

基于 F-K 理论的煤堆自燃特性试验研究

智浩森 高梓皓 孔繁鑫 张博康 赵世杰

辽宁工程技术大学葫芦岛校区 辽宁葫芦岛 125105

DOI:10.12238/ems.v7i6.13870

[摘要] 本研究基于 Frank-Kamenetskii (F-K) 理论, 通过网状篮实验分析了煤堆自燃特性的四个阶段, 并通过 F-K 理论论证了不同温度及体积对煤堆自燃特性的影响。通过 F-K 理论模型验证, 发现煤堆体积增大会显著降低 TCSIT, 而环境温度升高则会使 TCSIT 也随之升高。研究结果为工业储煤自燃风险评估以及预测和预防煤堆自燃提供了理论依据。

[关键词] F-K 理论; 煤堆自燃; 临界自燃温度; 粒径; 水分蒸发

1. 引言

煤堆自燃是煤炭开采、储存和运输过程中面临的重要安全问题, 不仅造成资源浪费, 还可能引发火灾和环境污染。随着全球能源需求的增长, 低品质煤炭的使用量不断增加, 这使得煤堆自燃问题更加突出。因此, 深入研究煤堆自燃特性, 探索有效的预防和控制方法具有重要的理论和实践意义。

现有研究多聚焦于单一因素(如通风、孔隙等)的影响, 但对环境温度、粒径和水分耦合作用的系统性分析不足。F-K 理论通过量化产热与散热的平衡关系, 为预测自燃临界条件提供了数学模型。而本研究主要通过控制温度与体积变量, 结合 F-K 理论揭示煤堆自燃的动态机制, 旨在为储煤安全管理以及监测、预防煤自燃提供科学依据。

2. 理论基础与实验设计

2.1 Frank-Kamenetskii (F-K) 理论框架

F-K 理论是研究可燃物质自燃现象的经典模型, 该理论主要基于均匀性、稳态条件、以及 Arrhenius 反应动力学的假设, 理论核心是通过分析可燃物质在某种环境下内部产热速率和散热速率的动态平衡来判断该物质能否自燃。

2.1.1 F-K 方程推导与临界自燃条件(产热速率与散热速率平衡)

F-K 理论的核心方程为:

$$\delta = \frac{r^2 \cdot Q \cdot A \cdot E}{\lambda \cdot R \cdot T_{crit}^2} \cdot \exp\left(-\frac{E}{R \cdot T_{crit}}\right)$$

其中:

δ : 无量纲参数, 表示产热于散热的比值。

r : 煤堆的特征尺寸

Q : 反应热(单位体积产热量, J/m^3)

A : 指前因子(于反应活性相关, s^{-1})

E : 活化能(J/mol)

λ : 热导率($W/(m \cdot K)$)

R : 气体常数($8.314 J/(mol \cdot K)$)

T_{crit} : 临界自燃着火温度(K)

临界条件为: 当 $\delta > \delta_{critical}$ 时, 系统无法维持热平衡, 会导致物质自燃。

2.1.2 临界自燃着火温度(T_{CSIT})的数学表达与物理意义

临界温度(T_{CSIT})是系统在特定条件下发生自燃的最低温度, 通过 F-K 理论推导可表示为:

$$T_{CSIT} = T_0 + \frac{RT_0^2}{E_a} \ln\left(\frac{hS}{A}\right)$$

其中:

T_0 : 环境温度

R : 气体常数

E_a : 活化能

h : 热传导系数

S : 表面积

A : 指前因子

2.2 实验设计与方法

采用内蒙古白音华褐煤为实验原料, 通过开放式恒温试验, 系统探究温度和体积对煤自燃特性的影响。实验前, 将煤样进行破碎处理, 筛选出平均粒径为 1cm 的煤样。采用 L=5、10、15、25 厘米的网状篮。在立方体煤堆的垂直中心线上布

置热电偶, 采集煤样内部温度。温度采集系统以 20 秒为采样间隔进行连续记录。为降低恒温箱强制对流对实验结果的影响, 在煤堆外围设置了无底无顶的铜制保温罩, 降低热对流干扰。

设定热炉环境温度为 T_a , 通过监测温度随时间的变化曲线, 确定温度变化规律。记录各测量点的温度变化曲线。采用 5℃ 为步长, 通过逐步升高或降低 T_a 值进行重复试验, 确定煤样发生自燃的最低环境温度(T_{sub})和未自燃的最高环境温度(T_{sup})。得到临界自燃温度(TCSIT), 为 T_{sub} 和 T_{sup} 的算术平均值。

3. 煤自燃过程的阶段划分与机理

煤堆自燃过程可划分为四个热力学阶段, 基于 Frank-Kamenetskii (F-K) 理论进行分析:

初始快速升温阶段, 煤堆温度呈现快速上升趋势, 温度曲线斜率较大。主要归因于热传导与热对流的协同作用。根据 F-K 理论中的热传导原理, 热量从高温环境向低温煤堆传递, 热流密度与温度梯度成正比。初始阶段, 煤堆与外部环境间的较大温差驱动了强烈的自然对流和热对流, 加速了热量在煤堆内部的传递。

水分蒸发升温阶段, 温度上升速率显著减缓, 温度曲线趋于平缓。这一现象主要归因于水分蒸发吸热效应的主导作用。根据 F-K 理论中的相变热力学分析, 水分蒸发是一个吸热过程, 其吸收的潜热显著抑制了温度上升速率, 导致整体升温速度减缓。

温度回升阶段, 温度曲线斜率再次增大, 表明温度上升速率加快。这一转变主要归因于水分蒸发影响的减弱和氧化反应的加速。根据 F-K 理论, 随着水分蒸发过程接近尾声, 其吸热效应逐渐减弱, 使得温度上升趋势得以恢复。同时, 煤堆内部温度的升高为氧化反应提供了更有利的条件, 氧化反应速率显著加快, 释放的热量成为推动温度回升的主要动力。

自热加速阶段, 温度曲线呈现持续上升趋势, 且斜率可能进一步增大。这一现象表明煤堆进入自热加速状态。根据 F-K 理论, 此阶段煤堆升温主要依赖于自身的氧化产热。氧化反应速率随温度升高呈指数增长, 释放的热量若高于散热速率, 则煤堆进入自热加速状态。这一现象体现了 F-K 理论中氧化产热、热传递和散热之间复杂的竞争关系。

4. 实验数据分析

4.1 温度对自燃特性的影响

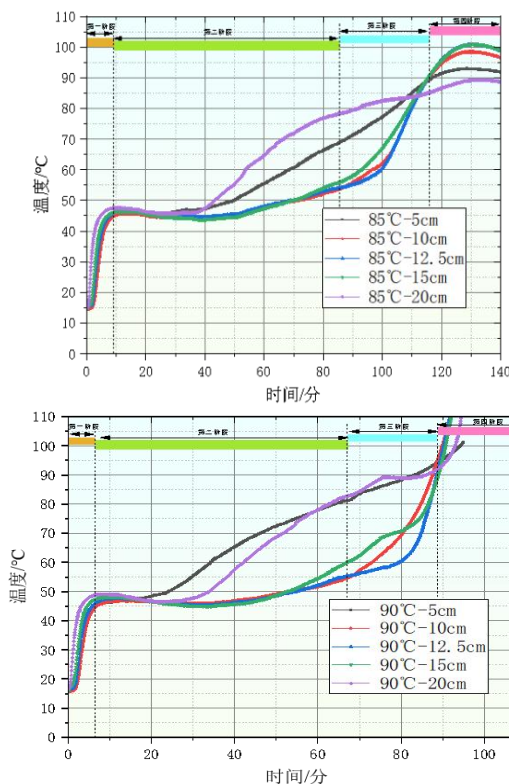
以 L=25cm 的煤堆为例, 煤堆的临界温度和亚临界温度分别为 90℃ 和 85℃, 如图所示。

基于 Frank-Kamenetskii (F-K) 理论, 可系统分析煤样升温过程中各阶段的热力学行为及其内在机制。在第一阶段, 煤样各点温度呈现显著上升趋势, 温度曲线斜率较大。这一现象可归因于热传导与热对流的协同作用。根据 F-K 理论中的热传导原理, 热量从高温环境向低温煤样传递, 其热流密度与温度梯度成正比。初始阶段, 煤样与外部环境间的较大温差驱动了强烈的自然对流和热对流, 加速了热量在煤样内部的传递。且 $H_{0.8}$ 测点(近堆顶)温度比 $H_{0.2}$ (近堆底)温度更高, 其次是 $H_{0.6}$ 、 $H_{0.5}$ 、 $H_{0.4}$, 也进一步验证了自然对流驱动顶部先加热效应。

由于温差过大水分蒸发加剧,导致热耗增加,进而抑制了煤炭温度的进一步上升。煤堆湿度与空气差异较大促使水分向空气扩散,在温度较高的H0.8测量点,水分蒸发尤为强烈。而在H0.5测量点,处于煤堆中心位置温度上升减缓,标志着向第二阶段的过渡。在缓慢升温阶段,温度上升速率显著减缓,温度曲线趋于平缓。这一现象主要归因于水分蒸发吸热效应的主导作用。根据F-K理论中的相变热力学分析,水分蒸发是一个吸热过程,其吸收的潜热显著抑制了温度上升速率。如图所示,由于H0.2近底部,而底部的水分积聚过多抑制了水分蒸发所以再H0.2测量点的热传导效果强烈,温度也会暂时超过H0.8。然而顶部区域由于热对流和热传导导致水分蒸发,H0.8逐渐变为干燥状态,温度也完成反超,这在 $T_a=85^{\circ}\text{C}$ 表现的更为明显,而在 $T_a=90^{\circ}\text{C}$,由于环境温度的增加,使得热对流和热传导能量增加导致H0.8测量点位置的煤颗粒温度反超H0.2测量点的速度慢于 $T_a=85^{\circ}\text{C}$ 。但较高的环境温度也使得 $T_a=90^{\circ}\text{C}$ 下第二阶段更早结束。在第三阶段,温度曲线斜率再次增大,表明温度上升速率加快。这一转变主要归因于水分蒸发影响的减弱和氧化反应的加速。根据F-K理论,其吸热效应逐渐减弱,使得温度上升趋势得以恢复。同时,煤样内部温度的升高为氧化反应提供了更有利的条件,氧化反应速率显著加快,释放的热量成为推动温度回升的主要动力。这也使得在这一阶段 $T_a=90^{\circ}\text{C}$ 与 $T_a=85^{\circ}\text{C}$ 差距较为明显。如图所示,在 $T_a=90^{\circ}\text{C}$ 下,由于H0.8测量点近顶部,更难保持热量,因此与H0.2测量点的温度趋近。而在 $T_a=85^{\circ}\text{C}$ 下,第三阶段末期二者才有趋近交点。

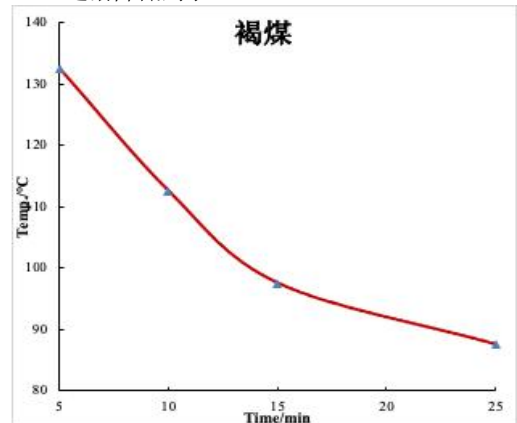
最后的自热加速阶段,温度曲线呈现持续上升趋势,且斜率可能进一步增大。这一现象表明煤样进入自热加速状态。根据F-K理论,此阶段煤样升温主要依赖于自身的氧化产热。氧化反应速率随温度升高呈指数增长,释放的热量若高于散热速率,则煤样进入自热加速状态。

热传导和热对流在此阶段仍然发挥作用,但其影响相对较小。此时环境温度的差异体现在当 $T_a < \text{TCSIT}$ 时,如图所示, $T_a=85^{\circ}\text{C}$ 时,煤的散热大于产热,达到峰值温度后,热量产生率等于散热率。又由于热生成的老化效应,煤温会逐渐下降。相反,当环境温度超过 $T_a > \text{TCSIT}$ 时,如图所示,当 $T_a=90^{\circ}\text{C}$ 时,煤堆放热大于散热,最终发生煤自燃。



4.2 体积对自燃特性的影响

煤堆体积的增大会导致其表面积与体积比(A/V)显著减小。这一几何特性使得在相同环境条件下,大体积煤堆与外界环境进行热交换的有效面积相对较小,从而降低了热传递效率。如图所示,大体积煤堆的中心点 $H_{0.5}$ 在随着时间增加从 132.5°C 逐渐降低到了 87.5°C 。



傅里叶定律进一步表明,热流密度与温度梯度和导热系数成正比,因此, A/V 值的减小直接导致热量传递速率降低,延缓了煤堆的整体升温过程。

此外,水分运移和释放强度也与煤堆体积密切相关。在煤自燃的第二阶段(缓慢升温阶段),水分蒸发是调控升温速率的关键因素。大体积煤堆由于 A/V 值较小,水分蒸发强度相对较弱,导致该阶段持续时间延长。根据F-K理论中的相变热力学分析,水分蒸发过程吸收的潜热会显著抑制温度上升速率,从而使得大体积煤堆的升温过程更为缓慢。

根据F-K理论中的质量传输模型,氧气扩散速率与煤堆的孔隙结构和体积密切相关。较大体积的煤堆由于扩散路径较长,氧气供应受限,导致内部氧化反应速率降低。Arrhenius方程表明,氧化反应速率与氧气浓度呈正相关,因此,氧气扩散受限会直接降低煤堆内部的氧化产热效率,进而减缓升温速度。

此外,大体积煤堆具有较强的热储存能力,这一特性在一定程度上可以缓冲温度波动,但也对升温过程产生复杂影响。根据F-K理论中的热平衡方程,热储存能力的增强会导致热量积累速率降低,从而延缓煤堆在升温初期的温度上升。

从自然敏感性角度来看,F-K理论表明,较大体积煤堆由于热量散失较慢,其内部温度分布更为均匀,降低了局部热点形成的概率,从而使得整体升温速度相对较慢。

煤堆体积通过影响热传递效率、水分运移强度、氧化反应动力学以及热储存能力等多个方面,显著调控了其自燃过程中的升温行为。较大体积煤堆由于 A/V 值较小、氧气扩散受限以及较强的热储存能力,表现出较慢的升温速率和较低的自然风险。

5. 结论展望

本研究基于Frank-Kamenetskii (F-K)理论,系统探讨了煤堆自燃的四个阶段及其热力学机制。实验发现,温度、粒径和水分是影响自燃特性的核心因素:温度升高加速了氧化反应,而粒径和水分则通过调控热传导、蒸发和氧气扩散,显著影响了升温速率和自燃风险。小粒径煤样因较大的比表面积和更高的氧化活性,升温更快,自燃风险更高;而大体积煤堆由于较低的表面积与体积比和较强的热储存能力,自燃风险相对较低。F-K理论模型与实验数据高度吻合,验证了其适用性。创新点在于首次将F-K理论与多因素实验结合,揭示了温度、粒径和水分的作用,并提出了体积-TCSIT对数关系模型,为工业储煤自燃风险评估提供了新工具。未来研究可进一步探索通风条件、硫含量等多因素耦合影响,并优化现场监测技术和预防措施。