采矿与矿山安全

文章编号：1004-4051(2024)05-0143-09 DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230315

多层隔热下工作面进风巷围岩传热特性

吕逸飞[1,2]，邱进伟[1,2]，邹 云[1,2]
（1. 安徽理工大学煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心，安徽 淮南 232001；
2. 安徽理工大学安全科学与工程学院，安徽 淮南 232001）

摘 要：深部矿井热害问题日益凸显，严重威胁作业人员生命健康，进一步影响矿井生产效益。本文通过围岩钻孔实验方法，研究了门克庆煤矿 2102 工作面、3100 工作面、3106 工作面及 3107 工作面进风巷围岩温度随径向深度变化规律；基于 ANSYS 软件，对膨胀玻化微珠水泥隔热材料与空气夹层协同隔热效果进行研究。研究结果表明：围岩温度与径向深度之间的关系符合 ExpAssoc 模型，相关系数 R^2 为 0.991 06；膨胀玻化微珠水泥隔热材料与空气夹层厚度均为 3 cm、6 cm、9 cm、12 cm、15 cm、18 cm 时，材料-空气协同隔热顺序与空气-材料协同隔热顺序相比，原巷道壁面温度更高，调热圈半径更小，隔热效果更好；材料-空气协同隔热时，空气夹层厚度在 12 cm 内对隔热效果影响更大，材料层厚度在 6～18 cm 内对隔热效果影响更大；对流换热系数与隔热层厚度呈反比，空气夹层厚度在 12 cm 内其变化幅度大，而受材料层厚度影响较小。本文研究结果可为矿井多层隔热降温提供参考。

关键词：矿井热害；围岩钻孔；围岩温度场；对流换热；协同隔热
中图分类号：TD727 **文献标识码：**A

Heat transfer characteristics of surrounding rock in air inlet laneway of working face under multi-layer heat insulation

LYU Yifei[1,2]，QIU Jinwei[1,2]，ZOU Yun[1,2]
（1. *Joint National-Local Engineering Research Centre for Safe and Precise Coal Mining*，*Anhui University of Science and Technology*，*Huainan* 232001，*China*；
2. *School of Safety Science and Engineering*，*Anhui University of Science and Technology*，*Huainan* 232001，*China*）

Abstract：Heat hazard in deep mine is increasingly prominent, which seriously threatens the life and health of operators and further affects the production efficiency of mine. Variation rule of surrounding rock temperature with radial depth in air inlet laneway of 2102 working face, 3100 working face, 3106 working face and 3107 working face in Menkeqing Coal Mine is measured by experimental method of drilling in surrounding rock; based on ANSYS software, the cooperative heat insulation effect of expansion vitrified microbeads cement insulation material and air sandwich is studied. The results show that the relationship between surrounding rock temperature and radial depth conforms to ExpAssoc model and the correlation coefficient R^2 is 0.991 06. When the thickness of expansion vitrefied

收稿日期：2023-05-15 **责任编辑：**刘硕
基金项目：“十四五”国家重点研发计划项目资助（编号：2022YFC2503201）；煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金项目资助（编号：EC2023009）
第一作者简介：吕逸飞（1997—），男，硕士，主要从事矿井热害等方面的研究，E-mail：1104486630@qq.com。
通讯作者简介：邱进伟（1978—），男，博士，副教授，主要从事矿井通风与粉尘防治等相关教学与科研工作，E-mail：59183698@qq.com。
引用格式：吕逸飞，邱进伟，邹云. 多层隔热下工作面进风巷围岩传热特性[J]. 中国矿业，2024，33(5)：143-151.
LYU Yifei, QIU Jinwei, ZOU Yun. Heat transfer characteristics of surrounding rock in air inlet laneway of working face under multi-layer heat insulation[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 143-151.

microbeads cement heat insulation material and air interlayers are 3 cm, 6 cm, 9 cm, 12 cm, 15 cm and 18 cm, the material-air collaborative heat insulation sequence is higher than that of air-material collaborative heat insulation sequence, the original laneway wall temperature is higher, the heat control circle radius is smaller, and the heat insulation effect is better. In the case of material-air collaborative heat insulation, the thickness of air layer within 12 cm has a greater effect on the heat insulation effect, and the thickness of material layer within 6-18 cm has a greater effect on the heat insulation effect. The convective heat transfer coefficient is inversely proportional to the thickness of the heat insulation layer. The thickness of the air layer varies greatly within 12 cm, but is less affected by the thickness of the material layer. The research results can provide reference for multi-layer heat insulation and cooling in mine.

Keywords: heat hazard in mine; drilling of surrounding rock; temperature field of surrounding rock; convective heat transfer; collaborative heat insulation

0 引 言

随着浅表煤炭资源的减少，矿井开采深度逐年增加，由此带来的矿井热害问题日趋凸显和严重[1]。受地温梯度影响，岩石温度随着埋深的增加而增加，因此，围岩散热逐渐成为导致矿井热害的主要因素之一。

近年来，很多学者对围岩传热进行了相应研究：LOWNDES 等[2] 进行模拟实验，研究了风流与围岩间对流换热系数及围岩换热特性；ROY 等[3] 研究了干燥与潮湿两种情况下围岩壁面温度变化规律；吴强等[4] 建立了动坐标下的导热微分方程，简化了围岩散热计算；姬建虎等[5-6] 采用模拟与实验相结合的方法得出掘进工作面压入式通风条件下围岩与风流间的换热关系式；秦跃平等[7] 推导了巷道围岩体温度随深度和时间变化的函数关系式。隔热降温则是减少围岩散热的有效途经，杨万鑫[8] 结合实验与模拟研究了封闭空气夹层对巷道与风流间传热的影响；李文菁等[9-10] 设计巷道空气夹层隔热实验系统并结合数值模拟，得出空气夹层厚度 8 cm 左右隔热效果最佳；张源[11] 进行了阻热圈内喷浆与注浆隔热效果对比分析；薛韩玲等[12] 模拟分析了水玻璃膨胀蛭石的隔热效果。

通过分析以上研究可知，国内外学者已采用多种方法对巷道围岩传热及单隔热层降温进行大量研究，但鲜有多隔热层协同降温效果研究。本文通过围岩钻孔实验方法，研究得出门克庆煤矿不同工作面围岩径向温度变化规律。结合数值模拟方法，对膨胀玻化微珠水泥隔热材料与空气夹层协同隔热效果进行研究，以期为多层隔热降温提供理论依据。

1 围岩传热模型

巷道掘进过程中，风流与巷道通过对流换热，巷道壁面乃至靠近巷道一侧的围岩温度也由围岩原温开始显著降低，持续通风至对流换热稳态后，围岩径向温度分布基本趋于稳定。

1）围岩内部热传导。围岩与巷道壁面及隔热层间传热以热传导为主，结合能量守恒定律与傅里叶方程求解[13]，见式（1）。

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\lambda\frac{\partial T}{\partial y})+q_v \tag{1}$$

式中：T 为围岩温度，K；ρ 为围岩的密度，kg/m^3；c_p 为围岩的比热容，J/(kg·m^3)；λ 为围岩导热系数，W/(m·K)；q_v 为围岩的广义热源项，J/(m^3·s)；x、y 为热传导方向；t 为热传导时间量，s。

2）巷道与风流对流换热。风流流入巷道后，风流温度与巷道壁面乃至浅层围岩温度之间存在温度差，伴随着以对流换热为主的换热过程。对流换热系数 h 通常按式（2）计算[14]。

$$h=\left[mc_p(t_{f1}-t_{f2})\right]/A(t_{w0}-t_1) \tag{2}$$

式中：h 为对流换热系数，W/(m^2·K)；m 为空气质量流量，kg/s；A 为换热面积，m^2；t_{w0}、t_1 为壁面温度与风流平均温度，K；t_{f1}、t_{f2} 为进口、出口风流温度，K；c_p 为空气定比压热容，J/(kg·m^3)。

3）围岩传热阻力。巷道内空气夹层或隔热材料的使用增加了围岩向巷道传热的热阻，总热阻由围岩内部热阻、空气夹层热阻、挡板热阻、隔热材料热阻、对流换热热阻等组成[15]，计算见式（3）。

$$R=R_0+R_1+R_2+R_3+R_4=\frac{1}{hL}+\frac{\delta_1}{\lambda_1 L}+\frac{\delta_2}{\lambda_2 L}+\frac{\delta_3}{\lambda_3 L}+\frac{d_3}{2\lambda_4 L}\ln\frac{d_4}{d_3} \tag{3}$$

式中：R_0、R_1、R_2、R_3、R_4 为巷道壁面对流换热热阻、挡板热阻、隔热材料热阻、空气夹层热阻、围岩内部热阻，K/W；L 为巷道截面周长，m；d_3 为巷道等值周长的圆直径，m；d_4 为调热圈直径，m；δ_1、δ_2、δ_3 为隔热板、隔热材料、空气夹层的厚度，m；λ_1、λ_2、λ_3、λ_4 为隔热板、隔热材料、空气夹层、围岩的导热系数，W/(m·K)。

巷道底部热阻计算公式见式（4）。

$$R'=R_0+R_4=\frac{1}{hL'}+\frac{d_3}{2\lambda_4 L'}\ln\frac{d_4}{d_3} \tag{4}$$

式中，L' 为巷道底部宽度，m。

2　围岩钻孔实验

为了探究围岩温度随径向深度变化规律，对门克庆煤矿 2102 工作面、3100 工作面、3106 工作面及 3107 工作面进行围岩钻孔实验，实验流程如图 1 所示。

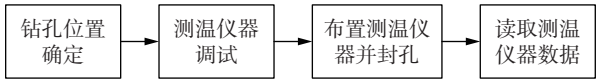


图 1　钻孔实验流程

Fig. 1　Flow of drilling experiment

2.1　实验方案

在 2102 工作面、3100 工作面、3106 工作面及 3107 工作面进风巷 1 500 m 处巷道中心径向方向，间隔 10 m 钻取 14 个 5 cm 孔径钻孔，钻孔深度依次为 2 m、5 m、8 m、11 m、14 m、17 m、20 m、23 m、26 m、29 m、32 m、35 m、38 m、40 m。图 2 为 3106 工作面进风巷围岩钻孔。摩擦会使钻孔内温度升高，钻孔完成后，等待风流将钻孔冷却 6 h 后将热电偶埋入钻孔内。

图 2　3106 工作面钻孔

Fig. 2　Drilling in 3106 working face

测温元件选用热电偶，其标定采用冰结法[16]，标定过程如图 3 所示。用万用表与温度计测出热电偶两端电势差及热端温度，按式(5)进行拟合，得出热电偶标定方程。其中，1 号热电偶拟合曲线如图 4 所示，表 1 为 3106 工作面热电偶标定方程。

$$E=\mu(T-T_0) \tag{5}$$

式中：E为热电偶两端点电动势，V；T为热端温度，℃；T_0为冷端温度，℃。

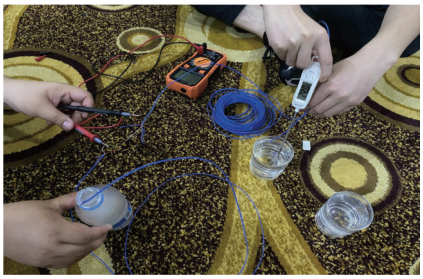


图 3　热电偶标定

Fig. 3　Thermocouple calibration

2.2　实验结果分析

为了减小误差影响，前期每隔 10 min 对热电偶读数一次，读数稳定后，频率改为 30 min 一次，热电偶读数如图 5 所示。表 2 为各工作面钻孔内围岩温度，其中，0 m 处为巷道壁面温度。

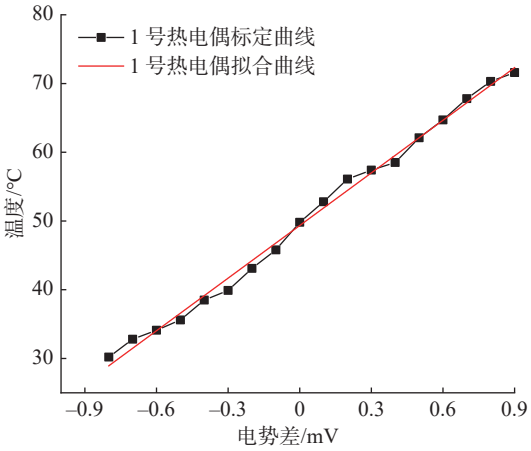


图 4　1 号热电偶拟合曲线

Fig. 4　Fitting curves of No.1 thermocouple

表 1　3106 工作面热电偶标定方程

Table 1　Thermocouple calibration equation of 3106 working face

编号	长度/m	标定方程	相关系数 R^2
1	2	T=25.24E+49.28	0.996 3
2	5	T=25.53E+51.11	0.996 6
3	8	T=25.72E+49.41	0.998 0
4	11	T=26.15E+50.22	0.989 3
5	14	T=25.93E+51.43	0.997 1
6	17	T=26.20E+48.98	0.998 4
7	20	T=26.58E+47.81	0.995 3
8	23	T=26.31E+47.88	0.992 1
9	26	T=25.73E+48.53	0.996 1
10	29	T=26.61E+48.43	0.989 1
11	32	T=25.98E+48.37	0.992 1
12	35	T=25.57E+48.62	0.994 5
13	38	T=25.63E+47.43	0.997 7
14	40	T=26.28E+48.13	0.996 4

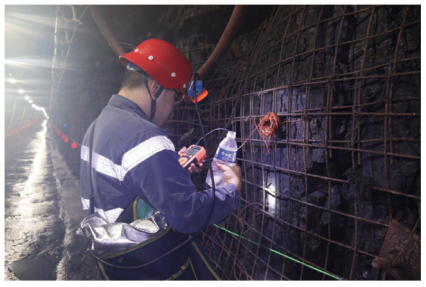


图 5　热电偶读数

Fig. 5　Thermocouple reading

表 2 各工作面围岩温度

Table 2 Surrounding rock temperature of each working face

深度/m	围岩温度/℃			
	2102 工作面	3100 工作面	3106 工作面	3107 工作面
0	27.63	27.54	28.10	27.86
2	28.89	28.66	29.43	29.12
5	32.68	32.43	32.98	32.76
8	35.13	35.02	35.35	35.23
11	36.53	36.45	36.72	36.64
14	37.48	37.36	37.65	37.55
17	38.18	38.08	38.31	38.21
20	38.62	38.56	38.74	38.65
23	39.02	38.95	39.10	39.05
26	39.36	39.32	39.41	39.38
29	39.59	39.56	39.63	39.61
32	39.70	39.68	39.72	39.71
35	39.74	39.73	39.76	39.75
38	39.74	39.73	39.76	39.75
40	39.75	39.73	39.77	39.76

由表 2 可知，3100 工作面巷道壁面温度最低，为 27.54 ℃，3106 工作面壁面温度最高，为 28.10 ℃。这是由于工作面与副井间的距离不一，工作面距副井越近，供风距离越短，风流温度更低，与浅层围岩换热更多，浅层围岩温度更低。径向 9～40 m 范围内，各工作面相同深度围岩原温接近，但各工作面标高不同，受地温梯度的影响，略有差距。

围岩温度与径向深度关系如图 6 所示。由图 6 可知，在径向 0～3 m 范围内，浅层围岩温度变化幅度小，越靠近巷道温度越低，这是由于持续通风，巷道与风流对流换热导致；在径向 3～6 m 范围内，对流换热对围岩温度影响开始随径向深度增加而降低，围岩温度急剧上升，变化幅度最大；在径向 6～26 m 范围内，围岩温度变化幅度随径向深度增加而降低，温度升高趋势逐渐变缓。随着径向深度增加，围岩温差减小，因此，径向 6～26 m 范围内围岩温度变化幅度较 26～40 m 范围内更大。

围岩温度随径向深度变化近似符合 ExpAssoc 模型（式（6）），对其进行曲线拟合（图 7），相关系数 R^2 为 0.991 06。

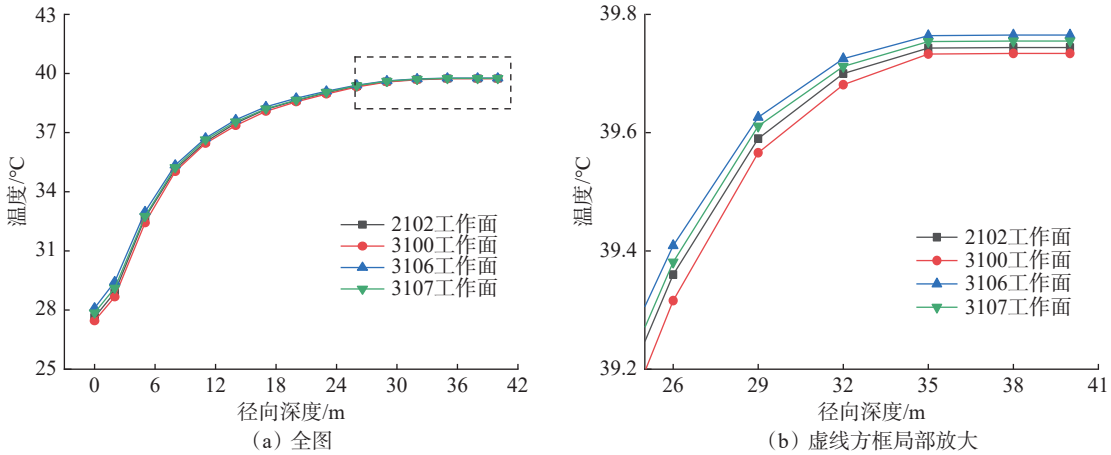
$$y = 27.057\,4 + 6.303\,6\left(1 - e^{\left(-\frac{x}{8.209\,65}\right)}\right) + 6.303\,6\left(1 - e^{\left(-\frac{x}{8.209\,3}\right)}\right) \tag{6}$$

式中：x 为径向深度，m；y 为围岩温度，℃。

3 隔热效果分析

3.1 几何模型及条件设置

材料-空气协同隔热与空气-材料协同隔热巷道



（a）全图　　（b）虚线方框局部放大

图 6 围岩径向随温度变化曲线

Fig. 6 Radial temperature variation of surrounding rock

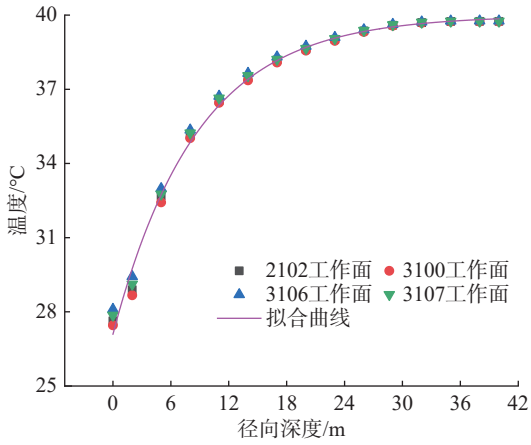


图 7　围岩径向随温度变化拟合曲线

Fig. 7　Fitting curves of radial temperature variation of surrounding rock

截面如图 8 所示。由图 8 可知，材料-空气协同隔热时，材料层为第一层隔热层，空气夹层为第二层隔热层，用挡板作为空气夹层封闭材料；空气-材料协同隔热则与之相反。

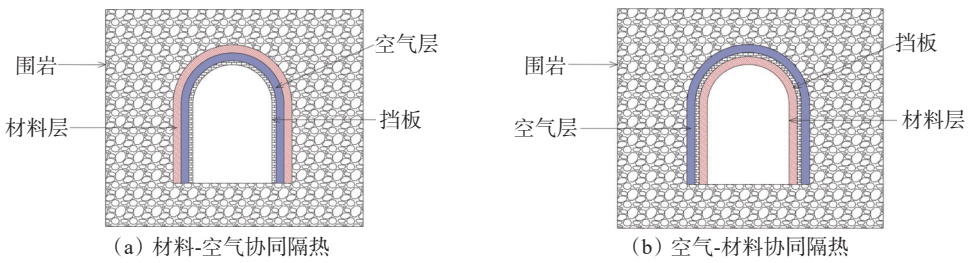
应用 SpaceClaim 软件建立门克庆煤矿 3106 工作面进风巷物理模型，围岩区域为 80 m×80 m×1 600 m 的长方体，巷道断面形状为半圆拱，宽 6 m，高 5 m，巷道中心为围岩区域中心，进风巷长 1 600 m，通风方式为压入式通风。巷道与隔热层建模及网格划分如图 9 所示。

巷道煤岩样本取自门克庆煤矿，隔热材料选取符合井下要求的膨胀玻化微珠水泥隔热材料[17]，空气夹层内空气与巷道空气同质，挡板设置薄层结构，其厚度相对隔热层厚度可忽略，具体热物理参数设定见表 3。径向深度到 35 m 后，围岩温度在 39.75 ℃ 左右不再变化。模拟中设置围岩深处边界条件为第 1 类边界条件，围岩温度为 39.8 ℃，风流初始温度 26 ℃，初始速度 1 m/s，与实际情况相同；出口设置为压力出口。求解模型选择打开能量方程及黏性方程 $k-\varepsilon$，选择 SIMPLE 求解方法，残差设置为 1e-06，选择标准初始化方法。

3.2　隔热层顺序对隔热效果影响

设置空气夹层与隔热材料相同厚度 3 cm、6 cm、9 cm、12 cm、15 cm、18 cm，风流温度 26 ℃，风速 1 m/s，通风至换热稳定。图 10 为隔热层厚度均为 6 cm、12 cm 时，进风巷 1 500 m 处截面围岩温度场分布所示。由图 10 可知，截面温度分布以巷道为中心，近似呈现不同温度梯度同心圆环状。巷道中心区域温度较四周壁面温度更低。材料-空气协同隔热时，巷道中心温度分布受隔热层厚度影响更明显；隔热层厚度相同时，材料-空气协同隔热巷道中心低温区域较空气-材料协同隔热巷道更大，其隔热效果更好。

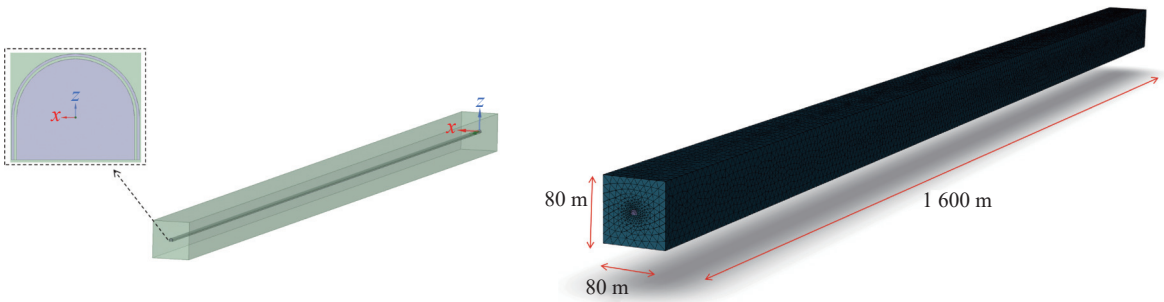
图 11 和图 12 是隔热层厚度相同，不同隔热层顺序下围岩温度与径向深度的关系。由图 11 和图 12 可知，实验时围岩壁面温度更低，这是由于实际巷道



（a）材料-空气协同隔热　　（b）空气-材料协同隔热

图 8　协同隔热巷道截面

Fig. 8　Section of collaborative heat insulation roadway



（a）巷道及隔热层模型　　（b）网格划分

图 9　物理模型及网格划分

Fig. 9　Physical model and division of grid

表 3 热物理参数设定

Table 3 Thermophysical parameter settings

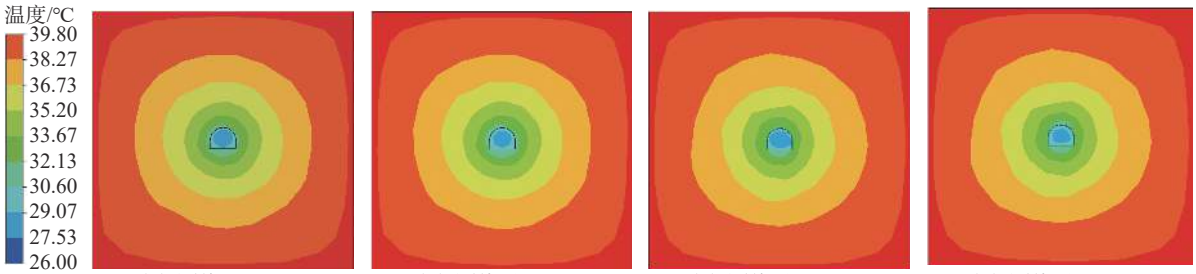
类别	密度/(kg/m)	导热系数/(W/m·K)	比热容/(J/kg·K)
围岩	1 380	1.580 0	920.00
空气	1.255	0.024 2	1 006.43
材料	335	0.238 2	747.00
挡板	700	0.173 0	2 310.00

未添加隔热层，巷道壁面与风流直接对流换热；添加隔热层后，结合式(3)，围岩传热热阻变大，且风流不与壁面接触，原壁面温度升高。添加隔热层后，原围岩壁面温度均超过 30 ℃，材料-空气协同隔热时最高温度为 32.67 ℃，空气-材料协同隔热时为 31.72 ℃，相差 2.91%。径向 0～3 m 范围内，空气-材料协同隔热时原壁面温度更低，因此，围岩温度变化幅度更大；径向 6～40 m 范围内，相同隔热顺序下，两隔热层厚度均为 3 cm、6 cm、9 cm 时径向同一位置围岩温度变化幅度小。依据围岩原温的 99% 为围岩调热圈半径的边界，材料-空气协同隔热巷道调热圈半径随隔热层厚度增加依次为 25.86 m、25.48 m、25.32 m、25.01 m、24.56 m、24.41 m，降低了 1.47%、2.08%、3.29%、5.03%、5.61%；空气-材料协同隔热巷道调热圈半径依次为：26.02 m、25.62 m、25.58 m、25.25 m、24.82 m、24.63 m，降低了 1.54%、1.69%、2.96%、4.03%、5.34%。因此，两隔热层厚度均相同时，材料-空气协同隔热巷道原壁面温度更高，调热圈半径更小，隔热效果更好。

3.3 隔热层厚度对隔热效果影响

为了进一步分析两隔热层厚度对隔热效果的影响，材料-空气协同隔热顺序下，设置隔热材料厚度为 3 cm、6 cm、9 cm、12 cm、15 cm、18 cm；设置空气夹层厚度为 3 cm、6 cm、9 cm、12 cm、15 cm、18 cm，共计 36 种组合。风流温度 26 ℃，风速 1 m/s，通风至换热稳定，不同隔热层厚度下进风巷 1 500 m 处截面围岩温度场分布如图 13 所示。

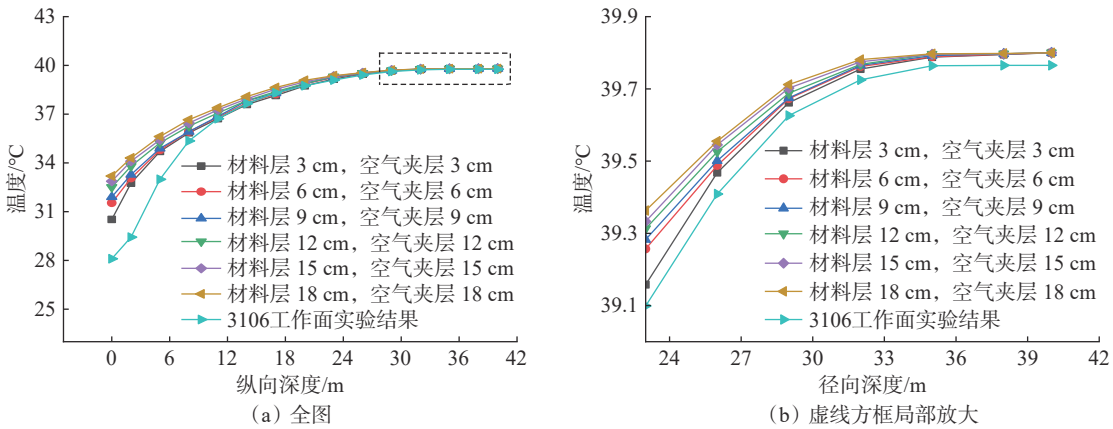
由图 13 可知，未添加隔热层时，巷道中心低温区域面积最小，巷道壁面四周均有明显换热现象；空气夹层厚度为 6 cm 时，材料层厚度增加对隔热效果影响小；材料层厚度为 12 cm 时，空气夹层厚度增加，巷道中心低温区域面积变大；材料层厚度 12 cm，空气夹层厚度 18 cm 时，巷道上方换热区域减少；材料层厚度增加到 18 cm 时，巷道下方换热区域较少。结合式(4)，这是由于巷道底部无隔热层，传热热阻较



(a) 隔热层 6 cm，材料-空气协同隔热　(b) 隔热层 6 cm，空气-材料协同隔热　(c) 隔热层 12 cm，材料-空气协同隔热　(d) 隔热层 12 cm，空气-材料协同隔热

图 10 不同隔热顺序下围岩温度场分布

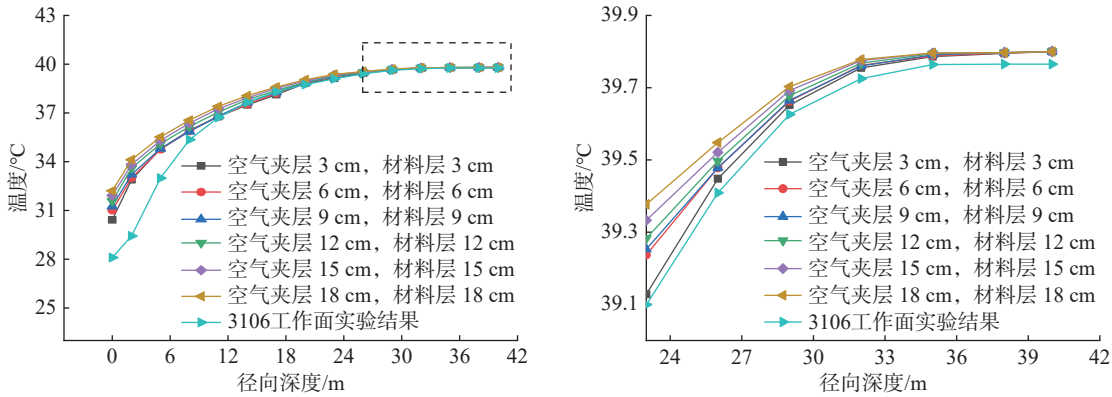
Fig. 10 Temperature field distribution of surrounding rock under different heat insulation sequences



(a) 全图　(b) 虚线方框局部放大

图 11 材料-空气协同隔热时围岩径向随温度变化

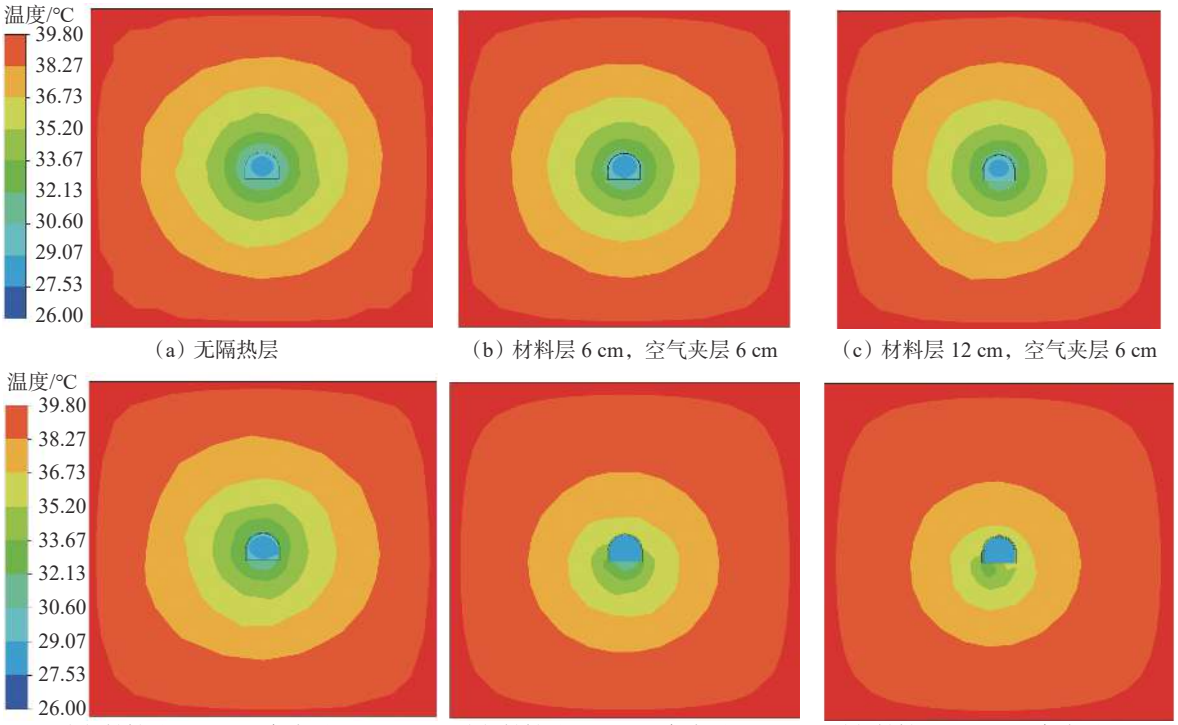
Fig. 11 Radial temperature variation of surrounding rock during material-air collaborative heat insulation



（a）全图　　（b）虚线方框局部放大

图 12　空气-材料协同隔热时围岩径向随温度变化

Fig. 12　Radial temperature variation of surrounding rock during air-material collaborative heat insulation



（a）无隔热层　（b）材料层 6 cm，空气夹层 6 cm　（c）材料层 12 cm，空气夹层 6 cm

（d）材料层 12 cm，空气夹层 12 cm　（e）材料层 12 cm，空气夹层 18 cm　（f）材料层 18 cm，空气夹层 18 cm

图 13　不同隔热层厚度下围岩温度场分布

Fig. 13　Distribution of surrounding rock temperature field under different thickness of thermal insulation layer

左、右及上方更小，围岩从巷道底部向巷道传热。

材料-空气协同隔热时隔热层厚度与原巷道壁面温度关系曲线如图 14 和图 15 所示。由图 14 和图 15 可知，材料层厚度一定，空气夹层厚度由 3 cm 增加至 6 cm 时，原巷道壁面温度显著升高；厚度由 6 cm 增加至 12 cm 时，温度上升趋势变缓；而厚度由 12 cm 增加至 18 cm 时，曲线相对平缓，此时空气夹层厚度对隔热效果影响减小。空气夹层厚度一定时，材料层厚度由 3 cm 增加至 9 cm 时，曲线上升趋势较平缓；厚度由 9 cm 增加至 18 cm 时，温度明显升高，且材料层厚度增加，空气夹层厚度为 12 cm、15 cm、18 cm 三曲线之间差值无明显变化。这是由于夹层两侧温差导致空气夹层内空气自然对流，材料层厚度增加，温差减小，且空气夹层厚度增加，隔热效果降低。

3.4　隔热层厚度对对流换热系数影响

添加隔热层后，围岩通过热传导将热量传递给隔热层，而风流与隔热层间通过对流换热，即隔热后风流与围岩换热本质仍是对流换热。对流换热系数使用式(2)计算。材料-空气协同隔热时，不同隔热层厚度下对流换热系数如图 16 和图 17 所示。由图 16 可知，反应材料层厚度一定时，对流换热系数受

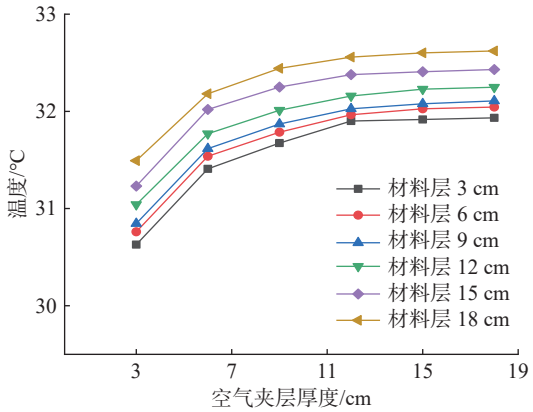


图 14　空气夹层厚度对原巷道壁面温度影响

Fig. 14　Effect of air layer thickness on original laneway wall temperature

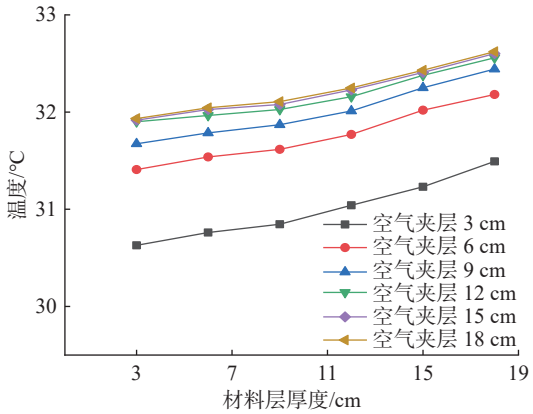


图 15　材料层厚度对原巷道壁面温度影响

Fig. 15　Effect of material layer thickness on original laneway wall temperature

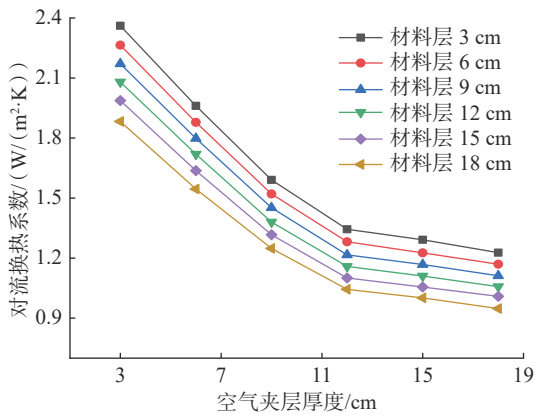


图 16　空气夹层厚度对对流换热系数影响

Fig. 16　Effect of air layer thickness on convective heat transfer coefficient

12 cm 厚度以内的空气夹层影响大；空气夹层厚度继续增大，对流换热系数降低幅度减小。由图 17 可知，空气夹层厚度为 3 cm 时，对流换热系数随材料层厚度增加减少的幅度越大，且空气夹层厚度越大，减少幅度越小。这是因为初始风速、风温不变，质量流量

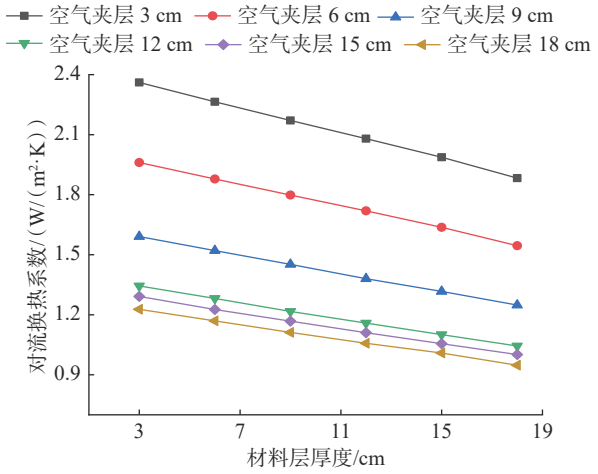


图 17　材料层厚度对对流换热系数影响

Fig. 17　Effect of material layer thickness on convective heat transfer coefficient

及换热面积受隔热层厚度影响小，隔热后壁面温度、风流出口温度及风流平均温度因不同厚度隔热层而改变，进一步影响对流换热系数的大小。

4　结　论

1）围岩钻孔实验得出了围岩在径向上的温度变化规律，径向深度 0～6 m 内围岩受对流换热影响温度变化显著，但径向深度越大，对流换热对围岩温度影响逐渐越小，温度升高趋势逐渐变缓，两者关系符合 ExpAssoc 模型，相关系数 R^2 为 0.991 06。

2）相同厚度膨胀玻化微珠水泥隔热材料与空气夹层协同隔热后，材料-空气协同隔热下。原壁面温度更高，调热圈半径更小，隔热效果更好。

3）材料-空气协同隔热下，空气夹层厚度在 12 cm 内对隔热效果影响更大，材料层厚度在 6～18 cm 内对隔热效果影响更大。

4）材料-空气协同隔热下，空气夹层厚度在 12 cm 内对对流换热系数影响较大，材料层厚度对对流换热系数影响较小，其大小与隔热层厚度呈反比。

参考文献（References）：

[1] 谢和平，周宏伟，薛东杰，等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报，2012，37(4)：535-542.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.

[2] LOWNDES I S, CROSSLEY A J, YANG Z Y. The ventilation and climate modelling of rapid development tunnel drivages[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(2): 139-150.

[3] ROY T R, SINGH B. Computer simulation of transient climatic conditions in underground airways[J]. Mining Science and Technology, 1991, 13(3): 395-402.

[4] 吴强，秦跃平，郭亮，等. 掘进工作面围岩散热的有限元计算

[J]. 中国安全科学学报, 2002, 12(6): 33-36.
WU Qiang, QIN Yueping, GUO Liang, et al. Calculation of the heat emitting from the wall rock at drifting face with finite element method[J]. China Safety Science Journal, 2002, 12(6): 33-36.

[5] 姬建虎, 廖强, 胡千庭, 等. 掘进工作面冲击射流换热特性[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 554-560.
JI Jianhu, LIAO Qiang, HU Qianting, et al. Characteristics of jet flow heat transfer in heading face[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 554-560.

[6] 姬建虎, 廖强, 胡千庭, 等. 热害矿井掘进工作面换热特性[J]. 煤炭学报, 2014, 39(4): 692-698.
JI Jianhu, LIAO Qiang, HU Qianting, et al. Heat transfer characteristics of driving face in heat harm mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 692-698.

[7] 秦跃平, 宋怀涛, 吴建松, 等. 周期性边界下围岩温度场有限体积法分析[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1541-1549.
QIN Yueping, SONG Huaitao, WU Jiansong, et al. Numerical analysis of temperature field of surrounding rock under periodic boundary using Finite Volume Method[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1541-1549.

[8] 杨万鑫. 封闭空气夹层对巷道围岩与风流传热的影响研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2021.

[9] 李文菁, 邹声华, 杨万鑫, 等. 水平同心环自然对流换热和隔热特性[J]. 矿业工程研究, 2021, 36(4): 53-59.
LI Wenjing, ZOU Shenghua, YANG Wanxin, et al. The simulation study of natural convection heat insulation in concentric horizontal cylindrical annuli[J]. Mineral Engineering Research, 2021, 36(4): 53-59.

[10] 李文菁, 邹声华, 杨万鑫, 等. 空气隔热夹层围岩温度场数值计算及试验分析[J]. 应用力学学报, 2022, 39(2): 394-402.
LI Wenjing, ZOU Shenghua, YANG Wanxin, et al. Simulation and experimental analysis for temperature field of roadway surrounding rock with air layer thermal insulation[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2022, 39(2): 394-402.

[11] 张源. 高地温巷道围岩非稳态温度场及隔热降温机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.

[12] 薛韩玲, 郭佩奇, 彭俊杰, 等. 高地温掘进巷水玻璃膨胀蛭石隔热围岩传热与降温特性[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(6): 997-1005.
XUE Hanling, GUO Peiqi, PENG Junjie, et al. Characteristics of airflow temperature decline and heat transfer from surrounding rock of digging tunnel insulated by waterglass/expanded vermiculite in high temperature mine[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(6): 997-1005.

[13] 张一夫, 谢倩楠, 董子文, 等. 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, 2021, 21(6): 2595-2601.
ZHANG Yifu, XIE Qiannan, DONG Ziwen, et al. Study on the influence of roadway cross-section shape on heat dissipation of surrounding rock[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2595-2601.

[14] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出社, 2006.

[15] 李文菁, 邹声华, 杨万鑫, 等. 高温围岩封闭空气夹层隔热的理论与数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1723-1732.
LI Wenjing, ZOU Shenghua, YANG Wanxin, et al. Theoretical and numerical analysis of enclosure air layer thermal insulation in high temperature tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1723-1732.

[16] 崔亦飞, 曹云乾. 简易热电偶制作原理与标定[J]. 仪器仪表学报, 1994, 15(2): 187-189.
CUI Yifei, CAO Yunqian. Principles and calibration of simple thermocouples[J]. Chinese Journal of Science Instrument, 1994, 15(2): 187-189.

[17] 张晓雷. 矿井隔热材料的研制及其性能的试验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2012.