

# 深部矿井煤岩体温度场特征及其控制因素研究

王世东 虎维岳

(中国煤炭科工集团西安研究院 陕西 西安 710054)

**摘要:**为给深部矿井热害防治提供科学的依据,分析了深部矿井煤岩体温度场的特征及其控制因素,研究了渗流场与温度场间相互作用机理,数值模拟了岩体热物理性质及裂隙网络几何参数对温度场的控制特征。结果表明:热导率低的岩层中地温梯度较大;岩体裂隙中水流温度变化随对流换热系数的增加而增加,当对流换热系数大于  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,对流换热系数对水流温度影响不明显;当渗透率远小于  $10^{-14} \text{ m}^2$  或裂隙宽度远小于 0.000 1 m 时,深部岩体渗流场对温度场的影响较小。

**关键词:**深部煤岩体;渗流场;温度场;热物理参数;热害防治

中图分类号: TD727 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2013)08-0018-04

## Research on Coal and Rock Mass Temperature Fields Characteristics and Control Factors in Deep Mine

WANG Shi-dong, HU Wei-yue

(Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** In order to provide scientific basis for the prevention of heat harm problem in deep mine, the characteristics and major factors affected to temperature fields were analyzed. The interaction mechanism between the flow field and temperature field of deep coal and rock mass was studied. The rock thermo physical properties and the control action of temperature fields on the fracture network geometry parameters were numerical simulated. The results showed that geothermal gradient was higher in the strata with lower thermal conductivity. The fissure water temperature would be greater with the convective heat transfer coefficients increased. The convective heat transfer coefficients would have no significant effects on the water temperature when it was greater than  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . The deep rock mass seepage field would have little effects on the temperature field when the permeability was far lower than  $10^{-14} \text{ m}^2$  or the fracture width was far lower than 0.000 1 m.

**Key words:** coal and rock mass in deep mine; seepage field; temperature field; thermo physical parameters; heat hazard prevention

## 0 引言

目前,随着矿井开采深度的不断增大,深部矿井煤岩体温度场也逐渐增高,使采煤工作面中空气温度普遍超过所规定的标准(26℃),严重影响工人的身体健康和劳动生产率<sup>[1]</sup>。华北华东地区是我国现阶段矿井热害最为严重的区域<sup>[2]</sup>,热害矿井主要分布在江苏、山东、安徽和河南东部地区,该区域大部分矿井开采深度超过800 m,深部矿井煤岩体温度一般高于40℃。因此,笔者分析了深部矿井煤岩体温度场特点及其控制因素<sup>[3]</sup>,以期为研究深部矿

井热害防治提供科学依据<sup>[4]</sup>,并指导深部煤炭资源安全、高效开采。

## 1 温度场特征及其控制因素

### 1.1 温度场特征

1) 煤岩体温度场随深度变化特征。根据钻孔测温资料统计分析,随着地层埋藏深度的增加,深部煤岩体温度随深度基本呈线性递增,局部呈非线性递增(图1),表明深部煤岩体温度除受到地层正常增温因素的控制外,还会受到多种非均质热物性岩石及其他地温异常地质因素的控制<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2013-04-23; 责任编辑: 王晓珍

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAC10B03);国家自然科学基金重点资助项目(51034003)

作者简介:王世东(1981—),男,河南南阳人,副研究员,博士。Tel:029-87862249, E-mail:wsdde@126.com

引用格式:王世东,虎维岳.深部矿井煤岩体温度场特征及其控制因素研究[J].煤炭科学技术,2013,41(8):18-21.

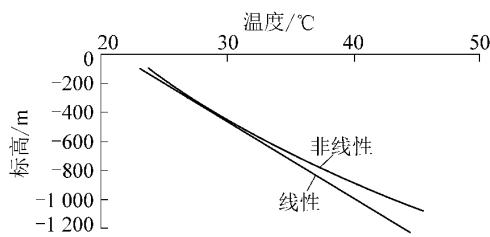


图1 三河尖煤矿地温随深度变化曲线

2) 煤岩体温度场水平方向变化特征。钻孔测温资料表明,即使在同一埋藏深度,同一平面上不同位置的煤岩体温度也会发生较大变化(图2),这种变化的差异程度随着埋藏深度的增加而增加。

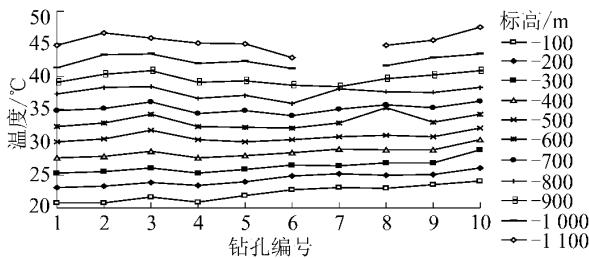


图2 不同钻孔相同深度处地温曲线

3) 地温梯度变化规律。由于煤矿床的地域、气象差别和地质条件差异性较大,其地温梯度也具有明显的地域性特征。我国地温梯度的分布总体上呈现东高西低、南高北低的特点。我国东部的地温梯度多在 $3.0\sim4.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ; 华北盆地一般在 $3.2\sim3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ,局部地热异常区最高可达 $7.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 。东南沿海地区一般在 $2.5\sim3.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ ; 中部地区多在 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{hm}$ 左右; 西部地区地温梯度分布的总体趋势为南部高、北部低<sup>[6]</sup>。

4) 大地热流变化规律。大地热流是地球内部热作用过程最直接的地表显示,其中蕴含着丰富的地质、地球物理和地球动力学信息。统计结果表明,中国大陆地区大地热流密度变化范围为 $30\sim140\text{ mW/m}^2$ ,平均( $61\pm15.5$ ) $\text{ mW/m}^2$ 。大地热流密度分布格局为东高、中低,西南高和西北低。地势最高的青藏高原表现为高大地热流密度( $>80\text{ mW/m}^2$ ),但地势最低的大陆东部地区亦表现为较高大地热流密度( $60\sim75\text{ mW/m}^2$ ),中部和西北部地区以低大地热流密度( $<60\text{ mW/m}^2$ )为主。

## 1.2 温度场的控制因素

深部煤岩体温度场的影响因素较多,但主要取决于以下3种因素:区域深部热背景、成热环境及附加热源。

1) 区域深部热背景。区域深部热背景主要包

括大地热流及基底起伏与褶曲构造等。个别深部矿井地温异常主要是由于大地热流散热引起的。基底隆起、大断裂带的上升盘和背斜构造等由于基底岩层和盖层热导率差异大,热流向背斜顶部隆起的部位集中,易导致局部地温异常。

2) 成热环境。成热环境包括不同岩性热物性参数及岩层组合方式等,不同岩性地层热导率差别很大,如图3所示。正是由于不同岩性地层的热导率差别,通常在深部形成热屏闭层,在低热导率的热屏闭层中,地温梯度会明显升高,从而形成深部的异常高温环境<sup>[7]</sup>。

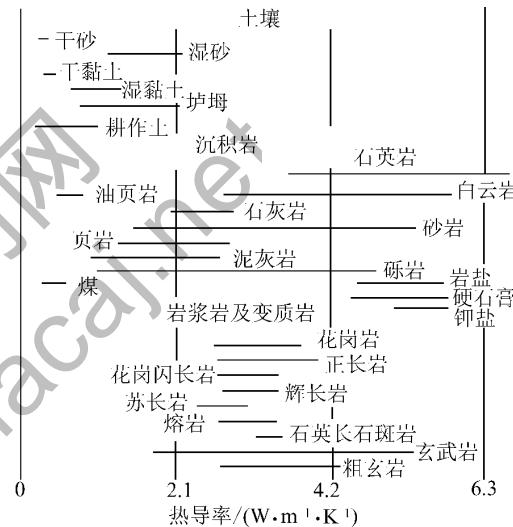


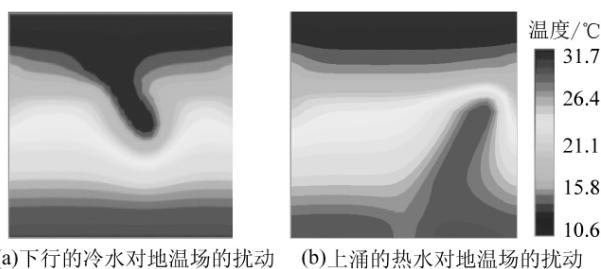
图3 常见岩石热导率分布

3) 附加热源。附加热源包括放射性元素生热、岩浆岩生热及地下水循环热等因素。在深部煤层开采过程中地下水渗流场对地温场的影响较为明显。在地下水补给、径流条件良好的盆地及其边缘地带,从补给区流入较低温度的地下水,在下降和流动过程中,不断吸取围岩热量,从而降低了围岩温度,如图4a所示; 地下水在深循环过程中经岩温加热后,在有利的地质构造条件下,地下水上升引起局部异常高温环境,如图4b所示。

## 2 温度场控制因素数值模拟

### 2.1 地下水渗流场与温度场相互作用机理

深部矿井煤岩体渗流场与温度场间的相互作用机理<sup>[7~10]</sup>: 渗流场水头发生变化,影响渗流速度场的分布,进而引起裂隙水流温度场的分布; 反之,裂隙水流携带的热量与水流的压力梯度呈正比,裂隙水温度场能通过影响裂隙水头压力分布,进而影响渗流

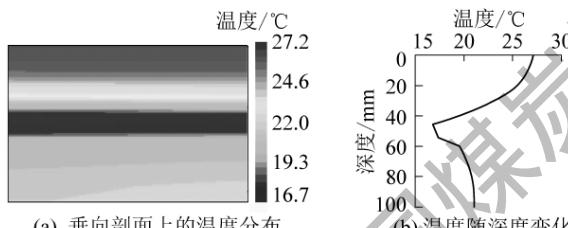


(a)下行的冷水对地温场的扰动 (b)上涌的热水对地温场的扰动

图4 沿断层下行、上涌的热水对地温场的扰动效应场的水头分布,进而影响到整个裂隙岩体渗流场。

## 2.2 岩体热物理参数对温度场的控制作用

1) 不同岩性热导率对岩体温度场的影响(图5)。分别对岩块上下2部分赋予不同的热物性参数,上部为热导率小( $0.195 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )的砂岩<sup>[11]</sup>,下部为热导率大( $2.197 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ )的花岗岩。由图5可以看出,砂岩区热导率低,传热慢,温度变化幅度较小;花岗岩区热导率高,传热快,温度均匀化。在热导率高的岩层中具有较小的地温梯度,在热导率低的岩层中具有较大的地温梯度。



(a) 垂向剖面上的温度分布

图5 不同岩性热导率对温度场的控制特征

2) 对流换热系数对岩体温度场的影响。当裂隙内水流经接触面时,由于裂隙水流与岩体表面存在温度差,因此在接触面上会发生热量交换。这种热量交换除了与水和岩体之间的温度差有关外,还与岩体和水之间的对流换热系数有关<sup>[12]</sup>,如图6所示,当对流换热系数小于 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,水流温度变化随对流换热系数 $h$ 增加而增加;而当对流换热系数大于 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 时,水流温度基本不发生变化。

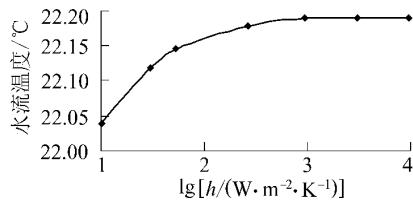


图6 地下水流温度随对流换热系数对数变化曲线

## 2.3 裂隙网络几何参数对温度场的控制作用

由立方定律可知,裂隙宽度与渗透率成正比,渗

透率影响裂隙水流的流速,进而对岩体温度场产生影响。因此通过数值模拟定性、定量地研究裂隙网络几何参数<sup>[13-15]</sup>(裂隙的渗透率、裂隙宽度)对岩体温度场的控制作用。

1) 裂隙渗透率对温度场的影响。通过计算得渗透率 $k$ 分别取 $10^{-10} \text{ } 10^{-11} \text{ } 10^{-14} \text{ m}^2$ 时的岩体温度场等值线(图7)。由图7可知:当裂隙水渗透率较大时,水流在穿过断裂部分时流速较大,带走介质中的热量也较大,因此在断裂两侧发生明显的温度跃变。随着裂隙水渗透率的减小,断裂两侧温度跃变逐渐变缓,渗流场对温度场的影响程度也逐渐减小,当渗透率远小于 $10^{-14} \text{ m}^2$ 时,则可不考虑深部岩体渗流场对温度场的影响。

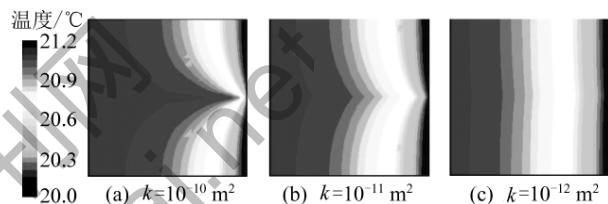


图7 不同渗透率下岩体内的温度场等值线

2) 裂隙宽度对温度场的影响。裂隙宽度影响着岩体内的水流场分布,从而对温度场产生影响。通过计算得裂隙宽度分别为 $0.1 \text{ } 0.01 \text{ } 0.001$ 和 $0.0001 \text{ m}$ 时的岩体温度场等值面(图8)。由图8可知:当裂隙宽度较大时渗透率就越大,水流流速就越大,因此带走介质中的温度也较大,在断裂两侧发生明显的温度跃变。随着裂隙宽度的减小,断裂两侧温度跃变逐渐变缓,渗流场对温度场的影响也逐渐减小。当裂隙宽度 $d \ll 0.0001 \text{ m}$ 的时候,温度差相对就越小,不需考虑渗流场对温度场的影响。

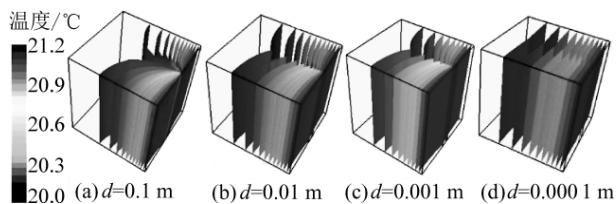


图8 不同裂隙宽度下岩体内的温度场等值面

## 3 结论与建议

1) 深部矿井煤岩体温度随深度增加基本呈线性递增特点,但在局部区段会呈非线性递增,表明深部地温场除受到大地热流控制下的正常增温因素影响外,地热地质异常体、岩体热物理参数、裂隙几何

参数等对深部矿井煤岩体温度场分布特征也产生明显的控制作用。

2) 深部矿井煤岩体渗流场通过水头变化影响渗流速度场的分布,引起裂隙水流温度场的分布;反之,裂隙水温度场能通过影响裂隙水头压力分布,影响到渗流场的水头分布,进而影响到整个裂隙岩体渗流场的变化。

3) 在热导率高的岩层中具有较小的地温梯度,在热导率低的岩层中具有较大的地温梯度;当对流换热系数小于  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,水流温度变化随对流换热系数增加而增加;而当对流换热系数大于  $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  时,水流温度基本不发生变化。

4) 当渗透率  $k \ll 10^{-14} \text{ m}^2$  或裂隙宽度  $d \ll 0.0001 \text{ m}$ ,深部岩体渗流场对温度影响较小,不需考虑深部岩体渗流场对温度场的影响;反之,则应考虑深部岩体渗流场对温度影响效应。

#### 参考文献:

- [1] 段忠丰,庞忠和,杨峰田.煤矿深部地温场影响因素分析[C]//深部煤炭资源及开发地质条件研究现状与发展趋势论文集.北京:煤炭工业出版社,2006:189-203.
- [2] Overstop B. Analyzing Flow and Transport in Fractured Rock Using the Discrete Network Concept [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 1991: 156-162.
- [3] 何满潮,徐敏. HEMS 深井降温系统研发及热害控制对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1353-1361.
- [4] 苗素军,辛嵩,彭蓬,等. 矿井降温系统优选决策理论研究与应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 613-618.
- [5] 何满潮,郭亚平,陈学谦,等. 三河尖矿深井高温体特征及其热害控制方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(1): 2593-2597.
- [6] LIU Chuang-xiao, LIU Fu-sheng, TAN Yun-liang. Identification of Geological Structures by the Ground Penetrating Radar with Systemic Entropy Theories [C]//Proceedings of 2006 International Colloquium on Safety and Technology. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing, 2006: 102-106.
- [7] 陆艳梅. 大坝渗漏传热模型分析与研究[D]. 南京:河海大学, 2006: 56-104.
- [8] HU Wei-yue, DONG Shu-ning. Research the Sudden Changes and the Controlling Factors of Deep Coal Mining Conditions [C]//2007 International Symposium on Mining Safety and Environment Protection. Jiaozuo, Henan Province, China, 2007: 43-52.
- [9] 戴锅生. 传热学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 1999: 40-122.
- [10] 周晓敏,肖龙阁. 渗流地层人工冻结温度场和渗流场之数值研究[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 24-28.
- [11] 姜培学,柯道友,任泽霖. 有内部热源的非稳态导热与自然对流换热及辐射换热耦合问题研究[J]. 计算物理, 1999, 16(3): 302-308.
- [12] 万志军,赵阳升,康建荣. 高温岩体地热资源模拟与预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 945-949.
- [13] 闻洁. 渗流铸造过程中渗流温度场的数值模拟[J]. 华侨大学学报, 2007, 28(1): 11-14.
- [14] 刘红星,张建甫. 利用制冷设备降低综采工作面温度的实践[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(1): 68-69.
- [15] 李德忠,李冰冰. 两淮矿区深井高温热害防治技术初探[J]. 中国煤炭, 2008, 34(4): 64-66.

(上接第 17 页)

降低。不同岩性岩石的热导率随着其泥质含量的增加而减小。煤的变质程度控制着热导率的大小,变质程度越高热导率越大。另外,岩石的孔隙度对热导率影响也很大,一般会随着孔隙度的增大而减小。不同岩性的地层组合控制着地温场的垂向分布。在热传导过程中,热流总是优先向热导率高的部位运移。在低热导率岩层(如煤层、泥岩夹层)内地温梯度增大,造成局部聚热,使得煤层成为聚热层,易发热害。因此,即使浅部测温地温梯度正常也不能保证深部煤层开采不会出现热害,需要对深部地温进行合理预测。

#### 参考文献:

- [1] 余恒昌,邓孝,陈碧琬. 矿山地热与热害治理[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1991: 404.

- [2] Su Z, Jiang Z, Sun Z. Study on the Heat Hazard of Deep Exploitation in High-temperature Mines and Its Evaluation Index [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009(1): 414-419.
- [3] 王永炜. 中国煤炭资源分布现状和远景预测[J]. 煤, 2007, 16(5): 44-45.
- [4] 尚冠雄. 华北晚古生代聚煤盆地造盆构造述略[J]. 中国煤田地质, 1995, 7(2): 1-6, 17.
- [5] 任战利. 中国北方沉积盆地热演化史的对比[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 33-37.
- [6] 彭担任,李洪震,徐爱建,等. 煤系地层热导率测试研究[J]. 煤炭科学技术, 2000, 28(9): 35-38.
- [7] 陈墨香. 华北地热[M]. 北京:科学出版社, 1988: 218.
- [8] 杨淑贞,张文仁,沈显杰. 孔隙岩石热导率的饱水试验研究[J]. 岩石学报, 1986(4): 83-91.
- [9] 淮南矿业(集团)有限责任公司. 顾桥井田电子版精查地质报告汇编[R]. 淮南:淮南矿业(集团)有限责任公司, 2001.
- [10] 王秋莉,张学义,马镇涛. 河北元北煤矿地热及热害防治[J]. 河北煤炭, 1999(1): 35-38.