文章编号: 1001 - 2060(2016) 10 - 0063 - 09

Vol. 31, No. 10

Oct., 2016

# 不同堆放条件下煤堆压实最低不适用风速研究

# 董子文 吴 宪 齐庆杰 郑 丹

(辽宁工程技术大学 安全科学与工程学院 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 为提高煤堆压实防治自燃可行性的预判能力,基于 煤堆自燃理论、使用 COMSOL Multiphysics 5.0 数值仿真软 件,建立煤堆自燃模型,对5个不同堆放规格尺寸煤堆进行 压实后温度变化和自然发火期变化进行了分析 从以上两个 角度研究了煤堆最低不适用压实风速 建立了与煤堆孔隙率 相关的最低不适用压实的风速方程。结果表明 煤堆压实防 治自燃存在不同的最低不适用风速 从温度变化角度考虑的 最低不适用压实风速小于从自然发火期角度考虑时的最低 风速 从安全角度考虑取二者较小值作为判断标准 煤堆压 实最低不适用风速与煤堆堆放参数相关性不强 受原孔隙率 影响较为显著 最低不适用压实风速与孔隙率之间具有幂函 数关系。

关 键 词: 煤堆自燃; 压实; 不适用风速; 堆放参数; 孔隙率 中图分类号: TK16 文献标识码: A

DOI: 10. 16146/j. cnki. rndlgc. 2016. 10. 012

# 引言

煤堆自热可能导致自燃 ,是一个非常严重的经 济和安全问题[1] 同时还会带来严重的环境污染问 题[2]。目前常用的防治煤堆自燃的方法有细煤覆 盖、风障和挡风墙、毡布覆盖、煤堆压实、水煤灰浆覆 盖或掺混等,肖辉等开发了一种的高聚物阻化 剂[3]; 邓军等提出了采用热棒技术加速煤堆降温的 方法[4]。工程实践中使用最多且成本较低的是煤 堆压实技术 但是煤堆压实技术在现场应用时存在 着高风速条件下越压实越易自燃的问题 因此需要 对不同风速条件下不同孔隙率煤堆进行自热 - 自燃 研究 探索煤堆压实技术的适用性 为煤堆自燃防治 提供理论依据。

煤堆自燃问题一直备受国内外学术和工程界广 泛关注和重视,开展了一系列研究工作。国内徐精 彩等认为煤堆压实是防治煤堆自燃的首选方法[5]; 董希琳等认为任何可以影响煤堆自热 - 自燃的参数 发生微小的变化都会导致煤堆内部系统发生较大的 非连续性变化 引起煤堆的不安全[6]; 张瑞新、谢和 平、谢之康通过试验证明煤堆自燃受环境影响较大, 应该以优先预防为主[7~8]。国外方面,Alazmi,B和 Hooman K 认为风流对煤堆的影响由自然对流转变 成混合对流之后会发展成强制对流 因此 煤堆自燃 必须充分考虑风速的变化[9~10]; Akguna F 等建立了 煤堆自热自燃的二维非稳态计算模型[11] ,充分研究 了煤堆高度和堆放时间、角度、粒径孔隙率等对煤堆 自热自燃的影响,认为孔隙率0.15~0.2时由于透 气性等降低煤堆自热升温较慢; Ejlali 在多风速条件 下开展了煤堆自燃研究[12] 认为进风量是影响煤堆 最高温度变化较为显著的因素; Ejlali 等认为孔隙率 是影响煤堆内部自热 - 自燃和最高温度变化的关键 参数 并指出煤堆压实也不一定能一直发挥保护煤 堆的作用[13]。

综上所述 煤堆自燃过程受影响因素较多 除煤 质外影响较为显著的就是风速和孔隙率等,目前不 同孔隙率煤堆自燃风速范围研究和不同风速下煤堆 压实适用范围的研究鲜见报道,因此有必要开展这 方面的研究。

本研究拟采用 COMSOLMultiphysics5.0 数值仿 真软件,以孔隙率为0.2~0.6的煤堆为基础,建立 风速为 0.05~13 m/s 条件下耦合自由和多孔介质 流动、多孔介质物质传递与扩散和多孔介质传热等 3 个物理场相互耦合的数值仿真模型,开展不同孔 隙率煤堆在不同风速条件下的自热 – 自燃数值仿真 实验 依据数值仿真结果分析煤堆不同孔隙率时的 温度随风速变化和不同孔隙率下的自燃风速范围变 化规律 并通过对大孔隙率煤堆压实后温度与自然

收稿日期: 2015 - 11 - 30; 修订日期: 2015 - 12 - 22

基金项目: 国家自然基金(51274113); 辽宁省教育厅一般项目(L2015221 L2012122)

作者简介: 董子文(1987 -) 男 安徽淮北人 辽宁工程技术大学博士研究生.

通讯作者: 吴 宪(1976-) 女 辽宁阜新人 辽宁工程技术大学讲师.

发火期变化规律的分析,讨论煤堆压实的最低不适用风速条件,为煤堆压实防治自燃提供科学规划。

# 1 建模与计算

## 1.1 物理模型

根据 Ejlali A 等的研究<sup>[14]</sup> ,在数值仿真计算中只有研究区域足够大才能消除有限元计算的影响,并提出总研究区域的高度为煤堆高度的 4 倍 ,长度为煤堆高度的 10 倍便可达到目的 ,结合文献 [15] 建立模型如图 1 所示 ,设置研究区域的高 60 m 长 200 m 是合理的。

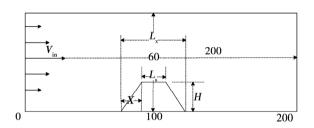


图 1 物理模型(m)

Fig. 1 Physical Model(m)

图 1 为本文数值仿真过程需要使用的物理模型 ,风流方向为图中左向右,右边界为开放出口,煤堆高度 H 、煤堆底部宽度为  $L_x$  ,煤堆角度  $\alpha$  ,煤堆顶宽  $L_s$  5 个模型的详细参数设置如表 1 所示。由于本文研究的主要内容为变风速条件下,其它因素单独或共同改变时对自燃的影响,所以每次开展仿真实验都将风速作为其中一个变量。

表1 物理模型参数

Tab. 1 Parameters of physical model

$L_{ m s}$ / m	$L_{\rm x}$ / m	H/m	TAN/1	α/(°)
10	20	6	1.2	50.5
12	24	9	1	45
8	18	7.5	1.5	58.8
5	15	4.5	0.9	38.8
6	12	5.4	1.8	64.5

# 1.2 边界和初始条件

# 1.2.1 边界条件

## (1) 自由和多孔介质流动

自由和多孔介质流动控制整个研究区域 将煤

堆设置为多孔介质 ,多孔介质的孔隙率 n=0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 ,平均粒径 dp=20 mm ,渗透率  $(kp/m^2)$  由平均粒径和孔隙率共同决定 ,采用式(1)表示:

$$kp = n^3 dp^2 / (150 (1 - n)^2)$$
 (1)

煤堆内由于温度升高会产生一定的体积力或热 浮力,采用式(2)进行简化控制:

$$h_{\mathcal{K}} = 12.25 \times y \times \frac{T - T0}{T}$$
 (2)

式中: h, 一热浮力 N/m³; y—区域高度 m。

煤堆以外的区域设置为自由流体; 研究区域的 左侧边界设置为风流入口,右侧边界设置为风流出口,入口采用风速( $V_{in}$ ) 控制,出口采用自由与多孔介质流动方程的压力控制。

## (2) 多孔介质物质传递与扩散

多孔介质物质传递与扩散控制区域为煤堆区域、该区域内发生煤氧复合的氧化放热反应、耗氧速率( $r_{-}O_{2}/\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ )根据杨永良的研究采用式(3)进行控制<sup>[16]</sup>:

$$r\_O_2 = \begin{cases} r\_O_2 1 = 1.861e^{15} (1.365 - 0.983 \log((dp + 1.585)/6.5)) (c_{O_2}/c_{O_2} 0) 10^{-464 6/T} \\ (273 [K] < T \le 343 [K]) \end{cases}$$

$$r\_O_2 = \begin{cases} r\_O_2 1 = 1.861e^{15} (0.659 - 0.529 \log((dp + 0.183)/6.5)) (c_{O_2}/c_{O_2} 0) \times 10^{-464 6/T} \\ (T > 343 [K]) \end{cases}$$

$$(3)$$

式中:  $r_{-}O_{2}1$  —低温阶段的耗氧速率  $mol/m^{3} \cdot s$ ;  $r_{-}O_{2}2$  —高温阶段的耗氧速率  $mol/m^{3} \cdot s$ ;  $c_{0_{2}}$  —氧气浓度  $mol/m^{3}$ ;  $c_{0_{2}}0$  —初始氧气浓度  $mol/m^{3}$ ; T —煤堆温度  $K_{0}$ 

氧气扩散系数( $D_{0}$ ,  $m^{2}$ /s) 采用(4) 控制:

$$D_{0_2} = (0.801 \ 1n - 0.161 \ 6) \times D_{0_2} 0 \times (T/T0)^{2/3} \times P0/P_2$$
 (4)

式中:  $D_{0_2}$  —氧气扩散系数  $m^2/s$ ;  $D_{0_2}0$  —初始状态的氧气扩散系数  $3.5 \times 10^{-5}$   $m^2/s$ ; T0 —煤堆初始温度或环境温度 K; P0 —煤堆初始气压 Pa;  $P_2$  —煤堆内现实气压 Pa。

煤堆顶部边界以及迎风坡和背风坡为环境煤堆

(5)

与外界环境的交界面 ,此 3 边界设置为氧气浓度边界 ,氧气浓度 21% (  $9.375 \text{ mol/m}^3$  ) 。

## (3) 多孔介质传热

多孔介质传热控制区域为煤堆 煤堆内煤体耗氧放热 放热量采用式(5)进行控制:

$$q\_c = \begin{cases} 6.021 \times 1e^{10} (0.905 \ 3 - 0.128 \ 6 \log(dp/6.5)) \times \\ (c_{0_2}/c_{0_2}0) \times 1e^{-6 \ 231.8/T} (273 \ [\text{K}\ ] < T \le 343 \ [\text{K}\ ]) \\ 6.021 \times 1e^{10} (0.560 \ 2 - 0.398 \ 6 \log(dp/6.5)) \times \\ (c_{0_2}/c_{0_2}0) \times 1e^{-6 \ 231.8/T} (T > 343 \ [\text{K}\ ]) \end{cases}$$

煤体导热系数是一个随着温度变化的变量,采用(6)控制:

$$\lambda_{\rm T} = 0.000 63 \text{ T} + 0.110 7$$
 (6)  
式中:  $\lambda_{\rm T}$  —煤堆的导热系数 J/( m • K) 。

煤堆顶部边界和两坡面为对流热通量控制边界 顶部边界的对流传热系数为  $4.1~\rm{W/m^2} \cdot \rm{K^{-1}}$  , 两坡面为  $1.51~\rm{W/m^2} \cdot \rm{K^{-1}}$  。

以上3个物理场必须进行有效耦合才能实现多场的统一,首先在自由与多孔介质流体流动物理场中的温度由多孔介质传热物理场控制;多孔介质传热的压力和流场速度由自由与多孔介质流动物理场控制;多孔介质物质传递与扩散的速度场也由自由与多孔介质物质传递的速度场举行控制,其温度场用多孔介质传热物理场的温度控制;3个物理场之间通过流场速度、温度和流场压力3种矢量实现了耦合和统一。

## 1.2.2 初始值

初始环境的相对湿度设置为 75% ,环境与煤堆 初始温度假设一致均为 293 K ,空气密度 1.25 kg/m³ ,研究区域初始风流速度与变条件进行仿真实验时设置的风速一致; 煤堆初始氧气浓度为 21% ( 9.375 mol/m³ ); 煤堆初始水分 3.5% ,密度 1.350 kg/m³ ,煤的最短自然发火期为  $45\sim60$  d ,煤堆内部及环境初始气压为 1.013 25  $e^5$  Pa。

#### 1.3 网格划分与计算

# (1) 网格划分

网格化分采用流体力学标准进行控制,网格尺寸采用特别细化处理,最大单元尺寸 0.1 m,最小单元尺寸 0.01 m,最大单元生成率 1.08,曲折因子 0.25 划分后定型几何有 2 域,15 边界,14 定点,共计划分了 7710 域单元,492 边界单元。

## (2) 计算

计算过程采用所有组合参数化扫描控制 ,瞬态 计算的步长设定为 1 d ,相对容差 1e-6 ,采用非线性定常控制 ,阻尼因子 0.9 ,终止方法采用迭代最大步数 5 步 ,稳定性采用 Anderson 加速控制 ,计算时长 180 d 。

## 1.4 模型验证

国电平庄能源股份有限公司瑞安煤矿目前主采 2 号煤层 。该煤为老年褐煤 ,发热量 4 500~5 000 大卡属于易自燃煤 。最短自然发火期 30~45 d ,由于滞销等原因瑞安矿业煤场堆积储存大量煤炭。本文以其中一个高约 6 m ,堆放近似等腰梯形,角度在 45°~55°之间,平均 50°,长 30 m ,梯形底部宽度 20 m ,底部宽 10 m 的经过分选后得小块煤煤堆进行相关研究和数值建模的可靠性验证,该煤堆堆放的粒径范围在 0~30 mm 范围内,平均为 20 mm;测点布置前分层取样,采用密度法测定煤堆孔隙率平均为 0.3。

由图 2(a) 可知 ,长 30 m 煤堆以 7.5 m 为间距取中间 3 个断面为测试断面 ,每个断面的测点布置如图 2(b) 所示 ,每个断面共布置 5 个测点 ,采用AD590 埋入相应位置后监测煤堆温度变化 ,监测周期 60 d ,监测期内环境温度平均为 27  $\infty$  ,风速平均为 2 m/s。

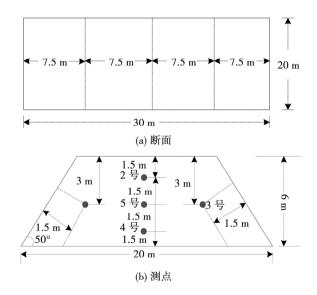


图 2 测试断面及测点布置

Fig. 2 Test section and measurement points

取 3 个断面相同位置测点的平均值绘制曲线如图 3a 所示 数值模拟建立与该测试煤堆相同的堆放

规格及孔隙率模型进行模拟,得到 5 个测点的温度如图 3b 所示。

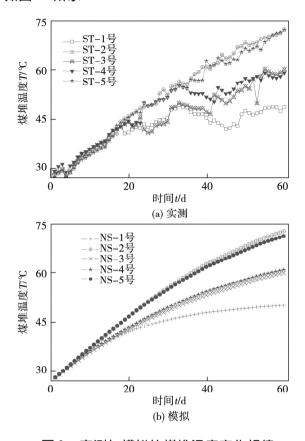


图 3 实测与模拟的煤堆温度变化规律 Fig. 3 Trend of the measured and simulated coal pile temperatures

观察图 3a,监测值中煤堆温度总体呈升高趋势,但是存在一定的波动,这与实测环境条件下环境温度、风速因昼夜差距和监测时间的延续存在一定的差异有关,同时监测期内有存在多次少量的降雨,也对其具有一定影响;而数值模拟过程外界风速和温度条件以监测期间测定的平均值进行设置,为了节约计算资源没有考虑降雨、昼夜温度变化等情况,因此数值模拟计算出的温度随时间变化曲线较为圆滑,没有波动现象。

图 4 为实测与模拟结果的相对误差,图中显示,1~5 号测点的相对误差范围分别为: -5.9%~15.7%、-0.1%~14.3%、-3.1%~15%、-8.3%~9.2%和-1.4%~16.3%;5 个测定的平均相对误差分别为: 3.9%、3.8%、3.9%、0.2%和4.7%;由以上相对误差的范围和平均相对误差判定数值模拟结果与实测结果较为接近,在工程应用中能满足需要,证明本文所见数值模型是合理的、可靠的。

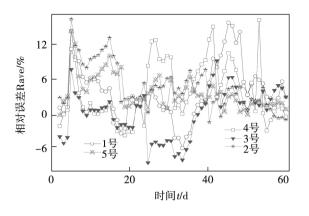


图 4 相对误差

Fig. 4 Relative error

# 2 结果分析与讨论

# 2.1 煤堆压实后最高温度变化

研究风速对煤堆自热 - 自燃过程的影响时开展了风速为 0.05~13 m/s 时 煤堆堆放 180 d 自热 - 自燃过程数值模拟 ,分析煤堆在不同风速条件下所能达到的最高温度、煤堆内部出现超过 343 K 高温区域的风速范围 解释风速对煤堆自热 - 自燃过程的影响及不同煤堆压实的适用性。

图 5 为 1 号煤堆在孔隙率 0.2~0.6 条件下煤堆内部最高温度随风速变化规律。图中显示,当风速较低时煤堆的孔隙率越小 最高温度越低,当风速较大时反之。孔隙率 0.2~0.6 最大最高温度对应的风速分别为 4、1.4、0.8、0.4 和 0.2 m/s 最高温度分别为 390.4、381.6、377.2、371.5 和 367.5 K。

孔隙率 0.2 的温度变化曲线与孔隙率为 0.6、0.5、0.4 和 0.3 的交点分别是风速为 0.7、0.9、1.3 和 1.9 m/s ,风速在交点左侧大孔隙率煤堆的最高温度低于孔隙率 0.2 的 ,在此风速范围内进行煤堆压实能保证煤堆最高温度明显降低 ,风速在交点的右侧时孔隙率 0.2 的最高温度高于较大孔隙率煤堆 因此在交点右侧风速条件下进行煤堆压实会适得其反 ,导致煤堆温度升高; 因此如果将煤堆孔隙率压实到 0.2 时随原煤堆孔隙率的增加 ,压实的不适用风速左移 即不适用风速降低。

图 6 为 2 号煤堆的最高温度随孔隙率和风速变化规律。与 1 号煤堆类似,在小风速条件下煤堆孔隙率越小最高温度越低,大风速条件下孔隙率越小煤堆的最高温度越高。孔隙率 0.2、0.3、0.4、0.5 和

0.6 的煤堆最大最高温度出现在风速为 3、1.4、0.6、0.35 和 0.2 m/s 时,对应的最大最高温度分别为: 537、528、526、528.5 和 528.5 K。孔隙率 0.2 的煤堆与孔隙率 0.6、0.5、0.4 和 0.3 的交点分别在风速为 0.6、0.9、1.3 和 2 m/s 处,对于某一大孔隙率当其处于风速在与孔隙率 0.2 的交点左侧时将煤堆压实到 0.2 后煤堆的最高温度会降低,风速在交点右侧时压实则会适得其反。同时随孔隙率增加其与孔隙率 0.2 的最高温度交点左移,即孔隙率增加煤堆的压实不适用风速较低,原孔隙率越大煤堆压实的不适用风速越小,压实的适用风速范围越窄。

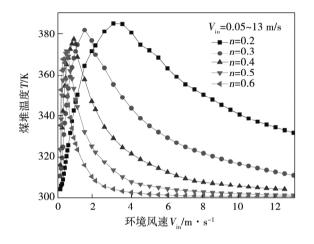


图 5 1 号煤堆最高温度变化( $V_i$ n = 0.05 ~ 13 m/s)

Fig. 5 Variation of the maximum temperature in coal pile no. 1

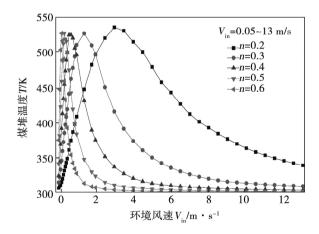


图 6 2 号煤堆最高温度变化 (V<sub>in</sub> = 0.05~13 m/s)

Fig. 6 Variation of the maximum temperature in coal pile no. 2

图 7 为 3 号煤堆最高温度变化规律。图中显示与 1~2 号煤堆类似 小风速时煤堆最高温度随孔隙率降低而降低 ,风速较大时随孔隙率较低而增加。该煤堆在孔隙率为 0.2~0.6 时达到最大最高温度对应的风速分别为: 2.5、1、0.6、0.35 和 0.2 m/s ,对应的最大最高温度分别为: 424、418、412、410 和 406 K ,孔隙率越大最大最高温度越小且对应的风速越小 ,说明孔隙率较大的煤堆在小风速条件下较易自燃。孔隙率0.2 与孔隙率0.6、0.5、0.4 和 0.3 交点风速分别为: 0.5、0.7、1 和 1.6 m/s ,与上述煤堆类似 ,孔隙率越大其与孔隙率 0.2 的交点风速向左移动。煤堆孔隙率越大在低风速条件下温度越高 ,且孔隙率越大其随风速增加达到最大最高温度的速度越快 ,孔隙率越小 ,随风速增加最高温度升高 ,风速范围越大。

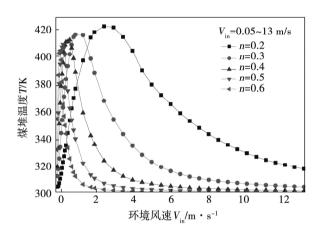


图 7 3 号煤堆最高温度变化 (V<sub>in</sub> = 0.05~13 m/s)

Fig. 7 Variation of the maximum temperature in coal pile no. 3

图 8 为 4 号煤堆自热过程中最高温度变化情况 图中显示 与以上 3 个煤堆的最高温度变化具有类似的规律 但是 4 号煤堆内部最高温度没有出现最高温度超过 343 K 的情况 即没有发生自燃 这主要与煤堆的堆放尺寸参数有关。4 号煤堆孔隙率为0.6、0.5、0.4、0.3 和0.2 时出现最大最高温度的对应风速分别为:2.5、1、0.8、0.45 和0.3 m/s ,所对应最大最高温度分别为 340.3、338.2、335.9、333.7 和330.6 K。4 号煤堆孔隙率为0.2 时最高温度变化曲线与孔隙率为0.6、0.5、0.4 和0.3 时的交点风速分别为0.6、0.8、1.2 和1.7 m/s 与以上3 个煤堆对

比交点风速明显较低。

如图 9 所示 5 号煤堆的最高温度变化与以上 1 ~4 号煤堆的最高温度变化具有类似的变化规律。 5 号煤堆在孔隙率分别为 $0.2 \times 0.3 \times 0.4 \times 0.5$  和 0.6 时出现最大最高温度对应的风速分别为  $2.5 \times 1 \times 0.6 \times 0.35$  和 0.2 m/s ,所对应的最大最高温度分别为  $483.5 \times 474.3 \times 474.3 \times 469.3$  和 464.8 K。孔隙率 0.2 的温度变化曲线与  $0.6 \times 0.5 \times 0.4$  和 0.3 的交点风速分别为  $0.5 \times 0.7 \times 1.1$  和 1.6 m/s。

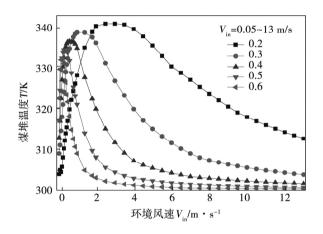


图 8 4 号煤堆最高温度变化(  $V_{\rm in}$  = 0.05 ~ 13 m/s)

Fig. 8 Variation of the maximum temperature in coal pile no. 4

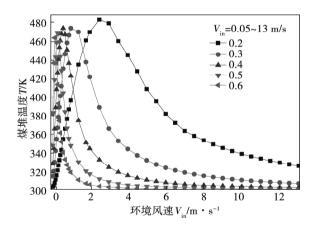


图 9 5 号煤堆最高温度变化( $V_{in} = 0.05 \sim 13 \text{ m/s}$ )

Fig. 9 Variation of the maximum temperature in coal pile no. 5

#### 2.2 压实后发火期的变化

考虑煤堆的压实效果不但要考虑煤堆的温度变化 还应该考虑煤堆压实后是否能完全消除自燃危险 如果不能完全消除自燃危险时 较大程度上延长

煤堆的自然发火期也是可以考虑的,因此需要开展 煤堆压实后自然发火期变化研究。

图 10 为 1 号煤堆孔隙率 0. 3、0. 4 和 0. 5 压实到孔隙率 0. 2 时煤堆的自然发火期随风速变化情况。由于孔隙率 0. 6 的煤堆压实到孔隙率 0. 2 后可以完全消除自燃危险 ,因此不必对其进行赘述。图中显示孔隙率 0. 3、0. 4 和 0. 5 的煤堆在原孔隙率自燃风速范围内进行压实后分别在风速大于 2. 3、1. 4、0. 9 m/s 时出现了自然发火期的缩短 ,分别缩短了 0~78、0~105、0~22 d ,风速低于以上值时自然发火期分别延长了 1~48、1~54、1~30 d ,说明孔隙率为 0. 3、0. 4、0. 5 时从自然发火期角度考虑 ,煤堆的不适用压实风速分别为 2. 3、1. 4 和 0. 9 m/s。

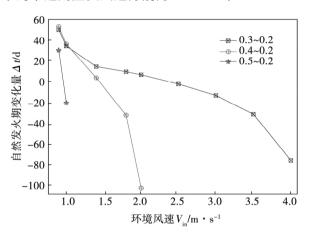


图 10 1号煤堆压实后自然发火期变化 Fig. 10 Variation of the time of spontaneous combustion after compaction for coal pile no. 1

图 11 为 2 号煤堆孔隙率 0. 3~0. 6 压实到 0. 2 时煤堆的自然发火期随风速变化情况。对于孔隙率 0. 3 压实到 0. 2 时在风速大于 3 m/s 时煤堆的自然发火期与不压实时相同,因此压实无效,当风速小于该风速时进行压实,自然发火期可以延长 1~65 d,压实有效;原煤堆孔隙率 0. 4 时压实到孔隙率 0. 2 时在风速大于 1.8 m/s 至原煤堆最大自燃风速条件下煤堆的自然发火期缩短了 1~4 d,因此当风速大于 1.8 m/s 时 2 号煤堆原孔隙率 0. 4 不适用压实到孔隙率 0. 2,当风速小于 1. 8 m/s 时煤堆的自然发火期延长了 1~75 d,压实有效;当原孔隙率为 0. 5时压实到孔隙率 0. 2 时,在风速小于 1. 1 m/s 时自然发火期缩短了 1~17 d,压实促进煤堆自燃,不宜进行压实,当风速低于 1. 1 m/s 时煤堆的自然发火

期延迟了1~75 d 压实可以具有一定的作用; 当孔隙率为0.6 时压实到0.2 ,在原孔隙率自燃风速范围内进行压实会保证煤堆自然发火期延长14~72 d ,风速大于0.8 m/s 时压实则会导致煤堆自燃 ,因此不宜进行压实。因此对2号煤堆 ,孔隙率为0.3~0.6 时不宜压实风速分别为3、1.8、1.1 和0.8 m/s。

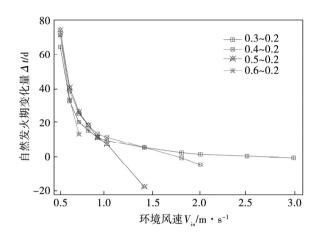


图 11 2 号煤堆压实后自然发火期变化

Fig. 11 Variation of the time of spontaneous combustion after compaction for coal pile no. 2

图 12 为 3 号煤堆在原孔隙率 0.3、0.4、0.5 和 0.6条件下进行压实到孔隙率 0.2 时煤堆的自然发 火期变化 压实后发火期变化都在原煤堆自燃风速 范围内进行研究。原孔隙率 0.3 压实到目标孔隙率 0.2 时在风速大于2 m/s 时自然发火期缩短了1~ 42 d 风速小于 2 m/s 时延迟了 1~88 d; 原孔隙率 0.4 时,在风速大于1.2 m/s 时缩短了1~55 d,风 速小于该值时发火期延长了1~94 d; 原孔隙率0.5 时 在风速大于 0.9 m/s 时发火期缩短了 1~7 d 风 速小于该值时煤堆的自然发火期延迟了1~93 d;由 于原孔隙率 0.6 的最大自燃风速小于目标孔隙率 0.2 的最小自燃风速所以压实后可以完全有效保障 不发生自燃; 综上所述,对于3号煤堆原孔隙率为 0.3、0.4 和 0.5 时在原孔隙率对应的自燃风速范围 内进行煤堆压实的最低不适用压实风速为: 2、1.2 和 0.9 m/s。

图 13 为 5 号煤堆在原孔隙率 0.3、0.4、0.5 和 0.6 条件下进行压实到孔隙率 0.2 时煤堆的自然发火期变化。由于原孔隙率 0.6 的最大自燃风速小于目标孔隙率的最小自燃风速因此进行煤堆压实后不

会发生自燃,可以有效保护煤堆;原孔隙率为 0.3 时,风速大于 2 m/s 时煤堆的自然发火期缩短了 1~51 d,风速小于 2 m/s 时延长了 1~52 d;原孔隙率 0.4 时,风速大于 1.4 m/s 时发火期缩短了 1~46 d,风速小于 1.4 m/s 时自然发火期延长了 1~58 d;原孔隙率 0.5 时,风速大于 0.9 m/s 时煤堆的自然发火期缩短了 1~16 d,小于该风速时延长了 1~57 d。因此对于 5 号煤堆从发火期变化角度考虑,原孔隙率在 0.3~0.5 时最低不适用压实风速为 2、1.4 和 0.9 m/s。

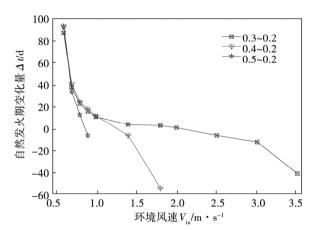


图 12 3 号煤堆压实后自然发火期变化

Fig. 12 Variation of the time of spontaneous combustion after compaction for coal pile no. 3

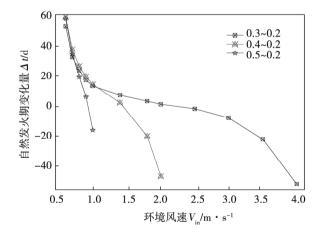


图 13 5 号煤堆压实后自然发火期变化 Fig. 13 Variation of the time of spontaneous combustion after compaction for coal pile no. 5

# 2.3 压实后不适用风速

综合以上煤堆压实后煤堆最高温度及自然发火期的变化。得出如表 2 所示的最低不适用压实风速 ,

"-"表示在原孔隙率自燃风速范围内从发火期角度考虑不存在压实不适用风速,分别如图 10、图 12、图 13 所示。根据表 2 显示,综合考虑煤堆压实

前后温度及自然发火期变化 从安全角度考虑 取两者对应的相对较低的风速作为煤堆压实的最低不适用风速进行煤堆压实较为安全 如表 3 所示。

表 2 压实到 0.2 的不适用风速

Tab. 2 Inapplicable wind - velocity

n/1 —	1号-v	1号-v/m·s <sup>-1</sup>		2号-v/m·s <sup>-1</sup>		/m • s - 1	4号-v/m • s <sup>-1</sup>	5号-v	/m • s <sup>-1</sup>
	t	T	t	T	t	T	t	T	t
0.3	2.3	2	3	2	2	1.8	1.8	2	1.8
0.4	1.4	1.4	1.8	1.4	1.2	1.4	1.4	1.4	1.4
0.5	0.9	1	1.1	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8
0.6	-	0.7	0.8	0.7	-	0.6	0.6	-	0.6

根据表 3 显示,同一煤堆原孔隙率不同时进行压实的最低不适用风速差别较大,孔隙率越大最低不适用压实风速越低,相同原始孔隙率条件下因煤堆不同差异较小,如图 14 所示,最低压实不适用风速只受原始孔隙率影响显著,受煤堆堆放规格尺寸影响明显。因此取相同孔隙率下不同煤堆最低压实不适用风速的平均值进行曲线拟合,如图 15 所示。

表 3 最低压实不适用风速(m/s)

Tab. 3 Minimum inapplicable wind-velocity (m/s)

孔隙率	1号-v	2 号 - v	3号-v	4号-v	5号-v
0.3	2	2	1.8	1.8	1.8
0.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
0.5	0.9	0.9	0.8	0.9	0.8
0.6	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6

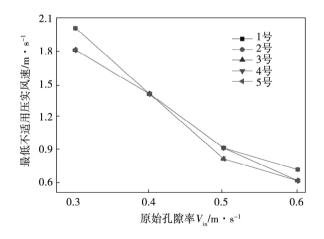


图 14 不同煤堆不同原始孔隙率下 压实不适用风速

Fig. 14 Inapplicable wind-velocity

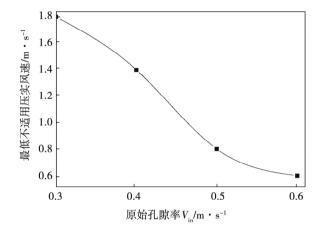


图 15 煤堆最低压实不适用风速

Fig. 15 Minimum inapplicable wind-velocity

图 15 显示 ,最低压实不适用风速与煤堆孔隙率之间具有较好的幂函数关系如式(7) 所示 ,式(7) 的回归系数为 0.968 8 ,拟合相关性较好 ,可以满足煤堆压实现场工程实践的需要。

$$v = 0.266 \ n^{-1.651} (R^2 = 0.968 \ 8)$$
 (7)

## 3 结 论

(1) 因不同煤堆和不同孔隙率下煤堆的自燃风速范围和最高温度不同,压实的适用风速范围存在明显差异 5 种完全不同规格尺寸的煤堆对于原孔隙率为 0.3~0.6条件下如果将其压实到孔隙率0.2时会在一定的风速条件下出现温度的升高现象,最低不适用压实风速因孔隙率差异明显,当压实的目标孔隙率为 0.2 时,最低不适用压实风速在原孔隙率为 0.3 、0.4 、0.5 和 0.6 时一般为 1.8~2、1.4 、0.8

- $\sim 1 \approx 10.6 \sim 0.7 \text{ m/s};$
- (2) 从自然发火期角度分析 A 个自燃煤堆原始孔隙率 0.6 时压实到孔隙率 0.2 一般其可以避免在 180 d 内发生自燃; 1、2、3 和 5 号煤堆孔隙率 0.3、0.4 和 0.5 压实到孔隙率 0.2 时的不适用最低风速分别为: 2.3、1.4 和 0.9 m/s; 3、1.8 和 1.1 m/s; 2、1.2 和 0.9 m/s; 2、1.4 和 0.9 m/s。
- (3) 原孔隙率  $0.3 \sim 0.6$  的煤堆压实到目标孔隙 0.2 时的最低不适用风速因原始孔隙率不同存在较大差异,而煤堆堆放规格参数对其影响不明显; 建立了不同原始孔隙率条件下压实目标孔隙率 0.2 时的煤堆压实最低不适用方程: v=0.266  $n^{-1.651}$  (  $R^2=0.968$  8) 。

#### 参考文献:

- MOGHTADERI B, DLUGOGORSKI B. Z, KENNEDY E. M.
   Effects of wind flow on self-heating characteristics of coal stockpiles
   [J]. Institution of Chemical Engineers 2000 78(B):445 453.
- [2] RIBEIRO J ,FERREIRA E. SILVA da ,LI Z ,et al. Petrographic , mineralogical and geochemical characterization of the Serrinha coal waste pile douro coalfield ,portugal and the potential environmental impacts on soil ,sediments and surface waters [J]. International Journal of Coal Geology 2010 83: 456 – 466.
- [3] 肖 辉 杜翠凤. 新型高聚物煤自燃阻化剂的试验研究[J]. 安全与环境学报 2006 β(1):46-48.

  XIAO Hui ,DU Cui-feng. Experiments on a new kind polymer inhibitor for suppressing coal spontaneous ignition [J] Journal of Safety and Environment 2006 β(1):46-48.
- [4] 邓 军 李 贝,马 砺.用热棒技术强化煤堆降温幅度试验
  [J].中国安全科学学报 2015 25 (6):62-67.

  DENG Jun ,LI Bei ,MA Li. Influence of heat pipes on temperature distribution in coal storage pile [J]. China Safety Science Journal , 2015 25 (6):62-67.
- [5] 徐精彩. 空气在煤堆中的渗流规律探讨[J]. 西安矿业学院学报、1995、15(4): 289-293.XU Jing-cai. Air presence flowing law in coal heap [J]. Journal of
  - Xián Mining Institute ,1995 ,15(4):289 -293.

process of self-hearting in a wet coal pile [J]. China Safety Science

[6] 董希琳,田 丽. 湿煤堆自热过程的非稳态数学模拟[J]. 中国安全科学学报,1999 &(3):38-43.

DONG Xi-lin, TIAN Li. Mathematical simulation in the transient

- Journal ,1999 8(3):38-43.
- [7] 张瑞新,谢和平. 煤堆自然发火的试验研究[J]. 煤炭学报, 2001 26(2):168-171.

  ZHANG Rui-xin ,XIE He-ping. Experimental study of the propensity of coal stockpiles to spontaneous combustion [J]. Journal of China Coal Society 2001 26(2):168-171.
- [8] 张瑞新、谢和平、谢之康. 露天煤体自然发火的试验研究[J]. 中国矿业大学学报 2000 29(3):235-238.

  ZHANG Rui-xin ,XIE He-ping ,XIE Zhi-kang. Experimental study on spontaneous combustion of ground coal [J] Journal of China University of Mining & Technology 2000 29(3):235-238.
- [9] ALAZMI B ,VAFAI K. Analysis of variants within the porous media transport models [J] J. Heat Transfer 2000 ,122: 303 – 325.
- [10] HOOMAN ,K. and GURGENCI ,H. ,Effects of temperature dependent viscosity on forced convection inside a porous medium
  [J]. Transp. Porous Media 2008 75: 249 267.
- [11] KGUNA F. A ,ESSENHIGH R. H. Self-ignition characteristics of coal stockpiles: theoretical prediction from a two-dimensional unsteady-state model [J]. Fuel 2001 80: 409 – 415.
- [12] EJLALI A ,AMINOSSADATI S. M ,HOOMAN K ,et al. A new criterion to design reactive coal stockpiles [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2009 36: 669 673.
- [13] EJLALI A ,HOOMAN K ,BEAMISH B. Effects of porosity changes on the self-heating characteristics of coal stockpiles [J]. Journal of Porous Media 2012 ,15(9): 869 – 876.
- [14] EJLALI A MEE D. J ,HOOMAN K ,et al. Numerical modeling of the self-heating process of a wet porous medium [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2011 54:5200 – 5206.
- [15] 董子文 吳 宪 济庆杰 ,等. 风障联合压实防治煤堆自燃技术工艺参数优化[J]. 中国安全生产科学技术 2016 ,12(03): 15-20.
  - DONG Zi-Wen "WU Xian QI Qing-Jie 'et al. Parameter optimization on prevention and control technology for spontaneous combustion of coal stockpile by combined method of compaction and wind barrier [J]. Journal of Safety Science and Technology '2016 '12 (03):15 20.
- [15] 杨永良. 煤最短自然发火期测试及煤堆自燃防治技术研究 [D]. 中国 徐州 中国矿业大学 2009.
  - YANG Yong-liang. Study on measurement of the shortest coal spontaneous combustion period and spontaneous combustion control technology of coal stockpile [D]. XU Zhou ,China ,China University of Mining & Technology 2009.

(单丽华 编辑)

consumption rate. Key words: fuel efficiency net efficiency coal consumption rate heat balance

中小型火电机组凝汽余热利用供热系统集成研究 = Configuration Research on Waste Heat Utilization System of Condensing Steam for Middle and Small-sized Thermal Power Unit [刊 ,汉] LI Yan ,MA Yi-feng , ZHANG Yong-gui (College of Civil Engineering & Mechanics ,Yanshan University ,Qinhuangdao ,China ,Post Code: 066004) ,FU Lin (School of Architecture ,Tsinghua University ,Beijing ,China ,Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -54~58

There is tremendous energy saving potential in the waste heat recovery of condensing steam for middle and small-sized thermal power unit. Aiming at middle and small-sized water-cooled unit this paper combines the low-vacuum operation and the absorption heat pump technologies and then puts forward a new system of condensing steam waste heat utilization. This system overcomes the high investment and the large-scale occupation of the absorption heat pump and therefore increases the feasibility to recover the waste heat of condensing steam. Taking the 135 MW water-cooled unit as research object for the ratio of the extraction and the exhausted stem of the turbine and its back pressure we set the security constraints through the safety analysis on the last-stage blade of the steam turbine. Also the system is optimized through analyzing its energy efficiency and economy. Results above can be used to guide the design of condensing steam waste heat utilization system for middle and small-sized thermal power unit. Key words: turbine unit waste heat recovery of condensing steam system optimization

双螺杆膨胀机的发电特性试验研究 = Experimental Study on Electricity Output Characteristics of Process Gas Twin Screw Expander [刊 以 XU Ming-zhao YANG Xiao-qiang, DIAO Anna, YANG Yi(Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute Shanghai 200072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 31(10). -59~62

The problem of using the screw expander to replace the industry pressure and temperature reducing device was theoretically analyzed and experimentally investigated. Thermodynamic model of the under-expansion working process in twin-screw expander was proposed in this paper. Through the analysis of the theoretical and experimental data the results indicate that under-expansion can lead to the reduction in electrical generation and the losses increases with the suction pressure. Due to the influence of heat exchange and leakage the actual expansion process is close to isothermal expansion. The theoretical calculation results agree reasonably well with the experimental data when the suction pressure is up to 0.238 MPa and the maximum and minimum deviations are 18% and 10% respectively. **Key words**: pressure and temperature reduction twin-screw expander under-expansion

不同堆放条件下煤堆压实最低不适用风速研究 = Study on the Minimum Inapplicable Wind Velocity of Coal Stockpile Compaction under Different Conditions of Stacking [刊 ,汉] DONG Zi-Wen ,WU Xian , QI Qing-Jie , ZHENG Dan (College of Safety Science and Engineering ,Liaoning Technical University ,Fuxin Liaoning , China ,Post Code: 123000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016 ,31(10) . -63 ~71

In order to enhance the pre-judgment ability of feasibility of compaction for prevention of spontaneous combustion in coal stockpiles the simulation model of spontaneous combustion in coal stockpile has been established by using the software of COMSOLMultiphysics 5.0. Numerical simulations for 5 different stack dimensions of coal stockpile were carried out and the changes of temperature and time of spontaneous combustion after compacting were studied and the applicability of compaction in coal stockpile were analyzed. The minimum impropriety wind-velocity equation of coal stockpile compaction was established with the consideration of porosity. The results show that there are different minimum impropriety wind velocities for the compaction of coal stockpile. The minimum impropriety wind-velocity from the perspective of changes in temperature is lesser than that from the perspective of changes in time of spontaneous combustion. Set the smaller value as the judgment standard there is a weak correlation with the stack dimensions and the minimum impropriety wind-velocity to compaction and the original porosity. The relationship between the minimum impropriety wind-velocity of compaction and the original porosity of coal stockpile exhibits a power function correlation. **Key words**: spontaneous combustion of coal stockpile compaction inapplicable wind velocity stack dimension porosity

基于流场不均匀度对 SCR 效率影响的探究 = The effect of Uneven Flow Field on the Efficiency of SCR [刊 汉] NIU Cai-wei ,LIU Han-tao (School of Machinery and Power Engineering ,North University of China , Taiyuan ,China ,Post Code: 030051) ZHANG Pei-hua (Shanxi Pingshuo Gangue-fired Power Generation Co. Ltd. , Huozhou ,Post Code: 036800) ,JIA Jian-dong (School of Machinery and Power Engineering ,North University of China ,Taiyuan ,China ,Post Code: 030051) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016 ,31 (10) . -72 ~78

The flow field in a selective catalytic reduction selective catalytic reduction (SCR) denitration reactor of a 600 MW coal-fired power plant was numerically simulated. Based on the relative standard deviation, the unevenness of NO and NH<sub>3</sub> concentration at the entrance of the first layer of the catalyst were investigated. The results show that the unevenness of concentration and flue gas temperature are higher than other conditions, the unevenness of NO concentration, NH<sub>3</sub> concentration and flue gas temperature all reduced as the conditions become 50THA 75THA THA BRL BMCR conditions, the unevenness of NO concentration was 0.399 131 436% 0.271 308 784%; the unevenness of NH<sub>3</sub> concentration was 11.431 272 594% 11.294 855 634%; the unevenness of flue gas temperature was 0.081 935 553% 0.079 103 890% under 50THA BMCR conditions, while the coinciding trend of NO and NH3 concentration decrease at low load. The above indicate that the increasing unevenness of flow field at low load makes a great difference in reducing SCR denitration efficiency, which causes boiler operation, the design of SCR de NO<sub>x</sub> system and so on are optimized to decrease the catalyst deactivation rate. **Key words**: SCR relative standard deviation denitration efficiency numerical simulation

结构化填充床内层流流动特性的研究 = Study of Laminar Flow Characteristics in a Structured Packed Bed [刊 汉] LI Nan ,SHI Jun-rui ,LIU Yang (Key Laboratory of Clean Combustion for Electric Generation &