

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.05.007

钢桥面铺装用环氧沥青柔韧性改善方法研究进展

张恒龙^{1,2}, 贺求生¹

(1. 湖南大学 绿色先进土木工程材料及应用技术湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082;
2. 湖南省建筑固废资源化利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410205)

摘要: 为了有效减少因环氧沥青柔韧性较差而引起的铺装层病害, 进一步促进环氧沥青在钢桥面铺装上的推广应用, 对环氧沥青的柔韧性问题进行了详细阐述。从环氧树脂、环氧沥青结合料、环氧沥青混凝土3个层面综合分析了国内外改善环氧沥青柔韧性方法的研究进展。结果表明: 相较于有机硅改性剂, 橡胶颗粒、有机蒙脱土(OMMT)、聚氨酯能大幅改善环氧树脂的柔韧性; 固体颗粒对环氧沥青结合料的改性效果良好, 但会增加结合料的黏度且容易发生团聚现象, 不利于施工; 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)在提升环氧沥青结合料柔韧性方面优势不大, 但能有效提高环氧沥青结合料的强度、高低温性能; 超支化聚酯改性与柔性长链固化剂基本不会增加环氧沥青结合料的黏度, 且能大幅提高断裂伸长率, 是未来研究的重点方向; 对于环氧沥青混凝土, 橡胶颗粒能有效提高柔性, 而纤维增韧效果较好, 但会略微降低柔性, 适当掺量的橡胶颗粒、纤维混合添加剂柔韧性改善效果显著, 橡胶颗粒和纤维都会增加混合物的黏度, 减少容留时间, 因而对施工技术要求较高; 聚氨酯在改性环氧沥青混凝土上也有少许应用, 因成本较高、降低其他路用性能而受到限制。

关键词: 桥梁工程; 柔韧性改善方法; 综述; 环氧沥青; 固体颗粒; 纤维

中图分类号: U444.7⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2021)05-0052-13

Study Progress of Improving Methods of Epoxy Asphalt Suppleness for Steel Deck Pavement

ZHANG Heng-long^{1,2}, HE Qiu-sheng¹

(1. Key Laboratory for Green & Advanced Civil Engineering Materials and Application Technology of Hunan Province, Hunan University, Changsha Hunan 410082, China; 2. Hunan Provincial Construction Solid Waste Utilization Engineering Technology Research Center, Changsha Hunan 410205, China)

Abstract: To effectively reduce the pavement disease caused by poor suppleness of epoxy asphalt, further promote the application of epoxy asphalt on steel bridge deck pavement, the problems of epoxy asphalt suppleness are described in detail. The research progress of improving suppleness of epoxy asphalt is comprehensively analyzed from the levels of epoxy resin, epoxy asphalt binder and epoxy asphalt concrete. The result shows that (1) compared with organosilicon modifiers, rubber particles, organic montmorillonite (OMMT) and polyurethane can greatly improve the suppleness of epoxy resin; (2) the solid particles have a good modification effect on epoxy asphalt binder, but it will increase the viscosity of binder and prone to agglomeration, which is not conducive to construction; (3) styrene-butadiene-styrene (SBS) has little

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078209); 湖南省科技人才专项“湖湘青年英才”支持计划项目(2019RS2052); 湖南省科技计划项目(2019XF5036, 2019GK5004, 2018TP2038); 湖南省交通科技进步与创新计划项目(201805)

作者简介: 张恒龙(1985-), 男, 湖北恩施人, 博士, 副教授。(hlzhang@hnu.edu.cn)

advantage in improving the suppleness of epoxy asphalt binder, but it can effectively improve the strength, high-temperature and low-temperature performance of epoxy asphalt binder; (4) hyperbranched polyester modification and flexible long-chain curing agent will not increase the viscosity of epoxy asphalt binder, and they can greatly increase the elongation at break, which is the focus of future research; (5) rubber particles can effectively improve the flexibility of epoxy asphalt concrete. Fiber has a good toughening effect on epoxy asphalt concrete, but it will slightly reduce the flexibility of epoxy asphalt concrete. Appropriate amount of the mixed additive of rubber particles and fibers has a significant modification effect of suppleness. Rubber particles and fibers will increase the viscosity of the mixture and reduce the holding time, which requires higher construction technology. (6) There are also a few applications of polyurethane in modification of epoxy asphalt concrete, which is limited due to its high cost and reduced road performance.

Key words: bridge engineering; improving methods of suppleness; review; epoxy asphalt; solid particle; fiber

0 引言

目前国内外大跨径桥梁多采用正交异性钢桥面板,其与钢筋混凝土桥面板相比,能大幅减轻自重并改善桥梁的受力状况,但结构本身的特殊性 & 钢材不同方向刚度的较大差异,使其在各个方向产生不均匀变形,使桥面铺装较普通路面结构更难设计。常用的钢桥面铺装材料有环氧沥青混凝土、沥青玛蹄脂碎石(SMA)及浇注式沥青混凝土,其中环氧沥青混凝土以高强度、优异的温度稳定性和良好的黏结性能等优点得到了广泛使用。自从20世纪60年代壳牌环氧沥青铺装在San Mateo-Hayward大桥首次应用以来,现已成为美国大跨径钢桥面铺装的主要形式,累计使用量超过22 500 t,总面积达到了11 km²。我国是世界上采用环氧沥青铺装最主要的国家之一,有百余座大型钢箱梁桥采用该类方案,比较著名的有南京长江二桥、虎门大桥、苏通长江大桥等。此外,世界上其他国家如日本、泰国、德国也有大量应用。

环氧沥青是环氧树脂与固化剂发生固化反应并与基质沥青及其他添加剂混合形成的高性能材料。随着固化反应的进行,环氧沥青逐渐形成以环氧树脂为连续相、沥青为分散相的三维网络体系,这种体系从根本上改变了基质沥青的热塑性,转化为强度高、高温稳定性好、抗老化性能佳的热固性复合物^[1]。相较于传统铺装材料,环氧沥青混凝土无可比拟的优势使其在更高要求的钢桥面铺装中极具竞争力,逐渐成为钢桥面铺装的主要材料。

在诸多工程案例中,环氧沥青铺装层在使用过程中易出现开裂现象,一旦裂缝未能及时修复,雨水渗入桥面板,将锈蚀钢材,带来巨大的财产损失。众多学者研究发现,环氧沥青混凝土固化后弹性模

量变大、变形协调能力变差,在低温条件或重复荷载作用下易产生裂缝^[2],因而,改善环氧沥青混凝土的柔韧性(变形能力、抗疲劳能力)能从材料上降低铺装层开裂的几率,延长桥梁的使用寿命。通过对钢桥面铺装用环氧沥青研究成果进行分析,指出了当前环氧沥青应用中出现的柔韧性问题、综述了环氧沥青增柔增韧技术的研究现状。

1 钢桥面铺装用环氧沥青柔韧性问题

铺装层直接铺筑在钢桥面板上,在复杂的车辆荷载、温度荷载、风荷载等共同作用下,桥面板常处于大变形和恢复交替出现的状态,这就需要铺装材料具有很好的变形协调能力和抗疲劳性能,以避免铺装层与桥面板产生错动、剪切或疲劳破坏。固化完成后的环氧沥青混凝土模量特别大,在低温环境下产生较大应力,容易发生低温开裂,并且由于与钢桥面的模量差异很大,在受到外荷载时,钢桥面板与铺装层不能很好地协调变形,易引起黏结层失效而引发脱层现象。此外,环氧沥青属于热固性材料,韧性比较差,吸收能量的能力欠缺,但钢桥面在车辆荷载的作用下会产生反复的挠曲变形,铺装层在随桥面板一起变形的过程中易产生疲劳开裂。

王建伟等^[3]、徐宁等^[4]、陈治宇等^[5]对国内外部分环氧沥青铺装病害进行了调查(见表1),发现铺装层最常见的破坏形式是裂缝和脱层。Nishizawa等^[6]对日本东京附近不同类型钢桥面进行病害调查,结果显示纵向裂缝是大部分桥梁铺装最严重的破坏形式。上述病害使得环氧沥青在钢桥面铺装上的应用受到很大限制,如何提高环氧沥青的柔韧性,使其适应钢桥面复杂多变的受力条件,成为很多研究者探索的方向。

表 1 环氧沥青钢桥面铺装病害调查统计^[3-5]
Tab. 1 Survey and statistics on diseases of epoxy asphalt steel deck pavements^[3-5]

序号	工程名称	桥梁结构	通车时间	原铺装结构	病害
1	荆岳长江大桥	斜拉桥	2017	双层日本环氧	微裂缝
2	黄舢长江大桥	斜拉桥	2014-06	双层环氧沥青	坑槽、裂缝
3	广州东沙大桥	斜拉桥	2010-12	双层环氧沥青	微裂缝
4	武汉天心洲大桥	斜拉桥	2009-12	双层美国环氧	微裂缝
5	坝陵河大桥	悬索桥	2009-12	双层环氧沥青	网裂、脱层
6	上海长江大桥	斜拉桥	2009-09	双层美国环氧	微裂缝
7	苏通长江大桥	斜拉桥	2008-05	双层美国环氧	裂缝
8	润扬长江大桥	悬索桥	2005-05	双层美国环氧	鼓包、裂缝、车辙、脱层
9	南京长江二桥	斜拉桥	2001-03	双层美国环氧	微裂缝、鼓包
10	Hale Boggs 桥	钢桁架梁	1983-06	双层环氧沥青	鼓包、裂缝、车辙、脱层

2 钢桥面铺装用环氧沥青增柔增韧技术

环氧沥青是环氧树脂体系与沥青通过一定的方法混合，在适宜温度下，环氧树脂体系发生固化反应而形成以环氧树脂为连续相、沥青为分散相的热固性材料。在钢桥面铺装的应用中，环氧沥青作为结合料与集料拌和成为混凝土摊铺在钢桥面板上。本研究从环氧树脂、环氧沥青结合料、环氧沥青混合料 3 个层面论述钢桥面铺装用环氧沥青柔韧性改善方法的研究现状。

2.1 环氧树脂柔韧性改善方法

2.1.1 柔韧性评价方法

冲击试验是用来评价环氧树脂柔韧性最常用的方法之一，主要包括基于 ISO 179-1 的夏比冲击试验和基于 ASTM D 256 的伊佐德冲击试验。其柔韧性评价指标是冲击强度，冲击强度越大，材料的柔韧性越好。夏比冲击试验的冲击强度表达式为：

$$\sigma_i - E_c / (h \times b), \tag{1}$$

式中， σ_i 为夏比冲击强度； E_c 为修正后试样破坏吸收的能量； h 和 b 分别为试样的厚度和宽度。

伊佐德冲击试验的冲击强度表达式为：

$$IS = E/w, \tag{2}$$

式中， IS 为伊佐德冲击强度； E 为试样破坏吸收的能量； w 为试样的宽度。

2.1.2 固体颗粒增柔增韧环氧树脂

橡胶颗粒在较大温度范围内能够呈现出高弹性及良好的变形能力，是一种轻质的可逆变形柔性材料，加入到环氧树脂体系中能有效改善柔韧性等力学性能。Verma 等^[7]将橡胶颗粒加入到环氧树脂中来研究该复合材料的力学性能，发现当橡胶颗粒掺量为 1% 时，拉伸强度达到最大，比普通环氧树脂增

加 26.65%，冲击能提高 67.6%，表明合适掺量的橡胶颗粒对环氧树脂的柔韧性提升很大。这是由于部分橡胶能够溶于树脂中，增加柔性，而橡胶颗粒周围易产生应力集中，使环氧树脂基体产生剪切屈服或出现微裂缝以吸收冲击能，增加韧性。Huang 等^[8]和 Ma 等^[9]利用纳米级橡胶体对环氧树脂进行改性，结果表明，改性剂明显提高了弯拉强度、冲击强度，即增加了环氧树脂的韧性，但其他性能如玻璃态转化温度、延展性等有所降低。Le 等^[10]研究发现，55 nm 橡胶颗粒能够增韧环氧树脂，并且不会降低玻璃的转换温度、拉伸强度。根据透射电镜的图片显示，纳米粒子之间距离很短，比表面积大，这会使纳米粒子更有效地引发增韧机制，如基体的剪切屈服。

蒙脱土是一种结构呈 2:1 型的层状硅酸盐，用有机阳离子置换蒙脱土中的吸附水合阳离子，即可得到与树脂相容性较好的有机蒙脱土（OMMT），特有的片状结构使其能被插层或剥离，均匀分散在环氧树脂中。Lim 等^[11]用单刃缺口试验来研究制备环氧有机蒙脱土，如图 1 所示，当 OMMT 掺量达到 5% 时，复合物的韧性为 2.02 MPa·m^{1/2}，韧性增加了 80%。Liu 等^[12]通过直接拉伸试验发现，向环氧树脂中添加 3% 掺量的 OMMT 后，改性环氧树脂的韧性得到提高，继续增加改性剂掺量，韧性则逐渐降低。这是因为 OMMT 结构周围出现的微裂缝能够有效抑制裂纹的扩展，当含量过大时，颗粒容易积聚，减少微裂缝，使增韧效果减弱。

2.1.3 热塑性弹性体增柔增韧环氧树脂

聚氨酯是主链上含有重复氨酯基团的大分子化合物的统称。其具有强度高、断裂伸长率大、耐久性好等优点，在材料复合改性中应用较多。Harani 等^[13]研究发现，异氰酸酯封端的聚氨酯能与环氧树

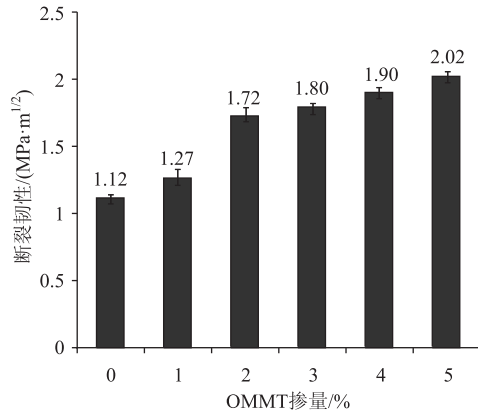


图 1 OMMT/环氧沥青的断裂韧性^[11]

Fig. 1 Fracture toughness of OMMT/epoxy asphalt^[11]

脂发生反应,使环氧树脂的断裂韧性大幅提高。Bakar 等^[14]通过使用不同异氰酸酯含量的聚氨酯对环氧树脂进行改性,发现异氰酸酯含量越高,环氧树脂的韧性越好。当聚氨酯掺量为 15% 时,拉伸强度、断裂伸长率及韧性达到最大值,同时,复合材料发生了软化效应,弹性模量和玻璃转化点降低,柔性增强。

表 2 环氧树脂柔韧性改善方法总结

Tab. 2 Summary of methods to improve suppleness of epoxy resin

作者/文献	柔韧性改善方法类型	评价试验方法	评价指标	柔韧性提高幅度/%
Verma 等 ^[7]	橡胶颗粒改性环氧树脂	冲击试验 (ISO 179-1)	冲击强度	67.6
Huang 等 ^[8]	橡胶颗粒改性环氧树脂	冲击试验 (ISO 179-1)	冲击强度	95.6
Ma 等 ^[9]	橡胶颗粒改性环氧树脂	冲击试验 (ISO 179-1)	冲击强度	67.3
Le 等 ^[10]	橡胶颗粒改性环氧树脂	断裂韧性试验 (ISO 13586)	断裂韧性	213.7
Lim 等 ^[11]	OMMT 改性环氧树脂	断裂韧性试验 (ISO 13586)	断裂韧性	80.4
Liu 等 ^[12]	OMMT 改性环氧树脂	直接拉伸试验 (ASTM D 638)	断裂伸长率	835
Harani 等 ^[13]	聚氨酯改性环氧树脂	冲击试验 (ASTM D 256)	冲击强度	633
Bakar 等 ^[14]	聚氨酯改性环氧树脂	冲击试验 (ISO 179-1)	冲击强度	215
Yu 等 ^[15]	有机硅改性环氧树脂	直接拉伸试验 (GB/T 2567)	断裂伸长率	21
Murias 等 ^[16]	有机硅改性环氧树脂	冲击试验 (ISO 179-1)	冲击强度	15.5

2.2 环氧沥青结合料柔韧性改善方法

2.2.1 柔韧性评价试验

直接拉伸试验因简单、易操作且与其他力学性能试验结果相关性较好,在环氧沥青结合料柔韧性研究中得到广泛应用。ATSM D 638 和 ISO 527 是国际上常用的 2 种直接拉伸试验的测试标准。Yin 等^[17]、Yu 等^[18]等根据 ATSM D 638 标准,试验温度保持 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$,试验速度选择 500 mm/min,测试了 5 组以上环氧沥青试件的力学性能。Bakar 等^[14]、Tang 等^[19]根据试样的类别,将试验速度设定为 1 mm/min 或 5 mm/min 以得到拉伸性能数据。Giannakopoulos 等^[20]依据 ISO 527 标准,选定温度为

有机硅材料是一种以 Si-O-Si 键为主链,硅原子连接有机基团,相互交联的半无机聚合物,具有优异的耐高低温和柔韧性。Yu 等^[15]以共混的方式将柔性 Si-O 键引入环氧树脂中来增加韧性,用 UV 照射固化改性环氧树脂。试验结果显示,当复合体中的有机硅含量为 15% 时,拉伸强度基本不变,断裂伸长率提高了 19.2%,柔韧性变好。Murias 等^[16]采用活性低分子量硅氧烷对环氧树脂进行改性,发现改性环氧树脂的储存模量和玻璃态转化温度降低,但冲击强度提高,柔韧性有所改善。

2.1.4 小结

表 2 是环氧树脂柔韧性改善方法的小结。多数研究者采用了冲击试验作为环氧树脂柔韧性的评价方法,还有部分文献利用断裂韧性试验或直接拉伸试验来表征。从表 2 中可以看出,固体颗粒的柔韧性改善幅度都超过了 50%,是良好的增韧改性剂,其中橡胶颗粒的来源广泛、绿色环保,得到大量的研究和应用。相较于有机硅改性环氧树脂,聚氨酯的柔韧性提升效果明显,最大提高了 635%,具有较大的应用潜力。

21 °C、试验速度为 1 mm/min 的控制条件对环氧沥青进行测试。在进行直接拉伸试验后,直接由断裂伸长率或采用应力应变曲线下方的面积(断裂能)来评价环氧沥青结合料的柔韧性。

2.2.2 固体颗粒增柔增韧环氧沥青结合料

环氧沥青结合料的优异性能主要来自于环氧树脂体系,其增柔增韧技术原理与环氧树脂的类似。目前固体颗粒改善环氧沥青结合料柔韧性的方法有橡胶粉改性、OMMT 改性和天然纤维凹凸棒石(ATT)改性。

孔庆磊等^[21]把 80 目橡胶粉按不同掺量加入到环氧沥青中,发现质量分数为 12% 改性环氧沥青的断

裂伸长率提高了46.3%，此外，改性环氧沥青的黏度因橡胶粉溶胀而增加。Liu等^[22]则先将橡胶粉末与沥青混合得到橡胶沥青，然后再把橡胶沥青和环氧树脂混合搅拌制备得到橡胶改性环氧沥青。结果表明，该橡胶改性环氧沥青的断裂伸长率比普通环氧沥青的小，这可能是由于橡胶沥青在环氧体系中分散性差，并且橡胶沥青的存在还会大大增加环氧沥青的黏度，降低了施工适用性。

肖新颜等^[23]采用熔融共混法制得OMMT/环氧树脂改性沥青试样，通过万能材料试验机进行试验分析。结果显示（图2），环氧树脂在沥青中分布更均匀，力学性能有较大提高且施工性良好，但柔韧性增加效果不明显。OMMT特殊的片状结构使沥青和环氧树脂界面作用增强，相容性得到改善，拉伸强度增加但断裂伸长率减少。

2.2.3 热塑性弹性体增韧环氧沥青结合料

苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物（SBS）由刚性苯乙烯分散相和柔性丁二烯连续相物理交联形成，特殊的两相结构使其能有效改善沥青的高低温性能及抗老化性能等。Liu等^[24]采用SBS改性沥青（SBA）制备了SBS改性环氧沥青（ESBA），并对比

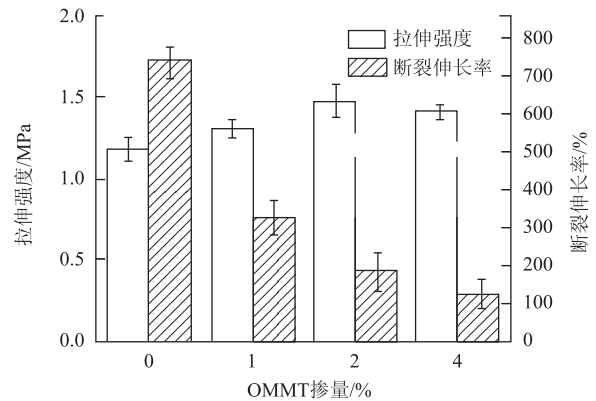


图2 OMMT 掺量对 OMMT/环氧沥青力学性能的影响^[23]
Fig. 2 Influence of OMMT content on mechanical properties of OMMT/epoxy asphalt^[23]

了环氧沥青（EA）和ESBA的微观形态和力学性能。2者中环氧树脂与沥青都发生了相分离，当沥青含量达到60%时，EA的环氧树脂相从连续相变成了分散相，而ESBA并没有出现相转变。从图3中可以看出，随着SBS的加入，EA的拉伸强度和断裂伸长率都得到提高，其韧性与柔性得到改善。综合考虑各个指标，40%沥青含量（SBS掺量1.8%）的改性效果最佳。

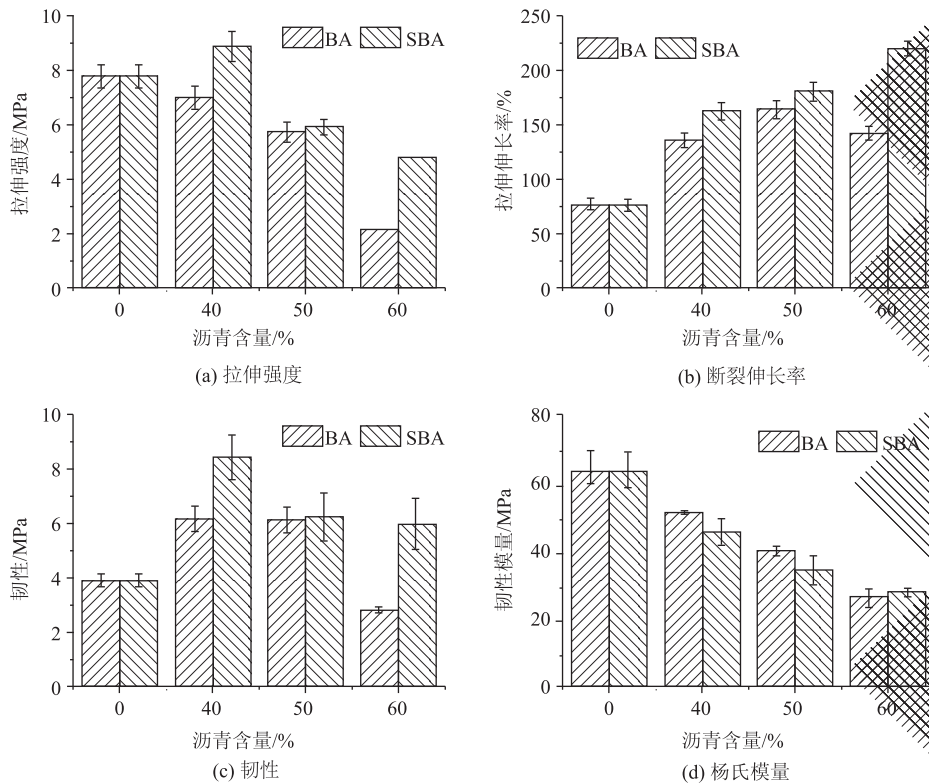


图3 环氧沥青和SBS改性环氧沥青的拉伸性能^[24]

Fig. 3 Tensile properties of epoxy asphalt and SBS modified epoxy asphalt^[24]

Si等^[25]研究了环氧树脂（ER），EA，ESBA的力学性能，结果如图4所示。ER的拉伸强度

（3.13 MPa）远大于EA（1.28 MPa）和ESBA（0.81 MPa）。这是由于沥青和SBS本身的强度比ER

低,再加上这2者的加入降低了ER的交联度密度,从而使ESBA的拉伸强度大幅降低。但断裂伸长率的试验结果与之不同,EA(85.7%)和ESBA(77.2%)较ER(70.5%)略有增加,加入SBS后的EA断裂伸长率反而降低了,这可能是由ER与SBS改性沥青较差的相容性引起。

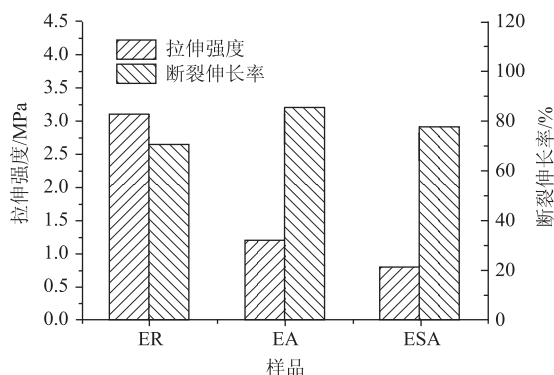


图4 环氧树脂、环氧沥青和SBS改性环氧沥青的力学性能^[25]

Fig. 4 Mechanical properties of epoxy resin, epoxy asphalt and SBS modified epoxy asphalt^[25]

Jiang等^[26]研究了SBS掺量为2%、S/B不同的ESBA的力学性能。结果表明(图5),SBS能够提升环氧沥青的拉伸强度,最大提升幅度可达26%,也会降低断裂伸长率,不过仍满足钢桥面铺装技术要求。除了S/B为30/70的ESBA的柔韧性提高之外,其他组的韧性都降低了,这可能与SBS改性沥青颗粒在环氧树脂中的分布有关。由此可见,适当含量和S/B比率的SBS能够改善环氧沥青的柔韧性。

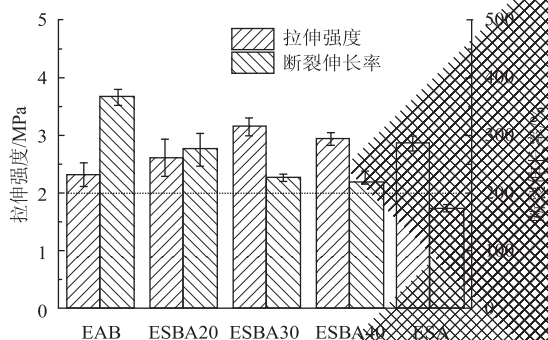


图5 环氧沥青、SBS改性环氧沥青和聚苯乙烯改性环氧沥青的力学性能^[26]

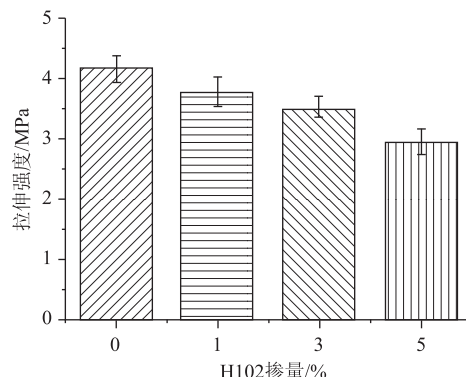
Fig. 5 Mechanical properties of epoxy asphalt, SBS modified epoxy asphalt and polystyrene modified epoxy asphalt^[26]

曹东伟等^[27]将有机硅树脂和环氧树脂混合作为A组分,沥青和固化剂及其他添加剂为B组分,在60~150℃搅拌得到有机硅改性环氧沥青。加入合适

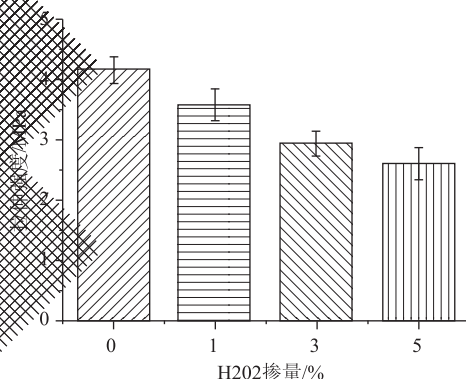
矿料后,通过拉伸试验,表明该材料的强度和韧性均得到提高,并且黏附性能、高温性能也有一定改善。周庆月^[28]将有机聚硅烷、异戊橡胶和聚四氟乙烯纤维混合加入环氧沥青制备了复合型改性环氧沥青,发现软化点、断裂伸长率有所提高。

2.2.4 超支化聚酯增柔增韧环氧沥青结合料

超支化聚酯(HBP)具有高度支化的树枝状结构,大量位于端部的官能团能与环氧树脂反应,形成交联结构使未占用空间增大并发生应力松弛,从而改善环氧体系的冲击强度和韧性。固体颗粒能够改善环氧沥青的柔韧性,但会使黏度大幅增加,降低施工性。而Xu等^[29]研究发现,具有端羟基的HBP能加速环氧树脂固化反应速率,且改性环氧沥青的黏度仅仅略微增加。通过直接拉伸试验比较了芳香族HBP(H102)和脂肪族HBP(H202)的改性效果。由图6、图7可知,2者都略微降低了改性环氧沥青拉伸强度,但H102改性环氧沥青的断裂伸长率增加量(96.6%)远大于H202改性环氧沥青(10.3%)。综合判断,芳香族HBP的增韧效果更好。



(a) H102改性环氧沥青



(b) H202改性环氧沥青

图6 两种类型HBP/环氧沥青拉伸强度^[29]

Fig. 6 Tensile strengths of 2 types of HBP/epoxy asphalt^[29]

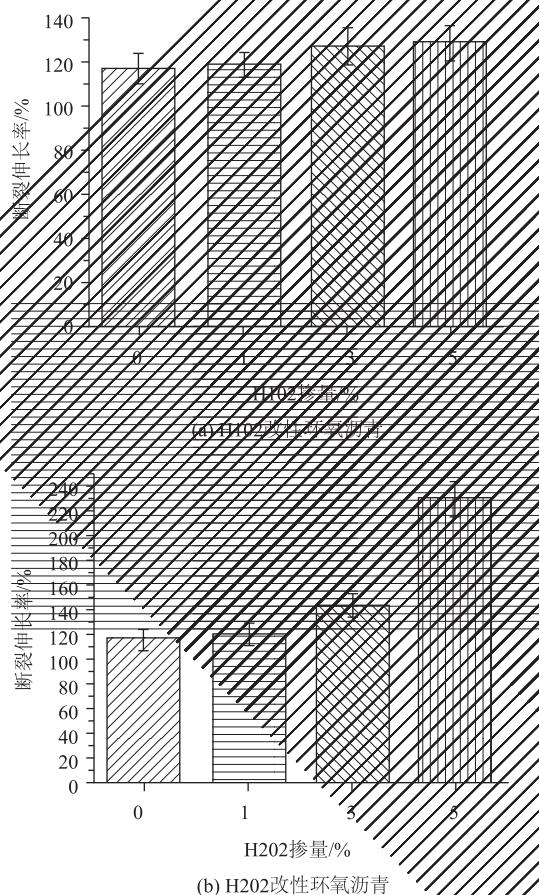


图7 两种类型 HBP/环氧沥青断裂伸长率^[29]

Fig.7 Elongation at break of 2 types of HBP/epoxy asphalt^[29]

低黏度是 HBP 改性的一大优势,然而大量的端羟基与环氧树脂反应还是会增大环氧沥青的黏度。Xu 等^[30]选择使用乙酰氯和长链烷基氯修饰 HBP 的端羟基,以避免 HBP 与环氧树脂反应。结果表明,这种新型改性环氧沥青的黏度明显降低,并在保证足够拉伸强度的条件下极大提升了断裂伸长率,柔韧性改善效果良好。张荣亮等^[31]采用端烷基修饰的超支化聚磷酸酯对环氧沥青进行改性,发现改性环氧沥青的黏度降低,断裂伸长率最大可提高 3 倍,韧性得到显著改善,但拉伸强度有所下降。

2.2.5 新型固化剂增柔增韧环氧沥青结合料

新型固化剂的增柔增韧作用近年来受到关注,柔性长链固化剂不仅可增加大分子的柔性骨架,而且能提高环氧树脂与沥青的相容性,进而改善环氧沥青的柔韧性。Li 等^[32]制备了一种柔性聚合脂肪酸环氧固化剂(PFA),可以用来催化环氧开环和水解。试验结果显示,随着 PFA 含量的上升,环氧沥青的拉伸强度不断降低,断裂伸长率提高,应力应变曲线无屈服点,呈现明显的柔性特性。在 PFA 与

环氧树脂的掺量为混合物的 20% 时,拉伸强度满足桥梁铺装技术要求,断裂伸长率提升较大。PFA 固化剂中含有多个羧基和柔性烷基链基团,能够提供足够的固化活性,并赋予环氧体系非常高的柔韧性。此外,通过微观形态和动态力学分析,发现 PFA 能够使沥青分散更均匀,相容性变好。

Kang 等^[33]则是利用马来酸酐作为短链分子来增强沥青的强度,利用己二酸和甲基六氢邻苯二甲酸酐作为柔性长链固化剂来增加环氧沥青的柔韧性。该新型环氧沥青复合材料的断裂伸长率高达 150% ~ 260%,韧性提高 1 倍以上。Hu 等^[34]和 Jiang 等^[35]发现具有酰胺基团封端的己二酰胺或癸二酰胺能够改善环氧树脂和沥青的相容性,并进一步提高拉伸强度。通过扫描电镜观察该环氧树脂体系中形成了“海岛结构”,沥青粒子成为了应力集中中心,通过形变吸收能量,提高了环氧沥青的柔韧性。

2.2.6 小结

基于环氧树脂柔韧性改善手段并结合环氧沥青自身特性,用固体颗粒、热塑性弹性体、超支化聚酯、新型长链固化剂等来改善环氧沥青结合料的柔韧性,研究成果汇总于表 3。总体而言,固体颗粒改性效果良好,但会使环氧沥青结合料的黏度大幅增加,从而降低施工性能,此外,还应避免因固体颗粒的团聚而降低环氧沥青的韧性。SBS 改性环氧沥青提升柔韧性的幅度不大,但其能有效改善环氧沥青其他性能,如强度、高低温性能等。超支化聚酯及新型长链固化剂在提升断裂伸长率方面优势巨大,且由于本身黏度较小,基本不会增加环氧沥青的黏度。

2.3 环氧沥青混凝土柔韧性改善方法

2.3.1 柔韧性评价试验

环氧沥青混凝土在低温环境下的脆性表现更明显,以低温弯曲试验来测定劲度模量,并把劲度模量作为评价柔性的指标较为合理。按照《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011),Qian 等^[36]、李凯^[37]将完全固化的环氧沥青混凝土车辙板切割成 30 mm × 35 mm × 250 mm 的标准棱柱体小梁试件,在 -10 ℃ 以 50 mm/min 的加载速度进行试验,得到荷载-挠度曲线后计算得到破坏时的劲度模量。Luo 等^[38]在不同的温度下以 1 mm/min 的加载速度对标准小梁试件加载,研究了劲度模量与温度的关系。Yang 等^[39]也进一步证实了低温弯曲试验评价环氧沥青混合料柔性的有效性。

铺装层的受力特点与梁的弯曲理论相似,并且

表 3 环氧沥青结合料柔韧性改善方法总结
Tab. 3 Summary of methods to improve suppleness of epoxy asphalt binder

作者/文献	柔韧性改善方法类型	评价试验方法	评价指标	柔韧性提高幅度/%
孔庆磊等 ^[21]	橡胶改性环氧沥青结合料	直接拉伸试验	断裂伸长率	46.3
Liu 等 ^[22]	橡胶改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	< 0
肖新颜等 ^[23]	OMMT 改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	67.6
Liu 等 ^[24]	SBS 改性环氧沥青结合料		应力-应变曲线面积	—
Si 等 ^[25]	SBS 改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	< 0
Jiang 等 ^[26]	SBS 改性环氧沥青结合料		应力-应变曲线面积	3
曹东伟等 ^[27]	有机硅改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	32.8
周庆月 ^[28]	有机硅改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	17.8
Xu 等 ^[29]	超支化聚酯改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	244
Xu 等 ^[30]	超支化聚酯改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	578
张荣亮等 ^[31]	超支化聚酯改性环氧沥青结合料		断裂伸长率	227
Li 等 ^[32]	新型固化剂增柔增韧环氧沥青结合料		断裂伸长率	—
Kang 等 ^[33]	新型固化剂增柔增韧环氧沥青结合料		断裂伸长率	> 100

需要与钢板一起反复挠曲,因而可以采用小梁弯曲疲劳试验评价环氧沥青混凝土的韧性。通过轮碾成型沥青混合料车辙板,并切割为 380 mm×50 mm×63 mm 的小梁试件,将标准测试温度定为 15 ℃,采用连续偏正弦加载,应变可根据不同种类沥青进行相应调整。在劲度模量降低到初始劲度模量的 50% 时,终止试验。该方法建议钢桥面铺装用环氧沥青混合料的应变选择在 1 000 με 以上,Zhang 等^[40]将控制应变设定为 3 500 με,徐伟等^[41]则将目标应变分别设置为 800,1 000,1 250 με 以研究环氧沥青的韧性。

2.3.2 固体颗粒增柔增韧环氧沥青混凝土

橡胶改性环氧沥青混凝土受到外界荷载时,均匀散布的橡胶颗粒会承受较大部分应力而产生形变,但良好的弹性恢复能力及在环氧体系下形成的特殊相分离微结构,使其能吸收大量能量而不至于断裂破坏,从而增加环氧沥青混凝土的柔韧性。张争奇等^[42]用干法向环氧沥青混合料中掺入 4 种掺量(1.5%,1.8%,2.1%,2.4%)的橡胶颗粒,如表 4 所示,试样的劲度模量随改性剂掺量的增加而降低,当掺量为 2.1% 时,其弯拉强度最大,不易出现拉裂破坏,且疲劳寿命最长。当改性剂掺量继续增加时,疲劳性能下降。橡胶颗粒作为一种柔性材料加入到硬脆性沥混凝土中,降低了模量,且通过银纹作用使该混合体系的韧性得到提高,过量则会降低强度和疲劳性能。薛永超等^[43]发现,橡胶颗粒体积掺量为 5% 的环氧沥青混合料的劲度模量比普通环

氧沥青降低了 31.6%,应变能密度也得到提高,柔韧性改性效果显著。此外,试验结果表明,体积掺量合适的橡胶颗粒不仅可显著改善环氧沥青混合料的柔韧性,且对环氧沥青混合料的弯拉强度、水稳定性、高温稳定性几乎没有影响。由此可以看出,橡胶颗粒在增柔方面作用明显,且对韧性也有改善,是良好的环氧沥青混凝土柔韧性改性剂。

表 4 不同橡胶颗粒掺量的环氧沥青混凝土低温弯曲试验结果^[42]
Tab. 4 Low temperature bending test result of epoxy asphalt concrete with different rubber particle contents^[42]

橡胶颗粒掺量/%	油石比/%	跨中挠度/mm	最大荷载/N	弯拉强度/MPa	破坏应变/(×10 ⁻³)	劲度模量/MPa
0.00	6.20	0.52	3 696.51	27.42	2 809.92	9 759.64
1.50	6.50	0.61	3 772.94	27.91	3 280.00	8 746.54
1.80	6.60	0.64	3 877.32	29.43	3 469.54	8 484.25
2.10	6.80	0.69	3 925.62	29.49	3 737.19	7 895.09
2.40	7.00	0.58	3 160.65	24.00	3 156.13	7 603.79

Sun 等^[44]不仅从环氧沥青结合料层面探究了 ATT 对环氧沥青柔韧性改善的效果,还通过低温弯曲试验研究了 ATT 改性环氧沥青混凝土的低温柔性。结果表明,当 ATT 的掺量为 0.5% 时,改性环氧沥青混凝土的弯曲应变能密度为 3 020 J/m³,比普通环氧沥青混凝土的高 20%,在低温环境下柔韧性大幅提高,抗开裂性增强,这与结合料试验结果一致。

2.3.3 纤维增柔增韧环氧沥青混凝土

纤维的来源广泛、价格便宜,在复合材料改性方面作用明显。许多学者利用纤维提高沥青混合料

的拉伸强度、高温稳定性、水稳定性，并有效减少裂缝。此外，纤维也常用作环氧体系的增韧剂。基于此，一些研究者考虑将纤维类材料添加至环氧沥青混凝土中，以改善环氧沥青混凝土的柔韧性。

Xue 等^[45]设计了一种矿物纤维改性环氧沥青混凝土（FEAC），并通过室内试验研究不同矿物纤维长度及含量对 FEAC 的性能影响。结果表明，矿物纤维对环氧沥青的拉伸强度和断裂伸长率有较大提高，纤维长度 5 mm，含量为 9% 时，提升效率最大。对于 FEAC 来说，当纤维含量不断增加时，弯曲强度和弯曲应变也随着不断增加，掺量为 9% 时，达到峰值，而弯曲刚度也略微增大，说明纤维的加入使柔性有所降低，但疲劳寿命增加较多，韧性增幅大。矿物纤维可在环氧沥青混凝土中形成三维网络，以抵抗界面处的裂纹扩展和滑动，降低集中应力，从而提升总体拉伸强度。纤维还具有桥接、传递荷载的作用，能够串联混凝土的微小裂缝，使其不至于形成宏观完整裂缝，增加混凝土的韧性。

钱振东等^[46]研究了短切玄武岩纤维（BFCS）对环氧沥青性能的影响，进行了直接拉伸试验和低温弯曲试验。结果表明，在掺量不超过 6% 时，改性环氧沥青的拉伸强度和断裂伸长率均提高，其中 4% 掺量的提升幅度最大，此时相应混凝土的弯曲应变能密度临界值是普通环氧沥青混凝土 47.1%，柔韧性得到较大提升。除了纤维本身的桥接、增韧作用外，

BFCS 能使最佳油石比提高，从而改善环氧沥青混凝土的柔性。

聚酯纤维的柔韧性好，且化学组成与沥青较为接近，亲和性好，是用来改善环氧沥青混凝土各项性能的优良改性剂。汪林等^[47]考虑某公路大桥钢桥面受力情况，研究掺加不同含量聚酯纤维的改性效果，试验组劲度模量略有下降，而最大疲劳寿命比未掺加聚酯纤维提高了 3 倍。王水^[48]发现聚酯纤维掺量为 2%~3% 时，改性环氧沥青的低温开裂性能和疲劳性能最佳，即柔韧性最好。李华平^[49]则向环氧沥青混合料当中添加 0.2% 聚酯纤维，利用落锤法抗冲击试验得到纤维改性环氧沥青混凝土的冲击功为 71.83 J，是普通环氧混凝土的 1.6 倍，韧性极大加强。

鉴于纤维改性环氧沥青混凝土可提高韧性，但对柔性提升不大，一些研究者考虑了纤维和橡胶颗粒复合改性。张争奇等^[50]将掺量 0.3% 聚酯纤维和掺量 2.1% 橡胶颗粒同时加入到环氧沥青中，在 -10℃ 进行低温弯曲试验。从表 5 可以看出，在弯拉强度和弯拉应变均有增大情况下，劲度模量为 6 310.8 MPa，比添加 0.3% 聚酯纤维环氧沥青混凝土和普通环氧沥青混凝土分别减少 3 220.06，3 448.84 MPa，复合型改性剂极大改善了柔性，而疲劳次数达到了 22 682 次，几乎是普通混凝土的 3 倍，是 2.1% 聚酯纤维改性沥青混凝土的 2 倍，韧性也比只添加其中 1 种改性剂好很多。

表 5 不同环氧沥青混凝土低温弯曲试验结果^[50]

Tab. 5 Low temperature bending test result of different epoxy asphalt concrete^[50]

类型	检测项目					
	油石比/%	最大荷载/N	跨中挠度/mm	弯拉强度/MPa	劲度模量/MPa	破坏应变/($\times 10^{-3}$)
普通环氧沥青混凝土	6.2	3 696.50	10.517	27.42	9 759.64	2 809.92
聚酯纤维（0.3%）	6.7	4 326.98	0.614	32.95	9 530.86	3 459.03
橡胶颗粒（2.1%）	6.8	3 925.62	0.692	29.49	7 895.09	3 737.19
0.3% 聚酯纤维 + 2.1% 橡胶颗粒	7.3	4 053.20	0.689	30.90	6 310.80	4 225.60

2.3.4 聚氨酯增柔增韧环氧沥青混凝土

如前所述，聚氨酯在改善环氧树脂柔韧性方面效果明显，一些学者尝试将聚氨酯柔性链段枝接交联到环氧树脂上，并与沥青混合制备得到聚氨酯环氧沥青，以改善环氧沥青混凝土的柔韧性。卜鑫德等^[51]使用剪切共混法制备了聚氨酯环氧沥青，并进行了力学性能测试，发现聚氨酯的最佳掺量为 30%，此时结合料的断裂伸长率为 378%，混合料的最大应变为普通环氧沥青混合料的 1.5 倍，柔韧性有了较大提高，但其他路用性能略有降低。陈利东等^[52]研制出一种聚氨酯环氧沥青混凝土，并与美国、日本

环氧沥青混凝土进行性能对比，发现该复合材料不仅在路用性能优于后者，疲劳寿命也胜过后者，柔韧性得到了很好的改善，且成本还略低。聚氨酯在提高环氧沥青混凝土柔韧性方面的研究较少，改性机理还需进一步探究。

2.3.5 小结

环氧沥青混凝土的增柔增韧研究主要集中在国内，分为固体颗粒改性、纤维改性、聚氨酯改性 3 类。由表 6 可知，橡胶颗粒对环氧沥青混凝土的柔韧性提高幅度较大，而纤维类能大幅提高环氧沥青混凝土的韧性，但不利于材料的柔性。这是由于纤

表 6 环氧沥青混凝土柔韧性改善方法总结
Tab. 6 Summary of methods to improve suppleness of epoxy asphalt concrete

作者/文献	柔韧性改善方法类型	评价试验方法	评价指标	柔韧性提高幅度/%
张争奇等 ^[42]	橡胶改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	19. 1
		弯曲疲劳试验	疲劳寿命	42
薛永超等 ^[43]	橡胶改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	应变能密度	108
Sun 等 ^[44]	ATT 改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	应变能密度	20
Xue 等 ^[45]	矿物纤维改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	<0
		弯曲疲劳试验	疲劳寿命	> 50
钱振东等 ^[46]	玄武岩纤维改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	应变能密度	47. 1
汪林等 ^[47]	聚酯纤维改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	5. 4
		弯曲疲劳试验	疲劳寿命	330
王水 ^[48]	聚酯纤维改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	6. 8
		弯曲疲劳试验	疲劳寿命	—
李华平 ^[49]	聚酯纤维改性环氧沥青混凝土	抗冲击试验	冲击功	65
张争奇等 ^[50]	橡胶纤维复合改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	35. 3
		弯曲疲劳试验	疲劳寿命	196
陈利东等 ^[52]	聚氨酯改性环氧沥青混凝土	低温弯曲试验	劲度模量	42. 3

维主要起桥接、传递荷载作用，阻碍了微小裂缝进一步扩展形成宏观裂缝，提高混凝土的疲劳性能。纤维与橡胶颗粒复合改性能充分发挥 2 者的优势，但由于橡胶颗粒改性和纤维改性都会增加黏度、减少容留时间，对施工要求较高。此外，聚氨酯在改善环氧沥青混凝土的柔韧性方面具有一定效果，但会降低路用性能，且成本相对较高，应用受到限制。

3 结论

环氧沥青混凝土因优越的路用性能在我国钢桥面铺装领域应用广泛，但在使用过程中出现的柔韧性问题使其进一步推广受到一定阻碍，众多研究者相继提出的增柔增韧技术使得桥梁铺装层脱层、开裂问题得到很大改善。总结钢桥面铺装用环氧沥青出现的柔韧性问题，并对目前国内外改善环氧体系柔韧性的方法进行了综述。

(1) 环氧沥青是一种热固性材料，其混合料与钢板的模量差较大、吸收能量的能力较差，即变形协调能力与疲劳性能不好，这使得钢桥面环氧沥青铺装层经常出现开裂和脱层病害。

(2) 橡胶颗粒、OMMT、聚氨酯对环氧树脂的柔韧性改善幅度超过了 50%，而有机硅的改性效果不显著。

(3) 固体颗粒对环氧沥青结合料改性效果良好，但会使黏度大幅增加，降低施工性。SBS 改性环氧

沥青结合料提升柔韧性的幅度不大，其优势在于综合改性效果好。超支化聚酯与新型固化剂在提升环氧沥青结合料断裂伸长率方面优势巨大，是未来重点研究的方向。

(4) 橡胶粉对环氧沥青混凝土的柔韧性提高幅度较大，并且价格低廉、绿色环保，是良好的改性剂。纤维具有桥接、传递荷载作用，能够串接微小裂缝，增韧效果较好，但会略微降低柔性，而橡胶颗粒和纤维复合改性环氧沥青混凝土具有良好的增柔增韧效果。聚氨酯改性环氧沥青混凝土有一定的效果，但会降低路用性能，并且成本相对较高，应用受到限制。

参考文献：

References：

[1] CONG P, TIAN Y, LIU N, et al. Investigation of Epoxy-resin-modified Asphalt Binder [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2016, 133 (21): 43401.

[2] HUANG B, LI G, MOHAMMAD L N. Analytical Modeling and Experimental Study of Tensile Strength of Asphalt Concrete Composite at Low Temperatures [J]. Composites Part B: Engineering, 2003, 34 (8): 705 - 714.

[3] 王建伟, 于力, 罗桑. 南京长江第二大桥环氧沥青混凝土铺装服役 13 年回顾 [J]. 公路, 2015 (8): 37 - 40.

WANG Jian-wei, YU Li, LUO Sang. Service Condition

- Survey and Analysis of Epoxy Asphalt Concrete Pavement on Nanjing Second Yangtze River Bridge after Thirteen Years Life [J]. Highway, 2015 (8): 37–40.
- [4] 徐宁, 吴双全, 张小荣. 环氧沥青钢桥面铺装层裂缝类病害机理分析 [J]. 河南城建学院学报, 2019, 28 (5): 24–29.
- XU Ning, WU Shuang-quan, ZHANG Xiao-rong. Mechanism Analysis of Cracks in Epoxy Asphalt Steel Bridge Deck Pavement [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2019, 28 (5): 24–29.
- [5] 陈治宇, 陈鑫, 郑孝强. 浅析浇注式沥青混凝土对大跨径钢桥面环氧沥青路面病害处置的应用 [J]. 西南公路, 2020, 153 (1): 27–30.
- CHEN Zhi-yu, CHEN Xin, ZHENG Xiao-qiang. Analysis on Application of Pouring Asphalt Concrete to Treatment of Long-span Steel Bridge Deck Epoxy Asphalt Pavement Diseases [J]. Southwest Highway, 2020, 153 (1): 27–30.
- [6] NISHIZAWA T, HIMENO K, UCHIDA K, et al. Longitudinal Surface Cracking in Asphalt Pavements on Steel Bridge Decks [C] //Fifth International RILEM Conference on Reflective Cracking in Pavements. Limoges: RILEM Publications SARL, 2004: 537–544.
- [7] VERMA A, NEGI P, SINGH V K. Experimental Investigation of Chicken Feather Fiber and Crumb Rubber Reformed Epoxy Resin Hybrid Composite: Mechanical and Microstructural Characterization [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2018, 27 (3): 201800014.
- [8] HUANG F, LIU Y, ZHANG X, et al. Effect of Elastomeric Nanoparticles on Toughness and Heat Resistance of Epoxy Resins [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2002, 23 (13): 786–790.
- [9] MA H, WEI G, LIU Y, et al. Effect of Elastomeric Nanoparticles on Properties of Phenolic Resin [J]. Polymer, 2005, 46 (23): 10568–10573.
- [10] LE Q H, KUAN H C, DAI J B, et al. Structure-property Relations of 55 nm Particle-toughened Epoxy [J]. Polymer, 2010, 51 (21): 4867–4879.
- [11] LIM S, CHOW W. Fracture Toughness Enhancement of Epoxy by Organo-montmorillonite [J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2011, 50 (2): 182–189.
- [12] LIU Y, HAN C, TAN H, et al. Organic-montmorillonite Modified Shape Memory Epoxy Composite [J]. Polymers for Advanced Technologies, 2011, 22 (12): 2017–2021.
- [13] HARANI H, FELLAHI S, BAKAR M. Toughening of Epoxy Resin Using Synthesized Polyurethane Prepolymer Based on Hydroxyl-terminated Polyesters [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1998, 70 (13): 2603–2618.
- [14] BAKAR M, DUK R, PRZYBYŁEK M, et al. Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin Modified with Polyurethane [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2009, 28 (17): 2107–2118.
- [15] YU Z, CUI A, ZHAO P, et al. Preparation and Properties Studies of UV-curable Silicone Modified Epoxy Resin Composite System [J]. Journal of applied biomaterials & functional Materials, 2018, 16 (S1): 170–176.
- [16] MURIAS P, MACIEJEWSKI H, GALINA H. Epoxy Resins Modified with Reactive Low Molecular Weight Siloxanes [J]. European Polymer Journal, 2012, 48 (4): 769–773.
- [17] YIN H, ZHANG Y, SUN Y, et al. Performance of Hot Mix Epoxy Asphalt Binder and Its Concrete [J]. Materials and Structures, 2015, 48 (11): 3825–3835.
- [18] YU J, CONG P, WU S. Laboratory Investigation of the Properties of Asphalt Modified with Epoxy Resin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 113 (6): 3557–3563.
- [19] TANG L C, WANG X, WAN Y J, et al. Mechanical Properties and Fracture Behaviors of Epoxy Composites with Multi-scale Rubber Particles [J]. Materials Chemistry and Physics, 2013, 141 (1): 333–342.
- [20] GIANNAKOPOULOS G, MASANIA K, TAYLOR A. Toughening of Epoxy Using Core-shell Particles [J]. Journal of Materials Science, 2011, 46 (2): 327–338.
- [21] 孔庆磊, 王帅, 王桂珍, 等. 废橡胶粉增韧环氧沥青及其机理研究 [J]. 化工时刊, 2013, 27 (12): 4–7, 18.
- KONG Qing-lei, WANG Shuai, WANG Gui-zhen, et al. Preparation and Mechanism of Crumb Rubber Toughened Epoxy Asphalt [J]. Chemical Industry Times, 2013, 27 (12): 4–7, 18.
- [22] LIU Y, XI Z, CAI J, et al. Laboratory Investigation of the Properties of Epoxy Asphalt Rubber (Ear) [J]. Materials and Structures, 2017, 50 (5): 219.
- [23] 肖新颜, 张登科, 晏英, 等. 有机蒙脱土/环氧树脂改性沥青材料的性能 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2015 (2): 139–143.
- XIAO Xin-yan, ZHANG Deng-ke, YAN Ying, et al. Properties of Asphalt Modified with Organic Montmorillonite/Epoxy Resin [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015 (2): 139–143.
- [24] LIU Y, ZHANG J, JIANG Y, et al. Investigation of Secondary Phase Separation and Mechanical Properties of Epoxy SBS-modified Asphalts [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 163–172.

- [25] SI J, JIA Z, WANG J, et al. Comparative Analysis of Cold-mixed Epoxy and Epoxy SBS-modified Asphalts; Curing Rheology, Thermal, and Mechanical Properties [J]. Construction and Building Materials, 2018, 176: 165 – 171.
- [26] JIANG Y, LIU Y, GONG J, et al. Microstructures, Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Asphalt Binder Modified by SBS Containing Various Styrene-butadiene Structures [J]. Materials and Structures, 2018, 51 (4): 86.
- [27] 曹东伟, 张艳君, 张海燕, 等. 一种有机硅改性环氧沥青以及混合料: 中国, CN104987735A [P]. 2015 – 10 – 21.
CAO Dong-wei, ZHANG Yan-jun, ZHANG Hai-yan, et al. A Silicone Modified Epoxy Asphalt and Mixture; China, CN104987735A [P]. 2015 – 10 – 21.
- [28] 周庆月. 纤维增强环氧沥青路面材料及其制备方法: 中国, CN108912707A [P]. 2018-11-30.
ZHOU Qing-yue. Fiber Reinforced Epoxy Asphalt Pavement Material and Preparation Method; China, CN108912707A [P]. 2018-11-30.
- [29] XU P, CONG P, LI D, et al. Toughness Modification of Hyperbranched Polyester on Epoxy Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 473 – 477.
- [30] XU P, ZHU X, CONG P, et al. Modification of Alkyl Group Terminated Hyperbranched Polyester on Paving Epoxy Asphalt [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 295 – 302.
- [31] 张荣亮, 杨建宇, 范哲. 烷基端基超支化聚磷酸酯对热拌环氧沥青的改性研究 [J]. 公路, 2018, 63 (6): 258 – 262.
ZHANG Rong-liang, YANG Jian-yu, FAN Zhe. Modification of Hot-mixed Epoxy Asphalt with Alkyl-terminated Hyperbranched Polyphosphate [J]. Highway, 2018, 63 (6): 258 – 262.
- [32] LI S, HUANG K, YANG X, et al. Design, Preparation and Characterization of Novel Toughened Epoxy Asphalt Based on a Vegetable Oil Derivative for Bridge Deck Paving [J]. RSC Advances, 2014, 4 (84): 44741 – 44749.
- [33] KANG Y, JIN R, WU Q, et al. Anhydrides-cured Bimodal Rubber-like Epoxy Asphalt Composites: From Thermosetting to Quasi-thermosetting [J]. Polymers, 2016, 8 (4): 104.
- [34] HU K, BAO L, CHEN X, et al. Synthesis of Castor Oil-derived Decanediamide as a Novel Flexible Asphalt-modified Epoxy Resin Curing Agent [J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37 (4): 1092 – 1098.
- [35] JIANG L, HU K, LIU Z, et al. Aliphatic Diamide as Novel Asphalt-modified Epoxy Curing Agent for Enhanced Performance [J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37 (3): 830 – 836.
- [36] QIAN Z, CHEN L, JIANG C, et al. Performance Evaluation of a Lightweight Epoxy Asphalt Mixture for Bascule Bridge Pavements [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25 (7): 3117 – 3122.
- [37] 李凯. 混凝土桥面铺装用环氧沥青混合料性能研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
LI Kai. Study on Performance of Epoxy Asphalt Mixture for Concrete Bridge Deck Pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [38] LUO S, QIAN Z D. Research on Low Temperature Performance of Epoxy Asphalt Mixture [J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 34/35: 1124 – 1128.
- [39] YANG Y, QIAN Z, SONG X. A Pothole Patching Material for Epoxy Asphalt Pavement on Steel Bridges; Fatigue Test and Numerical Analysis [J]. Construction and Building Materials, 2015, 94: 299 – 305.
- [40] ZHANG H, ZHANG G, HAN F, et al. A Lab Study to Develop a Bridge Deck Pavement Using Bisphenol A Unsaturated Polyester Resin Modified Asphalt Mixture [J]. Construction and Building Materials, 2018, 159: 83 – 98.
- [41] 徐伟, 黄红明, 周源, 等. 新型环氧沥青混合料 (N – Ea) 和粘结剂性能试验评价研究 [J]. 公路工程, 2014, 39 (1): 50 – 53.
XU Wei, HUANG Hong-ming, ZHOU Yuan, et al. Experimental Evaluation of the Performances of Novel Epoxy Asphalt Mixtures (N – EA) and Epoxy Adhesives [J]. Highway Engineering, 2014, 39 (1): 50 – 53.
- [42] 张争奇, 张苛, 李志宏, 等. 环氧沥青混凝土增柔增韧改性技术 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2015, 35 (1): 1 – 7.
ZHANG Zheng-qi, ZHANG Ke, LI Zhi-hong, et al. Technique Research on Flexibility and Toughness Modification for Epoxy Asphalt Concrete [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2015, 35 (1): 1 – 7.
- [43] 薛永超, 钱振东, 夏荣辉. 基于低温性能的橡胶颗粒环氧沥青混合料研究 [J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43 (9): 120 – 128.
XUE Yong-chao, QIAN Zhen-dong, XIA Rong-hui. Research on Rubber Particles Epoxy Asphalt Mixture Based on Low Temperature Performance [J]. Journal of Hunan University: Natural Science Edition, 2016, 43 (9): 120 – 128.
- [44] SUN Y, ZHANG Y, XU K, et al. Thermal, Mechanical Properties, and Low-temperature Performance of Fibrous

- Nanoclay-reinforced Epoxy Asphalt Composites and Their Concretes [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132 (12): 41694.
- [45] XUE Y, QIAN Z. Development and Performance Evaluation of Epoxy Asphalt Concrete Modified with Mineral Fiber [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102: 378–383.
- [46] 钱振东, 刘长波, 唐宗鑫, 等. 短切玄武岩纤维对环氧沥青及其混合料性能的影响 [J]. 公路交通科技, 2015, 32 (6): 1–5.
- QIAN Zhen-dong, LIU Chang-bo, TANG Zong-xin, et al. Effect of Basalt Fiber Chopped Strand on Performance of Epoxy Asphalt and Its Mixture [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32 (6): 1–5.
- [47] 汪林, 陈仕周, 黄冰释. 掺纤维环氧沥青混合料性能试验研究 [J]. 中外公路, 2010 (5): 189–191.
- WANG Lin, CHEN Shi-zhou, HUANG Bing-shi. Experimental Study on Performance of Fiber-added Epoxy Asphalt Mixtures [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2010 (5): 189–191.
- [48] 王水. 聚酯纤维掺量对环氧沥青桥面铺装混合料技术性能的影响 [J]. 公路工程, 2015, 40 (4): 95–99.
- WANG Shui. Study on Performance of Epoxy Asphalt and Its Mixture under Different Polyester Fiber Content [J]. Highway Engineering, 2015, 40 (4): 95–99.
- [49] 李华平. 纤维环氧沥青混凝土在道路与轨道平交口的应用 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2018, 35 (7): 106–110.
- LI Hua-ping. Application of Fiber Epoxy Asphalt Concrete in Intersection of Roads and Rails [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2018, 35 (7): 106–110.
- [50] 张争奇, 姚晓光, 李伟, 等. 环氧沥青混凝土柔韧性及路用性能研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13 (1): 74–81.
- ZHANG Zheng-qi, YAO Xiao-guang, LI Wei, et al. Research on Suppleness and Pavement Performance of Epoxy Asphalt Concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13 (1): 74–81.
- [51] 卜鑫德, 程烽雷. 聚氨酯-环氧复合改性沥青及其路用性能研究 [J]. 公路, 2016 (8): 171–174.
- BU Xin-de, CHENG Feng-lei. Research on Performance of Polyurethane-epoxy Resin Compound Modified Asphalt and Its Mixture [J]. Highway, 2016 (8): 171–174.
- [52] 陈利东, 李璐, 郝增恒, 等. 聚氨酯-环氧树脂复合改性沥青混合料的研究 [J]. 公路工程, 2013, 38 (2): 214–218.
- CHEN Li-dong, LI Lu, HAO Zeng-heng. Study of Polyurethane-epoxy Resin Compound Modified Asphalt Concrete [J]. Highway Engineering, 2013, 38 (2): 214–218.
-
- (上接第40页)
- [20] 徐日庆, 龚慈, 魏纲, 等. 考虑平动效应的刚性挡土墙土压力理论 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39 (1): 119–122.
- XU Ri-qing, GONG Ci, WEI Gang, et al. Theory of Earth Pressure against Rigid Retaining Walls Considering Translational Movement Effect [J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science Edition, 2005, 39 (1): 119–122.
- [21] 贾宁. 有限填土静止土压力系数计算方法研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (7): 1333–1337.
- JIA Ning. Coefficient of At-rest Earth Pressure from Limited Backfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34 (7): 1333–1337.
- [22] FANG Y S, ISHIBASHI I. Static Earth Pressure Various Wall Movements [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112 (3): 317–333.
- [23] 岳祖润, 彭胤宗, 张师德. 压实黏性填土挡土墙土压力离心模型试验 [J]. 岩土工程学报, 1992, 14 (6): 90–96.
- YUE Zu-run, PENG Yin-zong, ZHANG Shi-de. Centrifuge Model Tests on Lateral Pressure on Walls Retaining Compacted Clayey Backfill [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14 (6): 90–96.
- [24] 卢国胜. 考虑位移的土压力计算方法 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (4): 586–589.
- LU Guo-sheng. A Calculation Method of Earth Pressure Considering Displacement [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (4): 586–589.
- [25] FANG Y S, HO Y C, CHEN T J. Passive Earth Pressure with Critical State Concept [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 123 (3): 250–259.
- [26] 杨泰华, 龚建伍, 汤斌, 等. 不同变位模式下无粘性土非极限被动土压力计算分析 [J]. 岩土力学, 2013, 34 (10): 2979–2983, 2990.
- YANG Tai-hua, GONG Jian-wu, TANG Bin, et al. Calculation and Analysis of Unlimited Passive Earth Pressure of Cohesionless Soil in Different Movement Modes [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34 (10): 2979–2983, 2990.