

基于集料特性的沥青混合料级配设计

孙承吉¹, 李玉鑫¹, 胡家波^{2,3}, 符东绪^{2,3}

¹山东高速股份有限公司, 山东 济南

²山东省交通科学研究院, 山东 济南

³高速公路养护技术交通行业重点实验室(济南), 山东 济南

Email: 18653160896@163.com

收稿日期: 2021年4月6日; 录用日期: 2021年4月23日; 发布日期: 2021年4月30日

摘要

多级嵌挤沥青混合料经过多年的工程应用证明了其具有良好的路用性能, 但由于当前料源多边形及加工工艺发生很大的变化, 对于吸水率偏大密度偏小且棱角性较强的特殊石料, 事实证明要想达到理想的混合料体积指标, 就需要增加沥青的用量, 结合级配设计理论及实践经验, 需要对混合料的级配组成进行一定的优化设计。本文借鉴SMA间断级配和林秀贤前辈提出的这段级配理论, 对强棱角性集料用于中面层密级配沥青混合料进行了尝试性的级配优化。设计结果证明, 对于强棱角性等特殊集料为了保证混合料的骨架结构同时为了确保压实效果, 在增加粗骨料和细集料用量的同时减少中间部分骨料, 可以达到低沥青用量的同时又保证了混合料的骨架结构和密实性。但是由于粗骨料的用量偏多, 在施工过程中需要对混合料的离析现象加以考虑, 确保混合料整体的均匀性。

关键词

集料特性, 级配理论, 级配设计, 多级嵌挤, 路用性能

Gradation Design of Asphalt Mixture Based on Aggregate Features

Chengji Sun¹, Yuxin Li¹, Jiabo Hu^{2,3}, Dongxu Fu^{2,3}

¹Shandong Expressway Company Limited, Jinan Shandong

²Shandong Transportation Research Institute, Jinan Shandong

³Key Laboratory of Highway Maintenance Technology Transportation Industry (Jinan), Jinan Shandong

Email: 18653160896@163.com

Received: Apr. 6th, 2021; accepted: Apr. 23rd, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

The multi-stage embedded asphalt mixture has been proved to have good road performance after years of engineering application. However, due to the great changes in the current material source polygon and processing technology, for the special stone with high water absorption, small density and strong angularity, it has been proved that in order to achieve the ideal volume index of mixture, it is necessary to increase the amount of asphalt. Combined with the theory and practical experience of gradation design, the gradation composition of mixture should be optimized. Based on SMA discontinuous gradation and the grading theory proposed by Lin Xiuxian, this paper makes a common sense gradation design for dense graded asphalt mixture with strong angular aggregate. The design results show that for special aggregates such as strong angularity, in order to ensure the skeleton structure of the mixture and to ensure the compaction effect, the amount of coarse aggregate and fine aggregate can be increased and the discontinuous gradation of the middle part of aggregate can be reduced, which can ensure the skeleton structure and compactness of the mixture. However, due to the large amount of coarse aggregate, the segregation phenomenon of the mixture should be considered in the construction process to ensure the overall uniformity of the mixture.

Keywords

Aggregate Features, Gradation Theory, Gradation Design, Multi-Stage Inlay, Pavement Performance

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

沥青混合料由于具有良好的行车舒适性、密水性、经久耐用等特点,在各等级道路中得到大面积应用。沥青混合料由矿料、填料及沥青胶结料经拌合制成,有些特殊混合料还需要增加一些外加剂。而矿料级配是混合料性能好坏的基础,另外选用沥青胶结料的类型也会对混合料的性能产生一定的影响。众所周知,混合料的材料组成中,集料的占比一般在90%以上,集料的矿料级配决定着路面的结构强度、路面的抗滑等表面功能以及混合料抵抗行车荷载作用下的车辙变形能力。而集料与沥青的黏结性是路面的抗水损害能力和路面的耐久性的决定性因素。因此,必须对集料的矿料级配进行合理的设计和限定,以确保混合料骨架结构的形成,同时还需要对集料的强度力学指标及形状、软弱颗粒等物理指标进行相应的限制以保证混合料具有足够的强度。

但是近年来,集料的料源及加工特性发生了很大的变化,给沥青混合料的设计带来了一定的挑战,在日常过程中发现有些集料不能再按照传统理论进行混合料级配的设计,必须根据集料的料源特性及加工特性做出有针对性的级配优化调整。基于此,本文通过级配设计理论的深入分析,以工作实际经历为例,对不同集料料源特性及加工特性的级配设计进行初步探讨。

2. 级配设计理论[1][2]

严家骥在其著作道路建筑材料一书中对沥青混合料的级配来源进行了详细的描述,关于级配的研究

其实最早起源于我国的堆积理论[1]。但是由于理论模型和实际情况存在着巨大的差异性,导致这一理论在级配应用上没有得到很好的发展。纵观矿料级配理论的发展过程,目前还是主要以最大密实曲线理论和粒子干涉理论为主要理论依据。最大密实曲线理论二十世纪初由美国学者 W.B.富勒(Fuller)提出的,它从集料按比例组成可以达到最大密实度的角度出发来确定级配中各种粒径的分布,主要对连续级配的粒径分布进行了描述,多用来进行连续级配的计算[2]。C.A.G.魏矛斯(Weymouth)所提出的粒子干涉理论认为,为了达到最大密实度,高级颗粒之间形成的空隙应该由次一级的颗粒进行填充,但是填充的颗粒粒径不能大于上级颗粒间隙见的距离,否则大小颗粒之间会发生干涉现象。为了避免颗粒之间形成干涉,大小粒径颗粒之间必须按照一定的规则进行数量上的分配。粒子干涉理论对连续级配、间断级配和折断级配的计算都适用[2]。可以说后来山东省交通科研究院王林团队所提出的多级嵌挤密实型级配,就是在对粒子干涉理论研究基础上提出的。

2.1. 级配类型分类

在最大密实曲线和粒子干涉理论基础上,衍生了多种矿料级配类型,比如众人比较熟悉的连续式密级配,以 SMA 为代表的间断级配,还有同济大学林绣贤前辈在总结间断级配存在问题基础上提出的折断级配,以及山东省交通科学研究院王林团队提出的多级嵌挤密实型级配。以上几种级配类型各有特点,代表了沥青混合料矿料级配的发展历程[3]。连续式级配是 Fuller 的最大密实曲线理论的直接应用,理想的连续式级配曲线接近抛物线,在公路建设早期得到了很好的应用,随着现代车辆荷载不断凸显,采用传统连续式密级配修建的路面,由于高温抗剪切能力不足导致的车辙、波浪、推移等病害。为了应对各种病害的产生,需要混合料具有更高的强度以抵抗高温时的剪切,间断级配由于兼顾了骨架嵌挤和密实的原则,具有更高的骨料间的内摩阻力和黏聚力而且密实性也好,但是此种级配类型对材料、设计和施工技术水平提出了更高的要求,随着材料加工工艺的改进,机械设备的不断更新,目前该种级配类型已在全国得到了大面积的推广应用,尤其是为代表的 SMA 结构更是占据了高速公路建设的半壁江山。九十年代,同济大学林绣贤前辈针对间断级配的不足,所提出的折断级配由于实际操作中存在一定的困难,也没有得到很好的推广应用。2000 年前后山东交科院王林团队为了解决当时的水损害问题对美国 Baily 设计法[4]进行了系统研究后提出了多级嵌挤密实级配。该级配类型将传统连续密实级配和间断级配混合料优点进行了结合,它强调了集料颗粒之间的相互嵌挤,理论上保持了密实级配沥青混合料密水性强、耐老化的优点,同时弥补了原规范中 II 型混合料抗水损害能力和耐久性差不足的缺点,更加适用于我国高速公路和重载交通条件下的沥青路面。

2.2. 级配计算方法

针对以上几种级配类型,相关学者又提出了相应的级配计算方法,比如 N、K、I 法,但都是基于理论提出的级配计算方法,未与实际工程中使用的材料特性相结合,对于实际级配设计起不到指导作用,是不能直接用来进行沥青混合料级配设计的。实际中,大部分国家根据工程实际经验确定比较宽泛的级配范围供使用者自行选择,而法国是比较特殊的,仅制定一条级配曲线。

美国的 Superpave [5]初步提出了级配优化设计的思路,首先调试出 3 条级配曲线进行级配的验证,根据验证结果选择其中最优的一条级配曲线。然后进行沥青用量的选择性验证,最后对选定的级配在进行最佳沥青用量下的性能验证以最终确定级配。但是此方法是不能对级配效果进行事先预判,同时也没有给出如何对级配进行调整的方法和建议。

美国伊利诺州交通部的罗伯特·贝雷(Robert Bailey)发明的贝雷法[4]和张肖宁教授所提出的 CAVF 法[6]都是基于为沥青混合料级配提供一个合适的级配设计、评价和调整方法的目的而发明的。贝雷法可以

说是比较系统的级配设计方法,提出了需要将矿料按照粒径进行粗细划分,同时还提出了粗细集料分界筛孔尺寸随公称最大粒径的不同而不同的思想。贝雷法给出了三个级配评价的关键参数 CA、FAf、FAC。张肖宁教授提出的 CAVF (沥青混合料组成设计主骨料填充法)是将 4.75 mm 筛孔尺寸作为粗细集料分界点,利用 4.75 mm 以上粗集料的紧装密度和集料的表现相对密度来计算粗集料的空隙率,除保留少量混合料设计所需求的空隙外,其余空隙均被细集料、填充料和沥青体积来填充。薛小刚[3]在其研究中对该方法提出了三点值得商榷的地方,第一他认为该方法仅是解决了粗细集料和成比例的问题,而没有彻底解决粗细集料各自矿料级配组成的根本问题,第二该方法的适用性问题,用于间断级配没有什么问题,但如果永续骨架嵌挤密级配时则还需要进行相应的改进,第三将所有级配类型均按照 4.75 mm 作为粗细集料的分界点是否合适是有待商榷的。

3. 集料特性

美国 SHRP 计划研发过程中研究者在 Superpave 设计时采用了两种集料特性:认同特性和料源特性[5],其中集料的棱角性、扁平、细长颗粒含量和粘土含量被称为认同特性,这些特性在使用和规范值方面具有广泛的认同性,因此被称为认同特性;而石料的坚固性、安定性、风化颗粒含量是由材料本身所决定的,被称作料源特性。而我国规范[7]中粗细集料的技术指标多达 15 项,其中集料的各种密度、吸水率、坚固性、粘附性、压碎值、洛杉矶磨耗、磨光值等指标是由石料本身岩石属性所决定的,可以称之为“料源特性”。而集料的针片状颗粒含量、棱角性等指标受加工工艺的影响会有所区别,为此我们将其称之为“加工特性”。

3.1. 料源特性

根据以上描述,在料源选定的情况下,集料的密度、吸水率、坚固性、与沥青的粘附性、磨耗值和磨光值等指标与石料的加工工艺关系不大甚至根本不受加工工艺的影响。因此,将之称之为料源特性。

集料的密度和吸水率主要决定了混合料的沥青用量,集料吸水率大,则被吸收的沥青越多,则混合料沥青用量越大。我国规范对于集料吸水率的规定相对比较严格,虽然 Superpave 无集料吸水率控制指标,但为了避免使用高吸水率的集料,许多州也是最集料吸水率进行了最高值的规定,根据统计[8]有 36% 的州允许使用吸水率 5% 以上的集料,65% 的州允许使用吸水率 4% 以上的集料。即美国、加拿大大部分州允许的集料最大吸水率为 4%,而我国规范[7]对集料吸水率规定为不能大于 2%,吸水率大于 3% 的多孔隙石料,需经建设单位批准同意后方可使用。

沥青的粘附性则决定着混合料的抗水损害能力,集料与沥青的粘附性等级越高,则混合料的抗水损害能力越强,反之则越弱。

磨耗值和磨光值,表征是石料的耐磨性,决定了混合料的抵抗车轮磨耗和磨光的能力,对路面的抗滑能力具有决定性作用。

集料压碎值用于衡量石料在逐级加载作用下抵抗压碎的能力,是石料强度的相对指标,用于鉴定石料品质。压碎值主要取决于石料的岩性,但压碎值的大小跟集料的加工工艺也有一定的关系,同一岩性石料,采用不同破碎工艺情况下,其棱角性和针片状含量会有差异,从而也会对压碎值的大小产生一定的影响。

3.2. 加工特性

集料的棱角性、针片状含量受集料破碎加工方式的影响很大,同一岩性的石料采用不同的破碎加工工艺时,其加工后的集料棱角性和针片状含量差别很大。当然棱角性和针片状含量也一定程度上受料源

特性的影响,不同岩性的石料其强度等级差异很大,这就造成在加工过程中即使加工工艺相同,但加工后的集料棱角性和针片状含量差异挺大。但主要是由加工工艺特性决定的。

4. 混合料级配设计

以公程实际中遇到的山东某地产石料为例,在指标检测时发现其密度偏小,吸水率偏大,且棱角性非常好。将其用于混合料设计时,分别按照多级嵌挤密实级配和折断级配两种级配类型进行了混合料的设计。根据室内试验过程来看,针对特殊石料在混合料设计时如不对其集料特性加以分析,得出的结果差别非常大。表 1 为各规格集料检测结果。

Table 1. The density and water absorption of aggregate

表 1. 各档规格集料密度及吸水率

集料规格	毛体积相对密度	表观相对密度	吸水率, %
0~3 mm	2.508	2.651	2.2
3~6 mm	2.570	2.704	1.93
6~11 mm	2.586	2.691	1.50
11~16 mm	2.627	2.718	1.28
16~22 mm	2.661	2.730	0.94

根据表 1 测试的各档规格集料的密度及吸水率来看,相比石灰岩其密度偏小、吸水率偏大。这个指标的差异在混合料级配设计时如不加注意就会导致级配设计的结果差别很大。

4.1. 多级嵌挤密实型级配设计

按照多级嵌挤密实型级配进行了混合料设计,此时未考虑密度偏小及集料棱角性等因素。根据马歇尔击实过程反馈,加料量偏低,马歇尔试件测试结果显示毛体积相对密度[9]很小,吸水率偏大,孔隙率偏大。如果要想达到合适的体积指标,相比常规石灰岩至少需要增加 0.3% 的沥青用量。多级嵌挤密实型级配曲线合成如图 1 所示,室内混合料设计结果如表 2。

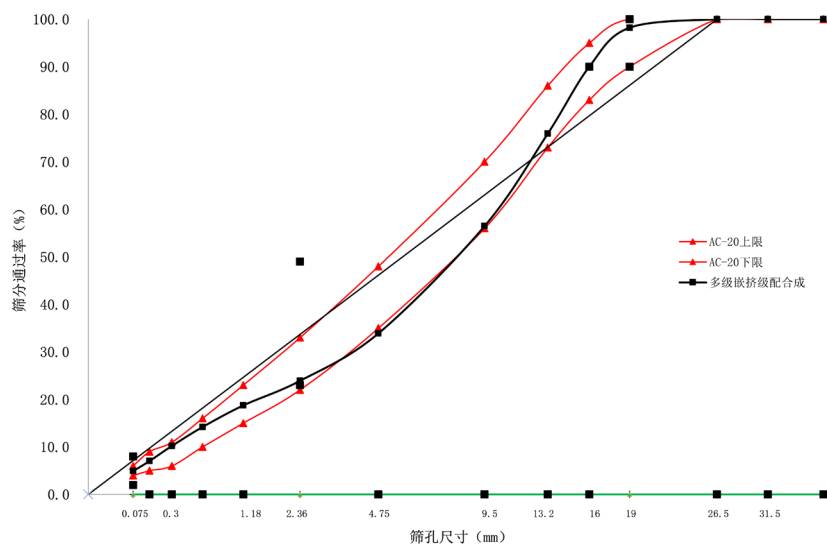


Figure 1. Multi-grade stone-to-stone gradation

图 1. 多级嵌挤级配合成曲线

Table 2. Design volume index of multi-grade stone-to-stone
表 2. 多级嵌挤级配设计体积指标

沥青用量, %	最大相对理论密度	毛体积相对密度	孔隙率, %	矿料间隙率, %	沥青饱和度, %
4.2	2.481	2.332	6.0	13.8	56.2
4.5	2.470	2.333	5.1	13.6	62.3
4.8	2.459	2.357	4.1	13.4	69.0
设计指标	-	-	4~6	≦13.0	65~75

根据表 2 数据显示, 沥青用量在 4.5% 时孔隙率为 5.1%, 且沥青饱和度不能满足要求, 室内配比设计时一般孔隙率控制在 4.5%, 根据内插法计算此时沥青用量为 4.68%, 矿料间隙率 VMA 为 13.48%, 沥青饱和度为 66.3%, 各项指标能够满足要求。相比常采用的石灰岩此时确定的沥青用量明显偏高。

4.2. 间断级配设计

根据以上所述, 同时考虑到此种集料棱角性较强, 借鉴 SMA 的级配理论及林绣贤[2]前辈提出的折断级配理论进行了级配调整。增加粗骨料和 4.75 mm 以下细集料的比例, 减少中间部分骨料, 在保证混合料粗骨架的同时减少中间部分骨料对于骨架结构的影响, 同时增加了 4.75 mm 以下细集料保证了混合料的密实。级配合成曲线如图 2 所示。

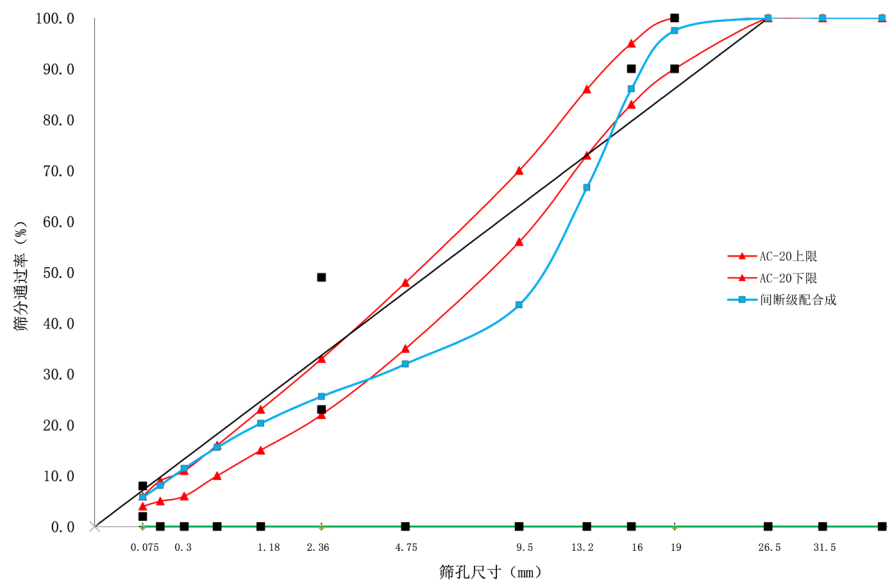


Figure 2. Gap gradation curve
图 2. 间断级配合成曲线

Table 3. Design volume index of gap gradation
表 3. 间断级配设计体积指标

沥青用量, %	最大相对理论密度	毛体积相对密度	孔隙率, %	矿料间隙率, %	沥青饱和度, %
4.2	2.486	2.347	5.6	13.5	58.7
4.5	2.475	2.373	4.1	12.8	68.0
4.8	2.464	2.377	3.5	13.0	72.8
设计指标	-	-	4~6	≦13.0	65~75

根据表 3 数据显示, 沥青用量在 4.5% 时孔隙率为 4.1%, 根据室内配比设计时一般孔隙率控制在 4.5%, 按照内插法计算此时沥青用量为 4.42%, 矿料间隙率 VMA 为 13.0%, 沥青饱和度为 65.62%, 按照此级配设计各项指标满足要求的情况下最佳沥青用量与常采用的石灰岩基本相当。

根据以上采用两种级配类型对该集料进行级配设计来看, 对于棱角性强且吸水率偏大的集料, 采用多级嵌挤密实级配进行设计时要想达到设计的孔隙率需要增加沥青用量; 借鉴 SMA 间断或者折断级配理论进行设计, 增加粗骨料和细集料的比例, 减少中间骨料比例, 在保证骨架密实的同时, 实现了沥青用量的小幅度降低。

5. 结束语

以上是作者根据工程项目建设过程中针对料源多变及加工工艺发生变化情况下, 采用两种级配类型进行级配设计的过程, 根据实践经验证明, 在当前集料料源多变及加工工艺发生明显变化的情况下, 有必要根据集料的料源特性和加工特性有针对性地进行混合料的级配设计, 以期达到工程建设就地取材减少工程建设成本, 同时又能达到混合料设计性能最佳的效果, 但采用折断级配时由于粗骨料用量的增加, 施工过程中要严格控制施工工艺, 减少由于粗骨料增加导致的离析现象的出现。

参考文献

- [1] 严家伋. 道路建筑材料[M]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [2] 林绣贤. 柔性路面结构设计方法[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [3] 薛小刚. 沥青混合料级配优化及配合比设计方法研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2005.
- [4] Transportation Research Board (2002) Baily Method for Gradation Selection in Hot Mix Asphalt Mixture Design. Transportation Research Circular E-C004.TRB. Transportation Research Board, Washington DC.
- [5] 贾俞, 等, 编译. 高性能沥青路面(Superpave)基础参考手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [6] 张肖宁, 王绍怀, 吴旷怀, 等. 沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J]. 公路, 2001(12): 17-21.
- [7] 中交公路科学研究所. JTG F40-2004 公路沥青路面施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 吴卓. 不同料源特性集料在抗滑表层中的适应性研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [9] 交通运输部公路科学研究院. JTG 20-2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.