

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.01.014

# 基于聚合物合金材料钢桥面铺装结构性能研究

杨波<sup>1,2</sup>,何兆益<sup>1</sup>,刘攀<sup>2</sup>,李凯<sup>1</sup>,盛兴跃<sup>2</sup>,李璐<sup>2</sup>

(1.重庆交通大学,重庆市 400074;2.重庆市智翔铺道技术工程有限公司,重庆市 401336)

**摘要:**基于聚合物合金材料轻质高强的特点,该文提出3种基于聚合物合金材料的新型钢桥面铺装结构,考察其高温性能、界面黏结性能、抗疲劳性能及抗滑性能等,并与传统铺装结构的路用性能做对比。试验结果表明:铺装层厚度对“聚合物合金材料+高弹改性沥青混凝土 SMA10”的高温性能影响较大,而对“聚合物合金材料+高韧性环氧沥青混凝土 EA10”和“浇注式沥青混凝土 GA10+聚合物合金材料”的高温性能影响较小。聚合物合金铺装结构具有良好的高温性能、界面黏结性能和抗疲劳性能,整体性能与浇注式沥青混凝土及环氧沥青混凝土铺装结构相似,完全能满足钢桥面铺装对材料及结构的要求,并降低了铺装层的自重,实现了钢桥面的轻质高强铺装目标。

**关键词:**钢桥面铺装;聚合物合金材料;铺装结构;铺装层厚度;路用性能

**中图分类号:**U443

**文献标志码:**A

中国钢桥面铺装技术发展至今,现有的铺装材料与铺装结构已遇到进一步发展的技术瓶颈。钢桥面铺装通常采用沥青混凝土<sup>[1]</sup>,由于沥青混凝土恒载大,增加了超大跨径钢桥的建设难度,极大地制约了钢桥建设的发展。为降低桥梁的恒载,减小超大跨径钢桥的建设难度,工程技术人员专门进行了钢桥面铺装轻质高强化的研究,主要集中在轻质沥青混凝土等方面<sup>[2-4]</sup>。然而,采用轻质沥青混凝土进行桥面铺筑的研究尚不深入,仍处于理论阶段,现实中铺筑的路面大多为试验路。有研究报道了轻质沥青混凝土存在级配退化现象<sup>[5]</sup>,极大地限制了轻质沥青混凝土铺装在大跨径钢桥中的应用。

本文跳出以沥青混合料为钢桥面铺装材料的思维定式,提出以聚合物合金材料进行钢桥面铺装。聚合物合金材料是将两种或两种以上不同种类的高聚物,通过物理或化学方法共混,使不同高分子的特性得以优化组合,从而形成具有所需性能的高分子混合物新材料,其中以工程塑料系聚合物合金为主。通过聚合物合金的共混,可赋予材料“高强”的突出优势<sup>[6-8]</sup>,使得钢桥面铺装层具备优异的强度和力学性能,同时实现材料轻质化。前期,研究利用工程塑料聚苯硫醚(PPS)和聚丙烯( $\beta$ -PP)制备聚

苯硫醚-聚丙烯聚合物合金,并添加多种功能性材料多元共混开发出综合性能良好、密度较低且成本适宜的钢桥面铺装聚合物合金材料。在设计聚合物合金钢桥面铺装结构时,可适当降低铺装层厚度,进一步降低钢桥面铺装恒重,进而实现铺装结构轻质化。在此,本文提出3种基于聚合物合金的钢桥面铺装结构,研究其路用性能,并与典型的铺装结构对比。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原材料

钢桥面铺装聚合物合金材料是一种以聚苯硫醚-聚丙烯(PPS/ $\beta$ -PP)为主体,并添加了一定量的热塑性弹性体、增韧树脂、无机填料和活性单体等外加剂的新型铺装材料,其常温拉伸强度可达30 MPa,断裂伸长率超过40%。经过多年发展,浇注式沥青混凝土 GA10、高弹改性沥青混凝土 SMA10 及高韧性环氧沥青混凝土 EA10 已成为中国钢桥面的典型铺装材料<sup>[9]</sup>。聚合物合金材料剖面见图1(a),不同于常规钢桥面铺装材料[图1(b)、(c)、(d)],不含粗集料,零空隙。钢桥面铺装材料的基本性能指标见表1。由表1可以看出:聚合物合金

收稿日期:2020-08-02

基金项目:重庆市重点产业共性关键技术创新专项重点研发项目(编号:cstc2017zdcy-zdyf0297)

作者简介:杨波,男,博士,正高级工程师.E-mail:41502337@qq.com

材料具有优异的高温性能、低温性能和防水性能,且密度低于其他3种沥青混凝土,完全能满足钢桥面铺装对材料的严格要求,并实现钢桥面铺装层的轻质高强目标。

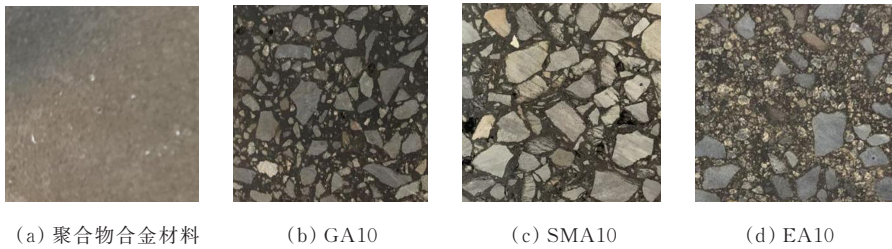


图1 钢桥面铺装材料结构简图

表1 钢桥面铺装材料基本性能指标

铺装材料	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	空隙率/ %	渗水系数/ ( $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ )	动稳定度(60℃)/ (次 $\cdot\text{mm}^{-1}$ )	破坏应变 (-10℃)/ $\mu\epsilon$	疲劳寿命 (600 $\mu\epsilon$ )/万次
聚合物合金材料	1.36	<1	0	42 760	10 700	>200
GA10	2.40~2.50	<1	0	500~1 000	3 000~3 500	>100
SMA10	2.40~2.50	3~4	50~100	5 000~7 000	2 700~3 200	>100
EA10	2.40~2.50	1~3	<50	>10 000	4 000~4 500	>100

1.2 铺装结构设计

根据聚合物合金材料的优良特性和钢桥面铺装的性能要求,参照传统沥青混凝土铺装结构总结出的两层结构形式的成功模式<sup>[1]</sup>,设计3种聚合物合金铺装结构。分别为铺装结构一:聚合物合金材料+SMA10;铺装结构二:聚合物合金材料+EA10;铺装结构三:GA10+聚合物合金材料。经过大量实体工程应用,浇注式沥青混凝土铺装(GA10+SMA10)已成为中国钢桥面主流铺装方案,占据一半以上的市场份额<sup>[10]</sup>。双层环氧沥青混凝土铺装(EA10+EA10)由于优异的抗车辙性能,近年来也得到大量应用<sup>[11]</sup>。在此,对比前述3种聚合物合金铺装结构与GA10+SMA10(记为铺装结构四)和EA10+EA10(记为铺装结构五)的路用性能,5种铺装结构具体示意见表2。铺装结构防水黏结材料(黏层与防水黏结层需用)均选用自主开发的二阶环氧树脂防水黏结剂,用量为0.4~0.5 kg/m<sup>2</sup>,其常温拉伸强度大于3.0 MPa,断裂伸长率大于100%,各项性能均满足要求。

1.3 试验方法

按照《公路钢桥面铺装设计与施工技术规范》(JTG/T 3364-02—2019)和《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)中的测试方法,进行铺装结构的车辙试验、拉拔剪切试验、五点弯曲疲

劳试验等,对比评价其路用性能。其中,高韧性环氧沥青混凝土及二阶环氧树脂防水黏结剂需60℃养护4 d,直至形成最终强度。

表2 铺装结构

铺装结构 类型	磨耗层	保护层	结构图示
结构一	SMA10	聚合物合金材料	
结构二	EA10	聚合物合金材料	
结构三	聚合物合金材料	GA10	
结构四	SMA10	GA10	
结构五	EA10	EA10	

注:结构图示中从上至下分别为:磨耗层、黏层、保护层、防水黏结层、防腐层、钢板。各结构均采用环氧富锌漆为防腐层和清洁度Sa2.5级,粗糙度为60~100  $\mu\text{m}$ 的钢板。

2 结果与讨论

2.1 铺装层厚度对结构高温性能影响

研究铺装结构一、二、三的铺装层厚度对结构高温性能的影响,测试各铺装结构的动稳定度和车辙深度,试验温度为60℃,试验结果见图2~4。

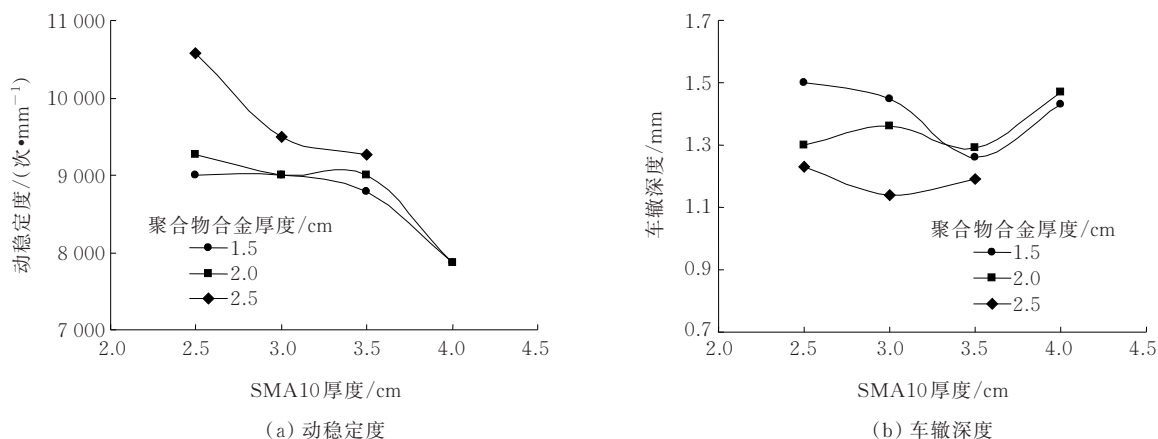


图 2 铺装层厚度对铺装结构一高温性能的影响

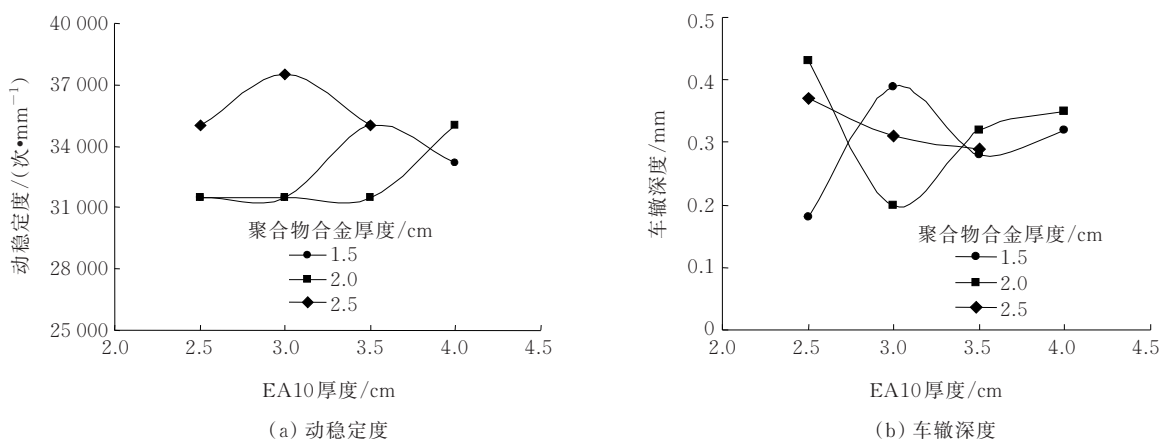


图 3 铺装层厚度对铺装结构二高温性能的影响

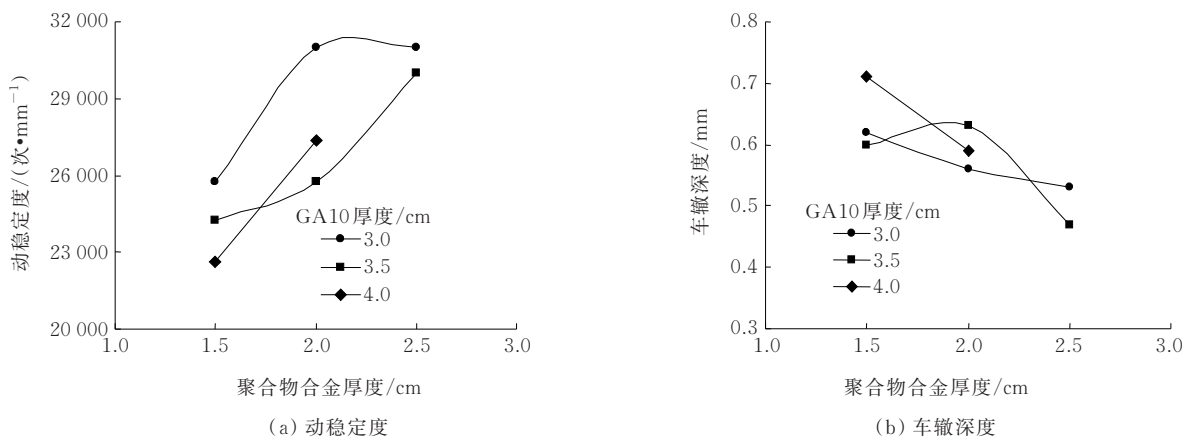


图 4 铺装层厚度对铺装结构三高温性能的影响

由图 2~4 可知:

(1) 铺装结构一具有良好的高温性能。铺装层厚度对该铺装结构的高温性能影响较大,整体表现为 SMA10 铺装层厚度越小,聚合物合金铺装层厚度越大,铺装结构的动稳定度则越大,这是因为高弹改性沥青混凝土 SMA10 的高温性能本就弱于聚合物合金材料。针对铺装结构一,其合适的铺装层(聚合物合金材料+SMA10)厚度为 1.5 cm+3.0 cm 或 2.0

cm+3.0 cm。

(2) 铺装结构二具有十分优异的高温性能,且铺装层厚度对该铺装结构的高温性能影响较小,这是因为聚合物合金材料和高韧性环氧沥青混凝土本身就具有十分优异的高温稳定性,温敏性较小。针对铺装结构二,其合适的铺装层(聚合物合金材料+EA10)厚度为 1.5 cm+3.0 cm 或 2.0 cm+3.0 cm。

(3) 铺装结构三具有优异的高温性能。铺装层

厚度对该铺装结构的高温性能有一定的影响,整体表现为GA10铺装层厚度越小,铺装结构的动稳定度则越大。一方面,浇注式沥青混凝土高温性能较差,对温度较为敏感;另一方面,聚合物合金铺装层在上面层,限制了下面层浇注式沥青混凝土的变形。因此,铺装结构依旧表现出良好的高温稳定性。针对铺装结构三,其合适的铺装层(GA10+聚合物合金材料)厚度为3.0 cm+2.0 cm。

对比评价5种铺装结构的高温性能,试验结果见表3。

表3 铺装结构车辙试验结果

铺装结构 类型	推荐铺装层 厚度/cm	动稳定度(60℃)/ (次·mm <sup>-1</sup> )	车辙深度 (60℃)/mm
结构一	1.5+3.0	9 000	1.45
结构二	1.5+3.0	31 500	0.39
结构三	3.0+2.0	31 000	0.56
结构四	3.5+3.5	6 300	1.67
结构五	3.0+3.0	42 760	0.24

从表3可以看出:5种铺装结构的高温性能优劣顺序依次为:铺装结构五>铺装结构二>铺装结构三>聚铺装结构一>铺装结构四。铺装结构的高温性能主要由上面层铺装材料决定,即上面层采用聚合物合金材料和高韧性环氧沥青混凝土的铺装结构具有优异的高温性能。3种聚合物合金铺装结构的高温性能均优于浇注式沥青混凝土铺装结构,对于高温重载地区,聚合物合金铺装结构具有明显的技术优势。

同时可以看出,铺装结构一和铺装结构二的总厚度为4.5 cm,铺装结构三的总厚度为5.0 cm,铺装结构四的总厚度为7.0 cm,铺装结构五的总厚度为6.0 cm,即采用聚合物合金材料能降低铺装层厚度。同时聚合物合金材料的密度(1.36 g/cm<sup>3</sup>)小于GA10、SMA10及EA10(2.40~2.50 g/cm<sup>3</sup>),因此3种聚合物合金铺装结构可降低铺装层自重40%以上,实现钢桥面轻质化铺装。

## 2.2 铺装结构界面黏结性能

分别测试铺装结构与钢板及铺装结构层间的拉拔强度和剪切强度,试验温度为25℃、60℃,以拉拔强度与剪切强度对比评价5种铺装结构的界面黏结性能,试验结果见表4、5。

从表4、5可以看出:由于二阶环氧树脂防水黏结

剂优异的黏结性能,聚合物合金铺装层与钢板及其层间均有优异的黏结力;另一方面,随着试验温度升高,铺装结构的界面黏结强度降低。在25℃下,聚合物合金铺装结构的界面黏结强度均大于规范要求,并优于浇注式沥青混凝土铺装结构。由此可见,聚合物合金铺装结构具有良好的黏结性能,完全能满足钢桥面铺装技术要求。

表4 铺装结构与钢板拉拔剪切试验结果

铺装结构 类型	拉拔强度/MPa		剪切强度/MPa	
	25℃	60℃	25℃	60℃
结构一	5.02	1.10	5.32	1.41
结构二	5.02	1.10	5.32	1.41
结构三	2.45	0.13	3.09	0.36
结构四	2.45	0.13	3.09	0.36
结构五	3.51	1.12	4.79	1.76

表5 铺装结构层间拉拔剪切试验结果

铺装结构 类型	拉拔强度/MPa		剪切强度/MPa	
	25℃	60℃	25℃	60℃
结构一	2.12	0.13	3.56	0.57
结构二	3.39	0.75	5.02	1.26
结构三	2.25	0.10	3.39	0.60
结构四	2.07	0.11	3.35	0.64
结构五	3.51	1.12	4.79	1.76

## 2.3 铺装结构抗疲劳性能

进行铺装结构的五点弯曲疲劳试验,采用正弦函数加载,加载频率为10 Hz,试验温度为20℃,在防水黏结层与铺装层出现的裂缝长度达到试件总周长的一半时,停止试验并记录疲劳次数,对比评价5种铺装结构的抗疲劳性能,试验结果见表6。

表6 铺装结构五点弯曲疲劳试验结果

铺装结构 类型	出现破坏时疲劳 次数/万次	破坏疲劳次数/ 万次	破坏疲劳次数 平均值/万次
结构一	117.2	149.1	147.4
	121.9	145.8	
结构二	121.4	157.0	151.2
	126.8	145.3	
结构三	102.5	170.1	168.0
	107.0	165.8	
结构四	99.0	156.3	161.2
	103.1	166.2	
结构五	101.4	177.5	165.0
	109.7	152.5	

注:出现破坏时疲劳次数指防水黏结层与铺装层出现裂缝时的试验次数;破坏疲劳次数指防水黏结层与铺装层出现的裂缝长度达到试件总周长的一半时的试验次数。



由表6可知:5种铺装结构在标准条件下的加载循环次数均超过100万次,其中,铺装结构三、五和四略优于铺装结构二和一,但整体相差不大。由此可见:3种聚合物合金铺装结构具有与浇注式沥青混凝土铺装结构及环氧沥青混凝土铺装结构同等优异的疲劳耐久性。聚合物合金铺装结构与钢板的变形协调性较强,可保证其在重载交通条件下的抗疲劳性能具有较大的安全储备,不会丧失对钢桥面板的长效保护。

## 2.4 铺装结构抗滑性能

铺装结构的抗滑性能取决于上面层的抗滑性能。因此,只需测试上面层的摆值即可对比评价5种铺装结构的抗滑性能,试验结果见表7。

表7 铺装结构抗滑性能试验结果

铺装结构类型	摆值/BPN	铺装结构类型	摆值/BPN
结构一	80.3	结构四	80.3
结构二	73.2	结构五	73.2
结构三	46.0		

由表7可知:铺装结构一和四的上面层均为SMA10,表现出优异的抗滑性能;铺装结构二和五上面层为EA10,抗滑性能同样满足要求;而铺装结构三由于上面层采用聚合物合金材料,其抗滑性能较差,说明上面层铺装材料不宜直接采用聚合物合金材料。上面层若要使用聚合物合金材料,必须加铺抗滑磨损层或者通过其他手段来提高其抗滑性能。

## 3 结论

(1) 聚合物合金铺装结构的高温性能主要由上面层铺装材料决定,并且受铺装层厚度的影响。铺装层厚度对“聚合物合金材料+高弹改性沥青混凝土SMA10”的高温性能影响较大,SMA10铺装层厚度越小,聚合物合金铺装层厚度越大,铺装结构的高温性能越好。铺装层厚度对“聚合物合金材料+高韧性环氧沥青混凝土EA10”和“浇注式沥青混凝土GA10+聚合物合金材料”的高温性能影响较小。聚合物合金铺装结构具有优良的高温性能,对于高温重载地区,聚合物合金铺装结构具有明显的技术优势。

(2) 聚合物合金铺装结构与钢板及其层间的25℃拉拔强度均大于2.0 MPa,25℃剪切强度均大于3.0 MPa,表现出良好的黏结性能,完全能满足钢桥面铺装技术要求。标准条件下,聚合物合金铺装结构的疲劳次数超过100万次,表现出优异的抗疲劳性能。铺装结构的抗滑性能取决于上面层的抗滑性能,上面层若采用聚合物合金材料,必须通过加铺抗滑磨损层等手段来提高其抗滑性能。

(3) 聚合物合金铺装结构完全满足钢桥面铺装对材料与结构的严格要求,表现出优良的路用性能,且整体性能达到浇注式沥青混凝土铺装结构及环氧沥青混凝土铺装结构的技术要求,并实现钢桥面铺装结构轻质化,具有较广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 王朝辉,郭瑾,陈宝,等.桥面铺装结构的应用现状与发展[J].筑路机械与施工机械化,2017,34(12):41-52.
- [2] 丁庆军,黄修林,马平,等.高强次轻混凝土的设计及其在钢桥面铺装中的应用[J].施工技术,2007,36(12):64-66.
- [3] 潘友强,罗瑞林.轻质耐久型桥面铺装结构开发及性能研究[J].公路,2019,64(3):74-78.
- [4] 江陈龙,钱振东,贾彦卿.国内外轻集料沥青混凝土研究现状[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2012,31(S1):714-718.
- [5] 周亚东.陶粒与沥青的粘附性及陶粒沥青混凝土级配退化问题研究[D].南京:东南大学,2016.
- [6] 雷祖碧,王飞,王浩江,等.PPO/PBT合金性能的研究[J].塑料助剂,2019(5):25-28.
- [7] 蒋刚军,董相茂,田征宇,等.挤出工艺对PC/PBT合金性能影响的研究[J].塑料工业,2019,47(6):77-80.
- [8] 陶建英.工程塑料系聚合物合金的技术状况与发展前景[J].上海化工,2003(2):29-32.
- [9] 王民,周启伟,胡德勇,等.三种不同钢桥面铺装材料的疲劳特性分析[J].公路工程,2016,41(3):40-42.
- [10] 朱定,李书亮.港珠澳大桥钢桥面铺装方案比选及浇注式沥青混合料(GMA)标准化施工工艺控制[J].中外公路,2019,39(2):161-164.
- [11] 黄红明,曾国东,周敏,等.基于施工控制的TAF环氧沥青混合料性能试验研究[J].中外公路,2018,38(5):262-266.