



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2306254

引用格式:王家辉,姜海波,喻天龙.考虑应力路径的深埋高地温隧洞黏弹-塑性围岩解析解[J].科学技术与工程,2024,24(16):6882-6890.

Wang Jiahui, Jiang Haibo, Yu Tianlong. Considering the analytical solution of viscoelastic-plastic surrounding rock in deep buried hydraulic tunnels at high ground temperature under stress path[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(16): 6882-6890.

水利工程

考虑应力路径的深埋高地温隧洞黏弹-塑性围岩解析解

王家辉¹, 姜海波^{2*}, 喻天龙³

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832003; 2. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 新疆兵团勘测设计院(集团)有限责任公司, 石河子 832003)

摘 要 高地温深埋水工隧洞黏弹-塑性岩体中,由于高温环境的影响和隧洞降温等,致使围岩产生一定的温度应力。因此研究高地温隧洞围岩解析解时必须研究温度应力对围岩塑性区以及应力应变的影响。基于广义 Kelvin 模型与 Bingham 模型组成的高地温深埋水工隧洞黏弹塑性围岩力学模型,并在考虑应力路径对围岩与支护的影响下,结合高地温环境中温度应力对围岩与衬砌的影响,进而推导高地温环境热力耦合作用下围岩应力、应变、洞壁位移以及围岩塑性区半径的解析解。基于新疆某高地温水工隧洞工程进行分析与计算,对温度、围岩应力应变及塑性区半径的关系展开理论计算与分析。结果表明:考虑温度应力后计算得到的围岩位移更小。当隧洞内温度变化到达一定量时,所产生的温度应力可能会对围岩与衬砌相互作用的稳定性产生影响。

关键词 水工隧洞; 应力路径; 温度应力; 温度场; 黏弹-塑性; 让压支护

中图分类号 TV223.1; **文献标志码** A

Considering the Analytical Solution of Viscoelastic-plastic Surrounding Rock in Deep Buried Hydraulic Tunnels at High Ground Temperature under Stress Path

WANG Jia-hui¹, JIANG Hai-bo^{2*}, YU Tian-long³

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China;

2. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agriculture University, Urumqi 830052, China;

3. Xinjiang Corps Survey and Design Institute (Group) Co., Ltd., Shihezi 832003, China)

[Abstract] In the viscoelastic-plastic rock mass of the hydraulic tunnel buried deep in high ground temperature, due to the influence of high temperature environment and tunnel cooling, certain temperature stress is generated in the surrounding rock. Therefore, when studying the analytical solution of surrounding rock of high geothermal tunnel, it is necessary to study the influence of temperature stress on the plastic zone and stress strain of the surrounding rock. Based on the mechanical model of viscoelastic-plastic surrounding rock of high-geothermal deep-buried hydraulic tunnel composed of generalized Kelvin model and Bingham model, and considering the influence of stress path on surrounding rock and support, combined with the influence of temperature stress on surrounding rock and lining in high-geothermal environment, the analytical solutions of stress, strain, cave wall displacement and radius of plastic zone radius of surrounding rock under the thermodynamic coupling of high-geothermal environment were derived. Based on the analysis and calculation of a highland temperature hydraulic tunnel project in Xinjiang, the relationship between temperature, stress strain and plastic zone radius of surrounding rock was theoretically calculated and analyzed. The results show that the displacement of the surrounding rock calculated after considering the temperature stress is smaller. When the temperature change in the tunnel reaches a certain amount, the resulting

收稿日期: 2023-08-13 修订日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(51769031); 兵团区域创新引导计划(2021BB004)

第一作者: 王家辉(2000—), 男, 汉族, 湖北孝感人, 硕士研究生。研究方向: 寒旱区水工结构。E-mail: w15971296844@163.com。

* 通信作者: 姜海波(1982—), 男, 汉族, 湖南长沙人, 博士, 教授。研究方向: 多场耦合作用下岩土体多尺度损伤破坏与稳定。E-mail: klaud_123@163.com。

投稿网址: www.stae.com.cn

temperature stress may affect the stability of the surrounding rock interaction with the lining.

[**Keywords**] hydraulic tunnels; stress paths; temperature stress; temperature field; viscoelastic-plasticity; let the pressure support

西北地区地势复杂,在深埋隧洞的施工中可能会遇到许多地质问题,其中包括高地应力、高地温、围岩应力与变形的黏弹-塑性分析以及支护方式与支护时机等重要问题。圆形隧洞由于其良好的受力与承载能力被广泛使用在理论模型与实际工程中。郑颖人^[1]从力学角度与地下工程设计阐述了黏弹塑性等工程问题。目前,在极坐标下的圆形孔周边应力计算式已经被普遍应用。张亮亮等^[2-3]推导了在恒应力下的黏弹塑性损伤蠕变模型,并进一步研究复合应力下的黏弹塑性蠕变模型。Li^[4]通过研究不同时间与刚度下的围岩与支护相互作用的特征曲线,进而推测两特征曲线的交点即为相互作用的稳定点。Kargar^[5]在 Burgers 模型和 Mohr-Coulomb 准则的基础上推导了黏弹-塑性围岩与支护作用的应力、应变计算公式。夏才初等^[6]推导了考虑应力路径影响的黏弹塑性围岩与支护作用的力学解答,并得出黏弹塑性围岩在考虑应力路径情况下塑性区半径不会发生变化。对于黏弹塑性的研究已有很多,但以上均未考虑到高地温环境下温度对于黏弹塑性围岩的影响。

高地温环境下,首先要考虑温度场的影响。对此,蔡晓鸿等^[7]对于深埋隧洞温度场的计算和温度应力对于支护和围岩的影响给出了解答。周小涵等^[8]研究了高温隧洞空气间的传热规律并分析不同影响因素对隧洞内热传导的影响,为高地温隧洞降温技术提供了理论依据。马超豪等^[9]结合能量传输方程,对隧洞内通风降温问题展开研究,得出通风的温度占比较多。郭瑞等^[10]研制了一种模拟寒区隧洞纵向温度场分布的室内模型试验装置,分析了隧洞长度、洞口气温和风速对寒区隧洞纵向温度场分布的影响及其规律。Prashant 等^[11]利用叠加原理和分离变量方法得到了圆形断面隧洞在考虑温度随坐标变化的对流边界条件下瞬态温度场的解析解。Lin 等^[12]采用数值模拟方法研究了不同围岩温度下采用不同降温措施的隧洞温度场。

高地温环境下,围岩会有一定程度的软化和损伤。苏国韶等^[13]针对高地温水工高压隧洞,建立了包含岩石损伤的水-力-热三力耦合模型,并分析了不同影响因素下的承载特性。李克妮等^[14]针对高地温深埋水工隧洞开挖下的围岩损伤区域及分布特征展开研究。尹士兵等^[15]通过对比分析高温与热处理下花岗岩物理特性得出高温下损伤更大、弹性模量更小。

随着西北地区隧洞工程的开发与建设,高地应力与围岩岩性等问题逐渐增加,因此适应高地应力的支护技术也逐渐发展,逐渐形成以“抗让结合”为理念的支护技术^[16]。Hu 等^[17]采用数值模拟方法研究了高地温隧洞喷射混凝土结构的受力性能。苏凯等^[18]建立某隧洞的二维和三维数值模型,研究不同支护时机下的围岩稳定性,最终给出基于位移完成率的最佳初次支护时机选择方法。王志龙等^[19]建立超前支护模型,分析考虑超前支护下的围岩与衬砌的相互作用机制,并得到了支护与围岩作用的动态过程解析。孙河林等^[20]推导了热力耦合作用下隧洞弹塑性围岩与支护作用的解析解,并得出考虑温度应力时对围岩与支护相互作用的影响更大。周远强等^[21]通过高温过水隧洞的面临的各种工程问题,总结了近年来高温过水隧洞围岩及衬砌结构稳定的研究进展。

综上所述,前人研究多集中在黏弹塑性围岩塑性区和塑性区半径,而结合实际工程时面对高地温环境下产生的高温影响的研究尚鲜见报道。鉴于此,推导在考虑应力路径的前提下的高地温水工隧洞黏弹塑性围岩的解析解,在考虑应力路径的前提下,分析考虑与不考虑温度应力对围岩应力路径的影响。通过对比分析考虑温度与不考虑温度下围岩应力应变与支护反力的变化,从而推导高地温深埋水工隧洞围岩与支护相互作用的解析解。为高地温深埋隧洞的设计提供参考。

1 高地温水工隧洞温度应力解析解

1.1 高地温深埋隧洞恒温半径解

高地温环境下,在初始地温与隧洞通风等降温措施导致围岩应力应变发生变化,地应力与温度应力相耦合并与支护相互作用。从力学观点分析,温度应力产生的原因可分为自生温度应力与约束温度应力。隧洞温度应力总体上可分为由混凝土冷却、洞内通风降温产生温度差、隧洞温度周期变化产生的温度应力。主要考虑围岩温度变化对衬砌产生的自生温度应力以及初始温度场自带的围岩约束温度应力,忽略衬砌产生的温度应力影响。由于实际工程中温度场并不固定,这对于温度应力的计算影响较大,因此采用恒定的温度场对于温度应力的分析而言,简化了理论计算,并且采用稳定温度场计算得到隧洞温度应力,一可以满足工程需求。已给出恒温半径及温度应力求解方法可参考

文献[7],此处不再赘述。

恒温半径 R 与岩性关系可表示为

$$\frac{R}{r_1} = f\left(\frac{2\lambda\tau_m}{c\rho r_1^2}\right) \tag{1}$$

式(1)中: r_1 为衬砌内表面到隧洞中心半径; c 为黏聚力; λ 为岩石导热系数, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ρ 为密度, kg/m^3 ; τ_m 为一年内最低温度持续时间, h ; R 为围岩恒温区半径,表示在范围以外的围岩受温度年周期的影响可以忽略不计, R 由 λ 、 ρ 、一年内最低温度 t_m (单位: $^{\circ}\text{C}$)、 τ_m 确定。

隧洞围岩恒温半径与岩性关系如表1所示。

表1 隧洞围岩恒温半径与岩性关系
Table 1 Relationship between constant temperature radius and lithology of surrounding rock of tunnel

$\frac{R}{r_0}$	1.6	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5
$\frac{2\lambda\tau_m}{c\rho r_1^2}$	0.35	1.61	3.77	6.81	10.7	15.5	21.1
$\frac{R}{r_0}$	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	
$\frac{2\lambda\tau_m}{c\rho r_1^2}$	27.6	35.2	43.3	52.5	62.4	73.2	

1.2 围岩自身温度应力

高地温环境下,热源稳定。由于隧洞通风、等问题导致温度场发生变化,对于温度变化而在围岩表面上产生的拉应力称之为围岩自身温度应力。隧洞温度分布如图1所示。假设当隧洞通风降温时衬砌最低温度为 T_1 ,由于衬砌在温度影响下内外温度变化并不大,那么此时对应的变温区内壁温度也为 T_1 。

对于围岩变温区,边界条件为

$$\begin{cases} r = r_0, t_d = T_1 \\ r = R, t_d = T_0 \end{cases} \tag{2}$$

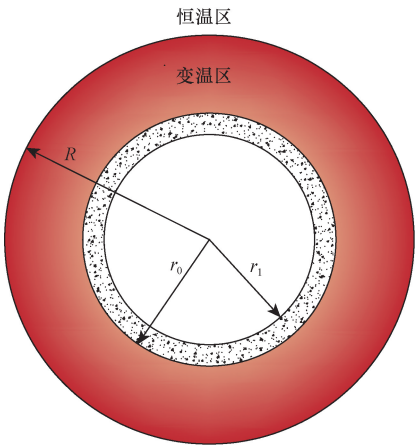


图1 隧洞温度分布计算简图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel temperature distribution calculation

式(2)中: r_0 为洞壁开挖半径; t_d 为变温区温度; T_0 为冬季过水时 R 以外的原始温度。

利用边界条件可求得围岩变温区温度分布为

$$t_d = C_d \ln \frac{r}{R} + T_0 \tag{3}$$

式(3)中: $C_d = \frac{T_0 - T_1}{\ln \frac{R}{r_1}}$ 。

自身温度应力产生的径向应力 σ_r^d 、环向应力 σ_θ^d 、围岩的位移 u_r^d 、围岩环向应变 ε_θ 和径向应变 ε_r 可分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_r^d = \frac{\alpha_d E_d C_d}{2(1-\mu_d)} \left[\frac{r_0^2 (R^2 - r^2)}{r^2 (R^2 - r_0^2)} \ln \frac{r_0}{R} - \ln \frac{r}{R} \right] \\ \sigma_\theta^d = -\frac{\alpha_d E_d C_d}{2(1-\mu_d)} \left[1 + \frac{r_0^2 (R^2 + r^2)}{r^2 (R^2 - r_0^2)} \ln \frac{r_0}{R} + \ln \frac{r}{R} \right] \end{cases} \tag{4}$$

$$u_r^d = \frac{\alpha_d (1 + \mu_d) C_d r}{2(1 - \mu_d)} \left[\ln \frac{r}{R} - (1 - \mu_d) - \frac{R^2 + (1 - 2\mu_d)r^2}{r^2 (R^2 - r_0^2)} r_0^2 \ln \frac{r_0}{R} \right] \tag{5}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u_r^d}{r}, \quad \varepsilon_r = -\varepsilon_\theta \tag{6}$$

式中: E_d 、 μ_d 、 α_d 分别为厚壁圆筒的弹性模量、泊松比、线膨胀系数;正应力以拉应力为正。

1.3 围岩与衬砌的约束温度应力

在深埋隧洞的环境下,围岩与衬砌在均匀内水压力下保持“完全接触”。主要考虑温度应力下围岩与支护相互作用,约束温度应力主要考虑衬砌与变温区的约束温度应力 p_{oc} 与变温区与恒温区的约束温度应力 p_{od} 。忽略了衬砌自身温度对与围岩的约束作用, p_{oc} 与 p_{od} 的计算参考文献[7]。

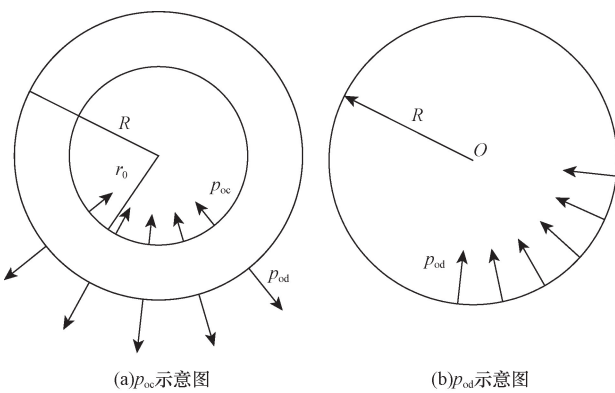


图2 约束温度应力 p_{oc} 与 p_{od} 示意图

Fig.2 Schematic diagram of p_{oc} and p_{od} with constrained temperature stress

围岩变温区产生的弹性约束温度应力产生的径向应力 σ_{rd} 、环向应力 $\sigma_{\theta d}$ 、洞壁位移 $u_r^{p_{ed}}$ 可分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rd} = \frac{r_0^2(R^2 - r^2)}{r^2(R^2 - r_0^2)}p_{oc} + \frac{R^2(r^2 - r_0^2)}{r^2(R^2 - r_0^2)}p_{od} \\ \sigma_{\theta d} = -\frac{r_0^2(R^2 + r^2)}{r^2(R^2 - r_0^2)}p_{oc} + \frac{R^2(r^2 + r_0^2)}{r^2(R^2 - r_0^2)}p_{od} \end{cases} \quad (7)$$

$$u_r^{p_{ed}} = \frac{1 + \mu_d}{E_d(R^2 - r_0^2)r} \left\{ -[(1 - 2\mu_d)r^2 + R^2]r_0^2p_{oc} + [(1 - 2\mu_d)r^2 + r_0^2]R^2p_{od} \right\} \quad (8)$$

围岩恒温区弹性约束温度应力、应变可分别表示为

$$\begin{cases} \sigma_{rd}^R = \frac{R^2}{r^2}p_{od} \\ \sigma_{\theta d}^R = -\frac{R^2}{r^2}p_{od} \end{cases} \quad (9)$$

$$u_r^{p_d} = \frac{(1 + \mu_d)R^2}{E_d r} p_{od} \quad (10)$$

由温度应力计算公式可得。对于高地温环境下的温度应力会使围岩所受的应力应变变小,当温差较大时,围岩和衬砌的应力应变就不能忽略,因此,本次研究对实际工程有重要意义。

当温度应力与高地应力耦合时,黏弹性区可能在变温区以内或者变温区之外,这是因为岩性在很大程度上影响恒温半径,此时恒温半径可以在塑性区以内,也可以在塑性区范围外,不考虑应力路径的情况下塑性区半径会随时间的推移逐渐减小,但这种现象并不合理,在文献[6]中已经给出解答,考虑应力路径时塑性区半径仍然保持不变。此时在工况不变的情况下,变温区范围与塑性区半径的大小不发生改变,计算时无需考虑塑性区半径随时间缩小的情况,不同的岩性变温区范围与塑性区半径大小都不同,这需要结合实际工程来计算。变温区、恒温区以及塑性区半径在不同岩性下不同的位置关系如图3所示。

从图3可以看出,当变温区在黏弹塑性区内时,应力应变耦合分为:一是黏弹塑性区与变温区自身温度应力和变温区约束温度应力;二是黏弹塑性区与恒温区约束温度应力;三是弹性区与恒温区约束温度应力。因为当围岩处于恒温区时,围岩自身温度应力影响甚微。但当变温区处于黏弹性区外时,黏弹塑性区的计算包含变温区自身温度应力与变温区约束温度应力,变温区超过黏弹性区范围的部分为弹性区与变温区自身温度应力与变温区约束温度应力,最外围部分为弹性区与恒温区约束温度应力。

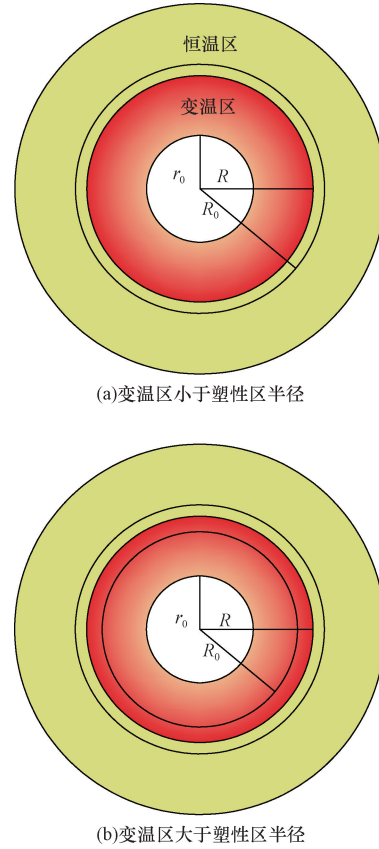


图3 温度应力范围关系

Fig. 3 Temperature stress range relationship

为简化计算公式,令 $\sigma_r^{tc} = \sigma_r^d + \sigma_{rd}$, $\sigma_{\theta}^{tc} = \sigma_{\theta}^d + \sigma_{\theta d}$, $u_r^{tc} = u_r^d + u_{rd}$ 。其中, σ_r^{tc} 为自身温度应力与约束温度应力耦合产生的径向应力, σ_{θ}^{tc} 为自身温度应力与约束温度应力耦合产生的环向应力, u_r^{tc} 为自身温度应力与约束温度应力耦合产生的洞壁位移。其他温度应力组合一律按照 σ_r^{tc} 、 σ_{θ}^{tc} 、 u_r^{tc} 表示。

由温度应力的推导进而对高地温下黏弹-塑性围岩热力耦合进行讨论与推导在理想情况下两者的耦合。

2 考虑高温效应的围岩黏弹-塑性力学响应

2.1 高温效应的隧洞围岩黏弹-塑性力学模型建立

由上文计算恒温半径与温度应力计算公式,还有变温区与塑性区的关系这三部分。将自身温度应力与约束温度应力的影响范围相组合。并结合黏弹-塑性围岩自身情况进而建立高温下的围岩黏弹-塑性力学模型。

把黏弹-塑性围岩看作黏弹性元件和塑性元件组合而成。组合模型如图4所示。黏弹性区采用广义 Kelvin 模型,塑性区采用 Bingham 模型。两者区别在于塑性部分不考虑黏性。总结前人对于深埋隧

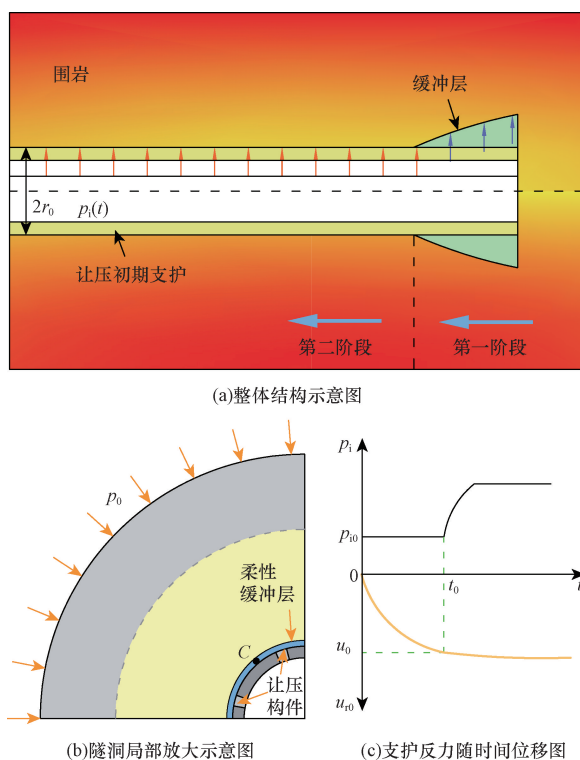


图4 边让边抗支护模型

Fig. 4 Resistance support model while letting go

洞支护上的研究,选取“先控再让后抗”“边让边抗”“先让后抗”3种支护方式,这3种都是让抗结合的支护方式,但它们的支护时机与支护方式都是不同的,从而所产生的支护效果也不同,不同的支护方式适用于不同的工况。

对于“先让后抗”是让围岩先释放一定的应力和应变,等围岩到了一定程度的变形后再施加永久支护。“先控再让后抗”是开挖后立即施加主动支护。支护方式不同,力学响应也会有所差异。

文献[6]中对不同初始地应力和围岩参数的条件下支护方式的选取已经给出解答,当地应力小于20 MPa时,边让边抗的效果最好,选取边让边抗的支护方式能达到更好的效果。

2.2 考虑应力路径下高地温隧洞围岩应力与变形的黏弹-塑性分析

黏弹-塑性围岩与支护作用分为两个阶段:第一阶段过程中支护反力为常数;第二阶段围岩与支护相互作用,支护反力逐渐增加。某些岩体和土具有比较明显的流变特性,因此在围岩稳定性分析中,必须涉及围岩应力、变形、破坏失稳及其形成的时间过程。物体受力后,除了产生可恢复的弹性变形外,有的还会出现不可恢复的塑性流动变形和黏性

流动变形。所谓的黏性流动,就是指物体中存在速度梯度 $\gamma = \frac{dy}{dt}$ 的流动。而文献[1]中对黏弹-塑性的解答中并未考虑应力路径,从而塑性区半径会随时间增加而减小。文献[6]对于考虑应力路径下黏弹-塑性围岩给出了塑性区半径不变的结论,在支护反力增加的过程中,只是塑性区围岩的应力状态从屈服面上回到屈服面内,但原有的塑性区应变是不可逆的,从而无法恢复。塑性区半径不随时间改变,应力应变的计算考虑随时间增加的附加支护反力,附加支护反力参考文献[1]中支护反力求解。忽略高温效应对围岩的损伤等,假设围岩温度应力应变与黏弹-塑性力产生的应力应变相互独立。黏弹-塑性力模型如图5所示。

随着围岩的流变效应,应力应变会变成关于时间 t 的函数,但此时塑性区半径由于考虑了应力路径从而成为一个常数,此外,温度应力下,支护反力减小,但支护反力总体还是在增加,只是塑性区状态改变,塑性区半径也不会发生改变,得出考虑应力路径与高地温下黏弹-塑性解仍不变,塑性区半径解为

$$R_0 = r_0 \left[\frac{(p_0 + c \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{p_{i0} + c \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \quad (11)$$

式(11)中: p_{i0} 为初始支护反力; φ 为内摩擦角; p_0 为初始地应力。

考虑应力路径下得出塑性区半径不变,塑性区半径就采用式(11),塑性区和黏弹性区的解,得出洞壁位移 $u_0(t)$ 和附加支护反力 $dp_i(t)$ 关于时间 t 的函数为

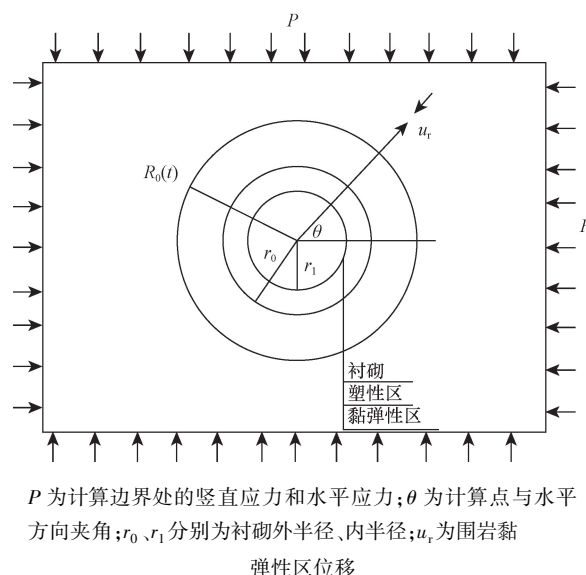


图5 黏弹塑性围岩力学模型

Fig. 5 Mechanical model of viscoelastic-plastic surrounding rock

$$u_0(t) = \frac{MR_0^2}{2r} \left\{ \frac{1}{G_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right] + \frac{1}{G_2} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right\} \quad (12)$$

$$dp_i(t) = K_c \left\{ \frac{MR_0^2}{2G_\infty r_0} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right] + \frac{MR_0^2}{2G_2 r_0} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) - u_0 \right\} \quad (13)$$

式中: $G_\infty = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2}$; $\eta_{rel} = \frac{\eta}{G_1}$; $G_0 = G_2$, 其中 G_1 、 G_2 为剪切模量; η_{rel} 为围岩松弛时间; $M = p_0 \sin\varphi + c \cos\varphi$; η 为黏滞系数; K_c 为支护刚度系数; u_0 为有支护围岩 $t=0$ 时洞壁径向位移。

黏弹性区围岩位移 u_r 、径向应力 σ_r 、环向应力 σ_θ 可分别表示为

$$\begin{cases} u_r = \frac{MR_0^2}{2r} \left\{ \frac{1}{G_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right] + \frac{1}{G_2} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right\} - \frac{dp_i(t)r_0^2}{2G_2 r} \\ \sigma_r = P - M \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \\ \sigma_\theta = P + M \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中: dp_i 为附加支护反力, 其中 d 表示附加。

假定塑性区体积应变不变, 则塑性区径向应力 σ_r^p 、环向应力 σ_θ^p 和围岩位移 $u^p(t)$ 可分别表示为

$$\sigma_r^p = (p_{i0} + c \cot\varphi) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} - c \cot\varphi + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \quad (15)$$

$$\sigma_\theta^p = (p_{i0} + c \cot\varphi) \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} - c \cot\varphi - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \quad (16)$$

$$u^p(t) = \frac{R_0^2}{r} \left\{ \frac{M}{2G_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right] + \frac{M}{2G_0} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right\} - \frac{dp_i(t)r_0^2}{2G_2 r} \quad (17)$$

温度应力与黏弹-塑性产生的应力、应变相互独立, 将温度应力产生的应力应变叠加到塑性区域和黏弹塑性区域中, 温度应力有变温区与恒温区产生的自生温度应力与约束温度应力, 需要分区域叠加

在围岩塑性区域和黏弹塑性区域。用温度应力产生的径向应变 σ_r^{tc} 、环向应变 σ_θ^{tc} 、围岩位移 u_r^{tc} 表示变温区范围与塑性区位置关系的不同情况。由于考虑应力路径的情况下避免了出现塑性区缩小而产生的随时间变化的塑性区半径问题, 此时对于温度应力的耦合就不会随时间变化而改变的塑性区半径, 从而影响围岩的应力和应变值。

将塑性区围岩的温度应力当成热弹性处理, 在一定的温度范围内可以忽略岩石热损伤等问题, 得出考虑温度应力下的黏弹塑性径向应力 $\sigma_r^c(t)$ 、环向应力 $\sigma_\theta^c(t)$ 及围岩位移 $u^c(t)$ 为

$$\sigma_r^c(t) = (p_{i0} + c \cot\varphi) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} - c \cot\varphi - \sigma_r^{tc} + \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \quad (18)$$

$$\sigma_\theta^c(t) = (p_{i0} + c \cot\varphi) \left(\frac{1 + \sin\varphi}{1 - \sin\varphi} \right) \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{2 \sin\varphi}{1 - \sin\varphi}} - c \cot\varphi - \sigma_\theta^{tc} - \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 dp_i(t) \quad (19)$$

$$u^c(t) = \frac{R_0^2}{r} \left\{ \frac{M}{2G_\infty} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right] + \frac{M}{2G_0} \exp\left(-\frac{t}{\eta_{rel}}\right) \right\} - u_r^{tc} - \frac{dp_i(t)r_0^2}{2G_2 r} \quad (20)$$

2.3 工程算例分析

新疆某水工隧洞全长 18 km, 洞室最大埋深约为 1 500 m, 围岩深处温度约为 80 °C, 隧洞通风后, 衬砌面温度为 20 °C。隧洞开挖半径 $r_0 = 1.5$ m, 初始地应力 $p_0 = 20$ MPa, 围岩的剪切模量 $G = 0.5$ GPa, 泊松比 $\nu = 0.25$, 黏聚力 $c = 1.0$ MPa 和 $\varphi = 29^\circ$ 。在隧洞开挖后施加初始支护反力 $p_{i0} = 0.3$ MPa。均匀内水压力 $p_0 = 2 \times 10^3$ kPa, 最低温 $t_m = 5$ °C。围岩热力学参数 $\lambda = 1.49$ W/(m·K), $\tau_m = 90$ d, $c = 0.985$ kJ/(kg·K), $\rho_d = 2.7 \times 10^3$ kg/m³, $E_d = 5$ GPa, $\mu_d = 0.25$, $\alpha_d = 0.5 \times 10^{-5}$ kg/m³, $T_d^0 = 10$ °C, 黏滞系数 $\eta = 5$ GPa·d, 剪切模量 $G_1 = 0.5$ GPa, $G_2 = 5$ GPa。采用边让边抗, 第一阶段施加初始支护, 待到一定位移量后再施加强支护。第二阶段强支护的刚度 $K_s = 4 \times 10^4$ kN/m³。

考虑应力路径的情况下, 随着时间的推移, 黏弹塑性围岩独有的流变效应所产生的附加支护反力也逐渐增加, 黏弹塑性围岩流变效应愈发明显, 支护反力逐渐增加, 最后趋于稳定, 由于温度场恒定, 以至于对于不同时间下的围岩, 温度应力所产生的应力随距离变化是不变的。

图 6 给出考虑应力路径和温度应力下围岩应力、

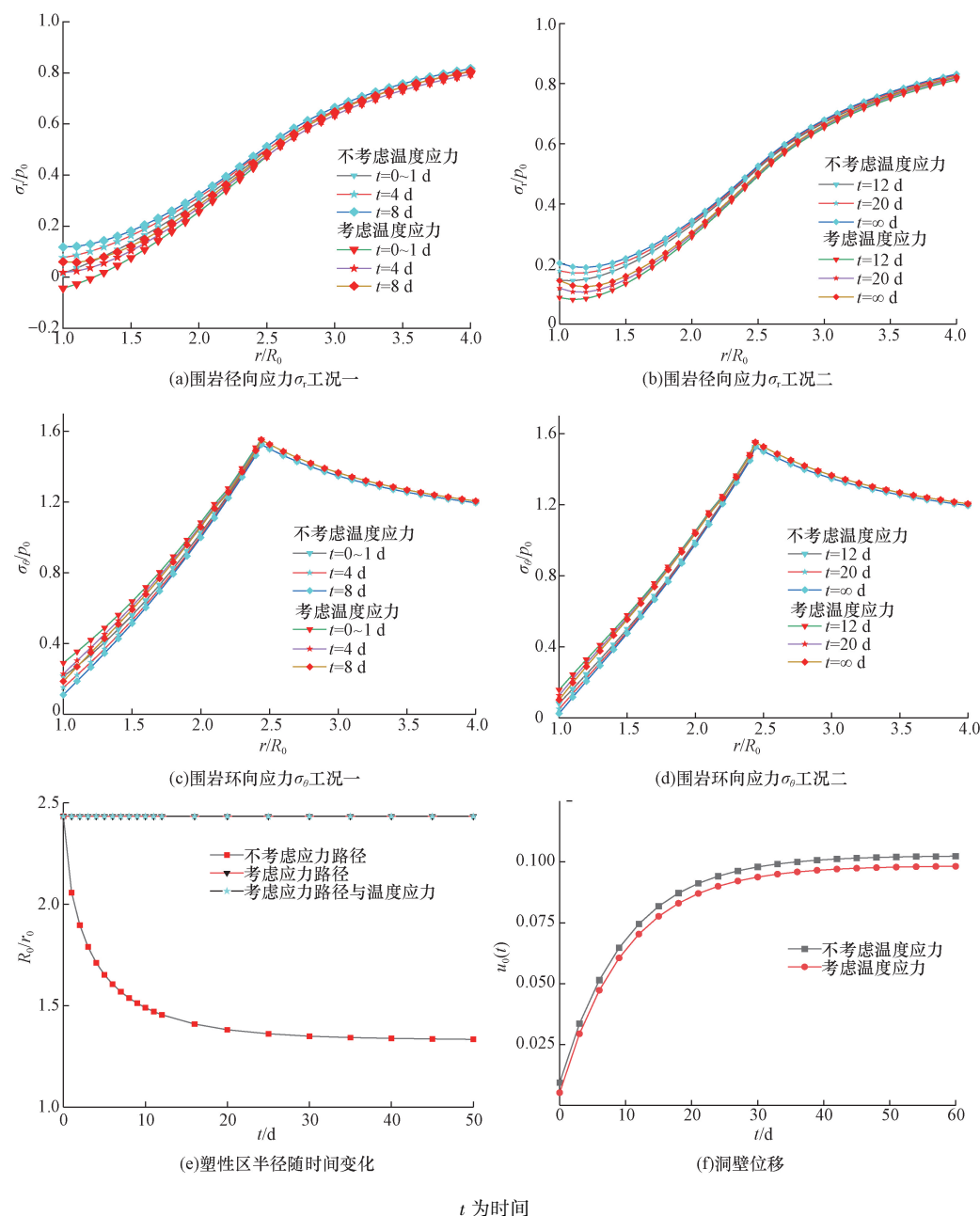


图6 围岩应力、塑性区半径及洞壁位移对比

Fig. 6 Comparison of surrounding rock stress, plastic zone radius and cave wall displacement

塑性区半径及洞壁位移对比。自身温度应力与热弹性约束应力对围岩产生的拉应力致使围岩应力变小,支护反力也随之减小。可以看出,超过变温范围时只剩下约束温度应力对围岩产生影响,随着距离的增加,温度应力也逐渐趋于稳定,考虑温度应力的正应力在变温区范围内的变化较大,随着逐渐接近变温区与恒温区的交界面,温度应力的作用逐渐减下,环向应力也是如此。对于正应力,温度应力的方向与围岩相反,对于环向应力则与围岩相同方向。总体上对衬砌产生一个拉力,使之位移变小,使围岩对支护的力也减小。但随着围岩半径

的增加,温度应力的影响逐渐趋近于0。

图6反映出考虑与不考虑应力路径和温度应力的差别明显。若考虑温度应力影响,与不考虑温度应力情况下进行对比,在隧洞洞壁增加支护反力后,围岩径向应力会偏小,环向应力偏大。但温度应力的影响范围是有限的,塑性区在考虑应力路径时不会缩小。洞壁位移相比于不考虑温度应力时会有所减小。这是由于温度应力会对衬砌产生向围岩方向的拉力,导致衬砌的总支护反力有所减小。

从图6可以看出,考虑温度应力时围岩径向应力偏小,反之环向应力会偏大。随着时间推移,洞

壁前期位移变化较大,随着时间变化逐渐稳定,在温度应力影响下位移会有所减小,相比于不考虑温度应力时位移差为温度应力所产生的位移,随时间不发生变化,为固定值。当围岩半径增大时,温度应力的影响会逐渐减小。所以研究高地温环境时有必要考虑温度应力的影响,由温度产生的应力与围岩自生力相互作用时,考虑温度时总应力会不同于不考虑温度下的计算结果,从图中可以明显看出考虑温度应力时的围岩变形会偏小,衬砌支护反力与洞壁位移也会偏小。

3 结论

通过推导考虑应力路径的情况下关于温度应力影响的黏弹-塑性围岩与支护相互作用的解析解,研究高地温下温度应力的影响范围与围岩塑性区的关系。得出以下主要结论。

(1)基于广义 Kelvin 模型和 Mohr-Coulomb 强度准则以及应力路径影响,推导了圆形水工隧洞在温度场的热力耦合作用下黏弹-塑性围岩在支护作用下应力、应变及洞壁位移等随时间变化的表达式,并用 MATLAB 软件计算拟合曲线,得到的结果符合 Kastner 公式,表明公式推导的正确性。

(2)考虑与不考虑温度应力两种不同情况下计算得到的围岩洞壁位移、围岩支护反力、应力和应变差别明显,考虑温度应力计算得到的围岩位移更小。说明在水工隧洞稳定分析时必须考虑温度的影响。

参 考 文 献

- [1] 郑颖人. 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.
Zheng Yingren. Stability analysis and design theory of surrounding rock in underground engineering[M]. Beijing: People's Communications Press, 2012.
- [2] 张亮亮, 王晓健. 岩石黏弹塑性损伤蠕变模型研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1085-1092.
Zhang Liangliang, Wang Xiaojian. Study on creep model of rock viscoelastic-plastic damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1085-1092.
- [3] 张亮亮, 王晓健. 考虑黏弹塑性应变分离的岩石复合蠕变模型研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(5): 1655-1665.
Zhang Liangliang, Wang Xiaojian. Study on rock composite creep model considering viscoelastic-plastic strain separation[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2021, 52(5): 1655-1665.
- [4] Li C. Study on the loading and deformation of tunnel segments in soft clay with consideration for the soil mass rheological characteristics[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(2): 1-10.
- [5] Kargar R A. An analytical solution for circular tunnels excavated in rock masses exhibiting viscous elastic-plastic behavior[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2019, 124: 104128.
- [6] 夏才初, 徐晨, 杜时贵. 考虑应力路径的深埋隧洞黏弹-塑性围岩与支护相互作用[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(9): 1789-1802.
Xia Caichu, Xu Chen, Du Shigui. Interaction between viscoelastic-plastic surrounding rock and support in deep buried tunnel considering stress path[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(9): 1789-1802.
- [7] 蔡晓鸿, 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 Xiaohong, Cai Yongping. Structural stress calculation of hydraulic pressure tunnel[M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2004.
- [8] 周小涵, 曾艳华, 杨宗贤, 等. 高地温隧洞温度场的数值解[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1406-1411.
Zhou Xiaohan, Zeng Yanhua, Yang Zongxian, et al. Numerical solution of temperature field of tunnel with high ground temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1406-1411.
- [9] 马超豪, 梁艳, 汪涛, 等. 基于高地温隧洞热流耦合温度场的数值模拟研究[J]. 北方交通, 2023(1): 77-80.
Ma Chaohao, Liang Yan, Wang Tao, et al. Numerical simulation study based on heat flow coupling temperature field of high ground temperature tunnel[J]. North Communications, 2023(1): 77-80.
- [10] 郭瑞, 郑波, 方林, 等. 寒区隧洞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.
Guo Rui, Zheng Bo, Fang Lin, et al. Model test study on longitudinal temperature field distribution characteristics of tunnel in cold region[J]. Modern Tunnel Technology, 2021, 58(5): 129-139.
- [11] Prashant K J, Suneet S, Rizwan U. Analytical solution to transient asymmetric heat conduction in a multi-layer annul[J]. Journal of Heat Transfer, 2009, 131(1): 1-7.
- [12] Lin M, Zhou P, Jiang Y F, et al. Numerical investigation on comprehensive control system of cooling and heat insulation for high geothermal tunnel: a case study on the highway tunnel with the highest temperature in China[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 173: 107385.
- [13] 苏国韶, 秦子华, 彭立锋, 等. 基于热-水-力-损伤耦合数值模型的高地温水工高压隧洞围岩承载特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 308-319, 330.
Su Guoshao, Qin Zihua, Peng Lifeng, et al. Bearing characteristics of surrounding rock of highland temperature hydraulic high-pressure tunnel based on thermo-hydraulic-damage coupling numerical model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 308-319, 330.
- [14] 李克妮, 张军, 吴鹏, 等. 深埋高地温水工隧洞开挖损伤区特征及分布规律研究[C]//第29届全国结构工程学术会议论文集. 北京: 中国力学学会, 2020: 29-36.
Li Keni, Zhang Jun, Wu Peng, et al. Study on the characteristics and distribution law of excavation damage zone of deep buried high-altitude warm hydraulic tunnel[C]//Proceedings of the 29th National Conference on Structural Engineering. Beijing: Chinese Mechanics Society, 2020: 29-36.
- [15] 尹士兵, 舒荣华, 李夕兵, 等. 高温作用下和加热冷却后花岗岩

- 岩力学性能的比较[J]. 中国有色金属学会学报, 2016, 26(7): 1926-1937.
- Yin Tubing, Shu Ronghua, Li Xibing, et al. Comparison of mechanical properties of granite under high temperature and after heating and cooling[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(7): 1926-1937.
- [16] 刘宇鹏, 夏才初, 吴福宝, 等. 高地应力软岩隧洞长、短锚杆联合支护技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 105-114.
- Liu Yupeng, Xia Caichu, Wu Fubao, et al. Research on the combined support technology of long and short anchor rods for high stress soft rock tunnels[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 105-114.
- [17] Hu Y P, Wang Q L, Wang M N, et al. A study on the thermo-mechanical properties of shotcrete structure in a tunnel, excavated in granite at nearly 90 °C temperature[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 110(2): 103830.
- [18] 苏凯, 崔金鹏, 张智敏. 隧洞施工开挖过程初次支护时机选择方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(8): 3075-3082.
- Su Kai, Cui Jinpeng, Zhang Zhimin. Method for selecting the timing of initial support during tunnel construction and excavation process[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2015, 46(8): 3075-3082.
- [19] 王志龙, 王明年, 严志伟, 等. 考虑超前支护作用效应的围岩-支护相互作用机制研究[J]. 隧洞建设, 2021, 41(10): 1748-1755.
- Wang Zhilong, Wang Nianniao, Yan Zhiwei, et al. Study on surrounding rock-support interaction mechanism considering advanced support effect[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1748-1755.
- [20] 孙河林, 喻天龙, 姜海波. 热力耦合作用下圆形水工隧洞围岩弹塑性解析解[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(12): 5234-5243.
- Sun Helin, Yu Tianlong, Jiang Haibo. Elastoplastic solution of surrounding rock of circular hydraulic tunnel under thermodynamic coupling[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(12): 5234-5243.
- [21] 周远强, 曹杰, 李有峰, 等. 高温过水隧洞围岩及衬砌结构稳定性研究进展[J]. 西北水电, 2020(6): 33-38.
- Zhou Yuanqiang, Cao Jie, Li Youfeng, et al. Research progress on stability of surrounding rock and lining structure of high temperature water-passing tunnel[J]. Northwest Hydropower, 2020(6): 33-38.