

粗、细集料指标检测及对路面性能影响

冯夏文

安徽省路桥试验检测有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8831

[摘要] 在道路工程中，无论是那类路面，其性能和原材料都具有直接的关系，其中表现较为突出的是粗、细集料的质量。在路面结构的主体材料上，集料占比达到了 90%，因而集料的各类指标，对路面性能影响较大。本文对粗、细集料的关键检测指标进行阐述后，结合试验，对集料指标变异对沥青混合料和水泥混凝土路面性能的内在影响机制进行分析。研究表明，集料级配的波动是导致路面早期损坏的首要因素，而粗集料的棱角性与细集料的砂当量共同决定了路面的抗剪强度与抗水损害能力。由此提出了基于性能的集料质量控制策略，为路面工程原材料优选与施工质量控制提供了理论依据与实践参考。

关键词 粗集料；细集料；指标检测；路面性能；影响

Testing of Coarse and Fine Aggregate Specifications and Their Impact on Pavement Performance

Feng Xiawen

Anhui Provincial Road and Bridge Testing Inspection Co., Ltd.

[Abstract] In road engineering, the performance of any pavement type is directly influenced by its raw materials, with the quality of coarse and fine aggregates being particularly critical. As aggregates account for 90% of the main materials in pavement structures, their various specifications significantly affect pavement performance. This study first outlines the key testing parameters for coarse and fine aggregates, then analyzes the underlying mechanisms by which variations in aggregate specifications impact the performance of asphalt mixtures and cement concrete pavements through experimental evidence. The research reveals that fluctuations in aggregate gradation are the primary cause of early pavement damage, while the angularity of coarse aggregates and the sand equivalent of fine aggregates jointly determine pavement shear strength and water damage resistance. Based on these findings, a performance-based aggregate quality control strategy is proposed, providing both theoretical foundations and practical references for optimal raw material selection and construction quality control in pavement engineering.

[Key words] coarse aggregate; fine aggregate; performance testing; pavement performance; influencing factors

引言

路面结构在车辆荷载和环境作用的影响下，其性能的高低直观关系到道路的使用时间和行车安全。目前，路面结构的主要形式包括：沥青路面和水泥混凝土路面，两者的区别在于构成的材料，但是其主要材料均是粗细集料，其中，沥青里面的集料占比达到了 85%-95%，水泥混凝土的集料占比为 75%-85%^[1]。由此表明集料的质量对路面性能形成较大的制约性。目前，在道路工程中，对集料质量控制还存在较大局限性，集料的使用量大，其原材料的来源比较广泛，岩性呈现出多样化，其加工的工艺也良莠不齐，此情况造成进场的集料质量稳定性较低^[2]。同时对于集料检测指标较为忽视，如：缺少检测

催熟、试验方法执行不够严格等，因而集料安全隐患难以及时的发现和调整，由此导致路面出现了开裂、车辙、抗滑减弱等早期病害^[3]。

1 粗集料关键检测指标及其对路面性能的影响

粗集料通常指粒径大于 2.36mm 或 4.75mm 的石料（具体界限依规范及混合料类型而定），在路面结构中主要起骨架支撑作用^[4]。

1.1 级配与最大粒径

级配是粗集料最基础的物理指标，反映各粒径颗粒的分布状况。检测方法采用筛分法，对于含有较多细粉的粗集料，应优先采用水筛法以避免干筛造成的误差。级配的优劣直接影响

混合料中粗集料能否形成有效的嵌挤骨架,进而决定矿料间隙率(VMA)的大小。在沥青混合料中,粗集料级配的合理性至关重要。若粗集料级配符合规范中值范围,粗细颗粒能够形成良好的空间填充关系,既保证骨架支撑,又提供足够的空隙容纳沥青胶浆。若粗集料中某一档粒径过多,会造成颗粒间的“干涉”效应,破坏骨架的稳定性;若粗集料总量偏少(即4.75mm以上颗粒含量不足),混合料将趋向悬浮密实结构,粗集料被细料撑开,无法形成有效的石-石接触,高温稳定性显著下降。

1.2 压碎值与洛杉矶磨耗损失

压碎值是评价粗集料在逐渐增加的荷载下抵抗压碎能力的力学指标,按《公路工程集料试验规程》(JTG E42) T0316方法进行检测。在路面结构中,粗集料作为主要受力单元,必须具备足够的强度以抵抗施工碾压与运营期车辆荷载的作用。若压碎值过大,集料在压实过程中即发生破碎,导致原有级配被破坏,骨架结构弱化。在重载交通作用下,路面内部可能发生“二次破碎”现象,进一步加剧级配细化,诱发车辙和推移病害。

1.3 针片状颗粒含量

针片状颗粒是指长度大于该粒径平均粒径2.4倍的针状颗粒,或厚度小于平均粒径0.4倍的片状颗粒。在荷载作用下,针片状颗粒易发生断裂或转动,破坏混合料内部应力的均匀传递,削弱骨架稳定性。大量研究证实,当粗集料针片状含量超过15%时,沥青混合料的高温抗车辙能力下降约30%,同时抗疲劳性能也显著劣化。对于骨架嵌挤要求更高的SMA结构,针片状含量通常被严格控制在10%以内。

1.4 含泥量与泥块含量

含泥量指集料中粒径小于0.075mm的颗粒含量,泥块含量则指原粒径大于2.36mm、经水洗手捏后变为小于0.6mm的颗粒含量。这两项指标共同反映集料的洁净程度。泥粉具有巨大的比表面积和强烈的亲水性。在沥青混合料中,泥粉会优先吸附沥青中的极性组分,导致有效沥青膜厚度减小,沥青与集料的黏附性降低。

1.5 磨光值

磨光值(PSV)是评价粗集料抵抗轮胎磨光能力的关键指标,尤其适用于路面表面层用集料。检测采用加速磨光机模拟轮胎磨光作用,并用摆式摩擦仪测定磨光后集料的摩擦系数,以此表征集料的微观纹理保持能力。路面抗滑性能由宏观构造和微观构造共同决定,微观构造主要来源于集料表面的微观纹理。磨光值高的集料(如玄武岩、辉绿岩等岩浆岩)在长期车辆磨耗下仍能保持较高的摩擦系数。现行规范要求高速公路表面层粗集料磨光值不小于42,对于特殊路段则应进一步提高要求。

2 细集料关键检测指标及其对路面性能的影响

细集料通常指粒径小于2.36mm或4.75mm的天然砂、机制砂或石屑^[5]。

2.1 级配与细度模数

细集料的级配通过筛分试验确定,因其含有较多0.075mm以下粉料,检测时应采用水筛法以保证准确性。细度模数(M_x)是表征细集料粗细程度的综合指标,M_x越大,细集料越粗。细集料过细,混合料比表面积增大,需油量增加,若未相应提高沥青用量,则有效沥青膜厚度不足;细集料过粗,则混合料易离析,压实困难,空隙率偏大。

2.2 砂当量与亚甲蓝值

砂当量(SE)和亚甲蓝值(MBV)是评价细集料中黏土矿物含量的核心指标。砂当量通过沉降试验测定洁净砂与黏土悬浮液的高度比;亚甲蓝值通过滴定吸附试验测定细集料中粉料对亚甲蓝染料的吸附量,能够更精准地识别膨胀性黏土矿物的含量。细集料中的黏土矿物对路面性能的负面影响极为显著。黏土矿物具有强吸水性、膨胀性和吸附性,在沥青混合料中会大量吸附沥青中的轻质组分,导致沥青变硬变脆,同时严重削弱沥青与集料的界面黏结力,直接后果是沥青路面出现剥落、松散、坑槽等水损害病害。

2.3 棱角性

细集料棱角性通常采用流动时间法测定,即测定一定体积的细集料通过标准漏斗所需的时间。流动时间越长,表明颗粒棱角性越好,颗粒间的内摩阻力越大。天然砂经水流冲刷,颗粒呈球形,棱角性较差;而机制砂经机械破碎,颗粒表面粗糙、棱角丰富。在沥青混合料中,细集料的棱角性直接贡献于混合料的内摩擦角,采用高棱角性细集料的沥青混合料,其抗剪强度可较天然砂混合料提高15%-25%,对抵抗高温车辙具有显著作用。

3 试验分析与数据验证

为进一步验证粗、细集料指标对路面性能的影响,选取某高速公路建设项目中的粗、细集料为试验对象,分析集料指标与路面性能的相关性。

3.1 试验材料与方案

粗集料选取石灰岩碎石,粒径范围4.75-31.5mm;细集料选取机制砂,粒径范围0-2.36mm;胶结料选取70#道路石油沥青,各项指标符合规范要求。完成粗、细集料各项核心指标的检测,根据集料级配设计,制备不同针片状颗粒含量、含泥量的沥青混合料试件,控制其他指标不变,每组制备3个试件。开展路面性能测试,高温稳定性采用车辙试验测试动稳定度(DS),水稳定性采用冻融劈裂试验测试劈裂强度比(TSR),抗滑性能采用摆式仪试验测试摆值(BPN),并分析集料指标与路面性能指标的相关性。

3.2 试验结果与分析

本次试验选取3组不同质量的粗、细集料,其核心指标检测结果如表1所示。

按照相同矿料级配和沥青用量制备AC-20沥青混合料试件,分别测试其高温稳定性、水稳定性和抗滑性能,试验结果如表2所示。

表1 集料指标检测结果

组别	粗集料针片状含量 (%)	粗集料压碎值 (%)	粗集料含泥量 (%)	细集料砂当量 (%)	细集料亚甲蓝值 (g/kg)
1组	8.2	18.5	0.6	71	8.3
2组	14.6	22.3	1.2	59	16.5
3组	21.3	27.8	2.1	46	29.4

表2 沥青混合料性能测试结果

组别	动稳定度 DS (次/mm)	冻融劈裂强度比 TSR (%)	摆值 BPN
1组	3280	86.5	52
2组	2450	74.2	48
3组	1680	58.6	43

根据表2所示:随着粗集料针片状含量、压碎值和含泥量的增加,以及细集料砂当量降低、亚甲蓝值升高,沥青混合料的各项性能指标均呈现显著下降趋势。从高温稳定性方面分析,1组集料针片状含量最低(8.2%),压碎值最小(18.5%),其动稳定度达到3280次/mm;2组针片状含量增至14.6%,压碎值升至22.3%,动稳定度降至2450次/mm,降幅约25%;3组针片状含量达21.3%,压碎值达27.8%,动稳定度仅为1680次/mm,较1组下降近49%。这表明针片状颗粒含量和压碎值对混合料高温抗车辙能力具有显著影响,与理论分析一致。从水稳定性方面分析,1组细集料砂当量71%、亚甲蓝值8.3g/kg,冻融劈裂强度比达86.5%;2组砂当量降至59%、亚甲蓝值升至16.5g/kg,TSR降至74.2%,低于规范要求的80%;3组砂当量仅46%、亚甲蓝值高达29.4g/kg,TSR仅为58.6%,已丧失基本的水稳定性。试验数据充分验证了细集料洁净度对水损害的关键控制作用。从抗滑性能方面分析,随着粗集料含泥量增加和细集料洁净度下降,摆值从52BPN逐渐下降至43BPN。这是由于含泥量增加导致混合料表面微观纹理被泥粉填充,降低了路面摩擦系数。

4 集料指标对路面性能的系统性影响及质量控制

4.1 对高温稳定性的影响

高温稳定性是沥青路面抵抗车辙变形的能力,其核心在于混合料内部能否形成稳定的骨架结构并提供足够的内摩阻力。宏观嵌挤由粗集料的级配、形状和针片状含量决定,形成石-石接触的骨架结构是抗车辙的根本保障。微观摩擦由集料表面纹理和细集料棱角性决定,粗糙的表面纹理增加了颗粒间的滑动摩擦阻力。内摩阻力由集料的整体密实程度和颗粒排列决定,良好的级配和坚实的集料能够保证在高温高荷载作用下颗粒不发生破碎或重排。

4.2 对水稳定性的影响

水损害的本质是水分侵入沥青与集料的界面,导致沥青膜剥离。黏附性与集料的化学性质密切相关,碱性集料与沥青黏附性较好,酸性集料较差,需通过添加抗剥落剂改善。粉料效应是水损害的另一重要诱因,细集料中黏土矿物的含量直接决定混合料的水敏感性,黏土遇水膨胀,从内部顶开沥青膜,引发剥落。空隙率由集料级配决定,级配不合理导致混合料压实后空隙率过大,水分易渗入并在动水压力作用下

反复冲刷沥青膜。

4.3 对抗滑性能的影响

路面抗滑性能由宏观构造和微观构造共同决定。宏观构造来源于粗集料的粒径大小、级配类型和表面纹理深度,偏粗的级配能提供更大的构造深度。微观构造来源于集料表面的微细纹理,由集料的磨光值决定。高PSV集料能在长期磨损下维持较高的摩擦系数,而低PSV集料则会在短期内出现抗滑衰减。

4.4 质量控制技术要点

源头控制与工艺优化方面,表面层宜采用玄武岩、辉绿岩等中-基性岩浆岩,其压碎值低、磨光值高、黏附性良好。加工工艺应采用两级或三级破碎并配套除尘设备,反击破能够有效增加集料棱角性、减少针片状含量。检测频率与关键指标权重方面,对于级配、含泥量、针片状含量等波动较大的指标,应加大抽检频率,建议进料时每500吨抽检一次,拌和站生产过程中每2小时抽检一次热料仓级配。在质量评定中,应赋予砂当量、亚甲蓝值、压碎值、针片状等关键指标更高的否决权,一旦超标应拒绝使用。试验检测技术精细化方面,细集料和含有0.075mm以下粉料的粗集料,筛分必须采用水洗法,干筛法会导致检测结果严重偏离真实含泥量。

5 结论

粗、细集料作为路面材料的主体,其质量特征直接决定了路面结构的使用性能与服役寿命。本文从集料检测指标入手,系统分析了粗集料的级配、压碎值、针片状含量、含泥量、磨光值,以及细集料的级配、砂当量、亚甲蓝值、棱角性等指标对路面性能的影响机理,并通过试验数据验证了相关规律。

[参考文献]

- [1]李超,姜运良,李绍勇,等.钢渣细集料对水泥稳定砂岩基层路面性能影响研究[J].硅酸盐通报,2024,43(3):1172-1180.
- [2]唐静.细集料掺量对混凝土性能的影响[J].交通世界,2025(28):33-35.
- [3]岳爱军,黄健洪,邱华,等.细集料含量对低掺量水泥稳定级配碎石性能的影响分析[J].兰州工业学院学报,2023,30(2):38-43.
- [4]刘玉朋.细集料对AC-13沥青混合料抗剪切性能的影响分析[J].四川水泥,2020(8):53-54.
- [5]黄桂萍,韩祖丽,谭毅.掺钢渣细集料水泥稳定碎石混合料路面性能试验研究[J].西部交通科技,2022(10):7-12.