

热-力作用下水工隧洞围岩-支护结构耦合力学特性及相互作用机制

张玉洁¹, 李晓哲², 姜海波¹, 侍克斌³

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2. 奎屯市农村饮水安全工程服务站, 新疆奎屯 833200; 3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 在高海拔寒区, 围岩与支护结构的相互作用过程是影响水工隧洞结构稳定的重要因素。为了研究热-力作用下水工隧洞围岩-支护结构相互作用的时空演化规律, 以新疆某寒区水工隧洞为依托, 基于现场监测资料, 采用有限元仿真模拟, 计算温度效应下围岩-衬砌相互作用的弹塑性解析解, 分析热力作用下隧洞耦合结构温度场和应力场的时空分布特征。结果表明: 洞内低温对耦合结构的温度场和应力场影响较大, 应实施防寒保温措施, 保证在极端天气下, 结构沿径向 2.7 m 内温度不低于 0 °C; 通风前期, 温度应力对耦合结构的应力变化起主导作用, 21 d 后还要考虑衬砌支反力、围岩被动支反力以及围岩外边界约束的共同耦合作用; 对流前 48 d 结构内侧受拉, 结构洞腰内侧出现最大拉应力 155 kPa, 48 d 后结构压应力激增, 并且 48~60 d 内耦合应力增长速率最快。随着温度的降低, -1.95 °C 为洞顶和洞底的拉应力激增点, 洞腰前期拉应力急剧增大, 于 -3.5 °C 开始缓慢减小。本次研究揭示了热-力作用下围岩支护结构相互作用的动态全过程, 可为寒区隧洞安全施工提供依据。

关键词: 水工隧洞; 围岩-支护结构耦合; 热-力作用; 力学特性; 相互作用机制; 数值模拟

中图分类号: TV32⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2022)03-0191-11

Coupling mechanical properties and interaction mechanism of surrounding rock – supporting structure of a hydraulic tunnel under thermal – mechanical action

ZHANG Yujie¹, LI Xiaozhe², JIANG Haibo¹, SHI Kebin³

(1. College of Water and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. Kuitun City Service Station for Rural Drinking Water Safety Project, Kuitun 833200, China; 3. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The interaction between the surrounding rock and supporting structure is an important factor affecting the stability of hydraulic tunnel structure in high altitude cold regions, it is of practical significance to study the temporal and spatial evolution of the interaction between surrounding rock and supporting structure of hydraulic tunnels under thermal – mechanical actions. Based on the field monitoring data of a hydraulic tunnel in a cold region of Xinjiang, the finite element simulation was used to calculate the elastic – plastic solution of the interaction between the surrounding rock and tunnel lining under thermal effect, so as to analyze the spatio-temporal variation characteristics of temperature field and stress field of the tunnel coupling structure under thermal effect. The results show that the low temperature in the tunnel has a great influence on the temperature field and stress field of the coupling structure. The implementation of insulation measures should be conducted to ensure that the temperature along the radial direction of the structure (with in 2.7 m) is not less than 0 °C under extreme weather conditions. In the early stage

收稿日期: 2021-07-27; 修回日期: 2021-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51769031); 兵团区域创新引导计划项目(青年科技骨干人才培养)(2021BB004)

作者简介: 张玉洁(1999-), 女, 河南开封人, 硕士研究生, 主要从事水工结构研究。

通讯作者: 姜海波(1982-), 男, 湖南长沙人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事多场耦合作用下岩土体多尺度损伤破坏与稳定研究。

of ventilation, the temperature stress plays a leading role in the stress change of the coupling structure. After 21 days, the joint coupling effect of lining support reaction, surrounding rock passive support reaction and surrounding rock boundary constraint should be considered. 48 days before the convection, the inner side of the structure was strained, and the maximum tensile stress of 155 kPa occurred in the inner side of the arch waist. After 48 days, the compressive stress of the structure increased rapidly, and the coupling stress increased at the highest rate from 48 to 60 days. With the decrease of the temperature, the tensile stress of arch roof and bottom increased sharply at $-1.95\text{ }^{\circ}\text{C}$, and then started to decrease slowly at $-3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. This study reveals the whole dynamic process of surrounding rock - supporting structure interaction under thermal action, which can provide a technical support for the safe construction of tunnels in cold regions.

Key words: hydraulic tunnel; surrounding rock - supporting structure coupling; thermal - mechanical action; mechanical property; interaction mechanism; numerical simulation

1 研究背景

在寒冷地区,围岩与支护结构受低温通风的影响,其温度场及应力场发生剧烈变化,隧洞会出现变形不收敛现象,严重时还会失稳坍塌。围岩与支护结构作为隧洞的共同承载体^[1-3],两者在温度影响下的耦合力学特性和相互作用机制是关系隧洞安全建设和运行的重要因素。因此,研究低温热应力作用下隧洞耦合结构温度场和应力场的分布规律,对于隧洞安全施工和稳定运行具有重要的实际工程意义。

在隧道工程中,除围岩热学参数^[4]外,隧道温度场分布主要受环境温度和风速等外部因素的影响。孟尧等^[5]利用对流-导热耦合模型计算得到了不同风温和风速下围岩温度场的演化规律,结果表明外界温度对隧洞温度场影响明显。丁浩等^[6]基于现场实测数据,运用数理统计法得到了多年冻土区隧道洞内外气温与围岩衬砌结构的温度变化规律,但缺乏三维温度场的动态模拟分析。郭瑞等^[7]、严健等^[8]通过模型试验、数值仿真和现场测试等方法,分析了洞口气温、风速及通风方式对隧道温度场的影响,结果表明洞口气温和洞内风速对温度场有相互促进和加强的作用,洞内风温主要受入口风温的影响。黄诗冰等^[9]利用弹性力学理论推导出低温热力作用下椭圆空隙的开裂特征,可为寒区裂隙岩体的损伤和扩展演化提供参考。陈华鑫等^[10]基于监测结果,利用有限元软件对寒区隧道二衬结构应力场进行了模拟分析,得到由温度引起的作用力约为所规定设计值的71.3%。谭贤君等^[11]、Neaupane等^[12]、Gatmiti等^[13]基于THMD(thermo-hydro-mechanical-damage)耦合模型,对寒区隧道温度和应力场的分布规律进行了研究,结果表明冻融循环对隧道结构受力影响较大。司政等^[14]

采用有限元计算软件对不同围岩温度下水工隧洞衬砌的温度场和应力场进行了研究,发现围岩温度每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,则衬砌混凝土的最高温度平均升高 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,最大应力增大约 0.033 MPa 。陈勤等^[15]采用三维有限单元法分析了洞室环境和围岩温度对衬砌的影响,表明温度降低对结构侧向拉应力影响最大。以上学者采用不同方法得出环境温度是影响隧洞温度场、应力场重分布的主要因素。

Panet^[16]、Oreste^[17-18]详细介绍了新奥法施工中隧道围岩的支护方法。孙振宇等^[19]、李之达等^[20]基于黏弹性理论,建立了考虑开挖空间效应和混凝土时效特性的初支-围岩耦合模型,得到了隧道初支-围岩相互作用下的应力动态解析。李俊等^[21]考虑围岩性质和衬砌厚度等因素,对隧洞衬砌的温度和温度应力进行了三维计算。由于隧洞结构受低温影响前后的力学特性存在差异,因而对于热力作用下围岩、支护结构的耦合机理及相互作用,无论是定性还是定量的评价均需要结合实际工程展开进一步的研究和探讨。

为此,本文依托新疆维吾尔自治区某水工隧洞,基于现场监测资料建立低温-荷载作用下的围岩-初支耦合模型,对热力作用下围岩-初支耦合结构的相互作用进行模拟,并与实地监测结果进行对比分析,总结热力作用下隧洞围岩-衬砌耦合结构瞬态温度场、应力场的时空分布规律及相互作用机制,研究成果可为降低类似隧洞工程的安全风险、保证其稳定施工及运行提供理论基础和参考。

2 热力作用下围岩-支护耦合理论模型

为获得热力作用下圆形隧洞围岩-衬砌耦合结构的相互作用机理,本文将围岩和衬砌视为位移边界条件相同的受力体系,根据围岩和衬砌的变形协

调关系,借助岩石热弹性理论和隧洞有限环模型进行解析分析,对热力作用下围岩-衬砌耦合结构的应力进行研究。其计算模型如图1所示,并做以下假设:(1)岩体为弹塑性材料,服从Mohr-Coulomb准则,衬砌为弹性材料,岩体和衬砌为均质、各向同性介质,深埋隧洞的耦合作用问题可简化为轴对称平面应变问题进行分析,将结构视为2层厚壁圆筒的弹塑性接触;(2)隧洞内壁面的换热条件不随洞轴线发生改变;(3)围岩与衬砌间的绑定约束良好,共同承载。

2.1 隧洞耦合结构的温度分布

将隧洞围岩和支护划分为衬砌($a \leq r \leq R_0$)、围岩变温区($R_0 \leq r \leq b$)、围岩恒温区($r \geq b$) (图1)。对于温度边界条件,选择衬砌与临空面为对流换热边界,衬砌与围岩间为接触边界,即:

$$\begin{cases} r = a & (-\lambda_c \frac{dt}{dr} = h_c(T_a - t)) \\ r = R_0 & (t = t_1) \\ r = b & (t = T_b) \end{cases} \quad (1)$$

利用边界条件(1)求解导热微分方程可得到衬砌和围岩变温区的温度分布规律分别为:

$$t_c = \frac{t_1 - T_a}{\frac{\lambda_c}{ah_c} + \ln \frac{R_0}{a}} \ln \frac{r}{R_0} + t_1 \quad (a \leq r \leq R_0) \quad (2)$$

$$t_d = \frac{T_b - t_1}{\ln \frac{b}{R_0}} \ln \frac{r}{R_0} + T_b \quad (R_0 \leq r \leq b) \quad (3)$$

根据围岩和初支交界面热流连续条件可得接触面温度 t_1 , 见公式(4):

$$\begin{cases} \sigma_{rc}^{at} = \frac{\alpha_c E_c (t_1 - T_a)}{2(1 - \mu_c) \left(\frac{\lambda_c}{ah_c} + \ln \frac{R_0}{a} \right)} \left[\frac{a^2 (R_0^2 - r^2)}{r^2 (R_0^2 - a^2)} \ln \frac{a}{R_0} - \ln \frac{r}{R_0} \right] \\ \sigma_{\theta c}^{at} = \frac{\alpha_c E_c (t_1 - T_a)}{2(1 - \mu_c) \left(\frac{\lambda_c}{ah_c} + \ln \frac{R_0}{a} \right)} \left[1 + \frac{a^2 (R_0^2 + r^2)}{r^2 (R_0^2 - a^2)} \ln \frac{a^2}{R_0^2} + \ln \frac{r}{R_0} \right] \end{cases} \quad (5)$$

围岩变温区:由公式(3)结合无限长厚壁圆筒理论可得:

$$\begin{cases} \sigma_{rd}^{vat} = \frac{\alpha_d E_d (T_b - t_1)}{2(1 - \mu_d) \ln \frac{b}{R_0}} \left[\frac{R_0^2 (b^2 - r^2)}{r^2 (b^2 - R_0^2)} \ln \frac{R_0}{b} - \ln \frac{r}{b} \right] \\ \sigma_{\theta d}^{vat} = -\frac{\alpha_d E_d (T_b - t_1)}{2(1 - \mu_d) \ln \frac{b}{R_0}} \left[1 + \frac{R_0^2 (b^2 + r^2)}{r^2 (b^2 - R_0^2)} \ln \frac{R_0}{b} + \ln \frac{r}{b} \right] \end{cases} \quad (6)$$

围岩恒温区:由于变温恒等于0,故 $\sigma_{rd}^{cat} = \sigma_{\theta d}^{cat} = 0$ 。式中: σ_{rc}^{at} 、 $\sigma_{\theta c}^{at}$ 分别为衬砌径向和切向的自生温度应力,MPa; σ_{rd}^{vat} 、 $\sigma_{\theta d}^{vat}$ 分别为围岩变温区径向和切向的

$$t_1 = \frac{T_b \left(\frac{1}{ah_c} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{R_0}{a} \right) + \frac{T_a}{\lambda_d} \ln \frac{b}{R_0}}{\frac{1}{ah_c} + \frac{1}{\lambda_c} \ln \frac{R_0}{a} + \frac{1}{\lambda_d} \ln \frac{b}{R_0}} \quad (4)$$

将公式(4)代入公式(2)、(3)即可得出衬砌和围岩变温区的温度分布规律。

式中: a 为隧洞圆心至衬砌内边界的距离,m; R_0 为隧洞开挖半径,m; b 为隧洞洞心至围岩变温区外边界的距离,m; T_a 为洞内气温,℃; t_1 为围岩与衬砌交界面的温度,℃; T_b 为原岩温度,℃; t_c 为衬砌温度,℃; t_d 为围岩变温区温度,℃; λ_c 、 λ_d 分别为衬砌、围岩的导热系数,W/(m·K); h_c 为洞内空气与衬砌的对流换热系数,W/(m²·℃)。变量中的下标 c 表示衬砌,下标 d 表示围岩,下同。

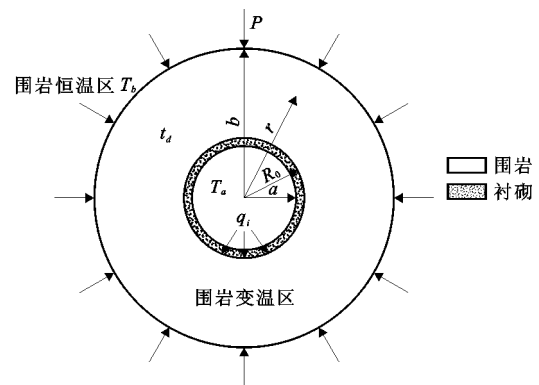


图1 热力作用下隧洞围岩-衬砌耦合结构计算模型

2.2 隧洞耦合结构的温度应力

(1) 自生温度应力。衬砌:设支护初始温度为 T_c^0 (℃),根据公式(2)及有限长厚壁圆筒理论可得:

自生温度应力,MPa; σ_{rd}^{cat} 、 $\sigma_{\theta d}^{cat}$ 分别为围岩恒温区径向和切向的自生温度应力,MPa,上述变量中的上标 at 表示自生温度情况,上标 v 表示变温区,上标 c 表

示恒温区; α 为介质的线膨胀系数, $10^{-6}/K$; E 为介质的弹性模量, GPa; μ 为介质的泊松比。

(2) 约束温度应力。当温度变化时, 衬砌与围岩

$$\begin{cases} P_c = -\alpha_c(t_1 - T_c^0) + \frac{\alpha_c(t_1 - T_a)}{2\left(\frac{\lambda_c}{ah_c} + \ln \frac{R_0}{a}\right)(1 - \mu_c)} \left[(1 - \mu_c) + \frac{(1 + \mu_c)a^2 + (1 - 3\mu_c)R_0^2}{R_0^2 - a^2} \ln \frac{a}{R_0} \right] \\ P_d = \frac{R_0^2}{b^2} P_c + \frac{\alpha_d E_d (T_b - t_1)}{2b^2(1 - \mu_d) \ln \frac{R_0}{b}} \left[\frac{1}{2}(b^2 - R_0^2) + R_0^2 \ln \frac{R_0}{b} \right] \end{cases} \quad (7)$$

结合拉梅公式解, 在 P_c 作用下衬砌的约束温度应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{rc}^{ct} = \frac{R_0^2(r^2 - a^2)}{r^2(R_0^2 - a^2)} P_c \\ \sigma_{\theta c}^{ct} = \frac{R_0^2(r^2 + a^2)}{r^2(R_0^2 - a^2)} P_c \end{cases} \quad (8)$$

在 P_c 、 P_d 作用下围岩变温区的约束温度应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{rd}^{vct} = \frac{R_0^2(b^2 - r^2)}{r^2(b^2 - R_0^2)} P_c + \frac{b^2(r^2 - R_0^2)}{r^2(b^2 - R_0^2)} P_d \\ \sigma_{\theta d}^{vct} = -\frac{R_0^2(b^2 + r^2)}{r^2(b^2 - R_0^2)} P_c + \frac{b^2(r^2 + R_0^2)}{r^2(b^2 - R_0^2)} P_d \end{cases} \quad (9)$$

在内边界受到 P_d 的作用下围岩恒温区的约束温度应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{rd}^{cct} = \frac{b^2}{r^2} P_d \\ \sigma_{\theta d}^{cct} = -\frac{b^2}{r^2} P_d \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_c 和 P_d 分别为温度变化时衬砌与围岩变温区、围岩变温区与围岩恒温区之间产生的均布约束力, MPa。各变量中的上标 ct 表示约束温度情况, 上标 v 表示变温区, 上标 c 表示恒温区。

2.3 隧洞耦合结构的支护反力

围岩在洞内低温的影响下将产生结构变形, 当变形受到衬砌和无限远处围岩(外边界施加的均布荷载 p) 的约束时就会在两者之间产生抵抗变形的反力, 对于围岩相当于在其内边界施加一个大小为 q_i 的支护反力, 衬砌同样也会受到大小相等、方向相反的被动支护力。通过确定围岩与支护的相互作用力, 进而研究围岩 - 支护耦合结构的力学特性。

由均布压力下的厚壁圆筒理论可得初衬应力为:

$$\begin{cases} \sigma_{rc} = -\frac{R_0^2(r^2 - a^2)q_i}{(R_0^2 - a^2)r^2} \\ \sigma_{\theta c} = -\frac{R_0^2(r^2 + a^2)q_i}{(R_0^2 - a^2)r^2} \end{cases} \quad (11)$$

变温区、围岩变温区与围岩恒温区之间会分别产生一对均布约束力 P_c 和 P_d , 由接触连续和变位协调条件可得:

式中: q_i 为衬砌作用在其与围岩接触面上的支护反力, MPa。

由围岩塑性区轴对称问题的平衡方程^[22-23] 可得:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{dp_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (12)$$

$$p_r = E_d \alpha_d (t_d - T_b) = E_d \alpha_d \left(\frac{T_b - t_1}{\ln \frac{b}{R_0}} \ln \frac{r}{b} \right) \quad (13)$$

式中: p_r 为围岩的温度应力, MPa; α_d 为围岩的线膨胀系数; b 为隧洞洞心至围岩变温区外边界的距离, m; r 为沿隧洞径向任意位置的距离, m。

由公式(12)、(13) 与 M - C 准则可得围岩塑性区内的径向应力 σ_r^p :

$$\sigma_r^p = r^{Z_1-1} \left(\frac{Z_2 - X}{1 - Z_1} r^{1-Z_1} + C \right) \quad (14)$$

$$Z_1 = \frac{(1 + \sin \phi)}{(1 - \sin \phi)} \quad (15)$$

$$Z_2 = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (16)$$

$$X = E_d \alpha_d \left(\frac{T_b - t_1}{\ln \frac{b}{R_0}} \right) \quad (17)$$

式中: C 为待定常数; ϕ 为内摩擦角, ($^\circ$)。

由轴对称圆形巷道围岩弹性区应力一般解可知^[24]:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = A \pm \frac{B}{r^2} \\ \sigma_\theta^e \end{cases} \quad (18)$$

式中: A 、 B 为积分常数, 由边界条件确定。

根据弹性区外边界条件 $r \rightarrow \infty$, $\sigma_r = \sigma_\theta = p$ 可得, $A = p$ 。

弹塑性边界线 $r = R_p$ 时, 由应力连续可知:

$$\sigma_r^e + \sigma_\theta^e = \sigma_r^p + \sigma_\theta^p \quad (19)$$

将公式(19) 与 M - C 准则联立可得:

$$\sigma_r^{e-p} = \frac{2P - Z_2}{Z_1 + 1} \quad (20)$$

将边界条件公式(20)代入公式(14)中可得:

$$C = R_p^{1-Z_1} \left(\frac{2P - Z_2}{1 + Z_1} - \frac{Z_2 - X}{1 - Z_1} \right) \quad (21)$$

衬砌与围岩相互作用,两者交界处径向应力连续^[25],即 $\sigma_r|_{r=R_0} = q_i$,由公式(5)~(21)可得:

$$\sigma_{rc}^{at} + \sigma_{rc}^{ct} + \sigma_{rc} = \sigma_{rd}^{vat} + \sigma_{rd}^{vct} + \sigma_r^p \quad (22)$$

由公式(22)解得:

$$q_i = \frac{(R_0^2 - a^2) [(\sigma_{rc}^{at} + \sigma_{rc}^{ct} - \sigma_{rd}^{vat} - \sigma_{rd}^{vct} - \sigma_r^p) r^2]}{R_0^2 (r^2 - a^2)} \quad (23)$$

由公式(23)结合具体初始及边界条件,可计算出温度效应下隧洞轴向围岩与衬砌之间的相互作用关系。

3 热力作用下水工隧洞围岩与支护结构应力变化规律

3.1 工程概况

新疆某引水隧洞位于西昆仑褶皱系公格尔-桑株塔格隆起中部,隧洞全长 20.14 km,主洞左侧设置先行施工的平导洞,平导洞起桩号为 DK194+980 m~DK207+500 m,埋深为 253 m,坝址区均为第四系地层,未见层理,洞室围岩较完整,主要为 IV 类围岩。隧洞采用圆形断面,初期喷厚度为 10 cm 的 C25 混凝土,围岩与衬砌间未做隔离层。隧洞内最低气温为 -34.3 ℃,最冷月环境平均气温为 -13.1 ℃,多年平均封冻天数为 96 d。该区域受较长的负温环境、较大的温差条件及隧洞施工的影响,从而引发低温热力问题,使得隧洞围岩与衬砌的温度场和应力场不断变化,影响隧洞稳定。

3.2 监测内容与监测方案

(1)温度监测。选定平导洞内距洞口 1 250 m

范围即桩号 DK194+980 m~DK196+230 m 进行监测,该洞段受外界温度影响显著。由于低温洞段净空温度受外界温度影响的强烈程度与距洞口距离成反比,故第 1 个监测断面设在距洞口 50 m 处,随后沿洞轴线每隔 100 m 布设 1 个监测断面,共计 13 个监测断面,监测工作于 2017 年 11 月 10 日开始,于 2018 年 1 月 20 日完成记录,监测时长为 72 d,采用玻璃温度计对洞内净空温度进行监测,在监测断面两侧各安置两根温度计,其量程范围为 -40~50 ℃,每日测量频率为 3~5 次,每日监测时间为 05:00、11:00、14:00,于 2017 年 12 月-2018 年 1 月极端天气下再增加两次监测,时间为 02:00、17:00,各次监测的最终温度取平均值。为获取 13 个监测断面的围岩壁温,在洞壁打设测温孔,采用测量范围为 -50~50 ℃ 的铂电阻温度传感器 (PT100A) 进行监测,每日测量频率为 1~3 次。各监测断面布置见图 2(a)。

(2)应力监测。由于高寒地区现场监测条件艰苦,故沿洞轴向选择 3 个断面,即 N 断面(距洞口 50 m,桩号 DK195+030 m)、P 断面(距洞口 650 m,桩号 DK195+630 m)、Q 断面(距洞口 1 250 m,桩号 DK196+230 m)进行研究。假设洞腰左、右侧的监测数值相等,断面径向应力测点仅布置半个断面,分别为洞顶、右洞腰、洞底,每个断面布设 6 个应力测点,采用 XJH-4 型埋入式混凝土应变计和振弦式无应力计对各断面衬砌内侧及外侧(衬砌-围岩接触面)进行应力监测,各监测位置及编号见图 2(b)。温度监测稳定后进行应力监测,故应力监测于 2017 年 11 月 12 日开始,于 2018 年 1 月 20 日完成记录,监测时长为 70 d,采集频率为 1 次/(3~4) d,共计 22 个应力值。

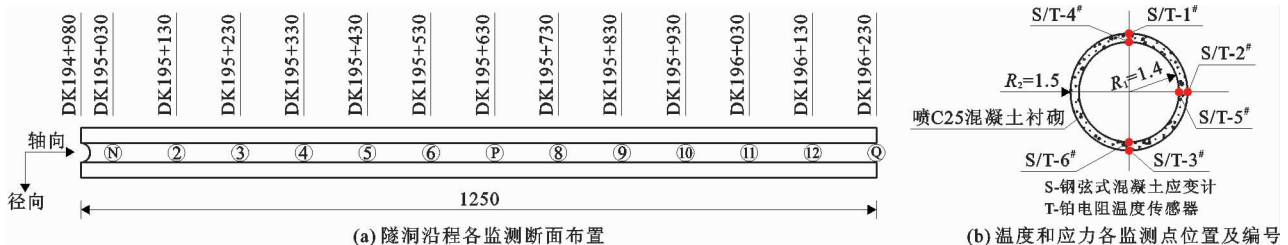


图 2 隧洞内温度及围岩-衬砌温度、应力监测断面及测点布置(单位:m)

3.3 现场监测结果分析

沿洞轴向 N、P、Q 3 个断面的 72 d 温度监测值变化曲线如图 3 所示,N 断面通风后衬砌内、外侧现场监测应力变化情况如图 4、5 所示(拉力为负,压力为正,下同)。

由图 3~5 可知:

(1)隧洞内 3 个断面的温度变化趋势大体相同,前期温度缓慢降低,在年最冷月 12、1 月,由于外界环境气温的降低,使洞内温度不断降低且波动激烈(图 3)。

(2)隧洞围岩-衬砌耦合作用随时间的变化以12月1日为界分为两个阶段:第1阶段为低温影响初期,隧洞外侧应力波动幅度较大。受围岩壁温和洞内气温的较大温差以及混凝土水化热的影响,围岩在热力作用下发生激烈的应力重分布,衬砌随之产生波动显著的支护力。第2阶段为低温影响后期,隧洞内侧应力波动幅度较大但量值较小,外侧应力呈稳态增大并于1月20日增大至最大值。前期外界环境冷空气与围岩衬砌经过了一段时间的对流换热,到后期环境温度更低但温差较小,所以内侧应力波动虽然较大但量值较小,此时结构处于动态平

衡状态(图4)。

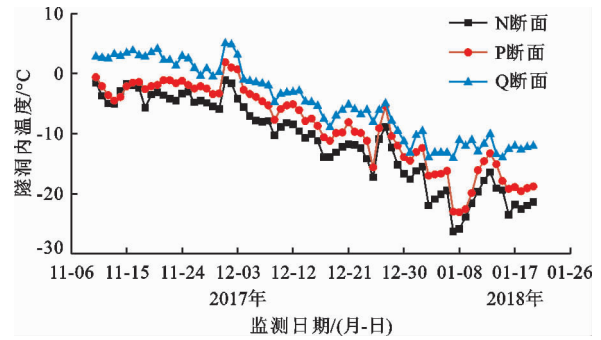


图3 监测期隧洞内3个断面的温度监测值变化曲线

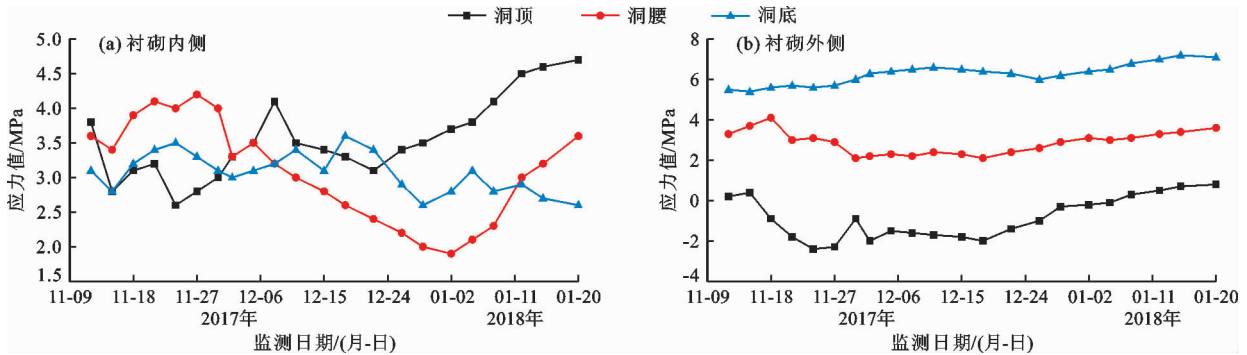


图4 监测期隧洞N断面衬砌应力-时间变化曲线

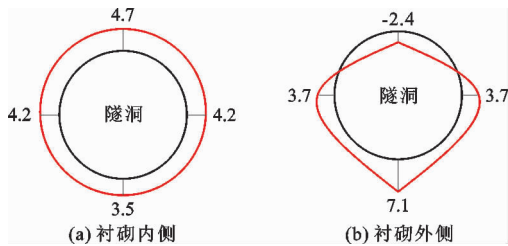


图5 热力作用下衬砌应力极值包络图(单位:MPa)

(3)隧洞衬砌不同位置的应力状态有所不同。洞顶衬砌外侧压、拉应力交替出现并且大部分时间承受拉应力,最大拉应力发生在洞顶,为2.4 MPa,且内外侧应力变幅最大,为7.1 MPa,约为洞腰和洞底内外侧应力变幅的14倍和2倍(图5)。由于开挖后隧洞的应力变化主要是受结构自身应力演化和温度应力变化的影响,衬砌结构在施工完成后需迅速承担起支护作用,使洞顶及时封闭成环并保证结构的稳定,且由于衬砌结构刚度较大,故比其他位置承担的压应力更大。受低温影响,衬砌内、外侧产生了拉应力,故洞顶衬砌内、外侧压应力的变化幅度较大。洞腰应力值受低温影响波动幅度较大,热敏性高,48 d后温度骤降造成内侧压应力突增。洞底衬砌应力分布较其他位置稳定,应力波动幅度最小但应力极值最大。

4 热力作用下水工隧洞围岩与支护结构力学特性的耦合计算与分析

4.1 计算模型及相关参数

在圆形隧洞问题中,洞轴向距离远大于径向尺寸,并且开挖后仅对距开挖边界3~5倍洞径内的岩体应力产生影响^[26],因此将其视为平面应变问题。选取平导洞建立模型,建模范围为3.5D。模型几何尺寸及网格划分如下:隧洞开挖半径为1.5 m,围岩范围取24 m×24 m,利用有限元软件,采用C3D8T单元对模型进行划分,共划分350 064个单元,衬砌为厚度10 cm、半径1.4 m的薄壁圆筒,单元类型为C3D8T,划分为2 057 184个单元,有限元计算模型见图6。

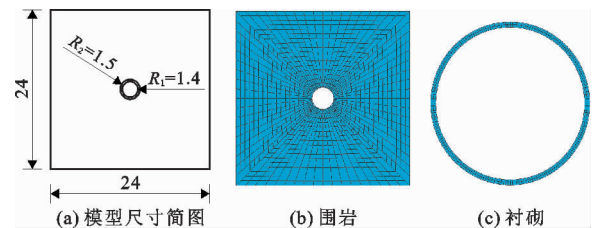


图6 隧洞围岩与支护结构有限元计算模型示意图(单位:m)

该工程岩体完整性较好,因内部渗流水占比较

小且对耦合结果的影响甚微,故可不考虑水体对围岩-衬砌耦合结果的影响。根据工程勘察资料和相

关规范^[27-28],隧洞围岩和衬砌的热力学参数如表1所示。

表1 隧洞围岩和衬砌的热力学参数

材料	弹性模量/ GPa	导热系数/ (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	泊松比	比热容/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	线膨胀 系数/10 ⁻⁶	重度/ (kN·m ⁻³)	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
IV类围岩	3.5	3.0	0.3	2240	5.6	23	0.38	37
C25 混凝土	20	2.3	0.2	1385	10	24		

初始条件:由于距外部环境大于150 m的围岩温度不再受外部温度的影响^[29],而本工程隧洞埋深达到了253 m,故围岩的初始温度取为3 °C。洞内通风温度为常温,即沿隧洞轴向实测的72 d环境温度。

温度边界条件:隧洞开挖后,由于临空界与衬砌、围岩间存在温差及洞内空气流动而产生对流换热,故取第三类边界条件,即 $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a - T_b)$ 。外边界温度为常函数,即 $T_b = 9$ °C。本文结合工程实际,取隧洞通风与衬砌间的对流换热系数为2.3 W/(m²·°C)。

位移边界条件:根据位移、约束关系确定模型顶部为自由面,两侧为水平法向约束,底部为3向约束。

4.2 围岩-衬砌耦合模式及解耦策略

隧洞支护后,围岩和衬砌共为承载结构,随着热应力的释放不断耦合,最终两者相互作用趋于动态平衡。作用机制如下:(1)隧洞开挖后,围岩受外界低温作用后在平衡自身过程中进行应力释放,产生径向变位而压迫衬砌,衬砌受压产生变形。(2)衬砌通过自身的刚度和强度来抑制岩体的变形和脱落,对围岩提供有效的支护阻力,同时自身也受到被动支护反力。

求解策略为:(1)根据实测工程资料,建立三维有限元模型并设置结构参数,模拟平衡初始地应力并复制模型。(2)结合实测洞内净空温度进行瞬态温度场模拟,计算沿洞轴向不同断面围岩-衬砌的瞬态单元节点温度值。(3)将瞬态温度场作为温载嵌入,改变分析步,计算沿洞轴向不同断面围岩-衬砌的瞬态单元节点热应力值。(4)基于模型单元节点应力与监测点应力变化趋势进行对比分析,求解热力作用下隧洞沿轴向围岩-衬砌耦合结构的受力特性及相互作用机制。

4.3 计算结果与分析

4.3.1 温度计算结果与分析 选取沿洞轴向的N、P、Q 3个断面,基于72 d洞内净空实测温度进行三维瞬态温度场模拟,得到图7和表2、3。图7为监

测期隧洞N、P、Q断面耦合结构温度场(负温区范围和最低温度)的变化以及洞腰处径向温度分布;表2、3为3个断面围岩与衬砌接触面的温度及径向负温区范围的模拟值与实测值。

表2 轴向围岩与衬砌接触面温度 °C

断面	模拟值	实测值
N断面	-5.91	-6.47
P断面	-4.42	-4.72
Q断面	-2.75	-2.63

表3 轴向围岩-衬砌的负温区范围 m

断面	模拟值	实测值
N断面	0.64	0.90
P断面	0.52	0.55
Q断面	0.36	0.33

由图7可以看出,受隧洞净空温度的影响,沿洞轴向N、P、Q 3个断面结构的径向负温区范围逐渐缩小,P、Q断面结构出现负温区的时间分别比N断面滞后了12和18 d,3个断面结构的最大负温区范围分别为0.64、0.52、0.36 m,最低温度分别为-5.9、-4.4、-2.8 °C。结构径向温度在3 m范围内变化较为剧烈,3 m之外变化平缓最终趋于围岩温度。考虑结构径向负温区和温度分布以及极端天气,由图7可以计算出3个断面径向温度的变化率,为保证温度变化率在10%以内,故实施防寒保温措施,保证在极端低温月份结构沿径向2.7 m范围内的温度不低于0 °C。

由表2可知,沿洞轴向N、P、Q 3个断面的结构接触面温度模拟值与实测值的误差较小,相对误差分别为8.7%、6.4%、4.5%;由表3可知,因洞口段受环境低温影响显著,故N断面负温区范围的实测值明显大于模拟值,而P、Q两断面的负温区范围模拟值与实测值较为一致。上述对比结果表明,模拟计算的温度值沿断面径向的误差较小,沿隧洞轴向的变化趋势与实测值较为一致,总体上模拟值与实

测值吻合度较高,因此认为此三维模型温度计算结果能够满足实际工程的要求。

洞内环境温度的变化会对隧洞断面径向温度场及负温区产生影响。因此,在地下隧洞工程施工中,应对洞内净空温度进行严格防控,以避免因其大幅变化而造成各结构温度场重分布,从而引起剧烈的应力变化。

4.3.2 应力计算结果与分析 将隧洞轴向 N、P、Q 3

个断面在监测期不同时间的结构耦合应力理论计算值和模拟计算值与现场监测值进行对比,如表 4 所示;为使结果更加直观,本文通过应力变化对模拟计算结果进行分析,即由三维瞬态耦合模拟的径向结果,将特征位置节点应力与前一时段该节点应力的差值作为耦合结构在本时段的温度耦合应力变化量,结果如图 8 所示;监测期隧洞轴向 N、P、Q 3 个断面不同时间衬砌外侧温度应力环向变化量曲线如图 9 所示。

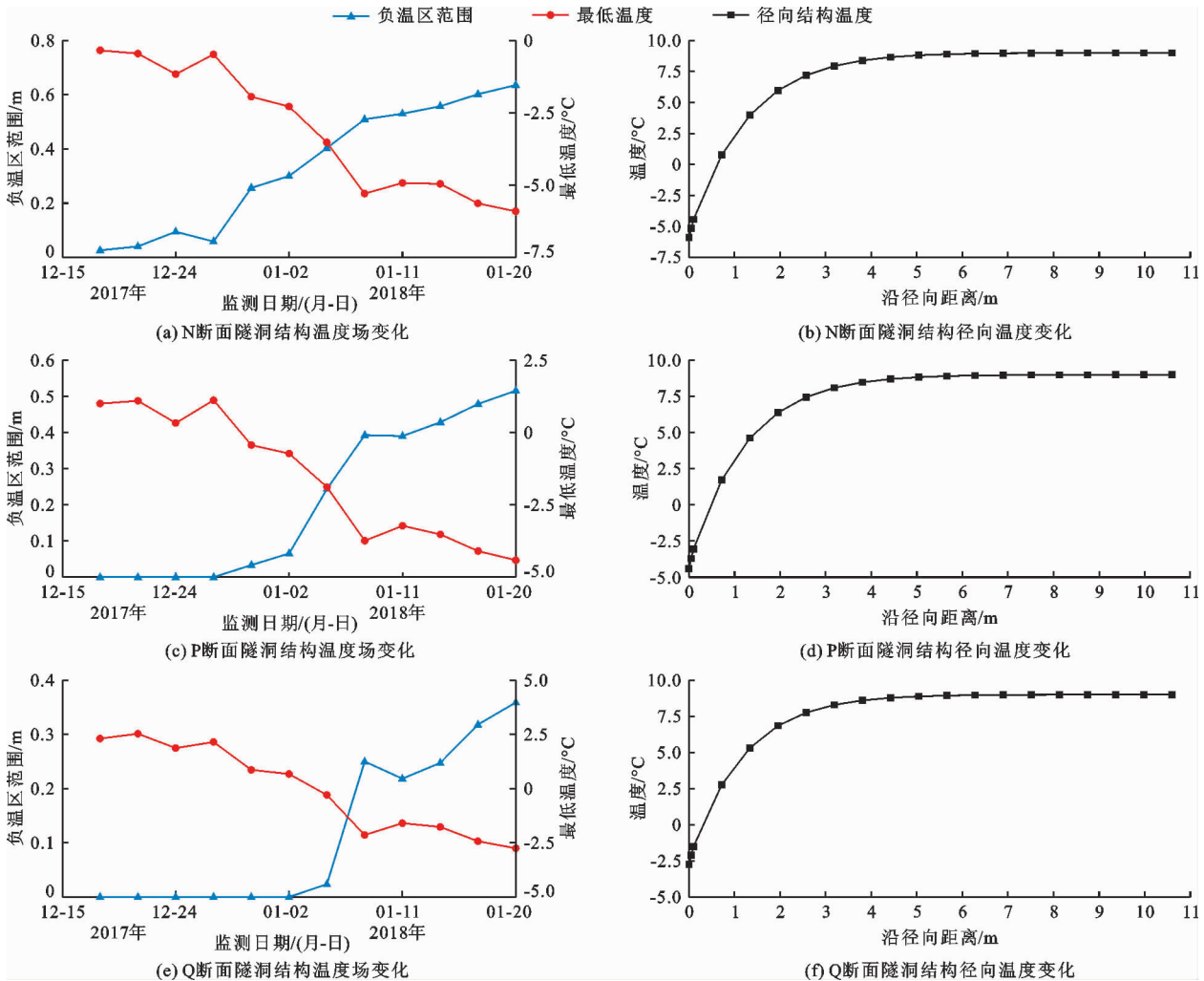


图 7 监测期隧洞 N、P、Q 断面耦合结构温度场及洞腰处径向温度分布

表 4 监测期隧洞 3 个断面不同时间耦合应力计算及监测结果

时间/d	N 断面应力/ MPa			P 断面应力/ MPa			Q 断面应力/ MPa		
	理论计算	模拟计算	现场监测	理论计算	模拟计算	现场监测	理论计算	模拟计算	现场监测
18	-4.91	5.39	5.35	-4.90	5.40	5.52	-4.88	5.41	5.49
36	-4.98	5.37	5.30	-4.95	5.38	5.40	-4.91	5.40	5.42
54	-5.05	5.35	5.35	-5.01	5.37	5.38	-4.97	5.38	5.41
72	-5.12	5.32	5.28	-5.09	5.34	5.36	-5.00	5.36	5.40

对表 4 及图 8、9 分析如下:

(1)表 4 中理论计算的应力为不同时刻的瞬时

值,而模拟计算和监测结果为相应各时间段的累积值,故模拟计算与监测结果均为正值,但随着时间的

推移应力正值不断减小,表明拉应力不断增大。总体来看,模拟计算的结构耦合拉应力随时间的推移而不断增大,随洞轴向距离的增加而不断减小。模拟计算与监测结果的数值和变化规律均较为一致,也验证了模型的准确性。

(2)图 8 表明,对流前期受洞内低温影响,结构

内侧应力为负值受拉应力,由于洞腰处的热敏性较高,拉应力于 N 断面洞腰处出现 155 kPa 的最大增量。结构外侧受衬砌支护反力和围岩外边界的约束整体呈受压状态。48 d 后由于环境温度骤降,各特征位置的压应力开始激增。模拟结果与监测结果较为一致,该模型可进行后续模拟计算。

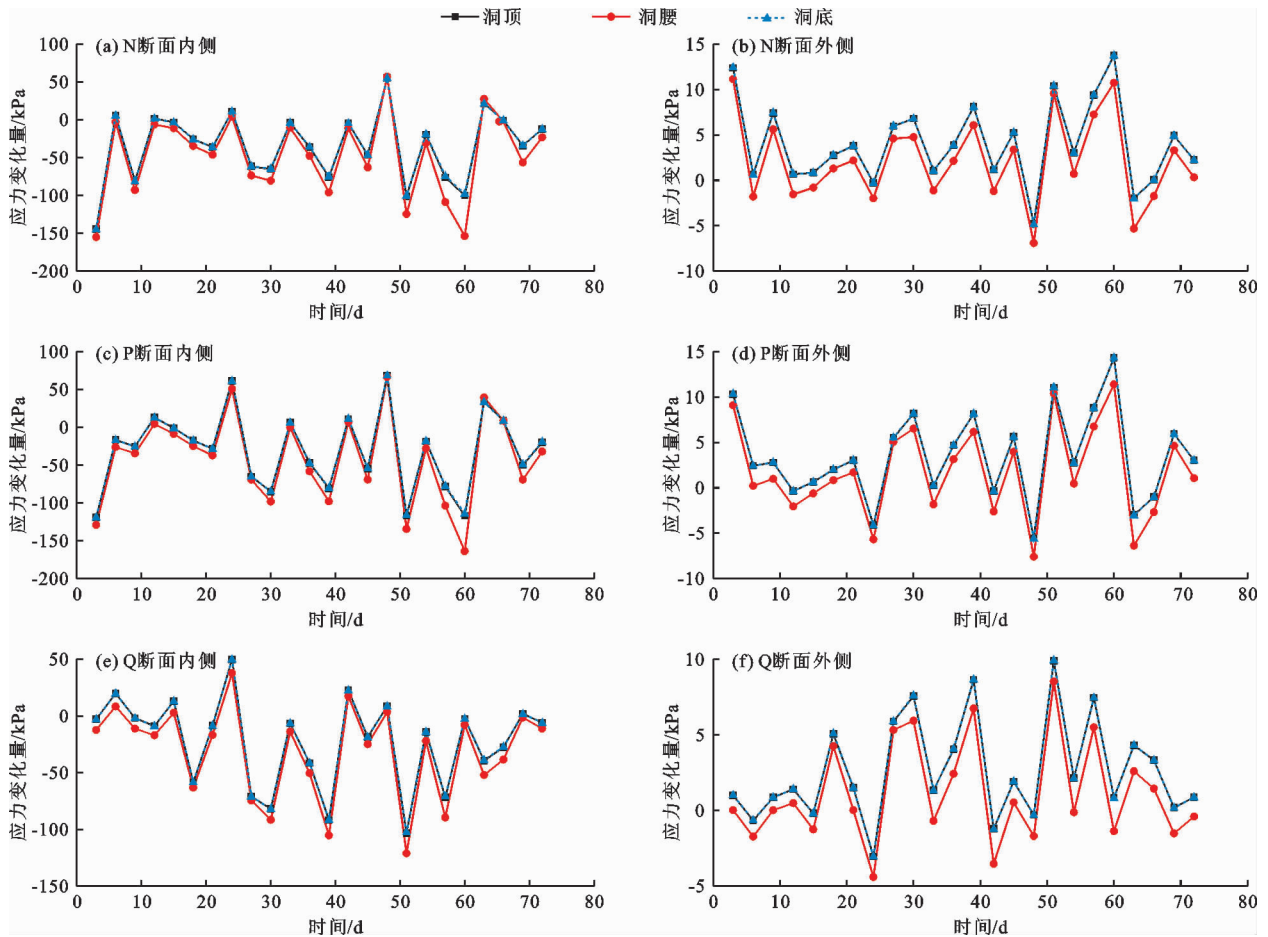


图 8 监测期隧洞 3 个断面特征部位衬砌内、外侧耦合应力变化量随时间变化曲线

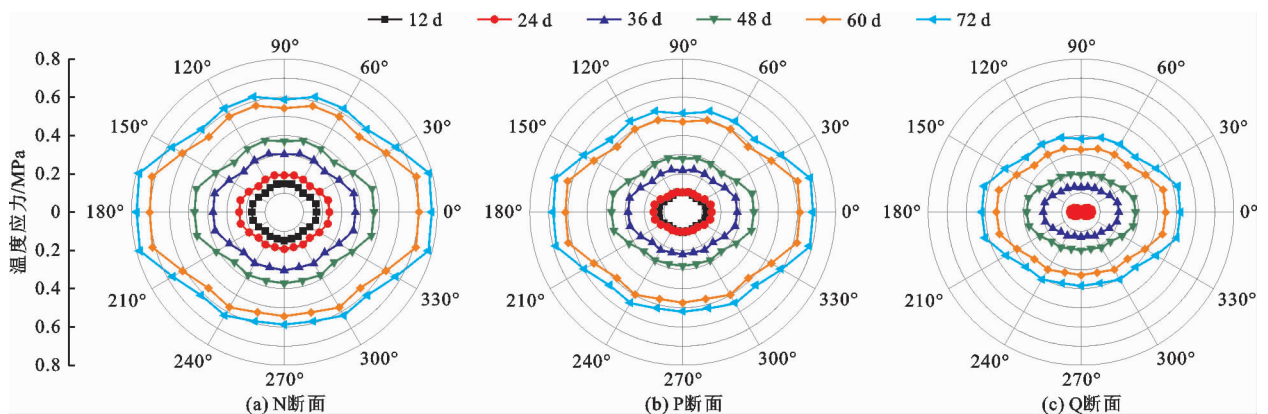


图 9 监测期隧洞 3 个断面不同时间衬砌外侧温度应力环向变化量曲线

由图 8 中还可以看出,隧洞各特征位置的应力最大值并非出现在环境温度最低时,应力的大小同

时还受到衬砌支反力、围岩被动支反力以及围岩外边界约束的共同耦合作用影响。洞内低温对流时,

围岩与衬砌耦合结构径向大于3 m的围岩恒温区所受热应力影响较小,但围岩变温区的膨胀挤压及围岩约束会对衬砌产生被动支反力而形成压应力。根据最大拉应力理论,围岩应力未完全释放并受到支护抑制时,会产生较大的压应力,从而使衬砌产生变形甚至破裂。

(3)图9显示,隧洞断面结构温度应力沿洞轴

向逐渐减小;同一断面衬砌外侧温度应力随时间不断增大,其中监测期第48~60 d的温度应力增长速率最大;60 d后虽然环境温度持续降低,但因温差较小,故各断面温度应力变化较缓。

基于图8得到隧洞N断面洞顶、洞腰、洞脚(洞腰向洞底45°处)、洞底的衬砌内、外侧温度-应力关系曲线,如图10所示。

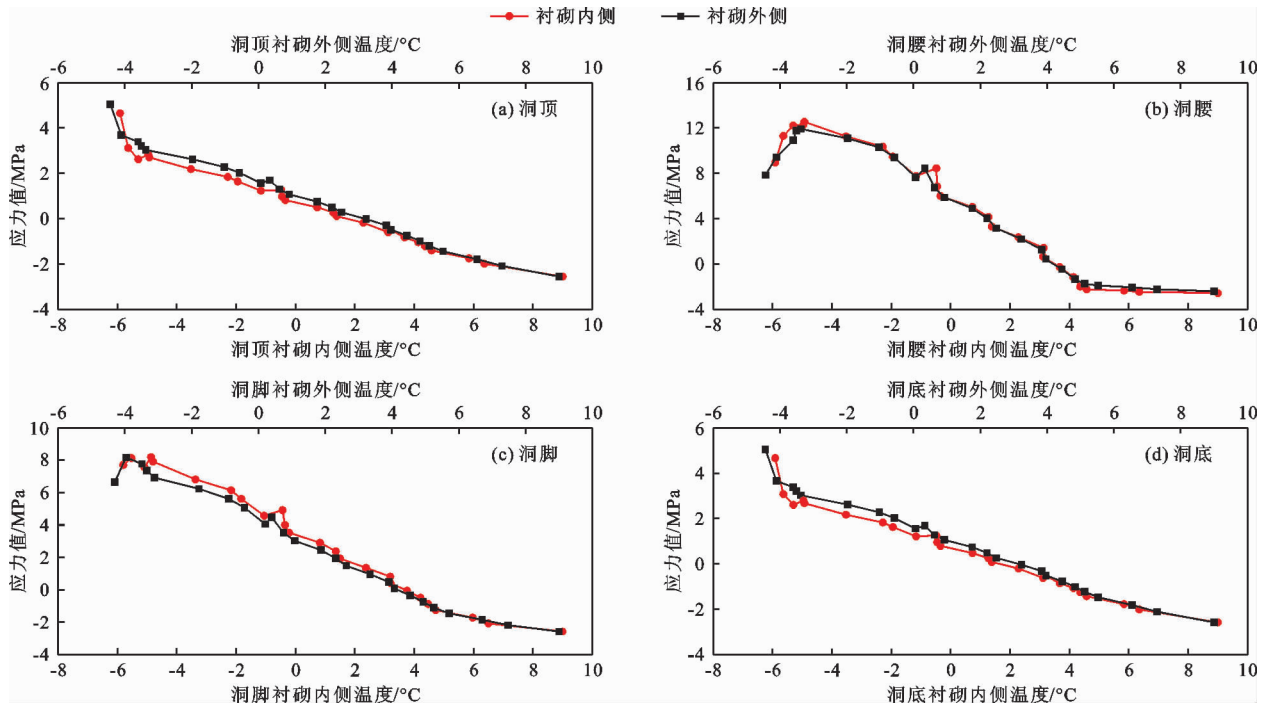


图10 隧洞N断面不同位置衬砌内、外侧温度-应力关系曲线

分析图10可知:

(1)隧洞N断面衬砌结构的内侧温度低于外侧温度,内外侧温差大约为0.7~1.5 °C。

(2)在正温区域,前期衬砌结构搭建完成后迅速对围岩进行支护,起主要承载作用,因此应力均为压应力,洞底和洞腰处应力值较其他部位最大,与文献[29]所得结果较为一致。随着时间的推移,受净空面低温影响,结构在热应力作用下内外侧应力变化幅度逐渐增大,且逐渐转为以拉应力为主。

(3)同一温度下洞顶和洞底的衬砌外侧应力大于内侧应力,在正温区随着温度的降低拉应力平稳上升,温度下降至-1.95 °C后拉应力急剧上升,且内、外侧应力随温度呈线性变化,结构受净空面低温影响,衬砌的热应力温度敏感性更高;洞腰、洞脚处的衬砌内侧应力大于外侧应力,由于隧洞自身的约束作用,洞腰衬砌临空面在上部围岩荷载、下部挤压、周边围岩被动支护反力及净空面热应力的共同作用下,洞腰衬砌前期受压,随着温度的降低拉应力

急剧增加,温度下降至-3.5 °C后拉应力减小,洞腰衬砌结构较其他位置受热应力作用更为明显,与文献[15]所得结果较为一致。

5 结论

本文依托新疆某寒冷地区深埋引水隧洞,对隧洞进口段轴向横断面在温度-应力作用下耦合结构的瞬态温度场和应力场变化情况进行模拟分析,结合现场监测结果,初步揭示出热力作用下深埋水工隧洞围岩-衬砌沿洞轴向的受力特性及相互作用机制,主要研究成果如下:

(1)在监测期内,2017年12月1日前为低温影响初期,初期隧洞衬砌外侧应力波动幅度较大。低温影响后期,结构应力波动幅度虽然较大但量值较小,衬砌外侧应力于2018年1月20日达到最大值;受低温影响,洞顶衬砌外侧大部分时间承受拉应力,且衬砌内、外侧压力变幅最大,达7.1 MPa,约为洞腰和洞底的14倍和2倍。洞腰热敏性较高,监测

48 d 后温度骤降造成内侧压应力突增。洞底应力波动幅度较小但量值最大。因此,寒区隧洞应对洞顶及洞腰处施加防寒措施以降低其温度应力。

(2) 实施防寒保温措施,保证在极端天气下结构沿径向 2.7 m 内温度不低于 0 °C;对流 48 d 前,隧洞衬砌内侧受拉应力,由于洞腰处的热敏性较高,拉应力在 N 断面洞腰处增量最大,达 155 kPa,48 d 后结构压应力激增,且在 48 ~ 60 d 内耦合应力增长速率最快。热力作用下围岩-支护耦合结构的最大值并非出现在温度最低时,应力的大小同时还受到衬砌支反力、围岩被动支反力以及围岩外边界约束的共同耦合作用影响。

(3) 隧洞进口附近 N 断面衬砌结构的内侧温度低于外侧温度,内外侧温差约为 0.7 ~ 1.5 °C;受净空低温及围岩-衬砌相互作用的影响,结构同一断面不同位置的内、外侧应力具有不同的变化规律。了解热力作用下围岩-支护耦合结构相互作用的动态过程,是保证隧洞安全施工和运行的关键。

参考文献:

- [1] 李双洋,牛富俊,孙志忠,等. 多年冻土区姜路岭隧道施工水热力数值研究[J]. 冰川冻土,2018,40(5):966-973.
- [2] 严健,何川,曾艳华,等. 高海拔特长隧道低温大风环境及对围岩-结构温度场的影响[J]. 中国公路学报,2019,32(11):192-201.
- [3] ZHOU Xiaohan, ZENG Yanhua, FAN Lei. Temperature field analysis of a cold-region railway tunnel considering mechanical and train-induced ventilation effects [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 100: 114-124.
- [4] 李思,孙克国,仇文革,等. 寒区隧道温度场的围岩热学参数影响及敏感性分析[J]. 土木工程学报,2017,50(S1):117-122.
- [5] 孟尧,姜海波. 基于对流-导热耦合模型的寒区水工隧洞围岩温度场分布规律研究[J]. 水资源与水工程学报,2020,31(1):221-226+233.
- [6] 丁浩,刘瑞全,胡居义,等. 姜路岭隧道温度场特性分析[J]. 现代隧道技术,2015,52(1):76-81.
- [7] 郭瑞,郑波,方林,等. 寒区隧道纵向温度场分布特征的模型试验研究[J]. 现代隧道技术,2021,58(5):129-139.
- [8] 严健,陈四来,何川,等. 平导压入通风对寒区隧道风温场的影响性研究[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(4):1328-1336.
- [9] 黄诗冰,刘泉声,刘艳章,等. 低温热力耦合下岩体椭圆孔(裂)隙中冻胀力与冻胀开裂特征研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(3):459-467.
- [10] 陈华鑫,黄庆庆,何锐,等. 高寒高海拔地区长大隧道温度场测试与二衬结构应力场耦合分析[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2021,42(2):242-248.
- [11] 谭贤君,陈卫忠,伍国军,等. 低温冻融条件下岩体温度-渗流-应力-损伤 (THMD) 耦合模型研究及其在寒区隧道中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(2):239-250.
- [12] NEAUPANE K M, YAMABE T. A fully coupled thermo-hydro-mechanical nonlinear model for a frozen medium[J]. Computers and Geotechnics, 2001, 28(8): 613-637.
- [13] GATMITI B, Delage P. A formulation of fully coupled thermal-hydraulic-mechanical behaviour of saturated porous media—Numerical approach [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(3): 199-225.
- [14] 司政,霍晓宇,辛兰芳. 围岩温度对输水洞衬砌混凝土温度与温度应力的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2):151-157.
- [15] 陈勤,段亚辉. 洞室和围岩温度对泄洪洞衬砌混凝土温度和温度应力影响研究[J]. 岩土力学,2010,31(3):986-992.
- [16] PANET M. Recommendations on the convergence-confinement method[R]. Paris: French Association of Tunnels and Underground Space, 2001.
- [17] ORESTE P P. The convergence-confinement method: Roles and limits in modern geomechanical tunnel design [J]. American Journal of Applied Sciences, 2009, 6(4): 757-771.
- [18] ORESTE P P. Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence-confinement approach [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(4): 347-363.
- [19] 孙振宇,张顶立,房倩,等. 隧道初期支护与围岩相互作用的时空演化特性[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(S2):3943-3956.
- [20] 李之达,康冕,靳华蕾,等. 隧道施工中围岩与支护结构的黏弹性分析[J]. 固体力学学报,2013,34(6):620-627.
- [21] 李俊,方朝阳. 围岩特性与衬砌厚度对隧洞衬砌混凝土温度应力的影响[J]. 长江科学院院报,2016,33(3):132-136.
- [22] 张玉军,张维庆. 热-水-力共同作用下圆形洞室弹塑性解析解[J]. 岩土力学,2013,34(S2):41-44.
- [23] 岳海,苏永华,方砚兵. 深部围岩非规则破裂化的温度效应分析[J]. 水文地质工程地质,2017,44(1):48-56.
- [24] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [25] 刘怀付. 考虑脆性损伤和渗流的圆形水工隧洞稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术,2017,13(4):94-100.
- [26] 郑颖人,朱合华,方正昌,等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京:人民交通出版社,2012.
- [27] 水利水电规划设计总院. 水利水电工程地下建筑物设计手册[M]. 成都:四川科学技术出版社,1993.
- [28] 中华人民共和国水利部. 水工隧洞设计规范:SL 279—2016 [S]. 北京:中国水利水电出版社,2016.
- [29] 周小涵. 寒区隧道围岩与风流的对流-导热耦合作用及其应用研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.