

岩石的热惯量研究*

崔承禹

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘要 本文阐述了热惯量的物理意义及其在地质遥感中的作用。在测得23种岩石热物理性质的有关参数——热传导率、热容量和密度的基础上,计算并列表给出了岩石的热惯量值和热扩散系数等基础数据。文中分析讨论了沉积岩、变质岩和岩浆岩岩石的热惯量变化由高到低的初步规律。取得了碳酸盐岩和砂岩类等沉积岩和沉积浅变质岩的热惯量差异的结果,指出了它们的易区分性;也指出了中-酸性、碱性岩浆岩之间的热惯量值差异较小,不易区分。

关键词 岩石热惯量,热惯量,热惯量制图,区分岩性

引言

在地质遥感研究中,热惯量的作用愈来愈受到遥感工作者的重视,在探测土壤湿度、圈定含水地带,识别岩性方面取得了很大的进展。美国利用热惯量制图任务卫星(HCMM)在4个地区进行热惯量制图试验,区分地面各种地质物质(1982);喷气推进实验室利用遥感器进行了视热惯量(ATI—Apparent Thermal Inertia)制图研究。视热惯量可由下式计算:

$$ATI = \frac{NC(1-A)}{\Delta T} \quad (1)$$

其中, A 为反照率, N 和 C 为常数, ΔT 是周日热周期的最大温差。利用白天的反照率数据和昼夜最大温差时所获取的热红外辐射温度图像,经像元对像元的配准后使辐射温度图像相减;再去除 $(1-A)$ 就得到视热惯量图像。以此来区分岩石类型,可快速识别大面积岩类。因此,对岩石本身的热惯量的研究是非常重要的基础研究,它可表征岩石本身的热物理性质,也是岩石热辐射研究必不可少的。美国在70年代中期发表过16种岩石和6种松散沉积砾石土壤等的热惯量测量结果。我国最早的测试是陈智康在1985年做硕士论文时进行的,当时测了8种岩石标本,重点是区分碳酸盐岩石^[1]。

1 热惯量的物理意义

物体对太阳辐射的吸收、反射和热辐射的能力,取决于物体内部组成对红外辐射能量

* 国家自然科学基金资助项目:“岩石矿物的红外辐射特性研究”课题。批准号:6 877 022。

中国科学院遥感应用研究所王志刚、金浩参加了本项研究工作。

收稿日期:1994年3月11日;收到修改稿日期:1994年3月21日。

的影响,集中表现在它的热学性质上。岩石中出现的热辐射差异的机理之一是物体的热学性质,这种热学性质可用物体的热惯量加以表述。因此,求出地面不同物体的热惯量值,是进行热红外图像判读的必不可少的物理参数。

热惯量(P)是物体阻止温度变化的热反应的一种量度^[2]。它是物体的体内特征,对于质地均匀的地物,热惯量的定义为:

$$P = \sqrt{K\rho C}, \quad (2)$$

其中热惯量 P 的单位是 $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{°C}^{-1}$ K 是热传导率 $\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{°C}$, ρ 是密度 (g/cm^3), C 是比热容 ($\text{cal}/\text{g} \cdot \text{°C}$)。或者表示为热惯量单位(TIU):

$$\begin{aligned} 1\text{TIU} &= 1\text{J}(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{°C})^{-1} \\ &= 2.389 \times 10^{-5} \text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot \text{°C}^{-1} \end{aligned}$$

由(2)式可看出,当岩石的密度、热传导率、热容量各不相同,其积的方根也就不同,因此,不同岩性的岩石的热惯量也就不同。又由 Watson 所作的在反射率相同而热惯量值不同的情况下,地表温度日变化数学模型可以看出,热惯量值大,则地物周日地表温度变化幅度小;热惯量小则周日地表温度变化幅度大。所以用岩石的热惯量可以区分岩性。这是红外遥感的热惯量制图研究区分岩性的依据。

2 岩石热惯量测定结果

由岩石的热传导率、热容量、密度等参数进行计算,可得到热扩散率和热惯量。

2.1 热扩散率

热扩散率决定物质内部温度变化的速率。它表示在太阳加热期间(白天),物质将热从表面传递到内部的能力;在夜间,热扩散率表示物质将储存的热传递到表面的能力。可以说热扩散率 κ 也是物质体内的热性质,它与物质的热传导率、热容量和密度的大小有关,其值由下式给出:

$$\kappa = \frac{K}{\rho C} \quad (3)$$

式中, K 为热传导率, C 为热容量, ρ 为密度。这3个量的测试值及由(3)式计算的结果见表1。热扩散率 κ 的单位为 cm^2/s 。

2.2 热惯量

将岩石的热传导率、密度和热容量测量结果用(2)式进行计算,其结果见表1(测试方法略)。

2.3 所测结果的可靠性评估

从表1列出的实验结果可以看出,热惯量值在0.046—0.096之间,最高值为白云岩。据 T.J. Majumdar 等(1990)报道,固体物质(例如岩石)的热惯量值较高,大约由0.05—0.10;土壤和粒状物质的热惯量值较低,大约0.01—0.05。文献[3]测土壤和岩石的热惯量时测量仪使用的定标源为白云岩,它具有高的热惯量值(文中未给出 P 值)。本次测量结果,白云岩的 P 值为0.096,23种岩石样品 P 值的测量结果同他们做的结果一致。

表 1 岩石的热性质参数
Table 1 Thermal properties of rocks

| 序号 | 岩石名称 | 热导率 K ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$) | 密度 ρ (g/cm^3) | 热容量 C ($\text{cal}/\text{g} \cdot ^\circ\text{C}$) | 热扩散系数 κ (cm^2/s) | 热惯量 P ($\text{cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1/2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) |
|-----|---------|---|---|---|--|--|
| 2 | 石英二长闪长岩 | 0.005 03 | 2.54 | 0.217 | 0.009 13 | 0.052 7 |
| 3 | 正长斑岩 | 0.004 47 | 2.52 | 0.194 | 0.009 14 | 0.046 7 |
| 4 | 闪长岩 | 0.005 04 | 2.66 | 0.199 | 0.009 52 | 0.051 7 |
| 5 | 水镁石大理岩 | 0.011 21 | 2.51 | 0.304 | 0.014 69 | 0.092 5 |
| 6-1 | 黑云母化闪长岩 | 0.005 07 | 2.79 | 0.217 | 0.008 37 | 0.055 4 |
| 7 | 石英闪长岩 | 0.004 17 | 2.38 | 0.227 | 0.007 72 | 0.047 5 |
| 8 | 白云岩 | 0.012 27 | 2.75 | 0.274 | 0.016 28 | 0.096 2 |
| 9 | 斜长角闪片岩 | 0.007 05 | 2.63 | 0.218 | 0.012 35 | 0.063 6 |
| 10 | 石英二长岩 | 0.005 75 | 2.54 | 0.242 | 0.009 35 | 0.059 5 |
| 11 | 斜长花岗岩 | 0.006 85 | 2.50 | 0.227 | 0.012 07 | 0.062 3 |
| 12 | 石英岩 | 0.014 20 | 2.57 | 0.232 | 0.023 82 | 0.092 0 |
| 13 | 鲕状灰岩 | 0.009 31 | 2.68 | 0.244 | 0.014 24 | 0.078 0 |
| 14 | 硬绿泥石片岩 | 0.008 30 | 2.74 | 0.232 | 0.013 06 | 0.072 6 |
| 15 | 细粒花岗闪长岩 | 0.005 13 | 2.69 | 0.255 | 0.007 48 | 0.059 3 |
| 16 | 粗粒花岗闪长岩 | 0.004 69 | 2.72 | 0.267 | 0.008 33 | 0.051 4 |
| 17 | 石英二长闪长岩 | 0.004 44 | 2.54 | 0.216 | 0.008 09 | 0.049 4 |
| 18 | 石灰岩 | 0.009 13 | 2.68 | 0.239 | 0.014 25 | 0.076 5 |
| 19 | 粉砂质页岩 | 0.007 41 | 2.68 | 0.250 | 0.011 06 | 0.070 5 |
| 20 | 泥质条带灰岩 | 0.006 94 | 2.68 | 0.222 | 0.011 66 | 0.064 3 |
| 21 | 玄武岩 | 0.008 03 | 2.78 | 0.229 | 0.012 61 | 0.071 5 |
| 22 | 石英砂岩 | 0.014 30 | 2.58 | 0.225 | 0.024 63 | 0.091 1 |
| 23 | 白岗岩 | 0.006 10 | 2.49 | 0.251 | 0.009 76 | 0.061 7 |
| 24 | 安山岩 | 0.006 26 | 2.76 | 0.223 | 0.010 17 | 0.062 1 |

同文献[4]中所列表比较,其中白云岩 P 值为 0.075,在所测岩石的 P 值中,也属高值,且所列的 16 种岩石的 P 值同本次所测的 23 种岩石的 P 值有对应关系。从这些材料比较来看,本次所测的结果是可靠的。

3 结果讨论

3.1 三大岩类的热惯量

从表 1 不难看出, P 值最高为白云岩,其次为水镁石大理岩、石英岩、石英砂岩;最低为正长斑岩,次最低为石英闪长岩。我们将表 1 各种岩石的热惯量按其值由大到小顺序排列得表 2。该表一目了然,沉积岩系热惯量值高,有 1—7 号和 9, 10 号;太古界变质岩 P 值序号为 11,居中,中酸至碱性岩浆岩 P 值序号为 12 和 14—23, P 值偏低; 8 号和 13 号为喷发岩。总的来说,沉积岩岩石的热惯量高、变质岩 P 值居中,岩浆岩岩石 P 值偏低。岩石的热惯量是矿物岩石的红外辐射的重要内在性质,一般来说由于 P 值的大小不同,引起矿物岩石的红外辐射特性的不同。但这一结论并不都是正确的,将另文讨论。

3.2 碳酸盐岩石的热惯量

由表 2 可看出,对于石灰岩、大理岩、白云岩等碳酸盐岩石的热惯量比较来说,样品 8 号白云岩 P 值最高、依次为 5 号水镁石大理岩、13 号鲕状灰岩、18 号石灰岩、20 号泥质条带灰岩。从这 5 种岩石的化学分析结果看,它们的 CaO , MgO 之和的含量,按以上岩石顺序排列为 37.69, 59.89, 55.90, 54.69, 33.93, 除 8 号外,其它 4 种碳酸盐岩石似乎热惯量同钙镁含量呈正相关。这 4 种岩石的密度相当 (5 号偏低),但热导率却按以上顺序有规律的降低,可以说 CaO 和 MgO 是引起碳酸盐岩石热导率变化的重要因素,而热导率的变化又导致热惯量的变化。至于 8 号岩石,其密度和热导率值在这几种岩石中是最大的,所以它的 P 值最高。这与物质的结构和成分有直接关系,8 号岩石的硅、铝、铁、钾的氧化物比 5 号高 8—20 倍。

另外,密度相同的 13, 18, 20 号碳酸盐岩石 ($\rho = 2.68$), 是因 SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O 的含量与 CaO , MgO 之和的含量正好呈相反关系,从而使它们的密度呈现一致。但这 3 种岩石的热导率和热容量都因 CaO , MgO 之和的含量减少而变小,致使三者的 P 值依次减低。

表 2 岩石热惯量顺序表

Table 2 The sequential values on the thermal inertia of the rocks

| P 值顺序号 | 热惯量值 | 样品编号 | 岩石名称 |
|----------|---------|------|---------|
| 1 | 0.096 2 | 8 | 白云岩 |
| 2 | 0.092 5 | 5 | 水镁石大理岩 |
| 3 | 0.092 0 | 12 | 石英岩 |
| 4 | 0.091 1 | 22 | 石英砂岩 |
| 5 | 0.078 0 | 13 | 鲕状灰岩 |
| 6 | 0.076 5 | 18 | 石灰岩 |
| 7 | 0.072 6 | 14 | 硬绿泥石片岩 |
| 8 | 0.071 5 | 21 | 玄武岩 |
| 9 | 0.070 5 | 19 | 紫红粉砂质页岩 |
| 10 | 0.064 3 | 20 | 泥质条带灰岩 |
| 11 | 0.063 6 | 9 | 斜长角闪片岩 |
| 12 | 0.062 3 | 11 | 斜长花岗岩 |
| 13 | 0.062 1 | 24 | 安山岩 |
| 14 | 0.061 7 | 23 | 白岗岩 |
| 15 | 0.059 5 | 10 | 石英二长岩 |
| 16 | 0.059 3 | 15 | 细粒花岗闪长岩 |
| 17 | 0.055 4 | 6-1 | 黑云母化闪长岩 |
| 18 | 0.052 7 | 2 | 石英二长闪长岩 |
| 19 | 0.051 7 | 4 | 闪长岩 |
| 20 | 0.051 4 | 16 | 粗粒花岗闪长岩 |
| 21 | 0.049 4 | 17 | 石英二长闪长岩 |
| 22 | 0.047 5 | 7 | 石英闪长岩 |
| 23 | 0.046 7 | 3 | 正长斑岩 |

3.3 变质岩的热惯量

表 2 中 P 值序号为 3 (震旦系石英岩), 4 (二叠系石英砂岩), 7 (石炭系硬绿泥石片岩) 和 11 (太古界变质岩系斜长角闪片岩) 的 4 种变质岩, 其 P 值大小已很明显。除 3 和 4

号 P 值相近难以区分外,它同后两种差别较大,易于区分。沉积岩层变质作用形成的浅变质岩的热惯量大于前寒武的变质岩系的热惯量,其原因由表 1 可看出,主要是热导率明显的高而引起的。这一结果对识别变质岩类及其它岩石是有利的。

3.4 岩浆岩的热惯量

由于北京地区超基性岩石严重风化,大块岩石样品无法取回,未能测量。对于基性岩,野外采样时认为是辉长岩,经化学分析和岩矿鉴定,确认是黑云母化闪长岩,从 P 值看,也在中性岩浆岩之列。这样,本次测量缺少基性和超基性岩石。而中性、中酸性、酸性和碱性岩中,经室内的化学分析和镜下鉴定,也同野外有些出入。现对最后定名的岩石做一讨论。

由表 2 可清楚地看出,中酸性和偏碱性岩石的热惯量值均较低,在 0.0623—0.047 之间,玄武岩和安山岩的 P 值分别为 0.072 和 0.062。并且,热惯量值有由中性—酸性—碱性逐渐减小的趋势。碳酸盐岩石和变质岩岩石的颗粒较大、粗糙,加之有斑晶,致使它们的热惯量值较前面讨论的值偏低。表 2 中的同一岩体的 P 值序号 16 (细粒花岗闪长岩)和 20 (粗粒花岗闪长岩)的热惯量值也清楚地说明了岩石结构的这一影响;另一方面,由岩石化学分析表也可看出,这些岩石中的导热性稍好者,金属元素含量低,也会使 P 值低。

3.5 SiO_2 含量对岩石热惯量的影响

从岩石化学分析结果看,将 SiO_2 含量进行多种大小顺序排列,未见有影响热惯量的规律。如 SiO_2 含量达 91% 的 22 号样品,其 P 值为 0.091 的石英砂岩,而 12 号样品 P 值为 0.092 的石英岩,其 SiO_2 仅为 44.36%。也就是说 SiO_2 的含量或其分子的伸缩振动

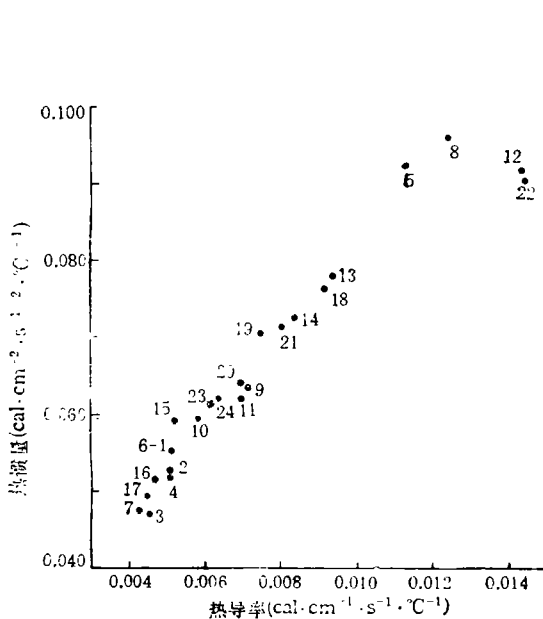


图 1 岩石热导率同热惯量关系图

Fig. 1 The changing relation between thermal conductivity and thermal inertia of rocks

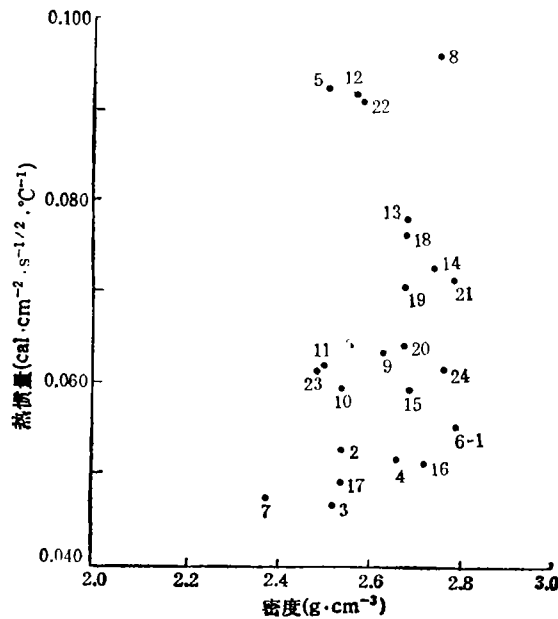


图 2 岩石密度同热惯量的关系图

Fig. 2 The changing relation between thermal density and thermal inertia of rocks

不是热惯量值的影响因素。

3.6 岩石热惯量同热物理性质有关参数的变化关系

由图 1 和表 1 及 2 可看出, 热导率最大的石英砂岩(22 号岩样) 其值为 $0.0143 \text{ cal/cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$, P 值序为第 4 位; 最小的石英闪长岩(7 号) 值为 0.00417 , P 值序接近最低, 最大值同最小值之比为 3.5, 变化幅度大。由图 1 还可看出, 热导率同热惯量呈线性关系, 梯度较大。并且热导率大的 4 个样品, 其热惯量值也是最大的。由此看来, 岩石热导率的变化对热惯量值的贡献最大。

由图 2 和表 1 可看出, 岩石密度最大的黑云母化闪长岩(6-1 号) 值为 2.79 g/cm^3 , 其热惯量值顺序居第 17 位, P 值偏低; 密度最小的 7 号值为 2.38 g/cm^3 , 最大最小之比为 1.17。而且图 2 中 P 值同密度变化关系的点分布离散, 规律不强。密度值偏低的水镁石大理岩(5 号) 的 P 值序为第 2 位。因此可以认为岩石密度的变化对岩石热惯量值大小的影响相对来说较小。

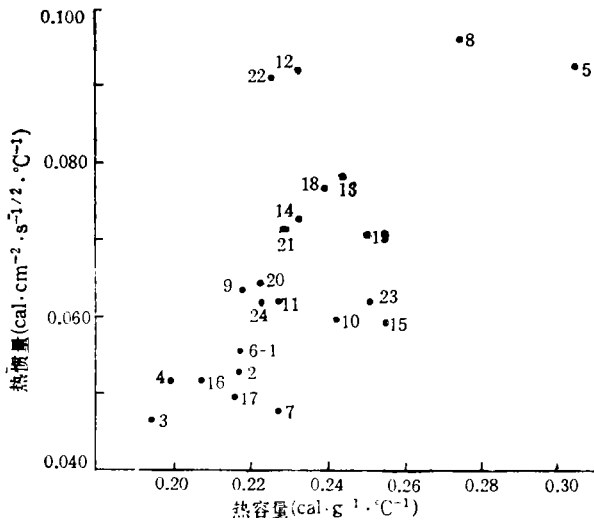


图 3 岩石热容量同热惯量的关系图

Fig. 3 The changing relation between thermal capacity and thermal inertia of rocks

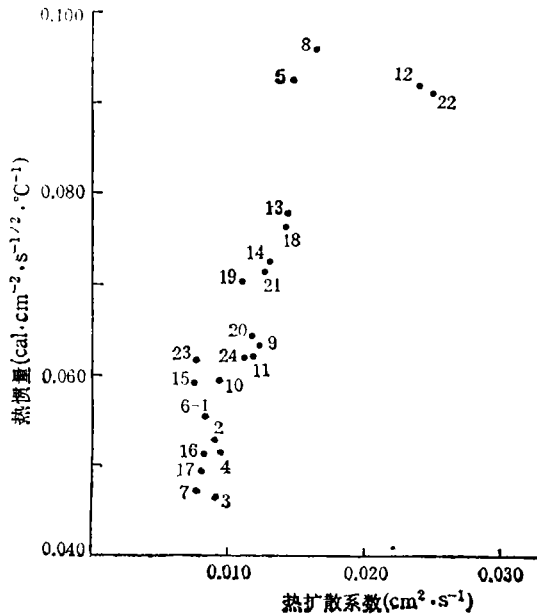


图 4 岩石热扩散系数同热惯量的关系图

Fig. 4 The changing relation between thermal diffusion coefficient and thermal inertia of rocks

图 3 中热容量值最高的 5 号样品,其值为 $0.304\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$,最小的 3 号样品(正长斑岩)的值为 0.194 ,它们的最大与最小之比为 1.57 。由图 3 也可看出,岩石热容量的变化对热惯量的贡献比岩石密度的贡献要大些,但远不如热导率的贡献。如 P 值高的 4 个样品中有 2 个样品(22 和 12 号)的热容量值居中等。

热扩散系数同热导率成正比,同密度和热容量乘积成反比,这样,图 4 中的线性规律明显,斜率更大。

综合图 1 至图 4 的分析结果可以认为,影响岩石热惯量的主要因素是热传导率,其次为热容量和密度。

4 结 论

综上所述,可以得出如下结论:(1)碳酸盐岩石的热惯量分析结果,为热红外遥感识别这类岩石提供了理论依据;(2)用岩石的热惯量可以区分三大岩类,为热红外遥感识别岩性提供了依据,但对中酸性岩浆岩之间的区分是困难的;(3)影响热惯量值的因素除热导率、密度、热容量外,岩矿的结构、化学组分是影响岩石热性质的很重要因素(对于层理的影响已作考虑);(4) SiO_2 含量不是热惯量的影响因素,它是吸收红外的主要因素。

参 考 文 献

- [1] 崔承禹,朱亮璞,陈智康. 航空红外扫描成像识别碳酸盐岩石的方法研究. 红外技术,1992,14(6): 11—18.
- [2] 张向前,马嵩乃,崔承禹. 热惯量成像研究. 遥感信息,1986,(2).
- [3] Stuart E. Marsh, John P. Schieldge, Anne B. Kahle. An Instrument for Measuring Thermal Inertia the Field Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1982, 48(4): 605-607.
- [4] Floyd F. Sabins. Remote Sensing Principles and Interpretation. 1978.

Study on Thermal Inertia of Rocks

Cui Chengyu

(Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences)

Abstract The paper describes the physical significance of thermal inertia and its role in geological remote sensing. Parameters related to thermal physical properties have been measured for 23 types of rocks, including thermal conductivity, density and thermal capacity. Based on this measurement, thermal inertia values and thermal diffusion coefficients of rocks are calculated and presented in the tables. The primary regularity that thermal inertia decreases from sedimentary, metamorphic to magmatic rocks is discussed. Thermal inertia differences between sedimentary rocks, such as carbonate rocks and sandstone, and sedimentary epimetamorphic rocks are obtained, and easy to be discriminated. Meanwhile, thermal inertia differences between mid-acidic and alkaline rocks are small and difficult to be distinguished.

Key words Thermal inertia, Thermal inertia of rocks, Thermal inertia mapping, Rock discrimination