

文章编号:1000-582X(2013)04-125-07

热害矿井冷负荷分析

姬建虎^{1,2}, 廖强¹, 胡千庭², 陈孜虎²

(1. 重庆大学 动力工程学院, 重庆 400044; 2. 中国煤炭科工集团 重庆研究院, 重庆 400037)

摘要:以热害矿井风流为研究对象,建立能量平衡方程,通过理论推导出非稳定多股流冷负荷表达式、稳流冷负荷表达式、稳定流忽略动能变化、忽略势能变化、忽略风机做功影响等5种情况下冷负荷表达式,推导了井下湿空气焓变的表达式和围岩散热计算过程,案例分析和计算矿井冷负荷,对热害矿井治理和设计具有良好的理论指导意义。

关键词:热害矿井;冷负荷;矿井降温

中图分类号:TD727

文献标志码:A

Analysis on cooling load on hot mine

JI Jianhu^{1,2}, LIAO Qiang¹, HU Qianting², CHEN Zihu²

(1. College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Chongqing Branch, China Coal Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: Air stream of hot mines is taken as research object, and energy balance equation is established. Cooling load expressions under five different conditions are derived through strict theoretical derivation, i. e. unsteady multi-stream, steady flow, steady flow ignoring kinetic energy change, steady flow ignoring potential energy change and steady flow ignoring fan power change. Then the enthalpy variable expression of the subsurface moist air and heat calculating process of surrounding rock are deduced. Finally, Yong Chuan coal mine illustrates and summarizes the process of calculation cooling load quantitatively. It is conducive to scientifically manage hot mine and design mine ventilation.

Key words: hot mine; cooling load; mine cooling

据中国煤田地温观测资料统计,百米地温梯度为2~4℃/100m,根据第三次全国煤炭资源预测,埋深大于1000m的煤炭资源占全国预测总量的59.5%^[1],随着对能源需求的增加,矿井向深部开采,热害也越来越严重,国内外主要通过人工制冷方式来达到井下环境目标温度,需冷点的冷负荷成为能否达到目标温度的关键,冷负荷关系着能否达到目标温度,能否创造出舒适的工作环境。GB50418-2007《煤矿井下热害防治设计规范》中规

定冷负荷 $Q \geq G(i_1 - i_2)$ ^[2],式中符号见文献[2],文献[3-5]与文献[2]观点一致,文献[6-7]则认为冷负荷应为 $Q \geq G(i_1 - i_2) + \sum Q'$,即冷负荷为需冷点风流焓变加上井下需冷点各热源的放热量,以上2种不同的观点在实践中皆有,另外热害矿井热源中围岩散热计算最为复杂,围岩散热是引起水平巷道中风流干、湿温度变化的主要因素,因此研究围岩温度场分布规律及围岩散热计算方法,对预测巷道风流热参数、控制井下风流热环境和研究热害矿井需

收稿日期:2012-12-19

基金项目:科技部“十二五”科技支撑计划资助项目(2012BAK04B00);重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC, 2008AB7008)

作者简介:姬建虎(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要研究方向为煤矿安全、矿井降温及地热利用等。

廖强(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(Tel)023-65102474。

冷点的冷负荷,对我国热害矿井设计和管理工作具有重要意义。

目前,国内外学者对围岩散热现象进行了大量研究,主要方法有解析法和数值算法^[8-12],包括有限元、边界元、有限差分、无因次分析和解析计算等,解析法只能在很多失真假设条件下求解,计算围岩温度场的精度非常有限。所以围岩散热计算方法一般采用数值分析方法。文中在建立数值模型的基础上,对围岩散热的影响因素进行了充分了分析,得出了较合理围岩散热计算公式,为矿井热害治理提供了必要的理论支撑,在实际应用中具有重要意义。

1 冷负荷公式

能量守恒原则应用于系统中的能量变化时可表达为

$$\begin{aligned} & \text{进入系统的能量} - \text{离开系统的能量} = \\ & \text{系统中储存能量的增加。} \end{aligned} \quad (1)$$

为更加清晰分析矿井中风流守恒和变化规律,建立如图 1 所示模型,将系统分割为趋向于无穷小的微元过程,参考热力学分析看作可逆过程。图 1 中虚线部分表示风流控制系统,矿井风流在巷道中流动通过 1-1、2-2 位置,在 $d\tau$ 时间内进行一个微元过程,质量为 δm_1 、体积为 dV_1 的微元风流流进口截面 1-1,风流状态的参数分变为进入系统总能量 E_1 、压力 P_1 、速度 v_1 、标高 Z_1 ; 2-2 处风流状态的参数分变为进入系统总能量 E_2 、压力 P_2 、速度 v_2 、标高 Z_2 。质量为 δm_2 、体积为 dV_2 的微元风流流出截面 2-2,同时系统吸收围岩散热、机电散热、人体散热等热量 δQ ,风机对系统做功 δW ,完成该微元过程后系统内风流质量增加了 dm ,系统总能量增加了 dE_{cv} ,系统总能量 E 包括热力学内能 U (内能又包括化学能、核能和内热能,用在工程上这里只考虑内热能)、宏观动能 E_k 、宏观势能 E_p ,则:

$$E = U + E_k + E_p. \quad (2)$$

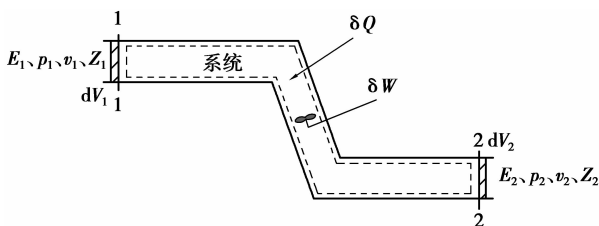


图 1 风流能量守恒模型

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (3)$$

式中: m 为风流质量, kg ; v 为风流速度, m/s 。

$$E_p = mgz, \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; z 为风流标高差值, m 。

由式(2)~(4),得

$$E = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz. \quad (5)$$

单位质量风流的总能,即比总能 e 可写为

$$e = u + \frac{1}{2}v^2 + gz. \quad (6)$$

分析微元过程的能量平衡:

$$\text{进入系统的能量: } dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q + \delta W, \quad (7)$$

$$\text{离开系统的能量: } dE_2 + p_2 dV_2, \quad (8)$$

$$\text{控制系统的储存能增量: } dE_{cv}. \quad (9)$$

式(7)~(9)中: $dE_1 = d(U_1 + E_{k1} + E_{p1})$ 、 $dE_2 = d(U_2 + E_{k2} + E_{p2})$ 分别为微元过程中风流带进和带出系统的总能。

$dE_{cv} = d(U_1 + E_{k1} + E_{p1})_{cv}$ 是控制容积内总能量的增量。 $p_1 dV_1$ 、 $p_2 dV_2$ 分别为微元风流带入、带出的推动功,根据能量表达式(1),得

$$dE_1 + p_1 dV_1 + \delta Q + \delta W - (dE_2 + p_2 dV_2) = dE_{cv}. \quad (10)$$

$$\text{即 } d(U_1 + E_{k1} + E_{p1}) + p_1 dV_1 + \delta Q + \delta W -$$

$$d(U_2 + E_{k2} + E_{p2}) - p_2 dV_2 = dE_{cv}$$

$$\delta Q + \delta W + dU_1 + p_1 dV_1 + dE_{k1} + dE_{p1} -$$

$$(dU_2 + p_2 dV_2 + dE_{k2} + dE_{p2}) = dE_{cv}$$

$$\text{由 } dU = u\delta m, dV = v\delta m, dE_k = \frac{1}{2}v^2\delta m, dE_p = gz\delta m$$

代入上式,得

$$\begin{aligned} & \left(u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1\right)\delta m_1 - \left(u_2 + p_2 v_2 + \right. \\ & \left. \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2\right)\delta m_2 + \delta Q + \delta W = dE_{cv}, \end{aligned} \quad (11)$$

由焓 $h = u + pv$ 代入上式,得

$$\begin{aligned} & \left(h_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1\right)\delta m_1 - \left(h_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2\right)\delta m_2 + \\ & \delta Q + \delta W = dE_{cv}. \end{aligned} \quad (12)$$

如果流进、流出控制体的风流各有若干股,则上式可写为

$$\begin{aligned} & \sum_i \left(h_1 + \frac{1}{2}v_1^2 + gz_1\right)\delta m_1 - \sum_j \left(h_2 + \frac{1}{2}v_2^2 + gz_2\right)\delta m_2 + \\ & \delta Q + \delta W = dE_{cv}. \end{aligned} \quad (13)$$

如果考虑单位时间内系统能量关系,仅需在上式两边各除以 $d\tau$ 即可,并设 $\frac{\delta Q}{d\tau} = q$, $\frac{\delta m}{d\tau} = \dot{m}$, $\frac{\delta W}{d\tau} = w$, q 、 \dot{m} 、 w 分别表示单位时间的热流量、质量流量

和内部功率。代入上式得出矿井风流能量一般表达式

$$\sum_i \left(h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 \right) \dot{m}_1 - \sum_j \left(h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \right) \dot{m}_2 + q + w = \frac{dE_{cv}}{d\tau} \quad (14)$$

风流流动为稳定流动时,系统参数不随时间变化,因此 $\frac{dE_{cv}}{d\tau} = 0$, $\sum \dot{m}_1 = \sum \dot{m}_2$, 如果只有一股风流,即对于单一巷道中风流系统,其单位质量能量平衡方程式可写为

$$h_1 - h_2 + \frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} v_2^2 + g z_1 - g z_2 + q + w = 0, \quad (15)$$

式中: q 为风流系统吸收热量,指吸收围岩散热、机电散热、人体散热等散热量 $\sum Q_{热}$, 如果加入制冷系统冷负荷为 $Q_{冷}$, 则 $q = Q_{热} - Q_{冷}$ 。代入上式,整理得

$$Q_{冷} = h_1 - h_2 + \frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} v_2^2 + g z_1 - g z_2 + \sum Q_{热} + w, \quad (16)$$

$$Q_{冷} = \Delta h + \frac{1}{2} \Delta v^2 + g \Delta z + \sum Q_{热} + w. \quad (17)$$

式(16)、(17)就是冷负荷在稳定风流状况下完整表达式。

上述冷负荷能量平衡方程,根据矿井不同情况,可分解为如下方程:

1) 非稳定多股流冷负荷表达式,由 $q = Q_{热} - Q_{冷}$ 代入上式得出

$$Q_{冷} = \sum_i \left(h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 \right) \dot{m}_1 - \sum_j \left(h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \right) \dot{m}_2 + \sum Q_{热} + w - \frac{dE_{cv}}{d\tau} \quad (18)$$

2) 稳流冷负荷表达式

$$Q_{冷} = h_1 - h_2 + \frac{1}{2} v_1^2 - \frac{1}{2} v_2^2 + g z_1 - g z_2 + \sum Q_{热} + w. \quad (19)$$

3) 稳定流动能变化可忽略的情况

$$Q_{冷} = \Delta h + g \Delta z + \sum Q_{热} + w. \quad (20)$$

4) 稳定流动能和势能变化可忽略的情况

$$Q_{冷} = \Delta h + \sum Q_{热} + w. \quad (21)$$

5) 稳定流动能和势能变化可忽略、且没有风机做功的情况

$$Q_{冷} = \Delta h + \sum Q_{热} \quad (22)$$

由上述能量平衡方程可知,热害矿井某一需冷

点(如掘进工作面、采煤工作面)的冷负荷的计算,应根据具体情况具体分析,如情况(5)计算冷负荷时,应设定目标温度,得出相应风流焓变 Δh , 并以目标温度计算需冷点各热源放热量之和 $\sum Q_{热}$, $\sum Q_{热}$ 与 Δh 之和只是最小冷负荷 $Q_{冷}$, 其中焓变 Δh 和 $\sum Q_{热}$ 是计算冷负荷一个关键的参数。

2 焓变

热害矿井下的风流为湿空气,且湿度都比较高,采掘工作面甚至常常达到 90% 以上,因此不能用 $H_2 - H_1 = C_{pa}(t_2 - t_1)$ 来衡量湿空气的焓变,而应按照国家理想气体混合物的性质,焓 H 为干空气的焓与水蒸气的焓之和,即 $H = H_{air} + H_{water}$ 。假设这里有 1 kg 的 0 °C 的干空气、 d kg 的水位于不同的容器,现对其加热,使空气温度达到 t_d 。同理对水加热,直到水蒸发,再继续加热,使水蒸气干球温度也为 t_d , 最后将空气和水蒸气混合得到干球温度为 t_d 、湿球温度为 t_w 的 $(1+d)$ kg 的非饱和湿空气。

通常热工计算中只要求确定热力变化过程的焓值的变化量,理想气体通常取 0 °C 的焓值为零^[13], 这样就可以很好定量上述的加热量:

1) 1 kg 干空气从 0 °C 到 t_d 吸收的热量为

$$q_{air} = 1C_{pa}t_d$$

2) 根据容器中的压力的不同,0 °C 的水加热变成 t_d 的水蒸气可按以下 3 种方式进行:

① d kg 的 0 °C 的水加热变成 t_d 的水蒸气:

$$q_{water} = L(0)d + dC_{pa}t_d,$$

式中, $L(0)$ 为 0 °C 的蒸发潜热, kJ/kg;

② 水温度从 0 °C 升至 t_d , 然后蒸发成水蒸气:

$$q_{water} = L(t_d)X + dC_w t_d,$$

式中: $L(t_d)$ 为 t_d °C 的蒸发潜热, kJ/kg; C_w 为水的比热, 4 187 J/kg · °C。

③ 水升至任意中间温度 t , 然后蒸发,再继续加热使蒸汽温度达到 t_d :

$$q_{water} = dC_w t + L(t)d + dC_{pv}(t_d - t),$$

式中 $L(t)$ 为 t °C 的蒸发潜热, kJ/kg。

3 种情况过程不同,但结果一样。为易于理解,取第 3 种情况,设中间温度 t 为空气、水蒸气的混合物的湿球温度 t_w , 这样上述系统相对于 0 °C 的焓变为

$$H = q_{air} + q_{water} = C_{pa}t_d + d[C_w t_w + L + C_{pa}(t_d - t_w)] \quad (23)$$

温度范围变化不大(不超过 100 °C), 湿空气的焓 H 可用以下公式^[15]:

$$H = 1.005t + d(2501 + 1.86t),$$

$$H = 1.005t + dh$$

式中: d 为湿空气的含湿量, kg/kg ; t 为湿空气干球温度, $^{\circ}\text{C}$; h'' 为 t $^{\circ}\text{C}$ 时的饱和水蒸气焓值, kJ/kg 。

湿空气中水蒸气的质量是变化的, 干空气的质量是稳定的, 因此湿空气的焓 H 是相对于单位质量的干空气而言的^[15], 单位为 J/kg 。

3 热源散热

热害矿井热源 $\sum Q_{\text{热}}$ 主要包括空气压缩热、围岩散热、机电设备散热、氧化散热、爆破热及人体新陈代谢散热等, 除围岩散热外, 其余热源可参考文献[16]通过相应公式直接计算得出。围岩散热是热害矿井主要热源之一, 计算过程相对复杂, 因此下面主要讨论围岩散热。

3.1 围岩换热系数研究

将巷道看作圆形通道, 并以 z 、 r 、 φ 柱坐标的方向, z 表示巷道长度方向坐标, r 表示巷道径向长度, φ 表示 r 与水平间的夹角, t 表示时间, 如图 2 所示,

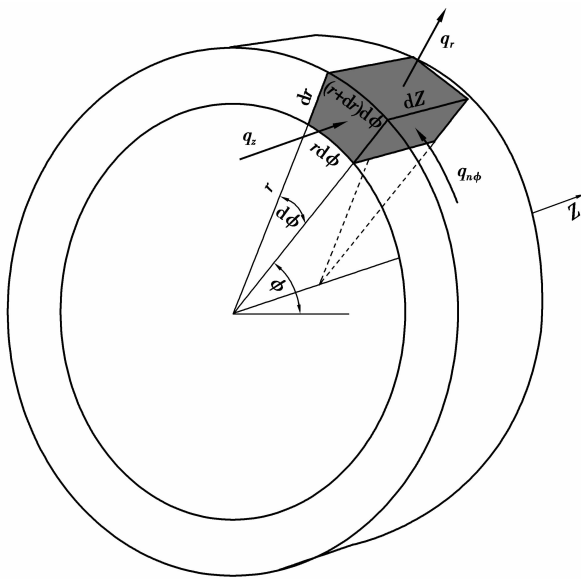


图 2 传热模型

利用柱坐标系得出传热模型如下^[14]:

$$\frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (24)$$

式中: K 为围岩导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ 为围岩密度, kg/m^3 ; c 为围岩比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

对于热害矿井中巷道风流来说, 风流被加热是因为巷道围岩对风流散热并在巷道长度方向积累而显现的。在巷道长度方向 z 和环巷道角度方向 φ 为

空气之间的换热, 相对围岩散热很小, 因此忽略巷道长度方向和角度方向上的传热, 即

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial \varphi} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} = 0$$

所以式(24)变为

$$\frac{k}{\rho c} \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (25)$$

由热扩散系数 $a = \frac{k}{\rho c}$, 则上式(25)变为

$$a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (26)$$

再解方程, 半径无量纲化:

$$r_a = \frac{r}{r_a}, \quad (27)$$

式中, $r_a = \frac{\text{周长}}{2\pi}$, 为巷道有效半径。

时间无量纲化, 傅立叶数

$$F_o = \frac{at}{r_a^2}. \quad (28)$$

将式(27)、(28)代入式(26), 得

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial (r_a r_a)^2} + \frac{1}{r_a r_a} \frac{\partial \theta}{\partial (r_a r_a)} = \frac{1}{a} \frac{\partial \theta}{\partial \left(\frac{F_o r_a^2}{a} \right)}, \quad (29)$$

消去常数 r_a 和 a , 得

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial (r_d)^2} + \frac{1}{r_d} \frac{\partial \theta}{\partial (r_d)} = \frac{\partial \theta}{\partial (F_o)}. \quad (30)$$

当风流在巷道壁面上流动时, 由于粘性的作用, 在贴壁处流体没有相对于壁面的流动, 称之为贴壁处的无滑移边界条件, 壁面和风流间的热量传递必须穿过这个流体层, 而穿过不流动的流体层的热量传递方式只能是导热^[17], 应用傅立叶定律于贴壁流体层, 可得

$$q = k \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_s, \quad (31)$$

式中: k 为风流导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$; $k \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_s$ 为风流与围岩贴壁面上法线方向上流体温度梯度, 以下标 s 表示。

围岩壁面与风流间的对流换热应用牛顿冷却定律

$$q = h(\theta_s - \theta_d), \quad (32)$$

式中: θ_s 为围岩表面温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_d 为巷道风流干球温度, $^{\circ}\text{C}$; h 为表面对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

由式(31)、(32)得

$$q = k \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_s = h(\theta_s - \theta_d). \quad (33)$$

将边界层的温度梯度无量纲化, 得

$$G = \frac{r_a}{t_{\text{VRT}} - \theta_d} \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_s, \quad (34)$$

式中: t_{VRT} 为原始岩温 (virgin rock temperature), $^{\circ}\text{C}$;

将式(34)代入式(33),得

$$G(t_{\text{VRT}} - \theta_d) = \frac{hr_a}{k}(\theta_s - \theta_d). \quad (35)$$

由于无量纲传热系数毕渥数 $Bi = \frac{hr_a}{k}$, 式(35)

变为

$$\theta_s = \frac{G}{Bi}(t_{\text{VRT}} - \theta_d) + \theta_d. \quad (36)$$

至此,得出计算围岩对流散热方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta}{\partial (r_d)^2} + \frac{1}{r_d} \frac{\partial \theta}{\partial (r_d)} &= \frac{\partial \theta}{\partial (F_o)} \\ \theta(0, x) &= t_{\text{VRT}} \\ \theta(t, 0) &= \theta_s \\ \theta_s &= \frac{G}{Bi}(t_{\text{VRT}} - \theta_d) + \theta_d \end{aligned} \right\}. \quad (37)$$

解上述方程组,即可得出无量纲温度梯度 G 。

3.2 围岩辐射换热

围岩散热除了对流散热之外,还有辐射散热。辐射一般采用根据斯特藩-玻耳兹曼定律,在地下环境工程中,更加实用辐射换热公式^[14]:

$$q_r = h_r(\theta_s - \theta_d)F_{ev}, \quad (38)$$

式中: q_r 为辐射散热, W/m^2 ; h_r 为辐射换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; θ_s 为围岩表面温度, $^{\circ}\text{C}$; θ_d 为巷道风流干球温度, $^{\circ}\text{C}$; F_{ev} 为包含辐射率和角系数的复合系数,对于粗糙的表面,一般大于 0.95。对于单位面积对风流中的水蒸气的角系数,或对大多数围岩表面,形成一个整体,因此取 F_{ev} 的值为 1。

对于具有 $10 \sim 40$ $^{\circ}\text{C}$ 的表面温度,辐射换热系数为 $5 \sim 7$ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$,更加准确的估值按下式计算

$$h_r = 4 \times 5.67 \times 10^{-2} \times T_{av}^3, \quad (39)$$

式中, T_{av} 为两表面的平均绝对温度, K ,实践中可以看作风流的干球温度。

通常 h_r 比对流换热系数 h_c 要小很多。风流中水蒸气对辐射热的吸收率的经验公式

$$a_b = 0.104 \ln(147 \times L), \quad (40)$$

式中: L 为风流通过的辐射换热距离, m 。

因此,围岩和风流间有效辐射换热系数变为 $a_b h_r$,总换热系数为

$$h = h_c + a_b h_r. \quad (41)$$

3.3 围岩散热计算步骤

整理以上所述围岩散热过程,围岩散热计算步

骤如下:

- 1)整理计算基本参数;
- 2) Nu 计算;
- 3) 计算综合换热系数 $h = h_c + a_b h_r$, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$;
- 4)计算 Bi ;
- 6)计算 F_o ;
- 7)计算无量纲温度梯度 G ;
- 8)计算热流密度 $q = h \frac{G}{Bi}(t_{\text{VRT}} - \theta_d)$, W/m^2 ;
- 9)计算围岩对风流的散热量 $\frac{q \times \text{周长} \times \text{风流} \times \text{风流长度}}{1000}$ 。

4 矿井冷负荷应用

热害矿井下的冷负荷的计算通常只计算采、掘工作面 and 硐室等需冷点的制冷量,该条件下巷道风流高差一般不大,风流量流速也比较稳定,如果再忽略风机对风流的影响,则冷负荷应按照式(22)计算,矿井各需冷点设计冷负荷应为

$$Q_{\text{冷}} \geq G(h_2 - h_1) + \sum Q', \quad (42)$$

式中: $Q_{\text{冷}}$ 为需冷点的冷负荷, kW ; G 为需冷处的风量质量流量, kg/s ; h_1 为需冷处达到降温目标对应的焓, kJ/kg ; h_2 为需冷处风流的焓, kJ/kg ; $\sum Q'$ 为需冷点最大热负荷,总散热量, kW ,由热源分析计算得出。

根据式(23)、(42)、围岩散热计算过程及其他矿井热源散热,结合永川煤矿实测数据^[18-19],按国内外通常做法将 28 $^{\circ}\text{C}$ 作为目标温度,计算矿井各需冷点的冷负荷(见表1),需冷点 -37506 、 -37107 、 -37403 、 -37616 为 4 个采煤工作面,其余 6 个需冷点为掘进工作面,工作面冷负荷为 $300 \sim 500$ kW ,掘进面为 $200 \sim 320$ kW ,为计算简便,工作面冷负荷平衡取 400 kW ,掘进面取 260 kW ,则 4 个工作面 6 个掘进面共需 3160 kW ,再乘以附加系数 1.2,则总冷负荷为 3792 kW 。计算结果忽略了风机对风流做功、动能差、势能差,且风流为单股稳定流的情况。设计热害矿井制冷量时,除了应充分考虑上述因素外,还应考虑管道设备冷损、排热等,确保冷量充足,能够达到目标温度。

表1 矿井各需冷点的冷负荷计算

需冷点	风量 G/ (m ³ · min ⁻¹)	风量 G/ (kg · s ⁻¹)	最热时温度		目标温度		焓变 G(h ₂ -h ₁)/ kW	热源散热之 和 ∑Q'/kW	冷负荷/ kW
			干球温度/℃	相对湿度/%	干球温度/℃	相对湿度/%			
-37506	471	9.50	32.5	90	28	90	216		
-37107	442	8.91	31.5	90	28	90	158	150~250	300~500
-37403	548	11.05	32.5	90	28	90	252		
-37616	530	10.69	32.0	90	28	90	216		
-37508	151	3.05	35.5	90	28	90	120		
-37109	141	2.84	33.0	90	28	90	72		
-350 延伸	214	4.32	30.5	90	28	90	55	80~200	200~320
下北一	148	2.98	33.0	90	28	90	76		
-37404	132	2.66	32.6	90	28	90	62		
下南二	164	3.31	34.0	90	28	90	102		

5 结 论

热害矿井冷负荷计算公式应根据不同条件分辨选取,如式(18)~(22)所示,热害矿井下空气为湿空气,湿空气焓变应按照式(23)计算,也可通过湿空气 $h-d$ 图描出过程起始点读出和计算其他热力参数。计算热害矿井热源时,还应充分研究围岩散热条件、潮湿程度等。实践中设计热害矿井制冷量时,除了要考虑上述因素外,还应考虑管道设备冷损、排热等情况,确保冷量充足,能够到达设计要求。通过矿井冷负荷计算,为热害矿井的治理工作提供理论支撑,为矿井降温设备及工程提供设计依据,达到有解决矿井热害的目的。

参考文献:

- [1] 王永炜. 中国煤炭资源分布现状和远景预测[J]. 煤, 2007(5): 44-45.
WANG Yongwei. China coal resource distribution and perspective prediction[J]. Coal, 2007(5): 44-45.
- [2] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB50418-2007 煤矿井下热害防治设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [3] 曲方, 秦跃平. 高温矿井集中生产对采煤工作面气候及制冷量的影响[J]. 山西矿业学院学报, 1996, 14(4): 341-349.
QU Fang, QIN Yueping. Effects of concentrating production on the climate and refrigerating capacity of coal face in hot mine[J]. Shanxi Mining Institute Learned Journal, 1996, 14(4): 345-349.
- [4] 柳源, 菅丛光, 陈宁, 等. 高温矿井冰输冷降温系统设计[J]. 能源与环境, 2010(4): 112-113.
LIU Yuan, JIAN Congguang, CHEN Ning, et al. Design to be ice cold cooling system in high temperature

mine [J]. Energy and Environment, 2010, (4): 112-113.

- [5] 吴亚非. 关于高温矿井回采工作面降温设计温度的讨论[J]. 煤炭工程, 2009(9): 22-24.
WU Yafei. Discussion on the designed cooling temperature of coal face in high temperature mine[J]. Coal Engineering, 2009(9): 22-24.
- [6] 胡春胜. 矿井集中空调技术中几个关键问题的探讨[J]. 煤矿设计, 1998(1): 43-46.
HU Chunsheng. Several key problems on mine central air conditioning technology[J]. Coal Mine Design, 1998 (1): 43-46.
- [7] 王德银, 胡春胜, 霍正齐. 矿用制冷设备的研制与应用[J]. 矿业安全与环保, 2005, 32(4): 42-45.
WANG Deyin, HU Chunsheng, HUO Zhengqi. Development and application of mine refrigeration equipment [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2005, 32(4): 42-45.
- [8] Sasaki K, Miyakoshi H, Mashiba K, et al. Analytical system for ventilation simulators with skyline nodal pressure method and practical estimate system for underground mine air-conditioning[C]// Proceedings of the 26th Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, September 16-20, 1996, The Pennsylvania State University, University Park, USA. Pennsylvania: The Society of Mining, Metallurgy and Explosion Inc., 1996: 393-399.
- [9] Starfield A M, Bleloch A L. A new method for the computation of heat and moisture transfer in partly wet airway[J]. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1983, 83(11): 263-269.
- [10] 高建良, 张学博. 围岩散热计算及壁面水分蒸发的处理[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(9): 23-28.
GAO Jianliang, ZHANG Xuebo. Treatment of water evaporation on airway surface in calculation of strata

- rock heat [J]. China Safety Science Journal, 2006, 16(9): 23-28.
- [11] 秦跃平, 党海政, 刘爱明. 用边界单元法求解巷道围岩的散热量[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(4): 403-406.
- QIN Yueping, DANG Haizheng, LIU Aiming. Calculation of heat quantity from rocks around roadways with boundary element method[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(4): 403-406.
- [12] 吴强, 秦跃平, 郭亮, 等. 巷道围岩非稳态温度场有限元分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2002, 21(5): 604-607.
- WU Qiang, QIN Yueping, GUO Liang, et al. Analysis of unsteady temperature field in wall rock by finite element method [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2002, 21(5): 604-607.
- [13] 沈维道, 童钧耕. 工程热力学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [14] McPherson M J. Subsurface ventilation and environmental engineering[M]. Berlin: Springer, 1993.
- [15] 曾丹苓, 敖越, 张新铭, 等. 工程热力学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2005, 5: 185.
- [16] 张荣立, 何国纬, 李铎. 采矿工程设计手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2003.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- (编辑 陈移峰)

~~~~~

(上接第 102 页)

- [5] Barnsley R, Peacock N J, Dunn J, et al. Versatile high resolution crystal spectrometer with x-ray charge coupled device detector [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(4): 2388-22408.
- [6] Marshall F J, McKenty P W, Delettretz J A, et al. Plasma-density determination from x-ray radiography of laser-driven spherical implosions[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(18): 185004.
- [7] 王洪建, 肖沙里, 施军, 等. 用于激光等离子体 X 射线诊断的谱仪[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(8): 864-868.
- WANG Hongjian, XIAO Shali, SHI Jun, et al. X-ray diagnosis spectroscopy of laser-produced plasma [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(8): 864-868.
- [8] Fujioka S, Fujiwara T, Tanabe M, et al. Monochromatic x-ray radiography for areal-density measurement of inertial fusion energy fuel in fast ignition experiment [J]. Review of Scientific Instruments, 2010, 81(10): 509-511.
- [9] 阳庆国, 李泽仁, 彭其先, 等. 激光驱动 X 射线单色背光照相系统优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2008, 20(12): 1983-1988.
- YANG Qingguo, LI Zeren, PENG Qixian, et al. Optimum design of laser-driven-monochromatic x-ray backlighting system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(12): 1983-1988.
- [10] Bennett G R, Smith I C, Shores J E, et al. 2-20 ns interframe time 2-frame 6.151 keV x-ray imaging on the recently upgraded Z accelerator; a progress report [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 914-916.
- [11] Sinars D B, Cuneo M E, Bennett G R, et al. Monochromatic x-ray backlighting of wire-array z-pinch plasmas using spherically bent quartz crystals [J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(3): 2202-2206.
- [12] Pisani F, Koenig M, Batani D, et al. Toroidal crystal spectrometer for time-resolved x-ray absorption diagnostic in dense plasmas [J]. Review of Scientific Instruments, 1999, 70(8): 3314-3318.
- [13] Tanabe M, Fujiwara T, Fujioka S, et al. Monochromatic x-ray sampling streak imager for fast-ignitor plasma observation [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 908-910.
- [14] Fujita K, Nishimura H, Niki I, et al. Monochromatic x-ray imaging with bent crystals for laser fusion research [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(1): 744-747.
- [15] 施军, 肖沙里, 王洪建, 等. 球面弯晶分析器研制[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(4): 397-400.
- SHI Jun, XIAO Shali, WANG Hongjian, et al. Research and development of a spherical bent crystal analyzer [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(4): 397-400.
- [16] Xiao S L, Wang H J, Shi J, et al. High resolution x-ray spherically bent crystal spectrometer for laser-produced plasma diagnostics [J]. Chinese Optics Letters, 2009, 7(1): 92-94.
- (编辑 陈移峰)