

文章编号:1671-8879(2008)01-0021-05

矿料间隙率标准研究进展

郝培文¹,徐金枝¹,肖 曼²,陈仁芳³

(1. 长安大学 道路结构与材料交通行业重点实验室,陕西 西安 710064;

2. 西安公路研究所,陕西 西安 710054; 3. 江西省交通设计院,江西 南昌 330002)

摘 要:矿料间隙率作为沥青混合料主要体积指标之一,对沥青混合料合理的体积组成设计及优良的使用性能具有重要影响。通过查阅、汇总和分析大量国内外相关文献,对矿料间隙率的计算方法、影响因素、最小值标准的发展历程及其与沥青膜厚的关系进行了综述。认为基于集料公称最大粒径的现有矿料间隙率最小值标准不太合理,今后应对集料特性、集料级配组成以及沥青膜厚与矿料间隙率的相互关系开展进一步研究,并结合实体工程路面混合料的性能,建立更加合理的矿料间隙率标准或找到更好的替代方案。

关键词:道路工程;矿料间隙率;最小值标准;沥青膜厚;综述

中图分类号:U411

文献标志码:A

Review on requirement of voids in mineral aggregates

HAO Pei-wen¹, XU Jin-zhi¹, XIAO Man², CHEN Ren-fang³

(1. Key Laboratory for Road Structure and Material of Transportation Industry, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Xi'an Research Institute of Highway, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

3. Jiangxi Province Institute of Communications Design, Nanchang 330002, Jiangxi, China)

Abstract: As one of the major volumetric indexes, the voids in mineral aggregates have an important effect on the volumetric design of asphalt mix. Based on lots of correlative literatures, this paper reviews the calculating method and influencing factors of the voids in mineral aggregates, the developing course of the requirement of the voids in mineral aggregates and its relation to asphalt film. It is consumed that the existing minimum requirement of voids in mineral aggregates, only based on aggregates nominal maximum size, is unreasonable. More studies should be devoted to the relationship between the voids in mineral aggregates and aggregates characteristics, gradation and asphalt film, and the mixture performance of practical projects should also be considered to find the reasonable requirement or a potential alternative plan. 2 tabs, 3 figs, 17 refs.

Key words: road engineering; voids in mineral aggregates; minimum requirement; asphalt film; review

0 引 言

沥青混合料是由沥青结合料、集料和空隙组成

的三相体系。传统的沥青混合料级配设计方法(如马歇尔法)以及一些新的级配设计法(如贝雷法),其设计思想都是通过合理调整这三相体系的组成比

收稿日期:2007-02-18

作者简介:郝培文(1967-),男,内蒙古和林人,教授,博士研究生导师,E-mail:haopw@yahoo.com.cn。

例,以使沥青混合料获得适宜的体积组成,包括矿料间隙率(VMA)、剩余空隙率(VV)和沥青填隙率(VFA)^[1]。作为重要的体积指标之一,VMA 定义为压实沥青混合料中集料颗粒间的空隙体积占混合料总体积的百分率。确定合理的 VMA 指标,为了使集料级配既能提供一定的空间,容纳足够的沥青结合料,以保证混合料的耐久性,同时还保留一定的剩余空隙,以保证混合料的稳定性^[2-3]。

20 世纪初,研究人员就注意到 VMA 与沥青混合料耐久性的关系,但是直到 40 多年前,通过 Mcleod N W 博士的努力,VMA 才真正成为沥青混合料的一个重要设计参数^[4-6]。美国 SHRP 计划的实施进一步促进了对 VMA 的研究,并确定了 VMA 最小值的标准,由其间接决定某一设计集料级配能否予以接受。然而,随着 Superpave 体积设计法的应用,出现了 VMA 最小值标准很难满足的问题。一些性能良好、经济合理的混合料组成,特别是 Superpave 粗级配混合料,因不满足 VMA 最小值标准而遭否决。VMA 最小值标准究竟是否合适,其确定的依据是否合理,对今后沥青混合料组成设计的发展有着重要的影响。为此,本文对 VMA 标准的确立与演变历程以及 VMA 与沥青混合料性能之间的关系进行系统地分析与综述,以期有利于今后更加科学、合理地进行沥青混合料体积组成设计,进而改善沥青混合料的使用性能。

1 VMA 的计算方法

VMA 是压实沥青混合料中矿料部分以外体积占试件总体积的百分率,即混合料的剩余空隙率与沥青体积百分率之和。由于矿料表面存在开口孔隙,因此对包裹其表面的沥青有一定的吸收作用。在实际的沥青混合料设计中,是否考虑集料对沥青的吸收作用,会产生两种不同的 VMA 计算结果。中国传统的沥青混合料设计通常不考虑集料对沥青的吸收作用,VMA 主要采用式(1)进行计算;新的《公路沥青路面施工技术规范》(JTG F40-2004)引入了美国 SHRP 计划的 Superpave 体积设计法思想,考虑有效沥青体积、集料的有效密度等概念。采用式(2)进行 VMA 计算,更符合实际情况,尤其是对吸水率大的集料。式(2)也可以表示成式(3)的形式。

$$I_{VMA} = \frac{P_b \gamma_f}{\gamma_s} + I_{VV} \tag{1}$$

$$I_{VMA} = \frac{P_{be} \gamma_f}{\gamma_s} + I_{VV} \tag{2}$$

$$I_{VMA} = 100(1 - \frac{P_s \gamma_f}{\gamma_{sb}}) \tag{3}$$

式中: I_{VMA} 为矿料间隙率; I_{VV} 为剩余空隙率; P_b 为沥青质量分数; P_{be} 为有效沥青质量分数; P_s 为矿质混合集料的质量分数; γ_f 为压实沥青混合料试件的毛体积相对密度; γ_s 为沥青的相对密度; γ_{sb} 为矿质混合集料的合成毛体积相对密度。

2 VMA 的影响因素

矿料级配组成、矿料表面形状与纹理影响矿料颗粒间的嵌挤排列情况及内摩擦力、矿料表面对沥青具有一定的吸收能力,这些因素均对混合料的 VMA 等体积指标产生影响。此外,沥青混合料施工中各个环节也对 VMA 造成较大影响,如混合料拌和及摊铺温度过高、储存时间与运输距离较长等都会导致更多的沥青被矿料吸收,造成 VMA 减小。

3 VMA 标准的演变历程

3.1 Mcleod N W 对建立 VMA 标准的贡献

Mcleod N W 博士最早将 VMA 作为沥青混合料的设计参数,为 VMA 标准的建立及发展做出了突出贡献。1955 年,他首次发表了对压实沥青混合料空隙特性的研究成果,提出了 VMA 最小值标准的基本原理^[4],并且强调了对于吸水性大的集料,在其体积指标计算中应该使用集料的毛体积相对密度,否则计算的 VMA 和 VFA 都是错误的。同时,针对早期的马歇尔混合料设计方法,Mcleod N W 提出了一种修正的马歇尔设计法,其中设定了最小 VMA 为 15% 的要求^[5],这样在空隙率为 3%~5% 情况下就能保证混合料中至少含有体积分数为 10% 的沥青,即相当于质量分数为 4.5% 的沥青用量。图 1 是 Mcleod N W 据此提出的一个沥青混合料

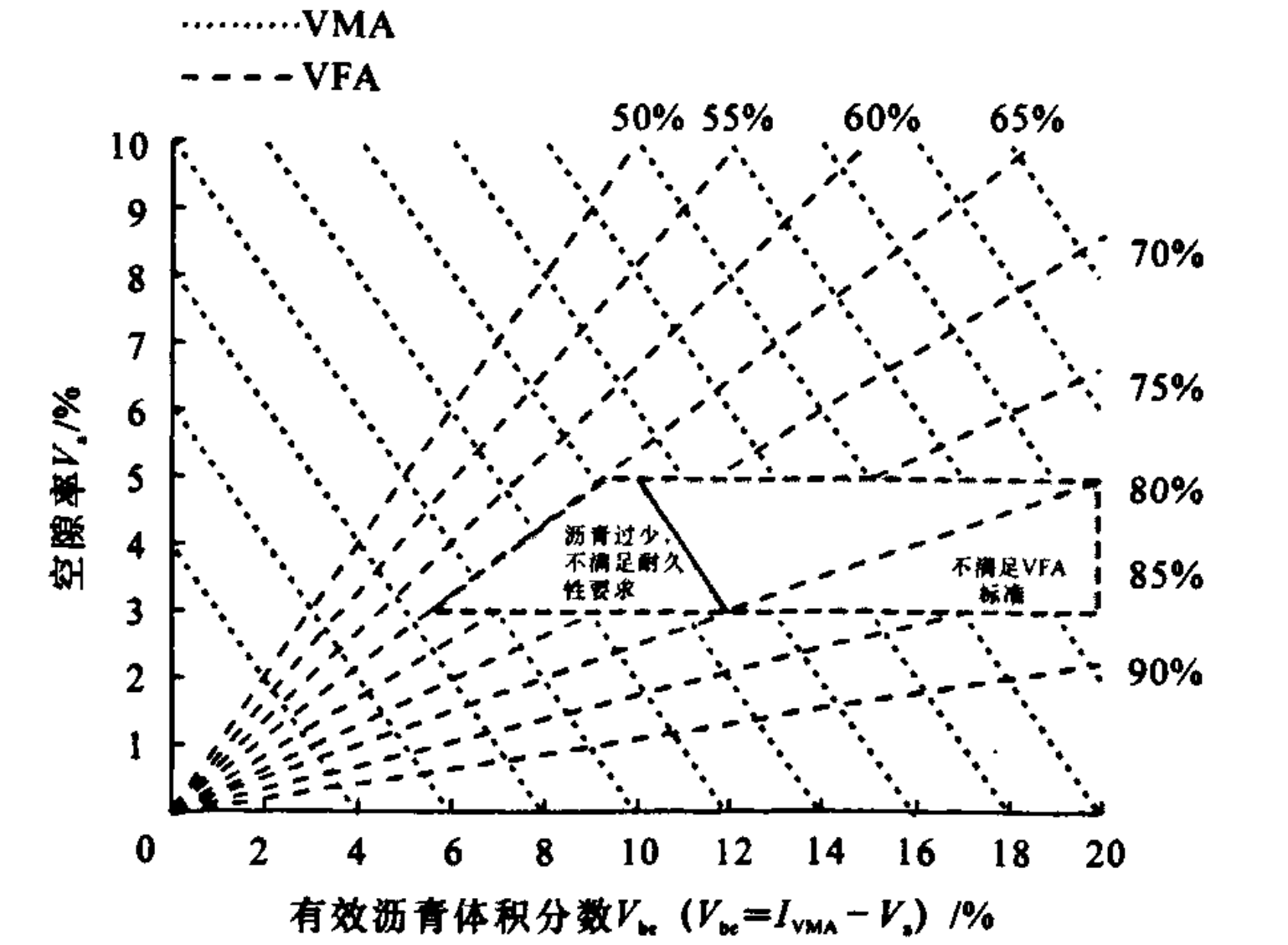


图 1 VMA 与 VFA 的关系曲线

体积指标关系图。Mcleod N W 基于最小沥青质量分数为 4.5%,1957 年,建立了 15%的 VMA 最小值标准。

Mcleod N W 进一步强调,分析混合料体积应使用毛体积相对密度和有效沥青体积分数^[6]。如果沥青混合料的空隙率控制在 3%~5%,那么 15%的最小 VMA 标准(相当于 67%~80%的 VFA)比 75%~85%的 VFA 标准更易满足。相隔两年后 Mcleod N W 重申^[7],为确保沥青混合料的耐久性,沥青用量(质量分数)最小应为 4.5%,但没有提供任何试验数据以支持基于此最小沥青用量的 VMA 标准。他的另一个重要研究成果是开创性地提出了 VMA 最小值与集料公称最大粒径的关系,如图 2 所示,此成果于 1964 年被美国沥青协会所采纳^[8]。这一关系建立的基础是,集料采用毛体积密度,混合料空隙率为 5%。同样,Mcleod N W 也没有给出建立这一关系的背景资料。

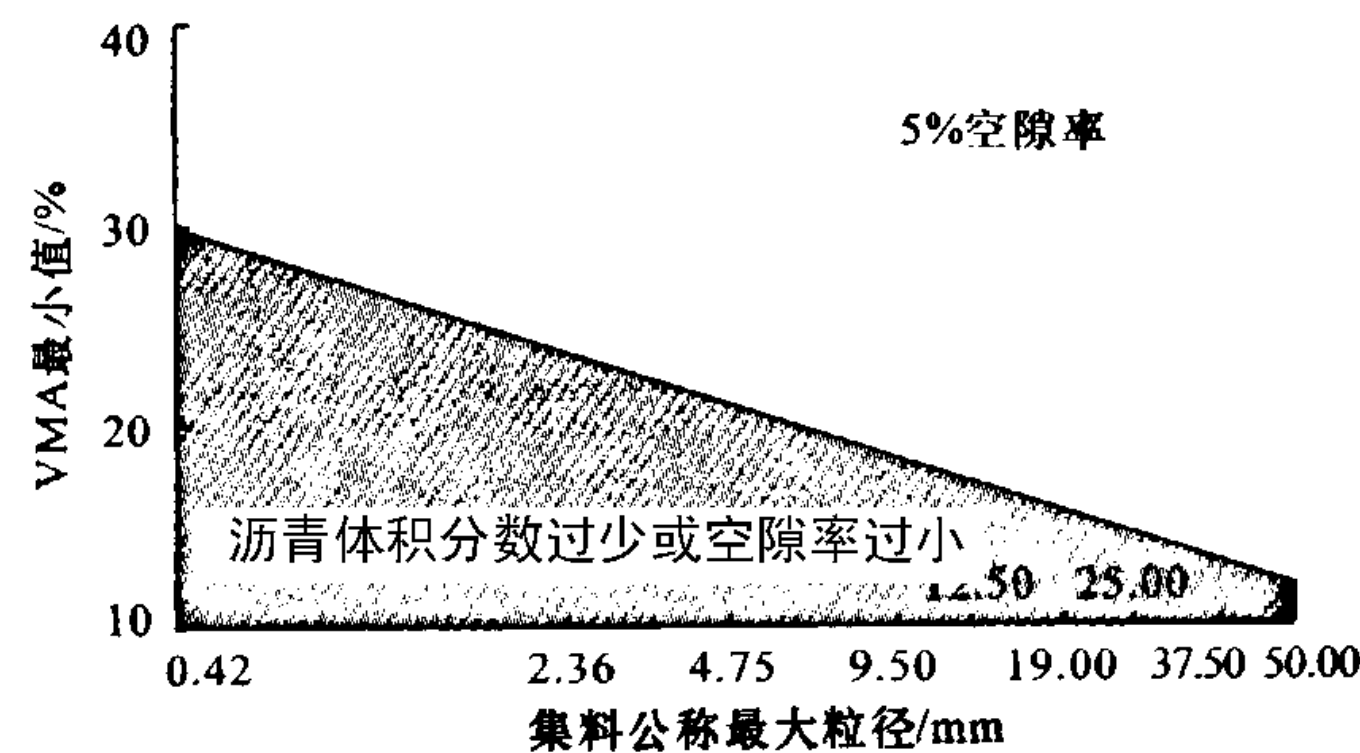


图 2 集料公称最大粒径与 VMA 最小值的关系

1987 年,Mcleod N W 再次强调了在混合料设计中使用 VMA 指标的主张^[9]。他指出,为避免重复,不应对 3 个体积参数(空隙率、VMA、VFA)同时设定标准;为了实用,建议应采用基于集料公称最

大粒径的 VMA 最小值标准和空隙率标准。

虽然 Mcleod N W 对 VMA 的研究成果缺乏一定的相关数据或背景资料予以支持,但他指出 VMA 标准是随进一步的试验数据和经验积累而逐步变化的。Mcleod N W 的研究为其后的沥青混合料设计提供了重要的指导,也为 VMA 标准的进一步深入研究奠定了坚实的基础。

3.2 VMA 标准的发展

Mcleod N W 对 VMA 标准的研究引起了道路同行的广泛关注,很多研究者对此产生了浓厚的兴趣,继而对 VMA 标准建立的依据、标准的适用性及修正完善展开了大量研究。

考虑到 Mcleod N W 提出的 15%VMA 低限值标准是基于 5%的空隙率,显然,与 4%空隙率对应的最小 VMA 也应降低 1%。因此,1993 年美国沥青协会标准 MS-2 对早期的标准做了修改,给出了相应于 3%、4%和 5%空隙率的最小 VMA 标准,如表 1 所示。该标准被 Superpave 混合料设计体系所采纳。

表 1 不同设计空隙率下的最小 VMA 值

设计空隙率/%	集料公称最大粒径(mm)下最小 VMA 值/%									
	1.18	2.36	4.75	9.50	12.50	19.00	25.00	37.50	50.00	63.00
3.0	21.5	19.0	16.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.0	9.5	9
4.0	22.5	20.0	17.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.0	10.5	10
5.0	23.5	21.0	18.0	16.0	15.0	14.0	13.0	12.0	11.5	11

Mallick R B 等人对 5 种不同集料公称最大粒径的沥青混合料进行研究^[10],结果发现,2.36 mm 筛孔通过率对 VMA 有显著影响。因此,他们认为根据 2.36 mm 筛孔通过率确定 VMA 标准将是一种更加合理的途径,其针对密级配沥青混合料提出的 VMA 标准如表 2 所示。

表 2 基于集料公称最大粒径和 2.36 mm 筛孔通过率的最小 VMA 建议标准

9.50 mm		12.50 mm		19.00 mm		25.00 mm		37.50 mm	
2.36 mm 通过率/%	VMA/%	2.36 mm 通过率/%	VMA/%	2.36 mm 通过率/%	VMA/%	2.36 mm 通过率/%	VMA/%	2.36 mm 通过率/%	VMA/%
67~62	16.6	58~53	15.8	49~44	14.0	45~40	13.8	41~36	13.6
62~57	16.2	53~48	15.5	44~39	13.7	40~35	13.4	36~31	13.2
57~52	15.7	48~43	15.2	39~34	13.4	35~30	13.1	31~26	12.8
52~47	15.4	43~38	14.9	34~29	13.1	30~25	12.7	26~21	12.2
47~42	15.0	38~33	14.5	29~23	12.7	25~19	12.3	21~15	11.7
42~37	14.6	33~28	14.1						
37~32	14.2								

Anderson R M 和 Bentsen R A 就 VMA 对 Superpave 粗、细级配混合料性能的影响进行了研究^[11],指出 VMA 值从 13%增大到 15%,可使细级配混合料剪切疲劳特性提高 50%,同时较小程度地影

响其高温劲度和抗车辙性能;但同样增大 VMA,则明显削弱了粗级配混合料的高温劲度和剪切疲劳特性,粗级配混合料对 VMA 的变化较细,级配混合料更为敏感。这一结论在实际工程中也得到证实,某些粗级

配混合料具有较大的 VMA 值不仅没必要,而且可能会导致使用性能较差,这就意味着 VMA 标准在 Superpave 粗、细级配混合料使用中应区别对待。

Nukunya B R 等人也就 Superpave 设计体系的 VMA 标准对粗级配混合料的适用性提出了质疑^[12]。通过研究指出,VMA 对细级配混合料性能影响较为明显,但与粗级配混合料各项性能无良好相关性;体积指标的使用应与力学性能试验相结合,以便更为科学、合理地进行沥青混合料性能评价。

Coree B J 和 Hislop W P 对不同级配进行了试验研究,以探求基于公称最大粒径的最小 VMA 标准是否合理^[13]。通过对各混合料临界状态时的 VMA 值及其他体积指标的计算,比较了临界 VMA 与 Superpave 体系所用的 VMA 最小值标准,并对集料相关因素与 VMA 等体积指标的关系进行了方差分析与多元回归。结果发现,所研究的级配中只有少数几个临界 VMA 符合 Superpave VMA 最小值标准。这说明最小 VMA 标准过于苛刻,会使许多不满足该标准、但具有良好性能的级配组成受到否决;另外,还发现 VMA 与公称最大粒径及集料表面积相关性较差,而破碎粗、细集料的质量分数、细度模数等集料特性对 VMA 有重要影响。因此,建议应同时考虑集料的相关特性,对基于公称粒径的 VMA 标准进行修正。

3.3 VMA 标准与沥青膜厚标准的关系

随着研究的深入,一些学者对 VMA 用于沥青混合料设计的适用性以及 VMA 标准确立的依据提出了质疑,进而对沥青膜厚进行研究,探求沥青膜厚标准替代 VMA 标准的可行性。

Foster C R 比较了几个实体工程路用性能和混合料体积指标之间的关系^[14],见图 3。由图 3 可见,VFA 为 68%~83% 的沥青混合料具有较好的路用性能,而 VMA 指标却无法区分路用性能的好坏。

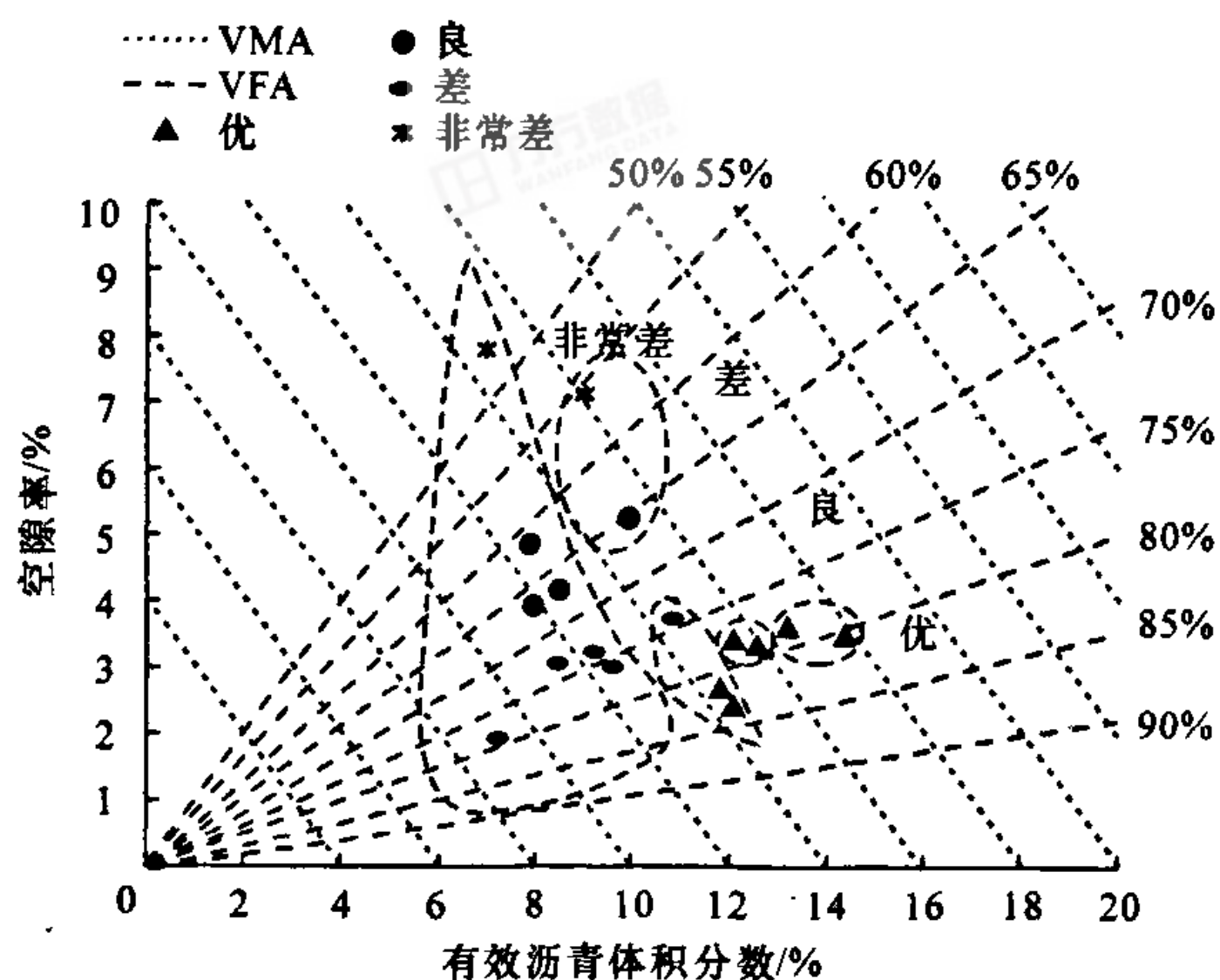


图3 实体工程路用性能与混合料体积指标的关系

Kandhal P S 和 Chakraborty S 对 VMA 最小值标准的确立依据以及确保混合料耐久性的最佳沥青膜厚进行了研究^[15],其结果也未能找到理想的数据,使混合料路用性能与其设计过程中所采用的最小 VMA 标准联系起来。研究中发现,沥青膜厚与混合料老化后的回弹模量相关性甚好,建议对压实到 8% 空隙率的试件,其沥青膜厚取 9~10 μm 为宜。

Hinrichsen J A 和 Heggen J 也建议在混合料设计中采用平均沥青膜厚指标^[16],并对固定最小 VMA 标准提出质疑。所提供的资料表明,一些满足 VMA 要求的沥青混合料,往往在使用性能和经济性方面并不是最好的。

Kandhal P S 等人提出沥青混合料的耐久性依赖于集料表面的沥青膜厚^[17]。基于平均沥青膜厚,认为最小 VMA 标准不仅无法保证混合料的耐久性能,还会否决掉一些 VMA 值低、但沥青膜厚合适的粗级配混合料。建议以 8 μm 的最小平均沥青膜厚取代 VMA 最小值标准。尽管无法找到美国沥青协会提出的集料表面积系数的取值依据,但仍认为应该采用平均沥青膜厚指标。

根据目前的研究状况,在沥青混合料设计中,究竟是采用 VMA 标准,还是采用沥青膜厚标准,还很难做出定论。只有进行更加深入地理论研究,具备更为充实的实际工程数据的支持,才有可能对此争论得到一个明确的答案。

4 结 语

(1) VMA 的影响因素众多,现有的 VMA 最小值标准仅以公称最大粒径分别进行规定是不太合理的。今后应进一步研究 VMA 与集料各项特性以及集料级配组成等各项因素的相互关系,明确影响 VMA 的关键因素,从而对现有的 VMA 最小值标准做出必要的修正或建立更加合理的标准。

(2) VMA 最小值标准设立的初衷是,为确保沥青混合料中有足够的沥青,以使混合料具备良好的耐久性,而集料表面的沥青膜厚与混合料耐久性关系密切,因此这两个指标之间应该存在一定的相关性。建议结合不同的级配类型(Superpave 粗、细级配混合料),研究其对 VMA 变化的敏感性以及 VMA 与沥青膜厚的相互关系,以建立更加合理的 VMA 最小值标准,解答沥青膜厚标准是否可以替代 VMA 最小值标准的疑问。

(3) 截止目前,仍未有研究资料提供实际工程中的路面混合料使用性能与 VMA 的相互关系,这就

使得 VMA 最小值标准的建立仍停留在室内研究和理论探索中,缺乏实践的指导。因此,在今后的研究中,应结合混合料的路用性能,特别是实体工程资料,对 VMA 的影响因素、标准设定的必要性和依据以及可能的替代方案进行探索,以促进沥青混合料体积设计法更加科学、合理的发展。

参考文献:

References:

- [1] 郝培文,徐金枝,周怀治.应用贝雷法进行级配组成设计的关键技术[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(6):1-6.
HAO Pei-wen, XU Jin-zhi, ZHOU Huai-zhi. Key technologies of aggregate blending by Bailey method [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 1-6.
- [2] 解晓光,王哲人.沥青碎石混合料动力变形特性研究[J].中国公路学报,2006,19(2):24-30.
XIE Xiao-guang, WANG Zhe-ren. Research on dynamic deformation characteristic of asphalt macadam mixture[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(2): 24-30.
- [3] 张争奇,李宁利,陈华鑫.改性沥青混合料拌合与压实温度确定方法[J].交通运输工程学报,2007,7(2):36-40.
ZHANG Zheng-qi, LI Ning-li, CHEN Hua-xi. Determining method of mixing and compaction temperatures for modified asphalt mixture [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(2): 36-40.
- [4] Mcleod N W. Comparison of density of marshall specimens and pavement cores[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 1955, 24:32-36.
- [5] Mcleod N W. Relationship between density, bitumen content, and voids properties of compacted paving mixtures[R]. Washington D C: Highway Research Board of the National Academies, 1956.
- [6] Mcleod N W. Selecting the aggregate specific gravity for bituminous paving mixtures[R]. Washington D C: Highway Research Board of the National Academies, 1957.
- [7] STP-252, Void requirements for dense-graded bituminous paving mixtures[S].
- [8] MS-2, Mix design methods for asphalt concrete and other hot mix types[S].
- [9] Mcleod N W. Design of dense graded asphalt concrete pavements [C]// Canadian Technical Asphalt Association. Proceeding of Canadian Technical Asphalt Association of the National Academies. Ottawa: Canadian Technical Asphalt Association, 1987:89-96.
- [10] Mallick R B, Buchanan M S, Kandhal P S, et al. A rational approach of specifying the voids in the mineral aggregate for dense-graded hot-mix asphalt [R]. Washington D C: Transportation Research Board of the National Academies, 2000.
- [11] Anderson R M, Bentsen R A. Influence of voids in the mineral aggregate (VMA) on the mechanical properties of coarse and fine asphalt mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 79: 1-37.
- [12] Nukunya B R, Roque M T, Birgisson B. Evaluation of VMA and other volumetric properties as criteria for the design and acceptance of superpave mixtures [J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 79: 38-69.
- [13] Coree B J, Hislop W P. A laboratory investigation into the effects of aggregate-related factors on critical VMA in asphalt paving mixtures[J]. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 2001, 79: 70-131.
- [14] Foster C R. The effects of voids in mineral aggregate on pavement performance [R]. Washington D C: National Asphalt Pavement Association, 1986.
- [15] Kandhal P S, Chakraborty S. Evaluation of voids in the mineral aggregate for HMA paving mixtures[R]. Washington D C: National Center for Asphalt Technology, 1996.
- [16] Hinrichsen J A, Heggen J. Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on gradation and volumetric properties [J]. Transportation Research Record, 1996, 1545: 75-79.
- [17] Kandhal P S, Foo K Y, Mallick R B. A critical review of VMA requirements in superpave [R]. Washington D C: National Center for Asphalt Technology, 1998.