

# 治理矿井热害的复合隔热材料及其应用

刘立民<sup>1,2,3</sup>, 张进鹏<sup>1,2</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建  
国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590; 3. 泰安方舟矿业科技有限公司, 山东 泰安 271026)

**摘要:**针对深井热害问题,分析复合材料的隔热机理,介绍了冒泡复合隔热材料。通过原材料不同配比进行实验,结合实验室圆管法测量绝热材料热导率装置,确定原材料的最佳配比,记录最佳配比材料的主要性能指标;利用巷道隔热结构放热量理论,推导出巷道采用冒泡复合隔热材料与不含冒泡复合隔热材料时,围岩向巷道内释放热量的差值计算公式。结合霄云煤矿1307综采工作面热害现状,运用围岩向巷道内释放热量的差值计算式,得出采用冒泡复合隔热材料后,巷道出口气流温度降低4.956℃;运用数值模拟软件对附加复合材料的巷道与不含复合材料的巷道进行模拟对比分析,得出采用复合材料的巷道出口气流温度比不含复合材料的约低5℃;通过应用现场巷道空气温度测量,得出添加复合材料后,巷道出口气流温度平均降低4.9℃。结果表明:该复合隔热材料能够有效减少围岩放热,降低巷道内的气流温度。

**关键词:**矿井热害;冒泡复合隔热材料;性能分析;隔热结构;数值模拟;现场测量

中图分类号: TD727

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2017)01-0046-08

## Thermal Insulation Composite Material for Governance of Underground Thermal Hazard and Its Application

LIU Limin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Jinpeng<sup>1,2</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;  
2. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry  
of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;  
3. Tai'an Fangzhou Mining Technology Co. Ltd, Taian, Shandong 271026, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of underground thermal hazard in deep wells, the thermal insulation mechanism of composite materials was analyzed, and a bubble composite thermal insulation material was proposed. By experimenting with different proportions of raw materials and measuring the thermal conductivity of insulation materials with laboratory tube method, the best ratio of raw materials was determined and the main performance indexes of the best proportion materials were recorded. By using the heat release theory of the roadway insulation structure, the difference calculation formula was deduced when the roadway adopted the bubble composite thermal insulation material and the non-bubbling composite thermal insulation material. By combining the heat damage on mechanized coal mining face 1307 in Yunxiao Coal Mine and by using the heat release difference calculation formula, it was deduced that the outlet airflow temperature of the roadway was reduced by 4.956 °C after the bubble composite thermal insulation

收稿日期: 2016-07-11

作者简介: 刘立民(1962—), 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 主要从事软岩巷道支护、开采沉陷、三下开采等方面的研究工作。

E-mail: lmluhhu@163.com

张进鹏(1992—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事矿山压力与岩层控制研究, 本文通信作者。

E-mail: 2280840483@qq.com

material was adopted. By simulating and analyzing the roadway with additional composite material and roadway without composite material with the help of numerical simulation softwares, it was found that the outlet airflow temperature of roadway with composite materials was 5 °C lower than that without composite materials. Through field measurement of the roadway temperature, it was found that the outlet airflow temperature was reduced by 4.9 °C on average compared with that of the roadway before the composite materials were added. The results show that the composite thermal insulation material can effectively reduce the heat release of the surrounding rock and reduce the air temperature inside the roadway.

**Key words:** underground thermal pollution; bubble thermal insulation composite material; performance analysis; heat insulation structure; numerical simulation; field measurement

隔热材料在建筑技术和航天工业方面的研究和应用已经非常广泛。近几年,王飞等<sup>[1]</sup>提出将 SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料应用在建筑节能技术中的设想,构建了全部由 SiO<sub>2</sub> 气凝胶材料替代当前保温隔热材料在建筑节能中的应用体系;陈艳林等<sup>[2]</sup>对各种保温材料的优缺点进行对比分析,详细阐述了我国保温隔热墙体材料的应用现状;徐士亮等<sup>[3]</sup>研究了向 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维中掺杂 ZrO<sub>2</sub> 纤维和六钛酸钾晶须,制备出兼具高强度和低热导率的纤维隔热材料;张世超等<sup>[4]</sup>对纳米氧化硅隔热材料样品在不同温度下的导热系数进行测量,并结合材料内部孔洞结构的变化规律得出纳米氧化硅隔热材料的最佳成型压力;李德富等<sup>[5]</sup>评述了多层隔热材料传热特性和空间环境适应性的研究状况,总结了相关研究方法、热分析模型与研究得出的基本认识。

随着矿井开采深度不断加大,矿井热害问题越来越严重。若将隔热新材料应用于受热害影响的矿井,通过在巷道壁面附加隔热材料,隔离巷道深度热源、阻止围岩放热,则可以达到预期降温效果,节约降温成本。矿井隔热材料降温法即是通过在巷道周围添加低热导率复合材料,阻止巷道围岩热量向巷道内部释放的一种方法。

为探寻理想的低热导率复合隔热材料,以膨胀珍珠岩为主要材料,通过实验研究添加剂等配料的最佳配比,提出冒泡复合隔热材料。冒泡复合隔热材料即是在原材料中加入添加剂后产生气泡,大量气泡堆积形成隔热层,起到良好的隔热效果的一种材料。该材料在矿井热害治理中起到良好的效果,节省了降温成本,补充了现有矿井理想隔热材料的不足。

## 1 冒泡复合隔热材料

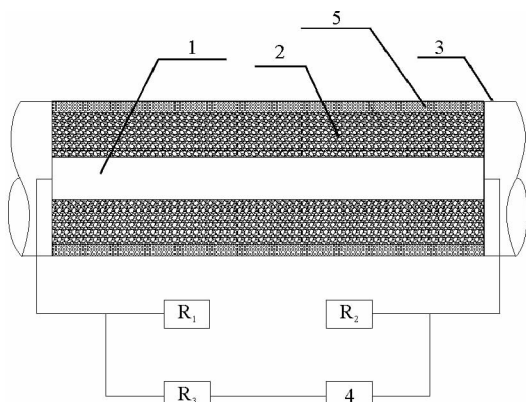
### 1.1 原材料选取

因膨胀珍珠岩导热系数低,选取膨胀珍珠岩为主要材料;因为生石灰和水泥在水化作用下具有胶结作用,选取生石灰和水泥为原材料;选取价格便宜、抗渗能力强的粉煤灰代替部分水泥;选取石膏可以延缓浆料稠化和生石灰消解速率,且便于施工;选取质轻、漂浮力高,对光和热的反射性能较好的铝粉,提升材料的隔热能力,同时可以作为引气剂,使材料产生较多封闭的小孔,有利于提高材料的抗渗作用。

### 1.2 原材料的配比实验

为研究原材料的最佳配合比,首先假设材料间的多组不同配比,制成各种材料,通过实验测定不同配比下复合材料的导热系数、抗压强度、抗折强度以及软化系数等各项性能。实验选用堆积密度为 100 kg/m<sup>3</sup>、导热系数为 0.036 W/(m·°C)的膨胀珍珠岩,生石灰和水泥(P. O 42.5),普通粉煤灰、石膏、铝粉。原材料经加工制备、配料搅拌、浇注成型、坯体静置及养护等制作工艺,按不同配比制成复合材料。

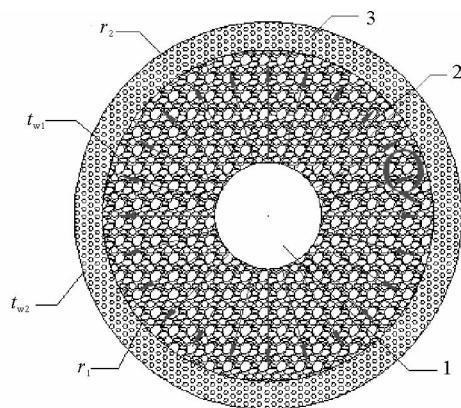
对制成的样品进行性能测试,包括导热系数、抗压强度、密度等主要技术指标,其中抗压强度、密度等可以直接测出。研究表明,井下任何一种巷道的围岩温度场受风流的影响仅在靠近巷道壁面的小段距离,超过一定距离,可以认为围岩温度场是以巷道为中心的同心圆,由此可通过实验室圆管法<sup>[6-7]</sup>测量绝热材料热导率装置,截面如图 1~2 所示,对不同配比得到的材料进行隔热效果测试。



1—主加热管; 2—煤或者砂岩; 3—防护管; 4—直流稳压电源; 5—绝热材料; R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>—标准电阻

图 1 主测管纵向截面图

Fig. 1 Longitudinal section of main test tube



1—主加热管; 2—煤或者砂岩; 3—绝热材料; r<sub>1</sub>—选定的衡量半径; r<sub>2</sub>—测定管半径; t<sub>w1</sub>—衡量半径温度; t<sub>w2</sub>—测定管边界温度

图 2 主测管横截面图

Fig. 2 Cross section of main test tube

为了减少由于端部热损失产生的非一维效应,根据实验室圆管法的要求,在测试段两端设置辅助加热器,使辅助加热管与主加热管的温度保持一致,保证主加热管径向温度梯度的大小在允许误差范围内,从而使测量段具有良好的—维温度场特性,主加热管的导热量为  $Q$ ; 并根据傅里叶定律,在一维、径向、稳态导热的条件下,材料的导热系数

$$\lambda = \frac{Q \ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l (t_{w1} - t_{w2})} \quad (1)$$

式中:  $\lambda$ —材料的导热系数,  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $l$ —主加热管长度,  $m$ ;  $Q$ —稳态时主加热管导热热量,  $W$ 。

对按照不同配比要求制成的样品经过多次试验测试,研究分析所得试验数据,选出最符合巷道环境要求的配比,确定复合材料的最佳配比值,并记录最佳配比复合材料的主要性能指标。该冒泡复合材料的最佳配合比见表 1。最佳配比冒泡复合材料的主要性能指标见表 2。

表 1 冒泡复合材料配合比

Tab. 1 Proportion of bubble composite materials

材料名称	冒泡材料	生石灰	粉煤灰	水泥	石膏	铝粉等	水
用量/(kg/m <sup>3</sup> )	160	75	75	20	10	0.5	360

## 2 巷道隔热结构放热量计算

巷道围岩与风流之间的热量传递,受到诸多因素的影响,其中风流量、风速及其温度以及岩石特性影响较大。井巷围岩放热(或吸热)量,在工程上可以按下式计算

$$Q_{gu} = k_r UL (t_{gu} - t_B) \quad (2)$$

式中:  $Q_{gu}$ —井巷围岩传热量,  $W$ ;  $k_r$ —围岩与风流间的不稳定换热系数;  $U$ —巷道截面周长,  $m$ ;  $L$ —井巷长度,  $m$ ;  $t_{gu}$ —井巷围岩的平均原始温度,  $^\circ C$ ;  $t_B$ —井巷风流平均温度,  $^\circ C$ 。

根据试验分析可以推算进行隔热层施工的巷道与风流间的不稳定热交换系数为

$$k'_r = P \frac{\lambda'}{\lambda \delta} k_r \quad (3)$$

表 2 冒泡复合材料的主要性能指标

Tab. 2 Main performance indexes of bubble composite materials

试验项目	标准	实测结果
干表观密度/(kg/m <sup>3</sup> )	<500	408
导热系数/(W/(m·°C))	<0.12	0.0816
抗压强度(变形 10%)/MPa	>0.40	1.5
线收缩/%	<0.3	0.18
软化系数(14 天养护)	<0.5	0.2
压剪粘结强度/kPa	50	168
烧结性能级别	A 级	A 级
蓄热系数	>0.95	1.25

式中： $P$ —调整系数，根据不同实验、试验条件确定，通常取  $0.6 \sim 1.0$ ； $\delta$ —隔热层厚度， $m$ ； $\lambda'$ —隔热材料导热系数， $W/(m \cdot ^\circ C)$ ； $k'_r$ —隔热材料与风流间的不稳定换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

同理可以推断出复合材料施工后的巷道围岩通过隔热结构释放热量的计算式为

$$Q'_{gu} = k'_r UL (t'_{gu} - t_B) \quad (4)$$

式中： $Q'_{gu}$ —井巷围岩通过隔热结构后向巷道内释放的热量， $W$ ； $t'_{gu}$ —隔热层与围岩交界处岩体的初始温度， $^\circ C$ 。

基于以上分析，可以推导出在巷道是否采用由复合材料组成的隔热结构这两种情况下，围岩向巷道内释放热量的差值

$$\Delta Q_{gu} = Q_{gu} - Q'_{gu} = LU [k_r (t_{gu} - t_B) - k'_{gu} (t'_{gu} - t_B)] \quad (5)$$

从式(5)可以看出，针对上述两种情况，当巷道长度、截面、围岩原始温度以及巷道中风流温度为定值时，围岩向巷道内释放热量的差值主要取决于复合材料的性能参数，材料的隔热效果越好，相应释放热量的差值就越大，巷道内风流温度的增幅越小；式(5)是巷道进行隔热结构施工后围岩热量减排量的预测关系解析式，为巷道降温计算和设计热害治理方案提供理论基础。

### 3 复合材料的应用

霄云煤矿目前开采水平为  $-790 m$ ，主要开采工作面是  $1307$  综采工作面，主要准备巷道是  $1306$  轨道顺槽及胶带顺槽。通过现场矿井地温测定，得知该井田的平均地温梯度约为  $2.78 ^\circ C/hm$ ，井下工人处于二级热害的作业环境。矿井的最主要热源是围岩放热，采取对主要进风巷道壁覆合隔热材料施工的降温措施。

#### 3.1 参数和方案

巷道入口处风流温度的初始值  $25 ^\circ C$ ，风速  $5 m/s$ ，风量为  $47.5 m^3/s$ 。根据霄云矿井地质统计历史资料可知：岩体的导热系数为  $3.044 W/(m \cdot ^\circ C)$ ，密度为  $2580 kg/m^3$ ，比热容为  $976 J/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，围岩的原始温度  $\geq 45 ^\circ C$ ，取  $60 ^\circ C$ ；锚喷支护混凝土厚度为  $200 mm$ ，导热系数为  $1.74 W/(m \cdot ^\circ C)$ ，密度为  $2400 kg/m^3$ ，比热容为  $2418 J/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ；巷道内风流与巷道壁面的对流系数为  $12.5 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。隔热材料结构层厚度  $100 mm$ ，导热系数为  $0.0816 W/(m \cdot ^\circ C)$ ，干表观密度为  $408 kg/m^3$ ，比热容为  $1250 J/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ，巷道与风流间的不稳定热交换系数为  $1.5 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。由材料的主要性能指标可知，冒泡复合隔热材料导热系数为  $0.0816 W/(m \cdot ^\circ C)$ ，假定巷道周围岩体及隔热结构的物理性质各向同性，巷道为半圆拱形状，净宽  $3 m$ ，净高  $2 m$ ，圆拱半径  $1.5 m$ ，长度  $100 m$ 。针对采用该隔热材料和不采用该隔热材料的情况，建立三维模型，巷道截面布局如图 3~4 所示。

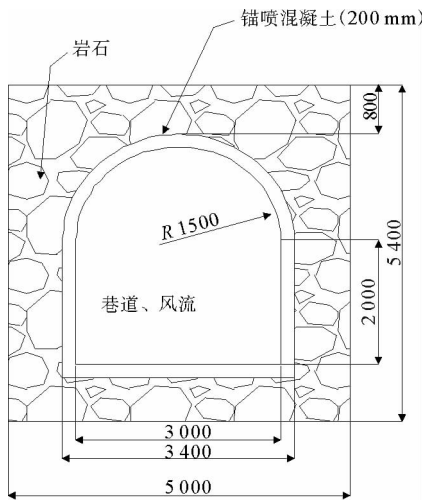


图 3 不含隔热结构的巷道模型

Fig. 4 Model of roadway without heat insulation structure

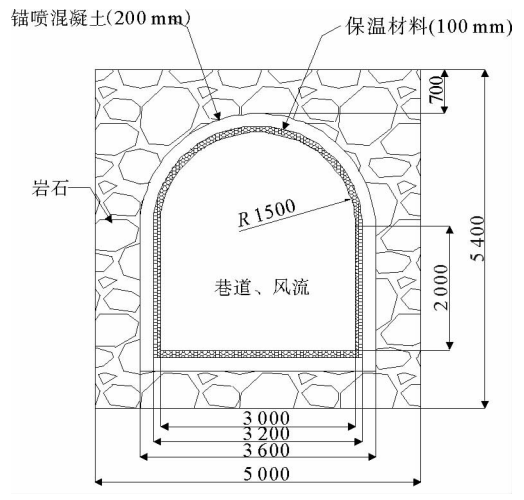


图 4 含有隔热结构的巷道模型

Fig. 5 Model of roadway with heat insulation structure

### 3.2 理论计算方法

针对该设计方案,运用理论公式(5),其中:巷道长度  $L$ 、巷道截面周长  $U$ 、围岩与风流间的不稳定热交换系数  $k_{\tau}$ 、原岩温度  $t_{\text{岩}}$  和风流温度  $t_{\text{B}}$  已知,隔热材料与风流间的不稳定换热系数  $k'_{\tau}$  可由式(3)求得,隔热层与围岩交界处岩体的初始温度  $t'_{\text{岩}}$  由巷道壁钻孔后测温仪实测为  $26.5^{\circ}\text{C}$ 。通过计算得出:  $\Delta Q_{\text{岩}} = 60.913 \text{ kJ}$ 。由温度与热量之间的转化公式,计算出流过巷道的空气温度相对降低  $\Delta T = 4.956^{\circ}\text{C}$ 。采用冒泡复合隔热材料的巷道,风流通过流出时的温度比不采用复合材料的巷道流出的风流温度低  $4.956^{\circ}\text{C}$ ,该材料可以有效减少巷道围岩散出的热量,降低通过巷道流向工作面风流的温度。

### 3.3 数值模拟分析

从主要进风巷道选取一段 100 m 的巷道,使用 ANSYS Fluent 软件对巷道风流温度场进行数值模拟分析。假定巷道是三维物理模型,选取巷道在  $z=20 \text{ m}$ 、 $z=40 \text{ m}$ 、 $z=60 \text{ m}$ 、 $z=80 \text{ m}$ 、 $z=100 \text{ m}$  时进行分析。由于篇幅限制,横截面上只展示  $z=20 \text{ m}$  和  $z=100 \text{ m}$  时的温度分布云图,模拟结果如图 5~7 所示。

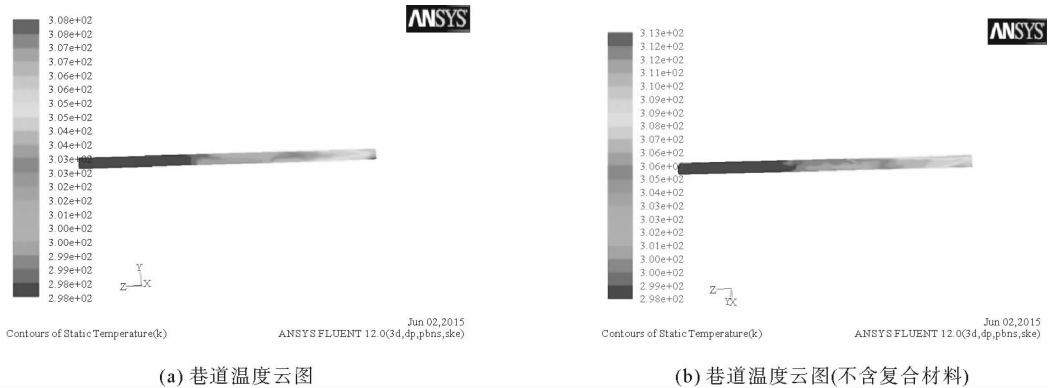


图 5 巷道全长温度云图

Fig. 5 Temperature cloud of the roadway

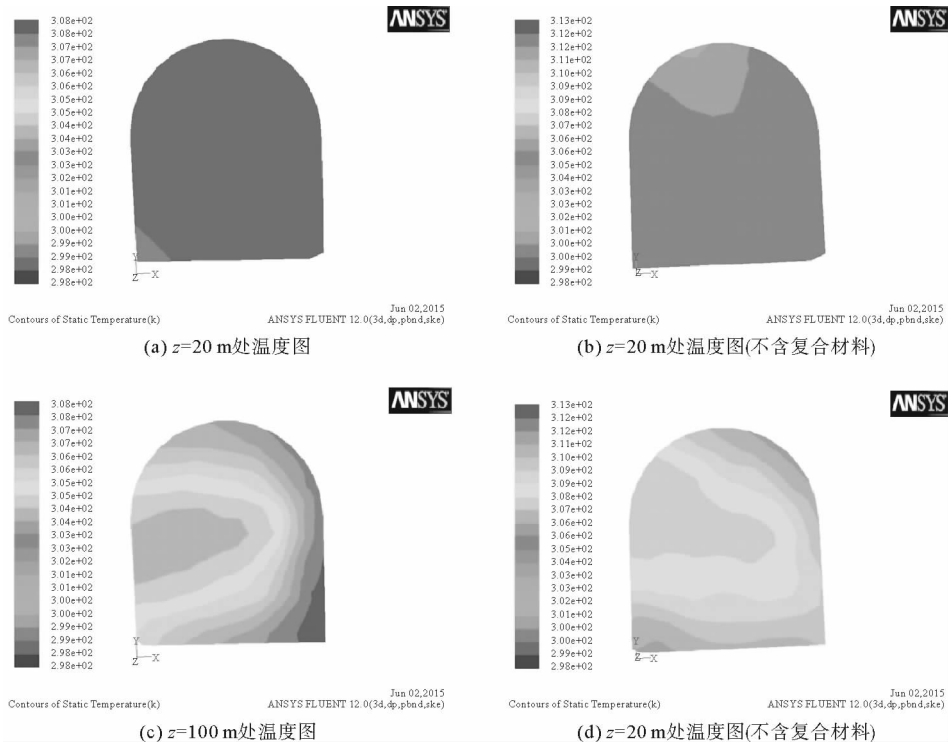


图 6 巷道在横截面上的温度云分布图

Fig. 6 Temperature cloud distribution in the cross section of roadway



由图 5(a)~(b)可知,在巷道入口附近,风流吸收少量热量,温度增幅不大;在巷道出口附近,风流吸收围岩释放的大量热量,温度增幅较大,巷道采用无隔热结构的风流温度增幅远大于巷道采用隔热结构的风流温度增幅。由图 6(a)、(c)可以看出,风流经过附加复合材料隔热层的 100 m 巷道时,温度上升 10℃左右;从图 6(b)、(d)可以看出,风流经过没有附加复合材料隔热层的 100 m 巷道时,温度上升 15℃左右,两者相差 5℃左右。

由图 7 看出,巷道横截面风流的平均温度沿着巷道长度方向变化微小,风流吸热温度升高;附加复合材料的巷道与不含复合材料的巷道对比,风流经过局部高温巷道温度增加幅度大小不等,且两者温度差有逐渐增大的趋势。可见,巷道附加发泡复合隔热材料能够有效减少围岩放热,降低巷道出口处风流温度。

## 4 现场应用

### 4.1 工艺流程

原材料按最佳配比经过加工制备、配料搅拌、浇注成型、坯体静置及养护等制作工艺,制成复合材料,如图 8 所示。

针对霄云矿井目前尚未开挖或已在使用的局部高温巷道,进行复合隔热材料施工措施主要有:

- 1) 对于新开挖成型后的高温巷道,首先在巷道壁面喷射第一遍混凝土,平整巷道壁面;然后钻孔并安装锚杆进行支护,使用高强度的锚杆(锚杆  $\phi=25$  mm,HRB335 级,屈服载荷 165 kN,每根长 2 m,间距 750 mm)、螺母以及托盘,控制围岩变形、维持岩层稳定;接着喷射第二遍混凝土,两次喷射混凝土厚度控制在 200 mm 内,待混凝土硬化一定程度后,采用传统混凝土喷浆工艺将膨胀珍珠岩复合材料喷射于锚喷混凝土表面。
- 2) 对于已经使用的局部高温巷道,首先对巷道壁面进行平整处理;然后采用传统混凝土喷浆工艺将膨胀珍珠岩复合材料喷射于锚喷混凝土表面。
- 3) 为保证隔热结构的强度及复合材料的隔热降温效果,针对霄云煤矿主要进风巷道进行复合材料施工,为延长复合材料的使用寿命,施工时在隔热层内表面喷涂一层 2 cm 厚的水泥砂浆。

### 4.2 效果观测

对已经使用的巷道进行添加复合隔热材料前后的巷道空气温度的测量,截取巷道长度为 100 m,巷道中每 10 m 选取一个测量点,从测量结果中选取 3 组有代表性的巷道进行分析,巷道编号为 1、2、3,测量数据如图 9 所示。

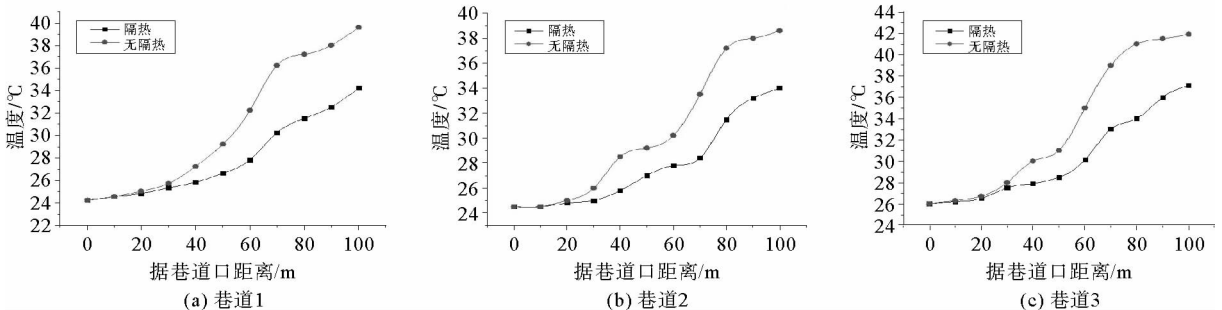


图 9 巷道温度测量结果对比图

Fig. 9 Roadway temperature measurement comparison

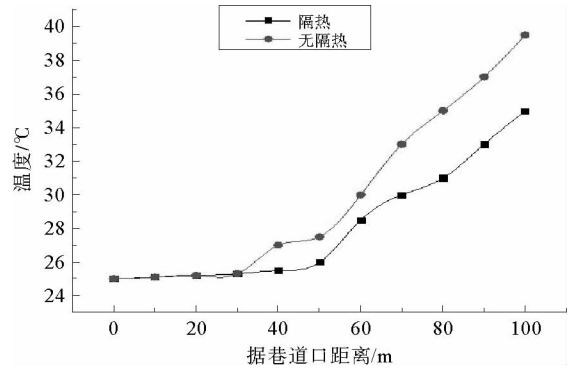


图 7 巷道截面平均温度沿 z 轴变化曲线图

Fig. 7 Changes of average temperature of roadway cross-section along z axis

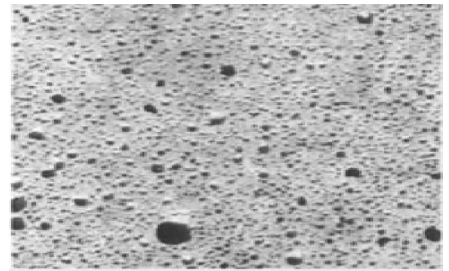


图 8 材料成型后的效果图

Fig. 8 Renderings of material after molding

由图9可知,距巷道入口30~40 m内,巷道添加隔热复合材料前与添加复合材料后空气温度相差不大;距巷道入口40~100 m内,巷道添加隔热复合材料前与添加复合材料后空气温度差值较大。由图9(a)可知,巷道1入口温度为24.2℃,添加隔热复合材料前巷道出口温度为39.6℃,添加隔热复合材料后巷道出口温度为34.2℃,两者差值为5.4℃;由图9(b)可知,巷道2入口温度为24.5℃,添加隔热复合材料前巷道出口温度为38.6℃,添加隔热复合材料后巷道出口温度为34.0℃,两者差值为4.6℃;由图9(c)可知,巷道3入口温度为26.0℃,添加隔热复合材料前巷道出口温度为41.9℃,添加隔热复合材料后巷道出口温度为37.1℃,两者差值为4.8℃。

在上述模拟中,巷道添加复合隔热材料与不添加复合隔热材料相比,出口温度约降低5℃。实际应用中,选取三个巷道,比较添加复合隔热材料前后温度变化情况,变化值分别为5.4、4.6和4.8℃,平均4.9℃,与模拟结果接近,说明该复合隔热材料在矿井热害治理中能够起到良好的效果。

## 5 结论

1) 提出采用冒泡复合隔热材料减少巷道围岩放热,通过实验确定了冒泡复合隔热材料的原材料最佳配比,记录了其主要性能指标。

2) 针对附加复合材料的巷道与不含复合材料的巷道,理论推导出两者围岩向巷道内释放热量的差值公式,结合矿井设计应用方案和参数,计算出附加冒泡复合隔热材料的巷道与不含复合材料围岩放热量的差值为60.913 kJ,相对应的巷道流出风流温度差值为4.956℃。

3) 结合矿井实例,运用数值模拟和现场温度测量的方法,分析出附加冒泡复合隔热材料的巷道出口风流温度比不含复合材料的巷道出口温度低约5℃,验证了冒泡复合隔热材料在巷道围岩放热治理中的显著效果。

### 参考文献:

- [1] 王飞, 刘朝辉, 叶圣天, 等. SiO<sub>2</sub> 气凝胶保温隔热材料在建筑节能技术中的应用[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 144-150.  
WANG Fei, LIU Chaohui, YE Shengtian, et al. Application of building energy-saving technology based on SiO<sub>2</sub> aerogel thermal insulation materials[J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 144-150.
- [2] 陈艳林, 尚珊珊, 严明, 等. 保温隔热墙体材料的研究现状[J]. 现代技术陶瓷, 2015, 149(3): 20-24.  
CHEN Yanlin, SHANG Shanshan, YAN Ming, et al. Research status of thermal insulation wall materials[J]. Advanced Ceramics, 2015, 149(3): 20-24.
- [3] 徐士亮, 王树明. 掺杂改性 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维隔热材料性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(增1): 462-465.  
XU Shiliang, WANG Shuming. Modification and performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fiber thermal insulation materials with addition[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1): 462-465.
- [4] 张世超, 陈玉峰, 孙浩然, 等. 成型压力对纳米氧化硅隔热材料孔结构的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(增1): 640-643.  
ZHANG Shichao, CHEN Yufeng, SUN Haoran, et al. Effect of forming pressure on pore structure of nano-porous SiO<sub>2</sub> insulation materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(S1): 640-643.
- [5] 李德富, 杨炜平, 刘小旭. 多层隔热材料传热特性研究现状及展望[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(3): 302-309.  
LI Defu, YANG Weiping, LIU Xiaoxu. Heat transfer characteristics of multilayer insulation materials[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(3): 302-309.
- [6] 中华人民共和国国家标准. GB/T 10296-1988, 绝热层稳态传热传递特性的测定——圆管法[S]
- [7] 纪玉超, 张双喜, 胡开永, 等. 圆管法导热系数测量的试验研究[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(3): 100-104.  
JI Yuchao, ZHANG Shuangxi, HU Kaiyong, et al. Experimental investigation on thermal conductivity measurement by tube-form method[J]. Journal of Qingdao Technological University, 2009, 30(3): 100-104.
- [8] 石小靖, 张瑞芳, 何松, 等. 玻璃纤维增韧 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合材料的制备及隔热性能[J]. 硅酸盐学报, 2016, 44(1): 129-135.  
SHI Xiaojing, ZHANG Ruifang, HE Song, et al. Synthesis and heat insulation performance of glass fiber reinforced SiO<sub>2</sub> aerogel composites[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016, 44(1): 129-135.
- [9] 杨冬晖, 李猛, 尚坤. 航天服隔热材料技术研究进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(2): 87-96.  
YANG Donghui, LI Meng, SHANG Kun. Development of thermal insulation materials technology for spacesuit[J]. Journal

of Aeronautical Materials, 2016, 4(2): 87-96.

- [10] 王少华, 邓承继, 张小军, 等. 镁橄榄石隔热材料孔体积分形维数特征[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(3): 351-357.  
WANG Shaohua, DENG Chengji, ZHANG Xiaojun, et al. Pore volume fractal dimension of magnesium olivine heat insulation materials[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(3): 351-357.
- [11] 刘志远, 王重君, 刘礼龙. 新型纳米级微孔隔热材料在炼钢生产中的应用[J]. 中国冶金, 2014, 24(3): 52-57.  
LIU Zhiyuan, WANG Chongjun, LIU Lilong. Application of new microporous thermal insulation materials in steel production[J]. China Metallurgy, 2014, 24(3): 52-57.
- [12] 钱晶晶, 冯军宗, 姜勇, 等. 刚帐篷夹芯隔热材料的研究进展[J]. 材料导报 A(综述篇), 2014, 28(2): 84-87.  
QIAN Jingjing, FENG Junzong, JIANG Yong, et al. Research progress of tent thermal insulation materials[J]. Materials Review A(Literature Review), 2014, 28(2): 84-87.
- [13] 刘学建, 陈永涛, 张付涛. 井下隔热阻水复合材料研究[J]. 煤炭工程, 2011(4): 82-83.  
LIU Xuejian, CHEN Yongtao, ZHANG Futao. Research on heat insulation and water proof complex material applied to underground mine[J]. Coal Engineering, 2011(4): 82-83.
- [14] 吴晓栋, 崔升, 王岭, 等. 耐高温气凝胶隔热材料的研究进展[J]. 材料导报, 2015, 29(5): 102-108.  
WU Xiaodong, CUI Sheng, WANG Ling, et al. Advance in research of high temperature resistant aerogel used as insulation material[J]. Materials Review, 2015, 29(5): 102-108.
- [15] 李世军, 肖仁辉, 靳涛. 几种隔热填料在水性涂料中的隔热性研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2014, 33(4): 33-36.  
LI Shijun, XIAO Renhui, JIN Tao. Heat insulation of several heating insulation fillers in latex paint[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 33(4): 33-36.

(责任编辑: 吕海亮)

## (上接第 45 页)

- [9] 王爵麟, 姜渭中, 周成浦. 高浓度胶结充填料管道水力输送[J]. 长沙矿山研究院季刊, 1981, 1(1): 10-23.  
WANG Juehe, JIANG Weizhong, ZHOU Chengpu. Hydraulic transport of high concentration and cemented filling pipe[J]. Quarterly of CIMR, 1981, 1(1): 10-23.
- [10] 刘同有, 金铭良, 周成浦. 中国镍矿金川高浓度充填料浆管道自溜输送新工艺[J]. 中国矿业, 1998, 71(1): 31-35.  
LIU Tongyou, JIN Mingliang, ZHOU Chengpu. A new pipeline flow transport technology for high-density slurry Jinchuan Corporation[J]. China Mining, 1998, 71(1): 31-35.
- [11] 王佩勋. 矿山充填料浆水力坡度计算[J]. 有色矿山, 2003, 23(1): 8-11.  
WANG Peixun. Hydraulic gradient calculation of mine filling paste[J]. Nonferrous Mines, 2003, 23(1): 8-11.
- [12] 武拴军, 辜大志, 张海军. 降低膏体料浆沿程阻力损失的试验研究[J]. 采矿技术, 2011, 11(4): 37-38.  
WU Shuanjun, GU Dazhi, ZHANG Haijun. Experimental study on reducing the loss of the material slurry along the path[J]. Mining Technology, 2011, 11(4): 37-38.
- [13] 张秀勇, 乔登攀. 金川二矿区胶结充填料浆可泵性影响因素分析[J]. 金属矿山, 2010(9): 34-37.  
ZHANG Xiuyong, QIAO Dengpan. Analysis of influencing factors on pump ability of cemented filling with in Jinchuan No. 2 mining area[J]. Metal Mine, 2010(9): 34-37.
- [14] 杨志强, 王永前, 高谦, 等. 泵送减水剂对尾砂-棒磨砂膏体料浆和易性与充填体强度影响研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 129-134.  
YANG Zhiqiang, WANG Yongqian, GAO Qian, et al. Research on pumping water reducing agent affecting on the strength of backfilling body and workability of paste slurry with tailing and rod grinding sand[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 129-134.
- [15] 张宗生. 金川矿山废石膏体配制与流变特性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008: 35-40.
- [16] 王晓宇, 乔登攀. 废石全尾砂高浓度充填料浆管输阻力影响因素分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2010, 62(4): 61-65.  
WANG Xiaoyu, QIAO Dengpan. Analysis of the influence of waste rock-full tailings high concentration filling on the resistance of slurry pipeline transport[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2010, 62(4): 61-65.
- [17] 王晓宇. 金川矿山废石-全尾砂高浓度充填料浆管输阻力模型研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 40-48.

(责任编辑: 吕海亮)