

# 深部高温巷道功能梯度隔热支护结构研究

张建俊<sup>1,2</sup>, 孙源骏<sup>1,2\*</sup>, 郭良银<sup>3</sup>, 孙闯<sup>1,2</sup>, 费鸿禄<sup>4</sup>, 金淳哲<sup>1,2</sup>, 王猛<sup>2</sup>, 周琳力<sup>2</sup>

1. 辽宁工程技术大学鄂尔多斯研究院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;
2. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000;
3. 山东黄金矿业股份有限公司新城金矿, 山东 莱州 261438;
4. 辽宁工程技术大学爆破技术研究院, 辽宁 阜新 123000



**摘要:**针对传统隔热材料在治理深部矿井高温热害问题时存在的强度低和支护效果差等缺陷,采用改性陶粒和纤维提升隔热混凝土材料强度,并基于功能梯度理论优化混凝土结构形式,构建功能梯度隔热支护结构,结合工程实际开展相似模型试验和数值模拟,分析隔热支护效果。研究表明:构建的“支护层+隔热层”功能梯度结构,可有效控制围岩变形和阻隔围岩散热,相比普通混凝土结构,围岩散热减少量提升了28.74%;随着隔热层厚度的增加,围岩调热圈半径缩小,当隔热层厚度为50 mm时达到阈值,围岩散热减少量提升了30.26%,与模型试验结果一致;隔热支护结构下,围岩应力状态和巷道塑性区形态较普通混凝土结构均无明显变化,仍为类圆形塑性区,支护效果良好;通过功效系数法综合分析围岩散热、围岩应力及巷道变形情况,确定支护层厚度为50 mm、隔热层厚度为50 mm时隔热支护综合效果最佳。

**关键词:**功能梯度;隔热支护结构;隔热效果;围岩温度场;模型试验;数值模拟

中图分类号:TD353 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)04-0789-15 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.04.321  
引用格式:张建俊,孙源骏,郭良银,等.深部高温巷道功能梯度隔热支护结构研究[J].黄金科学技术,2025,33(4):789-803.  
ZHANG Jianjun, SUN Yuanjun, GUO Liangyin, et al. Research on Functional Gradient Thermal Insulation Support Structure of Deep High Temperature Roadway[J]. Gold Science and Technology, 2025, 33(4): 789-803.

深部矿井高温热害问题是影响矿山安全生产的重大问题(蔡美峰等,2019;陈科旭,2022),造成矿井高温热害的因素可归纳为围岩散热、机电设备放热、空气的自压缩散热和爆破散热等,其中围岩散热是造成高温热害的主要因素(崔益源等,2021)。针对围岩散热,目前多采用主动降温技术,其治理方式是对巷道壁面喷射隔热材料来阻止围岩散热(郭平业等,2022)。例如:粉煤灰—无机矿物TIG隔热材料(Wang et al, 2020)、纳米多孔超级隔

热材料(Xiao et al, 2022)、以天然橡胶和稻壳粉为主的复合隔热材料(Tuampoemsab et al, 2023)以及由玄武岩纤维、玻璃纤维和玻化微珠研制而成的矿用隔热材料(Hou et al, 2020),均具备良好的隔热效果,但这些材料多存在强度低和支护效果差等缺陷。

为了开发更高效的材料,研究人员将功能梯度理论广泛应用于材料设计(Dias et al, 2018)。例如:通过设计具有不同孔隙率梯度的功能梯度混凝

收稿日期:2024-10-10;修订日期:2025-02-15

基金项目:辽宁省教育厅基本科研项目“煤矸石绿色稳固与资源化利用关键技术”(编号:JTZD2023077)、国家自然科学基金项目“采场悬臂岩层破断诱震机制与微震前兆信息智能判识”(编号:52404082)和辽宁省教育厅基本科研项目“高速铁路预制构件蒸养混凝土脆化效应研究”(编号:LJKMZ20220700)联合资助

作者简介:张建俊(1984—),男,河南新乡人,副教授,硕士生导师,从事地下工程支护新材料与新结构相关研究工作。

E-mail: zhangjianjun@lntu.edu.cn

\*通信作者:孙源骏(2000—),男,河南南阳人,硕士研究生,从事地下工程隔热支护材料相关研究工作。E-mail:2928627032@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

土,可以显著提升混凝土的压缩变形能力(Toader et al, 2017);采用多纤维复合增强混凝土,提升混凝土在湿热环境的力学特性(Chen et al, 2019)。尽管功能梯度材料在提升混凝土力学性能方面取得了显著进展,但针对同时具备高效隔热和可靠支护功能的混凝土材料的研究仍然相对较少。因此,针对深部高温巷道热害问题,构建了一种施工工艺简单、隔热支护综合效果显著的功能梯度结构,具有广阔的研究前景。与此同时,物理模型试验和数值模拟是隔热支护结构性能研究的常用方法,如:通过建立巷道围岩换热相似模拟试验平台,直观揭示高温围岩的温度变化规律(刘伟等, 2021);利用数值模拟技术进行巷道围岩温度场分析(高佳南等, 2021, 张一夫等, 2021; Zhou et al, 2024);利用有限体积法建立围岩散热及渗流—传热模型(Fan et al, 2022; Wang, 2024);开发相应的计算程序用于更高效地分析围岩隔热影响因素(张树光等, 2019)。这些研究为分析深部巷道热传递规律和隔热支护结构性能提供了理论基础。

鉴于此,根据功能梯度理论反演结果,采用由改性陶粒和纤维配制生产的隔热混凝土材料,结合室内试验所得配比,构建由隔热层和支护层组成的深部巷道功能梯度隔热支护结构。同时,结合新城金矿工程实际,搭建室内相似试验模型对隔热支护结构性能进行研究,并根据数值模拟结果优选功能梯度隔热支护结构设计参数,在保证巷道支护效果的前提下,阻隔围岩向巷道内部的热量传递,从根源上改善矿井高温热害,为金属矿山热害治理提供新的思路。

## 1 功能梯度隔热支护结构

### 1.1 功能梯度理论

对于巷道混凝土喷层支护结构来说,围岩为主要承载体,混凝土喷层结构作为荷载承载的辅助体,其支护阻力  $P_a$  可以根据薄壁圆筒理论进行计算:

$$P_a = \frac{E_c d_s (u_{R_0} - u_0)}{R_0^2 (1 - V_c)} \quad (1)$$

式中:  $E_c$  为混凝土喷层弹性模量(GPa);  $V_c$  为混凝土喷层泊松比;  $u_{R_0}$  为洞壁围岩位移(m);  $u_0$  为支护前

洞壁围岩位移(m)。

前人总结力传递的功能梯度理论时发现,当内层混凝土的弹性模量小于外层混凝土的弹性模量时,可使最易破坏的孔边产生较小的应力集中,将最大的切向应力向处于三轴应力状态的壁内转移(张宁, 2012)。在求得混凝土喷层支护与围岩相接触层弹性模量的前提下,通过改变弹性模量变化常数,得到不同弹性模量分布函数,从而使喷层支护结构每层弹性模量呈线性变化。定义弹性模量变化常数为

$$k = \frac{E_N - E_i}{E_N (N - i)} \quad (2)$$

$$E_i = E_N [1 - k(N - i)] \quad (3)$$

式中:  $k$  为弹性模量变化常数;  $E_N$  为喷层与围岩接触层的弹性模量(GPa);  $E_i$  为喷层第  $i$  层的弹性模量(GPa);  $N, i$  为喷层层数,  $i \in [1, N]$ 。

### 1.2 传热模型

基于基本假设,根据 Fourier 导热定律表达式(孙婉, 2021),结合饱和多孔介质岩体密度及饱和度表达式(李圣腾, 2020),通过能量守恒方程得到饱和弹塑性连续多孔介质岩体温度场控制方程为

$$\left( \rho_s C_{ps} + \rho_w C_{pw} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + K' \alpha_r (T_0 + T) \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} + \rho_w C_{pw} (T_0 + T) \frac{k_w}{\mu} \nabla P_w = \lambda_m \Delta^2 T \quad (4)$$

式中:  $\rho_s$  与  $\rho_w$  分别为多孔介质岩体内岩体与孔隙水渗流密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_{ps}$  和  $C_{pw}$  分别为多孔介质岩体内岩体与孔隙水渗流恒压热容 [ $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ];  $t$  为时间(s);  $K'$  为岩体体积模量的倒数;  $\alpha_r$  为多孔介质的体积热膨胀系数( $\text{K}^{-1}$ );  $T_0$  和  $T$  分别为岩体综合初始温度和综合上升后温度(K);  $\varepsilon_v$  为体积应变;  $k_w$  为多孔介质岩体的渗透率( $\mu\text{m}^2$ );  $\mu$  为孔隙水渗流的动力黏度( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ );  $P_w$  为孔隙水渗流压力(Pa);  $\lambda_m$  为岩体的综合热传导系数 [ $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ]。

### 1.3 功能梯度隔热支护材料

为解决深部高温巷道变形破坏及高温热害问题,根据功能梯度理论和传热模型理论,设计采用“支护层+隔热层”喷层形式构建隔热支护结构,根据理论反演结果开展室内配比试验。采用改性陶粒和纤维配制生成的隔热混凝土材料,模拟得出所

需配比,构建由隔热层和支护层组成的深部巷道功能梯度隔热支护结构。根据隔热层和支护层的物理力学和热力学参数(表1)开展模型试验和数值模拟,确定隔热支护结构分层厚度等设计参数。

表1 混凝土喷层物理力学和热力学参数  
Table 1 Mechanical and thermodynamic parameters of concrete shotcrete support

材料类别	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	导热系数	比热容
隔热层	1 800	18.3	0.6	3.44	0.58	1 835
支护层	2 400	25.5	0.2	1.91	0.95	920

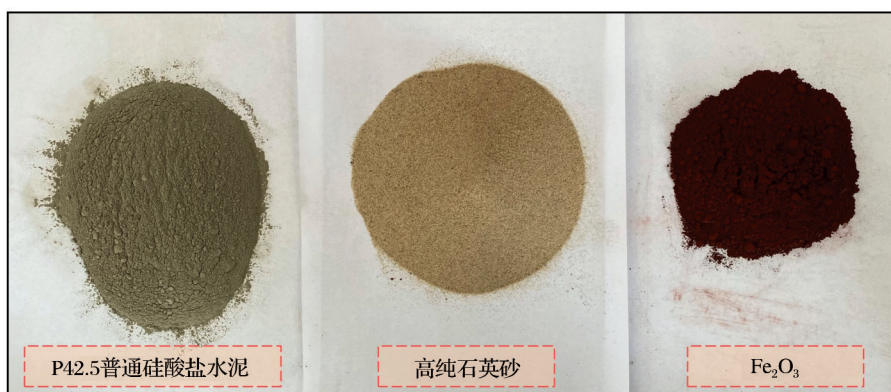


图1 围岩相似材料

Fig. 1 Similar materials of surrounding rock

表2 围岩相似材料配比  
Table 2 Mix ratio of similar materials in surrounding rock (%)

名称	比重	名称	比重
水泥	4.53	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.32
高纯石英砂	90.62	水灰比	4.53

模型尺寸选取需根据巷道现场实际情况、试验室空间大小、模型搭建难易程度和模型试验预期效果等综合确定。通过现场勘察,试验段巷道长度为40 m,巷道断面为半圆拱形,宽度约为3 m,高度约为3.5 m。综合考虑多方面因素,选定模型几何相似比 $C_l=20:1$ ,确定相似模型整体尺寸为1.75 m×

## 2 围岩温度场模型试验

### 2.1 围岩相似材料及相似比

为保证相似模型试验过程中热量的稳定传递,围岩相似材料应具备良好的导热性(图1)。根据高温巷道围岩温度场相似准则(吴栋,2019),结合实际围岩情况来确定围岩相似材料物理力学及热物性参数。综合模型成本、材料来源及性能,选取石英砂、42.5型普通硅酸盐水泥和铁红(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)作为原材料开展配比试验,最终确定围岩相似材料配比如表2所示。

1.50 m×2.00 m。其中,模型截面尺寸为1.75 m×1.50 m,巷道位于截面中心,断面仍为半圆拱形,宽度为15 cm,高度为17.5 cm。

基于巷道围岩温度场监测结果,结合温度场相似准则,根据相似常数关系式计算得到相关参数相似比如下:(1)导热系数相似比 $C_{\lambda_s}=\lambda_{s1}/\lambda_{s2}\approx 1:1$ ;(2)导温系数相似比 $C_a=a_1/a_2\approx 1:1$ ;(3)时间相似比 $C_t=C_l^2/C_a=400:1$ ;(4)风速相似比 $C_v=1/C_l=1:20$ ;(5)温度相似比 $C_t=1:1$ 。由表3可知,围岩相似材料满足温度场模型试验要求。

### 2.2 模型试验系统

(1)巷道模型制作。分别制作普通混凝土结构

表3 围岩相似材料热物性参数

Table 3 Thermal property parameters of surrounding rock and similar materials

材料种类	导热系数 $\lambda/(W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1})$	比热容 $c/(kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1})$	密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	28 d抗压强度/MPa
围岩原岩	3.12	0.79	2.62	66.36
相似材料	2.56	0.86	2.19	3.53

和隔热支护结构巷道模型,厚度均为 10 mm。其中,普通混凝土结构巷道模型可直接在模具中分段浇筑;对于隔热支护结构巷道模型,需将室内试验中用于制备改性陶粒隔热支护材料的原材料进行

粒径改良,调整隔热层和支护层材料配比,采用内外双层模具分层、分段浇筑。在模型搭建过程中,使用导热系数相同的黏合剂黏结巷道用于试验,如图 2 所示。

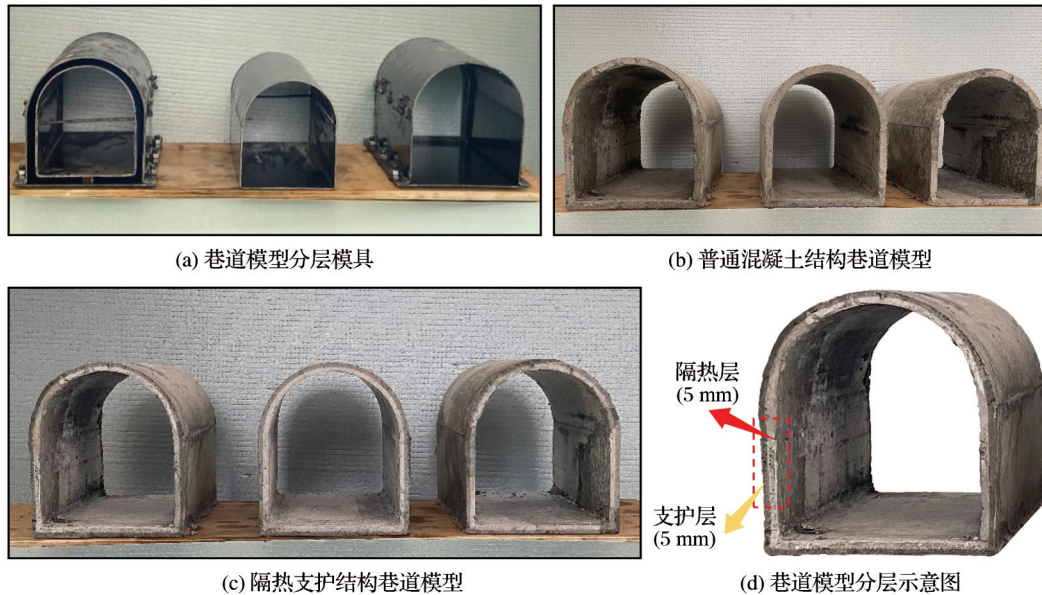


图 2 巷道模型浇筑

Fig. 2 Roadway model construction

(2)模型主体搭建。首先在巷道主体结构模具底部铺设一层保温挡板,堆砌厚度为 3 cm 的围岩相似材料后铺设加热线,然后逐步堆砌围岩相似材料,安装巷道模型和传感器,完成模型主体的搭建,最后在模型左右两侧及顶部布置加热线,构建加热圈,如图 3 所示。



图 3 模型主体结构

Fig. 3 Main structure of the model

(3)温度监测及风流控制系统。采用热电偶温度数显仪监测围岩温度,沿巷道轴向方向设置 2 个监测断面,各监测断面沿围岩径向方向等间距 16 cm 布设 6 支温度传感器。在巷道入口处安装圆形鼓风机装置进行通风,并加固通风管道连接巷道出入口实现巷道通风循环,在巷道的进、出风口及恒温恒湿机进风口处各设置 1 个风速传感器,以监测巷道内风速变化。

(4)试验系统布置。为避免封闭温度场时加热线破坏保温挡板,需要在模型主体加热线外覆盖一层相似材料进行抹平,养护 1 d 后使用保温挡板封闭其余 5 面,利用热电偶控制加热线温度为 35.5~36.0 °C(保持相似试验围岩温度始终与实际工况一致,实现温度补偿),构建封闭温度场。在巷道进口处连接鼓风机装置,安装风温控制装置和恒温恒湿机,并使用通风管道连接巷道出入口实现巷道通风循环,如图 4 所示。

(5)相似模型试验步骤。首先将模型整体加热至 36 °C 左右并保持恒定,然后对巷道进行通风加

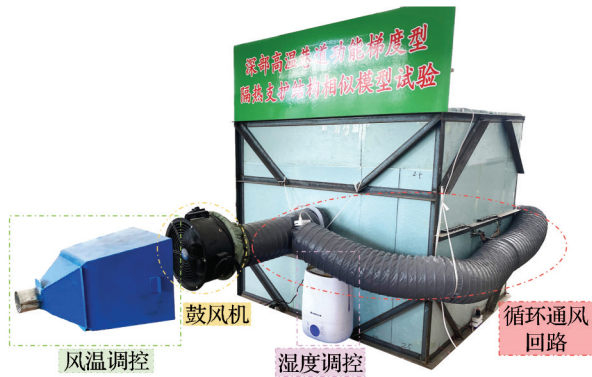


图4 相似模型试验系统

Fig. 4 Similar model test system

湿,根据模型参数相似比,设置巷道内通风温度、湿度和风速等参数展开试验,对比不同支护结构隔热效果,分析风温和风速对围岩温度场的影响。

### 2.3 试验结果分析

#### (1) 隔热效果评价

通过计算围岩散热量评价隔热混凝土具体隔热效果,围岩散热量计算公式为

$$Q_w = k_w LU(T_w - T_B) \quad (5)$$

式中: $Q_w$ 为围岩散热量(kW); $k_w$ 为围岩不稳定换热

系数[ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ]; $L$ 为巷道长度(m); $U$ 为巷道周长(m); $T_w$ 为围岩原岩温度( $^\circ C$ ); $T_B$ 为巷道内风流温度( $^\circ C$ )。

混凝土支护时围岩散热量计算公式(姚韦靖, 2019)为

$$Q_z = k_z LU(T_z - T_B) \quad (6)$$

式中: $Q_z$ 为混凝土支护时围岩散热量(kW); $k_z$ 为混凝土不稳定换热系数[ $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ]; $L$ 为巷道长度(m); $U$ 为巷道周长(m); $T_z$ 为混凝土与围岩交界处的温度( $^\circ C$ )。其中, $k_z$ 可表示为

$$k_z = p \frac{\lambda_z}{\lambda_w \delta} k_w \quad (7)$$

式中: $p$ 为调整系数,取值为0.7; $\delta$ 为混凝土支护厚度(m); $\lambda_z$ 为混凝土热导率[ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]; $\lambda_w$ 为围岩热导率[ $W/(m \cdot ^\circ C)$ ]。

混凝土支护时减少围岩散热的计算公式为

$$\Delta Q = Q_w - Q_z \quad (8)$$

式中: $\Delta Q$ 为混凝土支护时围岩散热减小量(kW)。

#### (2) 普通混凝土结构与隔热支护结构效果对比

控制巷道内通风温度为 $30^\circ C$ ,湿度为90%,风速为30 m/s,通风至围岩温度场达到稳定状态,如图5所示。

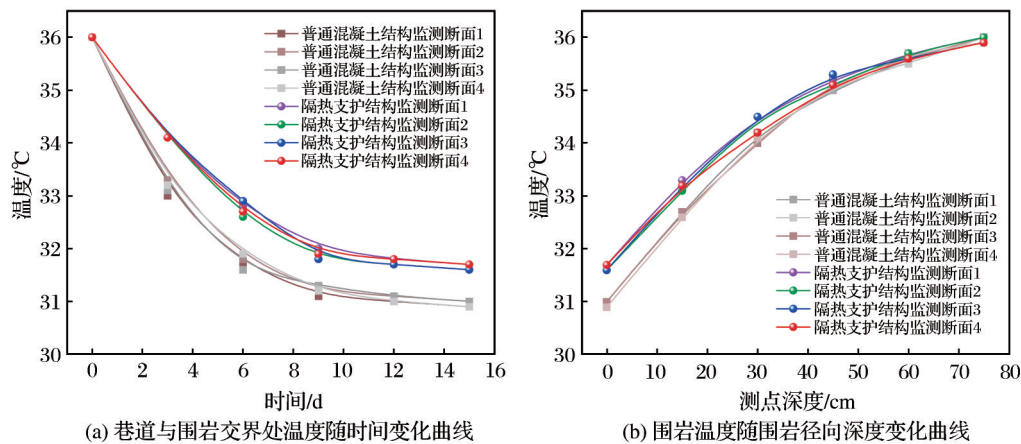


图5 普通混凝土结构和隔热支护结构对围岩温度场影响情况对比

Fig.5 Comparison of the influence of ordinary spray layer and thermal insulation spray layer on the temperature field of surrounding rock

由图5(a)可知,随着通风时间的延长,普通混凝土结构和隔热支护结构在巷道与围岩交界处的温度均逐渐降低,9 d后趋于稳定,较未通风时分别降低 $5.05^\circ C$ 和 $4.35^\circ C$ ,计算可得隔热支护结构下围岩散热减小量提高了28.74%。由图5(b)可知,随

着测点深度的增大,普通混凝土结构和隔热支护结构测点温度均呈现先快速升高,再缓慢升高至接近原岩温度的趋势。

#### (3) 风温对隔热支护结构隔热效果的影响

控制隔热支护结构巷道模型内风速为30 m/s,

湿度为90%,分别设置入口风温为28,29,30,31,32 °C,通风至巷道与围岩交界处温度达到稳定状态,得到不同风温下围岩温度场变化情况如图6所示。

由图6可知,随着通风温度的升高,通风稳定后围岩径向深度各测点温度均升高,与入口风温为28 °C时相比,入口风温为32 °C时巷道与围岩交界处稳定温度升高了1.8 °C,围岩散热减少量则降低了18.60%。由此可知,风温升高,巷道截面温差减小,隔热效果减弱,这一结果与前人试验结果一致(游波等,2024)。

(4) 风速对隔热支护结构隔热效果的影响

控制隔热支护结构巷道模型内风温为30 °C,湿度为90%,分别设置入口风速为20,25,30,35,40 m/s,通风至巷道与围岩交界处温度达到稳定状态,得到不同风速下围岩温度场变化情况如图7所示。

由图7可知,各测点温度随风速的提高而降低,与风速为20 m/s时相比,风速为40 m/s时巷道与围岩交界处稳定温度降低了1.8 °C,围岩散热减少量则提高了26.31%。风速提升使得围岩与巷道内风流热交换加快,散热速率增大,新鲜风流带走更多的热量,从而增强隔热效果。

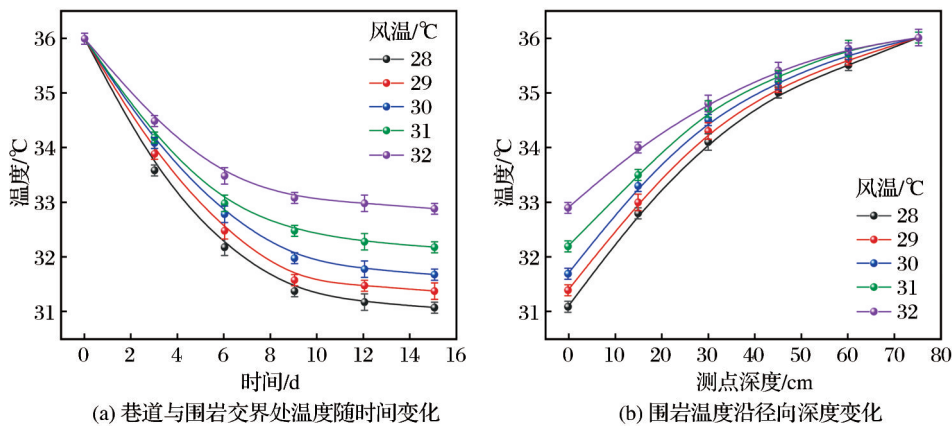


图6 不同风温下围岩温度场变化情况

Fig. 6 Changes of surrounding rock temperature field under different wind temperatures

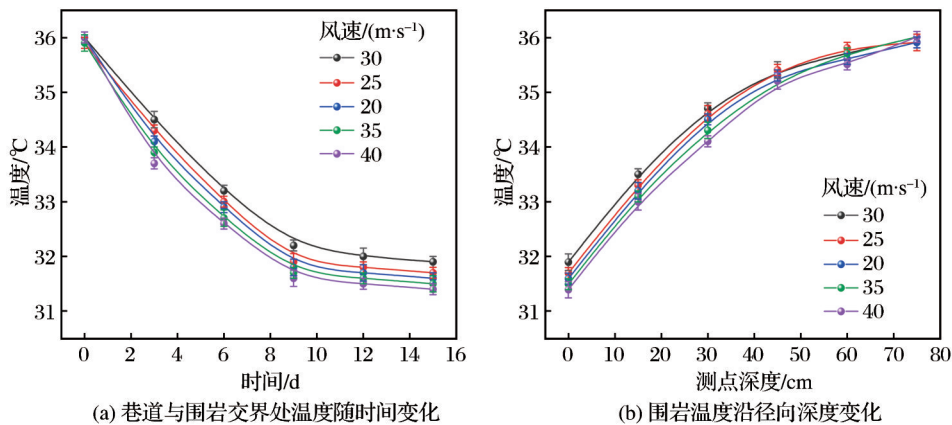


图7 不同风速下围岩温度场变化情况

Fig. 7 Changes of surrounding rock temperature field under different wind speed

3 围岩温度场及应力场数值模拟

鉴于物理模型试验在实施条件和工况范围上的局限性,采用数值模拟方法,探究多种工况下混

凝土结构的隔热支护效果。通过对比分析数值模拟与物理模型试验结果,验证数值模型的可靠性,在此基础上开展多工况模拟,通过围岩温度场和围岩散热量分析隔热效果,结合巷道变形情况、围岩

应力云图和巷道塑性区形态分析支护效果。

### 3.1 数值模型构建

(1)几何模型。通过分析新城金矿工程试验段巷道监测数据,围岩温度为36℃。根据工程实际,利用FIAC<sup>3D</sup>软件建立数值模拟几何模型,模型尺寸为34 m×30 m×40 m;巷道位于模型中间,其尺寸为3.0 m×3.5 m,拱高为1.5 m,总厚度为100 mm,构建普通混凝土结构为单层;隔热支护结构分2层构建,靠近围岩侧为高弹模、高导热支护层,靠近巷道侧为低弹模、低导热隔热层。考虑巷道开挖影响范围为巷道直径3~5倍区域,故将巷道直径3~5倍区域进行网格加密,如图8所示。

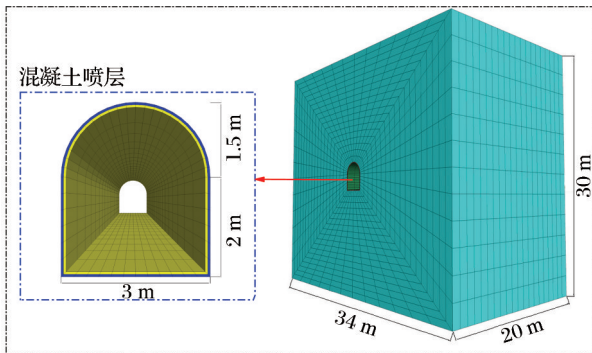


图8 数值模拟几何模型

Fig. 8 Geometric model for numerical simulation

(2)破坏准则。围岩采用摩尔—库伦弹塑本构模型,其破坏准则表示为

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2C \sqrt{N_\phi} \quad (9)$$

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (10)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 为地层中3个主应力,且 $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ;C为材料黏聚力; $N_\phi$ 为主应力比; $\varphi$ 为材料摩擦角。

(3)边界条件。将模型前后左右设置为法向约束边界,底部为全约束边界,顶部为自由边界,地应力根据新城金矿实际情况施加。新城金矿深部地应力分布函数表示为

$$\sigma_1 = -1.59 + 0.0679H \quad (11)$$

$$\sigma_2 = 0.17 + 0.0260H \quad (12)$$

$$\sigma_3 = -1.53 + 0.0358H \quad (13)$$

式中: $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 和 $\sigma_3$ 分别为最大水平主应力、最小水平主应力和垂直主应力;H为埋深。通过地应力分布函数计算出模型Z方向施加地应力为42.06 MPa,

X方向施加地应力为71.74 MPa,Y方向施加地应力为28.25 MPa。模型初始温度为36℃,模型上下、左右边界为温度边界,前后边界为绝热边界,本构模型采用各向同性传热模型。模型在开挖前先进行初始地应力平衡计算,得到模型初始地应力,模型开挖后,清除初始地应力平衡状态下围岩节点位移和速度。

(4)试验设计。参照表1、表3和表4相关参数,根据矿区实际情况,将隔热层厚度、巷道风温作为影响因素,分别设置隔热层厚度为30,40,50,60,70 mm,设置风温为28,29,30,31,32℃,开展数值模拟。对比相似模型试验结果,探究功能梯度隔热支护结构下隔热支护效果和围岩温度场变化规律,确定功能梯度隔热支护结构最优设计参数。

表4 围岩物理力学参数

Table 4 Physical and mechanical parameters of surrounding rock

参数	数值	参数	数值
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 620	内摩擦角/(°)	48.15
体积模量/GPa	19.51	黏聚力/MPa	7.85
剪切模量/GPa	15.87	抗拉强度/MPa	4

### 3.2 不同隔热支护结构效果对比

分别构建普通混凝土结构(100 mm)和隔热支护结构(支护层50 mm+隔热层50 mm),控制巷道开挖后通风温度为30℃和通风时间为360 d进行数值模拟,得出围岩温度场分布情况如图9所示。

由图9可知,相较于普通混凝土结构,隔热支护结构的调热圈半径缩小,巷道与围岩交界处温度升高;从温度变化来看,在由远及近靠近通风巷道的围岩中,围岩温度不断降低并趋于风温,而围岩径向深度越深,围岩温度越趋近于原岩温度。

为探究围岩温度场变化情况,对数据进行分析,结果如图10所示。由图10可知,随着通风时间的不断增加,不管是普通混凝土结构还是隔热支护结构,巷道与围岩交界处的温度均逐渐趋于稳定,分别为30.8℃和31.7℃;围岩散热量随通风时间的增加而逐渐减少,计算可得通风360 d时,在普通混凝土结构和隔热支护结构条件下,围岩散热量分别为1 390.75 kW和1 212.45 kW,说明在隔热支护结构下,围岩散热减小量较普通混凝土结构提升

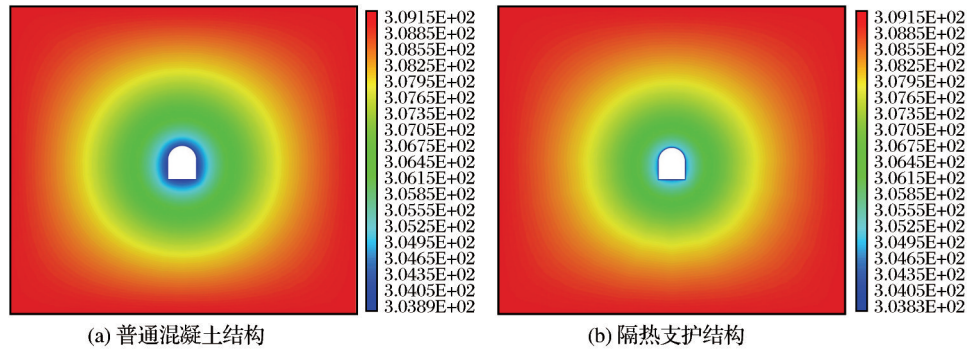


图9 围岩温度场分布

Fig. 9 Temperature field distribution of surrounding rock

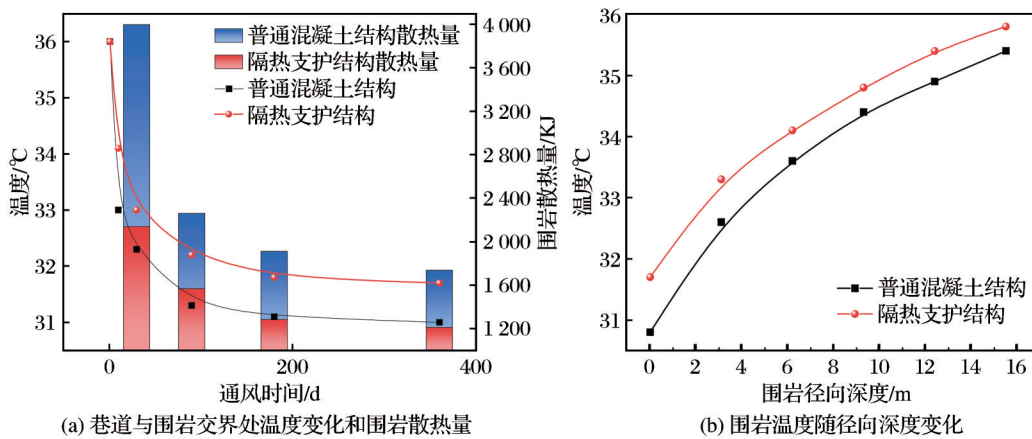


图10 围岩温度场变化情况

Fig. 10 Temperature field variation of surrounding rock

30.27%,与相似模型试验结果一致,验证了数值模拟的可靠性。据此,进一步针对不同工况展开研究。

相关研究表明:巷道顶、底位移量小于50 mm,两帮位移量小于30 mm时,支护效果良好(王猛等,2022)。此外,在控制围岩变形前提下,巷道可承受应力提升,说明支护效果增强(陈立强等,2022),而围岩塑性区呈现圆形或椭圆形分布时,属于“稳定性”破坏模式,围岩内弹性势能可通过变形得到充分释放,使巷道最终趋于稳定(王卫军等,2024)。本文据此对隔热支护结构的支护效果和围岩稳定性进行分析。由数值模拟结果可知:普通混凝土结构下,巷道顶板、底板、左帮和右帮最大位移量分别为12.816,9.1996,18.465,18.441 mm;隔热支护结构下巷道顶板、底板、左帮和右帮最大位移量分别为12.500,9.137,18.423,18.407 mm,说明顶、底板围岩变形量较小,能够有效控制围岩变形。

图11和图12分别为普通混凝土结构和隔热支

护结构下的围岩应力云图。由图11(a)和图12(a)可知,垂直应力在巷道两侧呈对称分布,应力峰值分别为46.19 MPa和46.38 MPa;由图11(b)和图12(b)可知,水平应力集中区域为巷道顶、底板,应力峰值分别为137.54 MPa和137.59 MPa,说明隔热支护结构下支护效果有所增强。普通混凝土和隔热支护结构下围岩塑性区分布情况如图13所示,均为圆形塑性区,巷道稳定性较好,结合围岩应力和巷道变形情况,可知隔热支护结构仍具备良好的支护效果。

### 3.3 隔热层厚度对隔热支护效果的影响

控制巷道开挖后通风温度为30℃和通风时间为360 d进行数值模拟,得到不同隔热层厚度下巷道围岩温度场的变化情况,如图14所示。由图14可知,随着岩层径向深度的增加,岩层温度逐渐提高;随着喷层厚度的增加,围岩温度场调热圈半径缩小,岩层各点温度随之提高,且径向深度越小,提高幅度越大。

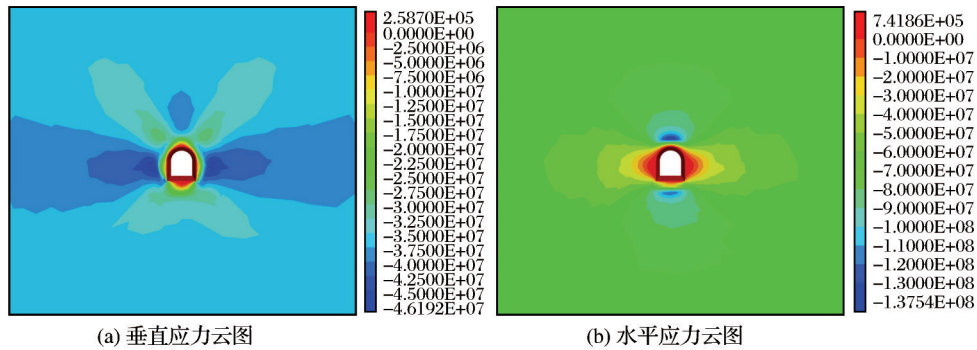


图 11 普通混凝土结构下围岩应力云图

Fig. 11 Stress cloud map of surrounding rock under conventional concrete structure

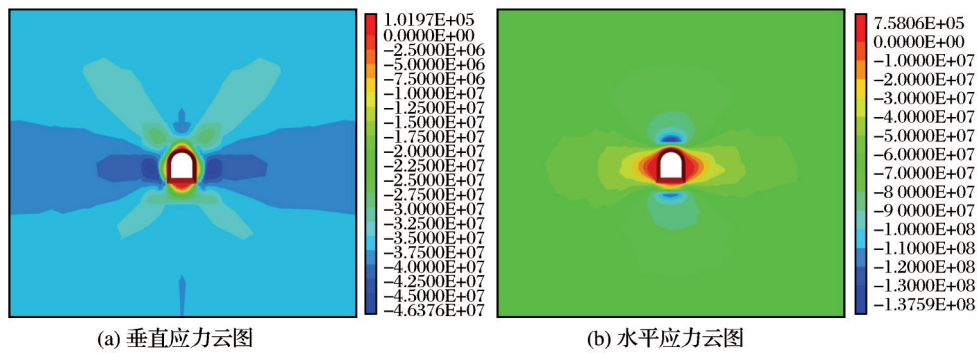


图 12 隔热支护结构下围岩应力云图

Fig. 12 Stress cloud map of surrounding rock under thermal insulation support structure

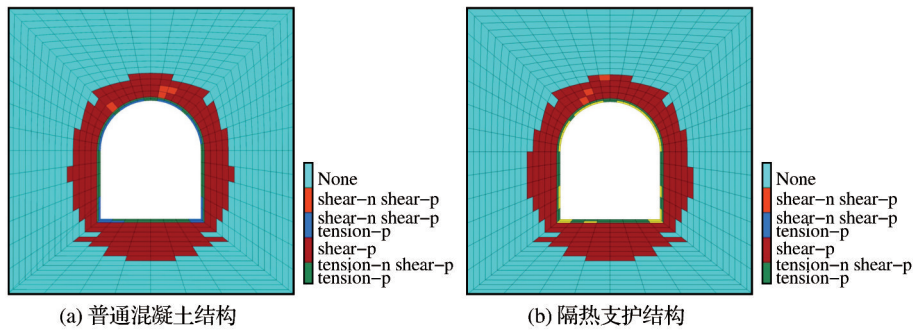


图 13 普通混凝土和隔热支护结构下围岩塑性区分布

Fig. 13 Plastic zone distribution of surrounding rock under conventional concrete structure and thermal insulation support structure

由图 14 可知,当隔热层厚度分别为 30, 40, 50, 60, 70 mm 时,通风 360 d,巷道与围岩交界处稳定温度分别较普通混凝土结构提高 0.89, 0.82, 0.70, 0.69, 0.68 °C;围岩散热量分别为 1 347.96, 1 298.03, 1 212.45, 1 205.31, 1 198.18 kW,围岩散热减小量分别提升了 22.46%, 25.33%, 30.26%, 30.67% 和 31.08%。分析其原因可能是喷层厚度增加,巷道内热量通过风流进行交换的路径增长,隔热效果涨幅减弱。

分别以巷道拱顶、底板、左帮和右帮中心线作为研究对象,建立巷道表面最大垂直位移随隔热支护结构厚度的变化曲线,如图 15 所示。由图 15 可知,随着隔热层厚度的增加,巷道拱顶、底板、左帮和右帮位移量均呈现先减小后增大的变化趋势,隔热层厚度为 50 mm 时各测点位移量最小。

由图 16 可知,围岩垂直应力在巷道两帮出现应力集中,当隔热层厚度为 30, 40, 50, 60, 70 mm 时,垂直

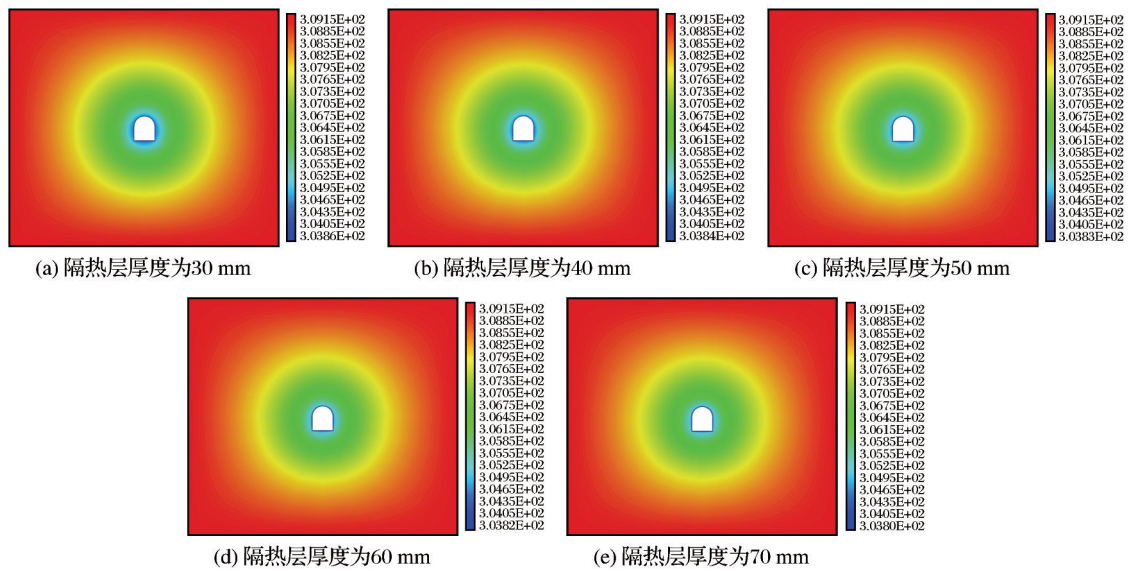


图 14 不同隔热层厚度下围岩温度场变化情况

Fig. 14 Changes of surrounding rock temperature field under different thickness of heat insulation layer

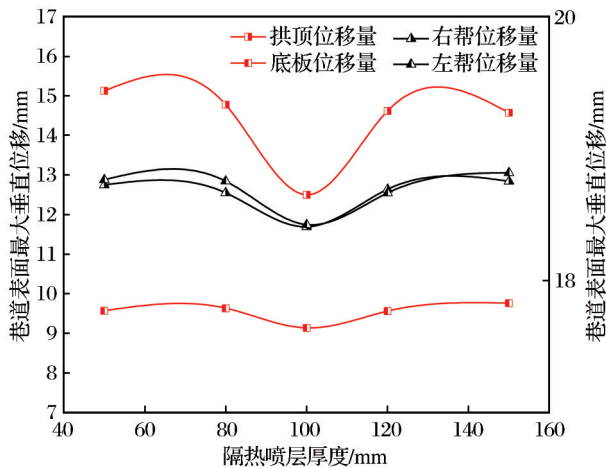


图 15 巷道表面最大垂直位移随喷层厚度的变化情况

Fig. 15 Changes of the maximum vertical displacement of roadway surface with the thickness of spray layer

应力峰值分别为45.90,46.81,46.38,46.08,46.32 MPa,即隔热层厚度为30 mm时垂直应力峰值最小。

由图 17 可知,围岩水平应力在巷道顶底板处出现应力集中,当隔热层厚度为30,40,50,60,70 mm时,水平应力峰值分别为140.28,140.02,137.59,139.99,139.77 MPa,即隔热层厚度为50 mm时应力峰值最小。

图 18 所示为支护结构隔热层厚度不同时围岩塑性区的变化。由图 18 可知:随着隔热层厚度的增加,围岩顶板塑性区主要由曾剪切破坏和正在剪

切破坏组成,围岩两帮塑性区主要由曾剪切破坏组成;喷层塑性区主要由正在剪切破坏、正在抗压破坏、曾剪切破坏和曾抗压破坏组成。结合围岩应力云图和巷道变形情况可知,各隔热支护结构下围岩应力状态和巷道塑性区形态较普通混凝土结构无明显变化,说明隔热支护结构仍具备良好的力学性能,满足支护要求。

### 3.4 风温对温度场分布规律的影响

为探究风温对围岩温度场的影响,设置隔热层厚度为50 mm,在不同风温下进行数值模拟,得到不同通风温度下的巷道围岩温度场,如图 19 所示。风温分别设为28,29,30,31,32 °C,当通风360 d时,巷道与围岩交界处稳定温度分别较风温提高了0.88,0.79,0.70,0.59,0.49 °C。由此可知,通风温度越高,调热圈半径越大,且在巷道与围岩交界处,隔热支护结构稳定温度与风温间的温差越小,隔热效果减弱,与相似模型试验结果一致。

### 3.5 隔热支护结构参数优选

采用功效系数法对围岩散热量、围岩应力和围岩位移进行分析,将不同隔热层厚度数值方案最优围岩散热量、最优围岩应力和最优围岩位移功效系数设置为1,其他组功效系数为最优项数据与相应的最优功效系数的比值,最后根据公式  $D = \sqrt{d_1 d_2 d_3 d_4 d_5}$  求出总功效系数,具体见表5。

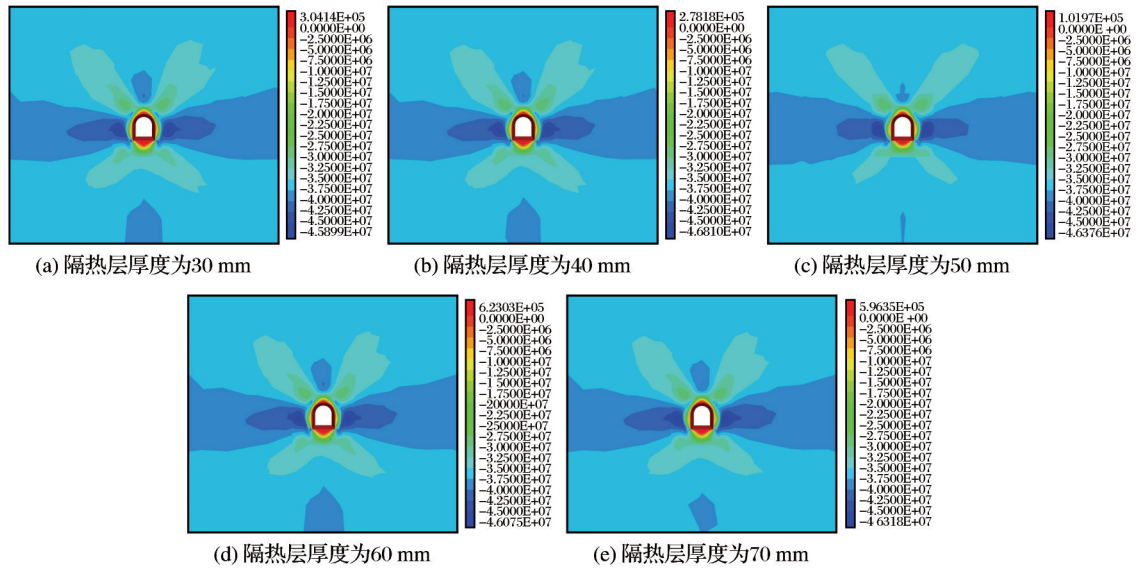


图 16 不同隔热层厚度下垂直应力云图

Fig. 16 Vertical stress cloud diagram under different insulation layer thicknesses

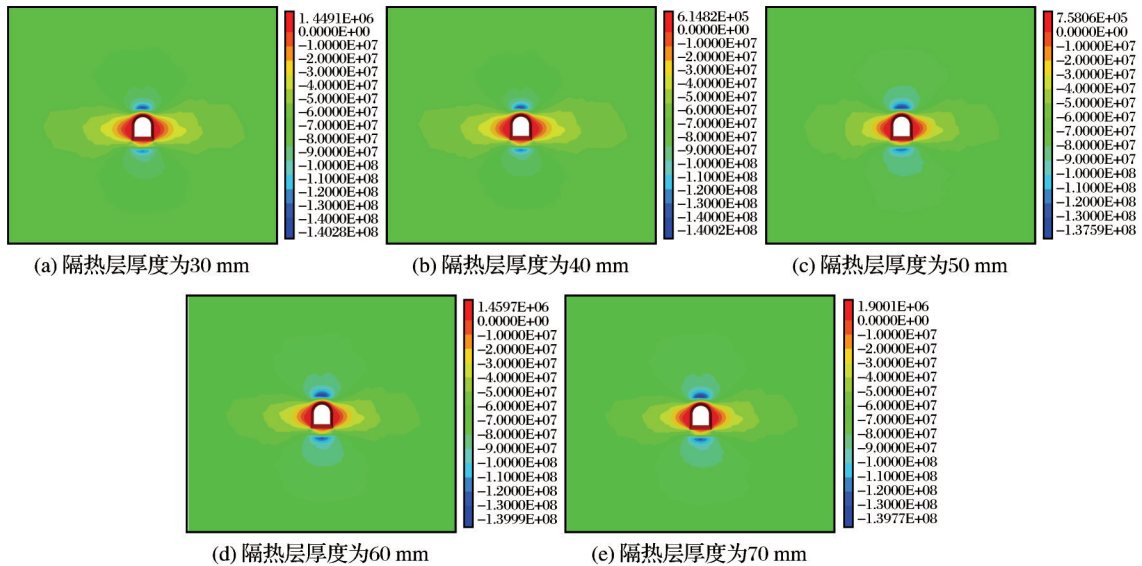


图 17 不同隔热层厚度下水平应力云图

Fig. 17 Horizontal stress cloud diagram under different insulation layer thicknesses

由表 5 可知,隔热支护结构隔热层厚度设置为 50 mm 时,总功效系数最大,与普通混凝土结构相比,该设计参数下通风 360 d 后围岩散热减少量提升了 30.26%,巷道表面最大垂直位移减少了 2.47%,巷道表面处最大水平位移减少了 0.23%。由此可知,隔热支护结构支护层厚度设置为 50 mm、隔热层厚度设置为 50 mm 时,隔热支护效果最佳,在保证巷道支护效果的前提下能够发挥良好的隔热作用。

#### 4 结论

通过物理模型试验及数值模拟,探究了功能梯度隔热支护结构对深部高温巷道围岩温度场的影响规律,利用功效系数法确定功能梯度隔热支护结构设计参数,得出以下结论:

(1)在模型试验各支护条件下,由远及近靠近通风巷道的过程中围岩温度不断降低并趋于风温;隔热支护结构下,围岩热量被隔绝在巷道与围岩交

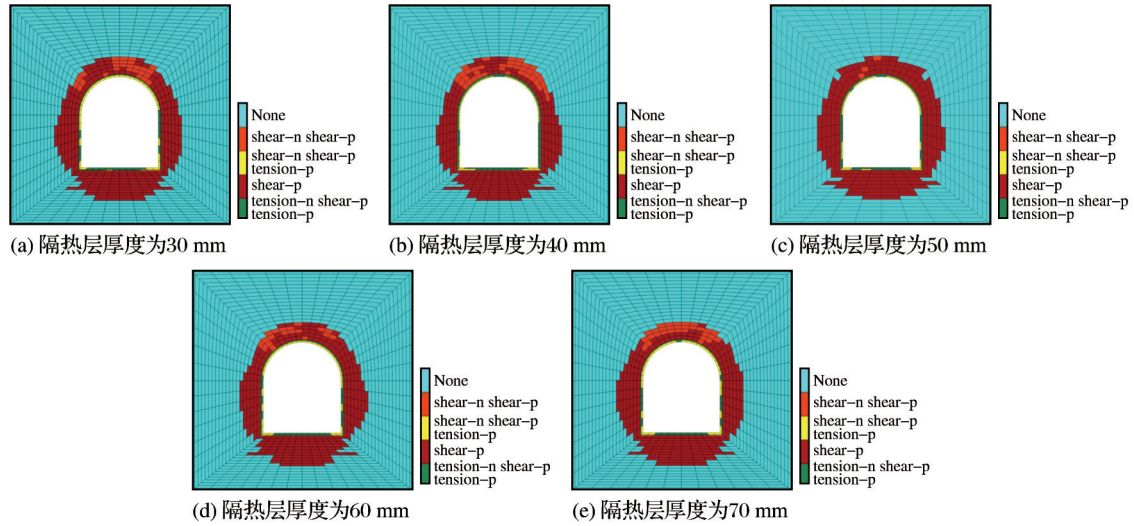


图 18 支护结构隔热层厚度不同时围岩塑性区

Fig. 18 Plastic zone of surrounding rock when supporting with different thickness of thermal insulation layer

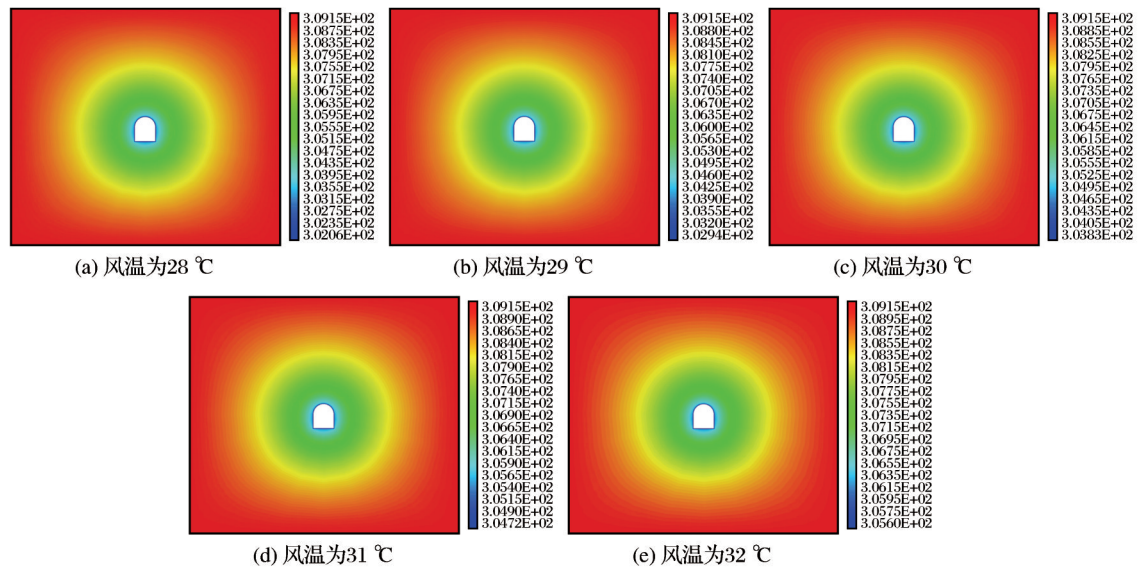


图 19 不同风温下围岩温度场

Fig. 19 Temperature field of surrounding rock under different wind temperatures

表 5 功效系数法隔热支护结构厚度最优解

Table 5 Optimal solution of thermal insulation spray layer thickness by efficiency coefficient method

厚度/mm	360 d围岩 散热量/kJ	围岩最大水 平位移/mm	围岩最大垂 直位移/mm	围岩最大 垂直应力 力/MPa	围岩水最大 平应力/ MPa	散热量 功效系 数 $d_1$	水平位 移功效 系数 $d_2$	垂直位 移功效 系数 $d_3$	垂直应 力功效 系数 $d_4$	水平应 力功效 系数 $d_5$	总功效 系数 $D$
30	1 347.96	18.764	15.124	45.90	140.28	0.89	0.98	0.83	1.00	0.98	0.84
40	1 298.03	18.753	14.776	46.81	140.02	0.92	0.98	0.85	0.98	0.98	0.86
50	1 212.45	18.423	12.500	46.38	137.59	0.99	1.00	1.00	0.99	1.00	0.99
60	1 205.31	18.663	14.616	46.08	139.99	0.99	0.99	0.86	0.99	0.98	0.90
70	1 198.18	18.817	14.572	46.32	139.77	1.00	0.97	0.86	0.99	0.98	0.90

界处,导致此处温度较高,相比普通混凝土结构,围岩散热减少量提升28.74%,起到良好的隔热效果。

(2)随着隔热层厚度的增加,调热圈半径缩小,隔热效果增强,当隔热层厚度为50 mm时达到阈值,围岩散热量为1 212.45 kJ,围岩散热减少量提升30.26%;巷道内通风温度降低也会使调热圈半径缩小。

(3)随着隔热层厚度的增加,围岩应力状态和巷道塑性区形态较普通混凝土结构无明显变化,均为圆形塑性区,具备良好的支护效果。巷道塑性区范围内巷道拱顶、底板、左帮和右帮位移量均呈现先减小后增大的趋势,当隔热层厚度为50 mm时各测点位移量最小,相较于普通混凝土结构,巷道表面最大垂直位移减少了2.47%,最大水平位移减少了0.23%。

(4)构建的“支护层+隔热层”功能梯度隔热支护结构,从靠近围岩侧至巷道侧,实现了由高弹模、高导热向低弹模、低导热过渡的结构形式,可有效控制围岩变形和阻隔围岩散热。根据功效系数法计算结果,确定最优设计参数为支护层50 mm+隔热层50 mm。

#### 参考文献 (References):

Chen G Q, Xu P, Mi G Y, et al, 2019. Compressive strength and cracking of composite concrete in hot-humid environments based on microscopic quantitative analysis [J]. *Construction and Building Materials*, 225: 441-451.

Dias C M R, Campello E M B, Savastano H, et al, 2018. Exploratory pre-industrial test linking FGM and Hatschek technologies for the manufacture of asbestos-free corrugated cementitious roof sheets [J]. *Construction and Building Materials*, 190: 975-984.

Fan B W, Shi P, Wan Z J, et al, 2022. Simulation study on the disaster-causing mechanism of geothermal water in deep high-temperature heat-damaged mines [J]. *Minerals*, 12(11): 1355.

Hou C B, Xin S, Zhang L, et al, 2020. Foundation research on physicochemical properties of mine insulation materials [J]. *Coatings*, 10(4): 355.

Toader N, Sobek W, Nickel K G, 2017. Energy absorption in functionally graded concrete bioinspired by sea urchin spines [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 14(2): 369-378.

Tuampoemsab S, Rattanapan A, Sapsrithong P, et al, 2023. Physical, mechanical and thermal insulation properties of foam made from natural rubber compounded with ground rice husk [J]. *Materials Science Forum*, 1086: 35-40.

Wang H, 2024. Numerical study of surrounding rock heat dissipation and wind temperature prediction in high geotemperature coal face [J]. *Energy Exploration and Exploitation*, 42(1): 17-39.

Wang J H, Wan Z J, Zhang H W, et al, 2020. Application of thermal insulation gunite material to the high geo-temperature roadway [J]. *Advances in Civil Engineering*, (1): 8853870.

Xiao Y G, Deng H W, Xie Z M, et al, 2022. Application of nanoporous super thermal insulation material in the prevention and control of thermal hazards in deep mining of metal mines [J]. *Journal of Nanomaterials*, (1): 2390616.

Zhou J L, Zhang Y, Shi P, et al, 2024. Dimensionless analysis of the spatial-temporal coupling characteristics of the surrounding rock temperature field in high geothermal roadway realized by Gauss-Newton iteration method [J]. *Applied Sciences*, 14(4): 1608.

蔡美峰, 薛鼎龙, 任奋华, 2019. 金属矿深部开采现状与发展战略 [J]. *工程科学学报*, 41(4): 417-426.

Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua, 2019. Current status and development strategy of metal mines [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 41(4): 417-426.

陈科旭, 程力, 孙玉强, 等, 2022. 山东黄金集团深部矿山热害特征与治理措施研究 [J]. *现代矿业*, 38(5): 171-177.

Chen Kexu, Cheng Li, Sun Yuqiang, et al, 2022. Study on heat damage characteristics and control measures of deep mines in Shandong Gold Group Co., Ltd [J]. *Modern Mining*, 38(5): 171-177.

陈立强, 赵国彦, 李洋, 等, 2022. 开挖卸荷扰动下的深部巷道支护及其效果评价 [J]. *黄金科学技术*, 30(3): 438-448.

Chen Liqiang, Zhao Guoyan, Li Yang, et al, 2022. Deep roadway support and its effect evaluation under excavation unloading disturbance [J]. *Gold Science and Technology*, 30(3): 438-448.

崔益源, 李坤, 梅国栋, 等, 2021. 深井热害分析与控制技术研究进展 [J]. *有色金属 (矿山部分)*, 73(2): 128-134.

Cui Yiyuan, Li Kun, Mei Guodong, et al, 2021. Research progress of analysis and control technology of heat stress in deep mine [J]. *Nonferrous Metals (Mining Section)*, 73(2): 128-134.

高佳南, 李超, 吴奉亮, 等, 2021. 巷道入口风温季节性变化下围岩温度场及其影响因素分析 [J]. *矿业安全与环保*,

- 48(6):19-24. Gao Jianan, Li Chao, Wu Fengliang, et al, 2021. Analysis of temperature field of surrounding rock and influencing factors under the seasonal variation of air temperature at the entrance of roadway[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 48(6):19-24.
- 郭平业, 卜墨华, 张鹏, 等, 2022. 矿山地热防控与利用研究进展[J]. 工程科学学报, 44(10):1632-1651. Guo Pingye, Bu Mohua, Zhang Peng, et al, 2022. Research progress on the prevention and utilization of mine geothermal energy[J]. Chinese Journal of Engineering, 44(10):1632-1651.
- 李圣腾, 2020. 矿山非均匀沉降胶结充填体热学性能研究[D]. 西安: 西安科技大学. Li Shengteng, 2020. Study on thermal performance of cemented paste backfill in mines based on non-uniform sedimentary characteristic[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology.
- 刘伟, 梁书菲, 黄庆威, 等, 2021. 周期性风温下矿井巷道围岩换热教学实验装置研制[J]. 中国安全生产科学技术, 17(7):28-34. Liu Wei, Liang Shufei, Huang Qingwei, et al, 2021. Development of teaching experimental device for heat exchange in surrounding rock of mine roadway under periodic wind temperature[J]. Journal of Safety Science and Technology, 17(7):28-34.
- 孙婉, 2021. 地下水渗流与地源热泵热量运移耦合模拟[J]. 太阳能学报, 42(5):16-23. Sun Wan, 2021. Coupling simulation of groundwater seepage and heat transfer of ground source heat pump[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 42(5):16-23.
- 王猛, 李志学, 夏恩乐, 等, 2022. 深部巷道围岩能量耗散与支护调控效应[J]. 采矿与安全工程学报, 39(4):741-749. Wang Meng, Li Zhixue, Xia Enle, et al, 2022. Energy dissipation and supporting regulation effect of surrounding rock in deep roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 39(4):741-749.
- 王卫军, 范磊, 赵志强, 等, 2024. 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, 49(1):320-336. Wang Weijun, Fan Lei, Zhao Zhiqiang, et al, 2024. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control[J]. Journal of China Coal Society, 49(1):320-336.
- 吴栋, 2019. 高地温巷道喷浆隔热机理的实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学. Wu Dong, 2019. Experimental study on spraying insulation mechanism of high ground temperature roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology.
- 姚韦靖, 2019. 深部高地温岩层巷道隔热混凝土喷层支护技术研究及应用[D]. 合肥: 安徽理工大学. Yao Weijing, 2019. Research and application of thermal insulation concrete spray layer support technology for deep and high temperature rock roadways[D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology.
- 游波, 崔大雄, 刘何清, 等, 2024. 不同隔热材料下的深井巷道隔热降温模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 34(2):153-160. You Bo, Cui Daxiong, Liu Heqing, et al, 2024. Simulation study on heat insulation and cooling of deep shaft tunnel with different heat insulation materials[J]. China Safety Science Journal, 34(2):153-160.
- 张宁, 2021. 功能梯度混凝土立井井壁承载性能研究[D]. 北京: 华北电力大学. Zhang Ning, 2021. Study on bearing behavior of functionally graded concrete shaft lining[D]. Beijing: North China Electric Power University.
- 张树光, 常剑, 王宏伟, 2019. 高温巷道调热圈特性及对隔热支护结构的影响[J]. 煤田地质与勘探, 47(5):179-185. Zhang Shuguang, Chang Jian, Wang Hongwei, 2019. Characteristics of heat-adjusting ring and the influence of thermal insulation support structure in high-temperature roadway[J]. Coal Geology and Exploration, 47(5):179-185.
- 张一夫, 谢倩楠, 董子文, 等, 2021. 巷道断面形状对围岩散热规律的影响研究[J]. 安全与环境学报, 21(6):2595-2601. Zhang Yifu, Xie Qiannan, Dong Ziwen, et al, 2021. Study on the influence of roadway cross-section shape on heat dissipation of surrounding rock[J]. Journal of Safety and Environment, 21(6):2595-2601.

## Research on Functional Gradient Thermal Insulation Support Structure of Deep High Temperature Roadway

ZHANG Jianjun<sup>1,2</sup>, SUN Yuanjun<sup>1,2</sup>, GUO Liangyin<sup>3</sup>, SUN Chuang<sup>1,2</sup>, FEI Honglu<sup>4</sup>, JIN Chunzhe<sup>1,2</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>, ZHOU Linli<sup>2</sup>

1.Erdos Research Institute, Liaoning Technical University, Erdos 017000, Inner Mongolia, China;

2.College of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

3.Xincheng Gold Mine, Shandong Gold Mining Co., Ltd., Laizhou 261438, Shandong, China;

4.Blasting Technology Research Institute, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China

**Abstract:** To address the challenge of high-temperature thermal hazards in deep mining operations, traditional thermal insulation support materials often suffer from limitations such as inadequate strength and poor durability. To improve and optimize the performance of thermal insulation support structures, modified ceramic particles and fibers were incorporated into the development of thermal insulation concrete materials. Utilizing the principles of functional gradient theory, the concrete structure was optimized, resulting in the construction of a functional gradient thermal insulation support structure. A corresponding model test system was established, integrating engineering practices to facilitate a comparative analysis of the thermal insulation effects between the newly developed thermal insulation support structure and conventional concrete structures. Through numerical simulation analysis, the impact of various parameters of the thermal insulation support structure on the thermal insulation efficacy of the surrounding rock in the roadway was examined, leading to the determination of optimal design parameters for the functional gradient thermal insulation support structure. The findings indicate that the engineered “support layer+thermal insulation layer” functional gradient structure successfully transitions from a high elastic modulus and high thermal conductivity at the surrounding rock interface to a low elastic modulus and low thermal conductivity at the roadway interface. This configuration effectively mitigates the deformation of surrounding rocks and reduces heat dissipation. In the model test, the application of the thermal insulation support structure resulted in a 28.74% reduction in heat dissipation from the surrounding rocks compared to a conventional concrete structure. As the thickness of the thermal insulation layer increased, the radius of the thermal adjustment zone in the surrounding rocks decreased, and the deformation of the roadway initially decreased before subsequently increasing. Additionally, a decrease in ventilation temperature further reduced the extent of the thermal adjustment zone. A comprehensive analysis of heat dissipation and deformation in the surrounding rocks, conducted using the efficacy coefficient method, it was determined that the optimal thermal insulation effect was achieved when the thickness of the support layer was 50 mm and the thickness of the thermal insulation layer was 50 mm.

**Key words:** functional gradient; insulated support structure; insulation effect; surrounding rock temperature field; model test; numerical simulation