

考虑温度效应时深埋洞室围岩变形特性

施 毅^{1 2} 朱珍德² 李志敬²

(1. 中国建设银行苏州分行造价咨询中心, 江苏 苏州 215011; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘要 选取锦屏二级水电站引水隧洞围岩大理岩作为试样, 进行不同温度条件下的单轴压缩试验, 分析温度作用对大理岩弹性模量、泊松比等力学参数的影响。根据岩石热传导理论, 在一定的简化假设条件下, 建立了深埋洞室围岩体稳态温度场模型, 得出温度应力和原岩应力耦合作用下深埋洞室围岩体应力场解析解, 并探讨了温度作用对深埋洞室围岩体稳定性的影响。

关键词 围岩变形特性 温度场 应力场 大理岩 锦屏二级水电站

中图分类号: TU454 文献标识码: A 文章编号: 1006-7647(2008)03-0033-04

Deformation characteristics of deep-buried caverns considering thermal effect // SHI Yi^{1 2}, ZHU Zhen-de², LI Zhi-jing²
(1. Construction Cost Consultancy Center, Suzhou Branch of China Construction Bank, Suzhou 215011, China; 2. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Taking the surrounding rock of deep-buried caverns at the Jinping Second Class Waterpower Station as an example, uniaxial compression tests are performed to study the influence of temperature on the Poisson ratio and elastic modulus under different temperatures. Based on a series of simplifying assumptions, a stable temperature field model for surrounding rock of deep-buried caverns is established with thermal conductance theory. The analytical solution of the stress field for surrounding rock of deep-buried caverns is obtained under coupled action of temperature stress and initial rock stress, then, the influence of temperature on the stability of surrounding rock of deep-buried caverns is discussed. The formulas proposed in this paper can be used to evaluate the stability of surrounding rock of deep-buried caverns at the Jinping Second Class Waterpower Station under high temperature.

Key words: deformation characteristics of surrounding rock; temperature field; stress field; marble; Jinping Second Class Waterpower Station

高放射性核废料的地层深埋处置、地热资源开发、煤层瓦斯的安全抽放和综合利用、岩石地下洞室受火灾作用后的修复与重建以及大都市圈的大深度地下空间开发利用等工程中的岩体均可能受到高温影响, 高温将引发岩体膨胀, 并会引起围岩介质应力场变化, 为确保地下岩土工程的稳定和安全, 必须进一步完善和发展岩石力学的理论和分析方法^[1-2]。温度作用下岩石的弹性及黏弹性本构模型^[3]、岩石断裂韧度的高温效应^[4]、高温条件下岩石力学性质的温度效应^[5]、岩石的热-力耦合流变特性^[6]等方面已经有了一些研究成果。但是, 无论从试验研究还是从理论研究来说, 所做的工作还不够全面, 尤其是不同岩类在温度作用下的应力~应变过程、深埋洞室围岩体在温度作用下的温度场分布, 以及结合两者因素后洞室围岩体应力场的改变情况, 均有待于进一步系统化的试验研究。

锦屏二级水电站位于四川凉山雅砻江干流之上, 属一等工程, 工程规模为大型, 隧洞须按一级建筑物设计。电站利用雅砻江 150 km 大河弯的巨大天然落差裁弯取直, 开挖隧洞引水发电。一般埋深 1.5~2 km, 最大埋深 2.5 km, 属洞线长、开挖温度高、埋深极大的大型引水隧洞, 在机械开挖过程中不可避免地会出现局部高温。本文通过对取自锦屏二级水电站地下隧洞大理岩的单轴压缩试验, 分析大理岩在不同温度作用下的力学特性, 结合深埋洞室围岩温度场的分布特性, 探讨温度作用对围岩稳定性及其变形特性的影响。

1 不同温度下大理岩应力~应变过程试验研究

大理岩试样取自锦屏二级水电站地下隧洞围岩, 为三叠系第二层(T_{2b}), 岩石为致密块状结构, 均

匀性好,矿物成分主要为方解石和少量镁橄榄石和磁铁矿,呈白色夹杂少量褐色杂质。试样按照国际岩石力学学会的建议方法和岩石力学试样规范,加工成直径为 50 mm、长为 100 mm 的圆柱体。

试验在 MTS 815.03 电液伺服岩石试验系统上进行,该系统是目前国内配置最高、性能最好的岩石力学试验装备。岩石加温采用 SX2-4-10 箱式电阻炉,具体加温方法及过程如图 1 所示。

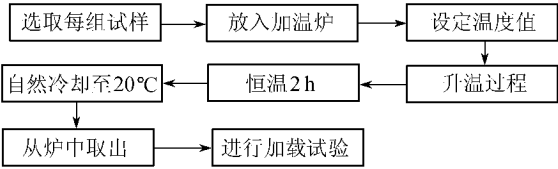


图 1 加温过程示意图

试验分 3 类,分别由轴向荷载、轴向应变和环向应变控制。试验得到了常温(20℃)和 100~600℃各温度条件下大理岩单轴压缩全应力~应变曲线(图 2),温度对大理岩力学性质的影响见表 1。

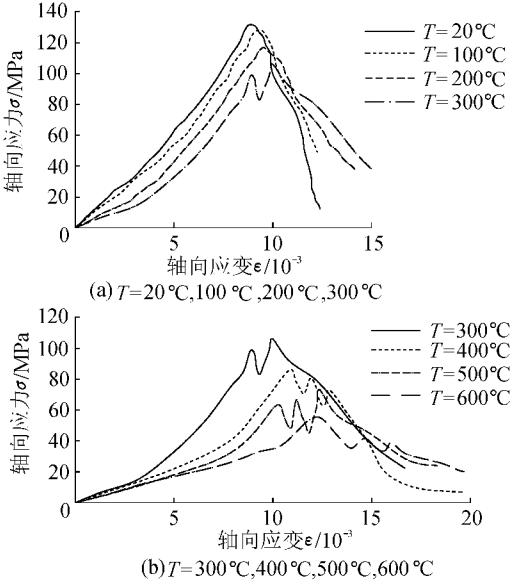


图 2 不同温度条件下大理岩单轴压缩应力~应变曲线

表 1 单轴状态下温度对大理岩力学性质的影响

$T/^\circ\text{C}$	峰值应力/ MPa	E/GPa	峰值应变/ 10^{-3}	μ
20	131	16.788	8.7	0.238
100	128	16.248	9.0	0.227
200	117	15.435	9.1	0.207
300	112	14.341	9.4	0.196
400	85	10.448	11.8	0.160
500	75	9.874	12.4	0.145
600	57	9.180	12.3	0.138

由图 2 可以看出 ①随着温度的升高,轴向应变呈现出增大的趋势,大理岩脆性减弱而延性增强;②峰值强度随温度的升高而降低,尤其在温度超过 400℃后峰值强度明显减小。将表 1 中参数进行线

性回归,可得大理岩 E, μ 与 T 的线性关系如下:

$$E = -0.0123T + 17.452 \quad (1)$$

$$\mu = -0.0002T + 0.2451 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知,深埋洞室周围围岩体的力学特性与岩体内部的温度有重要的联系,而要研究温度对围岩体的影响,必须首先研究温度作用下岩体温度场的分布情况。

2 深埋洞室围岩温度场分析

对于洞室围岩的热交换问题,可作出以下基本假设^[7]:①围岩为各向同性均质导热体,各个方向上的导热系数均相同;②温度只沿垂直岩石壁面方向变化,而洞室长度方向无温度差;③在整个洞室的岩壁上换热条件均相同,在其周长上热交换条件也相同;④洞室内温度场的分布是稳态的,洞室为无限长半径为 a 的圆形水平洞室,受洞室内温度影响的围岩体的半径为 R ,且 R 足够大, R 外岩体处于原岩应力状态;⑤在所分析的洞室内,温度恒定为 T_a ;⑥在分析开始时,岩石温度是均一的,且等于该处岩石的原岩温度 T_R 。这样,洞室围岩体温度场分布的求解问题就成为内半径为 a 、外半径为 R 的厚壁圆桶的导热问题,如图 3 所示。

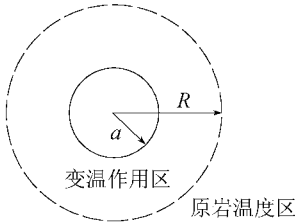


图 3 深埋洞室围岩体变温作用区
轴对称稳定热传导的微分方程为^[8]

$$\frac{d^2 T(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT(r)}{dr} = 0 \quad (3)$$

其边界条件为

$$T(r) = \begin{cases} T_a & r = a \\ T_R & r = R \end{cases} \quad (4)$$

根据方程(3)和边界条件(4),解得

$$T(r) = T_a + (T_R - T_a) \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (5)$$

3 温度作用下深埋洞室围岩体应力场分析

洞室岩体与其他物质一样,具有遇热膨胀的特性,岩体温度在由 T_R 升高到 T_a 的变温过程中,其应变为^[8]

$$\varepsilon_{FT} = \alpha \Delta T \quad (6)$$

式中: ε_{FT} 为由受热所引起的热应变; α 为岩石的线膨胀系数。

根据假设条件, 在各向同性岩体中, 热应变 ε_{FT} 在各个方向都相等, 不伴随任何切应变^[9]。

由式(5)式(6)可知:

$$\varepsilon_{FT} = \alpha \Delta T = \alpha (T_R - T_a) \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (7)$$

按照洞室周围的温度场分布形式, 将受温度影响的洞室围岩体视为空间轴对称体, 以 z 轴为对称轴, 可列出基本方程如下:

几何方程

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du(r)}{dr} = u'(r) \\ \varepsilon_\theta = \frac{u(r)}{r} \end{cases} \quad (8)$$

平衡方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (9)$$

物理方程

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E(r, T)} [\sigma_r - \mu(r, T) (\sigma_\theta + \sigma_z)] + \varepsilon_{FT} \\ \varepsilon_\theta = \frac{1}{E(r, T)} [\sigma_\theta - \mu(r, T) (\sigma_r + \sigma_z)] + \varepsilon_{FT} \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E(r, T)} [\sigma_z - \mu(r, T) (\sigma_r + \sigma_\theta)] + \varepsilon_{FT} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u(r)$ 为温度应力作用下的洞室围岩体径向的位移; $\varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_z$ 分别为洞室围岩体沿径向、切向和轴向的应变; $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ 分别为洞室围岩体沿径向、切向和轴向的应力; $E(r, T)$ 为弹性模量; $\mu(r, T)$ 为泊松比。

此处可按平面应变问题求解, 故 $\varepsilon_z = 0$ 。利用 $\varepsilon_z = 0$, 由式(10)可解出应力分量表达式, 并将几何方程式(8)代入, 得到

$$\begin{cases} \sigma_r = \lambda \left(\frac{du(r)}{dr} + \frac{u(r)}{r} \right) + 2G \frac{du(r)}{dr} - \frac{E(r, T) \varepsilon_{FT}}{1 - 2\mu(r, T)} \\ \sigma_\theta = \lambda \left(\frac{du(r)}{dr} + \frac{u(r)}{r} \right) + 2G \frac{u(r)}{r} - \frac{E(r, T) \varepsilon_{FT}}{1 - 2\mu(r, T)} \end{cases} \quad (11)$$

其中
$$\lambda = \frac{E(r, T) \mu(r, T)}{[1 + \mu(r, T)] [1 - 2\mu(r, T)]}$$

$$G = \frac{E(r, T)}{2[1 + \mu(r, T)]}$$

室内试验测得的结果是 E, μ 与 T 的关系, 可由温度场分布将其进一步转化为 E, μ 与 r 的关系, 由于 $E(r, T), \mu(r, T)$ 均与 r 呈非线性关系, 故推导极为繁杂。由式(1)式(2)可发现当 ΔT 变化不大

时, E, μ 的变化都控制在比较小的范围内, 实际工程中可按下式进行简化取值:

$$E^* = E(r, T) = \frac{\int_a^R E(r, T) dr}{R - a} =$$

$$\frac{\int_a^R \left\{ -0.0123 \left[T_a + (T_R - T_a) \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} \right] + 17.452 \right\} dr}{R - a} \quad (12)$$

$$\mu^* = \mu(r, T) = \frac{\int_a^R \mu(r, T) dr}{R - a} =$$

$$\frac{\int_a^R \left\{ -0.0002 \left[T_a + (T_R - T_a) \frac{\ln\left(\frac{r}{a}\right)}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} \right] + 0.2451 \right\} dr}{R - a} \quad (13)$$

当洞室高度远小于洞室埋置深度 H 时, 沿洞室高度的应力变化可忽略不计^[10-11], 洞室围岩处于静水应力状态, 即距离洞室周边足够远处应力为原岩应力, 大小为 $\rho g H$, 根据假设条件认为

$$\sigma_r = \begin{cases} 0 & r = a \\ \rho g H & r = R \end{cases} \quad (14)$$

将式(11)代入平衡方程(9), 利用边界条件(14), 求解微分方程可得

$$\sigma_r = -\frac{E^* \mathcal{K}(r)}{r^2(1 - \mu^*)} + \frac{E^* M}{(1 + \mu^*) [1 - 2\mu^*]} + \frac{a^2 E^* M}{(1 + \mu^*) r^2} - \frac{E^* N}{(1 + \mu^*) r^2} \quad (15)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E^* \mathcal{K}(r)}{r^2(1 - \mu^*)} + \frac{E^* M}{(1 + \mu^*) [1 - 2\mu^*]} - \frac{a^2 E^* M}{(1 + \mu^*) r^2} + \frac{E^* N}{(1 + \mu^*) r^2} - \frac{E^* \alpha (T_R - T_a) \ln\left(\frac{r}{a}\right)}{(1 - \mu^*) \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (16)$$

$$\sigma_z = \frac{2E^* \mu^* M}{(1 + \mu^*) [1 - 2\mu^*]} - \frac{E}{1 - \mu^*} \varepsilon_{FT} \quad (17)$$

其中

$$M = [2\gamma H a^2 R^4 (1 - \mu^*) [1 + \mu^*] [1 - 2\mu^*] + 2E^* a^2 R^2 (1 - 2\mu^*) [1 + \mu^*] \mathcal{K}(R)] / [2a^2 (1 - \mu^*) E^* R^2 (R^2 - a^2)]$$

$$N = [2\gamma H a^2 R^4 (1 - \mu^*) [1 + \mu^*] + 2E^* a^2 R^2 (1 + \mu^*) \mathcal{K}(R)] / [E^* R^2 (R^2 - a^2)]$$

$$K(r) = \int_a^r \alpha (T_R - T_a) \frac{\ln\left(\frac{t}{a}\right)}{\ln\left(\frac{R}{a}\right)} dt$$

式(15)~(17)即为在稳定温度场作用下大理岩质深埋水平圆形洞室应力场分布解。

4 算例分析

某大理岩质深埋水平圆形洞室,大理岩密度 $\rho = 2.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$,内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,黏聚力 $c = 0.3 \text{ MPa}$,洞室埋深为 800 m ,洞室半径 $a = 1.5 \text{ m}$,允许塑性松动区厚度 1.5 m ,大理岩线胀系数取 $\alpha = 0.5 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,原岩温度 $T_R = 35 \text{ }^\circ\text{C}$,假定洞室内热源温度为 $95 \text{ }^\circ\text{C}$,洞室围岩壁面直接与热源相接触并发生热传导,故可认为岩壁面与热源温度相同,温度作用下的围岩半径 R 按 $9a$ 取值。

根据以上弹性理论推导的公式可以计算得出围岩应力,见表2。由表2可知,考虑温度效应时,在高温作用下的洞室围岩体围岩壁处应力差 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 比常温环境条件下不考虑温度效应时更大。实际工程中,洞室围岩壁周围会形成一定厚度的塑性松动圈(图4),塑性松动圈的形成主要是由于当围岩壁周围应力差 $\sigma_\theta - \sigma_r$ 达到某一极限值时,洞室围岩体处于塑性平衡状态,产生塑性变形。因此,在高温作用下塑性松动圈将会进一步扩大,加剧了洞室围岩的不稳定。

表2 弹性条件下围岩应力计算结果对比

介 质	E/GPa	μ	$(\sigma_\theta - \sigma_r)/\text{MPa}$
考虑温度效应的围岩	15.777	0.218	42.12
不考虑温度效应的围岩	16.788	0.238	40.00

注: $r = a_0$ 。

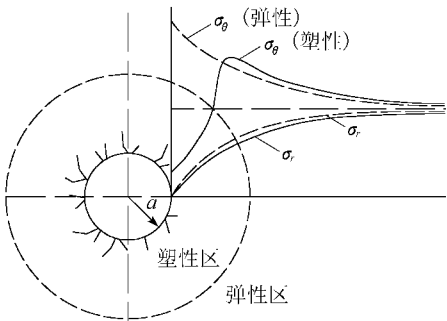


图4 围岩内的弹塑性应力分布

根据弹塑性理论,处于洞室围岩壁附近的岩体塑性破坏后,围岩应力降低,将承受的一部分应力转移给邻近的岩体,岩体向洞内产生塑性松胀,靠近洞壁处 σ_θ 减小, σ_θ 沿深度变化由图4中的虚线变为实线。

运用基于弹塑性理论的芬纳公式,结合表2中的计算结果,计算得出塑性圈厚度和围岩支护应力,

见表3。由表3可知高温作用下的洞室围岩体在考虑温度效应时,围岩的塑性圈半径增大,在同等塑性松动区厚度控制要求的情况下,支护所需承受的荷载增加,这对支护的设计提出了更高的要求。

表3 弹塑性条件下围岩计算结果对比

介 质	塑性圈厚度/m	围岩支护应力/MPa
考虑温度效应的围岩	3.19	0.99
不考虑温度效应的围岩	3.08	0.92

5 结 语

本文试验和理论分析结果显示:①深埋洞室中,温度应力和原岩应力的耦合作用不容忽视;②在耦合作用下,洞室塑性松动圈扩大,围岩破碎区增大,岩体失去自承能力,故应在洞室开挖后及时设置支护;③在温度作用前期应及时在洞室壁敷设隔热材料,并且对洞壁位移进行监测,随时绘出位移与时间的关系曲线,以便进行必要的防护措施。

温度场作用下岩石的力学特性研究尚处于发展阶段,笔者的研究是初步的,深埋围岩温度场、应力场、渗流场三者耦合的弹塑性问题,以及耦合的流变模型将是今后的研究主题。

参考文献:

- [1]王青海,周府生,季恒玉.花岗岩介质中处置中低放核废料的热应力[J].地质灾害与环境保护,1998,9(2):45-48.
- [2]WAI R,LO K Y,ROWE R K. Thermal stress analysis in rock with nonlinear properties[J]. Int J Rock Mech Min Sci and Geomech Abstr,1982,15(19):211-220.
- [3]徐燕萍,刘泉声,许锡昌.温度作用下的岩石热弹塑性本构方程的研究[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2001,20(4):527-529.
- [4]LAU J S O. The effects of temperature and water-saturation on mechanical properties of Lac du Bonnet pink granite[R]. Tokyo [s. n.],1995:315-321.
- [5]孙天泽.高温条件下岩石力学性质的温度效应[J].地球物理学进展,1996,11(4):36-69.
- [6]王崇革,刘泉声,刘双跃,等.单轴应力下岩石的热-黏弹塑性模型研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(S1):2341-2344.
- [7]康永华,耿德庸.煤矿井下工作面突水与围岩温度场的关系[M].北京:煤炭工业出版社,1996:75-111.
- [8]林睦曾.岩石热物理学及其工程应用[M].重庆:重庆大学出版社,1991:22-42.
- [9]陈国荣.弹性力学[M].2版.南京:河海大学出版社,2005:181-205.
- [10]徐志英.岩石力学[M].3版.北京:中国水利水电出版社,1993:118-154.
- [11]李通林,谭学术.矿山岩石力学[M].重庆:重庆大学出版社,1991:131-152.

(收稿日期 2007-07-25 编辑 骆超)