

深部工程围岩松动圈范围确定及变形破坏机理

钱 蓉¹, 邓树新¹, 王明洋^{1,2}, 邱艳宇²

(1. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 陆军工程大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 江苏 南京 210007)

摘要: 随着埋深增加, 深部工程围岩在开挖后应力重分布形成支撑压力区, 破坏后将形成新的破裂面, 稳定的支撑压力区即为围岩的松动圈。围岩松动圈范围的确定以及变形破坏机理的研究, 关乎围岩变形稳定控制支护的方式方法。利用围岩的平衡方程和泰勒展开方法, 得到松动圈的初始半径, 并采用 Maxwell 方程来表征岩体中缺陷应力演化, 推导了围岩松动圈发生劈裂破坏的条件。

关键词: 支撑压力区; 围岩松动圈; 围岩分区破裂

中图分类号: O38

文献标志码: A

Range Determination and Deformation Failure Mechanism of Loosening Zone of Surrounding Rock in Deep Engineering

QIAN Rong¹, DENG Shuxin¹, WANG Mingyang^{1,2},
QIU Yanyu²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: As the burial depth increases, the stress redistribution of surrounding rock in deep engineering forms a supporting pressure zone after excavation, and a new fracture surface will be formed after failure. The stable support pressure zone is the loosening zone of the surrounding rock. The determination of the scope of the loosening zone of the surrounding rock and the study of the deformation and failure mechanism are related to the methods of the deformation stability control and support of the surrounding rock. In this paper, the equilibrium equation of the surrounding rock and the Taylor expansion method are used to obtain the initial radius of the loose zone, the Maxwell equation is used to

characterize the evolution of defect stress in the rock mass, and the conditions for the cracking and failure of the loose zone of the surrounding rock are derived. The research results are of guiding significance to the stability analysis of underground roadways and the design of surrounding rock support.

Key words: support pressure zone; surrounding rock loose circle; partition fracture of surrounding rock

人类所需的资源和能源越来越依赖于地球深部, 向地球深部进军是必须解决的战略科技问题。在深部工程中, 岩体的开挖将导致岩体原有的平衡状态被打破, 围岩应力将重新分布, 切向应力增加并产生应力集中, 同时径向应力降低, 并在硐室边壁降低到零。一般将地下巷道周围切向应力增高的部分称为支撑压力。随着埋深的增加, 岩体承受的地应力增大, 支撑压力也随之增大。一般将围岩周围环向应力最大的部分称为最大支撑压力区, 最大支撑压力增大到一定程度将造成围岩破坏, 破坏后形成新的破裂面。稳定的支撑压力区即为围岩松动圈。围岩松动圈变形演化过程是围岩应力、围岩强度等共同作用的结果。深部工程长期稳定防控需要确定围岩松动圈的范围并揭示其变形演化机理。

目前, 探测围岩松动圈的方法主要有声波法、地质雷达法、钻孔成像法等。郭志宏等^[1]采用现场实测方法, 通过对开滦矿务局赵各庄矿深井开展现场实测, 揭示了松动圈厚度与开采深度及围岩强度之间的非线性关系以及松动圈厚度与采动次数、支护难度、临界开采深度等的关系。戴俊等^[2]提出声波测试法和窥视技术相结合的方法来确定围岩松动圈的位置。王睿等^[3]对宝汉高速石门隧道工程通过单孔声波测试获得了松动圈的厚度。李延河

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51909120)

第一作者: 钱 蓉(1998—), 女, 博士生, 主要研究方向为深部岩石力学与工程。E-mail: qr@njust.edu.cn

通信作者: 王明洋(1966—), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为防灾减灾工程及防护工程。E-mail: wmyrf@163.com



论文
拓展
介绍

等^[4]基于弱光纤光栅传感技术,研制了一种准分布式大量程应变传感器光缆,并在现场测试中成功观测到围岩应变、围岩松动圈边界等变化过程,为围岩内部变形以及围岩松动圈时空演化规律提供参考。赵海斌等^[5]阐述了声波法在松动圈动态分析中的适用性,并在实测中绘制了开挖深度、岩体波速、时间、空间位置与松动圈的相互关系曲线。于庆磊等^[6]以太平矿业矸卡岩型铜铁矿床为例,采用地质雷达探测巷道围岩松动圈,分析了松动圈的分布特征。于占军等^[7]利用现场测试和数值模拟的方法研究了不同深度下的围岩松动圈演化规律。研究表明,随着深度的增加,巷道松动圈的范围逐渐增加,并且增加的速度越来越快,大致呈现指数关系增长。李建功等^[8]以山西某矿回风大巷为研究背景,采用声波测试法对巷道围岩松动圈进行测试,确定了大巷的支护方式。曹庆华^[9]采用电磁雷达法对巷道围岩松动圈进行测试,得到了巷道围岩松动圈级别,优化了巷道支护参数,有效控制了巷道围岩变形。

现场测试试验虽然有着较高的可信度,但是其受场地限制较大,且测量成本较高。因此,有关围岩松动圈的理论研究也在不断发展。国外对于松动圈的理论研究起步较早。1926年,普罗托奇亚科夫提出自然平衡拱学说,认为岩石开掘后各组成单位将在自重作用下向洞室空间方向移动,移动后各单位被迫挤压而形成拱,这个拱就是自然平衡拱,大致呈抛物线形。此外,该学说还认为,拱线以上的岩体均处于极限平衡状态,而拱线以下的岩石如不加以支护则会脱落^[10]。一般认为自然平衡拱学说在均质黏性岩石中有较好的适用性。1946年,太沙基从现场研究的统计资料出发,提出了松动冒落拱学说,该学说认为巷道两侧将产生楔形体的作用,并给出了楔形体高度的计算公式^[11]。但是随着开挖深度的不断增加,地质条件的复杂化,该学说的准确性以及适用性都无法保证。1982年,Dube等对在受压条件下松动圈的半径进行估算,并在此基础上发展了图示法,但是该方法忽略了围岩压力以及岩体本身性质的影响,与实际情况存在较大差距^[12]。1989年,前苏联学者考虑埋深、跨度、岩石强度、应力集中等问题,提出了有关松动圈的关系式,给出了围岩出现不连续区的埋深临界值^[12]。但是在确定不连续区的厚度时仍存在问题,比如公式中常量难以确定等。我国学者董方庭^[13]提出围岩松动圈支理论,并对围岩松动圈的形状、围岩

强度以及围岩应力对围岩松动圈的影响等做了讨论。邹红英等^[14]根据围岩松动圈的主要影响因素,结合试验研究成果,基于施工开挖的声波资料,在统计分析的基础上给出洞室松动圈判别的数学模型。陈建功等^[15]考虑巷道围岩在开挖过程中的动静力作用,认为围岩松动区包括破碎区和塑性软化区两个部分,并且两者的形成过程有较大区别。此外,陈建功还根据动静力学分析得出围岩松动圈的半径计算公式。李政林等^[16]基于双线性损伤模型和应力等效原理,推导出卸荷围岩应力状态的损伤理论解析解。赵国彦等^[17]采用量纲分析法构建围岩松动圈厚度与岩石单轴抗压强度、围岩节理系数、围岩重度等的量纲为一关系式。Bai等^[18]在损伤力学的基础上讨论了松动圈的力学机理,提出了松动圈半径的计算公式。黄锋等^[19]基于D-P准则推导了围岩松动圈的弹塑性理论和损伤理论计算方法,其中损伤理论方法对于低级别围岩有很好的适用性。Wang等^[20]基于统一强度理论,推导了考虑中间主应力影响的松动圈半径计算公式,并对云屯堡隧道典型断面的松动圈进行了理论计算和现场验证,揭示了大变形软岩隧道围岩松动圈的厚度和分布规律。

以上关于围岩松动圈半径的计算公式大多从岩石的本构关系出发,很少考虑围岩开挖后的应力分布特点以及围岩峰后强度的影响。此外,上述围岩松动圈理论计算公式大多比较复杂,无法直接利用工程中得到的岩石力学参数,在实际工程中难以得到广泛应用,因此需要提出更加直接、简洁的围岩松动圈半径计算公式。本文首先利用围岩平衡方程和泰勒展开法得到围岩松动圈的范围,然后采用Maxwell方程表征岩体中缺陷应力演化方程,推导了围岩松动圈发生劈裂破坏的条件。

1 围岩松动圈范围

1.1 围岩松动圈范围的理论推导

巷道开挖前,地下岩体处于三向应力平衡状态,巷道开挖将破坏围岩原有的应力状态,一方面使应力重新分布,切向应力增加并引起应力集中,同时径向应力降低;另一方面围岩受力状态由三向近似变成二向。随着埋深增加,岩体承受地应力将增大,如果大于岩体强度,则围岩产生塑性区。图1为开挖后巷道围岩应力分布示意图。图中 σ 为应力, σ_0 为初始地应力, σ_θ 为环向应力, σ_r 为径向应力, r 为任意点

到隧道轴线的距离, a 为开挖半径, c 为最大支撑压力处半径。

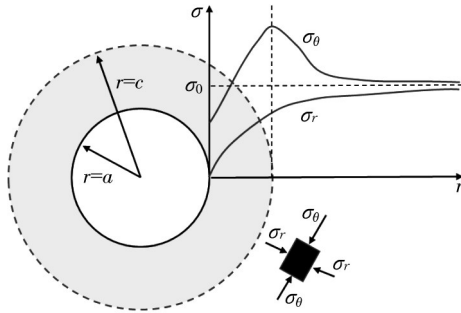


图1 开挖后围岩应力分布示意图

Fig.1 Stress distribution diagram of surrounding rock after excavation

围岩平衡方程为

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} \quad (1)$$

在巷道边壁处 ($r=a$), 假设岩石材料满足 Tresca 屈服准则, 即 $\sigma_\theta - \sigma_r = 2\tau_{oc}$ (τ_{oc} 为岩石残余应力), 由公式(1)可知

$$\left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=a} = \frac{2\tau_{oc}}{a} \quad (2)$$

同样地, 在最大支撑压力处 ($r=c$) 有

$$\left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=c} = \frac{2\tau_{max}}{c} \quad (3)$$

式中: τ_{max} 为岩石剪切强度。

将 σ_r 在 $r=a$ 处进行泰勒级数展开, 计算 $r=c$ 处径向应力(取二阶导数), 有

$$\sigma_r(c) = \sigma_r(a) + \left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=a} (c-a) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} \right|_{r=a} (c-a)^2 \quad (4)$$

在 $r=a$ 处, $\sigma_r(a) = 0$, 结合公式(2)有

$$\sigma_r(c) = \frac{2\tau_{oc}}{a} (c-a) + \frac{1}{2} \left. \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} \right|_{r=a} (c-a)^2 \quad (5)$$

同样地, 将 $\left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=c}$ 在 $r=a$ 处进行泰勒级数展开, 在 $r=c$ 处, 有

$$\left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=c} = \left. \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} \right|_{r=a} + \left. \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} \right|_{r=a} (c-a) \quad (6)$$

公式(6)结合公式(2)和(3)有

$$\left. \frac{\partial^2 \sigma_r}{\partial r^2} \right|_{r=a} (c-a) = \frac{2\tau_{max}}{c} - \frac{2\tau_{oc}}{a} \quad (7)$$

根据公式(5)和(7)可知

$$\begin{aligned} \sigma_r(c) &= \frac{2\tau_{oc}}{a} (c-a) + \left(\frac{\tau_{max}}{c} - \frac{\tau_{oc}}{a} \right) (c-a) = \\ & (c-a) \left(\frac{\tau_{oc}}{a} + \frac{\tau_{max}}{c} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

因为在 $r=c$ 处, 有 $\sigma_r(c) = \sigma_0 - \tau_{max}$, 因此公式(8)可以整理为

$$\frac{\sigma_0}{\tau_{max}} = \frac{\tau_{oc}}{\tau_{max}} \left(\frac{c}{a} - 1 \right) - \frac{a}{c} + 2 \quad (9)$$

令 $\chi = \frac{\tau_{oc}}{\tau_{max}}$, $\frac{c}{a} = x$, $\frac{\sigma_0}{\tau_{max}} = y$, 则公式(9)写为

$$y = \chi(x-1) - \frac{1}{x} + 2 \quad (10)$$

公式(10)的解为

$$\begin{aligned} x &= \frac{y-2+\chi + \sqrt{(y-2+\chi)^2 + 4\chi}}{2\chi} = \\ & \frac{y-2+\chi + \sqrt{\chi^2 + 2y\chi + y^2 - 4y + 4}}{2\chi} \end{aligned} \quad (11)$$

公式(11)在 $y=1$ 处进行泰勒级数展开, 有

$$\begin{aligned} x &= 1 + \frac{1}{\chi+1} (y-1) + \frac{1}{(1+\chi)^3} (y-1)^3 + \\ & o(y-1)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $o(y-1)^3$ 为泰勒公式的 Peano 余项。

一般地, $0 < y-1 < 1$, 公式(12)中忽略高阶项, 取

$$x = 1 + \frac{1}{\chi+1} (y-1) \quad (13)$$

由公式(13)和得到围岩松动圈范围为

$$\frac{c}{a} = \frac{\tau_{oc} + \sigma_0}{\tau_{oc} + \tau_{max}} \quad (14)$$

对于理想弹塑性模型, $\tau_{oc} = \tau_{max}$, 即 $\chi = 1$, 有

$$\frac{c}{a} = \frac{1}{2} + \frac{\sigma_0}{2\tau_{max}} \quad (15)$$

由公式(14)可知, 围岩松动圈半径和巷道半径、初始地应力、围岩强度、围岩残余强度有关。围岩松动圈半径与初始地应力关系如图2所示, 随着埋深增加, 松动圈范围增大。围岩残余强度与峰值强度比值越低, 即岩体脆性越强, 松动圈范围越大。说明在不发生劈裂破坏的情况下, 峰后强度越低, 形成的松动圈越大, 这样才能对弹性区提供足够的支撑力, 实现围岩的自稳。

本文推导出的公式(14)与卡斯特纳方程获得的松动圈半径计算公式相比, 计算方法更加简便, 公式包含的力学参数在工程实际中容易获取, 同时也考虑了岩石的峰后强度, 计算结果更加合理。

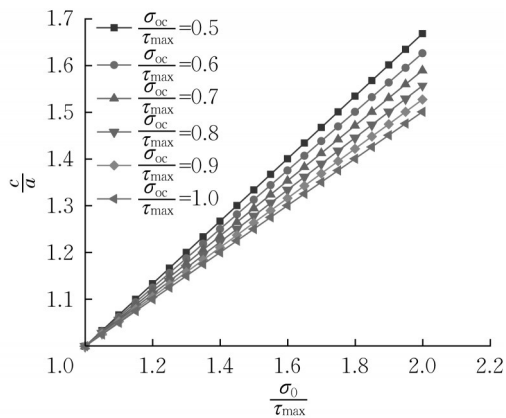


图2 围岩松动圈半径与初始地应力的关系

Fig.2 Radius of surrounding rock loose circle versus initial ground stress

1.2 算例分析

算例一 铜旬高速某隧道^[21]位于铜川市赵金镇

表1 算例1围岩力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of surrounding rock in Example 1

等效半径/m	围岩松动圈半径实测值/m	埋深/m	重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪切强度/MPa
5.57	6.77	115	24	38	0.16	2.3

表2 算例2围岩力学参数

Tab.2 Mechanical parameters of surrounding rock in Example 2

等效半径/m	围岩松动圈半径实测值/m	初始地应力/MPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/MPa	剪切强度/MPa
7.5	8.11	11	35	2	9.7

代入公式(15)可得该松动圈半径为 $c=8\text{ m}$ 。理论计算所得围岩松动圈半径与实测围岩松动圈半径误差约为1.3%。

由算例一和算例二可知,本文提出的理论计算公式所得的围岩松动圈半径与实际测量所得的围岩松动圈半径有很好的 consistency,两者的误差在可接受范围内。因此,本文提出的围岩松动圈半径计算公式可以为后续围岩支护等问题研究提供参考。

2 围岩松动圈变形破坏机理

2.1 围岩应力集中演化方程

在地下巷道开挖过程中,纵向应力与初始应力变化不大,切向应力随着开挖逐渐增大,径向应力则被快速卸载,其作用机制可视为有侧压的环向加载和静水压力下的径向卸载的叠加。这两种应力状态都倾向于产生径向的拉应力,由于岩体较低的抗拉能力,在最大支撑压力区可能产生受压劈裂。岩体内部的径向局部拉应力 σ_r^{loc} 由弹性应力 σ_r^e 和缺陷引

某村二组西约400 m。选取该隧道ZK204+930断面分析。隧道建筑限界:净宽10.50 m,净高5.00 m;经现场检测发现该围岩松动圈半径在6.77 m左右。围岩的力学参数如表1所示。

初始地应力只考虑围岩的自重应力,不考虑构造应力,则

$$\sigma_0 = \gamma h = 2.76 \text{ MPa} \quad (16)$$

将以上参数代入公式(15)可得围岩松动区半径为 $c=6.127\text{ m}$ 。理论所得围岩松动圈半径与实测结果误差约为9.5%。

算例二 石门隧道^[22]建筑限界:净宽16.50 m,净高5.50 m;内轮廓采用单心圆曲墙式设计,内半径 $R=7.50\text{ m}$,仰拱内半径为21.88 m;最大开挖宽度18.0 m。岩石力学参数如表2所示。

起的附加应力 $\Delta\sigma_r$ 组成,即

$$\sigma_r^{\text{loc}} = \sigma_r^e + \Delta\sigma_r \quad (17)$$

根据应力松弛的Maxwell模型,缺陷处应力集中的演化方程可以表示为

$$\frac{d\Delta\sigma_r}{dt} = J \frac{E_c}{2(1+\nu)} \frac{de_r}{dt} - \eta \frac{\Delta\sigma_r}{l} \quad (18)$$

式中: J 为特定尺寸缺陷上的应力集中系数; E_c 为岩体压缩模量; ν 为泊松比; e_r 为偏应变; η 为附加应力的松弛速率; l 为缺陷尺度。

结合Maxwell模型,下面分别分析环向加载和径向卸载产生的局部拉应力。

2.2 环向加载

假设开挖后应力调整时间为 t_{max} ,应力变化过程为线性过程,环向加载时围岩径向应力 σ_r 、环向应力 σ_θ 、轴向应力 σ_z 分别为(应力以压为正)

$$\sigma_r = \sigma_0 \quad (19)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 + \tau_{\text{max}} \frac{t}{t_{\text{max}}} \quad (20)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \quad (21)$$

按平面应变算,根据广义胡克定律可得径向应

变 ϵ_r 、环向应变 ϵ_θ 、轴向应变 ϵ_z 分别为

$$\epsilon_r = \frac{1-2\nu}{E_c} \sigma_0 - \frac{\nu}{E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (22)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1-2\nu}{E_c} \sigma_0 + \frac{1}{E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (23)$$

$$\epsilon_z = 0 \quad (24)$$

偏应变为

$$e_r = \epsilon_r - (\epsilon_r + \epsilon_\theta)/2$$

即

$$e_r = -\frac{1+\nu}{2E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (25)$$

将公式(25)代入公式(18)解得

$$\Delta\sigma_{r1} = \frac{J}{4} \frac{l}{\eta} \frac{\tau_{\max}}{t_{\max}} \left[\exp\left(-\frac{\eta}{l}t\right) - 1 \right] \quad (26)$$

式中: $\Delta\sigma_{r1}$ 为环向加载引起的局部应力变化量。

2.3 径向卸载

应力状态变化为

$$\sigma_r = \sigma_0 - \tau_{\max} \frac{t}{t_{\max}} \quad (27)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \quad (28)$$

$$\sigma_z = \sigma_0 \quad (29)$$

按平面应变计算,根据广义胡克定律计算应变为

$$\epsilon_r = \frac{1-2\nu}{E_c} \sigma_0 - \frac{1}{E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (30)$$

$$\epsilon_\theta = \frac{1-2\nu}{E_c} \sigma_0 + \frac{\nu}{E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (31)$$

$$\epsilon_z = 0 \quad (32)$$

式中: E_c 为岩体卸荷模量。

偏应变为

$$e_r = -\frac{1+\nu}{2E_c} \frac{t}{t_{\max}} \tau_{\max} \quad (33)$$

代入公式(18)解得

$$\Delta\sigma_{r2} = \frac{J}{4} \frac{l}{\eta} \frac{E_c}{E_e} \frac{\tau_{\max}}{t_{\max}} \left[\exp\left(-\frac{\eta}{l}t\right) - 1 \right] \quad (34)$$

式中: $\Delta\sigma_{r2}$ 为径向卸载引起的局部应力变化量。

2.4 劈裂破坏条件

将式(26)与式(34)相加可得总的局部应力变化量为

$$\Delta\sigma_r = \frac{J}{4} \frac{l}{\eta} \frac{\tau_{\max}}{t_{\max}} \left(\frac{E_c}{E_e} + 1 \right) \left[\exp\left(-\frac{\eta}{l}t\right) - 1 \right] \quad (35)$$

一般情况下,围岩在开挖后因弹性回弹诱发松动而存在较大尺寸的缺陷,即 $l \gg \eta t$,因而式(35)可

以进一步简化为

$$\Delta\sigma_r = -\frac{J}{4} \tau_{\max} \frac{t}{t_{\max}} \left(\frac{E_c}{E_e} + 1 \right) \quad (36)$$

当 $t = t_{\max}$ 时,单元体内径局部应力为

$$\sigma_r^{\text{loc}} = \sigma_r + \Delta\sigma_r = \sigma_0 - \tau_{\max} - \frac{J}{4} \tau_{\max} \left(1 + \frac{E_c}{E_e} \right) \quad (37)$$

若局部应力达到岩石抗拉强度 $-\sigma_t$,则裂隙扩展,此时初始地应力应满足的条件为

$$\frac{\sigma_0}{\tau_{\max}} = 1 + \frac{J}{4} \left(1 + \frac{E_c}{E_e} \right) - \frac{\sigma_t}{\tau_{\max}} \quad (38)$$

取 $J=2$,则

$$\frac{\sigma_0}{\tau_{\max}} = 1.5 + \frac{E_c}{2E_e} - \frac{\sigma_t}{\tau_{\max}} \quad (39)$$

深部围岩在一定的临界初始地应力条件下有可能发生劈裂破坏。 σ_0/τ_{\max} 取1/10,根据公式(39)可以得到发生劈裂的地应力与岩石模量的关系如图3所示。

局部拉应力使岩石内部的微裂纹扩展,直至贯穿形成劈裂破坏^[23]。而材料的不均匀性是产生局部拉应力的本质原因。在图3中,压缩模量与卸荷模量的比值反映了围岩不均匀性。不均匀岩体($E_c < E_e$)比均匀岩体($E_c = E_e$)发生劈裂破坏所需的初始地应力 σ_0 小,更容易发生破坏。

当最大支撑压力区 $r=c$ 处发生劈裂破坏形成环状破坏区后,一个更大的卸载面形成,围岩应力将再一次重新分布,形成新的松动圈。如果巷道埋深很大,新松动圈的应力状态仍然能够满足公式(39)所示破坏条件,则将发生新一轮的破坏,形成深部巷道特有的分区破裂化现象。

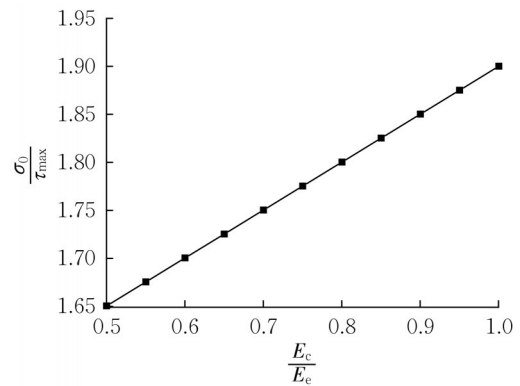


图3 劈裂的地应力与岩石模量的关系

Fig.3 Ground stress versus rock modulus of surrounding rock when splitting

3 结论

本文从开挖后围岩的平衡方程出发,结合泰勒公式,得到了围岩松动圈范围的理论计算公式。结合工程实际测量结果对计算公式加以验证,结果表明两者具有较好的一致性。采用 Maxwell 方程表征岩体缺陷处应力演化过程,给出了围岩发生破裂所满足的条件。综合研究结果发现:围岩松动圈范围与埋深相关,随着埋深增加,松动圈范围增大;围岩脆性越强,松动圈范围越大;围岩峰后强度越低,形成的围岩松动圈范围越大,这样才能给弹性区提供足够的支撑力,实现围岩的自稳。围岩松动圈破裂破坏的临界初始地应力与围岩抗剪强度、抗拉强度以及围岩不均匀性密切相关。围岩发生分区破裂时初始地应力存在临界值且越不均匀岩体越容易发生劈裂破坏。

本文计算公式同时考虑了初始地应力和围岩的峰后强度,计算结果更为合理;包含的力学参数在工程实际中容易获取,计算简便,可以为深部巷道的稳定性分析以及支护方式的确定提供计算依据。

作者贡献声明:

钱蓉:论文撰写。
邓树新:论文订正。
王明洋:研究思路指导。
邱艳宇:研究思路指导。

参考文献:

- [1] 郭志宏,靖付. 深井巷道围岩松动圈影响因素实测分析及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(1): 71.
GUO Zhihong, JING Fu. Study on the influencing factors and control technology of surrounding rock loose circle in deep roadway[J]. According to the Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(1): 71.
- [2] 戴俊,武宇,吴涛,等. 声波法和窥视技术相结合的围岩松动圈测试方法探究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(10): 81. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2015.10.030.
DAI Jun, WU Yu, WU Tao, *et al.* Research on broken zone testing by sonic wave and peep instrument [J]. Coal Technology, 2015, 34 (10): 81. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2015.10.030.
- [3] 王睿,袁崇洋,党发宁,等. 基于完整性系数的声波法围岩松动圈测试[J]. 公路交通科技, 2018, 35(6): 74.
WANG Rui, YUAN Dongyang, DANG Faning, *et al.* Testing loose circle of surrounding rock using acoustic method based on integrity coefficient [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35 (6): 74.
- [4] 李延河,杨战标,朱元广,等. 基于弱光纤光栅传感技术的围岩变形监测研究[J/OL]. [2023-03-14]. 煤炭科学技术. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20220826.1716.006.html>.
LI Yanhe, YANG Zhanbiao, ZHU Yuanguang, *et al.* Research on deformation monitoring of surrounding rock based on weak fiber grating sensing technology [J/OL]. [2023-03-14]. Coal Science and Technology. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20220826.1716.006.html>.
- [5] 赵海斌,付建军,周江平. 高地应力区大型地下洞室边墙松动圈动态分析研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(9): 35.
ZHAO Haibin, FU Jianjun, ZHOU Jiangping. Dynamic analysis of wall loosening zone of large underground caverns in high ground stress area [J]. Journal of Yangtze River Research of Institute, 2011, 28 (9): 35.
- [6] 于庆磊,蒲江涌,勒治华,等. 基于地质雷达的矽卡岩型铜铁矿巷道松动圈研究[J]. 金属矿山, 2021, 537(3): 46. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202103007.
YU Qinglei, PU Jiangyong, LE Zhihua, *et al.* Study on the broken rock zone of roadway in skarn copper-iron mine based on geological radar [J]. Metal Mine, 2021, 537 (3): 46. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202103007.
- [7] 于占军,杨玉中,左宝,等. 埋深对巷道围岩松动圈的影响研究[J]. 煤炭学报, 2022, 31(2): 4.
YU Zhanjun, YANG Yuzhong, ZUO Bao, *et al.* Research on the influence of buried depth on the loosening circle zone of surrounding rock [J]. Coal, 2022, 31 (2): 4.
- [8] 李建功,任家俊,丁坤朋. 深井高应力巷道松动圈测试及支护优化技术[J]. 山西冶金, 2021, 44(6): 62. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2021.06.024.
LI Jiangong, REN Jiajun, DING Kunpeng. Loose circle test and support optimization technology of high stress roadway in deep well [J]. Shanxi Metallurgy, 2021, 44(6): 62. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2021.06.024.
- [9] 曹庆华. 巷道围岩松动圈测定及支护参数优化[J]. 能源与环保, 2020, 42(9): 217.
CAO Qinghua. Measurement of surrounding rock loose zone of roadway and optimization of supporting parameters [J]. China Energy and Environmental Protection, 2020, 42 (9): 217.
- [10] 孙有为,薄景山,孙超. 地下洞室松动圈的研究方法与现状[J]. 防灾科技学院学报, 2009, 11(2): 13. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2020.09.048.
SUN Youwei, BO Jingshan, SUN Chao. Research methods and current situation of underground cavern loose circle [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention Science and Technology, 2009, 11 (2): 13. DOI: 10.19389/j.cnki.1003-0506.2020.09.048.
- [11] 史兴国. 巷道围岩松动圈理论的发展[J]. 河北煤炭, 1995(4): 1.
SHI Xingguo. Development of loose circle theory of roadway surrounding rock [J]. Hebei Coal, 1995(4): 1.
- [12] 周希圣,宋宏伟. 国外围岩松动圈支护理论研究概况[J]. 建井技术, 1994(S1): 67. DOI: 10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.

- 1994.z1.018.
ZHOU Xisheng, SONG Hongwei. Study on support theory of surrounding rock loose circle abroad [J]. *Mine Construction Technology*, 1994(S1): 67. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1994.z1.018.
- [13] 董方庭. 软岩巷道支护基础理论的研究 [J]. *建井技术*, 1991 (S1): 40. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1991.z1.013.
DONG Fangting. Research on basic theory of soft rock roadway support [J]. *Mine Construction Technology*, 1991 (S1): 40. DOI:10.19458/j.cnki.cn11-2456/td.1991.z1.013.
- [14] 邹红英, 肖明. 地下洞室开挖松动圈评估方法研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(3): 513.
ZOU Hongying, XIAO Ming. Study of methodology for assessment of excavation disturbed zone of underground caverns [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29 (3): 513.
- [15] 陈建功, 贺虎, 张永兴. 巷道围岩松动圈形成机理的动静力学解析 [J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(12): 1964.
CHEN Jianguo, HE Hu, ZHANG Yongxing. Dynamic and static analysis of mechanism of loosen zone in surrounding rock of tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, 33 (12): 1964.
- [16] 李政林, 吴瑞祥, 李龙剑, 等. 基于损伤理论的隧道围岩松动圈确定方法 [J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(6): 1060.
LI Zhenglin, WU Ruixiang, LI Longjian, *et al.* Method for defining the loose zone of tunnel surrounding rock based on damage theory [J]. *Chinese Journal Underground Space and Engineering*, 2011, 7 (6): 1060.
- [17] 赵国彦, 梁伟章, 王少锋, 等. 基于量纲分析的巷道围岩松动圈预测模型 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(S2): 273. DOI:10.16285/j.rsm.2016.S2.033.
ZHAO Guoyan, LIANG Weizhang, WANG Shaofeng, *et al.* Prediction model for extent of excavation damaged zone around roadway based on dimensional analysis [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (S2): 273. DOI:10.16285/j.rsm.2016.S2.033.
- [18] BAI H R, SHI Y J, CHEN L X. The loosen circle radius based on the theory of damage mechanics [C]// *Proceedings of the Advanced Materials Research*. [S.l.]: Advanced Materials Research, 2015:303-306.
- [19] 黄锋, 朱合华, 李秋实, 等. 隧道围岩松动圈的现场测试与理论分析 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 145.
HUANG Feng, ZHU Hehua, LI Qiushi, *et al.* Field detection and theoretic analysis of loose circle of rock mass surrounding tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37 (S1): 145.
- [20] WANG R, LIU Y, DENG X, *et al.* Analysis on loose circle of surrounding rock of large deformation soft-rock tunnel [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020: 8842976.
- [21] 王睿, 袁崇洋, 张进增, 等. 基于Hoek-Brown强度准则的隧道围岩松动圈分析 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13 (3): 58.
WANG Rui, YUAN Dongyang, ZHANG Jinzeng, *et al.* Analysis on broken zone of surrounding rock in tunnel based on Hoek-Brown strength criterion [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13 (3): 58.
- [22] 王睿. 隧道围岩松动圈确定方法及应用研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
WANG Rui. Research on determination method and application of surrounding rock loose circle of tunnel [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [23] 冯西桥. 脆性材料的细观损伤理论和损伤结构的安定分析 [D]. 北京: 清华大学, 1995.
FENG Xiqiao. Micro-failure theory for brittle materials and shakedown analysis of structures with damage [D]. Beijing: Tsinghua University, 1995.