

F1赛道专用填料致级配变异及路面性能响应研究

牛晓伟

[上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433]

摘要:以F1上海国际赛车场翻修工程为依托,针对专用填料引发的沥青混合料级配波动问题,结合两台拌合楼生产计量曲线、试验室筛析及现场检测数据,分析集料计量波动、合成级配偏移规律及其对路面构造深度与压实度的影响。结果表明,设计掺量1.7%的填料发生0.2%~0.3%波动是集料计量波动核心诱因,粗集料仓对其敏感性显著高于细集料仓;合成级配在0.075~2.36 mm细集料区间偏移0.6%~0.8%,粗集料区间则基本稳定;路面构造深度与细集料通过率呈显著负相关,双机交界段构造深度变异系数达10%,压实度偏差为3.4%~5.2%。研究明确拌合楼计量波动是路面性能不均匀的内在根源,可为高等级赛道混合料级配控制与专用填料应用提供技术参考。

关键词: F1赛道;级配波动;构造深度;压实度

中图分类号: U414;TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0015-04

Research on Gradation Variation and Pavement Performance Response of Special Fillers for F1 Tracks

NIU Xiaowei

[Shanghai Highway and Bridge (Group) Co., Ltd., Shanghai 200433, China]

Abstract: Based on the renovation project of the F1 Shanghai International Circuit, aiming at the gradation fluctuation of asphalt mixtures caused by special fillers, and combined with the production metering curves of two mixing plants, the laboratory sieve analysis and the on-site test data, the aggregate metering fluctuation, the synthetic gradation shift law and their impacts on pavement texture depth and compaction degree are analyzed. The results show that the 0.2%~0.3% fluctuation of the filler with a designed content of 1.7% is the core cause of aggregate metering fluctuation, and the coarse aggregate bins are significantly more sensitive to it than fine ones. The synthetic gradation shifts by 0.6%~0.8% in the 0.075~2.36 mm fine aggregate range while remaining basically stable in the coarse aggregate range. Pavement texture depth is significantly negatively correlated with fine aggregate passing rate. The coefficient of variation of texture depth in the dual-machine junction section reaches 10%, and the compaction degree deviation is 3.4%~5.2%. The study result confirms that metering fluctuation of mixing plants is the inherent cause of uneven pavement performance, providing technical reference for gradation control of mixtures and application of special fillers in high-grade race tracks.

Keywords: F1 racing track; gradation fluctuation; texture depth; compaction degree

0 引言

F1赛车场沥青路面作为超高等级交通工程设施,需长期承受高荷载、高剪切力作用,对混合料抗剥落性、级配稳定性、路面构造深度及压实度均匀性要求严苛。传统国产有机抗剥落剂存在高温稳定性不足、耐久性衰减快等缺陷^[1-4],无法匹配F1赛道使用工况。本次翻修工程采用由F1赛道设计咨询团

队指定的特定填料作为专用抗剥落材料,通过机械精准称量添加,同时启用锡通HQLB4000(国产,200~280 t/h)与安曼AM3000(进口,160 t/h)拌合楼联合连续生产以保障工期。

工程实践表明,该填料介入后破坏了沥青混合料级配平衡,引发集料含量波动与合成级配偏移^[5-7]。目前相关研究多聚焦常规道路工程^[8-9],针对高等级赛道双拌合楼联合生产工况,以计量可视化数据为支撑,分析填料引发的集料波动—级配偏移—路面性能响应的系统性研究少有报道。本文依托工程实测数据,分析填料添加后的集料波动、级配偏移规

收稿日期:2026-03-03

作者简介:牛晓伟(1981—),男,博士,高级工程师,从事道路工程材料研究工作。

律,揭示其对路面性能的影响机制,为同类高等级赛道及公路工程提供技术参考。

1 工程概况与检测方案

1.1 工程概况

F1上海国际赛车场翻修工程采用AC-16黏结层+AC-13面层沥青路面体系,锡通4000型拌合楼完成193组AC-13混合料生产,安曼3000型完成65组AC-13混合料生产。AC-16黏结层沥青用量控制为 $4.9\pm0.25\%$,马歇尔强度 ≥ 10 kN。施工严格执行项目专项技术规格要求。

工程摒弃传统抗剥落剂,依据FIA《国际体育法规》附录L道面建造技术规格,改造两台拌合楼原有回收粉仓作为特定填料专用储料仓,设计掺量1.7%,通过计量秤和专用输送系统实现精准定量添加^[10-11],添加方案如图1、2所示。该方案经专业技术审核后实施。拌合楼产出的物料计量占比、单次计量重量汇总曲线,为分析填料添加后的计量稳定性及后续级配偏移提供了核心数据支撑。

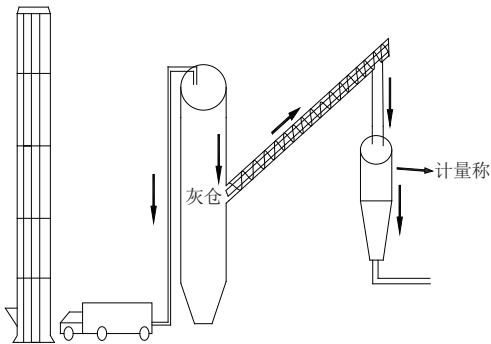


图1 HQLB4000添加方案示意图

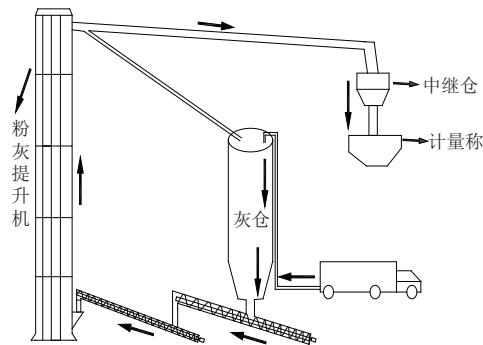


图2 AM3000添加方案示意图

1.2 检测方案设计

本次研究依托现场实测数据,构建“拌合楼生产计量可视化—集料波动分析—级配偏移推导—路面性能检测”全链条检测体系,覆盖生产、试验室、现场摊铺全环节。核心依托两台拌合楼生产数据,统计仓1~4集料、特定填料、矿料1、沥青的计量波动特

征。采用标准筛析法检测AC-13、AC-16混合料0.075~19 mm各筛孔通过率,聚焦细集料区间级配偏移规律。按拌合楼生产区段将试验段划分为安曼3000段、双机交界段、锡通4000段,采用构造深度仪检测构造深度,通过PQI380无核密度仪和表干法(钻取芯样)检测压实度^[12],校核压实度偏差并分析其与级配波动的内在关联。

2 特定填料的组分与集料计量波动特征

2.1 特定填料的组分与核心功能

本次采用的特定填料为定制化无机抗剥落填料,专为提升F1赛道沥青混合料抗剥落性能设计,核心成分及质量占比见表1。

表1 特定填料的组分及质量占比

组分名称	质量占比/%	核心功能
高活性钙质矿物 (如氢氧化钙)	≥ 90	提升集料与沥青的界面黏附性,增强抗剥落性能
惰性矿物填料 (如石英粉)	≤ 8	调节填料级配,改善混合料和易性
微量活性助剂	≤ 2	优化填料与沥青的相容性,提升高温稳定性

该填料以高活性钙质成分为核心,可提升集料与沥青界面黏附性,惰性矿物填料调节级配、改善混合料和易性,微量助剂优化填料与沥青相容性并提升高温稳定性^[13-15],其1.7%的设计掺量虽占比微小,却是引发拌合楼各集料仓计量波动的核心诱因。

2.2 面层AC-13混合料计量曲线对比分析

锡通4000型拌合楼193盘AC-13混合料生产计量曲线如图3所示。安曼3000型拌合楼65盘AC-13混合料生产计量曲线如图4所示。

从图3中可知,细集料仓1、2波动幅度均为0.9%,计量重量分别稳定在1 380~1 415 kg、895~935 kg,受填料扰动最小;粗集料仓3波动0.8%、仓4达1.0%,对填料波动高度敏感;特定填料波动0.2%(计量重量55~63 kg),因集中在0.075 mm以下粉体区间,打破粉料计量平衡并触发集料仓自动补偿,是级配偏移的根本原因;沥青、矿料1波动分别为0.5%、0.3%,单盘总产量稳定在约3 800 kg,拌合楼控制系统运行正常。

从图4中可知,细集料仓1、2波动均为0.8%,粗集料仓3、4波动为0.6%、0.8%,整体波动幅度低于锡通设备;特定填料波动0.3%,曲线锯齿特征更明显,反映不同厂家计量系统对微细粉体的控制精度差异;沥青波动仅0.3%,体现进口设备高精度计量优

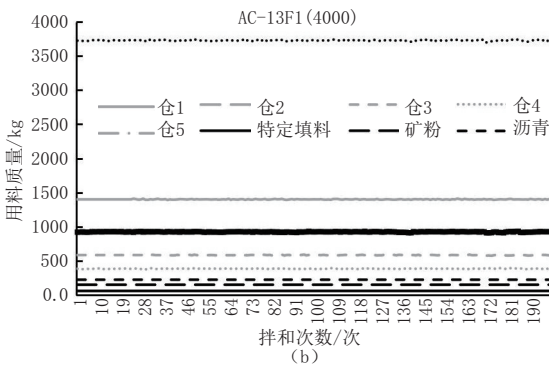
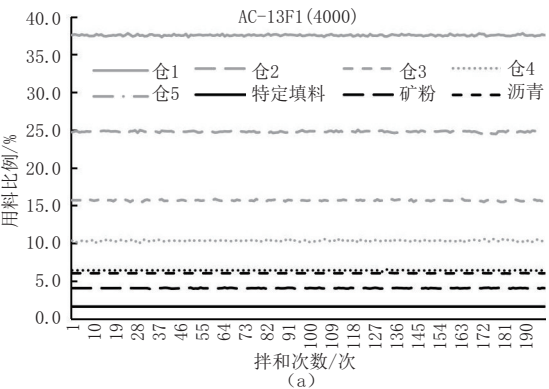


图3 HQLB4000 型拌合楼 AC-13 混合料各仓波动图

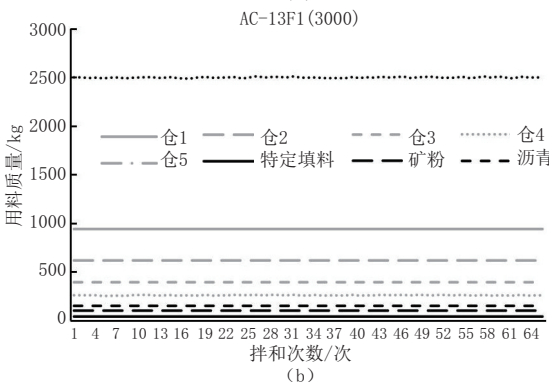
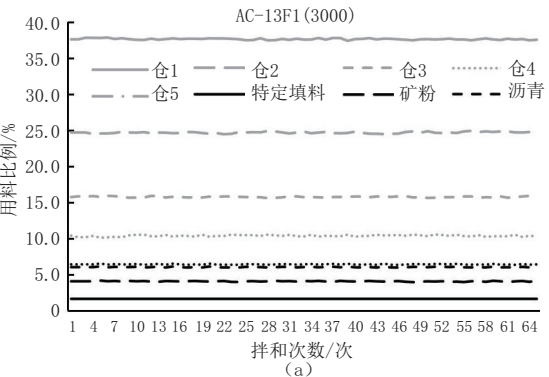


图4 AM3000 型拌合楼 AC-13 混合料各仓波动图

势;矿料 1 波动 0.4%,单盘总产量稳定在约 2 500 kg。两台拌合楼均呈现细集料稳定、粗集料敏感、特定填料为波动源头的共同特征。

2.3 集料计量波动规律与核心差异

特定填料作为 0.075 mm 以下细粉状材料,其掺量微小偏差打破混合料体积平衡,集料仓为补偿平

衡自动调整出料量,引发规律性波动。两台拌合楼的核心差异体现在两方面:一是填料计量精度,安曼 3000 型波动 0.3%,高于锡通 4000 型的 0.2%,源于计量秤精度与输送系统稳定性差异;二是粗集料敏感性,锡通 4000 型仓 4 波动 1.0%,显著高于安曼 3000 型的 0.8%,因锡通拌合楼最粗集料仓振动出料系统对料仓压力变化更敏感。

细集料仓 1、2 在两台设备中波动相近 (0.8%~0.9%),受填料影响小;沥青计量方面,安曼 3000 型波动幅度为锡通 4000 型的 60%,稳定性更优。

2.4 黏结层 AC-16 混合料计量曲线对比分析

两台拌合楼 AC-16 黏结层混合料计量曲线如图 5、6 所示。

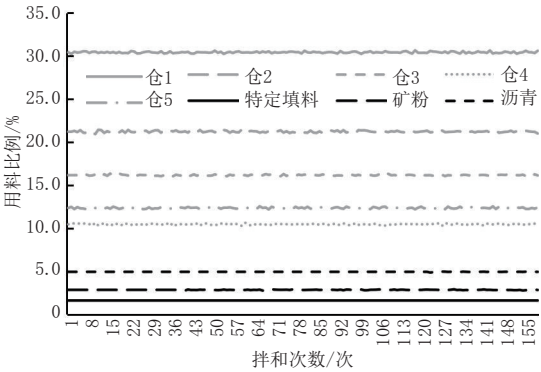


图5 HQLB4000 型拌合楼 AC-16 黏结层各仓波动图

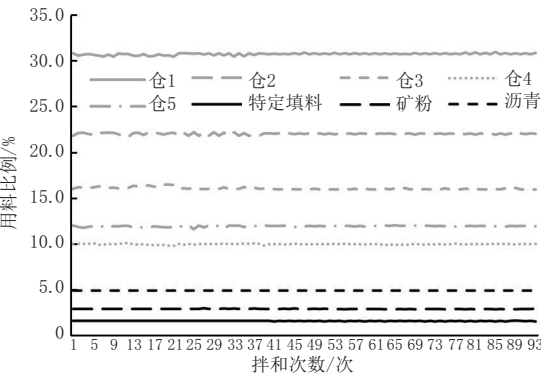


图6 AM3000 型拌合楼 AC-16 黏结层各仓波动图

从图 5、图 6 中可知,其波动规律与 AC-13 面层高度一致:粗集料仓对填料波动的敏感性显著高于细集料仓,安曼 3000 型沥青计量仍保持更高稳定性。该结果验证了特定填料计量波动是集料档位波动核心诱因的结论具有普适性,不受混合料级配类型影响。

3 集料计量波动引发的合成级配偏移规律

集料计量波动与仓 3、4 粗集料波动相互叠加,导致合成级配在 0.075~2.36 mm 细集料区间出现

0.6%~0.8%的持续性偏移,4.75 mm以上粗集料区间通过率基本稳定,与集料波动特征高度契合。

以AC-16黏结层为例,0.075 mm筛孔设计允许偏差±5%,锡通4000型实际波动±3.2%、安曼3000型±4.1%;2.36 mm筛孔二者波动分别为±2.8%、±3.5%,均在允许偏差内但呈规律性偏移。AC-13面层因粗集料占比更高,细集料区间通过率波动略大于AC-16粘结层。

两台拌合楼级配一致性偏差集中在0.075~1.18 mm特细集料区间,锡通4000型该区间平均通过率较安曼3000型高0.9%~1.2%,根源在于粗集料仓4波动特征差异;2.36~4.75 mm区间偏差<0.7%,4.75 mm以上区间偏差<0.5%,无明显差异。填料添加后,双

拌合楼合成级配偏差较之前增加0.6%~0.8%,成为路面构造深度与压实度波动的核心内因。

4 级配波动与路面构造深度、压实度的响应关系

将试验段划分为安曼3000段、双机交界段、锡通4000段3个检测单元,开展构造深度、压实度检测,核心数据如表2、3所示,

表2 试验段路面构造深度检查结果

检测单元	检测 点数	构造深度 范围/mm	平均值/ mm	变异 系数/%
安曼3000生产段	50	0.7~1.3	1.0	18.7
双机交界段	30	0.6~1.4	0.95	10
锡通4000生产段	50	0.8~1.2	1.05	12.5

表3 试验段路面压实度与密度检查结果

检测单元	无核密度仪压实度/%	芯样压实度/%	压实度偏差/%	芯样平均密度/(kg·m ⁻³)	厚度平均值/mm
安曼3000生产段	104.1~106.0	99.8~101.3	3.4~5.2	2450	68.4
双机交界段	105.0~105.7	100.7~101.1	4.2~5.0	2458	61.4
锡通4000生产段	104.3~105.2	100.2~100.5	3.8~5.0	2448	65.1

路面构造深度与0.075~2.36 mm细集料通过率呈显著负相关($R^2=0.89$):细集料通过率越高,构造深度越小。其中锡通4000段构造深度0.8~1.2 mm、均值1.05 mm、变异系数12.5%;安曼3000段0.7~1.3 mm、均值1.0 mm、变异系数18.7%;双机交界段0.6~1.4 mm、均值0.95 mm、变异系数10%,波动幅度显著高于单一设备区段,F1赛道薄层摊铺工况进一步放大了该差异。

压实度检测显示,无核密度仪与芯样检测存在3.4%~5.2%偏差,双机交界段压实度离散程度最高,局部压实不均匀现象最突出;各单元芯样平均密度2 448~2 458 kg/m³,整体波动小,说明级配波动对混合料整体密度影响有限,对局部压实均匀性影响显著。在摊铺速度2~3 m/min、压实工艺一致的条件下,构造深度变异系数与细集料级配变异系数、压实度偏差与级配一致性偏差均呈显著正相关, R^2 分别为0.87、0.82,证明拌合楼集料计量波动是路面构造深度与压实度不均匀的核心原因。

5 结 论

本文依托F1上海国际赛车场翻修工程实测数据,在物料计量波动、合成级配偏移及路面性能指标均满足技术规格书要求的前提下,系统分析特定填料添加下的集料计量波动、合成级配偏移规律,及二者对路面构造深度、压实度的影响,得出以下结论。

(1)特定填料计量波动是集料档位波动的核心诱因,安曼3000型填料最大波动0.3%、锡通4000型0.2%;粗集料仓敏感性显著高于细集料仓,锡通4000型仓4最大波动1.0%,填料细粉特性与拌合楼设备特性差异进一步放大了集料波动。

(2)集料计量波动主要引发0.075~2.36 mm细集料区间级配0.6%~0.8%的持续性偏移,4.75 mm以上粗集料区间基本稳定;双拌合楼级配偏差集中在0.075~1.18 mm特细集料区间,为级配控制的核心关注区间。

(3)路面构造深度与细集料通过率显著负相关($R^2=0.89$),双机交界段构造深度变异系数10%,为路面构造深度控制薄弱区段;级配波动伴随3.4%~5.2%的压实度偏差,对局部压实均匀性影响显著,对混合料整体密度无明显作用。

(4)拌合楼物料波动与路面性能波动直接相关,构造深度、压实度的性能指标变异及偏差与级配变异及一致性偏差均呈显著正相关,证明生产端计量波动是路面性能不均匀的内在根源,把控拌合楼物料计量精度是提升高等级赛道路面性能均匀性的关键。

参考文献:

[1] 张超. 沥青混合料抗剥落添加剂的抗老化性能研究[J]. 公路工程, 2010, 35(4): 167-170.
[2] 孙瑜, 李立寒. 基于表面能理论的沥青混合料抗剥落性能[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 285-291.

(下转第40页)