

利用测井资料获取松辽盆地深部热物性参数

马峰^{1,2)}, 王贵玲²⁾, 孙占学³⁾, 张薇²⁾, 侯贺晟⁴⁾, 郭晓阳⁵⁾

1)中国地质大学(北京), 北京 100083; 2)中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;
3)东华理工大学, 江西南昌 330000; 4)中国地质科学院, 北京 100037;
5)中国石油大学(北京), 北京 102249

摘要: 盆地导热系数是研究盆地深部热结构的重要参数, 通常通过获取深部岩心测试获得, 但这种传统方法经常会受到经费、取样条件等限制, 并且对于地热井来说, 因受温度压力条件的影响, 室内测试结果也不能代表岩石原位导热系数。本研究获取了松科2井三开3 289 m至4 536 m岩心实测导热系数和测井参数, 分析了砂岩、泥岩、流纹岩导热系数与测井参数之间的关系, 结果显示砂岩的测井参数孔隙度、波速与导热系数之间具有明显的相关性, 泥岩和流纹岩的相关性并不高。在此基础上, 本研究分析了松辽盆地温度、压力对导热系数的影响, 认为温度效应造成松辽盆地松科2井三开导热系数与室内实测值偏小约30%; 压力效应使盆地三开段导热系数相对室内测试值偏大约10%。本研究结果可以为我国盆地深部导热系数以及大地热流值的获取提供新的思路, 尤其是对于一些具有测井数据但无法获取深部岩心的废弃井具有更大的意义。

关键词: 松辽盆地; 热物性; 地球物理测井; 导热系数

中图分类号: P631.8 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2019.021101

An Analysis of Thermal Conductivity in Songliao Basin Based on Logging Parameters

MA Feng^{1,2)}, WANG Gui-ling²⁾, SUN Zhan-xue³⁾, ZHANG Wei²⁾, HOU He-sheng⁴⁾, GUO Xiao-yang⁵⁾

1) *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;*
2) *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050061;*
3) *East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330000;*
4) *Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;* 5) *China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249*

Abstract: Thermal conductivity is an important parameter to study the deep thermal structure of the sedimentary basin. The traditional way to obtain the thermal conductivity by measurement of deep core test is limited by funding, sampling conditions and some other factors. Meanwhile, due to the reason that geothermal wells are affected by temperature and pressure conditions, indoor test results cannot represent the in-situ thermal conductivity of the rocks. In this study, the measured thermal conductivity and logging parameters of cores from 3 289 to 4 536 meters in the third spudding of well Songke 2 are obtained, and the relationship between thermal conductivity of sandstone, mudstone and rhyolite and logging parameters was analyzed. The results show that correlation between porosity, wave velocity and thermal conductivity of sandstone logging parameters is obvious, but the correlation for mudstone and rhyolite is not high. On such a basis, the authors analyzed the influence of temperature and pressure on the thermal conductivity of the Songliao Basin. It is concluded that the thermal conductivity of the third spudding of well Songke 2 in Songliao Basin is reduced by about 30% due to temperature effect, and the thermal conductivity is increased by about 10% due to pressure effect compared with

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41602271; 41741018)、中国地质调查局项目(编号: DD20160207)、中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目(编号: SK201501)和国家矿产资源储量技术标准体系建设项目(编号: CB2017-4-5)联合资助。
收稿日期: 2018-10-23; 改回日期: 2019-01-26; 网络首发日期: 2019-02-11。责任编辑: 魏乐军。
第一作者简介: 马峰, 男, 1983年生。高级工程师。主要从事地热资源探测与评价相关研究。通讯地址: 050061, 河北省石家庄市中华大街268号。E-mail: mf-1203@163.com。

the measured values in laboratory. The results of this study can provide a new idea for the acquisition of deep thermal conductivity and geothermal flow value of basins in China, especially for some abandoned wells with logging dates but can not obtain deep cores.

Key words: Songliao Basin; thermophysical property; geophysical logging; thermal conductivity

松辽盆地为我国东北部大型中生代沉积盆地, 面积为 26 万 km², 以白垩纪陆相沉积的巨厚的砂岩、泥岩为主, 完整的古近纪早期—晚侏罗世陆相沉积地层为盆地内部热的聚集提供了良好的地质条件。松辽盆地是我国中东部地区地温梯度最高的大型沉积盆地, 平均地温梯度达到 3.8℃/100 m。初步评价显示, 松辽盆地在高的热背景条件下, 盆地水热型地热可开采资源量折合标准煤 6 870 万 t/a(王贵玲等, 2000), 干热岩可采资源量折合标准煤 7.4 万亿 t(蔺文静等, 2012), 地热资源开发潜力巨大。随着松辽盆地油田开发进入中后期, 油气开采的难度逐渐增大, 采出水量也越来越大, 探测深部地热, 研究盆地深部热结构也变得非常迫切。

盆地的热结构是决定盆地热能聚散以及油气资源生成和富集的关键, 而岩石的热物参数是影响盆地热结构和热演化的重要参数。岩土体的热传导是能量传递的主要方式, 不同类型的岩石的导热系数、放射性特征控制着盆地中地温和热流的空间分布(潘保芝和李舟波, 1998)。因此, 准确获取深部岩石的热物性参数是研究盆地热结构的基础。Blackwell and Steele(1989)认为, 如果不能较为精确地计算盆地的导热系数, 即使再完善、再合理的分析模拟技术, 应用到一个具体的盆地时也会失败。

松科 2 井是我国目前沉积盆地中探测深度最大的科学钻探井, 钻探深度达到了 7 018 m, 目的是通过连续取芯的方式研究松辽盆地白垩纪以来的古气候、古环境, 拓展陆相油气勘探领域和资源量(高有峰等, 2017)。本文以松科二井三开营城组底部以及沙河子组顶部 3 289 m 至 4 536 m 岩心和测井数据为基础, 通过研究测井参数与导热系数、放射性产热率之间的相关关系, 建立盆地热物性柱, 同时试图为盆地其他没有岩心资料的地区获取深部热物性数据提供新的方法。国外较早的对沉积盆地导热系数与测井参数之间的相关性进行了研究, 但总体而言, 主要是在新生代第三系形成的沉积盆地, 而对于像松辽盆地这样中生代形成的巨厚沉积盆地导热系数随测井参数的变化规律则研究较少。沉积岩的导热系数与沉积压实作用时间关系密切, 因此建立松科 2 井导热系数垂向变化与测井参数的关系对于研究白垩系盆地热结构至关重要。

本次研究岩石导热系数取样深度为 3 230~4 536 m, 共获取岩心 123 块, 其中: 砂砾岩 56 块,

泥岩 62 块, 流纹岩 5 块。室内测试内容包括导热系数、密度, 导热系数采用瞬态平面热源法, 密度采用蜡封法。

1 热物性的测试

岩石的导热系数是表征岩石导热能力的大小的参数, 为沿着热流传递方向温度降低一度时, 单位时间通过单位岩体面积的热量。目前, 主要获取研究区深部导热系数的方法有两种, 一是通过室内样品测试, 二是通过地球物理测井数据建立相关关系, 间接获取。

室内试验测试导热系数的方法又可分为稳态法和非稳态法两种。稳态法利用稳定传热过程中传热速率等于散热速率的热平衡条件来测试样品的导热系数, 具有原理简单、测量误差小的特点, 测试方法包括纵向热流法、径向热流法、保护热板法等; 非稳态法是根据非稳态导热微分方程和特定的边界条件求解的无限大介质中常功率线热源的径向一维稳态导热问题, 测试方法包括差示扫描量热法、光学扫描法、瞬态平面热源法、热线法、热探针法等。通过室内测试获取岩石热物性参数相对准确可靠, 但也存在以下不足:

(1)室内测试为常温常压条件下进行, 不能反映岩石原位的温压状态, 通常需要进行校正, 同时室内测试所用试件较小, 而现实中导热系数并非均匀的, 测试存在着尺度误差;

(2)受钻探取样数量限制, 很难获取连续的测试样品, 通常获取样品数量有限, 无法满足研究的需要;

(3)对于部分岩石样品, 取样后容易遭到破坏, 导致室内测试结构具有系统误差。

相比而言, 运用地球物理测井资料获取深部热物性参数具有简洁快速、经济的特点, 更重要的是测井是对地下岩层的原位直接测量, 相对室内测试而言实际意义更大。因此开展基于岩石热物理性质的测井方法原理和仪器研究是发展趋势。20 世纪 70 年代开始, 就有大量关于利用测井资料获取沉积盆地热物性的研究(Vasseur et al., 1995; Gallagher et al., 1997; Hartmann et al., 2005; Katharina et al., 2017), 测井可以获取连续的垂向物性和孔隙度等参数, 是获取连续热物性参数的有效手段。近年来, 随着地球物理测井技术的不断完善, 为沉积盆地热结构研

究提供了新的方向(冯来泉, 2000)。

许多研究通过建立导热系数与测井相关数据之间的经验公式获取原位导热系数(Vacquier et al., 1988)。Brigaud et al.(1990, 1992)提出了基于测井数据获取矿物成分和孔隙度特征, 从而求取原位导热系数的方法。Hartmann et al.(2005)在分析德国磨拉石盆地中 570~800 m 的伽马测井、中子孔隙度测井、岩石密度等测井资料的基础上, 估算了地层不同深度的各岩石组分(砂质、泥质、碳酸质)含量, 而各分组的导热系数则由其所含的石英、海绿石、方解石所确定, 以此为基础计算了钻孔不同深度岩石的有效导热系数以及饱和导热系数。本研究的目的是在前人研究的基础上, 通过建立松辽盆地导热系数与测井获取的各地球物理参数的相关关系, 探索一种更为廉价更为广泛适用的获取连续导热系数的方法。

根据地球物理测井资料来研究松辽盆地深部热物性具有如下几个优点: (1)松辽盆地是当今世界上最大的典型陆相沉积盆地之一, 沉积地层以白垩系为主, 厚度可达 7 000 m 以上, 以砂岩和泥岩为主, 其导热系数主要随孔隙度、密度、波速等参数而改变, 这些参数通过测井可以相对准确的获取; (2)松科 2 井(图 1)的一个科学目标是为建立松辽盆地的“金柱子”, 其中热物性柱的建立具有代表性, 松科 2 井的地球物理测井深度达到 7 000 m, 测井内容包括了常规测井、核磁共振测井、ECS 元素俘获测井、微电阻率扫描成像测井、正交多极子阵列声波测井等, 测井资料完整, 测井质量高; (3)通过测井资料获取的热物性数据需要与室内分析测试结果进行对比, 松科 2 井为全孔取芯, 具备室内热物性测试所需的样品条件; (4)松辽盆地深部岩石的岩性

致密, 含水率量少, 室内测井结果可以最大程度的接近原状条件下的热物性, 便于对比分析。

2 原理和方法

导热系数是岩石及矿物内在物理性质的表现, 根据热传导的机理, 岩石内部的热能传导通过晶体点阵或晶格的振动来实现。这种热传导所表现出来的岩石内部结构相应于地球物理测井时电阻率、声波等对岩石内部机制诱发的变化是相关的。岩石的导热系数主要与以下几种测井参数有关, 包括: 密度(ρ_b)、自然伽马(γ)、声波时差(ΔT)、中子孔隙度(ϕN)、光电因子(Pe)、岩石物理特征等。利用地球物理测井数据来计算岩石导热系数的方法可分为两种:

第一种方法通过建立一种或多种地球物理测井数据与热特征之间的经验公式, 来计算岩石导热系数。Goss et al.(1975)在研究加利福尼亚帝国谷砂岩时, 建立了导热系数与岩石密度、孔隙度、波速三者之间的经验公式, 相关性为 0.926, 通过进一步对各因子进行相关性分析, 建立了导热系数与孔隙度和波速之间的经验公式如下, 其相关性达到 0.966,

$$\lambda_b = 0.84 - 0.04 \phi + 0.00695 V_p$$

λ_b = 岩石骨架的导热系数, $Wm^{-1}K^{-1}$ 。

ϕ = 岩石孔隙度, %;

V_p = 声波速度, m/s。

Evans(1977)同样建立了沉积岩中导热系数与孔隙度、波速和密度的关系, 相关性为 0.9, 并且这种相关性仅适应在特定的地区和岩性中。

$$\lambda_b = -0.049 \phi - 0.016 V_p + 3.60 \rho - 5.50$$

ρ = 岩体骨架密度, g/cm^3 。

Beck(1982)则认为温度测井可以很好的指示导热系数的变化, 并指出电阻率与热阻率之间呈正相关关系。

第二种方法为通过测井曲线数据, 首先计算地层主要矿物及其组分含量, 结合各成分的导热系数经验数据按照热导组合定律计算原位岩体的有效热传导系数。Merkle et al. (1976)对圣安东尼奥附近石灰岩地层的声波、密度和中子等地球物理测井数据分析后获取了岩石主要的矿物成分及含量, 通过每种矿物组成的标准导热系数, 计算了岩石骨架的导热系数参数。

岩石的导热系数主要受到三个因素的控制: (1)岩石的矿物组成及其含水量; (2)岩石所处的温度; (3)岩体所处的压力(Vasseur et al., 1983)。而岩体骨架的导热系数取决于组成岩体各组分的百分含量。Middleton(1994)给出了计算岩体骨架导热系数的模型为:

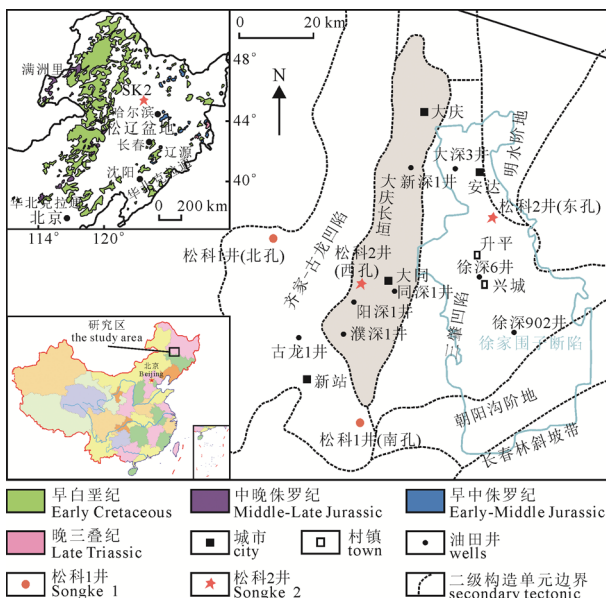


图 1 松辽盆地构造简图

Fig. 1 Structural sketch map of Songliao Basin

表 1 不同矿物的导热系数、密度、孔隙度、声波时差 (Fuchs and Förster, 2014)

Table 1 Thermal conductivity, density, porosity, and acoustic time difference of different minerals (after Fuchs and Förster, 2014)

类别	矿物名称	导热系数 TC/(Wm ⁻¹ K ⁻¹)	密度 ρ/(g/cm ³)	中子孔隙度 φ _N (p.u.)	声波时差 ΔT/(μsm ⁻¹)
碳酸盐	白云石	5.400	2.88	0.02	140
	方解石	3.400	2.71	0.00	153
黏土	高岭石	2.700	2.42	0.37	211
	蒙脱石	1.850	2.12	0.12	212
	伊利石	1.800	2.75	0.20	211
长石	钾长石	2.250	2.57	-0.02	233
	钠长石	2.000	2.62	-0.01	165
	钙长石	1.900	2.74	-0.02	145
卤化物	钾盐	8.500	1.98	-0.02	242
	岩盐	6.500	2.15	-0.02	229
云母	白云母	2.330	2.82	0.185	151
	黑云母	2.000	3.00	0.21	195
氧化物	石英	7.700	2.65	-0.02	182
硫酸盐	硬石膏	4.800	2.96	-0.02	164
	石膏	1.300	2.32	0.49	174
流体	空气	0.025	0.001 2	0.00	3 021
	水	0.604	1.15	1.05	620
	油	0.140	0.88	-0.02	770

$$\lambda_s = \lambda_1 V_1 + \lambda_2 V_2 + \dots + \lambda_n V_n$$

其中: λ_s 为沉积岩骨架的总体导热系数; $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ 分别为组成沉积岩各组分(矿物)的导热系数; 而 $V_1, V_2 \dots V_n$ 为组成沉积岩各组分(矿物)的梯级百分含量。

在考虑岩石孔隙度以及空隙中所含流体的条件下,

$$\lambda_b = \lambda_s^{1-\phi} \lambda_f^\phi$$

其中: λ_b 为岩体饱和状态下的导热系数; λ_f 为岩体空隙中流体的导热系数; ϕ 为岩体孔隙度。

相比较而言, 第二种方法更灵活且容易被接受, 因为只要地球物理测井数据能够给出各矿物组分含量即可, 并不需要固定运用具体哪种测井曲线, 且相关性更具有推广意义, 因此该方法具备进一步推广的可能, 值得进一步研究。表 1 给出了一些典型矿物以及流体常温常压条件下的测井参数, 基于此表只要能根据测井参数获取岩石各组分的体积分数, 原位岩体导热系数就可以用以上公式求取。

3 松辽盆地导热系数测试分析

本研究采用以下三种方法获取盆地深部导热

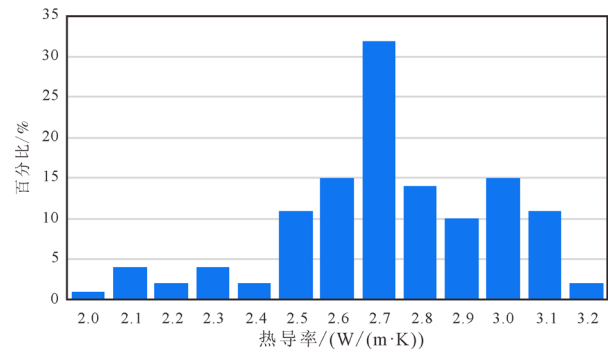


图 2 松辽盆地实测导热系数直方图
Fig. 2 Histogram of measured thermal conductivity in Songliao Basin

系数, 分别为室内测试法、矿物组成分析法以及测井参数法。

3.1 室内测试

通过取样测试岩石导热系数是我们最常用最直接有效的方法。本研究对松辽盆地 3 230~4 536 m 的 123 组岩样的室内测试结果进行统计分析(见图 2), 从表 3 中可以看出, 盆地泥岩导热系数最大, 为 2.04~3.03 W/(m·K), 平均为 2.71 W/(m·K), 砂岩次之, 平均为 1.99~3.07 W/(m·K), 平均值为 2.66 W/(m·K), 而流纹岩平均导热系数最小, 介于 2.06~2.62 W/(m·K)之间, 平均为 2.45 W/(m·K)。

岩体微观结构的不同是造成导热系数各向异性的内在因素(龚建洛等, 2014)。松辽盆地泥岩的各向异性比大于 1(图 3), 即水平方向的导热系数略大于垂向上的导热系数, 主要是由于盆地沉积过程中矿物颗粒的定向排列与水平分层结构所引起; 砂岩和流纹岩各向异性比均小于 1, 这与前人的研究成果一致(高平, 2015), 空隙结构的非均质性是造成砂岩和流纹岩各向异性的主要原因。尽管存在导热系数的各向异性, 各向异性比为 0.96~1.049, 盆地岩石导热系数的各向异性是微弱的, 因此在后续的分析研究中, 我们取各个样品的垂向导热系数与水平导热系数的平均值, 换言之, 认为盆地的岩体的导热系数是各向同性的。

3.2 矿物组成分析法

松辽盆地深部泥岩砂岩中所含的主要矿物为石英、方解石、蒙脱石、高岭石和钾长石。从表 1 中可以看出不同沉积岩矿物的导热系数差异较大, 其中最常见石英矿物导热系数为 7.7 W/(m·K), 明显高于黏土类以及长石类矿物, 其余矿物导热系

表 2 岩石导热系数的各向异性

Table 2 Anisotropy of rock thermal conductivity

岩性	样品数量/个	垂向导热系数/(W/(m·K))	水平向导热系数/(W/(m·K))	平均导热系数/(W/(m·K))	各向异性比($\lambda_{\parallel}/\lambda_{\perp}$)
砂岩	56	2.68	2.64	2.65	0.985
泥岩	62	2.64	2.77	2.71	1.049
流纹岩	5	2.50	2.40	2.45	0.960

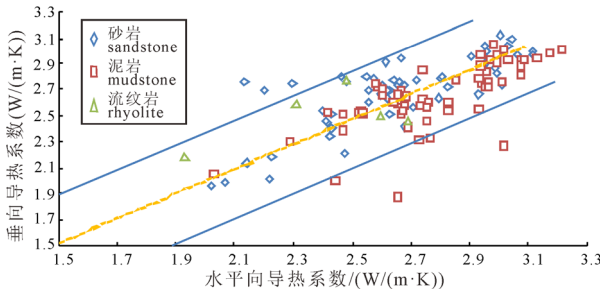


图3 松辽盆地实测导热系数各向异性
Fig. 3 Measured thermal conductivity anisotropy in Songliao Basin

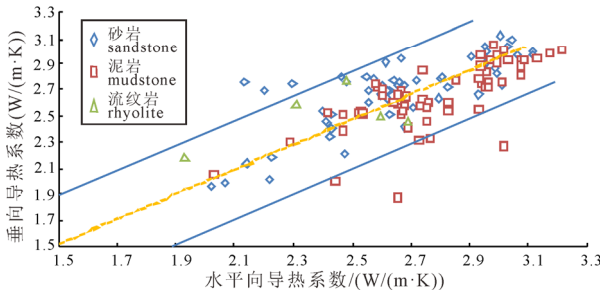


图4 不同矿物导热系数与密度关系图
Fig. 4 Relationship between thermal conductivity and density of different minerals

数值集中在 2~4 W/(m·K), 见图 4。盆地主要矿物的密度介于 2.1~2.8 g/cm³ 之间。根据松科 2 井元素俘获测井解译结果, 盆地主要矿物为黏土类、石英、长石类以及方解石, 总体上, 这几类矿物导热系数与密度具有弱正相关关系。

松辽盆地各矿物含量的获取来自 ECS 元素俘获测井。ECS 能够测量到地层的元素含量, 结合室内岩心分析, 可以进一步获取各矿物成分。松科 2 井开展的 ECS 元素俘获测井提供了准确的岩石矿物垂向变化特征。ECS 元素俘获测井处理流程为:

- (1)伽马探测器测量地层和井筒的俘获伽马谱;
- (2)对伽马谱进行剥谱处理, 得到地层主要元素的产额;
- (3)再经氧闭合处理, 可以得到地层中的元素重量百分含量;

(4)根据岩性模型确定地层矿物含量。

根据各矿物导热系数背景值以及孔隙度, 获得不同岩石骨架的导热系数以及干燥状态下岩石导热系数数据, 见表 3, 4。流纹岩岩石骨架导热系数最高, 其次为砂岩和泥岩, 说明岩石骨架的导热系数受组成其成分的主要矿物的导热系数及其含量所控制, 流纹岩石英含量达到 48%, 远超过砂岩和泥岩, 这是造成岩石骨架导热系数较大的主要原因; 干燥岩石导热系数受岩石骨架导热系数和岩石孔隙度的大小的共同制约, 孔隙度越大, 干燥岩石导热系数与岩石骨架导热系数的差值会越大, 流纹岩孔隙度达到 9.3%, 干燥岩石平均导热系数为 3.37 W/(m·K); 实测导热系数则来自实验室测试获得的平均值, 可以看到三种岩性的岩石实测导热系数值均在 2~3 W/(m·K)之间, 其中, 砂岩实测平均导热系数为 2.65 W/(m·K), 略低于干燥岩石导热系数 2.72 W/(m·K), 相对误差小于 3%, 因此对于砂岩而言, 可以运用测井数据来计算不同深度的导热系数参数。泥岩实测导热系数比岩石干燥条件下的导热系数大, 主要原因是泥岩中仍存在少量的水, 孔隙中水的存在增大了岩石的导热系数, 两者相对误差为 -5.2%, 仍在可接受范围内; 流纹岩实测导热系数仅有 2.45 W/(m·K), 远低于根据测井结果计算得出的干燥导热系数值, 主要原因在于流纹岩为气孔杏仁构造, 发育气孔、裂缝, 孔隙度大, 因此实测过程中, 孔隙度对导热系数的影响较大, 其次, 由于本次取样流纹岩样品较少, 且每个样品仅 100 g, 受流纹岩非均质性的影响较大, 如图 5。

矿物组成分析法没有考虑岩石温度压力对导热系数的影响, 因此, 在运用到原位导热系数分析时, 仍然需要进行温度压力条件的校正。

3.3 测井参数法

通过建立盆地各测井参数与导热系数之间的关系, 用测井数据来推断钻孔深部原位导热系数的方法。测井参数法随着目前地热井测井工作的

表3 ECS 测井解译不同岩性矿物及孔隙度结果

Table 3 Interpretation of different lithologic minerals and porosity based on the ECS Log

岩性	数量/个	石英/%	蒙脱石/%	钾长石/%	钠长石/%	方解石/%	白云石/%	孔隙度/%
砂岩	56	24	33	10	11	16	6	6.5
泥岩	62	18	38	2	25	3	14	6.2
流纹岩	5	38	26	25	11	-	-	9.3

表4 不同岩性的导热系数计算表

Table 4 Calculated thermal conductivity table for different lithologies

岩性	数量/个	岩石骨架导热系数/(W/(m·K))	岩石(干燥)导热系数/(W/(m·K))	实测平均导热系数(W/(m·K))	相对误差/%
砂岩	56	3.77	2.72	2.65	2.6
泥岩	62	3.49	2.57	2.71	-5.2
流纹岩	5	5.57	3.37	2.45	37.6

普遍增多以及测井技术的提高, 越来越受到人们的重视。

3.3.1 导热系数与波速(V_p)

前人的研究中曾发现, 部分沉积盆地中的导热系数与声波时差具有正相关关系, 而单从矿物成分而言, 并没有明显的相关性。由于声波时差是波速的倒数, 因此, 导热系数与波速呈负相关关系。然而, Hartmann 在研究第三系沉积岩中, 发现无论是干燥还是含水的岩石导热系数随波速的变大均有变大的趋势。

通过统计松科 2 井砂岩、泥岩和流纹岩与波速的相关性发现(图 6), 只有砂岩的导热系数与波速呈正相关关系, 相关系数为 0.826 4, 而泥岩和流纹岩的导热系数与波速之间均没有发现明显的相关性。可见, 对于类似松辽盆地这种岩石致密泥质含量较高的沉积岩, 不能单纯从波速来预测岩体原位导热系数的空间变化。

3.3.2 导热系数与孔隙度(ϕ)

导热系数与孔隙度的关系可参照前文导热系数随压力变化的分析结果。对于干燥的岩石样品, 导热系数与孔隙度呈负相关关系。本次试验所采集的样品均经过了长期的自然风干作用, 为便于分

析, 认为实验室在常温常压下所获取的导热系数为不含水状态下的导热系数。

孔隙度数据来自于测井解释结果, 采用的方法是双孔隙度测井交会法。可采用的方法包括: 补偿声波与补偿中子交会法、补偿密度与补偿中子交会法, 本次采用补偿密度与补偿中子交会法, 其响应方程为:

$$1 = \phi + V_{c1} + V_{c2}$$

$$\rho_b = \phi \rho_f + V_{c1} \rho_{c1} + V_{c2} \rho_{c2}$$

$$\phi_N = \phi N_f + V_{c1} \phi_{N1} + V_{c2} \phi_{N2}$$

$$\Delta T = \phi \Delta T_f + V_{c1} \Delta T_{c1} + V_{c2} \Delta T_{c2}$$

其中: ρ_f 、 ϕN_f 、 $\phi \Delta T_f$ 分别为密度、中子、声波时差流体值(g/cm^3 、%、 $\mu\text{s/ft}$);

ρ_{c1} 、 ϕN_1 、 ΔT_{c1} 分别为第一矿物的密度、中子、声波时差骨架值(g/cm^3 、%、 $\mu\text{s/ft}$);

ρ_{c2} 、 ϕN_2 、 ΔT_{c2} 分别为第二矿物的密度、中子、声波时差骨架值(g/cm^3 、%、 $\mu\text{s/ft}$);

ρ_b 、 ϕN 、 ΔT 分别为密度、中子、声波时差的测井值(g/cm^3 、%、 $\mu\text{s/ft}$)。

ΔT_{c1} 、 ΔT_{c2} 分别为两种矿物的相对体积。

ϕ 为计算孔隙度。

从图 7 中可以看出, 松辽盆地深部不同类型岩石的导热系数随孔隙度的变化各异。其中砂岩导热系数随孔隙度的增大而逐渐减小的趋势明显, 而泥岩虽然整体的趋势线指示微弱的负相关, 但各点的分布零散, 流纹岩导热系数随着孔隙度的升高而增大, 但由于所取样品少, 不具备代表性。因此, 整体来看, 松辽盆地深部砂岩的导热系数可以通过测井曲线获取的孔隙度进行推测, 线性关系式为 $y = -0.131 1x + 3.498 3$, 而泥岩、流纹岩的导热系数随孔隙度的关系尚不明确。

笔者认为, 造成这种现象的原因主要在于岩石的沉积演化过程中的不规则压实作用。松辽盆地深部砂岩和泥岩均具有很好的成岩特征, 并且在沉积过程中, 均受到了快速压实、缓慢压实、停滞压实的阶段, 砂岩在沉积压力作用下, 随着岩石的压实作用孔隙度变小, 导热系数增大; 而泥岩孔隙度较大, 随着压实的作用, 内部结构定向排列, 造成导热系数的增大, 而泥岩孔隙度随着压实作用的变化却并不明显, 因此造成了泥岩导热系数与孔隙度的非线性关系。同时, 图 8 显示导热系数与渗透率之间并无明显的相关关系, 也是由于盆地岩石压实作用强烈, 渗透率与孔隙度之间没有明显的相关性所致, 并且渗透率还决定于颗粒之间的排列以及胶结连通特征。

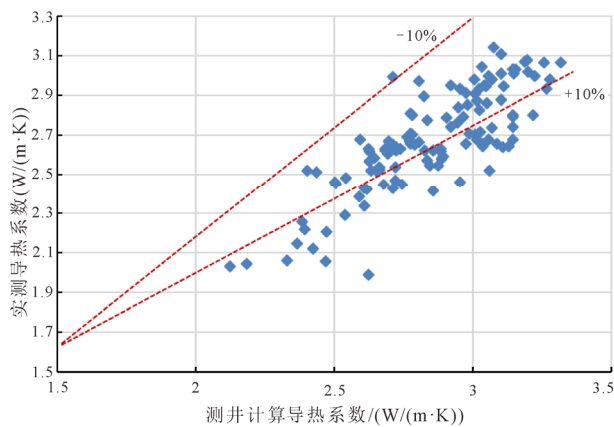


图 5 实测导热系数与测井参数预测导热系数关系散点图
Fig. 5 Scatter diagram of measured and well log parameters for interpreting thermal conductivity

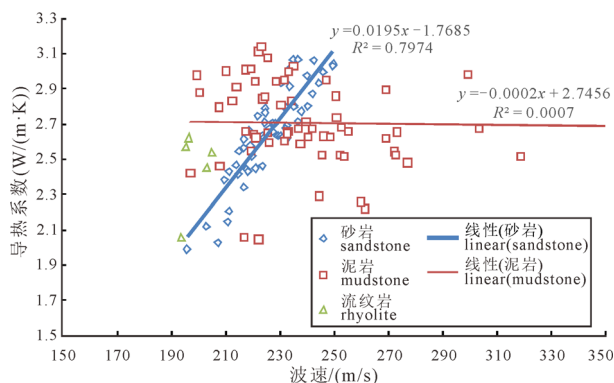


图 6 松科 2 井不同岩性导热系数随波速的变化图
Fig. 6 Variation of different lithologic thermal conductivities with wave velocity in Songke 2 well

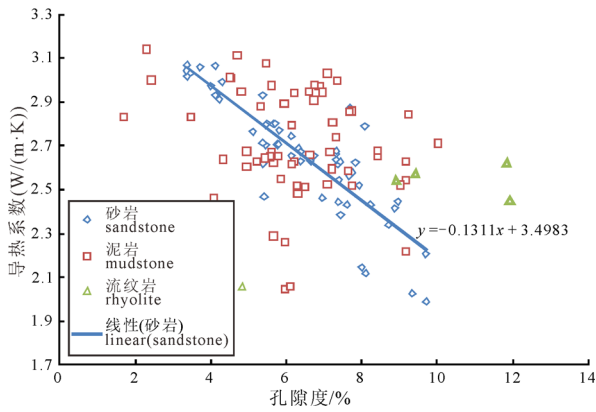


图 7 导热系数随孔隙度变化散点图

Fig. 7 Scatter diagram of thermal conductivity with porosity

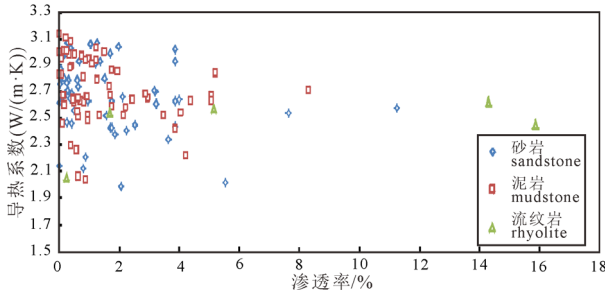


图 8 导热系数随渗透率变化散点图

Fig. 8 Scatter diagram of thermal conductivity with permeability

3.3.3 导热系数与密度(ρ)、泥质含量(V_{sh})

通过测井分析可见, 松科 2 井的泥岩位置自然伽马数值明显上升, 因此可以通过伽马测井可较准确识别井中不同段的泥质含量。一般情况下, 计算泥质含量所采用的公式为:

$$V_{sh} = \left(\frac{2^{G_{CUR} \times SH} - 1}{2^{G_{CUR}} - 1} \right)$$

$$SH = \frac{(GR - GR_{min})}{(GR_{max} - GR_{min})}$$

式中 V_{sh} 为泥质含量, %; G_{CUR} 为地层常数, 一般老地层取 2, 新地层取 3.7。

对于密度测井则采用重构技术获取测井结果, 具体构建公式为:

$$\rho = C_1 * \rho_1 + C_2 * \rho_2 + SH * \rho_{SH} + POR * \rho_f$$

式中: ρ 为重构密度曲线, g/cm^3 ; C_1 为矿物 1 含量体积, 小数; C_2 为矿物 2 含量体积, 小数; SH 为泥质含量体积, 小数; POR 为有效孔隙度(用声波方法预处理的孔隙度), 小数; ρ_1 为矿物 1 骨架密度, g/cm^3 ; ρ_2 为矿物 2 骨架密度, g/cm^3 ; ρ_{SH} 为泥岩骨架密度, g/cm^3 ; ρ_f 为流体密度, g/cm^3 。

图 9、图 10 给出了导热系数与密度、泥质含量之间的关系。可以看出, 盆地中的砂岩、泥岩以及流纹岩的导热系数均未见随泥质含量和密度之间的明显相关关系。测井显示盆地 3 230~4 536 m 砂岩

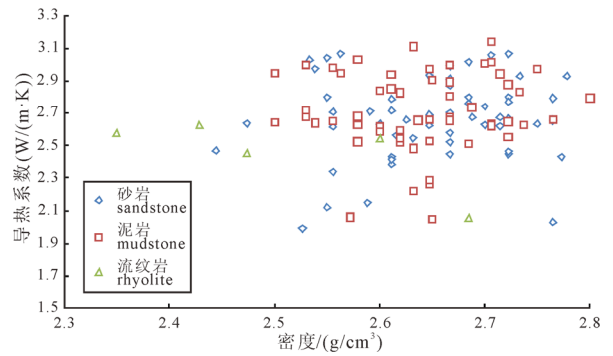


图 9 导热系数随密度变化散点图

Fig. 9 Scatter diagram of thermal conductivity with density

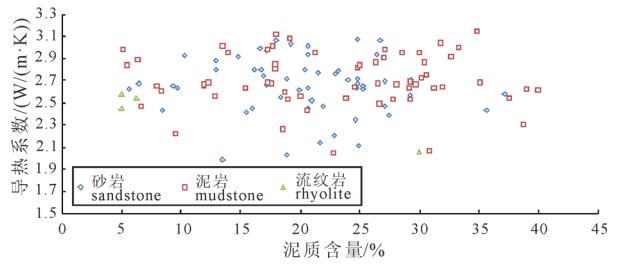


图 10 导热系数随泥质含量变化散点图

Fig.10 Scatter diagram of thermal conductivity with shale content

密度为 2.44~2.88 g/cm^3 , 泥岩密度为 2.50~2.93 g/cm^3 , 流纹岩密度为 2.35~2.68 g/cm^3 , 从图中可以判断盆地内三种岩性的导热系数与密度之间并无明显的相关性, 这与导热系数随着密度的增大而增大的传统认识不相符合, 主要原因在于盆地中的岩石致密, 密度变化小, 对于同一种岩性而言, 密度微弱的变化并不会引起岩石内部结构的明显变化, 因此不会对导热系数产生大的影响。

王良书等(1999)分析了东营盆地中 Y101 井 2 861~3 400 m 深度的导热系数随砂质、泥质含量的变化关系, 结果显示原位导热系数曲线和固体骨架中砂质含量曲线变化趋势相同, 导热系数主要受岩性组分的控制。笔者认为这里含水量是其主要影响因素, 东营组砂岩随着含砂量的增多含水量增大造成了导热系数增大, 而松辽盆地砂岩、泥岩含水量很小, 因此, 导热系数与泥质含量也没有明显的相关性。

综上, 松辽盆地的深部岩石的导热系数与岩石密度和泥质含量之间并没有明显的相关性, 在建立回归模型时可不作为影响变量考虑。

3.3.4 导热系数与测井参数间的关系

在以上分析的基础上, 分别建立砂岩和泥岩导热系数与测井参数的相关关系, 寻找沉积盆地利用测井数据获取不同深度导热系数的方法。这里砂岩的导热系数主要考虑与波速和孔隙度之间的相关关系, 泥岩考虑导热系数与波速、孔隙度与密度之间

的相关性。通过 Matlab 中回归分析功能构建相关方程。其中砂岩导热系数与波速与孔隙度之间具有较为明显的相关性(图 11), 相关方程为:

$$Y=0.026V_p-0.019\rho+3$$

实测值与计算值具有相同的变化规律, 同时, 预测值与实测值误差小于 5%, 因此本相关关系可以作为松辽盆地利用测井参数计算砂岩导热系数的方法, 因不同盆地沉积环境差异, 本式在应用于其他盆地地区还需要进一步研究。

泥岩导热系数与波速、孔隙度与密度之间相关性较差(图 12), 实测值变化区间较大, 而计算值相

对集中在 2.6~2.8 W/(m·K)之间, 说明测井参数在泥岩上差异较小。

4 导热系数影响因素分析

前人对松辽盆地岩石导热系数进行了较多的分析, 普遍认为松辽盆地泥岩、砂岩导热系数为 2.0~2.7 W/(m·K)(周庆华等, 2007; 鲍新华等, 2017), 且沉积岩导热系数的大小主要受岩石孔隙度与含水量的影响, 岩石孔隙度越大, 导热系数越低; 而含水量越大则导热系数越高。

温度和压力是影响导热系数最重要的外界因素, 岩石的导热系数在高温高压的条件下会有较大的变化。通常情况下, 岩石的导热系数随着温度的增大而减小, 随着压力的增大而增大。温度对导热系数影响表现为岩石结晶晶格的导热与温度呈负相关关系, 当岩体温度升高时, 晶格的振动幅度就会增大, 从而导致更大的非谐振荡而使热波的平均自由路程减少, 从而导致介质导热系数的降低(张延军等, 2009)。

压力对导热系数的影响主要通过改变岩体孔隙结构而影响岩体导热系数的大小, 压力使岩石区域致密, 减少声子发散源, 使晶格振动过程中能量转移的效能提高, 同时随着压力的增大岩石内部颗粒的排列趋于紧密, 空隙缩小, 部分裂隙趋于封闭, 整个岩相结构区域单一, 增强了固体传热的效果, 造成了岩石导热系数的增大。岩石越致密, 压力对导热系数的影响越小, 通常而言对于较为松散沉积砂岩, 压力对岩石导热系数的影响较大(赵永信等, 1995; 程超等, 2017), 随着沉积作用的加强, 岩石导热系数受压力的影响越来越弱。

室内导热系数的测试没有考虑温度和压力的条件, 本研究参考前人建立的沉积盆地岩石导热系数随压力和温度变化的经验公式, 根据松辽盆地测井资料对岩石导热系数数据进行了温度和压力的校正。根据测井结果, 3 000~4 000 m 深度温度可达到 113~140℃, 地温梯度为 27℃/km; 地层压力来自瞿雪姣等(2017)等对松科二井的分析研究, 其线性回归方程为 $X=0.02Y-28.68$, 相关系数为 0.5, X 为地层压力, 单位是 MPa, Y 为深度, 单位是 m。由此可以计算出本次研究取样分析段 3 000~4 000 m 深度的地层压力为 31.32~51.32 MPa。

许多学者建立了不同地区不同地层导热系数随温度计压力变化的理论公式(图 13), 还有一些经验和半经验公式均得到了较大的推广, Kutas 和 Gordienko 提出了 300℃ 以下估算沉积岩导热系数的经验公式:

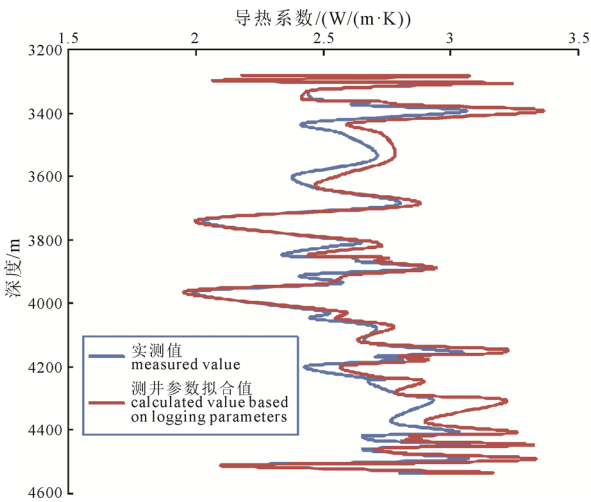


图 11 砂岩实测值与计算值对比曲线
Fig. 11 Contrast curve of sandstone between measured and calculated value

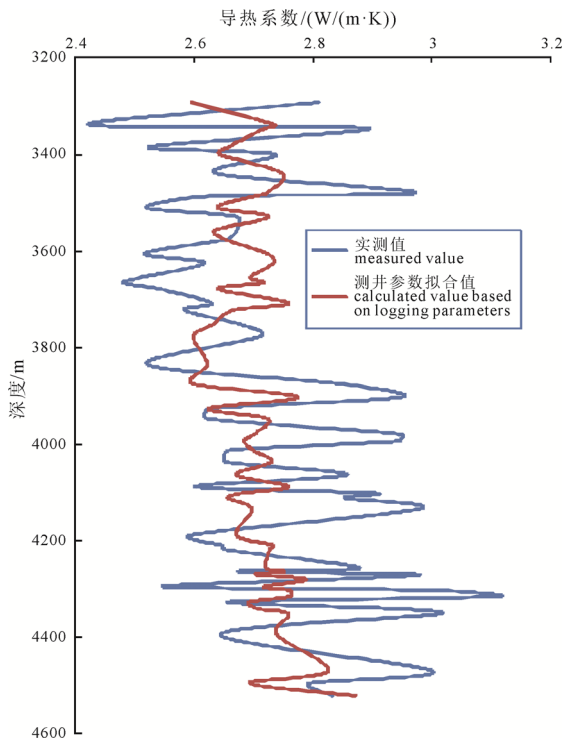


图 12 泥岩实测值与计算值对比曲线
Fig. 12 Contrast curve of mudstone between measured and calculated value

$$\lambda_T = \lambda_{20} - (\lambda_{20} - 3.3) \left[\exp\left(0.725 \frac{T-20}{T+130}\right) - 1 \right]$$

而, Chapman 等则提出温度对导热系数的影响可以用下式表示:

$$\lambda_{M,T} = 293\lambda_{M,20} / (273+T) \lambda_{M,T}$$

其中: $\lambda_{M,T}$ 为沉积岩在温度为 $T(^{\circ}\text{C})$ 时固体骨架的导热系数; 而 $\lambda_{M,20}$ 是在 20°C 时沉积岩的导热系数, 如果岩体中含有水, 则水的导热系数可以根据如下公式计算:

$$\lambda_{w,T} = 0.56 + 0.0037T^{0.827} \quad (0 \leq T \leq 63^{\circ}\text{C})$$

$$\lambda_{w,T} = 0.481 + 0.942 \ln T \quad (T > 63^{\circ}\text{C})$$

其中, $\lambda_{w,T}$ 为温度为 $T(^{\circ}\text{C})$ 时水的导热系数。

导热系数随着压力的变化远没有温度那么明显, 对于沉积岩而言, 岩石结构越疏松, 压力对岩石导热系数的影响就越大。通常而言, 压力每增加

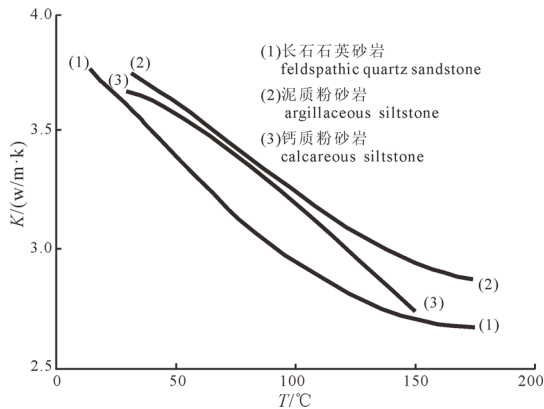


图 13 不同类型岩石导热系数与温度的关系

Fig. 13 Relationship between thermal conductivity and temperature of different types of sedimentary rocks

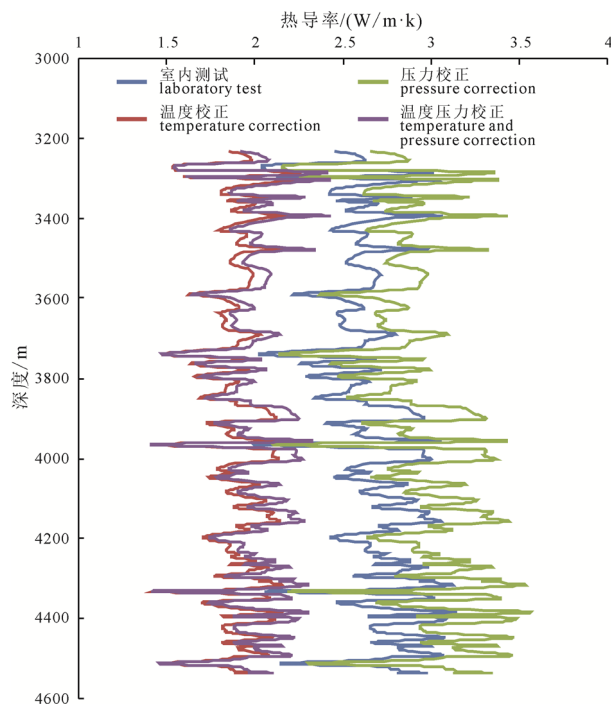


图 14 松辽盆地温度和压力校正后导热系数对比曲线

Fig. 14 Comparison curve of thermal conductivity after temperature and pressure correction in Songliao Basin

1 MPa, 导热系数增加 1~2 个百分点。压力对导热系数的影响可以用下式计算(Kappelmeyer and Hanel, 1974):

$$\lambda_p = (1.095\lambda_{lab} - 0.172)p^{(0.0088\lambda_{lab} - 0.0067)}$$

λ_{lab} = 常压条件下室内热物性测试结果;

p = 地层原位的压力。

图 14 给出了松辽盆地 3 200~4 600 m 导热系数随深度的变化曲线。可以看到温度对于导热系数的影响明显高于压力。实验室常温常压下所获取的导热系数经过温度校正后明显减小, 由原来的 1.99~3.14 W/(m·K), 减小到 1.42~2.27 W/(m·K), 减少了 30%; 同时, 导热系数在经过压力校正后平均仅增长了 10%; 说明对于盆地中沉积相对致密的岩石, 温度对岩石导热系数的影响更为明显。在综合温度和压力两个因素下, 对室内试验实测导热系数进行了两次校正后所得到的盆地 3 230~4 536 m 岩石原位导热系数为 1.41~2.42 W/(m·K), 平均导热系数为 1.99 W/(m·K)。可见, 松辽盆地深部岩心的原位导热系数与室内通过岩心测试所获取的导热系数有较大的差别, 造成这种差别的主要是由于温度对导热系数的影响机制。

5 结论

本研究围绕松科 2 井三开测井结果以及室内分析测试结果对深部岩石导热系数的测试、计算方法、影响因素等进行了系统的分析。

(1)通过对松科 2 井 3 230~4 536 m 的 123 个岩石导热系数进行测试分析, 结果表明盆地泥岩导热系数最大, 平均为 2.71 W/(m·K), 砂岩其次, 平均值为 2.66 W/(m·K), 而流纹岩平均导热系数最小, 平均为 2.45 W/(m·K)。导热系数各向异性比为 0.96~1.049, 具有微弱的各向异性。

(2)通过建立测井参数与导热系数之间的相关关系, 可以预测盆地不同区域导热系数的空间变化规律。松辽盆地砂岩的孔隙度、波速与导热系数之间具有明显的相关关系, 泥岩和流纹岩的相关性并不高, 因此, 对于盆地的砂岩段可以通过建立导热系数与波速、孔隙度之间的关系预测其他测井段岩石原位导热系数, 对于泥岩、流纹岩还有待进一步开展研究。

(3)温度和压力是影响原位导热系数和室内测试导热系数数值差异的重要因素。松辽盆地深部岩心实验室常温常压下所获取的导热系数经过温度校正后明显减小, 由原来的 1.99~3.14 W/(m·K), 减小到 1.42~2.27 W/(m·K), 减少了 30%; 同时, 导热系数在经过压力校正后平均仅增长了 10%; 说明对于盆地中沉积相对致密的岩石, 温度对岩石导热系数

的影响更为明显。

(4)松辽盆地沉积岩的热结构可以通过多种测井参数综合推算,同时,这种相关关系可以运用到盆地其他钻孔的导热系数预测上,对于那些因缺少深部岩石导热系数而无法计算大地热流的钻孔而言尤为重要,这为我国今后盆地大地热流的普测工作提供了一个新的手段。但是,这种相关关系是由沉积环境决定的,不同盆地通过测井参数获取的导热系数的变化规律是不一样的,国外许多盆地建立的测井参数与导热系数的变化关系并不适合于松辽盆地。因此,在应用中要以沉积相为基础加以区分,不同盆地不同沉积岩心分别建立不同的导热系数与测井参数的关系。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41602271 and 41741018), China Geological Survey (No. DD20160207), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. SK201501) and National Mineral Resources Reserve Technical Standard System Construction Project (No. CB2017-4-5).

参考文献:

- 鲍新华,张宇,李野,吴永东,马丹,周广慧. 2017. 松辽盆地增强型地热系统开发选区评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(2): 564-572.
- 程超,于文刚,贾婉婷,林海宇,李莲庆. 2017. 岩石热物理性质的研究进展及发展趋势[J]. 地球科学进展, 32(10): 1072-1083.
- 冯来泉. 2000. 物探测井在地热开发中的应用[J]. 地球学报, 21(2): 212-215.
- 高平. 2015. 岩石热物性参数分析及多场热效应耦合模型研究[D]. 长春: 吉林大学.
- 高有峰,瞿雪姣,蒋丽君,王树学,王璞珺. 2017. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科2井钻遇地层界面及岩性剖面预测[J]. 地学前缘, 24(1): 242-256.
- 龚建洛,张金功,惠涛,黄传卿,张林晔,孙志刚,陈晓军. 2014. 沉积岩平行层面与垂直层面方向导热系数与孔隙连通性之间的关系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 44(6): 1789-1797.
- 蔺文静,刘志明,马峰,刘春雷,王贵玲. 2012. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. 地球学报, 33(5): 807-811.
- 潘保芝,李舟波,景建恩. 1998. 大陆科学钻孔中的热测井及热参数计算[J]. 国外地质勘探技术, (5): 26-30.
- 瞿雪姣,杨立伟,薛璇,高有峰,王璞珺. 2017. 松辽盆地白垩系大陆科学钻探松科2井: 井底温度、地层压力预测[J]. 地学前缘, 24(1): 257-264.

- 王贵玲,张发旺,刘志明. 2000. 国内外热能开发利用现状及前景分析[J]. 地球学报, 21(2): 134-139.
- 王良书,熊振,郭随平,李成,施晓斌,王捷. 1999. 利用地球物理测井资料计算油气盆地中沉积岩原地热导率[J]. 石油地球物理勘探, 34(5): 526-531, 606.
- 张延军,于子望,黄芮,吴刚,胡继华. 2009. 岩土热导率测量和温度影响研究[J]. 岩土工程学报, 31(2): 213-217.
- 赵永信,杨淑贞,张文仁,梁宪荣,马丽云. 1995. 岩石导热系数的温压实验及分析[J]. 地球物理学进展, 10(1): 104-113.
- 周庆华,冯子辉,门广田. 2007. 松辽盆地北部徐家围子断陷现今地温特征及其与天然气生成关系研究[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 37(s2): 177-188.

References:

- BAO Xin-hua, ZHANG Yu, LI Ye, WU Yong-dong, MA Dan, ZHOU Guang-hui. 2017. Evaluation of Development Selection for Enhanced Geothermal System in Songliao Basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 47(2): 564-572(in Chinese with English abstract).
- BECK A E. 1982. Climatically perturbed temperature gradients and their effect on regional and continental heat-flow means[J]. Tectonophysics, 41: 17-39.
- BLACKWELL D D, STEELE J L. 1989. Thermal Conductivity of Sedimentary Rocks: Measurement and Significance[M]. New York: Thermal History of Sedimentary Basins: 13-36.
- BRIGAUD F, CHAPMAN D S, DOUARAN S L. 1990. Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs[J]. AAPG, 74(9):1459-1477.
- BRIGAUD F, VASSEUR G, CAILLET G. 1992. Thermal state in the north Viking Graben (North Sea) determined from oil exploration well data[J]. Geophysics, 57(1): 69-88.
- CHENG Chao, YU Wen-gang, JIA Wan-ting, LIN Hai-yu, LI Lian-qing. 2017. Research Progress and Development Tendency About Thermal Physical Properties of Rocks[J]. Advances in Earth Science, 32(10): 1072-1083(in Chinese with English abstract).
- EVANS T R. 1977. Thermal properties of North Sea rocks[J]. Log Analyst, 18(2): 3-12.
- FENG Lai-quan. 2000. The Application of Geophysical Logging to Geothermal Development[J]. Acta Geoscientia Sinica, 21(2): 212-215(in Chinese with English abstract).
- FUCHS S, FÖRSTER A. 2014. Well-log based prediction of thermal conductivity of sedimentary successions: a case study from the North German Basin[J]. Geophysical Journal International, 196(1): 291-311.
- GALLAGHER K, RAMSDALE M, LONERGAN L, MORROW D. 1997. The role of thermal conductivity measurements in modelling thermal histories in sedimentary basins[J]. Marine & Petroleum Geology, 14(2): 201-214.

- GAO Ping. 2015. Analysis of Rock Thermal Physical Parameters and research on Multi-field Thermal Effect Coupled Modle[D]. Changchun: Jilin University(in Chinese with English abstract).
- GAO You-feng, QU Xue-jiao, JIANG Li-jun, WANG Shu-xue, WANG Pu-jun. 2017. Lithology and stratigraphic interfaces prediction of the Continental Scientific Drilling Project of Cretaceous Songliao Basin (SK2)[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 242-256(in Chinese with English abstract).
- GONG Jian-luo, ZHANG Jin-gong, HUI Tao, HUANG Chuan-qing, ZHANG Lin-ye, SUN Zhi-gang, CHEN Xiao-jun. 2014. Thermal Conductivity Difference Between Parallel and Perpendicular to Bedding Plane of Sedimentary Rocks and Its Relationship to the Difference of Pore Connectivity[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 44(6): 1789-1797(in Chinese with English abstract).
- GOSS R, COMBS J, TIMUR A. 1975. Prediction of thermal conductivity in rocks from other physical parameters and from standard geophysical well logs[C]//Transactions of the SPWLA annual logging symposium, Society of Professional Well Log Analysts, 16: 21-25.
- HARTMANN A, RATH V, CLAUSER C. 2005. Thermal conductivity from core and well log data[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 42(7): 1042-1055.
- KAPPELMEYER O, HANEL R. 1974. Geothermics: with special reference to application[M]. Berlin: Gebruder Borntraeger.
- KATHARINA A, MARCELLUS S, CLAUDIA F, ROLAND K, KAI Z. 2017. Thermal conductivity estimation model considering the effect of water saturation explaining the heterogeneity of rock thermal conductivity[J]. *Geothermics*, 66: 1-12.
- LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, MA Feng, LIU Chun-lei, WANG Gui-ling. 2012. An estimation of HDR resources in China's mainland[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 33(5): 807-819(in Chinese with English abstract).
- MERKLE R H, MACCARY L M, CHICO R S. 1976. Computer techniques applied to formation evaluation[J]. *The Log Analyst*, 17(3): 3-10.
- MIDDLETON M F. 1994. Determination of Matrix thermal conductivity from dry drill cuttings[J]. *AAPG*, 78(11): 1790-1798.
- PAN Bao-zhi, LI Zhou-bo, JING Jian-en. 1998. Thermal logging and thermal parameter calculation in continental science boreholes[J]. *Foreign Geological Exploration Technology*, (5): 26-30(in Chinese).
- QU Xue-jiao, YANG Li-wei, XUE Xuan, GAO You-feng, WANG Pu-jun. 2017. Prediction of the bottom hole geotemperature, formation pressure and formation fracture pressure of the Continental Scientific Drilling of Cretaceous Songliao Basin (SK2)[J]. *Earth Science Frontiers*, 24(1): 257-264(in Chinese with English abstract).
- VACQUIER V, MATHIEU Y, LEGENDRE E, BLONDIN E. 1988. Experiment on estimating thermal conductivity from oil well logging[J]. *Am Assoc Petr Geol Bull*, 72(6): 758-64.
- VASSEUR G, BERNARD P, MEULEBROUCK J V D, KAST Y, JOLIVET J. 1983. Holocene paleotemperatures deduced from geothermal measurements[J]. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 43(3): 237-259.
- VASSEUR G, BRIGAUD F, DEMONGODIN L. 1995. Thermal conductivity estimation in sedimentary basins[J]. *Tectonophysics*, 244(1-3): 167-174.
- WANG Gui-ling, ZHANG Fa-wang, LIU Zhi-ming. 2000. An Analysis of Present Situation and Prospects of Geothermal Energy Development and Utilization in the World[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(2): 134-139(in Chinese with English abstract).
- WANG Liang-shu, XIONG Zhen, GUO Sui-ping, LI Cheng, SHI Xiao-bin, WANG Jie. 1999. Estimating the original geothermal conductivity of sedimentary rock in hydrocarbon-bearing basin by using geophysical logging data[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 34(5): 526-531, 606(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yan-jun, YU Zi-wang, HUANG Rui, WU Gang, HU Ji-hua. 2009. Measurement of thermal conductivity and temperature effect of geotechnical materials[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 31(2): 213-217(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Yong-xin, YANG Shu-zhen, ZHANG Wen-ren, LIANG Xian-yong, MA Li-yun. 1995. An experimental study of rock thermal conductivity under different temperature and pressure[J]. *Progress in Geophysics*, 10(1): 104-113(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Qing-hua, FENG Zi-hui, MEN Guang-tian. 2007. Evaluation of Development Selection for Enhanced Geothermal System in Songliao Basin[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 37(s2): 177-188(in Chinese with English abstract).