

# 岩石时-温等效原理的理论实验研究\*

## ——第二部分：岩石时-温等效原理主曲线与移位因子

刘泉声<sup>1</sup> 许锡昌<sup>1</sup> 山口勉<sup>2</sup> 长秋雄<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071) (<sup>2</sup>日本通产省工业技术院资源环境技术综合研究所 筑波 日本)  
(<sup>3</sup>日本地质调查所 筑波 日本)

**摘要** 第一部分, 从非线性材料不可逆过程热力学的基本理论出发, 阐明了岩石的时-温等效原理在客观上是存在的。第二部分将从理论和实验两个方面具体研究岩石时-温等效原理中的主曲线、主曲线中的移位因子及其参数的确定方法。

**关键词** 岩石, 时-温等效原理, 不可逆过程热力学, 主曲线, 移位因子

**分类号** TU 452

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2002)03-0320-06

### 1 岩石在单轴抗压情形下的时-温等效特性研究

#### 1.1 时-温等效原理、主曲线

岩石的松弛模量(或蠕变柔量)既是时间  $t$  的函数, 又是温度  $\theta$  的函数, 既可以在恒定的时间下把模量(或柔量)作为温度的函数来测量, 又可以在恒定的温度下把模量作为时间的函数来测量。原则上讲, 可以测量在任何温度下完整的模量(或柔量)-时间变化曲线。这一条完整曲线称之为松弛模量(蠕变柔量)在该温度下的主曲线。

图1是前人对高聚物所作的张应力松弛试验结果<sup>[1]</sup>。由图中可见, 在温度  $\theta_2$  下, 在  $10\text{ s} \sim 1\text{ h}$  的时间间隔内, 松弛模量大约衰减了10倍。如果在不同的温度下进行试验, 就会得到不同的响应, 这都表示在图的左侧。如何才能得到材料在某一温度下任意长时间尺度下的响应呢? 也即, 如何能够得到材料在某一温度下松弛模量(或蠕变柔量)的主曲线呢? 显然, 用直接测量的办法是行不通的, 因为材料响应随时间的变化是如此之慢(图中的时间  $t$  是在对数坐标上作出的), 以至于这种方法过于消耗时

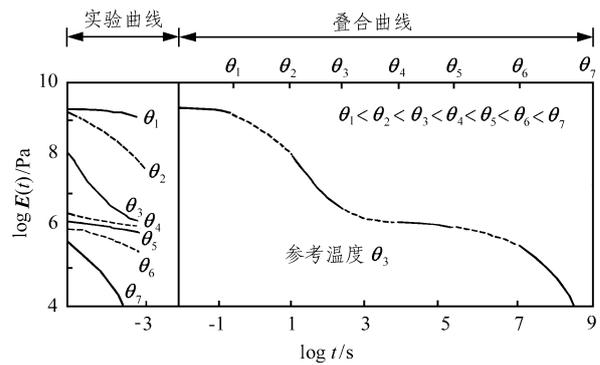


图1 聚合物张应力松弛试验结果

Fig.1 Test results of tensile stress relaxation for polymer

间。作者采取另一种方法: 升高温度, 在  $10 \sim 1\,000\text{ s}$  的时间间隔内, 分别在  $\theta_1, \theta_2$  下进行松弛试验。可以观测到向右边水平地移动曲线  $\theta_2$ , 将导致在  $\theta_1$  和  $\theta_2$  时测得的主曲线在模量值一致的地方准确地叠加, 而且在  $\theta_2$  下测得的曲线能延长到模量值低于在  $\theta_1$  下测得的数值。时-温等效原理指出, 这种延长和在温度  $\theta_1$  下长时间测得的模量值相等。因此, 把时-温等效原理应用到聚合物松弛试验测量时, 得到了一个在试验可达到的时间标度上测量完整的模量-时间变化曲线的方法。在数学上这一原理可以表示

2001年2月14日收到初稿, 2001年9月27日收到修改稿。

\* 国家自然科学基金资助项目(49772163)。

作者 刘泉声 简介: 男, 39岁, 博士, 1983年毕业于山东科技大学矿山建设系矿井建设专业, 现任研究员, 主要从事岩石地下工程稳定性及与核废料地下贮存有关的岩石力学方面的研究工作。

为

$$E(\theta_1, t) = E(\theta_2, t/a_\theta)$$

这里, 改变温度和对时间标度乘上一个因子, 即对时间标度的对数加上一个因子, 其效果是同样的。

对上述这种时-温等效原理的讨论还必须加上一个修正。作者已经通过水平地移动曲线补偿了改变温度引起的时间范围的变化。然而, 温度的变化也引起了模量的固有变化。因此, 还应考虑到由于温度的变化将有轻微的纵坐标方向的垂直移动。同样, 由于聚合物的体积是温度的函数, 而且按每单位横截面积确定的模量将明显地随单位体积中所包含的物质的量而变化, 所以还必须作进一步相应的修正, 以能说明单位体积的质量是作为温度的函数而变化的。这里, 密度显然是必须使用的参数, 基于以上考虑, 可写出

$$\frac{E(\theta_1, t)}{\rho(\theta_1)\theta_1} = \frac{E(\theta_2, t/a_\theta)}{\rho(\theta_2)\theta_2}$$

除以温度是校正松弛模量对温度的固有依赖性所引起模量的变化, 除以密度则是校正随温度的变化而引起的单位体积物质的变化。到此为止, 就得到了本文第一部分<sup>[2]</sup>式(23)中垂直修正因子  $A_f(\theta)$  的具体形式:  $\rho_0(\theta_0)\theta_0 / \rho(\theta)\theta$ , 而式(26)中  $B_f(\theta)$  的具体形式则为  $\theta\rho(\theta) / \theta_0\rho_0(\theta_0)$ 。作主曲线时一般应将图 1 左侧各温度下的曲线先在竖直方向修正, 然后沿时间坐标方向移位, 这样才能叠合成比较好的主曲线。

作主曲线时, 可以任意挑选一个温度作为参考温度。不妨选  $\theta_3$  为参考温度。若已知所有温度下的密度, 可把垂直修正因子应用于所有的聚合物的松弛曲线。对于  $\theta_3$  来说, 因子  $\rho_0(\theta_0)\theta_0 / \rho(\theta)\theta$  是 1, 不引起移动。然而, 在其他各种温度下, 修正因子一般来说不会是 1。现在假设对图 1 中左边的试验曲线已经作了修正, 把  $\theta_3$  温度下的曲线再现在图 1 的右侧。再将  $\theta_2$  温度下的曲线向左移动引起  $E(\theta_3, t)$  曲线向左的虚线延长, 将  $\theta_4$  温度下的曲线向右移动引起  $E(\theta_3, t)$  曲线向右的虚线延长。重复这个过程, 将  $\theta_i$  顺次向左向右移动(温度低于  $\theta_3$  的曲线向左移动, 高于  $\theta_3$  的曲线向右移动), 直到形成完整的  $\theta_3$  温度下的松弛曲线。这样形成的  $E(\theta_3, t)$  松弛曲线, 即为  $\theta_3$  温度下的主曲线。 $\theta_2$  下的松弛曲线左移时出现的  $a_\theta$  是温度的函数, 称为移位因子, 下标  $\theta$  表示移位因子都是相对于某一标准温度(即参考温度)而取的。在此例中, 所有比  $\theta_3$  高的温度下的曲线均向右移动, 而在  $\theta_1, \theta_2$  下的曲线则向左移

动。需要注意的是, 任何温度都可以被选作参考温度, 如果选择  $\theta_4$  为参考温度, 那么低于  $\theta_4$  的温度下的移位因子小于 1.0, 而高于  $\theta_4$  温度下的移位因子则大于 1.0。

### 1.2 移位因子方程的建立

现在考虑不同温度即参考温度  $\theta_g$  和任意温度  $\theta$  下的两根主曲线。由文[2]的方程(26)可知, 该方程能体现出蠕变柔量的时-温等效原理, 如下式:

$$J(\theta, t) = B_f(\theta) J(\theta_g, t_{ref}) \tag{26}$$

式中:  $B_f(\theta)$  为垂直修正因子,  $t_{ref}$  为参考温度  $\theta_g$  下的主曲线的参考时间, 且

$$t_{ref} = t/a_\theta \tag{27}$$

式中:  $a_\theta$  为在时-温等效中起着重要作用的时间移位因子, 它仅仅是  $\theta_g$  和  $\theta$  的函数。

为了便于实验研究, 不妨作如下的约束: 每一个蠕变柔量值  $J(\theta_g, t_{ref})$  在温度  $\theta$  下的主曲线都具有一个对应的相等蠕变柔量值  $J(\theta, t)$ , 即有以下形式:

$$J(\theta, t) = J(\theta_g, t_{ref}) \tag{28}$$

由于一般的岩石都比较坚硬, 由温度变化引起的密度变化比较小, 为讨论问题方便起见, 暂时不考虑由于温度变化引起的蠕变柔量的固有变化(这一问题留待以后讨论), 在这种情况下可以忽略式(26)中的垂直修正因子, 因而只有水平移位因子  $a_\theta$  起主导作用。

下面推定  $a_\theta$  的方程。由于花岗岩的粘度与温度有关, 则有下式成立(详见文[3]):

$$\eta(\theta) = \int_0^{+\infty} \frac{dt}{J(\theta, t)} \tag{29}$$

因为  $a_\theta$  不是时间  $t$  的函数, 因此从方程(27)中很容易得到

$$dt = a_\theta dt_{ref} \tag{30}$$

把式(28), (30)代入式(29)后可得

$$\eta(\theta) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{J(\theta, t)} dt = \int_0^{+\infty} \frac{1}{J(\theta_g, t_{ref})} dt = \int_0^{+\infty} \frac{a_\theta}{J(\theta_g, t_{ref})} dt_{ref} \tag{31}$$

式中积分的上下限都不变化, 然而, 在该积分下,  $a_\theta$  是温度的函数, 而不是时间  $t$  的函数, 所以它可以作为常数提到积分号外面, 比较式(29)可有以下形式:

$$\eta(\theta) = a_\theta \eta(\theta_g) \tag{32}$$

即

$$a_\theta = \frac{\eta(\theta)}{\eta(\theta_g)} \quad (33)$$

由此可以看出, 移位因子  $a_\theta$  的确定转换到了任意温度  $\theta$  下岩石的粘度与参考温度  $\theta_g$  下岩石的粘度之比上来。

半经验的 Doolittle 方程<sup>[3]</sup>也适用于岩石材料:

$$\ln \eta = \ln D_1 + D_2 [(V - V_f) / V_f] \quad (34)$$

该式用  $D_1$  和  $D_2$  两个常数给出了系统的粘度表达式。 $V$  代表岩石的总体积, 而  $V_f$  是岩石的自由体积, 自由体积是指岩石的总体积  $V$  去掉颗粒与颗粒之间非常微小的孔隙体积之后的密实部分的体积。该方程的解释表明, 粘度与岩石的流动性有关, 而流动性又与其自由体积密切相关。当自由体积增加时, 粘度下降。若令

$$h = V_f / V \quad (35)$$

式中:  $h$  为自由体积分数, 则式(35)可写成

$$\ln \eta = \ln D_1 + D_2 \left( \frac{1}{h} - 1 \right) \quad (36)$$

现在不妨设自由体积分数随温度  $\theta$  的变化有如下二次多项式形式:

$$h = h_g + \alpha_f (\theta - \theta_g) + \beta_f (\theta - \theta_g)^2 \quad (37)$$

式中:  $h$  为任意温度  $\theta$  下的自由体积分数,  $h_g$  为  $\theta_g$  时的自由体积分数; 而  $\alpha_f$ ,  $\beta_f$  分别为相对于参考温度  $\theta_g$  下发生温度变化时的自由体积分数的热膨胀系数。由此, 式(36)变为

$$\ln \eta(\theta) = \ln D_1 + D_2 \left[ \frac{1}{h_g + \alpha_f (\theta - \theta_g) + \beta_f (\theta - \theta_g)^2} - 1 \right] \quad (38)$$

当  $\theta = \theta_g$  时, 式(36)为

$$\ln \eta(\theta_g) = \ln D_1 + D_2 \left( \frac{1}{h_g} - 1 \right) \quad (39)$$

由式(38), (39)可得

$$\ln a_\theta = \ln \eta(\theta) / \eta(\theta_g) = \frac{D_2}{h_g} \frac{(\theta - \theta_g) + (\beta_f / \alpha_f)(\theta - \theta_g)^2}{(h_g / \alpha_f) + (\theta - \theta_g) + (\beta_f / \alpha_f)(\theta - \theta_g)^2} \quad (40)$$

即

$$\log a_\theta = \frac{\ln a_\theta}{2.303} = \frac{-D_2}{2.303 h_g} \cdot \frac{(\theta - \theta_g) + (\beta_f / \alpha_f)(\theta - \theta_g)^2}{(h_g / \alpha_f) + (\theta - \theta_g) + (\beta_f / \alpha_f)(\theta - \theta_g)^2} \quad (41)$$

不妨令

$$C_a = -\frac{D_2}{2.303 h_g} \quad (42a)$$

$$C_b = -\frac{D_2 \beta_f}{h_g \alpha_f} \quad (42b)$$

$$C_c = \frac{h_g}{\alpha_f} \quad (42c)$$

$$C_d = \frac{\beta_f}{\alpha_f} \quad (42d)$$

因此, 式(41)变为

$$\log a_\theta = \frac{C_a(\theta - \theta_g) + C_b(\theta - \theta_g)^2}{C_c + (\theta - \theta_g) + C_d(\theta - \theta_g)^2} \quad (43)$$

此式除了较 WLF 方程的分子和分母均多了一项外, 式中的各个系数的意义也与 WLF 方程不尽相同。此处的  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_d$  4 个系数与温度有关, 而 WLF 方程中的系数被认为是材料常数(一般认为是普适常数)。式(43)即为研究岩石材料时-温等效特性时间坐标方向的移位因子方程。

### 1.3 移位因子方程中参数的确定

为了确定移位因子方程(43)中的参数  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  和  $C_d$ , 在 20°C, 60°C, 80°C, 100°C, 150°C, 200°C, 300°C 7 种温度下, 对三峡花岗岩进行了单轴抗压蠕变试验。具体的试验方法、试验设备、试件取样、加工及筛选等详细情况已在作者的另一篇文章中作了说明<sup>[4]</sup>, 此处不再赘述。由这 7 种不同温度下的蠕变曲线, 可以得到三峡花岗岩在 20°C, 60°C, 80°C, 100°C, 150°C, 200°C, 300°C 7 种温度下 10~3 600 s 时间内的蠕变柔量的对数与时间的对数曲线, 如图 2 所示。图中实线为试验点的趋势线。下面由试验曲线来拟合移位因子方程(43)

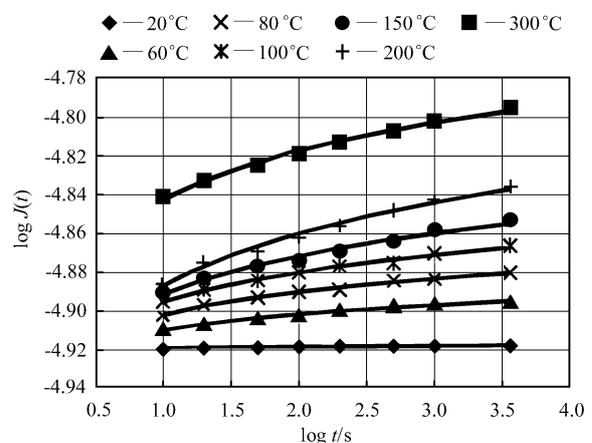


图 2 三峡花岗岩蠕变柔量对数与时间对数曲线

Fig.2 Double logarithmic curves of creep compliance and time for the Three Gorges granite

中的4个常数  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  和  $C_d$ 。由于参考温度  $\theta_g$  的选择不同, 这4个常数亦不同, 所以研究3种参考温度  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  时花岗岩单轴抗压蠕变柔量的时-温等效问题。

由于室温( $20^\circ\text{C}$ )下的蠕变曲线是在长时间下得到的, 所以, 可以得出  $20^\circ\text{C}$  时的蠕变柔量与时间的对数关系曲线, 即  $\log J(t)-\log t$  曲线(注意: 这是以10为底的对数)。该曲线即为参考温度  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$  下的主曲线, 然后将  $60^\circ\text{C}$ ,  $80^\circ\text{C}$ ,  $100^\circ\text{C}$ ,  $150^\circ\text{C}$  4种温度下的  $10\sim 3600\text{ s}$  的  $\log J(t)-\log t$  试验曲线, 沿着  $\log t$  轴向右平移, 在主曲线上分别找到与  $\log J(t)$  对应相等的试验点, 即可得到4个参考温度下的  $\log t_{\text{ref}}$ , 利用式(27)即可得到相应于4个参考温度下的  $a_\theta$ , 再利用方程(43), 解出  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_d$  4个参数, 具体数值见表1, 从而移位因子方程(43)即可确定。将显化的式(43)再应用于  $200^\circ\text{C}$ ,  $300^\circ\text{C}$  等温度下的  $10\sim 3600\text{ s}$  蠕变柔量与时间的对数曲线, 按计算得出的移位因子  $a_\theta$  水平方向沿时间轴右移, 发现确实可以叠合成参考温度下的主曲线, 见图3。该图也验证了三峡花岗岩的蠕变柔量符合时-温等效原理。根据此原理, 可以将岩石在高温下短时间内的蠕变特性外推到室温下长时间的蠕变特性。从中还可看到高于参考温度的短时间内的  $\log J(t)-\log t$  曲线沿着  $\log t$  轴向右移动, 可移动到主曲线上, 这时  $\log a_\theta$  取正值。

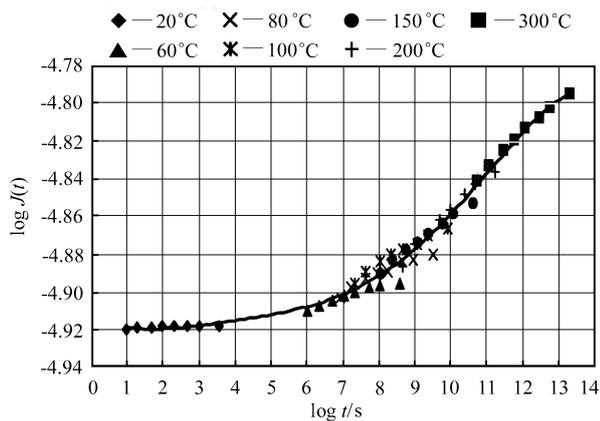


图3 参考温度  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$  下的主曲线  
Fig.3 Principal curve under  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$

用类似的方法可以得到三峡花岗岩在  $100^\circ\text{C}$  和  $150^\circ\text{C}$  两种参考温度移位因子方程中的4个参数  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_d$  及蠕变柔量主曲线  $\log J(t)-\log t$ , 将得到的显式(43)应用于  $300^\circ\text{C}$  情形下, 发现经平移以后, 也可叠合到主曲线上, 且吻合得较好(见图4

和图5)。局部吻合得不太好是因为没有先在时间坐标移位之前先作垂直移位修正, 如果作了这样的修正, 上述曲线会吻合得更好。由前面3种参考温度下确定出的移位因子方程中的4个参数  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$ ,  $C_d$  均列于表1中。

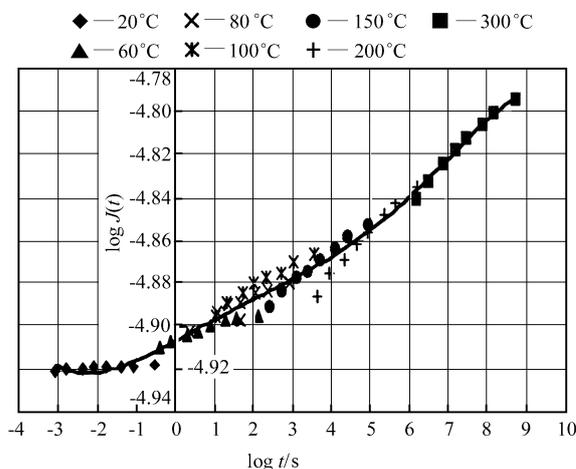


图4 参考温度  $\theta_g = 100^\circ\text{C}$  时的主曲线  
Fig.4 Principal curve under  $\theta_g = 100^\circ\text{C}$

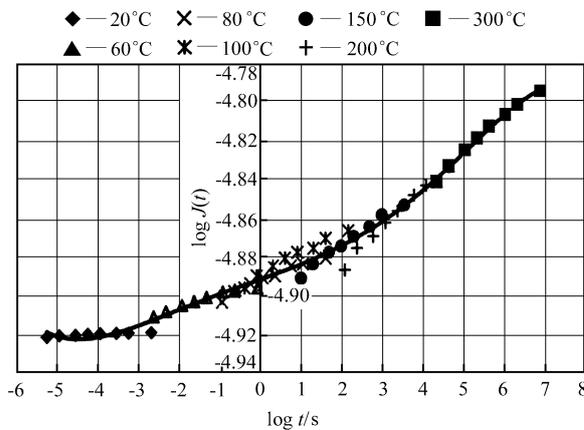


图5 参考温度  $\theta_g = 150^\circ\text{C}$  时的主曲线  
Fig.5 Principal curve under  $\theta_g = 150^\circ\text{C}$

表1 蠕变柔量在不同参考温度下的取值

Table 1 Values of creep compliance under different referential temperatures

参考温度 $\theta_g / ^\circ\text{C}$	$C_a$	$C_b$	$C_c$	$C_d$
20	7.516	-0.014 7	15.924	-0.002 5
100	4.448	0.017 6	144.878	-0.000 9
150	1.807	0.026 0	57.095	0.002 3

由表1可以看出, 对不同的参考温度  $\theta_g$ , 这4个参量值是不同的, 仅由这3种参考温度得到的这

4 个参量的数值还难以看出其变化规律, 今后仍须做大量的试验, 在不同的参考温度下, 拟合出相应的参数, 以确定移位规律。

## 2 粘聚力主曲线及其时-温等效特性研究

在 20°C, 60°C, 80°C, 100°C, 150°C, 200°C, 300°C 7 种温度下对三峡花岗岩进行了一系列的三轴压缩蠕变试验, 具体的试验方法、试验设备、试件取样、加工及筛选详见文[4]。

由此得到了一组关于粘聚力  $c$  值的试验曲线, 根据这组试验曲线可以得到在这 7 种温度下, 10~3 600 s 时间内  $c$  值与时间的对数曲线(以 10 为底), 见图 6。图中实线为试验点的趋势线。以下主要研究(在参数温度) $\theta_g = 20^\circ\text{C}$  时的时-温等效问题。

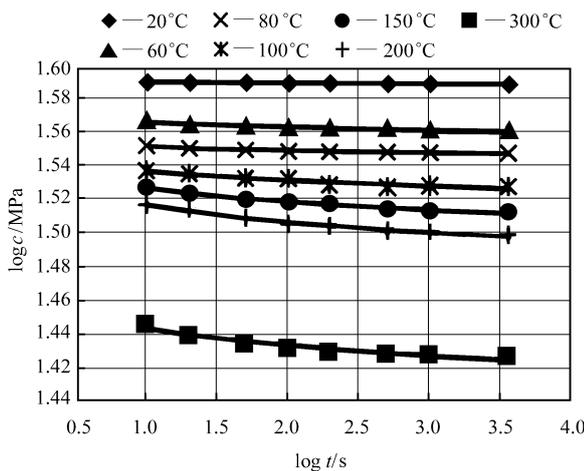


图 6  $c$  值与时间的对数曲线

Fig.6 Double logarithmic curves of  $c$  and time

由前面在长时间内 20°C 温度下  $c$  值随时间  $t$  的变化曲线, 可以得到  $\log c - \log t$  曲线, 该曲线即为 20°C 下  $c$  值的主曲线, 然后, 将 60°C, 80°C, 100°C, 150°C 4 种温度下 10~3 600 s 时间内的  $\log c - \log t$  曲线, 沿着  $\log t$  轴向右平移, 在主曲线上找到相对应的点, 再用式(26), (43), 即可得到移位因子中的参数  $C_a$ ,  $C_b$ ,  $C_c$  和  $C_d$ , 其具体数值见表 2。根据这种移位规律, 将 200°C, 300°C 下 10~3 600 s 时间内的  $\log c - \log t$  曲线右移, 亦可叠合成参考温度  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$  下的主曲线, 且吻合较好, 见图 7。

这表明, 三峡花岗岩的  $c$  值亦符合时-温等效原理。可将较短时间、较高温下的  $c$  值外推到较长时

表 2 参考温度为 20°C 时  $c$  值移位因子参数取值

Table 2 Values of displacement factor  $c$  under  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$

参考温度 $\theta_g / ^\circ\text{C}$	$C_a$	$C_b$	$C_c$	$C_d$
20	227.64	-0.613	101.31	-0.007 046

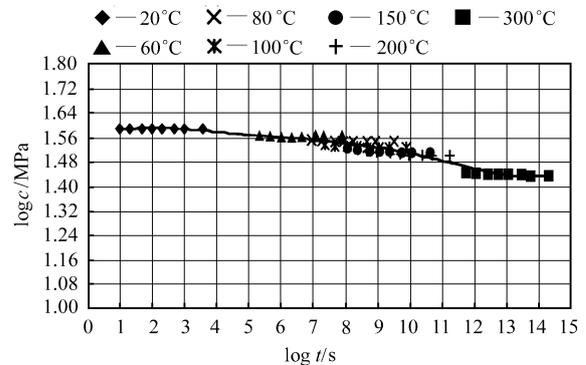


图 7  $c$  值在参考温度  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$  下的主曲线

Fig.7 Principal curve of  $c$  under  $\theta_g = 20^\circ\text{C}$

间、较低温度情况下。

岩石的蠕变柔量反映了岩石的变形特性, 岩石的粘聚力反映了其强度特性。在本文的第一部分作者从理论上系统地证明了岩石类材料时-温等效原理的客观存在。通过第二部分的实验验证, 不难看出: 不仅岩石的变形特性遵守时-温等效原理, 而且其强度特性也同样遵守时-温等效原理。通过移位因子方程式(43)的建立及其参数的确定, 相应地也找到了根据岩石材料在较高温、较短时间条件下的力学行为预测在较低温度、较长时间条件下其力学响应的方法。

## 参考文献

- 1 杨挺青. 粘弹性力学[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- 2 刘泉声, 王崇革. 岩石时-温等效原理的理论及实验研究——第一部分: 岩石时-温等效原理存在的热力学基础[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 193~198
- 3 阿克洛尼斯 J J, 麦克奈特 W J. 聚合物粘弹性引论[M]. 北京: 科学出版社, 1986
- 4 刘泉声, 许锡昌, 山口勉等. 三峡花岗岩与温度及时间相关的力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(5): 715~719

## THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY ON TIME-TEMPERATURE EQUIVALENT PRINCIPLE FOR ROCK

Liu Quansheng<sup>1</sup>, Xu Xichang<sup>1</sup>, Tsutomo Yamaguchi<sup>2</sup>, Akio Cho<sup>3</sup>

(<sup>1</sup> *Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071 China*)

(<sup>2</sup> *National Institute for Resource and Environment, AIST, MITI, Tsukuba, Japan*)

(<sup>3</sup> *Geological Survey Institute of Japan, Tsukuba, Japan*)

**Abstract** Based on the theory of irreversible process thermodynamics in part I of this paper, non-linear thermodynamic analysis is engaged in, and non-linear stress-strain-temperature equations are established. Thus, general expression for time-temperature equivalent principle is theoretically obtained. And furthermore in part II, the equation of displacement factor in time-temperature equivalent principle is derived. At last, the parameters in the equation are determined, and the main curves for creep compliance and cohesive of Three Gorges granite are obtained by a series of tests. As a result, it is proved that both deformation and strength performances obey the principle.

**Key words** rock, time-temperature equivalent principle, irreversible process thermodynamics, main curve, displacement factor

---

### ISRM 2003 Second Announcement and Call for Papers

ISRM 2003 Conference will be held in Gauteng, South Africa, 8~12 September 2003.

The proposed theme for the conference is: 'Technology Roadmap for Rock Mechanics'.

Papers are invited on rock mechanics topics which fall in any of the following fields:

- Behaviour of rock masses under very high stress to strength ratios
- Design and stability of very deep open pits and very high rock slopes
- Deformation behaviour of rocks and rock masses
- Modelling of fracture and failure of rocks and rock masses
- Dynamic effects
- Remote excavation, mechanical excavation including tunnel and raise boring
- In situ tests, large scale tests, field tests, back analysis
- Shallow and deep large span excavations, civil excavations, caverns etc.
- Rock mass classification revisited—success stories, weaknesses, applications, developments
- Probability and risk
- Petroleum rock engineering
- Environmental rock engineering
- Dams, foundations, rock as a construction material
- Fragmentation by blasting
- Tunnels
- Fundamental developments in rock engineering material
- Rock engineering education

Important dates:

Submission of Abstract—this is to be submitted to the respective National Groups 31 May 2002

Acceptance of Abstract 31 July 2002

Submission of Papers(to National group) 31 March 2003

Final Submission of Camera Ready Paper to SANIRE 1 July 2003

The detailed information could be found from website: [www.saimm.co.za](http://www.saimm.co.za).