

文章编号: 1005-0523(2025)02-0076-11



不同拌和速度下再生沥青混合料均匀性演变模拟研究

吴建涛, 刘金鹏, 韩雨廷, 刘 泉

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:为更好地掌握再生沥青混合料(RAP)拌和均匀性的变化规律,对不同拌和速度下RAP拌和均匀性演变的动态过程进行了模拟研究。首先,基于离散单元法(DEM)模拟不同拌和速度下的RAP拌和过程,分析旧料结团破碎的拌和均匀性变化和内部机理;其次,在结团破碎的基础上,进一步分析新旧料的均匀性演变进程;最后,利用3D打印技术及图像处理分析不同拌和速度下室内新旧料的拌和均匀性变化。结团破碎存在一个从快速到缓慢的过程,5,10,15,20 r/min拌和速度下的旧料结团分散系数拟合曲线拐点时间分别为10.92,6.69,5.48,4.12 s。离拌和中心越远的结团,在拌和中速度和受力的变化趋势越明显,拌和越均匀。5,10,15,20 r/min拌和速度下的新旧料分散系数拟合曲线拐点时间分别为17.05,8.74,5.66,4.26 s。不同拌和速度下室内实验与DEM模拟的新旧料拌和均匀性变化略有不同,但均在4 s左右达到均匀程度变化的拐点。RAP的拌和均匀性变化表现为复杂的动态过程,拌和速度是影响拌和均匀性不可忽略的关键因素。

关键词:拌和均匀性;拌和速度;再生沥青混合料;离散单元法;旧料结团;3D打印

中图分类号:U416.26

文献标志码:A

本文引用格式:吴建涛,刘金鹏,韩雨廷,等.不同拌和速度再生沥青混合料均匀性演变模拟研究[J].华东交通大学学报,2025,42(2):76-86.

Simulation Study on the Evolution of Uniformity of Reclaimed Asphalt Pavement with Different Mixing Speeds

Wu Jiantao, Liu Jinpeng, Han Yuting, Liu Quan

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to better grasp the changes in the mixing uniformity of reclaimed asphalt pavement (RAP), the dynamic process of the evolution of RAP mixing uniformity at different mixing speeds was simulated. Firstly, based on the discrete element method (DEM) to simulate the RAP mixing process under different mixing speeds, we analyze the mixing uniformity change and internal mechanism of the old aggregate agglomeration crushing; Secondly, on the basis of agglomerate crushing, we further analyze the uniformity evolution process of the new and old aggregates; Finally, we use the 3D printing technology and image processing to analyze the mixing uniformity change of the new and old aggregates in the chamber under different mixing speeds. There is a process of agglomerate crushing from fast to slow, The inflection times of the fitted curves of dispersion factors of old aggregate agglomeration at 5, 10, 15, 20 r/min mixing speeds are 10.92, 6.69, 5.48, 4.12 s, respectively. the further the agglomerates are away from the center of mixing, the more obvious the trend of speed and force changes in mixing, and the more homogeneous the mixing is. The inflection times of the fitted curves of disper-

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078190)

sion factors of old and new aggregates at 5, 10, 15, 20 r/min mixing speeds are 17.05, 8.74, 5.66, 4.26 s, respectively. The uniformity of the mixing of the old and new aggregates under different mixing speeds is slightly different between the indoor experiment and DEM, but all of them reach the inflection point of uniformity around 4 s. The change of mixing uniformity of RAP is a complex dynamic process, and the mixing speed is a key factor that cannot be ignored to affect the mixing uniformity.

Key words: mixing uniformity; mixing speed; reclaimed asphalt pavement; discrete element method; old aggregate agglomeration; 3D printing

Citation format: WU J T, LIU J P, HAN Y T, et al. Simulation study on the evolution of uniformity of reclaimed asphalt pavement with different mixing speeds[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42 (2): 76–86.

再生沥青混合料(reclaimed asphalt pavement, RAP)能够实现废旧沥青路面重复利用,并更好地保护环境^[1-4]。目前RAP的应用还存在许多问题,例如旧料结团成块、旧料利用率低,以及旧料与新料混合不均匀等问题^[5-11]。在工程应用中,RAP的拌和均匀性不仅是级配设计保障的基础,还关系到再生沥青路面的路用性能^[12-13]。

已有学者认为拌和温度、拌和时间、沥青用量,以及拌和工艺等因素都会影响RAP的拌和均匀性^[14-17]。在RAP内部组成方面,Wu等^[18]指出旧料结团没有充分破碎是导致RAP不均匀的主要原因。Tang等^[19]认为旧料结团对RAP不均匀程度的影响会随着旧料掺量的增加而增大。Liu等^[20]认为新旧沥青的黏度变化和扩散会影响RAP的均匀性。Vassaux^[21]等认为旧料结团的存在降低了新旧料的混匀程度,进而影响了RAP的拌和均匀性。由此看出,RAP拌和均匀性的关键是在保证旧料结团破碎的基础上达到新旧料的混合均匀。而结团的破碎是一个动态过程,是拌和功和结团内部黏结能的平衡过程,拌和速度是拌和功的决定性因素。现有研究主要关注结团的存在对RAP均匀性的影响,对于不同拌和速度下,旧料结团破碎并影响RAP拌和均匀性的动态过程研究较少。

离散单元法(discrete element method, DEM)不仅能够分析沥青混合料粗集料界面的力学行为^[22],还能分析集料颗粒的运动状态^[23]。本研究采用DEM模拟RAP的拌和过程并提取颗粒的运动状态和均匀性变化。

1 拌和仿真模型构建

1.1 集料形状模型构建

利用光栅投影扫描仪重构粗集料的三维形态,由于扫描后得到的真实集料模型精度过高导致计算量过大,使PFC软件无法在合理的时间内完成计算,所以将真实集料模型进行简化。参考已有关于特征点简化的研究^[24],将模型特征点的数量控制在1 500个左右,并将其导入PFC软件中转化为Rblock刚性块进行三维不规则集料模拟,其实际颗粒模型效果如图1所示。

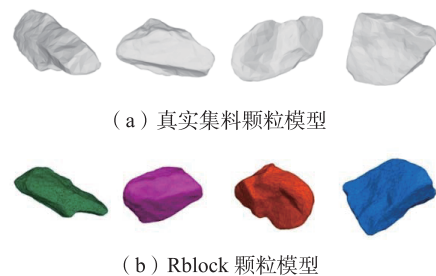


图1 真实集料和Rblock颗粒模型图

Fig. 1 Real aggregate and Rblock particle model diagram

1.2 旧料结团颗粒模型构建

本研究构建旧料结团颗粒模型的流程如图2所示。首先利用SketchUp绘制结团形状图如图2(a)所示,然后导入PFC软件中转化为刚性墙体如图2(b)所示。不考虑结团半径对模拟结果产生的影响,综合考虑DEM模拟的精度和效率,选择半径为1.5 mm的球颗粒进行旧料结团颗粒的填充,为了避免颗粒的重叠现象,将颗粒填充的孔隙率设置为

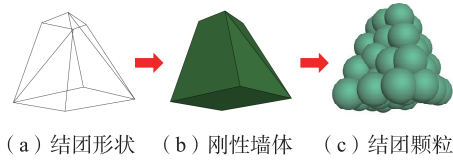


图2 旧料结团颗粒模型构建流程图

Fig. 2 Flowchart of old aggregate agglomeration particle model construction

0.8,得到结团颗粒的模型如图2(c)所示。

1.3 RAP 级配模拟

本研究采用AC-13级配应用于模拟RAP的生成,并设置其总重量为5 kg,颗粒密度为2 700 kg/m³,

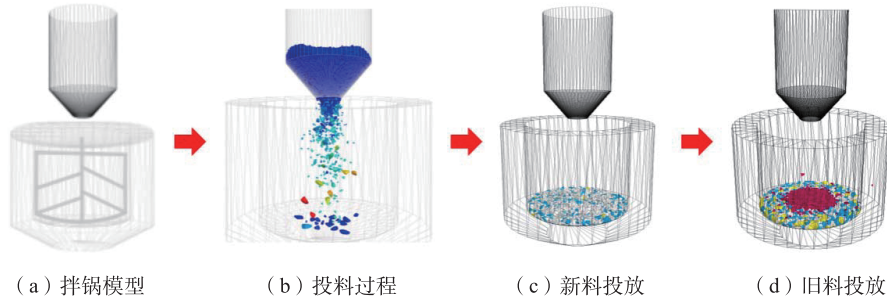


图3 RAP级配模拟流程图

Fig. 3 Flowchart of RAP grading simulation

1.4 接触参数设定

研究假定拌和模型中沥青砂浆均匀裹覆在集料表面,拌和模型接触类型分为新料-新料、新(旧)料-旧料、结团内外部、新(旧)料-墙体和结团-墙体等类型,集料间的接触选用平行黏结模型(linear parallel bond model)来表征,而集料和墙体之间的接触则选用线性模型(linear model)。基于已有关于RAP高温拌和的接触参数标定研究^[25],拌和模型的接触参数设定如表1所示。

1.5 叶片运动设置

以搅拌叶片的轴中心为旋转中心, z 轴为旋转轴,使搅拌叶片绕轴中心顺时针旋转。考虑到实际室内拌和实验的高拌速条件,如果将其应用至DEM模拟中,拌和模型颗粒会发生逃逸现象,故本研究选用多组低拌速进行RAP的拌和模拟实验,其拌和过程如图4所示。由图4可知,随着拌和过程的进行,旧料颗粒逐渐由集中态转变为离散态,与实验现象相一致。

1.6 均匀程度分析评价指标

本文通过颗粒分散系数 C 表征RAP的拌和均

旧料掺量为10%,其级配模拟流程如图3所示。首先利用AutoCAD绘制拌锅模型;再将模型导入PFC软件中转化为刚性墙体作为模拟拌锅,并在上方设置投料的颗粒工厂如图3(a)所示,其投料过程如图3(b)所示。在颗粒工厂下半部分生成符合级配的新料先行投放,上半部分生成旧料随后投放。如图3(c)图3(d)所示,其中白色、蓝色和黄色颗粒分别代表[4.75,9.50],[9.50,13.20],[13.20,16.00] mm粒径集料,红色为旧料。由于本研究主要考虑粗骨料运动,且加入粒径在4.75 mm以下的颗粒会使得计算效率急剧下降,因此选择删除粒径小于4.75 mm的颗粒。

匀性。首先统计拌和某一时刻全部旧料颗粒的位置坐标 (x_i, y_i, z_i) ,得到旧料颗粒 x 、 y 、 z 坐标的均值及标准差;再计算3个方向标准差的均值得到旧料在某时刻下的 C ,计算式为

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2)$$

$$\bar{z} = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n} \quad (3)$$

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (4)$$

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

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}} \quad (6)$$

$$C = \frac{S_x + S_y + S_z}{3} \quad (7)$$

式中: n 为旧料颗粒的总数量; $\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$ 分别为旧

表1 RAP拌和模型接触参数
Tab.1 RAP mixing model contact parameters

接触模型	接触类型	接触参数	数值
平行黏结模型	新料-新料	线性有效模量/ (N/m ²)	1.0×10 ⁶
		黏性有效模量/Pa	1.0×10 ⁸
		拉伸强度/Pa	2.0×10 ⁶
		黏聚力/Pa	3.0×10 ⁶
		摩擦角/ (°)	10
		摩擦系数	0.3
		法向与剪切刚度比	1.7
	新(旧)料-旧料	线性有效模量/ (N/m ²)	1.0×10 ⁶
		黏性有效模量/Pa	1.2×10 ⁸
		拉伸强度/Pa	3.0×10 ⁶
		粘聚力/Pa	4.0×10 ⁶
		摩擦角/ (°)	18
		摩擦系数	0.3
		法向与剪切刚度比	1.7
	结团内外部	线性有效模量/ (N/m ²)	1.0×10 ⁶
		黏性有效模量/Pa	5.0×10 ⁸
		拉伸强度/Pa	2.0×10 ⁶
		黏聚力/Pa	3.0×10 ⁶
		摩擦角/ (°)	40
		摩擦系数	0.3
		法向与剪切刚度比	1.7
线性模型	新(旧)料-墙体结团-墙体	有效模量/ (N/m ²)	8.0×10 ⁸
		法向与剪切刚度比	0.5

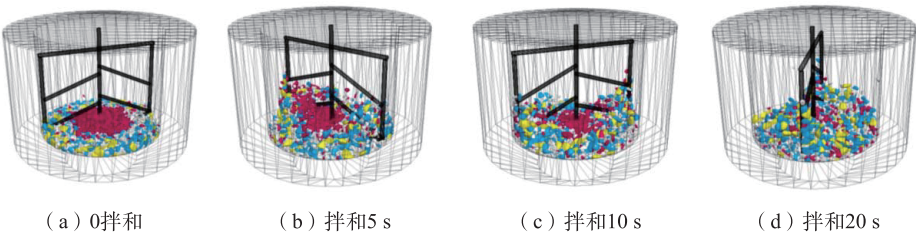


图4 RAP拌和过程示意图
Fig. 4 Schematic diagram of RAP mixing process

料颗粒坐标的均值; S_x , S_y , S_z 分别为旧料颗粒坐标的标准差; i 为不同旧料颗粒的编号。

2 基于3D打印技术的室内拌和实验方法

2.1 原材料

聚乳酸 (polylactic acid, PLA), 具有良好的力学性能与降解性能^[26-27]。本研究使用创想三维公司生产的 Ender3-V2 FDM 打印机打印 PLA 材质的人工集料及搅拌叶片, PLA 耗材的相关参数如表 2 所示。

表2 PLA 耗材相关参数
Tab.2 PLA consumables related parameters

参数	密度/ (kg/m ³)	抗拉强度/ MPa	打印温度/℃	线材直径/ mm
数值	1 137	34	190~230	1.75±0.03

2.2 集料制备

将光栅投影扫描出来的真实集料模型导入 Creality Print 中, 使用等比例缩放功能将集料控制在合适的粒径范围内。随后对模型进行切片处理, 生成 3D 打印机可以识别的文件类型进行集料打

印。为了与DEM模拟的结果进行对比,3D打印集料的级配与DEM模拟的级配设计保持一致,采用删除4.75 mm以下粒径颗粒的AC-13级配,其各档粒径颗粒的数量如表3所示,3D打印集料的制备过程如图5所示。

2.3 黏性介质选择

二甲基硅油透明度高且无毒环保^[28],在拌和过程中不会覆盖集料颗粒的颜色,便于后续的图像分析和处理。此外,二甲基硅油还具有良好的热稳定性^[29],其在-40~150 ℃内黏度变化极小。故本研究选用运动黏度分别为1 000,2 000 mPa·s的二甲基硅油替代RAP中的新旧沥青进行常温下的室内拌和实验,其旋转黏度测试值分别为212,487 mPa·s。由

于RAP中,旧集料表面的老化沥青黏度更高,并且为了使二甲基硅油能够均匀裹覆在集料的表面,将1 000 mPa·s二甲基硅油的掺量设置为50 mL,模拟RAP中的新沥青,2 000 mPa·s二甲基硅油的掺量设置为15 mL,模拟旧集料表面的老化沥青。再对70#基质沥青进行旋转黏度测试其结果如表4所示。

表3 3D打印集料各档粒径颗粒数
Tab.3 Number of particles in each grade of particle size of 3D printed aggregates

粒径范围/mm	新料颗粒数/个	旧料颗粒数/个
[4.75,9.50)	3 722	537
[9.50,13.20)	810	69
[13.20,16.00]	150	3

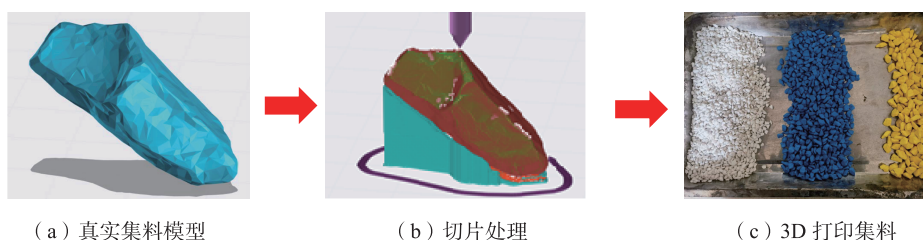


图5 3D打印集料制备过程

Fig. 5 3D printing aggregates preparation process

表4 基质沥青旋转黏度测试值
Tab.4 Rotational viscosity test values of substrate bitumen

温度/℃	黏度/(mPa·s)	对数值
120	1 290	3.11
135	557	2.75
150	272	2.43
165	148	2.17
180	86.6	1.94

根据表4绘制基质沥青温度与黏度对数的黏温线图,同时将二甲基硅油黏度标定在图中,其结果如图6所示。由图6可知,采用1 000,2 000 mPa·s的二甲基硅油替代新旧沥青进行常温下的拌和实验,相当于实际拌和实验中新旧沥青分别为158,139 ℃基质沥青的工况。

2.4 室内拌和实验过程

通过3D打印机打印搅拌叶片,并且为了更直观地观察集料颗粒的运动状态,使用透明圆柱桶作为拌和实验的容器,采用调速电机控制搅拌叶片的拌和速度。为更好地传递电机扭力给搅拌叶片,使用刚性联轴器将二者进行连接。拌和实验装置实物及拌和过程如图7所示。

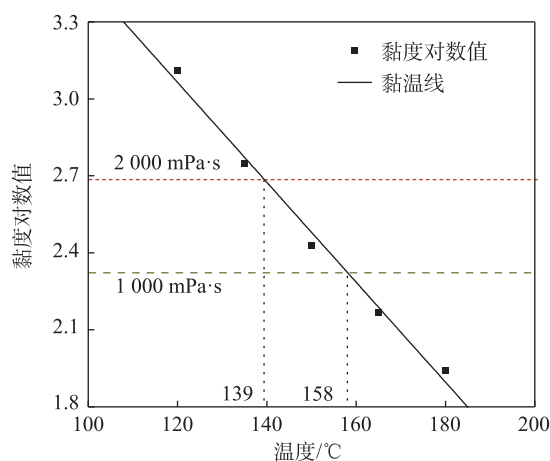


图6 基质沥青黏温线及二甲基硅油黏度标定图
Fig. 6 Viscosity-temperature line of substrate bitumen and dimethyl silicone oil viscosity calibration chart

首先在拌和容器中加入通过3D打印得到的新料颗粒和1 000 mPa·s二甲基硅油先行拌和均匀;随后在另一容器内以同样方式将旧料颗粒和2 000 mPa·s二甲基硅油拌和均匀;最后将表面均匀裹覆二甲基硅油的旧料颗粒倒入新料的拌和容器中进行RAP新旧料的室内拌和实验。为与DEM模拟实验形成对

照,在室内新旧料拌和实验过程中,搅拌叶片每拌和2 s,随即自上而下进行拍照记录,之后将照片导入

MATLAB 中进行旧料颗粒的二值化处理如图8所示,输出旧料的二维位置信息并计算出分散系数 C 。

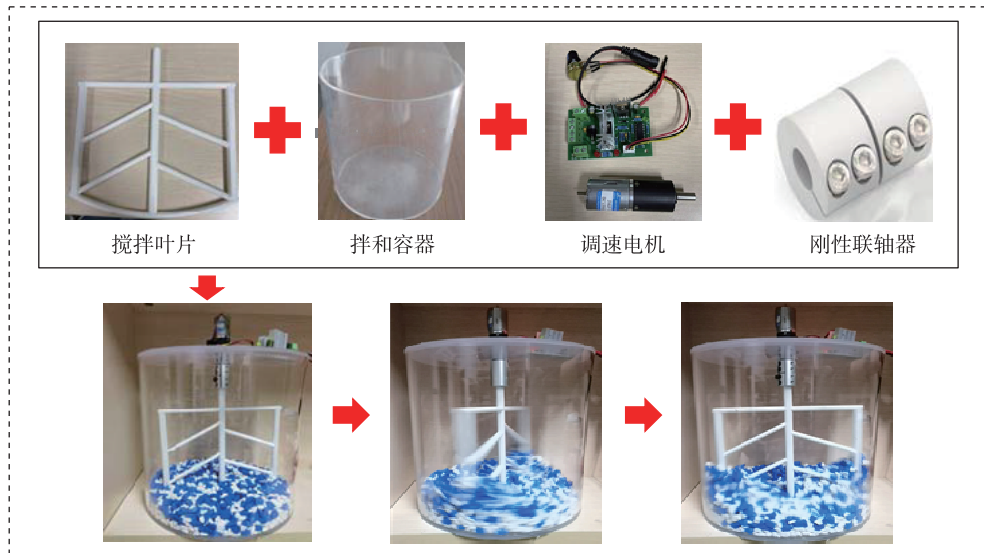


图7 拌和实验装置实物及拌和过程图

Fig. 7 Mixing experimental device and mixing process diagram

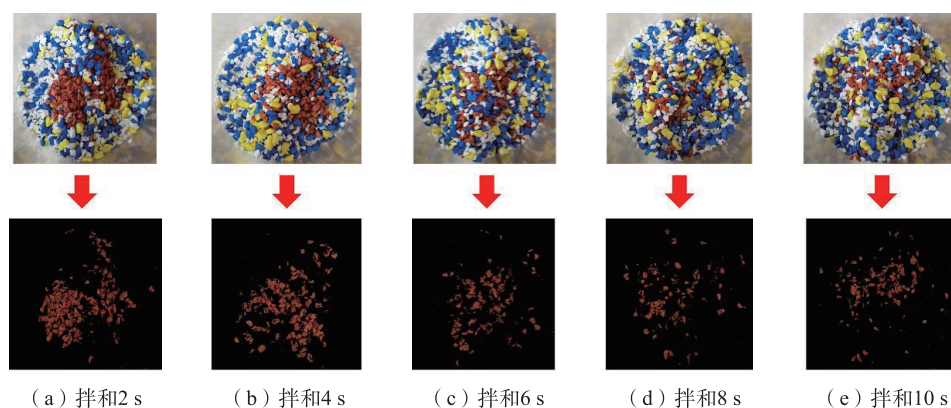


图8 旧料颗粒二值化处理

Fig. 8 Binarization of old aggregate particle

3 实验结果与分析

3.1 不同拌和速度下旧料结团破碎拌和均匀性演变模拟结果分析

利用前文提出的均匀程度评价指标分散系数 C ,绘制5, 10, 15, 20 r/min 4种不同拌和速度下,旧料结团拌和过程中 C 的变化曲线并对其进行拟合分析,其结果如图9所示。

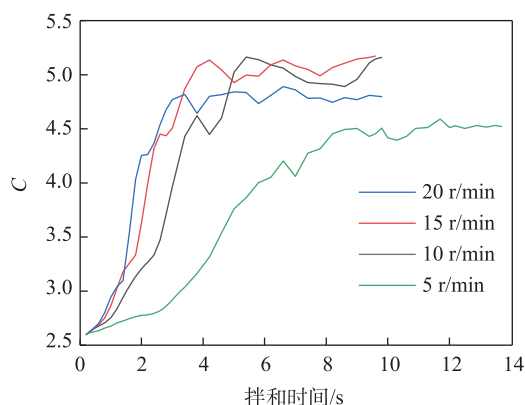
从图9中可以看出,在不同的拌和速度下,旧料结团 C 值的变化趋势基本相同,在拌和初期,4种拌和速度条件下的 C 值均快速上升,并在某一时刻

(即拐点)后,曲线的走势趋于平缓。说明在RAP的拌和过程中,旧料结团破碎存在一个从快速到缓慢的过程。

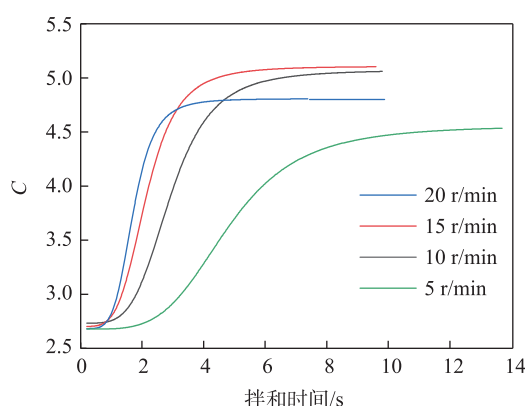
对图9中拟合曲线进行二阶求导,得出不同拌和速度下旧料结团分散系数变化拟合曲线的拐点时间如表5所示。

由表5可以得出,拌和速度越大,旧料结团分散系数拟合曲线的拐点时间越早,结团越快达到分散的平衡状态。建立拌和速度倒数与拐点时间之间的关系如图10所示。

由图10可知,拌和速度的倒数与结团分散系数



(a) 旧料结团分散系数变化图



(b) 旧料结团分散系数拟合曲线变化图

图9 不同拌和速度下旧料结团分散系数变化及拟合曲线图
Fig. 9 Variation diagram of dispersion factor of old aggregate agglomeration at different mixing speeds and fitting curve

表5 不同拌和速度下旧料结团分散系数拟合曲线拐点时间
Tab.5 Inflection time of old aggregate agglomeration dispersion factor fitting curves at different mixing speeds

拌和速度/(r/min)	5	10	15	20
拐点时间/s	10.92	6.69	5.48	4.12

拟合曲线拐点出现时间呈线性增长关系,其线性拟合的拟合优度为0.987 98,拟合效果很好,计算式如下

$$t_0 = 2.26 + \frac{43.57}{v} \quad (8)$$

式中: t_0 为结团分散系数变化曲线的拐点出现时间; v 为拌和速度。

3.2 旧料结团破碎内部机理分析

为进一步分析结团破碎的内部机理,如图11所示,将不同位置的旧料结团标记不同颜色和ID号进行分组。以搅拌叶片的旋转中心作为坐标原点,选取同一极轴方向上不同极径的结团进行破碎程度

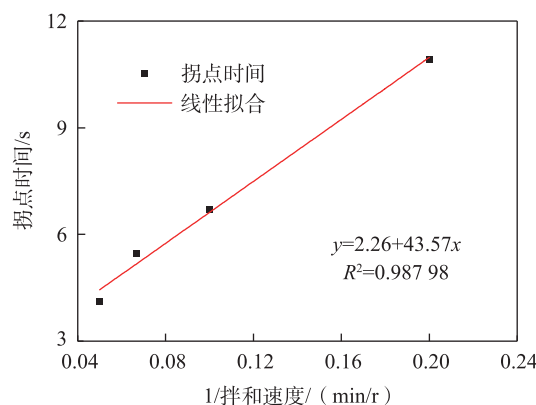


图10 结团分散系数拟合曲线拐点时间与拌和速度倒数变化关系图

Fig. 10 The change relationship diagram of agglomeration dispersion factor fitting curve inflection time and mixing speed inverse

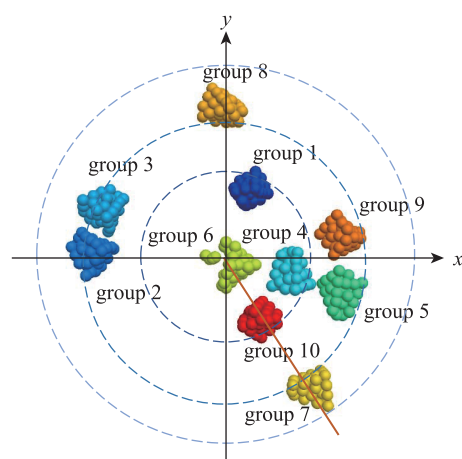


图11 旧料结团分组图

Fig. 11 Old aggregate agglomeration grouping chart

分析,例如group 6、group 10、group 7。

以15 r/min的拌和速度为例,绘制结团group 6、group 10、group 7的变化图如图12所示。由于在15 r/min拌和速度下,旧料结团分散系数在5 s左右出现拐点,此时大结团已经基本破碎,故仅在拌和5 s内进行分析。

由图12(a)可知,在拌和0~2 s内,三组结团的速度均呈现先增大后减小的趋势并在2 s左右达到峰值,group 7速度变化程度最大,group 6速度变化程度最小,说明在拌和2 s左右搅拌叶片转到所选结团极轴附近;由图12(b)中可知,三组结团随着拌和的进行对搅拌轴中心既有靠近又有远离;从图12(c)中可以看出,在拌和2 s过后,group 7和group 10

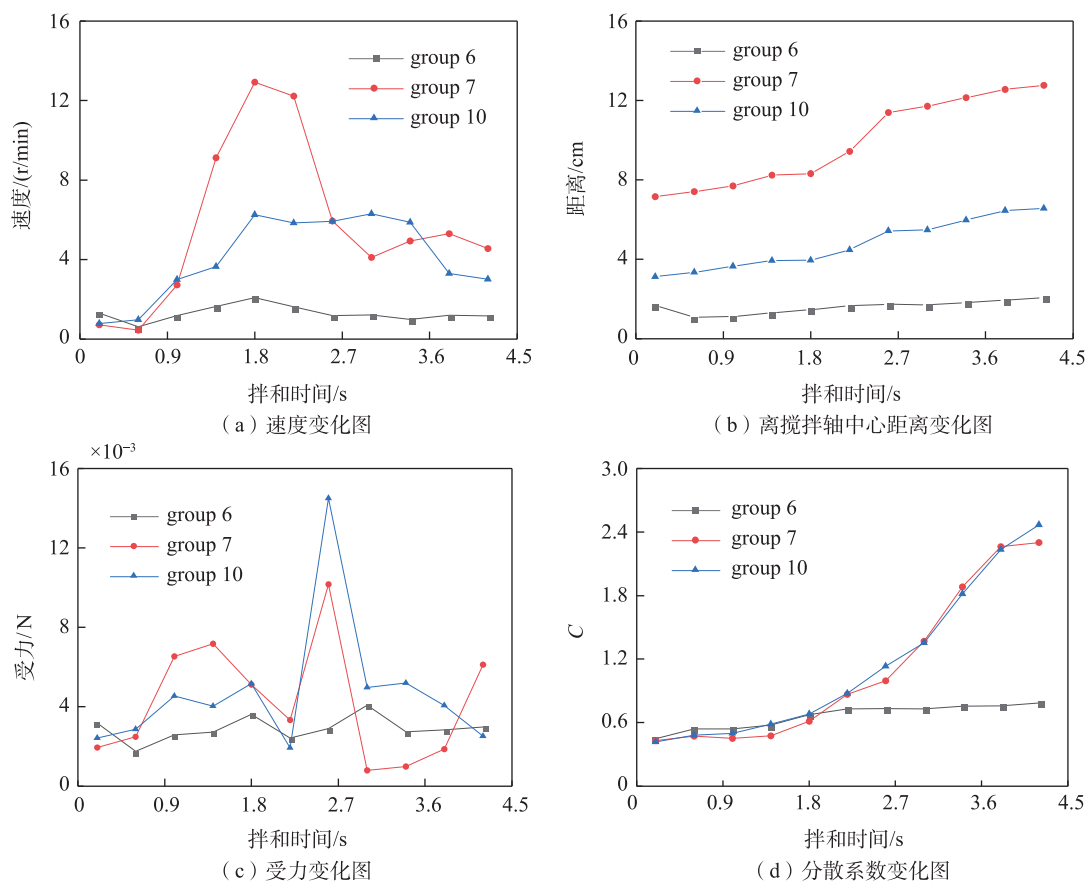


图12 结团group 6、group 7、group 10速度、距离搅拌轴中心距离、受力、分散系数变化图

Fig. 12 Variation diagram of agglomerate group 6, group 7, group 10 velocity, distance from the centre of the mixing shaft, force and agglomeration dispersion factor

受力变化存在一个明显峰值,而group 6的受力变化略显平稳,处在极轴外侧的group 7和group 10受力变化均大于处于内侧的group 6;由图12(d)中可知,在拌和0~2 s内,三者的 C 基本相同,在拌和2 s后,group 7和group 10的 C 变化速率增大,且分散系数明显高于group 6。

综上所述,在拌和初期(5 s内),结团的速度和受力在搅拌叶片的作用下呈现先增加后减小的变化趋势,并且越靠近外侧的结团变化趋势越明显。结团的位置在拌和过程中是不断变化的,在搅拌叶片尚未靠近结团时(0~2 s内),结团受到的外力不足以使结团破碎,其分散系数基本不变,直到搅拌叶片转动至结团极轴处(2 s后),在机械力的作用下,结团得到有效破碎,外侧结团相比内侧结团破碎程度更高,拌和更加均匀。

3.3 不同拌和速度下新旧料拌和均匀性演变模拟结果分析

RAP拌和均匀性的关键是在保证结团破碎的

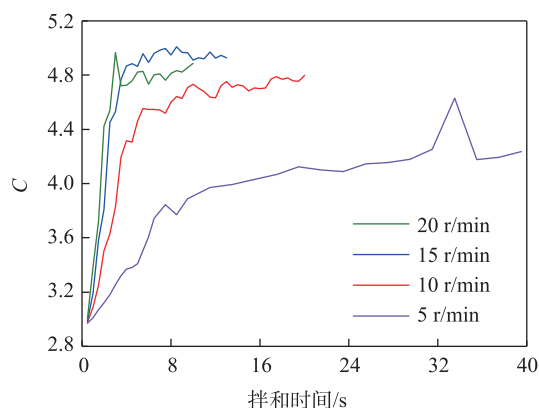
基础上达到新旧料的混合均匀。因此本研究将拌和模型中的旧料结团去除,假定结团已经完全破碎。

绘制5, 10, 15, 20 r/min 4种拌和速度下,新旧料拌和过程的分散系数变化图,并对其进行拟合分析,其结果如图13所示。

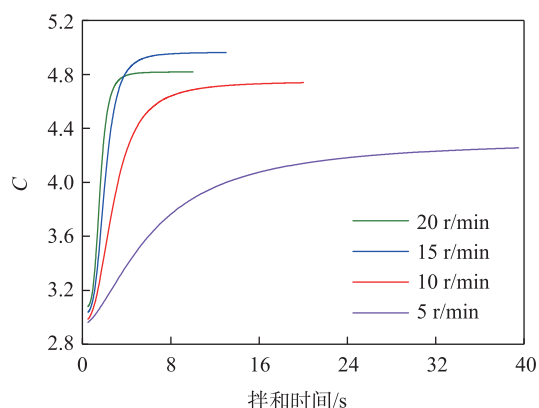
从图13中可以看出,4种拌和速度下的分散系数在拌和短时间内急剧增大,并在某一时刻(拐点)后,分散系数便增长缓慢。对图13中每条拟合曲线进行二阶求导,得出分散系数变化曲线的拐点时间如表6所示。

由表6可以看出拌和速度越大,新旧料分散系数变化曲线的拐点出现时间越早,新旧料混匀的效率就越高。建立拌和速度的倒数与拐点时间之间的关系如图14所示。

由图14可知,拌和速度的倒数与旧料分散系数拟合曲线拐点出现时间呈线性增长的关系,其线性拟合的拟合优度(R^2)为0.999 44,基本接近1。说明拟合曲线对几组数据点的拟合程度非常好,计算式



(a) 新旧料分散系数变化图



(b) 新旧料分散系数拟合曲线图

图13 不同拌和速度下新旧料分散系数变化及拟合曲线图
Fig. 13 Variation diagram of dispersion factor of old and new aggregate at different mixing speeds and fitting curve

表6 不同拌和速度下新旧料分散系数拟合曲线拐点时间
Tab.6 Inflection time of old and new aggregate dispersion factor fitting curve at different mixing speeds

拌和速度/(r/min)	5	10	15	20
拐点时间/s	17.05	8.74	5.66	4.26

如下

$$t_0 = 0.04 + \frac{85.29}{v} \quad (9)$$

3.4 基于3D打印技术的拌和均匀性演变实验结果对比分析

为验证RAP拌和仿真模型的合理性,绘制不同拌和速度下仿真模拟和室内实验的分散系数变化对比图如图15所示。

从图15中可以得出,在不同拌和速度下,室内实验和仿真模拟的均匀性变化略有不同,但在拌和0~4 s时,室内实验和仿真模拟的分散系数均快速增大。4 s过后,C逐渐平稳,即室内实验与仿真模拟均在4 s左右达到均匀程度变化的拐点,说明拌和

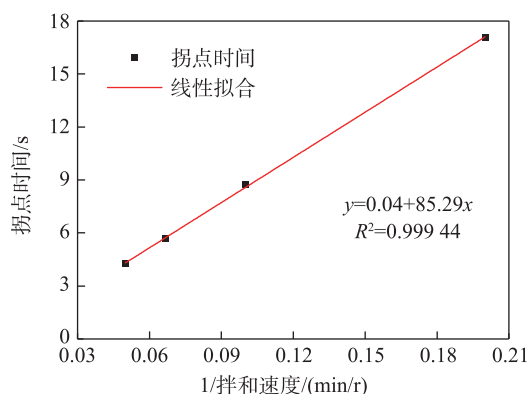


图14 新旧料分散系数拟合曲线拐点时间与拌和速度倒数变化关系图

Fig. 14 The change relationship diagram of old and new aggregate dispersion factor fitting curve inflection time and mixing speed inverse

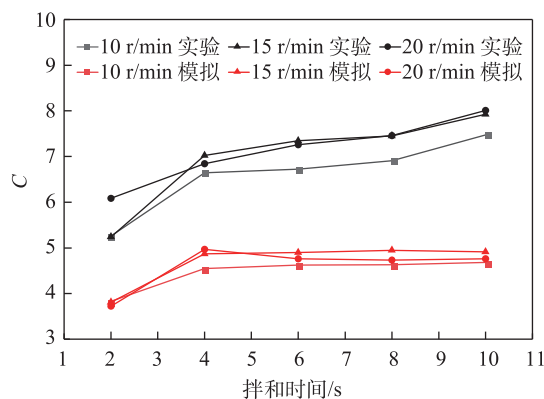


图15 室内实验与仿真模拟分散系数变化对比图
Fig. 15 Comparison of changes in dispersion factor between indoor experiment and simulation

模拟仿真的效果较好。

4 结论

1) 结团破碎存在一个从快速到缓慢的过程,拌和速度的倒数与旧料结团分散系数变化曲线拐点时间呈线性增长关系,即更高的拌和速度可以让旧料结团在更短的拌和时间内达到分散的平衡状态。

2) 在拌和初期,结团的速度和受力在搅拌叶片的作用下呈现先增加后减小的变化趋势,并且越靠近外侧的结团,变化趋势越明显。外侧结团相较于内侧结团破碎程度更高,拌和更加均匀。

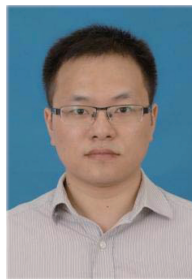
3) 拌和速度的倒数与新旧料分散系数变化曲线拐点时间呈线性增长关系,即拌和速度越大,拐点出现时间越早,新旧料混匀的效率就越高。

4) 不同拌和速度下室内实验与模拟实验的拌和均匀性变化略有不同,但二者均匀程度变化的拐点时间基本一致,模拟的效果较好。

参考文献:

- [1] DING Y J, HUANG B S, SHU X. Blending efficiency evaluation of plant asphalt mixtures using fluorescence microscopy[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 161: 461-467.
- [2] 杜晓博, 刘晓彤, 张宏超, 等. 团粒结构对再生沥青混合料路用性能的影响[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2020, 44(6): 1008-1012.
- DU X B, LIU X T, ZHANG H C, et al. Effect of agglomerate structure on road performance of recycled asphalt mixture[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2020, 44(6): 1008-1012.
- [3] YANG C, WU S P, CUI P D, et al. Performance characterization and enhancement mechanism of recycled asphalt mixtures involving high RAP content and steel slag[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 336: 130484.
- [4] 仰建岗, 姚玉权, 郭彧, 等. 就地热再生沥青混合料水稳定性非线性分析[J]. *华东交通大学学报*, 2019, 36(4): 48-56.
- YANG J G, YAO Y Q, GUO Y, et al. Nonlinear analysis of moisture stability of hot-in-place recycling asphalt mixture[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2019, 36(4): 48-56.
- [5] 郭鹏, 谢凤章, 孟建玮, 等. 沥青再生过程中新旧沥青界面混溶行为综述[J]. *材料导报*, 2020, 34(13): 13100-13108.
- GUO P, XIE F Z, MENG J W, et al. Review on the interface blending behavior of virgin asphalt and aged asphalt during asphalt reclaiming[J]. *Materials Reports*, 2020, 34(13): 13100-13108.
- [6] ANTUNES V, FREIRE A C, NEVES J. A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211: 453-469.
- [7] YANG J G, TAO W J, GAO J, et al. Measurement of particle agglomeration and aggregate breakdown of reclaimed asphalt pavement[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 296: 123681.
- [8] 马辉, 茅荃, 李宁. 沥青路面厂拌热再生 RAP 料掺量影响因素分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(9): 97-104.
- MA H, MAO Q, LI N. Influence factors of RAP content in plant-mixed hot recycling asphalt pavement[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*, 2020, 39(9): 97-104.
- [9] ZHU J Q, MA T, FANG Z Y. Characterization of agglomeration of reclaimed asphalt pavement for cold recycling[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 240: 117912.
- [10] 高磊, 林鹏. 厂拌热再生沥青混合料的最佳RAP掺量研究[J]. *华东交通大学学报*, 2018, 35(1): 103-108.
- GAO L, LIN P. Investigation of optimum RAP contents in hot recycled asphalt mixture[J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2018, 35(1): 103-108.
- [11] 吴建涛, 焦岩, 夏新全, 等. 基于筛分试验的热再生沥青混合料结团量化分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(3): 564-570.
- WU J T, JIAO Y, XIA X Q, et al. Analysis on cluster quantification in hot recycled asphalt mixtures based on sieve tests[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2022, 53(3): 564-570.
- [12] 田引安. 热再生沥青混合料精细化设计与路用性能研究[J]. *公路工程*, 2022, 47(1): 142-148.
- TIAN Y A. Study on delicacy design and pavement performance of hot recycled asphalt mixture[J]. *Highway Engineering*, 2022, 47(1): 142-148.
- [13] LI N, ZHAN H, LI H Z, et al. Investigation of recycled asphalt pavement materials treated by refined crushing and screening process: comparison with conventional methods[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2024, 36(2): 04023579.
- [14] 李雪连, 崔之靖, 吕新潮, 等. 就地热再生沥青混合料均匀性的细观评价指标[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(10): 254-264.
- LI X L, CUI Z J, LYU X C, et al. Mesoscale evaluation index for the homogeneity of hot in-place recycling asphalt mixture[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 254-264.
- [15] 郭德栋, 张圣涛, 李晋, 等. 厂拌热再生过程中旧矿料颗粒的迁移行为[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2018, 48(2): 46-52.
- GUO D D, ZHANG S T, LI J, et al. Migration behavior of reclaimed mineral aggregate in process of central plant hot recycling[J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2018, 48(2): 46-52.
- [16] 程培峰, 向银剑, 李炬辉, 等. RAP 粒径对热再生沥青混合料性能的影响研究[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(6): 81-86, 91.
- CHENG P F, XAING Y J, LI J H, et al. Influence of RAP particle size on the performance of hot recycled asphalt mixture[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*, 2020, 39(6): 81-86, 91.
- [17] 朱金龙, 王浩安, 吴建涛. 考虑颗粒结团的热再生沥青混合料均匀性评价[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2024, 48(1): 146-151.

- ZHU J L, WANG H A, WU J T. Homogeneity evaluation of hot recycled asphalt mixture considering particle agglomeration[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2024, 48(1): 146-151.
- [18] WU J T, LIU Q, WANG Y, et al. Effect of mixing time and temperature on the homogeneity of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement material[J]. Transportation Research Record, 2018, 2672(28): 167-177.
- [19] TANG W, LI N, ZHAN H, et al. Evaluation of aggregate dispersion uniformity of reclaimed asphalt mixtures using DIP technique[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(11): 04022290.
- [20] LIU Q, OESER M. The influence of mixing conditions on the macro-scale homogeneity of asphalt mixtures blended with reclaimed asphalt pavement (RAP)[J]. Materials, 2021, 14(15): 4137.
- [21] VASSAUX S, GAUDEFROY V, BOULANGÉ L, et al. Assessment of the binder blending in bituminous mixtures based on the development of an innovative sustainable infrared imaging methodology[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 215: 821-828.
- [22] 吴庭然, 李浩, 许建辉, 等. 再生沥青混合料复合骨架与细观力学性能的离散元分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2023, 47(6): 1152-1158.
- WU T R, LI H, XU J H, et al. Discrete element analysis of composite skeleton and fine mechanical properties of recycled asphalt mixtures[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2023, 47(6): 1152-1158.
- [23] ZHU X, YU H A, QIAN G P, et al. Evaluation of asphalt mixture micromechanical behavior evolution in the failure process based on discrete element method[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01773.
- [24] 李智, 王子硕, 吴文亮, 等. 离散元法中的集料三维数字模型构建[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2019, 46(11): 106-113.
- LI Z, WANG Z S, WU W L, et al. Construction of 3D digital model of aggregate in discrete element method[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2019, 46(11): 106-113.
- [25] ZHANG K, WEN H F, HOBBS A. Laboratory tests and numerical simulations of mixing superheated virgin aggregate with reclaimed asphalt pavement materials[J]. Transportation Research Record, 2015, 2506(1): 62-71.
- [26] 朱海彬, 朱涛, 张卫英, 等. 聚乳酸聚氨酯嵌段预聚体增韧 PLA/TPU 共混物[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 268-275.
- ZHU H B, ZHU T, ZHANG W Y, et al. Study on polylactic acid polyurethane block prepolymer toughened PLA/TPU blends[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2024, 52(3): 268-275.
- [27] 陈志明, 王泽凤, 马高琪, 等. 基于亚锡灭活及链端改性提高聚乳酸热稳定性的研究进展[J]. 化工学报, 2024, 75(3): 760-767.
- CHENG Z M, WANG Z F, MA G Q, et al. Research progress on improving thermal stability of polylactic acid based on stannous inactivation and chain end-group modification[J]. CIESC Journal, 2024, 75(3): 760-767.
- [28] 王渭萍, 刘俊, 孙洋, 等. 基于大型隧道围岩相似材料的配制方法研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(4): 30-35.
- WANG W P, LIU J, SUN Y, et al. Research on preparation method of similar materials for large tunnel surrounding rock[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(4): 30-35.
- [29] 蔡天瑜, 邓建国, 周元林, 等. NKC-9 催化 D4 开环聚合制备高粘度二甲基硅油[J]. 功能材料, 2018, 49(7): 7166-7169.
- CAI T Y, DENG J G, ZHOU Y L, et al. Preparation of high viscosity dimethicone with NKC-9 catalyzed D4 ring-opening polymerization[J]. Journal of Functional Materials, 2018, 49(7): 7166-7169.



第一作者: 吴建涛(1981—), 男, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为路面沥青材料环境耐久性及其再生。Email: jiantao.wu@hhu.edu.cn。



通信作者: 刘泉(1991—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为路面再生。E-mail: quan.liu@hhu.edu.cn。

(责任编辑: 姜红贵)