

# 橡胶颗粒沥青混合料设计的影响因素分析

辛 星<sup>1</sup>, 谭忆秋<sup>2</sup>, 徐立廷<sup>3</sup>, 周纯秀<sup>2</sup>

(1. 山东省公路建设(集团)有限公司 济南市 250102; 2. 哈尔滨工业大学交通学院 哈尔滨市 150090;

3. 广州金邦创新环保科技有限公司 广州市 510665)

**摘 要:** 掺加橡胶颗粒后的沥青混合料与普通沥青混合料相比产生了很大的变化, 本文首先对影响这种新型混合料的配合比设计的因素进行分析研究, 易确立的试验条件采用理论分析和单因素法确定后, 主要对影响较大、取值范围较广的影响因素通过星点设计—效应面优化法进行分析研究, 确定最佳条件。最后通过性能试验对设计结果进行验证。

**关键词:** 星点设计; 效应面优化法; 总评“归一”值; 橡胶颗粒沥青混合料

在进行试验设计的过程中, 常需同时考察多个影响因素对试验结果的影响, 并对结果进行优化。由于这些影响因素的水平不同, 对试验结果的影响不同, 这时我们就需要一个周密可靠的试验设计方法来合理地安排各种试验因素, 正确估计样本含量大小, 严格控制试验误差, 从而用较少的人力、物力和时间, 最大限度地获得丰富而可靠的资料。因此, 人们发展了一系列的试验设计及分析方法。如完全随机设计(单因素设计)、配伍设计(双因素无重复试验设计)、交叉设计、析因设计、拉丁方设计、正交设计、嵌套设计和星点设计等。

采用固定其他因素改变某一因素的单因素考察法能收到一定效果, 但条件优选凭经验, 且无法考察各因素间的相互作用。当因素水平数较少时可采用析因设计(factorial design); 较多时, 需采用试验次数较少的试验设计优化法, 国内常采用正交设计进行优化, 它在可以分析主效应与交互作用的同时大大减少了样本量。但是它也存在明显的不足<sup>[1]</sup>, 正交设计是基于线形模型的设计, 对曲线关系的分析可能会给出错误的信息, 用正交设计优化只能得到所取水平的最佳值, 无法精确找到操作因素的最佳点。近年来由国外学者提出的星点设计(central composite design, CCD)<sup>[1~3]</sup>和效应面优化法(response surface methodology, RSM)被应用于许

多领域。

国外近年来常用集数学和统计学方法于一体的效应面优化法进行优化<sup>[1~3]</sup>, 试验设计采用星点设计。其应用已比较成熟, 且特点鲜明。它把自变量和应变量的关系扩展到曲面, 使用方便, 优选条件预测性好。

## 1 橡胶颗粒沥青混合料的影响因素分析

橡胶颗粒沥青混合料即将经机械破碎成具有一定形状和粒径的颗粒的废旧橡胶轮胎, 掺入沥青混合料代替部分集料, 以骨料的形式直接掺加到沥青混合料中形成的混合料。对于此种新型的沥青混合料, 在进行其组成设计时, 从以下几个方面进行考虑。

(1) 将橡胶颗粒掺加到沥青混合料中, 进行级配计算时, 首先要确定橡胶颗粒的掺加计算方法。

(2) 沥青混合料中掺加了橡胶颗粒后, 由于橡胶颗粒的密度远低于石料密度, 而且具有极强的变形能力, 它的存在影响了集料的特性及沥青与石料的粘附性, 因此, 需要研究常见的橡胶颗粒产品的不同类型和基本形状, 研究用在沥青混合料中的橡胶颗粒所表现的基本物理力学特性。

(3) 由于橡胶沥青混合料中橡胶颗粒的掺加, 主骨架的紧装密度发生变化, 影响集料组成结构的变化。级配设计的过程中, 考虑不同级配类型的石料以

及不同掺量、不同级配范围的橡胶颗粒对主骨架紧装密度的影响及混合料性能的影响,研究石料合适的级配类型以及橡胶颗粒合适的掺量和级配范围。

从以上 3 个方面的分析可以看出,研究这种新型沥青混合料,要考虑的影响因素很多而且不同因素的水平也不相同。所以,要对这种新型沥青混合料进行研究,试验设计成为首先要解决的问题。

## 2 试验设计与结果讨论

进行试验设计时,首先对可以进行理论分析确定的因素分析确定,如:橡胶颗粒掺加的计算方法、橡胶颗粒的压缩率。其次对于水平较少的因素可以进行单因素设计,如:沥青的种类、橡胶颗粒的不同类型、基本形状以及物理力学特性。最后,在确定这几种影响因素后,对于石料的级配类型、橡胶颗粒的尺寸、橡胶颗粒的掺加比例这 3 种影响因素,考虑其影响因素之间存在相互影响及对其评价指标进行综合分析,对这 3 种影响因素进行星点设计,采用效应面优化法进行试验结果的讨论,本文主要对此进行介绍。

### 2.1 理论分析

#### 2.1.1 橡胶颗粒掺加的计算方法

考虑到掺加方式的不同,可以采用两种不同的计算方法。两种计算方法在对混合料的性能上并没有差别,在计算时,可以根据自己的习惯进行选择。两种计算方法用公式进行如下描述。

内掺法:沥青混合料=沥青+集料(石料+橡胶颗粒)+矿粉;

外掺法:沥青混合料=沥青+集料(石料)+橡胶颗粒+矿粉。

#### 2.1.2 橡胶颗粒的压缩率

橡胶颗粒是一种完全弹性的材料,在计算过程中将橡胶颗粒的压缩率视为零。

### 2.2 单因素设计及结果分析

对沥青种类(SBS 改性沥青、110 基质沥青、橡胶粉改性沥青)、橡胶颗粒的基本形状(扁平状含量),不同类型(硫化、未硫化)、含杂质量(较少、一般、较多)4 种水平较少的影响因素进行单因素设计。

通过对橡胶颗粒沥青混合料压实性能、体积特性、粘结性能、回弹性能进行比较分析后得出:选用杂质含量较少、扁平含量>90%的未经硫化的橡胶颗粒和 110 基质沥青成型的橡胶颗粒沥青混合料性

能满足要求。

### 2.3 星点设计及结果分析

#### 2.3.1 试验设计及数据处理

在确定以上影响因素后,对影响较大,取值范围较广的影响因素如橡胶颗粒的掺量  $X_1(\%)$ 、粗石料含量  $X_2(\%)$  以及粗橡胶颗粒含量  $X_3(\%)$  3 个可变因素进行星点设计。

根据预试验,每个因素设 5 个水平,3 个因素取值范围确定在  $X_1$  为 1%~7%;  $X_2$  为 20%~80%;  $X_3$  为 20%~80%。3 个因素的取值如表 1,试验设计见表 2。

表 1 3 个考察因素的代码水平及对应物理量

因素	-1.732	-1	0	1	1.732
$X_1/\%$ (橡胶颗粒掺量)	1	2.3	4	5.7	7
$X_2/\%$ (粗石料含量)	20	32.7	50.0	67.3	80
$X_3/\%$ (粗橡胶颗粒含量)	20	32.7	50.0	67.3	80

沥青混合料中掺加橡胶颗粒,橡胶颗粒起的作用主要是其变形能力,所以把橡胶颗粒沥青混合料的回弹模量作为考察指标之一,则将 5 kN、10 kN、15 kN 下的回弹模量、毛体积密度、空隙率、矿料间空隙率、沥青饱和度作为试验的考察指标,见表 2。每个指标均标准化为 0~1 之间的“归一值”,各指标“归一值”求算几何平均数,得总评“归一值”见表 2。公式如下:

$$OD=(d_1 d_2, \cdots, d_n)^{1/k}, k \text{ 为指标数} \quad (1)$$

对取值越小越好指标的“归一”值  $d$  和取值越大越好指标的“归一值” $d$  采用 Hassan 方法进行数学转换求得,公式如下:

$$d_{\min}=(\gamma_{\max}-\gamma_i)/(\gamma_{\max}-\gamma_{\min}) \quad (2)$$

$$d_{\max}=(\gamma_i-\gamma_{\min})/(\gamma_{\max}-\gamma_{\min}) \quad (3)$$

式中: $\gamma$  为指标的数值; $i$  为试验号; $\gamma_{\max}$  为指标中的最大值; $\gamma_{\min}$  为指标中的最小值。

总评“归一值”对各因素用二项式: $Y=b_0+b_1X_1+b_2X_2+b_3X_3+b_4X_1^2+b_5X_2^2+b_6X_3^2+b_7X_1X_2+b_8X_1X_3+b_9X_2X_3$  进行拟合。方程如下: $OD=-1.01+17.19X_1+3.75X_2+0.43X_3-101.71X_1^2-2.47X_2^2+0.49X_3^2-8.52X_1X_2-8.25X_1X_3-1.07$ ,  $r^2=0.73$ 。

#### 2.3.2 模型预测以及结果分析

本试验以此方程作为分析与预测的模型,未将模型进一步简化,固定 3 个变量之一为中值,以总评

表 2 星点设计表及各项指标

试验号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$\frac{5\text{ kN}\epsilon_c}{\text{mm}}$	$\frac{10\text{ kN}\epsilon_c}{\text{mm}}$	$\frac{15\text{ kN}\epsilon_c}{\text{mm}}$	$\frac{\rho_f}{\text{g/cm}^3}$	$\frac{VV}{\%}$	$\frac{VMA}{\%}$	$\frac{VFA}{\%}$	OD
1	2.3	32.7	32.7	0.074	0.173	0.265	2.246	8.4	21.6	61.3	0
2	5.7	32.7	32.7	0.081	0.207	0.311	2.158	8.1	21.2	61.9	0.234 5
3	2.3	67.3	32.7	0.095	0.226	0.407	2.375	4.0	16.3	75.7	0.642 1
4	5.7	67.3	32.7	0.091	0.212	0.352	2.239	5.5	17.6	68.6	0.491 0
5	2.3	32.7	67.3	0.088	0.194	0.280	2.239	8.6	21.8	60.5	0.219 5
6	5.7	32.7	67.3	0.113	0.235	0.303	2.117	10.0	22.9	56.4	0
7	2.3	67.3	67.3	0.085	0.231	0.292	2.338	5.5	17.8	69.2	0.446 7
8	5.7	67.3	67.3	0.091	0.244	0.401	2.203	6.9	19.2	63.9	0.477 8
9	1	50	50	0.083	0.215	0.299	2.429	3.6	15.9	77.3	0.415 3
10	7	50	50	0.104	0.239	0.436	2.252	3.2	15.5	79.3	0.577 4
11	4	20	50	0.108	0.241	0.352	2.246	5.5	19.8	72.0	0.605 1
12	4	80	50	0.078	0.192	0.275	2.271	5.5	19.0	70.9	0.249 7
13	4	50	20	0.102	0.239	0.328	2.352	2.7	14.8	81.6	0.458 8
14	4	50	80	0.140	0.275	0.351	2.313	4.3	16.4	73.5	0.786 6
15~20	4	50	50	0.084	0.214	0.325	2.330	3.7	15.7	76.7	0.470 6

注:试验 15~20 号为重复试验。

“归一值”为因变量,相对于另外两个自变量的效应面(response surface)三维图见图 1~图 3。

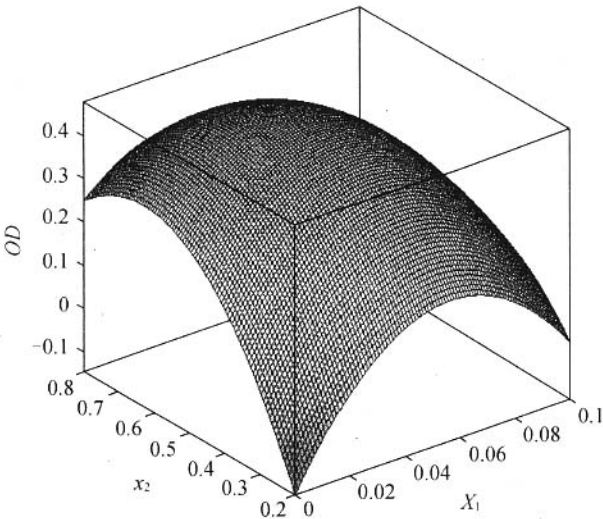


图 1 总评“归一值”对橡胶颗粒掺量和粗石料含量的因变量面(粗橡胶颗粒含量为 50 %)

由图1~图3 可以判断,橡胶颗粒掺量 $X_1$ 在2%~6%的范围内对总评“归一值”较好;粗石料含量 $X_2$ 在0.60 附近对总评“归一值”较好;粗橡胶颗粒含量 $X_3$ 对总评“归一值”影响较小。根据效应面优选的3 个因素较佳工艺范围为: $X_1$  为2%~6%; $X_2$  为50%~75%; $X_3$  由于作用不显著,可选 35%~75%之间

的值。

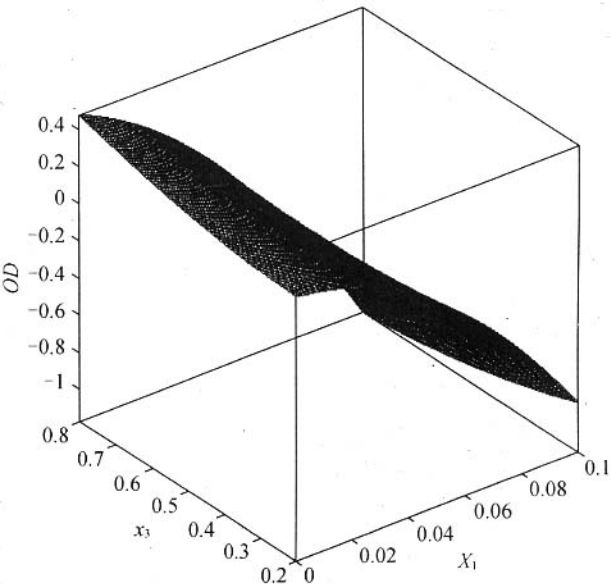


图 2 总评“归一值”对橡胶颗粒掺量和粗橡胶颗粒含量的因变量面(粗石料含量为 50 %)

3 性能检验

选满足上面分析范围的混合料(JG)、掺加橡胶颗粒的连续级配(AC-1)与没有掺加橡胶颗粒的普通沥青混合料(AC-2)进行性能检验,试验结果见图 4~图 6。

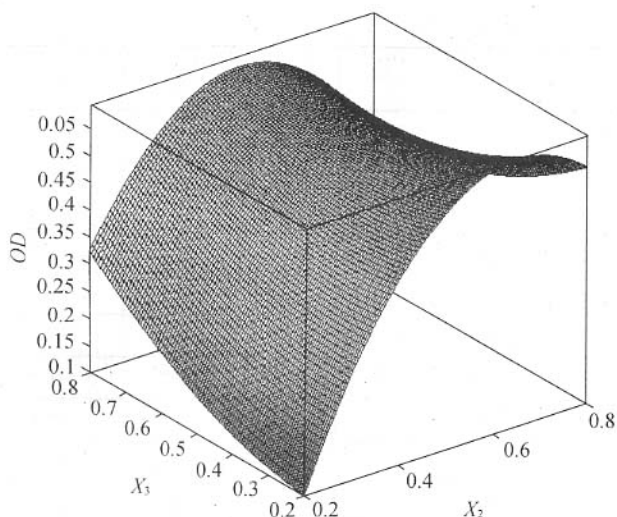


图3 总评“归一值”对粗橡胶颗粒含量和粗石料含量的因变量面(橡胶颗粒掺量为4%)

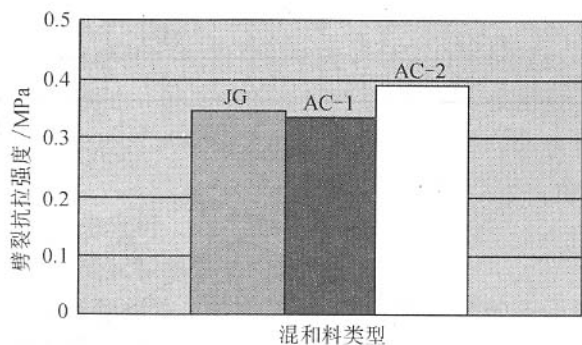


图4 混合料类型与动稳定度的关系

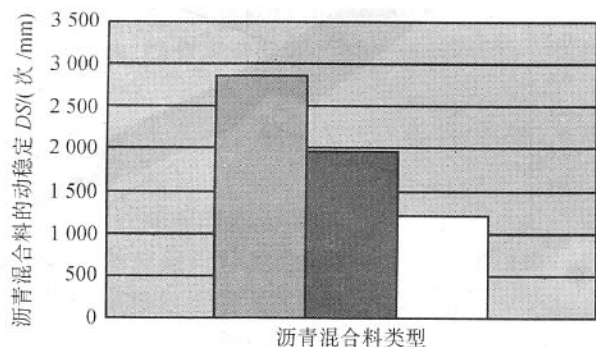


图5 不同混合料类型与劈裂抗拉强度的关系

通过上面的分析,可以看到掺加橡胶颗粒的沥青混合料的高温稳定性、低温拉应变要好于普通沥青混合料,其破坏劲度模量有所降低,且具有良好的除冰雪效果;掺加橡胶颗粒符合优选范围级配的混合料的高温性能和低温性能明显好于掺加橡胶颗粒



图6 橡胶颗粒沥青路面与普通路面的除冰雪比较  
的普通连续级配的混合料。

#### 4 结论

(1)试验结果证明,星点设计一效应面优化法应用于确定橡胶颗粒沥青混合料的影响因素取值范围具有较好的效果,具有实际应用价值。

(2)对于影响因素水平较多,指标之间具有相互影响的试验,采用星点设计并用总评“归一值”进行综合评价,可以取得较好的效果。

#### 参考文献:

- [1] 张文彤. 世界优秀统计工具[M]. 北京:希望电子出版社,2002.
- [2] 吴伟,崔光华,陆彬. 实验设计中多指标的优化:星点设计和总评“归一值”的应用[J]. 中国药理学杂志,2000, 35(8).
- [3] Iskandarani B, Clair J H, Patel P, et al. Simultaneous optimization of capsule and tablet formulation using response surface methodology [J]. Drug Dev Ind Pharm, 1993, 19(16).
- [4] Abu-Izza K A, Garcia-Contreras L, Lu D R. Preparation and evaluation of sustained release AZT-loaded micro spheres: optimization of the release characteristics using response surface methodology [J]. J Pharm Sci, 1996, 85(2).
- [5] Hassan E E, Parish R C, Gallo J M. Optimized Formulation of Magnetic Chitosan Micro spheres containing the Anticancer Agent, oxantrazole [J]. Pharm Res, 1992, 9(3).
- [6] Bronchus S, Forbes R T, York P, et al. A central composite design to investigate the thermal stabilization of lysozyme[J]. Pharm Res, 1999, 16(5).
- [7] 张肖宁, 实验粘弹原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨船舶工程学院出版. 1990.