

布仑口水电站高温引水发电隧洞受力特性研究

刘乃飞¹, 李 宁^{1,2}, 余春海³, 姚显春¹, 刘俊平¹

(1. 西安理工大学 岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 新疆水利水电勘测设计研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 新疆布仑口-公格尔水电站位于西昆仑山腹地, 在强烈的新老地质构造运动作用下引水发电隧洞前段存在高地温现象(实测温度 105℃), 严重影响隧洞施工和支护结构的耐久性。采用解析方法研究了该隧洞围岩和支护结构的温度分布规律和受力特性。首先采用瞬态和稳态两种方法研究温度分布规律, 在此基础上研究了温度和应力耦合作用下围岩和支护结构的受力特性, 最后初步设计了衬砌伸缩缝间距。研究表明低温冷水对围岩和支护结构的温度场影响显著, 过水瞬时围岩内壁温度发生骤降($\Delta T=60^{\circ}\text{C}$); 运行期支护结构应力近似呈线性分布, 而围岩应力却表现出明显的非线性特性。

关 键 词: 布仑口-公格尔水电站; 高温引水隧洞; 围岩; 支护结构; 温度分布; 受力特性

中图分类号: TU 94

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2014)04-0014-08

随着西部大开发的持续推进, 许多关系国计民生的基础工程(如水利、交通和采矿工程)在环境恶劣、地质结构复杂的高山峡谷展开, 这将不可避免地遇到许多前所未有的工程难题(如高地温、高地应力、地震和泥石流等), 严重影响工程的顺利施工和安全运行^[1]。特别是对于水利水电工程建设, 随着可利用水资源的不断减少, 为了寻求可开发的水头落差, 不断向江河的源头发展, 工程条件之差更是难以想象。

水利工程界人们最关心的问题之一是永久支护结构的长期运行稳定性。常规受力条件下衬砌结构的安全问题, 国内外已有了大量的研究成果。早在 1985 年吕有年等就系统研究了水工压力隧洞灌浆式预应力衬砌和围岩在各种应力状态下的分析方法, 并应用塑性强化理论分析了隧洞围岩和支护结构的受力特性^[2-3]; D. Kolymbas 等基于保角映射原理推导了地下水对圆形排水隧洞静态稳定评价公式^[4]; 冯夏庭^[5]、陈卫忠^[6]等对锦屏二级水电站引水隧洞的稳定性进行了研究。郑治等对水工隧洞受力特性进行了研究, 指出现行水工隧洞结构设计规范的诸多不合理之处, 并提出了水工隧洞衬砌按构造配筋的设计思路^[7]; 汪基伟等采用钢筋混凝土有限单元法对隧洞衬砌的受力特性进行了分析^[8]; 张志强研究了顶部分布有软弱夹层隧洞的围岩稳定性与支护结构安全性^[9]; 侯靖等通过计算对比并结合工程实践经验, 讨论了水工高压隧洞结构设计的面力理论和体力理论的适用条件^[10]; 张明聚、胡少伟、张贵金等也在隧洞受力方面做了不少研究工作^[11-13]。然而这些研究成果主要集中在地应力和地下水的影响方面, 对于高温这一特殊的地质情况却鲜有涉及。早在 19 世纪后半叶岩土工作者就已经发现了高地温现象对工程的影响^[14]。而我国关于高地温研究方面的记录是云南黑白水三级电站引水隧洞(1993 年)^[15]。目前国内高地温研究方面比较有代表性的就是西安理工大学, 课题组结合实际工程展开了大量的研究工作^[16]。

新疆布仑口-公格尔水电站位于昆仑山腹地, 由于区域热流背景下地质结构的各向异性导致热传导条件空间变化, 进而引起热流密度向热阻小(热传导条件较好)的局部区域集中^[17], 致使引水发电洞前段存在高地温现象, 给隧道施工和支护结构安全带来极大的影响和危险, 特别是在运行期会使支护结构两侧产生巨

收稿日期: 2013-12-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179153); 西安理工大学优博创新基金资助项目(207-002J1306)

作者简介: 刘乃飞(1985-), 男, 陕西榆林人, 博士研究生, 主要从事隧道工程、边坡工程、水热力三场耦合方面的研究。

E-mail: liunaifei1985@126.com

大的温度拉应力,影响工程的长期运行安全。本文以布仑口-公格尔水电站高温引水隧洞为依托,首次将解析方法应用于实际工程,研究高温引水发电隧洞围岩及支护结构的温度分布规律以及不同工况下围岩和支护结构的受力特性,同时还对温度和应力耦合作用下的衬砌伸缩缝间距进行了探讨,以期该研究成果能为本工程及类似工程的研究设计与施工建设提供技术指导和借鉴参考。

1 布仑口高温引水隧洞概况

布仑口-公格尔水电站工程位于新疆克孜勒苏自治州阿克陶县境内,是一项具有灌溉、发电、防洪和改善生态环境等综合利用效益的大(2)型二等工程,所属公格尔电站是盖孜河中游的第一级电站。发电引水隧洞位于盖孜河左岸,进口位于Ⅷ坝线上游约240 m处,向北东穿过 Q_{gl}^I 山包、过比克塔日尕克沟,沿盖孜河左岸高山区(推荐方案山顶最高海拔4 750 m)向下游延伸至314国道1 600 km里程碑处,总长17.36 km(高地温洞段平面图见图1)。

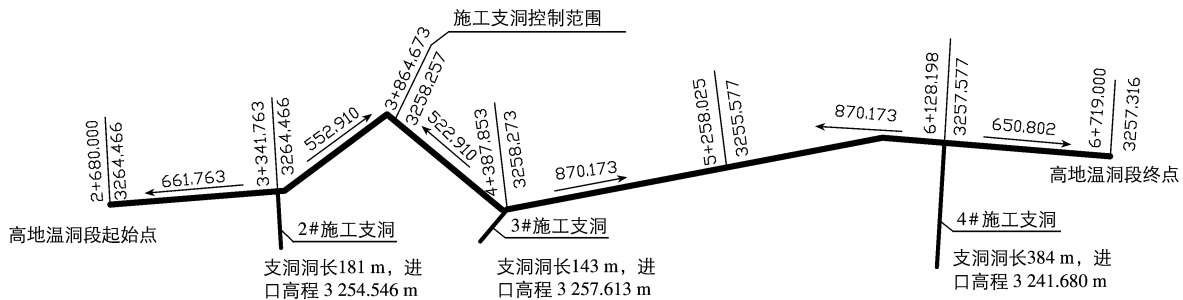


图1 发电引水隧洞高地温段平面布置

Fig. 1 Plan layout of high-temperature diversion tunnel

沿线山势陡峻,基岩多裸露,一般高程3 500~5 000 m,河谷狭窄,谷坡陡峻,地形总趋势西高东低。盖孜河左岸最高峰——萨尔祖鲁克峰海拔6 678 m,终年积雪,在河谷左岸有现代冰川分布,常沿冲沟发育冰舌、冰水洪积扇等地貌。引水隧洞沿线为下古生界志留~中泥盆系、新生界第四系地层和加里东期侵入岩等。据发电洞施工支洞开挖揭露,发电引水隧洞前段存在高地温问题(实测最早温度约为105℃),为2'#,3#,4#三条施工支洞,围岩岩层均为云母石英片岩夹有石墨片岩,3条支洞内干燥,未见地下水出露,个别裂隙中见有白色热气冒出(施工现场见图2)。根据施工支洞的位置推测引水发电隧洞主洞桩号2+680 m—6+799 m段存在高地温,在施工时需要采取一定降温措施。



图2 3#支洞施工区现场

Fig. 2 Construction site of 3# branch tunnel

2 围岩及支护结构温度分布规律

高地温隧洞温度场的分布规律对围岩和支护结构的受力特性影响巨大,因此在研究高温条件下围岩和支护结构的受力特性之前,首先应对高地温隧洞温度场的分布规律进行深入分析,本节分别采用稳态和瞬态两种分析方法来研究温度场的分布规律。

2.1 热学分析参数及恒温边界的确定

根据《布仑口初设地质报告》和水工隧洞设计规范选取的相关热力学参数,如表1所示。

对于高地温深埋地下洞室,假定在岩层较远距洞轴线半径 R 处的温度不受地面温度和洞内水温周期性波动的影响,视为常数 T_0 。蔡晓红等^[18]指出 R 可由岩石的导热系数 λ 、比热 c 、密度 ρ 、开挖半径 r_0 及一年内

最低温度持续时间 t_m 确定,即

$$\frac{R}{r_0} = f\left(\frac{2\lambda t_m}{c\rho r_0^2}\right) \quad (1)$$

表 1 围岩及支护结构热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters for surrounding rock and supporting structure

材 料	比热/(J·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	膨胀系数/(10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	对流换热系数/(W·m ⁻² ·℃ ⁻¹)
C20 混凝土	960	7.5	2.34	400
C30 混凝土	960	7.5	2.34	—
IV 围岩	1 000	4.5	—	—

将相关参数代入式(1)得 $R/r_0 = 3.06$, $R = 7.5$ m, 由于该引水隧洞埋深达 200 多米, 本文将 R 适当放宽至 10.0 m。

2.2 瞬态温度场求解

圆形洞室某一截面的传热过程可以简化为一维热传导过程, 其非稳态热传导控制微分方程为:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r}\right) \quad (2)$$

截面外边界为恒温边界, 内表面与流体进行对流换热, 王义江在给定边界条件下对该式进行了求解, 获得了围岩温度随时间的变化格式^[19]:

$$t(r, \tau) = t_a + (t_0 - t_a) \frac{1 + \frac{hr_0}{\lambda} \ln \frac{r}{r_0}}{1 + \frac{hr_0}{\lambda} \ln \frac{R_0}{r_0}} + (t_0 - t_a) \frac{\frac{hr_0}{\lambda}}{1 + \frac{hr_0}{\lambda} \ln \frac{R_0}{r_0}} \sum_{m=1}^{\infty} \exp(-a\beta_m^2 \tau) \frac{\pi^2 U_0^2}{2[U_0^2 - B_1 J_0^2(\beta_m R_0)]} \times$$

$$[J_0(\beta_m r) Y_0(\beta_m R_0) - J_0(\beta_m R_0) Y_0(\beta_m r)] \cdot \{ \beta_m r_0 \ln(R_0/r_0) [J_0(\beta_m R_0) Y_1(\beta_m r_0) -$$

$$J_1(\beta_m r_0) Y_0(\beta_m R_0)] + [J_0(\beta_m r_0) Y_0(\beta_m R_0) - J_0(\beta_m R_0) Y_0(\beta_m r_0)] \} \quad (3)$$

其中 β_m 为求解中间产物超越方程(4)的非负根:

$$[\beta_m J_1(\beta_m r_0) + H_1 J_0(\beta_m r_0)] Y_0(\beta_m R_0) - [\beta_m Y_1(\beta_m r_0) + H_1 Y_0(\beta_m r_0)] J_0(\beta_m R_0) = 0 \quad (4)$$

编写 FORTRAN 程序求解该超越方程, 即可获得任意时刻不同半径处围岩温度分布情况。

2.3 瞬态温度场分布规律

本文选取超越方程前 10 000 个非负实根来求解围岩瞬态温度场, 温度场分布规律如图 3 和 4 所示。

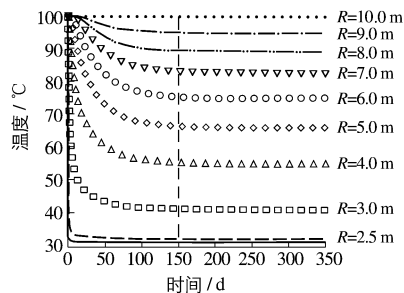


图 3 围岩温度随时间变化曲线

Fig. 3 Temperature curves of surrounding rock

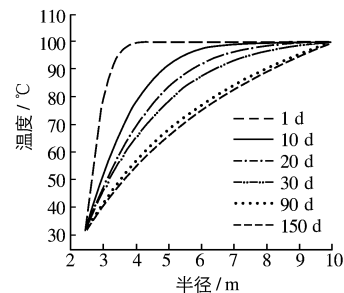


图 4 不同时刻围岩温度分布曲线

Fig. 4 Evolution curves of temperature distributions

由图 3 可知随着围岩与外部流体进行热量交换, 在热传导作用下围岩温度不断降低, 最后趋于稳定。过水瞬时围岩内壁温度发生骤降, 变温幅度约为 65℃, 沿岩体深部变温梯度呈递减趋势, 直至恒温边界。距洞壁越远围岩温度对低温冷水的响应越迟缓, 趋于稳定的时间也越长。在对流换热和热传导共同作用下围岩

温度场再次调整稳定需5个月。

图4为不同时刻围岩温度场分布曲线,从图中可以看出对流换热1d后,低温冷水对围岩温度场的影响半径约为4.75 m,10 d后影响半径约为9.45 m,20 d后全断面均已受到低温冷水影响。随着时间的推移围岩内部温度分布逐渐趋于平缓,围岩温度逐渐趋于稳定,围岩内部温度调整速率逐渐趋于零。洞壁和恒温边界温度变化较小,对流换热作用下岩体变温区温度不断调整,直至稳定。

2.4 稳态温度场分布规律

采用文献[18]中的公式求解高温隧洞稳态温度场,当隧洞冬季通过低温冷水时,衬砌内边界温度达到最低值,隧洞围岩半径 R 以外仍为初始温度 T_0 ,则可求得隧洞温度场分布规律,如图5所示。

从图5可见,隧洞稳态温度分布规律和图4中的瞬态温度分布规律一致,距洞壁越远其温度越接近于围岩初始温度。由于围岩和混凝土导热系数相差较大,因此喷层和围岩连接处温度呈非光滑过度,沿岩体深度方向围岩温度逐渐升高,温降减小。衬砌内表面最大温降约为14.68℃,而喷层温度升高了约5℃,围岩壁面最低温降为68℃。当对流换热系数降低50%时,隧洞壁面温度提高了约6%,而当导热系数降低50%时,隧洞开挖面温度降低了约35%,可见导热系数对隧洞温度场影响明显大于对流换热系数,因此,为了确保分析结果的准确性,参数(特别是导热系数)选取应尽量准确。

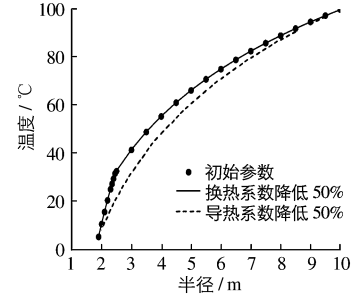


图5 隧洞稳态温度场分布规律

Fig.5 Steady temperature field distribution

3 围岩及支护结构受力特性研究

3.1 温度应力解析公式

高温隧洞中,围岩沿径向方向的尺寸远小于沿洞轴向的尺寸,因而可按平面应变问题处理。温度应力由自生温度应力和弹性约束温度应力两部分组成。首先根据无限长厚壁圆筒理论可得围岩及支护结构的自生温度应力计算公式^[18]为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 - r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \int_{r_0}^{r_1} \Delta T r dr - \int_{r_0}^r \Delta T r dr \right) \\ \sigma_\varphi = \frac{\alpha E}{1-\mu} \frac{1}{r^2} \left(\frac{r^2 + r_0^2}{r_1^2 - r_0^2} \int_{r_0}^{r_1} \Delta T r dr + \int_{r_0}^r \Delta T r dr - \Delta T r^2 \right) \\ \sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\mu} \left(\frac{2\mu}{r_1^2 - r_0^2} \int_{r_0}^{r_1} \Delta T r dr - \Delta T \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 为膨胀系数; E 为弹性模量; μ 为泊松比, ΔT 为温差; $\sigma_r, \sigma_\varphi, \sigma_z$ 分别为径向、环向和轴向应力,其余参数意义见图6。

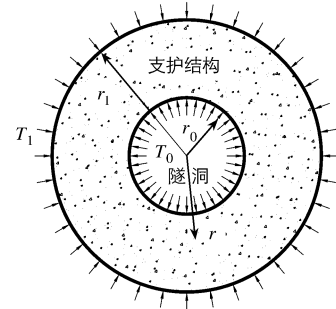


图6 温度应力计算

Fig.6 The calculating sketch for temperature stress

其次在假定两种物体完全接触的基础上,根据二者接触面处变形连续的条件,基于拉梅应力公式可得弹性约束温度应力计算公式^[18]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{r_1^2 (r^2 - r_0^2) p_s}{(r_1^2 - r_0^2) r^2} \\ \sigma_\varphi = \frac{r_1^2 (r^2 + r_0^2) p_s}{(r_1^2 - r_0^2) r^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_s 为热弹性约束力,其余符号同式(5)。

由式(6)综合内水压力等可得耦合约束应力,再加上自生温度应力即可得总耦合应力。

3.2 衬砌受力特性

衬砌结构径向应力分布如图 7。从图中可以看出衬砌结构径向应力较小,耦合作用下沿厚度方向衬砌径向受力均为拉应力,最大值位于衬砌中部,约为 0.20 MPa;而内水压力单独作用下,衬砌径向受压,沿厚度方向近似呈线性递减,内壁最大压应力约为 0.30 MPa;自生温度应力两端小中间大,最大值位于衬砌中部,约为 0.12 MPa;耦合约束应力随半径增大而增大,最大值约为 0.10 MPa。

图 8 为衬砌结构环向应力分布曲线。从图中可以看出衬砌环向应力各组分沿深度方向均呈线性分布,耦合作用下衬砌环向全断面受拉,低温冷水作用下衬砌发生了冷缩,环向最大拉应力出现在衬砌内壁,约为 4.80 MPa。在内水单独作用下衬砌环向全断面承受约 0.80 MPa 的均匀环向拉应力;自生温度应力沿厚度方向由拉应力转换为压应力,而耦合约束应力近似均匀分布,约为 2.20 MPa。

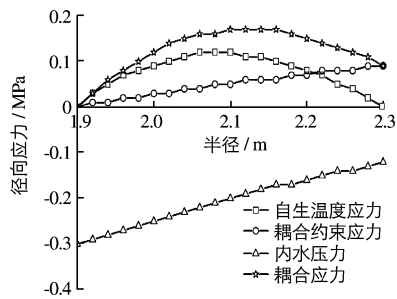


图 7 衬砌径向应力分布曲线

Fig. 7 Radial stresses distribution of lining

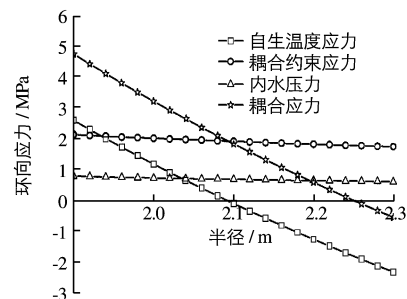


图 8 衬砌环向应力分布曲线

Fig. 8 Hoop stresses distribution of lining

3.3 喷层受力特性

初期支护厚度为 15 cm,温度荷载和内水压力耦合作用下喷层径向全断面受拉,沿喷层厚度方向近似呈线性递减,内壁最大拉应力约为 0.10 MPa。喷层厚度较小,自生温度应力也较小,而在内水压力单独作用下喷层全断面受压,最大值约为 0.12 MPa。

由于高温岩体和喷层之间的热传导作用,致使引水隧洞运行期喷层温度较初期施工温度略有升高,因此喷层在高温作用下发生热胀,全断面承受线性分布的环向压应力(图 10),最大值位于喷层外侧,约 1.0 MPa;而内水压力和耦合约束应力对喷层环向应力的贡献均近似呈均匀分布,其值分别为 0.60 和 -0.50 MPa。而自生温度应力分布规律基本和衬砌受力相同,沿厚度方向呈线性减小,由拉应力转化为压应力。

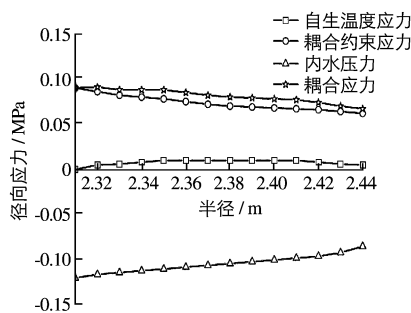


图 9 喷层径向应力分布曲线

Fig. 9 Radial stresses distribution of spray layer

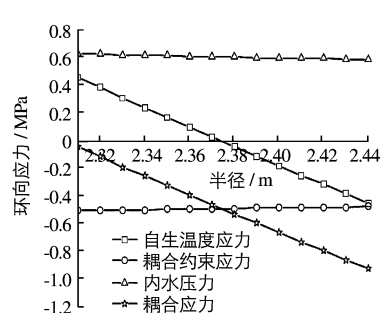


图 10 喷层环向应力分布曲线

Fig. 10 Hoop stresses distribution of spray layer

3.4 围岩变温区受力特性

引水隧洞围岩应力分布规律与支护结构的受力特性存在较大差异,呈现出明显的非线性。温度荷载和内水压力耦合作用下围岩变温区径向全断面受拉,且沿半径方向先增大后减小,最大值出现在 4.5 m 处,其值约为 0.60 MPa。自生温度应力分布规律和耦合应力规律基本一致,耦合约束应力随半径增加而增大,最大值约为 0.30 MPa,内水压力对围岩径向受力贡献较小。

耦合作用下引水隧洞围岩变温区环向应力沿深度方向由拉应力转化为压应力,转折点位于7.2 m处,围岩内壁最大环向拉应力约为2.3 MPa,自生温度应力分布规律基本和耦合应力相同,最大值约为1.6 MPa,约占耦合应力的70%。耦合约束应力近似呈均匀分布,内水压力对围岩环向应力影响很小。

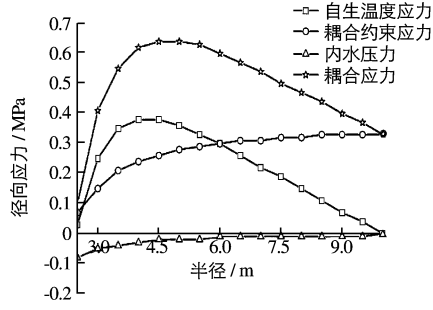


图 11 围岩变温区径向应力分布曲线

Fig. 11 Radial stresses of temperature variation zone of surrounding rock

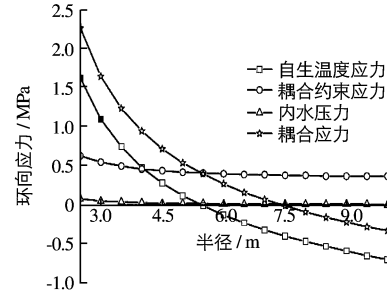


图 12 围岩变温区环向应力分布曲线

Fig. 12 Hoop stresses of temperature variation zone of surrounding rock

4 衬砌伸缩缝间距设计及裂缝宽度验算

由文献[18]可知最大伸缩缝间距可表示为:

$$L_{\max} = 2 \sqrt{\frac{(r_H^2 - r_m^2) E_c}{2 r_H C_d}} \operatorname{Arch} \left[\frac{\alpha_c E_c T}{E_c (\varepsilon_{ch} + \alpha_c) - \frac{A_s \sigma_s}{\pi (r_H^2 - r_m^2)}} \right] \quad (7)$$

根据稳态温度场分析结果可知,隧洞最大温降约为14.68℃,将相关热力学参数代入式(7),可得最大伸缩缝间距 $L_{\max} = 12.2$ m,而衬砌最小伸缩缝间距 $L_{\min} = L_{\max}/2 = 6.1$ m,则伸缩缝间距设计值可表示为:

$$[L] = \frac{1}{2} (L_{\max} + L_{\min}) = 9.2 \text{ m} \quad (8)$$

根据设计施工等要求进一步取 $[L] = 9.0$ m,根据文献[18]中的相关计算公式可得裂缝开展宽度为-0.90 mm,表明伸缩缝间距为9.0 m时,运行期过水工况下衬砌不会产生收缩裂缝。

5 结 语

本文以布仑口-公格尔水电站高地温引水发电隧洞为依托,首次采用解析方法研究了实际工程在高地温条件下引水隧洞围岩及支护结构的温度分布规律和受力特性,得到了以下几点认识:

(1)瞬态法所得稳定温度场与稳态分析结果吻合较好,导热系数对温度场的影响较对流换热系数更加明显,过水瞬时衬砌内边界降温剧烈,引水隧洞温度场调整稳定所需时长约为5个月。

(2)高温有压引水隧洞应力可分为自生温度应力、约束温度应力和内水压力产生的应力三部分,内水压力较小时,温度应力占主导地位。本工程衬砌全断面受拉,最大环向拉应力位于衬砌内壁约为4.8 MPa,喷层受力较小,围岩内壁出现了约2.3 MPa的环向拉应力,且沿深度方向逐渐转化为压应力。支护结构受力近似呈线性分布,而围岩受力则表现出明显的非线性特性,为了改善支护结构的受力特性应尽量降低混凝土的初始浇筑温度,并采取铺设保温材料或配筋等工程措施。

(3)布仑口-公格尔水电站高地温引水发电隧洞衬砌伸缩缝间距为9.0 m时,运行期过水工况下不会产生纵向裂缝。

参 考 文 献:

- [1] 朱珍德, 方荣, 朱明礼, 等. 高温周期变化与高围压作用下大理岩力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(11): 2279-2290. (ZHU Zhen-de, FANG Rong, ZHU Ming-li, et al. A study of mechanical performance of marble under high pressure and cyclic temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(11): 2279-2290. (in Chinese))
- [2] 吕有年, 蔡晓鸿. 灌浆式预应力隧洞衬砌和围岩应力分析若干问题的探讨[J]. 水力发电学报, 1985(3): 8-15. (LV You-nian, CAI Xiao-hong. The approach of problems for stress analysis of prestressed grouted concrete lining and surrounding rock[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1985(3): 8-15. (in Chinese))
- [3] 吕有年, 蔡晓鸿. 应用塑性强化理论分析隧洞衬砌和围岩的应力[J]. 土木工程学报, 1985, 18(3): 74-86. (LV You-nian, CAI Xiao-hong. Stress analysis of prestressed grouted concrete lining in hydraulic pressure tunnels and its surrounding rock by the plastic hardening theory[J]. China Civil Engineering Journal, 1985, 18(3): 74-86. (in Chinese))
- [4] KOLYMBAS D, WAGNER P. Groundwater ingress to tunnels-the exact analytical solution[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007(22): 23-27.
- [5] 陈国庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞长期稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增1): 417-422. (CHEN Guo-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Numerical analysis of the long-term stability of the seepage tunnel in Jinping II Hydropower Station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(Suppl): 417-422. (in Chinese))
- [6] 陈卫忠, 伍国军, 戴永浩, 等. 锦屏二级水电站深埋引水隧洞稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1184-1190. (CHEN Wei-zhong, WU Guo-jun, DAI Yong-hao, et al. Stability analysis of diversion tunnel for Jinping II Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1184-1190. (in Chinese))
- [7] 郑治, 刘杰, 彭成佳. 水工隧洞受力特性研究和结构设计思路[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 190-196. (ZHENG Zhi, LIU Jie, PENG Cheng-jia. Stress characteristics study and structural design ideas of hydraulic tunnels[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(2): 190-196. (in Chinese))
- [8] 汪基伟, 冷飞, 蒋勇. 圆形压力隧洞限裂配筋设计方法研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 143-148. (WANG Ji-wei, LENG Fei, JIANG Yong. A study of reinforcement design by crack width control for circular pressure tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(10): 143-148. (in Chinese))
- [9] 张志强, 李宁, 陈方方, 等. 不同分布距离的软弱夹层对洞室稳定性的影响研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1363-1368. (ZHANG Zhi-qiang, LI Ning, CHEN Fang-fang, et al. A study of influence of weak interlayers distributed at different intervals on opening stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1363-1368. (in Chinese))
- [10] 侯靖, 胡敏云. 水工高压隧洞结构设计中若干问题的讨论[J]. 水利学报, 2001(7): 36-40. (HOU Jing, HU Min-yun. Discussion on some problems in design of high pressure tunnel for hydroprojects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001(7): 36-40. (in Chinese))
- [11] 张明聚, 张文宇, 杜修力. 近接桥桩暗挖隧道支护结构内力监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(8): 30-36. (ZHANG Ming-ju, ZHANG Wen-yu, DU Xiu-li. Structure internal force monitoring and analysis for subway tunnels in the function of adjacent bridge pile[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(8): 30-36. (in Chinese))
- [12] 胡少伟, 陆俊, 牛志国. 高速地质雷达在隧洞混凝土衬砌质量检测中的应用[J]. 水利水电工程学报, 2010(2): 1-6. (HU Shao-wei, LU Jun, NIU Zhi-guo. Application of high-speed ground penetrating radar in detecting the quality of tunnel concrete lining[J]. Hydro-Science and Engineering, 2010(2): 1-6. (in Chinese))
- [13] 张贵金, 杨松林. 深埋大直径无压引水隧洞基于流变的风险分析[J]. 水利水电工程学报, 2005(1): 15-22. (ZHANG Gui-jin, YANG Song-lin. Risk analysis of deep-buried free-flow large-diameter tunnel based on surrounding rock rheology[J]. Hydro-Science and Engineering, 2005(1): 15-22. (in Chinese))
- [14] 王贤能, 黄润秋, 黄国明. 深埋长大隧道中地下水对地温异常的影响[J]. 地质灾害与环境保护, 1996, 7(4): 23-27. (WANG Xian-neng, HUANG Run-qiu, HUANG Guo-ming. Analysis of effects of groundwater on geotemperature anomaly in deeply-lying long and big tunnel[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1996, 7(4): 23-27. (in Chinese))
- [15] 和学伟. 高温高压热水条件下的引水隧洞施工[J]. 云南水力发电, 2003(增1): 59-61. (HE Xue-wei. Diversion tunnel construction under high temperature and high pressure hot water conditions[J]. Yunnan Water Power, 2003(Suppl): 59-61. (in Chinese))

- [16] 张岩, 李宁. 多因素对高温隧洞稳定性的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(2): 219-234. (ZHANG Yan, LI Ning. Influence of various factors on tunnel stability in temperature field [J]. Journal of Northwest Agriculture & Forest University (Natural Science Edition), 2012, 40(2): 219-234. (in Chinese))
- [17] 侯代平, 刘乃飞, 余春海, 等. 新疆布仑口高温引水隧洞几个设计与施工问题探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3396-3401. (HOU Dai-ping, LIU Nai-fei, YU Chun-hai, et al. Discussion on design and construction measures for a rock tunnel in high-temperature conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Suppl2): 3396-3401. (in Chinese))
- [18] 蔡晓红, 蔡勇平. 水工压力隧洞结构应力计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. (CAI Xiao-hong, CAI Yong-ping. Structural stress analysis of the hydraulic pressure tunnel [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2004. (in Chinese))
- [19] 王义江. 深部热环境围岩及风流传热传质研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010. (WANG Yi-jiang. Heat and mass transfer of surrounding rock and airflow for deep thermal environment [M]. Xuzhou: Chinese University of Mining and Technology, 2010. (in Chinese))

Analysis of mechanical characteristics for high-temperature diversion tunnel of Bulunkou hydropower station

LIU Nai-fei¹, LI Ning^{1,2}, YU Chun-hai³, YAO Xian-chun¹, LIU Jun-ping¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Xinjiang Survey and Design Institute of Water Resources and Hydropower, Urumqi 830000, China)

Abstract: Xinjiang Bulunkou-Gongeer hydropower station is located in the heartland of West Kunlun Mountains. With the action of the old and new tectonic movement, there exists high temperature in the front section of the diversion tunnel (the measured temperature is about 105°C), which has great impacts upon construction progress and the durability of the supporting structure. An analytical method has been used to make studies of the temperature distribution and stress characteristics of the surrounding rocks and the supporting structure. Firstly, both the transient and steady methods are used in studying the temperature distribution. Furthermore, the stress characteristics of the surrounding rocks and the supporting structure are also investigated in consideration of the coupling effects of temperature and stresses. Lastly, the spacing of the contraction joints to the lining structure is designed in this paper. The research results show that the stresses of the supporting structure are characterized by near-linear distribution, but the stresses of the surrounding rocks have obvious non-linear characteristics during the diversion tunnel operation period. When the cold water flows through the diversion tunnel, the temperature in the inner wall plummets and the variation amplitude is about 60°C.

Key words: Bulunkou-Gongeer hydropower station; high temperature diversion tunnel; surrounding rock; supporting structure; temperature distribution; mechanical characteristic