

搅拌均匀性的变化,以获得合理匹配的叶片参数,提高沥青混合料的搅拌质量.

1 搅拌叶片参数

1.1 双卧轴搅拌叶片参数

在双卧轴搅拌机中,搅拌叶片是以一定的数量和角度布置在两根同步反向旋转的搅拌轴上,主要叶片参数如图 1 所示.目前国内外双卧轴搅拌机的叶片排列方式和运动参数基本一致.搅拌机工作时,以 2.5~3.0 m/s 线速度转动的叶片,推动混合料在拌缸内形成水平和垂直两种大范围运动<sup>[14]</sup>.水平运动是通过叶片的轴向安装角将混合料沿着轴向水平推移.由于两轴上的叶片布置方向相反,从而形成了水平循环料流.垂直运动是叶片将拌缸底部混合料向上抛掷的过程中,混合料在两轴间互换并重力下落,从而形成垂直循环料流.由于搅拌过程的发展速度主要取决于料流运动,因此,能够改变混合料运动效果的叶片参数都会影响搅拌性能.



图 1 搅拌叶片参数  
Fig.1 Parameters of mixing blades

显然,加快混合料的循环运动频次和强度,能够增加混合料与搅拌叶片直接接触并发生强制作用的机会,对消除初始投料的不均匀性以及进一步的快速拌匀都极为有利,这也是合理选择叶片

参数的主要依据.在常用的叶片排列和速度下,本文重点研究单轴叶片总数量,单轴布置形式,返回叶片数量以及轴向安装角度的合理选取与匹配.

1.2 主要参数的分析

单轴叶片总数量为单搅拌轴上叶片的个数或者对数.在搅拌机容量和叶片几何尺寸一定时,单轴叶片总数量越多,搅拌轴向尺寸也就越大,从而形成不同的拌缸长度与宽度比值(长宽比).现有双卧轴搅拌机的叶片数量变化较大,从单轴 6 个(对)到 12 个(对)不等,相应的拌缸长宽比在 0.7~1.3<sup>[15]</sup>.单轴叶片布置为单搅拌轴上同一序号处的叶片布置.只有一个叶片为单置,两个以 180°布置的叶片为对置.返回叶片布置在每根搅拌轴混合料推动方向的末端,用来避免端部积料,并横推混合料以形成轴向循环,目前大多为 1 或 2 个(对).叶片的轴向安装角为搅拌叶片斜面与搅拌轴之间所夹的锐角,一般在 35°~55°<sup>[16]</sup>.

不难看出,减少单轴叶片总数量能够缩短轴向总尺寸,对置叶片能够使相邻叶片的轴向推料频次翻倍,增加返回叶片能够减少轴向推进距离,增大轴向安装角能够提高轴向推料量,从而都有助于增强混合料的水平循环.但从缸内运动来看,还需要兼顾混合料的垂直循环,而且应同时考虑参数间的匹配问题.过少的单轴叶片总数量,会增大拌缸的半径尺寸以保证缸内容量;对置叶片会造成缸内有效容积的降低,从而减小拌缸上部空间,减弱混合料的垂直运动.增加返回叶片数量,加大轴向安装角度,似乎都与较多的单轴叶片总数量更匹配.因此,即使采用相同的叶片排列,但随着单轴叶片总数量、单置布置形式、返回叶片数量以及轴向安装角度的变化,搅拌机内的水平和垂直循环运动都随之不同程度的改变,这必然对给定搅拌时间内的混合料搅拌均匀性产生显著影响.

2 仿真研究

2.1 模型与参数

在额定容量 4 000 kg 双卧轴搅拌机的基础上,采用 Pro/E 软件,建立搅拌机的三维模型.为提高仿真速度,搅拌机按比例缩小至 400 kg.在现有叶片参数的常用范围内,采用正交表  $L_9(3^4)$  来设计仿真方案,如表 1 所示.为了对比所研究的叶片参数,模型中的其他叶片参数都相同.其中,料流采用围流排列,单轴叶片为 90°的连续排列,双轴叶片为交错布置的双正排列,如图 2 所示.单轴

叶片总数量为 6、8、10 个(对)时,对应的拌缸长宽比分别为 0.7、0.95 和 1.2。

表 1 仿真方案的正交设计

Tab.1 Orthogonal design of simulation schemes

仿真方案	单轴叶片总数量/个(对)	单轴叶片布置	叶片安装角/(°)	返回叶片数量/个(对)
1	6	单置	35	1
2	8	单置	45	1
3	10	单置	55	2
4	8	单置	55	1
5	10	单置	35	1
6	6	单置	45	2
7	10 * 2	对置	45	1 * 2
8	6 * 2	对置	55	1 * 2
9	8 * 2	对置	35	2 * 2

注:对置叶片时,叶片的数量为对,表中采用“\* 2”表示。

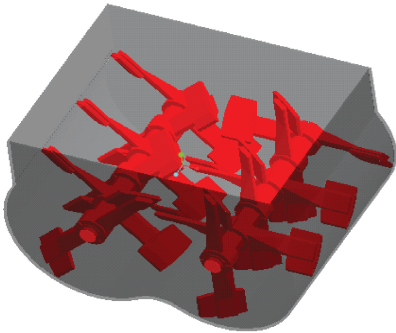


图 2 搅拌机模型(仿真方案 8)

Fig.2 Mixer model (simulation scheme 8)

由于计算机处理能力的限制,只仿真混合料中粒径大于某一尺寸的集料,粉料和沥青以胶泥的形式通过集料颗粒间的接触关系表示<sup>[17]</sup>。笔者采用 5 种简化的球形颗粒来模拟粒径的集料,并选择最小颗粒为 8 mm,同时根据搅拌设备实际生产时的筛网配置,确定集料 1~5 的球径分别为 32、26、20、14、8 mm。根据生产级配,设定  $m(\text{集料 } 1):m(\text{集料 } 2):m(\text{集料 } 3):m(\text{集料 } 4):m(\text{集料 } 5)=30:28:22:16:4$ 。根据工地实验室的数据,得到集料的密度,并参考文献[17-18],确定仿真材料的物理属性和接触属性,如表 2 和表 3。

由于 EDEM 中无法加入粉料和沥青,仿真过程的前 5 s 采用 Hertz-Mindlin (no slip) 模型,6 s 之后采用 Hertz-Mindlin with JKR 模型来增加材料间的粘结力,并设定 JKR 表面能为 60 J/m<sup>2</sup><sup>[19]</sup>,搅拌总时间为 26 s,搅拌轴转速为 45 r/min,拌缸

表 2 材料物理属性

Tab.2 Physical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )
钢	0.30	70	7 850
集料 1~3	0.25	23	2 692
集料 4	0.25	23	2 679
集料 5	0.25	12	2 759

表 3 材料接触属性

Tab.3 Contact properties of materials

材料 1	材料 2	恢复系数	静摩擦系数	动摩擦系数
	钢	0.10	0.60	0.24
集料	集料 1~3	0.06	0.80	0.32
1~3	集料 4	0.06	0.70	0.28
	集料 5	0.04	0.75	0.30
	钢	0.10	0.50	0.20
集料 4	集料 4	0.06	0.70	0.28
	集料 5	0.04	0.65	0.26
集料 5	钢	0.05	0.40	0.20
	集料 5	0.02	0.60	0.28

充盈率(投料体积与拌缸有效容积之比)为 45%。

## 2.2 仿真结果与分析

采用拌缸内不同位置混合料中某种成份含量的变异系数,来评价搅拌均匀性。考虑到颗粒数量越多,越有利于统计的准确性,因此,采用最小粒径的集料 5 进行分析。对搅拌机模型划分大小相同的网格,得到不同的取样位置。根据 GB/T 17808—2010 规定<sup>[20]</sup>,评价成品料搅拌均匀性的每份取样质量应为 2 kg 左右。因此,以网格内能够容纳 2 kg 混合料来确定网格大小,得到网格边长约为 100 mm。网格划分如图 3。从全部集料投入拌缸开始,按照间隔 2 s,统计每个网格内的集料总数量和集料 5 数量,得到每个网格内的集料 5 的百分含量。计算所有的网格,得到该时刻集料 5 含量的变异系数。

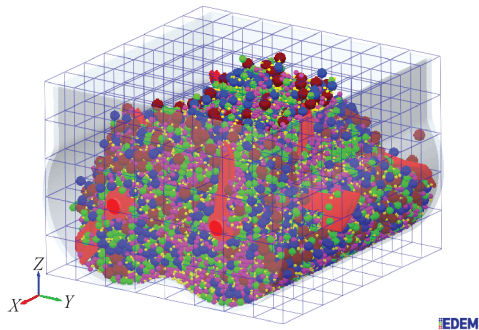


图 3 搅拌机的网格划分

Fig.3 Meshing of the mixer

由于 EDEM 网格是针对整个模型空间,实

际材料颗粒不可能遍及所有位置,因此必须选定合理的统计网格以保证结果准确.以表 1 的仿真方案 8 为例,按照仿真后网格内的颗粒总数,分别统计总网格数量的 30%~80%,得到 8 mm 粒径集料(集料 5)含量变异系数随搅拌时间的变化曲线如图 4.统计的网格数量超过 80%时,会出现部分网格内颗粒数为 0 而计算出错.由图 4 可见,统计的网格数量越少,数据的相关性越好,但数据间的差异性降低,表现为变异系数随搅拌时间的变化越来越平缓,从而不利于分析搅拌时间的影响.选择网格统计数量为 60%,不同仿真方案的结果如图 5.此时相关系数为 0.80~0.89,显著性良好.

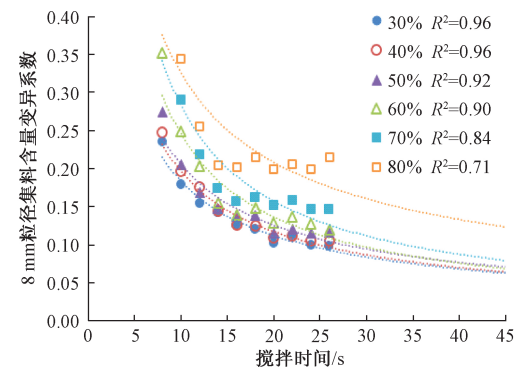


图 4 不同统计网格数量时的仿真方案 8 结果

Fig.4 Result of simulation scheme 8 from different amount of mesh

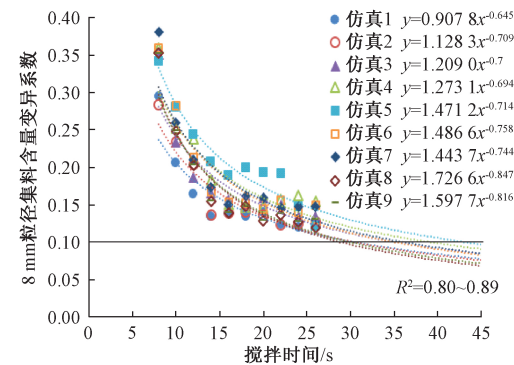


图 5 8 mm 粒径集料含量变异系数与搅拌时间的关系

Fig.5 Relationship between variation coefficient of 8 mm-diameter aggregate content and mixing time

由图 5 不难看出,随着搅拌时间延长,所有仿真方案的变异系数下降,并且呈负幂函数关系.搅拌开始时,变异系数下降迅速,均匀性提高很快;搅拌后期的曲线则较为平缓,表明均匀性趋于稳定.根据仿真趋势,选取 8 mm 粒径集料含量变异系数 0.1 为搅拌均匀性的目标值,并由拟合公式得到仿真方案 1~9 所需的搅拌时间分别为 29.61、30.51、35.18、39.09、43.19、35.19、36.18、

28.89、29.85 s,系数  $R^2$  分别为 0.80、0.86、0.85、0.80、0.89、0.84、0.84、0.89、0.87.相应的极差分析见表 4.表 4 中,  $K_i$  为影响因素水平为  $i$  的搅拌时间之和;  $k_i$  为影响因素水平为  $i$  的搅拌时间均值.

表 4 均匀搅拌时间的正交极差分析				
Tab.4 Orthogonal range analysis of mixing time				
分析参数	单轴叶片总数量/个(对)	单轴叶片布置	叶片安装角/(°)	返回叶片数量/个(对)
$K_1$	93.69	212.77	102.65	207.47
$K_2$	99.45	94.92	101.88	100.22
$K_3$	114.55	—	103.16	—
$k_1$	31.23	35.46	34.22	34.58
$k_2$	33.15	31.64	33.96	33.41
$k_3$	38.18	—	34.39	—
极差	6.95	3.82	0.43	1.17

由仿真结果可知,对于不同的叶片参数,集料 5 达到要求均匀度所需的搅拌时间不一样.虽然叶片参数都在常见的范围内,但搅拌时间在 29~43 s 间变化,最大时间相差 33%,这也表明叶片参数合理匹配的重要性.从表 4 的极差来看,单轴叶片总数量的影响最大,其次是单轴叶片布置和返回叶片数量,叶片安装角的影响最小.从均值  $k_i$  来看,不同参数的取值规律有所不同.其中,单轴叶片总数量的取值越小,达到目标均匀性所需的搅拌时间越短,表明在搅拌机容量和叶片几何尺寸不变的条件下,通过减少单轴叶片总数量,使拌缸长宽比小于 1 时,改善搅拌均匀性的效果最显著.在此基础上,与之相匹配的其他参数为:叶片对置、轴向安装角 45°、返回叶片数量 2 对.

### 3 试验验证

选择 3 个厂家的 4000 型搅拌机进行试验验证.搅拌机的叶片结构如图 6 所示,叶片参数见表 5.其中 A 搅拌机完全采用了仿真结果.试验采用相同的搅拌时间,拌缸充盈率和投料顺序.根据实际生产条件,选取 32 s 和 37 s 两种搅拌时间.充盈率采用额定值,即每批次搅拌 4 000 kg.投料顺序依次为粗、细集料;粉料和沥青.A、B 和 C 搅拌机生产的混合料分别为 ATB-25、SUP-25 和 AC-20,对应的沥青含量分别为 3.47%、3.75%和 4.12%.

搅拌完成后,由人工从接料装载机铲斗内料堆的不同位置处取样 12 个,分别计算不同试样间的沥青含量变异系数和 0.075 mm 粉料筛分通过率变异系数,如表 6 所示.由表 6 不难看出,A 搅

表 5 不同搅拌机的叶片参数  
Tab.5 Blades parameters of different mixers

叶片参数		A 搅拌机	B 搅拌机	C 搅拌机
几何参数	排列方式	90°相位,连续双正排列	90°相位,连续双正排列	135°相位,非连续双正排列
	轴向安装角/(°)	45	45	45
	单轴叶片	对置,7 对	单置,10 个	单置,11 个
数量参数	拌缸长宽比	0.9	1.0	1.2
	返回叶片	2 对	1 个	1 对
运动参数	叶片线速度/(m·s <sup>-1</sup> )	2.67	2.86	2.54

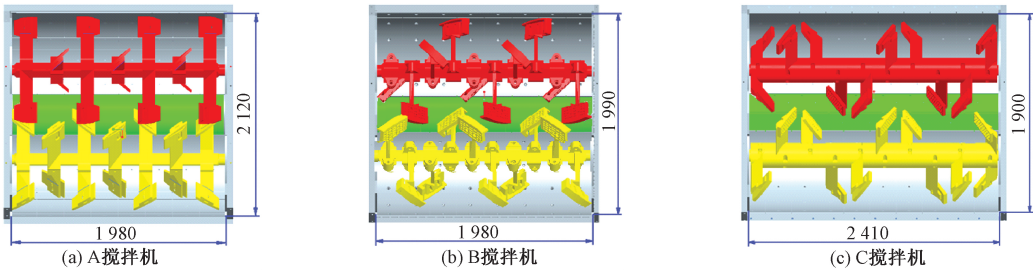


图 6 搅拌机叶片结构示意图 (单位:mm)

Fig.6 Blades sturcture of different mixers (units:mm)

表 6 不同搅拌机的对比试验结果

Tab.6 Test results of different mixers

搅拌机	搅拌时间/s	沥青含量 均值/%	变异 系数 1	0.075 mm 粉料筛分 通过率/%	变异 系数 2
A	32	3.50	0.059	3.96	0.064
	37	3.39	0.049	3.28	0.051
B	32	3.57	0.086	3.51	0.097
	37	3.68	0.064	3.62	0.080
C	32	4.15	0.105	4.38	0.102
	37	4.04	0.073	4.48	0.082

搅拌机采用数量最少的对置式单轴叶片,拌缸长宽比小于 1,使得相同搅拌时间内的混合料均匀性最好,表现为沥青含量和粉料筛分通过率的变异系数都最小,并且搅拌时间越短差距越明显.虽然 B、C 搅拌机都采用单置叶片,但 C 搅拌机的均匀性却最差.主要原因在于其单轴叶片总数量最多,致使拌缸长宽比达到了 1.2,从而减弱了混合料的轴向循环.此外,单轴相邻叶片相位偏大(135°),搅拌线速度偏低(2.54 m/s),也都不利于机内混合料的循环运动,导致搅拌质量的下降.

4 结论

(1) 尽可能地加快混合料在搅拌机拌缸内大范围循环运动的强度和频次,有利于提高搅拌均匀性,这是合理选择与匹配搅拌叶片参数的主要依据.

(2) 随着搅拌时间的延长,不同叶片参数匹

配下的 8 mm 粒径集料含量变异系数都下降,并且符合负幂函数规律.当以变异系数 0.1 为目标均匀度时,各叶片参数所需要的搅拌时间约为 29~43 s,时间最大相差 33%.

(3) 不同叶片参数对搅拌均匀性的影响程度:单轴叶片总数量>单轴叶片布置>返回叶片数量>叶片安装角.在搅拌机容量和叶片几何尺寸不变的条件下,通过减少单轴叶片总数量,使拌缸长宽比小于 1,对改善搅拌均匀性的效果最显著;在此基础上,与之相匹配的其他参数为:叶片对置,轴向安装角 45°,返回叶片数量 2 对.

参考文献:

[1] 陈启宗.连续式搅拌设备与间歇式搅拌设备的性能比较[J].同济大学学报,2001,29(9): 1101-1104.

[2] 谢立扬,赵利军,姚运仕,等.搅拌过程中沥青混合料的离析[J].长安大学学报(自然科学版), 2009, 29(5):116-121.

[3] 刘洪海,徐中富.影响沥青混合料质量的因素及其控制措施[J].筑路机械与施工机械化,1999,16: 27-29.

[4] American Association of State Highway and Transportation Officials, Federal Aviation Administration, Federal Highway Administration, et al. Hot-mix asphalt paving handbook 2000[M]. Washington D C: Trans portation, 2000.

[5] 陈渊召,李振霞.基于离散元法的橡胶颗粒沥青混合料细观结构分析[J].哈尔滨工业大学学报, 2013,4(4):116-121.



- [6] 石立万,王瑞宜,徐驰,等.基于离散元法的沥青混合料骨架细观性能研究[J].华南理工大学学报(自然科学版),2015,43(10):50-56.
- [7] 苏沛.基于离散元法的沥青混合料真空压实特性研究[D].西安:长安大学工程机械学院,2015.
- [8] 杨龙飞.基于 DEM 的沥青混合料振动筛分效率估算与试验研究[D].西安:长安大学工程机械学院,2015.
- [9] 张晨光,焦生杰,谢立扬,等.沥青搅拌设备烘干筒料帘密度建模及仿真[J].华中科技大学学报(自然科学版),2017,45(5):55-60.
- [10] SIMONS T A H, BENSMANN S, ZIGAN S, et al. Characterization of granular mixing in a helical ribbon blade blender[J]. Powder technology, 2016, 293: 15-25.
- [11] SAKAI M, SHIGETO Y, BASINSKAS G, et al. Discrete element simulation for the evaluation of solid mixing in an industrial blender [J]. Chemical engineering journal, 2015, 279: 821-839.
- [12] 纪云,刘送永.混凝土搅拌机搅拌性能的离散元分析[J].施工技术,2016,45(1/2):144-146.
- [13] 栗培龙,饶文字,冯振刚,等.沥青混合料动态响应的试验条件影响及其主曲线研究[J].郑州大学学报(工学版),2016,37(5):1-5.
- [14] KEMMANN C. What twin-shaft mixing can do for you [J]. Concrete producer, 2004, 22(10):47-50.
- [15] 冯忠绪,姚运仕,赵利军,等.搅拌机长宽比的确定方法[J].中国工程机械学报, 2004, 2(3):300-303.
- [16] 赵利军,冯忠绪,姚运仕,等.搅拌机叶片安装角的确定方法[J].长安大学学报(自然科学版),2006, 26(5):99-102.
- [17] CHEN J S. Discrete element method (DEM) analyses for hot-mix asphalt (HMA) mixture compaction[D]. Knoxville, Tennessee, USA: Department of civil and environmental engineering, University of Tennessee, 2011.
- [18] 孙学增,李士斌,张立刚.岩石力学基础与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2011.
- [19] 张新勇.基于 EDEM 方法的稳定土搅拌器搅拌过程模拟[D].西安:长安大学工程机械学院,2015.
- [20] 中国机械工业联合会. 道路施工与养护机械设备沥青混合料搅拌设备:GB/T 17808—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.

Parameters Matching of Mixing Blades for Asphalt Mixture Mixer Based on EDEM

ZHAO Lijun<sup>1</sup>, SHEN Yan<sup>1</sup>, DENG Xin<sup>1</sup>, LIU Benxue<sup>2</sup>, DONG Wu<sup>1</sup>, LI Yao<sup>1</sup>

(1.Key Laboratory of Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** In order to improve mixing uniformity of twin-shaft mixer, the EDEM software based on discrete element method was used to simulate the mixing process of asphalt mixture with different mixing blade parameters. The matching relationship of total number of single shaft blades, blade arrangement on single shaft, shaft angle of the blade, and the number of reversing blade were determined by orthogonal analysis of the mixing time required to reach given uniformity of variation coefficient of 8 mm-diameter aggregate content from different location in the same batch, The test verification was conducted. The results showed that the variation coefficient of 8mm-diameter aggregate content with different mixing parameters was decreased with increase of mixing time, and the relationship between them was a negative power function. When the variation coefficient of given uniformity was 0.1, the effect of total number of single shaft blades on mixing time required was the most significant, blade arrangement on the single shaft and number of reversing blade were the second, the shaft angle of blade was the least. The reasonable matching of these parameters were, the total number of single shaft blades that could meet the condition of the mixer's length-width ratio less than 1, the blades arranged symmetrically on both sides of one shaft, the shaft angle is 45°, the reversing blade number is 2.

**Key words:** mixing blades; discrete element simulation; asphalt mixture; mixing uniformity; twin-shaft mixer