

# 自主课题结题汇报

---

## 高地温巷道喷注隔热材料隔热机理研究

汇报人：万志军 教授

煤炭资源与安全开采国家重点实验室

2015年12月 23日

# 汇报提纲

---

- 一、课题背景及目的意义
- 二、研究思路
- 三、主要研究内容
- 四、主要研究成果
- 五、课题展望

# 1、课题背景

- 我国东部煤矿正以100~250 m/10a的速度向深部发展，出现了一批千米深井。
- 当煤矿进入到1000-1500m的开采深度，预测围岩温度在39-45℃，处于II级热害区。
- 矿井热害问题不仅严重威胁井下工人的身心健康，而且严重影响矿井的生产效率和效益的提高。

省份	矿井	矿井深度/m	矿井气温/℃	岩温/℃	地温梯度/℃ hm <sup>-1</sup>
辽宁	老虎台	685~715	30~33	38~42	3.6~4.3
安徽	潘三矿	755~810	32~35	40~43	3.7~4.6
江苏	三河尖	740	33.6	37.5	2.92~3.43
...	...	...	...	...	...

课题背景意义

研究思路

研究内容

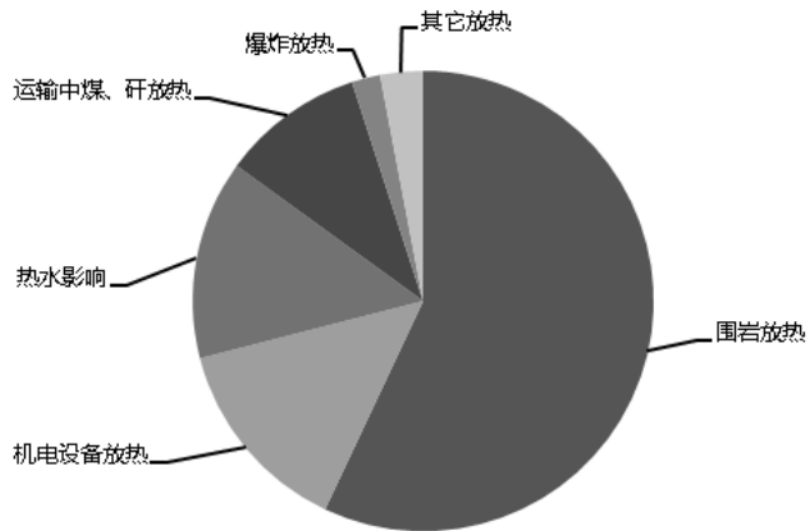
主要成果

课题展望

# 1、课题背景

## 高地温巷道井巷热源分析

- 井巷热源有**围岩散热**、机电设备散热、热水散热、压缩热、氧化热等。
- 根据井巷热害产生的根源将其分为**内生热源**（包括围岩散热、热水散热）和**外生热源**（包括机电设备散热、爆炸热等）。
- 影响井巷的主要热源为**围岩放热**（占**57%**以上）。



井巷热源放热比例图

课题背景意义

研究思路

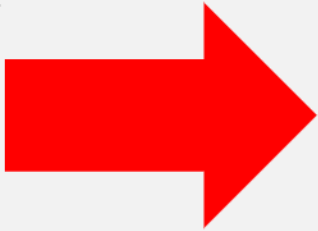
研究内容

主要成果

课题展望

# 1、课题背景

## □ 国内外主要的矿井降温方法：

被动降温法	<p>1、矿工<b>个体防护法</b> 比如：冷却背心、冷却帽</p> <p>2、制冷、制冰为主的<b>人工制冷降温法</b> 比如：空调降温</p>	<p>工人罹患关节炎等疾病</p> <p>投入大、能耗高、效率低</p>
主动降温法	<p>1、合理优化<b>开拓部署和通风系统降温</b></p> <p>2、巷道、管道、水沟等的隔热疏导</p>	<p>使用条件和效果有限</p> 

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

# 1、课题背景

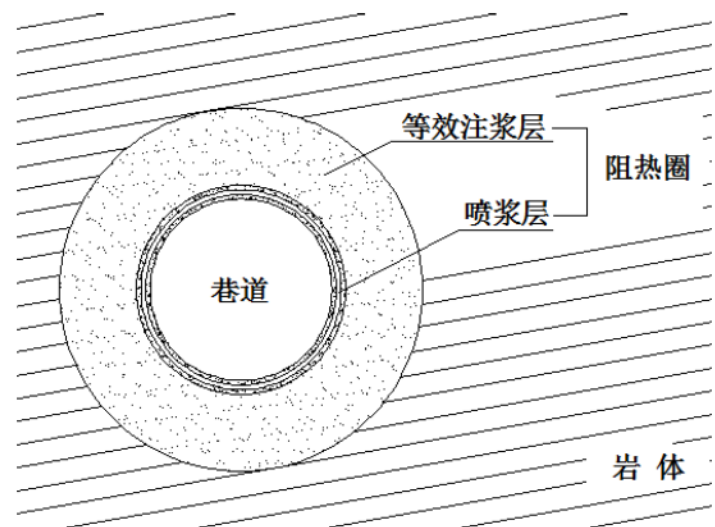
## 巷道隔热法：

- 属于主动降温法。
- 基本思想：通过向高地温巷道围岩喷注隔热材料，限制其围岩内部的热量向巷道风流中传输，辅以加强通风等措施及时带走热量，实现降温目的。
- 是一种从根源上着手的降温方法。

# 1、课题背景

## 巷道围岩“阻热圈”

- 与深部巷道支护技术结合。
- 巷道围岩喷、注隔热材料后形成的隔热结构称为**阻热圈**。
- 其中混凝土和隔热材料喷层称为**小阻热圈**，喷层和注浆范围内岩体合称为**大阻热圈**。



阻热圈结构示意图

- 体现以“防”为主的、主动的深部高地温巷道治理理念，既保证了巷道围岩的**稳定性**，又实现了巷道的**隔热降温**。

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

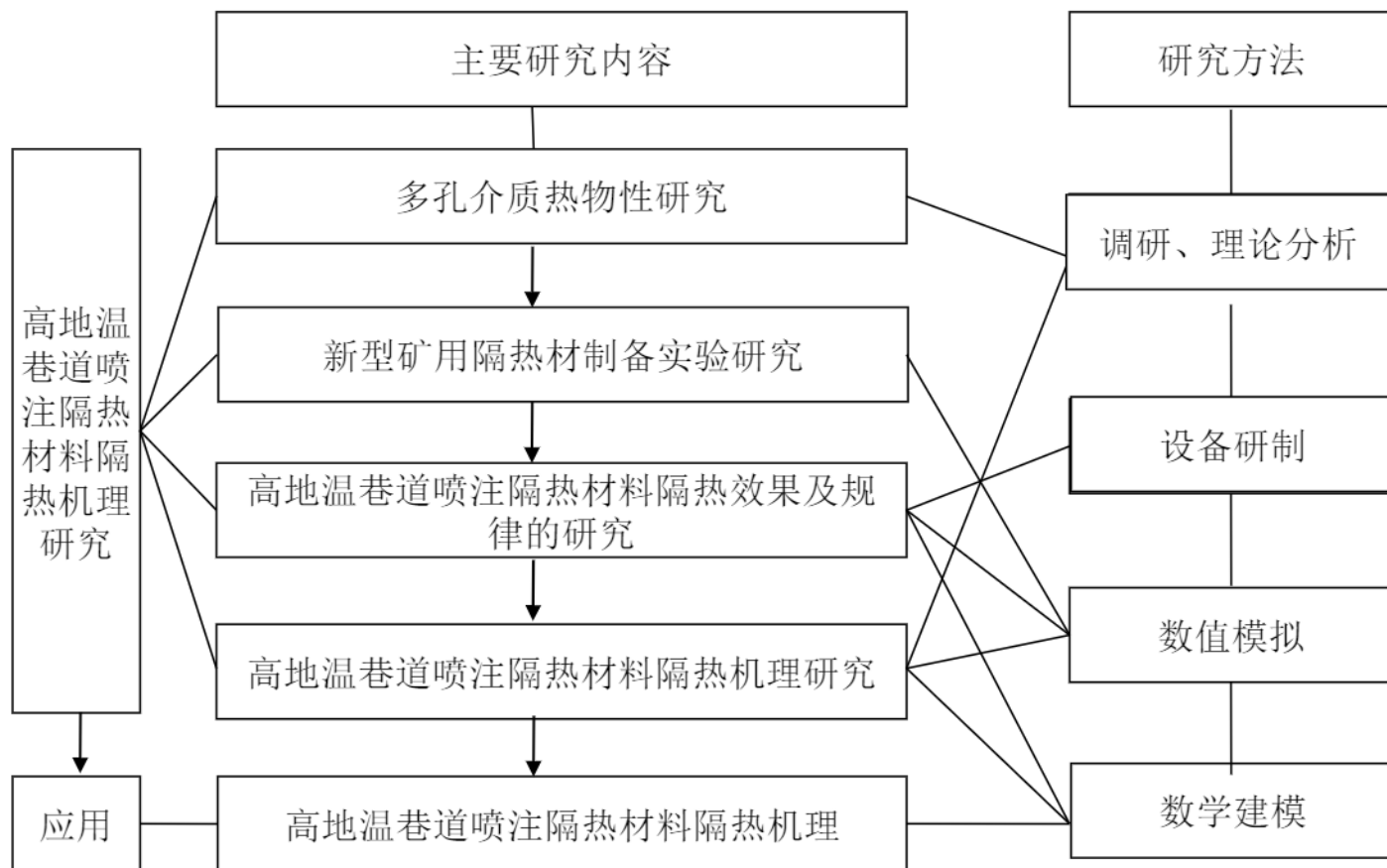
课题展望

## 2、课题研究目的及意义

- 课题研究目的：研制适合深部矿井的矿用**隔热材料及实验系统**，研究高地温巷道喷注隔热材料的**隔热降温机理**，为矿井围岩“阻热圈”隔热降温实践提供理论依据。



# 1、技术路线



课题背景意义

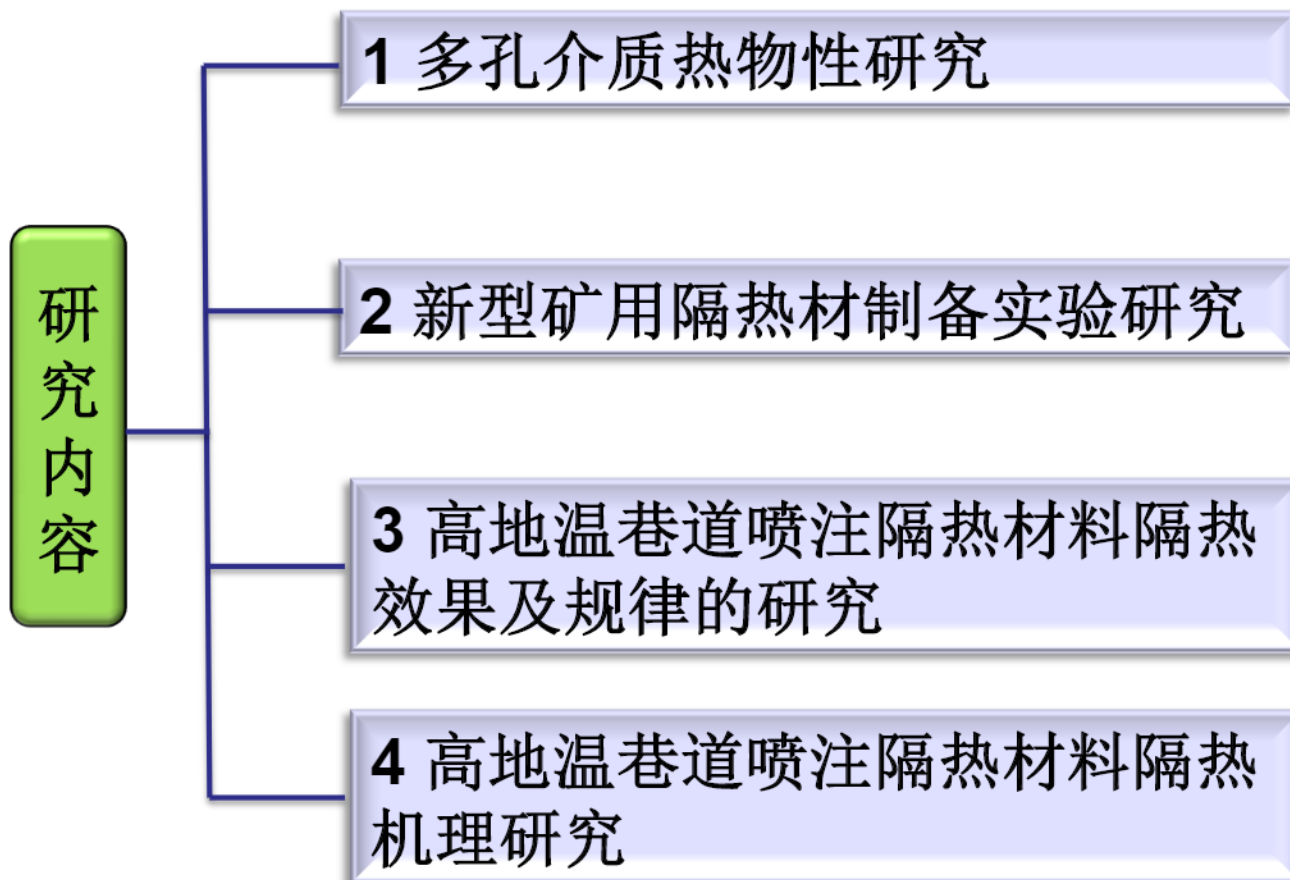
研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

# 1、主要研究内容



课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

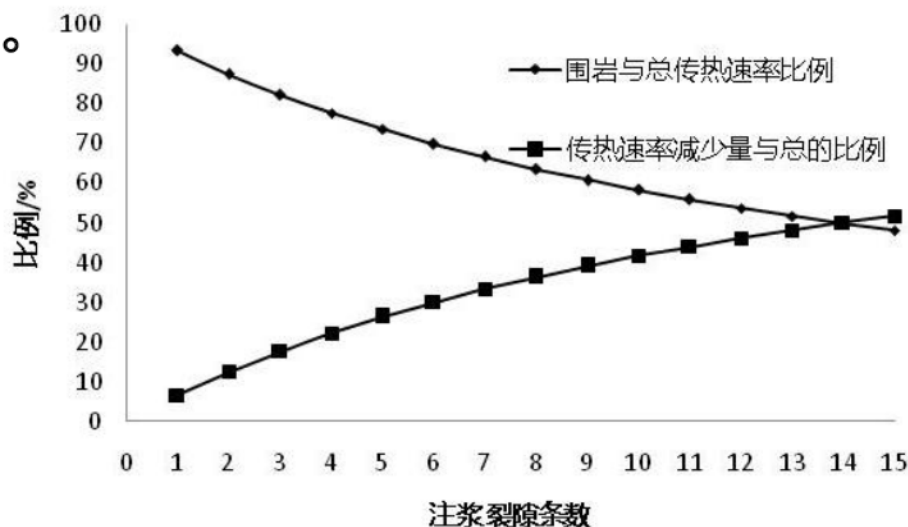
# 1、多孔介质热物性研究

- 巷道围岩是多孔介质，不仅具有微观孔隙，还存在一些裂隙。
- 这些结构对煤-岩的热力学和物理学性能具有重要影响。
- 高地温巷道围岩的传热过程涉及多孔介质裂隙场、流体场和温度场的耦合问题。
- 研究孔隙岩体的热物性参数，可为喷注隔热材料实现隔热效果研究提供理论依据。

# 1、多孔介质热物性研究

建立数学模型分析裂隙对围岩传热的影响

- 随着裂隙增多，巷道裂隙的**传热速率**呈线性增大，围岩裂隙的发育程度对巷内总传热速率影响较大。
- 裂隙越发育，注入隔热材料后**降温效果**越好；喷注隔热材料对于围岩传热速率影响较大，可以阻隔**80%以上**的围岩及围岩裂隙传热。



课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

## 2、新型矿用隔热材制备实验研究

- 研究隔热材料的化学特性对材料热物理力学特性影响的**微观机制**
- 采用**材料配比试验**和性能检测试验，制备满足矿用要求的隔热材料
- 研究隔热材料与混凝土砂浆混合以后所形成的特殊的**隔热结构**特征，水灰比、龄期等因素对隔热材料性能与强度的影响

## 2、新型矿用隔热材制备实验研究

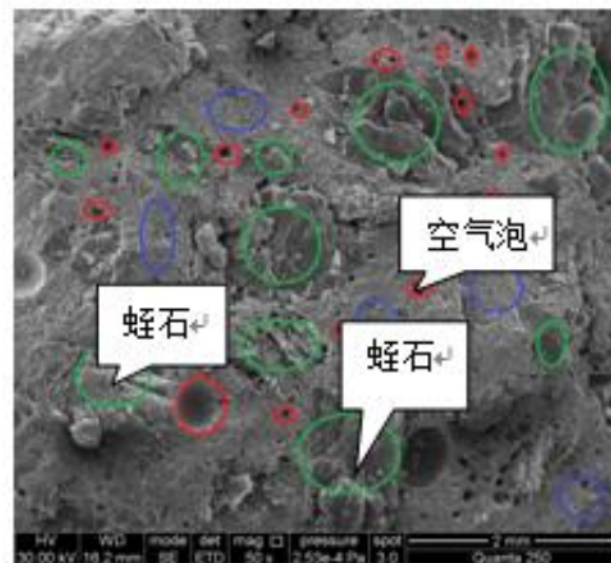
- 矿用隔热材料主要由水泥、黄沙、水、煤渣、蛭石、外加剂等按照一定的比例配制而成。
- 主要用表观密度、稠度、抗压强度、热导率等指标评价材料的综合性能。
- 采用单因素优选试试和正交试验，寻找最佳材料配比。

因素水平表

水平	因素	A 水灰比	B 煤渣掺量 (%)	C 蛭石比例 (%)
	1		0.5	20%
2		0.6	30%	8
3		0.7	40%	10

## 2、新型矿用隔热材制备实验研究

- 对实验结果进行方差分析，得出最佳的隔热材料配比，即水灰比为**0.5**，煤渣掺量为**40%**，蛭石掺量为**10%**，在此配比下，隔热材料的综合性能最佳，导热系数为**0.37W/（m k）**。
- 隔热砂浆中的蛭石片、煤渣、空气泡均是利用本身较好的隔热性，在热流传递过程中，可以起到较好的隔热效果。



隔热材料的微观结构

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

### 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

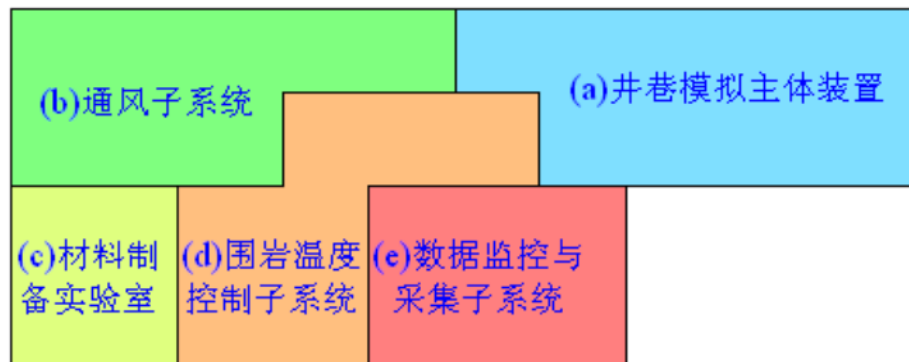
- (1) 高地温巷道热湿环境相似模拟试验系统
- (2) 巷道围岩温度场及其演化规律模化试验
- (3) “阻热圈”围岩隔热效果及温度场研究



### 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

#### (1) 高地温巷道热湿环境相似模拟试验系统

- 自主研发了“**高地温井巷相似模型实验系统**”，开展了常规通风降温、喷注隔热材料降温的相似模拟实验。
- 该系统是目前国内外已知的尺寸最大、功能最全的用于矿井高地温井巷热湿环境相似模拟的试验设备。



高地温巷道热环境相似模拟试验系统

课题背景意义

研究思路

研究内容

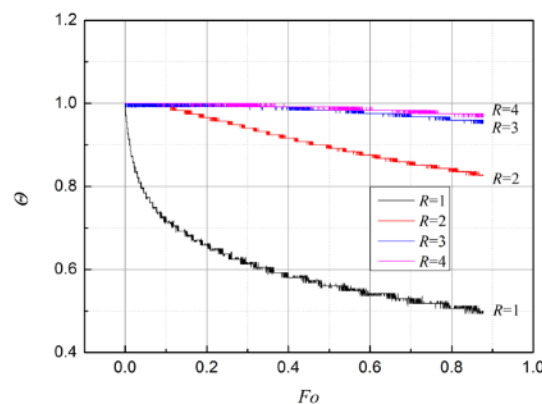
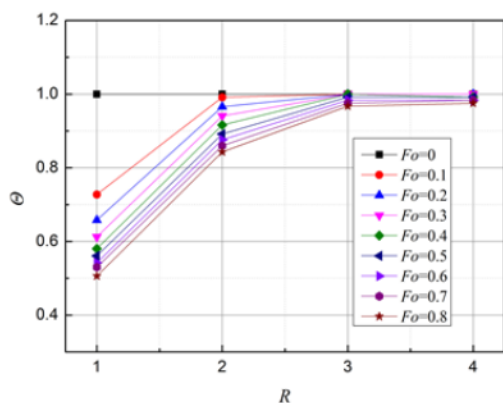
主要成果

课题展望

### 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

#### (2) 巷道围岩温度场及其演化规律模化试验

	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6
原岩温度/°C	37	37	37	37	38	39
入口风温/°C	20	20	20	10	20	20
平均风速 /m · s <sup>-1</sup>	5	7	8	5	7	7



无因次温度分布动态变化规律比较

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

### 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

#### (2) 巷道围岩温度场及其演化规律模化试验

- 巷道围岩内无因次温度 $\theta$ 与无因次半径 $R$ 之间的关系符合指数函数（**Exponential**）规律，表达式为

$$\theta = A \exp(BR) + C$$

### 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

#### (2) 巷道围岩温度场及其演化规律模化试验

□ 巷道围岩的**温度梯度**、**热流密度**和**热流量**的变化过程大致可以分成三个阶段：

(1) 未被扰动阶段，三者均维持在很低水平；

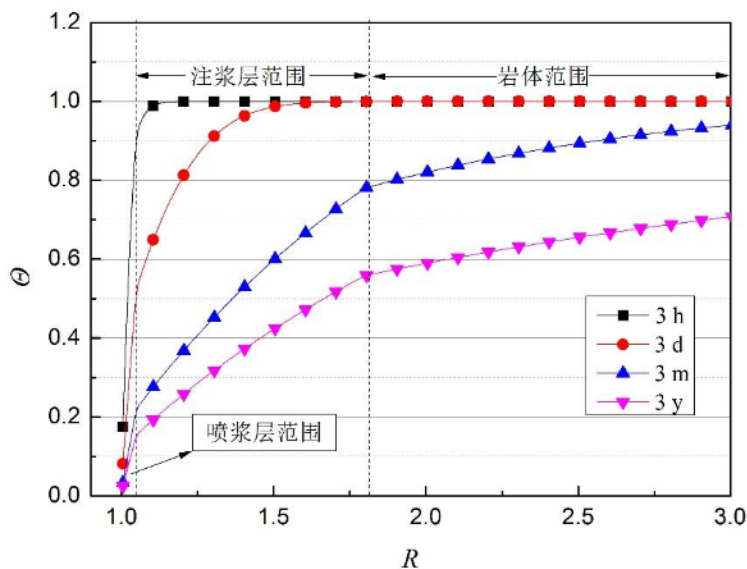
(2) 扰动持续阶段，三者逐渐增加，直至到达峰值

(3) 扰动充分阶段，三者逐渐降低，逐渐重新恢复到较低水平。

# 3、高地温巷道喷注隔热材料隔热效果及规律的研究

## (3) 阻热圈隔热机理及温度场数值模拟研究

参数名称	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
$\lambda_1 / \text{W/m}\cdot\text{K}$	2.0	0.8	0.2	0.2	0.2
$\lambda_2 / \text{W/m}\cdot\text{K}$	2.0	2.0	2.0	1.2	0.8
$\lambda_3 / \text{W/m}\cdot\text{K}$	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0



不同阻热圈参数试验方案

阻热圈内温度分布特征

□与无阻热圈的巷道围岩相比，“阻热圈”巷道围岩的温度场具有壁面温度低、内部温度高的总体特点。

课题背景意义

研究思路

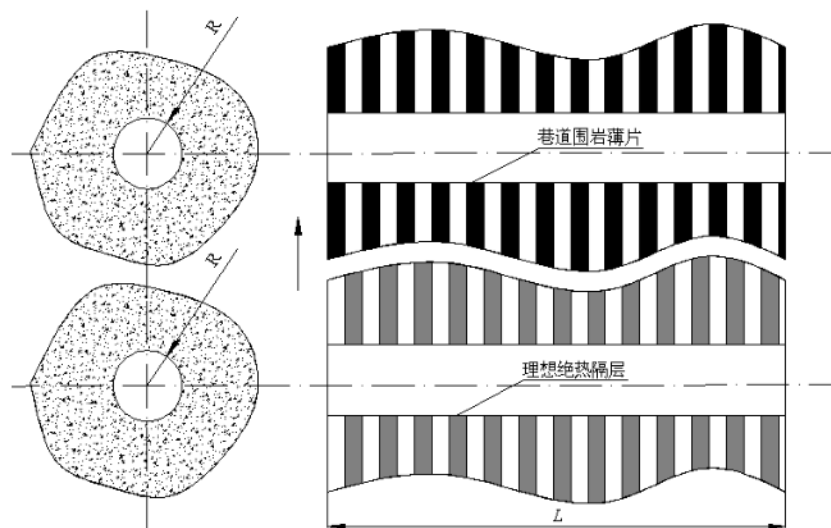
研究内容

主要成果

课题展望

## 4、高地温巷道喷注隔热材料隔热机理研究

- 总结理论和实验研究成果，分析巷道喷注隔热材料后所形成的力学结构和隔热结构。
- 建立相应的物理模型、力学模型和隔热模型，并对其进行数学分析，形成高地温巷道喷注隔热材料隔热降温理论。



高地温巷道围岩及阻热圈示意图

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

## 4、高地温巷道喷注隔热材料隔热机理研究

- 矿用隔热材料属于固体隔热材料，隔热利用材料的**阻隔性、反射性、辐射性**。
- 基于能量守恒定律和傅里叶定律，把高地温巷道围岩传热简化成一维半无限大单一介质空心圆薄片的导热问题，建立了相应的数学模型：

$$Bi = 0.0115 \frac{\lambda_f}{\lambda_s} (av)^{-0.4} (ud)^{0.8}$$

式中： $\lambda_f$  为风流导热系数， $\lambda_s$  为固体导热系数， $a$  为固体导温系数， $\nu$  为风流运动黏度系数， $u$  为风速， $d$  为巷道直径。

## 4、高地温巷道喷注隔热材料隔热机理研究

### 阻热圈隔热机理研究

- 喷浆层和注浆层，其导热系数越小，隔热效果越明显。
- 在通风初期，相同的导热系数降幅，**喷浆层隔热效果优于注浆层。**
- 通风3个月以后，**注浆层的隔热效果优于喷浆层。**
- 只有**喷浆和注浆结合**，才能有效隔热。阻热圈结构对于减少巷道围岩散热效果显著，一般可减排**29~40%**。



# 1、研究成果

## □ 自主设计研制了高地温巷道热环境相似模拟试验系统

- ☑ 基于巷道围岩温度场相似准则及试验方法，设计研制了目前国内外已知的尺寸最大、功能最全的用于矿井高地温井巷热湿环境相似模拟的专用试验平台。能够进行矿井井巷常规通风降温、空调降温、井巷围岩喷注隔热材料降温等模拟试验。

## □ 研究了高地温巷道围岩内温度分布及其动态变化规律

- ☑ 利用自主设计研制的高地温巷道热环境相似模拟试验系统，并依据提出的高地温巷道围岩温度场研究的物理相似试验方法，研究了高地温巷道围岩温度场及其演化规律。

# 1、研究成果

## □ 研究了具有阻热圈结构的高地温巷道围岩的温度场及其演化规律

- ☑ 建立了具有阻热圈结构的高地温巷道围岩非稳态导热的数学模型，给出了阻热圈温度场的数值解法，模拟分析了阻热圈隔热结构的隔热机理，完善了阻热圈概念的科学内涵。

## □ 进行了系统的矿用隔热材料配比及性能研究

- ☑ 综合采用了单因素分析法及正交试验设计，综合成本、稠度、抗压强度等因素及方差因素分析表，研究了矿用隔热材料的最佳的材料配比。采用扫描电镜法，观测了材料表面各成分的存在状态，结合分布状态对其进行了隔热机理分析。

## 2、物化成果

专利名称	专利号
一种井巷喷注隔热材料降温效果模拟的实验装置（发明）	专利号:ZL 2012 1 0011276.0
一种用于高地温巷道物理模拟的相似材料（发明）	专利号: ZL 201410194102.1
一种高地温巷道的围岩相似材料砌块制作装置（实用新型）	专利号:ZL 2014 2 0257230.1
一种以煤矿井下风管空气为气源的泡沫充填材料发泡系统（实用新型）	专利号:ZL 2014 2 0651589.7
一种高地温巷道的围岩相似材料砌块制作装置	发明公开 CN201310742062.5



课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

## 2、物化成果

论文名称	期刊名
Mine geothermal and heat hazard prevention and control in China	Disaster Advances, 2013, 6(S5):85-93(SCI)
A comprehensive methodology for predicting shield support hazards for a US coal mine	Dyna, 2015, 90(4): 442-450(SCI)

- 培养中青年学术带头人1名，培养博士1名，硕士3名；申请国家青年自然科学基金1项。
- 2014年10月获得兖州煤业股份有限公司合作科研项目《煤矿泡沫粉煤灰快速充填技术》，2015.12月被鉴定为国际领先。

课题背景意义

研究思路

研究内容

主要成果

课题展望

由于研究条件及研究时间等的限制，以后的研究应该从以下几个方面开展工作：

- **非均质岩体热物理性质的研究。** 注浆以后的岩体，其传热机理还有待于进一步研究，这对于推动阻热圈理论的发展有重要的意义。
- **巷道围岩与风流传热传质规律研究。** 本文研究的是干燥巷道围岩的温度场，在水分的参与下，巷道围岩与风流换热还涉及传质问题，其对矿井热环境有重要影响。
- **材料配比的优化研究。** 通过掺选更合适的材料，可以进一步实现材料的综合性能最优。

**感谢各位专家！**