

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.10.028

纤维增强塑料在公路工程中的研究进展

刘淑艳^{1,2}, 崔洪军¹, 张朝阳¹, 薛晓¹, 王清洲¹

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 天津市交通科学研究院, 天津 300074)

摘要: 介绍了纤维增强塑料的组成和特点, 综述了纤维增强塑料在涵洞工程、桥梁工程以及公路工程其它方面的应用, 分析了未来纤维增强塑料研究的热点和发展趋势, 以进一步促进纤维增强塑料的研究与工程实践。

关键词: 纤维增强塑料; 公路工程; 桥涵工程; 应用

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)10-0153-08

Research Progress of Fiber Reinforced Plastics in Highway Engineering

Liu Shuyan^{1,2}, Cui Hongjun¹, Zhang Zhaoyang¹, Xue Xiao¹, Wang Qingzhou¹

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;

2. Tianjin Transportation Science Research Institute, Tianjin 300074, China)

Abstract: The composition and characteristics of fiber-reinforced plastics were introduced, the application of fiber-reinforced plastic materials in culvert engineering, bridge engineering and other aspects of highway engineering were summarized, and the hot spots and development trends of future fiber-reinforced plastic materials research were analysed, to further promote fiber reinforcement. Research and engineering practice of plastics.

Keywords: fiber reinforced plastics; highway engineering; bridge engineering; application

随着我国经济建设的快速发展, 大力推动了公路基础设施建设的步伐。混凝土、钢筋混凝土、钢结构等材料是公路基础设施建设中的首选材料, 已沿用百年以上, 整体使用效果较好。这些材料建造的少数公路结构物因材料腐蚀、老化以及施工缺陷, 在运营期产生较多早期损害, 并且性能恢复施工难度大、维护成本高, 严重影响了构造物的使用寿命和正常工作^[1]。

纤维增强塑料 (FRP) 作为新兴土木工程材料, 凭借着轻质高强、耐腐蚀以及可设计性强等一系列优点, 有效地解决了传统材料易产生早期损害的问题, 近年来广泛应用于公路工程建设中, 使用效果良好。笔者综述了 FRP 的特点以及在公路工程领域中涵洞工程、桥梁工程、锚杆支护工程、旧桥加固、防撞设施等方向的应用, 阐述其未来发展趋势, 以期推动其在公路工程中更好的应用。

1 纤维增强塑料的特点

(1) 轻质高强。

FRP 材料的相对密度介于 $1.5 \sim 2.0 \text{ g/cm}^3$, 仅是普通钢或铸铁的 $1/4 \sim 1/5$, 比轻金属铝约小 $1/3$, 拉伸强度却接近甚至超过普通碳素钢的水平^[2-6], 具有优良的力学性能, 这使得 FRP 材料在运输和安装过程中更加轻捷方便, 同时减轻了自重, 更加经济^[7]。FRP 材料与其它材料的性能对比如图 1 所示。

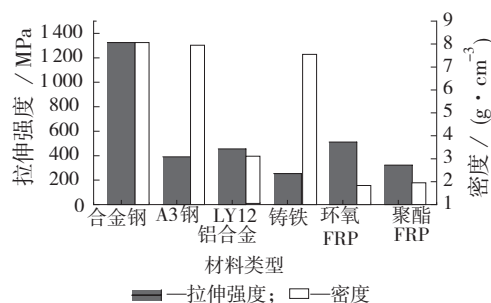


图1 不同类型材料对比

(2) 优良的耐腐蚀性。

FRP 材料的内衬层的树脂含量达到了 90% 以上^[8], 树

基金项目: 河北省交通运输厅科技计划项目 (Y-201628), 天津市自然科学基金项目 [JCYBJC00630]

通信作者: 王清洲, 博士, 副教授, 主要从事道路新材料、新技术方面的研究

收稿日期: 2021-07-20

引用格式: 刘淑艳, 崔洪军, 张朝阳, 等. 纤维增强塑料在公路工程中的研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(10): 153-160.

Liu Shuyan, Cui Hongjun, Zhang Zhaoyang, et al. Research Progress of Fiber Reinforced Plastics in Highway Engineering[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10): 153-160.

脂具有较高的稳定性,与无机盐溶液、表面活性剂以及聚合物溶液不易产生反应^[9]。此外,还可以根据 FRP 材料不同的工作环境和需要,在 FRP 材料的内衬层与外保护层选择不同类型的树脂进行加工,从而使 FRP 材料防腐蚀的效果达到最佳^[10]。对于酸性环境条件下,选用双酚 A 树脂和呋喃树脂效果最好;而碱性环境条件下,乙烯基树脂、环氧树脂以及呋喃树脂表现良好;在溶剂型的使用环境下,呋喃等类型的树脂则较为适用;若是酸、盐以及溶剂等腐蚀环境并不是特别严重的情况下,选用间苯型不饱和聚酯树脂会使得 FRP 材料更具有经济性^[7,11]。

(3) 优良的耐磨性。

由于 FRP 材料制成的管道在固体颗粒物料管道运输工程中的大规模使用,因此 FRP 管道的耐磨性能被越来越重视^[12]。大量泥浆砂石的砂浆水密封管道内的 300 万次旋转磨损对比试验、25 万次的负载循环磨损试验均证明 FRP 管内壁具有优良的耐磨性能,优于球墨铸铁-水泥内衬管、环氧树脂和焦油涂层处理的钢管内壁^[13-14]。

(4) 可设计性强。

FRP 材料由于具有灵活的可设计性,可以根据具体的应用场合和使用环境对其进行形状、颜色、结构形式、壁厚、部件之间的接头方式等进行设计,从而达到和满足不同功能的需要^[15]。例如,通过在设计的 FRP 夹层结构中填加树脂石英砂或者聚氨酯泡沫等不同填充物,可以以此来满足经济性和隔热性能的条件。此外,根据 FRP 材料的特殊结构与受力特性,可以通过改变 FRP 材料的纤维铺设角度和铺层方式,从而使得 FRP 材料在不同方向具有不同的强度分配。而改变纤维与树脂的类型或者通过掺入添加剂的手段,使 FRP 材料达到了耐腐蚀、阻燃、介电等目的^[7,16-18]。

(5) 优良的水力学性能。

FRP 管道由于内衬层的存在,内壁非常光滑,粗糙度和摩擦阻力远低于钢管、铸铁管等金属管道^[4,9,17],不同管材内壁粗糙度列于表 1^[11]。根据管道满流与非满流两种不同情况分别采用 Hazen-Williams 公式和曼宁公式进行水头损失计算发现^[18-21],满流情况下的 FRP 管道水头损失相较于同管径、同流量的球墨铸铁管降低了约 23.3%,非满流情况下的 FRP 管道水头损失相较于同管径、同流量的球墨铸铁管降低了约 33.3%~50%^[7,11],证明了 FRP 管道相较于同等条件下的金属管道具有更加优秀的输水能力。

表 1 不同管材内壁粗糙度

项目	管道类型					mm
	新钢管	半新钢管	旧钢管	铸铁管	FRP 管	
粗糙度	0.1~0.2	0.2~0.3	0.5~0.8	0.6~1.0	0.01	

(6) 热导率低、热应力小

同一水平条件下,FRP 材料相较于钢材在热性能方面有着非常明显的优势。FRP 材料与钢材性能参数对比见表 2^[7]。FRP 材料的热导率为 0.27 W/(m·℃),仅为钢材的 0.4%,二者相差悬殊。极低的热导率保证了 FRP 材料良好的保温性能,降低了 FRP 制品输送、储存介质时的热能损耗。此外,同一内外温差条件下的 FRP 材料的线性热膨胀系数与钢材大致相当,而 FRP 材料的轴向热应变之比明显大于钢材,并且 FRP 材料的轴向拉伸弹性模量为 11.2 GPa 远低于钢材的 210 GPa,温差在 FRP 材料上产生的热应力仅为钢材的 9.1%^[7,11,16]。因此在管道衔接的实际工程中,FRP 材料往往不需要膨胀接头的连接来消除热应力集中的情况,而钢材由于过大的应力集中问题需视情况考虑,这也保证了 FRP 制品在潮湿、沙漠、海底、冰冻等各种恶劣环境应用条件下仍具有良好的效果。

表 2 FRP 材料与钢材性能参数对比

性能参数	热导率 / [W·(m·℃) ⁻¹]	线膨胀系数 / K ⁻¹	轴向热应 变之比	轴向热 应力之比
FRP	0.27	1.12×10^{-5}	1.67	1
钢	62.8	1.23×10^{-5}	1	11

(7) 优良的电绝缘性能。

FRP 材料作为一种新型电绝缘材料具有优良可靠的保障。FRP 材料的介电强度为 12~16 kV/mm,体积电阻率约为 $1 \times 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$,表面电阻率约为 $1 \times 10^{11} \Omega$,因此 FRP 材料是一种良好的绝缘材料^[6,11]。由于 FRP 材料具有良好的绝缘效果,使得 FRP 材料在输电线塔、电磁干涉实验室、电信线路以及多雷暴天气地区得到了广泛应用^[2,7,22]。此外,通过研究 FRP 材料在辐照作用下的电绝缘性能变化规律发现,FRP 材料在辐照作用下的电绝缘性能不降反增,满足了 FRP 材料在高能物理和核物理辐照环境下仍能保持高电绝缘性能的要求^[23]。

(8) 防污抗蛀。

FRP 材料的内衬层非常光滑,具有优良的防污抗蛀性能,可大大节约维护成本。FRP 管道粗糙度仅为 0.01 mm, Hazen-Williams 系数可以达到 150,远远优于钢管、铸铁管等金属管道,光滑洁净的内壁确保了 FRP 材料在海水、污水等环境下甲壳类、菌类以及一些微生物难以在其内壁上粘附存活。而金属或混凝土管道则因为内壁粗糙率较高,大量的甲壳、菌类等生物粘附,使得内壁粗糙度越来越大,进一步减小管径、增加流水阻力、降低泵送功率等^[7,23]。

2 在公路排水中的管涵应用研究

公路工程应用的纤维增强复合塑料管绝大多数为 FRP 夹砂管,即在纯 FRP 管材的纤维缠绕层之间加入树脂砂层,可大大提高拉伸弹性模量、刚度,改善管材的埋地特性。目

前,FRP夹砂管已成为传统钢筋混凝土管、钢管等刚性管道的良好替代品。

2.1 FRP管道力学性能的研究

目前,国内外对FRP夹砂管涵洞力学性能方面的研究非常丰富,并取得了丰硕的研究成果,为玻璃钢夹砂管涵的设计和参数取值提供了良好的理论基础。组分材料性能和缠绕角度等生产参数是影响管涵结构力学性能的主要因素之一。王清洲等^[24]建立FRP夹砂管数值计算模型,分析了管道各项物理参数的改变对于其性能和环刚度的影响。陈涛^[25]、石华旺等^[26]以及高怀君^[27]采用MATLAB和ANSYS联合仿真计算研究了FRP夹砂管的管道层数、纤维体积比、夹砂层厚度、交叉缠绕层体积比以及缠绕角度等参数对于FRP夹砂管的刚度、强度等力学性能的影响规律,在保证FRP夹砂管安全性能的基础上使其在经济、结构等方面均得到了较大提升。王清洲等^[28-30]以试验和实际工程获取的数据为基础,建立了可靠的有限元模型,优化了多夹砂层FRP夹砂管的各层厚度,并对FRP夹砂管的径厚比提出了合理建议。A. Kavch^[31]对复合材料夹芯管道的环刚度进行了分析,在建模过程中考虑了材料性能非线性影响,将管道的夹芯层厚度、材料参数、内外结构层厚度作为优化参数,通过ANSYS对管道进行建模并分析,获得了性价比最高的复合材料夹芯管结构。R. M. Guedes^[32]采用室内试验和有二维有限元模拟计算方法对荷载作用下的FRP管进行受力及变形性能研究,建立了临界截面的最大挠度和最大应变之间的简单定律,提出有限变形理论的分析方法。这些研究为管材材料优选和生产加工工艺参数确定提供了依据。

FRP夹砂管的破坏模式、破坏荷载以及疲劳损伤关系到管涵服役特性优劣的关键参数,也是管壁结构优化的依据。王清洲^[8]、张济源等^[33]陈兆南^[34]针对FRP夹砂管的压缩性能、拉伸性能、以及平行板外载性能等一系列力学性能开展试验,确定了FRP夹砂管在荷载作用下的破坏荷载和破坏模式。C. Affolter等^[35]则通过对单层夹砂层FRP夹砂管进行室内的弯曲性能试验、层间剪切强度试验以及管环静载破坏试验,确定了单层夹砂层FRP夹砂管的基本力学性能和破坏荷载,探究了服役过程中单层夹砂层FRP夹砂管的破坏过程和破坏原因。上述研究成果为FRP夹砂管的优化和结构设计等方面提供了重要依据。此外,管涵在交通荷载的重复作用下产生的疲劳问题也是不可忽略的。石华旺等^[36]评估了300万次、王清洲等^[37]评估了250万次低幅值的疲劳性能试验后FRP夹砂管环的力学性能,仍然满足公路工程涵洞的使用标准。S. Ahmet等^[38]在交变内压建立的S-N曲线和A-N曲线来研究疲劳荷载作用下管涵的疲劳损伤行

为。V. A. Passipoularidis等^[39]研究了FRP材料的剩余强度预测模型,适用于变幅疲劳载荷或变周期疲劳载荷作用下的管道剩余强度的预测。这些研究证明了FRP夹砂管具有良好的抗荷载疲劳特性,非常适合承受交通荷载的反复作用。

2.2 FRP管-土作用研究

作为一种新型柔性排水管道,FRP夹砂管服役期允许产生3%~5%的变形,管-土相互作用更加复杂,也是是否具有良好服役性的重要因素。Y. J. Chiou等^[40]、A. S. Sharif等^[41]分析弹性软土中的埋地管道的力学性能,其中管道参数、埋设方式、埋深比、管土之间摩擦等因素是影响埋地管道的受力特性的主要因素。Young-Geun Lee^[42]针对给排水管道工程中所应用的大口径FRP夹砂管,采用工程现场的足尺试验,获取了埋深16 m FRP夹砂管387 d的径向变形数据,并将试验所测得的变形数据与爱荷华公式和有限差分法预测的结果进行比较,预测了60年后FRP夹砂管涵的竖向变形小于其竖向变形极限的5%。柔性管涵的变形大部分来源于施工期和工后沉降阶段,填土高度和管周压实度是变形产生的主要来源。魏连雨等^[43]、陈兆南^[44]针对服役过程中的FRP夹砂管在动荷载、静荷载以及超载等不同荷载条件下的力学性能进行监测发现,覆土高度的提升可有效降低路面交通荷载对于管涵的影响,并确定了允许重型工程车通过的浅埋高度。相关研究均证明FRP夹砂管具有优良的埋地特性,可以满足公路涵洞设计要求。

2.3 FRP管道的多排应用研究

双排以及多排的埋地FRP夹砂管涵的应用是一种新的尝试,避免了路基高程对于管涵敷设的限制,并取得了良好的效果。王清洲等^[45]针对双排FRP夹砂管替代单排FRP夹砂管的断面流量、力学性能以及经济性等多方面的可行性分析表明,双排FRP夹砂管的各方面均符合应用要求,具备大范围应用的潜力。汪洋^[46]和王清洲等^[47-49]仿真研究了双排及多排埋地FRP夹砂管的力学性能,结果表明涵管间距、填土压实度以及加载方式对于双排及多排埋地FRP夹砂管的受力位置与变形特性均有不同程度的影响。在浅埋条件下,双排FRP夹砂管替代单孔大直径FRP夹砂管时应采取土工格栅减载、控制双排管满足最小间距的工程措施。

3 在桥梁工程中的应用研究

FRP凭借着优良的特性在桥梁工程中的应用具有广阔前景,已广泛应用在桥梁建设、桥梁加固以及桥梁防撞等方面。

3.1 在桥梁建设工程应用中的研究

自1982年世界上第一座FRP公路桥在我国北京密云建成后,复合材料桥梁凭借着施工快、质量轻、耐腐蚀以及维

护方便等优点在世界各国快速发展^[50]。各类 FRP 制造的桥梁构件层出不穷,并取得了良好的应用效果。

复合材料桥板凭借自身优势解决了传统桥板腐蚀、混凝土退化等问题,使其在桥梁建设中大放异彩。第一座 FRP 夹芯桥面板公路桥于 1996 年在美国的堪萨斯州建成。此后各国不断开发不同新型结构的复合材料桥面板如图 2 所示^[51-56],其中主要包括: Superdeck 桥面板、Asset 桥面板、ACCS 体系空心板、Duraspan 桥面板、EZ-Span 桥面板以及 Strongwell 桥面板。FRP 桥面板的桥梁最早是在德国弗里德伯格公路上建造的,此类新型桥梁具有良好的耐久性并可现场完成快速安装^[57]。邹芳^[58]提出了一种新型格构腹板增强轻木夹芯复合材料桥面板,相较于原桥面板质量减少了 57%。高媛^[59]设计了一种适用于悬索桥的 FRP 夹芯桥面板,经模拟分析表明,其各项力学性能均满足要求。FRP 复合材料桥梁结构是未来桥梁走向装配式、轻量化、大跨径的关键。

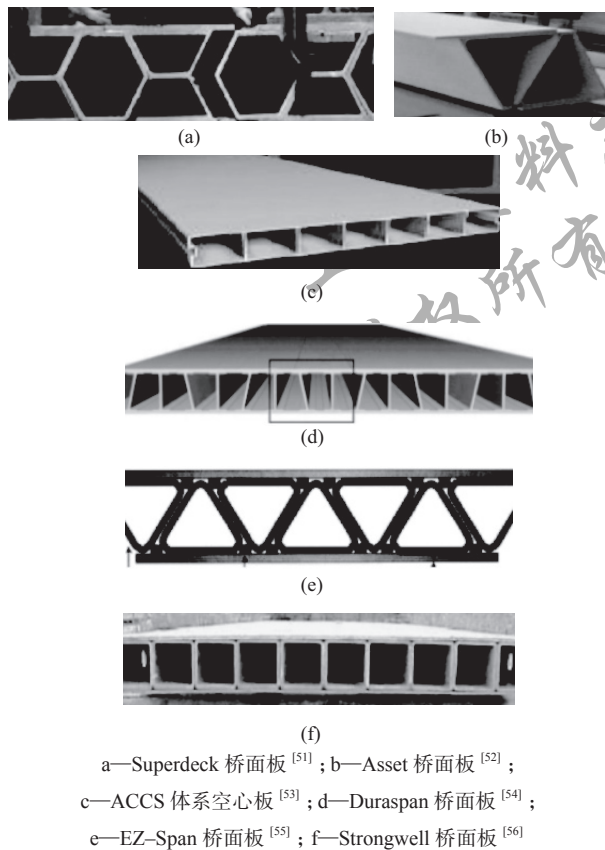


图 2 FRP 板体系示意图

另外,由 FRP 制成的拉索亦是复合材料桥梁建设中的一大突破,解决了传统钢索自重、强度不足以及易疲劳等问题。1996 年瑞典的温特图尔市建造了第一座采用 FRP 拉索的悬索桥—Storchen Bridge 桥,之后 FRP 拉索悬索桥在丹麦、荷兰等国也纷纷建成^[60]。但由于 FRP 材料是典型的各向异性材料,且抗剪强度较低,FRP 拉索的锚固成为难点。

汪昕等^[61]提出了一种适用于多根、大直径的 FRP 复合材料拉索整体式变刚度锚固方法,分析了 FRP 拉索应力集中产生的根本原因,推导出了界面摩擦系数关系式和锚固力计算公式。Wang Xin 等^[62]提出了一种 FRP 拉索新型锚固方法,结果表明该方法实现了锚固区应力较均匀分布并减少了拉索的应力集中出现。2017 年国家标准《结构用纤维增强复合材料拉索》(GB/T 35156—2017)正式颁布,为 FRP 拉索在中国工程中的推广应用提供理论依据。

3.2 在桥梁加固工程应用中的研究

公路桥梁的早期裂缝、老化、破损以及承载力不足是运营期桥梁普遍存在的损害。通常上述损害采用物理粘钢、套箍和化学灌浆等加固手段,由于设备和环境等因素的限制,使得加固效果参差不齐。而施工便捷、轻质高强的纤维增强塑料加固桥梁备受青睐。它主要包括外贴纤维增强塑料加固法、表面附近锚固法(即 NSM 法)以及内部 FRP 加筋法。外贴 FRP 加固法作为桥梁加固方法中应用最广的一种方法,是首先将树脂基底均匀涂抹在处理过的混凝土表面,随后将尺寸合适的 FRP 按照要求层数逐层贴到规定位置。NSM 法是将桥梁需加固区域进行矩形槽开挖,利用树脂把 FRP 筋锚固在相邻构件上。内部 FRP 加筋法则是利用 FRP 筋代替传统钢筋与混凝土形成复合结构。

针对 FRP 加固的力学性能,诸多学者开展了较为深入的研究,推动了 FRP 加固技术的应用与发展。吴茂胜^[63]结合工程实例分析发现,FRP 可有效提升桥梁极限承载力和破坏荷载。段敬民等^[64]与曾宪桃等^[65]通过对粘贴 FRP 板的混凝土梁进行试验分析发现,粘贴 FRP 板对于混凝土的开裂弯矩、极限承载力以及刚度均有提升,并在试验的基础上进一步得到了 FRP 板和组合构件的计算表达式。李亚^[66]和李文龙^[67]采用试验和有限元计算方法进行了 FRP 混合箍筋混凝土梁的抗剪性能研究,分析了配箍率、剪跨比等因素的影响,并推导出极限受剪承载力计算公式,推动了 FRP 筋在加固工程中的应用。H. Eliya 等^[68]采用拉拔试验评估 FRP 筋与混凝土之间的粘结性能发现,FRP 筋与混凝土之间通过化学粘附、机械互锁以及摩擦实现力的传递,FRP 筋的尺寸与生产变异性是影响粘结性能的主要因素。由于我国在 FRP 加固桥梁技术应用与加固规程等方面起步较晚,相较于日本和欧美等国仍有一定差距,加固桥梁的长期性能等方面需进一步探索。

3.3 在桥梁防撞工程应用中的研究

航道上航行船舶与桥梁碰撞事故日益频繁,船舶碰撞事故的发生常带来巨大的人员伤亡、经济损失以及环境污染。设置安全可靠的桥梁防护措施,对于降低桥梁撞击灾害

具有重要意义。传统的人工岛、群桩以及钢箱等手段均有一定局限性,而 FRP 因其自身轻质高强、耐腐蚀以及可设计性强等特点,在桥梁防护工程中受到了极大重视。南京工业大学先进工程复合材料研究中心首次提出了大型桥梁复合材料防撞系统的概念,并率先开展关于桥梁复合材料防撞系统设计制造与创新研究^[50]。成功研制的自浮式和固定式等复合材料防撞系统,在乌龙江大桥、润扬长江公路大桥、张家港巫山大桥等 30 多项桥梁防撞系统中取得了良好的应用效果,如图 3 所示。王飞等^[69]研发了一种新型柔性复合材料防撞装置,研究表明相较于传统刚性防撞装置,复合材料防撞装置防撞效率更具优势。方海等^[70]以武汉鹦鹉洲长江大桥为出发点分析了纤维增强塑料防撞装置的破坏模式,证明了纤维增强塑料防撞装置可有效降低船舶碰撞过程中二者的损伤。李嵩林等^[71]研发了环保型浮式柔性防撞装置, Hua Jiang 等^[72]提出了手糊工艺制造的 FRP 管复合材料防撞装置,均具有良好的缓冲消能效果。因此,FRP 防撞设施作为桥墩防撞装置具有较好的应用前景。



(a) 自浮式防撞装置; (b) 固定式防撞装置

图 3 不同 FRP 防撞装置

4 在公路工程其它方面中的应用研究

FRP 除了广泛应用于公路工程中的涵洞和桥梁方面之外,在边坡锚杆支护、路面面板、水泥混凝土路面材料等其它诸多工程中也有着良好的应用效果。锚杆支护技术在边坡防护和支挡工程中有着广泛的应用。常规的钢质锚杆在侵蚀、潮湿以及冰冻等恶劣复杂的服役环境下非常容易发生锈蚀,其安全性和耐久性受到了极大挑战,解决锚杆锈蚀在工程建设中已经迫在眉睫。FRP 锚杆出色的耐腐蚀性成为代替钢材锚杆的首选。匡亚川等^[73]借助有限元软件和现场试验的方式研究了 FRP 锚杆的粘结性能,优化设计后的 FRP 锚杆粘结性能优异。徐晓莲等^[74]、刘通昌^[75]利用试验和数值模拟方法对 FRP 锚杆进行研究,并在边坡支护的实际工程中确定了 FRP 锚杆应用的稳定性和可行性。

FRP 制成的复合材料路面面板具有轻质高强、刚度大、车辆通过性好以及节点传力可靠等优点,在应急抢修路面建设中备受青睐。尤其是 FRP 路面面板在淤泥、沼泽以及沙滩等恶劣场地中具有快速拼接使用的优势。方海^[76]成功利用真空导入成型技术设计并制备了轻质高强的纤维增强塑料

垫板,在军队、石油以及应急抢险等领域得到应用。陈洲等^[77]、徐靖等^[78]开展了 FRP 路面板的拉伸性能、层间剪切性能、冲击性能以及动态热力学等性能试验,结果表明 FRP 路面板可满足交通车辆通行的要求。华正良^[79]提出采用 FRP 筋代替钢筋修筑连续配筋水泥混凝土路面,试验证明该 FRP 筋水泥混凝土配筋路面具有广阔的应用前景。将废旧 FRP 磨细后作为水泥混凝土填料是一种较常见废旧 FRP 材料回收的做法。多数研究表明将增强纤维用于混凝土可以提高其力学性能^[80-82],能够有效提高混凝土的可加工性以及获得更低的孔隙率,且可制约微裂缝形成大裂缝^[83-84]。目前,我国 FRP 在路面中应用的较少,该领域也是未来研究的重点。

5 纤维增强塑料材料的未来挑战

工程材料的回收将有助于工业流程的可持续性和可持续发展,但是 FRP 的废物回收遇到了巨大挑战和困难。首先,复合材料产品中固有的基质材料、增强材料和填充材料的异质性,导致材料可回收性差,材料的分类困难,这增加了回收的阻力。其次,用量占较大比例的热固性 FRP,热固反应后无法再次重塑。因为热固性复合材料的树脂固化前是线型或带支链的,固化后分子链之间形成化学键,成为三度的网状结构,不仅不能再熔触,在溶剂中也不能溶解^[85],使其在自然环境中降解的周期甚至可长达数十年,这给回收工作带来了很大的困难。另外,废物对环境产生的负面影响是世界范围内的一个主要问题,需要强调回收过程和再利用方式的合理性。掩埋和焚烧是目前最常见且廉价的处理方式,人类不得不将大量的 FRP 采用这两种低端的再利用方式处理,对环境和生态产生不利影响,因为掩埋会占用大量土地和污染地下水,焚烧则可能会产生有害气体污染空气。因此,这两种方法从长期来看都无法持续,并且已经受到相关部门的严格监管。最后,还有一系列的再利用难题阻碍了复合材料废弃物的再利用,诸如高回收成本,回收后材料可能再利用的产品市场缺乏,以及与原始材料相比回收物力学性能的降低等。未来,FRP 复合材料的回收再利用将是该领域发展的研究热点问题。

6 结论

近年来,FRP 作为一种新型复合材料为公路工程结构带来了全面革新,通过在涵洞与桥梁建造和维护过程中替换传统的混凝土、钢筋等材料,以此来提升涵洞和桥梁的力学性能和耐久性能,取得了较为良好的效果。未来,FRP 夹砂管涵的长期性能与结构优化、装配式桥梁、废旧 FRP 材料的回收再利用等方面将是研究的热点问题。

参考文献

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 2021 中国公路学报, 2021, 34(2):1-97.

- Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. 2021 China Journal of Highway and Transport, 2021, 34 (2):1-97.
- [2] 孙凌云. 科技创新与应用, 2015(15):33-34.
Sun Lingyun. Technology Innovation and Application, 2015(15):33-34.
- [3] 刘洋, 等. 油气田地面工程, 2011, 30(4):98-99.
Liu Yang, et al. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2011, 30(4):98-99.
- [4] 林立, 等. 当代化工, 2009, 38(5):515-518.
Lin Li, et al. Contemporary Chemical Industry, 2009, 38(5):515-518.
- [5] 张双娣. 广东建材, 2005(8):8-9.
Zhang Shuangdi. Guangdong Building Materials, 2005(8):8-9.
- [6] 雷文, 等. 工程塑料应用, 2000, 44(7):21-22.
Lei Wen, et al. Engineering Plastics Application, 2000, 44(7):21-22.
- [7] 左向利. 科技信息, 2013, (21):112-113, 118.
Zuo Xiangli. Science & Technology Information, 2013, 4(21):112-113, 118.
- [8] 王清洲, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(12):107-113.
Wang Qingzhou, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(12):107-113.
- [9] 王浩, 等. 石油和化工设备, 2021, 24(4):82-84.
Wang Hao, et al. Petro & Chemical Equipment, 2021, 24(4):82-84.
- [10] 柳媛媛. 科技与企业, 2014(22):180. doi:10.13751/j.cnki.kjyqy.2014.22.162.
Liu Yuanyuan. Technology & Enterprise, 2014(22):180.. doi:10.13751/j.cnki.kjyqy.2014.22.162.
- [11] 雷文. 玻璃钢/复合材料, 1999(1):36-39.
Lei Wen. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 1999(1):36-39.
- [12] 孔庆宝, 等. 纤维复合材料, 2001, 4(2):17-23, 30.
Kong Qingbao, et al. Fiber Composites, 2001, 4(2):17-23, 30.
- [13] 关辉. 科技与企业, 2016(4). doi:10.13751/j.cnki.kjyqy. 2016. 04.182.
Guan Hui. Technology & Enterprise, 2016(4):218. doi:10.13751/j.cnki.kjyqy.2016.04.182.
- [14] 张熙, 等. 广东化工, 2018, 45(13):194-195.
Zhang Xi, et al. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(13):194-195.
- [15] 连丽. 塑料科技, 2015, 43(12):66-68.
Lian Li. Plastics Science and Technology, 2015, 43(12):66-68.
- [16] 黄宇, 等. 内江科技, 2007, 4(1):102-103.
Huang Yu, et al. Neijiang Technology, 2007, 4 (1):102-103.
- [17] 王家成. 科技信息, 2013(18):463-464.
Wang Jiacheng. Science & Technology Information, 2013(18):463-464.
- [18] 常世锋, 等. 河南建材, 2009(1):30-33.
Chang Shifeng, et al. Henan Building Materials, 2009(1):30-33.
- [19] 沈丹玉. 给水管网海曾威廉系数优化校正研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.
Shen Danyu. Water supply pipe network-study on optimization correction of hazen-williams coefficient[D]. Shenyang : Shenyang Jianzhu University, 2018.
- [20] 常胜, 等. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5):196-198.
Chang Sheng, et al. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5):196-198.
- [21] 常胜, 等. 水电能源科学, 2014, 32(10):159-161.
Chang Sheng, et al. Water Resources and Power, 2014, 32(10):159-161.
- [22] 熊金武. 科技资讯, 2017, 15(29):93-94.
Xiong Jinwu. Science & Technology Information, 2017, 15(29):93-94.
- [23] 周昂, 等. 高压玻璃钢在延长油田污水回注中的应用 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2014, 34 (10):82.
Zhou Ang, et al. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2014, 34 (10):82.
- [24] 王清洲, 等. 河北工业大学学报, 2018, 47(4):103-108.
Wang Qingzhou, et al. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(4):103-108.
- [25] 陈涛. 基于有限元分析的玻璃钢夹砂管道的强度分析与优化设计 [D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
Chen Tao. Finite element analysis and optimization design of glass fiber reinforced plastics mortar pipes[D]. Nanchang:Nanchang University, 2015.
- [26] 石华旺, 等. 玻璃钢/复合材料, 2017, 4(12):51-56.
Shi Huawang, et al. Fiber Reforced Plastics Composites, 2017, 4(12):51-56.
- [27] 高怀君. 玻璃钢夹砂管道环刚度有限元分析及优化 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2017.
Gao Huaijun. Stiffness analysis and optimization of glass fiber reinforced plastic sand tube[D]. Handan : Hebei University of Engineering, 2017.
- [28] 王清洲, 等. 工程塑料应用, 2020, 48(10) : 116-121.
Wang Qingzhou, et al. Engineering Plastics Application, 2020, 48(10) : 116-121.
- [29] 王清洲, 等. 长安大学学报: 自然科学版, 2018, 38(3):10-17.
Wang Qingzhou, et al. Journal of Chang'an University:Natural Science Edition, 2018, 38(3):10-17.
- [30] 王清洲, 等. 玻璃钢/复合材料, 2018(4):80-85.
Wang Qingzhou, et al. Fiber Reforced Plastics Composites, 2018(4):80-85.
- [31] Kavch A, et al. Marine Structures, 2011, 24(5):23-42.
- [32] Guedes R M. Composite Structures, 2009, 88(2):188-194.
- [33] 张济源. 埋地玻璃钢夹砂管的力学性能及公路应用研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2016.

- Zhang Jiyuan. Research on mechanical properties and the application in highway engineering of buried FRPM pipe[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2016.
- [34] 陈兆南. 施工及服役条件下公路玻璃钢夹砂管涵洞安全性能研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2017.
- Chen Zhaonan. Study on Safety Performance of Highway Glass Fiber Reinforced Plastics Mortar Pipe Culvert under Construction and Service [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017.
- [35] Affolter C, et al. Engineering Failure Analysis, 2018, 84. doi:10.1016/j.engfailanal.2017.09.017.
- [36] 石华旺, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(3):21-24.
- Shi Huawang, et al. Fiber Rforced Plastics Composites, 2017(3):21-24.
- [37] 王清洲, 等. 河北工业大学学报, 2018, 47(2):73-78.
- Wang Qingzhou, et al. Journal of Hebei University of Technology, 2018, 47(2):73-78.
- [38] Ahmet S, et al. Journal of Materials Science, 2008, 43(16):5 569-5 573.
- [39] Passipoularidis V A, et al. International Journal of Fatigue, 2011, 33(2):132-144.
- [40] Chiou Y J, et al. Journal of the Chinese Institute of Engineers, 2011, 19(3).doi:10.1080/02533839.1996.9677793.
- [41] Sharif A S, et al. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2019, 29(1):70-77.
- [42] Lee Young-Geun, et al. Composite Structures, 2015, 120. doi:10.1016/j.compstruct.2014.10.002.
- [43] 魏连雨, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(9):81-85.
- Wei Lianyu, et al. Fiber Rforced Plastics Composites, 2016(9):81-85.
- [44] 陈兆南, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2016(12):70-74.
- Chen Zhaonan, et al. Composites Science and Engineering, 2016, 4(12):70-74.
- [45] 王清洲, 等. 复合材料科学与工程, 2020(5):74-79.
- Wang Qingzhou, et al. Composites Science and Engineering, 2020(5):74-79.
- [46] 汪洋. 双排玻璃钢夹砂管涵洞的受力性能及变形特征研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
- Wang Yang. Study on mechanical property and deformation characteristic of double-row FRPM pipe culvert[D]. Tianjin : Hebei University of Technology, 2018.
- [47] 王清洲, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2018(7):82-88.
- Wang Qingzhou, et al. Composites Science and Engineering, 2018, 4(7):82-88.
- [48] 王清洲, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2018(3):68-73, 32.
- Wang Qingzhou, et al. Fiber Rforced Plastics Composites, 2018, 4(3):68-73, 32.
- [49] Wang Qingzhou, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2021, 40(3-4):103-117.
- [50] 韩娟, 等. 南京工业大学学报: 自然科学版, 2020, 42(5):543-554.
- Han Juan, et al. Journal of Nanjing Tech University : Natural Science Edition, 2020, 42(5):543-554.
- [51] Caigo R. Structural Engineering International, 1999, 9(4). doi:10.2749/101686699780481763.
- [52] Lopez-Anidor, Gangarao H V S, Troutman D. Design and construction of short-span bridges with modular FRP composite deck[C] // Second International Conference on Fiber Composites in Infrastructure.[S.l.]:ICCI, 1998:705.
- [53] 万水, 等. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2005, 4(1):17-21.
- Wan Shui, et al. Journal of Nanjing Tech University:Natural Science Edition, 2005, 4(1):17-21.
- [54] Richard T. Marine Structures, 2001, 14(1).doi:10.1016/S0951-8339(00)00040-X.
- [55] Michael D H, et al. Journal of Composites for Construction, 2000, 4(2).doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2000)4:2(48).
- [56] Bakis C E, et al. Journal of Composites for Construction, 2002, 6(2).doi:10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73).
- [57] 唐浩俊, 等. 世界桥梁, 2012, 40(2):55-58.
- Tang Haojun, et al. World Bridges, 2012, 40(2):55-58.
- [58] 邹芳, 等. 玻璃钢 / 复合材料, 2017(3):44-48.
- Zou Fang, et al. Fiber Rforced Plastics Composites, 2017(3):44-48.
- [59] 高媛. 石油天然气学报, 2020, 42(3):294-302.
- Gao Yuan. Journal of Oil and Gas Technology, 2020, 42(3):294-302.
- [60] 曾攀, 等. 广州大学学报: 自然科学版, 2006(2):90-93.
- Zeng Pan, et al. Journal of Guangzhou University:Natural Science Edition, 2006(2):90-93.
- [61] 汪昕, 等. 复合材料学报, 2019, 36(5):1 169-1 178.
- Wang Xin, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(5):1 169-1 178.
- [62] Wang Xin, et al. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(1). doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001504.
- [63] 吴茂胜. 塑料工业, 2016, 44(5):146-148, 153.
- Wu Maosheng. China Plastics Industry, 2016, 44(5):146-148, 153.
- [64] 段敬民, 等. 中国工程科学, 2004, 4(10):79-82.
- Duan Jingmin, et al. Strategic Study of CAE, 2004, 4(10):79-82.
- [65] 曾宪桃, 等. 粘贴玻璃钢板加固混凝土梁疲劳试验研究 [J]. 土木工程学报, 2001(1):33-38.
- Zeng Xiantao, et al. China Civil Engineering Journal, 2001(1):33-38.
- [66] 李亚. FRP 混合配箍混凝土梁受剪性能研究 [D]. 马鞍山, 安徽工业大学, 2018.
- Li Ya. Experimental Study on the shear capacity of concrete beams with FRP Hybrid stirrups [D]. Ma'an Shan, Anhui University of

- Technology, 2018.
- [67] 李文龙. FRP 箍筋混凝土梁受剪承载力试验研究 [D]. 马鞍山: 安徽工业大学, 2017.
- Li Wenlong. Experimental Study on the shear capacity of concrete beams with FRP stirrups[D]. Ma'an Shan, Anhui University of Technology, 2017.
- [68] Eliya H, et al. Construction and Building Materials, 2021, 288. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.123120.
- [69] 王飞, 等. 基于刚柔匹配的桥梁柔性防撞装置研究 [J]. 桥梁建设, 2021, 51(1):82–87.
- Wang Fei, et al. Bridge Construction, 2021, 51(1):82–87.
- [70] 方海, 等. 桥梁建设, 2020, 50(1):20–25.
- Fang Hai, et al. Bridge Construction, 2020, 50(1):20–25.
- [71] 李嵩林, 等. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015, 39(1):78–81.
- Li Songlin, et al. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2015, 39(1):78–81.
- [72] Hua Jiang, et al. Journal of Bridge Engineering, 2014, 4(5). doi:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000658.
- [73] 匡亚川, 等. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(12):1658–1664.
- Kuang Yachuan, et al. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(12):1658–1664.
- [74] 徐晓莲, 等. 塑料工业, 2017, 45(3):127–130.
- Xu Xiaolian, et al. China Plastics Industry, 2017, 45(3):127–130.
- [75] 刘通昌. FRP 锚杆锚头试验研究及其边坡应用 [D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- Liu Tongchang. Test study on anchor head of GFRF anchor and application of FRP anchor in slope support[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [76] 方海. 新型复合材料夹层结构受力性能及其道面垫板应用研究 [D]. 南京: 南京工业大学, 2008.
- Fang Hai. Research on the mechanical properties of new type composite sandwich structures and the application of pavement pads[D]. Nanjing: Nanjing Technology University, 2008.
- [77] 陈洲, 等. 河北农业大学学报, 2007, 4(6):104–109.
- Chen Zhou, et al. Journal of Hebei Agricultural University, 2007, 4(6):104–109.
- [78] 徐靖, 等. 天津工业大学学报, 2018, 37(1):19–25.
- Xu Jing, et al. Journal of Tiangong University, 2018, 37(1):19–25.
- [79] 华正良. FRP 筋连续配筋混凝土路面结构设计及施工技术研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2009.
- Hua Zhengliang. The testing research on the structure design and construction technology of FRP–CRCP[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2009.
- [80] Zakaria M, et al. Construction and Building Materials, 2011, 25(2):670–677.
- [81] Chan R, et al. Journal of Cleaner Production, 2019. doi:10.1016/j.jclepro.2019.01.221.
- [82] Grzymiski F, et al. Construction & Building Materials, 2019, 198:323–331.
- [83] Rangelov M, et al. Construction and Building Materials, 2016, 126(15):875–885.
- [84] Abreu F D S, et al. Journal of Cleaner Production, 2020. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122920.
- [85] Yang L, et al. Composites Part A, 2015, 72. doi:10.1016/j.compositesa.2015.01.030.