

基于均衡调控的路用基础吸能材料制备及性能优化

陈谦 王朝辉 胡学亮 郭春辉 刘方洲

Preparation and property optimization of road basic energy-absorbing materials based on balanced control

CHEN Qian, WANG Chaohui, HU Xueliang, GUO Chunhui, LIU Fangzhou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210929.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三元层状陶瓷 Ti_3AlC_2 /超高分子量聚乙烯复合材料的制备及性能

Preparation and performances of ternary layered ceramic Ti_3AlC_2 /ultrahigh molecular weight polyethylene composites

复合材料学报. 2017, 34(6): 1177–1184 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160907.004>

SiC-超高分子量聚乙烯仿生柔性叠层结构防弹性能关键影响因素的仿真与试验

Simulation and experiment of key influencing factors on ballistic performance of SiC-ultra-high molecular weight polyethylene biomimetic flexible laminated structure

复合材料学报. 2020, 37(11): 2928–2940 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200222.001>

加工芳纶纳米纤维/聚乙烯醇水凝胶制备高强度复合薄膜

Processing aramid nanofiber/poly(vinyl alcohol) hydrogel into high-strength composite films

复合材料学报. 2021, 38(12): 4005–4014 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210713.004>

超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纤维表面处理对UHMWPE/环氧树脂复合材料界面性能的影响机制

Influence mechanism of ultra high molecular weight polyethylene(UHMWPE) fiber surface modification on interfacial performance of UHMWPE/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(3): 573–580 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190705.001>

功能化六方BN纳米片/聚乙烯醇复合材料的制备及力学性能

Preparation and mechanical properties of functionalized BN nanoflakes/polyvinyl alcohol composites

复合材料学报. 2018, 35(5): 1073–1079 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170713.004>

聚乙二醇改性纳米纤维素/聚乙烯醇复合水凝胶的制备及性能

Preparation and properties of polyethylene glycol-modified cellulose nanofibers/polyvinyl alcohol composite hydrogel

复合材料学报. 2017, 34(4): 708–713 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160819.001>

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210929.002

基于均衡调控的路用基础吸能材料
制备及性能优化



分享本文

陈谦¹, 王朝辉^{*1}, 胡学亮², 郭春辉², 刘方洲²

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 山东高速集团有限公司, 济南 250098)

摘要: 为进一步开拓吸能材料在道路领域的全新应用, 调控制备了兼具优异力学性能与吸能缓力特性的新型路用吸能材料, 确定了材料适宜养生时间, 明确了不同类型路用吸能材料的力学性能、吸能特性与缓力功效, 在此基础上, 建立了基于多指标决策的路用吸能材料综合性能评价体系, 采用 II 型弹性体聚合物 (EP-II) 作为基础吸能材料, 推荐了路用吸能材料组成配比最佳方案, 为吸能材料在道路工程中的进一步推广应用奠定坚实基础。结果表明: 聚乙烯醇 (PVA) 纤维与超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 微粉均能有效改善 II 型弹性体聚合物材料的力学性能与吸能特性, 但后者效果更佳; 两者能够协同增强基础吸能材料的各项性能, 对于拉伸、撕裂、吸能等性能分别提升 127.4%~129.11%、34.04% 与 101.65%; 综合考虑工作性能及经济效益, 推荐路用吸能材料最佳配方为: 1.0wt%PVA-3wt%UHMWPE/EP-II, 其相应各项工作性能指标为: 拉伸强度 14.29 MPa、断裂伸长率 703.36%、撕裂强度 79.27 N/mm、吸收转化能量 1.73 J、最小缓冲系数 10.21。

关键词: 道路材料; 吸能材料; 缓冲性能; 力学性能; 吸收能量; 聚乙烯醇; 超高分子量聚乙烯

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2022)07-3356-13

Preparation and property optimization of road basic energy-absorbing
materials based on balanced control

CHEN Qian¹, WANG Chaohui^{*1}, HU Xueliang², GUO Chunhui², LIU Fangzhou²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Shandong Hi-Speed Group CO. LTD., Ji'nan 250101, China)

Abstract: The purpose is to further develop the new application of energy-absorbing materials in the field of road. A new type of road energy-absorbing material with excellent mechanical properties, energy absorbing property and cushion property was prepared. The suitable curing time was determined. The mechanical properties, energy absorption characteristics and cushion effect of different types of road energy-absorbing materials were clarified. On this basis, the comprehensive property evaluation system of road energy-absorbing materials based on multi index decision-making was established. Type II elastomeric polymer (EP-II) was used as the basic energy-absorbing material. The optimum scheme of composition ratio of road energy-absorbing materials was recommended. It lays a solid foundation for the further popularization and application of energy-absorbing materials in road engineering. The results show that both polyvinyl alcohol (PVA) fiber and ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) micropowder can effectively improve the mechanical properties and energy absorption properties of Type II elastomeric polymer, but the effect of the latter is more significant; Both of them can enhance the performance of basic energy absorbing materials. The tensile properties, tearing properties and energy absorption properties are improved by 127.4%-129.11%, 34.04% and 101.65% respectively; Considering the working properties and economic be-

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-09-13; 录用日期: 2021-09-22; 网络首发时间: 2021-09-30 11:38:17

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210929.002>

基金项目: 陕西省重点研发计划项目 (2021GY-206); 山东高速集团养护科技项目 (QLTD-2019-A-FW-0059); 中央高校基本科研业务费专项资金 (300102219314; 300102219701)

通信作者: 王朝辉, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为功能性道路材料 E-mail: wchh0205@chd.edu.cn

引用格式: 陈谦, 王朝辉, 胡学亮, 等. 基于均衡调控的路用基础吸能材料制备及性能优化 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3356-3368.

CHEN Qian, WANG Chaohui, HU Xueliang, et al. Preparation and property optimization of road basic energy-absorbing materials based on balanced control[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3356-3368(in Chinese).

enefits, the optimum scheme of the recommended road energy-absorbing material is 1.0wt% PVA-3wt% UHMWPE/EP-II. The corresponding working property indicators are: tensile strength 14.29 MPa, elongation at break 703.36%, tear strength 79.27 N/mm, absorbed conversion energy 1.73 J, and the minimum buffer factor 10.21.

Keywords: road materials; energy-absorbing materials; cushion property; mechanical property; absorbed energy; polyvinyl alcohol; ultra high molecular weight polyethylene

截止 2020 年末,我国公路养护里程占公路总里程 98% 以上,养护任务迫切而繁重^[1]。现阶段,道路养护技术中的预防性养护封层主要改善路表功能^[2],而对道路结构承载力的贡献极为有限。如何突破道路养护材料固有研发思路,研发新型高性能预防性养护封层材料,缓解行车荷载作用下路面结构应力,是值得深思与探索的技术难题。

目前,国内外关于较大幅度提升道路结构承载力的预防性养护封层技术相关研究鲜有涉及,与之相近的则主要以封层加纤技术、黏结材料增韧技术为主^[3-4]。前者将化工纤维添加到预防性养护封层中^[5-7],一定程度上提高路面抗裂性,主要改善原有路面表面状况,并未涉及结构承载力提升;后者能够适当提高路面结构的耐冲击性能和抗裂性能^[8-12],虽然能够提升预防性养护封层的力学性能,但在研究与应用过程中,由于材料适配相容性不足、填充优化程度不完善等问题,仍未达到大幅度改善道路结构承载力的要求。

而与此同时,近年来,吸能材料由于其良好的缓冲效果,具有极大潜力成为突破性的新型高性能养护材料^[13-15]。目前,吸能材料已成功应用于土建工程领域。土建工程往往采用属于脆性材料的混凝土结构,在爆炸恐怖或碰撞事故等冲击荷载作用下极易出现断裂破坏^[16],国内外研究学者采用不同形式增加了土建结构的韧性,Libonati 等^[17]将仿骨结构应用于纤维增强复合材料,使其断裂韧性优于传统金属、合金建筑材料;Zhang 等^[18]研发了聚氨酯泡沫铝/混凝土复合结构,其能量吸收能力明显高于泡沫铝;梁龙强等^[19]制备了用于抑制结构振动的聚氨酯-橡胶隔离复合阻尼材料,其振动响应峰值可降低 13%~62%;陈艺顺等^[20]研究了蒸压加气混凝土在冲击载荷下的动态力学性能。综上,目前吸能材料在土建领域得到了成功应用,但在道路领域却鲜有报道,路用吸能材料的可控合成、性能优化提升体系均未被系统研究与合理构建,高性能路用吸能材料亟待研发。

基于此,重点考虑吸能缓力效果、环境适应性及经济性等方面因素,优选适用于道路工程领

域的基础吸能材料,并通过向其中引入新型化工纤维、高分子材料等特种高性能材料,对基础吸能材料弹性体聚合物(EP)进行聚乙烯醇(PVA)/超高分子量聚乙烯(UHMWPE)复合优化与功能化改性,平稳均衡提升材料的关键吸能缓力效果及其他工作性能,并建立路用吸能材料综合性能评价体系,推荐路用吸能材料组成配比最佳方案,为吸能材料在道路工程中的进一步推广应用奠定坚实基础。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

基于能量耗散、增韧加柔等工作机制及原理^[21-22],优选弹性体聚合物(EP)作为基础吸能材料,其是一种由异氰酸酯与氨基化合物反应合成的嵌段共聚物,分子链由软硬链段交替组成,硬链段由于彼此间的氢键和 $\pi-\pi$ 堆积作用而自组装成纳米尺硬相,被软链段组成的软相包围。室温下,硬相处于玻璃态,软相处于橡胶态,这种特殊的软硬结合和非均质微观结构,使弹性体聚合物既具有一定刚度和抵抗变形能力(硬相提供),又具有较高韧性和能量耗散作用(软相提供,主要靠内摩擦耗能)。为突出吸能效果,选用三种软段含量较多的弹性体聚合物,技术参数见表 1。

弹性体聚合物由 A、B 两组分按照 1:1 比例混合后反应生成,其中,A 组分与空气中一定成分反应结晶,材料制备时须密封,操作较严谨,不适宜向其中添加改性物质。因此,选择在 B 组分中掺入高强高弹纤维,进一步增加弹性体聚合物的韧性。优选纤维为聚乙烯醇(PVA)纤维^[23-24],是以聚乙烯醇为原料经纺丝制得的合成纤维,主要特点是强度与模量高、分散性好、耐酸碱性强、长时间日照下强度损失率较低,技术参数见表 2。此外,在 B 组分中掺加具有高分子量的聚合物微粉,将进一步增加弹性体聚合物的模量与抵抗变形能力。优选微粉为超高分子量聚乙烯(UHMWPE)微粉,属于聚烯烃类物质^[25-26],主要特点是模量、强度较高、化学性质稳定、抗老化性强,技术参数见表 3。

表 1 弹性体聚合物 (EP) 技术参数
Table 1 Technical parameters of elastomer polymer (EP)

Project	EP- I	EP- II	EP- III
Solid content/%	100	100	100
Density/(g·cm ⁻³)	1.02	1.02	1.02
Gel time/s	20-25	15-20	10-15
Surface drying time/s	40-45	30-35	30-35
Low temperature bending property/℃	-35	-35	-35
Impact resistance/(kg·m)	1.0	1.0	1.0
Water permeability(0.4 MPa, 2 h)	Impervious	Impervious	Impervious
Hardness(Shore A)	90-95	85-90	85-90
Wear resistance(750 g/500 r)/mg	13.0	5.0	5.2

表 2 聚乙烯醇 (PVA) 纤维技术参数
Table 2 Technical parameters of polyvinyl alcohol (PVA) fiber

Project	Technical parameter
Diameter/m	17
Length/mm	6
Aspect ratio	35.29
Density/(g·cm ⁻³)	1.3
Flash point/℃	79
Melting point/℃	230-240
Elastic modulus/GPa	35
Tensile strength/MPa	1 600
Elongation at break/%	7

表 3 超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 微粉技术参数
Table 3 Technical parameters of ultra high molecular weight polyethylene (UHMWPE) micropowder

Density/(g·cm ⁻³)	Granularity/m	Melting point/℃	Molecular mass	Heat distortion temperature/℃
0.920-0.964	125	130-136	(2-3)×10 ⁶	80

1.2 制备方法

弹性体聚合物采用高压加热的专用喷涂设备进行施工作业，其固化速度极快，胶凝时间仅 20 s 左右，对于环境的依赖性低，几乎可忽略。路用吸能材料 (PVA-UHMWPE/EP) 制备流程分为改性材料添加与双组分聚合物合成两个部分。

(1) 改性材料添加：①添加高强高弹纤维：将适量乙醇作为分散介质倒入超声分散机，再将高强高弹纤维置于其中；启动机器，超声处理 10 min，使纤维均匀分散于介质中，可避免纤维成团而造成后期吸能材料难以迅速固化的问题；纤维过筛，干燥；取适量表面活性剂 (硅烷偶联剂 KH550) 置于烧杯中，向其中加入干燥分散的高强高弹纤维，浸泡 3 min；取出过筛，制得改性纤维，干燥备用；②添加高分子量微粉：将适量弹性体聚合物 B 组分倒入超声分散机，再将一定比例高分子量微粉置于其中；高速搅拌机转子插入溶剂中，速率设

定为 300 r/min；同时启动超声分散机和高速搅拌机，超声处理 3 min，使微粉均匀分散于介质中，制得微粉改性 B 组分。

(2) 双组分聚合物合成：将一定质量的弹性体聚合物 A、B 组分材料，按照质量比 1 : 1，分别倒入设备储料罐中，设定喷涂量及速率，启动机器，双组分材料均匀雾化混合，合成弹性体聚合物；根据喷涂量，设定喷涂层数为 2~3；第一层弹性体聚合物喷涂完成后，将干燥均匀的改性纤维撒在喷涂层上；再喷涂一层弹性体聚合物，使得聚合物与纤维形成夹心结构；适宜条件下养生一段时间，制得路用吸能材料。

1.3 试验方法

试验方法主要包括强度、韧性、能量耗散、缓力功效等方面 (试验重复 3 次)，具体如下：

(1) 拉伸试验：参考 GBT 2567—2008^[27]，采用拉伸强度、断裂伸长率表征材料拉伸性能。试件

为哑铃型，尺寸同规范，置于万能材料试验机上进行测试，试验速度为 10 mm/min。测试时，沿试件轴向匀速施加静态拉伸载荷直到试件断裂，计算拉伸强度与断裂伸长率。

(2) 撕裂试验：参考 GB/T 529—2008^[28]，采用撕裂强度表征材料撕裂性能。试样为直角形，尺寸同规范，置于万能材料试验机上进行测试，试验速度为 500 mm/min。测试时，将试样沿轴向拉伸方向对称夹入，计算撕裂强度。

(3) 摆锤冲击试验：参考 ISO 179-1—2010^[29]，采用试件被推移或者冲断时所消耗能量来表征材料吸能特性。试件为长方体，尺寸同规范，置于摆锤式冲击试验机上，测试试件发生变形、推移以及破坏断裂时消耗的能量，记为吸收能量，并计算冲击强度。

(4) 静态压缩试验：参考 GB/T 8168—2008^[30]中方法 A，采用静态缓冲系数曲线与最小缓冲系数表征材料缓力功效^[31]。试件为长方体，尺寸为 5 cm×5 cm×2.5 cm，置于万能材料试验机上进行测试，试验速度为 12 mm/min。测试时，压板延试件厚度方向逐渐增荷，荷载急剧增加时停止试验，输出应力-应变 (σ - ϵ) 曲线，并基于此计算材料静态缓冲系数，拟合绘制静态缓冲系数-最大应力 (C - σ_m) 曲线。

2 结果与讨论

2.1 养生时间确定

一般情况下，双组分树脂需要 7 天养生才能形成强度、发挥出应有功效^[32]，但这是建立在材料固化时间较慢的基础上 (4~8 h)。弹性体聚合物胶凝快，固化时间短，其养生未必需要较长时间。此外，3 种基础吸能材料为同一类材料，性能变化趋势一致。因此，综合考虑材料成本和性能，选择 II 型弹性体聚合物 (EP-II)，基于拉伸、撕裂、冲击等核心性能试验，分析不同养生时间下 EP-II 性能变化情况，从而确定其适宜养生时间，结果见图 1。其中，养生时间间隔初始设定为 6 h。可知，养生 6 h 后，EP-II 各项指标数值均极低，未达到预估理想值，初步确定弹性体聚合物的养生时间与其胶凝时间并不一致，各项性能无法在较短时间内完全成熟，因此，动态调整养生时间间隔，将养生时间扩大至 1 天、3 天、7 天和 15 天。随着养生时间增加，材料各项性能稳步上升，强度、韧性、吸能特性均逐渐形成与发展。

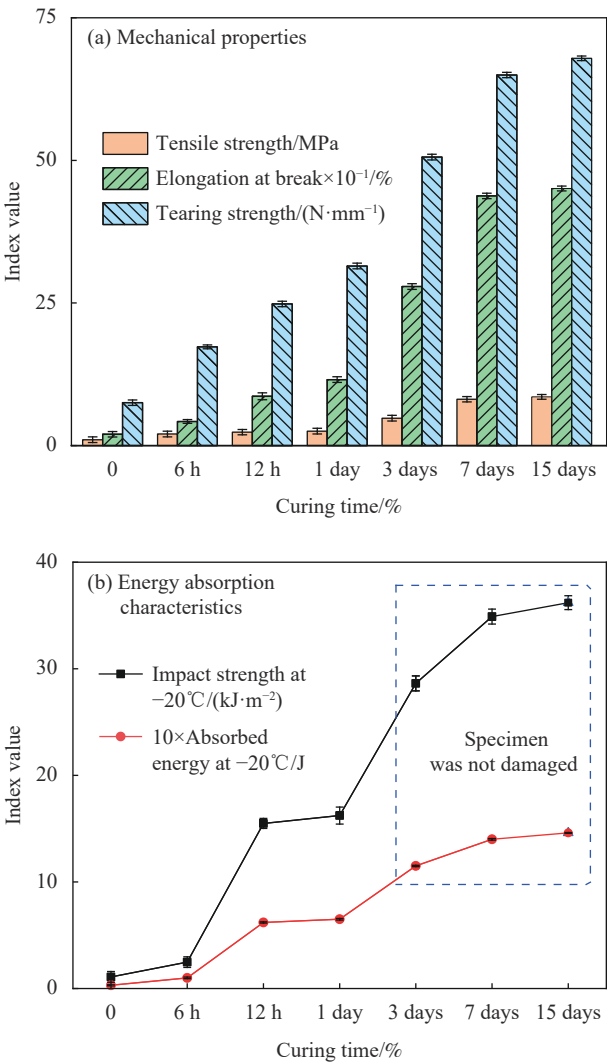


图 1 不同养生时间下 EP-II 的工作性能

Fig. 1 Working properties of EP-II at different curing time

关于力学性能方面，养生 3 天后，EP-II 的拉伸强度 4.80 MPa、断裂伸长率 278.85%、撕裂强度 50.58 N/mm，各项指标基本达到环氧树脂等常见树脂的技术要求；养生 7 天后，韧性优于普通树脂，断裂伸长率超过 400%。此外，以断裂伸长率为例，按照“(现阶段数值-上阶段数值)/间隔时间”的方式，计算 EP-II 在不同养生阶段的性能增长速度。养生 0~24 h、1~3 天、3~7 天、7~15 天时，增速分别为 115.66%/天、81.60%/天、39.72%/天和 1.63%/天，逐渐降低；撕裂强度和拉伸强度的变化趋势也基本一致。

关于吸能特性方面，随着养生时间增加，EP-II 材料试件发生变形或断裂时吸收的能量逐渐升高，而养生 0~24 h、1~3 天、3~7 天、7~15 天时，增速分别为 0.65 J/天、0.25 J/天、0.06 J/天和

0.007 J/天，逐渐降低，冲击强度亦然。但需要指明的是，普通树脂的试件在常温 25℃ 时即可被试验机冲击破坏断裂，而 EP-Ⅱ 材料试件是无法被冲击破坏的，因此将温度下调到 -20℃，增加试件脆性从而保证其被破坏。然而，养生 3 天后的 EP-Ⅱ 材料试件在低温条件下仍具有良好吸能特性与韧性，无法被试验机破坏。这一试验结果也直接表明 EP-Ⅱ 具有优异工作性能。

综上，EP-Ⅱ 在 15 天养生时间内，初期各项性能大幅度增长，后期增速放缓。养生 7 天后，材料各项指标数值均能达到养生 15 天时的 92%~95%，实现预期理想值，因此，推荐弹性体聚合物材料适宜养生时间为 7 天。

2.2 材料组成及配比调控优化

由吸能材料制备的道路养护吸能封层的最终目的是实现增韧缓力功效，因此，功能材料优选过程中的核心评价指标应主要涉及韧性、强度等力学性能及吸能缓力特性。采用“摆锤冲击试验+静态压缩试验”组合来评价材料的吸能缓力特性，并配合采用撕裂、拉伸试验评价材料强度及韧性，最终制备出具有优异性能的路用吸能材料。

2.2.1 弹性体聚合物优选

基于三种具有较高韧性和能量耗散作用的弹性体聚合物，对比分析其力学性能、吸能特性与缓力功效，优选出综合性能最佳的弹性体聚合物作为基础吸能材料。

(1) 弹性体聚合物力学性能

采用拉伸、撕裂试验，对比分析不同类型弹性体聚合物的力学性能，结果见图 2。可知，三种弹性体聚合物的力学性能基本处于一定范围内，除断裂伸长率外，其余两项指标的差异并不是非常显著。其中，关于断裂伸长率，EP-Ⅲ与 EP-Ⅱ 较高，均超过 300%，比 EP-Ⅰ 高出 44.26%；而关于拉伸强度与撕裂强度，均是 EP-Ⅲ 最高，超出其它型号 12.19%~17.69%。因此，重点考虑力学性能时，推荐 EP-Ⅲ。

(2) 弹性体聚合物吸能特性

采用摆锤冲击试验，对比分析不同类型弹性体聚合物的吸能特性，结果见图 3。可知，三种弹性体聚合物在面对冲击时，吸收转化的能量基本相同，均位于 0.8~0.9 J 范围，其中，EP-Ⅲ 的能量转化效果最佳，但差值较小，分别比 EP-Ⅰ 与

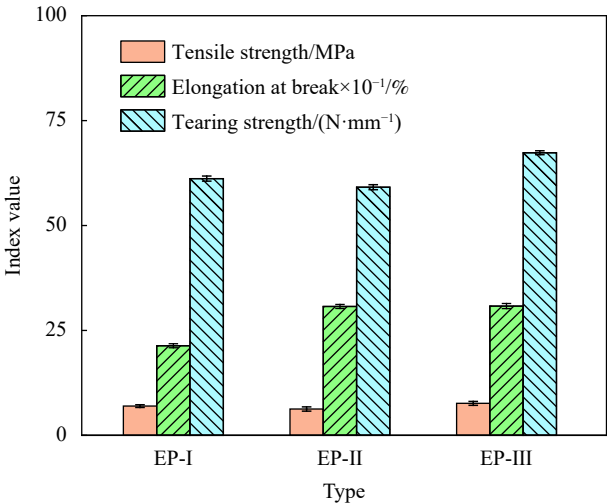


图 2 EP 的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of EP

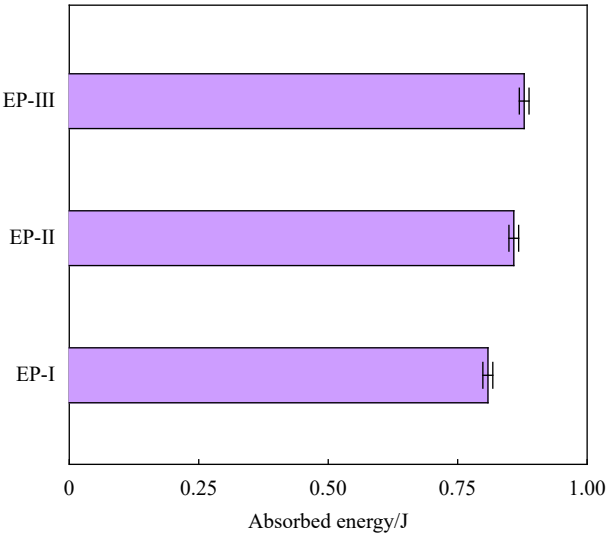


图 3 EP 的吸能特性

Fig. 3 Energy absorption characteristics of EP

EP-Ⅱ 高出 2.28%、7.97%。因此，重点考虑吸能特性时，推荐 EP-Ⅱ 与 EP-Ⅲ。

(3) 弹性体聚合物缓力功效

采用静态压缩试验，对比分析不同类型弹性体聚合物的 σ - ε 曲线与 C - σ_m 曲线，结果见图 4。可知，不同弹性体聚合物的 σ - ε 曲线与 C - σ_m 曲线的变化趋势基本一致。 σ - ε 曲线均逐渐增大，应力位于 0~29 MPa、应变位于 0~0.43。 C - σ_m 曲线先减小后平缓(为方便数据采集与对比分析，设定加载时的试验力阈值为 30 kN，下同)，其最小静态缓冲系数介于 9~10.5 间，其中，EP-Ⅲ 最低，为 9.1423，分别比 EP-Ⅰ 与 EP-Ⅱ 低 5.47%、10.26%。因此，重点考虑缓力功效时，EP-Ⅱ 与 EP-Ⅲ 均可

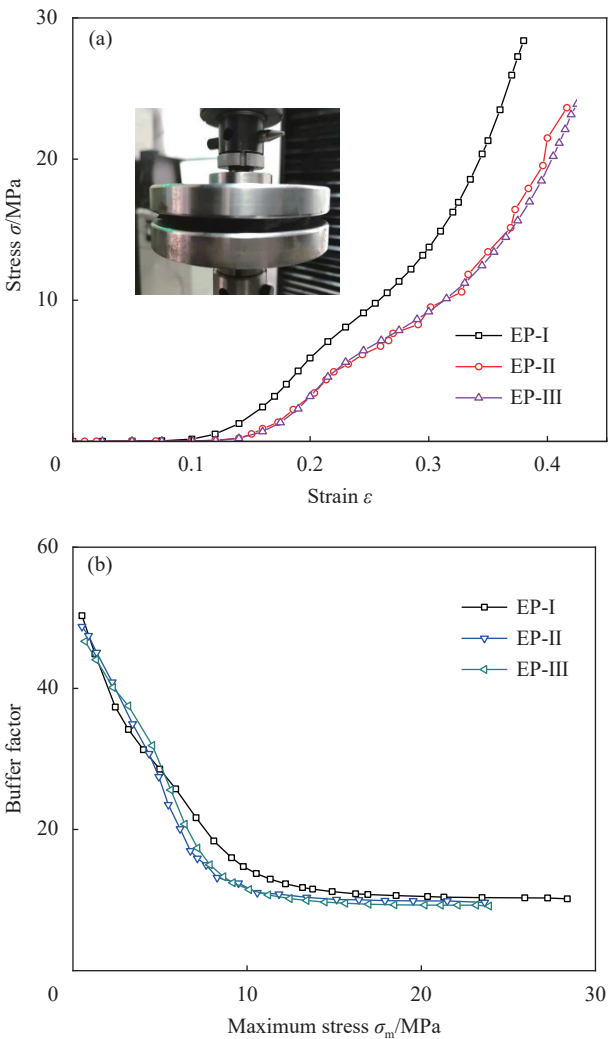


图 4 EP 的应力-应变 (σ - ϵ) 曲线 (a) 及静态缓冲系数-最大应力 (C - σ_m) 曲线 (b)

Fig. 4 Stress-strain (σ - ϵ) curves (a) and Static buffer coefficient - maximum stress (C - σ_m) curves (b) of EP

作为基础吸能材料的候选。

综上，EP-II 与 EP-III 的工作性能较优，EP-III 略突出，但考虑到 EP-II 材料的成本与普通环氧树脂材料基本一致，仅为 EP-III 材料的 40%~50%，因此，最终推荐采用 EP-II 作为基础吸能材料。

2.2.2 改性材料配比调控

基于优选的 EP-II，掺加 UHMWPE 微粉与 PVA 纤维等材料对其进行功能优化，制备 PVA 纤维/弹性体聚合物 (PVA/EP-II)、UHMWPE 微粉/弹性体聚合物 (UHMWPE/EP-II) 等高性能改性吸能材料，系统研究不同材料组成及配比方案的各项工作性能，确定最佳配方。其中，PVA 纤维与 UHMWPE 微粉的初步掺量分别设定为 1.5wt% 与 3wt%^[33-34]。

(1) 改性吸能材料力学性能

对比分析不同 PVA 纤维与 UHMWPE 微粉掺量下改性吸能材料的力学性能，结果见图 5。

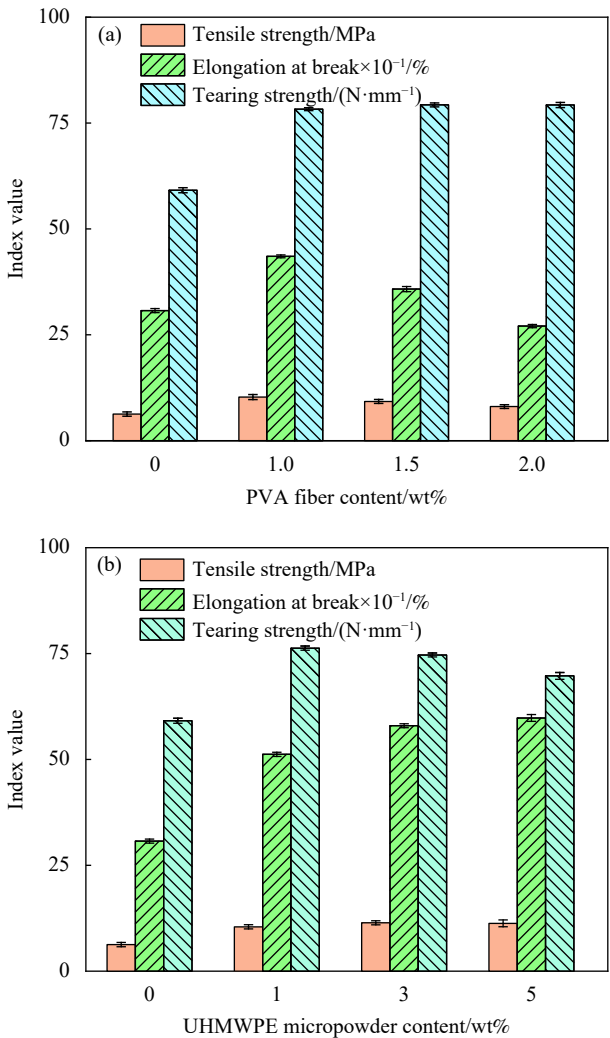


图 5 PVA/EP-II 与 UHMWPE/EP-II 的力学性能

Fig. 5 Mechanical properties of PVA/EP-II and UHMWPE/EP-II

由图 5(a) 可知，添加 PVA 纤维后，EP-II 的各项力学性能均得到明显改善，其中，拉伸强度、断裂伸长率与撕裂强度分别提升了 28.26%~63.86%、16.60%~41.75% 与 32.38%~34.07%。然而，各项性能指标的变化规律各异。关于拉伸性能方面，随着 PVA 纤维掺量提高，拉伸强度与断裂伸长率均呈现先增后降趋势；掺量为 1.0wt% 时，拉伸强度达到 10.29 MPa、断裂伸长率达到 435.24%，相比于其它两个掺量水平，超出 20% 以上；值得注意的是，PVA 纤维掺量增加到 2.0wt% 时，断裂伸长率出现了负增长 (-11.89%)。关于韧性方面，随着 PVA 纤维掺量增加，撕裂强度先增加后趋于平缓，

三个掺量水平下，撕裂强度值差异较小，仅1.27%。上述现象表明，PVA纤维被固化在EP-II中后，显著提升了其力学性能，这可能是因为PVA纤维与EP-II构成了良好的界面相，所以，当拉力作用在EP-II时，其通过界面直接传递至PVA纤维上；此时，PVA纤维优异的力学性能发挥作用，从而提升了EP-II整体性能。而掺量提高，材料性能下降，这可能是由于PVA纤维过多时分散不均匀、结团，试件出现鼓包，进而导致应力集中、试件破坏。

由图5(b)可知，与PVA纤维相比，UHMWPE微粉对于EP-II整体力学性能的提升幅度更大，效果更稳定。其中，断裂伸长率这一指标，UHMWPE微粉改善效果比PVA纤维高50%以上。添加UHMWPE微粉后，EP-II的拉伸强度、断裂伸长率与撕裂强度分别提升了66.73%~79.84%、66.79%~94.75%与17.92%~28.99%；随着UHMWPE微粉掺量逐渐提高，各项指标先增后平缓(或略微下降)。这一现象可能是由于UHMWPE微粉颗粒(分散相)细度较小，被均匀固化在了EP-II交联网络构成的连续相中，形成“海岛结构”，从而使EP-II的力学性能获得大幅度提升。

综上，重点考虑拉伸强度、断裂伸长率及撕裂强度等指标时，推荐PVA纤维适宜掺量为1.0wt%左右、UHMWPE微粉适宜掺量为3wt%~5wt%。

(2) 改性吸能材料吸能特性

对比分析不同PVA纤维与UHMWPE微粉掺量下改性吸能材料的吸能特性，结果见图6。可知，PVA纤维与UHMWPE微粉均能有效改善EP-II的吸能特性，且掺量越高，效果越显著，其中，PVA纤维对EP-II吸收转化能量的提升幅度为66.05%~81.42%，UHMWPE微粉则为67.37%~107.41%，比前者更高。由于吸能特性的改善原因与上述力学性能基本一致，因此不再赘述。此外，当PVA纤维掺量超过1.0wt%、UHMWPE微粉掺量超过3wt%时，两者改善效果均趋于平缓，增长幅度逐渐减小。综上，重点考虑吸收能量指标时，推荐PVA纤维适宜掺量为2.0wt%左右、UHMWPE微粉适宜掺量为3wt%~5wt%。

(3) 改性吸能材料缓力功效

对比分析不同PVA纤维与UHMWPE微粉掺量下改性吸能材料的 $C-\sigma_m$ 曲线与最小静态缓冲系数，结果见图7~8。可知，PVA/EP-II与UHMWPE/EP-II的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线与 $C-\sigma_m$ 曲线的变化趋势基本一

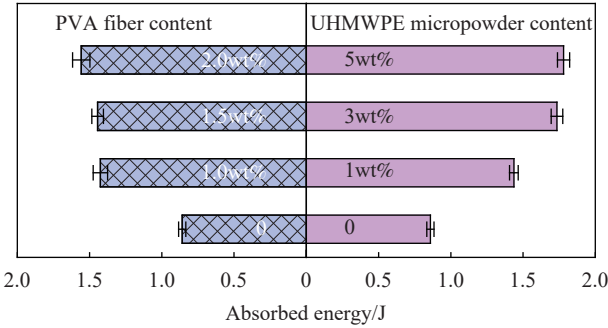


图6 PVA/EP-II与UHMWPE/EP-II的吸能特性
Fig. 6 Energy absorption characteristics of PVA/EP-II and UHMWPE/EP-II

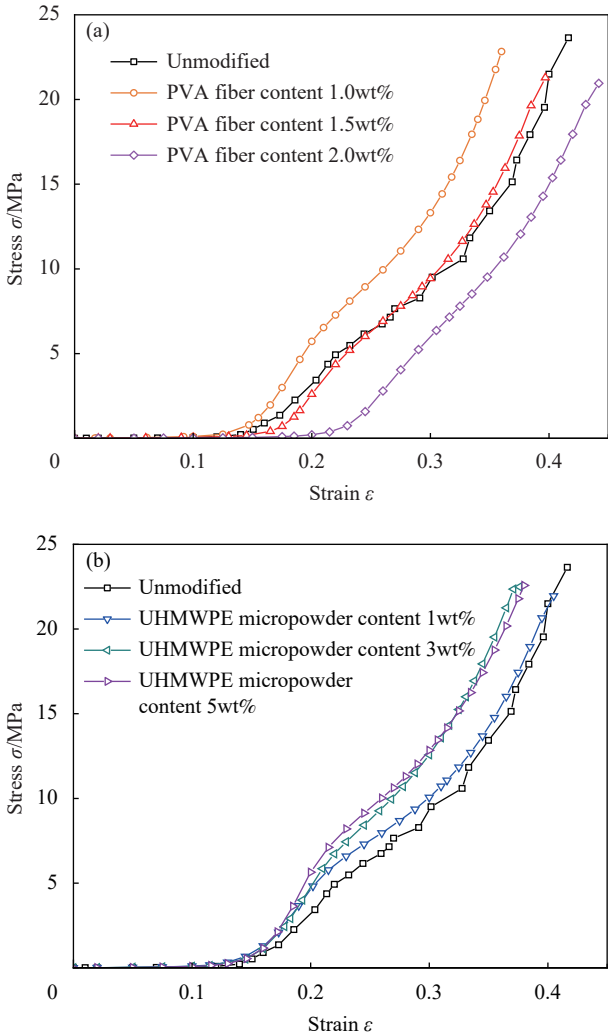


图7 PVA/EP-II与UHMWPE/EP-II的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线
Fig. 7 $\sigma-\varepsilon$ curves of PVA/EP-II and UHMWPE/EP-II

致。 $\sigma-\varepsilon$ 曲线均逐渐增大，应力位于0~25 MPa、应变位于0~0.45； $C-\sigma_m$ 曲线先逐渐减小、然后趋于平缓，其最小静态缓冲系数介于8~11间。

由图8可知，EP-II的最小缓冲系数为9.6718，

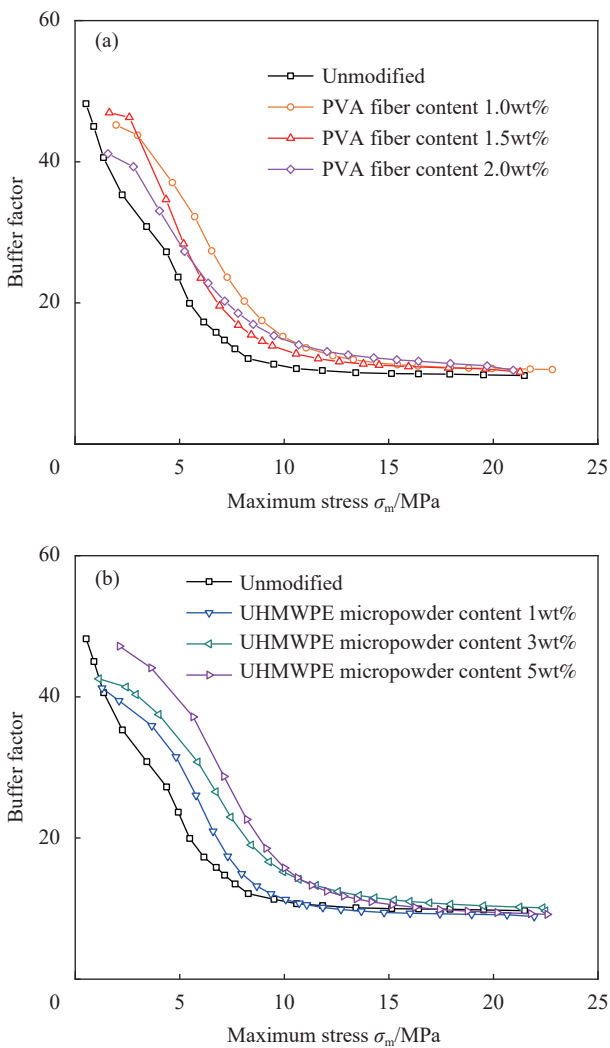


图8 PVA/EP-Ⅱ与UHMWPE/EP-Ⅱ的C-σ_m曲线
Fig. 8 C-σ_m curves of PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ

掺加 PVA 纤维后，最小缓冲系数小幅增加，幅度为 5.10%~8.41%；掺加 UHMWPE 微粉后，最小缓冲系数总体上降低了 5.41%~9.08%。上述现象表明，无论掺加 PVA 纤维还是 UHMWPE 微粉，对于 EP-Ⅱ 的缓力功效的影响程度均较小，但 UHMWPE

微粉起到了改善作用，PVA 纤维则呈现负面效应。这可能是是因为：EP-Ⅱ 自身较致密，添加体积较大的 PVA 纤维后，缓力体系受到了不利影响；而 UHMWPE 微粉则由于细度、体积较小，不仅不影响 EP-Ⅱ 的原有属性，还可凭借其高分子量的特点，进一步改善 EP-Ⅱ 的缓力体系及相应功效。
综上，重点考虑 C-σ_m 曲线与最小缓冲系数等指标时，推荐 PVA 纤维适宜掺量为 0、UHMWPE 微粉适宜掺量为 5wt% 左右。

2.3 工作性能综合评价

选取上述 5 项技术指标作为评价指标，建立基于功效系数法的综合评价体系^[35]，科学合理评价路用吸能材料工作性能，进一步优化并确定各类改性材料的适宜掺量。

(1) 数据采集及标准化处理

以基础吸能材料 (EP-Ⅱ) 作为方案 1、PVA 纤维掺量 1.0wt%~2.0wt% 的改性吸能材料依次作为方案 2~4、UHMWPE 微粉掺量 1wt%~5wt% 的改性吸能材料依次作为方案 5~7。基于此，采集上述 7 项材料配比方案的数据，见表 4。

确定评价指标满意值 (X_{hi}) 和不允许值 (X_{si})，满意值通常选择评价标准最优限值，不允许值通常选择评价标准最不利限值，见表 5。

(2) 单项功效系数计算

评价指标根据数据特点主要分为两种，其中，拉伸强度、断裂伸长率、撕裂强度、吸收能量为极大型变量，即随着数值增大，性能随之增强，呈正相关；最小静态缓冲系数为极小型变量，即随着数值减小，性能随之增强，呈负相关^[36-37]。根据下式，计算单项功效系数，结果见表 6。

$$d_{li} = \begin{cases} \frac{X_i - X_{si}}{X_{hi} - X_{si}} \times 0.4 + 0.6 & X_i \leq X_{hi} \\ 1 & X_i \geq X_{hi} \end{cases} \quad (1)$$

表 4 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ与UHMWPE/EP-Ⅱ的性能指标样本数据

Table 4 Sample data of performance index of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ						
No.	Material	Tensile strength/ MPa	Elongation at break/%	Tearing strength/ (N·mm ⁻¹)	Absorbed energy/J	Minimum buffer factor
1	EP-Ⅱ	6.281	307.04	59.14	0.8583	9.6718
2	1.0wt%PVA/EP-Ⅱ	10.292	435.24	78.28	1.4252	10.5601
3	1.5wt%PVA/EP-Ⅱ	9.257	358.00	79.29	1.4441	10.1920
4	2.0wt%PVA/EP-Ⅱ	8.056	270.54	79.26	1.5571	10.4637
5	1wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	10.472	512.10	76.28	1.4365	8.8668
6	3wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	11.422	579.67	74.67	1.7347	9.6755
7	5wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	11.296	597.96	69.73	1.7802	9.1756

表 5 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ与 UHMWPE/EP-Ⅱ 的评价指标标准化处理

Table 5 Standardization of evaluation index of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ

Evaluation index	Satisfaction value	Value not allowed	Average value
Tensile strength/MPa	11.422	6.281	9.582
Elongation at break/%	597.96	270.54	437.22
Tearing strength/(N·mm ⁻¹)	79.29	59.14	73.81
Absorbed energy/J	1.7802	0.8583	1.4623
Minimum buffer factor	8.8668	10.5601	9.8008

表 6 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ与 UHMWPE/EP-Ⅱ 的各项评价指标的单项功效系数

Table 6 Single efficacy coefficient of each evaluation index of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ

Evaluation index	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7
Materials	EP-Ⅱ	1.0wt% PVA/EP-Ⅱ	1.5wt% PVA/EP-Ⅱ	2.0wt% PVA/EP-Ⅱ	1wt%UHMWPE/ EP-Ⅱ	3wt%UHMWPE/ EP-Ⅱ	5wt%UHMWPE/ EP-Ⅱ
Tensile strength	0.6000	0.9121	0.8316	0.7381	0.9261	1.000	0.9902
Elongation at break	0.6446	0.8012	0.7068	0.6000	0.8951	0.9777	1.000
Tearing strength	0.6000	0.9800	1.000	0.9994	0.9402	0.9083	0.8102
Absorbed energy	0.6000	0.8460	0.8542	0.9032	0.8509	0.9803	1.000
Minimum buffer factor	0.8098	0.6000	0.6870	0.6228	1.000	0.8090	0.9271

$$d_{2i} = \begin{cases} \frac{X_i - X_{si}}{X_{hi} - X_{si}} \times 0.4 + 0.6 & X_i \geq X_{hi} \\ 1 & X_i \leq X_{hi} \end{cases} \quad (2)$$

其中： d_{1i} 为第*i*个极大型评价指标的单项功效系数； X_i 为第*i*个评价指标的实际值； X_{hi} 为第*i*个评价指标的满意值； X_{si} 为第*i*个评价指标的不允许值； d_{2i} 为第*i*个极小型评价指标的单项功效系数。

(3) 各项指标权重确定

单项功效系数确定后，根据各评价指标重要程度，采用变异系数法对各项指标进行赋权^[38]。根据下式计算各项评价指标权重，见表 7。

$$v_i = a_i / \bar{X}_i \quad (3)$$

$$\omega_i = v_i / \sum_1^n v_i \quad (4)$$

其中： v_i 为第*i*项评价指标变异系数； a_i 为第*i*项评价指标标准差； $\bar{X}_i$ 为第*i*项评价指标平均值； ω_i 为第*i*项评价指标权重； n 为评价指标个数。

(4) 总功效系数计算

根据下式计算方案总功效系数(见表 8)，对比评价不同类型路用吸能材料的综合工作性能。

$$D_i = \sum_1^n \omega_i d_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (5)$$

其中： D_i 为第*i*项技术方案的总功效系数； d_i 为第*i*个评价指标的单项功效系数。

由表 8 可知，不同方案总功效系数大小排序为：方案 7> 方案 6> 方案 5> 方案 2> 方案 3> 方

表 7 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ与 UHMWPE/EP-Ⅱ 的评价指标权重

Table 7 Weight of evaluation index of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ

Evaluation index	Weight
Tensile strength	0.2253
Elongation at break	0.3457
Tearing strength	0.1140
Absorbed energy	0.2395
Minimum buffer factor	0.0755

表 8 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ与 UHMWPE/EP-Ⅱ 的总功效系数

Table 8 Total efficiency coefficient of each scheme of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ and UHMWPE/EP-Ⅱ

No.	Materials	Total efficiency coefficient
No.1	EP-Ⅱ	0.6313
No.2	1.0wt%PVA/EP-Ⅱ	0.8421
No.3	1.5wt%PVA/EP-Ⅱ	0.8021
No.4	2.0wt%PVA/EP-Ⅱ	0.7510
No.5	1wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	0.9046
No.6	3wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	0.9627
No.7	5wt%UHMWPE/EP-Ⅱ	0.9706

案 4> 方案 1，根据决策结果，UHMWPE 微粉掺量为 5wt%、PVA 纤维掺量为 1.0wt% 时，路用吸能材料的综合工作性能最优，这一结果也与室内试验的测试结果相吻合。但考虑到 UHMWPE 微粉掺量分别设定为 3wt%、5wt% 时，两者的总功效系数仅相差 0.81%，即综合工作性能表现差异较小。因此，为进一步提高材料性价比优势、增强推广应用的可行性，将 UHMWPE 微粉掺量下

调，确定为 3wt%。综上，推荐改性材料的最佳掺量为：PAV 纤维 1.0wt%、UHMWPE 微粉 3wt%。

2.4 最佳方案验证与确定

基于 EP-Ⅱ、1.0wt% 掺量 PAV 纤维与 3wt% 掺量 UHMWPE 微粉，制备复合改性的路用吸能材

料(即 PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ)，测试其力学性能、吸能特性与缓力功效，并与方案 1(EP-Ⅱ)、方案 2(1.0wt%PVA/EP-Ⅱ)与方案 6(3wt%UHMWPE/EP-Ⅱ)及 E-51 水性环氧树脂[39] 进行对比，从而验证复合改性方案的合理性，结果见图 9~10。

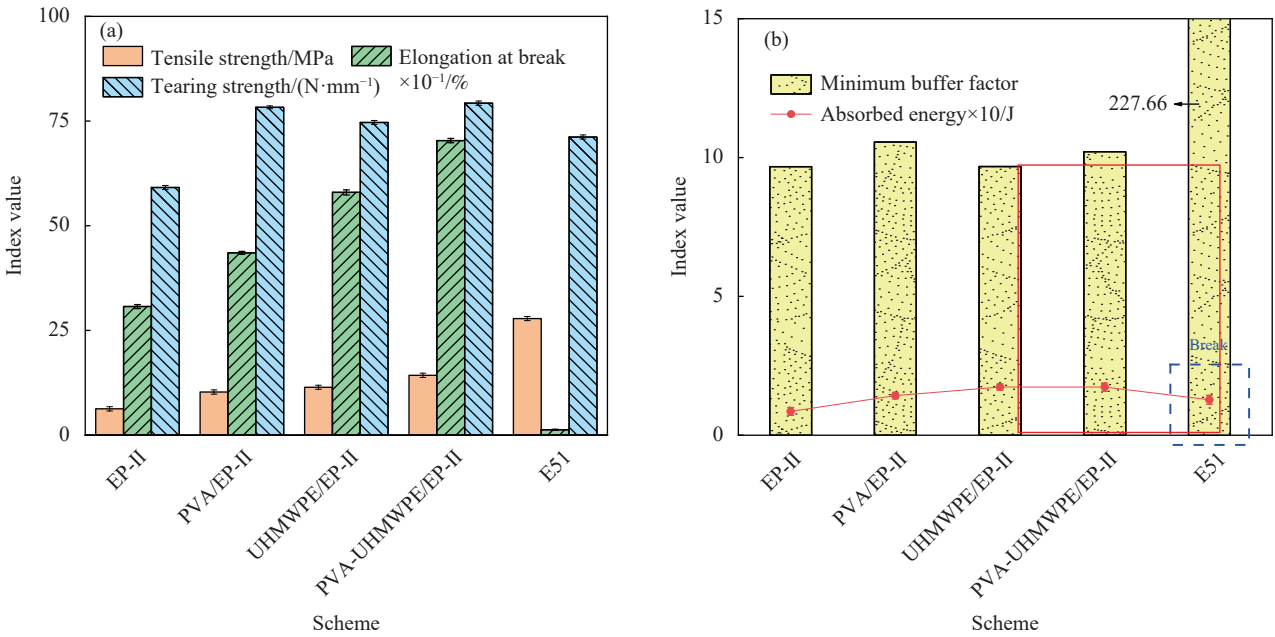


图9 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ、UHMWPE/EP-Ⅱ、PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ与E51的各项性能指标

Fig. 9 Various property indexes of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ, UHMWPE/EP-Ⅱ, PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ and E51

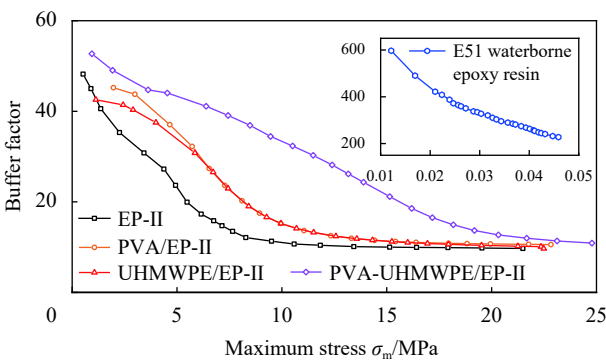


图10 EP-Ⅱ、PVA/EP-Ⅱ、UHMWPE/EP-Ⅱ、PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ与E51的C- σ_m 曲线

Fig. 10 C- σ_m curve of EP-Ⅱ, PVA/EP-Ⅱ, UHMWPE/EP-Ⅱ, PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ and E51

由图 9 可知，与 E51 水性环氧树脂相比，不同类型的路用吸能材料的拉伸强度均明显降低，而断裂伸长率显著提高，表明路用吸能材料的优势主要体现在韧性方面。

结合图 10 分析可知，E51 与不同方案制备的路用吸能材料相比，吸能特性差异较大，虽然吸

收能量均处于 1~2 J，但测试时，路用吸能材料试件无法被破坏(仅变形、推移)，采集的数据是变形吸收能量；E51 试件断裂，采集的数据是破坏吸收能量。同时，关于两者的缓力功效，E51 的最小缓冲系数是前者的 20 倍以上，表明水性环氧树脂抗冲击、变形追随性较差，基本不具备吸能缓力功效，而吸能材料则优势明显。

相比于 EP-Ⅱ，虽然 PVA-UHMWPE/EP-Ⅱ 的缓力功效并无明显改善，最小缓冲系数小幅增长了 5.29%(负面效应)，但是其拉伸强度、断裂伸长率、撕裂强度和吸收能量分别提升了 127.47%、129.11%、34.04% 和 101.65%，整体改善幅度超过 PVA/EP-Ⅱ、UHMWPE/EP-Ⅱ 等方案，这表明复合改性方案中的 PVA 纤维与 UHMWPE 微粉协同增强了基础吸能材料 EP-Ⅱ 的工作性能，尤其是力学性能，进一步验证了改性材料配方优选及多指标决策方法的科学性与合理性。

综上，重点考虑工作性能及经济效益，最终推荐路用吸能材料的最佳配方为：1.0wt%PVA-

3wt%UHMWPE/EP-II。

3 结论

(1) 路用吸能材料养生 3 天后, 各项力学指标基本达到环氧树脂养生 7 天的技术要求; 养生 7 天后, 断裂伸长率超过 400%; 且经过 -20℃ 低温脆化, 仍具有良好吸能特性与韧性。

(2) 聚乙烯醇(PVA)纤维与超高分子量聚乙烯(UHMWPE)微粉均能有效改善基础吸能材料的力学性能与吸能特性, 但后者效果更佳; 此外, 两者能够协同增强基础吸能材料的各项性能, 对于拉伸、撕裂、吸能等性能分别提升 127.4%~129.11%、34.04% 与 101.65%。

(3) 路用吸能材料最佳配方为: 1.0wt%PVA-3wt%UHMWPE/EP-II, 其工作性能为: 拉伸强度 14.29 MPa、断裂伸长率 703.36%、撕裂强度 79.27 N/mm、吸收转化能量 1.73 J、最小缓冲系数 10.21。

(4) 制备了路用吸能材料, 但尚未将其应用于预防性养护封层。下阶段, 将采用路用吸能材料制备道路吸能养护封层, 验证吸能材料在道路养护领域的可行性与适应性, 重点关注封层的抗滑、防水、黏结等路用性能及其耐久性能。

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.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research-2020[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(10): 1-66(in Chinese).
- [2] CUI P, WU S, XU H, et al. Silicone resin polymer used in preventive maintenance of asphalt mixture based on fog seal[J]. *Polymers*, 2019, 11: 1814.
- [3] 冯德成, 王东升, 易军艳, 等. 梯度功能复合路面设计原理与实现方法[J]. *科学通报*, 2020, 65(30): 3270-3286.
FENG Decheng, WANG Dongsheng, YI Junyan, et al. Designation principle and method for functionally graded composite pavement[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(30): 3270-3286(in Chinese).
- [4] 陈谦, 王朝辉, 傅豪, 等. 基于性能演变的水性环氧沥青开普封层施工方法优化[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(7): 236-245.
CHEN Qian, WANG Chaohui, FU Hao, et al. Optimization of construction method of waterborne epoxy asphalt cape seal based on performance evolution[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(7): 236-245(in Chinese).
- [5] KOKS E, ROZENBERG J, ZORN C, et al. A global multi-hazard risk analysis of road and railway infrastructure assets[J]. *Nature Communications*, 2019, 10: 2677.
- [6] LUO Y, ZHANG K, XIE X, et al. Performance evaluation and material optimization of micro-surfacing based on cracking and rutting resistance[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 193-200.
- [7] GU X, ZHANG X, LV J, et al. Laboratory performance evaluation of reinforced basalt fiber in sealing asphalt chips[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2018, 46(3): 1269-1279.
- [8] CAO C, MUKHERJEE S, HOWE J, et al. Nonlinear fracture toughness measurement and crack propagation resistance of functionalized graphene multilayers[J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaao7202.
- [9] MA L, ZHU Y, WANG M, et al. Enhancing interfacial strength of epoxy resin composites via evolving hyperbranched amino-terminated POSS on carbon fiber surface[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 51(170): 148-156.
- [10] CHIANG T, LIU H, TSAI L, et al. Improvement of the mechanical property and thermal stability of polypropylene/recycled rubber composite by chemical modification and physical blending[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10: 2432.
- [11] LIU Q, NIAN G, YANG C, et al. Bonding dissimilar polymer networks in various manufacturing processes[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 846.
- [12] ZAPICO G, OHTAKE N, AKASAKA H, et al. Epoxy toughening through high pressure and shear rate preprocessing[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 17343.
- [13] GHIDINI T. Materials for space exploration and settlement[J]. *Nature Materials*, 2018, 17: 846-850.
- [14] ZHOU Y, LIU Q, CHEN F, et al. Improving breakdown strength and energy storage efficiency of poly(vinylidene fluoride-co-chlorotrifluoroethylene) and polyurea blend films by double layer structure design[J]. *Polymer Testing*, 2020, 81: 106261.
- [15] 顾善群, 刘燕峰, 李军, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料高速冲击性能[J]. *材料工程*, 2019, 47(8): 110-117.
GU Shanqun, LIU Yanfeng, LI Jun, et al. High speed impact properties of carbon fiber/epoxy resin composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2019, 47(8): 110-117(in Chinese).
- [16] KWAN M, BRACCINI M, LANE M, et al. Frequency-tunable toughening in a polymer-metal-ceramic stack using an interfacial molecular nanolayer[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 5249.
- [17] LIBONATI F, VELLWOCK A, IELMINI F, et al. Bone-in-

- spired enhanced fracture toughness of de novo fiber reinforced composites[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 3142.
- [18] ZHANG Y, XUE Z, LIN Z, et al. Testing the explosion resistance and energy absorption of a polyurethane-foamed aluminum composite structure[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 2018: 4186943.
- [19] 梁龙强, 黄微波, 武迪, 等. 聚氨酯-橡胶复合阻尼材料减振优化设计[J]. *工程科学与技术*, 2020, 1: 184-190.
- LIANG Longqiang, HUANG WeiBo, WU Di, et al. Optimization design for vibration reduction of polyurethane-rubber composite damping material[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 1: 184-190(in Chinese).
- [20] 陈艺顺, 王波, 周健南, 等. 冲击载荷作用下蒸汽加气混凝土动态力学性能研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18): 201-206.
- CHEN Yishun, WANG Bo, ZHOU Jiannan, et al. Dynamic mechanical properties of AACs under impact loading[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18): 201-206(in Chinese).
- [21] LI H, ATTARD T, ZHOU H, et al. Integrating energy transferability into the connection-detail of coastal bridges using reinforced interfacial epoxy-polyurea reaction matrix composite[J]. *Composite Structures*, 2019, 216: 89-103.
- [22] 杨璐璐, 牛永平, 杜三明, 等. 增韧环氧树脂的研究进展[J]. *热固性树脂*, 2021, 36(1): 55-60.
- YANG Lulu, NIU Yongping, DU Sanming, et al. Review on toughening technology of epoxy resin[J]. *Thermosetting Resin*, 2021, 36(1): 55-60(in Chinese).
- [23] DEHGHANI A, ASLANI F. The synergistic effects of shape memory alloy, steel, and carbon fibres with polyvinyl alcohol fibres in hybrid strain-hardening cementitious composites[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 252: 119061.
- [24] SON M, KIM G, KIM H, et al. Effects of the strain rate and fiber blending ratio on the tensile behavior of hooked steel fiber and polyvinyl alcohol fiber hybrid reinforced cementitious composites[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103482.
- [25] CHRISTAKOPOULOS F, TROISI E, SOLOGUBENKO A, et al. Melting kinetics, ultra-drawability and micro-structure of nascent ultra-high molecular weight polyethylene powder[J]. *Polymer*, 2021, 222: 123633.
- [26] 张文阳, 吴正文, 王新威. 超高分子量聚乙烯树脂颗粒形态与结构性能的关系[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(12): 69-75.
- ZHANG Wenyang, WU Zhengwen, WANG Xinwei. Relationship between particle morphology and structure, properties of ultra-high molecular weight polyethylene resin[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2020, 36(12): 69-75(in Chinese).
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 树脂浇注体性能试验方法: GB/T 2567—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for properties of resin casting body: GB/T 2567—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [28] 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶撕裂强度的测定(裤形、直角形和新月形试样): GB/T 529—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tear strength (Trouser, angle and crescent test pieces): GB/T 529—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [29] ISO. Plastics—Determination of charpy impact properties—Part Non-instrumented impact test: ISO 179-1—2010[S]. London: British Standards Institution, 2010.
- [30] 中国国家标准化管理委员会. 包装用缓冲材料静态压缩试验方法: GB/T 8168—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Testing method of static compression for packaging cushioning materials: GB/T 8168—2008[S]. Beijing: China Standards Press, 2008(in Chinese).
- [31] JOHNSTON R, KAZANC Z. Analysis of additively manufactured (3D printed) dual-material auxetic structures under compression[J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101783.
- [32] CHEN Q, WANG S, WANG C, et al. Modified waterborne epoxy as a cold pavement binder: Preparation and long-term working properties[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(5): 04021079.
- [33] 谢磊, 李庆华, 徐世焱. 纤维掺量对聚乙烯醇纤维增强水泥基复合材料动态压缩性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2021, 38(9): 3094-3108.
- XIE Lei, LI Qinghua, XU Shilang. Effect of fiber content on dynamic compressive properties of polyvinyl alcohol fiber reinforced cement based composites[J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2021, 38(9): 3094-3108(in Chinese).
- [34] HAMED I G, SHAMAMI K, PAKENARI M. Effect of ultra-high-molecular-weight polyethylene on the performance characteristics of hot mix asphalt[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119729.
- [35] CHEN Q, WANG C, WEN P, et al. Comprehensive performance evaluation of low-carbon modified asphalt based on efficacy coefficient method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 633-644.
- [36] MA M, CHEN Q, WANG C, et al. High-performance organosilicon-refractory bauxite: Coating and fundamental properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 207:

563-571.

[37]

王济民, 蔡颖. 对功效系数法中标准值确定方法的研究[J]. [财务与会计](#), 2016, 12: 26-27.

WANG Jimin, CAI Ying. Study on the determination method of standard value in efficacy coefficient method[J]. [Finance and Accounting](#), 2016, 12: 26-27(in Chinese).

[38]

HU M, GUO N, WANG L. Preparation and assessment of paraffin/SiO₂ composite phase change material based on the efficacy coefficient method[J]. [Heat and Mass Transfer](#), 2020, 56(6): 1921-1929.

[39] 陈谦, 王朝辉, 傅豪, 等. 路用水性环氧树脂的拉伸强度预测和极值寻优[J]. 材料导报, 2021, 35(16): 16172-16177.

CHEN Qian, WANG Chaohui, FU Hao, et al. Prediction and extreme value optimization of tensile strength of waterborne epoxy resin for road[J]. [Materials Reports](#), 2021, 35(16): 16172-16177(in Chinese).