

# 基于火焰过程信息的沥青搅拌站燃烧状态监测

房怀英, 杨建红

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘 要:**为了在线监测热再生沥青搅拌站干燥、加热状态,首先通过高温 CCD 图像探测和火焰检测器搭建了燃烧器燃烧信息检测系统,对所提取的火焰图像和辐射信息进行去噪处理,在线提取加热干燥过程中火焰图像和辐射特征信息;分别改变燃油温度、雾化气压、燃油量等燃烧参数,对燃烧火焰的辐射和图像过程信息进行提取和试验研究,分析不同燃烧阶段火焰辐射状态,通过图像处理算法分别提取火焰图像亮度均值和均值标准差。研究表明:风/油比、燃油温度、雾化压力对燃烧过程火焰图像和辐射特征有较大的影响,且影响形式不同;单一的燃烧火焰辐射特征信息无法充分表征燃烧状态,通过多信息融合,燃烧火焰亮度均值和标准差等过程信息能准确表征燃烧器燃烧状态;同时在线提取燃烧火焰辐射和图像信息,能准确判定燃烧器的燃烧状态。

**关键词:**机械工程;火焰图像;沥青拌和站;亮度均值;亮度标准差;燃烧器

**中图分类号:**U415.522;TM343.03

**文献标志码:**A

## Burning state monitoring of asphalt mixing plant based on process information of flame

FANG Huai-ying, YANG Jian-hong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, China)

**Abstract:** The paper studied on monitoring and optimization of heating in thermal regeneration asphalt mixing plant. In order to get burning and drying state of asphalt mixing plant on line, a fire information detection system was established by using high temperature charge coupled device(CCD) and flame detector. The obtained fire image and energy radiation information were processed beforehand by de-noising. Some data of them were extracted on line. The information on thermal radiation and burning flame image was studied after changing some burning parameters such as fuel temperature, nebulizer pressure, fuel quantity, and so on. Test result show that air and oil ratio, oil temperature and atomization pressure have obvious effect on fire image and energy radiation in different conditions, and present different effect forms. The average of flame brightness and its standard error were calculated by some calculation method of burning flame. Single energy radiation information can't represent burning state. Burning state of burner can be represented accurately by the average of flame brightness information and its standard error. A good development foundation of intelligent control system was established in thermal regeneration asphalt mixing plant by detection technology

of burning state. 7 figs, 7 refs.

**Key words:** mechanical engineering; flame image; asphalt mixing plant; average of flame brightness; standard error of flame brightness; burner

## 0 引言

按照沥青路面的设计寿命计算,中国每年约有14%的沥青路面需要翻修,产生的旧沥青混合料多达几千万吨,且每年还以15%递增,若能加以再生利用,每年节约材料费达15亿元之多<sup>[1]</sup>。国内外很多学者对沥青热再生技术进行广泛的研究,沥青热再生设备的开发是热再生沥青的关键技术<sup>[1-2]</sup>。

厂拌热再生主要是将铣刨下来的旧沥青混合料通过燃烧器对干燥滚筒内的再生沥青混合料进行加热,然后按照一定比例加到沥青原生搅拌站进行搅拌、出料<sup>[3]</sup>。再生站的燃烧、加热系统的控制要求要比原生站高,再生沥青的干燥滚筒温度过高,导致再生沥青老化,影响成品料质量<sup>[4]</sup>;若温度过低,将导致后续沥青混合料无法充分搅拌,影响沥青的包裹性,同时温度过低也容易导致再生沥青干燥滚筒粘料,严重时需要大量人力、物力去清理。干燥滚筒的温度控制与燃烧器的负荷和燃烧状态密切相关。对以重油为燃料的燃烧器,燃烧状态控制的关键技术为风/油比的准确控制。目前沥青拌和站使用的重油燃烧器一般是根据燃烧负荷要求调整燃油消耗量,然后根据燃油消耗量来进行配风。每种燃油都有合理的配风量,为了调整不同燃油情况下的燃烧状态,需要实时监测燃烧器的燃烧状态,调整燃烧器的控制参数,使燃烧器达到最优的燃烧状态。燃烧器火焰中含有丰富的燃烧状态信息,通过火焰过程信息的检测能直接量化燃烧状态的变化。为此,本文分别在线采集了燃烧火焰图像和火焰辐射检测(火检)信息,提取燃烧过程状态信息,研究火焰图像、火检信息和不同工况下燃烧状态的关系,建立燃烧稳定性的控制模型,为改变燃油和燃烧工况下燃烧器的自动控制奠定基础。

## 1 热再生沥青拌和站加热干燥系统

### 1.1 热再生沥青拌和站的组成

热再生沥青拌和站主要由燃烧器、干燥滚筒、再生料提升输送系统和检测系统组成,如图1所示。中国再生沥青和原生沥青拌和站组成一个有机的整体,从图1可以发现,对于再生沥青和原生沥青加热系统,燃烧火焰过程信息和燃烧状态监测非常关键,直接影响成品料质量和生产成本。

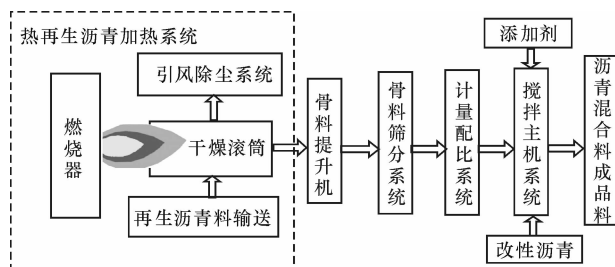


图1 热再生沥青拌和站的组成

Fig. 1 Composition of thermal regeneration asphalt

### 1.2 加热干燥系统的控制

加热干燥系统的控制主要为对燃烧器的控制。目前,中国对沥青拌和站燃烧器的控制方案为:根据滚筒内骨料温度,手动调整燃烧器负荷,通过事先标定好的风/油比参数,自动进行配风,现场观察火焰,判定燃烧器燃烧状态,再对燃烧器的风/油比进行微调,燃烧状态的判定直接取决于人为直观判定。燃烧器出厂的时候是按标准燃油进行风/油比标定的,若燃油发生变化,现场需要多次调整风/油比,这给现场操作带来极大困难。解决方案为直接检测火焰图像和辐射信息,建立火焰图像、火检信息与燃烧状态之间的关系模型,当燃油改变时,燃烧状态开始波动,反馈波动信息到燃烧器控制器,燃烧器自动调整控制参数,从而使燃烧器达到最优燃烧状态。

## 2 燃烧过程信息采集系统

### 2.1 试验系统

试验系统如下页图2所示,试验系统在测试燃烧器的标准炉膛中进行。火焰图像采集系统主要有保护退出装置,PLC控制箱工业级彩色摄像机,蓝宝石密封针孔镜头和水、气冷却装置。正常工作时,摄像机镜头通过水和风进行冷却,当温度超过设定值(50℃)时,保护退出装置自动退出,从而保护摄像机镜头,专用的工控机通过图像采集卡采集火焰图像。火焰检测器采用西门子的QRB1光敏电阻,QRB1安装在燃烧器稳焰盘的根部。为了保证试验的安全性,标准的炉膛配备了温度测量和引风除尘系统。

### 2.2 试验数据预处理

实际的燃烧火焰有较大的脉动<sup>[5]</sup>,实时采集的数据波动剧烈,试验中提取一段时间内的统计值,来表征某一时间段内的过程特征信息<sup>[6-7]</sup>。对火焰检

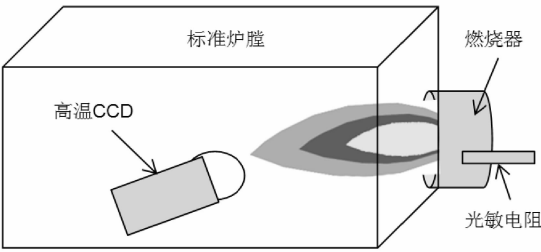


图 2 试验及采集系统

Fig. 2 Experiment and measuring system

测数据输出信号直接为 0~10 V 电压信号,将采集信号直接进行归一化处理,采样频率为 50 Hz,计算时取 2 min 火焰检测数据的平均值作为燃烧器初始燃烧区燃烧的剧烈程度。火焰图像提取采用松下 WV-CP484 摄像机,拍摄速度为 50 帧/s,经过噪声滤除、均值滤波、边缘检测等预处理。对单帧火焰图像提取平均亮度值、亮度值的标准差,多帧火焰图像统计参数为平均亮度值在 2 min 内的统计均值,2 min 内火焰亮度值标准差作为另一个多帧图像参数。单帧火焰图像平均亮度值反映了燃烧器燃烧的剧烈程度,多帧火焰图像平均亮度统计均值反映了某段时间内燃烧器燃烧剧烈程度,亮度值越大,燃烧越剧烈。单帧火焰图像的亮度标准差主要表征火焰亮度和燃烧的均匀性,2 min 内火焰统计标准差表征燃烧均匀性随时间的波动情况,是燃烧的动态稳定性指标,其值越小,燃烧越稳定。

3 试验结果及分析

3.1 火检试验及分析

从燃烧器点火开始,分别改变燃烧参数,通过 QRB1 连续采集火焰辐射信息,试验结果如图 3 所示。燃烧器刚开始采用小风量点火,点火时间较短,很快建立燃烧火焰,点火阶段火焰有较大的波动。从最佳风/油比不断减小配风量,由图 3 的阶段 2 可以发现,火焰辐射量在不断减小,但是变化量不大,很难通过此段曲线找到最佳的风/油比。阶段 3 为改变燃油油温的测试结果,油温从低于气化点开始逐渐减小,火焰辐射量在慢慢减小,且在特定的温度区间内,燃烧状态波动较大。阶段 4 为改变燃油雾化压力火检信息。由此可见,燃油压力对燃烧火焰的稳定性有较大的影响,因此稳定燃油压力对燃烧器的控制是非常关键的。阶段 5 为稳定燃烧阶段,在此阶段,保持燃烧参数不变,燃烧器基本能保持相对稳定的燃烧状态。阶段 6 为燃烧器熄火。由图 3 可以得到,当一些燃烧参数发生改变时,燃烧器的燃

烧状态发生变化,但是仅仅根据火检信息无法准确判定燃烧状态的波动,必须结合火焰图像分析,综合判定燃烧器的燃烧状态。

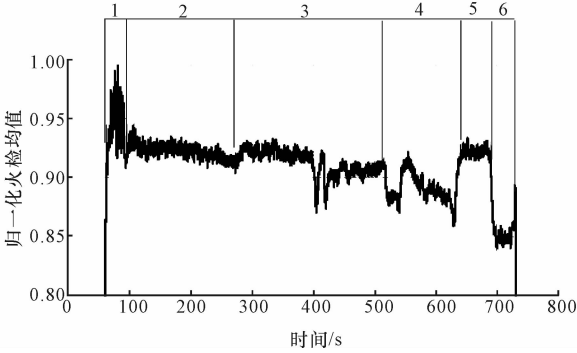


图 3 燃烧器火检统计均值检测

Fig. 3 Statistical average by flame of burner

注:阶段 1 为点火;阶段 2 为改变风/油比;阶段 3 为改变油温;阶段 4 为改变雾化压力;阶段 5 为稳定燃烧;阶段 6 为熄火。

3.2 火焰图像试验及分析

从燃烧器点火开始,不断改变燃烧负荷(燃油量)、配风量等燃烧参数,燃烧火焰图像如下页图 4 所示。由图 4 可以看出,燃烧器火焰的形态参数随着燃烧参数的改变而改变,雾化气压的改变导致燃烧火焰粗细发生变化,配风量和雾化气压的改变导致燃烧器火焰长度发生变化。燃烧器燃烧火焰形态参数的改变,对原生沥青搅拌站影响较小,但是对再生沥青拌和站影响较大,燃烧器负荷过大、火焰偏斜到炉膛壁、火焰太粗或太长将使再生沥青料温度过高,导致沥青老化和干燥滚筒着火,严重影响再生沥青料质量和生产安全。因此,通过燃烧器火焰形态参数的检测能提高再生沥青搅拌站性能。

在其他参数均不改变的情况下,人为调整燃烧器的燃油量(从小到大),相当于调整燃烧器的风/油比,分别提取单帧和多帧图像特征信息。每隔 2 min 改变一次燃油量,求取 2 min 内火焰亮度的平均值,连续试验 30 min,共得到 15 个火焰平均亮度值。由下页图 5(a)可以发现,在固定配风量的情况下,燃油量从小到大逐渐增大,将导致火焰图像的平均亮度先增大,然后慢慢减小,在火焰亮度最大点处是最佳的风/油比。从图 5(a)中燃油量较小、然后量适中、燃油量较大各取一组 2 min 过程图像,每组图像中,每隔 10 s 取一帧图像,求出每帧图像的亮度均值,然后计算每帧图像的标准差,计算结果见图 5(b)。由图 5(b)可以发现,燃油量中所取的点是图 5(a)最佳风/油比所得火焰图像结果,燃油量小和燃油量大均不是最佳的风/油比,当燃烧器处在较好的

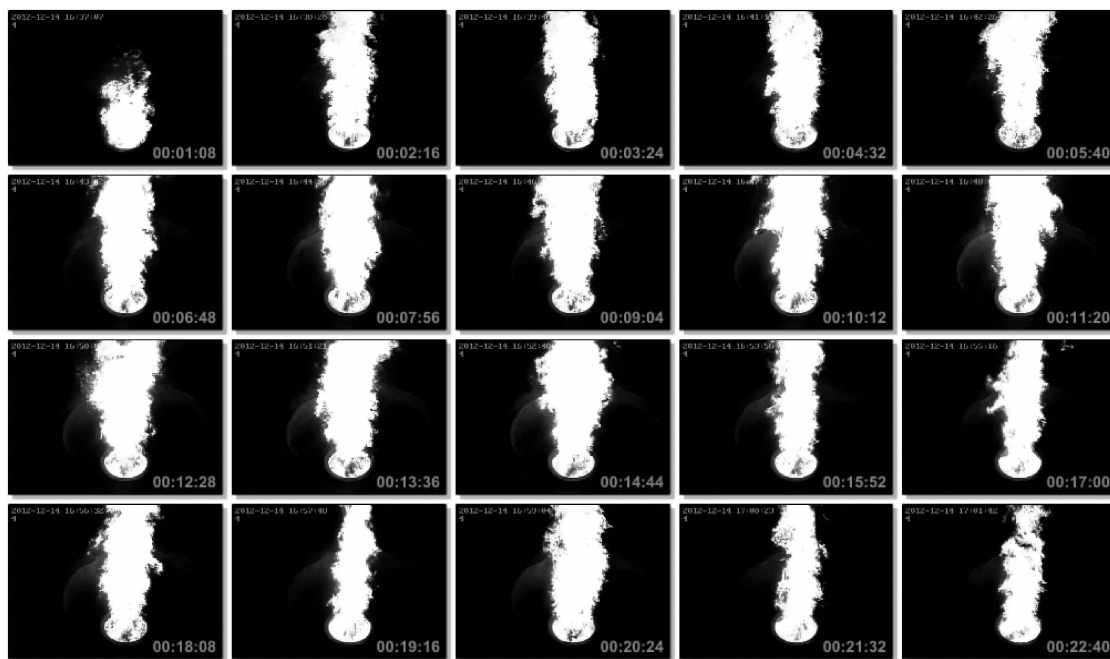


图 4 再生站燃烧器火焰图像

Fig. 4 Flame image of burner in thermal regeneration asphalt

风/油比时,火焰亮度波动较小,燃烧比较稳定;当风/油比调整不合适时,火焰亮度波动较大。因此,通过每帧图像的标准差,能判定燃烧火焰的稳定性。

组火焰图像亮度平均值。由下页图 6(a)可以发现,随着油温的上升,火焰亮度均值不断增大,当油温增大到一定值时,燃油开始气化,火焰亮度开始趋向变弱。分别在油温为 58℃、68℃、78℃时,各个温度点提取 1 min 火焰图像,在 1 min 内火焰图像里,每隔 3 s 提取一帧图像,求出 1 min 内火焰图像亮度标准差。由图 6(b)可发现,燃油温度高,火焰亮度均值大,在此阶段燃烧器火焰亮度标准差慢慢减小,即火焰亮度均值越大,燃烧越稳定,燃油温度达到 78℃时,燃烧火焰亮度标准差波动最小,燃烧最稳定。

其他参数不变,从小到大改变燃油的雾化气压,以公司再生沥青站燃烧器标定的雾化气压  $3.5 \times 10^5$  Pa 产品为例,雾化气压从  $2.6 \times 10^5$  Pa 调整到  $4.0 \times 10^5$  Pa,每隔  $0.1 \times 10^5$  Pa 测量一组火焰图像,求取 50 帧火焰图像亮度平均值,一共得到 15 个火焰亮度均值。由下页图 7(a)可以发现,刚开始随着雾化压力的增大,燃烧火焰亮度逐渐变大,当雾化压力达到一定值时,火焰亮度达到最大值,然后随着雾化气压的增大,燃烧火焰亮度开始减小。主要原因因为刚开始,雾化气压较小,燃油雾化效果差,当增大雾化气压后,改善了燃油雾化效果,但是当雾化气压过大时,将使雾化后的油雾直接被吹走,导致燃烧不充分。同时,雾化压力太大将从干燥滚筒中带走更多的热量,降低热效率,因此控制合适的雾化气压对沥青站干燥系统至关重要。分别在雾化气压为  $2.6 \times$

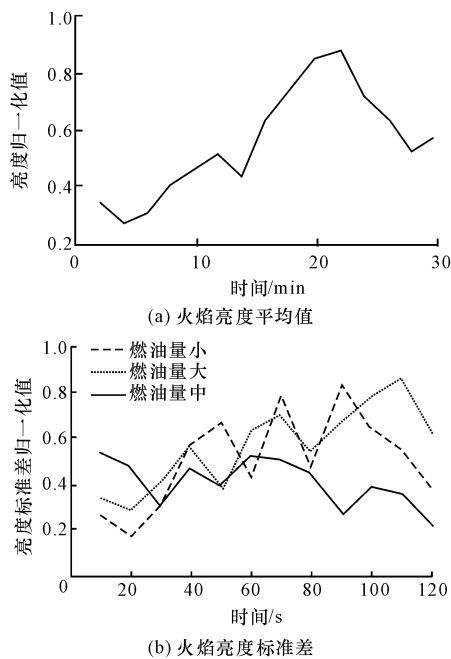


图 5 改变燃油量的火焰特征信息

Fig. 5 Characteristic information of flame when fuel quantity is changed

其他参数不变,从低到高调整燃油温度,考虑到试验用重油在 80℃左右容易气化。试验时燃油温度从 56℃到 80℃连续调整,温度上升时间约 17 min,每隔 1 min 取一组火焰图像,求出每

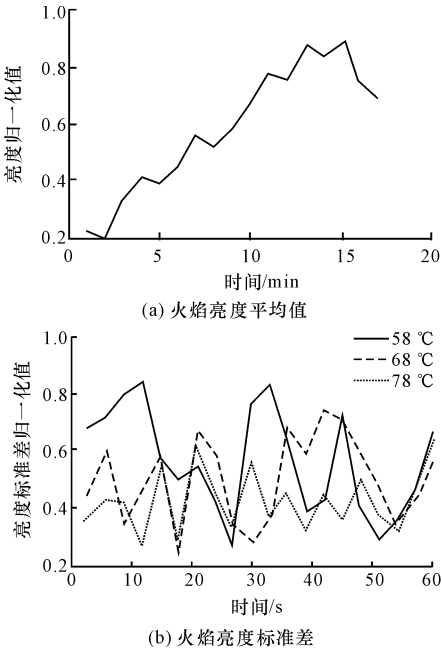


图6 改变油温火焰特征信息

Fig.6 Characteristic information of flame when fuel temperature is changed

$10^5$  Pa、 $3.0\times10^5$  Pa、 $3.5\times10^5$  Pa 燃烧火焰中提取 15 帧火焰图像,求出每组火焰图像的标准差。由图 7(b)可以发现,同上面的试验结果相类似,燃烧器火焰平均亮度值越大,燃烧火焰亮度标准差越小,燃烧火焰越稳定,燃油的雾化气压对燃烧状态有较大的影响。

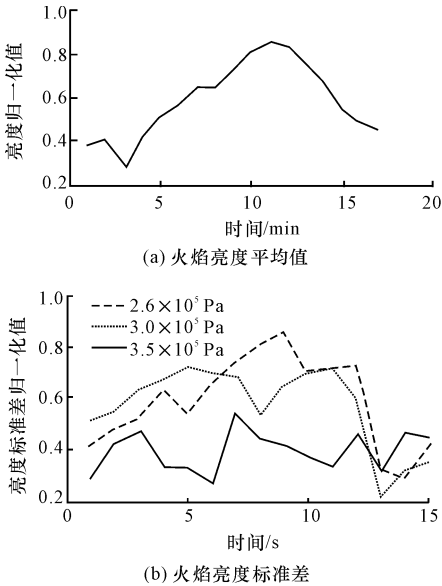


图7 改变雾化气压燃烧火焰特征信息

fig.7 Characteristic information of flame when nebulizer pressure is changed

4 结 语

(1)火焰辐射的火检信息无法准确表征燃烧

状态。

(2)分别改变燃油量、燃油温度、雾化气压,对燃烧火焰图像过程信息进行研究,多帧火焰图像平均亮度值和亮度标准差能准确表征燃烧状态。

(3)火检和火焰图像信息能作为再生沥青拌和站燃烧器参数调整的判据,为开发燃烧器智能控制系统奠定基础。

参考文献:

References:

[1] 江燕青. 沥青路面就地热再生技术的研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.  
JIANG Yan-qing. Study on hot recycling technology of asphalt concrete surface [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006. (in Chinese)

[2] Whitea P, Goldenb J S, Biligiri K P, et al. Modeling climate change impacts of pavement production and construction resources [J]. Conservation and Recycling, 2010, 54(2): 776-782.

[3] Muench S T. Roadway construction sustainability impact reviews of life-cycle assessments[J]. Transportation Research Record, 2010, 2151(3): 36-45.

[4] 李 伟, 纪小平. 厂拌热再生沥青混合料生产温度的确定方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2010, 29(9): 57-59.  
LI Wei, JI Xiao-ping. Determination of asphalt mixture production temperature of plant mix hot recyliny [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2010, 29(9): 57-59. (in Chinese)

[5] 陈立军, 宏立文, 文孝强. 基于图像处理的旋流燃烧器火焰燃烧状态识别[J]. 电站系统工程, 2005, 21(6): 35-37.  
CHEN Li-jun, HONG Li-wen, WEN Xiao-qiang. Swirl burner flame recognition based on digital image processing system [J]. Power System Engineering, 2005, 21(6): 35-37. (in Chinese).

[6] Shimoda M, Sugano A, Kinura T, et al. Prediction method of unburnt carbon for coal fired utility boiler suing image processing technique of combustion flame [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, 5(4): 640-645.

[7] 张 雪, 郑康捷, 丁燕军, 等. 基于火检与火焰图像信息的旋流燃烧器状态监测[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(7): 1053-1057.  
ZHANG Xue, ZHENG Kang-jie, DING Yan-jun, et al. Monitoring of a swirl burner by a flame detector and flame image information [J]. Journal Tsinghua University: Sci & Tech, 2010, 50(7): 1053-1057. (in Chinese)