

高胶改性沥青超薄磨耗层路用性能研究

吕书昌¹, 高伟²

(1. 眉山市城投建筑材料有限公司, 四川 眉山 620000; 2. 贵州中胜公路养护技术研究有限公司, 贵州 贵阳 550000)

摘要: 为解决传统胶粉改性沥青存在的储存稳定性和性质不稳定等问题, 使用一种新的高胶改性剂制备改性沥青, 并通过增设 6.7 mm 筛孔来改良 AC-10 级配, 形成了一种骨架密实型的 ECA-10 级配, 通过车辙、马歇尔稳定度、低温弯曲等试验, 对比验证了两种级配 (ECA-10、AC-10) 和三种沥青 (SBS 改性沥青、高黏沥青和高胶沥青) 组合的沥青混合料路用性能, 并通过微观形貌观测和红外光谱图来分析改性机理。结果表明: ECA-10 级配的高温抗车辙性能优于 AC-10 级配, 在采用高胶改性沥青后其高温性能进一步提高; 高胶沥青混合料低温性能和水稳定性较其他类型沥青混合料有显著提升; 高胶母粒在沥青中会溶胀形成不均匀的改性沥青体系, 改性过程表现为物理共混改性的同时伴随化学反应。

关键词: 道路工程; 高胶改性剂; 超薄磨耗层; 路用性能; 改性机理

中图分类号: U416.217

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)05-0270-05

Research on Pavement Performances of High-rubber Modified Asphalt Ultra-thin Wearing Course

LYU Shuchang¹, GAO Wei²

(1. Meishan City Investment Building Material Co., Ltd., Meishan 620000, China; 2. Guizhou Zhongsheng Highway Maintenance Technology Research Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to solve the problems of storage stability and property instability of traditional rubber powder modified asphalt, a new high-rubber modifier is used to prepare the modified asphalt, and through the addition of 6.7-mm sieve pore, the AC-10 gradation is modified to form a dense skeleton type of ECA-10 gradation. The rut test, Marshall stability test and low-temperature bending test are used to compare and verify the pavement performances of asphalt mixtures with two gradations (ECA-10 and AC-10) and three kinds of asphalt (SBS modified asphalt, high-viscosity asphalt and high-rubber asphalt). And the modification mechanism is analyzed by morphological observation and infrared spectroscopy. The results show that the high-temperature rutting resistance of ECA-10 gradation is better than that of AC-10 gradation, and its high-temperature performance is further improved after using the high-rubber modified asphalt. The low-temperature performance and water stability of the high-rubber modified asphalt mixture are improved more obviously than that of the other asphalt mixtures. The high-rubber masterbatch will swell in asphalt to form the non-uniform modified asphalt system of high-rubber asphalt. The modification process is characterized by physical blending and accompanying chemical reaction.

Keywords: road engineering; high-rubber modifier; ultra-thin wearing course; pavement performance; modification mechanism

0 引言

超薄磨耗层技术因其可靠的质量、较高的施工效率和较好的经济性被广泛应用在道路预防性养护中^[1-2]。该技术不仅能够迅速高效地修复轻度车辙、路面开裂以及泛白松散等常见问题^[3-4], 而且在改善抗滑性能、降低噪声以及减少水雾等方面同样展现

显著优势^[5-6]。由于其厚度通常在 15~25 mm 范围内, 相较于传统沥青面层, 其厚度缩减了约一半。这一特点不仅实现了造价与维护成本 30%~40% 的减少, 而且极大地降低了资源与能源的消耗。

橡胶沥青超薄磨耗层采用由废旧轮胎制成的橡胶沥青作为胶结料, 结合间断级配沥青混合料, 并采用高性能的乳化沥青, 来实现对原有路面的修复或增强, 具有显著的经济和社会效益^[6-7]。然而, 橡胶改性沥青在性质与储存稳定性方面面临诸多挑战。主要在于硫化橡胶本身所含的活性官能团数量极为

收稿日期: 2024-05-08

作者简介: 吕书昌(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事工程管理工作。

有限,难以在沥青内部形成有效的聚合网络,同时与沥青分子间的化学链接较少。因此,当橡胶粒子在沥青中分散时,难以形成协同增强效应。此外,橡胶与沥青在密度上存在的显著差异,也导致了在储存过程中改性沥青易发生离析,进一步影响了橡胶改性沥青的性能稳定性^[8-10]。

针对上述问题,采用特制的高胶改性剂来制备高胶改性沥青,并设计高胶沥青超薄磨耗层混合料,通过室内性能试验、工程应用实践及现场检测,深入研究了高胶沥青超薄磨耗层技术在预防性养护中的实际应用效果。

1 材料及方法

1.1 原材料

1.1.1 高胶改性剂

首先,在高温快速剪切条件下对轮胎橡胶进行脱硫预处理,后添加稳定剂进行共混反应,产生性质稳定的中间颗粒产物。接着,将这些中间颗粒产物与热塑性弹性体、活性剂及树脂进行混合反应,以形成高胶改性剂母粒,如图 1 所示。其粒径范围为 1.8 ~ 4.8 mm,技术参数如表 1 所列。

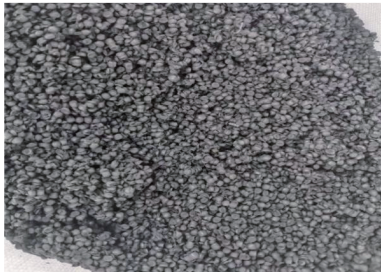


图 1 高胶母粒

表 1 高胶改性剂检测结果

检测项目	检测结果
密度/(g·cm ⁻³)	1.15~1.20
拉伸强度/MPa	≥10
拉伸率/%	≥200
粒径/mm	≤5
灰分/%	<6
有机物含量/%	≥90

1.1.2 沥青

本文选用的沥青为 7% SBS 改性沥青、成品高黏沥青以及由 SBS 改性沥青+8% 高胶改性剂直投制备而成的高胶沥青,其中 SBS 改性沥青和高黏沥青由江苏某沥青厂生产。不同沥青的基本技术性质指标如表 2 所列。

1.1.3 集料

本文选用玄武岩作为集料,其技术指标如表 3 所

表 2 沥青基本技术性质

技术指标	SBS 改性 沥青	高黏 沥青	高胶 沥青	
针入度(25 ℃)/(0.1 mm)	48.4	44.7	57.0	
延度(5 ℃,5 cm/min)/cm	26.5	22.6	37.0	
软化点/℃	67.7	78.9	89.0	
135 ℃布氏黏度/(Pa·s)	1.62	2.45	12.58	
闪点/℃	270	270	>300	
溶解度/%	99.45	99.40	99.35	
软化点差/℃	1.0	1.0	1.0	
弹性恢复/%	87.9	89.0	93.5	
质量损失/%	0.20	—	−0.15	
薄膜加热 TFOT	针入度比/%	77	82	88
(163 ℃,5 h)	延度	20	22	29
(5 ℃,5 cm/min)/cm				

列,填料选用由石灰岩加工所得的矿粉。

表 3 集料物理性质

检测项目	玄武岩	检测方法 ^[11]	质量指标
压碎值/%	11.8	T0316-2005	≤26
洛杉矶磨耗损失率/%	12.32	T0317-2005	≤28
表观相对密度/(g·cm ⁻³)	2.945	T0304-2005	≥2.6
毛体积相对密度/(g·cm ⁻³)	2.784	T0304-2005	—
针片状颗粒含量/%	1.5	T0312-2005	≤18
吸水率/%	0.58	T0304-2005	≤2.0

1.2 级配设计

本文选用 AC-10、ECA-10 两种级配类型,如表 4 所列,再结合三种沥青胶结料,共形成 6 种沥青混合料类型,如表 5 所列。其中 AC-10 油石比为 5.6%, ECA-10 油石比为 5.5%;ECA-10 在常规的筛孔基础上增加了一类筛孔(6.70 mm),且必须保证在 5~10 mm 粒径的集料中 6.70 mm 筛孔的通过率不大于 20%,从而形成骨架密实结构^[6]。

表 4 混合料设计级配

级配 类型	通过下列筛孔(mm)的百分率/%									
	13.2	9.5	6.7	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
ECA-10	100	90.5	27.6	38.4	24.4	20.3	14	12.5	7.6	5.2
AC-10	100	94.2	—	59.7	44.1	31.5	18.3	10.8	8.0	6.4

表 5 沥青混合料类型

沥青类别	级配类型	
	AC-10	ECA-10
SBS 改性沥青	AC-1	ECA-1
高黏沥青	AC-2	ECA-2
高胶沥青	AC-3	ECA-3

1.3 试验方法

1.3.1 沥青混合料试验方法

参考《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》(JTG E20—2011)^[12],分别进行车辙实验、小梁弯曲

试验、浸水马歇尔试验和冻融劈裂试验以测试不同沥青混合料试件的高温、低温和水稳定性能。

1.3.2 微观测试分析方法

采用场发射电子的扫描电子显微镜 FEI Inspect F50 对 SBS/高胶复合改性沥青试样的微观形貌进行测试,放大倍数为 5 000 和 20 000 倍。采用 Cary 630 在衰减全反射模式下工作,用 OPUS 软件记录 600~4 000 cm⁻¹ 波长范围的红外光谱。

表6 车辙试验测试结果

温度	荷载	指标	AC-1	AC-2	AC-3	ECA-1	ECA-2	ECA-3
60℃	0.7 MPa	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	4 385	7 729	8 537	4 828	8 326	9 057
		累计变形量/mm	2.015	1.303	1.216	1.933	1.255	1.108
	0.8 MPa	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	3 585	6 721	7 113	3 991	7 107	7 396
		累计变形量/mm	2.341	1.636	1.517	2.367	1.624	1.489
	0.9 MPa	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	2 618	5 102	5 476	2 904	5 484	5 784
		累计变形量/mm	2.674	1.904	1.875	2.762	1.880	1.803
	1.0 MPa	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	1 304	3 985	4 216	1 507	4 218	4 526
		累计变形量/mm	3.753	2.385	2.196	2.992	2.305	2.276
70℃	0.7 MPa	动稳定度 DS/(次·mm ⁻¹)	1 516	3322	3675	1839	3720	3988
		累计变形量/mm	3.672	3.201	3.087	3.612	3.178	3.103

对于 AC 类混合料,随着轮压从 0.7 MPa 逐渐增加到 1.0 MPa,采用 SBS 改性沥青、高黏沥青、高胶沥青的混合料对应的动稳定度降幅分别为 68.2%、48.4%、50.6%,表明随着轮压的增加,采用 SBS 改性沥青的混合料抵抗重载的能力最弱,而高黏沥青混合料和高胶沥青混合料动稳定度分别为 3 985 次/mm、4 216 次/mm,不仅降幅更小,且当轮压为 1.0 MPa 的模拟重载路况时,二者的动稳定度也仍然远远高于 SBS 改性沥青混合料的 1 394 次/mm,说明高黏沥青和高胶沥青在重载路段上抗车辙性能的优越性。

对比 AC-10 和 ECA-10 这两种级配类型对混合料抗车辙性能的影响,会发现试件动稳定度的变化幅度大致相同,在 60℃ 条件下,采用相同胶结料的三组进行对比(AC-1 和 ECA-1、AC-2 和 ECA-2、AC-3 和 ECA-3),三个组合中 EAC-10 分别比 AC-10 的动稳定度提升了 10.1%、7.7%、6.1%,证明了间断级配类型的 ECA-10 形成的骨架密实型结构,在抗车辙性能方面要优于悬浮密实型的 AC-10 级配。

当温度进一步提高到 70℃ 时,采用同种级配类型的混合料动稳定度大小依次为:高胶沥青>

2 试验结果分析

2.1 路用性能

2.1.1 高温抗车辙性能

车辙试验的测试结果如表 6 所列,可见两种级配混合料的动稳定度随轮压增加而减小的趋势和降幅大致相同,各类沥青混合料的动稳定度均符合规范技术要求。

高黏沥青>SBS 改性沥青,且两种高胶沥青的差距较小,表明高胶沥青在高温稳定性方面明显优于 SBS 改性沥青,证明了高胶沥青在高温地区的应用潜力。

2.1.2 低温抗裂性能

小梁弯曲试验结果如表 7 所列,可见三种类型的沥青混合料均具备较好的低温抗裂性能。在相同的级配类型条件下,高胶沥青的低温性能要比其他两种沥青更好,这是由于沥青中的轻质组分通过渗透和扩散机制深入橡胶网络内部,引发高胶含量母粒的膨胀现象^[12],这一过程会导致沥青由原本的溶胶结构向溶胶-凝胶型结构转变,从而显著降低了其感温性。值得注意的是,高胶含量母粒具有体积小、数量多的特点,故在低温环境下,这些母粒与沥青基体的模量差异显著,高度的应力集中促使大量银纹和剪切带的形成^[13],而产生这些结构需消耗大量能量,因此有效提升了沥青的韧性。同时,较大的高胶含量母粒颗粒具有抑制单个银纹扩展和断裂的作用,防止其迅速发展成为破坏性的裂纹,从而显著增强了沥青在低温条件下的柔韧性。

表7 低温小梁弯曲试验结果

试验指标	AC-1	AC-2	AC-3	ECA-1	ECA-2	ECA-3
抗弯拉强度/MPa	8.31	9.07	9.22	8.40	9.18	9.43
破坏应变 με	2 955.4	3 108.9	3 208.6	3 011.3	3 170.2	3 275.8
弯曲劲度模量/MPa	2 891.6	3 121.5	3 276.2	3 045.9	3 190.3	3 267.3

2.1.3 水稳定性

水稳定性试验结果如图 2 所示。由图可知,不论是采用 ECA-10 级配或 AC-10 级配,三种胶结料的水稳定性优劣依次是:高胶沥青>高黏沥青>SBS 改性沥青。高胶改性沥青的黏度较大,集料包裹的沥青膜厚度较大,因此集料与沥青之间的黏结强度较高,不易剥离^[14];从冻融劈裂强度比的数值来看,采用 SBS 改性沥青、高黏沥青、高胶沥青时,ECA-10 混合料比 AC-10 混合料分别提高了 1.0%、1.0%、1.1%,证明 ECA-10 级配在水稳定性方面比 AC-10 级配略好,但提升效果不显著。

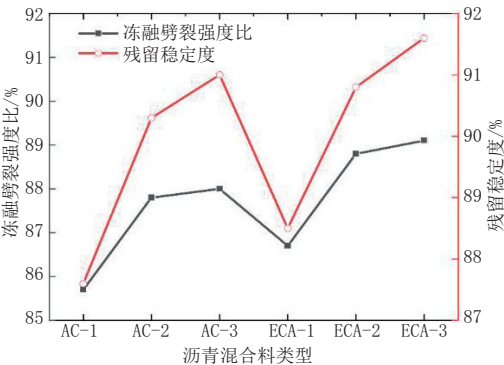


图 2 水稳定性试验结果

2.2 改性机理分析

2.2.1 微观形貌

不同沥青试样改性前后的微观形貌如图 3 所示。由图可知,SBS 沥青的均质性很好,除部分位置稍有杂质,接近于均相结构。由图 3(b)和图 3(c)可以看出,在搅拌和高速剪切的作用下,高胶改性剂经过解聚和脱硫,颗粒体积减小,均匀地分布在沥青中;高胶母粒颗粒并不能完全溶解于沥青,而是像弹性集料一般被沥青包裹,两者界面结合紧密。因此,复合改性沥青在本质上是一种不均匀体系。考虑到这一因素,对于将直投高胶沥青的使用针入度作为技术指标这一点就有待商榷,需开发更准确的评价指标。

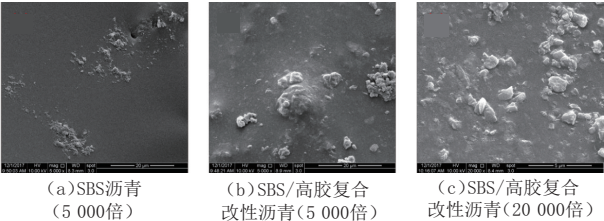


图 3 不同沥青试样电镜图

2.2.2 化学官能团变化

SBS 沥青与 SBS 高胶母粒复合改性沥青的红外光谱图如图 4 所示。由图可见,SBS 胶粉复合改性沥

青与 SBS 改性沥青虽呈现出相似的官能团分布,但吸收峰的强度有所不同。在 3 000~2 800 cm^{-1} 的波长范围内,可观察到强烈的吸收峰,主要源于环烷烃和烷烃中 C-H 键的振动,其中尤以 $-\text{CH}_2-$ 的吸收最为显著。然而,当加入高胶改性剂后,吸收峰的强度明显减弱,这是由于 $-\text{CH}_2-$ 的反对称伸缩和对称伸缩所导致的,说明改性剂与沥青之间发生了化学反应。

在 1 600 cm^{-1} 处的吸收峰由两部分组成:一部分是苯环骨架中的共轭双键 C=C 引起的,另一部分是 C-O 的吸收贡献。而位于 1 455 cm^{-1} 和 1 374 cm^{-1} 处的两个强烈吸收峰则属于 C-H 产生的面内伸缩振动。通过对比两类沥青的红外光谱图,我们发现这三处的吸收峰在高胶母粒掺入后均有所减弱,表明这些化学键在改性过程中与沥青发生了反应,特别是碳碳双键的吸收峰的减弱程度较为显著。这主要是由于双键的热稳定性较差,在加热和高速剪切的过程中会受热打开,然后与胶粉发生枝接反应^[12]。

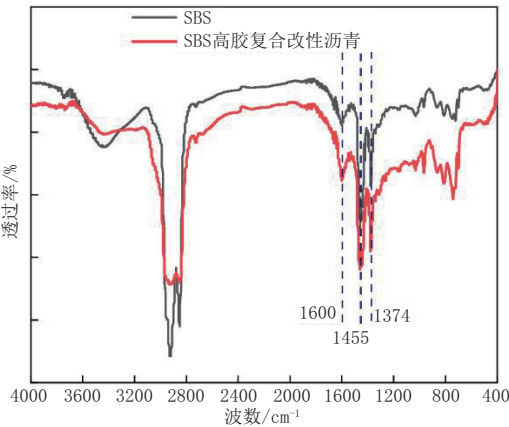


图 4 SBS/高胶母粒复合改性沥青红外光谱图

3 结 语

(1) 沥青性质比级配类型对磨耗层高温稳定性的影响更大,不同沥青胶结料制备的磨耗层高温抗车辙性能优劣分别为:高胶沥青>高黏沥青>SBS 沥青,说明高胶沥青比 SBS 改性沥青更适合作为超薄磨耗层的胶结材料。

(2) 高胶母粒显著增强了沥青在低温条件下的柔韧性,高黏沥青和高胶沥青的水稳定性能、低温性能差别不大,均优于 SBS 改性沥青。

(3) 通过 SEM 图可发现,高胶母粒颗粒在加速搅拌和高速剪切过程中发生了解聚和脱硫,且高胶母粒不能溶解只能溶胀,从而使得复合改性沥青变为一种不均匀体系。红外光谱的结果表明,改性过程中高胶母粒与 SBS 沥青发生了化学反应。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国路面工程学术研究综述·2020[J]. 中国公路学报, 2020, 33(10): 1-66.
- [2] 虞将苗, 杨倪坤, 于华洋. 道路高性能沥青超薄磨耗层技术研究与应用现状[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(7): 2287-2298.
- [3] Zhang W, Li Q, Wang J, *et al.* Physical and Chemical Evaluation of Adhesion Recovery Property of Aged High-Viscosity Asphalt Based on Specialized Composite Rejuvenators[J]. Journal of Cleaner Production, 2023(414): 137758.
- [4] 陈娥梅, 闵建刚, 李红顺, 等. 超薄磨耗层混合料设计及施工关键技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(2): 140-144; 17.
- [5] 周铭钰, 刘曙光, 吴超凡, 等. 基于水性环氧乳化沥青的超薄磨耗层级配设计及性能对比研究[J/OL]. 材料导报, 2024, 38(24): 265-272.
- [6] 毛新征, 周德宝, 陈国强, 等. 高胶改性ECA-10沥青混合料的试验研究及应用[J]. 国防交通工程与技术, 2022, 20(4): 65-68.
- [7] 冯志强. 超薄磨耗层温拌橡胶沥青混合料性能研究[J]. 公路, 2021, 66(11): 14-20.
- [8] Sun Z, Chen J, Liu S, *et al.* Evaluation of the Performance of SBS/CR Composite-Modified Deicing Asphalt Mixture Prepared for Ultra-Thin Wearing Course[J]. Construction and Building Materials, 2024(416): 135085.
- [9] 邱文利, 徐飞翔, 冯雷, 等. 高掺量橡胶改性沥青性能研究及优选[J]. 城市道桥与防洪, 2023(4): 194-198.
- [10] Miao Y, Li J, Zheng X, *et al.* Field Investigation of Skid Resistance Degradation of Asphalt Pavement During Early Service[J]. International Journal of Pavement Research and Technology, 2016(994): 313-320.
- [11] JTG E42—2005, 公路工程集料试验规程[S].
- [12] JTG E20—2011, 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].
- [13] 张春晓, 何翔, 王武, 等. 用废旧轮胎橡胶粉改性石油沥青的试验研究[J]. 材料导报, 2012, 26(增刊1): 351-354; 369.
- [14] 王新宽. 橡胶沥青室内制作及性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2010.
- [15] 徐鸥明, 张鸿, 曹志飞, 等. 经济型低胶粉掺量橡胶沥青混合料路用性能研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 52-56.

(上接第261页)

参考文献:

- [1] 唐幸. 加快推进交通领域节能降碳助力美丽中国建设和“双碳”目标顺利实现[J]. 中国经贸导刊, 2024(13): 66-68.
- [2] 华北电力大学. 基于层次分析模型的自动同调识别方法: 中国, 201110328530.5[P]. 2014-10-08.
- [3] 张孝存, 王凤来. 建筑工程碳排放计量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [4] GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准[S].
- [5] 彭琪. 大型洪涝灾害下应急物资需求预测和分配问题研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [6] 郑权明. 浅谈群决策层次分析法[J]. 中国设备工程, 2019(8): 215-217.
- [7] 朱茵, 孟志勇, 阚叔愚. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122.
- [8] 谢明逸, 凌宏伟. 基于层次分析法的非机动车道安全性评价[J]. 城市道桥与防洪, 2023(9): 122-125.
- [9] 张文文, 孙小康. 基于AHP的机场安检现场管理人员胜任力评价研究[J]. 民航学报, 2024(3): 144-147.
- [10] 孙舒月. 政策工具视角下中国知识产权政策量化研究—基于NVivo的政策文本分析[J]. 图书情报导刊, 2023(6): 70-78.
- [11] 武汉御风智行科技有限公司. 一种自动驾驶车辆线控制动效力判断方法及装置: 中国, CN202410008771.9[P]. 2024-01-03.
- [12] 朱茵, 孟志勇. 用层次分析法计算权重[J]. 北方交通大学学报, 1999, 23(5): 119-122.
- [13] 蒋旭东, 王丹, 杨庆等. 碳排放核算方法学[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2021.
- [14] 卢建光. 浅析路面大中修工程碳排放和碳减排措施[J]. 城市道桥与防洪, 2024(10): 182-186.
- [15] 卢建光, 庞晓明, 凌宏伟. 自修复路面沥青面层碳排放计算研究[J]. 上海公路, 2024(1): 5-8; 23.
- [16] 苏征宇, 张帆, 韦逸清, 等. 公路隧道建设碳排放量化分析计算及数字化[J]. 现代隧道技术, 2022(增刊1): 115-120.
- [17] 夏旭勇, 李书阳, 等. 建筑碳排放设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
- [18] 刘宏波. 基于LCA的公路路面建设碳排放量测算探究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2024, 39(1): 10-15.
- [19] 凌宏伟, 郑晓光, 闫国杰, 等. OGFC生产过程碳排放计算和碳减排技术研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(1): 19-22.
- [20] 王成武, 马振东. 建设工程施工碳排放定额估算方法及应用展望[J]. 建筑经济, 2016, 37(4): 59-61.