

# SAC 和其他粗集料断级配的 矿料级配设计方法

沙庆林

(交通部公路科学研究所 北京市 100088)

**摘 要:** 详细介绍了 SAC 和其他粗集料断级配沥青混凝土的矿料级配设计原理和计算方法。通常粗集料的级配是一个幂函数, 有 40% 左右的孔隙率; 细集料是另一个幂函数, 是一个很密实的级配。两者结合在一起, 组成一个以粗集料为主体的密实式中断级配。

**关键词:** 级配设计; 粗集料主体; 密实式; 中断级配

笔者曾经总结分析了当前国际上沥青混凝土矿料级配的发展方向是粗集料断级配。SAC 是 1988 年我国自主研究开发成功的粗集料断级配, 到 20 世纪末, 逐渐形成了从 SAC10 到 SAC30 系列。

## 1 设计原则

从设计角度讲, 由于矿料级配对沥青混凝土的性质有很重要的作用, 所以早在 100 年以前, 在美国就有一些学者开始研究矿料的级配问题。传统的连续密级配计算公式就是在 20 世纪初, 由美国学者 Fuller 根据最大密度理论提出的。美国 SHRP 于 1993 年春发表的 Superpave (SUP) 中又提出了 7 个控制点和一个限制区的矿料级配设计方法。但后者并没有作为一项硬性要求。后来的一些试验证明通过限制区的矿料级配, 其沥青混凝土的性质甚至还优于不通过限制区矿料级配沥青混凝土的性质。

SUP 矿料级配组成方法的发表, 实际上等于在美国已放弃了使用了近百年的传统连续级配。应该说, SUP 的矿料级配设计方法没有明确的原则, 属于纯经验性的。其矿料级配密实性有余, 骨架性不足, 是一种悬浮式密实结构。

20 世纪 90 年代初, 美国德克萨斯州交通厅根据混合料中碎石与碎石最佳接触的理论, 提出了新粗骨架高结合料含量混合料的设计方法。以大于 2.00 mm 的颗粒为粗集料, 但此方法仅是确定粗集

料含量的方法, 并没有提供粗细集料各自的级配方法。美国于 2002 年又发表了热拌混合料矿料级配的贝雷设计方法。据介绍, 其基本思想是要用粗集料形成骨架, 使设计的沥青混凝土具有较高的高温抗永久形变能力。同时通过调整粗细集料的比例, 获得合适的 VMA, 以保证设计的混合料具有较好的耐久性。

SAC 矿料级配的设计原则是用粗集料形成骨架, 用细集料和沥青填充骨架中的孔隙, 使设计的沥青混凝土既密实、空隙率小, 使水不容易透入, 又具有较高的高温抗永久形变能力。用作表面层时, 还具有良好的抗滑性能。根据沿线气温和交通量及车辆组成的需要, 既可设计成骨架密实结构, 又可设计成密实但骨架稍有撑开的结构, 甚至设计成悬浮式密实结构。

但是, 不管用什么方法设计出的矿料级配, 都必须在室内用合适的仪器进行沥青混凝土性能的试验研究, 以证明其性能确实符合要求。更重要的, 还必须通过工程实践的检验, 证明其实际使用性能满足要求。

## 2 当前矿料级配设计存在的问题

### 2.1 传统连续式密级配沥青混凝土

前面提到的美国学者富勒提出的组成最大密度沥青混凝土的公式, 称富勒 (Fuller) 氏公式, 见式 (1):

$$P_d = \left( \frac{d}{D} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中:  $d$  为某一筛孔尺寸, mm;  $D$  为最大粒径, mm;  $P_d$  为筛孔尺寸  $d$  的通过百分率, %。

直到 1964 年, 美国联邦公路局才将幂值 0.5 改为 0.45, 使矿料级配较细。该公式为许多国家的道路工作者使用了大半个世纪, 在美国一直使用到 1993 年。按照上述幂函数组成的矿料级配, 由于已使用了近百年, 所以俗称其为传统连续式密级配。国外常用的沥青混凝土孔隙率, 20 世纪 80 年代以前为 2%~5%。后来, 有的国家采用 3%~5%, 也有国家采用 3%~4%。

我国《公路沥青路面施工技术规范》(JTJ 032—94) 中的 AC—xxI 属于这种传统连续式密级配沥青混凝土, 其孔隙率被定为 3%~6%。现在看来,  $V_a$  达 6% 显然偏大。

## 2.2 粗集料断级配沥青混凝土

矿料中, 粗集料占一半以上, 同时不能用一个幂函数拟合矿料级配曲线时, 称做粗集料断级配沥青混凝土。

粗集料断级配沥青混凝土有法国 1982 年建立的 BBM (薄沥青混凝土)、德国 1984 年制定规范的 SMA、我国 1988 年研究成功的 SAC 和美国 1993 年发表的 SUP。实际上, 粗集料断级配沥青混凝土有悬浮式密实结构和骨架密实结构两种。

(1) 国外只有对传统连续级配有一个矿料级配计算方法, 即美国的 Fuller 公式, 已有约 100 年历史; 前苏联也有一个计算方法, 称 K 法; 国内林绣贤教授也提出过一个计算方法, 称 I 法。

(2) 对于目前广泛使用的粗集料断级配沥青混凝土的矿料级配, 国内外文献上都没有看到有具体的计算方法。各个国家都凭自己的经验确定一个较宽的级配范围或一条级配曲线 (仅法国)。让使用者按照较宽范围的中值和根据矿料的组成, 自己选择一条级配曲线。美国的 SUP 要求先做 3 条矿料级配曲线的试验, 通过沥青混合料配合比试验选定一条合适的级配曲线。然后通过试验确定所选定级配的沥青混凝土的性能指标是否符合要求。如不符合要求, 就重新调整级配和再重复做试验。

① 这种方法不能事先判断, 甚至初步判断所用的矿料级配将提供什么性能, 如其沥青混凝土的透水性如何, 抗高温永久变形能力如何, 可能要用多少沥青, 以及如果性能不符合要求, 该如何调整级

配, 等等。

由于这种方法的严重缺点, 使用者只能凭自己的经验在规定的级配范围内进行调整, 或按照规定范围的中值配料。配出来的沥青混凝土的物理—力学性质是否符合要求, 则心中无数。只能等待性能试验做完后, 才能知道矿料级配是否合适。但是, 性能的指标值又缺少实践依据。

② 这种方法费时、费力 and 费钱。

(3) 为了弥补上述方法的缺点, 国内外都有学者在研究如何为粗集料断级配提供一个合适的矿料级配设计方法, 例如以下方法。

① 美国的 Bailey (贝雷) 法。

国内有些学者和路面工程师认为, 采用此方法设计出的沥青混合料, 在压实后具有良好的骨架结构, 同时可以达到密实的效果。贝雷法按照惯例将沥青混合料中的矿料分为形成骨架的粗集料和填充孔隙的细集料, 只是粗细集料的分界筛孔尺寸随标称最大粒径  $D_{\max, n}$  而变。通常采用 0.22 倍标称最大粒径的筛孔作为粗细集料的分界点。同时将此分界点作为第一个控制筛孔 (PCS), 将 0.22 倍 PCS 的筛孔尺寸作为第二个控制点 FAC, 将 0.22FAC 的筛孔尺寸作为第三个控制点 FAF。然后用下列 3 个比值, 见式 (2)、式 (3) 和式 (4) 检验曲线:

$$CA = \frac{\left( P_{D_{\max, n}} - P_{PCS} \right)}{\left( 100 - P_{D_{\max, n}} \right)} \quad (2)$$

$$FAC = \frac{P_{FAC}}{P_{PCS}} \quad (3)$$

$$FAF = \frac{P_{FAF}}{P_{FAC}} \quad (4)$$

式中:  $P_{D_{\max, n}}$  为  $\frac{1}{2}$  标称最大粒径筛孔的通过质量, %;  $P_{PCS}$  为第一个控制筛孔尺寸的通过质量, %;  $P_{FAC}$  为第二个控制筛孔尺寸的通过质量, %;  $P_{FAF}$  为第三个控制筛孔尺寸的通过质量, %。

贝雷法要求 CA 值在 0.4~0.8 之间, 并认为 CA 值小于 0.4, 沥青混合料容易产生离析和难以压实; 要求 FAC 值和 FAF 值都小于 0.5。

据介绍, 用贝雷法做矿料级配设计非常复杂, 整个计算和修正过程需要有相应的试验规程和计算机设计程序。该方法从理论基础到实际应用都还存在着一些问题, 例如: 采用的是平面三圆模型, 控制点和级配参数计算都是采用的标准筛孔尺寸, 并没有真正按照 0.22 倍确定的筛孔的通过质量 (%) 来计

算 $CA$ 值、 $FA_C$ 值和 $FA_F$ 值。也没有考虑填料的填充作用等。因此,实际上在国内仅将它用于检验级配,而且即使这3个比值没有全符合要求,沥青混凝土的性能也不一定不好。相反,即使这三个比值全符合要求,也不一定不产生水破坏。实际上,贝雷法只控制几个点的通过量,如AC-19,只控制9.5 mm、4.18 mm、0.92 mm和0.20 mm等4个筛孔的通过量,如含19 mm的通过量,则相当于只控制5个筛孔的通过量。对于这5个筛孔之间共7个筛孔的通过量,没有说明该如何控制。国内也有人认为,贝雷法可能只适用于SUP的矿料级配检验。但SUP仅是悬浮式密实结构,与前面所称贝雷法是骨架结构且密实又不一致。

②CAVF(粗集料孔隙填充)法是国内张肖宁教授等提出的。该法用大于4.75 mm的粗集料的紧装密度和表观密度(或称视密度)计算粗集料的孔隙率,在此孔隙率中保留少量混合料所要求的孔隙,其余的孔隙都被细集料、填料和沥青的体积填充。这个方法从原理上讲是合适的,但主要有两个值得商讨的问题。其一是,没有明确用什么方法确定紧装密度,是用干捣实法还是用马歇尔击实法。这两种方法目前都有人在用,而两者的结果却有明显差异。例如某种集料和级配的试验表明,干捣实法粗集料的孔隙率是41.7%,马歇尔击实100次的孔隙率是42.3%。第二是,用表观密度并不合适,在此应用毛体积密度。此外,CAVF法只能用来检验原材料矿料级配是否符合骨架密实结构和据此确定粗集料、细集料和填料各自占的质量百分比,没有提供粗集料和细集料各自应有的矿料级配组成,也没有考虑实际沥青混凝土中,集料要吸收部分沥青。

### 3 SAC 矿料级配设计方法

以下以SAC为例,说明粗集料断级配矿料级配设计方法。

SAC矿料级配分三部分:一部分是粗集料;第二部分是细集料;第三部分是填料。粗细集料的分界线统一为4.75 mm。也就是最大粒径 $D_{\max}$ ~4.75 mm为粗集料,4.75 mm~0.075 mm为细集料,小于0.075 mm为填料。所以,其矿料级配计算也分别按粗集料和细集料(事先确定填料含量)两部分进行。前面已经说明,SAC是以粗集料为主的断级配。SAC发展的初期,粗集料含量 $\geq 60\%$ ,中期粗集料的含量60%~70%,近几年来,主要为65%~

75%。SAC实际上包括悬浮式密实结构和骨架密实结构两种。因此,描述粗集料级配曲线的幂函数应该具有较大的幂值,使粗集料具有40%左右的孔隙率。细集料是填充在粗集料孔隙中的,要求它比较密实,所以描述细集料矿料级配的幂函数应有较小的幂值。根据最新的研究,随岩石品种而异,骨架密实结构与悬浮式密实结构的分界线为粗集料含量67%左右。含量在此分界线以上的常是骨架密实结构,在分界线以下的常是悬浮式密实结构。在进行SAC的矿料级配设计时,要首先确定分界粒径以上的粗集料含量为65%或70%,即4.75 mm筛孔的通过量为35%或30%,同时确定标(或公)称最大粒径 $D_{\max, n}$ 的通过量为95%~100%。然后再分别计算粗集料的级配和细集料的级配。SAC研究成功后的16年来,使用的粗粒式、中粒式和细粒式SAC都有6个控制点,即:标称最大粒径处两个点,通常为通过量95%和100%,也可以是90%~100%之间的某两个值;筛孔尺寸4.75 mm处两个点,通过量原来为30%和40%,近几年来改为25%和35%;筛孔尺寸0.075 mm处两个点,通过量为6%和10%。这6个控制点实际上就形成了一个较宽的级配范围。本文中,做矿料级配设计时,常使用两个控制点的中值,所以实际上常使用3个控制点。一个控制点是标称最大粒径的通过量,如95%、97.5%或100%;第二个控制点是4.75 mm筛孔的通过量,如30%或35%;第三个控制点是0.075 mm筛孔的通过量,如4%~10%之间的某一个值。必要时,也可以在4.75 mm和0.075 mm两个筛孔间再设立一个控制点,如1.18 mm筛孔的通过量。利用3个控制点,计算两段级配曲线。如利用4个控制点,就计算3段级配曲线。第一段是描述粗集料,其孔隙率较大,约为40%左右;第二段是描述细集料(含填料),细集料应是密实式集料。这两段曲线各有自己的幂函数,两段曲线连接一起组成一根完整的中断级配曲线。如计算3段曲线,则细集料有两段不连续曲线。这3段曲线连接一起也组成一根完整的中断级配曲线。由于此中断级配曲线以粗集料含量为主,所以SAC是粗集料断级配沥青混凝土。

在本文中,对于矿料级配不再像以往那样,对粗细级配都给出一个较宽的级配范围,而是只使用一根矿料级配曲线。因为级配范围过宽,控制不住沥青混凝土的性质,级配范围过窄,难于实现。提供一根经过初步检验的级配曲线,规定一个允许变动的小误差。一旦满足不了规定的小误差,需要变动,还可

以利用本文所提供的矿料级配计算方法进行调整,并利用后续论文提供的检验方法进行检验。同时提出一些主要技术指标,供矿料级配设计时使用。笔者认为,这样做比规定一个级配范围,更有利于保持沥青混凝土性质的稳定。

这样做,实际上与以往做生产配合比设计后,只有一根级配曲线相同。一旦此级配曲线被确定,严格地说,不应该再允许有明显变化。只有这样,才能保持生产配合比确定的沥青混凝土的物理、力学性质比较稳定。因此,对 SAC 只提供一根经过初步检验的级配曲线,相当于不需要使用者在规定范围内,通过试验去自己找一条合适的级配曲线。

### 3.1 粗集料的级配计算

粗集料级配计算的基本公式:

$$P_{d_i} = A \left( \frac{d_i}{D_{\max}} \right)^B \quad (5)$$

式中:  $P_{d_i}$  为筛孔尺寸  $d_i$  的通过量,%;  $D_{\max}$  为矿料的最大粒径,mm;  $d_i$  为某筛孔尺寸,mm;  $A$ 、 $B$  分别为系数。

确定矿料级配的标称最大粒径  $D_{\max, n}$  后,设定  $D_{\max, n}$  和 4.75 mm 两个筛孔的通过量,就可以利用式(5)得出相应的粗集料级配的计算公式。

计算例:

(1) SAC20。

由于 SAC20 的最大粒径  $D_{\max}$  为 26.5 mm, SAC20 的标称最大粒径  $D_{\max, n}$  为 19 mm,所以设定 19 mm 筛孔的通过量为 97.5%。同时设定 4.75 mm 的通过量为 30%,由此可以建立下列两个联立方程:

$$97.5 = A \left( \frac{19}{26.5} \right)^B$$

$$30 = A \left( \frac{4.75}{26.5} \right)^B$$

解此联立方程可得系数  $A = 129.377$ ,  $B = 0.85022$

由此可得计算 SAC20 粗集料级配的公式

$$P_{d_i} = 129.38 \left( \frac{d_i}{26.5} \right)^{0.8502} \quad (6)$$

按式(6)计算得出的 SAC20 粗集料的级配列在表 1 中,编号 3-1。

也可以设定  $D_{\max, n}$  的通过量为 100%,此时两个联立方程为:

$$100 = A \left( \frac{19}{26.5} \right)^B$$

表 1 各种 SAC 粗集料的级配

编号	筛孔/mm	37.5	31.5	26.5	19	16	13.2	9.5	4.75
1-1	SAC30	100	95	86.6	72.6	66.3	59.9	50.4	30
1-2		100	100	89.6	72.5	65	57.5	46.6	30
2	SAC25		100	100	79.2	70.2	61.4	48.7	30
3-1	SAC20			100	97.5	84.2	71.5	54.1	30
3-2				100	100	86.1	72.9	54.8	30
4-1	SAC16				100	97.5	80.9	58.8	30
4-2						100	82.6	59.6	30
5-1	SAC16				100	97.5	82.9	62.8	35
6-1	SAC13					100	97.5	66.7	30
6-2						100	100	67.9	30

$$30 = A \left( \frac{4.75}{26.5} \right)^B$$

解此联立方程得:

$$P_{d_i} = 133.5 \left( \frac{d_i}{26.5} \right)^{0.8685} \quad (7)$$

计算 SAC20 粗集料矿料级配的公式为式(7)。

按式(7)计算得的 SAC20 粗集料的级配也列在表 1 中,编号 3-2。

室内外的实践证明,使  $D_{\max, n}$  的通过量为 100%,优于其通过量为 95% 和 97.5%。

(2) SAC16。

① 由于 SAC16 的最大粒径  $D_{\max}$  为 19 mm, SAC16 的标称最大粒径  $D_{\max, n}$  为 16 mm,先设定该筛孔的通过量为 97.5%,同时设定 4.75 mm 的通过量为 30%,由此可以建立下列两个联立方程:

$$97.5 = A \left( \frac{16}{19} \right)^B$$

$$30 = A \left( \frac{4.75}{19} \right)^B$$

解此联立方程可得系数  $A = 115.2$ ,  $B = 0.9705$ 。

由此可得计算 SAC16 粗集料级配的公式:

$$P_{d_i} = 115.2 \left( \frac{d_i}{19} \right)^{0.9705} \quad (8)$$

按式(8)计算得到的 SAC16 粗集料的级配也列在表 1 中,编号 4-1。

$D_{\max, n}$  的通过量为 100% 时的粗集料级配,也列在表 1 中,编号 4-2。

② 如果其他不变,只要求 4.75 mm 筛孔的通过量为 65%,则用同样的方法可以建立下列两个联立方程:

$$97.5 = A \left( \frac{16}{19} \right)^B$$

$$35=A\left(\frac{4.75}{19}\right)^B$$

解此联立方程可得系数  $A=112.7, B=0.843\ 6$ 。

由此可得计算 SAC16 粗集料级配的公式:

$$P_{d_i}=112.7\left(\frac{d_i}{19}\right)^{0.843\ 6}\tag{9}$$

按式(9)计算得到的 SAC16 粗集料的级配也列在表 1 中,编号 5-1。

用同样的方法可以计算得到 SAC30、SAC25、SAC13 和 SAC10 等粗集料的级配计算公式。现将各种 SAC 粗集料级配的计算公式汇列如下。

编号 1-1 SAC30 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=104.00\left(\frac{d_i}{37.5}\right)^{0.527\ 8}$$

编号 1-2 SAC30 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=111.73\left(\frac{d_i}{37.5}\right)^{0.636\ 4}$$

编号 2 SAC25 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=112.87\left(\frac{d_i}{31.5}\right)^{0.700\ 4}$$

编号 3-1 SAC20 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=129.38\left(\frac{d_i}{26.5}\right)^{0.850\ 2}$$

编号 3-2 SAC20 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=133.50\left(\frac{d_i}{26.5}\right)^{0.868\ 5}$$

编号 4-1 SAC16 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=115.2\left(\frac{d_i}{19}\right)^{0.970\ 5}$$

编号 4-2 SAC16 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=118.57\left(\frac{d_i}{19}\right)^{0.991\ 4}$$

编号 5 SAC16 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=112.7\left(\frac{d_i}{19}\right)^{0.843\ 6}$$

编号 6-1 SAC13 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=121.7\left(\frac{d_i}{16}\right)^{1.153\ 2}$$

编号 6-2 SAC13 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=125.44\left(\frac{d_i}{16}\right)^{1.178}$$

编号 7-1 SAC10 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=170.6\left(\frac{d_i}{13.2}\right)^{1.70}$$

编号 7-2 SAC10 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=177.07\left(\frac{d_i}{13.2}\right)^{1.737}$$

编号 7-3 SAC10 粗集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=179.3\left(\frac{d_i}{13.2}\right)^{1.852\ 3}$$

3.2 细集料的级配计算

细集料级配计算的基本公式的型式与粗集料级配的计算公式(5)相同,只是把式右侧的分母  $D_{\max}$  改为 4.75。细集料可以是一根级配曲线,需要时也可以是两根级配曲线。

计算例:

SAC30

由于 4.75 mm 筛孔通过量应与计算粗集料级配时的通过量相同,已定为 30%,在此确定 0.075 mm 筛孔的通过量为 4%,可以建立下列的联立方程:

$$30=A\left(\frac{4.75}{4.75}\right)^B$$

$$4=A\left(\frac{0.075}{4.75}\right)^B$$

解此联立方程,可得  $A=30$  和  $B=0.485\ 7$

由此可得计算 SAC30 细集料级配的公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.485\ 7}\tag{10}$$

用同样的方法,只要设定 0.075 mm 筛孔的通过量,就可以得到其他 SAC 细集料级配的计算公式。现将各种 SAC 细集料级配的计算公式汇列如下。

编号 1-1 SAC30 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.485\ 7}$$

编号 1-2 SAC30 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.485\ 7}$$

编号 2 SAC25 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.485\ 7}$$

编号 3-1 SAC20 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.431\ 9}$$

编号 3-2 SAC20 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.350\ 8}$$

编号 4-1 SAC16 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.350\ 8}$$

编号 4-2 SAC16 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.497\ 7}\quad P_{d_i}=15.0\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.332\ 5}$$

编号 5-1 SAC16 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=35\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.425\,1}$$

编号 6-1 SAC13 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.318\,6}$$

编号 6-2 SAC13 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.657\,9}$$

编号 7-1 SAC10 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.318\,6}$$

编号 7-2 SAC10 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.657\,9}$$

编号 7-3 SAC10 细集料级配的计算公式:

$$P_{d_i}=27\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.29}$$

如果为了某种需要,也可以将细集料的级配计算分成两段。例如,对于SAC16,希望控制1.18 mm筛孔的通过量为15%和0.075 mm筛孔的通过量为6%。为满足此要求,需要将4.75~1.18 mm作为第一段,将1.18~0.75 mm作为第二段(见上列编号4-2)。

第一段的联立方程为:

$$30=A\left(\frac{4.75}{4.75}\right)^B$$

$$15=A\left(\frac{1.18}{4.75}\right)^B$$

解此联立方程,可得第一段矿料级配的公式为:

$$P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.497\,7}\tag{11}$$

第二段的联立方程为:

$$15=A\left(\frac{1.18}{1.18}\right)^B$$

$$6=A\left(\frac{0.075}{1.18}\right)^B$$

解此联立方程,可得第二段矿料级配的公式为:

$$P_{d_i}=15\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.332\,5}\tag{12}$$

有了上述这些粗集料和细集料的矿料级配计算公式,就可以方便地计算出任何一个规定筛孔尺寸和非规定筛孔尺寸的通过量。

用上述公式由编号1-1到编号6-2计算得出的各种SAC的粗集料的级配都列在表1中。

由于SAC10粗集料的粒径范围小,只是4.75 mm~9.5 mm,按照我国习惯用的筛孔,只有4.75 mm~9.5 mm、9.5 mm~13.2 mm两个粒级

的矿料,而且后一粒级的矿料只有2.5%。如将9.5 mm作为实际最大粒径,大于9.5 mm的颗粒作为超尺寸颗粒废弃,大于4.75 mm的粗集料只有一个粒级,其用量却高达70%。为更好地控制矿料级配,需要在筛孔4.75 mm和9.5 mm之间增加一个筛孔7.5 mm的筛。

用上述SAC10的公式,计算得到的SAC10粗集料的矿料级配列在表2中。

用上述公式计算得到的各种SAC细集料的级配列在表3中。

表 2 SAC10 粗集料的级配

编号	筛孔/mm	13.2	9.5	7.5	4.75
7-1	SAC10	100	97.5	65.3	30
7-2	SAC10		100	66.3	30
7-3	SAC10	100	97.5	62.9	27

表 3 各种SAC 细集料的级配

编号	筛孔/mm	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	备注
1-1	SAC30	21.4	15.2	11	7.8	5.6	4	
1-2	SAC30	21.4	15.2	11	7.8	5.6	4	
2	SAC25	21.4	15.2	11	7.8	5.6	4	
3-1	SAC20	22.2	16.4	12.3	9.1	6.7	5	
3-2	SAC20	23.5	18.4	14.5	11.4	9.0	7	
3-3	SAC20	23.5	18.4	12.9	8.9	6.6	4.8	①三段
4-1	SAC16	23.5	18.4	14.5	11.4	9	7	
4-2	SAC16	23.5	18.4	11.3	6.8	6.4	6	②三段
5-1	SAC16	26	19.4	14.5	10.8	8	6	
6-1	SAC13	24	19.2	15.5	12.4	10	8	
6-2	SAC13	18.9	12	10.1	8.5	7.1	6	③两段
7-1	SAC10	24	19.2	15.5	12.4	10	8	
7-2	SAC10	27	24.3	17.2	12	8.5	6	④三段
7-3	SAC10	22	17.9	14.7	12	10	8	

表 3 备注中:

① 第一段为  $P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.350\,8}$ , 第二段为  $P_{d_i}=18.4\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.527}$ , 第三段  $P_{d_i}=8.9\left(\frac{d_i}{0.3}\right)^{0.438\,1}$ ;

② 第一段为  $P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.350\,8}$ , 第二段为  $P_{d_i}=18.4\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.726\,86}$ , 第三段为  $P_{d_i}=6.8\left(\frac{d_i}{0.3}\right)^{0.090\,29}$ ;

③ 第一段为  $P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.657\,9}$ , 第二段为  $P_{d_i}=12\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.251\,5}$ ;

④ 第一段为  $P_{d_i}=30\left(\frac{d_i}{4.75}\right)^{0.150\ 6}$ , 第二段为  $P_{d_i}=24.3\left(\frac{d_i}{1.18}\right)^{0.515\ 22}$ , 第三段为  $P_{d_i}=12\left(\frac{d_i}{0.3}\right)^{0.5}$ 。

3.3 矿料级配表的使用说明

(1)不同标称最大粒径 SAC 的矿料级配表,即表1、表2和表3是互相对应配合使用的。表1中的3号SAC20和4号SAC16粗集料的级配应与表3中的3号SAC20和4号SAC16细集料的级配相配合使用。在表3中3号细集料有3个级配,4号细集料有两个级配。

(2)表1和表3中SAC30、SAC25用作底面层或基层,SAC25、SAC20用做中层, SAC16、SAC13用作表面层,SAC10用作很薄(厚2~2.5 cm)和超薄面层。

(3)表1~表3中的级配与以前建议使用的级配有以下差别。

①以前提供的是一个级配范围,如4.75 mm 筛孔的通过量为30%~40%,现在只提供一条级配曲线。这是为了避免在级配范围内随意变动,从而导致沥青混凝土的性质产生明显变化。在进行沥青混合料设计和其他物理力学性质试验时,均按提供的级配曲线准备粗、细集料。用试验测定各个粒级粗细集料的毛体积密度、填料的视密度和沥青的密度后,用后读论文中的 $VCA_{DRF}$ 方法初步检验符合要求后,或需要调整后,就可以用此级配或调整后的级配曲线制备沥青混合料;在拌和厂进行目标配合比设计时,也按提供的级配曲线或调整的级配曲线计算冷料配合比,此时,不同筛孔通过量的允许误差见表4。由于矿料级配对沥青混凝土的性质影响很大,在组成的矿料级配有较大误差时,建议按后读论文所述骨架密实结构或悬浮式密实结构检验方法进行检验,必要时对粗、细集料和填料的配合比进行调整,并重新按上述矿料级配设计方法计算各个筛孔的通过量(%)。

②以前提供的粗集料的总量占35%(指规定范围的中值),或4.75 mm 的通过量为65%,这次多数改成粗集料占70%。因为室内的比较试验证明,粗集料占70%的SAC的抗剪切变形性能,或高温抗永久形变能力优于粗集料占65%的SAC;也因为粗集料占65%的SAC为悬浮式密实结构。实际工程也表明,粗集料占70%的SAC10、SAC13和SAC16表面层的粗糙度和外观均匀性都优于粗集料占65%的表面层。

表 4 不同筛孔通过量的允许误差

级配类型	通过下列筛孔(mm)质量百分率的允许误差/%					
	$D_{\max, n}$	>9.5	4.75	2.36	0.3	0.075
SAC10	±0.5		±0.7	±1.5	±1.5	±1.0
SAC13	±0.5	±0.5	±0.7	±1.5	±1.5	±1.0
SAC16	±0.5	±0.5	±0.7	±1.5	±1.5	±1.0
SAC19	±0.5	±0.5	±0.7	±1.5	±1.5	±1.0
SAC25	±0.5	±0.5	±0.7	±1.5	1.5	±1.0
SAC30	±0.5	±0.5	±0.7	±1.5	1.5	±1.0

③室内试验的经验证明,令 $D_{\max, n}$ 的通过量为100%,有利室内试件的均匀性和减小试验结果的变异性。施工现场的经验也证明,没有 $D_{\max, n}$ 以上的粗颗粒,可改善集料离析现象,使表面较均匀美观。这点对粗粒式和中粒式SAC尤其重要。因此,在表1和表2中,对同一种SAC都列出了 $D_{\max, n}$ 通过质量为100%的矿料级配。

④这次提供的级配中细集料的含量少于以前提供的级配。因为以前偏重于沥青混凝土的密实性和透水性小,细集料较多,有利于增加沥青混凝土的密实性;以前室内马歇尔试验时沥青混合料的击实温度偏低,所得最佳沥青用量偏大;近几年来由于击实温度提高,同样级配的沥青混合料的最佳沥青用量降低。沥青用量降低了,但沥青混凝土的抗剪切变形能力却没有提高,说明矿料级配中细集料偏多。细集料偏多,不利于提高沥青混凝土的高温抗永久形变能力。近几年来,高等级公路,特别是国道主干线高速公路上重载货车数量显著增加,对沥青混凝土的高温抗永久形变能力,提出了更高的要求。以前细集料偏多的级配已满足不了新的要求。但是,在减少细集料时,不能影响沥青混凝土的空隙率或透水性较小的要求。

增加粗集料和减少细集料,可使矿料级配成为骨架密实结构,将其用在夏季高温地区的重载交通高速公路上,更有利于减轻沥青混凝土路面的辙槽。

⑤表3中,从SAC20~SAC10细集料都有两个级配,主要是考虑了矿料的岩石类型不同时,虽然级配相同,但马歇尔试验的结果会有明显差别。可以说,列两个级配是为了适应不同岩石类型的碎石集料。到底哪个级配比较合适,都还要通过后续论文所述矿料级配检验方法进行检验。

(4)关于层厚 $h$ 与标称最大粒径 $D_{\max, n}$ 的关系。对于用热拌沥青混凝土铺筑的结构层,国内外通

常都采用层厚 $h$ 是标称最大粒径 $D_{\max, n}$ 的2.5~3倍,在某些情况下,可以是两倍左右。例如,1998年制定的欧洲SMA标准草案中规定 $D_{\max, n}$ 为4 mm的级配 $D_4$ 的最小层厚为12 mm,  $D_{\max, n}$ 为6.3 mm的级配 $D_6$ 的最小层厚为15 mm,  $D_{\max, n}$ 为8 mm的级配 $D_8$ 的最小层厚为20 mm,  $D_{\max, n}$ 为11.2 mm的级配 $D_{11}$ 的最小层厚为25 mm,  $D_{\max, n}$ 为14 mm的级配 $D_{14}$ 的最小层厚为30 mm,  $D_{\max, n}$ 为16 mm的级配 $D_{16}$ 的最小层厚为30 mm,  $D_{\max, n}$ 为20 mm的级配 $D_{20}$ 的最小层厚为40 mm,  $D_{\max, n}$ 为22.4 mm的级配 $D_{22}$ 的最小层厚为40 mm。由上述规定可以看到,仅层厚12 mm的超薄磨耗层是 $D_{\max, n}$ 的3.0倍,其他为2.38倍、2.5倍、2.23倍、2.14倍、1.88倍、2.0倍和1.78倍,而且面层下层的倍数最小。美国佐治亚州高速公路沥青面层的典型结构,其表面层是厚19 mm的OGFC-12.7( $D_{\max, n}$ 为12.7 mm),也就是层厚是 $D_{\max, n}$ 的1.5倍。我国在2000年以前建成的高速公路,其沥青混凝土面层常是表面层厚4 cm的AC-16I、SAC16或SMA16,中面层常是厚5 cm的AC-25和底面层常是厚6 cm的AC-25或AC-30或SAC25;它们的层厚是 $D_{\max, n}$ 的2.5倍、1.89倍和1.90倍。所有这些高速公路都没有通车不到一年就产生非常严重的水破

坏和辙槽,更没有几乎达到全线崩溃的程度。甚至通车3~5年后也没有产生较严重的水破坏。即使第一个强调层厚应等于 $D_{\max, n}$ 3倍的省,当时已建成的沥青混凝土路面高速公路总里程已超过面层过早全线崩溃高速公路总长的十几倍。它们的面层结构和厚度几乎相同,表面层厚4 cm,只是前者采用的是SAC16,后者采用的是AK16C,中面层都是厚5 cm的AC25I,它们的 $h/D_{\max, n}$ 全相同。表面层的比值是2.5,中面层的比值是1.89。为什么前者总长300多km没有产生过早严重破坏现象,而长度不到前者十分之一的后者开放交通不到一年,沥青混凝土面层就几乎全线崩溃?其原因显然不是层厚没有达到标称最大粒径的3倍。在吉林省有一条长约70 km的高速公路,沥青混凝土面层只有两层,表面层为厚4 cm的SAC16,至今已近7年,面层基本完好。1988年10月完成的京石高速公路正定试验路中,共有7段总长1200 m其表面层为厚3 cm的SLH20(即现在的SAC16)沥青混凝土,也就是层厚为 $D_{\max, n}$ 的1.88倍。使用近10年,这些试验路段没有产生显著破坏现象。而且其中的多数仅有不可避免的横向温度裂缝。总之,沥青混凝土层的厚度是标称最大粒径的2~3倍,片面强调应是3倍是没有任何实践依据的。

## 投 稿 须 知

《公路》月刊于1956年创刊,由中华人民共和国交通部主管,是中国公路行业出版最早的中央级技术类科学技术期刊,是公路运输类核心期刊,是交通部和全国优秀科技期刊。

1. 本刊刊登的内容以实用科学、实用技术为主,兼顾理论研究、科学实验与标准规范,还包括方针、政策、管理等内容,对技术水平领先、有创造性、适用推广价值较高的文章优先刊登。

2. 投寄本刊的稿件,可以是原稿,也可以是打印稿或E-mail文稿(作者必须与原稿核对无误,并签字认可),具体格式请参照本刊近期出版的《公路》杂志。稿件请作、译者自留备份,本刊概不退稿。若文章被采用,本刊即行寄样刊和稿酬,不再另发“用稿通知”。

3. 文稿应有“摘要”和“关键词”。“摘要”为全文的浓缩,以提供文章内容梗概为目的,不加评论和补充解释,简明、确切地记述文章重要内容。“关键词”为“摘要”的浓缩,可选3~8个。

4. 文章中科技术语和名词,请用规定的通用词语。文章内容应符合国家标准和各种行业标准要求,应使用法定计量单位。公式、图表应清晰准确,符合国家标准要求。各级标题应明确、清晰。

5. 文章中摘编、引用他人作品,请遵守《著作权法》规定在参考文献中写出。

6. 文章著作权,除《著作权法》另有规定外,属于作者。文责自负。署名作者的人数和顺序由作者自定。

7. 文章题目、摘要及关键词、作者的姓名和工作单位名称,要求作者翻译成英文。

8. 来稿请注明作者的真实姓名、工作单位和详细地址、电话。作者本人的详细信息,包括:学历、简历、身份证号码。请作、译者注意:来稿作者信息不详者,稿件一律不采用。

9. 所有来稿文责自负。

10. 投稿方式:

您可直接将稿件寄给本刊,地址见本刊“目次”页;

您还可通过E-mail:paper@chn-highway.com投稿。通过E-mail投稿的作者请注意留下详细联系地址及电话,否则本刊不接受投稿。