

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2022.12.001

# 基于高抗剪密实型的泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配设计

李秀君<sup>1</sup>, 赵麟昊<sup>1</sup>, 高世柱<sup>2</sup>, 欧阳欢<sup>1</sup>, 王宁宁<sup>1</sup>

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海勘察设计院(集团)有限公司, 上海 200093)

**摘要:** 在重载交通和雨水综合作用下, 泡沫沥青冷再生路面常因混合料抗剪切性能和密实性不足发生车辙和水损病害。为了设计出适用于多雨重载公路泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配, 在对散体力学剪切模量和最小空隙率分析的基础上, 以铣刨料为原料, 以剪切模量和最小空隙率为粗、细集料级配的设计指标, 以体积法为级配合成方法, 以贝雷法参数为检验标准, 并选取多级嵌挤密实型级配和级配中值为对照, 以冷再生混合料抗剪强度参数和路用性能为验证, 最终提出高抗剪密实型泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配设计方法。综合不同级配下泡沫沥青冷再生混合料的高温稳定性和水稳定性, 以满足规范路用性能的混合料级配曲线为上下限, 确定了推荐级配范围。结果表明: 新设计的级配的粗集料和粉料含量高, 细集料含量低, 与 SMA 级配相似, 新级配的粗铣刨料表面粗糙度高, 接触面多, 形成的骨架结构可有效传递车辆荷载, 适量的胶结料能有效进行填充, 空隙率小; 混合料具有较大的内摩擦角和黏聚力, 混合料高温稳定性较级配中值提高 131.3%, 远高于规范对重载公路动稳定的要求, 水稳定性相对于级配中值提高 12.3%, 均远高于规范限值; 选用铣刨料进行级配设计, 加入适当比例的新料不会对冷再生料力学性能产生不利影响。

**关键词:** 道路工程; 泡沫沥青冷再生; 高抗剪密实型; 多雨重载公路; 中粒式级配; 抗剪切性能; 水稳定性

**中图分类号:** U414

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-0268 (2022) 12-0001-07

## Medium-sized Gradation Design of Foamed Asphalt Cold Recycled Mixture Based on Higher Anti-shearing Dense Type

LI Xiu-jun<sup>1</sup>, ZHAO Lin-hao<sup>1</sup>, GAO Shi-zhu<sup>2</sup>, OUYANG Huan<sup>1</sup>, WANG Ning-ning<sup>1</sup>

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

**Abstract:** Under the combined action of heavy traffic and rain, rutting and water damage often occur in cold recycled foam asphalt pavement due to the lack of shear resistance and compacting property of the mixture. To design the medium-sized gradation of cold recycled foam asphalt mixture for rainy heavy traffic roads, based on the analysis of mechanical shear modulus and minimum air voids of granular materials, with milled materials as raw materials, shear modulus and minimum air voids as the design indicators of coarse and fine aggregate gradations, volume method as the grading method, and Bailey method parameters as the inspection criterion, selecting multi-stage embedded dense gradation and the median gradation as the contrast values, and taking the shear strength parameters and road performance of cold recycled mixture for verification, the design method of medium-sized gradation for higher anti-shearing dense type foamed asphalt cold recycled mixture is finally proposed. Considering the high-temperature stability and water stability of foamed asphalt

收稿日期: 2020-12-17

基金项目: 住房城乡建设部 2018 年科学技术项目 (2018-k9-062)

作者简介: 李秀君 (1976-), 女, 江苏江阴人, 副教授, 博士. (363096289@qq.com)

cold recycled mixture with different gradations, with the mixture gradation curve values which meet the standard road performance as the upper and lower limits, the recommended gradation range is determined. The result shows that (1) The newly designed gradation has high content of coarse aggregate and powder, and low content of fine aggregate, which is similar to SMA gradation. The rough milling material in the new gradation has high surface roughness and many contact surfaces. The formed skeleton structure can effectively transfer the vehicle load, and the appropriate amount of binder can fill effectively with small air voids. (2) The mixture has a large internal friction angle and cohesion. The high-temperature stability of the mixture is 131.3% higher than that of the median gradation, which is far higher than the requirements of the specification for dynamic stability of heavy traffic roads. The water stability is 12.3% higher than that of the median gradation, which is far higher than the specification limit value. (3) When using milling materials for gradation design, adding appropriate proportion of new material will not adversely affect the mechanical properties of cold recycled materials.

**Key words:** road engineering; cold recycling of foamed asphalt; higher anti-shearing dense type; rainy heavy traffic road; medium-sized gradation; shear resistance; water stability

## 0 引言

泡沫沥青冷再生技术在国内外开展研究和应用多年,已有多省市结合地区特点编制地方规范,但通过实际调查发现,完全按照地方标准推荐的级配范围设计冷再生混合料,在重载交通和雨水的作用下,常因混合料抗剪切性能和密实性不足导致再生路面发生车辙和水损病害<sup>[1-3]</sup>。虽然有省份已针对不同交通量的推荐级配范围开展研究,如浙江省《公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规范》(DB33T 715—2018)针对不同交通量给出粗粒式推荐级配范围,但当泡沫沥青冷再生层作为下面层时,常因再生层厚度受限,粗粒式级配不适用;《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008)虽给出粗粒式、中粒式和细粒式的推荐级配范围,但并未针对交通量给出相应的建议。

传统的级配设计方法如 Talbol 提出的“n 法”、前苏联的“K 法”、我国同济大学的“i 法”和美国的“Superpave 法”等,主要强调级配的密实性,未考虑集料的嵌挤状态,难以保证混合料的抗剪切性能<sup>[4-6]</sup>。“Bailey 法”虽通过调整粗细集料合成比例来表征集料的嵌挤状态,但未考虑粗、细集料矿料级配内部是否具备较好的嵌挤和填充状态<sup>[7-8]</sup>。为设计出高抗剪和高水稳定性的混合料,陈忠达、袁万杰等<sup>[9]</sup>以填充理论和贝雷法为基础,以最小空隙率为指标,提出由主、次骨架结构形成的多级嵌挤密实级配(MDBG)设计方法,并通过路用性能验证该方法的有效性。杜顺成、戴经梁和韩雪等<sup>[10-12]</sup>在散体细观力学研究的基础上,通过理论推导和试验

的手段,提出以剪切模量为指标的粗集料级配(MAS)设计方法,有效提高沥青混合料抗剪切性能。然而高抗剪密实型级配设计的研究主要针对普通沥青混合料,对泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配的研究尚未开展。因此,探寻一种适用于多雨重载公路下面层的高抗剪密实型泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配设计方法显得尤为重要。本研究在散体力学剪切模量和最小空隙率分析的基础上,结合冷再生材料特点,提出高抗剪密实型泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配设计方法,并以 MDBG 法和规范中值为对照,以混合料抗剪强度参数和路用性能为验证,为设计最佳级配曲线和级配范围开展系统研究。

## 1 级配设计理论和步骤

### 1.1 级配设计指标

#### (1) 剪切模量

泡沫沥青冷再生混合料矿料可视为散体颗粒材料,当混合料受到外界作用时,由构成骨架的粗集料以接触嵌挤的形式承担,因此在研究混合料抗剪性能时,应从粗集料内部颗粒的接触情况和抗剪性能进行研究。杜顺成等<sup>[13]</sup>将集料颗粒形状视为理想球体,采用不连续的粒状介质模型建立散体细观力学模型,推导出表征粗集料嵌挤状态的剪切模量  $G$  公式,如式(1)所示:

$$G = \frac{10}{3} k_n \left( \frac{\gamma}{4 + \gamma} \right) \frac{(6.3629d - 2.6537)}{R}, \quad (1)$$

式中,  $d$  为散体材料的相对密度;  $k_n$  为集料颗粒法向弹性刚度;  $\gamma$  为集料颗粒切线与方法向弹性刚度之

比;  $\bar{R}$  为散体材料的平均粒径, 采用式 (2) 计算。

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n P_i D_i, \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为第  $i$  档粗集料的质量比重;  $D_i$  为第  $i$  档粗集料的等效半径, 取平均半径。

若想以表征粗集料嵌挤状态的剪切模量为指标优化泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配, 仍需解决一个问题: 构成冷再生混合料骨架结构的铣刨料和新集料的法向和切向弹性刚度相差较大, 无法将其视为常数, 若将铣刨料与新集料进行混合设计, 将切向和法向弹性刚度视为定值将不符合实际情况。在实际工程中, 铣刨料的含量通常占 70%~80% 以上, 为了能够满足理论要求, 本研究尝试选择铣刨料含量为 100% 进行级配设计, 这可较大程度上保证构成主骨架颗粒力学性能相近, 能直接以式 (3) 表征的剪切模量为指标进行级配设计。同时, 为确保工程中不会因掺入新集料而削弱冷再生料的路用性能, 后文选取掺入新料 25% 和 50% 作为对照组进行验证。

$$G = K \frac{6.3629d - 2.6537}{\bar{R}}, \quad (3)$$

式中  $K = \frac{10}{3} k_n \left( \frac{\gamma}{4+\gamma} \right)$  为常数。

## (2) 最小空隙率

细集料主要用于填充主骨架空隙, 使级配具有较好的密实性, 提高混合料抗剪切和抗水损性能, 因此, 为确保细集料级配的密实性, 设计时选最小空隙率式 (4) 为指标。

$$VCA = (1 - \rho/\rho_d) \times 100, \quad (4)$$

式中,  $\rho$  为紧装密度;  $VCA$  为间隙率;  $\rho_d$  为表观密度。

## 1.2 级配设计步骤

(1) 粗集料级配设计: 根据逐级填充理论, 将低一级粒径  $D_1$  以不同比例填充到上一级粒径  $D_0$  中,

计算等效半径, 并通过插捣试验确定集料相对密度和剪切模量, 确定剪切模量与填充比例的曲线关系, 取最大剪切模量对应的填充比例为最佳填充比例; 在  $D_0$  和  $D_1$  形成最佳抗剪密实结构的基础上, 将下一级粒径  $D_2$  以不同比例填充到其中, 确定最佳 3 级粒径组成比例; 同理进行下一级填充, 直至各级铣刨料全部填充完成, 确定粗集料级配各档的组成比例。

(2) 细集料级配设计: 选取最小空隙率为指标, 参照粗集料级配设计步骤进行设计。

(3) 合成级配设计: 因粗细集料粒径相差较大, 若采用试验的方法确定二者质量比, 易产生离析, 影响试验结果, 故本研究采用体积法计算粗细集料的质量比<sup>[14]</sup>。

(4) 级配检验: 本研究采用“Bailey 法”的  $CA$  比、 $FA_c$  比和  $FA_f$  比对设计的级配进行检验<sup>[14]</sup>。同时, 选择 MDBG 级配和级配中值为对照, 根据混合料抗剪强度参数和路用性能确定和调整级配, 确定最佳级配范围, 并验证加入新集料不会对冷再生料路用性能产生不利影响。

为方便论述, 本研究将上述级配设计体系命名为高抗剪密实型冷再生料级配 (Higher Anti-shearing and Dense Cold Recycling Grading, 简称 ASDCR) 设计方法。

## 2 级配设计实例与分析

本研究取最大公称粒径为 19 mm, 由“Bailey 法”定粗细集料分界粒径为 4.75 mm, 以下将采用铣刨料进行级配设计。

### 2.1 粗集料级配设计

1 级填充试验: 将粒径为 19~16 mm 的铣刨料以表 1 的设计比例填充到 26.5~19 mm 的铣刨料中进行试验, 试验结果如表 1 和图 1 所示。

表 1 1 级填充试验结果

Tab. 1 Test result of level 1 filling

项目	26.5~19 mm 与 19~16 mm 铣刨料不同组成比例						
	6:4	5:5	4:6	3:7	2:8	1:5	1:6
VCA/%	44.15	44.89	44.65	44.14	44.16	44.63	44.69
$d$	0.558 5	0.551 1	0.553 5	0.558 6	0.558 4	0.553 7	0.553 1
VCA/mm	20.650	20.125	19.600	19.075	18.550	18.375	18.250
$G/K$	0.145 3	0.141 3	0.147 6	0.157 3	0.161 6	0.157 8	0.158 1

由表 1 和图 1 可知, 随 19~16 mm 铣刨料比例增加, 集料的剪切模量大体呈现先上升后下降的趋势, 当比例为 2:8 时, 取得最大值, 集料抗剪切性能最

优。从空隙率与填充比例的变化规律可知, 其呈现波动式变化, 当比例从 6:4 到 5:5 时, 19~16 mm 铣刨料体积已超过 26.5~19 mm 铣刨料形成的骨架

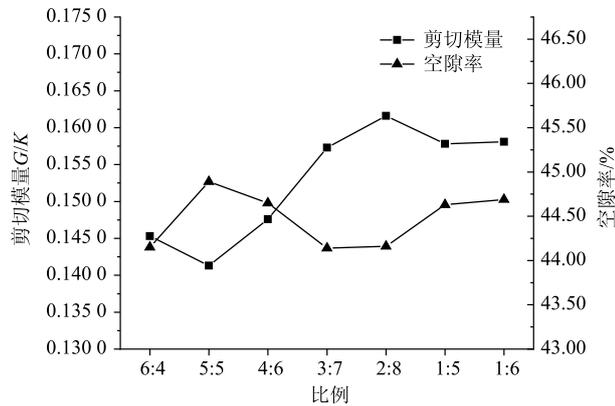


图1 1级填充试验结果

Fig. 1 Test result of level 1 filling

结构空隙, 干扰原有的密实结构, 骨架逐渐转化为由两档粒径铣刨料共同形成, 空隙较大; 随着比例增大, 由 19~16 mm 铣刨料形成骨架的占比提高, 铣刨料间嵌挤点数量增加, 并且 19~16 mm 中较小粒径的铣刨料对空隙进行填充, 当比例达到 3:7 和 2:8 时, 形成高抗剪密实结构; 随着比例继续增加, 骨架结构已完全由 19~16 mm 铣刨料构成, 骨架空隙小, 较小粒径的铣刨料已无法进行填充, 导致空隙率增大, 抗剪性能下降。

通过对比不同比例下剪切模量与空隙率, 二者基本呈现剪切模量较大时空隙率较小的规律。但空隙率随填充比例呈波动式变化, 若像 MDBG 法选最小空隙率为设计指标, 需进行多组混合料路用性能试验才能确定最佳比例。而剪切模量随填充比例变化时, 最大值明显且唯一, 且剪切模量公式中同时考虑空隙率和等效半径, 能保证集料具有高抗剪性和密实性。

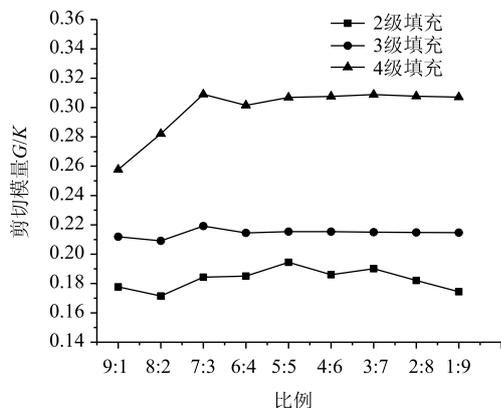


图2 2级~4级填充试验结果

Fig. 2 Test result of level 2 to level 4 filling

限于篇幅, 同理, 由图 2 可知, 2~4 级填充试

验结果: 26.5~16 mm 与 16~13.2 mm, 26.5~13.2 mm 与 13.2~9.5 mm, 26.5~9.5 mm 与 9.5~4.75 mm 的最佳质量比分别为 5:5, 7:3, 7:3。因此, 根据 ASDCR 法确定粗集料级配各档 (26.5~19, 19~16, 16~13.2, 13.2~9.5, 9.5~4.75 mm) 的最佳质量比例为: 1:4:5:4.3:6.1。

## 2.2 细集料级配设计

1 级填充试验: 将粒径为 4.75~2.36 mm 和 2.36~1.18 mm 的铣刨料按表 2 中的设计比例充分混合 (共 2 kg 左右), 并进行空隙率试验, 试验结果如表 2 和图 3 所示。

表2 1级填充试验结果

Tab. 2 Test result of level 1 filling

项目	4.75~2.36 mm 与 2.36~1.18 mm 铣刨料组成比例						
	9:1	8:2	7:3	6:4	5:5	4:6	3:7
VCA/%	44.32	44.31	44.13	43.96	44.06	44.41	44.42

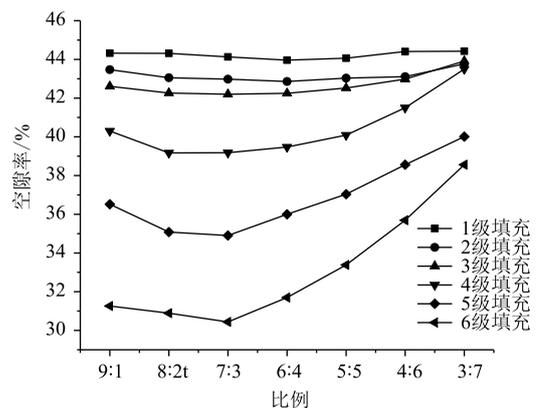


图3 1级~6级填充试验结果

Fig. 3 Test result of level 1 to level 6 filling

将 4.75~2.36 mm 和 2.36~1.18 mm 的铣刨料按相应比例混合时, 相对于粗集料的主骨架结构, 4.75~2.36 mm 铣刨料相当于构成次级骨架结构材料, 2.36~1.18 mm 铣刨料是对次级骨架结构间隙进行 1 级填充。由表 2 和图 3 可知, 当 2.36~1.18 mm 铣刨料占比较小时, 对次级骨架结构起到较好的填充作用, 当占比较大时, 挤占了 4.75~2.36 mm 铣刨料, 破坏了次级骨架结构, 导致空隙率变大。以最小空隙率为指标, 4.75~2.36 mm 和 2.36~1.18 mm 铣刨料质量比为 6:4 时所形成的次级骨架结构最为密实。

限于篇幅, 2, 3, 4, 5, 6 级填充试验结果不再赘述。但从图 3 可知, 随着填充等级增加, 次级骨架结构空隙率呈现先缓后快的下降趋势, 其中 1, 2, 3 级填充对次级骨架的空隙率影响较小, 对密实性贡

献不大, 主要因为前 3 级填充的铣刨料粒径较大, 起到构建次级骨架的作用; 而 4, 5, 6 级填充对次级骨架结构的密实性影响较大, 粒径较小的集料能对次级骨架进行较好填充。因此, 在进行细集料级配设计时, 应避免 1.18, 0.6 和 0.3 mm 这 3 档铣刨料用量偏高导致次级骨架结构被挤占而降低稳定性; 同时, 也应避免 0.15, 0.075 mm 和小于 0.075 mm 这 3 档铣刨料用量偏少而导致级配不密实, 可结合填充试验在接近最小空隙率的范围内进行确定。根据 ASDCR 法, 以最小空隙率为指标的填充试验, 确定细铣刨料各档 (4.75~2.36 mm, 2.36~1.18 mm, 1.18~0.6 mm, 0.6~0.3 mm, 0.3~0.15 mm, 0.15~0.075 mm, 0.075~0 mm) 的最佳比例为: 6:4:6.7:7.2:6:12.8:18.3。

表 3 不同设计方法的合成级配

Tab. 3 Gradations obtained by different design methods

级配类型	通过以下筛孔 (mm) 的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
A	100	96.7	83.3	66.6	52.3	31.8	28.9	26.9	23.6	20.1	17.1	10.7
B	100	96.9	84.5	69.0	55.7	36.9	33.3	31.1	27.2	23.1	19.6	12.2
C	100	96.4	81.9	64.1	48.6	26.7	24.3	22.7	20.1	17.0	14.6	9.2
D	100	95.6	85.4	70.7	58.2	30.5	27.6	25.8	22.5	19.1	16.2	10.1
级配中值	100	95	—	—	72.5	50	42.5	—	—	20	—	13
级配范围	100	90~100	—	—	60~85	35~65	30~55	—	—	10~30	—	6~20

## 2.4 合成级配检验

参考“Bailey 法”, ASDCR 法设计的级配 A, 其检验参数分别为:  $CA = 0.43$ ,  $FA_c = 0.84$  和  $FA_f = 0.75$ , 均在 SMA-19 型级配检验参数的推荐范围内 ( $CA$  比: 0.35~0.50,  $FA_c$ : 0.6~0.85,  $FA_f$ : 0.65~0.90)<sup>[14]</sup>。

## 2.5 级配对比分析

将不同级配曲线绘制如图 4 所示。根据图 4, 不论是 ASDCR 法设计的级配 A 还是 MDBG 法设计的级配 D, 均超出处于级配下限, 说明所设计的级配曲线整体偏粗, 细集料含量较少; 并且级配 A 和级配 D 与 SMA 的级配特点相似, 粗集料和粉料含量较高, 细集料含量较低, 较多的粗铣刨料表面粗糙度高, 接触面多, 形成的骨架结构可有效传递车辆荷载, 适量的胶结料能有效进行填充, 空隙率很小, 具有抗剪切、防水性强等特点<sup>[15-16]</sup>。级配 B 处于推荐级配范围内, 贴近级配下限; 而级配 C 距离级配范围较远, 细集料通过率差距较大。对于级配中值, 级配偏细, 细集料较多, 有利于与泡沫沥青形成沥青

## 2.3 合成级配设计

根据体积法计算粗细集料的合成比例。其中泡沫沥青用量占定 2.0%, 密度为 1.04 g/cm<sup>3</sup>; 水泥用量 1.8%, 密度为 1.4 g/cm<sup>3</sup>。根据粗集料 IV 级填充试验, 确定空隙率  $VCA = 39.88\%$ , 粗集料干捣密度 1.36 g/cm<sup>3</sup>; 细集料紧装密度 1.76 g/cm<sup>3</sup>。经计算, 粗集料、细集料和水泥的质量百分比为: 68.2%, 30.0%, 1.8%, 结合各档铣刨料最佳质量比, 进行级配确定。ASDCR 法设计的级配如表 3 级配 A 所示, 上下 5% 变化 4.75 mm 粒径的通过率, 确定级配 B 和级配 C。同时, 根据 MDBG 法, 采用相同材料进行试验, 确定级配 D。选取《公路沥青路面再生技术规范》(JTG F41—2008) 中粒式级配中值和级配范围进行对比。

胶砂黏附粗集料, 混合料早期稳定性较好, 但是混合料在剪切作用下, 沥青胶团易发生剪切变形, 特别在夏季高温下易发生车辙病害, 这也证明 ASDCR 法和 MDBG 法设计高抗剪混合料级配具有一定的合理性。

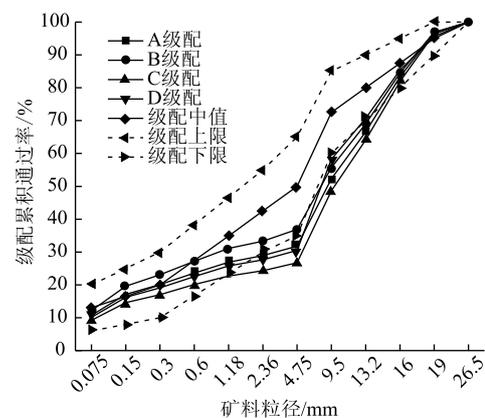


图 4 不同设计方法的合成级配曲线

Fig. 4 Gradation curves obtained by different design methods

### 3 泡沫沥青冷再生混合料抗剪强度参数与路用性能

#### 3.1 抗剪强度参数

泡沫沥青冷再生混合料强度主要由胶结料黏聚力和集料摩阻力构成,为进一步论证 ASDCR 法的合理性,本研究利用简易三轴力学模型<sup>[17]</sup>计算混合料抗剪强度参数,其中参数  $c$  和  $\varphi$  的计算如式(7)和式(8)所示。同时,为论证新集料的掺入不会削弱冷再生料的力学性能,选择级配 A,用新料按 25% 和 50% 的比例替换各档铣刨料,记为级配 E 和级配 F。

$$c = \frac{\sigma_u + \sigma_t}{4} \cos \varphi, \quad (7)$$

$$\varphi = \arcsin \frac{\sigma_u - \sigma_t}{\sigma_u + \sigma_t}, \quad (8)$$

式中,  $c$  为泡沫沥青冷再生混合料黏聚力;  $\varphi$  为内摩擦角;  $\sigma_u$  为混合料抗压强度,由无侧限抗压强度表征;  $\sigma_t$  为混合料抗拉强度,由劈裂强度表征。

常温下对各级配冷再生料进行无侧限抗压强度试验和劈裂试验,结果见表 4 和图 5。

表 4 不同级配冷再生混合料的无侧限抗压强度和劈裂强度

级配类型	A	B	C	D	中值	E	F
无侧限抗压强度/MPa	2.15	2.02	1.49	2.01	1.52	2.23	2.31
劈裂强度/MPa	0.57	0.62	0.44	0.64	0.51	0.59	0.60
内摩擦角/(°)	35.5	32.0	32.9	31.1	29.8	35.6	36.0
黏聚力/MPa	0.55	0.56	0.40	0.57	0.44	0.57	0.59

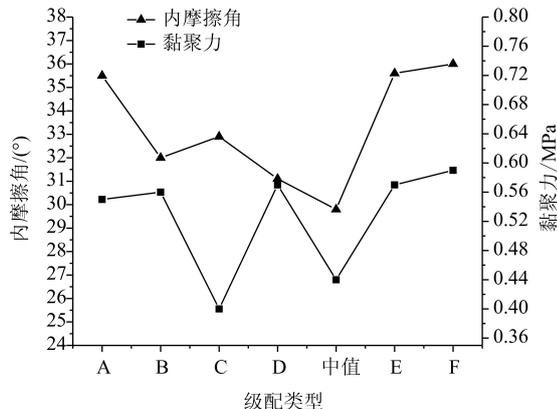


图 5 不同级配冷再生料的摩擦角和黏聚力

Fig. 5 Internal friction angles and cohesions of different graded cold recycled mixtures

对比级配 A、级配 D 和级配中值可知,级配 A 在外荷载作用下,集料骨架能够提供较大的摩阻力

和黏聚力,具有较好的抗剪切性能,主要因为级配 A 在设计过程中充分考虑骨架的抗剪切性能和密实性,而仅考虑密实性的级配 D 的内摩擦角则明显减小。由级配 A、级配 B 和级配 C 可知,细集料的增加或减小,均会降低骨架的内摩阻角,其中细集料过少,会严重影响混合料的黏聚力,影响混合料的抗剪切性能和水稳定性。由级配 A、级配 E 和级配 F 可知,在常温下,新集料部分代替铣刨料,其混合料内摩擦角和黏聚力均有一定程度增大,主要因为铣刨料表面裹附的旧沥青,在冷再生过程中,难以激发旧沥青的黏结作用,反而在集料间形成一定的润滑作用,降低集料间的内摩擦角<sup>[18]</sup>;根据表面能理论,新沥青与新集料之间具有更大的极性力,增加泡沫沥青与集料的黏附性,增加混合料的黏聚力。

#### 3.2 路用性能

为验证 ASDCR 法设计的级配能有效解决多雨重载公路冷再生路面车辙和水损病害,并为工程推荐合理的级配范围,本研究采用 60 °C 车辙试验和 25 °C 干湿劈裂试验,对不同级配的混合料高温稳定性和抗水损性能进行研究,结果见表 5。

表 5 不同级配下混合料的车辙试验和干湿劈裂试验结果

级配类型	A	B	C	D	中值	E	F
动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )	11 018	9 076	4 766	7 428	4 764	11 985	12 054
干劈裂强度/MPa	0.57	0.62	0.44	0.64	0.51	0.59	0.60
湿劈裂强度/MPa	0.47	0.51	0.27	0.55	0.38	0.48	0.50
TSR/%	82	83	61	86	74	82	83

对比级配 A、级配 B、级配 C 发现,级配 C 的动稳定度和湿/干劈裂强度比最小,主要因为级配 C 细集料太少,起黏结作用的胶结料太少,不能对主骨架进行较好的填充和黏结,骨架结构密实性差,水易进入混合料间隙中,骨架结构在外荷载和水的共同作用下易发生位移,导致混合料发生剪切破坏;级配 B 比级配 A 的动稳定度低,因为级配 B 细集料较多,对主骨架结构产生扰动,且较多的胶浆在高温和荷载作用下增加剪切流变,但其水稳定性未被削弱。

级配 D 动稳定度相对于级配 A 而言有明显的下降,主要是因为 MDBG 法设计的粗集料级配是以最小空隙率为指标,集料剪切模量较小,导致混合料抗剪切变形能力下降,但其密实性较好,混合料抗水损性能较好。

对比级配 A、级配 E 和级配 F 的动稳定度和湿/干劈裂强度比,证明适当添加新集料不会降低冷再

生料的高温稳定性和抗水损性能, 主要因为新集料完全按设计级配比例添加, 其自身能形成高抗剪密实型骨架结构, 同时新集料强度较铣刨料高, 集料在外力作用时能提供更大的抗剪切力, 减小骨架变形; 同时, 新集料与泡沫沥青的表面极性相差较大, 具有更大黏附力, 但黏附力增量较小, 故对混合料抗水损性能影响不大。

通过试验结果可知, 基于 ASDCR 法设计的级配, 其混合料动稳定性和湿、干劈裂强度均远高于

级配中值, 且均满足《公路泡沫沥青冷再生路面设计与施工技术规范》(DB33T 715—2018) 中对特重交通、重交通公路下面层混合料的要求, 因此基于 ASDCR 法设计的级配能较好地解决多雨地区重载公路冷再生路面易发生车辙和水损病害。

综合不同级配下冷再生料的高温稳定性和水稳定性, 本研究以级配 A、级配 B、级配 D 曲线为界限, 确定适用于多雨重载公路泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配范围, 见表 6。

表 6 推荐级配范围

Tab. 6 Recommended gradation range

级配类型	通过以下筛孔 (mm) 的质量百分率/%											
	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
推荐级配范围	100	95~97	83~86	66~71	52~59	30~37	27~34	25~32	22~28	19~24	16~20	10~12

#### 4 结论

(1) 通过对散体力学剪切模量和最小空隙率的分析, 提出高抗剪密实型泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配 (ASDCR) 设计方法, 包括设计材料、粗细集料级配设计、合成级配设计和级配检验。

(2) ASDCR 法设计的级配与 SMA 的级配特点相似, 粗集料和粉料含量高, 细集料含量低, 较多的粗铣刨料表面粗糙度高, 接触面多, 形成的骨架结构可有效传递车辆荷载, 适量的胶结料能有效进行填充, 空隙率小, 具有高抗剪、高防水等特点, 适用于多雨重载公路。

(3) ASDCR 法设计的级配, 其混合料具有较大的内摩擦角和黏聚力, 高温稳定性和抗水损性能远优于级配中值, 满足规范要求; 工程中为调整级配加入适当比例的新料不会对冷再生料力学性能产生不利影响。

(4) 以满足路用性能的混合料级配曲线为上下限, 确定了适用于多雨地区重载公路的泡沫沥青冷再生混合料中粒式级配范围, 为工程应用提供参考借鉴。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 曾维樵. 基于轴载谱的路面结构性能 [J]. 沈阳大学学报 (自然科学版), 2015, 27 (6): 495-502.  
ZENG Wei-qiao. Pavement Performance Based on Axle Load Spectrum [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science Edition), 2015, 27 (6): 495-502.
- [2] 朱靛雯, 孙立军, 刘黎萍, 等. 基于车辙谱的沥青路面轴载限研究 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2015, 43 (3): 392-398.

ZHU Liang-wen, SUN Li-jun, LIU Li-ping, et al. Study of Axle Load Limit Based on Asphalt Pavement Rutting Spectrum [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43 (3): 392-398.

[3] 吴传海, 赵顺根. 广东地区交通轴载状况调查及其对路面车辙的影响分析 [J]. 公路, 2011 (5): 1-8.

WU Chuan-hai, ZHAO Shun-gen. Investigation of Axial Load and Analysis of Its Influence on Pavement Rutting in Guangdong Province [J]. Highway, 2011 (5): 1-8.

[4] 曹明明. 刚柔复合式基层沥青路面结构特征与荷载响应分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018.

CAO Ming-ming. Analysis on Structural Characteristics and Load Responses of Rigid and Flexible Composite Base Asphalt Pavement [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[5] AL-KHATEEB G G, GHUZLAN K A, AL-BARQAWI M O. Effect of Superpave Restricted Zone on Volumetric and Compaction Properties of Asphalt Mixtures [J]. International Journal of Pavement Research & Technology, 2017, 10 (6): 488-496.

[6] CHENG Y Z, QIN Y. Aggregates Breakage Introduction to Optimize Gradation of Multi-supporting Skeleton Asphalt Mixtures [J]. Construction and Building Materials, 2019, 200: 265-271.

[7] SWAMY A K, SANDHU K K, FOXLOW J. Improving Quality Control through Chance Constrained Programming: A Case Study Using Bailey Method [J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 11 (2): 128-137.

[8] GRAZIANI A, FERROTTI G, PASQUINI E, et al. An Application to the European Practice of the Bailey Method for HMA Aggregate Grading Design [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 53 (3): 990-999.

(下转第 26 页)

- Rules of Recycled and Virgin Asphalt Based on AFM and FTIR [J]. Highway, 2019, 64 (3): 225-230.
- [15] BOWERS B F, HUANG B S, SHU X, et al. Investigation of Reclaimed Asphalt Pavement Blending Efficiency through GPC and FTIR [J]. Construction and Building Materials, 2014, 50: 517-523.
- [16] PIRZADEH P, KADHIM H, GRANT D L, et al. Impact of Hot Mix Asphalt Plant Silo Storage Conditions on Blending and Diffusion between Virgin and RAP Binders [J]. Road Materials and Pavement Design, 2019, 22 (6): 1231-1253.
- [17] 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 De-dong, ZHANG Sheng-tao, LI Jin, et al. Migration Behavior of Reclaimed Mineral Aggregate in Process of Central Plant Hot Recycling [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science Edition), 2018, 48 (2): 46-52.
- [18] YAN C Q, HUANG W D, LIN P, et al. Chemical and Rheological Evaluation of Aging Properties of High Content SBS Polymer Modified Asphalt [J]. Fuel, 2019, 252: 417-426.
- [19] REBELO L M, DE SOUSA J S, ABREU A S, et al. Aging of Asphaltic Binders Investigated with Atomic Force Microscopy [J]. Fuel, 2014, 117 (Pt. A): 15-25.
- [20] LIU B, SHEN J N, SONG X Y. Changes in Nanoscaled Mechanical and Rheological Properties of Asphalt Binders Caused by Aging [J]. Journal of Nanomaterials, 2015, 2015: 1-6.
- [21] HETTIARACHCHI C, HOU X D, XIANG Q, et al. A Blending Efficiency Model for Virgin and Aged Binders in Recycled Asphalt Mixtures Based on Blending Temperature and Duration [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104957.
- [22] LO PRESTI D, VASCONCELOS K, OREŠKOVIĆ M, et al. On the Degree of Binder Activity of Reclaimed Asphalt and Degree of Blending with Recycling Agents [J]. Road Materials and Pavement Design, 2020, 21 (8): 2071-2090.
- (上接第7页)
- [9] 陈忠达, 袁万杰, 高春海. 多级嵌挤密实级配设计方法研究 [J]. 中国公路学报, 2006, 19 (1): 32-37.
- CHEN Zhong-da, YUAN Wan-jie, GAO Chun-hai. Research on Design Method of Multilevel Dense Built-in Gradation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19 (1): 32-37.
- [10] 杜顺成, 戴经梁. 以剪切模量为控制指标的级配设计方法 [J]. 公路交通科技, 2010, 27 (5): 47-51.
- DU Shun-cheng, DAI Jing-liang. Grading Design Method Based on Shear Modulus [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2010, 27 (5): 47-51.
- [11] 韩雪. 高温多雨地区沥青路面修筑关键技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2018.
- HAN Xue. Study on Key Technique of Asphalt Pavement Construction in High Temperature and Rainy Area [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2018.
- [12] 杜顺成, 刘丽萍, 戴经梁. 高抗剪能力粗集料级配设计方法 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (4): 27-32.
- DU Shun-cheng, LIU Li-ping, DAI Jing-liang. Method of Coarse Aggregate Gradation Design with Higher Anti-shearing Ability [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (4): 27-32.
- [13] 杜顺成. 沥青混合料高温稳定性评价指标和级配设计方法研究 [D]. 西安: 长安大学, 2007.
- DU Shun-cheng. Study of Evaluation Index of High-temperature Stability and Design Methodology for Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [14] 张肖宁, 郭祖辛, 吴旷怀. 按体积法设计沥青混合料 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1995 (2): 28-36.
- ZHANG Xiao-ning, GUO Zu-xin, WU Kuang-huai. Volume Method of Bituminous Mixture Design [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995 (2): 28-36.
- [15] 龙艳飞. SMA 沥青路面抗滑性能优化设计与应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- LONG Yan-fei. Design and Application Research on Anti-sliding Performance of SMA Pavement [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2017.
- [16] 何壮彬. SMA 混合料级配特点及结构指标研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
- HE Zhuang-bin. Study on Gradation Features and Structure Indexes of Stone Matrix Asphalt Mixture [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [17] 贾锦绣, 韩森, 徐鸥明. 沥青稳定碎石混合料的抗剪性能 [J]. 长安大学学报 (自然科学版), 2009, 29 (3): 23-26.
- JIA Jin-xiu, HAN Sen, XU Ou-ming. Anti-shearing Performance of Asphalt Treated Base Mixtures [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2009, 29 (3): 23-26.
- [18] 刘娜. 泡沫沥青与乳化沥青冷再生混合料中长期使用性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
- LIU Na. Study on Long-mid Term Performance of Cold Recycled Mixture with Foamed Asphalt and Emulsified Asphalt [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.