

非均匀应力场条件下深部隧道围岩 变形和破坏特征研究

谢明龙^{1,2}, 张春雷³, 王涵石³, 王建望⁴

(1. 浙江华东工程咨询有限公司, 浙江 杭州 311122;

2. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000;

3. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223001; 4. 延安大学 建筑工程学院, 陕西 延安 716000)

摘要: 隧道所处地应力场是影响其开挖和支护方法选择的重要因素, 为了探究深部隧道在非均匀应力场下的围岩变形和破坏特征, 通过结合 Mohr-Coulomb 强度准则的理论分析和 PHASE2D 数值模拟, 系统研究了不同主应力比值(均大于1)、方向和隧道断面形状对围岩塑性区、应力场和位移场的影响。研究表明: 围压比的增加导致围岩塑性区形态从圆形向椭圆形和蝶形转变; 圆形断面在非均匀应力场中表现出最小变形和较均匀应力分布, 而矩形断面则因顶角应力集中导致复杂变形和应力分布; 最大主应力与水平面夹角为 90°时, 围岩蝶形区表现为标准的正蝶形, 且其边界尺寸较小, 强度系数分布较为集中, 有利于隧道集中支护; 非均匀应力场下的围岩强度系数分布呈现蝶形或不规则蝶形特征, 边界尺寸和位置随最大主应力与水平面夹角变化。

关键词: 深部隧道; 非均匀应力场; 围岩变形; 破坏特征

中图分类号: U452

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0098-07

Deformation and Failure Characteristics of Surrounding Rock in Deep Tunnels Under Non-uniform Stress Fields

XIE Minglong^{1,2}, ZHANG Chunlei³, WANG Hanshi³, WANG Jianwang⁴

(1. Zhejiang Huadong Engineering Consulting Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311122, China;

2. PowerChina HuaDong Engineering Corporation, Hangzhou, Zhejiang 310000, China;

3. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an, Jiangsu 223001, China;

4. School of Architecture and Engineering, Yan'an University, Yan'an, Shaanxi 716000, China)

Abstract: The in-situ stress field of tunnels significantly influences excavation and support methods. To explore surrounding rock deformation and failure characteristics of deep tunnels under non-uniform stress fields, this work systematically investigates the effects of principal stress ratios (all are greater than 1), directions, and tunnel cross-sectional shapes on plastic zones, stress fields, and displacement fields through theoretical analysis based on the Mohr-Coulomb strength criterion and PHASE2D numerical simulation. Results show that increasing confining pressure ratios transform plastic zone morphology from circular to elliptical and butterfly-shaped. Circular sections exhibit minimal deformation and the most uniform stress distribution, while rectangular sections suffer complex deformation due to corner stress concentration. When the maximum principal stress forms a 90° with the horizontal plane, the surrounding rock's butterfly zone appears as a standard positive butterfly shape with smaller boundary dimensions and concentrated strength coefficient distribution, favoring focused tunnel support. The strength coefficient distribution under non-uniform stress fields shows butterfly or irregular butterfly patterns, with boundary sizes and positions varying with the principal stress angle.

Keywords: deep tunnel; non-uniform stress field; surrounding rock deformation; failure characteristic

收稿日期: 2025-11-22

修稿日期: 2025-12-27

基金项目: 上海东大建筑设计研究院(集团)有限公司无锡分公司委托课题“海上风力发电特种灌浆料研发”(2025xhx097)

作者简介: 谢明龙(1989—), 男, 工程师, 主要从事市政工程技术咨询、工程造价管理。E-mail: xie_ml@hdec.com

通讯作者: 张春雷(1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事地下空间围岩稳定控制和地下空间开发与利用等方面的研究工作。

E-mail: fangyuanleihua@126.com

随着中国基础设施建设的快速发展,地下工程,特别是隧道工程,在交通、水利、矿山等多个领域扮演着至关重要的角色,且隧道开挖深度逐渐增大,围岩应力环境越复杂^[1-3]。在隧道开挖与运营过程中,为评价围岩稳定性以及进行隧道支护设计,需对隧道围岩应力分布和变形特征进行分析,因此,围岩的变形与破坏问题一直是工程界和学术界关注的焦点。关于隧道围岩应力分布和塑性区的计算往往采用 Kastner 方法^[4],虽然近些年来许多学者不断对其进行修正^[5],推动了隧道围岩塑性区计算的发展,但是由于理论计算的复杂性,目前关于隧道围岩应力场和塑性区的理论研究仍主要集中在均匀应力场下的圆形隧道。隧道围岩在实际工程中往往处于非均匀应力场中,水平应力一般大于垂直应力,且随着隧道埋深的增加和地质构造作用的影响,隧道所处天然应力场也在不断变化。隧道围岩呈现非均匀破坏特征,出现局部冒顶等问题,极大的增加了隧道维护难度,隧道围岩的稳定性面临着严峻挑战。

Kirsch^[6]基于弹性理论首次研究了非均匀应力场条件下圆形隧道围岩的弹性力学解,在此基础上,许多学者计算了不同岩石强度准则下的圆形隧道围岩塑性区。Detournay 等^[7]深入研究了非均匀应力场下圆形隧道的力学行为,并确定了其塑性区范围。陈立伟等^[8]基于统一强度理论分析了隧道围岩塑性区的大小,发现中间主应力对塑性区有显著影响。魏悦广^[9]通过摄动法对双向不等压作用下的圆形隧道进行分析,得到了围岩弹塑性问题的解答。赵志强^[10]采用统一强度理论,推导出了非均匀应力场影响下隧道塑性区边界的方程。Sheng 等^[11]基于 Mohr-Coulomb 准则,给出了深埋非圆隧道弹塑性围岩的广义摄动解。Luo 等^[12]提出了一种新的非均

匀应力场下圆形隧道围岩塑性区半径解析解,这些研究极大地丰富了非均匀应力场下隧道围岩塑性区的理论计算。数值模拟作为隧道工程的关键解决手段之一,在过去 20 年中得到了广泛应用,特别是在围岩应力分析中发挥了重要作用^[13]。贾剑青^[14]使用有限元方法分析了深埋隧道的塑性区,并确定了荷载松动圈的范围。赵启峰等^[15]采用 FLAC3D 模拟了不同阶段中沿空隧道覆岩结构的运移形态差异。江贝等^[16]利用非连续变形分析方法研究了隧道围岩的变形破坏和裂隙演化规律。何满潮等^[17]通过数值模拟结合室内岩石力学试验,研究了非均匀变形隧道的位移场和应力场分布,为隧道非均匀破坏特征理论提供了基础和依据。

然而,上述研究均仅考虑了单方面的影响因素,并未从隧道断面、应力条件等多重因素对隧道围岩力学响应特征的影响。因此,本研究基于深部隧道应力环境,首先通过理论分析探究双向非等压条件下隧道围岩塑性区形成的力学机制与形态特征,然后通过 PHASE2D 数值模拟探究主应力比值、方向、隧道断面等因素对隧道围岩强度系数、应力场和位移场影响规律,以及丰富复杂应力环境下隧道稳定性控制基础理论,为深部非均匀应力场隧道支护提供理论支撑。

1 圆形隧道围岩破坏机理

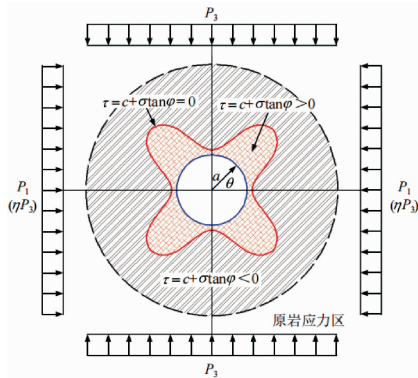
根据深部隧道隧道围岩应力环境,假设围岩满足 Mohr-Coulomb 强度准则,按照平面应变问题考虑,建立圆形隧道围岩非等压力学模型(见图 1),根据双向非等压圆形隧道周边围岩任意一点的应力解和 Mohr-Coulomb 准则的极坐标表达式,获得非等压圆形隧道围岩塑性区边界方程^[18],其表达式为:

$$\begin{aligned}
 & 9\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)\left(\frac{a_0}{R_0}\right) - \left[12\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 + 6\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos(2\theta)\right] \times \\
 & \left(\frac{a_0}{R_0}\right)^6 + 2\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \left\{\cos^2(2\theta)[5 - 2\sin^2(2\theta)] - \sin^2(2\theta)\right\} + \\
 & \left(1 + \frac{P_1}{P_3}\right)^2 + 4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos(2\theta)\left(\frac{a_0}{R_0}\right)^4 - \left[4\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos(4\theta) + 2\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right)^2 \cos(2\theta)(1 - \sin^2\varphi)\right] - \\
 & \frac{4}{\gamma H}\left(1 - \frac{P_1}{P_3}\right) \cos(2\theta) \sin(2\varphi)\left(\frac{a_0}{R_0}\right)^2(1 - \lambda)^2 - \sin^2\varphi \times \left(1 + \frac{P_1}{P_3} + \frac{2c}{\gamma H} \frac{\cos\varphi}{\sin\varphi}\right)^2 = 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

式中: a_0 为隧道塑性区边界; λ 为侧压系数; R_0 为隧道半径; γ 为土体重度; H 为埋深。

根据式(1),代入某一埋深隧道具体参数(以埋深 $H=400$ m, $\varphi=35^\circ$, $R_0=2.7$ m, $c=12$ MPa, 为例)

可计算得到圆形隧道在双向等压均匀应力场下的围岩塑性区为圆形,随着围压比的增加向椭圆形转化($\eta \approx 2$),并最终演化为蝶形($\eta > 2$)。



注: a 为隧道半径; c 为黏聚力; θ 为任一点极坐标角度; φ 为内摩擦角; η 为围压比; σ 为法向应力; τ 为抗剪强度; P_1 为最大主应力; P_2 为最小主应力。

图 1 圆形隧道围岩非等压力学模型

2 PHASE2D 数值模拟设计

2.1 模拟方案设计

确定矩形断面几何尺寸为长 10 m、高 5 m。在矩形断面基础上,其它隧道断面尺寸设置如下:圆形截面的半径为 5 m;直墙拱形截面的下半部分为长 10 m、高 5 m 的矩形,上半部分为半径 5 m 的半圆形。隧道围岩力学参数统一固定不变,本构关系采用摩尔-库仑模型,将初始地应力场中最小主应力固定为 10 MPa,通过改变最大和最小主应力比值和最大主应力与水平面夹角,模拟探究隧道开挖后的围岩应力响应。具体方案详见表 1。

表 1 矩形隧道主应力比值与角度模拟方案

最大主应力 /MPa	最大主应力与水平面夹角/(°)				
	30	60	90	120	180
15	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
20	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
25	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5

首先对矩形断面隧道围岩的垂直应力、水平应力、垂直位移和水平位移进行了模拟和分析,选择典型的应力和位移状态,并改变断面形状(圆形、直墙拱形),进一步探讨不同断面形状对隧道围岩垂直应力、水平应力、垂直位移和水平位移的影响。

2.2 数值模型建立

在 Phase2D 软件中,选择点 $(-5, 5)$ 、 $(-5, 0)$ 、 $(5, 0)$ 、 $(5, 5)$ 作为四个顶点,构建了一个尺寸为 10 m \times 5 m 的隧道模型。随后,为避免边界效应,设计了尺寸为 110 m \times 110 m 的外部围岩,以形成完整的

围岩模型。接着,对整个模型采取离散与网格划分的方法进行处理。确定边界条件后,施加场应力,最大主应力设置为 15 MPa,最小主应力为 10 MPa,且最大主应力与水平面成 30° 夹角。由于本研究不考虑围岩力学参数的影响,所有模型的参数均设定为固定值:内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$,弹性模量 $E = 20$ GPa,黏聚力 $c = 12$ MPa。

3 非均匀应力中最大最小主应力比值对隧道围岩应力与位移影响

以最大主应力与水平面夹角为 60° 为例,当最大主应力与最小主应力的比值分别为 1.5、2 和 2.5 时,对隧道围岩四周各边距离隧道边缘 0.1 m 处的垂直应力进行了监测,根据统计数据绘制了垂直应力曲线,如图 2 所示,其中横坐标的 0 点表示隧道在水平方向的中心位置。

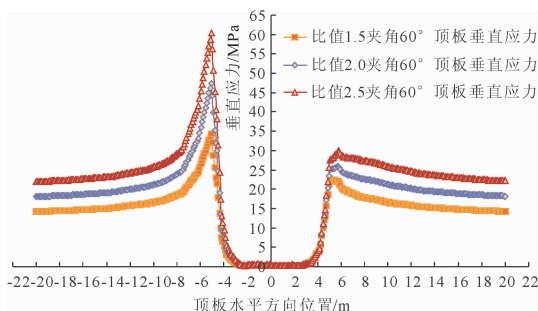


图 2 夹角 60° 隧道顶板 0.1 m 处的垂直应力曲线

从图 2 中可以看出,当最大主应力与水平面夹角为 60° 时,隧道顶板和底板中心处的应力几乎为零,表明这两个位置卸压效果显著。此外,顶板和底板的垂直应力曲线图整体呈现对称状态。当最大最小主应力比值(以下简称比值)变化时,可以观察到,随着比值的增大,隧道顶板和底板所承受的垂直应力呈线性增长,即顶板和底板的垂直应力与比值之间存在线性正相关关系,峰值应力从 35 MPa(比值 1.5)增加到 60 MPa(比值 2.5)。无论最大最小主应力比值如何,隧道顶板垂直应力的最大值均出现在横坐标 -6 至 -4 之间,表明此时应力集中在隧道顶板的左顶角。

夹角 60° 隧道左帮 0.1 m 处的垂直应力曲线如图 3 所示,由图 3 中可以看出,当最大主应力与水平面形成 60° 夹角时,隧道两侧的垂直应力曲线呈现出整体对称的特点。随着最大和最小主应力比值的增加,隧道两侧的垂直应力随之线性增加,显示出与

比值的正相关关系。值得注意的是,无论最大最小主应力比值如何,隧道左侧的垂直应力峰值均位于横坐标 4 至 6 之间,这表明应力在隧道顶板的左上角处集中。

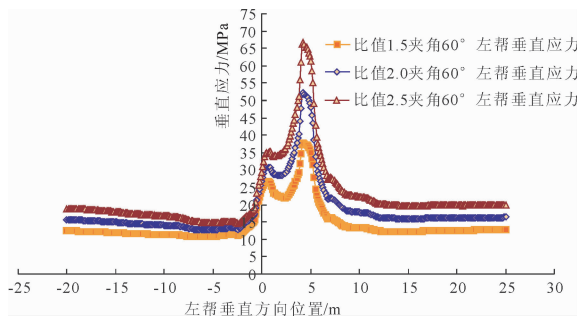


图 3 夹角 60°隧道左帮 0.1 m 处的垂直应力曲线

图 4 展示了隧道顶板和底板各测点的垂直位移曲线。从图 4 中可以看出,由于隧道为规则矩形且受力不均匀,顶板和底板的垂直位移曲线呈现出对称的特征。这种对称性源于顶板和底板所受应力的相似性和对称性。随着最大最小主应力比值的增大,顶板和底板的垂直位移也显著增加。图 4 还可看出,由于最大主应力与水平面的夹角为 60°,隧道顶板的垂直位移曲线的最大值偏向顶板中心的右侧,并且随着最大最小主应力比值的增大,垂直位移的值也相应增大,最大位移量从 0.0062 m 增加至 0.01 m。

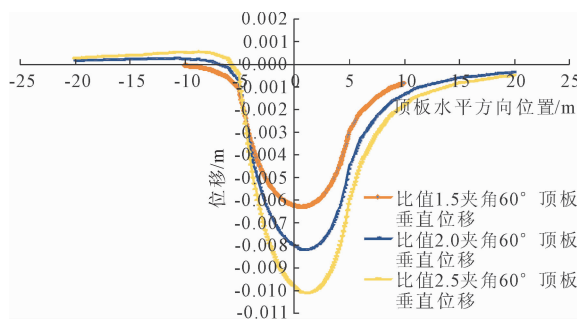


图 4 夹角 60°隧道顶板垂直位移曲线

图 5 展示了隧道左帮各测点的水平位移曲线。从图 5 可以看出,由于隧道的规则矩形形状和受非均匀应力场影响,水平位移曲线图呈现出反对称的特征。这是因为隧道两侧所受的应力相似且对称。图 5 还表明,在横坐标 -5 至 0 之间,即隧道左侧中心下部,水平位移逐渐增大,且水平位移峰值随着最大最小主应力比值的增加而增大。

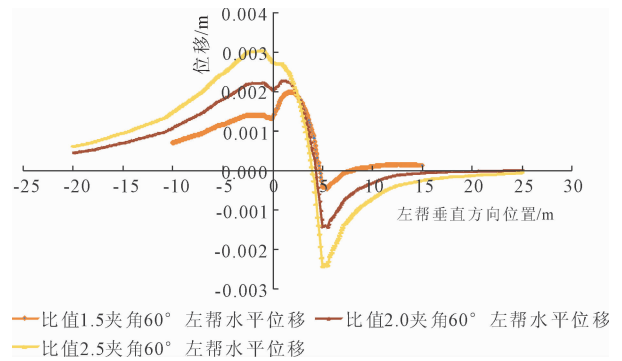


图 5 夹角 60°隧道左帮水平位移曲线

4 断面对隧道围岩应力与位移影响

在最大主应力与水平面夹角为 90°且最大最小主应力比值为 2.5 的情况下,统计了矩形、圆形及直墙拱形断面隧道顶板和底板边缘 0.1 米处的垂直应力,并绘制了垂直应力曲线图(图 6、图 7)。图 6、图 7 表明,在固定的最大最小主应力比值和主应力与水平面夹角的条件下,仅通过改变断面形状会影响结果。无论断面形状如何,隧道顶板和底板中心处的垂直应力接近于零,表明这些位置几乎没有垂直应力影响。如图 6 所示,由于直墙拱形断面的上半

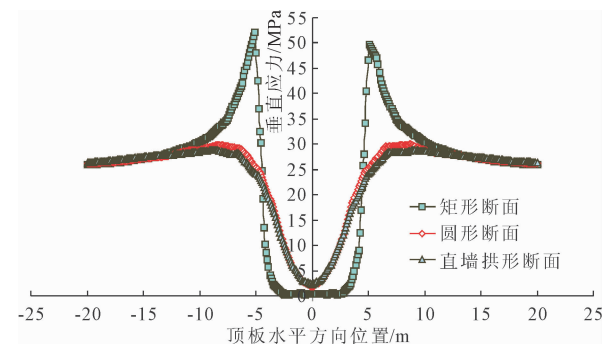


图 6 不同断面隧道顶板垂直应力曲线 (0.1 m 处,比值 2.5 夹角 90°)

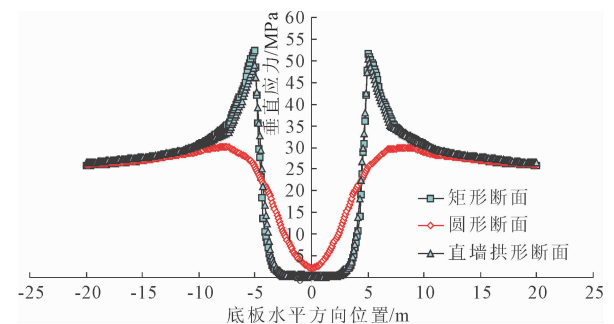


图 7 不同断面隧道底板垂直应力曲线 (0.1 m 处,比值 2.5 夹角 90°)

部分是半圆形,顶板的垂直应力曲线与矩形断面相似,仅矩形断面的顶板角部有应力集中现象;如图 7 所示,直墙拱形断面的下半部分与矩形断面相近,导致底板上出现两个应力集中区域,而圆形断面则没有类似的应力集中区域。

图 8 展示了不同断面形状的隧道顶板各测点的垂直位移曲线。从图 8 中可以看出,三种断面形状的隧道顶板的垂直位移均呈现中间高、两侧低的趋势。具体来说,直墙拱形断面和圆形断面的顶板垂直位移曲线在上半部分较为相似,而矩形断面的顶板垂直位移则为最大。对于底板,直墙拱形断面与矩形断面的下半部分垂直位移曲线较为相似,而圆形断面的底板垂直位移则最小。

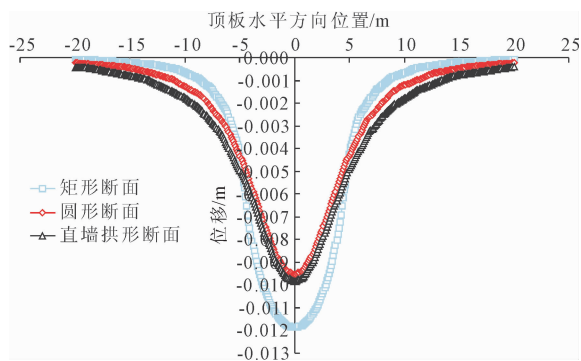


图 8 不同断面隧道顶板垂直位移曲线
(0.1 m 处,比值 2.5 夹角 90°)

图 9 展示了隧道两侧各测点的水平位移曲线。从图 9 中可以看出,在最大最小主应力比值和最大主应力与水平面夹角固定的情况下,改变断面形状会影响水平位移特征,总体上直墙拱形断面峰值水平位移量最大。由前文可知,直墙拱形断面为上半部分半圆形、下半部分矩形组合而成,因此两侧的水平位移同时表现出矩形断面和圆形断面的特征。

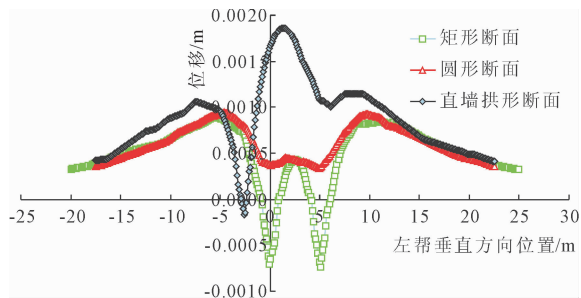


图 9 不同断面隧道左帮水平位移曲线
(0.1 m 处,比值 2.5 夹角 90°)

5 围岩强度系数分布特征

大量研究表明,隧道围岩的变形和破坏是围岩

强度系数分布特征形成和发展的结果。分布的形态和范围决定了隧道破坏的模式和程度。传统理论认为,隧道围岩的强度系数分布特征通常包括圆形、椭圆形、自然冒落拱形以及不规则块体破坏等几种形态。这些理论主要适用于双向等压、松散岩体及浅部层状岩体等条件。

在非均匀应力场中,隧道周围的围岩应力场呈现双向不等压特征。已有研究表明,在侧压系数满足特定条件下,这种双向不等压应力场中的隧道围岩强度系数分布通常呈现为“蝶形”或“不规则蝶形”^[18]。图 10 展示了在最大最小主应力比值为 2.5 的情况下,最大主应力与水平面夹角为 30° 、 60° 、 90° 、 120° 和 180° 时的隧道强度系数云图(由于篇幅限制,此处仅展示夹角为 90° 的云图)。

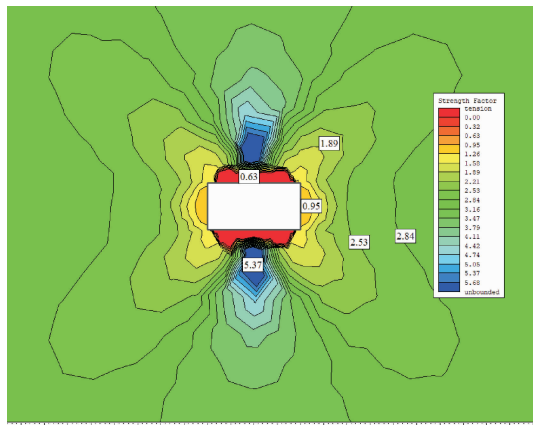


图 10 最大最小主应力比值 2.5 隧道围岩强度系数云图(夹角 90°)

从图 10 可以看出,当最大最小主应力比值为 2.5 时,隧道围岩强度系数云图呈现出独特的蝶形分布特征(蝶形量化示意图见图 11)。具体而言,强度系数云图中的黄色区域及其外围的浅绿色范围体现了这种蝶形分布。在非均匀应力影响下,强度系数的蝶形分布形态会随着最大主应力与水平面夹角的变化而旋转。当夹角为 30° 时,蝶形区域的最小尺寸出现在与夹角方向相同的区域边界中心。最大尺寸方向几乎与夹角方向一致,蝶形区域的最大部分位于顶板和底板的角部,并且与夹角方向以 30° 逆时针旋转一致。夹角为 60° 时,最小尺寸旋转至夹角 60° 方向的边界中点,最大尺寸位置分别在顶板和底板的角部,旋转夹角 60° 方向。夹角为 90° 时,最小尺寸位于垂直方向的中心,即顶板和底板的垂直中心,最大部分则位于顶板和底板的角部。夹角为 120° 时,强度系数云图与夹角为 60° 时对称,最小尺寸旋转至夹角 120° 方向的边界中点,最大尺寸

位于顶板和底板的角部,旋转夹角 120° 方向。夹角为 180° 时,强度系数云图与夹角为 0° 时相似,最小尺寸位于水平方向的中心,最大部分则位于隧道两侧的两个角。

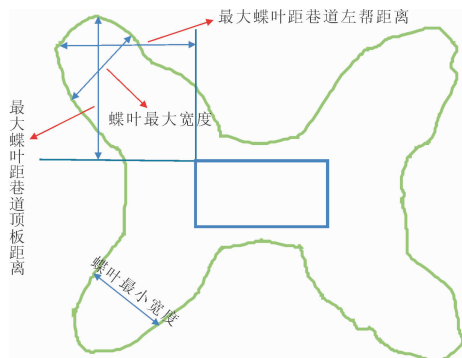


图 11 蝶叶量化示意图

对图 10 进行细化分析,可得到强度系数云图蝶叶宽度、最大蝶叶距隧道顶板距离以及最大蝶叶距隧道左帮距离的情况,如图 12 所示。

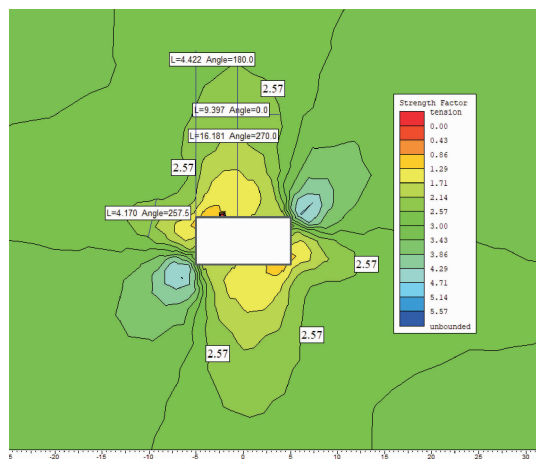


图 12 最大最小主应力比值 2.5 隧道围岩强度系数分布 (仅展示夹角 30°)

图 12 展示了强度系数为 2.57 的蝶形区在不同最大主应力与水平面夹角下的变化情况。当夹角从 30° 增加到 90° 时,蝶叶的最大宽度随着夹角的增大而减小,而蝶叶的最小宽度则随着夹角的增大而增大。同时,最大蝶叶距隧道顶板的距离也随着夹角的增大而减小。在夹角为 30° 时,蝶叶的最大宽度为 9.397 m,最小宽度为 4.170 m,最大蝶叶距隧道顶板的距离为 16.181 m,距隧道左帮为 4.422 m。夹角为 60° 时,蝶叶的最大宽度为 8.439 m,最小宽度为 7.148 m,最大蝶叶距隧道顶板为 15.026 m,距隧道左帮为 2.764 m。夹角为 90° 时,蝶形区表现为标准的正蝶形,蝶叶的最大和最小宽度几乎相等,大

约为 6.852 m,最大蝶叶距隧道顶板为 9.548 m,距隧道左帮为 6.432 m。在夹角从 90° 增加到 180° 时,蝶叶的最大宽度随夹角增大而增加,最小宽度则随夹角增大而减小,最大蝶叶距隧道顶板的距离也随夹角增大而增加。夹角为 120° 时,由于与夹角 60° 的强度系数云图对称,蝶形区的蝶叶宽度与夹角 60° 时相似,蝶叶的最大宽度为 8.271 m,最小宽度为 6.630 m,蝶形区的最大蝶叶距隧道顶板为 20.202 m,距离隧道左帮为 0.754 m。夹角为 180° 时,强度系数云图最为特殊,此时蝶形区仅有两扇蝶叶,集中在隧道顶板和底板附近,形成的蝶形区范围最小,而蝶叶宽度为整个蝶形宽度,最大。蝶叶宽度、最大蝶叶距隧道顶板距离和最大蝶叶距隧道左帮距离的汇总见表 2。

表 2 最大最小主应力比值 2.5 隧道围岩强度系数 2.57 蝶叶分布表

蝶叶参数	最大主应力与水平面夹角/ $(^\circ)$				
	30	60	90	120	180
蝶叶最大宽度/m	9.397	8.439	6.852	8.271	14.523
蝶叶最小宽度/m	4.170	7.148	6.852	6.630	—
最大蝶叶距隧道顶板距离/m	16.181	15.026	9.548	20.202	17.488
最大蝶叶距隧道左帮距离/m	4.422	2.764	6.432	0.754	5.176

6 结 论

本研究结合理论分析和数值模拟,探究了深部隧道在非均匀应力场下的围岩变形和破坏特征,得出的主要结论如下:

- (1) 随着围压比的增加,围岩塑性区形状由一开始的圆形变为椭圆形,并最终变成了蝶形。
- (2) 圆形断面在所有模拟条件下表现出最小的变形和最均匀的应力分布,说明圆形断面在非均匀应力场中具有较好的稳定性。
- (3) 对于矩形断面,由于顶角处应力集中现象显著,导致其变形和应力分布较为复杂,尤其是在顶板和底板位置的应力集中更为明显。在设计过程中,需要特别关注顶角区域的支持设计,以防局部破坏。
- (4) 随着主应力比值的增加,隧道顶板和底板的垂直应力和垂直位移均线性增大。
- (5) 非均匀应力场下,围岩强度系数分布呈蝶形或不规则蝶形特征。具体表现为,在不同的最大主应力与水平面夹角 (30° 、 60° 、 90° 、 120° 、 180°) 下,

蝶形区边界的尺寸和位置发生变化。当最大主应力与水平面夹角为 90° 时,蝶形区表现为标准的正蝶形,且其边界尺寸较小,强度系数分布较为集中,有利于支护设计的集中处理。

参考文献:

- [1] Zhang Anlin, Xie Heping, Zhang Ru, et al. Mechanical properties and energy characteristics of coal at different depths under cyclic triaxial loading and unloading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 161: 105271.
- [2] Zhang Anlin, Xie Heping, Zhang Ru, et al. Dynamic failure behavior of Jinping marble under various preloading conditions corresponding to different depths [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 148: 104959.
- [3] Zhang Zhaopeng, Xie Heping, Zhang Ru, et al. Deformation damage and energy evolution characteristics of coal at different depths [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52: 1491-1503.
- [4] Kastner H. *Static des Tunnel-und Stollenbaues* [M]. Berlin: Springer, 1971.
- [5] Cheng Y. Modified kastner formula for cylindrical cavity contraction in mohr-coulomb medium for circular tunnel in isotropic medium [J]. *Journal of Mechanics*, 2012, 28 (1): 163-169.
- [6] Kirsch G. *Die Theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre* [J]. *Zeitschrift Verein Deutsch Ing*, 1898, 42: 797-807.
- [7] Detournay E, Fairhurst C. Two-dimensional elastoplastic analysis of a long, cylindrical cavity under non-hydrostatic loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1987, 24(4): 197-211.
- [8] 陈立伟,彭建兵,范文,等.基于统一强度理论的非均匀应力场圆形隧道围岩塑性区分析[J].*煤炭学报*, 2007, 32(1): 20-23.
- [9] 魏悦广.两向不等压作用下圆形隧道弹塑性分析摄动解[J].*岩土工程学报*, 1990, 12(4): 11-20.
- [10] 赵志强.大变形回采隧道围岩变形破坏机理与控制方法研究[D].北京:中国矿业大学(北京), 2014: 59-61.
- [11] Sheng Yuming, Zou Jinfeng, Dong Yuepeng, et al. Novel perturbation solutions for deep-buried non-circular tunnels under biaxial in situ stress field based on Mohr-Coulomb criterion [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2022, 110: 408-440.
- [12] Luo Ziwen, Zhang Ru, Ren Li, et al. Analytical solution and factors influencing the tunnel plastic zone under a nonuniform stress field [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28(7): 3016-3032.
- [13] 池建军,滕杰,尚彦军,等.天山深埋隧道复杂地质条件影响下地应力分布数值模拟分析对比[J].*科学技术与工程*, 2024, 24(25): 10936-10945.
- [14] 贾剑青,王宏图,李晓红,等.深埋隧道软硬交替复合顶板岩体变形破坏分析[J].*岩土力学*, 2005, 26(6): 937-940, 950.
- [15] 赵启峰,杜锋,李强,等.综采工作面沿空掘巷围岩控制技术[J].*煤炭科学技术*, 2015, 43(10): 23-28.
- [16] 江贝,李术才,王琦,等.基于非连续变形分析方法的深部沿空掘巷围岩变形破坏及控制机制对比研究[J].*岩土力学*, 2014, 35(8): 2353-2360.
- [17] 何满潮,王晓义,刘文涛,等.孔庄矿深部软岩巷道非对称变形数值模拟与控制对策研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2008, 27(4): 673-678.
- [18] 李臣,马念杰,辛德林,等.基于蝶形理论的常规锚杆索支护围岩控制效用研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2024, 43(S1): 3195-3203.