重载交通条件下灌浆复合路面抗车辙性能研究

相成强
江苏东交智控科技集团股份有限公司，江苏 南京 210000

[摘要]重载交通下灌浆复合路面的抗车辙能力,是由基体空隙结构是否可以被灌浆料所填充以及灌浆料硬化后是否具有足够的骨架支撑作用所决定的。按照这样的匹配关系，从基体级配和空隙率控制、灌浆料流动性与体积稳定性、重载车辙试验条件以及施工过程控制这四个方面来整理出可以执行的技术要求。基体空隙率宜控制在 20%～30%，连通空隙率不小于 16%，灌浆料的初始流动度为 10～14s，70℃动稳定度大于等于 10000 次/mm。施工时路表温度降到 50℃以下才可以灌浆，灌注率不得小于 85%，早强型浆体养生 1～3h 后可以开放交通。贯通的不是单一材料指标的好坏，而是空隙结构、浆体性能、时机控制这三个方面在重载工况下的一致性。

[关键词]灌浆复合路面；重载交通；抗车辙；空隙率
DOI：10.33142/sca.v9i11.20771　　中图分类号：U416.21　　文献标识码：A

Research on the Anti-rutting Performance of Grouted Composite Pavement under Heavy Traffic Conditions

XIANG Chengqiang
Jiangsu Easttrans Intelligent Control Technology Group Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

Abstract: The anti rutting ability of grouted composite pavement under heavy traffic is determined by whether the matrix void structure can be filled with grout and whether the grout has sufficient skeleton support after hardening. According to this matching relationship, feasible technical requirements can be summarized from four aspects: matrix grading and porosity control, grout flowability and volume stability, heavy-duty rutting test conditions, and construction process control. The porosity of the matrix should be controlled between 20% and 30%, the connectivity porosity should not be less than 16%, the initial flowability of the grouting material should be 10 to 14 seconds, and the dynamic stability at 70 ℃ should be greater than or equal to 10,000 times/mm. Grouting can only be carried out when the road surface temperature drops below 50 ℃ during construction, and the grouting rate should not be less than 85%. Traffic can be opened after 1 to 3 hours of curing for early strength grout. What connects is not the quality of a single material indicator, but the consistency of the void structure, slurry performance, and timing control under heavy load conditions.

Keywords: grouting composite pavement; heavy traffic; anti-rutting; void ratio

引言

重载交通路段的车辙病害和常规交通路段有本质的区别。轮胎接地压强增大、作用时间延长，使沥青混合料高温蠕变由缓慢积累变为快速失稳，交叉口、长大纵坡、公交专用道等渠化严重的地方病害更加明显。常规改性沥青或者 SMA 方案在这些区段的长期效果不大，因此工程实践就采取了用水泥基灌浆料灌入大空隙沥青混合料来形成复合结构的方法。灌浆复合路面的力学逻辑就是基体沥青混合料给以连续的开式空隙网络以及一定的柔性约束，硬化后的浆体在空隙中形成刚性骨架，两者一起分担荷载并且抑制高温下的剪切流动。但是只有当灌注充分、界面良好、骨架连续的时候，复合结构才不会退化成有空洞的刚性体或者被浆体割裂的沥青层。目前的规范已经对空隙率范围以及浆体强度做出了规定，但是对于重载情况下各个控制指标之间相互影响的关系还没有进行系统的梳理。

1 重载交通条件下灌浆复合路面抗车辙性能的主要影响因素与技术要求

重载交通对灌浆复合路面的作用机理主要表现在三个方面。第一是荷载水平的放大。重载车辆单轴荷载、轮胎接地压强都远远大于设计标准轴载，在车辙试验中一般用 70℃、1.0MPa 的工况来近似加重的热力耦合条件[1]。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

第二是作用时间延长、重复次数集中。渠化交通使得同一断面上短时间内承受的轮载循环比正常情况要大很多倍，浆体骨架的疲劳损伤以及基体沥青相的蠕变在温度升高的情况下也被同时放大。第三是水和荷载的耦合侵入。重载路段渠化积水的概率较高，水对沥青-集料界面和沥青-浆体界面的破坏会先于车辙发生，或者和车辙一起发生。

以上机制决定了技术要求的设置不能只看灌浆后最终的强度。基体空隙率过低，浆体不能进入，过高，基体在灌浆前就失去了承载能力；浆体流动度不够，连通空隙中形成死区，流动度过大又会伴随泌水和离析。因此抗车辙性能的控制不能只依靠车辙指标，而应该以灌注充分性、骨架连续性这两个中间变量来控制。表 1 是重载条件下灌浆复合路面主要控制参数和技术依据的汇总，后面各节根据表中的指标展开论述。

表 1　重载交通灌浆复合路面抗车辙关键控制参数

控制环节	参数	技术要求	控制目的
基体沥青混合料	空隙率	20%～30%	保证连通空隙网络形成
基体沥青混合料	连通空隙率	≥16%	确保浆体可灌入空间
基体沥青混合料	马歇尔稳定度	≥3.0kN	灌浆前维持基本承载
灌浆料	初始流动度	10~14s	满足泵送与自流填充
灌浆料	28d 干缩率	≤0.3%	抑制界面收缩开裂
灌浆料	7d 抗压强度	≥20MPa	形成刚性骨架支撑
复合混合料	70℃动稳定度	≥10000 次/mm	对应重载高温工况
施工	灌注率	≥85%	控制实际填充程度

2 原材料与配合比设计

2.1 基体沥青混合料级配与空隙率控制

基体沥青混合料的设计目的不是使它自身达到最优密实状态，而是在保证施工和易性、基本稳定性的前提下，形成比例适当、相互连通的空隙系统。空隙率的技术区间一般在 20%～30%，当空隙率小于 20%时，连通空隙不足，浆体不能在重力或者低压泵送的情况下充分进入；空隙率大于 30%时，基体骨架的接触点减少，摊铺碾压后的马歇尔稳定度容易跌到 3.0kN 以下，灌浆前的临时交通或者施工扰动就会造成结构损伤。连通空隙率比总空隙率更具有控制意义，规范中一般以不小于 16%作为下限，因为只有连通的空隙才对灌注率有贡献，闭合空隙在灌浆过程中一直存在，是缺陷源。

级配设计用间断级配的思想，在公称最大粒径附近保留足够的粗集料来形成骨架，同时控制中间粒径颗粒的含量，防止空隙被细料过多地填充。以 MAM-13 为例，9.5mm 筛孔的通过率应控制在 20%～50%，4.75mm 筛孔的通过率应控制在 5%～25%，0.075mm 筛孔的通过率应控制在 1%～10%。沥青用量采用谢伦堡析漏试验和肯塔堡飞散试验相结合的方式确定，析漏损失不大于 0.4%，飞散损失不大于 20%，以此来控制自由沥青含量，保证集料之间有良好的粘结。重载路段基体沥青应该使用高黏改性沥青，来弥补大空隙结构下沥青膜厚度偏薄所造成的粘结储备不足。

2.2 灌浆料流动度、强度与体积稳定性要求

灌浆料的主要功能是在一定时间内以最小的能量输入来填满连通空隙，在硬化后具有比沥青相更高的模量和抗剪能力[2]。流动度用初始流动度和 30min 流动度两个指标来控制，初始流动度为 10～14s，30min 流动度不能有明显的经时损失，保证现场搅拌到灌注完成期间浆体不会发生触变固化。水固比一般在 0.25～0.4 之间，减水剂和矿物掺合料的调配可以达到流动性与稳定性的平衡。

强度指标里，7d 抗压强度不小于 20MPa 是形成有效刚性骨架的基本要求，早强型浆体还要在 3h 内达到抗压强度不小于 10MPa 才能满足快速开放交通的要求。体积稳定性对于重载条件有特殊的意义。浆体在空隙里硬化收缩会形成拉应力，在重载反复剪切的作用下，界面微裂纹会不断扩展，最终使灌注区从基体中脱离，失去了协同承载的能力。28d 干缩率不大于 0.3%，自由泌水率不大于 1%，这是对这个风险的最低控制。必要时可以加入适量的膨胀组分来补偿收缩，但是不能以牺牲流动度为代价。

3 抗车辙性能试验与评价

3.1 车辙试验条件与重载工况对应

标准车辙试验的 60℃、0.7MPa 条件对于重载路段的高温和荷载耦合水平存在系统性的低估。重载路段夏季路表温度可以达到或者超过 70℃，轮胎接地压强在超载车辆作用下可以达到 1.0MPa 以上，所以室内评价应该采用 70℃、1.0MPa 的加重条件。该条件选择不是为了追求指标的绝对大小，而是使试验的应力和温度路径同现场渠化重载区段的实际工况相吻合，防止配合比在重载条件下由于动稳定度急剧下降而出现的问题。对于极重交通路段，在 70℃的基础上可以增加更长的加载时间或者更高的轮压来补充验证。

3.2 动稳定度与车辙深度指标控制

在 70℃、1.0MPa 的条件下，灌浆复合路面的动稳定度技术要求应该不小于 10000 次/mm，部分规范或者工程验证中该值以 10000 次/mm 作为合格标准，但是实测值一般会高于这个数值。动稳定度表示的是变形速率，车辙深度表示的是总变形量，两者都要考虑。重载条件下的车辙深度控制不能只依靠动稳定度的间接推断来控制，而应

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

该以规定轮载作用次数下的深度值作为控制依据。需要注意的是，动稳定度极高的材料并不一定意味着界面完整性好，如果灌注不充分，局部未填充区域在轮载作用下会产生差异变形，动稳定度试验的总变形仍然在限值之内，但是结构内部已经出现了应力集中。因此车辙指标应该和灌注率检测一起使用。

3.3 灌浆前后高温变形对比检验

灌浆前后对比是判断复合效应是否真实存在的直接方法。对同一个基体配合比的试件，在灌浆前和灌浆后分别做 70℃车辙试验，灌浆后的动稳定度比灌浆前的提高量要达到可以检验的程度。如果提升幅度不够，说明浆体没有很好地填充连通空隙或者界面结合不好，复合骨架没有形成。对比检验的另一个作用就是发现基体设计上的不足之处，即灌浆前试件车辙深度过大时，虽然灌浆后指标表面合格，但是基体在灌浆前的施工窗口内已经发生了不可逆的变形，复合结构的初始几何完整性不能得到保证。灌浆前后马歇尔稳定度的变化可以作为辅助判据，灌浆后稳定度一般应大于 15kN。

3.4 水稳定性与界面粘结辅助检验

水稳定性不是重载灌浆复合路面的附属指标。基体的大空隙结构使得水更容易到达沥青-集料界面以及沥青-浆体界面，重载的泵吸作用会加快水分在界面缺陷处的往复运动。残留马歇尔稳定度或者劈裂强度比可以用来评价水侵入之后的整体稳定性，但是它不能够反映界面的劣化情况。小型拉拔试验可以对集料-沥青-水泥三相界面的黏结强度进行定量分析，是判断灌浆料和基体之间是否存在有效化学-力学连接的直接方法。界面黏结强度不够的时候，水稳定性指标仍然在限值之内，但是车辙变形已经通过界面滑移的方式发展起来。因此水稳定性检验要与界面拉拔指标一起作为辅助控制，尤其是对于花岗岩等酸性集料基体，界面处理措施的效果要通过拉拔试验来确认。

4 施工控制与质量检验

4.1 基体混合料摊铺碾压与空隙结构保持

基体摊铺碾压的目的就是保证达到规定压实度的同时不破坏设计空隙结构。过碾会使粗集料骨架被压碎或者细料迁移填充连通空隙，从而造成灌注率降低；欠碾基体强度不够，灌浆前的施工扰动就会使基体松散[3]。碾压组合应该采用低频高幅的初压和轮胎压路机的复压，振动压路机的使用要控制遍数，防止过振造成级配离析和空隙堵塞。碾压完毕后需要对马歇尔试件的空隙率以及连通空隙率进行检测，保证其数值符合目标配合比设计值。为了达到表面平整的目的，在施工中对基体表面进行薄层找平的做法，容易堵塞基体表面的空隙，因此在施工组织中应加以避免。

4.2 灌浆时机、温度与封边处理

灌浆时机的主要限制就是温度。基体摊铺碾压之后，路表温度要降到 50℃以下才可以进行灌浆作业，干燥是另外一个必要的条件。温度过高时浆体接触基体后水分很快蒸发，流动度经时损失加大，灌注深度不够；温度过低时基体空隙中的残余水汽凝结，阻碍浆体与集料表面的接触。封边处理在摊铺之前就应完成，四周预埋土工布留出 15～25cm 宽度，用来做灌浆时的围挡，防止浆体从侧向流失造成边缘灌注率低。纵坡和斜坡路段应该从低处向高处进行灌注，利用浆体自重来辅助填充，防止在高侧先封堵形成气囊。

4.3 灌注、养生与开放交通控制

灌注时浆体泵送管头要尽量靠近基体表面，依靠自流渗透而不是高空喷洒，减少浆体飞溅和离析。灌注分段长度应控制在 20～30m 之间，排浆口间距按照基体空隙率和坡度来布置，平坡段一般取 2～3m。每段连续灌注到排浆口均匀出浆，不能中途随意停泵。灌注饱满度的过程判断以排浆口出浆状态为准，所有排浆口均匀出浆才可以认为该区域灌注完成，发现局部不下渗时应停止推进并查找原因，不能用反复补灌来代替对堵塞原因的排查[4]。补灌仅限排浆口未出浆区域，且应在浆体初凝前完成。养生时间根据浆体的种类和气温而定，普通型浆体一般需要养生不少于 1d，早强型浆体在夏季施工中灌浆结束后 1～3h 就可以达到开放交通强度，冬季或者低温条件下需要适当延长。养生期间严格封锁交通，防止雨水冲刷未硬化浆体。使用早强型浆体时，开放交通前要对同条件养护试件进行抗压强度检测，当达到 10MPa 时方可逐步放行。

4.4 施工抽检与交工验收指标

施工抽检要包含灌注率和灌注均匀性这两个方面。灌注率以钻芯检测为主，每 2000m2 不少于一组三点，灌注率不小于 85%。芯样直径应为 100mm，记录浆体在空隙中的填充高度、空洞的位置以及界面缝隙的情况。芯样既可以用来观察浆体在空隙中的分布情况，也可以用来判断是否存在集中空洞或者浆体和集料之间有明显的缝隙。交工验收除了常规沥青路面指标外，还应该增加路表渗水系数的检测，灌浆复合路面的渗水系数异常增大一般表示连通空隙没有被充分封闭，是灌注缺陷的间接信号。渗水系数检测每车道每 200m 至少测一点，测点要包含灌注边缘和排浆口附近。当渗水系数大于 200mL/min 时，需要增加钻芯频率，以确定是否存在连通空洞。构造深度和平整

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

度按照现行的沥青路面验收标准来执行，但是构造深度的测点布置要覆盖灌注边缘和排浆口附近等施工薄弱的地方。局部灌注不足可以采用钻孔补灌的方式，单个缺陷面积大于 0.5m² 时，需要将缺陷处的沥青混合料铣刨到基体层后再重新摊铺灌注。

5 结束语

重载交通条件下灌浆复合路面的抗车辙性能不是灌浆料强度或者基体空隙率的单变量函数，而是空隙可灌注性、浆体填充充分性、骨架连续性这三个因素在施工时间窗口内所达到的一种系统状态。基体空隙率 20%～30%，连通空隙率不低于 16%，为浆体提供了进入通道，灌浆料 10～14s 的初始流动度不大于 0.3%，28 天干缩率不大于 0.3%，70℃动稳定度不小于 10000 次/mm，是对该系统状态在重载高温路径下整体的检验。施工环节中 50℃以下的灌浆温度、灌注率不小于 85%以及排浆口出浆等都是把室内设计变成现场质量的重要控制点。三者当中任何一个环节出现偏差都会在车辙指标上表现为合格，在使用的时候就会提前失效，所以抽检策略要以灌注率和车辙指标并重，不能用最终指标代替过程控制。重载渠化路段灌浆复合路面的优点就是刚性骨架对剪切流动的抑制，工程可靠性最终取决于施工均匀性而不是配合比的上限性能。

[参考文献]

[1]韩同睿,赵立双,刘伟,等.国省道干线灌注式半柔性复合路面应用研究[J].建材世界,2025,46(1):84-88.
[2]田书赫,马培建.半柔性沥青路面灌浆料配合比研究[J].北方交通,2025(4):45-48.
[3]李秀君,亓相莹,崔灿,等.半柔性路面改性乳化沥青灌浆料制备及其性能研究[J].公路工程,2024,49(6):127-133.
[4]冯春彦.半柔性路面材料的路用性能与灌注率的指标优化研究[J].工程建设与设计,2025(8):204-206.

作者简介：相成强（1995—），男，汉族，江苏灌南人，中级工程师，本科，毕业于南京工业大学交通工程专业，从事试验检测工作。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.