

水分蒸发引起巷道局部壁温 低于风温的理论分析

何昌富¹, 刘何清^{1,2}, 殷维^{1,2}, 杨威¹

(1. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 现场实测发现高温矿井井下巷道壁面温度低于风流干球温度现象。通过对巷道围岩与风流间热湿交换分析, 建立了巷道围岩内部温度场数学模型; 将潜热交换量表示成巷道壁面温度、风流温度及对流换热系数的函数, 得出了求解巷道壁面温度的计算式; 对此巷道壁面温度计算式进行数学变换、整理, 得出二次曲线。经理论和图解法分析得出了湿润巷道壁面温度低于风流干球温度的临界条件, 从理论上解释了“高温矿井湿润巷道壁面局部温度低于风流干球温度”这一现象。

关键词: 高温矿井; 巷道壁面温度; 对流换热; 蒸发换热

中图分类号: TD727 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5876(2014)01-0035-04

Theoretical analysis of tunnel wall local temperature lower than airflow temperature caused by evaporation in mines

HE Changfu¹, LIU Heqing^{1,2}, YIN Wei^{1,2}, YANG Wei¹

(1. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Measured results show that tunnel wall temperatures are lower than airflow temperature in some places of high temperature mines. This paper firstly set up the temperature distribution mathematical model inside the surrounding rocks by analysis of heat and moisture transfer between tunnel rock surface and airflow, and secondly deduces a formula that calculates tunnel wall temperature with function of water evaporation heat transfer considering airflow velocity, temperature and humidity, and thirdly quadratic curve is obtained by making mathematical transformation to this formula. Theoretical and graphical method reveal the critical condition of wet wall temperature which is lower than air temperature, the phenomenon that the tunnel wall local temperature covered with water is lower than airflow temperature is explained theoretically.

Key words: high temperature mine; tunnel wall temperature; convective heat transfer; evaporation heat transfer

2011年7月和9月课题组成员携带河北省武强县中兴玻璃计器厂生产的二等标准水银温度计(测量范围0~50℃,分格值0.1℃)和矿用本安CWH760型红外测温仪(测量范围-30~760℃,

精度±1℃),对江西某2座千米高温深井的井下巷道壁面温度和风流温度进行了实测,实测数据如表1所示(井下巷道平均风速约为2~4 m/s,相对湿度在80%以上)。

收稿日期:2013-10-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51074072;51134005);湖南省科技计划资助项目(2012FJ2001)

通信作者:刘何清(1964-),男,山东荣成人,博士,教授,研究方向:工业通风与安全. E-mail: hqliu8222638@163.com

从表1可以看出,虽然高温矿井原岩温度可能远高于风流温度(其中矿井1的水平标高-900 m,地层温度约43℃;矿井2的水平标高-850 m,地层温度约45℃),但巷道壁面温度多处出现低于风流干球温度现象。

在原岩温度很高的矿井中,围岩传热是引起巷道及工作面风流温度超高的主要原因之一。由于围岩沿程向风流中传热,使得巷道风流温度沿程不断增加,且是事实。但当巷道壁面温度低于风流温度,风流温度沿程增加需要的热量来源于哪里呢?因此,高温矿井“巷道壁面温度低于风流温度”现象难以理解,有待研究。

分析认为:高温矿井巷道壁面温度低于风流温度的主要原因是巷道表面存在水分蒸发。笔者根据巷道围岩与风流间的换热特点,试图从理论上分析产生这一现象的条件。

表1 江西2高温矿井现场实测数据

测点编号	巷道壁面温度/℃		风流干球温度/℃	
	高温矿井1	高温矿井2	高温矿井1	高温矿井2
1	28.0	28.0	30.5	29.8
2	30.0	27.0	31.5	29.4
3	30.0	28.0	32.0	29.8
4	28.0	28.0	28.8	30.0
5	29.5	29.0	29.4	30.1
6	30.0	29.0	29.4	30.3
7	28.0	31.0	28.6	31.6
8	28.0	32.0	27.8	32.8
9	29.0	33.0	27.2	33.2
10	31.0	33.0	30.0	33.2
11	30.0	32.0	30.6	33.2
12	29.0	32.0	30.4	34.0
13	28.5	33.0	30.2	34.2
14	28.0	35.0	30.2	34.6
15	33.0	35.0	32.2	34.9
16	33.0	35.0	33.0	35.2

1 巷道围岩传热平衡方程

矿井深部岩体可看作一个很大的蓄热体,当在其内部开挖巷道并连续通风后,岩体内部热量将逐渐传递给巷道风流并被排出,其整个传热过程为:岩体内部热量以导热的形式传递给巷道壁面,巷道壁面再以对流、辐射的形式与巷道内风流进行热交换,其中对流换热量包括以温差为动力的显热换热量和以水蒸气分压力差为动力的潜热换热量^[1-5]。根据能量守恒,有:

$$Q = Q_r + Q_x + Q_q \quad (1)$$

式中, Q :壁面总导热热流量, W ; Q_r :壁面与风流的辐射热流量, W ; Q_x :壁面与风流的对流显热换热量, W ; Q_q :壁面与风流水分蒸发潜热交换量, W 。

因为壁面与风流的辐射换热与热对流同时进行,再加上井下巷道四周围岩温度一般无差别,可忽略辐射热交换量。则,式(1)可简化为

$$Q = Q_x + Q_q \quad (2)$$

根据能量守恒和傅里叶导热定律,围岩内部温度场可用以下数学模型描述^[5-8]:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}(\lambda \frac{\partial t}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\lambda \frac{\partial t}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\lambda \frac{\partial t}{\partial z}) \quad (3)$$

式中, τ :时间, s ; t :围岩内部温度,℃; ρ :围岩密度, kg/m^3 ; c :围岩比热容, $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$; λ :围岩导热系数, $W/(m \cdot ^\circ C)$; x, y, z :直角坐标系的3个分量。

假设岩体均质、各向同性,则巷道各方向相同半径处可近似为等温面,则可近似将围岩内部导热简化为一维平面导热问题^[5-7]。则式(3)可简化为

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dx} \quad (4)$$

式中, x :距原岩恒温区边界的距离, m 。

围岩与风流的显热对流换热公式、潜热换热公式分别为^[1]

$$Q_x = h(t_w - t_f); \quad (5)$$

$$Q_q = \gamma h_m(d_w - d_f) \quad (6)$$

式中, t_w :巷道围岩壁面温度,℃; t_f :风流温度,℃; d_w :巷道围岩壁面温度对应饱和空气含湿量, kg/kg ; d_f :风流含湿量, kg/kg ; h :巷道表面对流换热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$; γ :水分蒸发汽化潜热, kJ/kg 。将式(4)~式(6)代入式(2),得到:

$$-\lambda \frac{dt}{dx} = h(t_w - t_f) + \gamma h_m(d_w - d_f) \quad (7)$$

对式(7)变形得:

$$t_w - t_f = \left[\left(-\lambda \frac{dt}{dx} \right) - \gamma h_m(d_w - d_f) \right] / h.$$

在高温矿井巷道围岩中,一般情况下, $\left(-\lambda \frac{dt}{dx} \right) \geq 0$ 。

当 $\left(-\lambda \frac{dt}{dx} \right) - \gamma h_m(d_w - d_f) > 0$ 时,即壁面热流量大于水分蒸发换热量, $t_w > t_f$;

当 $\left(-\lambda \frac{dt}{dx} \right) - \gamma h_m(d_w - d_f) < 0$ 时,即壁面热流量小于水分蒸发换热量, $t_w < t_f$;

当 $\left(-\lambda \frac{dt}{dx} \right) - \gamma h_m(d_w - d_f) = 0$ 时,即壁面热流量等于水分蒸发换热量, $t_w = t_f$ 。

如要从理论上分析可能出现壁面温度 t_w 小于风流干球温度 t_f 的条件,需先知道巷道围岩内部温度分布函数.

2 巷道围岩内温度分布

对于新开掘巷道,由于通风换热作用,通风初期自巷道壁面起岩体温度分布将随通风时间发生改变,围岩的传热处于非稳态过程;自巷道壁面起一定深度内存在一变温区,且此变温区厚度随通风时间加长而逐渐增大.但当通风时间足够长、变温区达到一定厚度时,围岩与风流间的换热将会形成一平衡状态.此时,巷道围岩内部温度场分布不再随时间发生改变,巷道围岩的壁面温度也保持稳定,围岩与风流间的净换热量也保持稳定^[6-8].则式(4)可变换成:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} = 0. \quad (8)$$

式(8)通解为

$$t = c_1 x + c_2. \quad (9)$$

式中, c_1, c_2 : 积分常数,由边界条件确定.

根据式(9)绘制图形如图1所示.根据矿井通风巷道的换热条件,当巷道经过足够长时间通风后,围岩内部导热及巷道壁面与空气的热湿交换过程基本保持稳定.此时,可引入2个边界条件对式(9)进行求解:围岩内深部岩石($x=0$ 处)温度基本保持不变,为第一类边界条件;巷道壁面($x=\delta$ 处)对流换热、换湿为第三类边界条件.将2个边界条件用数学表达式可描写为

$$\begin{aligned} x=0, t &= t_y; \\ x=\delta, -\lambda \frac{dt}{dx} &= \end{aligned} \quad (10)$$

$$h(t_w - t_f) + \gamma h_m (d_w - d_f).$$

式中, t_y : 围岩内部原岩温度, $^{\circ}\text{C}$.

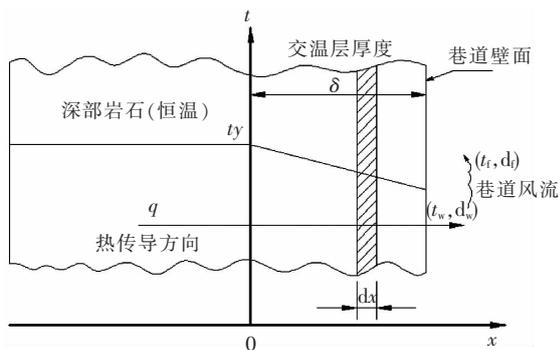


图1 围岩内温度分布

将上述边界条件带入式(9)解得,

$$c_1 = \frac{h(t_y - t_f) + \gamma h_m (d_w - d_f)}{h\delta + \lambda};$$

$$c_2 = t_y.$$

将 c_1, c_2 的值带入式(9),即可得到巷道围岩变温区内温度分布解析式:

$$t = \frac{h(t_y - t_f) + \gamma h_m (d_w - d_f)}{h\delta + \lambda} x + t_y. \quad (11)$$

3 巷道壁面温度

根据文献[9,10],潜热交换项可表示为

$$\gamma h_m (d_m - d_f) =$$

$$kh[at_w - b(t_w - t_1 v) + c](t_w - t_1). \quad (12)$$

式中, $k = 1670 \text{ m/B}$; m, a, b, c : 常数,根据湿空气状态参数表将饱和水蒸气分压力与温度之间拟合成直线关系时及误差修正时的一系列常数; B : 大气压力, Pa; t_1 : 巷道风流状态对应露点温度, $^{\circ}\text{C}$.

当 $x = \delta$ 时,将式(12)代入式(11)式得:

$$\begin{aligned} t_w = -\{h(t_y - t_f) + kh[at_w - b(t_w - t_1) + c] \\ (t_w - t_1)\} \frac{1}{(h\delta + \lambda)} \delta + t_y. \end{aligned} \quad (13)$$

解出 t_w 为

$$t_w = \frac{-u_1 \pm \sqrt{u_2 - u_3}}{2(a-b)} + t_1. \quad (14)$$

其中:

$$u_1 = \left(at_f + c + \frac{\lambda}{\delta h k} + \frac{1}{k} \right);$$

$$u_2 = \left(at_f + c + \frac{\lambda}{\delta h k} + \frac{1}{k} \right)^2;$$

$$u_3 = \frac{4(a-b)}{k} \left[t_y - t_f - (t_y - t_1) \left(\frac{\lambda}{\delta h} \right) + 1 \right].$$

一般情况下,矿井壁面温度 $t_w > 0$,所以上式根号前只能取“+”的结果.

4 壁面温度小于风流干球温度条件

由于计算巷道壁面温度的计算式(14)太复杂,比较其与风流干球温度的大小很难.需进行变换.令 $Y = t_w - t_1, X = t_f$,代入式(13)得:

$$Y + t_1 = -\frac{h(t_y - X) + kh[(a-b)Y + at_1 + c]Y}{h\delta + \lambda} \delta + t_y.$$

整理变换得:

$$X = k(a-b)Y^2 + \left[1 + \frac{\lambda}{h\delta} + k(at_1 + c) \right] Y +$$

$$\left(1 + \frac{\lambda}{h\delta} \right) t_1 - \frac{\lambda}{h\delta} t_y. \quad (15)$$

又令:

$$Z = t_w - t_f = t_w - t_1 + t_1 - t_f = Y - X + t_1.$$

将式(15)代入Z,得:

$$Z = -k(a-b)Y^2 - \left[\frac{\lambda}{h\delta} + k(at_1 + c) \right] Y +$$

$$\frac{\lambda}{h\delta}(t_y - t_1). \quad (16)$$

式(16)表明 Z 与 Y 之间是二次曲线关系. 为了直观表现此二次曲线在 (Y, Z) 直角坐标系的位置及变化趋势, 需绘制出此二次曲线. 为此, 必须确定出此二次曲线的 4 个特征点.

1) 二次曲线极值点确定.

对式(16)进行求导, 得:

$$\frac{dZ}{dY} = -2k(a-b)Y - \frac{\lambda}{h\delta} - k(at_1 + c).$$

再对式(16)进行二次求导, 得:

$$\frac{d^2Z}{dY^2} = -2k(a-b) < 0.$$

因此, 当 $\frac{dZ}{dY} = 0$, 即 $Y = -\frac{\lambda + hk\delta(at_1 + c)}{2hk\delta(a-b)}$ 时,

Z 取得极大值. Z 的极大值为

$$Z_{\max} = \frac{\lambda}{k\delta}(t_y - t_1) + \frac{[\lambda + hk\delta(at_1 + c)]^2}{4hk^2\delta^2(a-b)}.$$

式中, $t_y - t_1 > 0, a - b > 0$, 所以 $Z_{\max} > 0$.

2) 当 $Y = 0$ 时, $Z = \frac{\lambda}{k\delta}(t_y - t_1) > 0$.

3) 可以求出 Y 的 2 个不同的解:

$$Y_1 = \frac{-u_1 + \sqrt{u_2 + u_3}}{2k(a-b)};$$

$$Y_2 = \frac{-u_1 - \sqrt{u_2 + u_3}}{2k(a-b)}.$$

其中:

$$u_1 = \left[\frac{\lambda}{h\delta} + k(at_1 + c) \right];$$

$$u_2 = \left[\frac{\lambda}{h\delta} + k(at_1 + c) \right]^2;$$

$$u_3 = 4 \frac{k\lambda}{h\delta}(a-b)(t_y - t_1).$$

分析上述 2 个根可知: $Y_1 > 0, Y_2 < 0$. 根据上述 4 个特征点, 可定性将(16)式表示的二次曲线表示出来, 如图 2 所示.

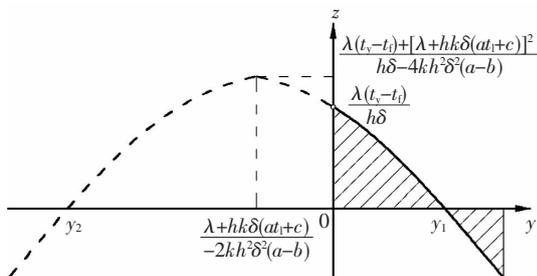


图 2 $Z=t_w-t_f$ 与 $Y=t_w-t_f$ 的关系

对于高温矿井井下巷道壁面温度一般大于巷道内空气状态露点温度, 即 $Y = t_w - t_1 > 0$, 所以图

2 中的 $Y > 0$ 部分曲线为有效曲线.

从图 2 中曲线可见: 当 $Y = t_w - t_1 > Y_1$ 时, $Z = t_w - t_f < 0$, 即 $t_w < t_f$, 湿润巷道壁面温度小于巷道内部风流干球温度.

5 结论

1) 高温矿井湿润巷道壁面温度可能高于、也可能低于风流干球温度.

2) 临界值 Y_1 可作为评判湿润巷道壁面温度高于或低于风流干球温度的依据.

3) 产生巷道局部不壁面温度低于风温的现象的主要原因是壁面水分蒸发吸热.

参考文献:

- [1] 余恒昌, 邓孝, 陈碧婉, 等. 矿山地热与热害治理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
- [2] 岑衍强, 胡春胜, 侯祺棕. 井巷围岩与风流间不稳定换热系数的探讨[J]. 阜新矿业学院报, 1987, 6(3): 105-113.
- [3] Yang X J, Han Q Y, Pang J W, et al. Progress of heat-hazard treatment in deep mines[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2011, 21(2): 295-299.
- [4] He M C. Application of HEMS cooling technology in deep mine heat hazard control[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2009, 19(3): 269-275.
- [5] He M C, Cao X L, Xie Q, et al. Principles and technology for stepwise utilization of resources for mitigating deep mine heat hazards[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2010, 20(1): 20-27.
- [6] 侯祺棕, 沈伯雄. 调热圈半径及其温度场的数值解算模型[J]. 湘潭矿业学院学报, 1997, 12(1): 9-16.
- [7] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 200.
- [8] 王波, 陈宝智, 陈喜山, 等. 井巷围岩与风流间热湿交换理论模型与应用[J]. 金属矿山, 2008(10): 84-86.
- [9] 刘何清, 王浩, 邵晓伟. 高温矿井湿润巷道表面与风流间热湿交换分析与简化计算[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 208-212.
- [10] 刘何清, 吴超. 矿井湿润巷道壁面对流换热简化计算方法研究[J]. 山东科技大学学报, 2010, 29(2): 57-62.