引用格式：韩宇栋，梁莹，李威，等. 环氧树脂及环氧基工程材料研究评述[J]. 工业建筑，2026，56(1)：151-167. HAN Yudong，LIANG Ying，LI Wei，et al. Review on Epoxy Resin and Its Composite Engineering Materials[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：151-167 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25102802

环氧树脂及环氧基工程材料研究评述*

韩宇栋[1]　梁　莹[1,2]　李　威[1]　岳清瑞[3]　蒋崇文[2]　毛　鑫[4]

（1. 中冶建筑研究总院有限公司，北京　100088；2. 中南大学化学化工学院，长沙　410083；3. 北京科技大学城镇化与城市安全研究院，北京　100083；4. 天津大学建筑工程学院，天津　300072）

摘　要　环氧树脂是一类重要的热固性树脂，具有优异的力学、黏结、耐腐蚀以及抗开裂、抗疲劳性能，工程应用广泛。针对环氧基工程材料的发展、研究和应用，总结了其三个阶段的发展历程，阐述了环氧材料的固化反应机理和关键性能调控方法，对其普遍存在的脆性问题提出了解决思路；按施工时的工作状态和使用功能进行了基本分类；详细介绍工程上常用的各类环氧基工程材料，分析了当前研究的不足和应用中的技术瓶颈，聚焦“高强化、功能化、高适应化、绿色化”新趋势和需求，对环氧基工程材料提出了新的发展方向；对环氧基工程材料的产品、性能测试方法及工程应用相关标准进行了梳理，对其未来研究创新、应用发展前景进行了展望，并结合工程新需求提出了若干工作建议。

关键词　环氧树脂；环氧基工程材料；性能调控；功能化；分类和应用

Review on Epoxy Resin and Its Composite Engineering Materials

HAN Yudong[1]　LIANG Ying[1,2]　LI Wei[1]　YUE Qingrui[3]　JIANG Chongwen[2]　MAO Xin[4]

(1. *Central Research Institute of Building and Construction Co.，Ltd.，MCC Group，Beijing* 100088，*China*；2. *College of Chemistry and Chemical Engineering，Central South University，Changsha* 410083，*China*；3. *Research Institute of Urbanization and Urban Safety，University of Science and Technology Beijing，Beijing* 100083，*China*；4. *School of Civil Engineering，Tianjin University，Tianjin* 300072，*China*)

Abstract：Epoxy resin is an important type of thermosetting resin，featuring excellent mechanical，adhesive，corrosion resistance，crack resistance，and fatigue resistance properties，and is widely used in engineering. Regarding the development，research，and application of epoxy-based engineering materials，this paper first summarizes its three-stage development process，then elaborates on the curing reaction mechanism and key performance control techniques of epoxy materials，and proposes solutions to the common brittleness problems. It classifies the materials based on their working state and functions during construction. It also provides a detailed introduction to various commonly used epoxy-based engineering materials in current engineering，analyzes the current research deficiencies and technical bottlenecks，and focuses on the new trends and demands of “high reinforcement，functionalization，high adaptability，and greenness”，proposing new development directions for epoxy-based engineering materials. Finally，it sorts out the product standards，performance testing methods，and engineering application standards of epoxy-based engineering materials，and looks forward to their future research and application development prospects，and puts forward several suggestions in combination with new engineering demands.

Keywords：epoxy resin；epoxy-based engineering materials；performance regulation；functionalization；classification and application

*中国五矿集团有限公司青年科技基金项目(2024QNJJB14)；国家自然科学基金资助项目(52178263)；国家重点研发计划青年科学家项目(2023YFB3711800)。

第一作者：韩宇栋，博士，正高级工程师，博士生导师，主要从事高性能混凝土、特种工程材料研究工作。

电子信箱：hanyudong@cribc.com

收稿日期：2025-10-28

© 2026 工业建筑

0 引 言

环氧树脂(Epoxy Resin,EP)作为一种重要的热固性高分子材料,因其优异的力学性能、界面黏结性能、耐腐蚀性能,而被广泛应用于建筑、交通、水利水电、能源、冶金以及船舶、海洋等领域,具有很高的应用价值。然而,单纯的环氧树脂固化材料存在反应热大、抗老化性不足、内应力大、抗裂能力较差、成本偏高等缺陷,阻碍了环氧树脂在工程上的大规模应用。通过对环氧树脂增韧改性,可大幅提高固化后环氧树脂的力学性能,满足工程应用需求。同时,环氧体系不断分化和发展,正不断涌现出高强化、功能化、高适应化和绿色化的新型环氧基工程材料。然而,其相关研究成果虽多,但多集中于单一体系或应用领域,缺乏系统性综述与趋势总结。本文系统梳理了环氧树脂及环氧基工程材料的发展概况、固化机理、增韧改性特性调控方法,典型工程材料种类及其应用场景,分析了当前环氧材料在性能提升、工程应用及绿色转型方面存在的问题,并结合未来工程需求,提出具有前瞻性的技术性能新需求与研究新方向,对环氧基工程材料的相关标准进行整理,旨在为环氧基工程材料的性能优化与提升、功能化创新以及工程应用拓展、标准化发展提供理论参考和思路借鉴。

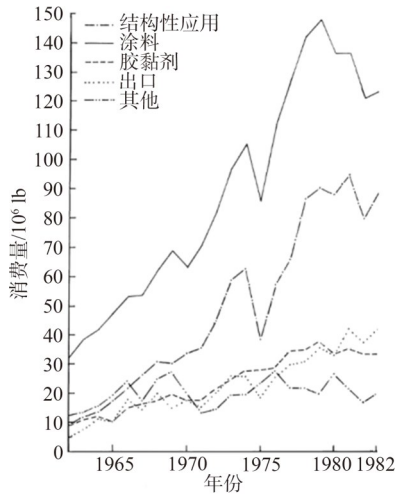
1 环氧基工程材料发展概况

1.1 技术萌芽期

1909年,环氧树脂首次被发现,俄国化学家Prileschajew[1]发现烯烃会与过氧苯甲酸反应生成环氧化合物。1934年,德国I. G. Farben AG染料公司的Schlack申请了用胺和含有1个以上环氧基团的化合物制备高分子聚合物的专利,但却未能认识到该发明的重要性。直到几年后,瑞士的Pierre Castan和美国的Sylvan Greenlee分别申报专利,描述了环氧氯丙烷和双酚A可以合成树脂,该树脂可通过有机胺或二元酸固化,对多种物质具有优异的附着力,这一发现才真正标志着环氧树脂材料的技术价值得以实现,为其在工业领域的广泛应用奠定了基础。

1.2 技术成熟期

1947年,美国的De Voe-Raynolds公司实现了环氧树脂的首次工业化生产。随后,瑞士的CIBA公司、美国的Shell和Dow Chemical等公司相继投身环氧树脂的工业生产,并不断扩大产能。进入20世纪50年代,随着固化剂种类的丰富和生产条件的优化,环氧树脂的生产工艺趋于成熟。同时期,脂肪族环氧树脂、酚醛环氧树脂和胺固化体系等相继被开发出来,大幅提升了环氧树脂的耐热性和机械强度,拓宽了其应用领域。到20世纪70年代,双酚A型环氧树脂成为主流,广泛用于结构胶黏剂、复合材料、涂层和电子工业等。从图1可以看出,1962—1982年间,环氧树脂在各领域的应用都显著增长。



注:1 lb=0.4536 kg。

图1 1962—1982年环氧树脂的消费分布[2]

Fig. 1 The consumption distribution of epoxy resin from 1962 to 1982

我国对环氧树脂的研究自1958年开始,相比于欧美国家起步较晚。改革开放以后,岳阳巴陵石化公司从日本东都化成公司引进年产300 t的环氧树脂装置,无锡石油化工总厂从德国贝克莱特公司引进年产3000 t的整套环氧树脂设备和技术,自此,我国的环氧树脂产业开始取得巨大的发展[3]。到2021年,全球环氧树脂总产能达到537.1万t/a,中国作为现今世界上最大的环氧树脂生产国和消费国,总产能达到249.0万t/a,约占全球总产能的46.4%[4]。

1.3 性能分化期

20世纪90年代后,随着高科技产业和工程应用的发展,单一性能的环氧树脂已难以满足市场多样化需求,材料产品进入了性能分化与结构优化并行的发展阶段[5]。这一阶段,环氧树脂的研究与应用向四个方向推进:以提升强度与韧性为目标的高强化材料,兼具结构与功能化的功能性材料,可满足特殊环境需求的高适应性材料,低挥发性有机化合物(VOC)的新型绿色环保类材料。这一分化趋势为后续高性能、功能型环氧基工程材料的发展奠定了

系统性基础。

2　环氧基工程材料固化机理和关键性能调控方法

环氧树脂的优异性能来源于其特有的分子结构与固化反应特征。为深入理解环氧基工程材料性能形成的内在规律，本节从典型固化体系与反应机制入手，重点分析针对其普遍脆性问题的调控方法。

2.1　固化机理概述

环氧树脂是一种热固性树脂，分子式为$(C_{11}H_{12}O_3)_n$，被定义为含有一个以上环氧基团的低分子量预聚物。环氧树脂有许多种类，其中双酚 A 型环氧树脂是最早商品化、应用最广、产量最大的一类，其原材料来源方便、成本较低，且工艺成熟，综合性能好，约占环氧树脂总产量的 85% 以上[6]，其结构式如图 2 所示。

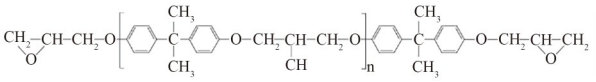
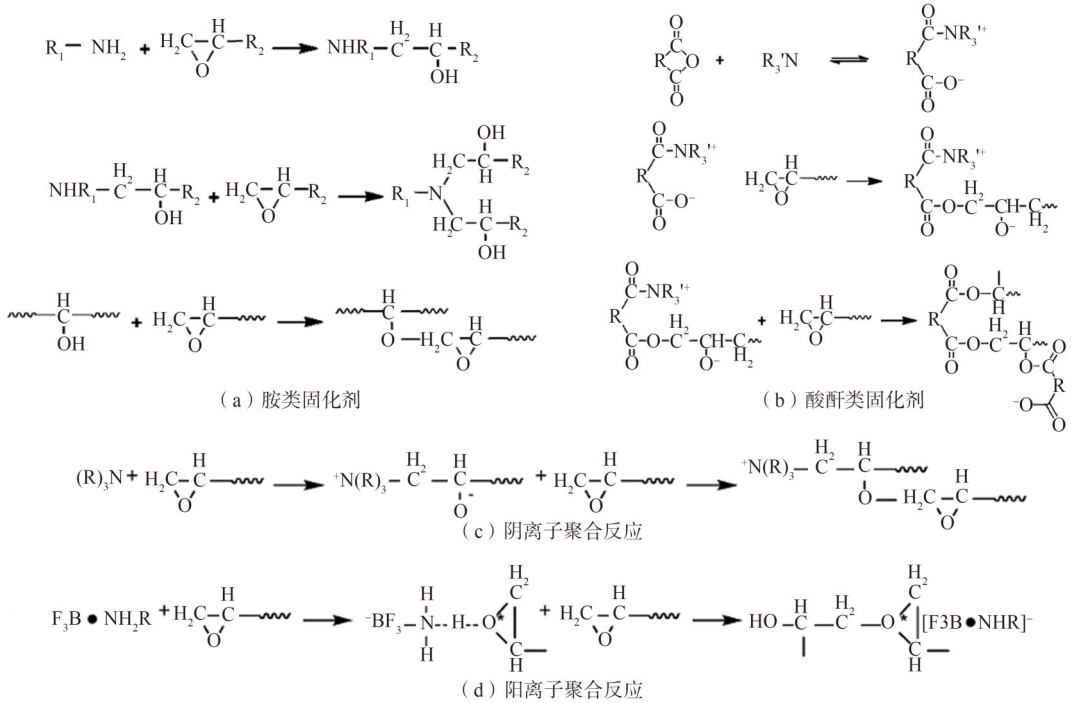


图 2　双酚 A 型环氧树脂分子结构式

Fig. 2　Molecular structural formula of DGEBA

环氧树脂分子中两个环氧基分别位于分子结构的两端，环氧基团较为活泼[7]。位于中间部分的一些基团则较为稳定，主要用于赋予分子链特定的力学性能。其中，亚甲基赋予柔性；双酚 A 骨架提供耐热性和刚性；醚键赋予耐化学品药性[3]；苯环赋予刚性。刚性和柔性的结合使得环氧树脂在固化后具有良好的热稳定性和承载性能。环氧树脂在通常情况下呈液体状态，其单独存在没有应用价值，必须加入固化剂进行高度交联，生成三维网络状结构，成为无定形的热固性材料[8-9]。环氧树脂的固化主要包括加成固化和催化聚合两种类型，固化反应方程式如图 3 所示。加成固化是指环氧基在活泼氢的作用下发生开环加成反应，常用胺类和酸酐类固化剂。催化型固化剂可分为阴离子型和阳离子型两类。其中，阴离子型固化剂以咪唑类化合物为代表，阳离子型固化剂则多采用 BF_3 及其络合物，通过引发环氧基自开环聚合，显著提高固化速率和效率。



（a）胺类固化剂　（b）酸酐类固化剂

（c）阴离子聚合反应

（d）阳离子聚合反应

图 3　各类型环氧树脂固化反应方程式[10]

Fig. 3　The curing reaction equation of epoxy resin

目前环氧基工程材料最常用的固化技术是热固化法，是指环氧树脂与固化剂在不同温度下发生固化交联反应，形成稳定的三维网络结构的方法。然而，在一些对温度敏感、极端环境或需要快速成型的应用场景下，热固化法已经无法满足需求，需要采用一些特殊的固化方法，如光固化、微波固化和潜伏固化。表 1 列举了这三种方法的技术路线与相关研究结果[11-16]。

此外，需要加入一些辅助材料，以完善环氧基工程材料的性能，如材料的流动性、固化所引起的

表1　特殊固化环氧基工程材料技术路线与研究结果

Table 1　Technical route and research results of special curing epoxy-based engineering materials

特殊固化技术路线	具体方法	特点	研究结果
光固化	紫外光、可见光	固化速度比较快，可以从几小时大幅缩短至几分钟，且过程相对可控[11]	Amirreza[12]采用紫外光诱导前沿聚合（UV-FP）将环氧树脂的固化时间从传统热固化的15 h缩短至不到2 min，且在光引发剂添加量为0.3%时，拉伸强度达到32 MPa，弯曲强度达到115 MPa，均高于传统热固化，适合现场修复以及快速制造工程
微波固化	0.3~300 GHz的电磁波	内加热，对比热固化法，具有传热均匀、加热速度快、效率高、无滞后效应、能耗低等优势	雷运波等[13]研究发现，为使环氧树脂混凝土固化后的抗压强度达到40 MPa，在常温下需要固化4 d，采用100 ℃热固化需要1.5~2.0 h，而微波固化仅需10 min，在不降低力学性能的条件下显著缩短施工时间，在路面抢修工程中表现出明显优势
潜伏固化	酮亚胺类脂肪族多胺、微胶囊类改性脂肪多胺、双氰胺、改性芳香族多胺和咪唑类固化剂	在正常室温条件下没有活性，能够长时间保持稳定状态，一旦经过外部刺激（光照、加热或者加湿等）则会变得活跃，发生固化交联反应，利于样品的储存与放置[14-15]	王志远等[16]研究表明，改性咪唑类潜伏固化剂M-10与环氧树脂混合后，室温适应期超过35 d，添加量为10%时，拉伸强度为48 MPa，改编化转变温度 T_g 为140 ℃，综合性能优异

内应力降低、固化物物性的调整等。在改性时加入稀释剂、促进剂、增韧剂、填料（石英砂、金刚砂、纤维等）、消泡剂、流平剂等辅助材料，是提高环氧基工程材料性能、扩大其工程应用范围的必备条件[6]。

2.2　关键性能调控方法

环氧树脂在固化剂的作用下高度交联，形成三维网络状结构，赋予材料优异的力学性能和较高的强度。然而，这种高交联结构也导致分子链段柔顺性不足、塑性变形能力不足、内应力较大，固化后的材料质地较脆，抗冲击强度和断裂韧性较差[17]。为满足现代工程对材料强度和韧性的双重需求，高强化材料应运而生，其核心目标是在保持或提升强度的同时，改善材料的韧性和抗冲击能力。目前环氧树脂的增韧体系可分为非均相增韧和均相增韧：非均相增韧体系是指基体与添加的改性剂之间不混溶，形成半渗透、互穿聚合物网络或直接形成分离相，见图4；均相增韧体系是指改性剂均匀分散在基体中，不会产生微米或纳米尺度的第二相[18]。

针对脆性，国内外众多学者进行了大量增韧改性研究，主要通过添加橡胶、纳米粒子、柔性链段、热塑性材料、热致液晶聚合物等方式来提高材料的韧性，扩大其工程应用范围。表2详细介绍了几种增韧改性机制的机理和优缺点等[8,18-35]。

总体而言，各类增韧方法在提升材料韧性的同时，也会对强度、模量、耐热性及流动性产生不同的影响。橡胶与柔性链段增韧效果显著，但易降低强度和模量；纳米粒子、热塑性聚合物、热致性液晶聚合物在增韧时兼顾了强度、模量与耐热性，但亦存在一定的局限性：纳米粒子易团聚、分散困难；热塑性聚合物流动性低、相容性差；热致性液晶聚合物加工困难、成本较高。因此，在工程应用中需结合具体应用场景和性能需求（如高强、高韧性、耐热性等）进行综合考虑。未来，多种增韧机制协同作用

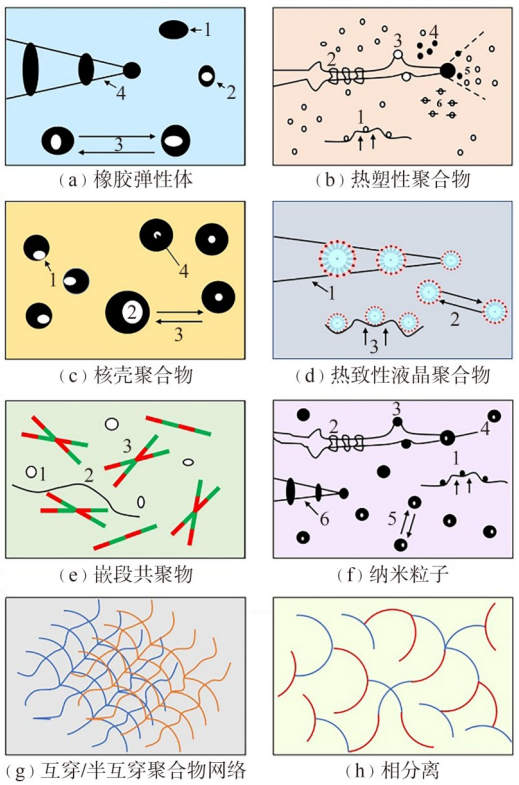


图4　增韧改性机理示意[18]

Fig. 4　Schematic representation of toughening mechanisms

表 2　环氧基工程材料增韧改性技术路线与研究结果[8,18-35]

Table 2　Technical routes and research results of toughness modification of epoxy-based engineering materials

技术路线	常用改性材料	作用机理	优点	缺点	文献研究结果
橡胶弹性体增韧	羧基液体丁腈橡胶(CTBN)[8,19]、端氨基丁腈橡胶(ATBN)[20]、端羧基聚丁二烯(CTPB)[21]	固化后，橡胶颗粒与环氧树脂基体不相容，发生相分离，形成海岛形状[23]。在受到外力冲击时，橡胶颗粒充当应力集中剂，增加基体的变形能力，材料的抗裂纹性增强，最终韧性提高[23]	对断裂韧性提升明显	显著降低体系的模量和玻璃化转变温度[23-24]	Shi 等[25]研究发现，添加液态橡胶(CTBN)能显著改善玻璃钢(FRP)层压板-混凝土界面在静态和动态载荷下的黏结行为，改性后的环氧胶黏剂断裂伸长率为 5.49%，具有较好的变形能力和抗冲击性，弹性模量却有所降低，从 2.92 GPa 降到了 2.51 GPa
纳米粒子增韧	纳米二氧化硅、二氧化钛、蒙脱土、碳纳米管、石墨烯等	纳米粒子表面的活性基团与环氧树脂相互作用，形成良好的界面。在外力冲击下，纳米粒子吸收能量并诱发裂纹偏转[26]；同时作为分子链段的接头，阻止微裂纹扩展[18]	在提高韧性的同时增强模量和耐热性	分散困难，易团聚	为提高环氧胶黏剂在混凝土-钢筋锚固系统中的机械性能和黏接强度，Reza 等[27]将硅烷化后的纳米 SiO_2 颗粒添加到环氧胶黏剂中，改性后的纳米颗粒分散更均匀，增强与环氧基体的界面结合，得到的材料拉伸强度、拉伸模量、抗压强度和黏接强度分别提高了 70%、20%、17% 和 50%
柔性链段增韧	脂肪族链段、硅氧烷链段、醚键链段	通过分子设计的方式，将柔性链段引入环氧树脂体系中：1)在固化剂中添加柔性链段，通过微观相分离，形成疏密相间的网络结构的环氧树脂固化剂[29-31]；2)直接在环氧树脂中引入柔性链段，对环氧树脂的结构和性能进行调控和优化[31-32]	显著提高材料的柔韧性	降低材料的强度和模量	Yi 等[29]以环氧脂肪酸甲酯和二乙烯三胺为原料，合成了一种具有长柔性链段的新型环氧固化剂，含有多个醚键和脂肪族链，可均匀分散在体系中，断裂伸长率能达到 13.20%，赋予材料较高的柔韧性，但抗拉强度却降到了 15.54 MPa
热塑性聚合物增韧	聚醚酮(PEK)、聚酰亚胺醚(PEI)、聚醚醚酮(PEEK)[33]、聚砜(PSF)、聚砜醚(PES)[34]等	添加的热塑性聚合物颗粒可以桥接基体表面开裂的裂纹，产生桥接约束效应，不仅会限制裂纹的生长扩展，还会在桥尖处起到一定的锚固作用，抑制裂纹扩展[18]	在不降低材料原有高模量和耐热性的同时提高韧性	流动性低，相容性差，溶解性较差	Yan 等[35]制备了两种羧基含量可控的热塑性聚醚酮树脂，羧基参与固化反应有效改善两相界面相容性差的问题。研究表明，含有苯二甲酰胺结构的树脂具有更优异的增韧效果，其添加量为 5% 时，冲击强度提高 82%，且并未降低混合物的模量和热稳定性，玻璃化转变温度仍在 210 ℃以上
热致性液晶聚合物增韧	液晶聚氨酯(LCPU)、液晶共聚酯酰胺(LCPA)	1)直接合成液晶环氧树脂；2)将材料共混使液晶聚合物加入到环氧树脂体系中，在交联生成的网络中嵌入聚合物的有序结构，达到增韧效果[18]	由刚性结晶和一定的柔性区间组成，具有高模量、高强度的特点	合成来源较少，加工成型困难，成本较高	Le 等[22]加入液晶共聚酯酰胺(LCPA)来增韧环氧树脂，由于 LCPA 本身的高刚性和高度堆积的分子链，改性后的材料冲击强度从 35.8 J/m 大幅提高到 51.8 J/m，提高了约 30%，介电损耗也有所降低

将成为实现韧性、强度与环境适应性平衡发展的关键方向。

3　环氧基工程材料的基本分类

为系统认识环氧基工程材料的体系构成与典型用途，本节将从工作状态和使用功能两个维度出发，对常见类型进行归纳与比较，并结合工程应用实例构建具有代表性的分类框架，为后续典型材料性能分析与应用拓展提供逻辑基础。

3.1　按工作状态分类

在实际工程或工业应用中，环氧基工程材料常按施工时的工作状态划分为五类：胶、浆、膏、泥、固，如表 3 所示，不同工作状态对应着不同的原料成分、功能定位、用途及其施工方法。

3.2　按使用功能分类

为更直观地体现环氧基工程材料功能定位与发展现状，从黏结、加固、修补、防腐防护、耐磨和造型六方面对其典型应用场景进行功能分类。

3.3　环氧基工程材料组成与分类相关关系分析

环氧基工程材料的基本组成、按工作状态分类、按使用功能和工程应用分类的相关性见图 5。

4　典型环氧基工程材料

4.1　典型环氧基工程材料

在前述分类体系的基础上，本节选取工程应用中具有代表性的环氧基材料，重点分析其组成结构、性能特征及典型工程应用案例，总结不同材料的研究现状与存在问题，提出优化建议，为环氧基工程材料的性能提升与应用拓展提供参考。

表 3　环氧基工程材料按工作状态分类

Table 3　Classification of epoxy-based engineering materials by working conditions

类别	主要成分	黏度	典型代表	施工方法
胶	环氧树脂+固化剂(无填料或微量填料)	最低,液态	结构胶、灌注胶、界面剂	涂抹、灌注、喷涂
浆	环氧树脂+固化剂+细腻填料(较少或适中)	中等,可灌注	环氧灌浆料、防腐涂料、植筋胶	自重灌注、喷涂
膏	环氧树脂+固化剂+细腻或适中颗粒(一般0~0.5 mm)的填料(较多)	高黏度,可控、可塑	胶黏剂、模型环氧、3D打印建筑材料、瓷砖胶	涂抹、3D挤出打印
泥(砂浆)	环氧树脂+固化剂+细腻填料+细骨料(0.075~5 mm)	可控流动度	环氧修补砂浆、环氧地坪砂浆、环氧胶泥	涂抹、摊铺
固	环氧树脂+固化剂+纤维或粉体	固体,成型态	纤维复合材料(FRP)、环氧制品	裁切、敷设

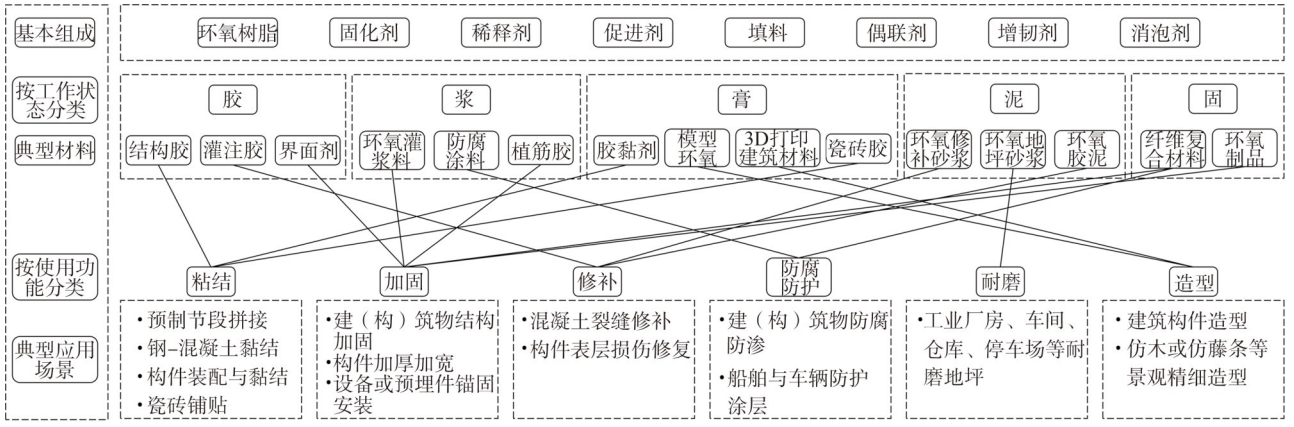


图 5　环氧基工程材料基本组成、按工作状态分类、按使用功能分类的相关性

Fig. 5　Diagram of correlation of the basic composition, classification by working state, and classification by application function of epoxy-based engineering materials

4.1.1　环氧胶黏剂

为了建造大型器件或建筑,不同结构构件之间连接必不可少。常用连接方法有焊接、铆接和胶接。传统焊接方式容易破坏结构表面,铆接则容易产生应力集中。相比之下,胶接能够实现载荷分布均匀,不破坏连接件表面,且施工工艺简便,可以显著缩短工期并提高生产效率,因此成为制造领域和工程应用中不可或缺的连接方法,在风电混塔管片、桥梁预制节段等拼装以及粘钢、粘碳纤维布等加固工程中应用广泛[36]。以南京长江第五大桥为例,其主体桥梁结构采用预制节段拼装技术,考虑到当地夏季施工存在温度高、雨水多的恶劣环境,研发人员通过引入低放热固化剂、疏水基团和仿生海洋生物官能团接枝改性技术,得到的海洋预制构件拼接胶在40 ℃下可施胶时间达35 min,抗压强度达95 MPa,钢对混凝土的正拉黏结强度为3.5~4.5 MPa,既缩短了施工工期,又保证了桥梁结构的耐久性和安全性[37]。Lu等[38]采用由核壳橡胶颗粒改性的胶黏剂J33,测试其在湿热环境下黏结碳纤维复合材料(CFRP)与钢的性能,发现该材料在50 ℃养护120 h后的抗拉强度达到40 MPa,黏结强度保持在17.8 MPa,有效缓解了胶黏剂在湿热环境下的性能衰减。尽管如此,界面强度和环境适应性仍是胶接材料的关键瓶颈,未来研究可从界面改性、固化体系优化以及开发自修复或阻燃型胶体等方向入手,以满足复杂环境下的工程需求。

4.1.2　环氧灌浆料

环氧灌浆料是一种以环氧树脂为基体,配合高强度骨料和固化剂的高性能灌浆料,具有固化速度快、耐腐蚀性、强度高、承载能力强等特点[39-40]。1996年,冶金工业部建筑研究总院首次研发出建筑物结构裂缝修补专用的系列环氧灌浆料,填补了国内空白,并成功应用到人民大会堂、人民英雄纪念碑等结构加固工程中。相较于水泥基材料,环氧灌浆料具有更高的抗压强度和耐久性,广泛应用于设备基础安装、钢结构加固、桥梁修补等工程领域。抗压强度作为评价环氧灌浆料工程适应性的关键参数,得到了研究学者的广泛关注。Li等[41]通过在体系中引入聚氨酯,制备出一种多孔-(IPN)结构的环氧灌浆料,初始黏度降至200 mPa·s以下,便于材料渗透微裂缝;同时,其拉伸强度、抗压强度和冲击

强度分别提升到 28 MPa、100 MPa 和 30 kJ/m^2，分别提高 87%、20% 和 50%，并在潮湿的环境下保持了 3.26 MPa 的黏结强度，现场注浆试验也验证了良好的修复和加固性能。李龙梓等[42]采用正交试验法系统研究了环氧灌浆料抗压强度的影响因素，其影响程度顺序为稀释剂≈增韧剂掺量>胶砂比，当稀释剂和增韧剂总掺量控制在 5%~15%，胶砂比为 0.35~0.45 时，灌浆料的综合性能最佳，抗压强度可达到 112.9 MPa，抗折强度达 45.3 MPa。尽管近年来的研究已显著提升环氧灌浆料的强度，但其抗压强度仍未突破工程应用普遍需求的门槛（120 MPa）。同时，高黏度导致的施工困难、骨料沉降引起的性能不均，以及固化过程中温升和收缩应力造成的开裂，限制了其在极端工况下的应用。未来研究可聚焦环氧灌浆料的高强化和高适应性发展，满足极端环境下的长期服役需求。

4.1.3　环氧防腐材料

在复杂服役环境下，钢结构、混凝土等工程材料极易受水分、紫外线、盐雾和化学介质等因素的侵蚀，导致结构劣化甚至失效[43]。环氧防腐材料凭借其优异的附着力、致密性和耐化学腐蚀性能，被广泛应用于船舶、车辆和建（构）筑物等的防护体系中。其固化后形成的三维交联网状结构，能够通过物理屏蔽隔绝腐蚀介质，有效阻隔水分、氧气和腐蚀性离子的渗透，从而延缓腐蚀进程，提高材料的服役寿命[44]。然而，长期暴露在户外条件下，环氧防腐材料普遍面临耐候性不足的问题。Zhang 等[45]对环氧铝合金底漆在典型沿海大气环境中的长期服役性能进行了测试，发现在 7，12，20 a 暴露后，试件逐渐出现晶间腐蚀和剥落腐蚀，伴随 $Al(OH)_3$ 腐蚀产物生成，涂层光泽度丧失、表面出现深微孔，阻抗下降至 2.56×10/Ω cm^2，材料被腐蚀，涂层失效。这说明在强腐蚀海洋环境下，单层涂层无法起到长效防腐效果。因此，目前工程应用中普遍采用“底漆-中间漆-面漆”一体化的多层配套体系，实现多重协同的长效防护。按照应用环境和服役需求，环氧防腐体系大致可分为通用长效型和环保长效型两类。表 4 为两类防腐体系的具体方案、典型应用场景及特点。

表 4　环氧防腐体系方案

Table 4　Epoxy anti-corrosion system plan

类别	防腐方案	典型应用场景	特点	作用
通用长效型	底漆：环氧富锌防腐底漆 中间漆：环氧云铁中间漆 面漆：丙烯酸聚氨酯面漆	建筑室内外结构、厂房、船舶、化工储罐等强腐蚀环境	体系成熟、施工简便、机械性能优异	底漆：与基材直接接触，起附着和防腐蚀屏障作用 中间漆：增加漆膜厚度，构建“迷宫效应”，延长腐蚀介质渗透路径 面漆：直接暴露于外界环境，承担装饰和耐候保护的作用
环保长效型	底漆：水性纳米改性聚硅氧烷重防腐底涂 中间漆：无溶剂环氧复合鳞片重防腐中间漆 面漆：聚硅氧烷防腐面漆	储罐内壁、洁净车间、环保要求高的石化装置	环保节能、低气味、安全施工、耐久性高	

4.1.4　环氧耐磨地坪

环氧耐磨地坪是一类以环氧树脂为基体，掺杂高硬度耐磨骨料（如金刚砂、石英砂、碳化硅等）制成的高强度地坪材料。传统环氧地面在使用过程中存在易起皮、车辆转弯时噪声大等问题。而耐磨地坪表面致密、坚硬，能够承受频繁的车辆和人员冲击摩擦，不仅使用寿命长，还具有防尘、防滑、噪声低和易清洁等特点，因此被广泛用于工业厂房、车间、仓库、停车场等对地坪耐久性和使用寿命要求较高的场所[46]。Xian 等[47]研究表明，在环氧树脂中引入不同粒径和含量的 Al_2O_3 颗粒对其力学性能和摩擦行为有显著影响：纳米级颗粒（30、80 nm）可通过均匀分散并在摩擦界面形成致密隔离膜，降低磨损率并改善韧性；而微米级颗粒（1 μm）能提升 22.6% 的硬度，摩擦系数和磨损率分别提升了 55.2% 和 90.0%，甚至出现界面脱落与塑性变形。可见，如何在骨料类型、粒径分布与含量之间实现平衡，兼顾耐磨性、韧性与使用寿命，仍是环氧耐磨地坪优化设计中面临的关键问题。

4.1.5　环氧胶泥

环氧胶泥是一种以环氧树脂为基体，加入多种硬质填料以及增韧剂、流变助剂等组成的高性能复合材料。与传统的水泥砂浆或沥青材料相比，环氧胶泥兼具黏结修补和密封防腐的特点，表现出优异的抗冲磨性和抗渗透性。混凝土抗渗试验中，传统的石蜡密封存在温度难以控制、密封效果差等问题，而采用环氧胶泥密封操作简单、无需加热，具有更高的密封性和试验成功率[48]。在实际工程中，环

氧胶泥常被用于填充缝隙、裂缝修补、钢结构与混凝土的黏结加固以及路桥病害处理。例如,当钢结构加固与混凝土柱拼接时,常在缝隙处填塞环氧胶泥,以增强结构的整体性和耐久性。

在三峡二期工程施工结束,并拆除模板后,导流底孔出现了气泡、挂帘、错台、蜂窝、麻面等缺陷[49]。为防止高速水流进一步冲刷底孔,导致磨损加剧并引发安全隐患,对19号孔的过流面采用环氧胶泥进行修补处理。修补后现场开展拉拔试验,结果显示其7 d龄期的平均黏结强度达到1.63 MPa,满足结构性能要求。所有过流面修补作业完成,经历一个冬季循环后,修补区域表面依然保持完好,未出现剥落或开裂现象,验证了环氧胶泥在复杂环境中的耐久性与适用性。未来,应继续提升环氧胶泥在潮湿界面的黏结强度以及防腐能力。

4.1.6 环氧基纤维增强复合材料(FRP)

环氧基纤维增强复合材料是以环氧树脂为基体,以碳纤维(CF)、玻璃纤维(GF)、芳纶纤维(AF)或玄武岩纤维(BF)为增强相,通过预浸料成型、液体成型、缠绕成型、拉挤成型、增材制造等工艺复合而成的一类高性能工程材料[50]。该类材料通常由三部分构成:环氧树脂基质、增强纤维和界面剂。其中,增强纤维起主承载作用;环氧树脂作为黏结剂固定和保护纤维,并传递载荷;界面剂用于改善二者之间的黏结性能,提高材料的机械性能[51]。在土木工程领域,碳纤维增强复合材料(CFRP)复合材料已逐渐成为钢材、混凝土等传统材料的重要补充与替代材料,被广泛应用于桥梁修复和改造、混凝土结构加固和抗震加固中[52]。Kim等[53]提出了一种由外部黏结碳纤维增强复合材料(CFRP)和超高性能混凝土(UHPC)填料组成的加固系统,用于提升阶梯式钢筋混凝土梁的弯曲性能,发现UHPC与普通混凝土之间的黏结强度在养护28 d后达到2.5 MPa,在阶梯深度为有效梁高的20%时,采用CFRP-UHPC加固的梁极限承载力达到52.8 kN,相比加固梁的42.9 kN提升了23.1%。在深海装备方面,Cao等[54]以玄武岩纤维(BF)为增强相,制备了一种用于采矿设备加载的低密度、高抗压强度的轻质浮力材料,当BF的含量为4%、长度为12 mm时,环氧合成泡沫的抗压强度提高到6.93 MPa,密度仅为0.316 g/cm^3,满足深海作业的耐压和浮力要求。如图6所示,Ma等[55]将多元SiO_2涂层辅助接枝有机磷到玻璃纤维(GF)上,开发了一种同时具有阻燃性和机械性能的环氧树脂/玻璃纤维(EP/GF)复合材料,其具有特殊的分子结构,氢键和化学键与EP链具有较强的界面黏附力,使其拉伸强度和冲击强度分别提高了35%和60%,为综合性能优异的高分子复合材料提供了研究思路。不同纤维赋予材料差异化性能,使FRP能够针对不同工程需求提供多样化解决方案,未来应通过界面改性和多功能化设计来突破性能瓶颈。

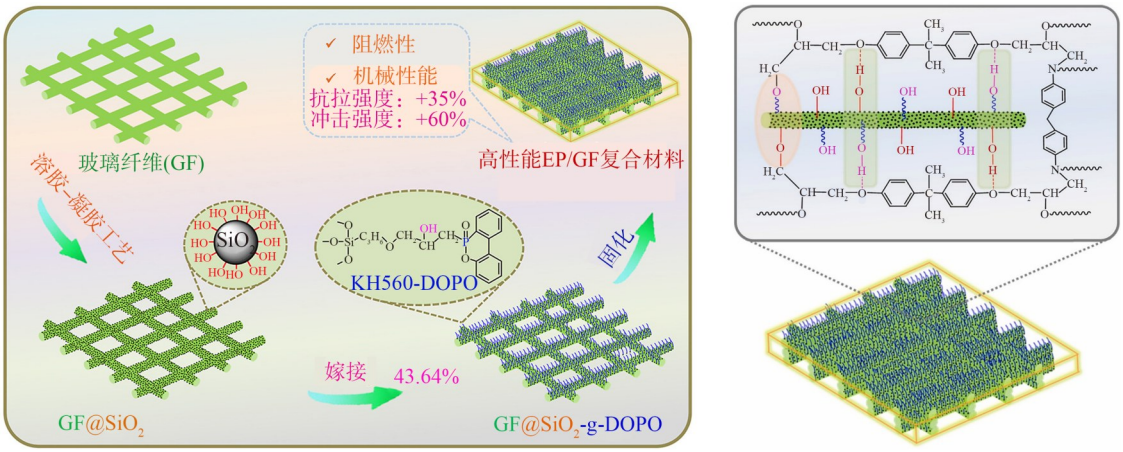


图6 高性能EP/GF复合材料制备过程及分子结构示意

Fig. 6 Schematic diagram of the preparation process and molecular structure of high-performance EP/GF composite materials

4.1.7 模型环氧与3D打印建筑造型材料

随着建筑造型艺术与智能制造技术的不断融合,环氧树脂材料在建筑造型与成型制造领域展现出新的应用潜力。其中,模型环氧作为一种双组分高强可雕刻环氧材料,兼具优异的柔韧性与可塑性,广泛应用于仿小树枝、细藤条,适用于精细纹

理、细枝藤条的造型，用于克服容易断裂的造型以及水泥基塑性材料无法胜任的场景[56]。目前，国内企业，如北京纽维逊建筑工程技术有限公司已经推出雕刻型、柔性型和超柔型等系列产品，基本覆盖了建筑造型的多样需求。然而，从学术与工程研究角度来看，针对模型环氧的研究相对匮乏，其力学性能优化、耐候性提升、长期耐久性及标准化应用等方面有待探索。

同时，3D 打印智能制造技术为环氧树脂材料在建筑造型与结构构件中的应用提供了新的技术路径。Wang 等[57]采用直接墨水书写（DIW）3D 打印技术，制造具有不同梯度间距和旋转角度的仿生渐变陶瓷样品，在梯度间距 Δd=0.08、旋转角 12°时的最大抗弯强度达到 63.35 MPa，在 Δd=0.1、旋转角 12°时的最高断裂韧性为 2 MPa/m^2，展示了刚柔耦合仿生环氧材料的结构优势。图 7 为该材料的制备工艺。研究表明，基于环氧体系的 3D 打印材料能够在建筑装饰构件与造型构件中实现精准控制与结构优化，与模型环氧的精细塑型特性形成互补，共同推动环氧材料在建筑造型领域的“精细雕塑”与“智能制造”。

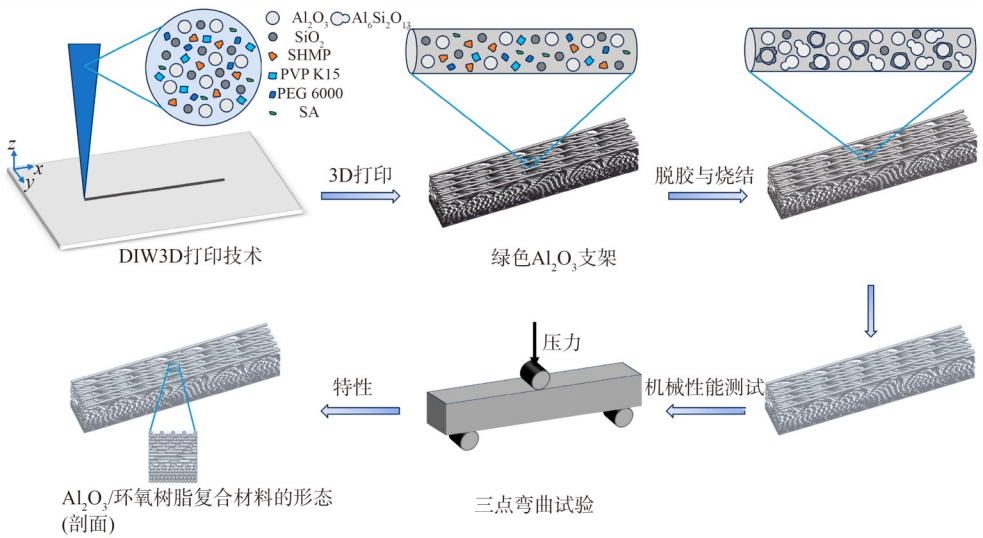


图 7　刚柔耦合仿生梯度陶瓷-环氧复合材料制备工艺示意

Fig. 7　Schematic illustration of the preparation process of rigid-flexible coupled biomimetic gradient ceramic - epoxy composites

4.2　特种环氧基工程材料

随着工程领域对材料性能的要求不断提高，传统环氧体系已难以满足极端环境、特殊工况及多功能化的需求。基于此，研究者开发出一系列具有特殊功能的特种环氧材料。本节重点介绍水下固化、高温耐热、低负温施工及超支化等特种环氧基工程材料的研究进展与典型应用。

4.2.1　水下环氧材料

水工建筑和海洋工程长期处于潮湿和水流冲刷环境中，常会出现各种腐蚀、裂缝与剥落破坏等损伤，若不能及时加固修复，将严重缩短设备的使用寿命[58]。传统环氧体系在水下施工中存在固化受阻、黏结强度下降等问题，难以满足复杂工程需求。针对这一难点开发了具有优异耐水性、耐腐蚀性和高强度的水下环氧基工程材料，能够在水下环境中固化并保持良好的黏结能力。以日利亚凯恩吉水电站为例[59]，采用 HK-UW-1 水下环氧砂浆对溢洪道中出现的裂缝、剥落、冲坑等缺陷进行了修复，其 28 d 后抗压强度大于 80 MPa，通过调控材料配比，有效延长了水下施工可操作时间约 2~4 倍，修复效果显著。此外，如图 8 所示，Li 等[60]研究发现，儿茶酚改性环氧胶黏剂（CEMA）在 50 ℃水中浸泡 32 d 后仍能保持 73.9% 的原始黏结强度，而茶酚改性环氧胶（PMEA）和纯环氧胶（EA）仅分别保持 59.8% 和 11.4%，CEMA 在不锈钢上的水下黏结强度（13.0 MPa）显著优于两个对照组（0.0 MPa 和 1.2 MPa）。但材料在长期浸泡和水流冲击条件下的耐久性仍旧不足，缺乏面向工程应用的结构-性能-环境之间的定量关联模型。未来可引入仿生黏附单元（如多巴胺、儿茶酚基团）或多功能纳米填料

(石墨烯、氮化硼)等,来提升界面黏结强度和耐久性。

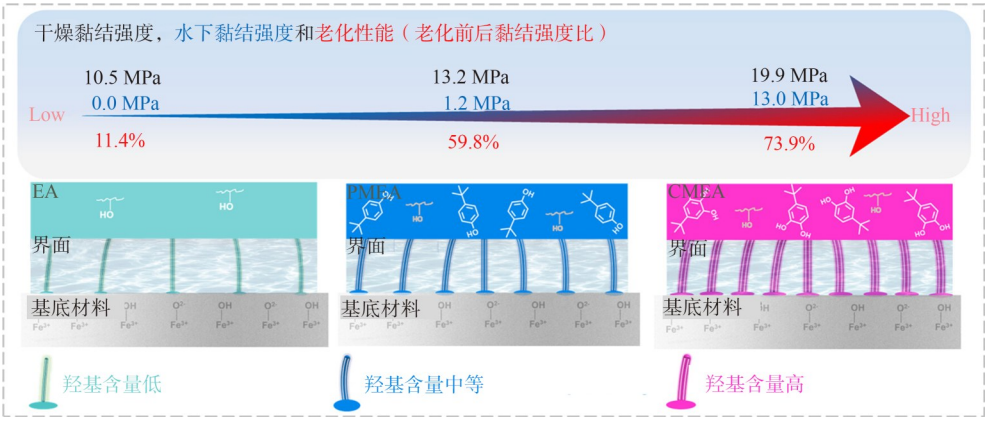


图8 纯环氧胶(EA)、茶酚改性环氧胶(PMEA)和儿茶酚改性环氧胶(CMEA)结构示意[60]

Fig. 8 Schematic diagram of pristine epoxy adhesive (EA), phenol-modified epoxy adhesive (PMEA), and a catechol-modified epoxy adhesive (CMEA)

4.2.2 耐高温环氧材料

在航天航空、海洋设备与工程建筑等领域,材料不仅需要具备基本的力学性能与耐化学腐蚀性,还需要优异的耐高温性能和热稳定性。传统环氧体系在高温下易分解,强度会显著降低,因此耐高温特种环氧工程材料的开发成为重要的研究热点。

Wang等[61]制备了一系列以环氧基和胺基为端部的聚合物,固化得到的胶黏剂在484 ℃下仍能保持95%的质量,炭化率为62%,剪切强度为48.7 MPa,在450 ℃下加热1 h,聚合物仍表现出17.8 MPa的良好剪切强度。Peng等[62]使用双马来酰亚胺树脂(BMI)和邻位二烯改性的双酚A树脂固化合成的具有独特结构和高交联密度的聚合物,T_g高达268 ℃,采用一体成型工艺合成出三明治复合材料,在180 ℃下弯曲强度提高了42.8%,抗压强度可与航空航天级聚甲基丙烯酰亚胺(PMI)泡沫相当。

4.2.3 低负温环氧材料

我国北方地区冬季温度较低,风电混塔施工温度最低可达-25 ℃。然而,传统的环氧树脂体系在低温(尤其是零下环境)环境下,分子网络被冻结,表现出黏度急剧增大、固化不完全、韧性和抗冲击性能降低等问题,严重影响现场施工。为提高环氧材料的低负温适应性,研究者通过引入低温固化剂、增韧剂和活性稀释剂等方法,降低材料黏度、改善脆性,从而实现了低负温施工的良好加工性和服役性能。例如,王先前等[63]开发的环氧胶黏剂可满足低温-5~10 ℃施工要求,采用改性聚硫醇作为固化剂,即使在低温下仍然具有反应活性,加入活性稀释剂降低黏度后,使材料可操作时间达65 min,40 mm×40 mm×160 mm的长方体大试件抗压强度为73.4 MPa,直径10 mm、高25 mm的圆柱体小试块抗压强度为64.8 MPa。李博洋等[64]对比研究了国内4种低负温结构拼接胶在-5 ℃下的性能,结果表明,固化剂含量较高的结构拼接胶的流挂长度仅0.1 mm,垂直施胶过程中基本不会发生流挂现象,但可操作时间较短,只有18 min。尽管研究学者做了大量的研究,现有环氧材料仍难以满足在-25 ℃下的施工要求,未来应继续向更低温的固化条件攻克。

4.2.4 超支化环氧材料

超支化环氧材料是近年来发展迅速的一类特种环氧树脂,通过将超支化聚合物引入环氧树脂,形成高度支化、具有丰富分子末端基团和大量内部空腔的拓扑结构,如图9所示。相比于传统线性环氧树脂体系,超支化环氧材料具有更低的黏度、更好的加工流动性和更优异的力学性能。Zhang等[65]以双酚A和偏苯三酸酐为前驱体,通过酯化反应和官能团渗入合成超支化环氧树脂,固化后分子链之间高度交联形成类似于“笼子”的三维网络结构,并在中间形成“多孔”拓扑网状结构,渗透在环氧树脂基体,增韧效果显著,有望成为碳纤维复合材料、混凝土修补等领域的优良材料。

4.3 新型绿色环保类环氧基工程材料

传统溶剂型环氧树脂在生产和使用中挥发大量有机溶剂(VOC)的问题逐渐凸显,随着人们环保意识和安全意识的增强,这限制了环氧树脂在胶黏剂、涂料等行业的大规模发展。目前应用最广泛的

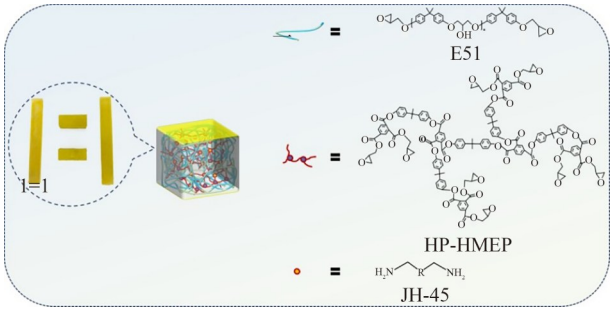


图 9　超支化环氧材料的网络结构[65]

Fig. 9　The network structure of hyperbranched epoxy materials[65]

热固性环氧树脂是双酚 A 型环氧树脂(DGEBA),其使用量约占树脂市场的 90%,该类树脂通常由双酚 A(BPA)和环氧氯丙烷(ECH)在碱性条件下反应合成,而双酚 A 具有一定的生物毒性。此外,传统热固性环氧树脂及其固化剂高度依赖石油基原料,寻找可再生资源代替石油资源对于缓解环境压力、推动环氧树脂行业绿色低碳转型至关重要。

4.3.1　水性环氧树脂

水性环氧树脂是以水为分散介质的环氧树脂体系,不含或只含少量有机溶剂。它不仅具有低 VOC 排放、施工安全性高等环保优势,还保留了传统环氧树脂优异的附着力、机械强度,已成为国内外研究热点。目前制备水性环氧树脂的主要方法有外加乳化剂法、自乳化法和固化剂改性法[66]。水性环氧树脂在性能上虽具有环保性与优异的黏结强度,但因其分散介质为水,相较传统溶剂型环氧树脂的质地较脆、耐磨性较差,并且其亲水基团会形成极性通道加速水的渗透,降低涂层的防腐性能[67]。通过引入纳米材料,如石墨烯、二氧化硅和氮化硼等填料,构建“迷宫效应”阻隔层,产生更曲折的转移路径来阻止腐蚀性物质的扩散。Mao 等[68]采用甘氨酸官能化的 $T_3C_2T_X$(GT)制备环氧复合涂层,良好的分散性使其填充环氧树脂固化留下的孔隙和孔洞,增强涂层的耐腐蚀性,将阻抗提高了 3 个数量级。此外,凭借其优良的黏结性能、较低的固化收缩率以及不挥发有机化合物(VOC)等特点,水性环氧树脂在沥青混合料改性中的应用日益受到重视,被广泛用作道路与桥梁结构中的路黏层、坑槽修补、雾封层预养护等工程领域[69]。

然而,水性体系在成膜过程中易受到湿度和温度的影响,水分的存在可能导致膜层结构疏松、致密性不足,降低材料的力学性能和耐水性、耐腐蚀性。为进一步扩大水性环氧树脂在工业领域的应用,还需解决其在低温固化、高温和潮湿环境中操作时间延长等问题,完善储存稳定性、耐久性评估和应用标准体系,推动发展更先进的制造工艺,实现大规模量产和使用。

4.3.2　生物基环氧树脂

在此背景下,生物基环氧树脂作为一种以植物油类、酚类、糖类以及天然树脂等可再生资源为原料,通过化学改性合成得到的具有环氧基团的新型绿色环保类材料,受到越来越多研究者的关注。如图 10 所示,Yang 等[70]由环氧大豆油(ESO)和松香衍生物-富马罗哌酸(FPA)合成了一种新型全生物基环氧玻璃体聚合物,由于动态共价键交换,材料表现出优异的自我修复、形状记忆和再处理能力,T_g 为 65 ℃,抗拉强度达到 16 MPa。Nikita 等[71]利用环氧化亚麻籽油(ELO)和单宁酸(TA)合成一种全生物基热固性环氧树脂材料,具有 146 ℃的高玻璃化转变温度,弯曲模量为 2986 MPa、弯曲强度为 72 MPa,良好的热稳定性和机械性能,使其成为传统双酚 A 型环氧树脂的重要替代品。与传统环氧树脂相比,部分生物基环氧树脂在力学性能、热稳定性能及环境友好性方面更优异。然而,目前生物基环氧树脂在实际工业生产中仍面临诸多挑战。一方面,其原料多来源于天然产物,受季节性、地域性影响较大;另一方面,生物基单体的提取和改性过程较为复杂,技术门槛高,加工效率低,难以满足大规模生产的需求。因此未来研究应致力于改进生物质的分离纯化技术,降低原材料和生物质单体的价格,实现大规模经济化生产,将生物基环氧树脂应用到实际工程领域中。

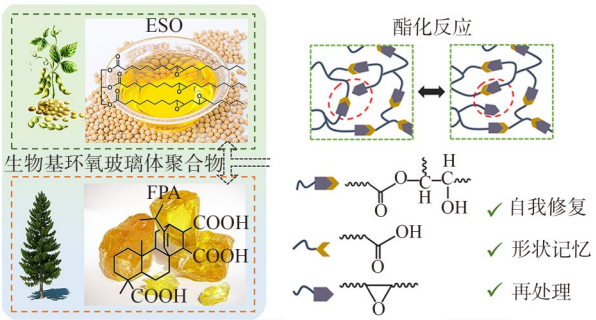


图 10　生物基环氧玻璃体聚合物的制备

Fig. 10　Preparation of bio-based epoxy vitrimer

5　环氧树脂及环氧基工程材料标准化发展历程

随着环氧树脂在日常生活和工程领域的广泛应用,其产品性能、使用安全和工程可靠性的重要性不

断提高,标准化工作也不断完善。环氧树脂及环氧基工程材料相关标准主要可以划分为产品、性能测试方法与工程应用相关标准三大类。表5介绍了环氧基工程材料的产品标准,表6主要聚焦于环氧树脂本体及其衍生产品的各种物理化学性质及其测试方法,表7则面向特定工程场景汇总了相应的应用技术标准。

表5 环氧基工程材料产品标准[72-81]

Table 5 Epoxy resin product specification

标准名称	应用范围	主要性能指标
HG/T 5248—2017《风力发电机组叶片用环氧结构胶黏剂》[72]	适用于风力发电机组叶片用环氧结构胶黏剂	拉伸强度:-40 ℃下,≥55 MPa;23 ℃/50%RH下,≥50 MPa;50 ℃下,≥30 MPa 断裂拉伸应变:-40 ℃下,≥1.3%;23 ℃/50%RH下,≥1.8%;50 ℃下,≥3%
GB/T 44543—2024《预制混凝土节段拼装用环氧胶粘剂》[73]	适用于桥梁、风电、地下结构等工程中预制混凝土节段拼装用环氧胶黏剂的生产、检验和使用	压缩强度≥80 MPa;抗拉强度≥30 MPa 抗流挂性能≥10 mm 钢对混凝土正拉黏结强度≥3 MPa
JC/T 2379—2016《地基与基础处理用环氧树脂灌浆材料》[74]	适用于水利水电、交通、采矿、工业及民用建筑等领域的地基与基础加固、防渗等处理用环氧树脂	抗压强度≥50 MPa;拉伸剪切强度≥7 MPa 抗拉强度≥12 MPa;干黏结强度≥3.5 MPa 湿黏结强度≥3 MPa;抗渗压力≥1.5 MPa
JC/T 1041—2007《混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料》[75]	适用于修补混凝土裂缝用的环氧树脂灌浆材料	抗压强度:Ⅰ型,≥40 MPa,Ⅱ型,≥70 MPa; 抗拉强度:Ⅰ型,≥10 MPa,Ⅱ型,≥15 MPa; 拉伸剪切强度:Ⅰ型,≥5 MPa;Ⅱ型,≥8 MPa; 黏接强度:干粘接Ⅰ型,≥3 MPa;Ⅱ型,≥4 MPa; 湿黏接:Ⅰ型,≥2 MPa;Ⅱ型,≥2.5 MPa
JC/T 907—2018《混凝土界面处理剂》[76]	适用于改善砂浆层与水泥混凝土、加气混凝土或以粉煤灰、石灰、页岩、陶粒等为主要原材料制成的砌块或砖等材料基面黏结性能的水泥基界面剂	拉伸黏结强度: 未处理:Ⅰ型,≥0.6 MPa;Ⅱ型,≥0.5 MPa 处理后(浸水、耐热、冻融循环、耐碱):Ⅰ型,≥0.5 MPa;Ⅱ型,≥0.4 MPa 晾置时间20 min,Ⅱ型且拉伸黏结强度≥0.5 MPa 横向变形≥2.5 mm
JG/T 340—2011《混凝土结构工程用锚固胶》[77]	适用于混凝土结构工程用锚固胶的生产、检验和适用	钢-钢拉伸抗剪强度标准值:A级胶,≥16 MPa;B级胶,≥13 MPa; 约束拉拔条件下带肋钢筋与混凝土的黏结强度: C30混凝土:A级胶,≥11 MPa;B级胶,≥8.5 MPa C60混凝土:A级胶,≥17 MPa;B级胶,≥14 MPa; 下垂流度≤10 mm(无滴落)
JC/T 2630—2021《环氧树脂灌注砂浆》[78]	适用于设备基础灌浆、地脚螺栓锚固、结构修补加固、桥梁支座灌浆等使用的环氧树脂灌注砂浆	抗压强度:1 d,≥30 MPa;7 d,≥80 MPa;28 d,≥90 MPa 抗折强度:1 d,≥10 MPa;7 d,≥20 MPa;28 d,≥25 MPa 流动度:初始值(≥230 MPa);30 min(≥200 MPa); 收缩率24 h(≤0.1%)
Q/GDDB 13—2017《HK-EQ环氧胶泥》[79]	适用于HK-EQ环氧胶泥	抗压强度:3 d,≥40 MPa;28 d,≥65 MPa 抗拉强度:28 d,≥12 MPa 干燥黏结强度:3 d,≥3 MPa;28 d,≥4 MPa(或基础破坏) 潮湿黏结强度:28 d,≥2 MPa
HG/T 4759—2014《水性环氧树脂防腐涂料》[80]	适用于金属基材用水性环氧树脂防腐涂料,不适用于水性环氧富锌底漆	耐水性(240 h):不起泡、不剥落、不生锈、不开裂; 耐酸性(50 g/L,H_2SO_4,24h):无异常 耐碱性(50 g/L,NaOH,168h):无异常 耐湿热性(168 h):不起泡、不剥落、不生锈、不开裂 耐盐雾性(300 h):不起泡、不剥落、不生锈、不开裂
JC/T 2748—2023《环氧磨石》[81]	适用于地坪工程施工所用的环氧磨石	抗压强度≥60 MPa;抗折强度≥20 MPa 耐磨性(750 g,500 r)≤0.050; 抗冲击性:无裂纹;防滑性:阻滑值≥50

综上,当前环氧基工程材料标准体系已基本涵盖从产品、材料性能测试到工程应用的各环节。但随着工程环境的日益复杂和特种环氧材料不断涌现,现有标准仍存在滞后与缺失。例如,模型环氧缺乏相应产品规范,工程应用技术标准数量较少,部分现行标准如HB 5398—1988《金属胶接结构胶粘剂规范》、GB/T 1733—1993《漆膜耐水性测定法》等发布年份较早,难以满足新需求。未来,标准化工作应在环保性能、极端环境以及智能制造等方面进一步完善,为环氧基

表 6　环氧基工程材料性能测试方法标准[82-88]

Table 6　Epoxy material usage specifications and testing standards

标准名称	主要内容
GB/T 2567—2021《树脂浇铸体性能试验方法》[82]	规定了测定热固性树脂浇铸体的拉伸性能、压缩性能、弯曲性能、简支梁冲击韧性、扭转、耐碱性和折光率的方法
GB/T 16777—2008《建筑防水涂料试验方法》[83]	规定了建筑防水涂料的标准试验条件、涂膜制备、固体含量、耐热性、黏结强度、潮湿基面黏结强度、拉伸性能、撕裂强度、定伸时老化、加热伸缩率、低温柔性、不透水性、干燥时间等性能的试验方法
GB/T 22314—2008《塑料 环氧树脂 黏度测定方法》[84]	适用于液态环氧树脂黏度的测定
GB/T 7124—2008《胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料)》[85]	规定了刚性材料对刚性材料胶接件的拉伸剪切强度的测定方法
GB/T 7750—1987《胶粘剂拉伸剪切蠕变性能试验方法(金属对金属)》[86]	测试在温度、拉伸剪切应力和时间的综合影响下,胶接金属与金属用的胶黏剂的蠕变性能
GB 33372—2020《胶粘剂挥发性有机化合物限量》[87]	适用于溶剂型、水基型、本体型胶黏剂中挥发性有机化合物含量的限定
JGJ/T 1770—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》[88]	适用于以无机凝胶材料、细集料、掺合料为主要材料,用于工业与民用建(构)筑物的砌筑、抹灰、地面工程及其他用途的建筑砂浆的基本性能试验

表 7　环氧基工程材料工程应用技术标准[89-97]

Table 7　Engineering application standards for Epoxy materials

标准名称	应用范围	主要性能指标
GB 50728—2011《工程结构加固材料安全性鉴定技术规范》[89]	适用于结构加固工程中应用的材料及制品的安全性检验与鉴定	包括结构胶黏剂、裂缝注浆料、结构加固用水泥基灌浆料、结构加固用聚合物改性水泥砂浆、纤维复合材料、钢丝绳、合成纤维改性混凝土和砂浆、钢纤维混凝土和后锚固连接件的鉴定合格指标
HB 5398—1988《金属胶接结构胶粘剂规范》[90]	规定了金属胶接结构胶黏剂应遵循的一般原则和最低强度要求,作为航空结构胶黏剂科研、设计、生产、采购和使用的通用技术标准	拉伸剪切强度:(23±5)℃:30 MPa;耐介质 30 d 后:27 MPa;喷盐雾 30 d 后:25 MPa; 蠕变强度:(23±5) ℃:11.0 MPa,200 h:最大变形 0.39 mm; 90°剥离强度、(23±5)℃:8 MPa
SL/T 807—2021《水工建筑物环氧树脂灌浆材料技术规范》[91]	适用于水工建筑物地基处理、混凝土缺陷修复灌浆中应用环氧灌浆材料的技术、施工及质量检查	抗压强度:28 d,≥40 MPa 抗拉强度:28 d,≥10 MPa 抗渗性能(试件厚度 30 mm)≥1.5 MPa
DB 11/T346—2022《建筑工程用界面处理剂应用技术规程》[92]	适用于新建、改建和扩建工业和民用建筑工程的界面处理剂选用、施工及质量检验	根据不同工程部位或基层种类选取合适的界面处理剂,按规定施工,界面处理剂的材料品种、质量应符合国家现行标准及本规程的要求
GB 50367—2013《混凝土结构加固设计规范》[93]	适用于钢筋混凝土结构构件以及结构胶种植带肋钢筋和全螺纹螺杆的后锚固设计及植筋胶安全性能鉴定	抗压强度≥60 MPa 抗弯强度≥50 MPa,且不得呈碎裂状破坏 劈裂抗拉强度≥8.5 MPa 钢对钢(钢套筒法)拉伸抗剪强度标准值≥16.0 MPa; 钢对钢(钢片单剪法)拉伸抗剪强度平均值≥6.5 MPa
DL/T 5193—2021《环氧树脂砂浆技术规程》[94]	适用于水利水电工程混凝土建筑物修补和防护用环氧树脂砂浆,规定了环氧树脂砂浆材料、施工、质量控制与检验、安全与环境保护的要求	抗压强度:R 型,≥40 MPa;P 型,≥60 MPa; 拉伸强度:R 型,≥6 MPa;P 型,≥10 MPa; 抗冲击性:8 次; 黏结强度:干基面,≥3 MPa;潮湿基面,≥2 MPa
SY/T 0457—2019《钢质管道液体环氧涂料内防腐技术规范》[95]	适用于输送介质温度不超过 80 ℃的原油、天然气、油气田工业水的钢质管道液体环氧内防腐层的设计、涂敷施工及检验	耐冲击性(25 ℃)≥6 J 耐弯曲(25 ℃,1.5°)涂层无裂纹 附着力(拉开法)≥10 MPa 铅笔硬度≥2 H 耐化学介质(90 d):10%H_2SO_4、10%NaOH、3%NaCl时防腐层无起泡,无脱落,无开裂
GB 50608—2020《纤维增强复合材料工程应用技术标准》[96]	适用于纤维增强复合材料在结构加固及新建结构中的设计与施工	碳纤维复材板 CFP: 抗拉强度:CFP2000,≥1800 MPa;CFP2300,≥2300 MPa 弹性模量:CFP2000,≥140 GPa;CFP2300,≥150 GPa 极限应变:CFP2000,≥1.4%;CFP2300,≥1.4% 玻璃纤维复材板 GFP800: 抗拉强度≥800 MPa;弹性模量≥40 GPa;极限应变≥2% 玄武岩纤维复材板 BFP1000: 抗拉强度≥1000 MPa;弹性模量≥50 GPa;极限应变≥2%
T/FJFA 005—2022《环氧磨石地坪施工及验收规范》[97]	适用于新建、扩建、改建和既有建筑工程中室内环氧磨石地坪装饰装修设计、施工及验收	抗压性能:配套底涂材料,260 MPa;胶凝材料,245 MPa; 拉伸性能:配套底涂材料,>25 MPa;胶凝材料,N20 MPa; 弯曲强度:配套底涂材料,240 MPa;胶凝材料,>31 MPa; 邵氏硬度:配套底涂材料,75/65;胶凝材料,>75; 挥发性有机化合物:配套底涂材料,<60 g/L

工程材料的绿色化、高性能化和智能化发展提供有力支撑。

6 总结与展望

环氧树脂及环氧基工程材料的发展已较为成熟,产品及其应用已较为细分,覆盖胶、浆、膏、泥(砂浆)、固等形态,材料类型从常规结构胶、防腐涂料、环氧灌浆料、纤维复材拓展到水下、高温、低负温等特种环氧基工程材料体系。在建筑、交通、城市更新及海洋工程等领域,广泛应用于黏结、加固、修补、防腐防护、耐磨和景观造型等工程场景,展示出优异的性能和广阔的应用前景。然而,随着工程领域应用场景日益复杂,应用环境条件日趋严苛,工程上对环氧基工程材料提出了"高强化、功能化、高适应化、绿色化"发展需求。结合全文的分析和讨论,针对环氧基工程材料的未来研究和发展,提出以下几点建议:

1)突破环氧材料当前力学性能瓶颈。现有环氧基工程材料抗压强度一般为60~100 MPa,仍难以满足大型节段桥梁或风电管片预制混凝土构件拼接、重载地坪高强耐磨、强动载高应力设备基础安装灌浆、城市更新高强粘贴加固等高强度工程需求。未来研究应继续向高强化方向发展,推动环氧材料抗压强度突破120 MPa,并研究多种高强韧协同改性机制,突破其力学性能瓶颈。

2)发展功能化环氧基工程材料体系。开发柔性、超高强黏结、超低黏高渗透、高耐腐蚀耐老化、可3D打印成型等体系,以应对景观装饰、城市更新、热带岛礁和西部高原工程防腐等场景需求,注重环氧材料开发中结构-性能-新应用三位一体的系统性。此外,应提升固化行为的精准可调性。现有固化体系多依赖单一热固化,难以兼顾"长效操作"与"快速施工"。未来应发展响应型潜伏固化剂、双响应(光/热)的触发型体系,实现"长效操作、瞬时触发固化"并存的多功能固化特性。

3)增强极端环境适应性。传统环氧体系在水下、高温以及低负温等极端环境中,均存在固化困难和强度降低等问题。未来研究应继续开发水下施工体系、耐高温和高温可控缓固化体系、低负温自触发固化体系,开发适应水利水电海工工程、沙戈荒特种构筑、夏季与冬季和极地环境的高适应性环氧基工程材料。

4)开发新型绿色环保类环氧基工程材料并扩大应用。在传统环氧体系的基础上,进一步向低VOC的水性环氧树脂和生物基环氧树脂拓展,并开发全反应性溶剂环氧胶、无溶剂环氧防腐涂料等,减少有机溶剂的排放,提高人体和环境友好性。

5)完善环氧基工程材料标准体系。与环氧基工程材料的功能化、高适应化、绿色化发展配套,应加快强化与之匹配的材料产品、性能测试方法、工程应用技术、特征性能评价相关的标准化建设工作,构建完善的各级标准体系,及时填补发展中的标准空白,规范保障环氧材料细分产业和领域的稳健发展。

参 考 文 献

[1] PRILESCHAJEW N. Oxydation ungesättigter verbindungen mittels organischer superoxyde[J]. Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 1909, 42(4): 4811-4815.

[2] MAY C. Epoxy resins: chemistry and technology[M]. 2nd edition. Boca Raton: Routledge, 2018.

[3] 朱红军,王建军. 环氧树脂的生产、消费及国内外生产技术进展[J]. 中国氯碱, 2002(9): 23-24.

[4] MI X, LIANG N, XU H, et al. Toughness and its mechanisms in epoxy resins [J]. Progress in Materials Science, 2022, 130: 100977.

[5] 范学忠, 张蓓. 环氧树脂产业发展现状及趋势[J]. 中国石油和化工经济分析, 2014(5): 56-58.

[6] 陈平, 王德中. 环氧树脂及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

[7] 张玉龙, 唐磊. 环氧胶黏剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[8] THOMAS R, DURIX S, SINTUREL C, et al. Cure kinetics, morphology, and miscibility of modified DGEBA-based epoxy resin-effects of a liquid rubber inclusion [J]. Polymer, 2007, 48(6): 1695-1710.

[9] 刘凤丹. 柔性链段和功能化石墨烯改性环氧树脂的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.

[10] 罗涛. 邻苯二甲腈改性环氧树脂及其碳纤维增强复合材料的性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.

[11] JIN F L, LI X, PARK S J. Synthesis and application of epoxy resins: A review [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 29: 1-11.

[12] TARAFDAR A. UV-induced frontal polymerization for optimized in-situ curing of epoxy resin for excellent tensile and flexural properties[J]. Composites Communications, 2024, 46: 101832.

[13] 雷运波, 蒋懋, 陈辉国, 等. 微波固化环氧树脂混凝土路面抢修材料的力学性能[J]. 建筑材料学报, 2013(4): 599-602.

[14] 岳丹. 端羧基丁腈橡胶改性环氧树脂的结构与性能[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.

[15] 赵玉春, 刘浩, 李智慧, 等. 环氧树脂中温潜伏型固化剂研究进展[J]. 热固性树脂, 2019, 34(4): 66-70.

[16] 王志远，陈刚，魏化震，等. 潜伏性改性咪唑低温固化剂/环氧树脂体系的性能[J]. 工程塑料应用，2023，51(8)：154-159.

[17] 陈青，宫大军，魏伯荣，等. 端羧基丁腈橡胶改性环氧树脂的研究[J]. 绝缘材料，2011，44(2)：30-33.

[18] MI X，LIANG N，XU H，et al. Toughness and its mechanisms in epoxy resins [J]. Progress in Materials Science，2022，130：100977.

[19] WISE C W，COOK W D，GOODWIN A A. CTBN rubber phase precipitation in model epoxy resins[J]. Polymer，2000，41(12)：4625-4633.

[20] CHIKHI N，FELLAHI S，BAKAR M. Modification of epoxy resin using reactive liquid (ATBN) rubber [J]. European Polymer Journal，2002，38(2)：251-264.

[21] DONG L，ZHOU W，SUI X，et al. A carboxyl-terminated polybutadiene liquid rubber modified epoxy resin with enhanced toughness and excellent electrical properties [J]. Journal of Electronic Materials，2016，45(7)：3776-3785.

[22] SINH L H，SON B T，TRUNG N N，et al. Improvements in thermal，mechanical，and dielectric properties of epoxy resin by chemical modification with a novel amino-terminated liquid-crystalline copoly (ester amide) [J]. Reactive & Functional Polymers，2012，72(8)：542-548.

[23] BAGHERI R，MAROUF B T，PEARSON R A. Rubber-toughened epoxies：a critical review [J]. Polymer Reviews，2009，49(3)：201-225.

[24] 高原. 环氧树脂/端羧基丁腈橡胶复合材料的制备及固化动力学研究[D]. 长春：长春工业大学，2018.

[25] SHI J W，CAO W H，XU B L. Effect of liquid rubber modification on the bond behavior of externally bonded FRP laminate-concrete interface under dynamic loading[J]. Journal of Building Engineering，2020，32：101533.

[26] 曹璐. 环氧树脂增韧研究进展[J]. 中国胶粘剂，2019，28(5)：49-52.

[27] GHAMARPOOR R，JAMSHIDI M，MOHAMMADPOUR M. Achieving outstanding mechanical/bonding performances by epoxy nanocomposite as concrete - steel rebar adhesive using silane modification of nano SiO_2[J]. Scientific Reports，2023，13(1)：9157.

[28] 郑亚萍，郑国兵，陈超，等. 一种韧性固化剂的制备及其性能[J]. 高分子材料科学与工程，2014，30(4)：162-167.

[29] YI J，LI S，XIA J，et al. Preparation and properties of polyether aliphatic polymerized amide as a vegetable oil-based epoxy curing agent[J]. ACS Omega，2019，4(4)：6238-6244.

[30] 谭延方，赵海鹏，赵亚奇，等. 新型增韧环氧树脂固化剂的合成及性能研究[J]. 中国胶粘剂，2022，31(4)：21-27.

[31] ZHANG P，KAN L，ZHANG X，et al. Supramolecularly toughened and elastic epoxy resins by grafting 2-ureido-4[1H]-pyrimidone moieties on the side chain [J]. European Polymer Journal，2019，116：126-133.

[32] BAO Q，WANG B，LIU Y，et al. Epoxy resin flame retarded and toughened via flexible siloxane chain containing phosphaphenanthrene [J]. Polymer Degradation and Stability，2020，172：109055.

[33] FRANCIS B，THOMAS S，JOSE J，et al. Hydroxyl terminated poly (ether ether ketone) with pendent methyl group toughened epoxy resin：miscibility，morphology and mechanical properties [J]. Polymer，2005，46(26)：12372-12385.

[34] YANG G，ZHENG B，YANG J P，et al. Preparation and cryogenic mechanical properties of epoxy resins modified by poly (ethersulfone)[J]. Journal of Polymer Science Part A：Polymer Chemistry，2008，46(2)：612-624.

[35] YAN C，SONG L，WANG H，et al. Preparation of reactive phenolphthalein poly (aryl ether ketone) for toughening epoxy resin：Synthesis，characterization，and performance evaluation [J]. Reactive and Functional Polymers，2024，199：105911.

[36] 许大玉. 基于纳米颗粒改性的环氧树脂胶粘剂力学性能研究[D]. 大连：大连理工大学，2022.

[37] 姜云，李波，亓帅，等. 预制构件拼接胶在南京长江第五大桥节段梁拼接密封防水工程中的应用与研究[J]. 中国建筑防水，2021(1)：14-18.

[38] KE L，ZHANG R，FENG Z，et al. Performance evolution of epoxy adhesive and CFRP-steel epoxy-bonded joints subjected to hygrothermal exposure[J]. Construction and Building Materials，2024，429：136445.

[39] WANG W，ZHAO W，ZHANG J，et al. Epoxy-based grouting materials with super-low viscosities and improved toughness[J]. Construction and Building Materials，2021，267：121104.

[40] KONG M，LIU C，TANG B，et al. Improved mechanical and thermal properties of trifunctional epoxy resins through controlling molecular networks by ionic liquids[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2019，58(19)：8080-8089.

[41] LI X，WANG F，CAI X，et al. A porous IPN-structured polyurethane/epoxy grouting material with low viscosity，high strength and low volume shrinkage[J]. Construction and Building Materials，2024，449：138312.

[42] 李龙梓，彭先兵，孙静娴，等. 材料组份对高强环氧灌浆料性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品，2024(9)：13-16.

[43] 陈肖寒，白杨，王志超，等. 低表面处理环氧防腐底漆的制备及其耐蚀性研究[J]. 中国腐蚀与防护学报，2023，43(5)：1126-1132.

[44] 张治财，齐福刚，赵镍，等. 环氧树脂防腐涂料的研究进展及发展趋势[J]. 功能材料，2021，52(6)：6069-6075.

[45] ZHANG T，ZHANG T，HE Y，et al. Long-term atmospheric aging and corrosion of epoxy primer-coated aluminum alloy in coastal environments[J]. Coatings，2021，11(2)：237.

[46] 杨喜丽，郑鸿芳，陈宙飞. 金刚砂耐磨地坪：CN105155818A[P]. 2015-12-16.

[47] XIAN G，QI X，LI J，et al. Effect of particle size and content of Al_2O_3 on friction behavior and wear mechanism of epoxy resin composite[J]. Polymer Composites，2025，42(1)：1-11.

[48] 尚守平，吕军在. 环氧树脂胶泥在混凝土抗渗试验中的应用[J]. 建筑结构，2016，46(2)：26-29.

[49] 李志坚，邵亮. 环氧胶泥在三峡二期工程导流底孔缺陷修补中

的应用[J]. 水利水电快报, 2011, 32(12): 35-38.
[50] 孟雨辰, 王彦辉, 荆蓉, 等. 碳纤维复合材料用环氧树脂体系研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(增刊1): 75-78.
[51] 周桂鹏. 玻璃纤维增强复合材料(GFRP)在建筑结构中的应用综述[J]. 广州建筑, 2024, 52(6): 117-120.
[52] 李彪, 杨勇新, 赵进阶, 等. 结构工程用碳纤维复材筋力学性能影响因素试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(2): 72-75.
[53] KIM Y J, HASSANI A. Stepped reinforced concrete beams retrofitted with carbon fiber-reinforced polymer sheets and ultra-high-performance concrete[J]. ACI Structural Journal, 2023, 120(2): 91-104.
[54] CAO S, JIANG T, SHI S, et al. Fabrication and compression properties of reinforced epoxy syntactic foam with basalt fiber[J]. Advances in Polymer Technology, 2024, 2024(1): 9224136.
[55] MA L, LIU H, WEN X, et al. Polyhydric SiO_2 coating assistant to graft organophosphorus onto glass fabric for simultaneously improving flame retardancy and mechanical properties of epoxy resin composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 243: 110176.
[56] 于钦萍, 王炜. 阻燃可雕刻环氧灰浆的制备[J]. 绿色科技, 2016(8): 146-148.
[57] WANG Z, JIANG B, LIU Y, et al. Three-dimensional printing of rigid-flexible ceramic-epoxy composites with excellent mechanical properties[J]. Materials, 2025, 18(7): 1479.
[58] 曹登云, 任银霞. 临海地区水下钢结构防腐技术试验研究[J]. 全面腐蚀控制, 2024, 38(11): 176-179.
[59] 高浩,赵沈军,程庆超. 尼日利亚凯恩吉水电站溢洪道水下环氧快速修复技术[J]. 水利水电快报,2025,46(8):61-66.
[60] LI G, WU Y, ZHANG P, et al. Interfacial study of steel joints prepared with a catechol-modified epoxy adhesive with enhanced bonding performance and durability[J]. Langmuir, 2024, 40(31): 16549-16556.
[61] WANG L, WANG J, QI Y, et al. Preparation of novel epoxy resins bearing phthalazinone moiety and their application as high-temperature adhesives[J]. Polymers, 2018, 10(7): 708.
[62] PENG Z, SUN Z, QIN Y, et al. Preparation and evaluation of the high-temperature-resistant epoxy resin with thermal expansion properties enables Z-axis reinforcement[J]. Composites Communications, 2025, 56: 102372.
[63] 王先前, 姚淑芳, 高硕, 等. 冬季低温预制节段改性拼接胶的制备与性能研究[J]. 粘接, 2024, 51(12): 9-13.
[64] 李博洋, 吴香国, 张明熠, 等. 负温下风电混塔拼接胶的抗流挂性能和可工作时间研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(10): 23-26.
[65] ZHANG X, SHI X, SHI Y, et al. Construction of interpenetrating networks structure in epoxy resin with both high modulus and high toughness and research on properties of polymers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(25): e57061.
[66] 郭何云, 王煦. 水性环氧树脂制备方法的研究进展[J]. 合成化学, 2017, 25(5): 457-460.
[67] 孙国强, 杨建军, 陈春俊, 等. 纳米改性水性环氧树脂防腐涂料的研究进展[J]. 现代化工, 2022, 42(4): 33-38.
[68] MAO X, HE Y, LI C, et al. Glycine - $Ti_3C_2T_x$ hybrid material improves the electrochemical corrosion resistance of a water-borne epoxy coating[J]. Langmuir, 2024, 40(22): 11817-11827.
[69] 郑木莲, 范贤鹏, 李洪印, 等. 道路用水性环氧乳化沥青的研究进展[J]. 中国科技论文, 2019, 14(8): 821-829.
[70] YANG X, GUO L, XU X, et al. A fully bio-based epoxy vitrimer: self-healing, triple-shape memory and reprocessing triggered by dynamic covalent bond exchange[J]. Materials & Design, 2020, 186: 108248.
[71] REINHARDT N, BREITSAMETER J M, DRECHSLER K, et al. Fully bio-based epoxy thermoset based on epoxidized linseed oil and tannic acid[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2022, 307(12): 2200455.
[72] 中华人民共和国工业和信息化部. 风力发电机组叶片用环氧结构胶粘剂: HG/T 5248—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
[73] 全国胶粘剂标准化技术委员会. 预制混凝土节段拼装用环氧胶粘剂: GB/T 44543—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
[74] 中华人民共和国工业和信息化部. 地基与基础处理用环氧树脂灌浆材料: JC/T 2379—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
[75] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 混凝土裂缝用环氧树脂灌浆材料: JC/T 1041—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
[76] 中华人民共和国工业和信息化部. 混凝土界面处理剂: JC/T 907—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
[77] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程用锚固胶: JG/T 340—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
[78] 中华人民共和国工业和信息化部. 环氧树脂灌注砂浆: JC/T 2630—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[79] 杭州国电大坝安全工程有限公司. HK-EQ环氧胶泥: Q/GDDB 13—2017[S]. 杭州: 杭州国电大坝安全工程有限公司, 2017.
[80] 浙江省质量协会. 水性环氧地坪涂料: T/ZZB 3088—2023[S]. 杭州: 浙江省质量协会, 2023.
[81] 中华人民共和国工业和信息化部. 环氧磨石: JC/T 2748—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
[82] 国家标准化管理委员会. 树脂浇铸体性能试验方法: GB/T 2567—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
[83] 中国国家标准化管理委员会. 建筑防水涂料试验方法: GB/T 16777—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[84] 中国国家标准化管理委员会. 塑料 环氧树脂 黏度测定方法: GB/T 22314—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[85] 中国国家标准化管理委员会. 胶粘剂 拉伸剪切强度的测定(刚性材料对刚性材料): GB/T 7124—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
[86] 中华人民共和国化学工业部. 胶粘剂拉伸剪切蠕变性能试验方法(金属对金属): GB/T 7750—1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.

[87] 国家标准化管理委员会. 胶粘剂挥发性有机化合物限量：GB 33372—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
[88] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准：JGJ 1770—2009[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2009.
[89] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构加固材料安全性鉴定技术规范：GB 50728—2011[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2011.
[90] 中华人民共和国航空工业部. 金属胶接结构胶粘剂规范：HB 5398—1988[S]. 北京：中国标准出版社，1988.
[91] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物环氧树脂灌浆材料技术规范：SL/T 807—2021[S]. 北京：中国水利水电出版社，2021.
[92] 北京市住房和城乡建设委员会. 建筑工程用界面处理剂应用技术规程：DB 11/T346—2022[S]. 北京：中国标准出版社，2022.
[93] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构加固设计规范：GB 50367—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.
[94] 国家能源局. 环氧树脂砂浆技术规程：DL/T 5193—2021[S]. 北京：中国电力出版社，2021.
[95] 国家能源局. 钢质管道液体环氧涂料内防腐技术规范：SY/T 0457—2019[S]. 北京：石油工业出版社，2019.
[96] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 纤维增强复合材料工程应用技术标准：GB 50608—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
[97] 福建省地坪行业协会. 环氧磨石地坪施工及验收规范：T/FJFA 005—2022[S]. 福州：福建省地坪行业协会，2022.