

肖国强,张鹏宇,马砺,等.矿用胶带火灾燃烧特性预测模型[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(3):9-15. doi: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.002

XIAO G Q, ZHANG P Y, MA L, et al. Prediction Model of Burning Characteristics of Mine Belt Fire [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):9-15. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.002

矿用胶带火灾燃烧特性预测模型

肖国强¹,张鹏宇²,马砺^{2*},拓龙龙³,张瑞³

(1.贵州发耳煤业有限公司,贵州六盘水 553001;2.西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西西安 710054;
3.内蒙古昊盛煤业有限公司,内蒙古鄂尔多斯 017212)

摘要:胶带火灾热释放率是矿井胶带火灾危险性大小的重要参数之一,准确预测其大小对胶带火灾预防具有重要意义.采用锥形量热仪测试空白胶带和运煤胶带,得到热释放率、CO₂浓度、CO浓度及产烟率等燃烧参数,并分析了胶带的燃烧性能.结合实验数据,建立基于随机森林模型(RF)的胶带火灾热释放率的预测方法.为了验证随机森林方法的准确性和可靠性,计算平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分误差(MAPE)、根均方误差(RMSE)和确定系数(R²).实验结果表明:从胶带燃烧测试实验可以看出空白胶带的点燃时间远小于运煤胶带的点燃时间,且根据胶带的热释放率、残余物质量和生成的CO₂浓度来看,相比空白胶带,运煤胶带并不利于燃烧.预测结果表明:随机森林模型的预测结果为MAE<0.260 9 kW/m²,MAPE<0.007%,RMSE<0.493 3,R²=0.999 8,表明该模型具有较高的预测精度、较强的泛化能力和良好的鲁棒性,能准确地预测胶带的热释放率,在预测性能指标都达到了较好的效果.

关键词:胶带火灾;热释放率;随机森林

中图分类号:TD75⁺2 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)03-0009-07

Prediction Model of Burning Characteristics of Mine Belt Fire

XIAO Guoqiang¹, ZHANG Pengyu², MA Li², TUO Longlong³, ZHANG Rui³

(1. Guizhou Faer Coal Industry Co., Ltd., Liupanshui 553001, China;
2. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
3. Inner Mongolian Haoshng Coal Industry Co., Ltd. Erdos 017212, China)

Abstract: The heat release rate of belt fire is one of the important parameters of mine belt fire risk. It is important to predict the size of belt fire accurately for the prevention of belt fire. In this paper, the blank belt and coal conveying belt were tested by cone calorimeter. The combustion parameters such as heat release rate, CO₂ concentration, CO concentration and smoke yield were obtained, and the combustion performance of the belt was analyzed. Combined with the experimental data, a prediction method of heat release rate of tape fire was established based on random forest model (RF). In order to verify the accuracy and reliability of random forest method, mean absolute error (MAE), mean absolute percentage error (MAPE), root mean square error (RMSE) and determination coefficient (R²) were calculated. The experimental results show that the ignition

收稿日期:2019-10-22

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2018YFC0808104)

*通信作者,E-mail:mal@xust.edu.cn

time of blank belt is much shorter than that of coal conveying belt. Compared with blank belt, coal conveying belt is not conducive to combustion according to the heat release rate, residual mass and CO_2 concentration. The results show that the prediction results of random forest model are $\text{MAE} < 0.2609 \text{ kW/m}^2$, $\text{MAPE} < 0.007\%$, $\text{RMSE} < 0.4933$, $R^2 = 0.9998$. It shows that the model has high prediction accuracy, strong generalization ability and good robustness. It can accurately predict the heat release rate of belt, and achieves good results in the prediction performance indicators.

Keywords: belt fire; heat release rate; random forest

目前95%以上的煤炭资源开采为井工开采^[1],火灾是其中的重大灾害之一^[2].随着煤矿的不断开采和发展,井下的机电设备也越来越多,由于井下情况复杂,往往会由于人员操作失误和机电设备老化等情况造成外因火灾^[3].胶带在煤矿的应用十分广泛,容易发生胶带燃烧、熔断等火灾事故^[4-5].胶带火灾是外因火灾的种类之一,井下巷道中的可燃物质较多,若不及时预测预警,火灾火势很容易迅速扩大,甚至诱发瓦斯爆炸等矿井灾害事故,严重威胁到井下作业人员的生命及财产安全^[6].

胶带火灾的研究主要集中在危险性监测预警, Charles D. Litton 等^[7]采用 CO 检测井下胶带火灾; M. Weyrich^[8]利用视频的方法监测胶带火灾; Rowland J. H. 和 Liming Yuan^[9-10]对大型巷道的胶带火灾的火焰传播规律进行了数值模拟; 蒋时才^[11]研究井下胶带燃烧产生的气体变化规律; 苏墨^[12]设计了胶带输送机自动监测灭火系统对火灾进行监测; 段燕飞^[13]权衡了非接触式运输胶带存在的问题,提出了一种红外监测方法对运输胶带危险源动态检测.

热释放率决定了火源释放热量的大小和快慢,它能反映火灾危险性大小^[14].邓超等^[15]利用 MCG 算法应用于多层前馈神经网络的训练来预测热释放率,通过对比 BP 神经网络的方法,证明了 MCG 算法的优越性.准确预测胶带火源热释放率,通过建立合适的模型确定火源状态,为胶带火灾的应急救援工作提供了依据.对于热释放率的预测研究相对较少,基本上都是通过数值模拟或数学计算等方法对于热释放率进行预测研究.

随机森林是 Breiman 提出的一种用于预测的工具^[16],它是由多个决策树模型组成的集成方法,对噪声数据和异常值具有极高的容忍度^[17].随机森林方法目前已经广泛应用于各个领域^[18-23].因此,本研究应用随机森林方法对胶带火灾热释放率进行预测,证明了随机森林模型能够准确预测胶带火灾热释放率.

1 实验装置及条件

1.1 实验样品

本研究采用山西省阳泉煤矿井下采集的胶带样品,胶带为 PVC 材料.胶带样品被密封在一个塑料袋中,运送实验室.本实验采集了 2 类胶带,分别为井下采集的运煤胶带样品(井下实际生产使用的,表面附着煤粉的胶带)和常规的初始胶带样品(与运煤胶带相同厂家和规格,未经过实际生产使用的胶带),将其按照 ISO 5660 标准样品尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,样品重 120 g .

1.2 实验装置

本研究使用 MOTIS CCT 锥形量热仪^[24-26].将样品装入到锥形辐射电加热器的负载架上,由于本实验所用的传送带是一种膨胀材料,所以将样品放置在垂直距离为 60 cm 的负载架上.

1.3 实验方法

将样品放在 45 kW/m^2 的热辐射通量下进行实验,并且全部在大气环境中进行中(氮气 78%, 氧气 21%, 其他 1%).在启动设备之前,打开通风系统,防止有毒和有害气体对实验人员造成损害.打开主电源,并开启泵电源、光路电源和分析仪电源.分析仪在打开电源后至少需要加热半小时.锥形辐射电加热器设置为 $643 \text{ }^\circ\text{C}$ (对应的是 45 kW/m^2).在这个过程中,冷却循环水必须打开.将样品放入负载保持器,正式启

动实验.并按照 ISO 554 的要求,将样品调质至 $23\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 50%.然后用一层铝箔包裹试样的底部和侧面,以避免除了顶面燃烧之外的所有边界传质.

2 实验数据分析

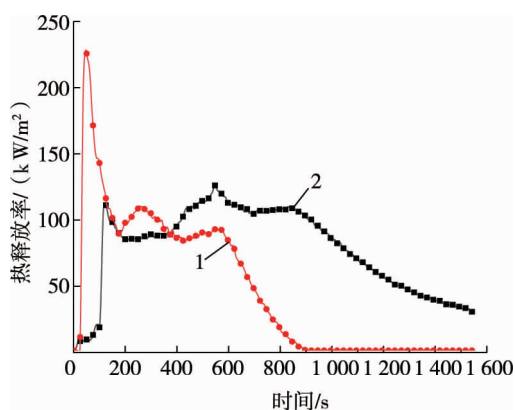
本文利用锥形量热仪进行实验,除了测量样品的点燃时间和热释放率,还得到了产烟率、总产烟量、总释放热、样品重量、Me 质量流量、孔板压差、含氧量和二氧化碳含量 8 个参数.通过井下运煤胶带和初始胶带的实验对比,得到井下实际情况下胶带的燃烧特性.

2.1 热释放率

初始胶带和运煤胶带的点燃时间分别为 17 和 93 s,点燃时间越长,用于火灾发生时人员能够逃生的时间也越长.实验测得的热释放率曲线如图 1 所示,运煤胶带的平均热释放率 R_{RHR} 为 52.44 kW/m^2 ,热释放率的最大值 R_{pkRHR} 为 126.69 kW/m^2 ;初始胶带的 R_{RHR} 为 79.37 kW/m^2 , R_{pkRHR} 为 229.93 kW/m^2 .可以得到,运煤胶带的 R_{RHR} 比初始胶带高出 33.9%,运煤胶带的 R_{pkRHR} 比初始胶带高出 44.9%.从图 1 可以看出 2 组实验都出现了 2 次波峰,第 1 个波峰的出现是由于胶带燃烧所形成,之后由于胶带燃烧会产生聚合物,而聚合物存在一定的阻燃效果,导致热量传递受阻,使得波峰下降,之后出现第 2 个波峰,由于运煤胶带上存在煤粉,温度达到了煤的燃烧温度,导致运煤胶带的第 2 个波峰曲线会比初始胶带的第 2 个波峰曲线维持的时间长.通过比较 2 条曲线,由于煤的热解温度要高于胶带的热解温度,在出现第 1 个波峰时,运煤胶带的燃烧会受到煤粉的影响,使得热释放率达不到峰值,点燃时间也得到了延长,当温度达到煤的热解温度时,热释放率达到峰值,所以运煤胶带的第 1 个波峰会低于第 2 个波峰.

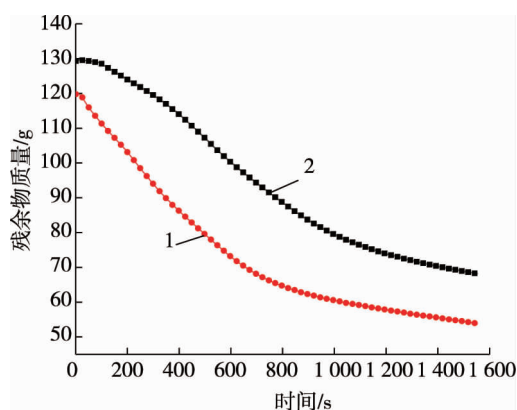
2.2 残余物质量

2 组实验的残余物质量如图 2 所示,残余物质量表示在燃烧的某一时刻剩余物的质量,从图 2 可以看出 2 组实验的曲线变化规律十分相似.随着胶带样品的燃烧,胶带残余物质量在逐渐减少,结合图 1 的热释放率曲线可以得知,在热释放率波峰出现时,胶带残余质量迅速下降,在波峰下降时,残余质量曲线的斜率变化也趋于平缓.通过图 2 也获取相同时间成碳率来直观地表现 2 组实验燃烧过程,燃烧 1 560 s 时,胶带基本燃烧完毕,运煤胶带和初始胶带的成碳率分别为 47.6% 和 55.5%,成碳率高的胶带在燃烧后更能保持其结构强度,因此初始胶带更容易在火场中保持其结构.



1-初始胶带;2-运煤胶带.

图 1 热释放率曲线的对比

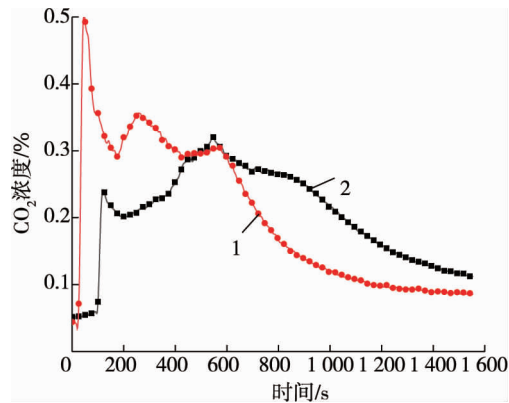


1-初始胶带;2-运煤胶带

图 2 残余物质量曲线的对比

2.3 二氧化碳浓度

2 组实验燃烧生成的 CO_2 如图 3 所示,将图 3 与图 1 相对比,发现图形的形状变化规律基本相似,表明胶带在燃烧过程中,热释放率主要由生成 CO_2 的反应提供而来.在燃烧 600 s 后,运煤胶带的曲线会高于初始胶带的曲线,这是由于实际运输过程中胶带沾上煤粉,使得燃烧过程中碳元素含量增加所导致的.



1-初始胶带;2-运煤胶带

图3 二氧化碳浓度曲线的对比

3 随机森林模型

3.1 建模方法

随机森林(RF)模型运用的是一种统计学的理论方法,它是利用 bootstrap 重抽样方法从原始的数据样本中抽取多个样本,并对每一个 Bootstrap 样本进行决策树建模,然后组合多棵决策树的预测,最后通过投票的方式得到最终的预测结果.随机森林方法对于预测的准确率很高,对异常值和噪声数据同样具有极强的容忍度,且很难出现过拟合的情况,能够很好地应用于各个领域.

随机森林(RF)可以较好地解决应用当中的分类以及回归问题,而热释放率的预测属于回归问题,所以本文仅讨论随机森林的回归算法.给定的训练数据集样本 $S = \{(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n\}$, $(X, Y) \in R^M \times R$, 输入矩阵 X 由具有 M 个特征的 N 个样本组成,输出 Y 是目标向量.采用 Bootstrap 重采样方法从原始样本集中随机地生成 n_{tree} 样本集 $S_k (k = 1, 2, \dots, n_{\text{tree}})$, 其中 S_k 元素的数量与 S 样本相同.在 RF 中,所有单独的决策树给出预测结果.对于回归问题,所有个体的平均结果被计算为预测值.在生成决策树模型的过程中,每个节点不比较所有的输入变量(特征),而是把 M 特征中随机选择 $m_{\text{try}} (m_{\text{try}} < M)$ 特征作为子集.CART 方法用于从该子集中选择最佳特征以分割.因此,每棵树在没有修剪的情况下分裂成其最大尺寸,并且在森林生长的整个过程当中, m_{try} 的值始终保持恒定.该方法进一步保证了训练过程中决策树模型的多样性.即使使用相同的训练样本,决策树上的每个节点的特征也会因为特征的随机选择而变差,从而进一步丰富决策树的多样性.这里仅需要调整 RF 算法的 2 个参数以获得最佳性能,即森林中树的数量,以及在每个分割处随机选择的特征 m_{try} 的数目.一般来说,增加树的数量会带来更好的性能.然而,存在一个 n_{tree} 的阈值,在该阈值之上性能没有显著的增益.

随机森林模型的袋外数据(OOB 数据)不包含在模型中的树的构建上,OOB 错误率是随机森林泛化误差的一个无偏估计,其预测误差分析为

$$\text{MSE}_{\text{OOB}} = n_{\text{tree}} \sum_{i=1}^{n_{\text{tree}}} (y_i - \hat{y}_i^{\text{OOB}})^2. \quad (1)$$

式中: MSE_{OOB} 为袋外数据预测的方差; y_i 为袋外数据中因变量的实际值; \hat{y}_i^{OOB} 为袋外数据的预测值.

3.2 建模设置

在实验的过程中,通过锥形量热仪测得 2 599 组数据,将实验数据分为训练数据(即建模数据)和测试数据(即模型验证数据) 2 组,其中 2/3 的实验数据作为训练数据,1/3 的实验数据作为测试数据(即 2 599 组样本数据,1 735 组作为训练样本,864 组作为测试样本).根据井下实际情况选取产烟率、总产烟量、含氧量和二氧化碳含量 4 种井下实际容易监测得到的指标作为输入,热释放率作为输出,以此建立井下胶带静止状态下热释放率的预测模型.

本研究采用 RF 建立模型,参数设置为 $n_{\text{tree}} = 500$ 和 $m_{\text{try}} = M/3$ 的默认值,其他参数保持不变。

3.3 误差分析指标

本文采用了多个指标来评价上述模型的预测性能,包括平均绝对误差(MAE)、平均绝对百分误差(MAPE)、根均方误差(RMSE)和确定系数(R^2)。

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i - y_i|; \quad (2)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{f_i - y_i}{y_i} \right| \times 100\%; \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}; \quad (4)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}. \quad (5)$$

式中: f_i 为预测值; y_i 为实际值; \bar{y} 为实际值的平均值。

3.4 模型的预测与分析

利用实验数据得到 RF 方法对胶带火灾热释放率的预测结果如图 4 所示,图 4 中显示了 RF 模型训练样本和测试样本的预测结果,从图 4 中可以看出 2 种预测模型的预测结果大都分布在零误差线 $y=x$ 上.结果表明:RF 模型的预测值与真实值十分接近,具有较好的预测性能。

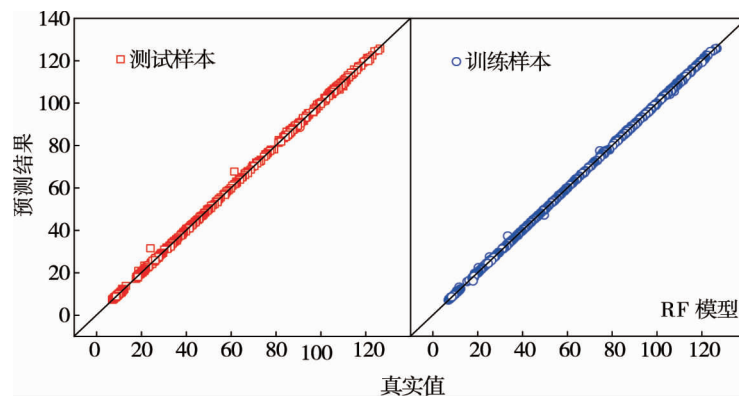


图 4 RF 模型的预测结果

为了更直观地显示 RF 模型的预测效果,图 5 显示了 RF 模型的绝对误差正态分布图,从图 5 可以看出 RF 模型预测结果大部分分布在 $\pm 2\%$ 的误差范围内,图形化地呈现了 RF 模型的预测特性.结果表明,RF 模型得到的预测值与真实值十分接近,进一步表明 RF 模型预测的准确性。

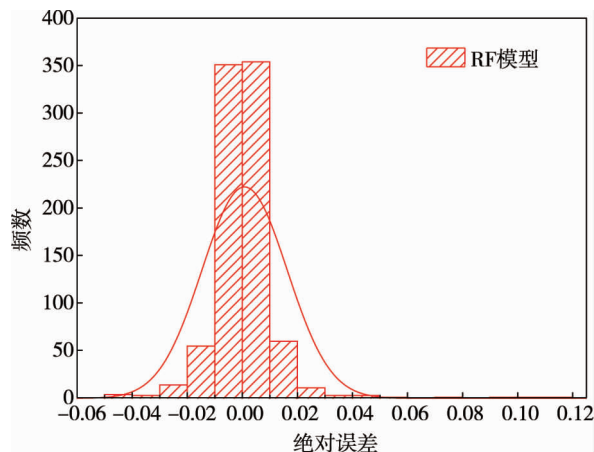


图 5 RF 模型的绝对误差正态分布

RF 方法具有很强的非线性解释能力,RF 模型能够根据建模过程中的 OOB 数据量化每个输入变量对输出目标的重要性.图 6 左图展现了在 RF 建模中各个变量用于热释放率预测的重要性.以实验数据为例进行分析.图 6 的序号分别对应的是含氧量、二氧化碳含量、产烟率以及总产烟量,这些指标对热释放率的预测有相当大的影响.结果表明:含氧量对于热释放率的影响>二氧化碳含量对于热释放率的影响>总产烟量对于热释放率的影响>产烟率对于热释放率的影响.图 6 右图表现了袋外数据的错误率,右图表明在 RF 建模过程中 OOB 误差稳定在大约 100 棵树.

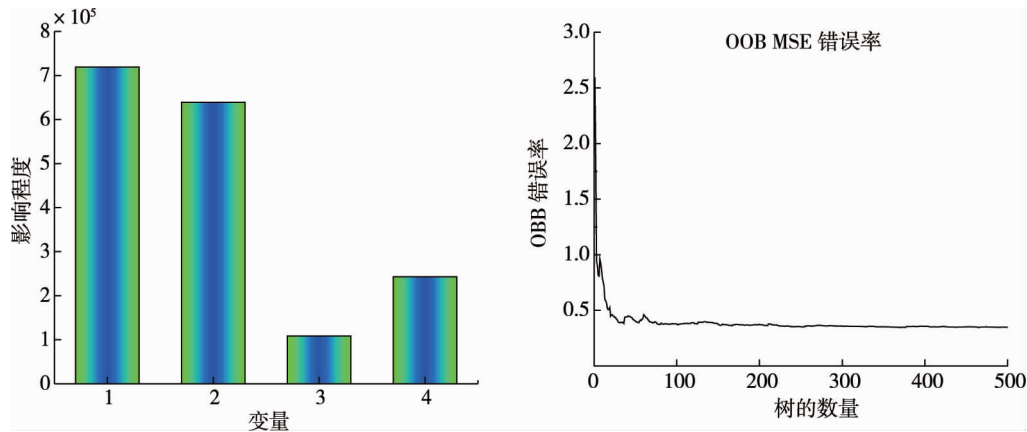


图 6 RF 中因素影响程度与 OOB 错误率

为了进一步显示 RF 模型的预测效果,量化模型的预测性能,将模型的训练样本和测试样本放入模型中进行预测,其性能指标 MAE, MAPE, RMSE 和 R^2 的结果列于表 1.结果表明,基于胶带火灾热释放率数据,RF 模型不仅获得满意的预测结果 ($MAE < 0.2609 \text{ kW/m}^2$, $MAPE < 0.007\%$, $RMSE < 0.4933$, $R^2 = 0.9998$),而且能准确预测热释放率.因此,基于上述比较和分析,RF 方法具有预测精度高、泛化能力强、实用性强等优点,表明 RF 模型更适用于热释放率的预测,具有广阔的应用前景.

表 1 预测模型的误差分析

模型	MAE	MAPE	RMSE	R^2
RF 训练数据	0.1559	0.0043	0.2758	0.9999
RF 测试数据	0.2609	0.0070	0.4933	0.9998

4 结论

1) 利用锥形量热仪进行实验,分析了胶带火灾的燃烧特性.结果表明:初始胶带的点燃时间为 17 s,远小于运煤胶带的点燃时间;从热释放率、残余物质质量和生成的 CO_2 浓度来看,相比初始胶带,运煤胶带更不利于燃烧.

2) 通过零误差线图和误差正态分布图表明 RF 模型对胶带火灾实验数据具有较强的预测性能,表明 RF 模型的非线性映射能力十分理想,能够揭示锥形量热仪测得的实验参数与热释放速率之间的非线性关系.

3) RF 方法的预测误差: $MAE < 0.2609 \text{ kW/m}^2$, $MAPE < 0.007\%$, $RMSE < 0.4933$, $R^2 = 0.9998$,表明 RF 模型具有极强泛化能力,而且在建模过程中 OOB 误差稳定在大约 100 棵树,表明 RF 模型对于胶带火灾热释放率预测具有极强的稳定性和适用性.

参考文献:

[1] 丁其乐.端帮压煤井工开采覆岩运动规律及控制研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.

- [2] Pandey J, Mohalik N K, Mishra R K. Investigation of the role of fire retardants in preventing spontaneous heating of coal and controlling coal mine fires[J]. Fire Technology, 2015, 51(2): 227-245.
- [3] 吴同性. 基于文化塑造的煤矿本质安全管理研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2012.
- [4] 宋彤菊. 矿用带式输送机常见故障分析及预防措施[J]. 机械管理开发, 2009, 24(3): 68-69.
- [5] 牛会永, 邓军, 周心权, 等. 矿井火灾事故调查综合分析技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(12): 4812-4818.
- [6] Zhang S Z, Cheng W M, Li Q J. Simulation and analysis of airflow stability during fire in mine belt roadway[J]. Journal of Coal Science and Engineering, 2010, 16(4): 375-380.
- [7] Litton C, Perera I. Evaluation of criteria for the detection of fires in underground conveyorbelt haulageways[J]. Fire safetyjournal, 2012, 51: 110-119.
- [8] Weyrich M, Wang Y, Winkel J, et al. High speed vision based automatic inspection and path planning for processing conveyed objects[J]. Procedia CIRP, 2012, 3: 442-447.
- [9] Rowland J H, Smith A C. Flammability of wider conveyor belts using large-scale fire tests[J]. Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011, 330: 345-349.
- [10] Yuan L, Mainiero R J, Rowland J H, et al. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30: 55-62.
- [11] 蒋时才. 矿用运输胶带摩擦升温及其火灾气体发生规律的研究[J]. 煤矿安全, 1990(6): 13-19.
- [12] 苏墨. 矿井胶带火灾灾变规律数值模拟及自动灭火系统设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- [13] 段燕飞. 运输胶带动态危险源红外视觉监测关键问题研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [14] 何洪源. 火灾现场调查与火场物证分析[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2010.
- [15] 邓超, 吴龙标, 范维澄, 等. 热释放率计算和预测的神经网络方法[J]. 中国科学技术大学学报, 1999(2): 52-57.
- [16] Breiman L. Random forests[J]. Machine learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [17] Lei C K, Deng J, Cao K, et al. A random forest approach for predicting coal spontaneous combustion[J]. Fuel, 2018, 223: 63-67.
- [18] 柴颖. 基于随机森林回归分析的径流预报模型[J]. 水利水电快报, 2018, 39(9): 36-38.
- [19] 柴明锐, 程丹, 张昌民, 等. 机器学习方法对砂砾岩岩屑成分的预测——以西北缘 X723 井百口泉组为例[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(5): 22-28.
- [20] 邴其春, 龚勃文, 林赐云, 等. 城市快速路交通事件自动检测算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(6): 1682-1687.
- [21] 罗扬燧, 卢会国, 蒋娟萍, 等. 基于随机森林算法的电线覆冰检测技术[J]. 成都信息工程大学学报, 2018, 33(6): 632-638.
- [22] 王轩慧, 郑西来, 韩仲志, 等. 混合式随机森林的土壤钾含量高光谱反演[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(12): 3883-3889.
- [23] 徐旺丁, 张兵, 王华毕. 基于随机森林算法的非定常气动力建模研究[J]. 计算力学学报, 2018, 35(6): 698-704.
- [24] 赵冰冰, 王然, 张欣欣. 锥形量热仪在阻燃棉织物燃烧性能评价中的应用[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2018, 38(3): 9-13.
- [25] 王红双, 李莉, 朱龙龙, 等. 基于锥形量热仪的典型软垫座椅材料燃烧特性研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 79-84.
- [26] 黄志伟, 关明杰. 竹地板燃烧特性的锥形量热仪分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 187-192.