

试验研究

自燃煤矸石山内部温度拟合研究

陈兵, 胡振琪, 赵艳玲, 李江坤, 苏未曰, 何松

(中国矿业大学(北京)土地复垦与生态重建研究所, 北京 100083)

摘要: 了解煤矸石山内部温度的变化对煤矸石山自燃深度的测算以及煤矸石山自燃的预防具有重要的作用。分析了王庄煤矸石山温度探测试验的数据, 采取合适的拟合方法, 建立温度拟合模型, 揭示出自燃煤矸石山内部温度的变化趋势, 进而为下一步的灭火工作做好准备。通过模型的比较、验证, 证明研究最后得到的基于一元二次函数和指数函数预测模型是切实可行的。

关键词: 自燃煤矸石山; 温度探测; 拟合; 模型验证

中图分类号: TD854.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8759(2011)02-0017-04

TEMPERATURE FITTING STUDY OF COMBUSTION SPONTANEOUS COAL WASTE PILES

CHEN Bing, HU Zhen-qi, ZHAO Yan-ling, LI Jiang-kun, SU Wei-yue, HE Song

(Institute of Land Reclamation and Ecological Reconstruction,
CUMTB, Beijing 100083, China)

Abstract: Knowing the changes of internal temperature in coal waste piles would play an important role in measuring the depth of spontaneous combustion in coal waste piles and preventing spontaneous combustion of coal waste piles. The study analyzes the data from the experiment of detecting temperature in Wangzhuang coal waste piles, takes appropriate fitting methods and establishes temperature fitting models, reveals the internal temperature's trends of coal wastes piles, then prepares for fire fighting next. By comparing with models and testing, the results of the study show that the predicting models based on a quadratic function and the exponential function are available.

Keywords: coal waste piles; temperature detecting; fitting; model testing

0 引言

据不完全统计, 目前全国历年累计堆放的煤矸石约 45 亿 t, 其中规模较大的煤矸石山有 1 600 多座, 占地面积约 1.5 万 hm^2 , 假如煤矸石产量按

原煤产量的 15 % 计, 则每年煤矸石的堆积量还将以大约 1.5~2.0 亿 t 的速度增加^[1]。由于矸石中含有残煤、碳质泥岩、碎木材等可燃物质, 在经过长期的露天堆积之后, 往往就会发生自燃现象, 据估计, 在全国这些数量巨大的煤矸石山当中, 至少约有 1/4 是自燃煤矸石山^[2], 甚至可能占煤矸石山总量的 30 % 以上, 严重地破坏了矿区的生态环境。

目前国内对于自燃煤矸石山治理技术已经有比较深入的研究, 诸如注浆灭火、绿化技术等, 并在山西成功提出了一些治理煤矸石山自燃的有效

收稿日期: 2011-01-17

基金项目: 国家 863 计划(2009AA06Z320), 国家自然科学基金项目(50874112), 煤炭资源与安全开采国家重点实验室资助项目(SKLCRSM08B09)

第一作者简介: 陈兵(1987-), 男, 安徽安庆人, 毕业于中国矿业大学(北京), 在读硕士, 主要从事煤矸石、土地复垦及土地整理方面的研究。

方法和预防措施。在矸石山温度探测及模型建立方面,刘二永、汪云甲、顾强等^[3]借鉴土壤的传热模型,通过求解矸石山内部热传导方程,建立了煤矸石的温度场模型,但关键的问题如何准确求出导热率还有待进一步地研究;梁铁山、谷明川^[4]在对平煤集团多座自燃或没有自燃矸石山温度探测之后,提出了矿井矸石山内部温度异常上升具有整体变化的现象并分析了变化原因,但是没有建立起内部温度变化模型;裴晓东、张人伟、杜高举等^[5]将矸石山看作一大体积多孔介质,运用多孔介质流体渗流理论并结合达西定律和渗透连续性方程,建立了煤矿矸石山自然发火的数学模型,但模型较为复杂。总之,煤矸石山内部温度探测是一个尚未很好解决的难题,本文试图通过实际内部温度探测数据的拟合,揭示内部温度的变化规律。

1 研究区概况

研究区选择在潞安集团王庄煤矿一座正在燃烧的矸石山(如图1)。矸石山形成于1986年,占地面积4 km²,堆放煤矸石量约110万 m³,自1996年发现着火以后,火势迅速扩大并蔓延至其他区域,燃烧区内树木大量死亡,并释放出刺激性的有毒有害气体,严重污染矿区周边的大气环境和危害居民的身体健康。

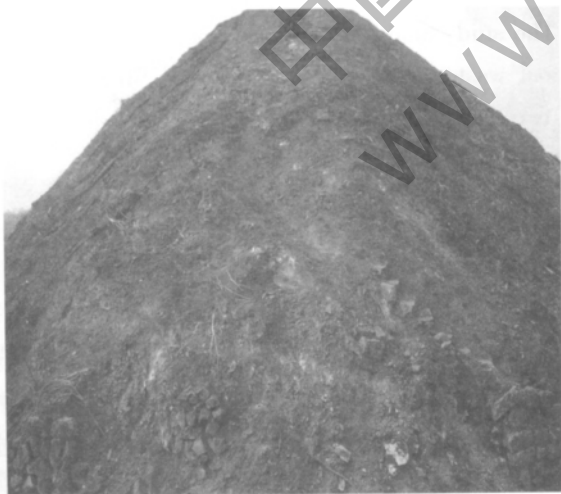


图1 王庄矸石山北坡现状图

2 内部温度实际探测试验

根据试验要求和现场调研情况,选取较为典型的北坡区域作为内部温度测量的指定地点,其内部燃烧程度属于三个特征阶段,表面温度也逐渐从60℃、40℃、20℃三个范围逐步减弱。

试验设备:(1)点温度计:测温范围为0~430℃;(2)土壤传感器:测温范围为0~500℃,测温精度为+1摄氏度,测杆长度为2 m,探头长度为10 cm,为热电阻式计温仪;(3)其他仪器:照相机、皮尺、钢尺、油漆(用于标记)、钢钎(用于打孔,便于土壤传感器深度内部测量温度)、1 m长钢棍、锤子等。

试验步骤:(1)在矸石山上北坡区域,以3 m为间隔进行网点布设,设计好结点位置,标号1,2,⋯,9记录并醒目标记,面积约50 m²左右;(2)用点温度计开始对1号点的表面温度进行探测,然后用土壤温度传感器插入到10 cm处,待数据稳定后记录;然后依次以10 cm为间隔向下插入土壤温度传感器探头,温度不宜超过500℃左右,待数据稳定后记录;(3)按照步骤(2)的方法依次对2~9号点的各个深度进行温度探测,待数据稳定后记录。

试验结果的北坡土壤温度数据表1。

表1 王庄矸石山北坡土壤温度

深度/cm	单位:℃								
	0	10	20	30	40	50	60	70	80
测点1	38	100	114	207	283	291	375	377	430
测点2	56	69	107	208	202	235	302	360	394
测点3	33	62	132	171	201	305	303	360	401
测点4	38	120	150	181	260	295	373	390	409
测点5	26	36	48	90	120	160	256	289	309
测点6	29	36	48	180	120	160	220	321	432
测点7	33	36	48	160	120	160	232	314	421
测点8	34	36	48	84	120	160	256	270	406
测点9	32	36	48	250	120	160	221	294	441

从上表中可以看出,总体上王庄矸石山北坡区域内部温度是随探测深度的增加而呈现出上升的趋势,但在测点6、测点7及测点9的30 cm处,这一深度的温度值明显高于其他测点该深度的温度值,这是因为这些测点附近矸石山表面具有裂缝,内部气体通过区域裂隙向外排出,导致测点温度值出现了跳跃性的变化。因此,在拟合的过程中,将舍去这些明显异常数值点。

3 温度曲线拟合

3.1 拟合模型的建立

在曲线拟合方法中,最小二乘法是最常采用的一种典型方法,应用非常广泛。因此,本次研究是在运用最小二乘法的基础上,通过北坡区域矸

石山土壤温度数据得出的温度走势曲线形状和趋势,根据以往的知识经验,推断出图中煤矸石山的探测深度与土壤温度之间的关系大体上满足基于一元二次函数($y=ax^2+bx+c$)或指数函数($y=ae^{bx}$)的关系要求。

本次研究采用最小二乘法对试验数据进行基于一元二次函数和指数函数的曲线拟合,若手工计算则数据点多、运算量大并且比较繁琐,故采用 EXCEL 软件进行数据的拟合过程。首先在 EXCEL 表中插入某一测点土壤温度的折线散点图,然后利用图表添加趋势线的功能就可完成该测点的拟合模型建立。

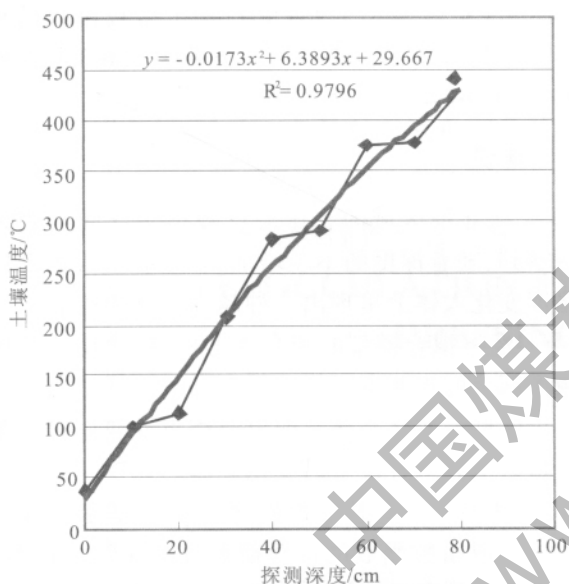


图 2 测点 1 基于一元二次函数的拟合模型

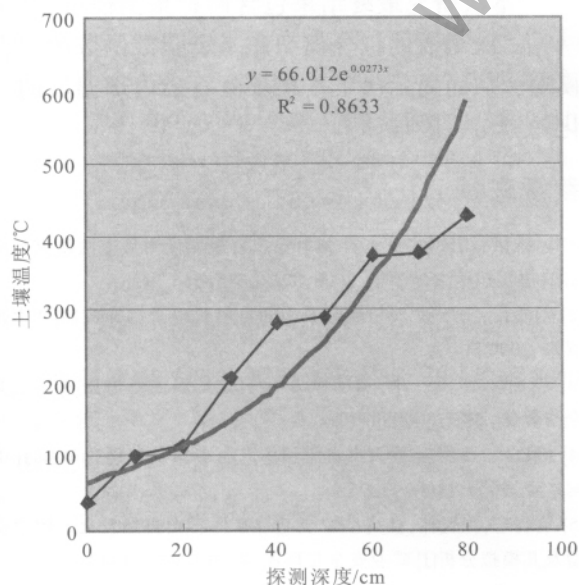


图 3 测点 1 基于指数函数的拟合模型

利用 EXCEL 软件对北坡测点 1 拟合的模型如图 2 和图 3 所示。

以上两图对比,我们可以比较直观地推测图 2 的拟合曲线比图 3 的拟合曲线更接近测点 1 的温度走势变化,偏差也更小。接下来,依次对北坡区域剩下 8 个测点分别进行以上两种函数的拟合,拟合结果表 2。

表 2 北坡区域温度曲线拟合的结果

测点	基于一元二次函数拟合		基于指数函数拟合	
	拟合模型	R ² 值	拟合模型	R ² 值
1	$y = -0.0173x^2 + 6.3893x + 29.667$	0.9796	$y = 66.012e^{0.0273x}$	0.8633
2	$y = 0.082x^2 + 3.7453x + 46.321$	0.9752	$y = 65.484e^{0.0249x}$	0.9278
3	$y = -0.053x^2 + 5.1574x + 24.291$	0.9840	$y = 53.168e^{0.0292x}$	0.8851
4	$y = -0.015x^2 + 5.9601x + 41.915$	0.9844	$y = 72.665e^{0.0256x}$	0.8398
5	$y = 0.0278x^2 + 1.734x + 15.745$	0.9735	$y = 27.958e^{0.0335x}$	0.9721
6	$y = 0.0756x^2 - 1.2093x + 36.377$	0.9961	$y = 26.737e^{0.0352x}$	0.9953
7	$y = 0.0712x^2 - 0.9612x + 36.532$	0.9987	$y = 28.351e^{0.0342x}$	0.9902
8	$y = 0.0593x^2 - 0.2763x + 33.685$	0.9834	$y = 29.47e^{0.0333x}$	0.9822
9	$y = 0.0775x^2 - 1.4467x + 39.88$	0.9900	$y = 27.952e^{0.0343x}$	0.9917

表 2 中列举了北坡每个测点两种拟合模型的方程结果以及方程的相关系数 R² 值,为了从中选出最优拟合模型,本研究进行了拟合度检验。

3.2 拟合优度检验

拟合优度检验是检验回归方程对样本观测值的拟合程度,即检验解释变量与被解释变量之间的相关程度。通常是对多个预测模型同时进行检验,选其拟合度较好的进行试用。拟合优度检验可以采用考察相关系数 R² 的大小来表示,R² 的数值越接近于 1,表示自变量对因变量的解释程度越高,观察点在拟合曲线附近越密集,说明残差越小,曲线的拟合效果越好。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}$$

其中, y 是观测值, \hat{y} 是回归方程的拟合值, \bar{y} 是观测值的平均值^[6]。

根据表 2 中的数据分别比较北坡每个测点基于一元二次函数和指数函数模型的 R² 值,比较的结果为测点 9 指数函数模型的 R² 值大于一元二次函数模型的 R² 值,因此指数拟合效果较好,该测点选用基于指数函数的拟合模型;测点 1~测点 8 则是一元二次函数模型的 R² 值大于指数函数模型的 R² 值,因此一元二次拟合效果较好,这些

测点则选用基于一元二次函数的拟合模型。

3.3 模型显著性检验

方程显著性检验就是对模型中解释变量与被解释变量之间的函数关系在总体上是否显著成立做出推断,常用的统计分析方法有 t 检验、卡方检验和方差分析等^[7]。本文研究的模型显著性检验采用方差分析法,它通过各个数据之间显示的偏差与 F 分布函数统计数据中认为是属于误差范围内的偏差进行比较,来测验各组数据之间有无显著差异存在^[8]。

主要方法:在一定的显著性水平下,若统计量 $F = \frac{S_A/(s-1)}{S_E/(n-s)} > F_{\alpha}(s-1, n-s)$, 则判定模型回归效果显著;反之,不显著^[9,10]。其中 $S_A = \sum (\hat{y} - \bar{y})^2$, $S_E = \sum (y - \hat{y})^2$, S 是参数变量的个数, n 是观测值的个数。

表 3 方差分析法模型显著性检验结果

测点	s-1, n-s	α=0.01	
		F	F _{α(s-1, n-s)}
1	(2,6)	143.6 351	10.92
2	(2,6)	117.6 445	10.92
3	(2,6)	183.6 935	10.92
4	(2,6)	189.8 328	10.92
5	(2,6)	109.9 905	10.92
6	(2,6)	36.54 421	10.92
7	(2,6)	56.83 812	10.92
8	(2,6)	177.9 054	10.92
9	(1,7)	36.52 192	12.25

由上表可知,本研究在选取显著性水平 α=0.01 的情况下,采用方差分析法进行显著性检验以后,结果显示所有测点的 F 值均相对较大,因此无论是基于一元二次函数还是指数函数拟合模型的拟合值对于观测值都是具有显著性的,拟合模型优良并且是可以接受的。

3.4 最优预测模型的选择

由以上研究已经得知,只有北坡的测点 9 是基于指数函数模型的拟合效果好,因此基于指数函数的最优预测模型就可用北坡测点 9 的拟合模型来表示。关键是在其他 8 个模型中得到基于一元二次函数的最优预测模型,本次研究采用的方法是:在北坡区域的观测点 1~8 中,首先选择第一个观测点,然后计算出该观测点的温度值与这 8 个基于一元二次函数拟合模型拟合值的偏差平方

和,摒除掉该观测点所对应的拟合模型之外,观察在哪一个拟合模型取得最小偏差平方值,接下来以此类推,对每一个观测点都计算其与每一个基于一元二次函数拟合模型拟合值的偏差平方和,并都找到在哪一个拟合模型取得最小偏差平方值,最后获得最小偏差平方和观测点个数最多的拟合模型则为本次试验中基于一元二次函数的最优预测模型。此种方法因为计算量很大,因此本次研究利用 EXCEL 软件强大的数据统计分析功能来完成这项工作。

分析结果表明,基于一元二次函数的预测模型是: $y = 0.0712x^2 - 0.9612x + 36.532$, 方差为 150 999.3, 残差为 7 969.967; 基于指数函数的预测模型是: $y = 27.952e^{0.0343x}$, 方差为 156 336.7, 残差为 29 964.4。

4 结论

从北坡区域的土壤温度数据中比较直观地观察到,随着深度的不断增加,王庄矸石山内部温度变化大体上呈现出一种越来越高的趋势。

经过拟合模型的拟合优度检验,表明北坡区域大部分的观测点更好地符合基于一元二次函数拟合模型的变化规律,而只有测点 9 较好符合基于指数函数拟合模型的变化规律。

利用方差分析法对每个观测点基于一元二次函数或指数函数的拟合模型进行显著性检验,结果均为具有显著性。

本次研究最终结果包含两种预测模型:基于一元二次函数的拟合模型和基于指数函数的拟合模型,从而揭示出了王庄煤矸石山内部温度的变化趋势与一般规律。

参考文献

[1] 盛耀彬,汪云甲,束立勇.煤矸石山自燃深度测算方法研究与应用[J].中国矿业大学学报,2008,37(4):545~546.

[2] 刘培云,王明建.浅析煤矸石山的自燃机理及燃烧控制[J].中州煤炭,2000(5):37.

[3] 刘二永,汪云甲,顾强等.矸石山自燃的温度场模型[J].矿业安全与环保,2007,34(4):9~12.

[4] 梁铁山,谷明川.矸石山自燃整体升温现象及其理论解释[J].中国矿业,2009,18(4):93~95.

[5] 裴晓东,张人伟,杜高举等.新建煤矿矸石山自然发火的数学模型及其模拟分析[J].矿业安全与环保,2009,36(4):11~13.

[6] 田考聪.曲线拟合优度的一种检验方法[J].重庆医科大学学报,1994,19(3):204~209.

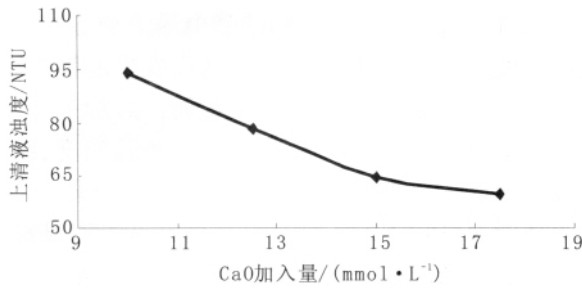


图5 CaO 加入量对絮凝效果的影响

4 结论

通过对以上煤泥水的絮凝沉降实验，可以得出以下结论：

(1)絮凝后上层澄清液的浊度随絮凝剂分子的分子量的变化而变化，且分子量越大沉降效果越好。同时阴离子型由于对表面带负电荷的煤泥胶体微粒具有选择絮凝作用，因此效果更好，因此选择阴离子 800 万作为最适宜的絮凝剂。

(2)加入无机电解质后，絮凝效果有了明显的提高。根据凝聚剂的作用效果与易获得性综合考虑，选取 CaO 为最适宜的凝聚剂。

(3)综合实验结果，当阴离子 800 万聚丙烯酰胺加入量为 6.25 ppm, CaO 为 15 mmol/L 时絮凝效果最佳，经济性也最合理。

参考文献

[1] 郝凤印,李文林.选煤手册[M].哈尔滨:哈尔滨工业出版社,1993.

[2] 唐海香,庞顶峰,吴大为.动力学因素对煤泥水絮凝沉降效果的影响[J].煤炭工程,2006.8:78-80.

[3] 苟鹏,叶向德,吕永涛等.煤泥水的水质特征及处理技术[J].工业水处理,2009.1.

[4] 韩德馨,任德贻,王延斌等.中国煤岩学[M].徐州:中国矿业大学出版社,1996.

[5] 李东颖,丁淑芳.煤泥水的絮凝沉降试验研究[J].华北水利水电学院学报,2009 第 30 卷第 3 期:99-102.

[6] 陈建启,纪玉华.絮凝剂在选煤厂煤泥水处理中的合理应用[J].煤炭加工与综合利用,1998.5:15-18.

[7] 王小文,张雁秋.水污染控制工程[M].北京:煤炭工业出版社,2002.8.

[8] 郑劲松.聚丙烯酰胺类絮凝剂的现状与进展[J].山东化工,2009 第 38 卷第 7 期:24-27.

(上接第 16 页)

陆海波.能源-经济-环境系统的可持续发展研究 [D].天津大学,2004.

[14] ZHAI GAO-yue. Simulation of Renewable Energy Exploitation in Rural Area Based on System Dynamics (SD) —A Case Study in Rugao Country in China[D]. Nanjing Agricultural University, 2004

翟高粤.基于系统动力学方法的农村可再生能源开发动态模拟—以江苏如皋为例[D].南京农业大学,2004.

[15] DU Hui-bin, GU Pei-liang. Energy-Economy-Environment Complex System in Regional Development[J]. Journal of Tianjin University (social science), 2005,7(5):362-365.

杜慧滨,顾培亮.区域发展中的能源-经济-环境复杂系统[J].天津大学学报(社会科学版),2005,7(5):362-365.

[16] Fiddaman, T.S. Exploring policy options with a behavioral climate-economy model. System Dynamics Review . 2002, 18 (2): 243~

267.

[17] SAYSSEL, A.K, BARLAS, Y, YENIGUN, O, Environmental sustainability in an agricultural development project: a system dynamics approach. [J]. Environment Management. 2002.64: 247-260.

[18] WANG Li-meng, HE Kang-lin. Analysis on Temporal Variation of Environmental Impact Based on STIRPAT Model—A Case Study of Energy Consumption of China [J]. Journal of Natural Resources, 2006,21(6):862-869.

王立猛,何康林.基于 STIRPAT 模型分析中国环境压力的时间差异 [J].自然资源学报, 2006,21(6):862-869.

[19] ZHOU Shi-xing. The Application of System Dynamics to Planning Environmental Impact Assessment[D]. Sichuan University, 2005.

周世星.系统动力学在区域规划环境影响评价中的应用[D].四川大学,2005.

(上接第 20 页)

[7] 盛洁,胡建华.Excel 软件的统计功能在卡方检验中的应用[J].医学信息,2008,21(1):28-30.

[8] 贾婧.方差分析概述[J].学术探讨,2008(7):217.

[9] 吕栋雷,曹志耀,邓宝等.利用方差分析法进行模型验证[J].计算机仿真,2006,23(8):46-48.

机仿真,2006,23(8):46-48.

[10] 陶文信.Excel 在方差分析中的应用[J].郑州航空工业管理学院学报(社会科学版),2002,21(1):42-44.