

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2024.06.001

考虑温度和损伤的圆形巷道围岩弹塑性分析

贺 杨, 杨自友, 高 鹏, 尚阳光, 张 煜, 刘俊杰

(安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为研究圆形巷道围岩在温度应力和损伤作用下的塑性区半径及应力分布规律, 基于统一强度理论, 推导了围岩在温度应力和损伤耦合作用下的应力场、位移场和塑性区范围的计算公式。结合具体算例, 分析了损伤、温度应力等因素对巷道围岩应力和塑性区范围的影响, 计算结果表明: 损伤和温度应力等因素均对巷道围岩应力和塑性区半径产生较大影响, 其中损伤-温度应力共同作用时所造成的塑性区半径最大, 相较于仅有围岩应力作用时的塑性区范围增加了8.1%。因此探究巷道在温度应力和损伤作用下围岩塑性区半径及应力分布规律是必要的, 可以为巷道工程的优化支护设计和稳定性分析提供理论依据。

关键词: 统一强度理论; 温度应力; 损伤; 圆形巷道; 弹塑性解

中图分类号: TU457

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2024)06-0001-08

引文格式: 贺 杨, 杨自友, 高 鹏, 等. 考虑温度和损伤的圆形巷道围岩弹塑性分析 [J]. 湖南工业大学学报, 2024, 38(6): 1-8, 28.

An Elasto-Plastic Analysis of Surrounding Rocks of Circular Roadway Considering Temperature and Damage

HE Yang, YANG Ziyu, GAO Peng, SHANG Yangguang, ZHANG Yu, LIU Junjie

(School of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China)

Abstract: In view of a study on the plastic zone radius and stress distribution law of circular roadway surrounding rocks under temperature stress and damage effects, based on the unified strength theory, the calculation formulas can be derived for the stress field, displacement field, and plastic zone range of surrounding rocks under the coupling effect of temperature stress and damage. Combined with concrete examples, an analysis is made of the effects of damage, temperature stress and other factors on the stress and plastic zone range of roadway surrounding rocks. The calculation results show that such factors as damage and temperature stress have a significant impact on the stress and plastic zone radius of the roadway surrounding rocks. Among them, the plastic zone radius caused by the combined effect of damage and temperature stress is the largest, which increases by 8.1% compared with the plastic zone range caused by the surrounding rock stress only. Therefore, it is necessary to explore the radius and stress distribution of the plastic zone of surrounding rock in tunnels under the effects of temperature stress and damage, which can provide a theoretical basis for an optimal support design and stability analysis of tunnel engineering.

Keywords: unified strength theory; temperature stress; injury; circular roadway; elasto-plastic solution

收稿日期: 2023-12-26

基金项目: 安徽省高校自然科学基金资助重点项目 (KJ2021A0610)

作者简介: 贺 杨, 男, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为岩土工程强度理论与应用, E-mail: 534071622@qq.com

通信作者: 杨自友, 男, 安徽建筑大学教授, 博士, 主要研究方向为岩土工程与矿业工程,

E-mail: zyyang@mail.us.tc.edu.cn

0 引言

随着巷道工程的不断开挖,围岩附近的温度场和应力场也随之改变^[1],其不断影响着围岩的力学形态,因此对围岩在温度应力和损伤作用下进行弹塑性分析,对巷道工程的优化支护设计和稳定性分析有着重要意义。近年来,很多学者对不同影响因素下的围岩力学形态进行了研究,并取得了丰富的成果。如张玉洁等^[2]通过某寒区深埋引水隧洞推导了其热力作用下的支护反力方程;黎明镜^[3]通过有限元程序 ANSYS 进行热力耦合数值模拟,并分析了热力耦合对围岩应力和塑性区范围的影响;惠强等^[4]基于统一强度理论推导了热-力耦合作用下的弹塑性区应力方程,并结合算例分析了其对围岩应力的影响;高召宁等^[5]结合 Drucker-Prager 强度准则推导了围岩在损伤和扩容作用下弹塑性区的应力解和位移解;赵光明等^[6]通过引入非线性的损伤本构模型,对巷道围岩进行了弹塑性分析。

综上所述,前人的研究大多只考虑了单一应力场,但地下围岩所处环境复杂,且任意应力场的改变都会影响围岩塑性区半径大小和应力分布。故只考虑单一应力场与实际工程会有较大误差,鉴于此,本文在前人研究的基础上,基于统一强度理论,推导了圆形巷道围岩在温度和损伤耦合作用下的应力和位移解析解。

1 理论模型

1.1 力学模型

深埋圆形巷道可被看作轴对称平面应变问题,图 1 为某圆形巷道力学模型,其中 r_0 为巷道半径, σ_0 为地应力, p_i 为支护荷载, p_p 为弹塑性交界处应力, R_p 为塑性区半径, r_1 为计算弹性区域半径。为了定性研究温度和损伤对围岩的影响,做如下假设:

1) 围岩体为均质的,且各向同性;

2) 忽略计算岩体自重的影响,围岩处于各向等压状态。

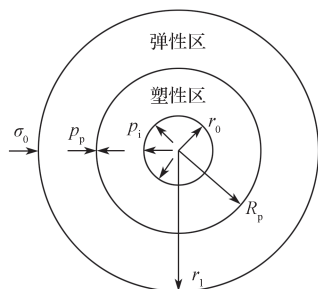


图 1 圆形巷道力学模型

Fig. 1 Mechanical model of the circular roadway

1.2 围岩温度场模型

随着巷道不断开挖,巷道围岩内部温度发生改变,围岩变温区便由此产生,超出变温区,仍为原岩温度 t_1 ,为恒温区。由文献[7-8]可知,巷道围岩不考虑温度应力作用时的应力和塑性区半径公式。设围岩变温区半径为 R ,可得变温区边界条件: $r=r_0$, $T=t_0$; $r=R$, $T=t_1$ 。其中 t_0 为巷道开挖后洞内温度, t_1 为原岩温度^[4],本文统一压应力取正值,拉应力取负值。温度应力由自生温度应力和约束温度应力组成,因在巷道围岩恒温区无温度变化,故恒温区内自生温度应力为 0,变温区自生温度应力计算公式可由变温区内温度分布方程和无限长厚壁圆筒理论求得^[8]。由文献[8]可得巷道围岩总的温度应力方程。

恒温区 ($r > R$):

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{ct}} = \frac{\alpha E (t_1 - t_0)}{2r^2 (1 - \mu) \ln \frac{R}{r_0}} \left[\frac{1}{2} (R^2 - r_0^2) + r_0^2 \ln \frac{R}{r_0} \right], \\ \sigma_\theta^{\text{ct}} = \frac{\alpha E (t_1 - t_0)}{2r^2 (1 - \mu) \ln \frac{R}{r_0}} \left[\frac{1}{2} (R^2 - r_0^2) + r_0^2 \ln \frac{R}{r_0} \right]. \end{cases} \quad (1)$$

式中:上角标 ct 表示恒温区; α 为膨胀系数; E 为弹性模量, μ 为泊松比; σ_r^{ct} 为恒温区内径向应力; $\sigma_\theta^{\text{ct}}$ 为恒温区内切向应力。

变温区 ($r_0 < r < R$):

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{vt}} = \frac{\alpha E (t_1 - t_0)}{2r^2 (1 - \mu) \ln \frac{R}{r_0}} \left[r^2 \ln \frac{r}{r_0} - R_0^2 \ln \frac{r_0}{R} - \frac{1}{2} (r^2 - r_0^2) \right], \\ \sigma_\theta^{\text{vt}} = \frac{\alpha E (t_1 - t_0)}{2r^2 (1 - \mu) \ln \frac{R}{r_0}} \left[r_0^2 \left(\ln \frac{r_0}{R} + \frac{r^2 + R^2}{R^2 - r_0^2} \ln \frac{r}{R} \right) + \frac{1}{2} (r^2 - r_0^2) \right]. \end{cases} \quad (2)$$

式中:上角标 vt 表示变温区; σ_r^{vt} 为变温区内径向应力; $\sigma_\theta^{\text{vt}}$ 为变温区内切向应力。

1.3 岩石材料损伤模型

岩体中存在大量的微小裂隙,其随着巷道开挖过程不断延伸,不断影响围岩的力学性能,从而使围岩应力计算结果与实际相差较大^[9]。如图 2 为岩石在单轴压缩条件下的应力-应变曲线,图中 σ_c 为峰值强度; AB 段为线弹性阶段,弹性模量为 E ; BC 段为塑性损伤阶段,降模量为 λ 。因此引入损伤变量 D 来反映岩石的损伤程度。

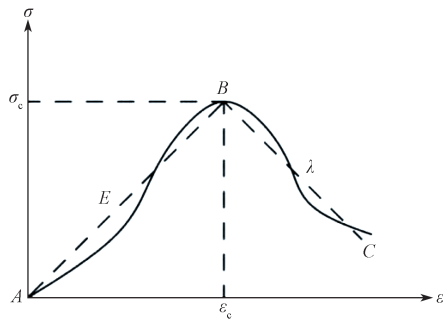


图2 岩石材料应力-应变曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of rock material

一维损伤演化方程为

$$\begin{cases} D=0, & \varepsilon < \varepsilon_c; \\ D=\frac{\lambda}{E} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - 1 \right), & \varepsilon \geq \varepsilon_c. \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε 为单轴压缩下应变; ε_c 为最大弹性应变。

当损伤变量等于 0 时, 材料无损伤; 当损伤变量等于 1 时, 材料处于断裂状态。设主应变为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 , 则有^[10]

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}. \quad (4)$$

式中 ε_i 为等效应变。

可得如下三维损伤演化方程:

$$D = \frac{\lambda}{E} \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_c} - 1 \right). \quad (5)$$

2 损伤作用下围岩弹塑性分析

对于平面应变问题, 取 $m=1$ (m 为中间主应力参数, 对于岩石类材料, $m=1$), 则^[11]

$$\sigma_2 = \frac{m(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}, \quad (6)$$

式中: σ_1 为第一主应力; σ_3 为第三主应力; σ_2 为中间主应力。

整理得地应力各向等压条件下的围岩统一强度理论公式为

$$\sigma_1 = A_1 \sigma_3 + A_2. \quad (7)$$

式中: $A_1 = \frac{(2+3b)\sin\varphi + b + 2}{(1-\sin\varphi)(2+b)}$; $A_2 = \frac{4C\cos\varphi(1+b)}{(1-\sin\varphi)(2+b)}$;

其中, C 为岩石统一黏聚力, φ 为岩石内摩擦角, b 为参数, 反映中间主应力对材料强度的影响程度, 取值为 $0 \leq b \leq 1$ 。

2.1 围岩弹性区分析

在 $r=r_1$ 处, 围岩弹性区应力等于初始地应力, 且弹塑性交界处径向应力连续, 故可得如下弹性区边

界条件: $\sigma_r = \sigma_0$; $\sigma_{Rp} = p_0$ 。

由边界条件并参考文献 [9] 可知弹性区应力计算公式为

$$\begin{cases} \sigma_r^e = \left(1 - \frac{R_p^2}{r^2} \right) p_0 + p_p \frac{R_p^2}{r^2}, \\ \sigma_\theta^e = \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2} \right) p_0 - p_p \frac{R_p^2}{r^2}. \end{cases} \quad (8)$$

式中上角标 e 代表弹性区。

本构方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r^e = \frac{(1+\mu)}{2E} (\sigma_r^e - \sigma_\theta^e), \\ \varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\mu)}{2E} (\sigma_\theta^e - \sigma_r^e). \end{cases} \quad (9)$$

联立式 (8) 和 (9), 可解得巷道围岩弹性区真实应变和真实位移为

$$\begin{cases} \varepsilon_r^e = \frac{(1+\mu)}{E} (p_p - p_0) \frac{R_p^2}{r^2}, \\ \varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\mu)}{E} (p_0 - p_p) \frac{R_p^2}{r^2}, \\ u^e = r \varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\mu)}{E} (p_0 - p_p) \frac{R_p^2}{r}. \end{cases} \quad (10)$$

在弹塑性交界处: $\sigma_\theta + \sigma_r = 2p_0$; 且满足式 (7), 得弹塑性交界处的应力为

$$\begin{cases} \sigma_r^{Rp} = \frac{2p_0 - A_2(1-D)}{1+A_1} = p_p, \\ \sigma_\theta^{Rp} = \frac{2p_0 A_1 + A_2(1-D)}{1+A_1}. \end{cases} \quad (11)$$

将式 (11) 代入式 (10) 得弹性区内岩体位移:

$$u^e = r \varepsilon_\theta^e = \frac{(1+\mu)}{E} \left(p_0 - \frac{2p_0 - A_2(1-D)}{1+A_1} \right) \frac{R_p^2}{r}. \quad (12)$$

2.2 围岩塑性区分析

平衡微分方程^[12] 为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0. \quad (13)$$

几何方程为

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \\ \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \end{cases} \quad (14)$$

由以上分析可知作用在单元体上的最大和最小主应力分别为 σ_θ 和 σ_r , 则有 $\sigma_1 = \sigma_\theta$ 、 $\sigma_3 = \sigma_r$, 代入式 (7) 得

$$\sigma_\theta = A_1 \sigma_r + A_2. \quad (15)$$

由围岩各向同性损伤^[13-14], 可得

$$\sigma_{\theta}^* = \frac{\sigma_{\theta}}{1-D}, \quad \sigma_r^* = \frac{\sigma_r}{1-D}. \quad (16)$$

式中: D 为损伤变量, 可根据式 (5) 得出。

将式 (16) 代入式 (15) 得

$$\frac{\sigma_{\theta}}{1-D} = A_1 \frac{\sigma_r}{1-D} + A_2, \quad (17)$$

由非关联流动法则可得:

$$\varepsilon_r + \varepsilon_{\theta} = 0. \quad (18)$$

由围岩弹性区和塑性损伤区交界处的应变边界条件, 联立式 (18) 和式 (14) 可得

$$\varepsilon_i = \left(\frac{R_p}{r} \right)^2 \varepsilon_c. \quad (19)$$

将式 (19) 代入式 (5) 得损伤演化方程为

$$D = \frac{\lambda}{E} \left[\left(\frac{R_p}{r} \right)^2 - 1 \right]. \quad (20)$$

将式 (20) 代入式 (13) 得

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{A_1 - 1}{r} - \frac{1-D}{r} A_2 = 0. \quad (21)$$

在 $r=r_0$ 处, 围岩塑性区应力等于支护力, 且弹塑性交界处径向应力连续, 得塑性区边界条件:

$$\sigma_{R_p} = p_p; \quad \sigma_{r_0} = p_i.$$

联立式 (20) 和式 (21), 并结合其边界条件可得:

1) 径向应力,

$$\sigma_r^p = \left[p_i - \frac{A_2 \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right)}{1-A_1} + \frac{A_2 \left(\frac{\lambda}{E} \right) R_p^2}{1+A_1 r_0^2} \right] \cdot \left(\frac{r}{r_0} \right)^{A_1-1} - \frac{A_2 \left(\frac{\lambda}{E} \right) R_p^2}{1+A_1 r_0^2} + \frac{A_2 \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right)}{1-A_1}. \quad (22)$$

2) 切向应力,

$$\sigma_{\theta}^p = \left[p_i - \frac{A_2 \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right)}{1-A_1} + \frac{A_2 \left(\frac{\lambda}{E} \right) R_p^2}{1+A_1 r_0^2} \right] \cdot A_1 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{A_1-1} - \frac{A_2 \left(\frac{\lambda}{E} \right) R_p^2}{1+A_1 r_0^2} + \frac{1 + \frac{\lambda}{E}}{1-A_1}. \quad (23)$$

由弹塑性理论可知, 塑性区应变由弹性应变和塑性应变两部分组成, 即:

$$\varepsilon_r^p = \varepsilon_r^{pe} + \varepsilon_r^{pp}, \quad (24)$$

$$\varepsilon_{\theta}^p = \varepsilon_{\theta}^{pe} + \varepsilon_{\theta}^{pp}. \quad (25)$$

式中: 上角标 pe 代表塑性区弹性部分, 上角标 pp 代表塑性区内塑性部分; ε_r^p 为塑性区径向应变; ε_{θ}^p 为塑性区切向应变。

性区切向应变。

由式 (24) (25) 并结合非关联流动法则可得:

$$\varepsilon_r^p + \varepsilon_{\theta}^p = \varepsilon_r^{pe} + \varepsilon_r^{pp} + \varepsilon_{\theta}^{pe} + \varepsilon_{\theta}^{pp} = \varepsilon_r^{pe} + \varepsilon_{\theta}^{pe}. \quad (26)$$

将式 (26) 代入几何方程 (14), 可得:

$$\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} = \varepsilon_r^{pe} + \varepsilon_{\theta}^{pe}. \quad (27)$$

根据弹塑性位移边界条件 ($r=R_p$) 可知:

$$u_r^{pe} = r \varepsilon_{\theta}^c = \frac{(1+\mu) R_p}{E} \left(p_0 - \frac{2p_0 - A_2}{1+A_1} \right). \quad (28)$$

将式 (11) 代入式 (28), 整理可得塑性区岩石位移 u_r^{pe} 的表达式:

$$u_r^{pe} = \frac{(1+\mu)(p_0 - p_p)}{E(1+\eta)} \left[\eta - 1 + 2 \left(\frac{R_p}{r} \right)^{\eta+1} \right]. \quad (29)$$

2.3 围岩塑性区范围

在弹塑性交界处径向应力连续: $\sigma_r^c = \sigma_r^p$, 联立式 (8)、式 (11) 和式 (22) 可得:

$$P_i = \frac{2[(1-A_1)p_0 - A_2] \left(\frac{R_p}{r_0} \right)^{1-A_1}}{1-A_1^2} - \frac{A_2}{1-A_1} \left(\frac{\lambda}{E} \right) \left(\frac{R_p}{r_0} \right)^2 + \frac{A_2}{1-A_1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right). \quad (30)$$

由式 (30) 即可求得塑性区半径 R_p 。

3 热力耦合和损伤下围岩弹塑性分析

3.1 变温区和恒温区交界面位于弹性区内

由 2.1 边界条件, 有

$$r=r_1, \quad \sigma_{r_1}^{e-m} = \sigma_0; \quad r=R_p, \quad \sigma_{R_p}^{e-m} = p_p.$$

式中: 上角标 m 代表边界; $\sigma_{r_1}^{e-m}$ 为边界 r_1 处围岩径向应力; $\sigma_{R_p}^{e-m}$ 为边界 R_p 处围岩切向应力。

联立式 (11) 和式 (15), 可得弹性区边界荷载产生的径向应力和切向应力为

$$\begin{cases} \sigma_r^{e-m} = p_0 + \frac{(p_p - p_0) R_p^2}{r^2}, \\ \sigma_{\theta}^{e-m} = p_0 - \frac{(p_p - p_0) R_p^2}{r^2}. \end{cases} \quad (31)$$

温度应力可由荷载产生的应力和约束温度应力叠加而得, 联立式 (1) 和式 (31) 可得变温区内径向应力和切向应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r^{cv} = \sigma_r^{e-m} + \sigma_r^{vt}, \\ \sigma_{\theta}^{cv} = \sigma_{\theta}^{e-m} + \sigma_{\theta}^{vt}. \end{cases} \quad (32)$$

联立式 (2) 和式 (31) 可得恒温区内径向应力和切向应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{ec}} = \sigma_r^{\text{e-m}} + \sigma_r^{\text{ct}}, \\ \sigma_\theta^{\text{ec}} = \sigma_\theta^{\text{e-m}} + \sigma_\theta^{\text{ct}}. \end{cases} \quad (33)$$

则含有温度应力的塑性区平衡微分方程为^[14-16]

$$\frac{d\sigma_r^{\text{p-tm}}}{dr} + \frac{dP}{dr} + \frac{(\sigma_r^{\text{p-tm}} - \sigma_\theta^{\text{p-tm}})}{r} = 0. \quad (34)$$

式中: $P = E\alpha\Delta t$ ^[16]; $\Delta t = t - t_1 = \frac{t_1 - t_0}{\ln(R/r_0)} \ln \frac{r}{R}$ 。

将式(17)和(34)联立,并代入内边界条件 $\sigma_\theta^{\text{p-tm}} = p_i$, 可得塑性区径向应力和切向应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{p-tm}} = \frac{A_2 - B - DA_2}{1 - A_1} + \left(p_i - \frac{A_2 - B - DA_2}{1 - A_1} \right) \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-A_1}, \\ \sigma_\theta^{\text{p-tm}} = \frac{A_2 - A_1 B - DA_2}{1 - A_1} + A_1 \left(p_i - \frac{A_2 - B - DA_2}{1 - A_1} \right) \left(\frac{r_0}{r} \right)^{1-A_1}. \end{cases} \quad (35)$$

式中 $B = \frac{E\alpha(t_1 - t_0)}{\ln(R/r_0)}$ 。

将塑性区外边界条件 $\sigma_{r_p}^{\text{p-tm}} = p_p$ 代入式(35), 可得温度应力-损伤耦合作用下的塑性区半径为

$$R_p = R_0 \left(\frac{P_p(1 - A_1) - A_2 + B + DA_2}{P_i(1 - A_1) - A_2 + B + DA_2} \right)^{\frac{1}{A_1-1}}. \quad (36)$$

3.2 变温区和恒温区交界面位于塑性区内

当变温区和恒温区交界面位于塑性区内, 此时塑性区位于恒温区内, 应力表达式同式(33), 在变温塑性区的应力表达式同式(35)。由变温区边界条件, 联立式(17)和(34), 可得恒温塑性区径向应力和切向应力表达式为

$$\begin{cases} \sigma_r^{\text{p-tm}} = \frac{A_2 - DA_2}{1 - A_1} - \frac{B \left(\frac{R}{r} \right)^{1-A_1}}{1 - A_1}, \\ \left(p_i - \frac{A_2 - B - DA_2}{1 - A_1} \right) \left(\frac{R_0}{r} \right)^{1-A_1}, \\ \sigma_\theta^{\text{p-tm}} = \frac{A_2 - DA_2}{1 - A_1} - \frac{A_1 B \left(\frac{R}{r} \right)^{1-A_1}}{1 - A_1}, \\ A_1 \left(p_i - \frac{A_2 - B - DA_2}{1 - A_1} \right) \left(\frac{R_0}{r} \right)^{1-A_1}. \end{cases} \quad (37)$$

由弹塑性交界面处应力相等, 联立式(35)和(37), 可求得温度应力-损伤共同作用下的塑性区半径。

4 模型验证与算例分析

为了进一步研究温度应力和损伤作用对围岩应

力分布及塑性区范围的影响, 引用文献[4]中巷道基本地质力学参数(如表1所示), 进行算例分析; 其开挖半径为2 m, 支护阻力 $p_i = 2$ MPa, 内摩擦角为 37° , 黏聚力为1.3 MPa, 初始地应力为20 MPa, 隧洞内边壁温度为 20°C , 原岩温度为 60°C 。

表1 算例参数

Table 1 Example parameters

材料	弹性模量 / GPa	密度 / gcm^{-3}	泊松比	热膨胀系数 / $^\circ\text{C}^{-1}$	比热容 / $(\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$	导热系数 / $(\text{Wm}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1})$
岩石	7.5	2.5	0.25	5×10^{-6}	1.0	2.4

4.1 模型验证

本文推导了温度-损伤共同作用下圆形巷道弹塑性统一解, 本文解可退化成多种解, 当温差为0时, 为损伤解; 当损伤变量 $D=0$ 时, 退化为温度解; 当温差、损伤同时为0、且 $b=0$ 时, 退化为文献[16]中的卡斯特那解。

为了证实本研究中计算出的数学公式的精确度, 设3种工况: ①仅有损伤的作用(工况一), ②仅有温度作用(工况二), ③温度-损伤共同作用(工况三)。假定围岩内部和外部的温度差为 0° , 损伤变量 $D=0$, 并固定岩石各项力学参数, 对比此时3种工况和文献[17]解的差异, 其基本应力分布如图3所示。

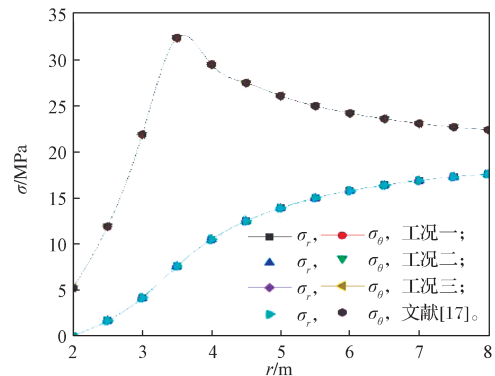


图3 不同工况下的围岩应力

Fig. 3 Surrounding rock stress under different working conditions

由图3可以看出, 3种工况下 R_p 均为3.39 m, 和文献[17]保持一致, 应力场分布完全相同。经比较: 本研究中推导出的应力公式所得结果与文献[17]中围岩应力所得结果相同。这也证实本研究中计算出的数学公式的准确性。

4.2 仅有损伤作用下围岩应力分析

图4表示中间主应力系数 b 等于0时不同程度损伤作用下所对应的支护阻力 p_i 与塑性区半径 R_p 之间的关系。

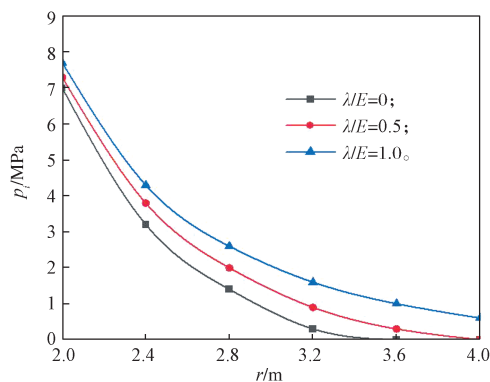


图4 损伤作用下支护力与塑性区半径的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between the supporting force and the plastic zone radius under the action of injury

从图4可知,若塑性区半径取2.8 m,3种不同损伤程度作用所需支护阻力分别为1.4 MPa、2.0 MPa和2.6 MPa,相较于无损伤情况下增加了43%和86%,且随着塑性区范围扩大,增长的幅度也越明显。图5表示中间主应力系数 b 等于0时不同程度损伤作用下所对应的围岩半径 r 与应力 σ 之间的关系。由图5可知:仅考虑损伤作用下,围岩峰值切向应力升高,不考虑损伤且不考虑温度作用下所对应的峰值切向应力为33.1 MPa,不考虑损伤考虑温度所对应的峰值切向应力为34.5 MPa,相较于不考虑损伤作用时升高了4.2%。

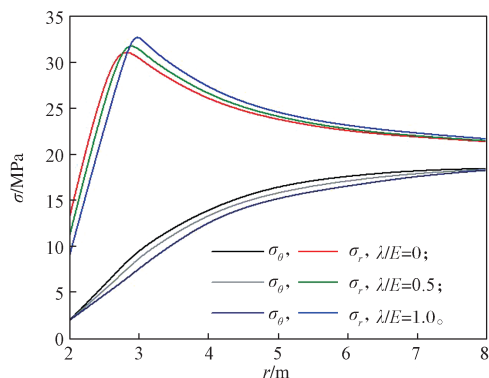


图5 不同程度损伤时的围岩应力分布

Fig. 5 Stress distribution of surrounding rocks under different degrees of damage

4.3 仅有温度作用下围岩应力分析

图6反映了中间主应力系数 b 等于0时温度应力作用下支护阻力 p_i 与塑性区半径 R_p 之间的关系。从图6可知,若塑性区半径取2.8 m,不考虑损伤作用($\lambda/E=0$)和温度应力作用时,所需提供的支护阻力为1.4 MPa;当隧洞围岩内恒温区与变温区温差恒等于40℃时,所需支护阻力为1.7 MPa,相较于不考虑温度应力作用情况下增加了21%。图7反映了中间主应力系数 b 等于0时温度应力作用下围岩半径 r 与应力 σ 之间的关系。由图7可知:仅考虑温

度作用时,围岩峰值切向应力降低;不考虑损伤且考虑温度作用下,所对应的峰值切向应力为33.1 MPa;不考虑损伤考虑温度所对应的峰值切向应力32.0 MPa,相较于不考虑温度作用时降低了3.3%,表明在温度作用下围岩极限强度有所降低。

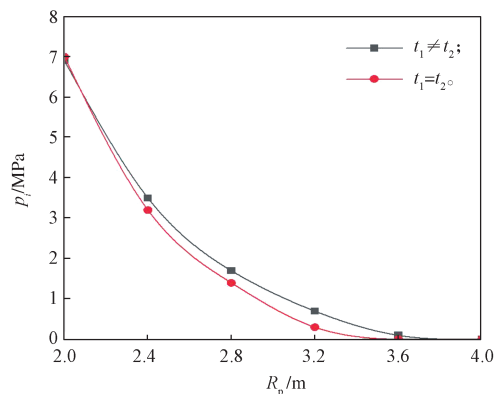


图6 温度应力作用下支护力与塑性区半径的关系

Fig. 6 Relationship between the supporting force and the plastic zone radius under temperature stress

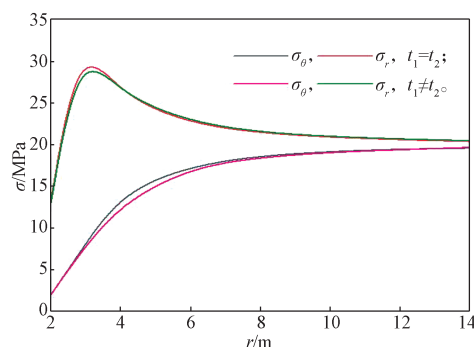
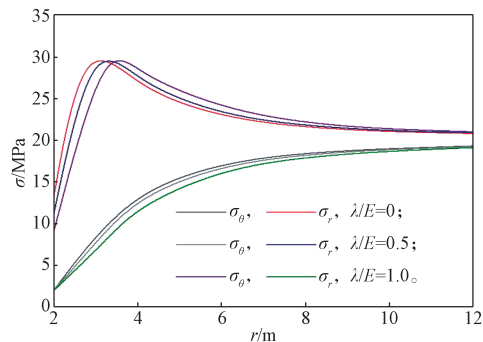


图7 不同温度差时的围岩应力分布

Fig. 7 Stress distribution of surrounding rocks at different temperature differences

4.4 温度-损伤共同作用下围岩应力分析

对于统一强度理论,当中间主应力系数 b 取不同值时,可得到一系列新准则。取中间主应力系数 b 等于0(Mohr-Coulomb强度理论)、0.5和1.0(双剪强度理论),则图8表示围岩在温度应力-损伤共同作用下且 b 取不同值时的应力分布图。



a) 中间主应力系数 $b=0$

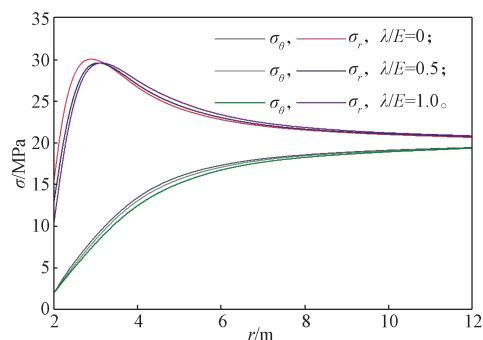
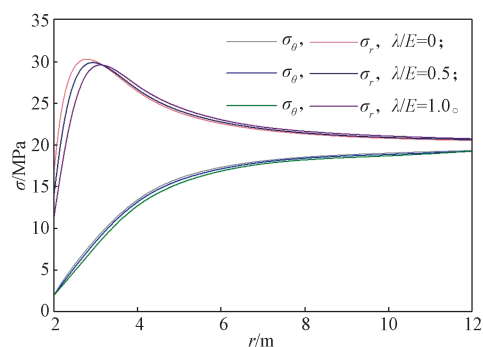
b) 中间主应力系数 $b=0.5$ c) 中间主应力系数 $b=1.0$ 图8 不同中间主应力系数 b 时的围岩应力分布

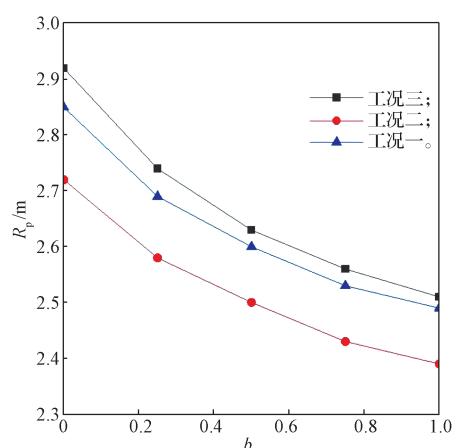
Fig. 8 Stress distribution of surrounding rocks with different intermediate principal stress coefficients

当中间主应力系数 b 等于 0、0.5 和 1.0 时, 将不同程度损伤 ($\lambda/E=0.5$) 作用下的围岩应力 (图 8b、图 8c) 对比不考虑损伤 ($\lambda/E=0$) 作用时的围岩应力 (图 8a) 可得: 随着围岩深度增加, 径向应力逐渐增加, 随着中间主应力系数增大, 径向应力也逐渐增加, 但幅度相对围岩深度较小, 最后缓慢趋于初始地应力; 围岩切向应力的变化趋势是先快速增长, 到达塑性区半径后其数值达到顶峰, 再逐渐减小, 最后同样缓慢趋于初始地应力, 且围岩应力值在塑性区内随着 b 值的增大而增大, 在弹性区内随着 b 值的增大而减小; 当中间主应力系数 b 等于 0、0.5、1.0 时, 对比不考虑温度所得的围岩应力分布情况与不考虑损伤所得围岩应力分布情况基本一致。

比较中间主应力系数 b 等于 0 时损伤-温度共同作用时所得的围岩应力分布情况可得: 相比于只考虑损伤的情况, 当损伤-温度共同作用时, 由于温度降低对围岩产生拉应力, 导致围岩径向应力相较于只考虑损伤作用时有所下降。当中间主应力系数相同时, 温度应力作用下不同损伤程度的围岩切向应力会在某点相交, 当中间主应力系数为 0 时, 重合点分别位于半径值 3.2、3.3、3.4 m 处; 在应力值到达峰值前, 切向应力增长速率逐渐增加, 温度应力作用下不同损伤程度的围岩切向应力交点值逐渐减小, 并缓慢趋向

于一点, 该点位于半径值 3.1 m 处, 且在重合点之前围岩切向应力随着损伤程度的增加而增加, 在重合点之后随着损伤程度的增加而减小, 最终都接近于原始地应力; 相比于只考虑温度的情况, 当损伤-温度共同作用时, 围岩峰值切向应力分别为 32.8、32.2 MPa, 只考虑温度作用下所对应的峰值切向应力为 33.1 MPa, 分别降低了 0.9% 和 2.7%, 且随着损伤程度增加, 降低幅度增大。

图 9 为不同中间主应力系数下 3 种工况塑性区半径对比图。

图9 不同 b 值下的围岩塑性区半径Fig. 9 Plastic zone radius of surrounding rocks under different b -values

由图 9 可知: 随着中间主应力系数的增加, 塑性区半径整体呈现降低趋势, 参照俞茂宏等^[14]的研究结果可得: 当 b 值确定时, 不同工况作用所产生的塑性区范围不同, 温度应力和损伤耦合 (工况三) 所产生的塑性区范围最大, 仅考虑温度 (工况二) 应力所产生的塑性区范围最小; 当 b 取不同值时, 由文献 [16] 可得不同中间主应力系数原岩应力作用时, 塑性区半径分别为 2.64、2.52、2.45、2.39、2.36 m。只考虑温度 (工况二) 作用时, 塑性区半径分别为 2.72、2.58、2.50、2.43、2.39 m; 只考虑损伤 (工况一) 作用时, 塑性区半径分别为 2.85、2.69、2.60、2.53、2.49 m 和损伤-温度 (工况三) 共同作用时, 塑性区半径分别为 2.92、2.74、2.63、2.56、2.51 m, 相较于无温度应力无损伤作用时, 平均增加了 2.1%、6.4%、8.1%。综上所述, 3 种不同工况作用时的塑性区半径与仅有原岩应力作用时的塑性区半径值均相差较大, 同时 b 的值越小, 3 种不同工况作用所产生的塑性区范围越大, 说明采用 Mohr-Coulomb 强度理论得到的结果相对保守, 3 种工况中仅考虑温度作用的情况中受主应力系数影响最小, 损伤-温度 (工况三) 共同作用的情况中受主应力系数影响更大。

5 结 论

本文基于统一强度理论,推导了围岩在温度应力和损伤影响下应力场、位移场和塑性区范围的计算公式,模型验证及算例分析结果表明:

1) 对比分析不同损伤程度和温度应力对支护阻力的影响,可知损伤程度和温度应力越大,所需支护阻力均越大。

2) 中间主应力系数 b 的取值对塑性区半径有着较大的影响,随着 b 值增大,塑性区半径逐渐减小,说明考虑中间主应力可以使岩石类材料的强度潜能更加充分地发挥出来。

3) 在分析巷道围岩的应力与支护范围时,忽略损伤和温度应力是偏危险的,计算结果表明损伤作用时的塑性区半径相较于仅有原岩应力作用时的塑性区半径增加了 2.1%;温度作用时的塑性区半径相较于仅有原岩应力作用时的塑性区半径增加了 6.4%;温度-损伤耦合作用时的塑性区半径相较于仅有原岩应力作用时的塑性区半径增加了 8.1%。因此,在实际工程中应考虑各因素的影响。

参考文献:

- [1] 孟 强, 赵洪波, 茹忠亮, 等. 锚杆支护圆形隧洞弹塑性解[J]. 工程力学, 2015, 32(7): 17-25.
MENG Qiang, ZHAO Hongbo, RU Zhongliang, et al. Analytical Solution for Circular Tunnels with Rock Bolts[J]. Engineering Mechanics, 2015, 32(7): 17-25.
- [2] 张玉洁, 李晓哲, 姜海波, 等. 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[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(3): 191-201.
ZHANG Yujie, LI Xiaozhe, JIANG Haibo, et al. Coupling Mechanical Properties and Interaction Mechanism of Surrounding Rock-Supporting Structure of a Hydraulic Tunnel Under Thermal-Mechanical Action[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(3): 191-201.
- [3] 黎明镜. 热力耦合作用下深井巷道围岩变形规律研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2010.
LI Mingjing. Study of the Deformation Laws of Rock Roadways in Deep Mine Based on Thermo-Mechanical Coupling[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2010.
- [4] 惠 强, 姜海波, 张玉洁. 基于统一强度理论的热-力耦合作用下圆形隧洞的弹塑性解析解[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2021, 39(6): 697-705.
HUI Qiang, JIANG Haibo, ZHANG Yujie. Anelastoplastic Analytical Solution of Circular Tunnel

- Under Thermal-Mechanical Coupling Based on the Unified Strength Theory[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2021, 39(6): 697-705.
- [5] 高召宁, 陈登国, 孙振川, 等. 考虑损伤和扩容影响的隧洞围岩稳定性分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 159-165.
GAO Zhaoning, CHEN Dengguo, SUN Zhenchuan, et al. Stability Analysis of Tunnel Surrounding Rock Considering Influence of Damage and Dilatancy[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7): 159-165.
 - [6] 赵光明, 张小波, 孟祥瑞, 等. 基于连续损伤理论的巷道围岩弹脆性损伤分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 314-320, 335.
ZHAO Guangming, ZHANG Xiaobo, MENG Xiangrui, et al. Elasto-Brittle Damage Analysis of Roadway Surrounding Rock Based on Continuous Damage Theory[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 314-320, 335.
 - [7] 蔡晓鸿, 李清华, 蔡勇斌, 等. 水工压力隧洞结构设计若干关键问题刍析[J]. 江西水利科技, 2010, 36(4): 262-266.
CAI Xiaohong, LI Qinghua, CAI Yongbin, et al. Discussion of some Critical Question of Structural Design for Hydraulic Pressure Tunnels[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2010, 36(4): 262-266.
 - [8] 蔡晓鸿, 吕有年. 水工有压隧洞弹性温度应力计算[J]. 水力发电, 1984, 10(11): 14-18, 33.
CAI Xiaohong, LÜ Younian. Calculation of Elastic Temperature Stress in Hydraulic Pressure Tunnel[J]. Water Power, 1984, 10(11): 14-18, 33.
 - [9] 孟 龙, 高召宁, 孟祥瑞. 考虑损伤的圆形巷道围岩弹塑性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(11): 11-16.
MENG Long, GAO Zhaoning, MENG Xiangrui. Elasto-Plastic Analysis of Circular Roadway Surrounding Rocks Under Consider Ation of Rock Damage[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(11): 11-16.
 - [10] 贾乃文. 黏塑性力学及其解析方法[C]//“力学 2000”学术大会论文集. 北京: 中国力学学会, 2000: 387-388.
JIA Naiwen. Viscoplastic Mechanics and Its Analytical Methods[C]//Proceedings of the “Mechanics 2000” Conference. Beijing: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2000: 387-388.
 - [11] 胡小荣, 俞茂宏. 统一强度理论及其在巷道围岩弹塑性分析中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2002, 12(5): 1021-1026.
HU Xiaorong, YU Maohong. Unified Strength Theory and Its Application in Elasto-Plastic Analysis to Tunnel[J].

(下转第 28 页)