



高温采面热力特性的研究

中国矿业大学北京研究生部 张素芬 杨国栋 秦跃平

据统计目前我国已有80多对矿井的部分采面出现了气温超限现象,有的采面气温超过30℃。高温高湿的闷热环境,给矿井生产带来不利和危害。正确的治理决策,基于矿井空气热力学理论和降温技术的研究。采面是井下风流的主要升温段,是研究的重点,以便掌握采面的给热形式、给热能力及其过程等有关规律,建立采面气温预测式,确定以降温为目的所需的配风量、采面入风温度以及机械制冷设备的产冷量等。所以高温采面热力性质的研究是矿井降温技术中的重要任务之一。风流流经采面时,引起风流升温的有围岩放热、氧化散热、采空区外泄的热风、机电设备及人体散热等热源,亦有起冷却作用的如走向长壁U型采面上行风流的膨胀吸热以及井下水分蒸发吸热等。由于篇幅所限,本文只重点对一般巷道有所不同的围岩、氧化等热源,结合平八矿实例,对其测定方法和计算等进行探讨和介绍。

1 测定设计

1.1 测定方法与测点布置

根据能量守恒与转换定律可知,风流沿采面流动中在前述各种产、耗热因素影响下,引起采面始、末断面上风流焓值的改变。当忽略风流动能变化的影响,有G(kg/s)质量风流流过采面时,其焓值方程为

$$\begin{aligned} G(h_2 - h_1) &= \Sigma Q \\ &= Q_{RO} + Q_{ox} + Q_f + \\ &\quad + Q_m + Q_r + GQ_p \quad (1) \end{aligned}$$

式中 h_1 、 h_2 ——采面始、末断面上风流的比焓, $h_2 - h_1 = C_p(t_2 -$

$$t_1) + 0.01r(d_2 - d_1),$$

$$\text{kJ/kg}; \quad (a)$$

C_p ——空气的定压质量比热,
 $C_p = 1.01 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$;

r ——0℃时水蒸汽的汽化潜热,
 $r = 2501 \text{kJ/kg}$;

t_1 、 t_2 ——始末断面上空气温度,
℃;

d_1 、 d_2 ——始末断面上空气含湿量,
 $d = 622 \times \varphi P_s / (B - \varphi P_s)$,
g/kg(干空气); (b)

φ ——空气相对湿度, %;

B ——气压, Pa;

P_s ——饱和蒸汽压力, $P_s =$
 $601.6 \times \exp\left(\frac{17.27t}{237.3 + t}\right)$,
Pa; (c)

G ——通过采面的质量风量,
 $G = Q\rho_{1,2}$, kg/s; (d)

Q ——通过采面的容积风量,
 $Q = (\omega_1 s_1 + \omega_2 s_2) / 2$,
 m^3/s ; (e)

ω_1 、 ω_2 ——始末断面上平均风速,
m/s;

s_1 、 s_2 ——始末断面面积, m^2 ;

$\rho_{1,2}$ ——采面空气平均密度, $\rho_{1,2} =$
 $(\rho_1 + \rho_2) / 2$, kg/m^3 (f)

$$\rho = \frac{B}{287(273 + t)} -$$

$$- 0.00115 \frac{\varphi P_s}{273 + t},$$

$$\text{kg}/\text{m}^3; \quad (g)$$

Q_m ——采面机电设备运转时产热。采面的采煤机、输送机等设备从馈电线路接受的电能，几乎全部转为热能传给风流，故
 $Q_m = N_m \cdot K_m, \text{kW}; (h)$

N_m ——采面设备的总装机容量，kW;

K_m ——运转时间等综合系数;

Q_r ——人体散热，人体以对流、辐射、和汗液蒸发换热形式用显热、潜热传给风流，其总散热量为
 $Q_r = q_r \cdot n, \text{kW}; (i)$

q_r ——平均每人发热量，kW/人;

n ——同时工作最多人数，人;

Q_p ——风流沿走向长壁工作面上行膨胀吸热， $Q_p = G(Z_1 - Z_2)g \times 10^{-3}, \text{kW}; (j)$

Z_1, Z_2 ——始末断面中心标高，m;

g ——重力加速度;

Q_{RO} ——围岩散热量，
 $Q_{RO} = K_r(t_{0,1,2} - t_{a,1,2}), \text{kW}; (k)$

$t_{a,1,2}$ ——巷道始末端间平均空气温度， $^{\circ}\text{C}$;

$t_{0,1,2}$ ——在 Z_1, Z_2 标高内平均原岩温度， $t_{0,1,2} = t_0 + T_g(\bar{Z}_{1,2} - Z_0), ^{\circ}\text{C}; (l)$

t_0, Z_0 ——恒温带岩温与标高;

T_g ——地温梯度， $^{\circ}\text{C}/\text{m}$;

$\bar{Z}_{1,2}$ ——采面平均标高， $\bar{Z}_{1,2} = (Z_1 + Z_2)/2, \text{m}; (m)$

K_r ——风流与采面围岩不稳定换热系数， kW/m^2 。常年通风巷道的 K_r 与巷道存在时间、风速、潮湿程度等主要因素有关，对于影响回

采工作面 K_r 的主要因素和函数关系待查，是测试的任务之一;

Q_{ox} ——采面内氧化散热，其计算式为 $\dot{Q}_{ox} = q_0 \omega^{0.8} \cdot u \cdot L, \text{kW}; (n)$

u, L ——采面平均断面周长和采面长;

q_0 ——当量氧化散热系数， kW/m^2 ，该量需测试待查;

Q_f ——老塘外泄总热量，它与漏风量、热风温度等因素有关，待查； $Q_f = f(Q_t, t_k, \dots)$ 。 (o)

由(a)~(o)各中间式说明，(1)式中除 Q_{RO}, Q_{ox}, Q_f 三项外，其余各项均可用仪表直接测量或由设计（或实际）数据进行计算求出。故依据上述原理采用实测风流焓值改变量法来测算 Q_{RO}, Q_{ox}, Q_f 中有关因素的数值。为了测试数据准确且有代表性：①选择具有代表性的高温采面（指不同的煤层、标高、回采工艺）进行测试；②测试时间选在检修班或停产日，避开机电设备散热（ Q_m ）和过多人体散热（ Q_r ）的影响，以及维持采面通风制度的相对稳定性。测点的布置要根据采面具体条件和测试精度要求而定。例如平八矿 J_{-1218}, J_{-1413} 采面的测点布置（图1），自下口起向上每隔15m（约10台液压支架）布置一个测点，并按序编号。

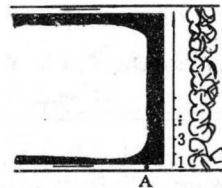


图 1

1.2 测试工作与组织

在每一测定断面上皆采集风流的干、湿温度及气压、风速、断面尺寸、测点间距、采空区漏风、老塘内气温等。

测试仪表有风扇式干湿球温度计、最高温度计(分度值为 0.1°C ,经二级标准温度计校正),空盒气压计,中、微速风表,热球式风速仪,半导体热敏电阻温度计和烟雾管、皮尺等。测定工作由2~3人组成,每次均由采面下口向上逐点按顺序测量,每个测点各种参量均测3次以上,使相邻两次读值接近或与平均值之差不超过5%。当采面空间不能用风表测风时就用热线风速仪按图2测点风速,最后取其平均值。根据多次观测决定在支架后2m处测采空区气温(用最高温度计或热敏电阻点温度计测)。在支架缝隙中用烟雾管发烟观察采空区漏风情况,定性判别漏风方向与大小,并在采面下顺槽内选一测试断面(A点)定时测风,用于验证各测点的风量和采空区漏风情况。

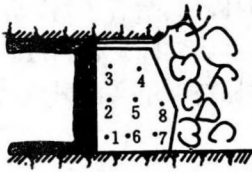


图 2

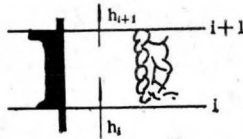


图 3

2 测试数据的处理与分析

2.1 采面风流热参数及风量的变化状况

根据对平八矿两个高温采面的测试结果表明,风流由下口至上口气压量线性下降;气温呈线性增加,温差随深度增加而增加;相对湿度较高且无明显变化,计算中取值98%,含湿量呈线性增加;风量沿采面全长无明显变化,相邻测试断面的风量之差以及各测点与下顺槽基点的风量差或小于或接近5%,并配合烟雾管的观测,认为平八矿西翼的采面在其顶板岩性的条件下,采后冒落较严实,老塘无热风外泄。支架后2m处采空区气温与同一测试断面的气温很相近。故在(1)式中可忽略 Q_r 项。

2.2 采面围岩与风流间的换热系数、当量氧化散热系数的确定及计算机程序

鉴于上述,待测算的只有 Q_{RO} 与 Q_{ox} ,测算的目的是确定(k)、(n)式中的 K_r 与 q_{ox} 。现任取一小段工作面(图3)进行分析。根据测试规定和上述结论,当 G (kg/s)风流从i向上流到i+1断面时,(1)式可写成

$$G_j(h_{i+1} - h_i)_j = Q_{ROi,j} + Q_{oxi,j} + G_j Q_{pi,j} \quad (2)$$

式中 i——测点号, $i=1,2,3,\dots,m$;

j——测定次数, $j=1,2,3,\dots,n$ 。

把(a)、(j)、(k)、(n)式代入上式,整理后得

$$Y_{i,j} = K_r X_{i,j} + q_{ox}$$

$$(i=1,2,\dots,m-1; n=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

式中

$$Y_{i,j} = \frac{G_j}{u_{i,j}(L_{i+1} - L_i)_j} [C_p(t_{i+1} - t_i)_j + 0.01r(d_{i+1} - d_i)_j - g(Z_i - Z_{i+1})_j \times 10^{-3}]$$

$$X_{i,j} = (t_{0i,j} - t_{i,j})$$

(3)式表明,可用一元线性回归来确定 K_r 与 q_{ox} 。其求解过程为,先根据实测数据求出不同条件下的 K_r 与 q_{ox} ,然后找出影响 K_r 、 q_{ox} 的主要因素,并建立其函数关系。根据采面特征、回采工艺以及煤层的赋存条件,认为单位面积、单位时间氧化散热量 q_{ox} 为一定值;采面的 K_r 值主要受风速因素的影响。建立 $K_r - \omega$ 的散点图(图4),取幂函数曲线关系与其拟合,相关密切,则

$$K_r = K_1 \omega^{K_2} \quad (4)$$

式中 K_1 、 K_2 ——待定系数,用一元回归法确定。

对于上述过程,根据(3)、(4)、(2)式和前述的(a)~(g)各中间式,本文用BASIC语言编制程序(图5)进行计算。并令

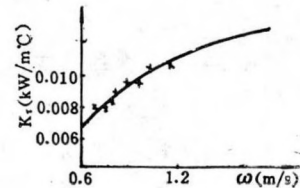


图 4

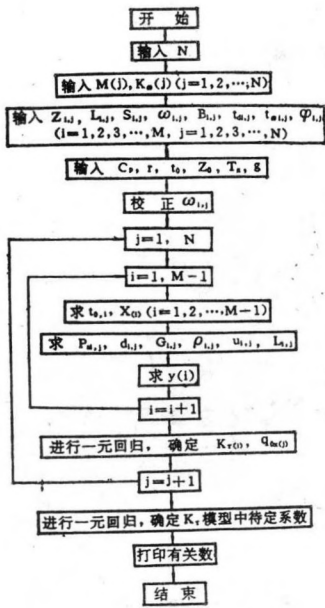


图 5

$\omega = 1\text{m/s}$ 下的 $q_{0,x}$ 平均值为 q_0 ，定义 q_0 为采面的当量氧化散热系数。

根据对平八矿采面的实测数据用上述程序计算得到：采面的当量氧化散热系数 $q_0 = 0.006\text{kW/m}^2$ ；采面围岩与风流间的换热系数 $K_r = 0.008\omega^{0.705}$ ， kW/m^2 。（5）

3 采面风温预测及计算机程序

在掌握了采面的给热形式并通过测算建立了各种热源产热能力计算式的基础上，可进行采面风温预测。采面风温预测包括：①在已知采面入风的气象参数和采面的给热能力、设计的配风量下，预测采面回风口的气温。②在已知采面给热能力、一定的配风量下，为保证采面回风口（即采面）气温不超过《规程》规定时，预测采面所需的入风温度。

3.1 采面风温预测模型及计算机程序

根据能量守恒建立的(1)式，并把有关中间式代入(1)式，整理后得

$$t_2 = t_1 + [g(Z_1 - Z_2) \times 10^{-3} + (Q_{R0} + Q_{0x} + Q_m + Q_r) / Q\rho_{1,2} -$$

$$- 0.01r(d_2 - d_1)] / C_p \quad (6)$$

采面所需入风温度预测式

$$t_1 = t_2 - [0.01r(d_2 - d_1) - (Q_{R0} + Q_{0x} + Q_m + Q_r) / Q\rho_{1,2} - g(Z_1 - Z_2) \times 10^{-3}] / C_p \quad (7)$$

本文采用FORTRAN语言编制其计算机程序（框图从略）进行计算，其迭代步骤为（以(6)式为例）：①先假设 t_2' 为初值；②经各中间式(a)~(n)和(6)式求出 t_2'' ；③比较 t_2' 、 t_2'' ，若二者差大于5%，重新以 $t_2^{(1)} = (t_2' + t_2'') / 2$ 为初值代入，重复上述计算，当计算值与假设值误差小于5%，最后的计算值即为所求的采面末端气温 t_2 ；④打印，结束。

3.2 计算结果与分析

应用上述模型和计算机程序对平八矿 J_{-1218} 采面进行验证性计算。取采面的平均原岩温度 33.6°C ，进风温度 27°C ，配风量 $350\text{m}^3/\text{min}$ ，计算的采面回风温度 31°C ，其结果与实测值极为吻合，表明模型及计算机程序正确、可行。当采面条件不变，应用该程序对不同岩温和入风温度下，对采面多种配风量时的回风温度进行计算，结果表明：

(1) 采面的配风量小于 $400\text{m}^3/\text{min}$ 时， t_2 上升较快，超过 $800\text{m}^3/\text{min}$ 后随风量增加 t_2 下降但较缓慢。高温采面在一定条件下可用增风来降温，但不能盲目增大配风量，否则既造成通风费用增加又达不到降温目的。

(2) 原岩温度相同，采面回风温度随进风温度升高而高。高温矿井首先应改善通风系统，在现有条件下降低采面入风温度。

(3) 在岩温不是很高的条件下，相同条件的综采面回风温度高于炮采，所以采掘机械化水平提高后，机电设备的散热是不可忽视的一个热源。但岩温高时，该项影响不显著。说明以绝对热源为主要的工作地点，增风降温效果明显。

（责任编辑 许升阳）