

干热岩储层水力压裂改造的电磁法监测评价研究进展

黄若宸,舒彪*,李帝铨

中南大学有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室,地球科学与信息物理学院,
长沙 410083

摘要 从岩石受压破裂过程电阻率特性、裂缝型岩石电阻率特性、岩石电阻率与渗透率关系3个方面出发,总结了电磁法水力压裂监测评价相关的岩石物性基础研究,介绍了干热岩水力压裂现场电磁法监测应用案例。基于岩石电性基础研究总结得出:岩石在受压破裂过程中会伴随着显著的电阻率变化,且电阻率变化特征与岩石中的含水饱和度紧密相关;裂缝数量、宽度与粗糙度等都会对岩石的电阻率产生影响,影响趋势与裂缝是否含水有关;可通过修正 Archie 定律与 Kozeny-Carman 模型建立特定岩石的电阻率与渗透率关系模型。讨论了电磁法应用于干热岩水力压裂监测评价所面临的难点,包括:(1)研究高温高压条件裂缝型致密岩石的电阻率性质;(2)研究高温高压条件裂缝型致密岩石渗透率与电阻率关系模型;(3)研究开发具有更高精度、更小分辨率、更强抗干扰能力及更远探测距离的电磁法探测新理论新方法、新技术新装备。

关键词 深部干热岩;电阻率;渗透率;水力压裂;电磁法监测

地热资源以极高的清洁性、运行的稳定性和空间分布的广泛性成为世界各国重点研究和开发的清洁能源^[1-2]。地热资源按照其成因和产出条件可分为水热型和干热岩型^[3],其中干热岩型已探明地热资源的90%左右,具有极大的开发潜力^[4]。干热岩一般是指地下埋深3~10 km、温度范围150~650℃的深部岩体,其内部没有或仅含有少量不能

流动的水,以变质岩或花岗岩作为主要赋存岩体^[5]。经中国地质调查局研究,中国大陆3~10 km深处干热岩资源为 2.5×10^{25} J,相当于860万亿t标准煤,按2%的可开采资源量计算,相当于中国2021年能源消费总量的3282倍^[6](2021年中国能源消费总量52.4亿t标准煤)。可见,干热岩地热资源储量丰富,科学高效的开发干热岩是中国达成

收稿日期:2022-09-08;修回日期:2022-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(42072304);湖南省科技创新计划项目(2021RC3009);湖南省自然科学基金青年基金项目(2021JJ40726)

作者简介:黄若宸,硕士研究生,研究方向为非常规能源电磁法应用,电子信箱:205012131@csu.edu.cn;舒彪(通信作者),副教授,研究方向为岩石力学及非常规能源开采,电子信箱:biaoshu@csu.edu.cn

引用格式:黄若宸,舒彪,李帝铨.干热岩储层水力压裂改造的电磁法监测评价研究进展[J].科技导报,2022,40(20):83-92;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2022.20.010

“双碳”目标的重要途径之一。

干热岩开发通常包括资源勘查、储层改造、渗流换热发电3个阶段^[7-8]。资源勘查阶段主要是确定干热岩储层埋深、盖层厚度、热源及导热通道位置等信息,获取干热岩储层温度、体积等参数^[9]。储层改造阶段则是通过钻孔向干热岩储层注入高压流体,形成新的裂缝或者使得原有的天然裂隙错动、扩展、连通形成裂隙网络,从而增大储层的渗透率^[10]。渗流换热发电阶段则是从注入井注入换热工质,让工质在人工裂隙网络中渗流以提取岩石中的热量,再通过生产井抽出高温工质在地面进行发电^[11]。这种干热岩开发方法被称为增强型地热系统(enhanced geothermal systems, EGS),原理如图1所示。

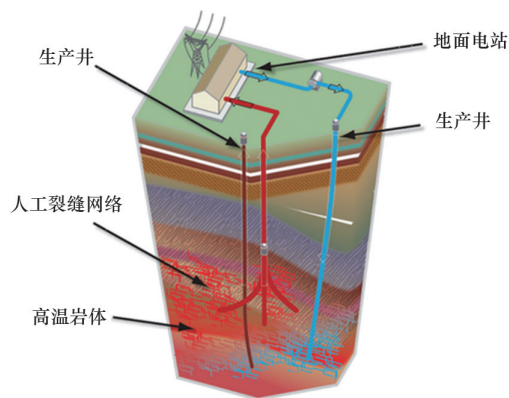


图1 增强型地热系统(EGS)示意
(据文献[12]修改)

水力压裂技术是干热岩储层改造的关键技术之一。然而,由于地下岩石构造差异以及水力压裂过程中的各种不确定性因素,使得压裂裂隙扩展及压裂效果难以预测,无法对储层改造的效果进行精确评价^[10]。储层改造后常出现以下2个问题:一是短路循环,即注入井与生产井之间形成高渗通道使得换热时间和换热面积缩小^[13];二是水流损失,即注入储层的水无法从生产井产出,而是从其他方向流失^[10]。水力压裂产生的裂隙网络结构直接影响换热工质在热储层中的渗流换热过程,是决定增强型地热系统效率及寿命的关键因素,因此需要采用一定的手段对水力压裂过程进行监测,并对压裂后的储层进行评价。

电磁法是地球物理勘探的重要分支,该方法利用地下目标体与围岩的导电性差异,采用电磁感应原理观测和分析电磁场的时空分布特征,进而研究目标体的导电性,通过反演手段和地质解释得到地下目标体的岩性、埋深等地质信息^[14]。干热岩储层在水力压裂过程中,低电阻压裂流体注入不含水或者仅含有少量水的高电阻岩体中,两者之间将会产生明显的电性差异,满足电磁法探测的前提。地下目标岩石的基础电性研究是电磁法应用的理论前提,因此本文介绍与水力压裂相关的岩石基础物性实验研究,梳理对国际上干热岩项目水力压裂电磁法监测评价应用。

1 岩石物性基础

岩石间的电性差异是电磁法探测的前提,因此岩石电阻率特性研究就是进行电磁法应用的理论基础。为了采用电磁法对地质资源进行勘探,国内外学者对岩石的电学性质进行了大量研究,总结出主要影响岩石电阻率的5大因素,包括岩石矿物成分、孔隙结构、孔隙流体、温度和压力^[15-20]。

地下干热岩储层中的岩石往往发育有天然裂隙^[21],天然裂隙存在能够降低岩石的起裂压力^[22],降低压裂所需的泵入压力,从而降低储层改造的成本和难度。因此,世界上的干热岩项目中大多选择天然裂隙发育的高温岩体进行水力压裂建立增强型地热系统^[23-24]。目前实验室内针对水力压裂相关的岩石基础电性研究,主要集中在3个方面:岩石受压破裂过程电阻率特性研究、裂缝型岩石的电阻率特性研究、岩石电阻率与渗透性关系研究。

1.1 受压破裂过程岩石电阻率特性

岩石受到压力作用时,会对岩石的孔隙结构、孔隙流体产生影响,进而对岩石的电阻率产生影响。在岩石受压破裂的过程中,其孔隙度、孔隙结构的变化十分复杂,需进一步采取实验对该过程的电阻率变化进行研究。

Brace等^[25]在实验室内对饱和结晶岩石受应力作用破裂过程进行电阻率实验,观察到此过程中岩石电阻率下降一个数量级,其中当岩石所受应力大

于断裂应力 1/2 时电阻率下降明显。此后的进一步研究中观察到岩石在低应力下会出现电阻率小幅度增加的现象,将此过程中的电阻率变化归结于体积膨胀导致的孔隙度变化(图 2)。

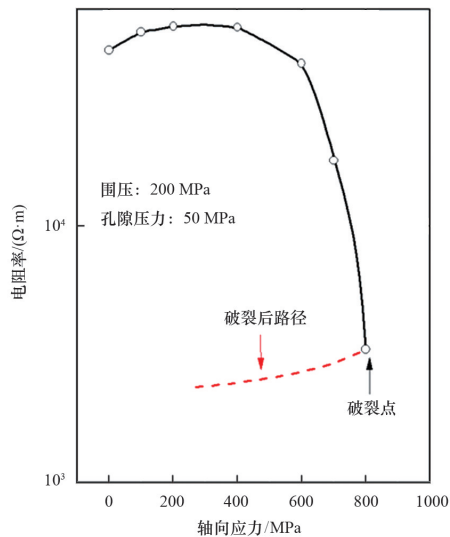


图 2 含水花岗岩断裂过程的电阻率变化曲线
(据文献[25]修改)

然而, Parkhomenko^[15]和李术才等^[17]的研究得到砂岩岩石在低应力下电阻率减小,在高应力下电阻率升高的相反结论(图 3)。将岩石破裂过程的电阻率变化划分为 4 个阶段:(1) 压密、弹性变形阶段,岩样中的孔隙在外力作用下逐渐闭合导致孔隙度减小,导电能力增加,电阻率降低;(2) 随着荷载增大进入塑性变形阶段,微裂隙开始产生,岩石电阻率开始上升;(3) 当荷载达到峰值时进入破裂阶段,微裂隙贯通形成宏观裂隙,岩石电阻率突然上

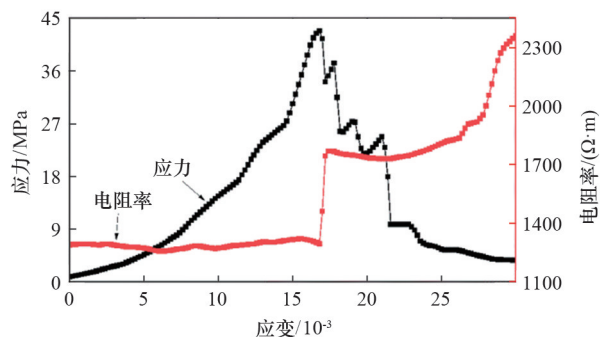


图 3 干燥砂岩单轴压缩电阻率变化曲线
(据文献[17]修改)

升,导电能力大幅下降;(4) 残余变形阶段,岩石导电机制同时作用,电阻率不断变化,最后趋于稳定。

针对以上实验研究结论不一致的问题,姜文龙等^[26]设计了饱和与半饱和 2 种状态下的石英砂岩受压电阻率实验,2 种状态下的岩石电阻率随压力变化趋势不同。在低应力下,岩石被压密而使得孔隙度减小,从而导致电阻率升高;在高应力下,岩石产生破裂面,此时不同饱和度的岩石电阻率就会产生不同的变化趋势,饱和岩石电阻率会逐渐增大,而半饱和岩石电阻率则会逐渐减小。

不同含水饱和度的岩石在受压破裂的过程中的电阻率变化特征不同(图 2、图 3),含水饱和度低的岩石表现出低应力下电阻率减小,高应力下电阻率增大的现象^[15,17];高含水饱和度的岩石则表现出低应力下电阻率增大,高应力下电阻率减小的相反特征^[25]。经过实验室内岩石物性基础研究,说明干热岩水力压裂引起储层电阻率变化的主要原因可能是:储层岩石受流体作用引起孔隙度变化,低电阻流体充填天然裂缝使得裂缝开度、长度扩展形成相互连通的复杂的人工裂缝网络,低电阻流体在人工缝网中运移增大了储层的含水饱和度,导致储层的电阻率减小。

1.2 裂缝对岩石电阻率影响

岩石中存在裂缝在一定程度上可视为岩石的孔隙度增大。20 世纪 40 年代美国测井工程师 Archie^[27]通过研究大量的砂岩测井数据,总结归纳出了著名的 Archie 定律描述岩层电阻率与孔隙度之间的关系。

目前,也有学者针对岩石中存在宏观裂隙的情况进行电阻率实验。Stesky^[28]对含有裂缝的多种类型的岩石进行电阻率实验,发现了含裂缝岩石的电阻率不仅与岩石岩性和内部流体有关,还与裂缝的开度、裂缝表面几何形状(粗糙度和尖端曲率)有关。Sandler 等^[29]采用不同频率测量砂岩、灰岩的电阻率,发现含有裂缝会导致不同频率下岩石的电阻率随含水饱和度变化特征有显著差异,且裂缝型岩石在高含水饱和度下满足 Archie 公式,但是在低含水饱和度下该公式并不适用。潘保芝等^[30]采用人工岩心,通过调整人工裂缝的宽度、密度及倾角来

研究裂缝对岩心复电阻率的影响,发现在较低含水饱和度时,裂缝宽度和密度增大会导致岩石的电阻率增大系数曲线分离。Li等^[31]在不同频率下研究不同孔隙度、渗透率的裂缝型岩石的电阻率与含水饱和度之间的关系,发现频率对完整岩石与裂缝岩石电阻率的影响不同,并且建立了一种表征特定裂缝的岩石电阻率模型。

干热岩储层经过压裂形成裂缝网络后,改造后的储层会表现出异常的电阻率特征。实验研究发现裂缝数量、裂缝倾角及裂缝表面的几何形状等都会对岩石的电阻率产生影响,并且含有流体的裂缝与干燥裂缝对岩石电阻率的影响也有很大差异^[30-32]。干燥裂缝的数量越多、粗糙度越大,岩石的电阻率越大;含水裂缝的数量越多、粗糙度越大,岩石的电阻率越小,且在高含水饱和度下裂缝型岩石电阻率与孔隙度关系满足 Archie 公式。研究表明经过水力压裂改造后的人工裂缝网络越复杂、裂缝数量越多,后续渗流时引起的电阻率变化越大,引起的地面电磁异常响应越明显,更有利于采用电磁法监测与储层评价。

1.3 岩石电阻率与渗透率关系

在干热岩的储层改造中,流体注入储层的流动特性主要取决于储层的渗透性^[12]。经过改造的储层渗透率增大,以满足 EGS 系统拥有足够的换热流量提取热能^[33]。岩石受力破裂时裂缝扩展、连通不仅会对岩石的电阻率产生影响,也会对岩石的渗透性产生影响。

Pirson 等^[34]进行砂岩的双相渗透电阻率实验,使用电阻率对油、水的相对渗透率特征进行预测,其研究表明在油水两相的渗流中,水相的渗透率与岩石电阻率存在一定的关系。关继腾等^[35]将两相渗流的达西定律与欧姆定律相结合,研究在不同孔隙饱和介质中的电流规律,通过双水模型研究渗透过程中的岩石电阻率与相对渗透率之间的关系。Li 等^[36-37]依据多孔介质中水流流动与电流流动性质相似的原理,建立了应用电阻率数据计算油、水相对渗透率的方法,从实验角度验证了应用电阻率数据求取相对渗透率的可行性。

在利用岩石电阻率求取岩石单流体渗流的渗

透率研究中, Archie 定律提出了如式(1)的模型描述岩石电阻率与岩石孔隙度之间的关系^[27],而 Kozeny 和 Carman 提出了如式(2)的 Kozeny-Carman 模型描述岩石渗透率与孔隙度之间的关系^[38-39]。

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \varphi^{-m} \quad (1)$$

$$K = c \frac{\varphi^3}{a_v^2} \quad (2)$$

式中, F 为地层因素; R_0 为 100% 含水岩石的电阻率, $\Omega \cdot m$; R_w 为地层水的电阻率, $\Omega \cdot m$; m 为胶结指数; φ 为岩石的孔隙度, %; K 为岩石的渗透率, $10^{-3} \mu m^2$; c 为 Kozeny-Carman 模型系数; a_v 为介质的比面, 为颗粒的表面积与体积的比值, m^{-1} 。

Archie 定律与 Kozeny-Carman 模型能够将岩石的电阻率与渗透率通过孔隙度联系起来。马建斌等^[40]根据式(1)、式(2)并假设岩石颗粒为球形,得到渗透率与岩石电阻率之间的关系如式(3),并通过室内实验测量页岩的渗透率与电阻率,发现利用岩石电阻率求取渗透率的方法可行,且仅当样品中存在较大裂缝时会导致颗粒半径 r 偏离假设值,使得理论值与测量值存在微差异。

$$K = \frac{9c}{r^2} \left(\frac{R_w}{R_0} \right)^{\frac{3}{m}} \quad (3)$$

式中, r 为颗粒半径, m 。

Hanai-Bruggeman (H-B) 模型由 Hanai 提出,该模型在 Archie 定律的基础上充分考虑了岩石电阻率、地层水电阻率以及颗粒电阻率,将岩石的孔隙度用 3 个电阻率进行描述,计算公式为^[41]

$$\varphi = \left(\frac{R_w}{R_s} \right)^{\frac{m-1}{m}} \left(\frac{R_s - R_g}{R_w - R_g} \right) \quad (4)$$

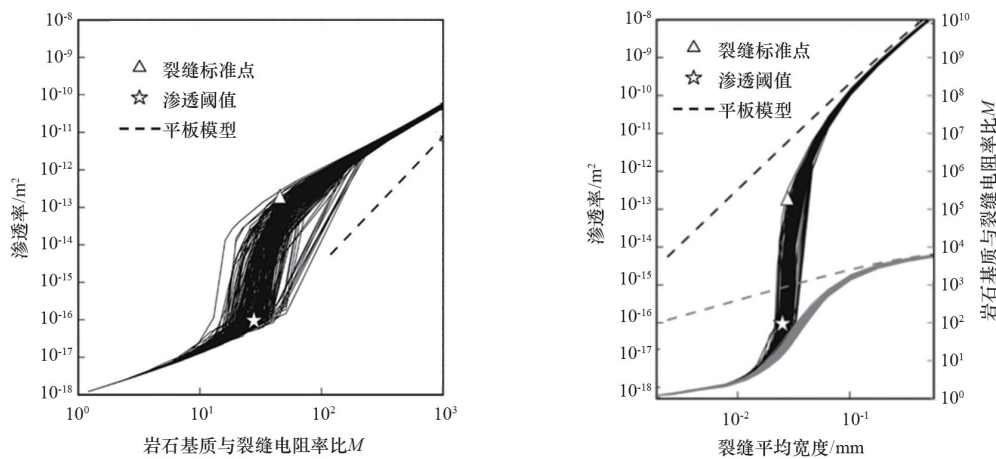
式中, R_s 为岩石电阻率, $\Omega \cdot m$; R_g 为颗粒电阻率, $\Omega \cdot m$ 。

在针对致密砂岩的研究中,焦乃林等^[42]和尹帅等^[43]采用 Hanai-Bruggeman 模型与 Kozeny-Carman 模型结合,假设岩石颗粒形态为椭球形且岩石内部相互连通的孔隙形态为毛细管状,建立致密砂岩利用岩石电阻率求取渗透率的模型,将该模型应用于川西地区三叠系致密砂岩储层的渗透率预测中取得了较好的效果,验证了模型的可靠性。

干热岩储层经过改造后不仅改变了储层的电性结构,也改变了储层的渗透性,而研究也说明岩石基质、裂缝的电阻率与渗透率具有很好的对应关系(图4)。岩石中存在油、水两相渗流时,岩石的电阻率能对两相的相对渗透率进行预测。在单相渗流的研究中,Archie定律总结了岩石孔隙度与电阻率之间的联系,然而 Archie定律是基于高孔隙度纯净砂岩数据归纳得出的,具有一定的适用范围及条件,很多学者对 Archie定律进行修正,提出了如

Hanai-Bruggeman (H-B)模型、Waxman-Smith (W-S)模型^[44]等对特殊条件的岩石电阻率与孔隙度关系进行表达,如表1所示。而 Kozeny-Carman模型则描述了岩石的渗透率与孔隙度的关系。因此,采用 Archie定律或其他修正的岩石电阻率与孔隙度模型,结合 Kozeny-Carman模型,可将岩石的电阻率与渗透率进行联系,该方法的可靠性在致密砂岩储层中也已得到验证。

除了如表1中所示的几种典型的岩石电阻率



(a) 电阻率比值 M 与渗透率变化情况 (b) 裂缝平均宽度对电阻率比值 M (灰色) 与渗透率 (黑色) 的影响

图4 充水裂缝打开时渗透率与电阻率比值 M 的变化情况 (据文献[32]修改)

与孔隙度关系模型外,学者们还基于表1中的典型的岩石电阻率模型,考虑孔隙连通性、宏观裂缝^[45]、温度^[46]等多种参数对电阻率模型的影响,提出了适

用于各个特定储层的修正模型。

表1 典型岩石电阻率模型

模型	特点及条件	文献来源
Archie 模型	1. 基于高孔隙度、高含水饱和度的纯净砂岩数据总结提出; 2. 不适用于低孔隙度岩石、低含水饱和度、含泥质岩石; 3. 没有考虑岩层温度、压力和润湿性的影响; 4. 要求岩石孔隙、孔隙水分布均匀,孔隙水为高矿化度盐水。	[27,47]
Patnode-Wyllie 模型	1. 考虑砂岩中的泥质成分对岩石电阻率的影响; 2. 假设泥质成分的导电性与孔隙流体导电性无关,且两者为并联导电; 3. 在 Archie模型的基础上考虑了泥质成分,适用于高孔隙度、含高矿化度流体的泥质砂岩。	[48]
Waxman-Smith 模型	1. 提出泥质成分表面的阳离子交换导电机制,将泥质成分的电阻率用其表面的阳离子容量进行表达; 2. 假设黏土成分的导电性与孔隙流体导电性为并联形式; 3. 适用于含高矿化度流体的含黏土砂岩。	[44,48-50]
Hanai-Bruggeman 模型	1. 基于两相介质理论,将岩石电阻率组成为岩石电阻率、孔隙水电阻率、岩石颗粒电阻率,建立颗粒与孔隙水的混合电阻率模型; 2. 适用于低孔隙度储层、含低矿化度流体的储层中。	[41-43,48-50]

2 EGS 电磁法监测评价

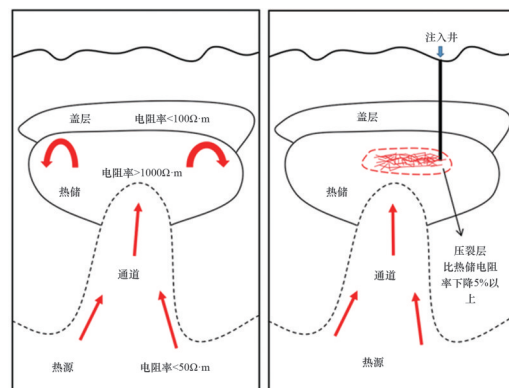
随着世界上干热岩项目的逐渐开发,目前已有学者采用电磁法在干热岩水力压裂现场进行压裂监测与储层评价。

Paralana 项目位于南澳大利亚地区,经过前期地热资源勘查与开发,发现区域热流估值高达 113 mW/m^2 ^[51],地层主要由古元古代片麻岩、花岗岩与变质沉积物组成。2009 年进行首次钻孔开发,钻孔深度约 4000 m,钻孔底部测得温度达 190°C 。在深度 3860 m 处发现盐水(电阻率为 $1.5 \Omega\cdot\text{m}$),表明热储中存在有充满流体的天然裂缝^[52]。为了实现地热增产,2011 年 Petrathern 公司在地下 3680 m 的深度处注入体积为 3100 m^3 的盐水(电阻率为 $0.3 \Omega\cdot\text{m}$)以实现储层改造^[53],采用微地震、连续大地电磁、延时大地电磁 3 种监测手段对水力压裂过程进行监测^[12]。流体注入造成了 7000 多次的微地震响应,最大振幅为 $2.4\sim 2.5 \text{ MW}$,微地震定位结果显示:震源沿着 NNE-SSW 方向拓展,集中在注入井附近的天然裂缝周围^[54]。连续大地电磁监测设置 11 个宽带大地电磁站点,最大间距为 2 km;延时大地电磁监测共设置了 56 个站点。大地电磁监测的结果显示:流体注入能够引起明显的大地电磁响应,大地电磁参数的变化在时间与空间上一致,其变化大小约为 5%。其中电磁相位张量残差最能有效的表征地下电阻率的结构变化,该参数表示储层的电阻率变化不是各向同性的,而是沿着与最大水平应力方向垂直的 NNE 方向^[55],即注入流体沿着现有断层系统的 NNE 方向运移^[52,56],大地电磁反演结果与微地震监测结果基本一致。Macfarlane 等^[57]在先前研究的基础上采用各向异性模型对该区域水力压裂过程进行二维大地电磁正演模拟,结果显示采用各向异性模型能够很好地表示深部小规模裂缝网络。

Habanero EGS 项目位于南澳大利亚 Cooper 盆地中,该区域存在高热花岗岩,平均地热流值为 100 mW/m^2 ^[58]。经过前期勘查与开发,区域内沉积盖层厚度达 3.6 km ^[59],花岗岩热储经过 4 次钻井,最大深度 4.3 km ,最大井底温度高达 244°C ^[60]。为进

行地热增产,2012 年在该干热岩储层中 14 d 内注入 36500 m^3 的盐水(25°C 时电阻率为 $13 \Omega\cdot\text{m}$)以实现储层改造,采用微地震与大地电磁 2 种方法进行监测。微地震监测结果显示:流体注入期间产生约 20000 个微地震事件,微震云面积约为 3.8 km^2 ,厚度为 $100\sim 150 \text{ m}$,整体呈 N-S 向^[61]。大地电磁监测结果显示^[62]:该区域 5 km 深度内存在 3 个电性层,表层为沉积层(厚度为 1.5 km ,电阻率 $< 6 \Omega\cdot\text{m}$),第 2 层为固结的沉积层(厚度为 2 km ,电阻率 $< 25 \Omega\cdot\text{m}$),第 3 层为高电阻率花岗岩层(埋深大于 3.5 km)。流体注入 10 s 时间内,注入点附近的视电阻率下降约 5%,下降主要发生在垂直于最大水平应力的 NNE 方向,剖面显示注入流体沿着 N-S/NNE 方向传播,与微震云方向基本一致。与 Paralana EGS 项目相比,Habanero EGS 项目中观察到的流体注入引起的视电阻率变化较小,推断因为该区域内沉积盖层厚度过厚(约 3.6 km)而引起了电磁屏蔽效应,表明采用大地电磁法对 EGS 水力压裂监测时需要有利的地质环境(沉积盖层不宜过厚)。

综上所述,水力压裂电磁法监测已在实际干热岩开发工程中得到初步应用,高压流体注入热储层中引发的裂缝错动、扩展、连通,裂缝网络中的流体运移都会引起储层的电阻率发生改变(图 5),从而引起足够明显的大地电磁异常响应。通过数据处理反演,可以了解地下流体的运移路径,指示出热储改造后的主裂缝走向、长度等信息,为后续开发中确定生产井位置或进一步压裂改造提供依据。



(a) 储层改造前

(b) 储层改造后

图 5 典型干热岩地热系统电性结构示意图

(据文献[63]修改)

3 结论

水力压裂会导致热储层的电性结构发生变化,从而引起足够大的电磁异常,使得电磁法能够成为水力压裂的监测手段之一。针对水力压裂电磁法监测应用,研究了处在水力压裂状态的岩石电阻率特性,包括岩石在压力作用下的电阻率变化特征及裂缝型岩石的电阻率特征。发现岩石受压破裂过程中电阻率变化随应力变化明显,在低应力作用下岩石孔隙度受压变小,低含水饱和度岩石电阻率小幅度减小;在高应力作用下岩石微裂隙扩展形成宏观裂隙,低含水饱和度岩石的电阻率急剧增大。当岩石的含水饱和度较高时,其电阻率的变化趋势相反。裂缝的数量、密度、表面形貌及裂缝含水情况等都会对岩石的电阻率产生影响。

由于岩石电阻率对孔隙度、孔隙流体反应敏感,岩石孔隙度与孔隙流体又与其渗透特性联系紧密,目前常用 Archie 模型或其他岩石电阻率孔隙度模型与 Kozeny-Carman 模型结合,建立岩石电阻率与渗透率的关系模型,以采用电阻率数据预测储层的渗透率,该方法准确性已在致密砂岩储层中得到验证,并在油气测井领域得到广泛应用。

电磁法水力压裂监测已在干热岩开发现场得到初步应用,用于监测地下流体的运移方向,研究说明电磁监测是一种可行的水力压裂监测工具,可以通过地面测量来探测深部储层的电阻率变化,以探测压裂流体运移情况,刻画储层裂缝网络结构。然而,针对干热岩水力压裂电磁法监测评价研究,若要建立一套成熟的干热岩储层监测评价体系,仍然有以下方面的内容需要突破:(1) 干热岩开发相较于其他地质资源,其主要特点为温度高,而岩石、孔隙流体的电阻率性质在高温下与常温时有很大不同,对于高温条件下岩石的电阻率特性仍需研究;(2) 改造后的干热岩储层通常是含大量裂缝的高温花岗岩,相比于砂岩,花岗岩的孔隙度、孔隙性质等完全不同,适用于常温砂岩的电阻率渗透率模型可能并不适用于高温花岗岩,因此亟需开展适用于高温裂缝花岗岩的电阻率渗透率模型的研究;(3) 电磁法已经在干热岩水力压裂现场监测得到

初步应用,但是监测过程的精度会受到沉积盖层的电磁屏蔽影响,未来的干热岩开发深度会更深、地质环境会更复杂,因此今后的研究中需围绕探测精度、分辨率、抗干扰能力及探测距离等问题,加强新理论新技术、数据正反演方法及新装备仪器等方面的研究。

参考文献(References)

- [1] 胡鞍钢. 中国实现 2030 年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 等. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. 地质学报, 2018, 92(9): 1936-1947.
- [3] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
- [4] 许天福, 袁益龙, 姜振蛟, 等. 干热岩资源和增强型地热工程: 国际经验和我国展望[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(4): 1139-1152.
- [5] 许天福, 张延军, 于子望, 等. 干热岩水力压裂实验室模拟研究[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 35-39.
- [6] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 2012, 33(5): 807-811.
- [7] 马峰, 孙红丽, 蔺文静, 等. 中国 EGS 示范工程靶区选址与指标矩阵评价[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 41-47.
- [8] 马峰, 王贵玲, 魏帅超, 等. 2018 年地热勘探开发热点回眸[J]. 科技导报, 2019, 37(1): 134-143.
- [9] 刘德民, 张昌生, 孙明行, 等. 干热岩勘查评价指标与形成条件[J]. 地质科技通报, 2021, 40(3): 1-11.
- [10] 郭盼, 吴波, 李朋, 等. 增强型地热系统储层建造及其评价[J]. 资源环境与工程, 2020, 34(2): 256-261, 265.
- [11] Gaucher E, Schoenball M, Heidbach O, et al. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52:1473-1490.
- [12] Thiel S. Electromagnetic monitoring of hydraulic fracturing: Relationship to permeability, seismicity, and stress [J]. Surveys in Geophysics, 2017, 38(5): 1133-1169.
- [13] 陆川, 王贵玲. 干热岩研究现状与展望[J]. 科技导报, 2015, 33(19): 13-21.
- [14] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文. 大地电磁测深法勘探资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 260.
- [15] Parkhomenko E I. Electrical resistivity of minerals and rocks at high temperature and pressure[J]. Reviews of

- Geophysics, 1982, 20(2): 193.
- [16] 田瀚, 王贵文, 王克文, 等. 碳酸盐岩储层孔隙结构对电阻率的影响研究[J]. 地球物理学报, 2020, 63(11): 4232-4243.
- [17] 李术才, 许新骥, 刘征宇, 等. 单轴压缩条件下砂岩破坏全过程电阻率与声发射响应特征及损伤演化[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 14-23.
- [18] Wang Q, Bagdassarov N, Ji S C. The Moho as a transition zone: A revisit from seismic and electrical properties of minerals and rocks[J]. Tectonophysics, 2013, 609: 395-422.
- [19] Kolah-kaj P, Kord S, Soleymanzadeh A. The effect of pressure on electrical rock typing, formation resistivity factor, and cementation factor[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 204: 108757.
- [20] 马衍坤, 刘泽功, 成云海, 等. 煤体水力压裂过程中孔壁应变及电阻率响应特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊1): 2862-2868.
- [21] 张森琦, 文冬光, 许天福, 等. 美国干热岩“地热能前沿瞭望台研究计划”与中美典型EGS场地勘查现状对比[J]. 地学前缘, 2019, 26(2): 321-334.
- [22] 谢紫霄, 黄中伟, 熊建华, 等. 天然裂缝对干热岩水力压裂裂缝扩展的影响规律[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 63-72.
- [23] 郭亮亮, 张延军, 许天福, 等. 大庆徐家围子不同储层改造的干热岩潜力评估[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(2): 525-535.
- [24] Sausse J. Hydromechanical properties and alteration of natural fracture surfaces in the Soultz granite (Bas-Rhin, France)[J]. Tectonophysics, 2002, 348(1-3): 169-185.
- [25] Brace W F, Orange A S. Electrical resistivity changes in saturated rocks during fracture and frictional sliding[J]. Journal of Geophysical Research, 1968, 73(4): 1433-1445.
- [26] 姜文龙, 刘英. 岩石在单轴压力环境下电阻率变化的研究[J]. 地质学刊, 2009, 33(3): 299-302.
- [27] Archie G E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. Transactions of the Aime, 1942, 146(1): 54-62.
- [28] Stesky R M. Electrical conductivity of brine-saturated fractured rock[J]. Geophysics, 1986, 51(8): 1585-1593.
- [29] Sandler J, Li Y Z, Horne R N, et al. Effects of fracture and frequency on resistivity in different rocks[C]//71st European Association of Geoscientists and Engineers Conference and Exhibition. Amsterdam: Society of Petroleum Engineers, 2009: 119872.
- [30] 潘保芝, 阿茹罕, 郭宇航, 等. 裂缝性岩石低频下复电阻率与饱和度关系研究[J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3774-3787.
- [31] Li K W, Pan B Z, Horne R. Evaluating fractures in rocks from geothermal reservoirs using resistivity at different frequencies[J]. Energy, 2015, 93: 1230-1238.
- [32] Kirkby A, Heinson G, Krieger L. Relating permeability and electrical resistivity in fractures using random resistor network models[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2016, 121(3): 1546-1564.
- [33] Lv Y X, Yuan C, Gan Q, et al. Analysis of heat transfer based on complex Embedded Discrete Fracture Network (EDFN) for field-scale EGS[J]. Geothermics, 2022, 104: 102463.
- [34] Pirson S J, Boatman E M. Prediction of relative permeability characteristics of intergranular reservoir rocks from electrical resistivity measurements[J]. Journal of Petroleum Technology, 1964, 16(5): 564-570.
- [35] 关继腾, 房文静, 王玉斗. 油藏储渗特性对阿尔奇饱和度指数的影响[J]. 测井技术, 1999, 23(6): 419-423, 479.
- [36] Li K W. A new method for calculating two-phase relative permeability from resistivity data in porous media [J]. Transport in Porous Media, 2008, 74(1): 21-33.
- [37] Li K. A semianalytical method to calculate relative permeability from resistivity well logs[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Dallas: Society of Petroleum Engineers, 2005: 95575.
- [38] 孙强, 冯永, 朱术云, 等. 饱水岩石加载变形过程中视电阻率-渗透率的关联性[J]. 煤田地质与勘探, 2012, 40(2): 86-90.
- [39] Won J, Park J, Choo H, et al. Estimation of saturated hydraulic conductivity of coarse-grained soils using particle shape and electrical resistivity[J]. Journal of Applied Geophysics, 2019, 167: 19-25.
- [40] 马建斌, 唐新功, 向葵. 利用电阻率求取岩石渗透率的方法研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2013, 10(10): 105-106, 122.
- [41] Bussian A E. Electrical conductance in a porous medium [J]. Geophysics, 1983, 48(9): 1258-1268.
- [42] 焦乃林, 丁文龙, 尹帅, 等. 通过构建基于地层岩石电导率的动态渗透率图版求取致密砂岩储层渗透率方法[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(21): 20-26.

- [43] 尹帅, 丁文龙, 单钰铭, 等. 利用致密砂岩储层电导率参数求取渗透率[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(6): 117-124.
- [44] Waxman M H, Smits L J M. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1968, 8(2): 107-122.
- [45] 夏培. 含泥质致密砂岩储层三孔隙导电模型[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 748-752.
- [46] Fajana A O, Ayuk M A, Omoyegun T D. Comparison of modified Waxman-Smith algorithms and Archie models in prospectivity analysis of saturations in shaly-sand reservoirs. A case study of Pennay field, Niger-Delta[J]. Earth Science Informatics, 2021, 14(3): 1647-1663.
- [47] 孙建国. 阿尔奇(Archie)公式: 提出背景与早期争论[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(2): 472-486.
- [48] 沈金松, 苏本玉, 王智茹, 等. 泥质砂岩电导率模型的分析及对比[J]. 测井技术, 2008, 32(5): 385-393.
- [49] Chelidze T L, Gueguen Y. Electrical spectroscopy of porous rocks: A review—I. Theoretical models[J]. Geophysical Journal International, 1999, 137(1): 1-15.
- [50] Chelidze T L, Gueguen Y, Ruffet C. Electrical spectroscopy of porous rocks: A review—II. Experimental results and interpretation[J]. Geophysical Journal International, 1999, 137(1): 16-34.
- [51] Neumann N, Sandiford M, Foden J. Regional geochemistry and continental heat flow: Implications for the origin of the South Australian heat flow anomaly[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 183(1-2): 107-120.
- [52] Peacock J R, Thiel S, Heinson G S, et al. Time-lapse magnetotelluric monitoring of an enhanced geothermal system[J]. Geophysics, 2013, 78(3): B121-B130.
- [53] Rosas-Carbajal M, Linde N, Peacock J, et al. Probabilistic 3-D time-lapse inversion of magnetotelluric data: Application to an enhanced geothermal system[J]. Geophysical Journal International, 2015, 203(3): 1946-1960.
- [54] Albaric J, Oye V, Langet N, et al. Monitoring of induced seismicity during the first geothermal reservoir stimulation at Paralana, Australia[J]. Geothermics, 2014, 52: 120-131.
- [55] Balfour N J, Cummins P R, Pilia S, et al. Localization of intraplate deformation through fluid-assisted faulting in the lower-crust: The Flinders Ranges, South Australia [J]. Tectonophysics, 2015, 655: 97-106.
- [56] Peacock J R, Thiel S, Reid P, et al. Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(18): B121-B130.
- [57] Macfarlane J, Thiel S, Pek J, et al. Characterisation of induced fracture networks within an enhanced geothermal system using anisotropic electromagnetic modelling [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2014, 288: 1-7.
- [58] Beardsmore G. The influence of basement on surface heat flow in the cooper basin[J]. Exploration Geophysics, 2004, 35(4): 223-235.
- [59] Holl H G, Barton C. Habanero field: Structure and state of stress[C]//World Geothermal Congress 2015. Melbourne: International Geothermal Association, 2015: 19-25.
- [60] Hogarth R, Holl H, McMahon A. Flow testing results from the Habanero EGS project[C]//Proceedings Australian Geothermal Energy Conference 2013. Brisbane: Australian Geothermal Energy Association, 2013: 21-28.
- [61] McMahon A, Baisch S. Case study of the seismicity associated with the stimulation of the Enhanced Geothermal System at Habanero, Australia[C]//Proceedings Australian Geothermal Energy Conferences 2013. Brisbane: Australian Geothermal Energy Association, 2013: 29-36.
- [62] Didana Y L, Heinson G, Thiel S, et al. Magnetotelluric monitoring of permeability enhancement at enhanced geothermal system project[J]. Geothermics, 2017, 66: 23-38.
- [63] 张炯, 黄少鹏, 傅饶, 等. 大地电磁测深在火山区地热研究中的应用[J]. 岩石学报, 2017, 33(1): 279-290.

Research progress of electromagnetic monitoring and evaluation of hot dry rock hydraulic fracturing reservoir

HUANG Ruochen, SHU Biao*, LI Diqian

Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring, Ministry of Education;
School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The development of the hot dry rock is one of the important ways to achieve the goal of "double carbon". In the context of monitoring the hot dry rock reservoir with the electromagnetic method and establishing a scientific and efficient hot dry rock reservoir evaluation system, this paper reviews the basic researches of the rock physical properties related to the electromagnetic hydraulic fracturing monitoring and evaluation, focusing on three aspects, namely, the electrical resistivity characteristics of the rock in the process of fracturing under pressure, the electrical resistivity characteristics of the fractured rock, and the relationship between the rock electrical resistivity and permeability. The application cases of the electromagnetic monitoring in the field of the hot dry rock hydraulic fracturing are introduced. Based on the basic researches of the rock electrical properties, it is concluded that: the pressure fracturing will be accompanied by significant electrical resistivity changes of the rock, and the characteristics of the electrical resistivity changes are closely related to the water saturation in the rock; the number, the width and the roughness of the fractures will affect the electrical resistivity of the rocks, and the influence trend is related to whether the fractures contain the water; the relationship between the electrical resistivity and permeability of specific rocks can be established by modifying the Archie's law and the Kozeny-Carman model. Finally, the tasks faced by the application of the electromagnetic method to the monitoring and the evaluation of the hot dry rock hydraulic fracturing are discussed, including: (1) the study of electrical resistivity properties of the fractured compact rocks under high temperature and high pressure; (2) the relationship model between the permeability and the electrical resistivity of the fractured compact rock under high temperature and high pressure; (3) new theories, new methods, new technologies and new equipment of electromagnetic method detection with higher accuracy, finer resolution, better anti-interference ability and longer detection distance.

Keywords hot dry rock; electrical resistivity; permeability; hydraulic fracturing; electromagnetic monitoring ●



(责任编辑 刘志远)