深部软岩巷道椭环双锚壳全空间协同支护技术及工程应用

左建平[1,2],朱　凡[1,2],王　军[3],马宗宇[2],丁厚刚[4],徐丞谊[2],刘发义[5]
(1. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院,北京　100083;2. 中国矿业大学(北京)采矿岩石力学国际创新中心,北京　100083;3. 山东建筑大学 土木工程学院,山东 济南　250000;4. 山东深博巷道支护技术有限公司,山东 济南　250000;5. 晋能控股装备制造集团 沁水胡底煤业有限公司,山西 晋城　048200)

摘要: 针对沁水煤田胡底煤矿深部软岩大变形且难以支护的难题,深入分析了不同断面形状巷道围岩受力特征,基于等强支护理论进一步提出了椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护模型,开发等效轴比可调技术与地应力环境动态匹配,确定不同锚固长度的锚杆索构建椭圆承载结构,内部以高强度的钢管混凝土支架作为“刚性支撑核”,形成主被动协同的全空间支护体系. 分析了不同断面与埋深时巷道围岩所需的支护强度计算公式,采用数值模拟的方法分析了不同断面形状、埋深、轴比关系、协同效果与支护方式差异等因素下的围岩应力演化及变形情况. 结果表明:随着埋深增加,全空间协同支护在不同断面的围岩控制能力逐渐增强并优于初始支护方式,从最大控制变形效率可达75.4%、峰值应力下降约11.9 MPa、应力差值减小等证明了等效轴比调控的可行性,锚固边界应力趋向平稳,差值在0.98～1.21 MPa,通过现场工业试验监测支架全断面受力状态同步验证了全空间协同支护的可行性.

关键词: 椭环双锚壳-钢管混凝土支架;等应力轴比;椭圆承载结构;全空间协同支护
中图分类号: TD 353　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1000-1964(2026)02-0447-18

Full-space cooperative support technology and engineering application of elliptical ring double-anchor shell for deep soft-rock roadways

ZUO Jianping[1,2], ZHU Fan[1,2], WANG Jun[3], MA Zongyu[2], DING Hougang[4], XU Chengyi[2], LIU Fayi[5]
(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 2. International Innovation Center for Mining Rock Mechanics, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China; 3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250000, China; 4. Shandong Shenbo Roadway Support Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China; 5. Qinshui Hudi Coal Industry Co., Ltd., Jinneng Holdings Equipment Manufacturing Group, Jincheng, Shanxi 048200, China)

Abstract: Aiming at the problem of large deformation and difficult support of deep soft rock in Hudi Coal Mine of Qinshui Coalfield, the stress characteristics of surrounding rock of roadway with different cross-section shapes were analyzed in depth. Based on the theory of uniform-strength sup-

收稿日期: 2025-09-27　　**修回日期:** 2026-01-01　　**DOI:** 10.13247/j.cnki.jcumt.20250393
基金项目: 国家自然科学基金项目(52225404,52394192,12532020);新疆自治区重点研发计划项目(2024B03017)
通信作者: 左建平(1978—),男,江西省高安市人,教授,博士生导师.E-mail: zjp@cumtb.edu.cn
引用格式: 左建平,朱　凡,王　军,等.深部软岩巷道椭环双锚壳全空间协同支护技术及工程应用[J].中国矿业大学学报,2026,55(2):447-464.
ZUO Jianping, ZHU Fan, WANG Jun, et al. Full-space cooperative support technology and engineering application of elliptical ring double-anchor shell for deep soft-rock roadways[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2026, 55(2): 447-464.

port, the full-space cooperative support model of elliptical ring double-anchor shell concrete-filled steel tube support was proposed for the first time. The equivalent axial ratio adjustable technology was developed to dynamically match the in-situ stress environment. The anchor cables with different anchorage lengths were determined to construct the elliptical bearing structure, and the high-strength concrete-filled steel tube support was used as the "rigid support core" to form a full-space cooperative system with active and passive coordination. The calculation formula of supporting strength required by surrounding rock of roadway with different section and buried depth was analyzed. The numerical simulation method was used to analyze the stress evolution and deformation of surrounding rock under different cross-section shapes, buried depths, axial ratio relationships, cooperative effects, and differences in support methods. The results show that with the increase of buried depth, the surrounding rock control ability of the full-space cooperative support in different sections is gradually enhanced and better than that of the initial support method. The maximum control deformation efficiency can reach 75.4%, the peak stress decreases by about 11.9 MPa, and the stress difference decreases, which proves the feasibility of the equivalent axial ratio control. The stress of anchorage boundary tends to be stable, and the difference is 0.98 ~ 1.21 MPa. The feasibility of the full-space cooperative support is verified by monitoring the stress state of the whole section of the support through the field industrial test.

Key words: elliptical ring double-anchor shell concrete-filled steel tube support; equivalent stress axis ratio; elliptical bearing structure; full-space cooperative support

煤炭是我国的主体能源之一,每年的煤炭开采需要掘进大量巷道,巷道所处应力环境复杂,需要相应的巷道支护理论与技术控制围岩变形,实现安全高效生产.浅部巷道支护理论与技术相对完善,当开采重心逐渐向深部转移时,深部软岩巷道高应力集中导致围岩产生大变形现象增多,深部开采面临着诸多严峻的巷道围岩大变形问题.

很多专家学者深入研究了巷道围岩的支护控制问题,提出诸多支护理论并不断革新.早期提出了古典压力理论、塌落拱理论、新奥法支护理论、围岩强度强化理论、松动圈理论等,包括现阶段大量的支护理论也围绕着围岩的自承能力与支护结构作用关系逐渐创新.联合支护理论的核心思想是面对井下巷道诸多差异化环境采用"先柔后刚、先让后抗、柔让适度、稳定支护"的方式协同支护作用.关键部位耦合支护理论[1]认为围岩与支护体的强度和刚度耦合是支护稳定性的关键,需要柔性的面支护与关键部位的点支护协同作用.蝶形塑性区支护控制理论[2-3]的核心思想为塑性区是影响巷道稳定的主要影响因素,与巷道破坏模式存在一定的对应关系,通过支护提高围岩的承载能力,从而阻止塑性区恶性扩展.

针对深部复杂的地应力环境,提高"支护-围岩"整体的协同作用尤为关键[4-7],诸多学者提出了新的协同承载结构理论,如主次承载区支护理论[8-9],核心思想是将巷道围岩的支护区域分为辅助承载的次承载区与保证稳定的核心主承载区,主次承载区协同作用保证巷道稳定性.文献[10]提出深部强采动大断面巷道围岩内锚-外卸协同控制技术,核心原理是固结修复、桁索强锚、内卸转移、内外协同.巷道承压环强化支护理论[11]以锚网喷为基础,认为巷道全断面的锚杆连续挤压形成的加固拱的厚度、钢管混凝土支架与混凝土喷层厚度协同作用形成了承压环.文献[12]依据围岩承载分层的演化规律提出了"层-双拱"协同承载结构的力学模型.文献[13]通过长短锚索层次协同控制的方法,认为高预紧力与高刚度的短锚索增强浅部破碎围岩强度,长锚索稳定锚固在弹性区范围增强控制能力,针对性的差异支护方案在复合软岩巷道中应用良好.综合诸多学者的研究内容,主动支护的目的在于提高围岩的自承载能力,通过构建不同的协同承载结构来优化控制效果,诸多学者采用不同方法对压力拱结构进行划分[14-18],分析其应力分布形态和演化特征.

文献[19]提出了轴变论理论,通过改变巷道的轴比形成稳定的应力环境,匹配地应力环境的最佳轴比为椭圆形.文献[20]采用弹性力学方法提出了等效断面理论,在围岩的内部形成椭圆形承载结

构，建立了最佳轴比关系．等强梁支护理论[21-23]以材料力学等强度梁的概念为基础，提出等强支护控制模型，最大程度恢复初始等强的状态，匹配不同地应力环境达到该状态，依据围岩的受力状态，采用主动卸压、围岩注浆加固、主被动空间协同支护等综合手段，调整巷道周边的应力状态达到等强支护的效果．因此综合前人成果，分析认为基于等强支护理论和轴变论等，采用不同长度支护材料构建椭圆形承载结构可动态匹配不同地应力环境，形成等应力状态，可作为深部软岩巷道支护的参考方向并进行深入研究，扩展新的支护方式．

本文针对胡底煤矿巷道深部软岩巷道大变形的问题，通过理论计算、力学试验以及数值模拟等方式综合分析了不同断面巷道围岩应力分布特征及变形破坏机理，首次提出了深部椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护控制技术，建立了不同断面形状的最佳轴比关系并与地应力场动态匹配，确定不同的锚固深度，构建“支护-围岩”椭圆壳状承载结构体，综合多因素影响分析全空间协同支护的实际应用效果．

1　胡底煤矿工程背景介绍

晋能胡底煤矿位于沁水县胡底乡，井田地质中褶曲构造较多，断裂构造较少，倾角小于10°．如图1所示，5条大巷空间平行布置，间距为25 m，埋深为750～800 m，平均倾角为3°，主采煤层为3#煤层，煤层厚度为6.05 m，节理发育，坚固系数约为1.2～1.5，属于松软煤层．通过应力解除法测得最大水平主应力为21.2，18.8和21.7 MPa，方位角为248.2°，倾角为15°，侧压系数为1.3～1.4．5条大巷中，1103巷道断面为矩形，1105巷道为圆形，其余为直墙半圆拱形，其中1105巷道为主进风大巷，沿煤层顶板掘进，巷道顶底板主要以软弱的砂质泥岩为主，厚度约16 m，地层综合柱状图如图2所示．

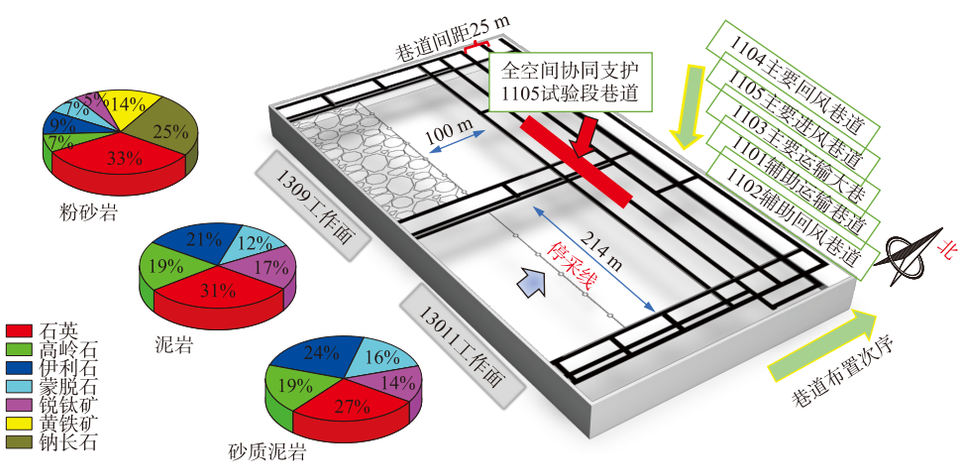


图1　巷道采掘平面图

Fig. 1　Roadway mining planar graph

柱状	岩层	厚度/m	累积厚度/m	岩性
	泥岩	14.00	751.00	灰黑色，泥质结构，块状构造
	粉砂岩	10.00	761.00	主要矿物成分为石英、云母
	砂质泥岩	16.00	777.00	黑色-灰色、砂状泥状构造
	粉砂岩	10.00	787.00	伊利石含量9%，蒙脱石含量7%
	砂质泥岩	16.00	803.00	石英含量27%，高岭石含量19%
	煤	6.05	809.05	黑色，光亮，玻璃光泽
	砂质泥岩	16.00	825.05	伊利石含量24%，蒙脱石含量16%
	细粒砂岩	12.00	837.05	灰、细粒砂结构，中厚层
	泥岩	18.00	855.05	深灰-灰黑色泥岩、粉砂质泥岩

图2　地层综合柱状图

Fig. 2　Comprehensive histogram of strata

2　胡底煤矿巷道变形破坏特征

由于胡底煤矿1105巷道埋深大，应力集中效应显著，依据现场收集的围岩变形及钻孔取芯数据情况，总结出巷道的变形破坏特征如下：

1)通过钻孔取芯可知岩层结构为包含21%伊利石和12%蒙脱石的泥岩，24%伊利石与16%蒙脱石的砂质泥岩，具有较强的吸水性，产生膨胀变形，体积增加，含水率增加进一步减少了岩体裂隙的摩擦，增大了应力的敏感性使塑性区体积扩张．巷道围岩帮部以煤岩为主，顶底板存在大量软弱夹层，包括一些小构造、破碎带及煤线，使得锚杆或者锚索的自由端内陷，锚固端无法锚固在稳定

岩层上，不利于围岩的稳定．原支护采用了锚网喷、U 型钢支架等多种支护方式，效果不理想，帮部产生 0.7～1.0 m 的变形量导致金属网破断、U 型钢支架扭曲变形断裂．

2）如图 3 所示，巷道帮部存在张裂贯通裂纹，帮部变形量为 0.4～1.1 m，高应力作用下巷帮围岩不断向巷道内挤破坏支护材料，导致行人无法通过，顶板结构相对完整．部分锚索发生剪切破坏，局部锚杆被整体拔出，喷浆层脆性破断内挤张裂．巷道进行多次返修，锚索呈补丁状，靠单体柱及木支垛支撑，原支护不能有效维持巷道的稳定性，影响巷道的正常使用．

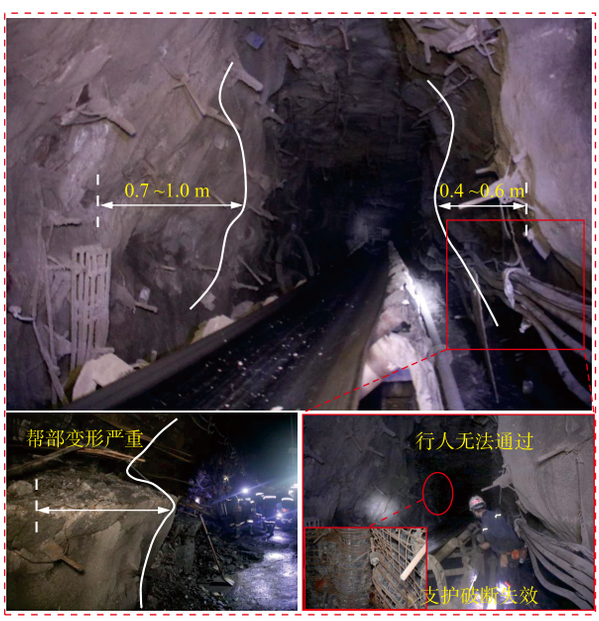


图 3 1105 巷道变形破坏特征

Fig. 3 Deformation and failure of 1105 roadway

3 不同形状巷道应力场分析与等效椭圆支护力学演化模型

为了深入研究深部软岩巷道围岩变形破坏机理，采用理论计算的方法分析不同形状巷道的围岩受力特征及应力场分布情况．首先建立基本假设关系：①材料均匀性与各向同性．假设围岩为各向同性、均匀且连续介质，忽略节理、裂隙等非均质特征．②小变形假设．在弹性阶段，应变与位移满足线性几何关系，塑性阶段允许有限变形．③大巷在 z 轴方向无限长且无应力，简化为平面应变问题．

采用增量理论描述弹塑性行为，总应变分解为弹性应变 ε^{e} 和塑性应变 ε^{p}：

$$d\varepsilon_{ij}=d\varepsilon_{ij}^{e}+d\varepsilon_{ij}^{p}, \tag{1}$$

式中：ε_{ij} 为应变张量的分量；ε_{ij}^{e} 为弹性应变张量的分量；ε_{ij}^{p} 为塑性应变张量的分量．

弹性阶段符合广义胡克定律：

$$\sigma_{ij}=2G\varepsilon_{ij}+\lambda_0\sum\varepsilon_{kk}\delta_{ij}, \tag{2}$$

式中：G 为剪切模量；λ_0 为拉梅常数；σ_{ij} 为应力张量的分量；ε_{kk} 为应变张量的迹；δ_{ij} 为单位张量．

塑性阶段采用 Mohr-Coulomb 屈服准则：

$$f(\sigma_{ij})=\frac{\sigma_1-\sigma_3}{2}+\frac{\sigma_1+\sigma_3}{2}\sin\varphi-c\cos\varphi=0, \tag{3}$$

式中：σ_1 为最大主应力；σ_3 为最小主应力；c 为黏聚力；φ 为内摩擦角．

3.1 典型圆形巷道应力场分析

巷道断面形状一般以圆形和矩形为主，随着埋深增加，水平应力与垂直应力比值一般在逐渐减小[24]，圆形巷道在特定的地应力环境拥有最佳的支护效果．如图 4 所示（图中 R_e 为弹性区半径，R_f 为破坏区半径），将圆形巷道围岩受力状态简化为平面应变问题，以均布受压 $P_1=(\lambda+K)\gamma h/2$ 和水平受拉、垂直受压 $P_2=(-\lambda+K)\gamma h/2$ 叠加构成（其中 K 为动载系数，λ 为侧压力系数，γ 为单位体积重量，h 为巷道埋深），假设岩体性质为弹塑性体且各向同性、连续、均质[25]．

弹性区内圆形巷道叠加计算后非均匀应力场径向应力与切向应力为

$$\sigma_{re}=-P_1\left(1-\frac{R_p^2}{r^2}\right)-P_2\cos 2\theta\left(1-\frac{R_p^2}{r^2}\right)\left(1-3\frac{R_p^2}{r^2}\right)+\sigma_{R_p}\frac{R_p^2}{r^2}, \tag{4}$$

$$\sigma_{\theta e}=-P_1\left(1+\frac{R_p^2}{r^2}\right)+P_2\cos 2\theta\left(1+3\frac{R_p^4}{r^2}\right)-\sigma_{R_p}\frac{R_p^4}{r^2}, \tag{5}$$

$$\sigma_{R_p}=c\cos\varphi+(P_1+2P_2\cos 2\theta)(1-\sin\varphi), \tag{6}$$

式中：σ_{re} 和 $\sigma_{\theta e}$ 为弹性区内径向应力和切向应力；R_p 为弹塑性交界面的半径；σ_{R_p} 为弹塑性交界面应力；r 为极坐标下的径向距离；θ 为极坐标下的角度．

塑性区内圆形巷道围岩的应力表达式通过塑性区应力平衡方程和极限平衡条件求得：

$$\sigma_{rp}=(\sigma_{R_p}+c\cot\varphi)\left(\frac{r}{R_p}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}-c\cot\varphi, \tag{7}$$

$$\sigma_{\theta p}=\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\left(\sigma_{R_p}+c\cot\varphi\right)\left(\frac{r}{R_p}\right)^{\frac{2\sin\varphi}{1-\sin\varphi}}-c\cot\varphi, \tag{8}$$

式中：σ_{rp}和$\sigma_{\theta p}$为塑性区内径向应力和切向应力.

破坏区内围岩应力表达式通过塑性区应力平衡方程和破碎区 Mohr-Coulomb 准则极限方程求得：

$$\sigma_{rf}=\left(P_3+\frac{\sigma_c}{k-1}\right)\left(\frac{r}{R_0}\right)^{k-1}-\frac{\sigma_c}{k-1}, \tag{9}$$

$$\sigma_{\theta f}=k\left(P_3+\frac{\sigma_c}{k-1}\right)\left(\frac{r}{R_0}\right)^{k-1}-\frac{k\sigma_c}{k-1}, \tag{10}$$

$$k=\frac{1+\sin\varphi_c}{1-\sin\varphi_c}, \tag{11}$$

式中：σ_{rf}和$\sigma_{\theta f}$分别为破坏区（塑性区）内的径向应力和切向应力；P_3为支护力；σ_c为残余抗压强度；φ_c为残余岩体内摩擦角；k为塑性应力系数；R_0为巷道半径.

取相关参数为：$\gamma h=18$ MPa，$R_0=2.5$ m，$c=4.9$ MPa，$\varphi=37°$. 巷道围岩的破坏区与塑性区的扩展与动载系数成正相关，与岩体的内聚力和内摩擦角成负相关，深部巷道开挖后受应力环境影响，破坏区及塑性区不断向围岩深部扩张. 当岩体强度较低时裂隙发育，塑性区继续向深部扩张，浅部支护基本失效，支护较困难；圆形巷道侧压系数为 1 时，均匀受压是巷道支护中最理想的支护状态，随着侧压系数不断增加，在浅部围岩出现应力集中，不利于巷道稳定.

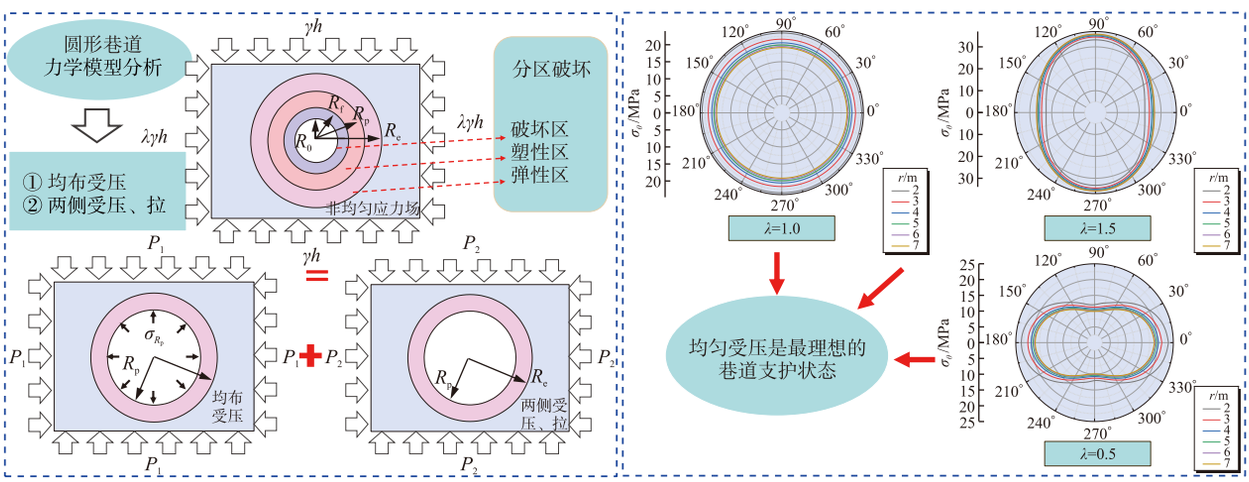


图 4　圆形巷道力学模型

Fig. 4　Mechanics model of circular roadway

3.2　椭圆形巷道等应力分析

圆形巷道作为特殊的椭圆形巷道，考虑通过不同的轴比关系匹配不同的侧压系数，使椭圆形边界的应力分布趋于均匀化，求解最佳轴比关系得到最佳的巷道支护方案.

如图 5 所示（图中 k_1为垂直应力系数，k_2为水平应力系数，σ_r为径向应力，$\tau_{r\theta}$为剪应力分量），基于弹性力学的基本假设，简化边界条件，令 $t=b/a$（t为轴比关系，b为椭圆短半轴长度，a为椭圆长半轴长度），深埋椭圆形巷道的周边切向应力分布公式为

$$\sigma_\theta=P_0\frac{t^2\sin^2\theta+2t\sin^2\theta-\cos^2\theta}{t^2\sin^2\theta+\cos^2\theta}+\lambda P_0\frac{-t^2\sin^2\theta+2t\cos^2\theta+\cos^2\theta}{t^2\sin^2\theta+\cos^2\theta}, \tag{12}$$

式中：σ_θ为椭圆巷道周边某点处的切向应力，随角度θ变化；P_0为原岩垂直应力.

根据围岩应力分布特点判定，极值在椭圆巷道的长短轴顶点，如图 5 中点 A，B，则相应的切向应力为

$$\begin{cases}\sigma_A=P_0\left(1+2\dfrac{1}{t}-\lambda\right),\\ \sigma_B=P_0(-1+2\lambda t+\lambda),\end{cases} \tag{13}$$

式中：σ_A为椭圆短轴端点处的切向应力；σ_B为椭圆长轴端点处的切向应力.

通过求解式（12）的极值得到椭圆巷道周边应力均匀分布的长短轴之比，这个比值称为等应力轴比.

$$\frac{\mathrm{d}\sigma_\theta}{\mathrm{d}\theta}=0\Rightarrow t=\frac{1}{\lambda}, \tag{14}$$

$$\sigma_\theta = P_0(1+\lambda). \tag{15}$$

当巷道周边围岩应力处处相等时是最佳的支护状态，则求解的 t 值为等应力轴比值，称为最佳支护轴比，该数值与 λ 成反比.

$$\begin{cases} t>1 & ta=b \quad (0<\lambda<1)\Rightarrow \text{竖椭圆}, \\ t=1 & a=b \quad (\lambda=1)\Rightarrow \text{圆}, \\ t<1 & a=tb \quad (\lambda>1)\Rightarrow \text{横椭圆}. \end{cases} \tag{16}$$

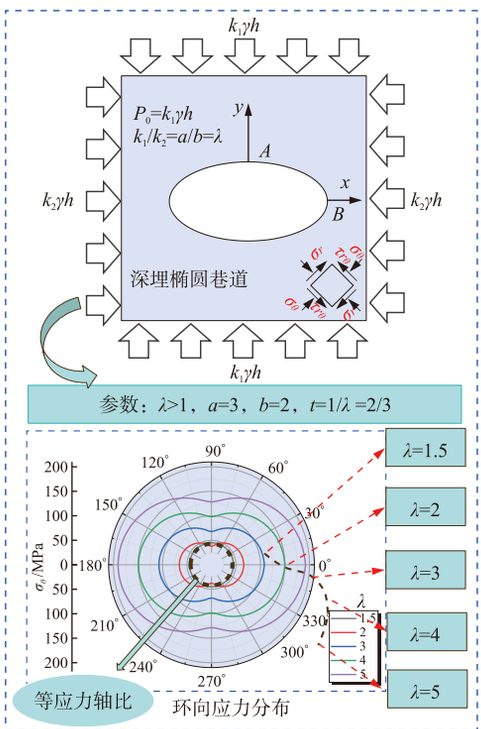


图 5 椭圆形巷道力学模型

Fig. 5 Elliptical roadway mechanical model

设计巷道支护的椭圆形承载结构时，椭圆的短轴对应最小主应力方向，椭圆的长轴对应最大主应力方向. 相较于其他形状的巷道，椭圆形巷道的掘进开挖难度更大，造价较高；椭圆形巷道的断面利用率相对较低，由于巷道断面的形状特点，可能导致部分空间无法被有效利用，从而影响巷道的整体使用效率，因此考虑建立等效椭圆承载结构模型提高支护效果.

3.3 直墙半圆拱与矩形巷道对比分析

如图 6 所示（ρ 为极坐标系下的径向坐标，δ 为角度，ζ 为复平面上的映射变量，h_1 为直墙部分的高度，h_2 为拱高，数字 1～8 对应矩形巷道边界上的角点或边界分段点，用于定义映射函数），首先分析矩形巷道受双向不等压应力的力学模型，将矩形长度设置为 $2a_1$，高度为 $2b_1$，$c=a_1/b_1$ 为长高比，垂直应力为 P_0，水平应力为 λP_0. 采用 Schwarz-Christoffel 变换将矩形巷道外部映射到单位圆外部. 首先假设映射函数为 $z=\omega(\zeta)$，其中 ζ 平面的单位圆外对应 z 平面的矩形外部. 因为巷道围岩浅部只有 σ_θ，无支护时，σ_r 与 $\tau_{r\theta}$ 均为 0，所以推导矩形巷道切向应力分布公式为

$$\sigma_\theta=(\sigma_y+\lambda\sigma_y)\left(\frac{x_1x_2+y_1y_2}{x_2^2+y_2^2}\right)+2(\lambda\sigma_y-\sigma_y)\left(\frac{x_3x_2+y_3y_2}{x_2^2+y_2^2}\right), \tag{17}$$

$$\begin{cases} x_1=\left(C_1+\dfrac{2C_1}{C_2-1}\right)\cos2\theta-3C_2\cos4\theta-1, \\ x_2=C_1\cos2\theta+3C_2\cos4\theta-1, \\ y_1=\left(1+\dfrac{2C_1}{C_2-1}\right)\sin2\theta-3C_2\sin4\theta, \\ y_2=C_1\sin2\theta+3C_2\sin4\theta, \\ x_3=\dfrac{1}{C_2-1}\cos2\theta, \qquad y_3=\dfrac{1}{C_2-1}\sin2\theta, \end{cases} \tag{18}$$

式中：σ_y 为垂直应力；C_1 与 C_2 为 Schwarz-Christoffel 变换确定的与矩形巷道几何形状相关的复数常数.

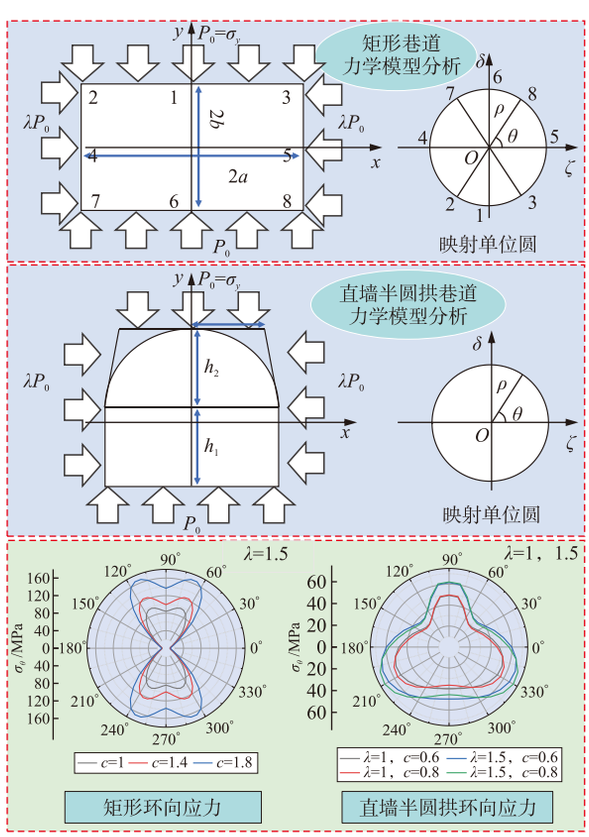


图 6 矩形和直墙半圆拱形巷道力学模型

Fig. 6 Mechanical model of rectangular and straight wall semi-circular arch roadway

非均匀应力场下直墙半圆拱巷道的力学模型如图 6 所示，直墙半圆拱巷道的切向应力分布公式[26]为

$$\sigma_\theta = 2\sigma_y + 4a_1 + 4\lambda\sigma_y \frac{x_1x_2 + y_1y_2}{x_2^2 + y_2^2}, \tag{19}$$

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{C_5\cos3\theta}{3} - \dfrac{\sin4\theta}{4} - \dfrac{4C_4 - 2C_3C_6}{8 - C_6^2}\sin\theta, \\ y_1 = \dfrac{C_5\sin3\theta}{3} + \dfrac{\cos4\theta}{4} - \dfrac{4C_5 - 2C_3C_6}{8 - C_6^2}\cos\theta, \\ x_2 = -\cos2\theta - C_3 + C_4\sin\theta - C_5\cos2\theta + C_6\sin3\theta, \\ y_2 = \sin2\theta - C_4\cos\theta - C_5\sin2\theta - C_6\cos3\theta, \end{cases} \tag{20}$$

式中：C_3，C_4，C_5，C_6为映射函数中的特定系数，由直墙半圆拱巷道的几何尺寸决定.

巷道断面形状对围岩应力场分布的影响较明显，矩形巷道在隅角出现数倍于地应力的压应力，易发生剪切破坏；直墙半圆拱巷道在顶板及底板两隅角容易出现应力集中，不同断面形状围岩变形破坏位置存在差异，受到不同侧压力系数与巷道尺寸的影响较大. 因此基于椭圆等应力理论，考虑改变不同形状的长短轴与地应力动态匹配，建立同等条件下最优的比例关系，以更高效地控制围岩变形.

3.4　等效椭圆支护力学演化模型及理论

基于轴变论理论，采用锚杆索主动支护在巷道周边形成椭圆形锚固边界，构建不同轴比的椭圆形承载结构. 椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护是一种通过优化围岩应力状态的新型支护方式，首先利用不同长度的锚杆索、注浆加固等主动支护方式重构围岩内部的应力传递路径，使围岩椭圆形承载结构与侧压系数实现动态匹配. 主动调节锚杆索预紧力、间距、倾角等支护参数，面对深部软岩巷道单一支护方式无法有效控制围岩变形，增加高刚度的钢管混凝土支架被动支护来增强浅部承载能力，形成椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护，使应力分布相对均匀化，消除传统支护导致的应力集中现象. 巷道全空间协同支护模型见图 7.

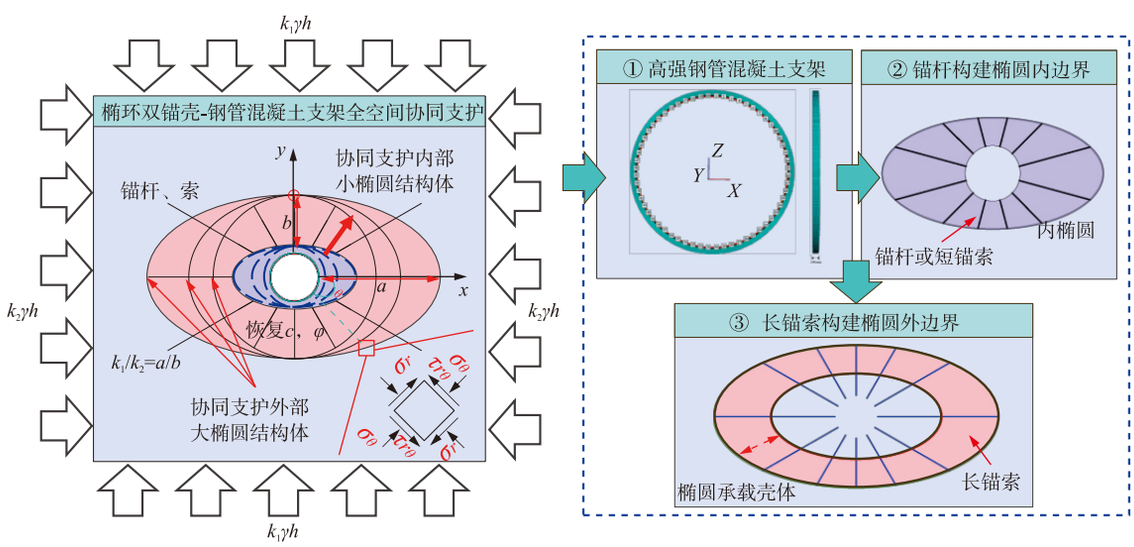


图 7　巷道全空间协同支护模型

Fig. 7　Full-space cooperative support model of roadway

高承载性能的钢管混凝土支架在围岩发生微小变形时在巷道内侧提供初始支护力，内部充填的混凝土抗压强度随着最小主应力的增加逐渐增强，混凝土的抗压强度随着侧向约束力增加逐渐增大，即发挥强支性能，钢管支架的承载强度略高于 U 型钢支架，在钢管支架的空心薄壁结构中灌注混凝土能依靠力学共生原理以及高约束性成倍提高混凝土承载性能，提高抗弯强度，使钢管混凝土支架的承载强度提高至 U 型钢支架的 2～3 倍，椭圆锚固壳通过预应力主动调整围岩应力场，支架通过刚性支撑被动抵抗变形.

如图 7 所示，外部大椭圆结构处于三向加载状态，具有较高的自承载性能，使得内部的小椭圆承载结构体处于低应力状态，小椭圆承载结构周边破坏区岩体可通过注浆加固的方式重新胶结成一个整体，恢复部分 c，φ 值增强整体强度，改善浅部围岩的自承能力. 内外大小椭圆承载结构的夹层形成围岩自承椭圆壳体，双承载结构协同作用充分发挥围岩的自承载能力，锚杆索主动构建的椭圆结构边界形成低差值应力状态，保证巷道的稳定性. 随着埋

深的增加,高应力的复杂环境伴随工程扰动影响是巷道支护的难点与重点,常规的锚杆锚索支护不能保证巷道稳定性,巷道表层围岩破碎,支护体无法提供有效的挤压力控制浅部围岩变形,因此提出了适应性较强的“椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护控制技术”. 如表1所示,全空间协同支护的目标是构建一个自适应、自稳定的椭圆形环向承载结构体,椭圆长轴方向对应最大主应力方向,轴比可调. 通过高频率应力监测锚杆索、钢管支架压力数据反馈与巷道围岩变形情况,调整支护参数. 支护结构与围岩形成“强-强耦合”体系,支护层分担荷载的同时,激发围岩自承能力.

表1 全空间协同支护与传统支护的对比分析

Table 1 Comparative analysis of full-space cooperative support and traditional support

对比内容	传统支护	全空间协同支护
应力调控机制	依赖围岩自稳,应力集中显著	主动重构应力场,消除集中区域
材料利用效率	支护材料冗余度高,易局部超载	按需分配支护力,材料利用率最大化
动态适应性	静态设计,无法响应围岩变形	高频监测-反馈调控,适应地应力变化

3.5 围压强化效应与弹性模量的等效化方法

巷道支护中锚杆索与围岩体共同组成了复合承载结构体,基于经典弹塑性力学理论中的Mohr-Coulomb强度准则,结合支护材料参数与空间分布特征,建立了包含锚杆索密度因子在内的多参数等效方程,从而实现复合承载结构体力学参数的定量化表征[27].

基于抗拉强度公式,将等效组合岩层的弹性模量与面积表示为

$$EA = E_1A_1 + E_2A_2, \tag{21}$$

式中:E,A分别为等效组合岩体的弹性模量和面积;E_1,A_1分别为岩体的弹性模量和面积;E_2,A_2分别为支护材料的弹性模量和面积.

$$E = \frac{E_2\pi r_2^2 + E_1SD - E_1\pi r_2^2}{SD}, \tag{22}$$

式中:S为锚杆索间距;D为锚杆索排距;r_2为锚杆索半径.

极坐标系中的Mohr-Coulomb屈服准则为

$$\sigma_\theta = \frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}\sigma_r + \sigma_c', \tag{23}$$

式中 σ_c'为岩体的单轴抗压强度.

锚杆索支护前后屈服轨迹梯度与屈服轨迹截距为

$$f = f_1 + f_1\alpha, \qquad \sigma_c = \sigma_{c1} + \alpha\sigma_{c1}, \tag{24}$$

$$\alpha = \frac{2\pi r_2 \tan\dfrac{\varphi}{2}}{SD}, \tag{25}$$

式中:f为支护后组合岩体的屈服轨迹梯度;f_1和σ_{c1}为支护前屈服轨迹梯度与屈服轨迹截距;α为锚杆索密度因子.

联立(23)和(24)求解组合岩体的内摩擦角和内聚力为

$$\varphi_1 = \arcsin\left[\frac{(2+\alpha)\sin\varphi + \alpha}{2 + \alpha\sin\varphi + \alpha}\right], \tag{26}$$

$$c_1 = \frac{c\cos\varphi\left(1-\sin\varphi_1\right)\left(1+\alpha\right)}{\left(1-\sin\varphi\right)\cos\varphi_1}, \tag{27}$$

式中:c_1和φ_1为组合岩体的内聚力和内摩擦角.

3.6 不同形状巷道等效轴比可调模型

笔者以材料力学等强度梁的概念为基础,提出等强支护控制模型,最大程度恢复初始等强状态,匹配不同地应力环境达到该状态. 依据围岩的受力状态,采用主动卸压、围岩注浆加固、主被动空间协同支护等综合手段,调整巷道周边的应力状态达到等强支护的效果,考虑了顶板的支护特征,本文继续深入扩展至顶底板和帮部整体承载结构,形成相应的全空间协同效果,通过矩形巷道外接圆分析巷道周边应力分布.

$$\begin{cases} \dfrac{2a^2}{l^2} + \dfrac{2b^2}{h^2} = 1, \\ a/b = l/h, \end{cases} \tag{28}$$

$$a = \sqrt{\frac{l^2}{2}}, \qquad b = \sqrt{\frac{h^2}{2}}, \tag{29}$$

式中:l为巷道宽度,m;h为巷道高度,m. 矩形的高宽比与椭圆的长短轴之比相关.

如图8所示,通过锚杆索主动支护构建椭圆承载结构,同理得到直墙半圆拱外接椭圆形态,根据不同的地应力环境,结合水平应力与垂直应力的比值,建立巷道外接椭圆等应力轴比关系,得到巷道高宽比对应椭圆长短轴比值的等效椭圆巷道. 在采矿工程中,随着工作面的回采,一般垂直应力逐渐增加,侧压系数不断减小,通过补强顶底板锚杆索长度,增大锚固边界可重构椭圆承载结构体以适应应力环境.

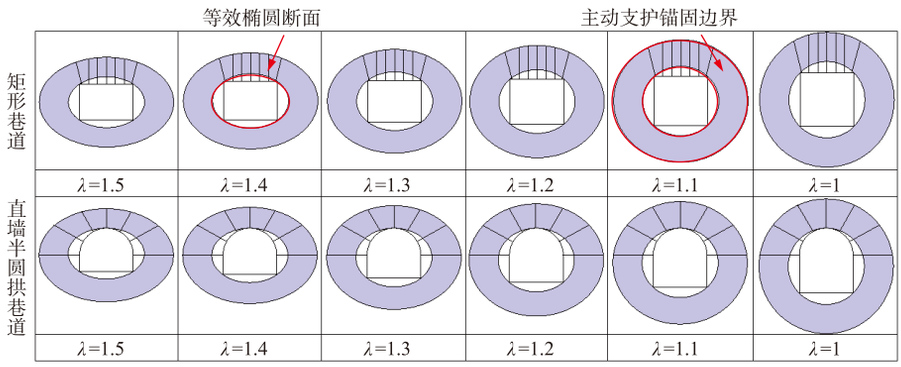


图 8　矩形与直墙半圆拱巷道等效轴比模型

Fig. 8　Equivalent axial ratio model of rectangular and straight wall semi-circular arch roadway

4　巷道全空间协同支护数值模拟分析

基于FLAC^{3D}建模原理，主要根据胡底煤矿钻孔综合柱状图揭露的地层及岩性结构信息，并适当简化该位置地层及断层，应用FLAC^{3D}内嵌 extrusion 模块建立网格模型还原围岩赋存特点．如图 9 所示，依据胡底煤矿的地质信息，建立的模型尺寸为 160 m×160 m×118.5 m（长×宽×高），因主要研究的是不同支护方案对围岩塑性区、位移、应力的影响，对上覆岩层做部分简化，对钻孔柱状揭露的距离煤层较远的地层合并，并将 1105 巷道周围的单元格进行加密，对模型水平与垂直方向施加限制．钢管混凝土支架支护参数：支架简化为圆形，与巷道断面相当，半径 2.7 m，钢管混凝土支架采用 beam 梁单元进行模拟，该支架由 60 个梁单元组成，模型的截面和力学参数（包括弹性模量、泊松比、塑性极限弯矩）如表 2 所示，锚杆、锚索参数如表 3 所示．

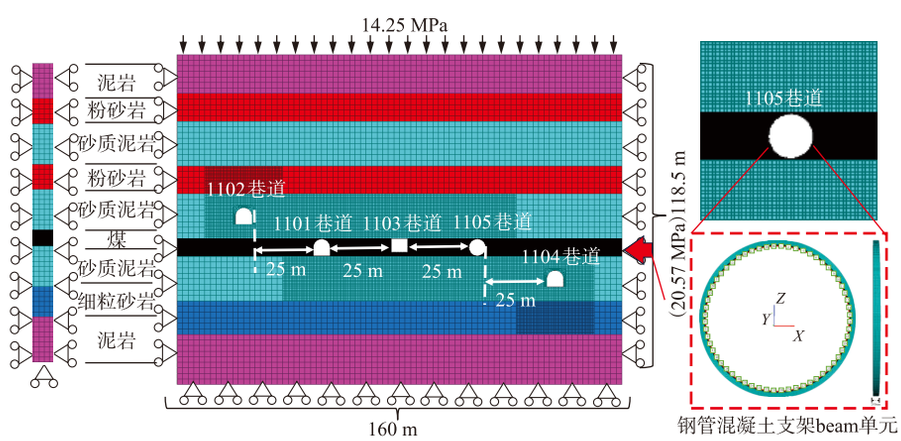


图 9　数值模型

Fig. 9　Numerical model

表 2　钢管混凝土支架参数

Table 2　Concrete-filled steel tube support parameters

钢管混凝土支架单元	弹性模量/GPa	泊松比	塑性极限弯矩/(kN·m)	横截面积/m^2	极惯性矩	Z惯性矩	Y惯性矩
beam 梁单元	67.7	0.25	112.9	0.029 6	13.9×10^{-5}	6.95×10^{-5}	6.95×10^{-5}

表 3　锚杆、锚索参数

Table 3　Anchor bolt and anchor cable parameters

支护材料	直径/mm	弹性模量/GPa	长度/m	拉断荷载/kN	初始张拉力/kN
锚杆	22	100	2.4	254	150
锚索 1	22	210	7.3	600	200
锚索 2	22	250	10.3	700	250

本构关系采用Mohr-Coulomb模型，共划分为613 439个单元、738 576个节点．岩体中含有大量孔隙、裂隙、纹理结构等，导致其强度远远低于岩石力学试样得到的数据结果，基于Hoek-Brown强度准则，结合岩石的矿物成分及水理性质分析量化GSI地质强度指标，估算岩体力学参数如表4所示（表中，σ_{ci}为岩石试件的单轴抗压强度，μ为泊松比，E为岩石的弹性模量，GSI指标表示地质强度，m_i，m_b，s，a为经验参数[28]，E_{mass}为岩体的弹性模量，σ_{cmass}为岩体的单轴抗压强度）．

表4 岩体力学参数

Table 4 Mechanical parameters of rock mass

岩性	完整岩石					GSI	经验参数				岩体	
	σ_{ci}/MPa	μ	E/GPa	c/MPa	φ/(°)		m_i	m_b	s	a	σ_{cmass}/MPa	E_{mass}/GPa
砂质泥岩	45.46	0.290	4.928	4.88	37	23	7	0.178 9	0.000 035	0.535 76	2.898 1	1.068 8
泥岩	40.29	0.293	4.361	2.58	30	21	5	0.116 2	0.000 027	0.540 89	1.959 2	0.896 7
粉砂岩	159.47	0.201	24.580	30.08	48	36	14	0.664 6	0.000 197	0.514 91	23.913 6	4.230 6
细粒砂岩	63.58	0.240	5.740	12.23	40	30	12	0.428 1	0.000 088	0.522 34	7.124 1	1.891 1
煤	15.60	0.320	3.560	1.83	28	10	3	0.041 3	0.000 006	0.585 36	0.306 1	0.296 2

4.1 围岩受力状态分析及支护参数设计

如图10所示（图中φ_1与c_1为支护后岩体的等效内摩擦角与内聚力，σ_1'，σ_1''与σ_3'，σ_3''为不同支护阶段的最大主应力与最小主应力），通过全空间协同支护围岩受力分析可知，巷道开挖前σ_1和σ_3数值差较小，处于相对稳定状态．开挖后径向应力σ_3下降为0，环向应力σ_1增长，差值增大后转变为莫尔圆2，浅部失稳破坏后裂隙扩展，塑性区发育，超过支护前强度包络线发生破坏[29]．通过全空间协同支护恢复部分围岩承载能力，提高内聚力与内摩擦角，使强度包络线逐渐上移，钢管混凝土支架通过高刚度设计、密贴安装及协同锚固系统的方式后，围岩产生微小变形即可快速提供一定的径向反力，使径向应力σ_3增大，σ_1减小，受力相对均匀稳定．

通过恢复围岩的自承载能力，锚杆索悬吊在稳定岩层中提供轴向挤压力，减少岩层间滑移错动，改善锚固区的力学性能，增强整体强度，并且内部由钢管混凝土支架提供径向反力，使围岩由单向或双向受力向三向受力状态改变，计算塑性区R的影响范围[30]：

$$R=r_0\left[\frac{(P_0+c_1\cot\varphi_1+\dfrac{n\tau\pi d^2\cot\varphi_1}{4\times10^6})\cdot(1-\sin\varphi_1)}{nP_i+P_c+c_1\cot\varphi_1+\dfrac{n\tau\pi d^2\cot\varphi_1}{4\times10^6}}\right]^{\frac{1-\sin\varphi_1}{2\sin\varphi_1}},\tag{30}$$

式中：r_0为巷道半径；τ为锚杆索抗剪强度；d为锚杆索直径；n为锚杆索布置密度；P_i为锚杆索支护阻力；P_c为钢管混凝土支架支护阻力，一般锚索长度选择1.2倍的塑性区范围．

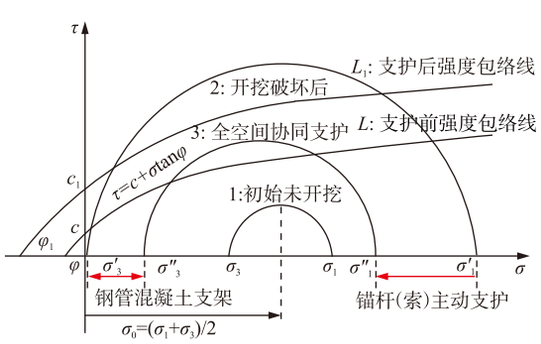


图10 全空间协同支护理论围岩受力状态

Fig. 10 Stress state of full-space cooperative support theory

依据Mohr-Coulomb准则计算巷道围岩的起塑条件，计算不同位置锚杆索提供的支护强度P_i：

$$P_i=\frac{1}{2}\sigma_\theta-\frac{1}{2}\sin\varphi_1\sigma_\theta-\sin\varphi_1\cot\varphi_1\left(\frac{0.6\sigma_t S_m}{et}+C\right),\tag{31}$$

式中：σ_t为岩体抗拉强度；e为锚杆索的纵向间距；t为锚杆索的横向间距；S_m为杆体横截面积；C为等效黏结强度．

钢管混凝土支架最大支护阻力P_c计算公式[31]为

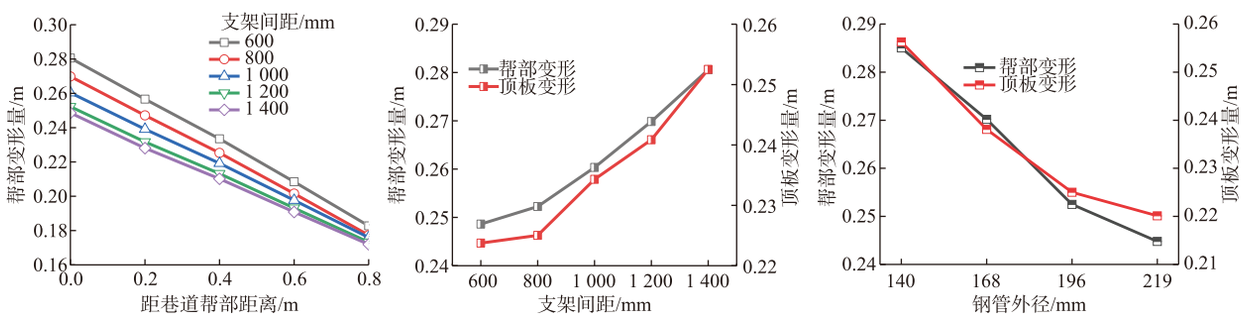
$$P_c=\frac{2(A_cf_c+\sqrt{A_sf_sA_cf_c}+1.1A_sf_s)}{D_cr_0\int_0^{180}\sin\theta\mathrm{d}\theta},\tag{32}$$

式中：f_s为钢管的屈服极限；A_s为钢管的横截面积；

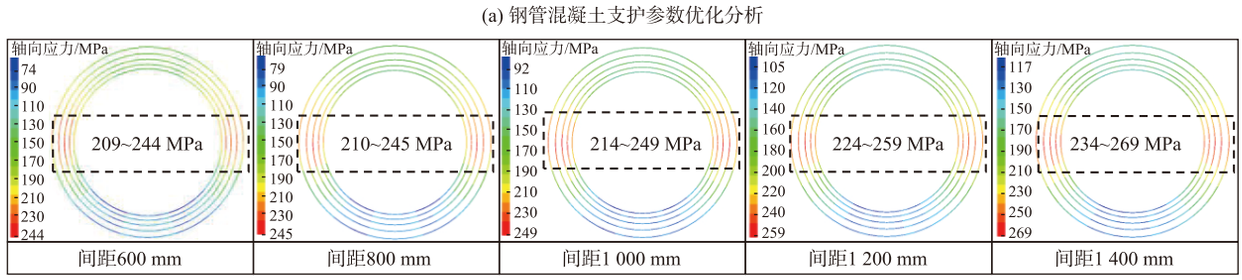
f_c为核心混凝土抗压强度；A_c为混凝土横截面的净面；D_c为支架间距.

胡底煤矿盘区大巷为软岩煤巷，帮部变形量较大，主动支护的锚杆索在煤岩中锚固性能下降，采用单一支护方式难以控制，优化方案为在巷道内部使用钢管混凝土支架，主被动协同支护形成“椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护体系”. 分析钢管混凝土支架钢管直径及排距等不同影响因素对围岩变形量的影响，首先需研究仅单独使用钢管混凝土支架后的变形及受力情况，以进一步优化相关参数.

如图 11 所示，侧压系数为 1.4，水平应力为 21.57 MPa时，不同排距的支架支护的轴力最大值均在帮部，并且支架弯矩最大值均集中在套管处，随着钢管混凝土支架间距的增加，帮部及顶板变形量逐渐增大，在该区域应力特征下排距在超过 800 mm后变形量迅速增长，考虑深部软岩巷道工程系统协同、施工可靠性合理、支护成本与初期设计目标变形量不超过断面尺寸的8%的综合考量，选择钢管外径219 mm，间距800 mm最佳.



(a) 钢管混凝土支护参数优化分析



(b) 管径∅219 mm钢管混凝土支架受力分析

图 11　钢管混凝土支架影响因素分析

Fig. 11　Analysis of influencing factors of concrete-filled steel tube support

4.2　数值模拟位移结果分析

通过控制变量法将侧压系数λ=1.4作为基础条件，方案一：建立等效椭圆支护长短轴之比a/b=1，0，1.2，1.4和1.6(水平应力20.57 MPa)，分析轴比可调机制对围岩稳定的控制效果；方案二：建立埋深400，600，800，1 000 m的不同支护方案进行差异对比，主要分为无支护、初始支护、等效椭圆与全空间协同支护，巷道断面形状分为圆形、矩形与直墙半圆拱形；方案三：前文分析了单独钢管混凝土支架控制变形情况，结合单独等效椭圆支护与椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同后的控制效果进行综合分析. 具体支护参数如图 12 所示(图中r_d为巷道半径，L_d为巷道宽度).

如图 13 所示，方案一在侧压系数为 1.4 的情况下，不同轴比的帮部变形量分别为303，279，271和284 mm，轴比可调的椭圆形长短轴之比a/b=λ时控制帮部变形效果最佳. 由于篇幅所限仅给出圆形巷道的具体围岩变形数据. 在方案二中，当埋深为400 m时，圆形巷道在无支护情况下帮部位移为166 mm，采用初始支护方式帮部变形量下降约14%，等效椭圆支护帮部变形量下降约17%，全空间协同支护帮部变形量下降约48%. 随着埋深由400 m增大至1 000 m，采用初始支护方式帮部变形量下降约38%，采用等效椭圆支护帮部变形量下降约51%，全空间协同支护帮部变形量下降约75%，等效椭圆与钢管混凝土支架协同支护构建的椭圆形承载结构随着埋深增加支护效果显著. 不同断面的变形情况有所差异，矩形巷道与直墙半圆拱巷道的围岩变形量均大于圆形巷道.

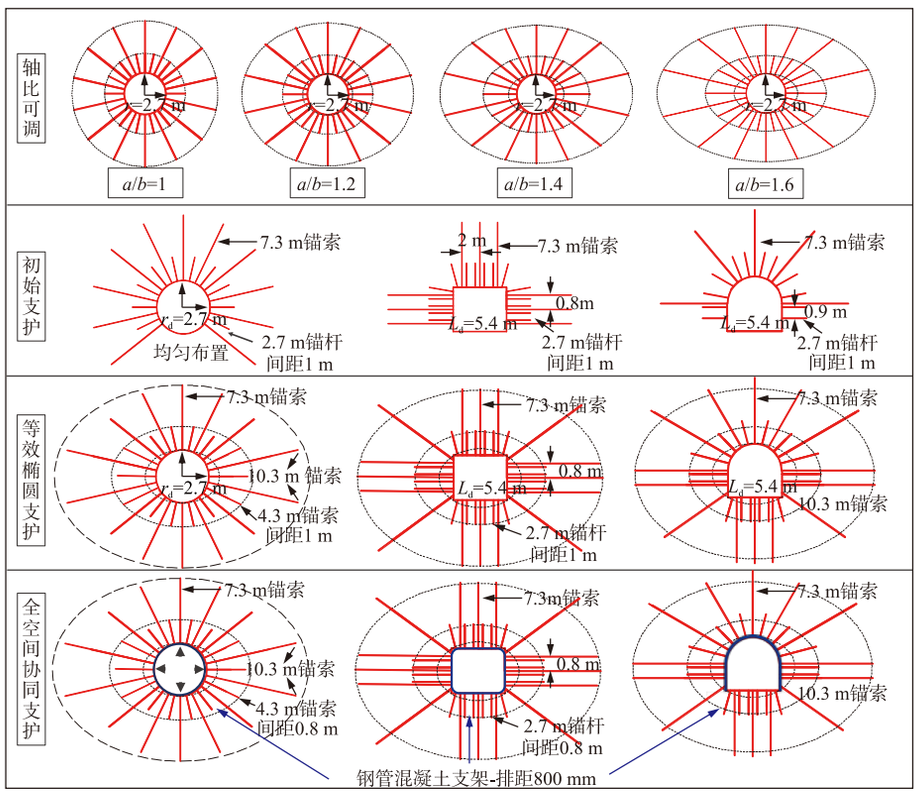


图 12 不同断面形状的巷道支护方案

Fig. 12 Roadway support schemes with different cross-section shapes

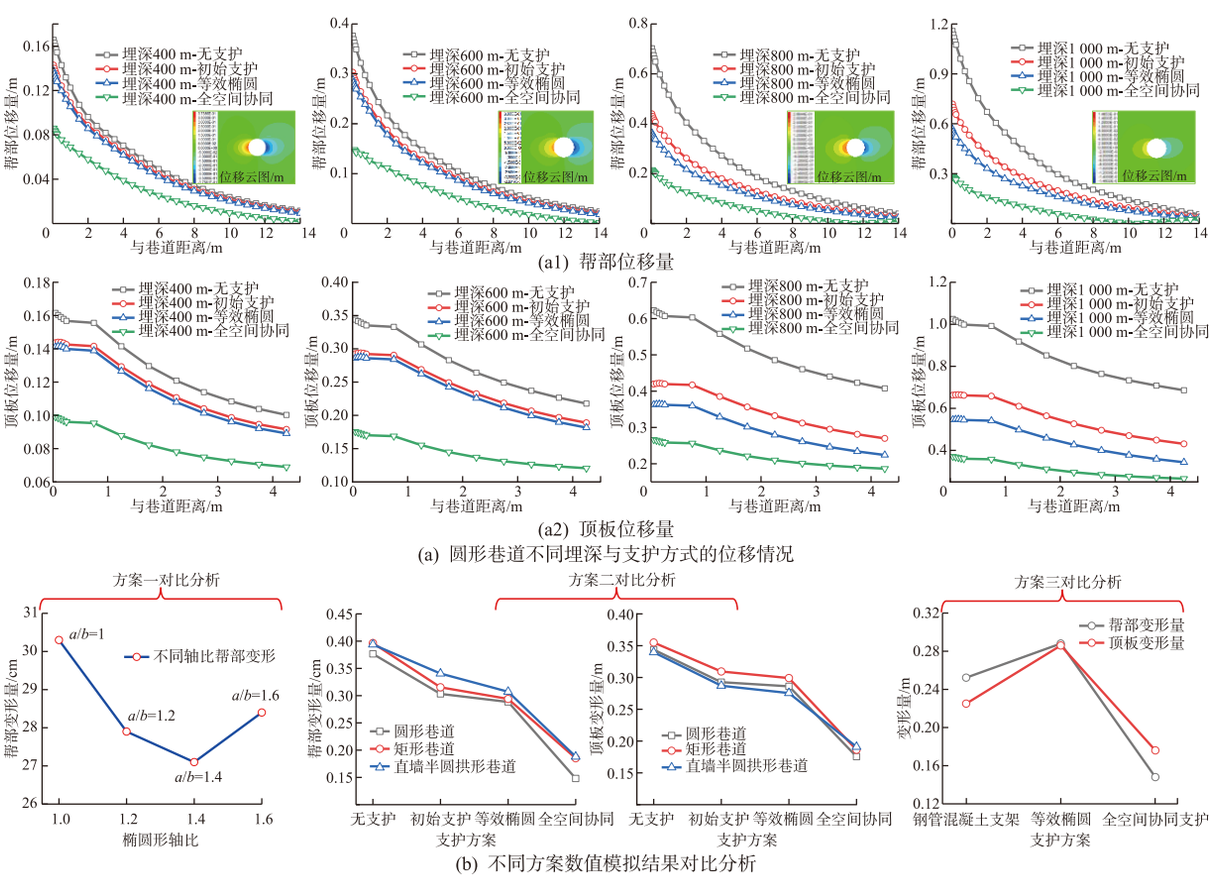


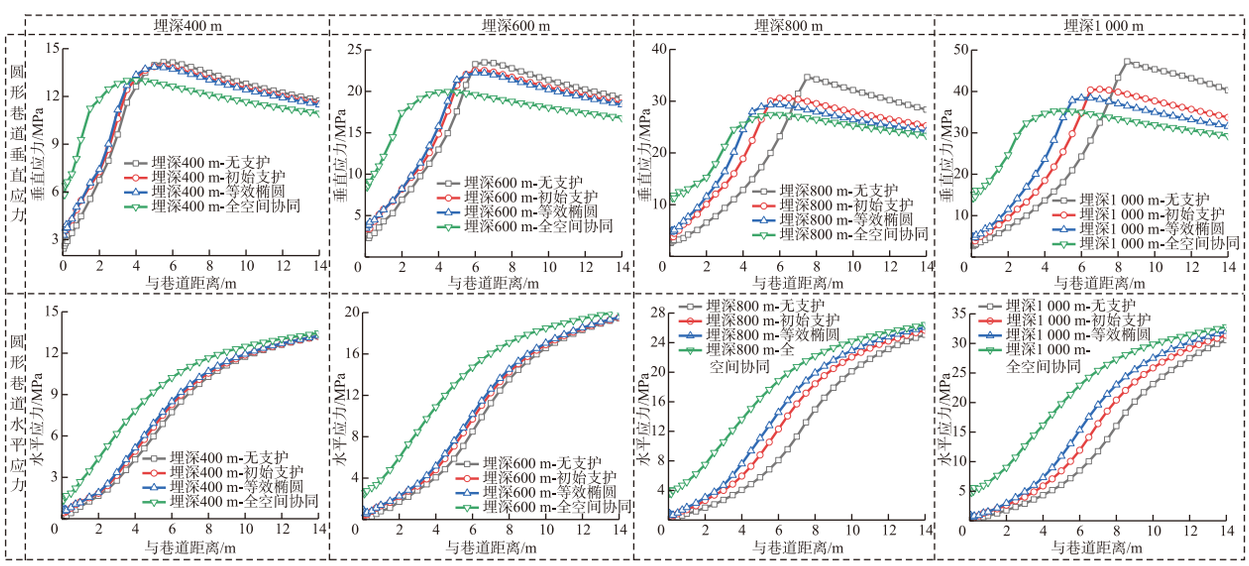
图 13 不同埋深、断面形状及支护方式的围岩变形情况

Fig. 13 Deformation of surrounding rock with different buried depth, section shape and support mode

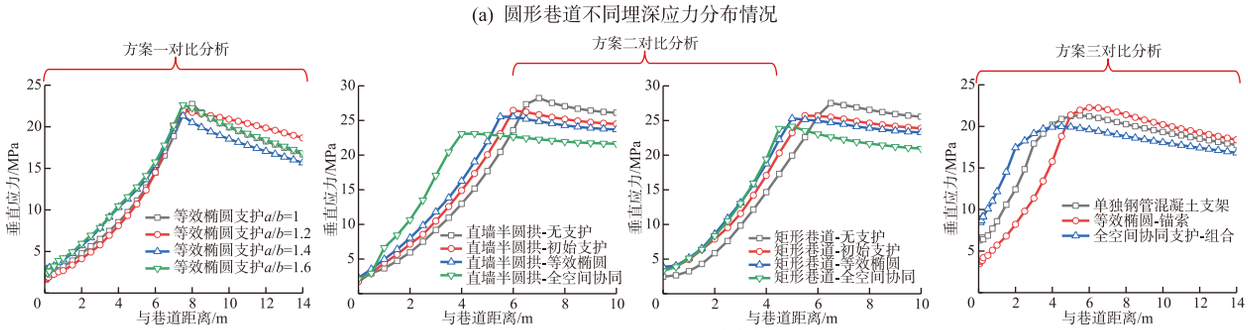
方案三中椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护相较于单独钢管混凝土支架帮部控制率提高28%，相较于等效椭圆提高了37%，验证了主被动协同支护的作用效果．随着埋深的增加，全空间协同支护的围岩变形控制能力逐渐增强，在不同断面形状的支护性能均优于初始方案，根据锚杆索的支护控制原理可知，初始支护帮部塑性区扩展导致锚杆索的控制范围不足[32]，并且无法锚固在稳定岩层上，两帮内挤收敛，发生张拉剪切破断导致帮部大变形，全空间协同支护的被动支撑具有高刚度与高承载性能，有效降低与分担了部分主动支护的荷载，使支护结构趋于稳定状态．

4.3　不同支护方式应力分布结果分析

在方案一中，长短轴之比 a/b=1，1.2，1.4 和 1.6，对应的垂直应力峰值约为 22.74，21.97，21.31，22.64 MPa，轴比为 1.4 时峰值应力最小．如图 14 所示，在方案二中，当埋深在 400 m 时，圆形巷道在无支护、初始支护及等效椭圆支护状态下对应的垂直应力峰值约为 14.2，13.9 和 13.9 MPa，峰值范围均在距离巷道围岩表面 4～7 m 深处，而全空间协同支护峰值应力在 3～5 m 范围达到 13.0 MPa．当埋深增大到 1 000 m 时，圆形巷道在不同状态下对应的垂直应力峰值约为 47.3，40.5，38.4 和 35.4 MPa，无支护峰值范围在距离巷道壁 8～11 m 处，初始支护、等效椭圆与全空间协同支护的峰值范围在距离巷道壁 6.5～9.5 m，5.5～8.5 m 及 4.5～6.5 m 处．相较于无支护情况，锚杆索的主动支护方式将松散破碎岩体挤压形成完整结构体，使巷道帮部垂直应力峰值点前移，并且不同埋深情况初始支护对比无支护状态峰值下降约 2%～14.4%，采用等效椭圆应力峰值下降约 2%～18.8%，全空间协同支护下降约 8.45%～25.15%．不同断面形状中，分析其位移、应力及塑性区分布情况时，圆形巷道优于其他断面形式，具有控制应力集中和限制塑性区扩展等方面的优势．方案三中，对比单一支护方式，全空间协同支护峰值点前移，峰值应力明显降低．采用全空间协同支护，内部提供的径向约束力改善了围岩应力环境，将单向或双向受压岩体重新进入三向受力状态，恢复了破碎岩体的强度，全空间协同的承载结构体具有更高的整体性和承载面积，将集中应力有效地沿着环向应力分散和传递，峰值应力下降并由深部转向浅部．



(a) 圆形巷道不同埋深应力分布情况



(b) 不同方案对比的应力分布情况

图 14　不同埋深、断面形状及支护方式的应力分布情况

Fig. 14　Stress distribution of different buried depth, section shape and support mode

不同支护方式下巷道应力等值线在浅部围岩处较稀疏,在深部围岩较密集,而椭环双锚壳-钢管混凝土全空间协同支护在浅部就能达到一定数值,说明其提供围岩径向应力最大. 如图 15 所示,分析不同支护方式的锚固边界应力(锚杆索锚固端形成的椭圆形承载结构边界上,围岩的切向应力分布状态)可知,全空间协同支护构建的椭圆形承载边界应力分布相对均匀,差值在 0.98~1.21 MPa. 通过锚杆索主动支护构建“内外双椭圆承载壳”的方法,使围岩承载能力最大化. 其中巷道内部的钢管混凝土支架作为“刚性支撑结构”显著提高了整体承载结构的刚度与承载能力,最终实现了巷道全空间协同稳定控制.

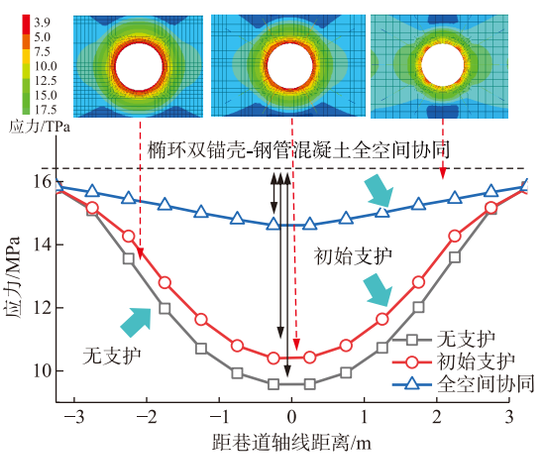


图 15 不同支护方式的巷道轴线应力分布

Fig. 15 Stress distribution of different support methods

5 椭环双锚壳-钢管混凝土支架协同支护体系应用分析

如图 16 所示,采用椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护方案进行支护. ① 支架断面与型号:圆形截面,钢管外径 219 mm、壁厚 10 mm,内部充填 C40 混凝土. ② 锚索:SKP22-1/1720 型钢绞线,直径 22 mm,长度 7 300 和 10 300 mm,间距 1 200 mm,排距 800 mm,设计预紧力≥200 kN;初始支护锚索长度 4 300 mm,锚杆长度 2 700 mm. ③ 全断面铺设型号为∅6.5 mm 的钢筋网,网孔规格为 100 mm×100 mm;网片搭接不小于 100 mm. ④ 一次封闭喷层,利用 C20 混凝土材料进行喷射,厚度 50 mm. ⑤ 二次喷射采用 C20 混凝土,喷射至设计使用净断面尺寸,拱顶范围喷射厚度应≥200 mm;侧压系数 λ=1.3~1.4,外椭圆轴比 t_1=13/10=1.3,内椭圆轴比 t_2=7/5.4=1.3,基于现场支护材料近似达成等效轴比效果.

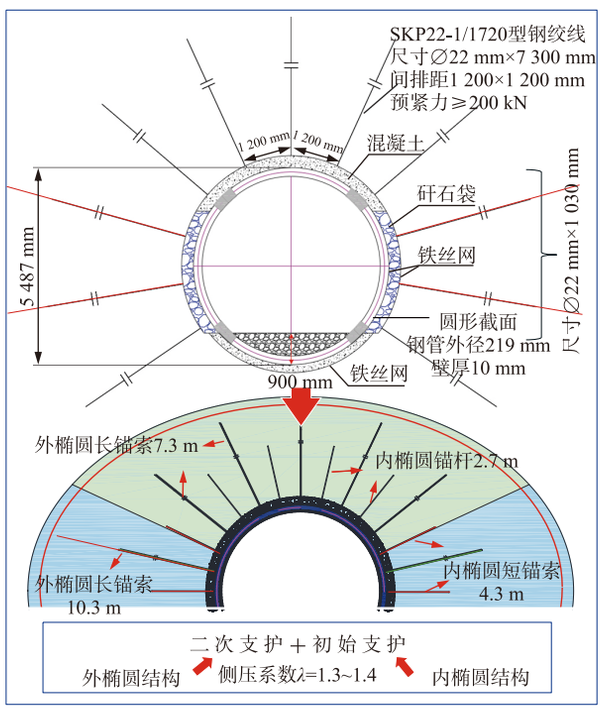


图 16 1105 巷道全空间协同支护

Fig. 16 1105 roadway full-space cooperative support

如图 17 所示,钢管混凝土支架共分为 4 段,采用接头套管连接,支架间采用顶杆连接,支架间距 800 mm,净间距 600 mm,全断面面积 22.9 m^2.

1)接头套管连接设计. 支架安装顺序为反底拱、两侧帮管与顶拱段,采用接头套管内卡外套加强连接,接头套管采用∅223 mm×10 mm 的钢管,套管外弧长度 600 mm,每架支架 4 个套管.

2)支架间的顶杆连接设计. 顶杆规格∅76 mm,顶杆长度 600 mm. 相邻支架通过顶杆连接形成整体,连接后的支架群可以平衡支架间的拉压作用,增强相邻支架的稳定性.

3)全断面锚固要求设计. 支架顶部每 5 架锚固 1 架,要求锚杆锚固力不小于 190 kN. 间隔 10 架全断面锚固,提高整体支架的稳定性.

4)支架壁后充填:①腰部填充矸石袋. 腰部采用柔性可破除矸石袋充填,厚度不小于 0.3 m,单点集中荷载作用在支架;②壁后全部喷射混凝土. 支架的预留安装空间全部喷射混凝土至密实即可.

5)支架底拱处理:底板铺设铁丝网,安装反底拱后喷射 200 mm 厚混凝土覆盖,混凝土以上填充矸石至地坪后浇筑混凝土加固.

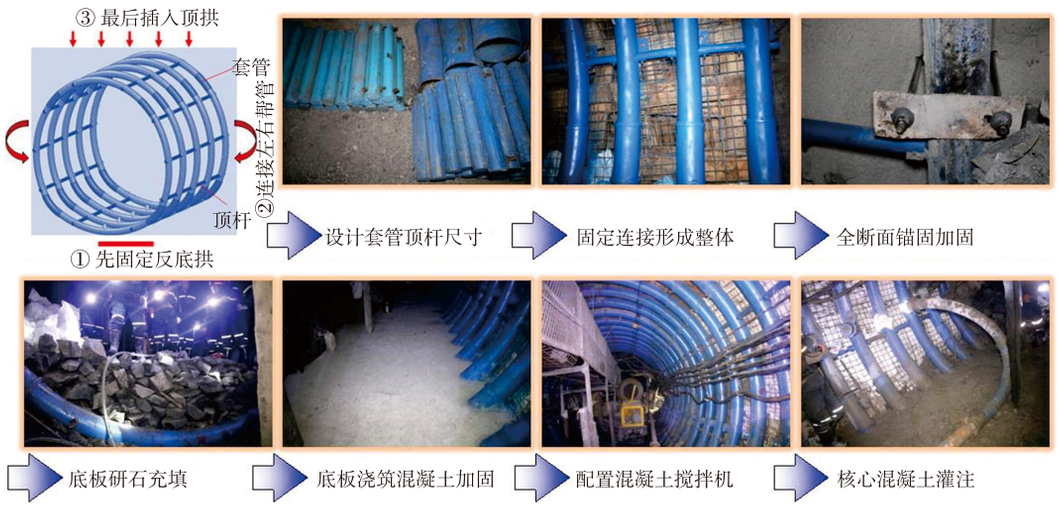


图 17　钢管混凝土支架支护技术流程

Fig. 17　Concrete filled steel tube support technology process

6)核心混凝土灌注设计,钢管内的混凝土按照C40进行配比,坍落度测试大于180 mm.

钢管混凝土支架安装后同步进行应力观测,采用GAD400矿用本安型张拉力传感器监测支架压力,最大量程为400 kN,分辨率为1 kN,精度为2.0级,每10架作为一个综合测站,每站6个压力测点全断面测量钢管混凝土支架的受力状态,共计5个综合测站,30个压力测点,初始值均为0 MPa. 如图18所示,采样频率为1次/h,通过高频率监测掌握现场动态压力变化,通过测站附近来压数据分析可知,测站①～⑤的压力数值范围分别为4.12～6.01 MPa, 5.36～7.79 MPa, 6.34～8.34 MPa, 6.35～8.32 MPa和5.34～7.85 MPa,支架整体来压缓和,全断面监测应力数值相对均布与稳定,数值范围在8.34 MPa以内. 通过目前压力表数据分析,巷道受采掘扰动影响,帮部来压略高于顶板,不同测站差值范围约为1.89～2.51 MPa,采用椭环双锚壳-钢管混凝土支架全空间协同支护控制围岩未出现明显变形,支护效果良好. 钢管混凝土支架安装后同步进行位移变形监测,在1105巷道试验段安装钢管混凝土支架200 m,整体支护效果良好,巷道围岩初始变形量在65.8～97.1 cm,采用椭环双锚壳-钢管混凝土全空间协同支护方案后,变形量控制在18.9～24.6 cm,顶板变形量下降71.3%,两帮变形量下降74.6%,巷道围岩基本无明显变形,现场变形对比情况如图19所示.

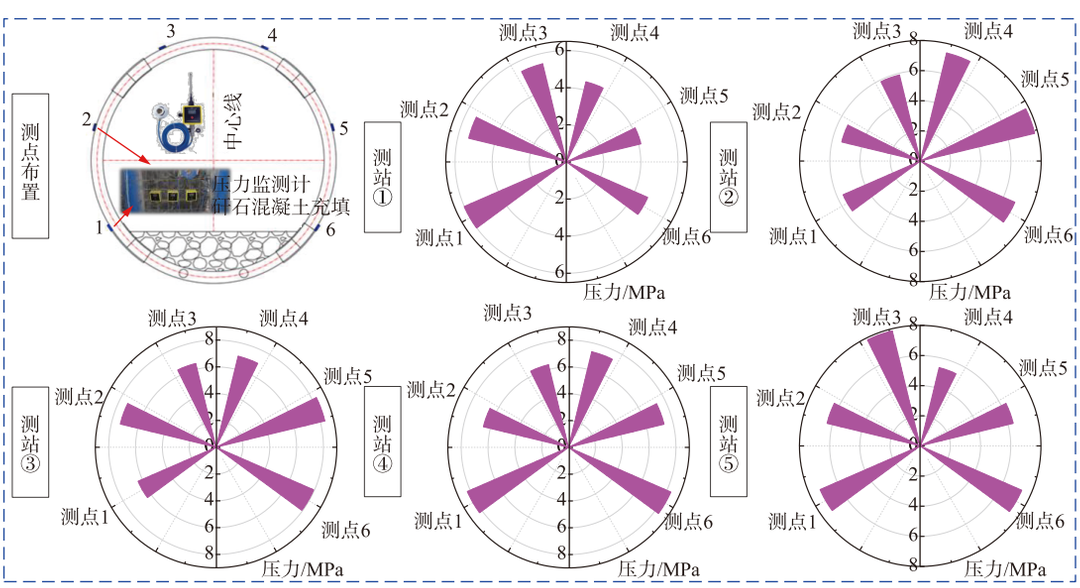
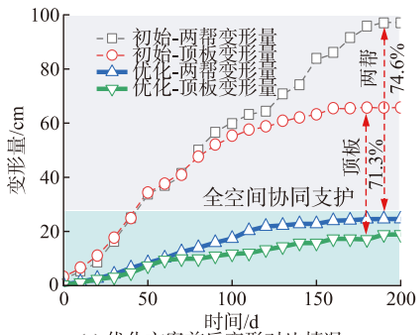


图 18　钢管混凝土支架压力监测

Fig. 18　Concrete-filled steel tube pressure monitoring meter



(a) 优化方案前后变形对比情况



初始支护变形严重　　全空间协同支护效果显著

(b) 优化方案前后现场应用效果

图 19　现场变形对比情况

Fig. 19　Comparison of on-site deformation

6　结　论

1)基于轴变论理论与等强支护思想提出了椭环双锚壳-钢管混凝土全空间协同支护模型,通过锚固不同长度的锚杆索构建内外椭圆形承载结构与地应力场动态匹配,使围岩切向应力分布趋于均匀分布状态.

2)随着埋深增加,全空间协同支护最大控制变形量由 48.2% 增长至 75.4%,控制效果逐渐增强,全空间协同支护方式大幅度降低了巷道围岩变形量,控制效率提高 1.9～3.5 倍,应力增量减少 11.9 MPa. 轴比可调的椭圆形长短轴之比 $a/b=\lambda$ 时控制帮部变形效果最佳.

3)通过现场工业试验全断面高频率应力动态监测,全空间协同支护构建的椭圆形“支架-围岩”承载结构体较稳定,巷道顶底板及两帮位移量大幅降低,有效控制在 18.9～24.6 cm.

参考文献:

[1] 孙晓明,张　勇,何满潮,等. 深部井巷工程高预应力 NPR 耦合支护技术[J]. 矿业科学学报,2023,8(1):50-65.
SUN Xiaoming, ZHANG Yong, HE Manchao, et al. Research of high pre-stress NPR support technology in deep shaft roadway engineering[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(1): 50-65.

[2] 马念杰,李　季,赵志强. 圆形巷道围岩偏应力场及塑性区分布规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2015,44(2):206-213.
MA Nianjie, LI Ji, ZHAO Zhiqiang. Distribution of the deviatoric stress field and plastic zone in circular roadway surrounding rock[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(2): 206-213.

[3] 赵志强,马念杰,刘洪涛,等. 巷道蝶形破坏理论及其应用前景[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(5):969-978.
ZHAO Zhiqiang, MA Nianjie, LIU Hongtao, et al. A butterfly failure theory of rock mass around roadway and its application prospect[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(5): 969-978.

[4] WANG Q, WANG X P, JIANG B, et al. Compensation control and design methods for excavations in deep soft rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 17(6): 3747-3761.

[5] 刘洪涛,韩子俊,韩　洲,等. 考虑轴向应力作用的“围岩-支护”相互作用关系研究[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(6):1116-1124.
LIU Hongtao, HAN Zijun, HAN Zhou, et al. Study on the interaction relationship between surrounding rock and support considering axial stress[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(6): 1116-1124.

[6] 刘洪涛,韩子俊,韩　洲,等. 叠合采动下围岩破坏区非均匀扩展机理及巷道稳定控制[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(3):522-532.
LIU Hongtao, HAN Zijun, HAN Zhou, et al. Mechanism of non-uniform expansion and stability control in surrounding rock failure zone due to superimposed mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(3): 522-532.

[7] ZUO J P, LIU H Y, LIU D J, et al. Theoretical analysis and numerical simulation on the coupled support technology of concrete-filled steel tube and bolt-cable in deep roadway[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(1): 257-275.

[8] YANG S Q, CHEN M, JING H W, et al. A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin′An coal mine, China[J]. Engineering Geology, 2016, 217: 89-101.

[9] 王正义,窦林名,王桂峰,等. 锚固巷道围岩结构动态

响应规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(6):1132-1140.
WANG Zhengyi, DOU Linming, WANG Guifeng, et al. Research on dynamic response of anchoring roadway surrounding rock structure[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(6): 1132-1140.

[10] 谢生荣,王　恩,陈冬冬,等. 深部强采动大断面煤巷围岩外锚-内卸协同控制技术[J]. 煤炭学报,2022,47(5):1946-1957.
XIE Shengrong, WANG En, CHEN Dongdong, et al. Collaborative control technology of external anchor-internal unloading of surrounding rock in deep large-section coal roadway under strong mining influence[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(5): 1946-1957.

[11] 王　军,卢文岩,董晓莉,等. 深部巷道承压环强化复合支护技术与应用[J]. 山东建筑大学学报,2021,36(6):83-90.
WANG Jun, LU Wenyan, DONG Xiaoli, et al. Technology and application of compression ring strengthening composite support in deep roadway[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2021, 36(6): 83-90.

[12] 李英明,赵呈星,刘增辉,等. 围岩承载层分层演化规律及"层-双拱"承载结构强度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(2):217-227.
LI Yingming, ZHAO Chengxing, LIU Zenghui, et al. Research on layered evolution law of surrounding rock bearing layers and strength analysis of "layer-double arch" bearing structure[J]. 2020, 39(2): 217-227.

[13] 付玉凯,王　涛,孙志勇,等. 复合软岩巷道长短锚索层次控制技术及实践[J]. 采矿与安全工程学报,2021,38(2): 237-245.
FU Yukai, WANG Tao, SUN Zhiyong, et al. Layered control technology and practice of long and short anchor cable in composite soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2021, 38(2): 237-245.

[14] XU L, WANG S Y, ELOM D, et al. Mechanism and control of multi-level floor heave in soft rock roadway with straight-wall semicircular arch section[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025, 163: 106745.

[15] 王晓卿,康红普,高富强,等. 碎石锚固中压力拱形成与锚杆作用分析[J]. 煤炭学报,2021,46(10):3139-3147.
WANG Xiaoqing, KANG Hongpu, GAO Fuqiang, et al. Analysis of pressure arch formation and rock-bolt function in gravel bolting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3139-3147.

[16] 戚　伟,付建新,李　腾. 考虑节理劣化效应的深部围岩应力演化规律及敏感性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2020,37(2):327-337.
QI Wei, FU Jianxin, LI Teng, et al. Stress evolution law and sensitivity analysis of surrounding rock in deep mine considering deterioration effect caused by joint[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 327-337.

[17] 张世瑞,江　权,邱士利,等. 深部碎裂岩体巷道变形破坏机制与支护效应连续-非连续分析[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2025,7(1):86-97.
ZHANG Shirui, JIANG Quan, QIU Shili, et al. Continuous-discontinuous analysis of deformation failure mechanism and supporting effect of roadway in deep fractured rock mass[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(1): 86-97.

[18] 常聚才,齐　潮,熊藤根. 深井采场外错式顶板巷道围岩卸压控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2023,40(2):215-223.
CHANG Jucai, QI Chao, XIONG Tenggen, et al. Study on pressure relief control technology of surrounding rock around the staggered roof roadway in a deep longwall face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(2): 215-223.

[19] 于学馥,乔　端. 轴变论和围岩稳定轴比三规律[J]. 有色金属,1981,33(3):8-15.
YU Xuefu, QIAO Duan. Theory of axial variation and three rules of axial ratio for stabilizing country rock[J]. Nonferrous Metals, 1981, 33(3): 8-15.

[20] 郑建伟,鞠文君,张　镇,等. 等效断面支护原理与其应用[J]. 煤炭学报,2020,45(3):1036-1043.
ZHENG Jianwei, JU Wenjun, ZHANG Zhen, et al. Equivalent section supporting theory and its applications[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1036-1043.

[21] 左建平,文金浩,胡顺银,等. 深部煤矿巷道等强梁支护理论模型及模拟研究[J]. 煤炭学报,2018,43(增1):1-11.
ZUO Jianping, WEN Jinhao, HU Shunyin, et al. Theoretical model and simulation study of uniform strength beam support in deep coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(Sup 1): 1-11.

[22] 左建平,文金浩,刘德军,等. 深部巷道等强支护控制理论[J]. 矿业科学学报,2021,6(2):148-159.
ZUO Jianping, WEN Jinhao, LIU Dejun, et al. Con-

trol theory of uniform strength support in deep roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 148-159.

[23] 左建平,刘海雁,徐丞谊,等.深部煤矿巷道等强支护力学理论与技术[J].中国矿业大学学报,2023,52(4):625-647.
ZUO Jianping, LIU Haiyan, XU Chengyi, et al. Theory and technology of uniform strength support mechanics for deep coal roadway [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(4): 625-647.

[24] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):23-33.
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.

[25] 黄庆显.平顶山矿区典型深井巷道围岩内外承载协同控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.
HUANG Qingxian. Study on collaborative control of interior and exterior bearing structure for typical surrounding rock of deep roadway in pingdingshan mining area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.

[26] 王志强,黄 鑫,武 超,等.基于复变函数理论的巷道围岩稳定性分析[J].煤炭科学技术,2022,50(4):58-66.
WANG Zhiqiang, HUANG Xin, WU Chao, et al. Stability analysis of roadway surrounding rock based on complex variable function theory[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 58-66.

[27] 晏 勤,李树忱,谢 璨,等.锚杆加固作用下圆形隧道复合岩体围岩特征曲线解析方法研究[J].岩石力学与工程学报,2017,36(12):3021-3027.
YAN Qin, LI Shuchen, XIE Can, et al. Analytical solution for ground characteristic curve of composite rock mass reinforced by bolts in circular tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(12): 3021-3027.

[28] HOEK E, CARRANZA-TORRES C T, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(3): 445-463.

[29] 王卫军,范 磊,赵志强,等.基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J].煤炭学报,2024,49(1):320-336.
WANG Weijun, FAN Lei, ZHAO Zhiqiang, et al. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control [J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 320-336.

[30] 乔建永.采矿工程中的基础数学研究及其工程应用[J].中国科学:技术科学,2023,53(10):1747-1762.
QIAO Jianyong. Research on pure mathematical problems in mining engineering and their applications [J]. Scientia Sinica(Technologica), 2023, 53(10): 1747-1762.

[31] 高延法,王 波,王 军,等.深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能试验及应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增1):2604-2609.
GAO Yanfa, WANG Bo, WANG Jun, et al. Test on structural property and application of concrete-filled steel tube support of deep mine and soft rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup 1): 2604-2609.

[32] ZUO J P, MA Z Y, XU C Y, et al. Mechanism of principal stress rotation and deformation failure behavior induced by excavation in roadways [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(11): 4605-4624.

(责任编辑 宋 爽)