

地热学岩石圈厚度计算方法综述

焦亚先¹,李文正^{2,3},阙永泉²,邱楠生²

(1. 中国石油华北油田公司勘探开发研究院,河北 任丘 062552; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249; 3. 中国石油杭州地质研究院,浙江 杭州 310023)

摘要:地热学岩石圈厚度体现了长时间尺度上的岩石圈热学作用,可以反映地球深部动力学过程。介绍了地热学岩石圈厚度的计算方法,探讨了这种方法的参数选取和影响因素,并对比了地热学岩石圈厚度与其他类型岩石圈厚度的差异及其原因。结果表明:地热学岩石圈厚度的计算结果受地壳分层结构、岩石生热率、岩石热导率以及地表热流的影响;地质历史时期内的地壳分层结构要结合岩石学、岩石地球化学等领域最新研究成果得出;地表热流较低($42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)时,岩石圈地幔生热率对计算结果的影响非常显著,岩石圈地幔生热率变化 $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,地热学岩石圈厚度计算结果最高变化 40 km,岩石圈地幔热导率每变化 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,地热学岩石圈厚度变化 15 km;地表热流为 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,岩石圈地幔生热率每变化 $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,地热学岩石圈厚度变化 3 km,岩石圈地幔热导率每变化 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,地热学岩石圈厚度变化 5 km;地表热流增高 $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,地热学岩石圈厚度约增加 3 km;地热学岩石圈厚度与岩石学、地震学岩石圈厚度略有差异,其差异取决于流变边界层的厚度。

关键词:岩石圈厚度;地热学;地表热流;热导率;生热率;地壳分层结构;流变边界层

中图分类号:P314.2 **文献标志码:**A

Review on Calculation Method of Geothermal Lithospheric Thickness

JIAO Ya-xian¹, LI Wen-zheng^{2,3}, QUE Yong-quan², QIU Nan-sheng²

(1. Exploration and Development Research Institute, Huabei Oilfield Company, PetroChina, Renqiu 062552, Hebei, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 3. Hangzhou Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou 310023, Zhejiang, China)

Abstract: Geothermal lithospheric thickness reflects the thermal effect of lithosphere in long-time scale and the deep dynamic processes of earth. Calculation method of geothermal lithospheric thickness was introduced, preference selection and influencing factors of the method were discussed, and the differences of geothermal and other lithospheric thicknesses and their reasons were compared. The results show that calculation result of geothermal lithospheric thickness is influenced by crustal layered structure, heat generation rate and thermal conductivity of rock and surface heat flow; crustal layered structure in geological history should be speculated according to the newest research findings in petrology, petrogeochemistry, etc.; effect of heat generation rate of lithospheric mantle on the calculation result of geothermal lithospheric thickness is very significant when the surface heat flow is low ($42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$), change of $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ for heat generation rate of lithospheric mantle has a maximum effect on the calculated results with the

收稿日期:2013-10-15

基金项目:国家自然科学基金项目(91114202,90914006)

作者简介:焦亚先(1989-),女,河北涿州人,助理工程师,理学硕士,E-mail:jiaoyaxian163@163.com。

change of 40 km, and change of $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ for thermal conductivity of lithospheric mantle results in the change of 15 km; when surface heat flow is $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, change of $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ for thermal conductivity of lithospheric mantle results in the change of 3 km, and change of $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ for thermal conductivity of lithospheric mantle results in the change of 5 km; when surface heat flow increases $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, the geothermal lithospheric thickness increases 3 km; geothermal lithospheric thickness has slightly differences with petrological and seismological lithospheric thickness, and the differences depend on the thickness of rheological boundary layer.

Key words: lithospheric thickness; geothermics; surface heat flow; thermal conductivity; heat generation rate; crustal layered structure; rheological boundary layer

0 引言

岩石圈的概念是 1914 年 Barrell 相对于软流圈而提出的,其含义是具有高强度的地球外壳^[1]。随着板块构造理论的发展,20 世纪六七十年代,岩石圈被定义为若干漂浮于软流圈之上、在较长地质时间尺度上保持刚性的块体板块,包括地壳和上地幔高速盖层^[2]。岩石圈内部结构是地幔动力学及板块构造学说的基础。随着科学技术的发展,广大学者已经不单纯从刚性力学领域研究岩石圈,而是越来越多地关注其地震学结构、温度、化学成分、弹性、岩石组成、导电性等多方面的性质。地热学岩石圈厚度体现了长时间尺度上的岩石圈热学作用,因此,其厚度定义的标准是较合理的^[3]。前人应用地热学原理研究岩石圈厚度主要侧重其地质意义,对地质时期内各参数如何选取以及不同参数对结果的影响研究较少。笔者主要从地热学角度阐述了岩石圈厚度的计算方法,定量探讨了不同参数对计算结果的影响,同时综述了其他方法定义岩石圈厚度的原理,并对比了几种方法的异同,分析了各种计算方法产生差异的原因。

1 地热学岩石圈厚度

1.1 计算方法

地热学定义的岩石圈是指以热传导方式进行热传递的岩石圈层,其下部为以热对流为主要方式的软流圈^[4]。岩石地球化学的研究表明,软流圈处于部分熔融状态,其熔融物质成分类似于干玄武岩^[5],因此,软流圈的温度应高于干玄武岩固相线温度,而岩石圈温度应低于干玄武岩固相线温度,岩石圈底部温度应等于干玄武岩固相线温度^[5]。依据此原理,在岩石圈内,热传导方式遵循一维热传导方程

$$T_{i,\text{upper}} = T_{i,\text{lower}} + q_{i,\text{upper}} Z_i / K_i - A_i Z_i^2 / (2K_i) \quad (1)$$

式中: Z_i 为第 i 层构造层的厚度; $T_{i,\text{upper}}$ 、 $T_{i,\text{lower}}$ 分别为第 i 层构造层上、下界面的温度; A_i 为第 i 层构造层的岩石生热率($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); K_i 为第 i 层岩石热导率; $q_{i,\text{upper}}$ 为第 i 层构造层顶面处的热流值。

若已知地壳结构、各层地质参数以及热流值,则可以得到岩石圈内地温随深度变化的分布曲线,地温分布曲线与干玄武岩固相线或地幔绝热线的交点处深度则为地热学岩石圈厚度^[4](图 1)。

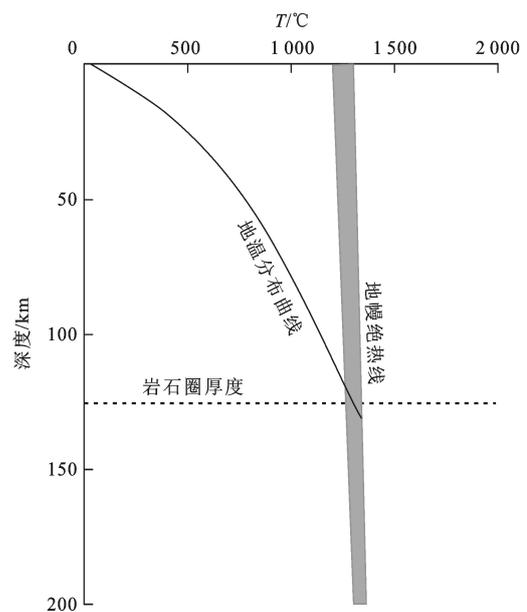


图 1 地热学岩石圈厚度的计算方法

Fig. 1 Calculation Method of Geothermal Lithospheric Thickness

20 世纪 90 年代,地幔绝热线主要采用 Lachenbruch 等提出的干玄武岩固相线来近似^[6](BDS),其近似方程为 $T = 1050 + 3Z$ 。其中: T 为温度; Z 为深度。随着地热学理论的成熟,Artemieva 等提出的采取两条绝热线分别作为地热学岩石圈厚度的上、下限被广泛应用^[7]。上限公式为 $T_1 = 1200 + 0.5Z$;下限公式为 $T_2 = 1300 + 0.4Z$ 。

1.2 影响因素

地热学岩石圈是在地表生热率和热导率的基础上,利用稳态热传导方程来推导上地幔的温度场,其下部是部分熔融状态具有较高变形能力的软流圈。因此,利用地热定义的岩石圈与板块构造的岩石圈概念是一致的,也是合理的。但地热学方法也存在一定缺陷:只有稳定的大陆岩石圈,其地表热流才是地壳热流与地幔热流供给的总和。因此,地热学岩石圈厚度计算的准确度取决于热流场的稳定性以及地表热流测量的准确性。地热学岩石圈厚度的计算不仅受地壳模型以及岩石热物性参数影响,还受到热流值的影响。

1.2.1 地壳分层结构

在计算地热学岩石圈厚度时,地层分层数据、地

壳厚度等地质参数是计算的基础。计算现今地热学岩石圈厚度时,地层分层数据主要来源于钻井资料,对于没有钻井的地区或钻井没有揭露的地层,则可以通过地震剖面解释而获得(人工井);地壳厚度采用地震成像方法揭示的现今地壳分层厚度。

对于地质历史时期地热学岩石圈厚度的计算,地层和地壳分层厚度要使用当时的厚度数据。根据现今地层厚度、剥蚀量恢复结果以及压实校正系数,利用地层骨架厚度不变的压实模型,通过数学计算复原出地质时期的地层埋藏状态,从而得到地质历史时期的地层厚度;地壳分层厚度可以根据岩石学、岩石地球化学以及构造演化的研究成果得出。以渤海湾盆地为例,地质历史时期地热学岩石圈厚度的计算应采用与其相对应的地壳分层结构(图 2)。

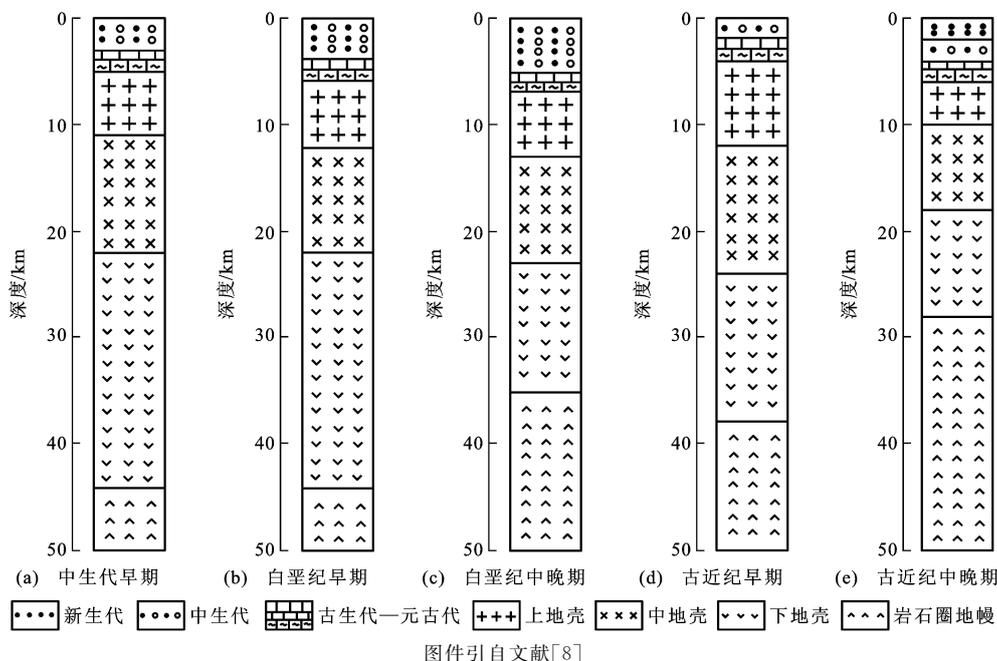


图 2 渤海湾盆地地质历史时期地壳分层结构

Fig. 2 Crustal Layered Structures of Bohai Bay Basin in Geological History

1.2.2 岩石热物性参数

岩石热物性参数主要包括岩石的生热率和热导率。岩石热导率(K)表示岩石传热的特性,其物理意义为:沿热传导方向在单位厚度岩石两侧的温度差为 1℃时,单位时间内所通过的比热流量。一般来说,较新地层或较浅地层的热导率较小,随着深度的增加,岩石的热导率变大,较老或者较深的地层热导率较大。砂岩的热导率分布较为分散,但总体上大于泥岩的热导率,灰岩和白云岩的热导率也较大。岩石热导率主要和岩石的成分和结构以及后期压实演化的程度有关。岩石的生热率(A)是指单位体积岩石中所含放射性元素在单位时间由衰变所释放的

能量,其大小主要取决于岩样中所含铀、钍、钾的含量。一般来说,盆地沉积地层的生热率比下地壳生热率高,下地壳生热率比岩石圈地幔生热率高;在盆地沉积地层中,砂岩一般比泥岩生热率低,而石灰岩生热率最低,并且岩石生热率随着深度的增加逐渐减小。沉积地层和地壳的岩石样品可以从钻孔中取得,其生热率和热导率一般采用样品的实测值,而岩石圈地幔热物性参数没有直接的实测数据,需要根据地壳及其上覆沉积地层的地质参数估算^[8]。因此,岩石圈地幔生热率和热导率取值的差异会对计算的岩石圈厚度产生一定影响。

(1)岩石圈地幔生热率的影响。以鄂尔多斯盆

地为例,古生代构造活动稳定,盆地为岩石圈厚度超过 200 km 的克拉通,地壳厚度 40 km,地表热流值低($42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$),地壳及其上覆沉积地层岩石生热率和热导率采用实测值,岩石圈地幔生热率取值不同时($0.01 \sim 0.09 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$),计算的地温分布曲线不同[图 3(a)]。结果显示:地幔生热率从 $0.01 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 变为 $0.03 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,计算的岩石圈厚度增大近 20 km;地幔生热率从 $0.03 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 变为 $0.05 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,计算的岩石圈厚度增大更多,约 40 km;当岩石圈地幔生热率取值超过 0.05

$\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,地温分布曲线不再与地幔绝热线相交,说明地幔生热过高,不在合理范围内。这种方法也可以用来约束该区岩石圈地幔生热率合理的取值范围;当地表热流值增大至 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,计算的岩石圈厚度明显减小[图 3(b)],此时岩石圈地幔生热率取值 $0.01 \sim 0.09 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,计算的岩石圈厚度差异不大(地幔生热率每变化 $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,岩石圈厚度变化约 3 km)。总之,热流值较低时,深部岩石生热率对岩石圈厚度计算结果的影响较大。

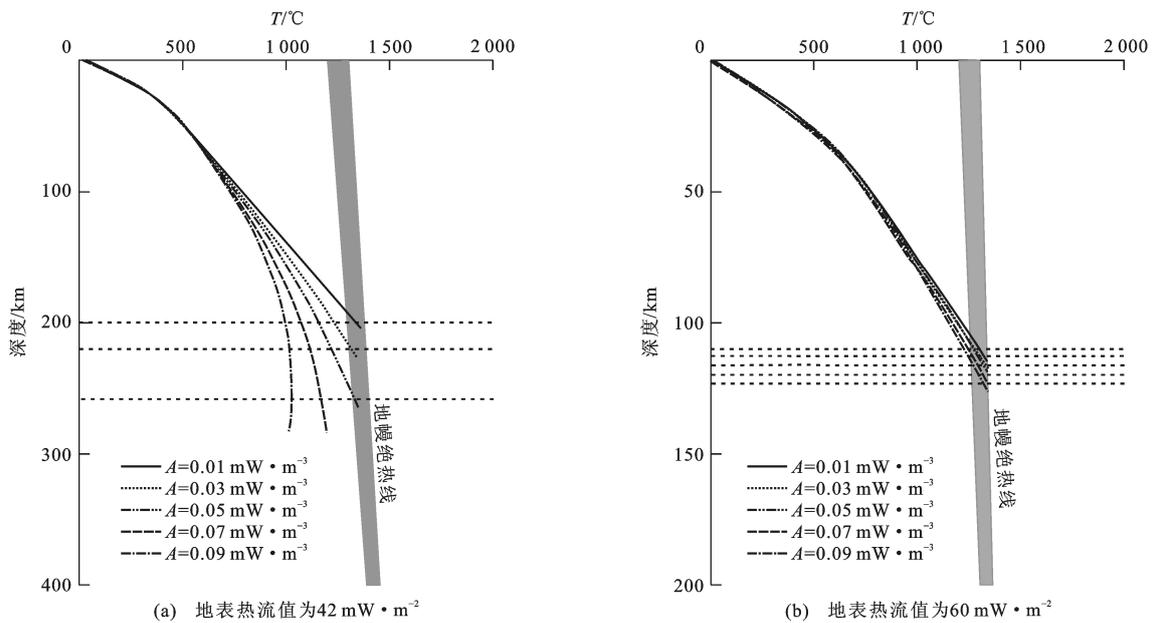


图 3 岩石圈地幔生热率对地热学岩石圈厚度计算结果的影响

Fig. 3 Effect of Heat Generation Rate of Lithospheric Mantle on the Calculation Result of Geothermal Lithospheric Thickness

(2)地幔热导率对计算岩石圈厚度的影响。以渤海湾盆地为例,利用渤海湾盆地现今地壳分层结构(图 2),沉积地层盖层和地壳的岩石热物理参数取实测值,地幔生热率取 $0.03 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,当地幔热导率为 $3.0 \sim 3.8 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 时,地温分布曲线不同(图 4)。结果表明:当地表热流为 $42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,地温分布曲线随着地幔热导率的增大而越来越陡,即与地幔绝热线的交点深度不断增加;岩石圈地幔热导率每增加 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 时,岩石圈厚度增加约 15 km[图 4(a)];而当地表热流值为 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,岩石圈地幔热导率变化对岩石圈厚度计算结果的影响明显增大(热导率每变化 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 时,岩石圈厚度变化约 5 km)[图 4(b)],变化趋势与岩石圈地幔生热率对计算结果的影响相似。由此可见,热流值较低时,深部岩石热导率对岩石圈厚度计算结果的影响较大。

1.2.3 地表热流

对同一地区而言,热流值不同计算的地热学岩石圈厚度也有一定的差异。图 5 显示了地壳结构和岩石热导率、生热率取值相同时,地表热流值的不同对地热学岩石圈厚度计算结果的影响。从图 5 可以看出,热流值的变化对计算地热学岩石圈厚度影响较大。地表热流值从 $59 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 增大至 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,计算的地热学岩石圈厚度增加 3 km 左右,因此,地表热流值的测量精度及古地表热流恢复的精度决定了地热学岩石圈厚度计算的精度。

在计算地热学岩石圈厚度时,现今地表热流一般采用实测值,即由系统稳态测温数据和相应层段岩石热导率实测值得到的大地热流值。系统稳态测温是指在钻孔中所测的温度是稳态的,只有在停钻、井液循环终止相当长的时间后,井温与围岩温度达到平衡才是稳态的。然而,在实际工作中,得到稳态温度是不容易的,更多的是测量得到流温,此时得到的大地热流值会

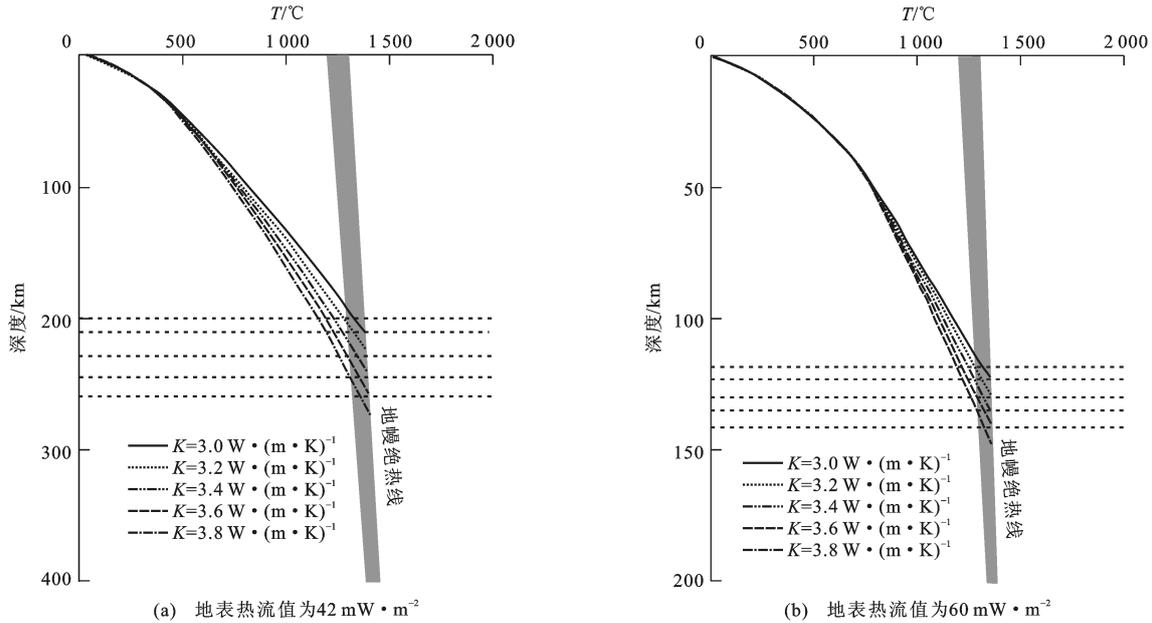


图 4 岩石圈地幔热导率对地热学岩石圈厚度计算结果的影响

Fig. 4 Effect of Thermal Conductivity of Lithospheric Mantle on the Calculation Result of Geothermal Lithospheric Thickness

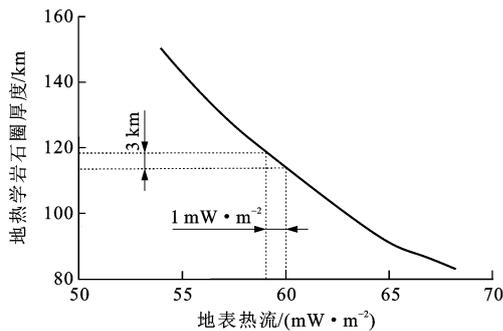


图 5 地表热流对地热学岩石圈厚度的影响

Fig. 5 Effect of Surface Heat Flow on Geothermal Lithospheric Thickness

出现异常值。盆地内非深部因素也会导致局部的热流值异常:断裂活动、局部岩浆侵入导致热流值高热异常;快速沉降沉积地层未达到热平衡导致热流值低热异常。因此,在选井的过程中,应选取远离岩浆侵入体的井位进行热历史的恢复,避免高热流异常的影响;对快速沉降导致的热流异常应先进行校正,然后再利用校正后的热流值进行地热学岩石圈厚度的计算。

2 其他类型岩石圈厚度

2.1 岩石学岩石圈厚度

岩石地球化学家利用玄武岩或金伯利岩中壳、幔源捕虏体研究岩石圈厚度时,一般是利用捕虏体矿物平衡温压计算得出。幔源包体的平衡温压是指包体在被寄主岩浆捕获前的温压,它可以揭示包体的起源深度和岩石圈地幔的热状态^[9]。将计算的温压

数据拟合成上地幔地温线,可以认为上地幔地温线与地幔固相线的交点深度相当于软流圈的最顶部。

幔源包体是岩体来自地幔的直接证据,因此,上述方法对研究岩石圈具有很高的可信度。该方法不仅可以分析不同时空背景下岩石化学成分的差异来探讨其岩石圈地幔的演化过程,同时也可以揭示岩石圈地幔性质变化的时间等。然而,由于地幔包体以及岩浆岩分布范围具有局限性,所以岩石地球化学方法对岩石圈的研究受限于岩石地域的发育情况。

2.2 地震学岩石圈厚度

地震学家把上地幔内地震波速度高衰减带作为软流圈出现的标志,他们通过观察上地幔中地震波波速降低(进入低速带)的位置来估计岩石圈厚度,也就是地震学岩石圈厚度。S波速度结构与地球内部介质的剪切模量密切相关,对软流层、热物质等比P波更敏感,能更好地反映地球内部介质的流变状态和热结构^[10]。朱介寿等利用S波速度研究东亚及西太平洋边缘海地区不同构造单元的岩石圈结构,将速度 $4.3\sim 4.5\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 作为划分界限,将上地幔中速度低于此范围的划为低速层,其上划分为岩石圈,以此来研究岩石圈和软流圈的厚度横向变化^[11]。Van Der Lee认为上地幔S波速度的降低速率达到最大是进入软流圈的标志,并用此种方法较准确地推测了北美地区的岩石圈厚度^[12]。

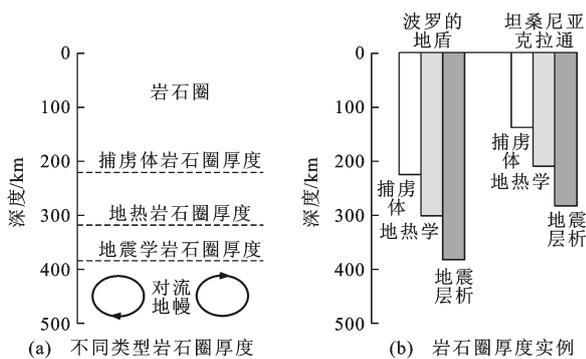
由于上地幔和低速带之间并不是一个显著的间断面,地震波在其中的传播往往表现出速度渐进变

化的规律,所以在估计岩石圈厚度时,计算的岩石圈厚度较其他方法要大。

3 讨论

3.1 不同类型岩石圈厚度的差异

目前,基于不同物理化学边界,对岩石圈赋予了不同的定义,包括岩石学岩石圈、地热学岩石圈、地震学岩石圈、弹性岩石圈等。一般来说,不同的岩石圈定义的岩石圈厚度也不一样,表现为地震学岩石圈厚度最大,地热学岩石圈厚度居中,幔源捕虏体定义的岩石圈厚度最小(图6)。从图6可以看出,对于波罗的地盾和坦桑尼亚克拉通,捕虏体、地热学岩石圈厚度以及地震层析定义的岩石圈厚度之间差异约为70 km^[7]。笔者基于上述原理计算了鄂尔多斯盆地现今地热学岩石圈厚度为125 km,与Huang等利用剪切波速度揭示的鄂尔多斯盆地地震学岩石圈厚度(160 km)相差35 km^[13]。



图件引自文献[7]

图6 不同类型岩石圈厚度的对比

Fig. 6 Comparison of Different Kinds of Lithospheric Thickness

渤海湾盆地是华北克拉通减薄破坏的中心区域,前人运用不同方法对其岩石圈厚度进行了较为详细的研究。Xu利用捕虏体研究岩石圈厚度时指出,华北克拉通东部现代岩石圈厚度大多小于100 km,而岩石圈减薄的中心地区(如渤海湾盆地、松辽盆地等)厚度最小约为50 km^[14]。对于现今地热学岩石圈厚度,何丽娟等给出渤海湾盆地现今地震学岩石圈厚度为(75±11)km^[15]。Huang等利用反射地震波偏移成像技术对华北克拉通东部岩石圈进行研究,认为渤海湾盆地地震学岩石圈厚度平均约为80 km^[13]。对于渤海湾盆地平均岩石圈厚度,捕虏体岩石圈厚度最小,地热学岩石圈厚度居中,地震学岩石圈厚度最大,它们之间的差距分别为15、5 km。

地热学岩石圈与地震学岩石圈厚度存在差异的主要原因是,在软流圈和岩石圈之间存在流变边界

层。岩石圈内热传递的主要方式为热传导,软流圈内热传递的主要方式为热对流,位于岩石圈和软流圈之间的部分为流变边界层。热在流变边界层内部的传递方式已经不符合一维热传导原理,热传递方式由热传导逐渐变为热对流,因而利用热传导方程计算的岩石圈边界更接近流变边界层的顶界面。由于上地幔和低速带之间并不是一个明显的不连续面,而是表现为地震波速度的渐进变化,所以地震波在其中的传播速度逐渐降低,地震学定义的岩石圈界面更接近流变边界层的底界^[16]。流变边界层越厚,地热学岩石圈与地震学岩石圈厚度差异越大^[17]。

3.2 存在问题

计算地质历史时期的地热学岩石圈厚度需要结合当时的地壳结构,但是地质历史时期的地壳结构仅采用岩石学、地球化学等学科的研究成果进行约束,无法进行直接观测,具有一定的不确定性。其次,地球深部及地质历史时期岩石的热物理参数(包括岩石的生热率和热导率),也是研究中的一个难题。目前,大部分研究仅采用现今沉积地层的热导率和生热率代替地质历史时期的参数,而深部的生热率和热导率采用推测值,因此,这些处理方式对计算结果都有一定影响,但它们的影响是次要的,并不会改变岩石圈厚度的演化趋势。在所有参数中,地表热流对岩石圈厚度的计算结果影响最大,而且地质历史时期热流的恢复结果也受很多因素的影响。总之,地热学岩石圈厚度的计算方法结合岩石学、地球化学等的最新研究成果才能得出可信度较高的岩石圈厚度。

4 结语

(1)利用地热学方法计算岩石圈厚度可以从盆地全貌为深部岩石圈提供科学依据,可以揭示地质历史时期地热学岩石圈的状态及其演化过程。但是,地热学岩石圈厚度的计算结果依赖于地壳分层结构、岩石热物性参数以及地表热流等参数的选取。其中,热流值对地热学岩石圈厚度的计算结果有显著影响,热流值每变化 $1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,计算的地热学岩石圈厚度就会变化3 km。在热流值较小时,岩石的生热率和热导率对计算结果的影响也较大。其中:热流很低($42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)时,岩石圈地幔生热率每变化 $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,地热学岩石圈厚度最高可变化40 km,岩石圈地幔热导率每变化 $0.2 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,地热学岩石圈厚度变化15 km;热流为 $60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时,岩石圈地幔生热率每变化 $0.02 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$,地热学岩石圈厚度变化3 km,岩石圈地幔热导率每变化 0.2

$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$,地热学岩石圈厚度变化 5 km。

(2)不同方法定义的岩石圈厚度不同。地震学岩石圈厚度具有较高的精度也被国内外学者青睐,但其精度依赖于人为地对岩石圈的定义,具有短时间尺度效应。地热学岩石圈厚度体现了长时间尺度上的岩石圈地热学作用,因此,其厚度定义的标准与长时间尺度的岩石圈概念一致。并且,地热学方法计算的岩石圈厚度往往比地震波揭示的岩石圈厚度大,这是由于岩石圈和软流圈之间存在流变边界层。用地热学方法要得出可信度较高的岩石圈厚度需要结合岩石学、地球化学等领域的最新研究成果。

参考文献:

References:

- [1] BARRELL J. The Strength of the Earth's Crust Part I: Geologic Tests of the Limits of Strength[J]. The Journal of Geology, 1914, 22(1): 28-48.
- [2] WILSON J T. A New Class of Faults and Their Bearing on Continental Drift[J]. Nature, 1965, 207: 343-347.
- [3] 安美建, 石耀霖. 中国大陆岩石圈厚度分布研究[J]. 地学前缘, 2006, 13(3): 23-30.
AN Mei-jian, SHI Yao-lin. Review on Lithospheric Thickness Research of the Chinese Continent [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(3): 23-30.
- [4] MORGAN P. The Thermal Structure and Thermal Evolution of the Continental Lithosphere[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1984, 15: 107-193.
- [5] 秦秀峰, 徐义刚, 张辉煌, 等. 大陆亚碱性火山岩的成因多样性: 以敦化—密山和东宁火山岩带为例[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2501-2514.
QIN Xiu-feng, XU Yi-gang, ZHANG Hui-huang, et al. Petrogenetic Diversity of Continental Subalkaline Volcanic Rocks: An Example from the Dunhua-Mishan-Dongning Volcanic Belt [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2501-2514.
- [6] LACHENBRUCH A H, SASS J H. Heat Flow in the United States and the Thermal Regime of the Crust [C]// HEACOCK J G. Earth's Crust: Its Nature and Physical Properties. Washington DC: AGU, 1977.
- [7] ARTEMIEVA I M, MOONEY W D. On the Relations Between Cratonic Lithosphere Thickness, Plate Motions, and Basal Drag [J]. Tectonophysics, 2002, 358 (1/2/3/4): 211-231.
- [8] 左银辉, 邱楠生, 常健, 等. 渤海湾盆地中、新生代岩石圈热结构研究[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 145-153.
ZUO Yin-hui, QIU Nan-sheng, CHANG Jian, et al. Mesozoic-Cenozoic Lithospheric Thermal Structure in the Bohai Bay Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 145-153.
- [9] BERTRAND P, MERCIER J C C. The Mutual Solubility of Coexisting Ortho- and Clinopyroxene: Toward an Absolute Geothermometer for the Natural System? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1985, 76(1/2): 109-122.
- [10] 张学民. 剪切波速度结构研究方法综述[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1): 135-141.
ZHANG Xue-min. The General Statement on Shear Wave Velocity Structure Research Methods [J]. Progress in Geophysics, 2005, 20(1): 135-141.
- [11] 朱介寿, 曹家敏, 蔡学林, 等. 东亚及西太平洋边缘海高分辨率面波层析成像[J]. 地球物理学报, 2002, 45(5): 646-664.
ZHU Jie-shou, CAO Jia-min, CAI Xue-lin, et al. High Resolution Surface Wave Tomography in East Asia and West Pacific Marginal Seas [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(5): 646-664.
- [12] VAN DER LEE S. High-resolution Estimates of Lithospheric Thickness from Missouri to Massachusetts, USA [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(1): 15-23.
- [13] HUANG J L, ZHAO D P. Seismic Imaging of the Crust and Upper Mantle Under Beijing and Surrounding Regions [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2009, 173(3/4): 330-348.
- [14] XU Y G. Diachronous Lithospheric Thinning of the North China Craton and Formation of the Daxin'anlin-Taihangshan Gravity Lineament [J]. Lithos, 2007, 96 (1/2): 281-298.
- [15] 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征[J]. 自然科学进展, 2001, 11(9): 966-969.
HE Li-juan, HU Sheng-biao, WANG Ji-yang. The Thermal Structure of Lithosphere in Eastern China Continent [J]. Progress in Natural Science, 2001, 11 (9): 966-969.
- [16] PAVLENKOVA N I. Rheological Properties of the Upper Mantle of Northern Eurasia and Nature of Regional Boundaries According to the Data of Long-range Seismic Profiles [J]. Russian Geology and Geophysics, 2011, 52(9): 1016-1027.
- [17] 焦亚先, 邱楠生, 李文正, 等. 鄂尔多斯盆地中-新生代岩石圈厚度演化——来自地热学的证据[J]. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3051-3060.
JIAO Ya-xian, QIU Nan-sheng, LI Wen-zheng, et al. The Mesozoic-Cenozoic Evolution of Lithospheric Thickness in the Ordos Basin Constrained by Geothermal Evidence [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9): 3051-3060.