

前 言

第二次世界大战后，特别是六十年代以来，火箭、激光、等离子体等技术广泛应用于各工业技术部门，促进了各工业技术部门的飞跃发展。矿业工程部门也不例外，自六十年代以来，也开始研究这些新技术在矿山工程中的应用。研究表明，火箭、激光、等离子体等新技术在矿山工程的应用方面有广阔的前景。特别是在岩石破碎和钻孔的应用方面，已经取得了显著成绩。岩石的热破坏已成为一个新的技术分支。在美国和苏联的许多矿山正付诸于实用。为了促进我国岩石热破坏技术的研究，本书将着重介绍目前岩石热破坏研究中所取得的一些成果。全书共分十一章，前十章主要介绍岩石的热特性，岩石热破坏的基本理论；火焰射流破岩的基本原理和方法；电磁波、激光、等离子体射流破岩的基本原理和方法。最末一章介绍高速水射流破岩机理。

本书编写过程中参考了日本东京大学资源开发系教授外尾善次郎所编“资源火焰ジェット工学”（日文）一书及国内外一些研究资料，此外，最末一章是由张庙康同志编写的。

本书是为矿山工程物理专业学生学习而编写的。可供地下采矿、地下采煤、露天开采、建井、火工及矿山机械等专业的研究生、大学生学习参考。也可供研究岩石热破坏的教师、科研人员、现场技术人员参考。

由于编者的水平有限，书中错误在所难免，欢迎批评指出。

编者 矿岩物理教研室

林睦曾

一九八一年四月

矿山工程物理方法

目 录

前 言

第一章 岩石的热特性	(1)
§ 1.1. 岩石加热时的强度变化	(1)
§ 1.2. 岩石的线膨胀系数	(5)
§ 1.3. 岩石的弹性模量	(6)
§ 1.4. 岩石的热传导率	(8)
§ 1.5. 岩石的比热	(12)
§ 1.6. 岩石在冰点下的物理特性变化	(16)
第二章 岩石热破坏的基础理论	(19)
§ 2.1. 热冲击应力	(19)
§ 2.2. 热冲击阻力(临界应力学说)	(19)
§ 2.3. 破坏概率学说	(22)
§ 2.4. 平均破坏应力学说	(28)
§ 2.5. 加热岩石表面时岩石内温度分布	(30)
§ 2.6. 由岩石面加热而产生的热应力	(33)
§ 2.7. 为了使岩石表面不被熔化的措施	(35)
§ 2.8. 停止加热后的热应力	(37)
§ 2.9. 根据火焰射流温度分布分析热应力	(38)
§ 2.10. 对岩石喷射火焰射流时,岩石内部的温度分布	(41)
§ 2.11. 热钻孔过程和有效温度、热传导系数的关系	(46)
第三章 超音速火焰射流的发生机构和构造	(52)
§ 3.1. 热力学基础公式	(52)
§ 3.2. 喷咀喷出的流体	(58)
§ 3.3. 燃烧机构	(62)
§ 3.4. 燃料和氧化剂	(66)
§ 3.5. 热钻机的构造	(67)
§ 3.6. 喷咀的构造	(72)
§ 3.7. 喷射器的构造	(75)
§ 3.8. 燃烧室体积的确定	(79)
§ 3.9. 冷却	(81)

第四章 火焰射流的特性.....	(83)
§ 4.1. 火焰射流参数的测定.....	(83)
§ 4.2. 静压测定.....	(84)
§ 4.3. 全压测定.....	(84)
§ 4.4. 马赫数的测定.....	(86)
§ 4.5. 速度的测定.....	(87)
§ 4.6. 温度的测定.....	(87)
§ 4.7. 燃烧室内压力的测定.....	(92)
§ 4.8. 火焰射流的有效温度和热传导系数.....	(93)
§ 4.9. 火焰射流对孔底的压力.....	(99)
第五章 岩石的热钻孔性.....	(102)
§ 5.1. 高温下, 岩石弹性模量的变化和钻孔性的关系.....	(102)
§ 5.2. 热钻孔性指数.....	(105)
§ 5.3. 热钻机的有效作用系数.....	(107)
§ 5.4. 影响热钻孔速度的各种因素.....	(111)
§ 5.5. 钻孔的扩孔.....	(123)
§ 5.6. 热钻孔时岩粉的大小.....	(131)
§ 5.7. 热钻孔时岩粉的排除.....	(136)
第六章 岩石的切割.....	(140)
§ 6.1. 岩石切割速度和火焰喷射角度的关系.....	(140)
§ 6.2. 冲击角 θ 和切割速度.....	(144)
§ 6.3. 供氧量和切割速度的关系.....	(145)
§ 6.4. 用热钻机切割花岗岩的实际效果.....	(145)
§ 6.5. 混凝土的切割.....	(146)
第七章 热钻孔的技术经济效果.....	(153)
§ 7.1. 对硅岩钻孔时的经济效果.....	(153)
§ 7.2. 热钻孔和钢绳冲击式钻机的经济比较.....	(154)
§ 7.3. 热钻孔和旋转式钻孔机钻孔的经济效果比较.....	(156)
第八章 电磁波破碎岩石的方法.....	(159)
§ 8.1. 电磁波破碎岩石的原理.....	(159)
§ 8.2. 电磁波发生装置.....	(160)
§ 8.3. 影响电磁波破岩的各因素.....	(161)
§ 8.4. 存在问题.....	(165)
第九章 激光钻孔和破岩.....	(166)
§ 9.1. 激光的产生.....	(166)
§ 9.2. 激光器.....	(171)

§ 9.3. 激光破岩和钻孔.....	(174)
§ 9.4. 激光破岩的经济效果.....	(180)
§ 9.5. 激光破岩存在的主要问题.....	(181)
第十章 等离子体射流钻孔和破岩.....	(182)
§10.1. 等离子体的特点.....	(182)
§10.2. 等离子体射流发生器.....	(183)
§10.3. 等离子炬破岩及钻孔.....	(185)
§10.4. 等离子炬破岩的适用条件和经济效益.....	(188)
第十一章 高速水射流破碎岩石的机理.....	(190)
§11.1. 引言.....	(190)
§11.2. 高速水射流.....	(190)
§11.3. 高速水射流破碎岩石机理的初步分析和它的研究方法.....	(193)
参考文献.....	(200)

第一章 岩石的热特性

采用热力破岩时，为了取得最好的热破坏效果，首先必须充分掌握岩石的热特性。

岩石在常温下的机械物理性质过去已作过一些研究，但对高温下岩石的各性质还研究得很少。

岩石在高温下的物理性质与常温下差别很大。它的热传导率、比热、线膨胀系数、泊桑比等随着加热温度的增加而变化。这些值的变化对岩石的热破坏影响极大，所以，以下就各种岩石加热时的机械物理性质的变化加以测定和研究。

§1.1 岩石加热时的强度变化

高温下的岩石强度可分为以下两种情况：

(1) 岩石高温强度——岩石加热状态的强度。

(2) 岩石冷却强度——岩石加热到某温度后，自然冷却到常温时的强度变化。

岩石在加热期间和冷却期间的强度可分为变化的和几乎不变化的。

以下所得的测定结果，是在如下实验条件下所取得的：

(a) 升温速度保持一定($50^{\circ}\text{C}/10\text{分}$)。

(b) 炉内试验温度从常温升高到 1000°C 时，其温升间隔是 200°C 。

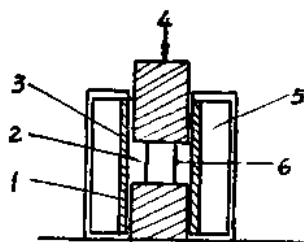
(c) 炉内温度如果达到所定的试验温度时，立即进行高温试验，或者进行自然冷却试验。

(d) 冷却试验，是自然冷却开始后经过 20 小时后进行试验的。

图 1.1 所示为试验装置模型图，把试料放入电炉中，在加热状态下给予加压。

图 1.2 表示各种岩石加热过程中，受压缩力作用时的强度变化。它用对加热前的压缩强度的比率来表示。图 1.3 是冷却期间的压缩强度的变化，它是以对加热前常温下所产生的变化来表示的。

图 1.4 表示冷却期间拉伸强度的比率变化。



1—托架 2—试件 3—加热皿
4—压力机 5—加热炉 6—热电偶

图1.1 岩石强度的热特性测定装置

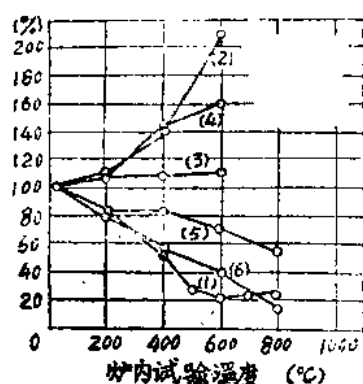


图1.2 加热强度试验中, 各种岩石的炉内试验温度(°C)和加热后的高温压缩强度对加热前的压缩强度的比率(%)的关系。

(注): 加热前的平均压缩强度是 (kg/cm^2): 花岗岩①1800 安山岩①770, 砂岩490, 凝灰岩500, 石灰岩760, 水泥砂浆590。

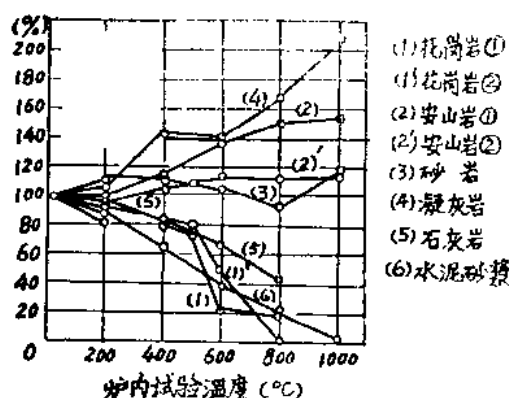


图1.3 加热强度试验中, 各种岩石的炉内试验温度(°C)和加热后的冷却期间的压缩强度对加热前的压缩强度的比率(%)的关系。

(注): 加热前的平均压缩强度 (kg/cm^2) 为: 花岗岩①1870, 花岗岩②2370, 安山岩①785, 安山岩②864, 砂岩418, 凝灰岩424, 石灰岩809, 水泥砂浆512。

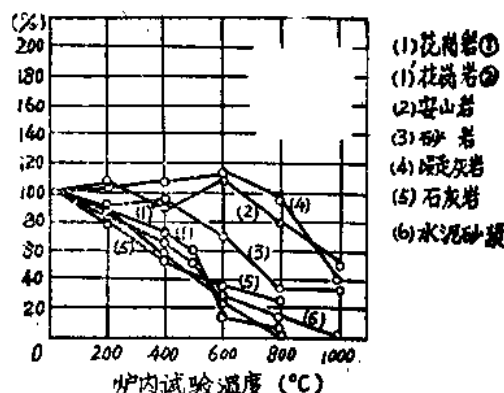


图1.4 加热强度试验中, 各种岩石的炉内试验温度(°C)和加热后的冷却期间拉伸强度对加热前的拉伸强度的比率(%)的关系。

注: 加热前平均拉伸强度 (kg/cm^2): 花岗岩①93.5, 花岗岩②113, 安山岩59.4, 砂岩49.1, 凝灰岩83.3, 石灰岩78.0, 水泥砂浆43.6。

对岩石的压缩强度而言,随着加热温度的升高,岩石大致可分为三种类型:一类是岩石强度急剧降低,如花岗岩;二类是岩石强度增加,如某些安山岩;三类是岩石强度几乎无变化,如砂岩等。

拉伸强度在 600°C 以下时,虽然有些岩石的强度比常温下的强度增加,但一般的岩石强度都要降低,特别是如果加热到 $800\sim 1000^{\circ}\text{C}$ 时,所有的岩石的强度都是下降的。以下对有代表性的岩石的热特性试作一些分析。

花岗岩

对冷却试验而言,试验温度在 500°C 以下时,压缩强度、拉伸强度、弹性模量都单纯地下降,而在 500°C 和 600°C 之间则急剧地减少。超过以上温度,虽然几乎无变化,但往往会产生自然破坏。对含石英较多的花岗岩而言(例如作为日本具有代表性的花岗岩——稻田花岗岩,含石英量达 $30\sim 40\%$),当这种石英超过过渡点温度 573°C 时,则由 β 石英转变为 α 石英,显示这时的体积膨胀。该时的状况如图 1.5 所示。在温度为 573°C 时变为 α 石英,体积膨胀率约增加 1% ;在 870°C 时,则变为 α 鱼鳞状石英,体积膨胀率增加 6% ;在 1470°C 时,则变为 α 方石英,体积膨胀率再增加 1% 。因此,温度在 573°C 以后,矿物组织缓慢地产生裂隙,强度急剧地下降。这从加热到 600°C 的花岗岩薄片的显微镜照相看得很清楚。

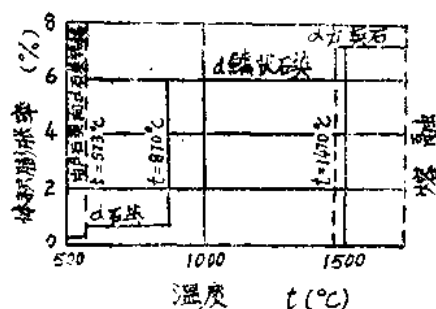


图1.5 随石英的过渡,体积膨胀率的变化

安山岩

安山岩的压缩强度随加热温度的增加而单纯地增加,加热到 600°C 时,其强度等于常温下强度的 200% ,而冷却期间的强度等于常温下的 150% 。冷却期间的强度在温度为 400°C 时虽然稍有降低。但在达到 600°C 前几乎无变化。温度为 800°C 时其强度为常温下的 80% ,温度为 1000°C 时强度为常温下的 50% 。

砂岩

所试验的砂岩,无论是加热期间还是冷却期间的强度虽然多少稍有增加,但变化都不太大。拉伸强度从 400°C 左右开始大体上是单纯地降低,到 800°C 时急剧地降低到常温下的约 36% 。砂岩由于产地不同,岩石的组成有变化,所以,其热特性也有很大的变化。

凝灰岩

压缩强度随温度上升连续增加,冷却期间,温度为 1000°C 时的强度等于常温下强度的 200% 。拉伸强度的增加较少,而到 1000°C 时,其强度约为常温下强度的 36% 。

安山岩、砂岩、凝灰岩的压缩强度同花岗岩不同,由于加热产生了与粘土烧结后相似的现象,它的强度随温度的上升而增加,象砂岩,凝灰岩那样的岩石的基岩部分如果被粘土化,这种现象特别显著。但是以玻璃质作为基岩的安山岩也会产生类似现象。烧结的第一阶段脱水——机械脱水在试验前的干燥过程中基本完成了。从 150°C 开始进行化学脱水,与此

平行，从 350℃ 进行氧化。这些结果实际上也能从这些岩石加热前后的重量测定和示差热分析结果得到确认。随着温度的上升，一边进行脱水，重量也随着减轻，从 200~400℃ 开始随着温度升高，逐渐地成为茶褐色。由于脱水粒子难于滑移，而且由于烧结粒子结合增强，这些大概是强度增加的原因之一。

还有，随着温度的升高由于组成岩石的颗粒膨胀和脱水，孔隙率增加，这些气孔重新排列和扩大，也是强度增加的原因。

对砂岩来说，温度为 800℃ 时强度降低，这大概是因为砂岩中含有较多的方解石作为斑晶的原因。加热烧结也可能成为拉伸强度增加的原因，但由于加热，气孔重新排列扩大，在拉伸试验时，也是强度减少的重要原因。

石灰岩

它的拉伸和压缩强度都单纯地减少。把加热到 800℃ 的石灰岩试件在大气中放置数日，会自然破坏。石灰岩中的主要成分 CaCO_3 ，当温度超过 800℃ 时，就要分解出 CO_2 ($\text{CaCO}_3 \xrightarrow{\text{加热}} \text{CaO} + \text{CO}_2$)，再把它放在空气中冷却则吸收水分而变为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$)。

水泥砂浆（凝固）

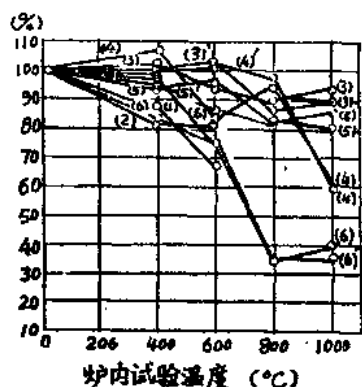
加热和冷却期间的压缩强度，弹性模量，冷却期间的拉伸强度在 1000℃ 以内都成直线地减少，若设 $T^\circ\text{C}$ 时的拉伸强度为 S_T ，20℃ 时的拉伸强度为 S_{20} ，弹性模量为 E_T ，那么大体上下列关系能成立。

$$S_T (\text{或 } E_T) = S_{20} (\text{或 } E_{20}) \times \left(1 - \frac{T}{1000} \right) \quad (1.1)$$

T 为加热温度，由于水泥砂浆是水泥的水合物，所以，加热后水合物放出化合水，氢氧化钙脱水，则强度逐渐减少。

急剧冷却效应

把加热了的岩石试块放入常温水或 100℃ 的沸水中使其急剧冷却，取出后再测定其自然冷却干燥后的强度，其结果如图 1.6 所示。可以看出，加热到 800℃~1000℃ 的岩石，任何



- (1) 花岗岩②在20℃水中急剧冷却的压缩强度
- (2) 花岗岩②在20℃水中急剧冷却的拉伸强度
- (3) 安山岩①在20℃水中急剧冷却的压缩强度
- (3') 安山岩①在100℃水中急剧冷却的拉伸强度
- (4) 安山岩①在20℃水中急剧冷却的拉伸强度
- (4') 安山岩①在100℃水中急剧冷却的拉伸强度
- (5) 砂岩在20℃水中急剧冷却的压缩强度
- (5') 砂岩在100℃水中急剧冷却的压缩强度
- (6) 砂岩在20℃水中急剧冷却的拉伸强度
- (6') 砂岩在100℃水中急剧冷却的拉伸强度

图1.6 缓慢加热急剧冷却试验中，炉内试验温度[℃]和急冷强度对缓慢冷却强度的比率(%)的关系。

情况下强度都有较大的降低。温度为 600°C 时, 花岗岩急冷时的压缩强度降低到 加热后缓慢冷却期间强度的 67% 左右, 砂岩在 800°C 时拉伸强度降低到 35% 左右。这种现象可以认为是加热和冷却同时作用于热破坏的效应。

§1.2 岩石的线膨胀系数

岩石由于加热膨胀, 因此线膨胀系数加上热冲击时, 将会给热应力产生以很大影响, 这从热应力的理论分析上是明确的。但是, 岩石的线膨胀系数随加热温度的变化不是一定的。

究竟随加热温度如何变化, 根据实验所得的结果说明如下:

图 1.7 所示为实验测定装置。在圆筒形的电炉中放入岩石试件, 用试件两侧的石英棒测

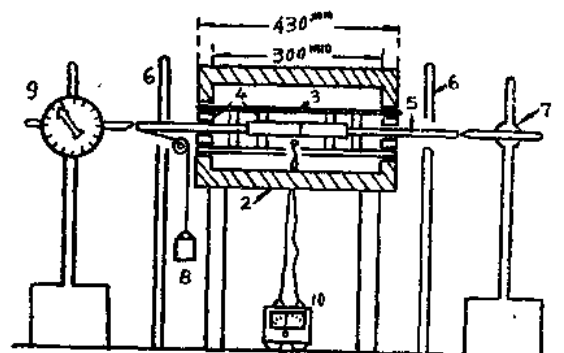


图 1.7 实验装置

1. 岩石试件 2. 坎瑟尔铁铬铝电阻丝
3. 素烧圆筒 4. 氧化铝圆盘 5. 石英棒
6. 密封热辐射用的石棉板 7. 固定侧磁铁基座
8. 产生复原力重锤 9. 测变形用千分表
10. 测定试件温度用 C、A 热电偶

定其伸长。这种情况下, 由于石英棒的一部分伸出炉外, 所以对石英棒的加热不均匀, 由此产生的误差需要进行修正。

图 1.8 所示为各种岩石热应变和温度之间的关系。可以看出, 像石灰岩那样的岩石的热应变几乎直线地增加, 而像陶石（伟晶岩的一种）那样的岩石热应变就不是直线地增加。

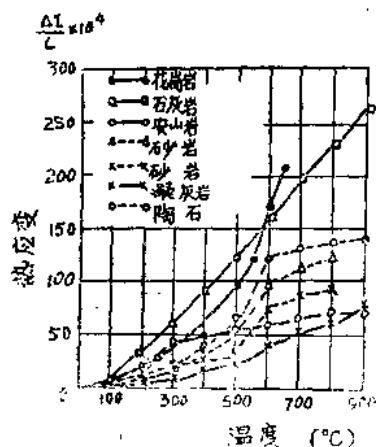


图 1.8 各种岩石的热应变和温度的关系

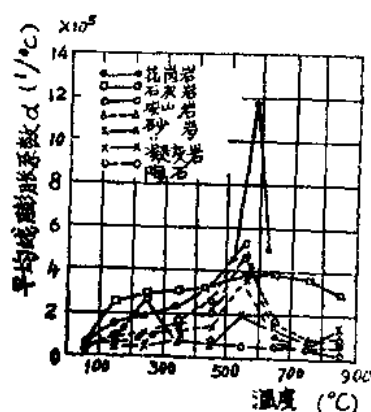


图 1.9 各种岩石的线膨胀系数的变化

图 1.9 所示为线膨胀系数和加热温度的关系。花岗岩在 573°C 时线膨胀系数有最大值。这像前面所述的强度变化点那样，是由于产生了从 β —石英过渡到 α —石英的原因。陶石、砂岩、凝灰岩等的最大线膨胀系数都在 550°C 附近，只有安山岩在 250°C 附近。因此，安山岩看不出有大的变化。关于线膨胀系数的测定结果，苏联的雅莫希琴科夫和多米托里耶夫，还有美国的马罗维里 (Marocelli) 等都发表过有关资料。

§1.3 岩石的弹性模量

弹性模量也和线膨胀系数一样，给热冲击情况下所产生的热应力以很大影响。图 1.10 是实测时的实验装置。对长条形的岩石试件的中心部分加热，强制振动试件一端，根据测定它的频率数，测定这种岩石的弹性模量；由于试件两端放在炉外，因此有必要进行修正。

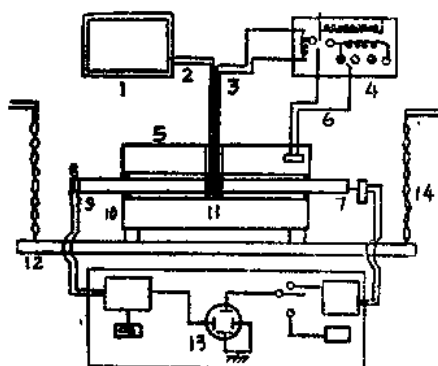


图 1.10 高温下岩石弹性模量的测定装置

- 1—记录仪 2—热电偶 3—热电偶
4—电炉电源 5—电炉 6—电源线
7—拾振仪 8—冷凝型驱动器 9—岩石试料杆 10—石棉 11—支持岩石用石棉丝 12—木板基座 13—共振频率测定装置 14—悬挂用链条

图 1.11 表示各种岩石的弹性模量随加热温度的变化情况。花岗岩和安山岩的弹性模量随加热温度的增加而急剧减少。相反，陶石，凝灰岩尽管增加温度，但弹性模量几乎不变化。Wingquist 也对多种岩石在高温下的弹性模量进行了实测。他把小试件放入圆筒状电炉内，

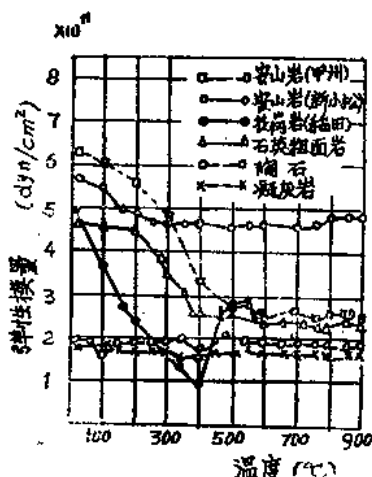


图 1.11 弹性模量的变化

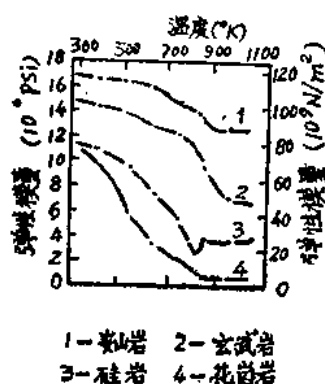


图 1.12 各种岩石的弹性模量随温度的变化情况

并把它用石棉线悬吊起来，然后采取强制振动的方法（图1.12）进行实验。

现就图1.10的实测方法作一简单说明。长度为 l 的试件，由于炉内部分的弹性模量和炉外部分不同。因此，认为有图1.13那样的温度急剧变化的接触面的模型。若设密度为 ρ ，时间为 t ，弹性模量为 E_1 、 E_2 ，位移为 ξ_1 、 ξ_2 、 ξ_3 则以下波动方程式能成立。



图 1.13

$$0 \leq x \leq l_1, \quad \frac{\partial^2 \xi_1}{\partial t^2} = \frac{E_1 \partial^2 \xi_1}{\rho \partial x^2} \quad (1.2)$$

$$l_1 \leq x \leq l - l_1, \quad \frac{\partial^2 \xi_2}{\partial t^2} = \frac{E_2 \partial^2 \xi_2}{\rho \partial x^2} \quad (1.3)$$

$$l - l_1 \leq x \leq l, \quad \frac{\partial^2 \xi_3}{\partial t^2} = \frac{E_1 \partial^2 \xi_3}{\rho \partial x^2} \quad (1.4)$$

在以下边界条件下解这些式子：

$$\left. \begin{array}{l} x=0 \quad \xi_1' = 0 \\ x=l \quad \xi_3' = 0 \end{array} \right\} \text{两端自由} \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{array}{l} x=l_1 \quad \xi_1 = \xi_2 \\ E_1 \xi_1' = E_2 \xi_2' \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} x=l-l_1 \quad \xi_2 = \xi_3 \\ E_2 \xi_2' = E_1 \xi_3' \end{array} \right\} \quad (1.7)$$

则可以得到下式：

$$\frac{2 \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \cdot \tan \sqrt{\lambda} l_1}{1 - \frac{E_1}{E_2} \tan^2 \sqrt{\lambda} l_1} = \tan \sqrt{\frac{E_1}{E_2}} \cdot \lambda (2l_1 - l) \quad (1.8)$$

式中

$$\left. \begin{array}{l} \sqrt{\lambda} = 2\pi f_2 \sqrt{\frac{\rho}{E_1}} \\ E_1 = 4l^2 f_1^2 \rho \end{array} \right\} \quad (1.9)$$

在上式中， f_2 ——高温下的共振频率
 E_2 ——高温下的弹性模量
 f_1 ——常温下的共振频率
 E_1 ——常温下的弹性模量

由于炉的端部有一定厚度，所以上述模型不能准确地建立。在炉子的端部的厚度的点上，由于温度斜率使温度上升，所以必须进行修正。

进行修正后，利用以上公式求得的弹性模量如图1.12所示。由图可以看出，像花岗岩、安山岩（甲州）那样的岩石，随加热温度的增加，弹性模量急剧减少，而像安山岩（新小松）那样的岩石在300℃左右以下是减少的，但超过这一温度以后几乎保持一定。陶石、凝灰岩那样的岩石，往往认为加热没有影响。花岗岩的弹性模量在400℃以下虽然急剧地减少，但达到过渡温度以后相反又增加。安山岩（甲州）在400℃以前急剧下降，但超过400℃以后几乎保持一定值。

§1.4 岩石的热传导率

米尔科别奇对高温加热时各种岩石的热传导率的变化做过详细测定。

采用研究金属材料热传导率的方法，

用相同的测定装置对各种岩石的热传导率进行测定，图1.15是实验装置的示意图。

这种方法称为比较法，测定原理极简单。在热源和受热体之间放置标准试件，再在它们之间放置想要测定的岩石样品。

当热传导到它里面时，如果向周围没有热损耗，则传导到下面标准试件的热量 q_1 （每单位时间）应该同传导到岩石样品的热量 q_2 以及传导到上面标准试件的热量 q_3 相等，即

$$q_1 = q_2 = q_3$$

(1.10)

热传导公式为：

$$q = \lambda A \frac{dt}{dx}$$

(1.11)

应用(1.10)式则成为 $\lambda_1 A_1 \left(\frac{dt}{dx} \right)_1 = \lambda_2 A_2 \left(\frac{dt}{dx} \right)_2 = \lambda_3 A_3 \left(\frac{dt}{dx} \right)_3$

式中 A 为这种试件的断面积， λ 为热传导率。如测定装置表明的那样，若设 $A_1 = A_2 = A_3$ ，又设 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t_3$ ，则

$$\lambda_1 \Delta t_1 = \lambda_2 \Delta t_2 = \lambda_3 \Delta t_3$$

(1.12)

对标准试件而言由于 λ 的值是知道的。所以，如果测定了 Δt ，则可以求出岩石的热传导率。在下段标准试件下面放置稳定器，这是由于热源的断面积同试件不同，所以把标准试件直接接触电源不好。

把测定结果表示于图1.15，图1.16，图1.17，所使用的岩石样品的成分如表1.1所示。

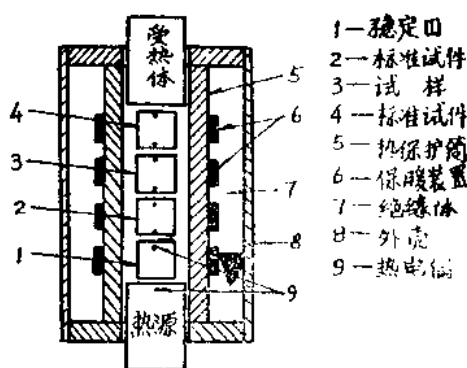


图1.14 热传导测定装置

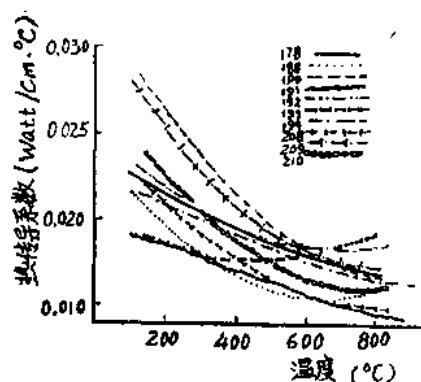


图1.15 火成岩的热传导率的变化(米尔科别奇资料, 数字是样品的编号)

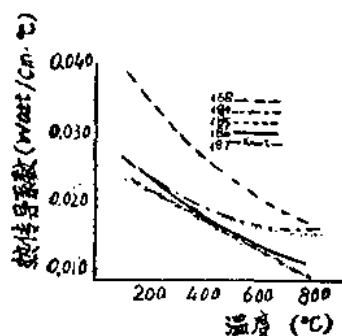


图1.16 碳酸盐类的岩石热传导率的变化(根据米尔科别奇资料)

由图可知, 不管什么岩石, 热传导率都随加热温度的增加较剧烈地下降。测定温度约为800~900°C。其中成直线关系减少的有硅岩(Nb: 207)、白云石灰岩(Nb: 187), 普通角闪石闪长岩(Nb: 191)等, 在600°C左右有最小值的有霞石闪长岩(Nb: 188), 斑岩(Nb: 178)等, 而斜长石(Nb: 193)在400°C左右出现最小值。

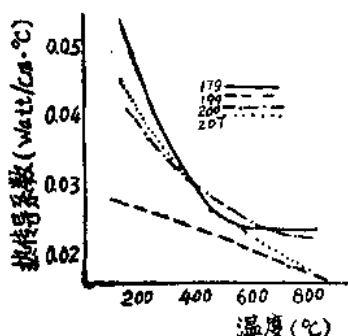


图1.17 各种硅质岩石的热传导率的变化(据米尔科别奇资料)

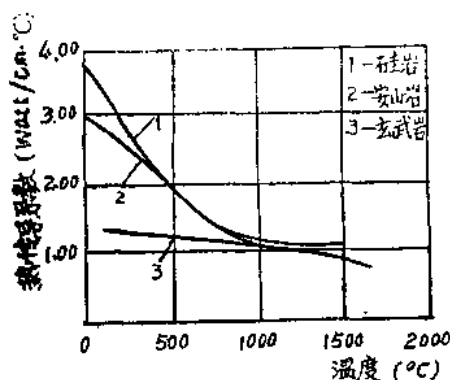


图1.18 岩石热传导率的变化(据 R. L. Marovelli 资料)

图1.18所示为 R. L. Marovelli 的测定结果, 表 1.2 所示为多米托里也夫等的测定结果。其测定装置如图1.19所示。这种测定装置能测定热传导率和温度传导率两个参数, 其测

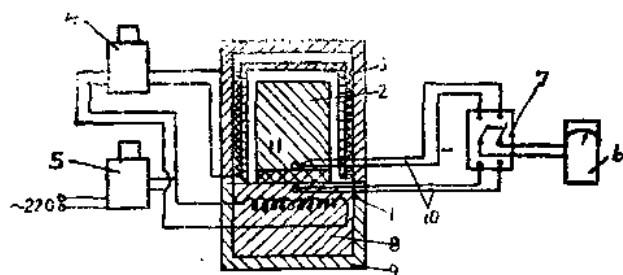


图1.19 多米托里也夫等在高温下对岩石的热传导率和温度传导率的测定装置

- 1—岩石试件 2—标准柱
- 3—热护罩 4, 5—装有马达的自动变换器
- 6— $k\pi-59$ 型电位差计 7—开关
- 8—加热装置 9—外壳 10—热电偶

定结果示于表 1.2 和图 1.20, 图 1.21。除此之外, 还有 D. C. Freeman 等人的温度传导率的测定结果 (图 1.22)

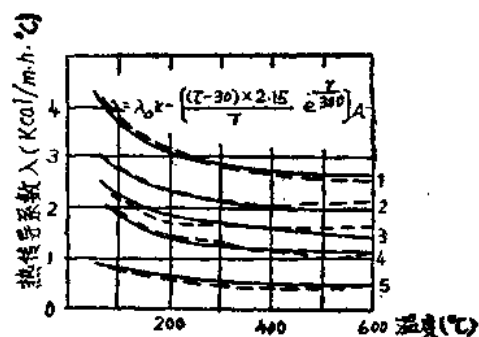


图 1.20 各种岩石的热传导率的温度变化

1—硅岩 2—硅质砂岩 3—花岗闪长岩 4—石灰岩 5—花岗岩
 λ^0 —50°C时的热传导率 T —温度(°C)
 K —表示岩层平行程度的系数, 岩石试件取平行层时 $K=1$ 取垂直层时 $K=0.75\sim 0.93$

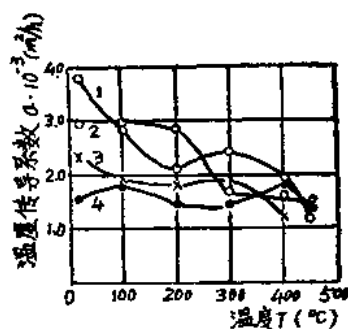


图 1.21 随温度的增加温度传导率的变化
 (根据多米托里也夫资料)

1—伟晶花岗岩 2—铁硅岩
 3—花岗岩 4—铁硅岩

图 1.20 中经验公式中的 A , 根据不同岩石取如下值

岩 石	A
硅 岩	1
大 理 石	1
含铁硅岩	0.65~0.80
石英质砂岩	0.7
花岗闪长岩	0.66
玢 岩	0.68
角闪石岩	0.58
石 灰 岩	0.38
磷灰石—霞石	0.25
花 岗 岩	0.20

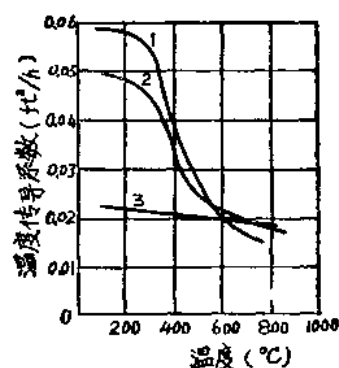


图 1.22 随温度的增加, 温度传导率的变化 (根据 Freeman 资料)

1—chelmsford 灰色花岗岩 2—Ortonville 花岗岩 3—暗色岩 (トラップ)

表 1.1

岩石试件的成分

标本 编号	岩 石	矿 物 成 分* (%)				
		石英	K—成分	Na—成分	Ca—成分	铁苦土成分等

图 1.15 的火成岩

178	辉长岩	-12(文象构造)	—	—	46(An50)	24Aug, 11Hbde, Biot, 7Mag
188	霞石闪长岩	—	23	52	—	2Mag, 23霞石
190	流纹岩	23	52	51	—	3Mag
191	普通角闪石闪长岩	—	73 (带状构造)	17	—	9Hbde, 2Biot, 3Mag
192	石英闪长岩	9	69 (带状构造)	8	—	7Hbde, 2Aug, 1Mag+赤铁矿
193	斜长岩	—	1	—	97(An50)	1Aug, 1Mag
194	花岗岩	34	31	31	—	3Biot
208	粗粒花岗玄武岩	21	4	—	51(An50)	12Hbde, 9Biot 3绿帘石+钛石
209	花岗岩	33	29	25	—	10Biot
210	石英二长岩	27	20	—	42(An50)	10Biot 1白云石

图 1.17 的岩石(各种石英质岩石)

179	石英岩	100	—	—	—	
199	普通角闪石—石英片麻岩	25	(含长石?)			70Hbde 5方解石
200	铁燧石	60	—	—	—	23Granite, 17Mag
207	硅岩	93	—	—	—	7白云母

图 1.16 的岩石(碳酸盐岩石)

		石 英	方解石	白云石	其 它
168	白云岩(再结晶)	—	—	98	2角闪石
184	石灰岩	1	94	4	2粘土、不纯物
185	石灰岩(再结晶)	1	88	10	1透辉石 1石墨
186	白云母	—	—	80	1硫化物、氧化物 19空隙
187	白云母石灰岩	—	72	27	1暗色不纯物

* Hbde = Homblende(普通角闪石) Biot = Biote(黑云母)
 Aug = Augite(辉石) Mag = Magnetite(磁铁矿)

表1.2 各种岩石的温度传导率和热传导率由于温度而引起的变化
(α —温度传导率, λ —热传导率)

岩石、矿物	矿物成分 (%)	系数	温 度 (°C)					
			20	100	200	300	400	450
铁 硅 岩	石英.....38.92	α	2.97	2.96	2.85	1.62	1.60	1.465
	矿物.....53.58							
	辉石.....3.05	λ	1.775	1.586	1.500	1.070	0.859	0.774
	角闪石.....2.05							
	黑云母、方解石等.....1.4							
伟晶体花岗岩	斜长石.....53.07	α	3.76	2.78	2.10	2.40	1.95	1.22
	微斜长岩.....28.43							
	石英.....10.55	λ	3.27	2.03	1.66	1.68	1.37	0.95
	绿泥石、绿帘石等.....余值							
KMA的米哈依洛夫矿床的铁硅岩	石英.....39.83	α	1.51	1.76	1.44	1.44	1.80	1.38
	矿物.....33.11	λ	1.10	1.08	1.00	0.875	0.89	0.88
	黑云母、角闪石等.....余值							
花 岗 岩	石英.....32.4	α	2.38	1.85	1.77	1.90	1.21	—
	斜长石.....26.7							
	微斜长石.....17.3	λ	1.24	1.77	1.085	1.21	0.93	—
	绿泥石等.....余值							

注: 单位是: λ —— $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}\right)$, $\alpha \cdot 10^{-3}$ —— $\left(\frac{\text{m}^2}{\text{h}}\right)$

§1.5 岩石的比热

关于岩石的比热随加热温度的变化的情况 lindroth 和多米托里也夫等人有一些测定结果。图1.23所示为 lindroth 等人所采用的测定装置。它是把岩石试件插入一个特制的铜质园筒内, 然后进行测定, 称为落锤式量热器的测定方法。把加热温度提高到1000°C, 测定各温度下的比热。其测定结果如图1.24、图1.25、图1.26所示。当 Tennessee 大理石的温度为100°C时, 比热为0.236 (cal/g, °C), 随着温度的升高直线地增加, 当达到900°C时, 比热为0.348 (cal/g, °C)。

多米托里也夫的测定结果如图1.27所示, 这个测定结果可以归结为以下公式:

$$C = c_0 + n10^{-1}(T - 50) \quad (Kcal/m^3 \cdot ^\circ C)$$

C 是某温度下的比热, c_0 是50°C时的比热, T 为温度(°C)。式中的系数根据不同的岩石种类, 取表1.3中的值。

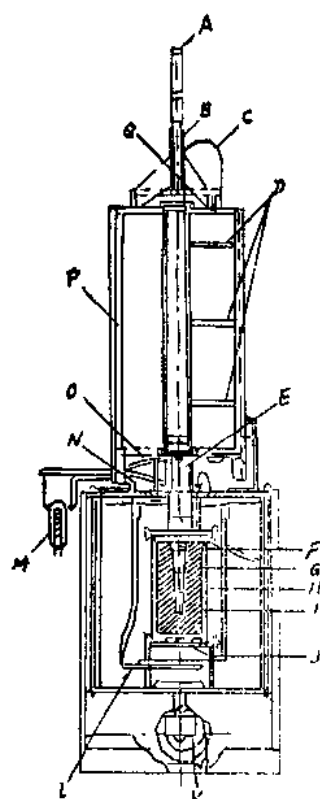


图1.23 落锤式量热器的构造 (根据 lindroth 等的资料)

- A: 试件下落机构
- B: 空气锤
- C: P_1-P_2 10% Rh 热电偶
- D: 炉式热电偶
- E: 等温范围
- F: 铜阀门
- G: 铜圆筒
- H: 真空套管
- I: 试件
- J: 支座
- K: 低频循环水泵
- L: 低频加热器
- M: 低频热交换器
- N: 低频温度调节器
- O: 辐射防护屏
- P: 炉
- Q: 活塞

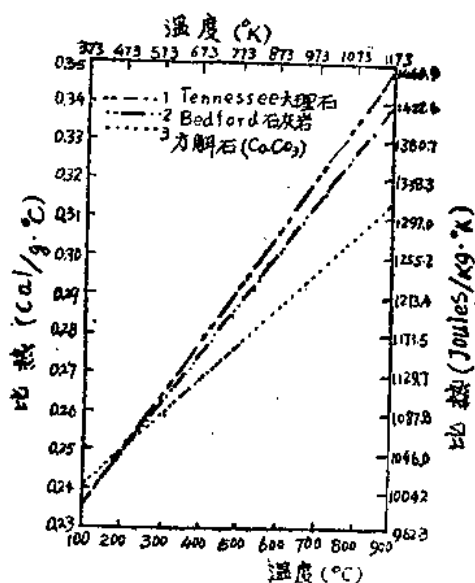


图1.24 Bedford 石灰岩, Tennessee 大理石, CaCO_3 的比热 (根据 lindroth 等的资料)

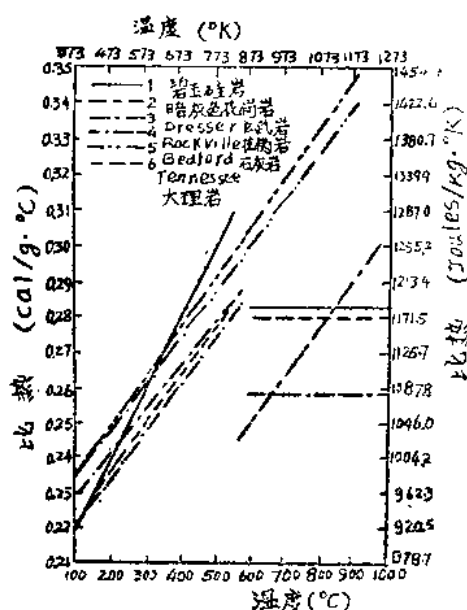


图1.25 6 种岩石的比热比较 (根据 lindroth 等资料)