

文章编号:1671-8879(2009)05-0116-06

搅拌过程中沥青混合料的离析

谢立扬,赵利军,姚运仕,左文军

(长安大学 道路施工技术与装备教育部重点实验室,陕西 西安 710064)

摘要:为了提高沥青混合料的搅拌均匀性,采用理论分析与试验相结合的方法,分析了搅拌缸几何参数、粉料和沥青撒布方式以及热料仓集料变异对沥青混合料离析的影响,提出了控制搅拌过程中沥青混合料离析的合理措施。研究表明:合理的搅拌缸几何参数应能保证缸内混合料良好的对流循环运动;沿搅拌轴纵向布置的粉料和沥青撒布方式优于在搅拌缸端部布置方式,应在结构允许条件下优先采用;热料仓进仓比例和振动筛筛孔尺寸应根据冷骨料级配进行合理选择。

关键词:机械工程;沥青混合料;强制搅拌设备;搅拌;离析

中图分类号:U415.522 **文献标志码:**A

Segregation of asphalt mixture in mixing process

XIE Li-yang, ZHAO Li-jun, YAO Yun-shi, ZUO Wen-jun

(Key Laboratory for Highway Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve mixing uniformity of asphalt mixture, a method of theoretical analysis and test was used to analyze the effects of geometric parameters of the mixer, delivery modes of power and asphalt, aggregate variation in hot aggregate tank on the segregation of asphalt mixture. Reasonable measures of controlling segregation in the mixing process were put forward. The results indicate that, the reasonable geometric parameters of the mixer should ensure ad-equate circulation flow of the mixture in the mixer; the longitudinal arrangement of power and asphalt delivery is superior to the arrangement at the end of mixer, so it should be firstly used under the optimization of structure; the delivery proportion of aggregate in hot aggregate tank and sieve size of vibrating screen should be properly selected according to the gradation of cold aggregate. 4 tabs, 10 figs, 9 refs.

Key words: mechanical engineering; asphalt mixture; batch type asphalt mixing equipment; mixing; segregation

0 引言

沥青混合料产生离析的原因有很多种^[1-5],在搅拌、运输、摊铺和压实等过程中都可能产生离析现

象。混合料产生离析后,沥青含量(质量分数)不均匀,或在同一区域内粗细集料不均匀分散,使级配组成和沥青含量偏离了设计值。沥青混合料离析的出现,使路面空隙率加大,混合料劲度模量降低,使路

收稿日期:2008-10-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50678062)

作者简介:谢立扬(1963-),男,新疆奎屯人,高级工程师,工学硕士,E-mail:gcjxcszx@chd.edu.cn.

面出现早期损坏。按照公路施工规范要求^[6-8],沥青混合料沥青含量偏差应小于 $\pm 0.3\%$,矿料级配的允许偏差小于 0.075 mm 颗粒为 $\pm 2\%$;小于 2.36 mm 颗粒为 $\pm 6\%$;小于 4.75 mm 颗粒为 $\pm 7\%$ 。但此允许偏差范围较大,在一些高速公路施工中,提出了比公路施工规范更为严格的指标。

过去,人们认为混合料拌合过程中产生离析的主要原因是沥青、粉料和骨料计量系统误差较大造成的。目前,沥青搅拌设备计量系统性能已大大提高,计量系统在信号的采集、处理方式的改进,传感器精度、稳定性的提高,沥青 2 次计量、骨料飞料补偿及大小门技术的应用,使计量误差对混合料离析的影响已大大降低。因此,沥青混合料在搅拌过程中产生离析的原因可分为生产工艺参数和结构参数两部分的影响。工艺参数的影响主要有混合料的干拌时间、湿拌时间,沥青、热骨料拌和时的温度,原材料、冷料级配的变异等;结构参数的影响主要有沥青、粉料撒布管的结构,搅拌缸的结构形式,振动筛及热料仓的结构等。在这些影响因素中,搅拌缸几何参数、粉料、沥青撒布管的布置形式及相对位置和热料仓集料变异对混合料离析的影响较大。为此,本文对搅拌过程中的沥青混合料离析进行了研究。

1 搅拌缸几何参数

在搅拌缸中,集料按不同粒度($0.075\sim 31\text{ mm}$)规格依次称量投放,粉料与热骨料经过 $2\sim 3\text{ s}$ 的干拌,加入沥青,再经过 $20\sim 60\text{ s}$ 的拌和时间,拌和出符合生产级配、温度的沥青混合料,其搅拌缸工作原理如图 1 所示。

第 1 根轴上的叶片将混合料自搅拌缸一端推向



图 1 搅拌缸工作原理

另一端,在那里则由一对反向叶片将矿料自该端反向推回,并移向另一根轴。第 2 根轴上的叶片则将混合料作反方向推移,到该轴端部同样被反向安装的叶片挡回,又移向第 1 根轴。这样混合料形成了一个封闭的对流运动,如图 1 所示的循环流动,在搅拌缸中 2 根轴上的相邻叶片会同时使混合料沿不同的方向移动,这种配合着混合料的扩散和剪切运动,就形成了一个小循环圈,从而使混合料各组分快速搅拌。

在这 3 种运动中,对流运动是一种主要运动,扩散运动和剪切运动则是为了将混合料拌透。以搅拌缸一端的两搅拌轴的中心为坐标原点,建立空间坐标系 $Oxyz$,工作腔容积为 Ω ,工作腔内混合料横断面为 D^* ,在混合料搅拌和移动过程中,在混合料内任意容积的某组分体积分数 W 是随时间 t 变化的,可用方程描述为^[9]

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -v \frac{\partial W}{\partial x} + b_p \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + b_v \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

式中: v 为物料沿 x 轴方向的平均移动速度; b_p 、 b_v 分别为纵向和横向搅拌系数,其值取决于工作机构的运动特性、结构特性和混合料的结构流变特性,当利用相似理论和试验确定其大小时,取其沿 x 轴与横断面的平均值。

式(1)的初始及边界条件为

$$\left. \begin{aligned} W|_{t=0} &= f(x, y, z) \\ W|_{x=0} &= \varphi(y, z, t) \\ \frac{\partial W}{\partial r}|_{r=R} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: r 为 D^* 上某处的矢径值,在搅拌缸内壁 $r=R$ 处,物料混合均匀度为 0, R 为搅拌缸内壁半径。

方程的解为

$$W(x, y, z) = W_0 - B_1^0 e^{a_2 x} \varphi(y, z) \quad (3)$$

式中: W_0 为理想均匀度; B_1^0 为由函数 $\varphi(y, z)$ 确定的常数; a_2 为经验系数。

实际上,不可能准确地确定函数 $W(x, y, z)$ 的形式,对工程应用来说也没必要这样做。通过试验研究,可准确地确定混合料某组分与加料口距离为 x 的不均匀系数 V_x^* 或其含量的均方根偏差 S_x 。 S_x 与 $W(x, y, z)$ 的关系为

$$S_x^2 = \frac{1}{D^*} \iint [W(x, y, z) - W_0]^2 dydz \quad (4)$$

用标准差 S_x 表示的离异性缺点是没有把试样含量(质量分数)的影响包括进去,当某组分在 2 种混合物中含量悬殊时,标准差不足以阐明混合程度

的影响;当样本数量有限时,用样本标准差 σ 与样本平均值 \bar{X} 的比值,即离散系数 C_V 能比较确切地反映粉料、沥青在搅拌中的混合程度,计算式为

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{X}} \times 100\% \quad (5)$$

$$M = 100 - C_V \quad (6)$$

式中: M 为混合均匀度(%)。

一个实际的混合过程可用 σ 表示的混合度随时间 t 变化的曲线来描述。如图 2 所示,其中 σ_0 为浓度设定值。整条曲线可分成 3 个区间,各个区间有不同的混合机理。混合初期,主要受对流混合支配;混合中期,是对流和剪切进行恒速混合;混合后期则以扩散为主。在混合过程中,总是存在 2 种过程,即混合与反混合,混合状态是这 2 种相反过程之间建立起来的平衡。

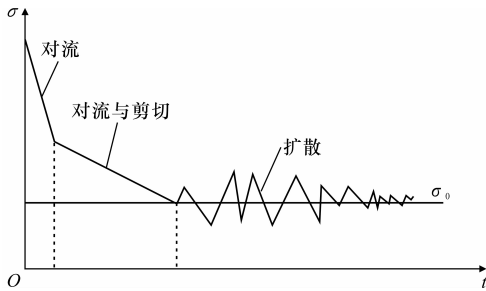


图 2 混合特性曲线

混合过程中发生的对流、剪切和扩散 3 种混合机理,不可能在各自的区间独立起作用,而是随混合过程同时出现的。

对于搅拌缸的对流运动,搅拌臂及其叶片的排列对它的影响较大。单轴搅拌臂排列有正排列和反排列 2 种形式。当逆着混合料流动方向看,搅拌臂排列的相位方向与搅拌轴转向相同时就是正排列;相反的情况则是反排列。由于叶片对物料连续递推作用,正排列叶片要比反排列叶片推搅得快,物料的轴向流动次数也多。目前广泛使用的强制式搅拌主机,有水平安置的 2 根搅拌轴,且相向转动。显然,当双轴搅拌臂为正反排列时,物料沿轴向在搅拌臂为正排列的轴上推搅得快,而在反排列的轴上推搅得慢。由于物料在搅拌缸内沿轴向是一个闭合的“大循环”运动,当物料被推搅到搅拌臂为反排列的这根轴上时,因料流变慢,会出现物料堵塞现象,这必然导致整个大循环的物料运动不流畅。当双轴搅拌臂为正正或反反组合排列时,由于物料在 2 根轴上的流动相同,不会出现正反排列时的物料堆积情况。但是双反排列与双正排列相比,物料的循环次数要少,不利于快速均匀的拌和。

在单相相位角 90° 、2 种不同叶片排列的搅拌缸中, I、II 为轴的序号,数字为拌臂序号 n ,如图 3 所示。4000 型沥青搅拌设备的转速为 51 r/min,叶片数目为 10 个。对于 I 轴,物料由叶片 1 推到叶片 10;对于 II 轴,物料由叶片 10 推到叶片 1。图 4 为 2000 型沥青搅拌设备,转速为 53 r/min,叶片数目为 5 个,其中 I 轴的 5 叶片和 II 轴的 1 叶片都为对置叶片。对于 I 轴,物料由叶片 1 推到叶片 5;对于 II 轴,物料由叶片 5 推到叶片 1。

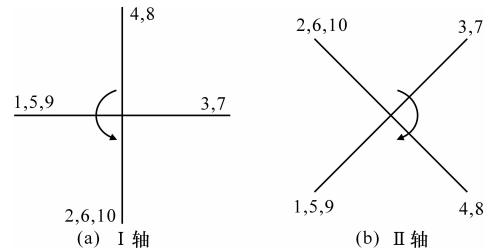


图 3 4000 型沥青搅拌设备叶片的排列

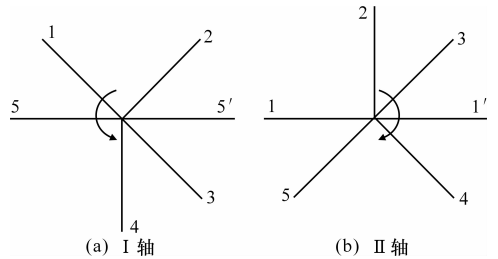


图 4 2000 型沥青搅拌设备叶片的排列

由图 3 可看出, I 轴为反排列, II 轴为正排列布置。显然,搅拌轴旋转时,两轴上叶片到达中央搅拌区存在先后,即有相位差。由图 3 中相位关系可知, $\varphi_{I_n-II_{n+1}}$ 为 135° , 而 $\varphi_{II_n-I_{n-1}}$ 的相位差为 225° ($\varphi_{I_n-II_{n+1}}$ 为 I 轴上第 n 个叶片与 II 轴上第 $n+1$ 个叶片的相位差,其他同理)。

由图 4 可看出, I 轴为正排列, II 轴为正排列布置。搅拌轴旋转时,两轴上叶片到达中央搅拌区的相位差为

$$\begin{aligned} \varphi_{I_1-II_2} &= 45^\circ, \varphi_{I_2-II_3} = 270^\circ, \varphi_{I_3-II_4} = 90^\circ, \\ \varphi_{I_4-II_5} &= 315^\circ; \varphi_{II_2-I_1} = 315^\circ, \varphi_{II_3-I_2} = 90^\circ, \\ \varphi_{II_4-I_3} &= 270^\circ, \varphi_{II_5-I_4} = 45^\circ. \end{aligned}$$

$\varphi_{I_n-II_{n+1}}$ 或 $\varphi_{II_n-I_{n-1}}$ 到达中央搅拌区次序存在相位差。相位差太大,造成作用时间的延迟会减弱两轴间物料的碰撞作用;相位差太小,则意味着两搅拌臂几乎同时到达搅拌区。由于二者对物料推动的方向相反,因此会产生类似于一堵“墙”的作用,阻断了物料在搅拌缸内的循环运动,形成局部的“死循环”现象。显然,图 4 中的 $\varphi_{I_1-II_2}$ 和 $\varphi_{II_5-I_4}$ 的相位差较小,会破坏物料的循环流动,从而难以快速均匀

的拌和。

图 5 为 4000 型沥青含量的抽提筛分结果。沥青混合料 AC-13, 搅拌时间 45 s, 沥青含量设定值为 4.40%, 离散系数 2.7%, 混合均匀度达到 97.3%。

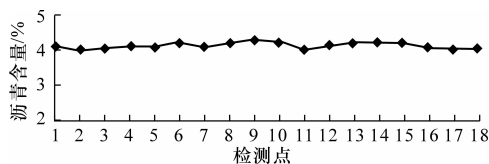


图 5 4000 型搅拌缸沥青含量的抽提结果

图 6 为 2000 型搅拌缸沥青含量的抽提结果。沥青混合料 AC-13, 搅拌时间 55 s, 沥青含量设定值为 5.3%。从图 6 可看出, 沥青含量(质量分数)的最小值为 4.42%, 最大值为 6.02%, 离散系数为 8.3%, 混合均匀度为 91.7%, 沥青混合料存在严重的离析现象。

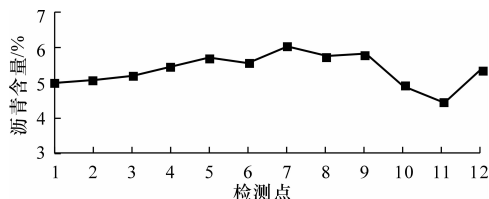


图 6 2000 型搅拌缸沥青含量的抽提结果

为分析混合料离析的原因, 分别在搅拌缸放料门两边各取 3 个成品料样进行试验, 试验结果见表 1。

表 1 搅拌缸两侧取样筛分抽提结果

项 目	下列筛孔(mm)的通过率/%									沥青含量/%	
	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075		
搅拌缸左侧	1	100	88.0	41.5	32.5	25.8	21.8	16.5	14.8	8.79	4.94
	2	100	87.8	41.6	31.2	24.5	20.8	16.1	14.5	8.54	4.99
	3	100	89.7	45.9	35.4	27.2	22.6	17.1	15.3	9.24	4.42
	平均	100	88.5	43.0	33.0	25.8	21.7	16.5	14.9	8.85	4.78
搅拌缸右侧	1	100	89.7	37.6	28.5	22.1	18.7	14.4	13.1	8.13	5.38
	2	100	92.9	38.2	28.6	22.3	18.9	14.7	13.2	8.06	5.31
	3	100	92.4	39.7	30.4	23.0	19.2	14.7	13.3	8.47	5.83
	平均	100	91.7	38.5	29.2	22.5	18.9	14.6	13.2	8.22	5.51

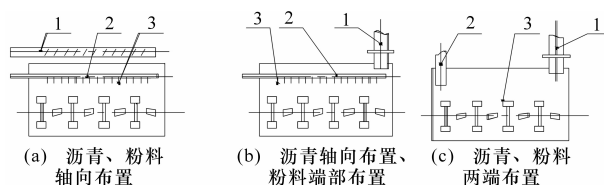
从表 1 可以看出, 左侧 3 个点的沥青含量均小于右侧; 而在级配组成中, 除 9.5 mm 筛孔孔径外, 其余筛孔筛分通过率左侧均高于右侧; 在 4.75、2.36、0.075 mm 这 3 个筛孔上, 分别相差 4.5%、3.8%、0.68%。这充分说明, 在搅拌过程中, 对流循环未充分进行, 搅拌缸中产生了 2 个区域, 造成了沥青混合料离析的出现。

对照 AC-13 级配中值线可以看出, 2.36、4.75 mm 这 2 种集料明显偏多, 9.5 mm 偏少。

2 粉料、沥青撒布方式

在搅拌缸中, 沥青混合料的搅拌是液-固-粉的三相搅拌。混凝土属于粘-弹性体, 细集料(0.075 mm)有很大的表面系数, 对沥青的吸附力强, 混合料中粗集料显示完全裹覆, 但实际上沥青膜厚度减薄, 粗集料的粘结力减小, 增加了混合料离析的倾向。所以, 沥青与粉料的撒布方式对混合料质量有一定的影响。

相对于搅拌缸, 粉料与沥青的撒布有下列不同方式, 如图 7 所示。



1-粉料撒布管; 2-沥青撒布管; 3-搅拌缸

图 7 沥青、粉料撒布管布置形式

粉料、沥青含量与撒布时搅拌缸单位浓度相关。在图 7(a)中, 沥青、粉料撒布管沿轴向布置, 理论上沥青、粉料含量(质量分数)沿轴向相等; 在图 7(b)中, 沥青含量相等, 但在搅拌开始时, 粉料含量一端为最大, 一端为零, 相差最大; 在图 7(c)中, 粉料卸料口与沥青出口布置在搅拌缸两端, 粉料投放时间为 5~8 s, 然后经过干拌, 在这个过程中, 搅拌缸两端粉料含量之差最大, 理论上搅拌所需时间较长。

由于粉料的颗粒直径与集料相差较大(2.0~1 000倍), 粉料放料过程中的扩散性以及处于运动中的骨料之间空隙较大, 所以粉料与集料之间的混合在很短的时间内, 可以达到相对均匀的程度。

下页图 8 和图 9 为 4000 型搅拌缸中粉料以两种不同的投料形式的检测结果。在图 8 中, 粉料通过螺旋沿轴向输送, 沥青混合料 AC-13, 搅拌时间 45 s; 在图 9 中, 粉料在搅拌缸端部靠自流投放, 沥青混和料 AC-25, 搅拌时间 58 s。以 0.075 mm 筛分通过率作为评价依据, 虽然两种不同的投料方式使粉料的拌和都达到了规定要求, 但图 8 的粉料投放方式使粉料含量较为均匀, 方差为 0.08%, 离散系数为 19.5%; 而图 9 中的投料方式的方差为 0.84%, 离散系数为 22.3%。对比之下, 沿轴向布置的方式, 使粉料含量更趋于均匀化。

沥青撒布分压力撒布和自流 2 种, 撒布形式有端部撒布和轴管撒布。理论上说, 沿搅拌轴向布置的压力撒布更利于搅拌均匀; 从表 1 也可看出, 当沥

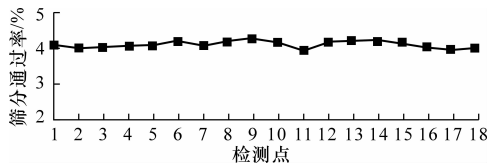


图8 粉料管轴向布置筛分通过率检测结果

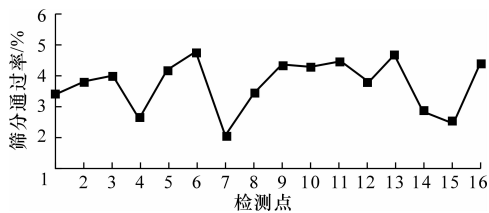


图9 粉料管端部布置筛分通过率检测结果

青撒布管位于搅拌缸一端时,搅拌缸左右侧沥青含量有明显差别。沥青搅拌均匀程度所受的影响因素较多,虽然撒布管的布置有影响,但这个影响过程难以用模型来描述,目前尚未发现对此问题研究的相关文献,这有待于进一步研究。

3 热料仓材料的变异

沥青混合料在生产过程中,冷骨料皮带速度与热骨料进仓比例是由生产给定的级配决定的。但在实际过程中,热骨料仓级配组成与设计值之间存在差异,造成这种现象的原因有以下几点。

(1)原材料的生产、组织和管理比较混乱。突出表现是:材料脏、粉尘大、针片状含量高和级配不规格等,导致实际级配与设计级配有很大差距。

(2)生产过程中人为地改变冷料皮带速度。从表面上看,似乎没有改变各种热料的级配组成,但事实上,热料仓中每种骨料的级配组成会发生变化。振动筛的筛分效率是由筛网的喂料率、材料特性、筛网层数以及网片上的材料厚度等因素决定的。当间歇式拌和楼的筛网、筛网的面积及其振动频率、机械特性固定后,筛分效率只与网片上材料的厚度有关。所以尽管保持冷料比例的不变,但随着冷料进料速度的提高或降低,筛网的筛分效率也在改变。表2为表面层AC-13型沥青混合料生产中不同上料速度下3号热料仓的2次筛分结果。

表2 不同上料速度3号热料仓的2次筛分结果

项 目		下列筛孔(mm)的通过率/%			
		13.2	9.5	4.75	2.36
冷料皮带电机 转速/(r·min ⁻¹)	900	96.1	40.4	17.1	4.6
	680	95.2	31.2	9.3	2.2
级配变化		0.9	9.2	7.8	2.4

从表2试验结果可看出,由于改变了冷料的上料速度,对热料仓的矿料组成有较大影响,其中3号

热料仓通过9.5 mm的矿料级配变化达9.2%,从而显著影响混合料的表面积。虽然有些拌和场试验能精确出混合料,而实际却生产不出符合要求的混合料,其根本原因就是冷料上料速度前后不一致。

(3)筛分过程中产生的混仓与离析。搅拌站的热骨料混合是普遍存在的问题,混仓率一般为10%左右;振动筛的筛分不充分及筛面破损是造成骨料离析的主要原因。对某一沥青搅拌设备而言,振动筛的结构、类型、筛分面积、筛体体积、运动形式、振幅、频率、筛面倾角和振动方向角等参数都已确定,基本上不能改变或很难调整,而生产的沥青混合料种类有多种,级配的不同,要求振动筛更换相应孔径的筛网。每挡筛孔均要起到一定的控制作用,如果做不到这一点,必然会引起热骨料的溢料、待料及混仓现象的发生。

根据搅拌站的大小,热料仓可分为4~6个,热料仓越多,控制筛孔越多,级配变异越小。成品料级配取决于各热料仓的合成级配,热料仓的集料变异势必造成成品料的级配变化。图10为生产AC-20沥青混合料热料仓集料级配的变异与成品料级配变异的对照检测结果。从图10可看出,集料级配变异性大,则成品料级配变异性也大,两者的变化规律总体一致。

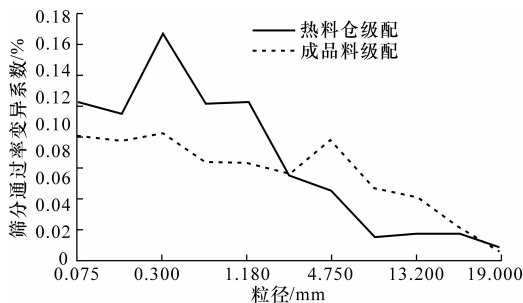


图10 热料仓集料与成品料级配变异的对照

在生产过程中,沥青混合料的设计级配一经确认,便不允许更改。但实际上热料仓集料变异的普遍存在,使得级配曲线偏离了原来的设计值。为保证沥青混合料的目标级配,科学的做法是改变沥青混合料的设计级配,即改变各热料仓的来料比率,这种调整是系统调整,而不是一味地调整某个冷料仓的供料量。下页表3为搅拌设备生产AC-13沥青混合料各热料仓筛分的检测结果;下页表4为热料仓目标级配变异的对照。

从下页表3、表4可看出,混合料的设计级配是由各热料仓筛分级配合成的,但由于热料仓集料发生变异,3号料仓4.75、2.36、1.18 mm这3个筛孔

来料比率由设计的 6.5%、3.8%、1.2% 变为 19.5%、7.5%、2.0%，见表 3 中 3 号仓对应的括号内数值；2 号料仓 2.36、1.18、0.6、0.3 mm 这 4 个筛孔来料比率变为 14.2%、4.7%、2.1%、1.2%，设计级配与目标级配有较大的偏离。这时调整 1 号料

仓、2 号料仓、3 号料仓及粉仓来料比率，由原来的 40.8%、13.2%、21.9%、3.2% 调整为 39.1%、11.0%、25.4%、3.6%；从图 10 可看出，此时的设计级配接近于目标级配，误差在《公路沥青路面施工技术规范》允许的范围

表 3 热料仓筛分检测结果

筛孔孔径/mm	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
规定级配/%	100	96.78	79.98	58.97	45.49	31.44	21.52	13.61	9.22	6.97
设计级配/%	4号仓	100	84.6	4.2	1.6	0.4	0	0	0	0
	3号仓	100	100	100	6.5(19.5)	3.8(7.5)	1.2(2.0)	0	0	0
	2号仓	100	100	100	99.9	7.1(14.2)	3.2(4.7)	1.4(2.1)	0.6(1.2)	0
	1号仓	100	100	100	100	99.1	67.5	14.4	25.3	14.8
	粉料	100	100	100	100	100	100	100	99.6	98.5
	合成值	100	96.8	80.0	58.9(61.8)	45.5(47.2)	31.4(31.8)	21.5(21.6)	13.6(13.7)	9.2

表 4 热料仓目标级配变异的对照

项 目	4号仓	3号仓	2号仓	1号仓	粉料
目标配比/%	20.9	21.9	13.2	40.8	3.2
修改后目标配比/%	20.9	25.4	11.0	39.1	3.6

4 结 语

(1) 搅拌缸各工作参数的合理匹配，对沥青混合料的均匀性起着至关重要的作用，但参数优化的前提是要保证混合料在搅拌缸中的循环流畅，特别是对流运动(大循环)的正常进行。

(2) 沿搅拌轴纵向布置的粉料和沥青撒布方式优于在搅拌缸端部的布置方式，应尽可能采用轴向布置方式。

(3) 根据冷骨料的级配，合理地选择各热料仓进仓比例，确定振动筛的筛孔尺寸大小，是减小热料仓变异的主要措施；但是，当级配偏离设计值时，应重新系统地调整各热料仓供料比例，否则会造成搅拌站产量降低，材料浪费严重。

参考文献:

References:

[1] 左文军. 沥青搅拌设备级配调试技术及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(6): 15-18.
ZUO Wen-jun. Application and technology of gradation adjusting for asphalt mixing units[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(6): 15-18.

[2] 李立寒, 麻旭荣. 级配离析沥青混合料性能的试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(12): 1622-1626.

LI Li-han, MA Xu-rong. Influence research of gradation segregation on performance of asphalt mixture [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2007, 35(12): 1622-1626.

[3] 冯忠绪, 姚仕运, 冯建生. 热沥青混合料碾压过程的离析现象[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(3): 96-99.
FENG Zhong-xu, YAO Yun-shi, FENG Jian-sheng. Rolling segregation of hot asphalt mixture[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(3): 96-99.

[4] 孙祖望. 热沥青混合料在施工过程中的不均匀性及其质量控制[J]. 建筑机械, 2004(10): 30-31.
SUN Zu-wang. Non-homogeneity in rolling hot asphalt mixture and quality control [J]. Construction Machinery, 2004(10): 30-31.

[5] 沈金安. 关于沥青混合料的均匀性和离析问题[J]. 公路交通科技, 2001, 18(6): 20-24.
SHEN Jin-an. On issues of homogeneity and separation of bitumen mixtures[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(6): 20-24.

[6] JTGF 40—2004, 公路沥青路面施工技术规范[S].

[7] JT/T 270—2002, 强制间歇式沥青混合料搅拌设备[S].

[8] 彭余华. 沥青混合料离析特征判别与控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2006.

[9] Waddas S A, Obaidat M T, Nazem M A. Influence of aggregate type and gradation on voids of asphalt concrete pavements[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1998, 10(2): 76-85.