

刘星魁,杜学胜,常绪华.露天煤堆自燃过程中“三带”分布的动态特征[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(4): 24-28.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.004

Liu X K, Du X S, Chang X H. Study for Dynamic Distribution Characteristic of Three Areas Under Different Spontaneous Combustion Stage in Open Coal Pile[J].Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 24-28.doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.004

露天煤堆自燃过程中“三带”分布的动态特征

刘星魁*,杜学胜,常绪华

(河南工程学院 安全工程学院,河南 郑州 451191)

摘要:为了准确划分煤堆自燃过程中的重点监测区域,利用数值模拟方法分析了煤堆自燃带分布的动态变化特征,结果表明:煤堆自迎风面向背风面会形成散热带、自燃带和窒息带,自燃带温度代表了煤堆的自燃危险性.自燃带的位置会随着时间逆风向迎风面移动,以温度和氧气指标划分的自燃带宽度具有不同的变化趋势.依据研究结论,自燃初期宜采用氧气指标,后期采用温度指标划定自燃带区域.

关键词:煤堆;动态特征;自燃带;氧气;温度

中图分类号:TD751 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2019)04-0024-05

Study for Dynamic Distribution Characteristic of Three Areas Under Different Spontaneous Combustion Stage in Open Coal Pile

Liu Xingkui, Du Xuesheng, Chang Xuhua

(College of Safety Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: In order to divide the key monitoring area of coal pile during spontaneous combustion process, the numerical method was used to analyze the dynamic change feature of coal pile spontaneous combustion area, the results show that the cooling area, spontaneous combustion area and suffocative area are formed from windward side to lee side, while the temperature in spontaneous combustion area represents the coal pile danger. The position of spontaneous combustion area move towards windward side along with time, and its widths divided by temperature and oxygen indicator have different change trend. Based on research conclusion, oxygen indicator should be taken to determine spontaneous combustion area in initial stage while temperature indicator in later stage.

Keywords: coal pile; dynamic feature; spontaneous combustion area; oxygen; temperature

煤堆自燃现象是煤炭露天堆放时企业面临的一种主要风险,包括经济风险、环境风险和安全风险^[1-2].尤其是在当今煤炭经济整体下行,煤炭销量持续走低的背景下,煤炭储存周期显著延长,大量储煤场所普遍存在煤堆自燃现象,造成各类安全事故的损失^[3-4],这足以说明研究煤堆自燃防治技术具有重要的现实意义.

收稿日期:2016-09-04 修改日期:2019-04-18

基金项目:2019年度河南省高等学校重点科研项目资助计划(19A620001)

*通信作者,E-mail: 26638587@qq.com

现场对煤堆自燃的管控措施包括干冰法、喷膜法、覆盖法和注水法等^[5],各类工程措施实施的原理主要分为2个方面:一是惰化煤堆内的氧气分布,破坏氧化环境,使煤堆失去升温能力;二是针对煤堆内部高温火源进行直接冷却,降低自燃发生的几率.不管何种措施,在实施之前必须要了解煤堆内部的氧化环境、升温速率和高温区位置等信息,为施工参数的制定提供依据^[6].针对采空区自燃现象,“自燃三带”的概念^[7-8]可用来形象地描述采空区内的各类场信息,已有学者将自燃带划分应用于煤堆自燃的前期预警^[9],取得了较好的效果.与采空区自燃相比,煤堆自燃属于同类物理现象,即外界漏风逐渐渗入煤体内部,煤氧之间缓慢发生反应,积蓄热量,首先在某一点形成阴燃,最终发火区域扩大形成大面积燃烧,灾害发展趋势二者比较相符.如利用“自燃三带”协助推断煤堆初始自燃位置、划定危险区,可为管控措施的制定提供参考,为研究煤堆自燃现象提供另一种思路.目前“自燃三带”的划分普遍遵循氧气指标和温度指标,这需要依据研究对象内部流场分布结果确定,但煤堆的几何规模远小于井下采空区,煤堆自燃过程更易受到边界条件影响,其内部流场分布变化的即时性很强^[10].“自燃三带”的位置变化是一个动态过程,本文利用数值方法对一段时间内煤堆内部温度场、氧气分布的变化情况进行研究,从中总结煤堆内部“三带”位置的动态变化特征,并比较氧气和温度这2类指标下自燃带分布的不同之处,为安全防火措施施工参数的制定提供依据.

1 研究模型

首先利用以下5点假设划定本文研究范围:

- 1) 煤堆内部漏风渗流特征符合 Darcy 定律;
- 2) 将煤堆简化为二维平面,即从煤堆内取某一截面作为分析对象;
- 3) 煤堆内部水包括液态水和气态水,二者均视为理想流体;
- 4) 煤堆内流体与固体达到热平衡后温度无差别;
- 5) 煤堆结构稳定,在堆放过程中空隙度与迎风倾角保持不变.

经过上述假设,煤堆自燃等效于一个二维平面上包含相变且具有热源的层流多孔区非稳态传热问题.基于前述5点假设,含水煤堆内部关于自燃问题的数学模型可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \rho V = 0; \\ (-\Delta P + \bar{\rho}g) - g\bar{\rho}\bar{\beta}(T - \bar{T}) = \mu \frac{V}{k}; \\ (1 - \varepsilon)\rho_c c_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + \rho c_1 \nabla V T_1 = \nabla \lambda_c \Delta T_c - h(T_c - T_1) + (1 - \varepsilon)q; \\ \varepsilon \rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} + \rho c_1 \nabla V T_1 = \nabla \lambda_1 \Delta T_1 + h(T_c - T_1) + QM\rho_v; \\ \frac{\partial \rho_1 C_1}{\partial t} + \nabla \rho_1 C_1 V = \nabla \rho_1 D_1 \Delta C_1 - M; \\ \frac{\partial \rho_v C_v}{\partial t} + \nabla \rho_v C_v V = \nabla \rho_v D_v \Delta C_v + M; \\ \frac{\partial \rho_{O_2} C_{O_2}}{\partial t} + \nabla \rho_{O_2} C_{O_2} V = \nabla \rho_{O_2} D_{O_2} \Delta C_{O_2} - r. \end{array} \right. \quad (1)$$

式中: ρ 为温度时气体密度,kg/m³; V 为漏风速度,m/s; ΔP 为漏风风压,Pa; $\bar{\rho}$ 为温度为 \bar{T} 时的气体密度,kg/m³; g 为重力加速度,m/s²; $\bar{\beta}$ 为由状态方程决定的压强为 p 时的气体膨胀系数; T 和 \bar{T} 分别为自燃升温前后煤堆内部温度,K; μ 为空气动力粘度,1.789 4×10⁻⁵ Pa·s; k 为煤堆内部的渗透率,m²; ε 为孔隙率; ρ_c, ρ_1 为煤体与水密度,kg/m³; c_c, c_1 分别为煤体与水热容,J/(kg·K); T_c, T_1 为煤体和水的温度,K; t 为氧化时间,s; λ_c, λ_1 为煤体和流体的导热系数,W/(m·K); h 为流体固体之间换热系数,由速度和压力的计算结果决定,W/(m²·K); q 为煤氧反应放热强度,W/m³; Q 为水分蒸发热,取2.1×10⁶ J/kg; M 为水分

蒸发速率, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$; ρ_v, ρ_{O_2} 为水蒸汽和氧气的密度, kg/m^3 ; c_v, c_{O_2} 为水蒸汽和氧气的质量分数; D_1, D_v, D_{O_2} 为液态水、水蒸汽和氧气的扩散系数, m^2/s ; r 为煤堆耗氧能力, $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$.

上述参数中包括了耦合参数,如 $\bar{\beta}, h, M$ 等由内部压力、温度和速度的耦合计算结果决定,经验参数如 $c_c, c_1, \lambda_c, \lambda_1, Q, \rho_1, \rho_v, \rho_{O_2}$ 等,由边界条件和物质属性决定,其中大多已在求解工具的材料库中列出,另外还有实验参数,如 r 和 q 由煤氧自热实验结果决定^[11].将各类参数带入式(1)中,利用 FLUENT 求解工具进行煤堆内部流场分布的模拟分析,得出自燃带分布的动态特征.

2 结果及讨论

初始煤堆物理模型如图1所示.物理模型规模取宽8 m,高3 m,迎风倾角为45°的梯形;风流速度取1.5 m/s,从左往右掠过煤堆;环境温度300 K,煤堆上边界、迎风面和背风面均与大气产生对流换热,底部与大地相连,并与大地发生导热.

图2为煤堆内部漏风趋势,从中可分析煤堆自燃升温的原因,风流渗入煤堆后形成漏风,在煤堆长期堆置后漏风会形成2种趋势,自迎风面开始,漏风向背风面发生渗流,但由于沿程动能损失,最终只有少量的漏风从背风面流出,而随着温度的升高煤堆内产生热压力,更多的漏风受热压力作用从煤堆顶部漏出,漏风一方面会为煤堆带来供氧,刺激温度上升,但同时也会加快煤堆内对流散热,在漏风流经的路径上会存在供氧相对散热占据主导的区域,其位置可通过“自燃三带”划分确定.

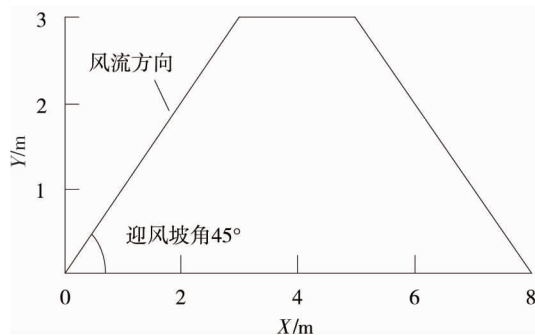


图1 初始煤堆物理模型

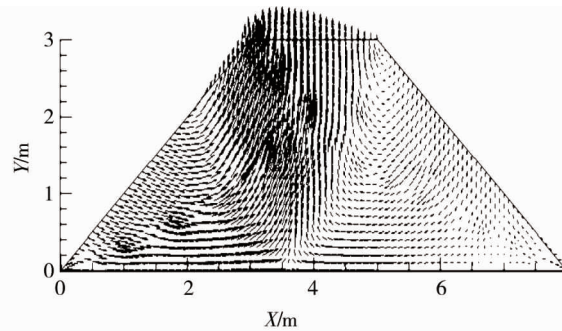


图2 煤堆内部漏风趋势

借鉴采空区划分“自燃三带”的标准,依据分别为氧气浓度(10%~18%)、漏风速度(0.001~0.004 m/s)和升温速率(>1 °C/d)^[12].氧气浓度是反映采空区氧化环境的单项指标,漏风速度是反映采空区蓄散热环境的双项指标,而升温速率是反映煤质、散热和氧化环境共同作用结果的综合指标.由于漏风风速不易准确测量,温度和氧气指标对于现场工程更具有可操作性.这里模拟了26 d时间内煤堆内温度和氧气的分布,首先利用氧气指标划分自燃带的位置,了解煤堆自燃过程中“三带”分布的动态特征,自燃带位置范围与温度分布之间的对应关系.

图3为6 d时煤堆温度分布及自燃带位置,从图中可以得出:在自燃初期升温速率很慢,等温线稀疏,温度分布均匀,而此时氧气分布面积非常大,2 m之前漏风强度最大,迎风面充分供氧,热量无法集聚,5 m之后漏风强度减弱,供氧不足,在深入迎风面2~5 m的范围存在大面积的自燃带,此处是早期监测的重点区域.

图4和图5分别为16 d,26 d时煤堆温度分布及自燃带位置,从图中可以得出:随着时间的推移,升温速率加快,温度升高后加速了氧化反应速率,使煤堆内部的氧气大量消耗,此时再利用氧气指标划分自燃带,其位置较之前向迎风面移动了1 m.随着温度的升高,自燃带前移的趋势一直保持下去,但当自燃带接近迎风面后由于漏风强度加大,充分供氧,自燃带前锋面的位置几乎不再发生移动,只有尾线随着耗氧速率的加快发生前移,这与初期的整体前移趋势存在差异.总之,煤堆温度和氧气的分布是一个动态变化过程,初期升温较慢,氧气分布最广,而后快速升温的区域逐渐增大,氧气分布越发狭窄.利用温度指标划分

自燃带位置,其范围会逐渐增大,而利用氧气指标划分自燃带位置,范围会逐渐狭窄,这会给煤自燃征兆的即时监测、预警和预报带来困难.对这 2 种趋势的模拟数据进行整理对比后可得到自燃带范围的动态分布特征,如图 6 所示.

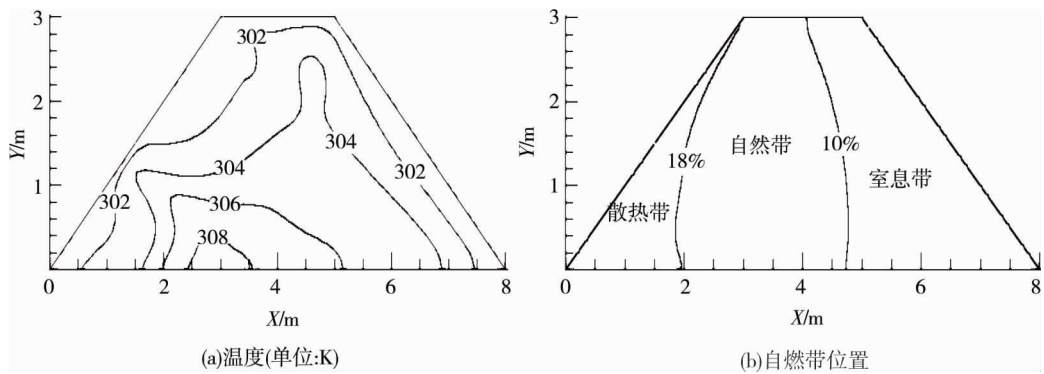


图 3 6 d 时温度与自燃带分布结果

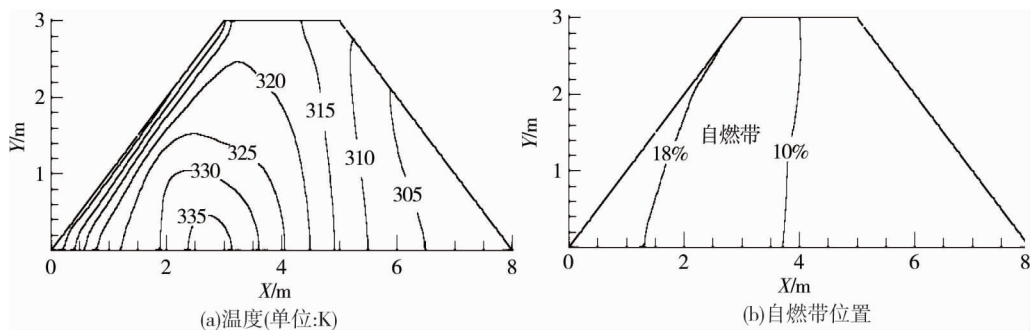


图 4 16 d 时温度与自燃带分布结果

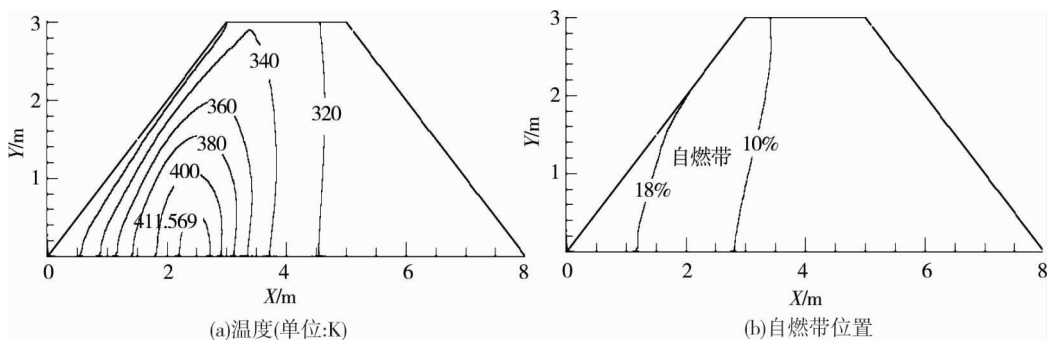


图 5 26 d 时温度与自燃带分布结果

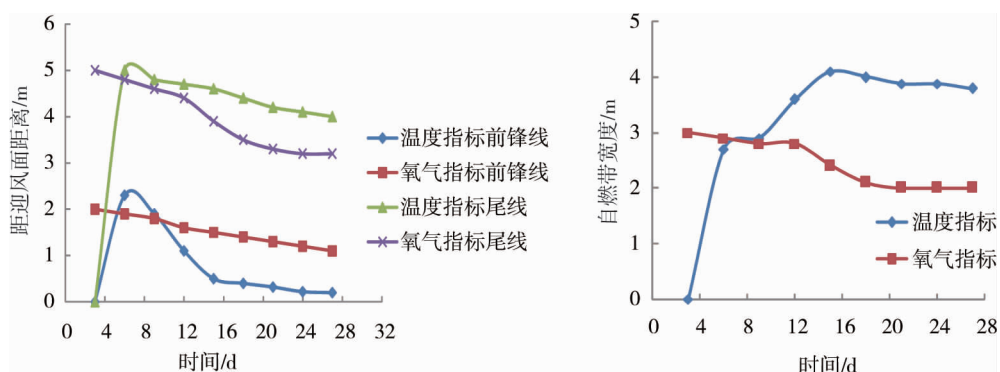


图 6 温度和氧气指标下自燃带位置结果

图 6a 显示:在堆放初期低温阶段,温度指标不具敏感性,而以氧气指标划分的自燃带范围非常明显,前锋线和尾线分别距迎风面 2 m 和 5 m 左右;随着温度的升高,温度指标下开始呈现一定宽度的自燃带,此时氧气开始快速消耗.结合图 3~图 5 分析,氧气指标下的前锋线和尾线逐渐前移,最终距迎风面 1.1 m 和 3.2 m,由于迎风面附近供氧充分,因此前移的趋势尾线较前锋线更加明显.另一方面,自燃中后期,高温区越来越集中,伴随着氧气消耗,温度指标下的自燃带位置也会随着氧气分布发生前移,由于指标概念本质上存在区别,2 种指标下自燃带划分位置存在一定的差异.图 6b 显示:氧气指标下的自燃带宽度在初期最大,随时间推进有减小的趋势,最后会稳定在 2 m 左右;而温度指标下的自燃带宽度随时间推进先有增大的趋势,但随着氧气的大量消耗,而后又逐渐减小,氧气和温度指标下的自燃带宽度划分结果在自燃发展过程中呈现一定差异性.现场预警应综合这 2 类指标的监测结果,如氧气数据明显下降,应考虑改变温度探头的监测位置.煤堆堆放初期宜采用氧气指标,但经过一段时间自然氧化后,自燃中后期则宜采用温度指标划分重点监测区域.

3 结论

1) 煤堆在堆放过程中由于漏风渗流作用,自迎风面向背风面会形成散热带、自燃带和窒息带,自燃带温度最高,代表了煤堆的自燃危险性.

2) 以温度和氧气指标划分的自燃带位置随着时间具有明显的动态特征,随着温度的升高,氧气分布发生前移,而随着氧气的大量消耗高温区位置也会发生改变,而温度分布又会在氧气消耗后发生改变,在文中所设内外界条件下,二者的划分结果最大相差约 1.5 m,这种差距在仅有 8 m 宽度的煤堆中不应被忽略.

3) 不同指标下自燃带宽度具有不同的变化趋势,从安全的角度讲,自燃初期采用氧气指标,后期采用温度可最大限度划定自燃带区域.

参考文献:

- [1] 王正生.神宁集团煤堆自燃原因分析及预防[J].低碳世界,2017(36):371-372.
- [2] 李树荣.露天动力煤料场煤堆自燃影响因素及防控措施[J].酒钢科技,2017(3):36-39.
- [3] 王国胜.奥塔乌克日什东露天煤矿储煤场自燃防治对策研究[J].煤质技术,2015(3):45-47.
- [4] 张晓明,王永军,张河猛,等.基于 F-K 理论的大体积煤堆自燃特性试验研究[J].中国安全科学学报,2018,28(2):57-63.
- [5] 张建华,沈家铨,郑智扬,等.燃煤电厂储煤场煤堆自燃及防治措施的试验研究[J].发电与空调,2013,34(5):15-20.
- [6] 崔铁军,马云东,王来贵.基于 PFC3D 的煤堆自燃过程模拟与实现[J].安全与环境学报,2016(2):94-98.
- [7] 李建军,郝维栋.孤岛工作面自燃“三带”区域指标气体分析研究[J].煤炭与化工,2018,41(9):109-112.
- [8] Yuan L, Smith A C. CFD modeling of spontaneous heating in a large-scale coal chamber [J].Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2009, 22(4):426-433.
- [9] 王国胜.奥塔乌克日什东露天煤矿储煤场自燃防治对策研究[J].煤质技术,2015(3):45-47.
- [10] Taraba B, Michalec Z, Blejcha T, et al. CFD simulations of the effect of wind on the spontaneous heating of coal stockpiles [J]. Fuel, 2014, 118(1):107-112.
- [11] 刘星魁,王公忠.干燥煤堆自燃升温特征的数值模拟[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,30(3):7-12.
- [12] 杨胜强,徐全,黄金,等.采空区自燃“三带”微循环理论及漏风流场数值模拟[J].中国矿业大学学报,2009,38(6):769-777.