

我国现行沥青混合料配合比设计规范的技术要点与适用性探讨

李 森

云南交投公路工程检测咨询有限公司 云南 昆明 650000

摘要：沥青混合料是现代公路工程主要路面结构材料，其性能关乎道路服役寿命、行车舒适与安全。配合比设计是确保其性能满足工程要求的核心技术。本文以我国现行《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40-2004）及相关配套标准为研究对象，梳理马歇尔设计法流程与核心指标，剖析各技术要点理论基础与工程内涵。鉴于当前交通荷载重型化、气候极端化及新型材料结构涌现，批判性探讨现行规范在高温稳定性等多方面的局限性。最后，提出优化我国沥青混合料配合比设计体系的建议，为提升沥青路面工程质量、延长使用寿命提供理论与实践指导。

关键词：沥青混合料；配合比设计；马歇尔设计法；技术要点；适用性；Superpave

引言

沥青路面因行车舒适、噪音低等优势，在我国及全球公路网中占主导。但交通量激增、车辆轴载增大，加上极端天气频发，传统沥青路面出现车辙等早期病害，许多病害根源在沥青混合料配合比设计阶段。科学合理的配合比设计方案是构筑高性能沥青路面的基石。我国自20世纪50年代引入马歇尔设计方法，2004年《公路沥青路面施工技术规范》将其系统化标准化，形成“三阶段”为核心、多项指标为控制的设计体系，为公路建设提供技术支撑。然而时代和工程需求变化，现行马歇尔设计体系能否适应新要求、有无固有局限、如何吸收前沿理念革新等问题亟待研究。本文将系统解读规范中配合比设计要点，结合实际与理论审视其适用性并提出优化路径。

1 我国现行沥青混合料配合比设计规范体系概述

我国现行沥青混合料配合比设计以《公路沥青路面施工技术规范》（JTGF40-2004）为主，并辅以《公路工程集料试验规程》（JTJ3432-2024）、《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTJ3410-2025）等一系列配套试验规程。核心是马歇尔设计法，嵌入严谨“三阶段”流程。“三阶段”中，目标配合比设计在实验室依据原材料性能确定最优矿料级配和最佳沥青用量；生产配合比设计考虑拌和楼特性微调级配、标定沥青用量；生产配合比验证在工程路段铺筑试验段，检测关键指标，合格后方可用于大规模施工。同时，JTGF40-2004规范建立多维度控制指标体系，体积参数占主导，空隙率、矿料间隙率、沥青饱和度各有作用，稳定度与流值作为传统力学指标，虽与长期性能相关性有限，但仍为评价混合料

基本性能的重要参考。

2 配合比设计关键技术要点深度解析

2.1 原材料选择与性能要求

配合比设计的成功始于优质的原材料。规范对各类原材料均有严格规定：沥青根据气候分区（高温、低温、雨量）和交通荷载等级，选用相应标号的道路石油沥青或改性沥青。重点控制针入度、软化点、延度、粘度等指标，以确保其感温性、高低温性能和耐久性。粗集料要求质地坚硬、洁净、粗糙、形状接近立方体。压碎值、洛杉矶磨耗损失、磨光值（PSV）等是关键指标，直接影响混合料的骨架强度和抗滑性能。细集料应洁净、干燥、无风化。机制砂优于天然砂，因其棱角性和粘附性更好。重点控制砂当量和亚甲蓝值，以限制有害粉尘含量。填料（矿粉）要求亲水系数小于1，塑性指数小，且与沥青有良好的粘附性。其粒径分布对混合料的整体级配和VMA有重要影响。

2.2 矿料级配设计

级配是构建沥青混合料骨架结构的蓝图。规范推荐使用密级配（如AC型）或间断级配（如SMA型），并给出了各类混合料的级配范围。设计时，通常先根据经验或贝雷法初步拟定几组级配曲线，然后通过马歇尔试验比较其性能，最终选定一条既能形成良好嵌挤骨架，又能满足VMA等体积要求的级配^[1]。近年来，GTM（Gyratory Testing Machine，旋转压实仪）的引入，使得级配设计可以更精确地模拟现场压实过程，但其结果仍需转换到马歇尔体系下进行最终评定。

2.3 最佳沥青用量（OAC）的确定

最佳沥青用量（OAC）确定是马歇尔设计法核心步

骤。基本流程为：先制备试件，对初选级配按估计沥青用量（间隔0.5%）成型一组（通常5个）马歇尔试件；接着测定物理力学指标，测试各试件毛体积相对密度等，算出VV等参数，还进行稳定度和流值试验；再绘制关系曲线，以沥青用量为横坐标，绘各指标随其变化曲线；然后确定OAC1，找出VV等于设计中值对应的沥青用量；确定OAC2，找出满足多项技术要求的沥青用量范围并取中值；最终取OAC1和OAC2平均值作OAC。此过程看似严谨，但内在逻辑有主观性和经验性，OAC2依赖多指标“窗口”重叠，平衡点难寻。

2.4 性能验证试验

为了弥补马歇尔指标的不足，规范还强制或推荐了一系列性能验证试验：（1）车辙试验：通过动稳定度（DS）评价混合料的高温抗车辙能力。这是对马歇尔稳定度的重要补充，因为MS与实际路面的抗永久变形能力相关性并不高。（2）浸水马歇尔试验与冻融劈裂试验：用于评价混合料的水稳定性，即抵抗水侵蚀导致粘结力下降的能力。（3）弯曲试验：用于评价混合料的低温抗裂性能。这些验证试验将配合比设计从单纯的指标符合性，提升到了性能导向的层面，是现行规范的一大进步。

3 现行规范体系的适用性探讨与局限性分析

3.1 对交通荷载特性的模拟不足

马歇尔试验采用静态、垂直加载的方式，其应力状态与实际路面在车辆轮胎作用下产生的复杂剪切、揉搓应力相差甚远。马歇尔稳定度（MS）作为一个峰值荷载指标，无法有效反映混合料在重复荷载下的累积变形（即车辙）特性。虽然规范引入了车辙试验作为补充，但这是一种“事后”验证，而非内生于设计体系本身。相比之下，美国的Superpave设计体系从一开始就采用旋转压实仪（SGC）模拟现场压实，并通过动态模量、重复加载三轴试验等直接关联混合料的力学响应与路用性能，设计理念更为先进。

3.2 对气候环境因素的考虑相对简单

规范通过气候分区来选择沥青标号和混合料类型，这是一种宏观的、静态的处理方式。它未能充分考虑气候变化带来的不确定性，例如，同一地区可能出现历史罕见的极端高温或持续强降雨。马歇尔设计法本身缺乏一个能够量化评估混合料在特定温度-湿度耦合场下长期性能的框架。而Superpave的PG（PerformanceGrade）沥青分级体系，则直接根据路面在当地气候条件下可能经历的最高和最低设计温度来选择沥青，实现了材料性能与环境需求的精准匹配。

3.3 体积设计的内在矛盾与经验性

现行规范的体积设计体系（VV-VMA-VFA）存在一定的内在张力。例如，为了提高高温稳定性，往往希望降低VV，但这会压缩VMA，进而可能迫使VFA升高，增加泛油风险。反之，为了保证耐久性而增大VV，又可能牺牲高温性能^[2]。设计师常常需要在这几个相互制约的指标间进行权衡，而这种权衡很大程度上依赖于个人经验，缺乏普适性的理论指导。此外，规范规定的VV范围（3%-6%）对于某些高性能路面（如SMA）而言可能偏大，导致其实际空隙率难以控制在理想范围内。

3.4 对新型材料与结构的适应性有限

随着技术进步，温拌沥青、再生沥青（RAP/RAS）、高模量沥青、各种纤维和添加剂等新材料被广泛应用。现行的马歇尔设计法在面对这些新材料时显得力不从心。例如，再生料的加入会改变混合料的劲度和老化特性，传统的马歇尔指标难以准确预测其长期性能。同样，对于开级配磨耗层（OGFC）等特殊结构，其设计目标（高渗透性、降噪）与密级配混合料截然不同，沿用同一套设计逻辑显然不合时宜。

3.5 “三阶段”流程的潜在脱节

虽然“三阶段”流程设计精巧，但在实际操作中，目标配合比、生产配合比和现场摊铺压实之间仍可能存在偏差。例如，实验室的击实功与现场压路机的压实效果并非线性对应；生产配合比验证阶段的取样代表性也可能存在问题。这可能导致实验室设计出的“完美”混合料，在现场却表现出不尽如人意的性能。

4 优化我国沥青混合料配合比设计体系的思考与建议

4.1 逐步引入性能导向设计理念

未来改革首要方向是推动设计理念根本性转变，从“经验-指标符合”模式迈向“性能-模型驱动”模式。设计起点不再局限于满足固定指标限值，而是要结合具体项目的交通量、车型构成、轴载谱、当地极端气候及路面功能定位，预先明确混合料关键路用性能目标，如特定年限最大车辙深度、抗水损害临界条件等。在此基础上，经大量系统性室内外试验，构建混合料原材料组成与关键路用性能的定量关系模型或数据库。设计过程变为反向求解，依据预设性能目标，利用模型反推最优混合料组成方案。这种以终为始的设计逻辑，能让配合比设计更具科学性与前瞻性。

4.2 推广先进试验设备与方法的应用

应大力推广旋转压实仪（GTM/SGC）在配合比设计中的核心应用。旋转压实通过模拟轮胎对混合料的揉搓作用，能够成型出内部结构更接近实际路面的试件。其提供的压实特性参数，如初始压实次数（N初始）、设计

压实次数(N设计)和最大压实次数(N最大),不仅能更真实地反映混合料的压实难易程度,还能有效预测其抗剪切变形和抗车辙的能力^[3]。可以考虑在未来规范修订中,将旋转压实仪确立为目标配合比设计的主要工具,用其测得的体积参数(如4%空隙率对应的沥青用量)作为确定OAC的基础,而将传统的马歇尔试验降级为一种辅助性的验证或对比手段,从而在方法论层面实现与国际先进水平的接轨。

4.3 完善与细化体积参数体系

首先,应摒弃“一刀切”的空隙率控制范围,转而引入“设计空隙率”的概念,即根据不同交通等级(轻、中、重、特重)和结构层位(表面层、中面层、下面层)的具体功能需求,设定更具针对性和精细化的设计空隙率目标值。其次,应强化矿料间隙率(VMA)的首要控制地位,因为VMA从根本上决定了沥青膜的最小厚度,是混合料耐久性的物理上限。设计时应首先确保VMA满足最低要求,然后再在此约束下协调空隙率和沥青饱和度的关系。此外,还可以探索引入如细集料骨架空隙率(VCAmix)等新的、更具结构性意义的体积参数,用于更精细地评价SMA等骨架密实型混合料的嵌挤状态和稳定性,从而为不同类型混合料提供差异化的、更科学的设计指引。

4.4 构建面向新材料的专用设计指南

为了鼓励和规范新技术的应用,必须加快编制针对各类新材料的专用配合比设计指南。这些指南不应是现有规范的简单套用,而应是基于对新材料特性的深刻理解而形成的独立技术文件。例如,对于高掺量厂拌热再生混合料,指南应包含对老化沥青性能的特殊评价方法、修正的体积参数控制标准(如适当放宽VMA要求以补偿老化沥青的硬化效应)、以及强制性的长期老化性能和疲劳性能验证要求^[4]。对于温拌沥青,则需重点关注其在较低温度下的压实特性、长期水稳定性以及与常规热拌混合料的兼容性设计原则。通过建立这样一套灵活、专业的子体系,可以在保持主干规范稳定的同时,为技术创新提供清晰、可靠的技术路径。

4.5 加强全寿命周期成本(LCCA)理念的融入

配合比设计的最终目标不应仅局限于控制初期的建造成本,而应着眼于整个路面结构寿命周期内的综合经济效益。一个初始造价略高,但采用了高性能材料和优化级配,从而具备卓越耐久性、低养护需求和长使用寿命的混合料方案,其全寿命周期成本(LCCA)很可能远低于一个廉价但性能平庸、需要频繁维修的方案。因此,在配合比设计阶段就应有意识地引入LCCA分析的理念。设计单位在提出多个可行的配合比方案时,应同步进行初步的LCCA估算,将材料成本、施工成本、预期的养护维修成本以及用户延误成本等因素纳入考量。这种经济性与技术性的综合比选,能够引导决策者选择那些真正具有高性价比和可持续性的设计方案,从而实现社会资源的最优配置。

5 结语

我国以JTGF40-2004为核心的沥青混合料配合比设计规范体系,凭借“三阶段”流程和多指标控制,有力支撑了二十年的公路建设。但在交通重载、气候极端、材料多元的当下,以马歇尔法为基础的设计范式,在荷载模拟、环境适应等方面暴露出局限性。未来优化应迈向性能导向设计,引入旋转压实仪等先进设备,完善体积参数体系,制定新材料专用指南,融入全寿命周期成本理念,构建科学、精准、灵活的新体系。这既是提升路面质量与耐久性的必然,也是交通基础设施高质量发展的关键。改革虽难,但与时俱进才能筑就“百年路面”。

参考文献

- [1]肖丽华.对沥青混合料配合比设计规范的解读与实践[J].公路交通技术,2024,40(05):1-8+16.
- [2]李伟.道路桥梁工程中沥青混合料配合比设计、运输、摊铺及养护要点[J].运输经理世界,2025,(20):141-143.
- [3]刘酉庚.浅谈排水沥青混合料目标配合比设计方法及要点[J].交通科技与管理,2024,5(10):84-86.
- [4]陈正权.乳化沥青厂拌冷再生沥青混合料配合比设计与质量控制研究[J].工程技术研究,2025,10(21):137-139.