DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.048

胶粉类改性沥青技术理念及性能指标体系对比研究

李正中[1,2]，柴东然[3]，李翠红[4]，肖庆一[5]
（1.天津市交通科学研究院，天津市 300074；2.长安大学 公路学院；3.北京市首都公路发展集团有限公司；
4.天津海泰环保科技发展股份有限公司；5.河北工业大学 土木与交通学院）

摘要：胶粉类改性沥青是一种有效的节能环保技术，在各等级公路建设养护过程中得到了广泛应用。由于其组成材料的复杂性和改性工艺的多样性，经过近20年的研究实践，形成了不同的技术体系。该文对“胶粉改性沥青”和“橡胶沥青”两种技术体系的研发应用理念进行了梳理，对其相应的改性机理、改性工艺、技术指标进行了对比分析，可为胶粉类改性沥青的技术选择和工程应用提供借鉴。

关键词：胶粉改性沥青；橡胶沥青；改性机理

将废旧轮胎胶粉用于道路石油沥青改性，能够变废为宝、节约资源、降低造价，有效改善普通沥青的路用性能，提升沥青路面服务品质和使用寿命，同时，解决废旧轮胎大量堆积衍生的环境污染问题，实现技术、经济、社会效益的统一，已经被国内外公认为一种有效的循环再生利用技术，并被纳入行业科技成果推广目录和示范工程项目。经过近20年的试验研究和工程实践，胶粉类改性沥青的应用领域越来越广，应用规模逐年上升，行业对胶粉类改性沥青的认识也越来越理性、客观，对胶粉类改性沥青的研究也越来越深入。

天津市早在2004年开始，就在市政道路和国省干线公路试用胶粉类改性沥青，于2006年编制了中国首部胶粉改性沥青路面施工技术规范。截至目前，天津市高速公路中上面层已大部分使用胶粉类改性沥青，可以说是中国胶粉类改性沥青应用最广泛、最深入的省份，在研发、生产、应用等方面积累了丰富的经验。笔者有幸全程参与了天津市胶粉类改性沥青的研发应用全过程，该文结合工程实践，对胶粉类改性沥青的技术研发理念和性能指标体系进行探讨。

1 研发应用理念梳理

胶粉类改性沥青作为新型道路建筑材料，主要应用于各等级公路和城市道路领域。由于其组成材料的复杂性、改性工艺的多样性，以及独特的环保特性和高黏、高耐久性等技术优势，公路建设、橡胶工业、石油化工等行业都从各自专业角度，不断推动此类材料的机理分析、产品研发、工程应用、标准编制等工作。经过近20年的工程应用实践，胶粉改性沥青已形成了两套相对独立的技术体系，分别是依托于公路建设领域的“橡胶沥青”体系和依托于橡胶石化领域的“胶粉改性沥青”体系。

1.1 橡胶沥青

20世纪90年代，由同济大学牵头，在中国首次开展了对橡胶沥青的试验研究，但最终因受废旧轮胎处理工艺、改性沥青加工工艺等限制，未能实现大规模应用。伴随着中国废旧汽车轮胎堆积问题日益严重，以及大规模沥青路面建设对高性能沥青的市场需求，交通运输部公路科学研究院、广州金邦橡胶沥青有限公司等单位借鉴并引进美国设备，于2001年再次启动了对橡胶沥青的理论研究、试验验证、装备研发及产业化应用等工作，由此推动了橡胶沥青行业的蓬勃发展，并建立了相对完整的产学研用体系。

公路建设领域主要借鉴美国的湿法橡胶沥青技术，其对应的“橡胶沥青”是一种不同于传统SBS改性沥青结构的新型改性材料，主要通过胶粉与沥青在高温状态（200 ℃以上）下充分融胀反应所得。“橡胶沥青”加工工艺强调高温搅拌混合，以物理溶胀为主，主要为发挥胶粉颗粒的弹性作用；通常采用现场改性模式，工艺末端直接对接拌和楼；以黏度作为主要控制指

收稿日期：2019－03－18
基金项目：天津市应用基础与前沿技术研究计划项目（编号：15JCYBJC23100）；河北省自然科学基金资助项目（编号：E2016202279）
作者简介：李正中，男，博士研究生，高级工程师.E－mail:lizhengzhonglzz@163.com

标。目前，公路建设领域对“橡胶沥青”的研究方向主要集中于橡胶沥青性能测试方法的适用性、混合料级配优化及配合比设计、混合料路用性能及力学性能评价、产品应用领域拓展等方面，更加关注胶粉颗粒在改性沥青中的存在形式，通常建议只能用于间断级配并采用高油石比。

1.2 胶粉改性沥青

橡胶及石油化工行业对胶粉类改性沥青也非常青睐，并于同期并行开展了相关的研究应用工作。作为重要的国家战略资源，橡胶行业对废旧轮胎的循环利用需求更加关注，而且，依托于对橡胶、沥青材料特性的深入认识，以及橡胶工业的技术进步，该领域对胶粉改性沥青的研究更为深入，更偏重于机理分析和产业化应用。

橡胶及石化行业采用的技术路线属于中国首创，与公路建设领域研发理念显著不同，尽管都是将废旧轮胎胶粉用于沥青改性，但其研发的“胶粉改性沥青”的改性机理和产品特性与“橡胶沥青”存在较大差别。“胶粉改性沥青”是以胶粉作为改性剂加入沥青中并辅以其他化学助剂，通过物理和化学反应所得。其加工工艺强调高温多次剪切或研磨，需要添加各种化学助剂实现胶粉与沥青的反应，以化学改性为主；现场改性和工厂化加工均可，实现了长时间储存和远距离运输，产品更加稳定和均匀；产品性能特点接近于常见的聚合物改性沥青。目前，“胶粉改性沥青”的研究主要集中于胶粉的选择及预处理、胶粉与沥青的混熔界面处理、改性工艺优化、改性助剂优化研究等方面，更强调胶粉颗粒在改性沥青中的分布均匀性以及混熔体系的稳定性，对连续级配和间断级配具有普适性，且油石比与 SBS 改性沥青混合料基本相当。

总体来说，“橡胶沥青”与“胶粉改性沥青”源于不同的技术路线，“橡胶沥青”概念源于美国橡胶沥青路面协会，其主要出发点是解决废旧轮胎积存所衍生的环境问题，以废物利用为研发导向，重点是解决废旧轮胎的消耗问题。“胶粉改性沥青”概念由中国橡胶及石化行业提出，其主要出发点是解决胶粉改性沥青的路用可行性和技术实现路径，以提升普通沥青技术性能为研发导向，重点是实现沥青的高性能需求。随着工程应用的不断深入，“胶粉改性沥青”技术体系能够解决“橡胶沥青”的储存稳定性、特定级配、高油石比等问题，使用更加方便、造价相对较低、更加符合国情，已逐步得到中国学术界、产业界及建设单位的广泛认同，也获得了美国橡胶沥青协会的认可，已成为胶粉类沥青应用的首选方案。同时，“橡胶沥青”和“胶粉改性沥青”两种技术理念互为借鉴、日益融合，胶粉预处理、混熔工艺优化、改性过程中的均化分散及脱硫过程控制等内容，已成为中国从事胶粉类改性沥青研究需要考虑的主要因素。

2 改性机理及特性分析

目前，对胶粉类改性沥青改性机理的研究主要基于界面理论、混熔理论；测试方法主要有四组分试验、黏度变化试验、扫描电镜试验、红外光谱试验等。宏观层面，胶粉类改性沥青的改性过程主要分为 4 个阶段。第 1 阶段，胶粉颗粒体积熔胀，吸收沥青中的轻质组分，通过组分迁移促使沥青胶体结构的发育转变；第 2 阶段，胶粉颗粒通过凝胶膜连接，形成连续相的混熔体系；第 3 阶段，胶粉颗粒脱硫降解，与沥青发生物质交换，对沥青胶体体系进行化学改性；第 4 阶段，未完成降解的胶粉颗粒在沥青中悬浮分布，依靠凝胶膜实现弱连接，起到一定程度的物理加筋作用。尽管“胶粉改性沥青”与“橡胶沥青”的核心理念都是通过胶粉颗粒在热沥青中的混熔、熔胀、交联来实现对原沥青结构体系的改变，但在改性机理、改性工艺、技术性能等方面存在较大差异。

2.1 改性机理差异

“橡胶沥青”是胶粉与基质沥青按照一定比例在高温环境下不停搅拌发育而成，通常只采用简单机械慢速搅拌工艺，主要经历了胶粉的溶胀、吸附等过程，以物理改性过程为主，而“胶粉改性沥青”在搅拌和混熔发育之间增加了高速剪切研磨工序，并添加了相应的稳定剂、交联剂等化学助剂，目的是催化和控制胶粉颗粒与原沥青的化学改性过程，使胶粉分散更加均匀、性能更加稳定。

2.2 改性工艺差异

“橡胶沥青”是在高温（不低于 210 ℃）下，将粒径较大的胶粉（22～26 目）与基质沥青混熔发育一定时间后制得。而“胶粉改性沥青”生产温度一般为 180～190 ℃，胶粉粒径通常选用 30～60 目，混熔过程中需要经过胶体磨研磨分散，并添加各种化学助剂。“胶粉改性沥青”通过化学改性作用，增强了胶粉与沥青混熔体系的稳定性，因此，其性能的可控性、均匀性、稳定性、胶粉颗粒与沥青间的节点效应力均明显强于“橡胶沥青”，可根据工程使用要求对生产工艺进行多角度的优化调整，如调整工艺参数（顺序、时间、温度）、调整胶

粉掺量或粒径、调整助剂类型及掺量等，以更好地符合设计使用要求，实现一定程度的定制化。

2.3 技术性能差异

“橡胶沥青”采用的废轮胎胶粉颗粒较粗，胶粉在普通沥青内部很难形成较强的网络结构，其整体性能指标较“胶粉改性沥青”要低，尤其表现在软化点、低温延度、离析等方面；且“橡胶沥青”生产工艺灵活性小，产品性能指标难以调整。在施工泵送方面，“橡胶沥青”中胶粉颗粒较粗，胶粉在沥青中的流动阻力较大，成品沥青表观黏度大，不利于管道输送，易造成管道堵塞。另外，较大颗粒的胶粉也会影响碾压效果，容易因级配或施工不合理导致碾压不密实。而“胶粉改性沥青”采用了更细的胶粉，降低了改性温度，延缓了沥青老化和胶粉衰减，也可以与多种聚合物形成复配，因此，其性能指标可调节性巨大，且较细的胶粉有利于改善改性沥青的流动性，混合料的施工和易性更强，更易于碾压密实。

“橡胶沥青”与“胶粉改性沥青”主要性能指标对比如表 1 所示。

由表1可以看出：“胶粉改性沥青”和“橡胶沥青”均将旋转黏度作为关键控制指标，采用 180 ℃作为试验温度，主要是考虑胶粉与沥青混熔过程中的脱硫反应过程特点，180 ℃旋转黏度测试值较为平稳，更能反映其工程应用特性。天津市地方标准明确了“胶粉改性沥青”黏度试验所采用的转子型号及转速（27 号转子、转速为 20 r/min），实践证明，同一种转子型号下，转速越快所测黏度值越小，如果采用不同的转子型号及转速，将使得试验结果缺乏可比性。同时，“胶粉改性沥青”的软化点、延度指标均高于“橡胶沥青”，黏度调整范围也更广，且增加了储存稳定性（离析）指标，主要考虑了胶粉改性沥青工厂化加工和长距离运输的特点，设定的离析技术指标≤5 ℃不仅满足工程需要，也符合中国胶粉改性沥青行业的生产应用技术水平，能够有效提升其使用性能。

表 1 “橡胶沥青”与“胶粉改性沥青”主要性能指标对比

对比指标	单位	橡胶沥青	胶粉改性沥青
软化点	℃	≥55（很难达到 60）	≥60（可超过 70）
25 ℃针入度	0.1 mm	30～60	30～60
5 ℃延度	cm	≥5	≥10
180 ℃布氏黏度	Pa·s	2～4	1～4
离析软化点差	℃	—	≤5
性能指标可调节性		不可调节	可按照设计需求调整
改性设备要求		特殊设备	通用设备
改性工艺要求		现场改性	工厂化、现场改性均可
级配适应性		间断级配	所有级配类型
油石比	%	7～9	4～6
施工和易性		差	优
经济性		差	优

3 结语

“胶粉改性沥青”与“橡胶沥青”作为两种不同的技术体系，其改性机理、工艺和产品指标存在较大的差异，各有特点，均能够有效利用轮胎胶粉的技术特性，在工程实践中应根据项目需求进行针对性的选择应用。相对来说，“胶粉改性沥青”改性工艺更为复杂，但性能更加稳定，且能够实现长距离运输，对矿料级配具有很好的适应性，油石比相对较低，产品性能调整方便，更加符合国情。同时，胶粉类改性沥青由于组成材料的复杂性以及节能环保的优越性，其理论研究、技术研发、应用实践日益深入，部分技术瓶颈问题正在逐步突破，诸如高掺量、低黏度、净味型等以传统胶粉类改性沥青为主体的各项新技术、新产品已经相继涌现并用于实体工程，产品标准及应用指南也在逐步完善，必将给沥青路面建设养护提供一些新的解决方案。

参考文献：

[1] 黄文元，张隐西.路面工程用橡胶沥青的反应机理与进程控制[J].公路交通科技，2006(11).

[2] 孙大权，金福根，徐晓亮.橡胶沥青路面湿法和干法技术

DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.049

高温型复合改性沥青灌缝胶正交试验研究

李侠[1]，张爱勤[2]，周晓静[2]，孙华东[2*]，王彦敏[2]

（1.威海市公路勘察设计院，山东 威海 264299；
2.山东交通学院 山东省高校路面结构与材料重点实验室）

摘要：采用正交试验设计，通过极差和方差分析，研究高温型复合改性沥青灌缝胶的组配对其性能的影响规律，结果表明：岩沥青和SBS对高温型灌缝胶性能（尤其是高温性能）的影响较大；不同种类岩沥青改善灌缝胶高温性能的顺序为：青川岩沥青＞北美岩沥青＞新疆岩沥青＞布敦岩沥青。综合分析得出高温型复合改性沥青灌缝胶最优组配（外掺法）为90#沥青：青川岩沥青：SBS：废旧橡胶粉：自制改性剂X：相容剂：自制改性剂Y＝100：6：9：20：6：25：1。

关键词：高温型；复合改性沥青灌缝胶；青川岩沥青；正交试验；性能指标

1 引言

近年来，中国公路建设发展迅猛，截至2017年底，中国公路通车总里程达到477.35万km。沥青路面凭借优越的性能和行车舒适性，占据中国公路总里程的90％以上，但随着中国越来越多的沥青路面进入养护期，其病害及其处治问题也引起人们的高度重视。沥青路面常见病害主要有裂缝、车辙、拥包和坑槽等，而裂缝是最早出现、普遍存在，且无法避免的一种病害。沥青路面进行及时合理的修补养护能够有效阻止裂缝进一步恶化，延长路面的使用寿命。美国SHRP计划研究表明：在众多养护方式中灌缝处理是最常使用且性价比最高的一种方式。

目前常用的灌缝材料主要有热用沥青类、冷用沥青类和专用材料类，其中热用沥青灌缝胶因其制备简单、造价低等优点最为常用。但是从路面现场应用效果看，中国国产沥青路面灌缝材料的品质还不稳定，高温流淌、低温开裂、黏附性差和柔韧性小等问题突出，最终导致路面裂缝修补失效。与之对照，国外产品应用效果较好，但受价格昂贵、施工复杂等因素制约，使之推广应用受到一定限制。

研究进展[J].石油沥青，2008(6).
[3] 李剑新，时敬涛，马庆丰.废橡胶粉改性沥青技术新进展[J].石油沥青，2011(2).
[4] 杨永顺，曹卫东，李英勇，等.橡胶沥青制备工艺及其性能的研究[J].山东大学学报，2008(5).
[5] 李强，郑炳锋，朱磊，等.橡胶粉改性沥青的混溶机理及其胶浆性能研究[J].中外公路，2013(5).
[6] 李波，李鹏，张新雨，等.废旧胶粉的反应与交联作用对橡胶沥青黏度的影响[J].长安大学学报：自然科学版，2017(2).
[7] 丁湛，邹鹏，栗培龙.胶粉在改性沥青中的物化行为分析[J].应用化学，2017(2).
[8] 董夏鑫，黄晓明，陈怡林，等.反应型橡胶改性沥青的微观改性机理分析[J].中外公路，2016(5).
[9] 陈呈.稳定型橡胶沥青的改性机理与性能研究[D].东南大学硕士学位论文，2016.
[10] 黄绍龙，金帆，李明，等.活性橡胶粉改性高粘度改性沥青的开发[J].中外公路，2015(1).
[11] 陈戈.基于活化特性的橡胶沥青性能及其改性机理研究[J].中外公路，2017(1).
[12] 刘延军，刘朝辉，张玉贞.橡胶粉改性沥青反应过程规律[J].中国石油大学学报：自然科学版，2017(3).
[13] 韩丽丽，韩红红，郑木莲，等.低黏度Terminal Blend废胶粉改性沥青研究进展[J].中外公路，2017(1).

收稿日期：2018－10－12
基金项目：交通运输部主干学科应用基础研究项目（编号：201531987150）
作者简介：李侠，男，高级工程师.E－mail：leeyanxian@163.com
*通信作者：孙华东，男，讲师.E－mail：sunhuadong2004@163.com