < 1$ 。

$$\gamma = \frac{10}{|\bar{\omega} - 30|} \quad (4)$$

岩体破裂系数越高,压裂改造时更容易获得较大的裂缝面积,对提高干热岩地热流体的流动潜力和热量提取效率极为重要。裂缝走向因子越小,表示天然裂缝中,走向在最大水平主应力方向上的裂缝占据主导优势,此时裂缝开放程度高、有效性好,后期地热系统水力破裂形成导流现象越明显,地热资源的商业价值越高。

## 5 基于热储层改造潜力分析的工程品质研究

为了保障地热系统中流体循环,必须向目标储层泵入有压力的冷水来扩大现有裂缝,增强岩石的渗透率。天然裂缝因流体压力增加而扩张,裂缝两侧发生相对位移,裂缝面呈现出的不规则或凹凸不平的状态使得裂缝保持相对开放的同时进一步延伸到离井筒更远的位置<sup>[13-15]</sup>。该过程不仅与天然裂缝发育程度有关,储层地应力状态以及岩石物理学特征等因素对储层的压裂改造也具有非常显著的影响。

虽然,天然裂缝能够被打开并发生剪贴位移,要求现今水平地应力差须大于地层抗剪强度;但随着应力差逐渐增加,当其超过地层岩体的抗拉强度时,又会限制天然裂隙的起裂和延伸<sup>[16]</sup>。因此,为了保障地热系统的成功运行,水平应力差必须限制在抗剪强度和抗拉强度之间,且应力差越小越有利于形成复杂网状缝。笔者利用交叉偶极子阵列声波测井技术,通过纵波、横波、斯通利波的提取和处理,结合常规测井中补偿密度曲线、有效孔隙度、泥质含量等计算地层泊松比、杨氏模量、抗张强度、抗剪强度、水平主应力等,进行岩石机械强度分析,为开发改造地热系统提供基础力学参数。其中现今水平应力差异指数  $\eta$  计算公式为:

$$\eta = \frac{T_o - S_o}{(Fk1 - Fk2)(P_o - \alpha \times pp)} - 1 \quad (5)$$

式中:FK1 为静模式构造应力系数 1,隐含值 1.0;FK2 为静模式构造应力系数 2,隐含值 0.4;PP 为地层孔隙压力;P<sub>o</sub> 为上覆岩层压力;T<sub>o</sub>、S<sub>o</sub> 分别为交叉偶极子声波测井技术评价地层抗张强度、抗剪强度。根据理论可得:水平应力差异系数在 0~0.3 时,水力压裂能够形成充分的裂缝网络;水平应力差异系数为 0.3~0.5 时,只有当静压力较高时,水力压裂能够形成较为充分的裂缝网络;水平应力差异

系数 >0.5 时,水力压裂不能形成裂缝网络。

裂缝面在地应力作用下发生剪切位移。剪切裂缝错位程度主要受岩石杨氏模量、泊松比、地应力差、天然裂缝长度及缝面摩擦系数等因素影响,虽与单个力学参数关系较为复杂,无法定量描述,但总体上与杨氏模量和泊松比的几何关系  $g$  (计算公式见式 6) 呈现正相关<sup>[17-18]</sup>。

$$g = \frac{2(1-\nu^2)}{E} \quad (6)$$

式中: $\nu$  为泊松比,无量纲; $E$  为杨氏模量,10<sup>4</sup> MPa。可见,在低杨氏模量、低泊松比的地层中,天然裂缝压裂易形成较大错位,拓展成复杂裂缝网络的成功率越高,有效换热面积越大,地热资源的开采潜力越显著。

## 6 热储层综合品质评价研究

干热岩地热资源需要进行大型压裂改造才能实现经济开采,影响开采成本与成功率的不但与地热储层先天的储层品质有关,还与决定后天改造能力的工程力学品质有关,只有两者有效结合的热储岩相才能压裂形成复杂缝网,降低开采难度,提高商业价值<sup>[19-20]</sup>。笔者在储层压裂敏感参数分析的基础上,量化了目标储层的天然裂缝发育程度和产状,以及地应力状态和应力下裂缝面的相对位移量等关键参数,将岩体破裂系数、优势裂缝走向因子、水平应力差异强度、改造裂缝面位移量 4 个关键参数综合分析,形成干热岩热储层综合品质评价指数,将强构造活动带干热岩热储层划分为 I、II、III 类,具体公式如下:

优势岩相可压性综合评价指数  $p$ :

$$p = \alpha \times A + f \times B + \gamma \times C + \eta \times D + g \times E \quad (7)$$

其中: $P$  为综合品质参数,无量纲; $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  分别为其对应总评价参数中的权重,根据目标区块测井资料与地质认识,确定  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  对应的权重均为 0.2。 $P$  值越高表征增强型地热系统压裂开发成功率越高。结合现场经验,将  $P > 0.4$  时,评价为 I 类地层,适合形成干热岩有效热储;  $0.15 < P < 0.4$ , 评价为 II 类地层,较适合形成干热岩有效热储;  $P < 0.15$ , 评价为 III 类地层,不适合形成干热岩有效热储。

图 4 为 GHX 井测井综合评价图。由图可见,3 640 m~3 720 m,井温高,岩体破裂程度强,裂缝走向与最大主应力方向相差小,且水平应力差异系

数好,生热率高,综合评价指数  $F > 0.4$ ,故地层为裂缝型发育 EGS 系统(Enhanced Geothermal Systems,增强型地热系统) I 类地层,适合形成干热岩有效热储,是后期 EGS 系统压裂改造的优势区域。3 720 m~3 970 m,井温较高,岩体破裂程度强,裂缝走向与最大主应力方向相差较小,水平应力差异系数好,生热率较高,综合评价指数  $F$  介于 0.15~

0.4,故地层为裂缝型发育 EGS 系统 II 类地层,较适合形成干热岩有效热储。3 000 m~3 640 m 井温相对偏低,岩体破裂程度强,裂缝走向与最大主应力方向相差较小,水平应力差异系数好,生热率较高,综合评价指数  $F$  介于 0.15~0.4,故地层为裂缝型发育 EGS 系统 II 类地层,较适合形成干热岩有效热储。

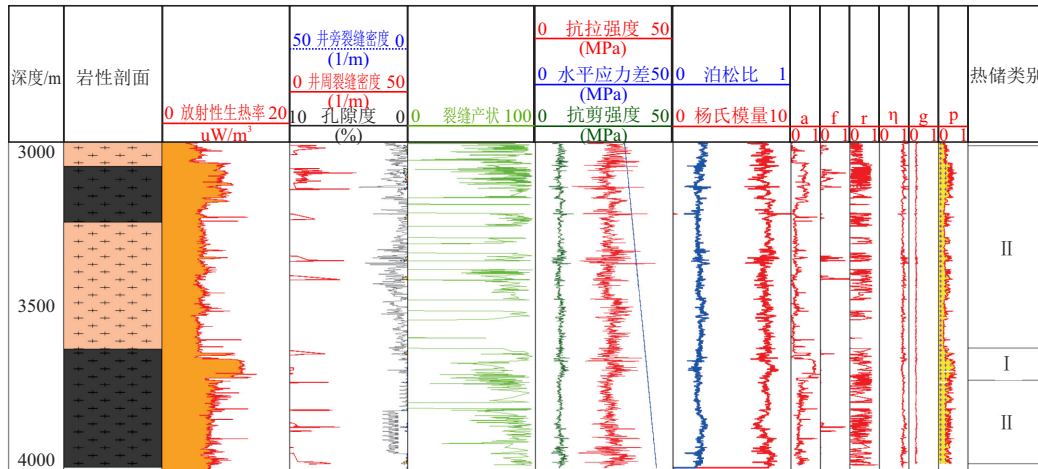


图 4 GHX 井基于地球物理特征分析的干热岩优势岩分类评价  
 Fig. 4 Classification and evaluation of dominant rocks of hot dry rock based on geophysical characteristics analysis in GHX well

## 7 结论

基于测井技术的基础物理评价是干热岩勘探开发以及理论研究的前提。多维高精度成像测井技术可以详细描述热储层岩性、基础物性以及裂缝发育特征,在干热岩开发中发挥着重要作用。笔者针对青海共和盆地开展地球物理研究得到了以下几点认识:

1)青藏高原地热热源由地壳花岗岩放射性生热与壳内熔融层供热双重作用下的联合形成,其中高放射性生热作为附加热源提供热补给发挥着重要的作用。黑云母二长花岗岩具有自然伽马呈高值,TH/U 数值低于基线的特征,构成了最佳优势高温岩体。

2)天然裂缝构成了地热系统注采开发的主要换热通道的物质基础。裂缝发育程度越高,岩体破裂越明显,优势产状越集中,裂缝开放程度越高、有效性越好,压裂改造时更容易获得较大的裂缝面积,对提高干热岩地热流体的流动潜力和热量提取效率极

为重要。

3)地应力状态以及力学特征对热储层的后天压裂改造具有显著的影响。为了保障地热系统的成功运行,水平应力差应限制在抗剪强度和抗拉强度之间,且应力差越小越有利于形成复杂网状缝。在低杨氏模量、低泊松比的地层中,天然裂缝压裂易形成较大错位,有利于增加有效换热面积。

4)笔者针对国内强构造活动带干热岩地球物理特征分析,从热储品质、工程品质两方面出发,集合岩体破裂系数、优势裂缝走向因子、水平应力差异强度、改造裂缝面位移量 4 个关键参数,形成了一套多参数融合的优势岩相综合评价技术,有效指导压裂方案设计,为地热能源开发提供技术支撑。

### 参考文献:

[1] 张超,胡圣标,宋荣彩,等. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制:来自岩石放射性生热率的约束[J]. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2697-2709.  
 ZHANG C, HU S B, SONG R C, et al. Genesis of the hot dry rock geothermal resources in the Gonghe basin: Constraints from the radiogenic heat production

- rate of rocks [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2020, 63(7): 2697—2709. (In Chinese)
- [2] 张超, 张盛生, 李胜涛, 等. 共和盆地恰卜恰地热区现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2018, 61(11): 4545—4557.  
ZHANG C, ZHANG S S, LI S T, et al. Geothermal characteristics of the Qiabuqia geothermal area in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(11): 4545—4557. (In Chinese)
- [3] 苏小鹏. 干热岩裂缝渗流及储层水力压裂缝网扩展机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.  
SU X P. Study on fracture seepage in dry—hot rock and mechanism of hydraulic fracturing network expansion in reservoir[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020. (In Chinese)
- [4] 雷治红. 青海共和盆地干热岩储层特征及压裂试验模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
LEI Z H. Study on reservoir characteristics and fracturing test model of dry—hot rocks in Gonghe Basin, Qinghai Province [D]. Changchun: Jilin University, 2020. (In Chinese)
- [5] 梁明星, 杨毅, 蒋正中, 等. 花岗岩地热储层地球物理测井评价方法研究[J]. 中国地球科学联合学术年会. 2020:3649—3650.  
LIANG M X, YANG Y, JIANG Z Z, et al. Study on geophysical logging evaluation method of granite geothermal reservoir[J]. China Earth Science Joint academic Conference, 2020:3649—3650. (In Chinese)
- [6] 威廉 E G. 地热能: 可再生能源与环境[M]. 王社教, 闫家泓, 李峰, 译. 北京: 石油工业出版社, 2017.  
WILLIAM E G. Geothermal energy: Renewable energy and the environment[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017. (In Chinese)
- [7] 戴维·博登. 地热能资源的地质基础[M]. 曲海, 万立夫, 吴康军, 等译. 北京: 石油工业出版社, 2021.  
DAVID B. Geologic fundamentals of geothermal energy[M]. QU H, WAN L F, WU K J, et al. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021. (In Chinese)
- [8] 郭建春, 肖勇, 蒋恕, 等. 深层干热岩水力剪切压裂认识与实践[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1582—1593.  
GUO J C, XIAO Y, JIANG S, et al. Understanding and practice of hydraulic shearing in deep hot dry rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1582—1593. (In Chinese)
- [9] 邹雨时, 张士诚, 马新仿. 页岩压裂剪切裂缝形成条件及其导流能力研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(18): 5152—5157.  
ZOU Y S, ZHANG S C, MA X F. Research on the formation conditions and conductivity of shear fracture for hydraulic fracturing in gas-shale[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(18): 5152—5157. (In Chinese)
- [10] 王永和. 压裂过程中能否形成剪切裂缝探讨[J]. 化学工程与装备, 2020(7): 98—99.  
WANG Y H. Discussion on whether shear cracks can be formed during fracturing[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(7): 98—99. (In Chinese)
- [11] TAN X F, LIU X, WANG G L, et al. 2020. Research on the key technology for the investigation and evaluation of the hot dry rock geothermal resources in Lijin [J]. Acta Geologica Sinica, 94(7): 2166—2176.
- [12] 侯克均. 甘孜地区高温地热储层测井识别与评价[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(3): 308—312.  
HOU K J. Identification and evaluation of high temperature geothermal reservoir in Ganzi Region [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 308—312. (In Chinese)
- [13] BROWN S R. Fluid flow through rock joints: The effect of surface roughness[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(B2): 1337—1347.
- [14] BROWN S R, STOCKMAN H W, REEVES S J. Applicability of the Reynolds Equation for modeling fluid flow between rough surfaces[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(18): 2537—2540.
- [15] TSANG C F, NERETNIEKS I. Flow channeling in heterogeneous fractured rocks [J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(2): 275—298.
- [16] WATANABE N, HIRANO N, TSUCHIYA N. Diversity of channeling flow in heterogeneous aperture distribution inferred from integrated experimental-numerical analysis on flow through shear fracture in granite [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114(B4): 208.
- [17] ISHIBASHI T, WATANABE N, HIRANO N, et al. Beyond-laboratory-scale prediction for channeling flows through subsurface rock fractures with heterogeneous aperture distributions revealed by laboratory evaluation [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2015, 120(1): 106—124.
- [18] ISHIBASHI T, WATANABE N, TAMAGAWA T, et al. Three-dimensional channeling flow within subsurface rock fracture networks suggested *via* fluid flow analysis in the Yufutsu fractured oil/gas reservoir [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering,

- 2019, 178: 838–851.
- [19] MANDELBROT B B. The Fractal Geometry of Nature[J]. Am. J. Phys. 1983,51:286–287.
- [20] ROY A, PERFECT E. Lacunarity analyses of multifractal and natural grayscale patterns[J]. Fractals, 2014, 22(3): 1440003.

### Logging evaluation technology of a hot dry rock reservoir in a strong tectonic active zone

LI Jin, LI Haiyan, LIU Jundong, HAO liping, GUO Xiangguang,  
ZHUO Kun, XU Jinfeng, XU Chen

(Tianjin Branch, China National Logging Corporation, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** Constructing an enhanced geothermal system from hot dry rock has its core technology in reshaping the thermal storage layer through hydraulic fracturing. It forms a "four-way, eight-direction" fracture network that enhances the heat exchange capacity during the injection and extraction process and extracts energy from high-temperature thermal storage layers that lack economic value. Well-logging evaluation technology can provide detailed descriptions of the lithology of the thermal storage layer, its fundamental properties, and the characteristics of fractures that play important roles in hot, dry rock development. This study (combined with multi-dimensional high-precision imaging logging) analyzes the factors conducive to improving the formation conduction capacity and heat exchange capability. It proposes a quantitative characterization method for the innate spatial distribution of fractures in the thermal storage layer and the acquired mechanical expansion capability. A comprehensive evaluation technology based on multiparameter integration for advantageous lithofacies was developed based on a meticulous evaluation of the hot dry rock thermal storage quality and engineering quality. This technology enhances the geological understanding of the thermal storage layer and provides effective technical support for enhanced geothermal systems' subsequent fracturing development scheme.

**Keywords:** hot dry rock; thermal storage quality; engineering quality; multi-parameter fusion; dominant lithofacies division