

# 纳米 $\text{TiO}_2$ 负载方式对半柔性路面的路用性能影响研究

迟凤霞, 王洋洋\*, 严守靖, 程沁灵

(1. 浙江省交通运输科学研究院 道桥检测与养护技术研究重点实验室, 浙江 杭州 311305)

**摘要:**以半柔性路面为母体,采用不同的方式将纳米  $\text{TiO}_2$  负载到半柔性路面上,开展了一系列基本路用性能试验,研究负载方式对路用性能的影响。结果表明:将纳米  $\text{TiO}_2$  替代矿粉拌和到沥青混合料中,会出现高温力学性能下降、低温性能改善、残余空隙率降低等现象。喷洒嵌入式和水溶液涂覆式相对于拌和式,高温下的动稳定度提高 3 500 次/mm,低温平均劲度模量分别增加 24.10% 和 16.40%。因此,喷洒嵌入式和水溶液涂覆式的高温性能较好,低温性能较差;而拌和式则与之相反,高温稳定性较差,低温抗裂性较好。

**关键词:**纳米  $\text{TiO}_2$ ; 负载方式; 半柔性路面; 路用性能

纳米  $\text{TiO}_2$  是一种绿色、廉价、超亲水的环保材料,在光照条件下能发生光催化反应,具有良好的空气净化能力而广泛运用于治理空气污染和污水处理等行业。

近年来,关于纳米  $\text{TiO}_2$  的应用越来越广,将其负载到沥青路面上用于治理汽车尾气的报道屡见不鲜,钱国平等利用硅烷偶联剂将纳米  $\text{TiO}_2$  涂到沥青路面及稀浆封层中,并进行汽车尾气降解试验,结果显示:当  $\text{TiO}_2$  与硅烷偶联剂按质量比 1:3 混合时制得的涂层材料对 NO 降解效果最佳;刘成虎等将纳米  $\text{TiO}_2$  均匀分散到沥青中,以及用替换矿粉等方式负载到沥青混合料上,结果表明采用拌和式降解尾气效果更好;谭忆秋等将光催化材料二氧化钛以涂覆式和掺入式应用于沥青路面材料中,开展了光催化性能和耐久性分析,结果表明涂覆式最佳掺量为载体黏结剂用量的 8%~10%,掺入式的最佳掺量为矿粉的 50%~60%。总结以往的研究成果发现,纳米  $\text{TiO}_2$  在普通沥青路面上应用较多,在半柔性路面上的研究很少。

半柔性路面是一种刚柔并济的路面,通过骨料之间的相互嵌挤和水泥胶浆共同形成强度,不仅具有较好的抵抗荷载作用的能力,而且高温稳定性能、抗水损害性能也优于普通沥青混凝土路面。而将纳米  $\text{TiO}_2$  负载到半柔性路面上,可以扩大该材料的应用范围,因此,有必要探究纳米  $\text{TiO}_2$  负载方式对半柔性路面基本路用性能的影响。

该文分别采用拌和式、水溶液涂覆式和喷洒嵌入式将纳米  $\text{TiO}_2$  负载到半柔性路面上,开展一系列基本路用性能试验,以探究不同纳米  $\text{TiO}_2$  负载方式对路用性能的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料准备

试验主要原材料有纳米  $\text{TiO}_2$ 、P. O. 42.5 级水泥、SBS(I-D)改性沥青、标准砂、速凝剂、缓凝剂、膨胀剂、阳离子乳化沥青(中裂)。

参考《半柔性路面应用技术指南》(文献[17]),采用 CAVF 法设计半柔性大孔隙母体混合料,空隙率为 24%,级配为 SFAC-13,沥青用量为 4.3%。利用马歇尔试验法成型标准马歇尔试件 9 个,借助轮碾成型机制备方形车辙板 12 块,尺寸为 300 mm×300 mm×50 mm,并灌入特制的水泥砂浆(砂胶比:0.2,水胶比:0.5),其配比如表 1 所示,预留灌浆深度为 7.92~10.56 mm,灌浆率为 98%~98.5%。灌浆养护成型,选取 3 块车辙板制作小梁试件 9 根,尺寸为 250 mm×30 mm×35 mm。

拌和式车辙板所用矿粉质量为 40.015 g,水溶液涂覆式所用纳米  $\text{TiO}_2$  水溶液与矿粉等量,水溶液涂覆式和喷洒嵌入式所用纳米  $\text{TiO}_2$  含量均为 4%。喷

收稿日期:2020-08-10(修改稿)

基金项目:浙江省科技厅项目(编号:2018F10045)

作者简介:迟凤霞,女,教授级高工。E-mail: 57118721@qq.com

\* 通信作者:王洋洋,男,工程师。E-mail: 1048386064@qq.com

洒嵌入式(A组)、水溶液涂覆式(B组)、拌和式(C组)的试件准备如表 2 所示。

表 1 水泥砂浆配比

成分	比例/%	成分	比例/%
水泥	0.900	速凝剂	0.005
矿粉	0.100	阳离子乳化沥青	0.050
膨胀剂	0.080	减水剂	0.010

表 2 各组试件纳米 TiO<sub>2</sub> 含量

组别	纳米 TiO <sub>2</sub> 含量/g		
	马歇尔试件	车辙板试件	小梁试件
A	0.144	1.601	0.107
B	0.144	1.601	0.017
C	3.603	40.015	2.668

1.2 试验方法

采用 Boo42—MS 型马歇尔稳定度仪测试试件的稳定度和流值,测试条件为 60℃水浴环境,保温时间为 30~40 min。利用 HYCZ—5A 型自动车辙试验仪测试试件的高温抗车辙性能,测试条件为(60±1)℃干燥环境,在恒温室中保温不少于 5 h,接地压强为(0.7±0.05) MPa,行车速度为 42 次/min。利用 UTM—100 型万能动态伺服液压材料试验机测试试件的低温抗裂性能,测试条件为(−10±0.5)℃,加载速率为 50 mm/min。

2 结果与讨论

2.1 不同负载方式下的流值和稳定度

表 3 为 3 种不同负载方式下的流值和稳定度。由表 3 可得:A、B 组的流值平均值均为 1.88 mm,稳定度平均值分别为 29.19 和 31.03 kN,而 C 组的流值平均值为 1.98 mm,稳定度平均值为 25.79 kN。

表 3 流值和稳定度

组别	试件编号	流值/mm	稳定度/kN
A	3.4—1	1.89	30.778
	3.4—2	1.86	27.268
	3.4—3	1.91	29.534
	3.4—4	1.84	31.255
B	3.4—5	1.89	30.074
	3.4—6	1.92	31.746
	3.4—7	1.98	25.991
C	3.4—8	2.01	24.842
	3.4—9	1.95	26.553

由表 3 可得:喷洒嵌入式和水溶液涂覆式的流值基本相同,而采用拌和式负载方式时,其流值相对于前两者分别增大了 4.76%和 5.13%,稳定度相对于前两者分别减少了 11.61%和 16.86%。表明将纳米 TiO<sub>2</sub> 替代矿粉拌和到沥青混合料中,会出现稳定度下降和流值增加的现象,导致力学性能下降。

2.2 不同负载方式下的残留空隙率

该文设计的半柔性路面母体混合料的目标空隙率为 24%,按照 JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中的相关规定,这种大孔隙沥青混合料采用体积法进行检测,最大理论相对密度采用真空法进行试验。毛体积相对密度采用式(1)计算:

$$\gamma_s = \frac{m_s}{V \times \rho_{水, 25\text{℃}}} \tag{1}$$

式中:γ<sub>s</sub> 为 25℃时试件的毛体积相对密度,无量纲;m<sub>s</sub> 为干燥试件的空中质量(g);V 为干燥试件的体积(cm<sup>3</sup>);ρ<sub>水, 25℃</sub> 为 25℃时水的密度(g/cm<sup>3</sup>)。

对于养护成型后的半柔性路面材料,其吸水率小于 2%,可以采用表干法进行试验,采用式(2)计算试件的毛体积相对密度:

$$\rho_f = \frac{m_s}{m_f - m_w} \tag{2}$$

式中:ρ<sub>f</sub> 为试件的毛体积相对密度,无量纲;m<sub>s</sub> 为试件干燥质量(g);m<sub>f</sub> 为试件表干质量(g);m<sub>w</sub> 为试件水中质量(g)。

由于目前没有成型后的半柔性路面混合料最大理论相对密度的测试规程,此外混凝土硬化以后,也无法采用真空法进行试验。因此,参考文献[20]提出的半柔性路面灌浆后的最大理论密度计算公式进行计算。

$$\gamma_t = \frac{100 + p_a}{\frac{p_1}{\gamma_1} + \frac{p_2}{\gamma_2} + \dots + \frac{p_n}{\gamma_n} + \frac{p_a}{\gamma_a}} \times (1 - V_{v1}) + \gamma_m \times V_{v1} \tag{3}$$

式中:γ<sub>t</sub> 为理论最大相对密度,无量纲;p<sub>a</sub> 为油石比(%);p<sub>1</sub>, ..., p<sub>n</sub> 为各种矿料在总矿料质量中的比例(%);γ<sub>1</sub>, ..., γ<sub>n</sub> 为各种矿料相对水的密度;γ<sub>m</sub> 为砂浆的相对密度;V<sub>v1</sub> 为沥青混合料的连通空隙率(%)。

采用上述公式分别对 3 种不同纳米二氧化钛负载方式的半柔性路面混合料进行计算,成型后半柔性沥青混合料试件的残留空隙率结果见表 4。

由表 4 可以发现:① 不同负载方式的试件,初始空隙率约为 24%,经过灌浆后试件的残留空隙率降到 2.7%~3.5%。表明试件灌浆均匀,开口空隙在振动

灌浆的方式下,基本填满水泥砂浆,残余空隙率为试件的封闭空隙;② 残留空隙率基本保持一致,残留空隙率平均值分别为 3.324%、3.157%和 3.325%,都符合《半柔性路面技术应用指南》中的技术要求。但三者的变异性、差异性较大,A 组和 B 组的变异系数为 0.3 和 0.39,而拌和式变异系数为 0.16。由此表明,采用拌和式更有利于降低残余空隙率。

表 4 半柔性路面的空隙率

组别	试件编号	初始空隙率/%	残余空隙率/%
A	3.4-1	24.0	3.345
	3.4-2	24.2	3.467
	3.4-3	24.0	2.891
B	3.4-4	24.0	3.317
	3.4-5	23.9	2.711
	3.4-6	24.1	3.444
C	3.4-7	23.8	3.158
	3.4-8	23.5	3.334
	3.4-9	24.1	3.482

2.3 不同负载方式的车辙深度和动稳定度

按照半柔性路面技术应用指南的技术要求,动稳定度要大于 10 000 次/mm,不同的纳米二氧化钛负载方式对半柔性路面的高温性能有不同程度的影响,尤其是拌和式(纳米二氧化钛等体积替换矿粉)的负载方式。该文在最佳预留灌浆深度和灌浆率的条件下,对 3 种不同负载方式的半柔性路面进行高温车辙试验,试验时间为 60 min,结果如表 5 所示。

表 5 半柔性路面的动稳定度

组别	试件编号	60 min 车辙深度/mm	动稳定度/(次·mm <sup>-1</sup> )
A	3.4-1	1.112	21 000
	3.4-2	1.214	21 000
	3.4-3	1.183	28 636
B	3.4-4	1.081	22 000
	3.4-5	1.133	21 000
	3.4-6	1.025	21 000
C	3.4-7	0.833	16 579
	3.4-8	0.859	16 000
	3.4-9	0.942	16 832

由表 5 可以发现:① A、B 组的车辙深度均约为 1.1 mm,两者的动稳定度均保持在 20 000 次/mm 以上,而 C 组的车辙深度最大为 0.942 mm,动稳定度约为 16 500 次/mm。由此说明,拌和式的负载方式会导致高温性能下降;② 喷洒嵌入式和水溶液涂覆式车辙深度和动稳定度次数几乎一致,平均的车辙深度分别为 1.169、1.079 mm,平均的动稳定度为 23 545、21 333 次/mm。而拌和式的负载方式对半柔性路面高温性能有很大的衰减,其平均动稳定度为 16 470 次/mm,相对于前两者分别减少了 30.1%和 22.8%。与此同时,拌和式车辙深度也明显减小,平均车辙深度为 0.878 mm,相对于前两者分别减少了 24.8%和 18.7%。因此,采用拌和式负载的半柔性路面高温稳定性较差。

2.4 不同负载方式的低温性能

按照半柔性路面技术应用指南的技术要求,在最佳预留灌浆深度和灌浆率的条件下制备小梁试件,并分别对不同纳米二氧化钛负载方式的半柔性路面混合料进行低温弯曲试验,测试结果如表 6 所示。

表 6 半柔性路面混合料低温性能

组别	编号	跨中挠度/mm	抗弯拉强度/MPa	最大弯拉应变/ $\mu\epsilon$	弯曲劲度模量/MPa
A	3.4-1	0.233	7.253	1 225.823	5 916.494
	3.4-2	0.209	5.535	1 099.508	5 034.239
	3.4-3	0.181	5.535	952.508	5 811.171
B	3.4-4	0.284	7.878	1 488.454	5 293.043
	3.4-5	0.295	7.757	1 550.640	5 002.332
	3.4-6	0.291	7.508	1 527.960	4 913.688
C	3.4-7	0.344	7.878	1 803.454	4 368.534
	3.4-8	0.375	8.198	1 970.640	4 159.883
	3.4-9	0.341	7.508	1 790.460	4 193.290

由表 6 可以看出:① C 组的跨中挠度、最大弯拉应变整体大于 A 组和 B 组,而弯曲劲度模量整体比 A 组和 B 组减少约 1 000 MPa。由此表明,A 组和 B 组在低温下具有更高弯曲劲度模量,但抵抗变形的能力较低;② 不同纳米二氧化钛负载方式对半柔性路面的低温性能有较大的影响。三者的低温抗拉强度指标均能满足技术要求,喷洒嵌入式和水溶液涂覆式的低温性能较好,平均抗弯拉强度分别为 6.108、7.714 kN,平均最大弯拉应变分别为 1 092.613、1 522.35  $\mu\epsilon$ ,平

均劲度模量分别为 5 587.3、5 069.65 MPa。拌和式的低温性能相对较差,平均抗弯拉强度为 7.831 kN,相对于前两者分别增加了 22.0%和 14.94%,平均最大弯拉应变为 1 854.85  $\mu\epsilon$ ,相对于前两者分别增加了 41.09%和 17.93%,而平均劲度模量为 4 240.57 MPa,相对于前两者分别减少了 24.10%和 16.40%。结果表明,采用拌和式负载纳米 TiO<sub>2</sub> 的半柔性路面低温性能整体优于喷洒嵌入式和水溶液涂覆式。

### 3 结论

采用不同的负载方式将纳米 TiO<sub>2</sub> 负载到半柔性路面上,开展了一系列力学性能试验,得到以下结论:

(1) 稳定度性能试验结果表明,将纳米 TiO<sub>2</sub> 替代矿粉拌和到沥青混合料中,会出现稳定度下降和流值增加的现象,该负载方式会导致基本力学性能下降。

(2) 3 种负载方式下的残留空隙率基本保持一致,但喷洒嵌入式和水溶液涂覆式的残余空隙率变异性较大,约为拌和式的 2 倍。由此表明,采用拌和式更有利于降低残余空隙率,提高混合料均匀性。

(3) 车辙试验结果表明,喷洒嵌入式和水溶液涂覆式的动稳定度远远高于拌和式。表明采用拌和式负载的半柔性路面具有较低的高温抗车辙性能。

(4) 小梁弯曲试验显示,拌和式相对于喷洒嵌入式和水溶液涂覆式,具有较低的劲度模量。表明拌和式负载纳米 TiO<sub>2</sub> 的半柔性路面具有较好的低温抗裂性能。

### 参考文献:

[1] Zouzelka R, Rathousky J. Photocatalytic Abatement of NO<sub>x</sub> Pollutants in the Air Using Commercial Functional Coating with Porous Morphology[J]. Applied Catalysis B:environmental, 2017, 217: 466—476.

[2] Zhen Leng, Huayang Yu. Novel Method of Coating Titanium Dioxide onto Asphalt Mixture Based on the Breath Figure Process for Air—Purifying Purpose[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(5): 1—7.

[3] 张广泰,邓洋洋,叶奋. 纳米 TiO<sub>2</sub> 彩色防滑路面的尾气降

解效率及路用性能研究[J]. 中外公路, 2016(2).

[4] Zhen Leng, Huayang Yub, Zheming Gaoa. Study on Air—Purifying Performance of Asphalt Mixture Specimens coated with Titanium Dioxide Using Different Methods[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2018, 8(3): 1—8.

[6] Yoon S, Kim E, Yun Y, et al. Chemical Durability and Photocatalyst Activity of Acid—Treated Ceramic TiO<sub>2</sub> Nanocomposites[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018: 230—236.

[6] 王晓晓. OGFC 沥青路面尾气降解性能研究[D]. 北京建筑大学硕士学位论文, 2015.

[7] 黄维蓉,张宸,谭明,等. 不同拌和方式对水泥橡胶综合改性沥青性能的影响[J]. 中外公路, 2016(3).

[8] 钱国平,朱俊文,周大垚. 纳米 TiO<sub>2</sub> 涂层在沥青路面及稀浆封层中降解汽车尾气的效果对比试验研究[J]. 公路与汽运, 2016(3).

[9] 刘成虎,连瑞扬,任冶. 纳米 TiO<sub>2</sub> 光催化技术在沥青路面中的应用研究[J]. 交通运输研究, 2015(5).

[10] 谭忆秋,李洛克,魏鹏,等. 可降解汽车尾气材料在沥青路面中的应用性能评价[J]. 中国公路学报, 2010(6).

[11] 张华. 可降解汽车尾气的排水性沥青混合料性能评价[J]. 中外公路, 2016(3).

[12] 李文博,于江,李林萍. 纳米 TiO<sub>2</sub> 封层式光催化分解尾气型沥青路面研究[J]. 中外公路, 2017(5).

[13] 张华. 纳米 ZnO/SBS 改性沥青混合料路用性能评价[J]. 中外公路, 2016(2).

[14] 王伟明,高丹,吴旷怀. 半柔性路面材料性能研究[J]. 公路工程, 2014(1).

[15] 孔繁盛. 高性能半柔性路面材料性能研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2016.

[16] 李茜,李莹. 半柔性水泥沥青混合料的路用性能分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2018(5).

[17] 重庆交通大学. 半柔性路面应用技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[18] 张肖宁,王绍怀,吴旷怀,等. 沥青混合料组成设计的 CAVF 法[J]. 公路, 2001(12).

[19] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].

[20] 董营营. 高性能半柔性路面设计参数及施工工艺研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文, 2008.