

文章编号:0253-9993(2007)09-0955-04

新疆煤田火区火风压模式研究及其应用

曾 强^{1,2}, 常心坦²

(1. 新疆煤炭科学研究所, 新疆 乌鲁木齐 830091; 2. 西安科技大学, 陕西 西安 710054)

摘 要:通过对新疆煤田火区火风压物理过程的分析, 提出煤田火区火风压由地上、地下区域组成。地上、地下区域火风压主要是由空气柱内外温度差形成的密度差导致对流作用产生的。同时认为地下区域箱体内存在烟气的多变膨胀效应。基于上述作用机理, 提出了新疆煤田火区火风压计算模型, 并对火区状态系数 C 进行了分析。从确定火区地面覆盖层厚度和估算火区温室效应气体排放量 2 个方面对该模型进行了应用分析, 初次提出了火区温室效应气体排放量的估算模型。

关键词: 煤田火区; 火风压; 火区气体排放

中图分类号: TD752 **文献标识码:** A

Study on the model of fire-heating airflow and its application to Xinjiang coal-field fires

ZENG Qiang^{1,2}, CHANG Xin-tan²

(1. Xinjiang Coal Science Institute, Urumqi 830091, China; 2. Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Study on the process of the fire-heating airflow development due to spontaneous combustion in Xinjiang coal field reveals that the fire-heating air pressure (FAP) is composed of the upper-ground and underground sections, energized by the density difference arose from air temperature differences. Based on the above mechanism, a mathematic model for FAP calculation was put forward. The covering thickness for open coal fire control was analyzed and the green-house gas emission from coal field fire was estimated.

Key words: coal-field fire; fire-heating air pressure (FAP); green-house gas emission

大面积煤田火灾主要分布在新疆地区。根据 1995—1997 年新疆煤田火区普查成果, 新疆现有煤田火区 35 处, 总面积 $9.719 \times 10^7 \text{ m}^2$ 。其中活火区面积为 $8.26 \times 10^6 \text{ m}^2$, 每年损失煤炭资源量约 10 Mt, 同时释放大量的温室效应气体。火灾的发生、发展与供氧有关。火与风是相辅相成的关系。所谓火风压, 一般是指由于燃烧或自热导致区域空气密度变化, 引起区域空气流动的动力的大小及方向。对于煤田火灾而言, 火风压是火区自燃发展的动力, 其大小及分布直接体现了火区状态及供氧情况, 并决定火区的发展趋势。与矿井火灾不同, 煤田火灾是个相对开放的热系统。空气(烟气)在火区内的运移和变化与火区要素(如温度、裂隙、深度、地形、灭火工艺等)密切相关。火区火风压则集中体现了火区内部诸要素综合作用的结果。本文试图通过对煤田火区火风压物理过程的系统分析, 提出其火风压的计算模型, 为确定地面覆盖层厚度和估算火区温室效应气体排放量提供一定的理论参考。

1 煤田火区成因分类及火区火风压物理建模

1.1 火区成因分类

根据煤层赋存特点和自燃成因, 新疆煤田火区一般分为 2 种类型。第 1 类火区: 本煤层煤层露头燃烧

(自燃或人类开采活动引燃) 引起的煤田露头火灾 (图 1), 如新疆奇台北山煤田火区. 第 2 类火区: 由于矿井采肥弃瘦, 受采动影响使上部区域煤层破坏, 漏风进入上部区域煤层 (或本煤层) 导致氧化自热引起的煤田火灾 (图 2), 如新疆白杨河火区和硫磺沟火区.

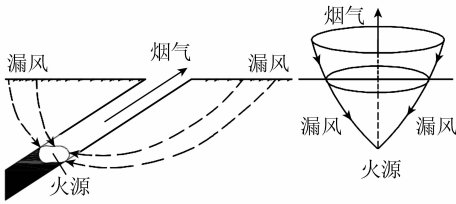


图 1 第 1 类火区

Fig. 1 Type one fire-zone

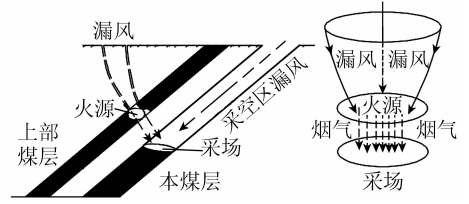


图 2 第 2 类火区

Fig. 2 Type two fire-zone

2 类火区的主要不同点在于空气渗入→逸出模式不同: 第 1 类火区形成火风压的进、出空 (烟) 气柱是以火源为顶点的抛物线柱体. 柱体边缘为进气层 (新鲜风流), 方向由地面向火源. 火源核心上方为出气层 (烟气), 方向由火源向地面. 由于地形及构造的影响, 实际中该气柱是一个变形的抛物线柱体; 第 2 类火区形成火风压的进、出空气柱体方向开始为一个由地面→火源→采场的柱体, 这时火风压强度有限, 不是火灾持续发展的主要动力. 随井下开采活动停止或闭坑, 在一定条件下, 火灾持续燃烧的进、出空气柱转换为一变形的以火源为顶点的抛物线柱体, 即第 1 类火区. 实际的煤田火区大都为第 1 类火区 (或者是转换后的第 1 类火区).

1.2 火区火风压物理建模

对于上述 2 类火区, 其火风压均可以地表为界分为地上、地下区域 (图 3). 地上区域: 即以火区地表区域为顶点的抛物线空气柱体内、外层空气密度差导致对流作用形成火风压; 地下区域: 即以火源为顶点的抛物线空气柱体内、外空 (烟) 气密度差导致对流作用产生火风压. 地下区域新鲜风流一般经由裂隙渗入火源, 不易勘察清晰.

当前煤田灭火方法主要采用注水、注浆→剥离→覆盖工艺. 覆盖前后火区空气状态的变化是笔者研究的重点. 可将整个火区视为一个单元, 如图 3 所示.

该系统可视为是一个燃烧状态、供氧状态、覆盖前后空气 (烟气) 流量动态变化的开口热平衡系统.

如前所述, 覆盖前形成火区火风压的抛物线空气柱体分为地上与地下 2 个区域. 由于火区一般燃烧时间长, 火区围岩与大气环境处于一种相对的温度平衡状态, 围岩温度升降有个滞后过程. 可认为覆盖 (不考虑注水等降温措施) 后一定时间, 火区地表温度基本无变化. 覆盖后地面裂隙被封堵, 地下区域近似为一箱体. 地上、地下区域火风压作用原理相同, 均由空气柱体密度差导致的对流作用引起. 但地下区域明显存在烟气的膨胀效应. 地上、地下区域火风压作用之和可近似视为该火区单元火风压.

根据上述分析, 煤田火区火风压 H_f 可表示为

$$H_f = H_{fs} + H_{fx}, \tag{1}$$

根据矿井火灾灾变通风理论^[1], 地上火风压 H_{fs} 可按下式计算, 即

$$H_{fs} = \Delta Z \rho_m g [(t_a - t_c) / t_c], \tag{2}$$

式中, ΔZ 为单元火区地面热空气柱作用高度^[2], m, $\Delta Z = n_0 Q_h^n D^{n_2} \bar{u}_x^{-1}$, 其中 n_0 为火区烟气热状况系数, 取值与烟气热释放率 Q_h 有关; Q_h 为烟气热释放率, kJ/s; $Q_h = 0.35 p_c Q_v [(t_c - t_e) / (273.15 + t_c)]$;

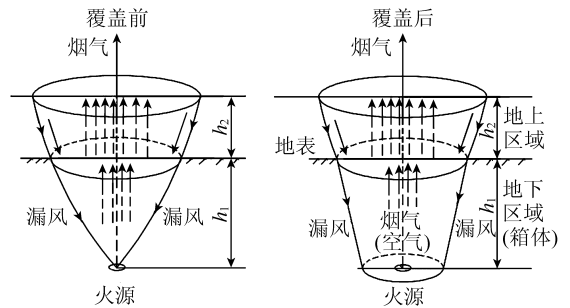


图 3 单元火区火风压模式

Fig. 3 Fire air-pressure model of unit fire-zone

h_1 ——火源距地面高度; h_2 ——地面烟气作用高度

n_1, n_2 分别为烟气热释放率指数和覆盖层厚度指数, 取值与烟气热释放率 Q_h 有关; D 为覆盖层厚度, m; \bar{u}_x 为覆盖层表面烟气平均风速, m/s, 可由气象监测统计资料获得; p_e 为环境大气压力, hPa; Q_v 为实际排烟率, 可由监测得到; t_c 为覆盖层表面温度, °C; t_e 为单元火区大气环境温度, °C; ρ_m 为单元火区地面热空气柱平均密度, kg/m³; g 为重力常数, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; t_a 为单元火区地面热空气柱温度平均温度, °C, $t_a = (t_c + t_e)/2$.

地下火风压 H_{fx} 的确定. 火区地面覆盖后, 地下区域可近似看作一个固定容量的箱体. 箱体內的空气从进入→逸出为一复杂的多变过程. 空(烟)气同时存在 2 个作用: 膨胀效应和对流作用.

(1) 膨胀效应. 为便于分析, 视烟气为理想气体, 根据气体多变过程方程^[3]有

$$p_1^{(n-1)}/(273.15 + t_1)^n = p_2^{(n-1)}/(273.15 + t_2)^n, \quad (3)$$

式中, p_1 为覆盖后箱体的大气压力, Pa; t_1 为覆盖后箱体的温度, °C; p_2 为覆盖后火区环境大气压力, Pa, 取 $p_2 = p_e$; t_2 为覆盖后火区环境温度, °C, 取 $t_2 = t_e$; n 为多变指数.

p_e, t_e 代入式 (3) 变换为 $p_1 = p_e [(273.15 + t_1)/(273.15 + t_e)]^{[n/(n-1)]}$, 这时覆盖层上、下界面压力差可近似按下式计算, 即

$$\Delta p = p_1 - p_2 = p_e \{ [(273.15 + t_1)/(273.15 + t_e)]^{[n/(n-1)]} - 1 \}.$$

考虑覆盖后火区地下箱体区域实际存在烟气进、出, 其 ΔP 数值可按下式计算, 即

$$\Delta p = C p_e \{ [(273.15 + t_1)/(273.15 + t_e)]^{[n/(n-1)]} - 1 \}, \quad (4)$$

C 为反映火区状态的系数, 其值与火区烟气进、出状况有关, 称火区状态系数, 取值在 0~1 间变化.

(2) 对流作用. 空气(或烟气)在箱体内存在渗入→逸出现象. 在箱体空间高度上存在着渗入空气与逸出烟气的密度差, 从而导致对流作用产生火风压. 参照式 (2), H_{fx} 可按下式计算, 即

$$H_{fx} = \Delta H \rho_x g [(t_{ax} - t_e)/t_e], \quad (5)$$

式中, ΔH 为单元火区地下箱体空间高度, m; t_{ax} 为单元火区地下箱体烟气柱平均温度, °C, $t_{ax} = (t_c + t_f)/2$; t_f 为火区火源温度, °C; ρ_x 为单元火区地下箱体烟气柱平均密度, kg/m³.

由式 (1), (2), (5) 得煤田火区火风压计算模型为

$$H_f = \Delta Z \rho_m g [(t_a - t_e)/t_e] + \Delta H \rho_x g [(t_{ax} - t_e)/t_e]. \quad (6)$$

1.3 箱体内烟气作用分析

由式 (4) 可知, $C=0$, 即火区未覆盖时, 箱体内主要存在烟气→环境空气间的对流作用. 对流作用形成箱体区域火风压. $C=0 \sim 1$, 即随覆盖工程的实施, 箱体由一个开放的热系统向一个相对封闭的热系统转换, 这时箱体内烟气的多变膨胀作用加强, 烟气→环境空气间的对流作用减弱. $C=1$, 即覆盖工程完成, 箱体烟气作用主要体现在多变膨胀效应上. 这时空(烟)气柱的对流作用减弱直至消逝.

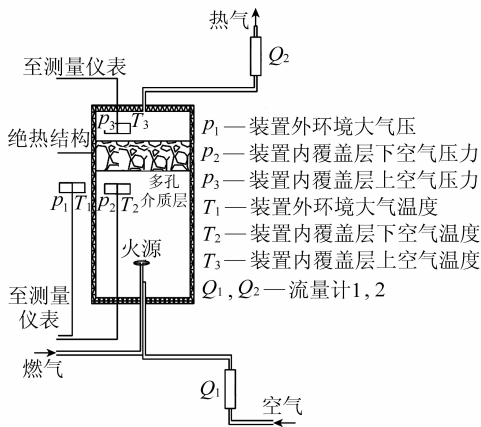
1.4 火风压 H_f 分析

由式 (6) 可知, 确定火区火风压数值的参数有火源温度 t_f 、覆盖层表面温度 t_c 、大气环境温度 t_e 、火区深度(即 ΔH)、 ρ_m 、 ρ_x 等. 对于确定的火区, $t_f, t_c, t_e, \Delta H$ 不难确定. 需要确定的有地面热空气柱作用高度 ΔZ 和火区烟气密度 ρ_m, ρ_x . 其中作用高度 ΔZ 可由 $\Delta Z = n_0 Q_h^{n_1} D^{n_2} \bar{u}_x^{-1}$ 求出, ρ_m, ρ_x 可通过监测、取样分析获得. 当其他条件一定, 环境温度越高, 火风压 H_f 越小. 即夏季火风压 H_f 较冬季小, 这与实际情况相符. 同时火源温度 t_f 越高, 火风压值越高, 表明火区燃烧活跃.

2 火区状态系数 C

根据式 (4), 主要针对火区状态系数 C 设计了如下试验方法. 试验装置如图 4 所示.

整个装置为一绝热升温装置. 由绝热外壳、火(热)源、进气流量计 1、出气流量计 2、压力探头 p_1, p_2, p_3 、温度探头 T_1, T_2, T_3 及多孔介质覆盖层组成. 其中多孔介质覆盖层和上盖及流量计 2 为连体镶嵌结构, 易于启、闭.

图4 火区状态系数 C 实验装置Fig. 4 Experiment of the status coefficient C

连接好流量计1→启动热(火)源→放置好压力探头 p_2 、温度探头 T_2 →放置好多孔介质覆盖层、上盖、流量计2 连体镶嵌结构及压力探头 p_3 、温度探头 T_3 ，同时在外环境中放置好压力探头 p_1 、温度探头 T_1 。温度探头 T_1, T_2, T_3 为热电偶，与测温仪表联接。压力探头 p_2, p_3 为压力传导管，与数字式微压表联接； p_1 为精密数字气压计，直接读数。试验时，定期读取记录各参数值。热源可变化，以反映不同流量下参数 C 的变化规律。实验需要确定在煤自燃极限风(流)量下的 C 值。

3 应用分析

3.1 火区覆盖层厚度的确定

参照图4，根据孔隙介质流体力学原理^[4,5]，可得

$$D = KH_f / (\mu q), \quad (7)$$

其中， K 为多孔介质的渗透率； H_f 为火区火风压，Pa， $H_f = p_2 - p_3$ ； μ 为流体的动力黏度系数； q 为单位面积烟气流速， $\text{m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。实际中 q 取煤的自燃极限风量； K 根据覆盖材料和压实程度不同而变化，由试验确定。根据式(7)可确定火区覆盖层的厚度。

3.2 火区温室效应气体排放量的确定

根据已生效的《京都议定书》精神，新疆煤田灭火工程符合其 CDM (清洁发展机制) 项目特点，煤田灭火工程减排的温室效应气体量有望在国际碳市场进行交易。其关键在于确定火区温室效应气体排放量的方法得到国际认可。由式(7)得覆盖后单元火区气体排出量 $q = KH_f / (\mu D)$ ，覆盖后， K, μ, D 具有相对确定的数值， q 主要与 H_f 变化有关。对于 q 流量中各种温室效应气体的浓度可用气相色谱等分析手段测定，并分别记为 C_1, C_2, \dots, C_k ，则单元火区温室效应气体排放量 $dQ_g = \sum_{i=1}^k \int q C_i dt$ 。对于面积为 S 的

煤田火区，自火区形成到完全熄灭，温室效应气体总排放量 $Q_g = \int^S \sum_{i=1}^k \int q C_i dt dS$ ，其中， S 为面积， t 为时间。在实际工作中，由于存在测量误差、昼夜四季气候变化及地形影响，数值有一定偏离，但不影响用该模型计算温室效应气体排放总量方法的正确性。

4 结 语

从分析煤田火区火风压物理过程着手，提出煤田火区火风压的计算模型，并从确定覆盖层厚度和估算火区温室效应气体排放量两个方面对该计算模型进行了应用分析，提出了估算煤田火区温室效应气体排放量的计算模型，可为新疆煤田灭火工程争取 CDM 项目的方法学研究提供一定的理论参考。

参考文献：

- [1] 戚颖敏. 矿井火灾灾变通风理论及其应用 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1978. 35~37.
- [2] 郑 彤. 陈春云. 环境系统数学模型 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 小林清志. 工程热力学 [M]. 刘吉萱, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983. 56~58.
- [4] 科林斯 R E. 流体通过多孔材料的流动 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [5] 曾 强. 蔡忠勇. 新疆煤田火区灭火方法选择与应用区域的探讨 [J]. 煤矿安全, 1998 (12): 35.