DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.07.029

废弃防水卷材资源化基本问题与发展路径研究

肖建庄[1,2*]，俞才华[1]，肖绪文[1]，丁陶[1]，张勇[3]

（1. 同济大学土木工程学院，上海 200092；2. 广西大学土木建筑工程学院，南宁 530004；
3. 中国建筑防水协会，北京 100831）

摘要：建筑固体废物（固废）资源化是建筑业高质量发展的必然要求，在“双碳”战略目标的驱动下进一步提升建筑固废资源化利用率迫在眉睫。废弃防水材料作为建筑固废的重要组成部分，其资源化研究基本处于空白状态。本文测算了2005—2021年我国防水材料总产量（2.983×10^{10} m^2）、防水卷材总产量（1.89×10^{10} m^2），形成了防水材料资源化的主体是防水卷材资源化的基本判断。应对国家绿色低碳发展形势，提出了针对防水卷材的减量化、重复利用、循环再生（3R）资源化路径，防水卷材“基因组”、多尺度/多场景分析、机器学习预测相结合的高性能防水卷材研发理念，明晰了以体系拆解为核心的防水卷材重复利用模式、以“分类”“分级”“分解”为关键构成的废弃防水卷材循环再生策略。应以再生防水卷材为主攻方向，推动全再生防水卷材、增材制造技术的深入研究和创新应用。面向防水卷材资源化未来发展，“原料–产品”“产品–工程”是亟待攻克的关键环节，需要管理部门、学术界、工业界共同努力。

关键词：废弃防水卷材；资源化利用；减量化；重复利用；循环再生；全再生防水卷材
中图分类号：TU318　　**文献标识码：**A

Fundamental Problems and Development Paths for Reclamation of Waste Waterproof Membranes

Xiao Jianzhuang[1,2*], Yu Caihua[1], Xiao Xuwen[1], Ding Tao[1], Zhang Yong[3]

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. China National Building Waterproof Association, Beijing 100831, China)

Abstract: The reclamation of construction solid wastes is crucial for the high-quality development of the construction industry and it is urgent to further improve the utilization rate of the construction solid wastes to achieve the carbon peaking and carbon neutralization goals. Waste waterproof materials are an important component of the construction solid wastes; however, research on the utilization of these materials is almost blank in China. As calculated in this study, the total output of waterproof materials in China was 2.983×10^{10} m^2 during 2005–2021 and that of waterproof membranes was 1.89×10^{10} m^2, indicating that waterproof membranes are the main body for waterproof material recycling. In response to the national green and low-carbon development situation, a utilization path for “reducing, reusing, and recycling” (3R) the waterproof membranes is proposed as well as a high-performance waterproof membrane research and development concept that combines waterproof membrane “genome”, multi-scale / multi-scenario analysis, and machine learning prediction. A waterproof membrane reuse mode with system disassembly as the core is clarified as well as a recycling strategy with classification, gradation, and deconstruction as the core. Moreover, the in-depth research and innovative application of fully recycled waterproof membranes and additive manufacturing technology should be promoted. The transformation

收稿日期：2023-04-21；**修回日期：**2023-06-02
通讯作者：*肖建庄，同济大学土木工程学院教授，研究方向为建筑固废资源化与再生混凝土基础理论；E-mail: jzx@tongji.edu.cn
资助项目：中国工程院咨询项目“绿色建造发展战略研究”(2022-XZ-21)，“建筑业数字化发展战略研究”(2022-XY-80)
本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

of recycled waterproof membranes to products and the engineering application of these products are major challenges to be addressed in the future, which requires joint efforts of the management departments, academia, and industry.
Keywords: waste waterproof membrane; resource utilization; reduce; reuse; recycle; fully recycled waterproof membrane

一、前言

建筑固体废物（固废）资源化是建筑全寿命周期的重要组成部分[1]。在过去十多年里，我国建筑固废总排量超过2×10^{10} t，较多采用的传统填埋处置方式浪费了大量土地资源且对环境造成不利影响[2]。因此，建筑固废资源化是建筑业高质量发展的必由之路。2020年我国正式提出“双碳”战略目标，对应的背景是我国CO_2排放量达到9.88×10^9 t（含建筑全寿命期CO_2排放量5.08×10^9 t）[3]。在“双碳”战略目标的驱动下，建筑业节能减排引起了全社会的关注，建筑固废资源化则是建筑业节能减排的重要方式。综合来看，建筑固废资源化受到建筑业高质量发展、“双碳”战略目标的双重驱动。

当前，我国建筑固废资源化利用率从不足10%快速提升到30%，但依然落后于2025年达到60%的规划目标，因而进一步提升建筑固废资源化利用率迫在眉睫。经过近20年研究，建筑固废主成分得到了较好的再生利用，如废弃混凝土用于再生骨料生产、再生混凝土制备[4]，废弃砖块制备再生骨料或者碾磨成再生砂或粉[5]，废弃渣土制成人造骨料、烧结陶粒、免烧砖、混凝土矿物掺合料等[6]。此外，金属废弃物可回收至冶炼生产线，废塑料可用于制备塑料颗粒[7]。然而，废弃防水材料作为建筑固废的重要组成部分，资源化研究基本处于空白状态，实际上成为制约建筑固废资源化效率提升的瓶颈环节之一。探讨和解决废弃防水材料资源化问题，不仅有助于提升建筑固废资源化利用率，还可支持“双碳”战略目标实现以及建筑业高质量发展。

从近期的文献检索结果来看，废弃防水材料资源化相关研究极少，仅有的个别研究尚处单点探索层面[8~10]。实现废弃防水材料资源化，首先需要厘清基本问题，即目前建筑防水材料的产量、资源化主体以及利用潜力；从筑牢创新应用基础条件的角度出发，亟待明确废弃防水材料资源化的发展路径。针对于此，本文开展包括防水材料产量、资源化潜力、减碳潜力在内的废弃防水材料资源化基本问题分析，构建作为废弃防水材料资源化主体的废弃防水卷材资源化发展路径并提出相应的主攻方向与发展建议，以期为建筑固废资源化研究提供启发和参考。

二、废弃防水材料资源化的基本问题

（一）废弃防水材料资源化的主体

我国现代建筑防水材料起源于20世纪40年代，前期主要以石油沥青纸胎油毡作为防水材料。在20世纪80年代之后，各种防水卷材开始大量应用于实际工程，最终形成了六大门类防水材料：聚合物改性沥青类防水卷材、高分子防水卷材、防水涂料、建筑密封材料、刚性防水材料、止水堵漏材料（见表1）[11]。目前，建筑防水材料朝着绿色、高性能、智能方向发展，尤其是在《建筑与市政工程防水通用规范》（GB 55030—2022）[12]颁布实施后，高分子防水卷材将成为未来的主流类型。本文主要讨论上述7种建筑防水材料（即石油沥青纸胎油毡、六大门类防水材料）的资源化潜力。

确定废弃防水材料资源化的主体，需综合考虑各种防水材料的成分、结构、产量等特征。防水涂料在拆除过程后呈粉末状，难以收集且纯化困难；建筑密封材料、止水堵漏材料产量很低，品种繁杂；刚性防水材料产量低，废弃后属于废混凝土或砂浆。可以初步判断，防水卷材、石油沥青纸胎油毡因其主体材料（如沥青、高分子材料、胎基）具有较成熟的资源化模式而具有良好的资源化潜力。

为进一步明确废弃防水材料资源化的主体，调研并梳理了各种建筑防水材料的产量。20世纪40年代至1995年，我国共生产石油沥青纸胎油毡1.212×10^{11} m^2 [13]。综合中国建筑防水协会的统计数据（见图1）[14~30]，2005—2021年共生产防水材料2.863×10^{10} m^2，其中防水卷材为1.89×10^{10} m^2（包括改性沥青防水卷材、高分子防水卷材、自粘防水卷材、沥青复合胎柔性防水卷材，占比为66.01%）、防水涂料为7.201×10^9 m^2（占比为25.15%）、玻璃纤维胎沥青瓦为3.86×10^8 m^2（占比为1.35%）、其他新型防水材料为1.526×10^9 m^2（占比为5.33%）。防水

表1　建筑防水材料的基本情况（不含止水堵漏材料）

防水材料类型		主要原料	主要性能	工作年限
聚合物改性沥青类防水卷材	热熔法施工聚合物改性沥青防水卷材	聚合物改性沥青涂盖料、填料，聚酯毡或玻璃纤维毡、高分子膜胎体等	耐久性、抗老化性能、抗拉强度、延伸性、尺寸稳定性、低温柔性、接缝剥离强度等	地下工程防水设计工作年限不低于工程结构设计工作年限（50年），屋面工程防水设计工作年限不低于20年，室内工程防水设计工作年限不低于25年，桥梁工程桥面防水设计工作年限不低于桥面铺装设计工作年限，非侵蚀性介质蓄水类工程内壁防水层设计工作年限不低于10年
	热沥青粘结和胶粘法施工聚合物改性沥青防水卷材			
	预铺反粘防水卷材（聚酯胎类）			
	自粘聚合物改性沥青防水卷材（含湿铺）（包括聚酯胎类、无胎类、高分子膜基）			
高分子防水卷材	均质型、带纤维背衬型、织物内增强型	树脂、填料、助剂等		
	双面复合型			
	预铺反粘防水卷材（含塑料类、橡胶类）			
	塑料防水板			
防水涂料	反应型高分子类防水涂料	高分子成膜剂和交联剂	固含量、力学性能、不透水性、耐水性与粘结强度、环保性能等	
	聚合物乳液类防水涂料	聚合物乳液、填料、分散剂、润湿剂、增稠剂等		
	水性聚合物沥青类防水涂料	乳化（改性）沥青、聚合物乳液、填料、助剂等		
	热熔施工橡胶沥青类防水涂料	石油沥青、聚合物改性剂、填料等		
建筑密封材料	丙烯酸酯建筑密封材料	丙烯酸酯类聚合物、填料、助剂等	流动性、弹性恢复率、拉伸模量、质量损失率等	
	聚氨酯建筑密封材料	聚氨酯树脂、填料、助剂等		
	聚硫建筑密封材料	聚硫橡胶、硫化剂、填料等		
	硅酮建筑密封胶	硅酮树脂、填料、助剂等		
刚性防水材料	防水砂浆	水泥、细骨料、防水剂（聚合物改性剂）、外加剂、水等	抗压、抗折、抗渗、抗裂和耐久性等	
	防水混凝土	水泥、骨料、外加剂、掺合料、水等		

卷材产量占比高于60%（早年甚至接近80%），说明防水卷材是主要的建筑防水材料、防水材料资源化的主体。

在防水卷材中，聚合物改性沥青类防水卷材、自粘防水卷材、高分子防水卷材、沥青复合胎柔性防水卷材的占比分别为44.96%、27.53%、19.76%、7.75%。可见，改性沥青类防水卷材的资源化是重中之重，自粘防水卷材、高分子类防水卷材次之，而沥青复合胎柔性防水卷材因产量过小可忽略不计。近年来，国家鼓励发展高性能、绿色防水材料，未来高分子防水卷材可能成为主流，因而高分子防水卷材的资源化值得关注。

（二）废弃防水卷材资源化的价值

1. 资源化潜力

废弃防水卷材作为建筑固废的重要组成部分，开展资源化研究能够进一步提升建筑固废的资源化利用水平。为了直观表述资源化潜力，测算了我国已生产防水卷材的总质量，测算依据为国家标准推荐的单位面积质量（见表2）。石油沥青纸胎油毡的总质量为9.696×10^{7}~1.818×10^{8} t，SBS/APP改性沥青防水卷材的总质量为2.805×10^{7}~5.1×10^{7} t；高分

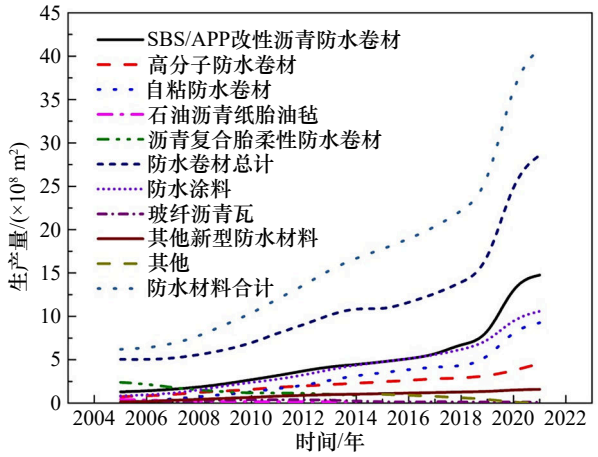

图1 我国各种防水材料生产量（2005—2021 年）

注：SBS 表示苯乙烯－丁二烯－苯乙烯三嵌段共聚物；APP 表示无规聚丙烯。

子防水卷材、自粘防水卷材因种类繁多且无细分种类，无法测算相应的总质量。然而，仅是石油沥青纸胎油毡、SBS/APP 改性沥青防水卷材的总质量即为 1.25×10^{8}~2.328×10^{8} t。

事实上，我国防水卷材存量可能明显大于上述测算值，因为直到 2013 年工业和信息化部才规定，新建聚合物改性沥青防水卷材单线产能规模不低于 1×10^{7} m^2/a，新建高分子防水卷材单线产能规模不低于 3×10^{6} m^2/a；在相当长的时间内建筑防水材料市场处于散乱发展状态，大量小型企业的产量数据未纳入统计。因此，废弃防水卷材存量较大，其资源化潜力突出。

2. 减碳潜力

虽然建筑防水材料并未进入中国建筑材料联合会的减碳重点行业目录（2022 年），但在石油产品价格高涨、环境效应日益凸显的背景下，防水卷材的节能减排问题已无法回避。目前有关防水卷材碳排放研究稀少，各类防水卷材的全球变暖潜值（GWP）并不明确，目前只能对我国防水卷材碳排放作简单估算。

聚合物改性沥青类防水卷材的 GWP 为 12.6 kg CO_2 eq/m^2（因文献稀少，此处测算不考虑各类改性沥青防水卷材的差异性）[31]；假设未来聚合物改性沥青防水卷材年产量为 2×10^{9} m^2，则相应的年 CO_2 排放量约为 2.52×10^{7} t。假设再生防水卷材可节约 10% 的 CO_2 排放量，未来再生防水卷材替代率达到 50%，则每年可降低 CO_2 排放量为 1.26×10^{6} t。

由于缺少相关 GWP 值，大量的石油沥青纸胎油毡、高分子防水卷材、自粘防水卷材等未纳入测算。可以认为，废弃防水卷材资源化可实际降低的 CO_2 排放将远大于上述测算值。

三、废弃防水卷材资源化的发展路径

从实际应用角度看，防水卷材约有 60% 用于地下工程防水、30% 用于屋面工程，导致废弃防水卷材不仅收集困难，往往和其他建筑固废、废弃沥青混合料、装修垃圾等混杂；尤其是装修垃圾成分复杂，含有纸片、塑料、模板以及其他与废弃防水卷材形态和性质接近的化工产品，加大了废弃防水卷材的分拣难度。现实情况表明，需要从多个维度构思防水卷材低碳发展路径。石油沥青纸胎油毡虽已退出新建工程应用，但历史用量巨大、在大量老旧建筑上存留，相应资源化也是防水材料循环再生的重要内容。石油沥青纸胎油毡不能等同于聚合物改性沥青防水卷材，但从资源化角度看两者因材料和

表2 建筑防水材料总产量和总质量的测算值

防水材料类型	总产量/m^2	单位面积质量/(kg·m^{-2})	标准	总质量/t
石油沥青纸胎油毡	1.212×10^{11}	0.8~1.5	GB 326—2007	9.696×10^{7}~1.818×10^{8}
SBS/APP 改性沥青防水卷材	8.5×10^{9}	3.3~6.0	GB 18242—2008、GB 18243—2008	2.805×10^{7}~5.1×10^{7}
高分子防水卷材	3.734×10^{9}	—	—	—
自粘防水卷材	5.202×10^{9}	—	—	—
沥青复合胎柔性防水卷材	1.464×10^{9}	—	—	—
防水涂料	7.201×10^{9}	—	—	—
玻璃纤维胎沥青瓦	3.86×10^{8}	—	—	—
其他类型防水材料	1.526×10^{9}	—	—	—

结构类似而可归为同类。

根据废弃防水卷材的特点，相应资源化可采取3R发展路径：减量化（Reduce）、重复利用（Reuse）、循环再生（Recycle）。防水卷材减量化是最重要的目标，即减少防水卷材的产量和用量，从根本上减少废弃防水卷材的产生；对于已经使用的防水卷材，宜尽可能进行重复利用，让防水卷材二次甚至多次使用；仅在无法重复利用时考虑循环再生，将废弃物转化为再生产品。

（一）减量化

防水卷材减量化是防水卷材资源化的起点和制高点，以控制防水卷材用量的方式达到减少废弃防水卷材存量的目标。防水卷材减量化的主要路径是提升混凝土结构的自防水性能、提升卷材防水层的长期性能：前者可直接减少防水卷材的使用量；后者可减少防水卷材的设防道数甚至延长使用寿命，从而间接减少防水卷材的使用量。本文主要讨论提升防水卷材的长期性能，重点关注防水卷材在复杂服役环境中的耐久性和抗病害能力。为此，需要深入了解防水卷材性能演变机制及其在外部环境中的劣化机理，发展相应的性能调控、靶向抗劣化等技术。然而，现有的防水卷材基础研究尚不完善（基本停留在卷材配比、生产工艺、添加剂等方面），微细观尺度层面的防水卷材研究很少；可借鉴复合材料、高分子材料领域的理论研究体系，开展防水卷材基础研究。此外，传统实验试错法成本较高，需要在理解防水卷材性能演变规律的基础上发展性能预测理论与技术，优先从理论上预测防水卷材在各种服役状态下的性能，支持高耐久性防水卷材配方和工艺筛选。

目前，有关防水卷材在应力、环境因素耦合作用下的性能演变机制研究还很少。已有研究分析了老化、风致病害、水致病害对防水卷材的影响，发现不同防水卷材的性能劣化机制不尽相同[32,33]。双层使用并不能提升卷材系统的抗风能力，隔热层厚度、防水层特性对测试模型的抵抗力没有显著影[34]。研究认为防水卷材水泡源自阳光长期照射造成的蒸汽压力积累[35,36]，而温度、水分、初始脱黏孔径都对防水卷材的破坏时间产生重大影响[37]。显然，防水卷材性能演变规律及调控机理不清，不同应力条件下防水卷材性能劣化机制不明，制约了高性能防水卷材研发。

材料基因是材料的基本单元，可以是原子、分子等不同尺度特征，决定了材料的性能和功能[38]。以聚合物改性沥青防水卷材为例，改性沥青基因包括沥青组分、微观结构等，胎基基因包括纤维形态、空间分布等。确定防水卷材基因组，有助于准确建立组成、结构、工艺、性能之间的定量关系[39]。在高性能防水卷材开发方面，应以材料基因组为切入点，以多尺度、多场景耦合方法为主线，以深度学习预测为实现手段。这是因为，防水卷材整体性能不仅体现在宏观单一尺度，而是原子、分子，微观、细观、宏观等多个尺度相互耦合的结果；相应耦合涉及物理、化学作用，外部应力、静电力、物理黏附、湿润作用、物理嵌锁、化学吸附等，不同尺度层面的关系也表现为尺度跨越的复杂耦合作用。

建立防水卷材基因–耐久性数据库需以防水卷材基础研究成果为前提，包括材料研发、配合比设计、添加剂机理与效应等。相关的多尺度设计方法有：原子尺度可采用密度泛函理论分析，分子尺度可采用分子动力学模拟，介观尺度可采用耗散粒子动力学模拟，微观尺度可采用原子力显微镜、扫描电镜、透射电镜、纳米压痕等，细观尺度可采用细观三维重构技术和有限元模拟，宏观尺度可采用各种性能测试。以大量实验结果来填充数据库，进而采用深度学习等方法预测防水卷材性能（见图2）。只要建立的数据库足够大，就可以获得精准的防水卷材性能预测结果，筛选出高性能防水卷材配方、添加剂种类等。同理，构建防水卷材性能劣化及病害数据库，采用深度学习方法针对性开发抗病害防水卷材，甚至能够根据服役地区不同的气候环境开发针对性的防水卷材类型。

在高性能防水卷材开发之外，防水卷材与基体之间的黏附性也是重点研究内容，这是因为防水卷材失效多表现为防水卷材与基体之间的界面黏结失效。目前已有一些相关研究，如关注了聚合物改性沥青防水卷材的动态黏弹性能表征问题，定义了松弛谱指数[40]；聚合物改性沥青有效提升了界面附着力和黏合力[41]；防水卷材–砂子界面摩擦角与法向压力无关，湿润砂子界面的剪切阻力高于干燥砂子[42]。但在防水卷材与基体黏附行为方面没有形成深刻理解。

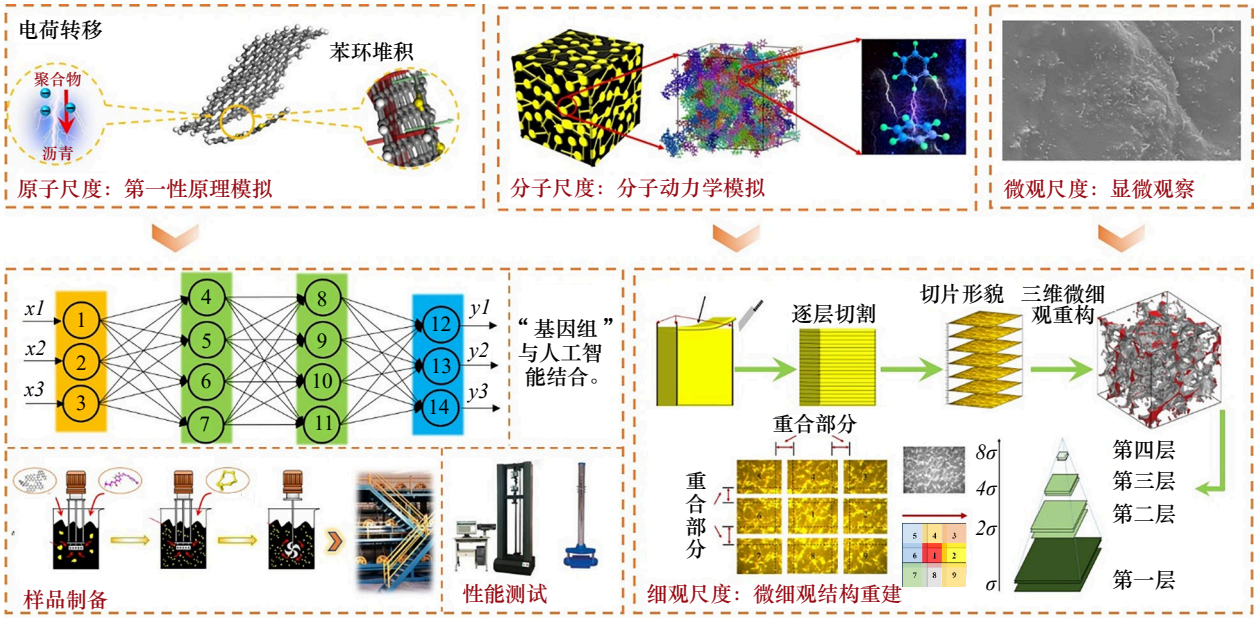

图2　防水卷材多尺度性能评估技术路线

需要建立施工工艺–界面耐久性理论，发展界面黏附预测和监测技术，主要从设计思路、界面处理、施工措施等方面理解防水卷材与基体的黏附失效行为。从多尺度尤其是分子尺度视角着手，探究防水卷材–基体的黏附机理，获取界面黏附多尺度信息，建立界面黏附及破坏理论；根据黏附理论，规避界面劣化诱因，加强界面黏附因素，提升界面黏附耐久性。还需发展防水系统结构健康检测理论与技术，提供防水卷材服役状态的实时监控能力。目前有少量相关报道，如提出了平屋顶防水病害检查分类系统[43]，开发了预测风压膨胀防水卷材最大挠度理论[44]，但远不能满足防水系统结构健康检测需求。以智能化、信息化手段为依托，开发防水卷材在自然环境中的性能劣化监测技术，获取直接信息和防水结构多尺度反应，支持病害问题的及早处置，从而提高防水卷材服役寿命并达到减量化目的。

（二）重复利用

对于已经服役过的防水卷材系统，优先采用重复利用方法。重复利用方法主要分为体系重复利用、材料重复利用：前者指将防水卷材体系进行整体或局部拆解，再将拆解下来的防水卷材体系再利用至新场景；后者指将已经服役一段时间、仍具有原有形态及功能的废弃防水卷材作为原材料进行回收。对于体系重复利用，需采取科学的拆解过程，尽量保存原有防水卷材体系的形态及功能并减少卷材损伤，利于防水卷材体系的再次利用[45]。

在传统防水卷材系统拆除过程中，通过各种工程器械破坏防水卷材系统原有的形态及功能会产生大量的废弃防水卷材。然而，拆解应以防水卷材回收为目的，采取解构方式将防水卷材系统尽可能完整地从建筑中分离出来；拆解下来的防水卷材系统可具有相对完整的形态及功能，能够直接应用到新建防水工程，从而规避废弃物运输、加工、施工等工序，极大减少碳排放。防水卷材拆解与原施工技术直接关联。当前的防水卷材铺设方法主要分为干法、湿法，又细分为热熔法、热粘法、冷粘法、自粘法、焊接法、机械固定法；铺贴方法主要有满粘法、空粘法、条粘法、点粘法。显然，采用干法铺设便于进行拆解，采用湿法施工则很难拆解；为了便于拆解防水卷材，应尽可能减少防水卷材与基底的粘贴面积，故避免使用满粘法。换言之，宜优先发展干铺与机械固定相结合，干铺与空铺法相结合的防水卷材施工工艺。

目前，防水卷材再利用理念涉及甚少，针对防水卷材拆解分析方法、施工技术的研究也未见报道。未来可构建防水卷材拆解理论框架，形成防水卷材拆解技术集成体系。需要从防水卷材拆解设计、施工以及拆解后再利用的角度着手，提出防水

卷材拆解设计的原则、步骤、施工要求，进而发展防水卷材施工工艺、拆解关键技术；从寿命周期评价角度出发，量化防水卷材拆解的环境友好程度与低碳价值，分析防水卷材拆解与传统废弃的差异性，据此提出基于重复利用理念的防水卷材低碳设计理论框架。

（三）循环再生

对于无法重复利用的防水卷材，可考虑循环再生，即将废料变成原料（再生料）。废弃防水卷材循环再生的关键是分离、分级、分解：分离指将废弃防水卷材和其他建筑固废或装修垃圾分开，再进行不同类型防水卷材的进一步分离；分级指针对不同性能的废弃防水卷材开展分级回收；分解是防水卷材生产的逆过程，实现废弃防水卷材基料（高分子或沥青材料）和胎基的分解。

将废弃防水卷材从建筑固废或装修垃圾中分离是第一步，废弃防水卷材和混凝土或其他建筑材料在成分、形态上具有显著的差异性而不存在技术困难。随后，不同成分的防水卷材分类进行循环再生，避免不同种类废弃防水卷材的混合回收（将造成薄弱界面），维持再生产品的附加值[46]。高分子防水卷材（单位面积质量为0.98~1.05 kg/m^3）、沥青类防水卷材（单位面积质量为1.1~1.4 kg/m^3）的密度有所差异，可据此开发废弃防水卷材分离技术。从源头上进行废弃防水卷材分类，避免后续的处理和分选环节，不仅可以降低回收成本，还能降低碳排放，是极有价值的分离方法。管理部门应从防水卷材铺设阶段开始，记录防水卷材类型并建立管理档案；在防水卷材拆除时，禁止随意丢弃或混入其他建筑固废，而是单独堆放废弃防水卷材；构建废弃防水卷材管理网络，将不同类型废弃防水卷材分类聚集，为循环再生创造良好条件。

在分离的基础上，根据废弃防水卷材性能进行分级再生，针对性开展循环再生。对于废弃高分子防水卷材，可参考废弃高分子材料分类再生策略（见图3）[47]：如果性能较高，可进行原等级再生，或回归防水卷材生产线，或将废弃高分子防水卷材碾磨成增材制造原料并采用增材制造技术制备防水卷材或其他产品（见图4）；若无法原等级再生，优先采用机械回收方式，将废弃高分子防水卷材粉碎成颗粒或者纤维，作为填充料或添加剂来提升其他材料的断裂韧性及抗应变能力。废弃沥青基防水卷材的主要回收方式之一即破碎成纤维或颗粒加入到沥青材料中，相应的核心科学问题是老化沥青、聚酯（玻璃纤维）、原生沥青之间的多重界面交互，横跨原子、分子、细观、宏观等多个尺度（见图5）。

分解是废弃防水卷材高附加值循环再生的重要方法，能够最大限度地开展废弃防水卷材的合理利用，主要分为物理分解、化学分解。① 物理分解指采用物理方法将复合材料分解开，目前已有高压碎

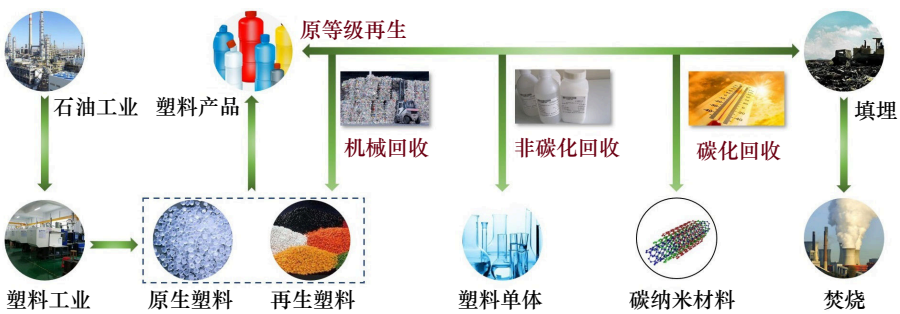

图3　废弃高分子材料（以塑料为例）的多级再生策略

图4　增材制造再生防水卷材

裂法，即利用放电脉冲破碎废弃高分子基体来获取其中的纤维（纤维应用面较广，不限于防水卷材生产）[48]。可采用物理分解方法将废弃沥青基防水卷材分解为沥青材料、纤维胎体后再进行回收，应用比较成熟；分解而得的老化沥青，可加入再生剂以提升性能，用于路面材料或防水卷材制备。② 化学分解指采用化学方法将复合材料分解开，这一过程通常改变复合材料的成分。目前高分子领域代表性的化学分解方法有高压分解法、大气压分解法：前者是重要的废弃复合材料回收方法，使用化学试剂并在高温、高压条件下将高分子材料转化成超临界流体，使高分子材料化学键断裂，实现废弃高分子复合材料的回收，应用中能量消耗大；后者过程更加温和，可保护废弃高分子复合材料中的纤维结构，在工业上更易推广使用[48]。

在分解基料与胎体之外，可将废弃高分子防水卷材看成整体，直接采用化学方法进行处理，已有化学解聚法、催化裂解法：前者通过化学方法将废弃高分子材料解聚为单体，或重新炼成可燃油气，获取高附加值再生产品；后者将废弃高分子材料在添加催化剂、高温等条件下裂解成碳纳米材料甚至碳纳米管、石墨烯（见图6）[49]。碳纳米材料在土木工程领域的应用前景广阔，但成本昂贵[50,51]；如果能够将废弃高分子防水卷材转化为碳纳米材料，有望带来行业应用的重大变革。对于性能过低的废弃高分子防水卷材，还可采用燃烧方式回收能量。

四、废弃防水卷材资源化的主攻方向与发展建议

废弃防水卷材资源化具有减量化、重复利用、循环再生三方面主要内容，而当下最迫切、最有价值的研究方向是循环再生。废弃防水卷材循环再生的主要路径是制备再生防水卷材，故系统讨论再生防水卷材研发要点（当前）与发展建议（未来）。

（一）再生防水卷材研发要点

以再生产品为原料制备而成的防水卷材称为再生防水卷材。相关原料可以来源于废弃防水卷材（支持实现废弃防水卷材产业链循环），也可以来源于其他再生产品（如再生沥青、再生高分子材料、再生纤维、再生填料）。为了尽量发挥再生防水卷材的低碳优势，用于制备再生防水卷材的原料宜遵循“就地取材”原则，规避原料运输、存储等高碳排放流程。再生防水卷材制备通常采用成熟工艺，将再生料部分替代原料是常规做法。

全再生防水卷材指原料全部采自再生产品的防水卷材，具有最大环境效益，相关技术有待发展。

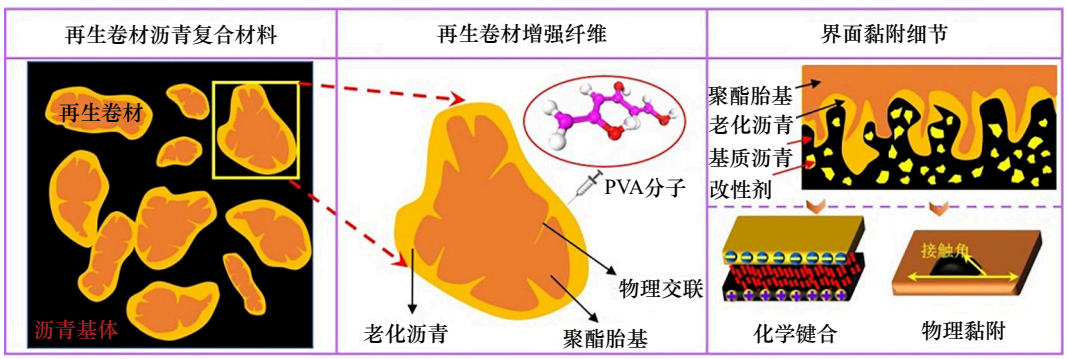

图5 废弃沥青基防水卷材界面多尺度作用

注：PVA表示聚乙烯醇。

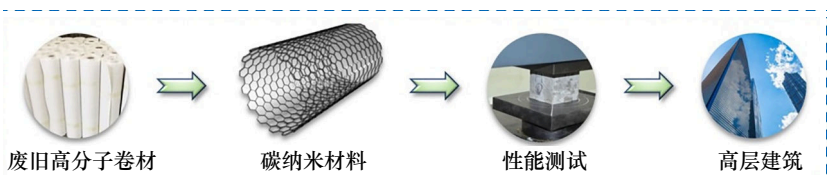

图6 利用废高分子防水卷材制备高性能混凝土

以全再生沥青基防水卷材为例，沥青原料可采用再生沥青，胎体可采用再生玻璃纤维、再生纤维布、再生纸张等，而聚乙烯膜可采用再生高分子材料。不仅如此，未来各种土木工程材料都尽可能避免使用天然原材料，而多从废弃物中寻找替代原材料，以缓解我国废弃物储量巨大、天然土木工程材料短缺的现实困境。需要系统开展全再生防水卷材基础研究，涉及废弃物前期处理、材料研发、配比优化、添加剂使用等。还需关注界面问题并开发界面改性技术，以提升全再生防水卷材的性能（废弃物更容易存在薄弱界面）；建立材料基因库，发展基于人工智能的全再生卷材性能预测方法。

全再生防水卷材生产可采用传统成熟工艺或者增材制造等高端新技术。以全再生高分子卷材为例，优先考虑将废弃高分子材料作为原料；根据废弃高分子材料的成分差异，制备不同类型的再生高分子防水卷材 以适应不同工况需求。废弃高分子储量巨大[52]，可将废弃高分子制备成颗粒，采用常规卷材生产方法、双螺旋杆挤出法制备再生颗粒，用于全再生高分子防水卷材生产[53]；也可将废弃高分子防水卷材碾磨成增材制造材料原料，通过增材制造技术生产全再生高分子防水卷材；还可将废弃物原料经前期处理后用作高分子防水卷材生产原料，采用成熟工艺生产全再生高分子防水卷材。针对这条路径，需考虑现行工艺流程能否满足生产要求，新工艺和添加剂开发以及相应基础研究是必要内容。

提升再生防水卷材的基础性能和耐久性是重要的研究课题，这是因为再生产品的基础性能和耐久性一般劣于常规产品，需要从基体、界面等方面改进性能。可将再生纤维添加至再生防水卷材中，在胎基、再生纤维表面生成碳纳米材料，由此提升再生防水卷材的机械性能、界面性能，赋予其导电性能，为防水系统结构健康监测提供基础条件；增加防水卷材使用层数也可延长使用寿命。通过以上方式，再生防水卷材的性能一般可达到常规产品的80%，基本满足地铁、隧道、路桥等特殊工程需求。

（二）再生防水卷材发展建议

关于再生防水卷材的研发与应用，当前亟待攻克的关键环节是“废料－原料”，即再生防水卷材的研发；未来需要解决的问题是“原料－产品”“产品－工程”，即再生防水卷材的应用。在未来应用目标方面，超过50%的防水卷材以再生料为原料，再生防水卷材在工程中大量替代原生防水卷材。为此，管理部门、学术界、工程界需共同努力，推动防水卷材资源化发展。

管理部门需积极发挥引导作用，增强建筑行业采用再生防水卷材的意识，发布再生防水卷材鼓励政策，支持防水卷材再生基础研究，推动防水卷材再生研究及应用，编制防水卷材资源化生产及应用规范。鉴于工程防水行业制度执行不力的现状，管理部门还可深化行业制度建设，如强化工程总承包负总责的防水工程管理体制、完善防水工程质量保修制度和工程信用体系、促进高性能防水材料和防水工程施工方法研发，尽快建成一体化防水产业体系和综合标准体系。

学术界是防水卷材再生研究的主要力量，将聚焦攻克防水卷材再生的科学与技术问题。未来将深化防水卷材再生基础研究，解决“废料－原料”“原料－产品”过程中的关键科学问题，增强技术保障能力。高校可增设工程防水专业，构建建筑防水人才培育体系，完善防水工程多层次职业教育、技能教育体系，提升从业人员专业技术水平，化解专业发展的“智力”瓶颈。

工程界是防水卷材再生的直接应用部门。未来将研发防水卷材资源化装备，培育防水工程管理人才，落实管理部门主推的防水卷材资源化政策；承接和转化学术界的防水卷材再生资源化成果，发展绿色施工技术，提高工程实用水平，高质量解决工程防水问题。

五、结论

（1）2005—2021年，我国共生产防水材料2.863×10^{10} m^2，其中防水卷材为1.89×10^{10} m^2；聚合物改性沥青类防水卷材、自粘防水卷材、高分子防水卷材、沥青复合胎柔性防水卷材的占比分别为44.96%、27.53%、19.76%、7.75%。各种防水材料产量稳步增长，高分子防水卷材将是未来主流类型，开展废弃防水卷材资源化研究需求迫切。

（2）当前防水卷材基础研究薄弱，防水卷材资源化研究近乎空白。可采取材料基因组－人工智能

理念展开系统性的基础研究，发展防水卷材性能预测理论，开发高性能、高耐久性的防水卷材，在确保防水工程质量的前提下，减少防水卷材的使用量和废弃量。防水卷材资源化发展可采取减量化、重复利用、循环再生的3R发展路径。

（3）防水卷材循环再生旨在解决“废料–原料”问题，应以分离、分级、分解为要点。发展防水卷材分离技术，完善废弃防水卷材分流制度及管理网络，从源头上分离不同成分的废弃防水卷材；根据废弃防水卷材性能，开展分类、多级的循环再生；分解包括物理分解和化学分解，是防水卷材高附加循环再生的关键举措。

（4）测算表明，如果未来再生防水卷材替代率达到50%，仅改性沥青防水卷材每年即可降低CO_2排放量1.26×10^6 t。在胎基、再生纤维表面生成碳纳米材料等方式，能够兼顾再生防水卷材机械性能和界面性能的提升并赋予其导电性能，为防水系统结构健康监测提供基础条件。

（5）为实现防水卷材高效资源化及后续利用，未来应着力解决“原料–产品”“产品–工程”关键环节，需要管理部门、学术界、工程界共同努力。管理部门增强建筑行业采用再生防水卷材的意识，发布支持性政策并深化行业制度建设。学术界积极开展防水卷材再生基础理论与应用技术研究，构建建筑防水人才培育体系。工程界承接和转化学术界的防水卷材再生资源化成果，提高工程实用水平，培育防水工程管理人才。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 21, 2023; **Revised date:** June 2, 2023

Corresponding author: Xiao Jianzhuang is a professor from the College of Civil Engineering, Tongji University. His major research field is construction solid waste resourcing and basic theory of recycled concrete. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Development Strategy of Green Construction” (2022-XZ-21) and “Strategy of Digital Development in the Construction Industry” (2022-XY-80)

参考文献

[1] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻 [J]. 科学通报, 2022, 67(28-29): 3425–3438.
Xiao J Z, Xia B, Xiao X W, et al. Prospects for low-carbon design theory of concrete structures [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(28-29): 3425–3438.

[2] 肖建庄, 张航华, 唐宇翔, 等. 废弃混凝土再生原理与再生混凝土基本问题 [J]. 科学通报, 2022, 68(5): 510–523.
Xiao J Z, Zhang H H, Tang Y X, et al. Principles for waste concrete recycling and basic problems of recycled concrete [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 68(5): 510–523.

[3] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会. 2021 中国建筑能耗与碳排放研究报告: 省级建筑碳达峰形势评估 [R]. 北京: 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专委会, 2021.
Professional Committee of Building Energy and Emissions, China Association of Buliding Energy Efficiency. 2021 China building energy consumption and carbon emissions research report: Evaluation of provincial building carbon peaking situation [R]. Beijing: Professional Committee of Building Energy and Emissions, China Association of Buliding Energy Efficiency, 2021.

[4] Xiao J Z, Shen J Y, Bai M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125742.

[5] Liu Q, Singha A, Xiao J Z, et al. Workability and mechanical properties of mortar containing recycled sand from aerated concrete blocks and sintered clay bricks [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 157: 104728.

[6] Dang J T, Hao L K, Xiao J Z , et al. Utilization of excavated soil and sewage sludge for green lightweight aggregate and evaluation of its influence on concrete properties [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 390: 136061.

[7] Hu K, Yu C H, Yang Q L, et al. Mechanistic study of graphene reinforcement of rheological performance of recycled polyethylene modified asphalt: A new observation from molecular dynamics simulation [J]. Constr Build Mater, 2020, 320: 126263.

[8] 刘娜娜. 废旧防水卷材用于改性沥青的研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东) (硕士学位论文), 2017.
Liu N N. Study on the waste waterproofing membrane used for modified asphalt [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (Master’s thesis), 2017.

[9] 张敏. 一种利用沥青类废旧防水卷材改性后生产的防水卷材制备方法: CN112609476A [P]. 2021-04-06.
Zhang M. The invention relates to a preparation method of waterproof roll produced by modifying waste asphalt waterproof membrane: CN112609476A [P]. 2021-04-06.

[10] 马峰, 冯乔, 傅珍, 等. 一种回收防水卷材再利用的方法及改性沥青混合料: CN107879674A [P]. 2017-11-22.
Ma F, Feng Q, Fu Z, et al. The invention relates to a method of recycling waterproof membrane material and a modified asphalt mixture: CN107879674A [P]. 2017-11-22.

[11] 肖建庄. 建筑防水基础 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
Xiao J Z. Building waterproofing foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑与市政工程防水通用规范 (GB 55030—2022) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China, State Administration for Market Regulation. Geneal code for waterproofing of building and mu-

nicipal engineering (GB 55030—2022) [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2022.

[13] 许春明. 三元乙丙橡胶防水卷材火灾特性实验研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学 (硕士学位论文), 2010.
Xu C M. The study on fire performance of EPDM rubber waterproof sheet. Master Dissertation [D]. Hefei: University of Science and Technology of China (Master's thesis), 2010.

[14] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2005年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2005.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2005 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2005.

[15] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2006年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2006.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2006 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2006.

[16] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2007年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2007.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2007 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2007.

[17] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2008年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2008.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2008 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2008.

[18] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2009年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2009.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2009 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2009.

[19] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2010年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2010.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2010 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2010.

[20] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2011年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2011.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2011 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association. 2011.

[21] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2012年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2012.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2012 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2012.

[22] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2013年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2013.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2013 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2013.

[23] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2014年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2014.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2014 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2014.

[24] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2015年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2015.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2015 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2015.

[25] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2016年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2016.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2016 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2016.

[26] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2017年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2017.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2017 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2017.

[27] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2018年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2018.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2018 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2018.

[28] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2019年度发展报告 [R]. 中国建筑防水协会, 2019.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2019 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2019.

[29] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2020年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2020.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2020 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2020.

[30] 中国建筑防水协会. 中国建筑防水行业2021年度发展报告 [R]. 北京: 中国建筑防水协会, 2021.
China National Building Waterproof Association. China building waterproofing industry 2021 annual development report [R]. Beijing: China National Building Waterproof Association, 2021.

[31] Monica P, Maurizia S, Domenico C, Sandra V. Utilization of Tannery Wastewaters Sludge Ash in Waterproofing Membrane: a Technical and Environmental feasibility Study [J]. Advanced Materials Research, 2014, 849: 397–404.

[32] Liu Y K, Zhang Q S, Liu R T, et al. Compressive stress-hydrothermal aging behavior and constitutive model of shield tunnel EPDM rubber material [J]. Construction and Building Materials, 2022, 320: 126298.

[33] Ivanic A, Lubej S, Durability and degradation of PVC-P roofing membrane—Example of dynamic fatigue testing [J]. Polymers, 2022, 14(7): 1312.

[34] Silva R R, Lopes J G, Correia J R. The effect of wind suction on flat roofs: An experimental and analytical study of mechanically fastened waterproofing systems [J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(1): 105–112.

[35] Hailesilassie B W, Hean S, Partl M N. Testing of blister propaga-

tion and peeling of orthotropic bituminous waterproofing membranes [J]. Materials and Structures, 2015, 48: 1095–1108.

[36] Hailesilassie B W, Partl M N. Adhesive blister propagation under an orthotropic bituminous waterproofing membrane [J]. Construction and Building Materials, 2013, 48: 1171–1178.

[37] Liu H Y, Li Y, Zhang Q, et al. Deformation characteristic and mechanism of blisters in cement concrete bridge deck pavement [J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 358–369.

[38] Simon C M, Kim J, Gomez-Gualdron D A, et al. The materials genome in action: Identifying the performance limits for methane storage [J]. Energy & Environmental Science, 2015 (4): 1190–1199.

[39] 宿彦京, 杨明理, 祝伟丽, 周科朝, 等, 新材料研发智能化技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 161–169.
Su Y, Yang M, Zhu W, Zhou K, et al. Development of Key Technologies for Intelligent Research and Development of New Materials [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 161–169.

[40] Goikoetxeaundia G, González O, Muñoz M E, et al. Dynamic viscoelastic characterization of bitumen/polymer roofing membranes [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2007, 292(6): 715–722.

[41] Mazzotta F, Lantieri C, Vignali V, et al. Performance evaluation of recycled rubber waterproofing bituminous membranes for concrete bridge decks and other surfaces [J]. Construction and Building Materials, 2017, 136: 524–532.

[42] Shahraki M, Tessari A, Bolisetti C. An experimental study on the interface between a waterproofing membrane in contact with dry and saturated sand [C]. Charlotte: Geo-Congress 2022, 2022.

[43] Walter A, Brito J, Lopes J G. Current flat roof bituminous membranes waterproofing systems—Inspection, diagnosis and pathology classification [J]. Construction and Building Materials, 2005, 19(3): 233–242.

[44] Shi X, Burnett E. Mechanics and test study of flexible membranes ballooning in three dimensions [J]. Building and Environment, 2008, 43(11): 1871–1881.

[45] Ding T, Xiao J Z, Wei K H, et al. Seismic behavior of concrete shear walls with bolted end-plate DfD connections [J]. Engineering Structures, 2020, 214: 110610.

[46] Najafi S K. Use of recycled plastics in wood plastic composites—A review [J]. Waste Management, 2013, 33(9): 1898–1905.

[47] 孙昱楠, 张帆, 李建园, 等. 废塑料处置与利用技术研究进展 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 182–196.
Su Y N, Zhang F, Li J Y, et al. Advances in waste plastic disposal and utilization technology [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(3): 182–196.

[48] Korley L T J, EPPS III T, Helms B A, et al. Toward polymer upcycling—Adding value and tackling circularity [J]. Science, 2021, 373(6550): 66–69.

[49] Chen S L, Liu Z, Jiang S H, et al. Carbonization: A feasible route for reutilization of plastic wastes [J]. Science of The Total Environment, 2020, 710: 136250.

[50] Yang Q L, Yu C H. Multiscale enhancement mechanism of carbon nanotube-modified asphalt at high temperature by oxidative aging: A molecular dynamics simulation investigation [J]. Energy Fuels, 2022, 36(24): 15279–15296.

[51] Yang Q L, Qian Y, Fan Z P, et al. Exploiting the synergetic effects of graphene and carbon nanotubes on the mechanical properties of bitumen composites [J]. Carbon, 2021, 172: 402–413.

[52] Jambeck J R, Geyer R, Wilcox C, et al. Plastic waste inputs from land into the ocean [J]. Science, 2015, 347(6223): 768–771.

[53] Qu J P, Huang Z X, Yang Z T, et al. Industrial-scale polypropylene–polyethylene physical alloying toward recycling [J]. Engineering, 2022, 9(2): 95–100.