

DOI:10.11918/202308038

RAP 级配自动实时检测系统设计及仿真分析

马登成¹,徐天昊¹,桂 学²,王恩东³

(1. 公路养护装备国家工程研究中心(长安大学),西安 710064; 2. 陕西中霖沥青路面养护科技有限公司,西安 710124; 3. 山东高速工程咨询集团有限公司,济南 250014)

摘要: 为快速、准确检测沥青路面回收料(reclaimed asphalt pavement, RAP)的级配,提高 RAP 级配的检测效率并降低人工操作对检测结果的影响,将目前检测 RAP 性能常用的设备与方法相结合,提出了一种对 RAP 含水率、RAP 的油石比及其级配一体化检测的方法。同时,针对目前 RAP 检测存在的问题,设计了新型的 RAP 级配自动检测设备,实现了 RAP 级配的自动实时检测。首先,根据 RAP 级配的检测功能要求设计了检测设备的整体结构。其次,建立了检测设备核心关键结构振动筛分部件的仿真模型,采用 EDEM 离散元仿真软件模拟了筛分全过程;仿真采用控制变量法对振动筛中的集料颗粒在不同筛面倾斜角、振动频率、振动方向角等参数的情况下进行对比分析。最后,以符合标准要求的最优筛分效率为目标对振动筛进行优化设计。结果表明:当振动筛倾斜角为 3°、振幅为 4 mm、振动频率为 16 Hz、振动方向角为 63°时,振动筛各层筛网的筛分效率均达到 91% 以上,能够满足实际需要。证明了 RAP 级配自动实时检测系统能实现 RAP 含水率、RAP 的油石比、级配的检测,为实现智能再生拌合站的研发提供可能,同时该检测系统也可代替人工作为日常沥青混合料级配监测的新手段。

关键词: RAP 级配;含水率;RAP 的油石比;实时检测设备;筛分效率

中图分类号: U416.26;U418.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)08-0145-08

Design and simulation analysis of real-time automatic detection system for RAP gradation

MA Dengcheng¹, XU Tianhao¹, GUI Xue², WANG Endong³

(1. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Equipment (Chang'an University), Xi'an 710064, China;

2. Shaanxi Zhonglin Asphalt Pavement Maintenance Technology Co., Ltd., Xi'an 710124, China;

3. Shandong High-speed Engineering Consulting Group Co., Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: To quickly and accurately detect the gradation of reclaimed asphalt pavement (RAP) and improve the detection efficiency of RAP gradation while reducing the influence of manual operation on detection results, this study proposes a method for integrated detection of RAP moisture content, RAP oil-stone ratio, and gradation by combining currently commonly used equipment and methods for testing RAP performance. At the same time, in view of current issues in RAP detection, a new type of automatic detection equipment for RAP gradation is designed, enabling real-time and automated detection of RAP gradation. Firstly, according to the functional requirements of RAP gradation detection, the overall structure of the detection equipment is designed. Secondly, a simulation model of the key structure of the testing equipment, the vibrating screening unit, is established, and the whole screening process is simulated by EDEM discrete element simulation software. A controlled variable method is used to compare and analyze the aggregate particles in the vibrating screen under different parameters such as inclination angle, vibration frequency, vibration direction angle. Finally, the vibrating screen is optimized for the optimal screening efficiency that meets the requirements of the standard. The results show that when the inclination angle of the vibrating screen is 3°, the amplitude is 4mm, the frequency is 16 Hz, and the vibration direction angle is 63°, the screening efficiency of each layer of the vibrating screen mesh reaches over 91%, meeting the practical needs. This demonstrates that the automatic real-time RAP gradation detection system is capable of measuring RAP moisture content, asphalt content, and gradation, providing a possibility for the development of intelligent regenerative mixing stations and can also replace manual as a new means of daily asphalt mixture gradation monitoring.

Keywords: gradation of reclaimed asphalt pavement (RAP); moisture content; oil-stone ratio of RAP; real-time detection equipment; screening efficiency

收稿日期: 2023-08-10; 录用日期: 2023-09-19; 网络首发日期: 2024-07-02

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20240701.1042.002>

基金项目: 陕西省自然科学基金面上项目(2024JC-YBMS-413)

作者简介: 马登成(1981—),男,副教授,硕士生导师,国际学生博士生导师

通信作者: 马登成,mdc8235@163.com

中国每年产生大约 3×10^8 t 沥青路面废旧材料 (reclaimed asphalt pavement, RAP), 如不加以再生利用不仅造成大量堆弃, 影响生态环境, 而且其所蕴含的巨量经济价值与社会效益也无从体现^[1]。厂拌热再生是对其高效高质量再生利用的有效途径^[2-4], 但是再生过程中, 由于 RAP 存在假粒径和级配的变异性, 即使预处理后仍存在级配变异, 使再生后的沥青混合料质量不能得到保证^[5]。如果在再生过程中对 RAP 的级配进行实时自动检测, 根据检测结果实时调整原生料配合比, 实现再生拌合站的智能化, 使得再生沥青混合料级配能够按照生产配合比稳定生产, 从而有效提高再生沥青混合料质量。关于上述问题的研究, 国内外还未有相关技术报道。而目前针对 RAP 的级配检测, 实际生产中主要依靠技术人员操作筛分仪器进行, 这一过程耗时、耗力, 且要求较高的技术水平, 还可能存在人为因素对结果的影响, 关键无法实时在线检测 RAP 的级配, 从而无法根据检测结果实时调整再生沥青拌合站的原生料配料系统, 导致再生沥青混合料级配波动很大, 不符合技术规范要求。其他关于 RAP 或沥青混合料级配检测的方法和研究主要基于图像处理技术^[6], 如文献[7]采用 CCD 数码相机获取沥青混合料试件的切面图像, 利用数字图像处理技术对形状及空间分布进行分析; 文献[8]开展了图像法和筛分法测量粒径的对比研究, 结果表明图像法测量误差远大于筛分法, 现阶段还不能用于实际生产; 文献[9]开展了深度神经网络和全卷积神经网络对沥青混合料图像的识别; 文献[10]采用自动阈值对颗粒图像进行二值化处理, 对不同粒径颗粒采用不同的补偿系数, 并通过拟合对比来减小图像分割造成的误差; 文献[11]依据图像处理技术和 BP 神经网络对填筑材料颗粒尺寸进行分析, 建立了图像识别检测结果与筛分数据之间的对应关系。国内学者也对图像处理技术检测沥青混合料级配进行了深入研究, 如文献[12]采用数字图像处理技术开展了沥青混合料均匀性研究, 表明数字图像处理技术得出的结果与主观上的观测结果基本一致; 文献[13]提出二维数字图像级配转换为三维机械筛分级配的修正方法, 发现数字图像级配和室内机械筛分级配密切相关; 文献[14]应用图像处理技术结合体视学方法, 获得集料粒径分布, 进而将假设级配转化为筛分级配, 具有在 5% 的相对误差; 文献[15]对沥青混合料图像进行处理, 得出混合料的图像特征参数, 利用统计的方法汇总数据, 修正数据误差得到沥青混合料级配; 文献[16]基于图像处理技术, 利用 MATLAB 对获取的图像进行增强和二值化处理, 得

出较为准确的级配曲线; 文献[17]采用 CT 扫描技术, 获取沥青混合料内部的图像信息, 对图像进行去噪、增强和分割等处理, 识别处理后图像的级配特征; 文献[18]同样采用 BP 神经网络的级配检测方法, 通过改进电子筛分的算法, 发现颗粒粒径越大准确率越高。上述基于图像处理技术的级配检测方法虽然可以进行级配检测, 也代表了一种方向, 但受限于图像处理技术的发展还处于理论分析阶段, 其检测结果与实际还有很大差别, 且需要较长的图像处理时间不能指导实际生产。

因此, 本文根据实际工况, 开发设计了 RAP 级配自动实时筛分检测系统, 实现对 RAP 级配的实时快速检测。在此基础上, 建立了振动筛分的仿真模型, 通过 EDEM 仿真软件对其筛分过程进行仿真, 计算其筛分效率, 依据筛分效率来优化振动筛的参数配置, 为 RAP 的级配检测提供一种新的设备和方法。本文设计的 RAP 级配自动实时检测设备实现对 RAP 含水率、RAP 的油石比、集料级配的实时检测, 可替代人工操作仪器的检测方法, 同时为后续的智能再生拌合站提供 RAP 级配数据, 从而对新料添加的精确控制, 实现再生拌合站智能控制, 保证再生沥青混合料质量。

1 RAP 级配自动实时检测方法

基于来源、回收方式、预处理方式不同, RAP 的级配及性能存在巨大差异^[19]。RAP 传统的级配检测方法有烘干法、燃烧炉法、实验室筛分法等^[20]。研究表明, 3 种方法的检测精度高, 但耗时长且需要人工操作仪器进行, 不能实时反馈检测结果。本检测系统将三者的检测过程相结合, 依据从上而下的顺序进行一体化检测的方法, 同时结合计算机控制和传感器技术, 实现检测的自动化, 主要检测流程如图 1 所示。RAP 通过进料结构进入到检测系统; 系统启动后, 微波加热箱对 RAP 进行加热除湿, 箱体外部的称量传感器实时检测箱体质量, 当传感器称重数值稳定后, 除湿结束, 根据除湿前后比重计算获得 RAP 的含水率; 除湿后的 RAP 进入燃烧箱, 其内部电热丝网格使 RAP 中的沥青充分快速燃烧, 燃烧形成的沥青烟气经过滤处理后排放, 当燃烧箱外部的称量传感器数值稳定后, 同理可计算获得 RAP 的油石比; 经燃烧后 RAP 进入振动筛, 通过振动筛分后的集料颗粒按不同粒径进入储料仓, 依据差称量法得到不同粒径的质量, 计算获得 RAP 矿料的级配, 采用数据采集卡将传感器检测的数据信息上传系统, 在系统界面对检测过程进行实时监控, 如图 2 所示。整个过程可在 1 min 内完成, 从而实现

RAP 的级配实时快速检测。

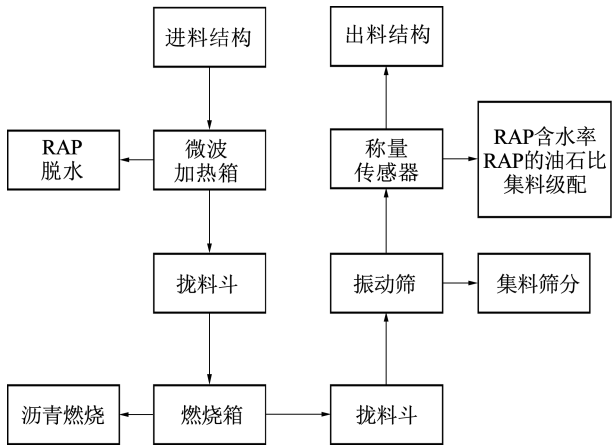


图 1 检测流程
Fig. 1 Inspection process

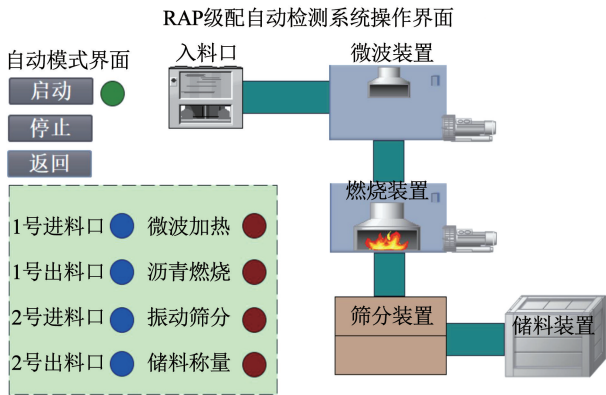


图 2 系统界面
Fig. 2 System interface

与传统检测方法相比,本文提出的自动实时检测方法具有明显优势,见表 1。

表 1 与传统检测方法的对比

Tab. 1 Comparison with traditional detection methods		
RAP 性能		本设备检测
RAP 含水率	人工操作烘箱烘干加热除水,通过称量得出前后的质量	设备自动进行微波加热除湿,传感器实时检测质量
RAP 的油石比	人工操作燃烧炉燃烧沥青,根据内部电子秤得出前后质量	设备自动进行沥青燃烧,传感器实时检测质量
混合料级配	人工利用标准套筛筛分,对筛分结果进行称量,得出质量	设备自动进行混合料筛分,传感器实时检测质量

2 检测设备参数与结构设计

检测设备主要包括微波加热箱(RAP 的含水率检测)、燃烧箱(RAP 的油石比检测)、集料振动筛分计量系统(矿料级配筛分检测)以及辅助结构等,共同完成对 RAP 级配的检测,设备总体结构如图 3 所示。

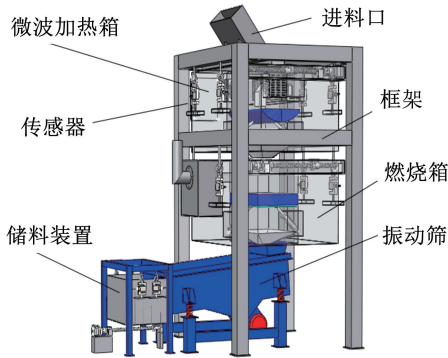


图 3 检测设备总体结构
Fig. 3 Overall structure of detection equipment

2.1 微波加热箱结构

RAP 含水率检测在带有排湿功能的微波加热箱内进行,密闭的结构有效杜绝了微波泄漏和热量散失,箱体通过称重传感器与外框架直接连接,选用高精度传感器测量溢出水分的质量,通过传感器的检测得到 RAP 的含水率。脱水后依据 PLC 控制电机和气缸的运动,进而驱动料板的开闭实现除湿后的 RAP 的掉落,整个检测过程在系统软件的控制下完成,实现检测的自动化过程。所设计的微波加热

箱由料门、驱动电机、滚珠丝杠、磁控管、排风扇、料板、通风波导板、传感器、气缸等组成,如图 4 所示。在实现基本功能的前提下,箱体结构满足紧凑的设计要求,箱体的长、宽、高设计为 750 mm × 750 mm × 450 mm。

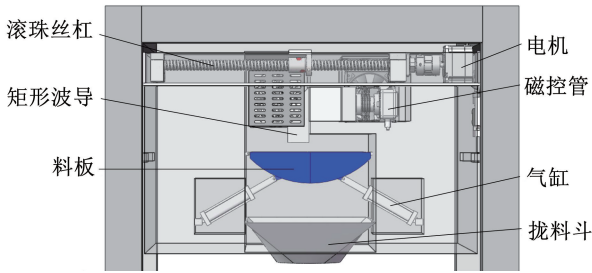


图 4 微波加热箱结构
Fig. 4 Structure of microwave heating box

电机驱动滚珠丝杠运动实现料门的开闭,加热箱中部铰接安装料板,采用弧形设计便于 RAP 的集聚,料板上方安装带有矩形波导的磁控管,磁控管发射微波对旧料进行加热,采用微波加热能实现快速除湿。排风扇与磁控管上部的散热板呈配合关系,加热的同时排风扇持续工作,带动空气循环,对磁控管进行散热。箱体外部的高精度传感器实时检测箱体质量,并将数据上传系统。加热结束后,在气缸的带动下,料板打开,RAP 进入燃烧箱。

由于 RAP 中的含水率会影响再生料加热生产与快速检测的时间,为达到快速加热除湿的目的,本设备的加热时间控制在 20 s,需要计算微波加热的

功率。参考实验室沥青混合物筛分实验,设定每次检测的 RAP 总质量为 1.5 kg,初始含水率设置为 3%,微波加热源的功率计算如下:

$$P = \frac{Q}{3\ 600t\eta} \times 100\% \tag{1}$$

式中: Q 为 RAP 吸收的热量; η 为微波加热效率,取 70%; t 为加热时间。其中 RAP 吸收的热量包括预热和水分汽化需要的热量,即

$$Q = Q_1 + Q_2 \tag{2}$$

其中:

$$Q_1 = m \times c_1 \times w \times (T_1 - T_0)$$

$$Q_2 = m \times w \times \lambda$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为 RAP 预热所需热量和 RAP 中水分汽化所需热量; m 为 RAP 总质量,取 1.5 kg; c_1 为水的比热,取 4.21 kJ/(kg·℃); w 为 RAP 初始含水率,取 3%; T_1 为水分汽化的温度,取 100 ℃; T_0 为 RAP 初始温度,取 30 ℃; λ 为水的汽化热,取 2 260 kJ/kg。

经过计算得 Q 约为 114.96 kJ。则微波加热源的功率根据式(1)可得约为 8.25 kW,考虑到 RAP 含水率的波动,适当放大微波加热功率,取为 10 kW。与传统的烘干法相比,采用微波加热可实现快速除湿,保证了后续 RAP 级配检测的准确。

2.2 燃烧箱结构

采用燃烧法检测 RAP 的油石比,燃烧箱由料门、驱动电机、滚珠丝杠、燃烧装置、料板、过滤室、排气孔、传感器、气缸等组成,如图 5 所示。同上,箱体的长、宽、高为 750 mm×750 mm×450 mm。整个检测过程在系统软件的控制下完成,实现检测的自动化过程。

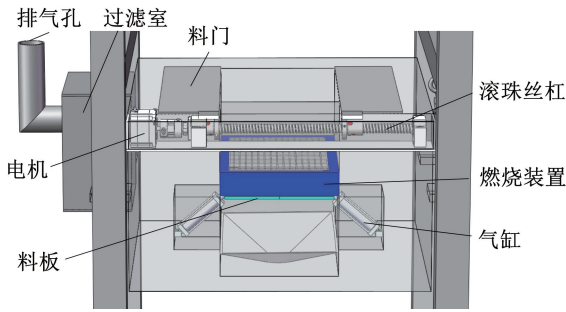


图 5 燃烧箱结构

Fig. 5 Combustion box structure

燃烧箱采用高温隔热材料,内部安装料板和燃烧装置,料板安装在燃烧装置下部且在不影响正常开合的情况下尽量贴近燃烧装置,贴近的安装方式使得热量能迅速传递。燃烧装置的电加热可采用网格排布,保证旧料在下落的过程中沥青能充分燃烧,料板采用平形设计,便于旧料的均匀分布。燃烧过程中上端的料门关闭以阻止热量的散失,燃烧后的

废气经过滤后从排气孔排出,同时燃烧箱质量的变化通过传感器检测得到 RAP 的油石比。为达到快速燃烧沥青的目的,本设备的燃烧时间控制在 20 s,为此,需要计算燃烧装置的功率,取检测的 RAP 总质量为 1.5 kg,初始油石比设置为 5%,根据下式计算功率为

$$P_1 = \frac{Q'_0}{3\ 600t_1\eta_1} \times 100\% \tag{3}$$

式中: Q'_0 为沥青燃烧需要的热量; η_1 为电热丝燃烧效率,此处取 90% 计算; t_1 为燃烧时间。其中沥青燃烧吸收的热量按下式计算:

$$Q'_0 = Q_3 + Q_4 \tag{4}$$

其中:

$$Q_3 = m \times c_2 \times w_1 \times (T_2 - T_0) + m \times c_3 \times w_1 \times (T_3 - T_2)$$

$$Q_4 = m \times w_1 \times \lambda_1$$

式中: Q_3 、 Q_4 分别为沥青预热需要的热量和沥青燃烧生成沥青烟气吸收的热量; c_2 为固态沥青的比热,取 1.67 kJ/(kg·℃); c_3 为液态沥青的比热,取 1.34 kJ/(kg·℃); w_1 为混合料初始油石比,取 5%; T_2 为沥青的熔化温度,取 204.40 ℃; T_3 为沥青的燃烧温度,取 326.85 ℃; λ_1 为沥青的相变热。

经过计算得 Q'_0 约为 275.05 kJ。则燃烧装置的功率根据式(3)可得约为 15.30 kW,本设备通过改进燃烧装置的结构实现了快速燃烧沥青的目的,为后续再生沥青混合料的检测提供了保障。

2.3 振动筛分结构

振动筛分结构如图 6 所示,主要包括筛箱、振动电机、防尘罩、筛网、减震弹簧、储料装置等。振动筛采用不锈钢材质,内部设置筛网,为保证筛分的准确性,在筛箱上部安装防尘罩,防尘罩进料端开有进料口,振动筛的出料端安装储料装置。RAP 经过筛网筛分后按粒径大小进入储料装置,结构底部的底板可在电机的驱动下运动,颗粒依次掉落,通过传感器测量不同粒径集料的质量,从而获得 RAP 的矿料级配。

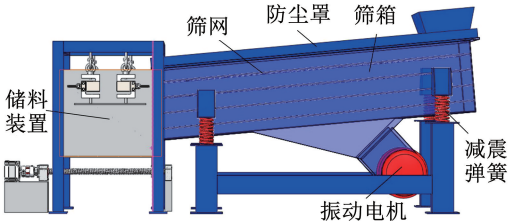


图 6 振动筛结构

Fig. 6 Structure of vibrating screen

3 级配检测精度仿真分析

级配检测是对 RAP 的含水率、RAP 的油石比及

矿料级配进行筛分检测,其中 RAP 的含水率与 RAP 的油石比主要依赖于称重传感器的精度,选用高精度传感器即可达到要求。而决定矿料级配检测精度的主要依赖于振动筛分系统的筛分效率与筛分后的计量精度,计量精度仍可通过选用高精度传感器实现,因此整个级配检测的精度主要依赖于振动筛分系统的筛分效率。为实现高精度筛分,对整个筛分系统进行建模仿真分析,包括振动筛模型和颗粒模型,获得满足筛分效率的条件下的振动筛参数。

3.1 模型建立与参数设置

3.1.1 模型建立

振动筛结构如图 6 所示,为简化模型,提高筛分速度,采用关键粒径筛分的方法检测 RAP 的级配,建立的关键筛孔振动筛仿真模型如图 7 所示。振动筛筛箱长 775 mm,宽 310 mm,高 180 mm;储料装置长 290 mm,宽 314 mm,高 260 mm;振动筛选用方筛孔,筛网长 760 mm,宽 300 mm,高 1.5 mm,筛网的尺寸和标准目数见表 2^[21]。

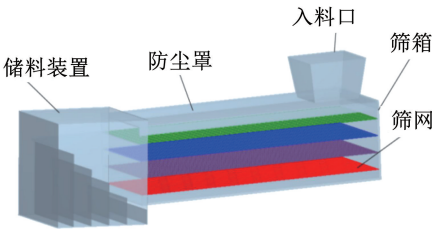


图 7 振动筛仿真模型

Fig. 7 Simulation model of vibrating screen

表 2 筛网尺寸

Tab. 2 Screen Size

筛网尺寸/mm	标准目数	筛网尺寸/mm	标准目数
13. 20	2	4. 75	4
9. 50	2	2. 36	8

除去水分和沥青的 RAP 成为散料后落入振动筛,集料模型采用圆球颗粒,仿真颗粒的总质量设置为 1.5 kg, RAP 颗粒的筛分区间分别为 13. 20 ~ 16. 00 mm、9. 50 ~ 13. 20 mm、4. 75 ~ 9. 50mm、2. 36 ~ 4. 75 mm 和小于 2. 36 mm。

3.1.2 参数设置

RAP 在实际筛分过程中存在复杂的接触,不同颗粒之间的碰撞和颗粒与筛网之间的碰撞,选择 EDEM 软件中的 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型模拟实际的筛分过程。振动筛和混合料的特征参数和接触参数见表 3、4。

表 3 材料特征参数

Tab. 3 Material characteristic parameters

材料	密度/(kg·m ⁻³)	剪切模量/Pa	泊松比
集料	2 600	0. 5 × 10 ⁸	0. 2
钢	7 850	7. 0 × 10 ¹⁰	0. 3

表 4 颗粒与振动筛的接触参数

Tab. 4 Contact parameters between particles and vibrating screen

接触材料	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
颗粒 - 颗粒	0. 35	0. 2	0. 01
颗粒 - 钢	0. 21	0. 2	0. 01

3.2 仿真分析

RAP 的矿料级配决定相应各粒径新料的用量,因此,要严格保证检测出的级配的准确性。由于振动筛的倾斜角、振动频率、振幅等对筛分效率产生主要影响,因此本文主要研究这 3 个参数对筛分效率的影响。得出在不同参数下振动筛的筛分效率,通过对比匹配合理的作业参数来指导振动筛分结构的设计,为实现快速、准确检测 RAP 的级配,振动筛的筛分时间控制在 20 s,图 8 为振动筛仿真过程。

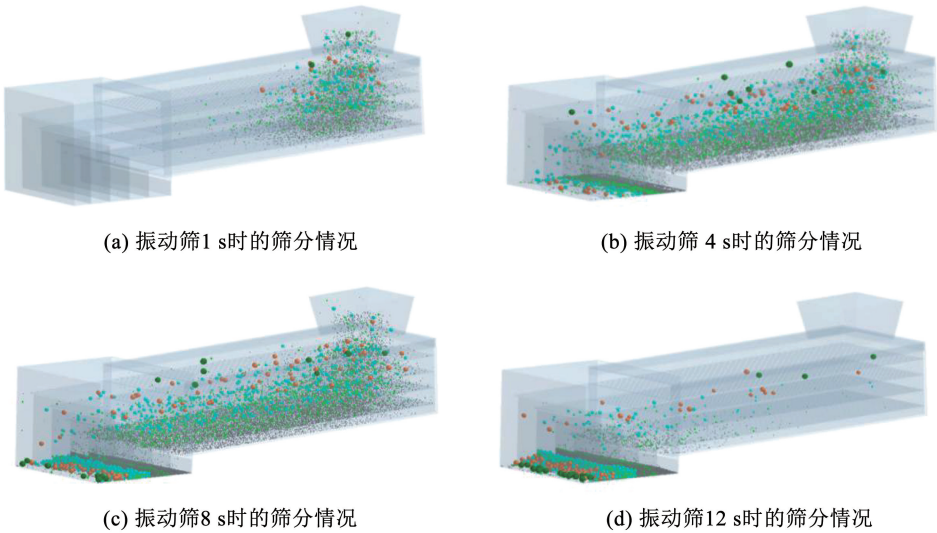


图 8 振动筛仿真过程

Fig. 8 Simulation process of vibrating screen

3.2.1 筛网倾斜角的影响

筛网倾斜角的大小影响到筛分效率的高低。倾斜角较大时,RAP 沿筛网面快速运动,与筛网的碰撞次数减少导致小颗粒未经过充分的筛分,出现混仓;倾斜角较小时,混合料沿筛网面的运动速度降低,与筛网的碰撞次数增加,可提高筛分效率。

在振动筛的振幅为 4 mm、振动方向角为 60°、振动频率为 16 Hz 的基准参数条件下^[22],设置倾斜角数值分别为 2°、3°、4°、5°,进行仿真分析,可得倾斜角对筛分效率的影响如图 9 所示。

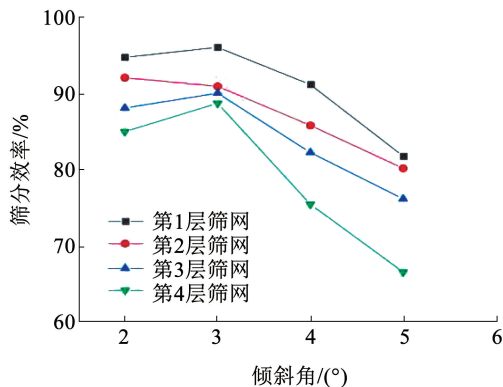


图 9 倾斜角对筛分效率的影响

Fig. 9 Effect of inclination angle on screening efficiency

由图 9 可知,当其他参数固定时,第 1、3、4 层筛网在倾斜角为 2°~5°之间的筛分效率先上升后下降,表现在 3°的时候筛分效率达到最大;第 2 层筛网的筛分效率则呈下降的趋势,当倾斜角为 2°的时候筛分效率最高。根据仿真结果对比分析获得了不同倾角下的筛分情况,得出当筛网倾斜角为 3°时振动筛的筛分效率最高。对图 9 中的曲线关系进行拟合,可获得倾斜角与筛分效率的关系如下:

$$y_i = a_i x^2 + b_i x + c_i \quad (5)$$

式中: i 为筛网序号, $i = 1, 2, 3, 4$; a_i 为二次项系数, $a_1 = -2.680\ 0$, $a_2 = -1.127\ 5$, $a_3 = -2.007\ 5$, $a_4 = -3.147\ 5$; b_i 为一次项系数, $b_1 = 14.380\ 0$, $b_2 = 3.809\ 5$, $b_3 = 9.697\ 5$, $b_4 = 15.178\ 0$; c_i 为常数项, $c_1 = 76.825$, $c_2 = 89.176$, $c_3 = 77.337$, $c_4 = 68.343$ 。

3.2.2 振动频率的影响

振动频率主要通过改变 RAP 与筛网的接触碰撞次数来影响筛分效率。通过上述倾斜角的仿真分析,在振动筛的振幅为 4 mm、振动方向角为 60°、倾斜角为 3°的基准参数条件下,设置振动频率分别为 15、16、17、18 Hz,进行仿真分析,得到振动频率对筛分效率的影响如图 10 所示。

由图 10 可知,当其他参数固定时,4 层筛网的筛分效率均随振动频率的增加呈现先上升后下降的趋势,其中,第 1、2、4 层筛网在 16 Hz 的时候筛分效

率达到最大、第 3 层筛网在 17 Hz 的时候筛分效率达到最大,随后,4 层筛网的筛分效率开始下降。根据仿真对比分析,发现不同振动频率下,当振动频率为 16 Hz 时振动筛具有最高的筛分效率。集料颗粒的筛分效率并未随着频率的增加而提高,即一味的增加振动频率并不能提高振动筛筛分效率,过高的振动频率不仅影响筛分效率,还会额外增加能耗,降低筛网寿命。对图 10 中的曲线关系进行拟合,可获得振动频率与筛分效率的关系如下:

$$y_j = a_j x^2 + b_j x + c_j \quad (6)$$

式中: j 为筛网序号, $j = 1, 2, 3, 4$; a_j 为二次项系数, $a_1 = -1.632\ 5$, $a_2 = -2.010\ 0$, $a_3 = -3.130\ 0$, $a_4 = -3.135\ 0$; b_j 为一次项系数, $b_1 = 54.830\ 0$, $b_2 = 67.578\ 0$, $b_3 = 104.290\ 0$, $b_4 = 102.630\ 0$; c_j 为常数项, $c_1 = -367.630\ 0$, $c_2 = -476.840\ 0$, $c_3 = -779.870\ 0$, $c_4 = -757.050\ 0$ 。

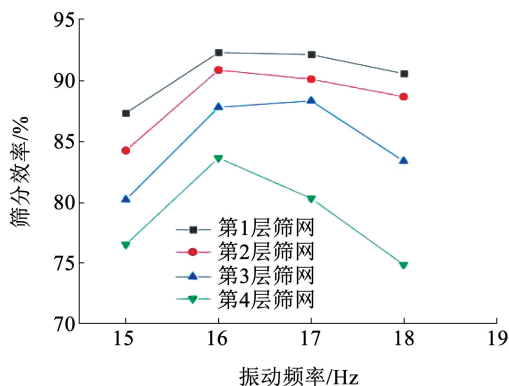


图 10 振动频率对筛分效率的影响

Fig. 10 Effect of vibration frequency on screening efficiency

3.2.3 振动方向角对筛分效率的影响

振动方向角大小表示颗粒在水平和竖直方向的运动距离,振动方向角越大,颗粒在竖直方向的运动距离越大,在水平方向的运动距离越小,颗粒与筛网的碰撞越充分;反之则相反。通过上述对振动筛倾斜角和振动频率的仿真分析,在振动筛的振幅为 4 mm、振动频率为 16 Hz、倾斜角为 3°的基准参数条件下,设置倾斜角数值分别为 59°、61°、63°、65°,进行仿真分析,得到振动方向角对筛分效率的影响如图 11 所示。

由图 11 可知,当其他参数固定时,增加振动方向角并不能提高筛分效率,4 层筛网都表现出筛分效率先增加后减小的趋势,只是程度有所差别,4 层筛网均在振动方向角为 63°的时候筛分效率达到最大,其后,4 层筛网筛分效率下降,第 1、2 层筛网筛分效率平缓下降,第 3、4 层筛网筛分效率剧烈下降。根据仿真的数据对比分析 4 种振动方向角的筛分情况,选择 63°为最佳的振动方向角。对图 11 中的曲

线关系进行拟合,可获得振动方向角与筛分效率的关系如下:

$$y_k = a_kx^2 + b_kx + c_k \tag{7}$$

式中: k 为筛网序号, $k = 1, 2, 3, 4$; a_k 为二次项系数, $a_1 = -0.409\ 4$, $a_2 = -0.591\ 9$, $a_3 = -0.579\ 4$, $a_4 = -1.011\ 9$; b_k 为一次项系数, $b_1 = 51.722\ 0$, $b_2 = 75.032\ 0$, $b_3 = 73.662\ 0$, $b_4 = 127.240\ 0$; c_k 为常数项, $c_1 = -1\ 535.600\ 0$, $c_2 = -2\ 280.800\ 0$, $c_3 = -2\ 247.500\ 0$, $c_4 = -3\ 910.000\ 0$ 。

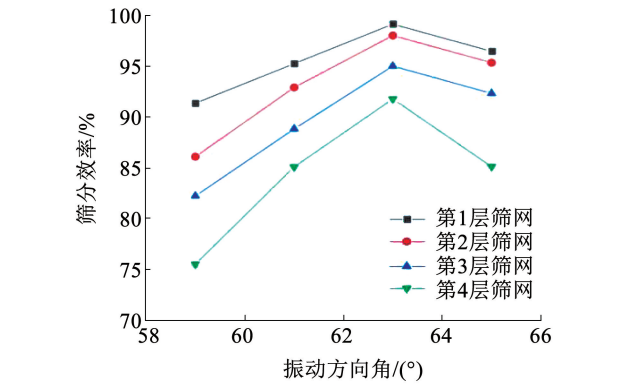


图 11 振动方向角对筛分效率的影响

Fig. 11 Effect of vibration direction angle on screening efficiency

3.2.4 最佳参数组合对筛分效率影响分析

综上所述,通过仿真对比分析,在倾斜角为 3°、振幅 4 mm、振动频率 16 Hz、振动方向角 63°的条件下,振动筛各层筛网的筛分效率按筛孔尺寸从大到小依次为 99.10%、97.98%、94.98%、91.75%,4 层筛网的筛分效率达到 91% 以上,振动筛筛分后的 RAP 级配满足工程的实际需要,同时,检测设备整体在满足工程实际需要的前提下实现了快速化、准确化、自动化的检测,最佳参数组合下筛分效率仿真结果见表 5 所示,筛分效率仿真过程如图 12 所示。

表 5 最佳参数组合下筛分效率仿真结果

Tab.5 Simulation results of screening efficiency with optimal parameter combination

筛网 层数	倾斜角/ (°)	振幅/ mm	振动频率/ Hz	振动方向角/ (°)	筛分效率/ %
1	3	4	16	63	99.10
2	3	4	16	63	97.98
3	3	4	16	63	94.98
4	3	4	16	63	91.75

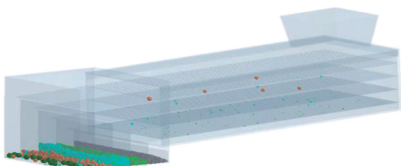


图 12 最佳参数组合下筛分效率仿真

Fig. 12 Simulation of screening efficiency with optimal parameter combination

4 结 论

1)提出了 RAP 级配自动实时检测方法,可对 RAP 含水率、RAP 的油石比、混合料级配进行快速检测,全部检测可在 60 s 内完成,同时设计了 RAP 级配自动实时检测设备,对设备的组成部分及工作流程进行了说明,并分析计算了各组成部分的结构参数。

2)建立了检测设备核心关键结构振动筛的仿真模型,采用控制变量法对振动筛在不同的筛面倾斜角、振动频率、振动方向角等参数时进行了对比分析。

3)以符合标准要求的最优筛分效率为目标对振动筛进行优化设计,获得了当倾斜角为 3°、振幅 4 mm、振动频率 16 Hz、振动方向角 63°的条件下,振动筛整体筛分效率可达 91% 以上,能满足实际工程的需要。

参考文献

[1]徐光霁,韩诚嘉,马涛,等. 路网沥青旧料综合再生站点规划与效益[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 145
XU Guangji, HAN Chengjia, MA Tao, et al. Planning and benefits of comprehensive recycling stations for old asphalt materials in road network[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2022, 52(1): 145. DOI:10.3969/j. issn. 1001-0505. 2022. 01. 019

[2]GAO Jie, YANG Jiangang, YU Di, et al. Reducing the variability of multi-source reclaimed asphalt pavement materials; a practice in China [J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 122389. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2021. 122389

[3]YANG Jiangang, TAO Wenjie, GAO Jie, et al. Measurement of particle agglomeration and aggregate breakdown of reclaimed asphalt pavement [J]. Construction and Building Materials, 2021, 296: 123681. DOI:10.1016/j. conbuildmat. 2021. 123681

[4]PÉREZ MADRIGAL D, IANNONE A, MARTINEZ A H, et al. Effect of mixing time and temperature on cracking resistance of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement material [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(8): 04017058. DOI:10.1061/(asce) MT. 1943-5533. 0001831.

[5]YUE Yanchao, ABDELSALAM M, EISA M S. Aggregate gradation variation on the properties of asphalt mixtures[J]. Coatings, 2022, 12(11): 1608. DOI:10.3390/coatings12111608

[6]赵毅,杨旋,郝增恒,等. 沥青混合料均匀性数字图像评价方法研究进展[J]. 材料导报, 2020, 34(23): 23088
ZHAO Yi, YANG Xuan, HAO Zengheng, et al. Research progress on digital image evaluation method of homogeneity of asphalt mixture [J]. Materials Reports, 2020, 34(23): 23088. DOI:10.11896/cldb.19070174

[7]YUE Zhongqi, BEKKING W, MORIN I. Application of digital image processing to quantitative study of asphalt concrete microstructure [J]. Transportation Research Record,1995, 1492: 53

[8]KUMARA G H A J J, HAYANO K, OGIWARA K. Image analysis techniques on evaluation of particle size distribution of gravel[J]. International Journal of geomate, 2012, 3(1): 290. DOI: 10.21660/2012.5.1261

- [9] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 640. DOI:10.1109/TPAMI.2016.2572683
- [10] SULAIMAN M S, SINNAKAUDAN S K, NG S F, et al. Application of automated grain sizing technique (AGS) for bed load samples at Rasil River: a case study for supply limited channel[J]. CATENA, 2014, 121: 330. DOI: 10.1016/j.catena.2014.05.013
- [11] ZHANG Shilin, WU Gaojian, YANG Xingguo, et al. Digital image-based identification method for the determination of the particle size distribution of dam granular material [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(8): 2820. DOI: 10.1007/s12205-017-0304-8
- [12] 彭勇, 孙立军, 王元清, 等. 数字图像处理在沥青混合料均匀性评价中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(2): 334
- PENG Yong, SUN Lijun, WANG Yuanqing, et al. Application of digital image processing in evaluating homogeneity of asphalt mixture [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 334. DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb2007.02.017
- [13] 汪海年, 郝培文, 庞立果, 等. 基于数字图像处理技术的粗集料级配特征[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 54
- WANG Hainian, HAO Peiwen, PANG Liguang, et al. Investigation into grading characteristic of coarse aggregate via digital image processing technique [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2007, 35(11): 54. DOI: 10.3321/j.issn:1000-565x.2007.11.011
- [14] 吴文亮, 王端宜, 张肖宁, 等. 沥青混合料级配的体视学推测方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 29
- WU Wenliang, WANG Duanyi, ZHANG Xiaoning, et al. Stereology method of estimating gradation of asphalt mixtures [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 29. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2009.05.005
- [15] 沙爱民, 王超凡, 孙朝云. 一种基于图像的沥青混合料矿料级配检测方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2010, 30(5): 1
- SHA Aimin, WANG Chaofan, SUN Zhaoyun. An image-based mineral gradation measurement method of asphalt mixture [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2010, 30(5): 1. DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2010.05.001
- [16] 李强, 邵成, 刘雄. 基于 MATLAB 沥青混合料碎石级配的检测方法[J]. 交通科学与工程, 2015, 31(2): 23
- LI Qiang, SHAO Cheng, LIU Xiong. MATLAB asphalt mixture detection method based on the graded gravel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2015, 31(2): 23. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2015.02.006
- [17] 程永春, 马健生, 颜廷野, 等. 基于数字图像处理技术的沥青混合料级配检测方法[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(32): 332
- CHENG Yongchun, MA Jiansheng, YAN Tingye, et al. Asphalt mixture gradation detection method based on digital image processing technology [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(32): 332. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.32.055
- [18] 宫兴, 英红, 姜鹏. 基于 BP 神经网络的沥青混合料级配检测研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 165
- GONG Xing, YING Hong, JIANG Peng. Research on asphalt mixture grading detection based on BP neural network [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2022, 41(3): 165. DOI:10.16186/j.cnki.1673-9787.2060076
- [19] 吴建涛, 伍洋, 刘泉, 等. 预处理方法对聚氨酯再生沥青混合料性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 489
- WUJiantao, WU Yang, LIU Quan, et al. Effect of pretreatment methods on performance of polyurethane recycling asphalt mixture [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 489. DOI:10.3969/j.issn.1001-0505.2021.03.018
- [20] 梁波, 兰芳, 郑健龙. 沥青的老化机理与疲劳性能关系的研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(9): 9083
- LIANG Bo, LAN Fang, ZHENG Jianlong. Research and development of relationship between aging mechanism and fatigue properties of asphalt [J]. Materials Reports, 2021, 35(9): 9083. DOI: 10.11896/cldb.20010138
- [21] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 117. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2011.05.019
- [22] 石智文, 陈学庚, 刘海山, 等. 基于 EDEM 的花生秧清选装置筛分性能仿真试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(10): 81
- SHI Zhiwen, CHEN Xuegeng, LIU Haishan, et al. EDEM-based simulation test of peanut seedling cleaning device sieving performance [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(10): 81. DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2023.10.009

(编辑 张 红)