

# 深井巷道隔热降温技术的研究与应用\*

李国富<sup>1,2</sup> 夏永怀<sup>3</sup> 李 珠<sup>2</sup>

(1. 江苏省安全生产科学研究院; 2. 太原理工大学; 3. 平顶山矿区建设工程质量监督站)

**摘要** 为深井巷道降温提供设计参数是深井高温岩层巷道隔热降温技术研究的主要目的。研究了非隔热层巷道围岩向巷道的热量释放模式,分析了调热圈形成原理、热传递解析方程及参数;然后研究了隔热层巷道围岩向巷道的热量释放模式,分析了调热圈变化原理,并推导出隔热降温效果理论解析式及参数确定;工业性试验对比证实,巷道采用隔热降温技术后,隔热效果达到64%,具有巨大的技术经济效益。

**关键词** 深井巷道 隔热 降温 技术

## Research and Application of Insulating and Cooling Technology in Deep Mine Roadway

Li Guofu<sup>1,2</sup> Xia Yonghuai<sup>3</sup> Li Zhu<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Academy of Safety Science and Technology; 2. Taiyuan University of Technology;  
3. Construction Project Quality Supervision Station of Pingdingshan Mining Area; )

**Abstract** Insulating and cooling technology for high temperature strata roadway in deep mine is studied, and the main purpose of the research is to provide design parameters for cooling of deep mine roadway. The heat emission model from roadway surrounding rocks without insulation layer to roadway is investigated, and the forming principle of heat circle control, the heat transfer analytic equation and parameters are analyzed. Then the heat emission model for roadway surrounding rock with insulation layer to roadway is investigated, and the changing principle of heat circle control is analyzed to determine the insulating and cooling effect theory analytic expression and the corresponding parameters. Through industrial tests, the insulation heat effect can reach 64% by adopting the insulating and cooling technology, which has great technical and economic benefits.

**Keywords** Deep mine roadway, Insulation, Cooling, Technology

研究认为矿井的地热一般随着深度的增加而增加,地壳在地热和太阳辐射热的共同作用下,形成3个垂直分布的温度变化层带,即变温带、恒温带和增温带。变温带为离地表20~30m的地表层,地温受太阳辐射热影响而具有周期性变化;恒温带是在变温带之下某一深度处,大地热流与太阳辐射的热流达到平衡,常年基本保持恒定的地层,其深度一般在30m左右;增温带是在恒温带之下,不受地面温度周期变化影响,只受大地热流的作用,地温随深度的增加而增加的地层。恒温带的深度一般为数十米,而矿井生产的深度大都为数百米或千米以上,远远大于恒温带的深度,且地温随温度的增加而增高,当地温超过某一温度时,就产生了矿井的热害问题。热害是煤矿或其他矿井向深部发展过程中不可避免的,矿井的地温分布规律除了受采深影响外,在许多地区还受热容量大的地下水、构造、岩石氧化放热等影响,使局部温度很高,已严重威胁矿井的生产与工

人的生命安全,当井下空气的温度、相对湿度、风速和环境温度达到一定状态后,致使人体散热困难,工人感到闷热,劳动生产率下降,进而出现大汗不止、体温升高、头昏、虚脱、呕吐等中暑症状,甚至死亡的自然灾害。

我国现有大中小型各类煤矿2万处左右,各类非煤矿山3~4万处,这些矿井中深计大于千米的超过100处,有近五分之一的出现或即将出现热害,如:山东新汶局孙村矿属于高温梯度,1000m埋深巷道岩温达43℃,采面气温超过38℃,掘进工作面气温达40℃;平顶山矿区属于高温梯度,原始岩温为44℃,采面气温超过33℃。国外,南非金矿采深已经达到3000m,美国、德国、俄罗斯等国超过千

\* 国家自然科学基金项目(编号:50774078)。

李国富(1962—),男,江苏省安全生产科学研究院,副总工程师,教授;太原理工大学,教授,博士,硕士研究生导师;210042 江苏省南京市花园路9号。

米,地温达到40℃以上。

为保障矿工的身心健康和生产的安全进行,我国的矿山安全条例规定:井下工人作业地点的空气温度不得超过28℃,超过时应采取降温和其他保护措施,同时煤矿安全规程规定:采掘工作面的空气温度不超过26℃,机电硐室的空气温度不得超过30℃,空气温度超过时,要采取降温措施。

目前,国内外矿井降温主要采用人工制冷降温技术,这些技术一般要投入巨大的基建工程和设备,且运营成本高、能耗大,使用效果也较差。隔热降温技术是将巷道的热源阻挡在巷道围岩的外部,减少向巷道的热量释放,达到主动降温的一种方法,实施技术简单,成本低廉,特别是在高热岩层地区,如配合人工制冷降温技术,降温效果明显,可大幅降低生产和运营费用,实现地下工程的降温和节能<sup>[1-2]</sup>。

## 1 巷道隔热与降温理论研究

### 1.1 非隔热巷道围岩向巷道的热量释放模式

非隔热巷道巷道围岩与风流间的传热是一个复杂的不稳定传热过程。岩体开挖井巷之前,各点的温度为原始岩温,处于热平衡状态;开挖巷道并通风后,这种热平衡状态遭到破坏,岩体会从高温地带逐渐的向巷道风流散热,在通风过程中,风流又将热量逐渐冷却带走,随着时间的增加,岩体内部的温度不断降低,并且温度降低的范围不断延伸到岩体内部,直至达到新的热平衡状态为止。根据传热学理论,这个延伸厚度随时间加长而不断增大,即通风初期,该厚度的增加率大,但随着通风时间的加长,其增加率逐渐变小。研究和实测表明,该延伸厚度的外边界处的岩体温度接近原始岩温,将这一外边界所包围的岩体范围称为调热圈,它的半径大小与围岩的热物理性质、风流温度的影响、巷道支护形式、支护材料、通风时间的长短有关。一般在1a之后,围岩与风流已进行了较充分的热交换,调热圈半径趋于稳定。

高温岩层向巷道的热交换是通过围岩调热圈的热传导后释放到巷道岩壁,岩壁向巷道辐射和对流释放热量,从而使风流温度升高。为简化研究,可将众多复杂的影响因素都归结到传热系数中去分析,即引入“不稳定换热系数”,围岩向巷道风流的热传递量可简化为下述计算模型<sup>[3]</sup>:

$$Q_{gu} = k_{\tau}LU(t_{gu} - t_B), \quad (1)$$

$$k_{\tau} = k_{ur}\lambda/R_0;$$

式中,  $Q_{gu}$  为围岩向巷道风流的热传递量,或井巷围岩散热量, W;  $k_{\tau}$  为不稳定换热系数, kW/(m<sup>2</sup>·℃),

$U$  为井巷周长, m;  $L$  为井巷长度, m;  $t_{gu}$  为井巷围岩的初始岩温, ℃;  $t_B$  为巷道中风流的平均温度, ℃;  $\lambda$  为导热系数, W/(K·m);  $R_0$  为巷道当量半径, m;  $k_{ur}$  为基尔皮切夫不稳定换热系数, 无因次, 其定义为

$$k_{ur} = f(F_0, B_i) = \frac{1 + 0.4 \sqrt[4]{F_0}}{1.77 \sqrt{F_0} + \frac{1}{B_i}},$$

$B_i$  为毕欧准数,  $F_0$  为傅利叶准数。

### 1.2 隔热岩层巷道围岩向巷道的热量释放模式

巷道采用隔热材料进行支护,围岩的高温热源从围岩深部传导到巷道的隔热层外界面被阻隔后,温度有所下降。根据热力学理论,热量通过隔热层是以热传导的方式传输,释放到巷到内壁面,巷道壁面与巷道中的气体热对流或辐射方式进行热传递,最后使风流温度增加。围岩调热圈的大小从最理想的隔热层传热密度为零,发展到隔热层达到岩层的导热密度的调热圈,如图1所示。

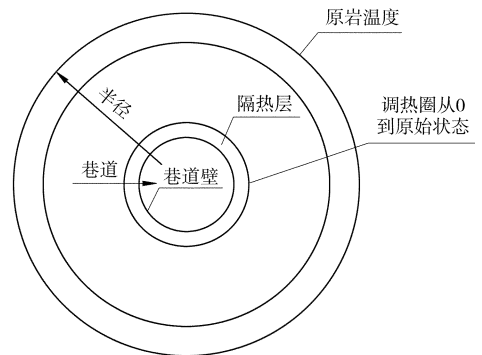


图1 巷道加隔热后调热圈的发展规律

引入一个“不稳定换热系数”后,围岩向巷道风流的热传递量可简化为下述计算模型。

根据热力学理论<sup>[3,4]</sup>,可推算出不稳定换热系数  $k'_{\tau}$ :

$$Q'_{gu} = k'_{\tau}LU(t'_{gu} - t_B), \quad (2)$$

$$k'_{\tau} = 1 / \left( \frac{\delta}{\lambda'} + \frac{1}{\alpha'} \right), \quad (3)$$

式中,  $Q'_{gu}$  为巷道隔热后的热传递量,或井巷围岩散热量, W;  $\delta$  为隔热层厚度, m;  $\lambda'$  为隔热层导热系数, W/(m<sup>2</sup>·℃);  $\alpha'$  为隔热层对风流放热系数,  $\alpha' = (\lambda'/\lambda) \times \alpha$ ;  $\alpha$  为岩石对风流放热系数;  $k'_{\tau}$  为不稳定换热系数, W/(m<sup>2</sup>·℃);  $t'_{gu}$  为隔热层外边界岩层温度,  $t'_{gu}$  由测试确定, ℃。

### 1.3 热量释放减少量

热量释放减少量为

$$\Delta Q_{gu} = Q_{gu} - Q'_{gu}, \quad (4)$$

热量释放减少率为

$$\frac{\Delta Q_{gu}}{Q_{gu}} \times 100\% \quad (5)$$

## 2 工业性试验研究

### 2.1 试验条件及参数

试验巷道长度为  $L = 200 \text{ m}$ , 巷道断面周长折算为  $U = 10 \text{ m}$ , 原始岩温  $t_{gu} = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ , 巷道风流温度  $t_B = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , 不稳定换热系数  $k_r = 0.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。

采用玻化微珠保温砂浆材料作为巷道隔热层, 巷道保温系数隔热层厚度  $\delta = 0.10 \text{ m}$ , 隔热层导热系数  $\lambda' = 0.075 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , 隔热层放热系数  $\alpha' = 0.72 \text{ w}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ , 隔热层外温度  $t'_{gu} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ , 不稳定换热系数  $k'_r = 0.30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C})$ 。

### 2.2 巷道隔热层结构设计

巷道设计为圆形, 1 次支护为锚网喷, 然后将隔热层全断面喷涂在巷道外表面, 喷射厚度  $100 \text{ mm}$ , 巷道隔热结构如图 2 所示。

### 2.3 试验巷道热量释放减少量

试验巷道热量释放减少量为

$$\Delta Q_{gu} = Q_{gu} - Q'_{gu} = 0.5 \times 200 \times 12 (35 - 25) - 0.3 \times 200 \times 12 (31 - 25) = 7680 \text{ (W)}$$

试验巷道热量释放减少率为

$$\frac{\Delta Q_{gu}}{Q_{gu}} \times 100\% = 64\%$$

## 3 结 论

(1) 研究了非隔热层巷道和设置隔热层巷道围

(上接第 148 页)

避免对环境造成污染, 又可缓解矿区供水不足的局面。

## 5 结 论

(1) 建筑物荷载的作用促使断层“活化”, 从而引起含断层带的采空区场地浅层地表水的流失。

(2) 断层是造成水资源流失的主要原因之一, 需要利用的采空区场地, 在煤炭开采时就要留设合理的防水煤柱。

(3) 矿井水的资源化利用, 有助于避免对环境造成污染, 又可以缓解矿区供水不足的境况。

(4) 前人提出了留设断层防水煤柱的计算方法<sup>[1,9]</sup>, 但很少考虑采空区上建筑物荷载的影响, 进一步的研究可以着眼于建筑物荷载大小与防水煤柱留设宽度的关系上。

致谢: 本研究得到张后全指导, 同时也是中国矿

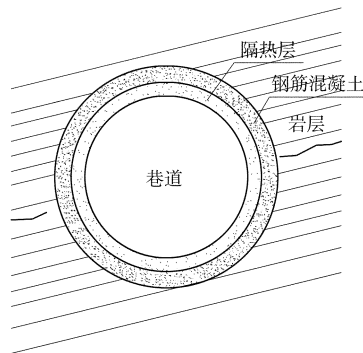


图 2 巷道隔热结构

岩热量释放模式, 提出了围岩热量释放计算模型和公式, 为非隔热层巷道和设置隔热层巷道围岩热量释放计算提供了依据。

(2) 通过工业性试验对比, 采用玻化微珠保温砂浆材料作为巷道隔热层, 巷道热量释放减少率为  $64\%$ , 大幅度地减少了热量的排放量, 具有巨大的技术经济效益。

## 参 考 文 献

- [1] 马世志. 矿井通风 瓦斯防治技术与措施[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [2] 王 文, 桂祥友, 王国君. 矿井热害的产生与治理[J]. 工业安全与环保, 2003, 29(4): 33-35.
- [3] 杨德源, 杨天鸿. 矿井热环境及其控制[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [4] 柳金海. 绝热工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

(收稿日期 2010-07-12)

业大学大学生实践创新训练计划项目。

## 参 考 文 献

- [1] 何绪文, 杨 静, 邵立南, 等. 我国矿井水资源化利用存在的问题与解决对策[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 63-66.
- [2] 杨天鸿, 唐春安, 朱万成, 等. 岩石破裂过程渗流与应力耦合分析[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 498-493.
- [3] 王 维, 王宏伟, 敬 毅. 基于关键层理论的保水开采技术[J]. 露天采矿技术, 2009(2): 23-25.
- [4] 彭文庆, 王卫军, 李青锋. 不同断层倾向条件下防水煤柱合理宽度的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(2): 179-186.
- [5] 何绪文, 肖宝清, 王 平. 废水处理与矿井水资源化[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002.
- [6] 潘 哲, 刘灿浩. 矿井水资源化是节约水资源的有效途径[J]. 煤炭环境保护, 2001, 15(4): 55-56.
- [7] 陈 雄, 刘俊杰, 吴 寅, 等. 矿井水资源化与生态环境安全探讨[J]. 采矿与安全工程学报, 2004, 4(5): 65-68.

(收稿日期 2010-07-25)