

山东省陈庄潜凸起区地温场特征与泰山岩群放射性元素生热率

谭现锋,王浩,张震宇

山东省鲁北地质工程勘察院,德州 253015

摘要 自然界的岩石中存在着放射性元素,这些元素在衰变过程中会释放出热能,放射性生热是岩石圈内热的主要来源之一。山东省陈庄潜凸起区作为一个干热岩勘探研究区域,在干热岩调查研究方面取得了一些基础性资料。本文对该区大地热流及地温场进行分析的基础上,利用 Rybach 生热率公式计算了钻孔岩石的放射性生热率,从 GRY1 孔的生热率与深度的关系来看,1650 m 以上,生热率整体数值较大,且变幅较大,在埋深 1430~1645 m 生热率达到 4.72~6.78 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,该区间主要由含黑云母二长花岗岩及绿泥石化二长花岗岩组成。1645~2500 m 区间主要由花岗岩及含黑云母闪长岩、辉长岩组成,生热率有所降低。整体来说,花岗岩中生热率变化较小,一般在 2.0~2.5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$;而含黑云母二长花岗岩及弱绿泥石化二长花岗岩生热率较高,且变化较大。

关键词 陈庄潜凸起;地温场;泰山岩群;放射性生热率

中图分类号 P624

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.19.009

Geothermal field characteristics and heat generation rate of radioactive elements in Taishan rock group at Chenzhuang uplift, Shandong Province

TAN Xianfeng, WANG Hao, ZHANG Zhenyu

Shandong Provincial Lubei Geo-Engineering Investigation Institute, Dezhou 253015, China

Abstract Radioactive elements exist in rock in the nature, which will release energy in the decaying process. Radioactive heat production is one of the main sources for lithospheric heat. Some basic information has been obtained about Chenzhuang uplift, Shandong Province as a hot dry rock exploration and study site. This paper calculates the radiogenic heat ratio of the rock core using Rybach heat generation rate formula, on the basis of analysis of terrestrial heat flow and geothermal field. The vertical distribution of heat generation rate at GRY1 borehole shows that the heat generation rate was larger with greater variation above 1650 m, and reached 4.72~6.78 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ at depth of 1430~1645 m, where biotite adamellite and chloritized adamellite mainly exist. At the interval of 1645~2500 m, where the rock is mainly composed of granite, biotite bearing diorite, and gabbro, the heat generation rate decreased. Overall, the heat generation rate of granite changed slightly, which was about 2.0~2.5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, while that of biotite adamellite and slightly chloritized adamellite was higher with larger variation.

Keywords Chenzhuang uplift; geothermal field; Taishan rock group; radioactive heat generation

岩石生热率分布在一定程度上反映了区域基底生热元素的丰度和岩浆活动的强度,放射性元素生热是岩石圈内热主要来源之一,放射性元素种类很多,只有具有一定丰度、产

热量大和半衰期长的元素,才具有地热研究意义^[1]。U、Th 和天然放射性同位素 ^{40}K 具备这些条件,是地球内部主要的生热元素^[2]。 ^{238}U 、 ^{235}U 的半衰期分别为 4.47×10^9 、 7.04×10^8 a, ^{232}Th

收稿日期:2015-08-21;修回日期:2015-08-31

作者简介:谭现锋,高级工程师,研究方向为大口径深部资源钻探,电子信箱:geotan1977@126.com

引用格式:谭现锋,王浩,张震宇.山东省陈庄潜凸起区地温场特征与泰山岩群放射性元素生热率[J].科技导报,2015,33(19):58-61.

的半衰期为 1.41×10^{10} a, ^{40}K 的半衰期为 1.28×10^9 a, 与地球的形成时间比较相似。同时 U、Th 和天然放射性同位素 ^{40}K 的发热率对地温场起着重要作用^[5]。

地壳的各类岩石中 U 和 Th 组分的分布很不均匀^[6]。总体来说,酸性岩富集 U 和 Th,基性岩亏损 U 和 Th。但即使在同一岩类中,U 和 Th 组分的变化也比较大。研究地壳中不同地区生热元素的赋存状态及分布规律,对于了解地壳物质对大地热流的热贡献、解释地温场分布特征、寻找隐伏的增强型地热系统等都具有十分重要的意义^[5]。陈庄潜凸起区岩性以酸性花岗岩类为主,本次通过对陈庄潜凸起区干热岩勘探孔不同深度的岩心进行放射性测试、岩矿分析,研究岩石的发热率与岩性的关系和垂向变化特征。

1 地质背景

1.1 地质背景条件

陈庄潜凸起区主体位于利津县陈庄镇、盐窝乡一带,在大地构造单元上属华北板块、华北拗陷区(I)、济阳拗陷(I_1)、沾化潜陷(I_{15})的一部分。根据“利津县干热岩调查”及区内石油钻探成果综合分析可知,在埋深 4000 m 以上分布有花岗岩的区域为陈庄潜凸起区。

陈庄潜凸起区北、西为沾化潜凹陷,南、东为东营潜凹陷,呈近东西向长方形分布(图 1)。凸起区新近系及第四系覆盖厚度 950~1900 m,下部由新太古界泰山岩群侵入岩及古生代地层组成。

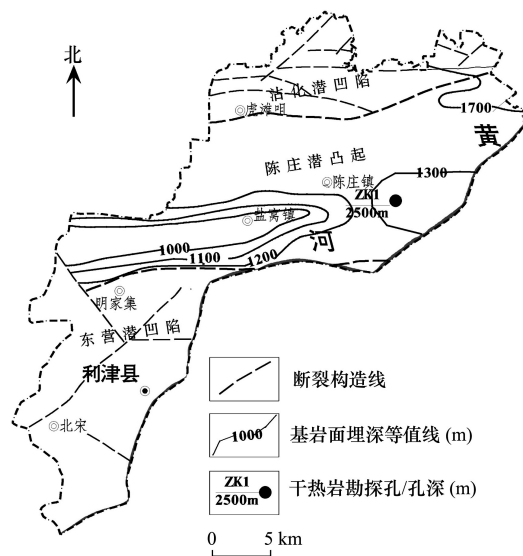


图 1 陈庄潜凸起地质构造与基岩面埋深等值线
Fig. 1 Tectonic structure and bedrock buried-depth contour map at Chen Zhuang uplift

1.2 地层

陈庄潜凸起区地层变化较大。特别是中生代以来受燕山运动和喜马拉雅运动的影响,其上沉积了较厚的新生代地

层,且地层厚度变化较大,新近系及第四系覆盖厚度 950~1900 m,区内地层由老至新有:

- 1) 新太古界泰山岩群(Ar_3T);
- 2) 古生界(Pz)寒武系—奥陶系($\epsilon-O$);
- 3) 古近纪沙河街组及东营组;
- 4) 新近纪馆陶组及明化镇组;
- 5) 第四系。

位于陈庄镇前郭村西侧施工的 GRY1 孔揭露的地层依次为:第四系平原组(275 m)、新近纪明化镇组(275~989 m)、新近纪馆陶组(989~1243 m)及新太古界泰山岩群(1243~2500 m 未揭穿)。

2 大地热流与地温场特征

2.1 区域岩石圈热结构分析

汪集旻等^[6]从地热角度将中国大陆划分出 5 个“热—构造区”:西北区含塔里木、准噶尔和柴达木盆地;西南区以青藏高原为主体,含三江构造带;中部“热—构造区”包括鄂尔多斯、四川盆地和云贵高原的大部分;东部沿秦岭—大别山一线划分成两个区;北部为东北热—构造区;南部为东南热—构造区。陈庄潜凸起区属华北“热—构造区”的华北地块的一部分,其中华北地块为低热流区(50 mW/m^2),莫霍面温度也最低,一般在 650°C 以下,热岩石圈较厚,据计算,地幔热流占地表热流的比例一般都在 60% 以上,具有“冷壳热幔”的热结构^[7]特征。表明深部热源控制着该区的岩石圈热结构^[8]。

2.2 大地热流值特征

陈庄潜凸起区大地热流值较高,据钻孔实测资料,大地热流一般大于 65 mW/m^2 (表 1)。2014 年施工 GRY1 孔埋深 2000~2500 m 区段其修正后热导率平均值为 $2.398 \text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$,基岩段平均地温梯度为 $2.903^\circ\text{C}/100 \text{ m}$,由此计算得热流值为 69.5 mW/m^2 。罗 30 石油钻孔实测值为 82 mW/m^2 ,综合两孔平均值,其大地热流值达到了 75.7 mW/m^2 ,说明该区域大地热流值较周边区域有较明显的升高。

表 1 区域钻孔大地热流值

Table 1 Regional heat flow measured in boreholes

孔号	构造部位	埋深/m	热导率/ ($\text{W}\cdot$ $(\text{m}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$)	地温梯度/ ($^\circ\text{C}\cdot$ $(100\text{m})^{-1}$)	热流量/ ($\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)
永 2	东营凹陷 北斜坡	1714~1914	2.684	2.82	75.4
		4345~4900	2.604	2.2	57.4
东风 2	东营凹 陷中部	4200~4300	2.152	2.7	58.2
		3770~4150	2.659	2.15	57.4
		3600~3700	1.365	4	54.4
义 13	沾化凹 陷中部	2705~2763	2.453	3.4	52.3
		2510~2705	2.286	4.2	59.5
罗 30	陈庄凸起	1529~1642	3.885	5.74	82.1
大 3-9	车镇凹陷 东段南坡	1810~1835	2.985	3.6	63.2
GRY1 孔	陈庄凸起	2000~2500	1.474	2.903	69.5

2.3 地温场垂向变化特征

根据2014年10月31日GRY1孔内测温资料(本次测温距施工完成封井间隔时间约7个月,所测数据能很好地反映该孔处垂向地温的变化特征,图2),GRY1孔在埋深1200 m以上地温梯度较高,达到4.77°C/100 m,在埋深1200 m以下地温梯度较低,为2.903°C/100 m。由此可见,GRY1孔处基岩段地温梯度较低,但整体变化不大,一直维持在2.903°C/100 m左右。

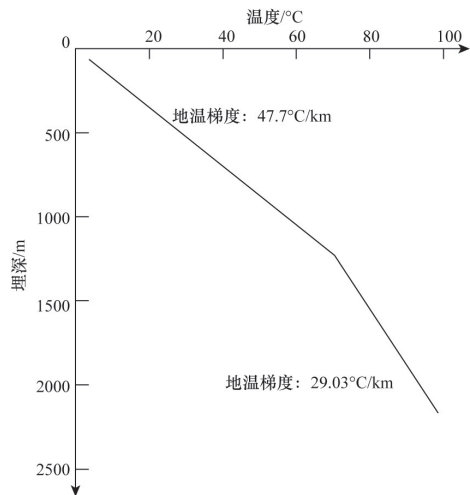


图2 GRY1孔孔内测温曲线

Fig. 2 Temperature logging in GRY1 borehole

3 放射性生热浅析

3.1 放射性生热元素

在地球的演化过程中,随着放射性元素的不断衰变,其丰度在逐步降低,放射性生热量随时间的增加而减少^[9]。由于不同生热元素的半衰期不同,它们间热贡献的相对比例也会随时间发生变化。半衰期较长的生热元素如²³²Th,其热贡献的相对比例在逐渐增大,而半衰期较短的生热元素如²³⁵U和⁴⁰K,其热贡献的相对比例却在逐渐减小(图3^[11])。

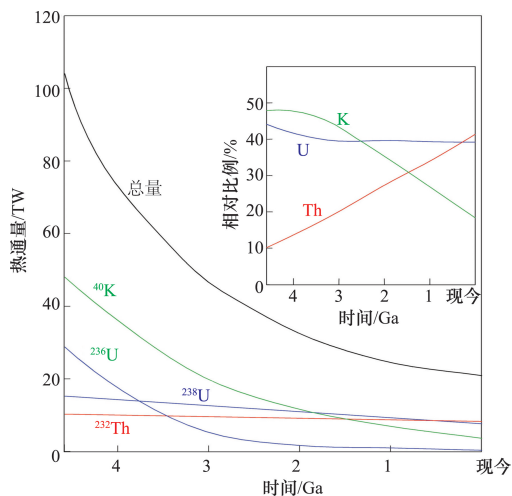


图3 生热元素的热贡献及其相对比例随时间的变化

Fig. 3 Heat contribution and time variation curve of heat generating elements

目前,地球上生热元素U和Th的热贡献比较接近,大体上各占40%,而生热元素K的热贡献比较小,只占有20%左右的份额^[10]。

3.2 放射性生热研究

单位体积岩石中的生热元素在单位时间内能产生多少热能,不同研究给出的计算方法并不完全一致^[12-14]。本次主要依据Rybach^[15]提出的计算公式进行计算:

$$A = 10^5 \cdot \rho \cdot (9.52 \cdot C_U + 2.56 \cdot C_{Th} + 3.48 \cdot C_K) \quad (1)$$

式中,A为岩石放射性生热率或简称生热率, $\mu\text{W}/\text{m}^3$; ρ 为岩石密度, kg/m^3 ; C_U 、 C_{Th} 、 C_K ,分别为岩石中U含量($\mu\text{g}/\text{g}$)、Th含量($\mu\text{g}/\text{g}$)、K含量(%)。

显然,生热率只与岩石密度及U、Th、K含量4个独立变量有关^[16]。

3.3 放射性生热计算

根据陈庄潜凸起区GRY1孔所采集的岩芯岩矿测试资料,该区的新泰山岩群侵入岩在埋深2500 m以上主要以花岗岩、二长花岗岩及弱绿泥石化二长花岗岩为主。根据式(1)及所取得的参数对生热率进行计算,结果如表2所示。

表2 GRY1孔实测放射性元素质量分数与计算生热率

Table 2 Content and calculated heat generation rate of radioactive elements at GRY1 borehole

埋深/m	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Th/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	U/ $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	K/%	生热率/ $(\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$
1290	2633	4.33	1.99	6.45	1.381683
1390	2647	11.40	2.19	2.50	1.554657
1458	2656	56.10	10.90	2.31	6.784030
1600	2661	27.40	10.70	1.71	4.735484
1685	2652	17.60	4.66	1.85	2.542133
1800	2712	13.40	6.35	4.29	2.974663
1942	2642	16.70	3.54	3.64	2.354550
1990	2641	12.70	3.73	2.69	2.043680
2068	2696	22.10	13.10	2.28	5.101436
2125	2671	13.10	2.91	2.64	1.881089
2205	2661	12.20	8.21	2.73	3.163705
2260	2940	10.80	2.53	2.72	1.799256
2381	2659	12.40	6.52	2.73	2.747141
2470	2675	13.40	7.64	2.67	3.111785

从GRY1孔的生热率与深度的关系看(图4),以1645 m为界,可以将GRY1孔内埋深1250~2500 m范围内生热率分为两段。1650 m以上,生热率整体数值较大,且变幅较大,在1430~1645 m生热率达到4.72~6.78 $\mu\text{W}/\text{m}^3$,该区间主要由含黑云母二长花岗岩及绿泥石化二长花岗岩组成。1645~2500 m区间主要由花岗岩及含黑云母闪长岩、辉长岩组成,生热率有所降低。整体来说,花岗岩中生热率变化较小,一般在2.0~2.5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$;而含黑云母二长花岗岩及弱绿泥石化二长花岗岩生热率较高,且变化较大。

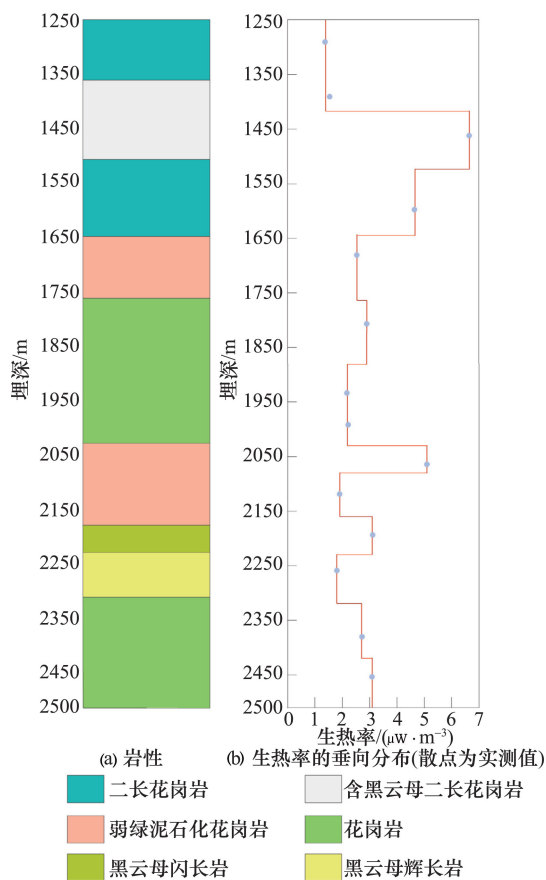


图4 GRY1孔揭示的生热率垂向分布特征

Fig. 4 Vertical distribution of heat generation rate at GRY1 borehole

4 结论

1) 放射性生热是岩石圈内热的主要来源之一,放射性元素种类很多,只有具有一定丰度、产热量大和半衰期长的元素,才具有地热研究意义。U、Th和天然放射性同位素⁴⁰K具备了这些条件,是地球内部主要的生热元素。

2) 山东省陈庄潜凸区大地热流值相对于周边区域数值较大,达到75.7 mW/m²,且潜伏的基岩在埋深2500 m以上地温梯度达到2.903℃/100 m,具有较好的干热岩形成与开发利用条件。

3) 经对GRY1孔放射性生热元素进行分析测试,GRY1孔放射性生热元素含量较高,以埋深1645 m为界,上部生热率变化较大,其值较高,最高可以达到(埋深1430~1520 m)6.78 μW/m³,整体来说,花岗岩中生热率变化较小,一般在2.0~2.5 μW/m³;而含黑云母二长花岗岩及弱绿泥石化二长花岗岩生热率较高,且变化较大。

参考文献(References)

[1] 吴耀,金振民,欧新功,等. 中国大陆科学钻探(CCS D)主孔地区岩石圈热结构[J]. 岩石学报, 2002, 21(2): 18-22.
Wu Yao, Jin Zhenmin, Ou Xingong, et al. Lithospheric thermal structure beneath the area of the Chinese Continental Scientific Drilling Site (CCSD)[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 21(2): 18-22.

[2] Albarede F. 1975 The heat flow-heat generation relationship: An interaction model of fluids with cooling intrusions[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1975, 27: 73-78.

[3] 迟清华, 嫣明才. 华北地台岩石放射性元素与现代大陆岩石圈热结构和温度分布[J]. 地球物理学报, 1998, 41(1): 32-34.
Chi Qinghua, Yan Mingcai. The north China platform of radioactive elements and modern rock lithospheric thermal structure and temperature distribution[J]. Journal of Geophysics, 1998, 41(1): 32-34.

[4] Blackwell D D. The thermal structure of the continental crust[C]//Heacock J G. The structure and physical properties of the Earth's crust. American Geophysical Union Geophysical Monograph, 1971, 14: 169-184.

[5] Kremenetsky A A, Milanovsky S Y U, Ovchinnikov L N. A heat generation model for continental crust based on deep drilling in the Baltic shield [J]. Tectonophysics, 1989, 159: 231-246.

[6] 何丽娟, 胡圣标, 汪集咏. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征[J]. 自然科学进展, 2011, 11(9): 966-969.
He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. Lithospheric thermal structure characteristics of eastern China[J]. Progress in Natural Science, 2011, 11(9): 966-969.

[7] 曾令森, 刘福来, 张泽明, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔100~2000 m放射性产热元素的垂向分布特征及其成因[J]. 中国地质, 2005, 32(2): 20-23.
Zeng Lingsen, Liu Fulai, Zhang Zeming, et al. Vertical distribution characteristics and origin of radiogenic heat-producing elements (HPE) in the first 2000m of the main hole of the CCSD project[J]. Geology in China, 2005, 32(2): 20-23.

[8] 黄少鹏. 全球大地热流-岩石生热率关系综合分析[J]. 地球物理学报, 1998, 41(增1): 26-31.
Huang Shaopeng. Global heat flow-rock heat generation comprehensive analysis[J]. Journal of Geophysics, 1998, 41(Suppl 1): 26-31.

[9] 何丽娟. 流变边界层及其对华北克拉通热/地震岩石圈底界差异的意义[J]. 地球物理学报, 2014, 57(1): 53-61.
He Lijuan. The Rheological boundary layer and its implications for the difference between the thermal and seismic lithospheric bases of the North China Craton[J]. Journal of Geophysics, 2014, 57(1): 53-61.

[10] 何丽娟, 胡圣标, 杨文采, 等. 中国大陆科学钻探主孔揭示的大陆地壳生热模型[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2808-2814.
He Lijuan, Hu Shengbiao, Yang Wencai, et al. Heating generation model for the continental crust based on the main hole of the Chinese continental scientific drilling project[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(11): 2808-2814.

[11] Arevalo Jr R, McDonough W F, Luong M. The K/U ratio of the silicate Earth: Insights into mantle composition, structure and thermal evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 278: 361-369.

[12] Birch F. Heat from radioactivity[M]// Faul H. Nuclear Geology. New York: John Wiley & Sons, 1954: 148-174.

[13] Rybach L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters[J]. Pure and Applied Geophysics, 1976, 114: 309-318.

[14] Wollenberg H A, Smith A R. Radiogenic heat production of crustal rocks: An assessment based on geochemical data[J]. Geophysical Research Letters, 1987, 14: 295-298.

[15] 张邦桐, 凌洪飞, 陈培荣, 等. 岩石古放射性生热率的校正及其地球化学意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 29(2): 17-21.
Zhang Bangtong, Ling Hongfei, Chen Peirong, et al. Correction to the paleoradiogenic heat production rate of rocks and its geochemical significance[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2010, 29(2): 17-21.

[16] 赵平, 汪集咏, 汪集安, 等. 热流和岩石生热率关系的研究[J]. 地质科学, 1996, 31(3): 297-307.
Zhao Ping, Wang Jiyang, Wang Ji'an, et al. Study on the relationship between heat flow and heat production[J]. Chinese Journal of Geology, 1996, 31(3): 297-307.

(责任编辑 吴晓丽)