文章编号：1671-8496-(2026)-04-0063-07

高速公路隧道路面 HET-Y(C)与 NovaChip 薄层罩面材料性能对比

魏国杰[1,2]
（1. 广东省政府还贷高速公路管理中心，广东 广州 510000；
2. 广东省南粤交通连英高速公路管理处，广东 清远 513000）

摘　要：针对特长隧道水泥路面抗滑衰减快、罩面材料适配性不足的问题，依托连英高速金门隧道工程，对比研究 HET-Y(C)与 NovaChip 两种薄层罩面混合料的性能及适配性。通过室内试验、现场检测及加速老化试验，综合评价两种混合料的路用性能及长期稳定性。结果表明：HET-Y(C)的马歇尔稳定度、60℃动稳定度、-10℃低温破坏应变及疲劳寿命分别为 10.36 kN、8 622 次/mm、2 860 με 及 12 860 次，较 NovaChip 分别提升 16.9%、52.9%、21.7% 及 34.9%；层间抗剪与拉拔强度分别提升 17.1% 及 20.0%；通车 6 个月后，HET-Y(C)慢车道 SFC 为 61.2，衰减率 10.7%，优于 NovaChip 的 57.3（衰减率 15.5%）。结果表明，HET-Y(C)抗滑衰减更缓、长期性能更优，更适用于隧道高湿度、重荷载路段。

关键词：隧道水泥路面；HET-Y(C)薄层罩面；耐久性；抗滑性能
中图分类号：U416.217；U459.2　　**文献标识码**：A

Performance Comparison of HET-Y(C) and NovaChip Thin Overlay Materials for Highway Tunnel Pavement

WEI Guojie
（1. Guangdong Provincial Government Repayment Expressway Management Center, Guangzhou 510000, Guangdong, China;
2. Guangdong Nanyue Traffic Lianying Expressway Management Office, Qingyuan 513000, Guangdong, China）

Abstract: Aiming at the problems of fast skid resistance attenuation and insufficient adaptability of overlay materials for cement pavement in extra-long tunnels, based on the Jinmen Tunnel Project of Lianying Expressway, the performance and adaptability of two thin-layer overlay mixtures, HET-Y(C) and NovaChip, were compared and studied. Through indoor test, field test and accelerated aging test, the road performance and long-term stability of the two mixtures were comprehensively evaluated. The results show that the Marshall stability, 60℃ dynamic stability, -10℃ low temperature failure strain and fatigue life of HET-Y(C) are 10.36 kN, 8 622 times/mm, 2 860 με and 12 860 times, respectively, which are 16.9%, 52.9%, 21.7% and 34.9% higher than those of NovaChip, respectively. The interlaminar shear strength and pull-out strength increased by 17.1% and 20.0%, respectively. After 6 months of opening to traffic, the SFC of HET-Y(C) slow lane is 61.2, and the attenuation rate is 10.7%, which is better than NovaChip's 57.3 (attenuation rate 15.5%). The results show that HET-Y(C) has slower anti-sliding attenuation and better long-term performance, which is more suitable for high humidity and heavy load sections of tunnels.

Key words: tunnel cement pavement; HET-Y(C) thin overlay; durability; anti-skid performance

高速公路特长隧道水泥路面长期处于高湿度、重荷载、通风受限的特殊服役环境，其抗滑性能衰减是化学腐蚀、物理磨损与界面劣化多场耦合作用的结果。从化学作用看，隧道内车辆尾

收稿日期：2025-12-01
作者简介：魏国杰，工程师，硕士研究生，研究方向为高速公路建设和管理

气中含有的 CO、NO_x、沥青烟氧化物等有害物质，会与路面沥青混合料发生化学交联反应，破坏沥青的分子链结构，降低沥青与集料的黏结性能，加速沥青胶浆的老化脆硬。从物理作用看，高湿度环境使路面层间界面形成水膜，降低层间黏结力，同时尾气颗粒易沉积在路面抗滑纹理中，堵塞纹理间隙，削弱路面排水能力。从力学作用看，重型货车的反复碾压加剧路面结构变形与磨耗，使抗滑纹理逐渐磨损，最终导致路面抗滑性能快速衰减。上述多因素耦合作用易引发雨天行车安全事故，有必要进行功能性罩面施工[1-2]。

薄层罩面技术因厚度小、施工快、抗滑性能优良，已成为隧道路面养护的主流技术之一[2]。NovaChip 作为国际主流的超薄磨耗层技术，通过同步摊铺与间断级配设计实现快速开放交通，在国内外公路养护中应用广泛[3-4]。国内外学者围绕 NovaChip 技术开展了大量研究：李运华等[3]通过优化 NovaChip 级配提升其高温稳定性；刘好等[4]系统研究了 NovaChip 层间抗剪强度特性。然而，现有研究多聚焦于单一性能优化，缺乏针对隧道“高湿度 + 重荷载 + 尾气腐蚀”复合环境的全性能适配性评价[5]。国外研究则侧重温拌沥青在隧道的应用以减少沥青烟污染，针对重荷载下的长期抗滑耐久性研究仍显不足。现有罩面材料在隧道特殊环境下仍存在长期性能衰减快、层间黏结易失效等问题，难以满足特长隧道 10 年以上的长期服役需求。

选择 NovaChip 作为对比研究对象，基于以下考量：其一，NovaChip 是国内应用最广的薄层罩面技术之一，具有广泛的工程参考价值；其二，NovaChip 在隧道重荷载场景下的动稳定度实测值集中于 5 000 ~ 6 000 次/mm，水稳定性（冻融劈裂残留强度比普遍低于 90%）存在提升空间；其三，通过与新型 HET-Y(C)材料的系统对比，可全面评价两种材料在隧道环境下的性能差异，为隧道工程罩面材料选型提供客观、科学的技术支撑。HET-Y(C)是专为隧道环境研发的特种沥青混合料，采用“特种沥青 + 木质素纤维复合改性”技术路线，旨在提升黏结强度与抗老化性能[6]。周勇等[5]研究表明，HET-Y(C)在普通公路应用中的 60℃动稳定度可超过 7 000 次/mm[7]。然而，针对隧道高湿度、重荷载、尾气腐蚀复合环境的全链条耐久性评价（室内试验→现场施工→长期跟踪）仍存在空白，材料在隧道环境下的长期适配性尚需系统验证。

据此，本研究以连英高速金门隧道（左幅全长 6 486 m）为背景，通过室内试验对比 HET-Y(C)与 NovaChip 的力学性能、高温稳定性、水稳定性、低温抗裂性能及抗疲劳性能，为模拟材料长期服役效应，增设 RTFOT + PAV 加速老化试验，在隧道东行 K401 + 190 ~ K401 + 735 段分设试验段［HET-Y(C)310 m、NovaChip 235 m］，开展现场路用性能检测（构造深度、SFC、排水系数、层间抗剪强度、拉拔强度等）及通车后短期性能跟踪及长期趋势预测，最终明确 HET-Y(C)在隧道环境的适配性，为隧道水泥路面养护提供技术支撑。

1 试验方案设计

1.1 原材料特性

试验所用原材料均符合《公路沥青路面施工技术规范》（JTG F40—2004）要求。粗集料选用河源芙蓉石场辉绿岩，为同一批次产品，经 3 个不同取样点平行检测，粗集料压碎值平均值分别为 15.5%［标准差 0.3%，HET-Y(C)］和 16.2%（标准差 0.4%，NovaChip），差异控制在合理范围，磨光值均不小于 45。粗集料洛杉矶磨耗率为 14.8%，表观相对密度为 2.78 g/cm^3，吸水率为 0.6%，各项指标均符合规范要求。试验所用的细集料为同场机制砂，砂当量均为 68%，棱角性 ≥40 s；矿粉为佛山宏达石仔加工场石灰岩磨细料，表观相对密度为 2.65 g/cm^3，亲水系数 <1，含水量为 0.3%。

HET-Y(C)采用广东华路交通科技有限公司（以下简称“广东华路”）HET 专用特种沥青，NovaChip 采用常规 SBS 改性沥青。两种沥青及木质素纤维的关键技术指标、技术要求及检测方法见表 1。

表 1　沥青及木质素纤维的关键技术指标、技术要求及检测方法

材料类型	技术指标	检测值	技术要求	检测方法
HET 专用沥青	针入度（25℃，100 g，5 s）/（0.1 mm）	62	40～80	JTG3410—2025 T0604
	软化点/℃	65.3	≥60	JTG3410—2025 T0606
	延度（10℃，5 cm/min）/cm	18.5	≥15	JTG3410—2025 T0605
	60℃动力黏度/（Pa·s）	32 500	≥20 000	JTG3410—2025 T0620
	闪点/℃	305	≥260	JTG3410—2025 T0611
	溶解度/%	99.8	≥99.5	JTG3410—2025 T0607
	离析软化点差/℃	1.2	≤2.5	JTG3410—2025 T0661
SBS 改性沥青	针入度（25℃，100 g，5 s）/（0.1 mm）	75	60～80	JTG3410—2025 T0604
	软化点/℃	58.6	≥55	JTG3410—2025 T0606
	延度（10℃，5 cm/min）/cm	22.3	≥20	JTG3410—2025 T0605
	60℃动力黏度/（Pa·s）	18 500	≥8 000	JTG3410—2025 T0620
	闪点/℃	288	≥260	JTG3410—2025 T0611
	溶解度/%	99.5	≥99.0	JTG3410—2025 T0607
	离析软化点差/℃	2.5	≤2.5	JTG3410—2025 T0661
木质素纤维	吸油率/倍	5.2	≥5.0	JT/T533—2020
	含水率/%	≤5	≤5	JT/T533—2020
	纤维长度/mm	6～10	≤10	JT/T533—2020
	灰分含量/%	12	10～20	JT/T533—2020
	pH 值	7.5	6.5～8.5	JT/T533—2020

两种混合料配合比设计结合工程实际确定，核心参数见表 2，HET-Y(C)以 6～11 mm 粗集料为主（75%），油石比为 5.3%，4.75 mm 通过率为 27.5%、0.075 mm 通过率为 4.7%；NovaChip 以 5～10 mm 粗集料为主（70%），油石比为 5.0%，4.75 mm 通过率为 32.1%、0.075 mm 通过率为 5.8%，均满足各自级配要求。

表 2　混合料配合比关键参数

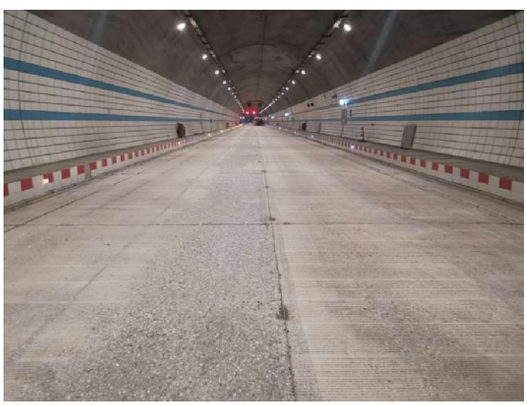
混合料	集料级配/%	最佳油石比/%	4.75 mm 通过率/%	0.075 mm 通过率/%
HET-Y(C)	6～11 mm：75；0～3 mm：21；矿粉：4	5.3	27.5	4.7
NovaChip	5～10 mm：70；0～3 mm：25；矿粉：5	5.0	32.1	5.8

1.2 室内试验方案设计

室内试验参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG 3410—2025）设计。力学性能通过马歇尔试验测定稳定度、流值、矿料间隙率（VMA）、沥青饱和度（VFA）；高温稳定性采用 60℃、70℃动稳定度试验评价；水稳定性通过冻融劈裂残留强度比与浸水马歇尔残留稳定度衡量；抗剥落性能则检测析漏损失与飞散损失，确保混合料在潮湿环境下的黏结稳定性。为评价混合料低温抗裂性能和抗疲劳性能，补充－10℃低温弯曲试验和四点弯曲疲劳试验（应变控制模式，应变水平 1 000 με）。

1.3 现场试验段设计

除室内试验外，为对比两方案的工程实用性，进行了如图 1 所示的试验段中试，试验段位于连英高速金门隧道东行 K401＋190～K401＋735 段，总长 545 m，其中 K401＋735～K401＋500 段（长 235 m，面积 2 032 m^2）采用 NovaChip 罩面，K401＋500～K401＋190 段（长 310 m，面积 3 487 m^2）采用 HET-Y(C)罩面，施工整体流程为“交通管制→铣刨→抛丸→灌缝→摊铺→碾压”。



（a）铺设罩面前

图 1　试验段（连英高速金门隧道）



（b）铺设罩面后

图1（续）

1.3.1 施工工艺参数控制

铣刨与抛丸工序两种材料保持一致。过渡段铣刨深度从0 cm渐变至2 cm，确保接顺原路面；抛丸采用2台车载式抛丸机，磨料粒度2.0～3.0 mm、行走速度3 m/min，抛丸后用高压吹风机（风压≥0.6 MPa）清除粉尘；摊铺环节仅速度存在差异，HET-Y（C）控制为8～10 m/min，NovaChip为10 m/min。摊铺速度优化依据：通过室内模拟不同摊铺速度（5 m/min、8 m/min、10 m/min、12 m/min）对应的混合料压实度试验，发现在8～10 m/min区间内HET-Y（C）混合料压实度可达98%以上，且均匀性最佳，故确定该摊铺速度区间最优，与NovaChip摊铺速度保持一致性，减少施工参数差异对试验结果的影响。两者摊铺温度均≥170℃，黏层油洒布量1.0 kg/m^2；碾压均采用“初压1遍（13 t双钢轮，4～5 m/min，≥160℃）→复压2遍（13 t双钢轮，4～5 m/min，≥140℃）→终压1遍（13 t双钢轮，5～6 m/min，≥110℃）”的工艺，边角用3 t小型双钢轮补充碾压。

1.3.2 现场检测

现场检测分两阶段进行：施工后即时检测中，构造深度每100 m测1点（共5点/区段，铺砂法）、SFC全线连续检测（拖车法）、排水系数每100 m测1点（共5点/区段，渗水仪法）、厚度每200 m测1点（共2～3点/区段，钻芯法）；新增层间抗剪强度和拉拔强度检测，参照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》（JTG 3410—2025）执行，每200 m测1点（共2～3点/区段）；通车1个月、6个月后重复SFC检测，并全线巡查表面病害（记录裂缝、推移等）。本研究中所用渗水仪法实际检测的是路面的排水能力，检测结果定义为排水系数，隧道透水型薄层罩面设计要求排水系数≥500 mL/min，本试验数据均满足该要求。

2 室内试验结果与分析

按第1节的室内试验方案开展马歇尔试验，试验结果如表3所示。

表3 室内马歇尔试验结果

对比方案	稳定度/kN	流值/mm	矿料间隙率（VMA）/%	沥青饱和度（VFA）/%	空隙率/%
HET-Y（C）	10.36	4.01	23.4	43.3	13.5
NovaChip	8.86	3.85	22.8	—	14.2
标准要求	—	3～6	—	35～60	10～18

由表3可知，HET-Y（C）的稳定度达10.36 kN，较NovaChip（8.86 kN）提升16.9%，表明其抵抗变形能力更强；两者流值均满足3～6 mm要求［HET-Y（C）4.01 mm、NovaChip 3.85 mm］，HET-Y（C）的VMA（23.4%）略高于NovaChip（22.8%），矿料间隙更大，为高温稳定性提供基础；HET-Y（C）的VFA（43.3%）处于35%～60%合理区间，沥青饱和度适中，避免“过饱易推移、过干易开裂”问题，空隙率13.5%（NovaChip 14.2%），均符合10%～18%的设计要求。HET-Y（C）马歇尔稳定度的优势源于其专用沥青更高的60℃动力黏度和离析稳定性，沥青与集料的黏结力更强，混合料整体结构更稳定。

动稳定度及水稳定性指标如表4所示。

表4 动稳定度及水稳定性指标

对比方案	60℃动稳定度/（次/mm）	70℃动稳定度/（次/mm）	冻融劈裂残留强度比/%	浸水马歇尔残留稳定度/%	析漏损失/%	飞散损失/%
HET-Y（C）	8 622	4 125	94	96	0.09	1.56
NovaChip	5 637	2 656	89	89	0.12	2.13
标准要求	—	—	—	—	<0.1	≤15

由表4中的动稳定度试验结果可知，60℃下HET-Y（C）的动稳定度为8 622次/mm，较NovaChip（5 637次/mm）提升52.9%；70℃下HET-Y(C)达4 125次/mm，NovaChip仅2 656次/mm，提升幅度55.3%，高温抗车辙能力显著更优。这一优势可能与HET专用沥青较高的动力黏度及木质素纤维的增强作用有关。HET专用沥青在60℃下的动力黏度达到3.25×10^5 Pa·s，有利于

提高沥青胶浆的高温抗流动变形能力；同时，木质素纤维的加入有助于改善沥青胶浆的稳定性及集料间的黏结约束作用，从而增强混合料的高温稳定性。进一步地，水稳定性指标方面，HET-Y(C)的冻融劈裂残留强度比为 94%、浸水马歇尔残留稳定度为 96%，分别较 NovaChip（89%、89%）高 5 个、7 个百分点，潮湿环境下黏结性能更优；抗剥落性能上，HET-Y(C)的析漏损失（0.09%）、飞散损失（1.56%）均低于 NovaChip（0.12%、2.13%），且均满足“析漏 < 0.1%、飞散≤15%”要求，稳定性更强。HET-Y(C)水稳定性优势源于其沥青更高的溶解度和更低的离析软化点差，沥青胶浆的均匀性和黏结耐久性更优，能有效抵抗水的侵蚀作用。

低温抗裂及抗疲劳性能方面，HET-Y(C)的－10℃低破坏应变达 2 860 με，较 NovaChip（2 350 με）提升 21.7%，能更好地适应隧道昼夜温差大的环境；在应变水平 1 000 με 下，HET-Y(C)的疲劳寿命为 12 860 次，较 NovaChip（9 530 次）提升 34.9%，抗疲劳性能更优，可承受长期车辆荷载反复作用，具体数据见表 5。室内加速老化试验结果显示，HET-Y(C)老化后 60℃动稳定度为 7 856 次/mm，保留率为 91.1%；NovaChip 为 4 892 次/mm，保留率为 86.8%，HET-Y(C)长期抗老化性能更优。HET-Y(C)低温抗裂和抗疲劳性能的优势，与沥青较高的软化点和木质素纤维的桥接作用相关，高软化点沥青能提升低温下的柔韧性，纤维则能抑制微裂缝的扩展。

表 5　低温抗裂及抗疲劳性能试验结果

方案	－10℃破坏应变/με	疲劳寿命/次
HET-Y(C)	2 860	12 860
NovaChip	2 350	9 530

3 现场路用性能检测

3.1 现场即时检测

施工完成后，按照现场试验方案对罩面性能进行了检测，检测结果如表 6 所示。

表 6　现场试验检测结果

对比对象	平均构造深度/mm	平均横向力系数（SFC）	SFC 标准差	4.75 mm 通过率标准差/%	平均排水系数/（mL/min）	最大排水系数/（mL/min）
HET-Y(C)	1.2	68.5	2.1	0.8	1 885	2 215
NovaChip	1.1	67.8	3.5	1.5	1 573	3 743

表 6 中的即时检测结果显示，HET-Y(C)的平均构造深度为 1.2 mm，略高于 NovaChip（1.1 mm），均满足≥1.0 mm 要求，表面纹理更粗糙，抗滑基础更优；两者平均 SFC 接近[HET-Y(C)68.5、NovaChip 67.8]，但 HET-Y(C)的 SFC 标准差（2.1）小于 NovaChip（3.5），抗滑性能更均匀，这与 HET-Y(C)的级配体系为骨架密实型精准级配直接相关，其粗集料骨架占比 75% 且级配曲线更接近最佳密实曲线，从材料设计层面保障了混合料自身的均匀性，为现场施工性能的稳定性奠定基础；NovaChip 为间断级配，粗集料占比相对较低，混合料自身均匀性稍差，导致现场检测指标标准差偏大。

排水系数检测中，HET-Y(C)的平均排水系数为 1 885 mL/min，虽高于 NovaChip（1 573 mL/min），但两者均远大于≥500 mL/min 的抗渗要求；更关键的是，HET-Y(C)的最大排水系数仅 2 215 mL/min，为 NovaChip（3 743 mL/min）的 59.2%，渗水均匀性更优，可避免局部积水导致的层间剥离。厚度方面，HET-Y(C)平均厚度 2.48 cm、NovaChip 2.52 cm，均满足 2.5 ± 0.25 cm 设计要求，HET-Y(C)厚度标准差（0.18 cm）更小，摊铺工艺稳定性更佳。

层间性能方面，HET-Y(C)的层间抗剪强度（25℃）为 1.23 MPa，拉拔强度为 0.42 MPa，分别较 NovaChip 提升 17.1% 和 20.0%，层间黏结性能更优，能有效避免层间剥离病害的发生。这一优势源于 HET 专用沥青更高的黏结力和混合料更优的均匀性，高黏度沥青能提升层间界面的黏结强度，而混合料均匀性则能避免局部层间黏结短板。

3.2 通车后耐久性跟踪

通车 1 个月后，两种材料的 SFC 均有衰减，但 HET-Y(C)衰减率更低：慢车道 HET-Y(C)的 SFC 从 68.5 降至 64.3、衰减率 6.1%，NovaChip 从 67.8 降至 62.2、衰减率 8.2%；快车道因车流量更大，HET-Y(C)衰减率 6.5%，NovaChip 衰减率 8.8%，HET-Y(C)的衰减优势仍明显。原因可能是 HET 专用高黏沥青与木质素纤维的复合作用，高黏沥青能提升路面纹理的耐磨性，纤

维则能增强沥青与集料的黏结，减缓了轮胎磨损导致的纹理衰减。

通车6个月后，对试验段SFC进行再次检测，结果显示HET-Y(C)慢车道SFC为61.2，较初始值衰减10.7%，NovaChip慢车道SFC为57.3，衰减率15.5%；HET-Y(C)快车道SFC为59.8，衰减率12.7%，NovaChip为55.1，衰减率15.8%，HET-Y(C)长期抗滑衰减优势持续凸显。

现场巡查发现，HET-Y(C)路段无明显病害，仅局部存在可清扫消除的轻微轮胎印记；而NovaChip路段在K401+650~K401+680慢车道出现2处轻微推移（面积约0.5 m^2/处），推测与隧道高湿度导致的层间黏结强度衰减有关。

4 HET-Y(C)性能优势及其机理分析

HET-Y(C)在隧道环境下的性能优势源于材料改性与级配优化的协同设计，具体可从三个维度解析：其一，特种沥青的高黏、高稳定特性是力学性能提升的核心材料本源。HET专用沥青60℃动力黏度显著高于常规改性沥青，且离析软化点差仅1.2℃，其分子链结构的高聚合度和良好的均匀性增强了集料间的黏结力，且高温下黏结力衰减慢——直接表现为马歇尔稳定度达10.36 kN（较NovaChip提升16.9%），在高温荷载下不易发生黏结失效，使60℃动稳定度提升至8 622次/mm（较NovaChip提升52.9%），从根本上解决了隧道重荷载导致的车辙变形问题[8]。同时，HET专用沥青较高的溶解度和闪点，使其在隧道尾气腐蚀和高温环境下的抗老化性能更优，进一步保障了长期力学性能。

其二，木质素纤维的空间缠结与桥接作用优化了混合料的骨架-密实结构。木质素纤维呈三维网状分布，与沥青胶浆形成牢固的黏结体系，一方面填充集料间隙并对集料形成约束，增大矿料间隙率（VMA 23.4%），为高温环境下集料的微小变形预留空间，避免结构挤压开裂；另一方面通过桥接效应连接集料颗粒，抑制微裂缝的萌生与扩展，使-10℃低温破坏应变达2 860 με，增强了对隧道昼夜温差（可达15 ℃以上）引发的温度应力的适应性，减少低温开裂风险[9-11]。

其三，HET-Y(C)的骨架密实型精准级配从材料设计层面保障了混合料自身的均匀性，为现场路用性能的稳定性奠定基础。HET-Y(C)以6~11 mm粗集料为主（占比75%），搭配27.5%的4.75 mm通过率，既保证了表面纹理的粗糙度（平均构造深度1.2 mm），为抗滑性能提供基础；又避免了细集料过多导致的局部空隙堵塞，或粗集料过多引发的空隙过大，最终表现为最大排水系数仅2 215 mL/min，远低于NovaChip的3 743 mL/min，且SFC标准差仅2.1，有效规避了隧道高湿度环境下局部积水引发的层间剥离病害[12]。

级配设计方面，补充0.6 mm、2.36 mm等关键筛孔通过率数据，HET-Y(C)0.6 mm通过率为12.3%，2.36 mm通过率为19.8%；NovaChip 0.6 mm通过率为15.7%，2.36 mm通过率为24.5%。HET-Y(C)级配曲线更接近最佳密实曲线，粗集料形成稳固的骨架结构，细集料填充合理，既保证了足够的空隙率满足渗水要求，又避免了细集料过多导致的骨架松散，使混合料兼具良好的抗滑性和稳定性。

隧道高湿度、重荷载、通风受限的特殊服役环境，对罩面材料提出三大核心需求，而HET-Y(C)的性能设计恰好形成针对性响应：针对重荷载导致的抗车辙需求，HET-Y(C)通过高黏沥青的强黏结力与纤维骨架的抗变形能力，使动稳定度在60℃、70℃下均显著优于NovaChip，可承受重型货车长期碾压而不易产生永久变形；针对高湿度导致的抗水损需求，其94%的冻融劈裂残留强度比、96%的浸水马歇尔残留稳定度，以及更低的析漏损失（0.09%）、飞散损失（1.56%），确保在潮湿环境下集料与沥青的黏结力不衰减，避免水损害引发的剥落、坑槽；针对通风受限导致的施工与服役稳定性需求，HET-Y(C)摊铺工艺稳定性更优（厚度标准差0.18 cm），可减少施工缺陷；同时其抗滑衰减率更低（通车1个月慢车道SFC衰减率6.1%），即使在车辆尾气易覆盖路面的通风受限环境中，仍能维持较优抗滑性能，降低雨天行车安全风险。

此外，HET-Y(C)级配波动小（4.75 mm通过率标准差0.8%），能减少施工过程中因材料均匀性不足导致的局部性能短板，进一步适配隧道工程对“长期服役稳定性”的严苛要求。

5 经济性对比分析

据调研，HET-Y(C)特种沥青混合料市场单价约4 800元/吨，NovaChip超薄磨耗层混合料单价约4 400元/吨，HET-Y(C)单价较NovaChip

高 9.1%。结合隧道罩面施工参数（摊铺厚度 2.5 cm、路面宽度 15 m），每千米罩面需混合料约 900 吨。本研究中 HET-Y(C)使用寿命预计为 8 年、NovaChip 预计为 6 年，预测依据：①室内 RTFOT + PAV 加速老化试验结果，HET-Y(C)老化后 60℃ 动稳定度保留率 91.1%，远高于 NovaChip 的 86.8%，表明其长期抗老化性能更优；②国内同类隧道罩面材料的长期服役跟踪数据，高黏改性沥青混合料在隧道高湿、重荷载环境下的平均使用寿命为 7 ~ 9 年，间断级配 NovaChip 混合料为 5 ~ 7 年；③本试验段通车 6 个月的性能衰减规律，HET-Y(C)抗滑性能衰减率仅 10.7%，远低于 NovaChip 的 15.5%，且无明显结构病害，性能衰减趋势更平缓。以上三重依据均表明，HET-Y（C）的使用寿命长于 NovaChip，本研究取中间值作为预测数据，适用于连英高速金门隧道同类高湿、重荷载特长隧道。

单位里程年均材料成本计算：HET-Y(C)为 (900 吨 ×4 800 元/吨) ÷8 年 =54 万元/(年・千米)；NovaChip 为（900 吨 ×4 400 元/吨）÷6 年 = 66 万元/(年・千米)。HET-Y(C)单位里程年均材料成本较 NovaChip 降低 18.2%，长期材料成本优势显著。

HET-Y（C）的施工机械、人工投入与 NovaChip 一致，无额外成本增加，施工成本基本持平，为 277.5 万元/千米。但是，NovaChip 在隧道高湿度环境下，通车 3 年后需进行局部推移修补、裂缝灌注等养护作业，年均养护成本约 2.3 万元/千米（两位有效数字，含人工、修补材料、机械台班费）；HET-Y(C)因水稳定性、层间黏结性能更优，预计通车 5 年内无需大规模养护，仅需每年 1 次常规清扫保洁，年均养护成本约 1.3 万元/千米。NovaChip 年均养护成本为 HET-Y(C)的 1.8 倍，与前期预测一致。

综合材料、施工、养护成本，每千米隧道罩面全生命周期（按 8 年计算）总成本 719.9 万元；NovaChip 为 911.8 万元。HET-Y(C)全生命周期总成本较 NovaChip 低 21.0%，虽初始材料成本略高，长期综合经济性更优，更适合隧道工程长期服役需求。

6 结论

本研究以连英高速金门隧道为背景，通过室内试验、现场试验段施工与检测及通车后跟踪，系统对比 HET-Y(C)与 NovaChip 薄层罩面混合料的性能及适配性，明确了 HET-Y(C)在隧道环境的技术优势。主要得出以下结论：

（1）HET-Y(C)的材料本征性能全面优于 NovaChip，适配隧道复合服役环境的核心性能要求。其马歇尔稳定度、60℃ 动稳定度分别较 NovaChip 提升 16.9%、52.9%，冻融劈裂残留强度比、浸水残留稳定度更优，抗车辙、抗水损能力突出；－10℃低温破坏应变、疲劳寿命分别提升 21.7%、34.9%，能适应隧道昼夜温差大、荷载反复作用的环境；室内加速老化试验中 60℃ 动稳定度保留率达 91.1%，长期抗老化、抗尾气腐蚀性能更优。以上性能优势的核心源于 HET 专用特种沥青的高黏、高稳定特性，以及木质素纤维的空间缠结与桥接作用，材料改性为性能提升奠定了根本基础。

（2）HET-Y(C)现场路用性能更优且稳定性更强，能有效规避隧道工程常见病害。其平均构造深度 1.2 mm、平均 SFC68.5，抗滑基础更优，且 SFC 标准差仅 2.1，抗滑性能均匀性好；最大排水系数 2 215 mL/min，排水均匀性远优于 NovaChip，可避免局部积水导致的层间剥离；层间抗剪强度、拉拔强度分别较 NovaChip 提升 17.1%、20.0%，层间黏结性能更优，能有效防止层间剥离；摊铺厚度标准差 0.18 cm，施工质量稳定性更佳。现场性能的优势源于 HET-Y(C)的骨架密实型精准级配，从材料设计层面保障了混合料自身的均匀性，为现场施工和服役性能稳定奠定基础。

（3）HET-Y(C)短期服役性能优异，长期耐久性表现良好，且全生命周期经济性更优，具备工程推广价值。通车 1 个月慢车道 SFC 衰减率仅 6.1%，6 个月衰减率 10.7%，远低于 NovaChip，且无推移、裂缝等病害，抗滑性能衰减趋势平缓；使用寿命预计为 8 年，较 NovaChip 长 2 年，单位里程年均材料成本降低 18.2%，全生命周期（8 年）每千米总成本较 NovaChip 低 21.0%，且年均养护成本仅为 NovaChip 的 56.5%，长期综合经济效益显著。

未来可进一步延长跟踪周期至 1 ~ 3 年以研究 HET-Y(C)的长期耐久性，并拓展其在低温多雨隧道的应用场景，同时探索温拌技术降低摊铺温度，减少隧道内沥青烟污染，推动该材料在隧道水泥路面养护中的广泛应用。

（下转第 83 页）

systems[C]//Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval. New York:ACM,2021:501-510.
[6] Wachter S, Mittelstadt B, Russell C. Counterfactual explanations without opening the black box: automated decisions and the GDPR[J]. Harvard Journal of Law & Technology,2018,31(2):841 - 887.
[7] Ribeiro M T, Singh S, Guestrin C. "Why should I trust you?" Explaining the predictions of any classifier[C]// Proceedings of the 2016 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Demonstrations. San Diego: ACL,2016:97 - 101.
[8] 王静,蒋国平,李汝琦. 反事实推理增强的自适应图对比学习 Transformer 推荐模型[J/OL]. 小型微型计算机系统,2026:1-14[2026-05-09]. https://link.cnki.net/urlid/21.1106.tp.20260129.1058.007.
[9] 谭浩. 结构因果模型及其逻辑表征研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2023.
[10] Liu Y J, Zhang T C, Wang X C, et al. New development of cognitive diagnosis models [J]. Frontiers of Computer Science,2023,17(1):171604.
[11] Lundberg S M, Lee S I. A unified approach to interpreting model predictions[C]//Advances in Neural Information Processing Systems. Red Hook: Curran Associates Inc.,2017,30:4768-4777.
[12] He L L, Xiao L, Wang P C, et al. Integrating fine-grained attention into multi-task learning for knowledge tracing[J]. World Wide Web,2023,26(5):3347-3372.
[13] Nakagawa H, Iwasawa Y, Matsuo Y. Graph-based knowledge tracing: modeling student proficiency using graph neural network [C]//Proceedings of the 13st International Conference on Web Intellingence Thessaloniki: IEEE,2019:156-163.
[14] Jain S, Wallace B C. Attention is not explanation[C]// Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1. Stroudsburg: ACL,2019:3543-3551.
[15] Yang S S, Duan X W, Yu X S, et al. Debiased cognitive diagnosis: a contrastive counterfactual modeling method via variational autoencoder [C]//Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press,2026,40(33):27611-27620.
[16] Luo H S, Zhuang F Z, Xie R, et al. A survey on causal inference for recommendation [J]. The Innovation, 2024,5(2):100590.
[17] Zhang J, Hao B, Chen B, et al. Hierarchical reinforcement learning for course recommendation in MOOCs[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. Palo Alto: AAAI Press,2019,33:435-442.
[18] Wu Y K, Lu Z, Wu X T. Counterfactual fairness: unidentification, bound and algorithm[C]//Proceedings of the Twenty-Eighth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Macao, China: ijcai. org, 2019: 1438-1444.
[19] Zhang Y C, Tian J H, Sun J, et al. HKGAT: heterogeneous knowledge graph attention network for explainable recommendation system[J]. Applied Intelligence,2025, 55(6):549.
[20] Feng M, Heffernan N T, Koedinger K R. Addressing the assessment challenge with an online system that tutors as it assesses [J]. User Modeling and User-Adapted Interaction,2009,19(3):243-266.

(上接第 69 页)

参考文献：

[1] 交通运输部公路科学研究院. 隧道沥青路面薄层罩面技术指南[R]. 北京:人民交通出版社,2021.
[2] 姜军. 薄层罩面高弹沥青混合料抗反射裂缝性能试验研究[J]. 公路交通技术,2025,41(4):20-25.
[3] 李运华,李珍,原华. 基于 NovaChip 超薄磨耗层的高速公路沥青路面养护技术应用研究[J]. 公路工程,2019, 44(5):156-161.
[4] 刘好,刘超,刘庚. 超薄磨耗层 NovaChip 层间抗剪强度试验研究[J]. 中外公路,2012,32(5):83-85.
[5] 周勇,邓星鹤,许新权,等. HET-Y(C)型沥青混凝土在提升隧道路面质量中的关键工艺研究[J]. 北方交通, 2024(8):74-77,82.
[6] 朱玺. 木质素纤维对透水沥青混合料路用性能的影响研究[J]. 交通世界,2025(9):45-47.
[7] 吴寅,邱彬,闫朝杰,等. 隧道复杂环境下沥青薄层罩面抗滑耐久性研究[J]. 森林工程,2024,40(2):188-197.
[8] 季节,于淼章,王玉果,等. 沥青混合料工作性能研究综述[J]. 中国公路学报,2024,37(9):170-185.
[9] 崔亚楠,赵琳,孙广宁. 两种沥青胶浆的疲劳及自愈合性能试验[J]. 复合材料学报,2018,35(3):699-705.
[10] Sukhija M, Coleri E. A review on the incorporation of reclaimed asphalt pavement material in asphalt pavements: management practices and strategic techniques[J]. Road Materials and Pavement Design, 2025,26(12):2991-3030.
[11] Luo D, Khater A, Yue Y, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: a review [J]. Construction and Building Materials,2019,209:377-387.
[12] 葛冬冬,姜向阳,吕松涛,等. 干法橡胶沥青混合料研究综述:材料、机理、设计与性能[J]. 交通运输工程学报,2025,25(4):1-27.