

轻质高强结构材料的发展与应用

陈 哲

武汉工程大学 湖北武汉

【摘要】轻质高强结构材料是航空航天、轨道交通、建筑工程等领域的战略性基础材料，对于实现结构轻量化、提高能源效率和推动绿色制造具有重要意义。本文系统综述了轻质高强结构材料的研究进展与工程应用，涵盖轻质高强金属材料、纤维增强复合材料、金属有机框架材料等主要类型。在金属材料方面，重点介绍了高性能铝合金、钛合金的制备技术、性能优化及其在轨道交通、船舶制造等领域的应用；在复合材料方面，详细阐述了碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、天然纤维混杂复合材料的界面工程策略、力学性能及其在结构加固、建筑抗震等领域的应用；在制备技术方面，综述了选区激光熔化、大型铸造、拉挤成型等先进工艺，以及界面工程、涂层防护等性能优化方法。研究表明，轻质高强结构材料正朝着多材料混杂化、智能化多功能化、绿色可持续化、先进制造技术等方向发展。当前面临的主要挑战包括制备成本较高、界面结合强度不足、长期耐久性有待验证以及回收利用体系不完善等。未来应加强多材料优化设计、结构健康监测一体化以及可回收材料的研发，推动轻质高强结构材料的规模化工程应用。

【关键词】轻质高强材料；铝合金；碳纤维复合材料；纤维增强复合材料；结构加固；混杂层压板

【收稿日期】2025 年 11 月 25 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 20 日 **【DOI】**10.12208/j.ijms.20250005

A review of the development and application of lightweight high-strength structural materials

Zhe Chen

Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei

【Abstract】 Lightweight high-strength structural materials are strategic basic materials in aerospace, rail transportation, construction engineering and other fields, playing an important role in achieving structural lightweight, improving energy efficiency and promoting green manufacturing. This paper systematically reviews the research progress and engineering applications of lightweight high-strength structural materials, covering major types such as lightweight high-strength metals, fiber-reinforced composites, and metal-organic framework materials. In terms of metallic materials, the preparation technologies, performance optimization, and applications of high-performance aluminum alloys and titanium alloys in rail transportation and shipbuilding are highlighted. In terms of composite materials, the interface engineering strategies, mechanical properties, and applications of carbon fiber composites, glass fiber composites, and natural fiber hybrid composites in structural reinforcement and seismic resistance are elaborated. In terms of preparation technologies, advanced processes such as selective laser melting, large-scale casting, and pultrusion, as well as performance optimization methods such as interface engineering and coating protection, are reviewed. Research shows that lightweight high-strength structural materials are moving towards multi-material hybridization, intelligent multifunctionalization, green sustainability, and advanced manufacturing technologies. Current challenges include high preparation costs, insufficient interfacial bonding strength, uncertain long-term durability, and imperfect recycling systems. Future efforts should strengthen multi-material optimization design, structural health monitoring integration, and recyclable material development to promote the large-scale engineering application of lightweight high-strength structural materials.

【Keywords】Lightweight high-strength materials; Aluminum alloy; Carbon fiber composites; Fiber-reinforced composites; Structural reinforcement; Hybrid laminates

引言

轻质高强结构材料是航空航天、轨道交通、建筑工程、海洋工程等领域的战略性基础材料。随着全球对能源效率、环境保护和可持续发展的日益重视，结构轻量化已成为工程领域的重要发展方向。轻质高强材料能够在保证结构承载能力的前提下显著降低结构自重，进而减少能源消耗和碳排放，是实现绿色制造和循环经济的关键路径^[1]。

轻质高强结构材料的内涵涵盖密度低、比强度高、比刚度高等核心特征，主要包括轻质高强金属材料（如铝合金、钛合金、镁合金）、纤维增强复合材料（如碳纤维复合材料、玻璃纤维复合材料、天然纤维复合材料）、金属-纤维混杂层压板以及新型金属有机框架材料等。这些材料各具特色，在不同工程领域展现出独特的应用优势^[2]。

近年来，轻质高强结构材料的研究取得了显著进展。在金属材料方面，选区激光熔化等增材制造技术实现了高性能铝合金的精密成形，大型一体化铸造技术不断突破尺寸和性能瓶颈。在复合材料方面，碳纤维复合材料已在航空航天、建筑工程加固等领域得到广泛应用，玻璃纤维复合材料在海洋工程、建筑结构中展现出良好性能，天然纤维复合材料因其环保特性受到越来越多的关注^[3]。

在制备技术与性能优化方面，界面工程策略显著提升了纤维增强复合材料的界面结合强度，涂层防护技术有效改善了材料的耐环境性能，数值模拟方法为材料结构设计提供了重要工具。与此同时，损伤检测与健康监测技术的发展为轻质高强结构材料的安全服役提供了保障^[4]。

锆基金属有机框架材料作为一类新型多孔材料，通过连接子去对称化和调节剂补偿等结构设计策略，在气体吸附、催化、传感等领域展现出巨大潜力。这一新兴材料体系为轻质高强结构材料家族增添了新的成员^[5]。

本文旨在对轻质高强结构材料的发展与应用进行系统性综述。文章结构安排如下：第一章介绍轻质高强金属材料的研究进展；第二章系统阐述纤维增强复合材料的研究现状；第三章介绍其他轻质高强结构材料；第四章综述材料制备与性能优化技术；第五章分析典型工程应用；第六章讨论当前挑战与未来发展方向。

1 轻质高强金属材料

1.1 高性能铝合金

铝合金因其低密度、良好耐腐蚀性和可加工性，是应用最广泛的轻质高强金属材料。近年来，通过合金成分优化和先进制备技术，铝合金的力学性能得到显著提升。

选区激光熔化（SLM）技术为高性能铝合金的制备提供了新途径。研究表明，通过 SLM 制备的新型 Al-Mg-Mn-Zr-Ti 合金展现出优异的强度-延展性匹配。该合金的设计策略是在 Al-Mg-Mn 基体中复合添加 Zr 和 Ti 元素，利用 SLM 快速凝固的特点形成纳米尺度的 Al₃(Zr, Ti) 析出相。这些纳米析出相不仅起到了钉扎晶界、细化晶粒的作用，还在变形过程中有效阻碍位错运动，从而显著提高合金强度。同时，细小均匀的晶粒组织为位错滑移提供了足够空间，使合金保持了良好的塑性。这一研究为开发高性能增材制造铝合金提供了新思路。

高性能大型铝合金铸造技术是实现铝合金结构件规模化应用的关键。近年来，大型复杂薄壁铝合金铸件的铸造技术取得了长足进步，主要包括低压铸造、差压铸造、精密铸造等工艺方法。通过优化浇注系统设计、精确控制凝固过程、采用数值模拟辅助工艺设计，可以有效减少铸造缺陷，提高铸件内部质量和尺寸精度。大型铝合金铸件在航空航天、轨道交通、汽车制造等领域具有广阔应用前景，如飞机整体舱段、高速列车车体、新能源汽车电池托盘等^[6]。

高强铝合金在输电杆塔领域的应用是轻质高强材料在能源基础设施中的重要实践。研究表明，采用高强铝合金替代传统钢材制作输电杆塔，可降低杆塔自重 40%-60%，显著减少基础承载要求和运输安装成本。然而，铝合金杆塔具有质量轻、刚度小的特点，对风荷载更为敏感。通过对高强铝合金杆塔风振系数的系统研究，揭示了铝合金杆塔的风振响应特性，为铝合金杆塔的抗风设计和工程应用提供了理论依据^[7]。

船用 5083 铝合金是海洋工程中广泛使用的轻质高强材料，具有良好的耐海水腐蚀性能和焊接性能。便携式激光装焊技术为船用铝合金薄板的高效连接提供了新方案。与传统电弧焊相比，激光焊接具有热输入小、焊接变形小、焊接速度快等优点。研究表明，优化激光功率、焊接速度和保护气体流量等工艺参数，可以获得成形良好、力学性能优异的

5083 铝合金焊接接头。便携式激光装焊设备的应用,提高了船舶建造的灵活性和效率^[8]。

1.2 钛合金及其他轻质金属材料

钛合金具有密度低、比强度高、耐腐蚀性能优异的特点,在航空航天、海洋工程、生物医用等领域具有重要应用。近年来,钛合金在轨道交通领域的应用逐渐受到关注^[9]。

高速动车组转向架构架是承载车体重量和传递牵引制动力的关键部件,其重量直接影响列车的运行能耗和动力学性能。研究表明,将钛合金应用于高速动车组转向架构架,可以在保证结构强度和疲劳寿命的前提下显著减轻构架重量。钛合金转向架构架的设计需要考虑材料的各向异性、焊接特性和疲劳性能,通过优化结构形式和连接方式,充分发挥钛合金的轻质高强优势。钛合金在高速动车组中的应用,为轨道交通装备的轻量化提供了新途径^[10]。

2 纤维增强复合材料

2.1 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料(CFRP)具有比强度高、比模量高、可设计性强等优点,已成为轻质高强结构材料的典型代表,在建筑工程加固、航空航天、交通运输等领域得到广泛应用。

碳纤维复合材料加固混凝土构件是建筑结构加固改造的重要技术手段。研究表明,采用CFRP布或CFRP板外贴加固混凝土梁、柱、板等构件,可以有效提高构件的承载能力和延性。CFRP加固的效果受多种因素影响,包括碳纤维的用量和铺设方式、粘结剂性能、锚固措施等。通过优化加固方案,CFRP加固混凝土构件的承载力可提高30%-80%。评估CFRP加固效果的指标体系应包括承载力、刚度、裂缝宽度、延性系数等多个维度^[11]。

CFRP加固混凝土结构的设计计算与施工要点是保证加固工程质量的关键。设计计算方面,需要根据原结构的受力状态和加固目标,确定CFRP的用量和布置方式,进行正截面抗弯、斜截面抗剪、锚固长度等验算。施工要点方面,需要严格控制基层处理、底涂涂刷、找平处理、碳纤维粘贴、表面防护等工序质量。CFRP加固技术的成熟应用,为既有建筑的延寿和安全改造提供了可靠技术支撑^[12]。

碳纤维复合材料拉索的缺陷成像及损伤检测技术是保障CFRP结构安全服役的重要手段。CFRP拉索具有比强度高、耐疲劳、耐腐蚀等优点,在大跨度

空间结构和桥梁工程中具有应用潜力。然而,CFRP材料的各向异性和脆性破坏特征对其损伤检测提出了更高要求。研究表明,结合电磁检测和声发射技术,可以实现CFRP拉索内部缺陷的成像识别和损伤过程的实时监测。电磁技术适用于检测CFRP中的纤维断裂和孔隙缺陷,声发射技术可以捕捉损伤演化过程中的弹性波信号,实现损伤定位和严重程度评估。

碳纤维复合材料在矿用低压变压器中的应用是CFRP在能源装备领域的有益探索。矿用变压器对重量和防爆性能有严格要求,传统钢制壳体重量大、散热性能有限。研究表明,采用CFRP制作矿用低压变压器的外壳和绝缘结构,可以在满足防爆要求的前提下显著减轻设备重量。通过静压模拟分析,优化CFRP结构的铺层设计和几何构型,可以满足矿用变压器的机械强度和安全性能要求。CFRP在矿用变压器中的应用,有助于提高煤矿装备的便携性和运输效率。

带有部分CFRP拉索的开口索穹顶结构静力性能分析展示了CFRP在大跨度空间结构中的应用前景。索穹顶结构具有自重轻、跨度大的特点,是体育场馆、展览中心等大跨度建筑的理想结构形式。采用CFRP拉索替代传统钢索,可以进一步减轻结构自重,提高跨越能力。研究表明,在开口索穹顶结构中合理布置CFRP拉索,可以优化结构内力分布,提高整体刚度,改善静力性能。CFRP拉索与钢索的混合配置策略,兼顾了结构性能和经济效益。

2.2 玻璃纤维复合材料

玻璃纤维复合材料(GFRP)具有成本相对较低、绝缘性能好、耐腐蚀性能优良的特点,在建筑工程、海洋工程、化工防腐等领域得到广泛应用。

GFRP筋增强混凝土板耐火性能试验与数值分析揭示了GFRP筋混凝土结构在高温下的力学行为。GFRP筋的玻璃化转变温度较低,高温下力学性能退化明显,这限制了其在有防火要求的结构中的应用。研究表明,通过设置防火保护层、优化混凝土保护层厚度、采用高性能混凝土等措施,可以显著提高GFRP筋混凝土板的耐火极限。数值模拟可以准确预测高温下GFRP筋混凝土板的温度场分布和力学响应,为防火设计提供依据^[13]。

玻璃纤维多腔拉挤成型工艺是实现高性能GFRP型材高效生产的关键技术。传统拉挤成型工

艺适用于等截面型材的生产，而多腔拉挤成型技术可以一次成型具有多个腔体的复杂截面型材。研究表明，通过优化纤维排布、树脂浸润和模具设计，可以制备力学性能优良的 GFRP 多腔型材。该型材在建筑门窗、幕墙骨架、桥梁栏杆等领域具有广阔应用前景。多腔拉挤成型技术的进一步发展，将推动 GFRP 型材在更多工程领域的应用。

2.3 天然纤维复合材料

天然纤维复合材料利用菠萝叶纤维、亚麻纤维、黄麻纤维等可再生资源作为增强体，具有密度低、成本低、可降解等优点，是绿色复合材料的典型代表。

铝/碳纤维/菠萝叶纤维混杂层压板的高速冲击响应与损伤分析为天然纤维在汽车结构中的应用提供了实验依据。该混杂层压板采用铝合金面板和碳纤维-菠萝叶纤维混杂芯层的结构形式，兼具金属的韧性和纤维复合材料的高比强度。研究表明，菠萝叶纤维的引入可以改善混杂层压板的能量吸收能力和损伤容限。采用 TOPSIS 多属性决策方法对混杂层压板的高速冲击性能进行综合评价，可以优化纤维混杂比例和铺层顺序，获得综合性能最优的设计方案。这种混杂结构在汽车轻量化领域具有良好应用前景。

2.4 纤维增强树脂基复合材料界面工程

界面是纤维增强复合材料中纤维与基体之间的过渡区域，其结构和性能直接影响复合材料的宏观力学性能。界面工程策略是提升纤维增强树脂基复合材料性能的重要手段。

界面工程策略赋能纤维增强树脂基复合材料的研究进展表明，通过纤维表面改性、上浆剂优化、纳米材料界面修饰等方法，可以有效改善纤维与基体之间的浸润性和化学键合，提高界面剪切强度和抗老化性能。碳纤维表面的氧化处理、等离子体处理、化学接枝等方法可以增加表面活性官能团，增强与树脂基体的化学键合。纳米材料（如碳纳米管、石墨烯、纳米二氧化硅）的界面修饰可以在纤维表面构建多尺度增强结构，显著提高界面强度和抗疲劳性能^[14]。

纤维增强复合材料金属层压板（FML）是将金属薄板和纤维复合材料交替层压形成的混杂复合材料，兼具金属的韧性和纤维复合材料的高比强度。FML 的界面问题是影响其综合性能的关键因素，包括金属-纤维界面的粘结强度和耐久性能。研究表

明，通过金属表面预处理（如阳极氧化、喷砂、化学刻蚀）、采用胶粘剂过渡层、优化固化工艺等措施，可以显著提高 FML 的层间剪切强度和抗分层性能。FML 在飞机蒙皮、高速列车壳体等领域具有广阔应用前景。

3 其他轻质高强结构材料

3.1 金属有机框架材料

金属有机框架材料（MOFs）是由金属离子或金属簇与有机配体通过配位键自组装形成的一类新型多孔晶态材料，具有超高比表面积、可调孔径和可功能化的结构特点^[15]。

钪基金属有机框架材料的结构探索通过连接子去对称化和调节剂补偿策略，实现了对 MOF 结构多样性和功能性的精确调控。连接子去对称化策略是在对称性有机配体中引入不同取代基，打破其对称性，从而产生新的拓扑结构和孔隙环境。调节剂补偿策略是通过添加单羧酸调节剂，调节 MOF 晶体生长过程中的成核和生长速率，实现对晶体尺寸、形貌和缺陷浓度的控制。这两种策略的结合，为开发具有特定孔道结构和功能位点的新型 MOF 材料提供了有效途径。钪基 MOF 在气体储存与分离、催化、药物递送、传感等领域展现出巨大应用潜力。

3.2 玄武岩纤维复合材料

玄武岩纤维是以天然玄武岩为原料经高温熔融拉丝制成的无机纤维，具有力学性能优良、耐高温、耐腐蚀、绿色环保等特点。

玄武岩混凝土组合结构浮式防波堤失效模式试验研究揭示了玄武岩纤维复合材料在海洋工程中的应用潜力。浮式防波堤是用于波浪防护的浮动结构，对材料密度和耐海水腐蚀性能有较高要求。采用玄武岩纤维增强混凝土制作浮式防波堤壳体，可以在保证结构强度的前提下减轻自重。研究表明，玄武岩混凝土组合结构浮式防波堤的主要失效模式包括壳体开裂、连接节点破坏和整体倾覆。通过优化结构形式和配筋方案，可以提高浮式防波堤的承载能力和抗波浪性能。

3.3 塑料及纸质增强材料

塑料和纸质材料作为轻质材料的代表，在某些特定应用场景中也发挥着重要作用。

塑料制品在体育运动训练中的应用展示了工程塑料在运动器材领域的价值。碳纤维增强塑料、玻璃纤维增强塑料等轻质高强塑料制品，如碳纤维自

行车、玻璃钢滑雪板、聚碳酸酯头盔等,在提高运动性能和保障运动安全方面发挥了重要作用。塑料制品的轻质特性降低了运动员的负重,高强特性保证了器材的耐用性。

纸质增强材料在建筑工程抗震结构加固中的应用探索了环保材料在结构工程中的可能性。通过将纸质材料与树脂复合,可以制备具有一定强度和刚度的纸质复合材料。这种材料可用于填充墙体的加固和耗能构件的制作,在提高结构抗震性能的同时减少环境负荷。纸质增强材料的应用还需要进一步研究其长期耐久性和防火性能^[16]。

中空板环保包装在洗衣机产品中的应用展示了轻质高强材料在家电包装领域的经济和环境价值。中空板是一种具有中空结构的塑料板材,具有重量轻、强度高、可回收等优点。用中空板替代传统木质或纸质包装,可以降低包装重量,提高防护性能,减少木材消耗。这一应用体现了轻质高强材料在绿色包装领域的发展潜力。

4 材料制备与性能优化技术

4.1 增材制造与先进成型技术

增材制造和先进成型技术是实现轻质高强结构材料精密成形的关键手段。

选区激光熔化技术利用高能激光束逐层熔化金属粉末,可以制备具有复杂几何形状和高尺寸精度的金属零件。该技术的特点包括快速凝固形成细晶组织、材料利用率高、设计自由度大等。在铝合金的 SLM 成形中,工艺参数的优化(激光功率、扫描速度、扫描间距、层厚等)和合金成分的设计是获得高致密度和优异力学性能的关键。

大型铝合金铸造技术的发展主要体现在铸造工艺的优化和数值模拟技术的应用。低压铸造、差压铸造、精密铸造等工艺方法各有特点,适用于不同类型和规模的大型铝合金铸件。数值模拟技术在铸造工艺设计中的应用,可以实现充型过程、温度场、应力场的精确预测,辅助工艺参数优化和缺陷控制^[19]。

玻璃纤维多腔拉挤成型工艺是实现高性能 GFRP 型材高效生产的先进技术。该工艺通过牵引装置将浸润树脂的玻璃纤维束拉过具有多腔结构的加热模具,在模具中完成树脂的固化和型材的成型。多腔拉挤成型技术的关键在于纤维的均匀分布、树脂的充分浸润和模具的精确设计。

4.2 界面工程与表面改性

界面工程和表面改性技术是提升轻质高强结构材料综合性能的有效手段。

涂层防护技术在材料防弹性能提升中的应用表明,通过在金属或复合材料表面涂覆陶瓷涂层、聚脲涂层等防护层,可以有效提高材料的抗冲击性能和防弹能力。涂层的增韧机制包括应力波传播路径的改变、裂纹扩展的阻碍以及涂层本身的能量吸收。

界面工程策略在纤维增强复合材料中的应用,主要通过纤维表面改性和纳米材料界面修饰来提高界面结合强度。纤维表面氧化处理可以在纤维表面引入含氧官能团,增强与树脂基体的化学键合;纳米材料(如碳纳米管、石墨烯)的界面修饰可以在纤维表面构建多尺度结构,提高界面抗剪切和抗剥离性能。

4.3 结构与数值模拟

结构与数值模拟方法为轻质高强结构材料的优化提供了重要工具。

无网格方法在层合复合板动态稳定性分析中的应用展示了数值方法在复合材料结构分析中的优势。与传统有限元方法相比,无网格方法不需要划分网格,避免了网格畸变问题,特别适用于大变形和动态问题的分析。通过无网格方法,可以准确分析层合复合板在动态荷载作用下的屈曲失稳特性,为复合材料结构的抗屈曲设计提供依据。

大跨度空间索膜结构的风致振动响应及抗风优化策略研究揭示了膜结构在风荷载作用下的动力响应特征。索膜结构具有质量轻、刚度小的特点,对风荷载敏感。通过风洞试验和数值模拟相结合的方法,可以分析索膜结构的风振响应特性,提出抗风优化策略,包括结构形态优化、附加质量调控、拉索预应力优化等措施。

GFRP 筋增强混凝土板的耐火性能数值分析采用热-力耦合分析方法,可以准确预测高温下 GFRP 筋混凝土板的温度场分布、变形过程和破坏模式。数值模拟结果与试验数据具有较好的一致性,验证了分析方法的可靠性。数值分析为 GFRP 筋混凝土结构的防火设计提供了高效工具^[20]。

4.4 损伤检测与健康监测

基于电磁与声发射的 CFRP 拉索缺陷成像及损伤检测技术为 CFRP 结构的安全服役提供了保障。电磁检测技术利用 CFRP 的导电特性,通过检测电磁场变化来识别纤维断裂、孔隙等内部缺陷。声发

射技术可以实时监测结构在受力过程中的损伤演化,通过分析声发射信号的特征(能量、幅值、持续时间等),可以判断损伤类型和严重程度。两种技术的结合,实现了 CFRP 拉索从局部缺陷成像到整体损伤监测的全覆盖^[21]。

5 轻质高强结构材料的工程应用

5.1 航空航天与轨道交通

铝/碳纤维/菠萝叶纤维混杂层压板在汽车结构中的应用研究表明,该混杂层压板在保证结构安全性的前提下可以显著减轻车身重量。混杂层压板在高速冲击下的能量吸收能力和损伤容限优于单一材料,这得益于金属面板的塑性和纤维芯层的高比强度的协同作用。在汽车前防撞梁、B 柱等关键吸能结构中的应用,可以提高车辆碰撞安全性和燃油经济性。

钛合金在高速动车组转向架构架中的应用实现了转向架构架的显著减重。钛合金的比强度约为铝合金的 1.5 倍、钢的 3 倍,采用钛合金制作构架可以在保证强度的前提下减轻重量。钛合金构架的设计需要充分考虑材料的疲劳性能和焊接特性,通过优化结构形式和连接方式,充分发挥钛合金的轻质高强优势^[22]。

船用 5083 铝合金薄板的便携式激光装焊技术为船舶建造提供了高效连接方案。该技术设备便携、操作灵活,适用于船体曲面外板和狭小空间内的焊接作业。优化激光焊接工艺参数,可以获得成形良好、力学性能满足船级社要求的焊接接头。便携式激光装焊技术的应用,提高了船舶建造的自动化水平和生产效率^[23]。

5.2 建筑工程与结构加固

轻质高强结构材料在建筑工程中的应用主要包括结构加固、抗震改造和新型结构体系等方面。

住宅建筑轻质隔墙板裂缝成因及抗裂施工技术研究揭示了轻质隔墙板开裂的主要原因是干燥收缩、温度变形和施工不当。通过优化材料配比、增设抗裂网格、控制施工环境温湿度等措施,可以有效减少裂缝产生,提高隔墙板的工程质量和使用寿命。

玄武岩混凝土组合结构浮式防波堤的应用展示了玄武岩纤维复合材料在海洋工程结构中的可行性。玄武岩纤维增强混凝土具有比强度高、耐海水腐蚀的特点,适用于制作浮式防波堤壳体。通过试验研究,确定了浮式防波堤的主要失效模式,提出了结

构优化方案,为实际工程应用提供了依据。

GFRP 筋增强混凝土板的研究为 GFRP 筋在混凝土结构中的应用提供了技术支撑。GFRP 筋具有耐腐蚀、不导电、透波性好等优点,适用于有防腐和电磁屏蔽要求的混凝土结构。研究表明,通过合理设置防火保护层,GFRP 筋混凝土板可以满足一定耐火等级要求。

复合材料加固既有建筑结构的疲劳性能分析表明,采用 CFRP 布加固的钢结构和混凝土结构,其疲劳寿命可以显著延长。复合材料的轻质特性使加固过程对原结构影响小,施工便捷。疲劳性能分析考虑了应力比、加固量、荷载历史等因素的影响,为加固设计提供了依据。

碳纤维复合材料加固混凝土构件的效果评估研究表明,CFRP 加固可以有效提高混凝土构件的承载能力、刚度和延性。评估指标体系的建立为加固效果的量化评价提供了方法,包括承载力提高幅度、裂缝宽度控制、刚度退化程度、延性系数改善等。

纸质增强材料在建筑工程抗震结构加固中的应用探索了绿色材料在结构工程中的可能性。纸质复合材料可作为填充墙体的耗能构件,在地震作用下通过材料的塑性变形消耗地震能量,减轻主体结构损伤。这一应用体现了绿色环保理念在结构抗震领域的发展方向。

CFRP 加固混凝土结构的设计计算与施工要点为工程实践提供了技术指南。设计计算部分包括正截面抗弯、斜截面抗剪和锚固长度等验算;施工要点部分包括基层处理、底涂涂刷、碳纤维粘贴、表面防护等工序的质量控制要求。

带有部分 CFRP 拉索的开口索穹顶结构静力性能分析表明,CFRP 拉索在开口索穹顶结构中的应用可以优化内力分布、提高结构刚度。CFRP 拉索与钢索的混合配置策略兼顾了结构性能和经济效益,是大型空间结构轻量化的有效途径^[24]。

5.3 能源与电工领域

高强铝合金杆塔风振系数研究为铝合金输电杆塔的抗风设计提供了理论依据。铝合金杆塔具有质量轻、刚度小的特点,风振响应显著。通过风振系数研究,确定了铝合金杆塔在不同风速和地形条件下的风振系数取值方法,为杆塔结构设计提供了参考。

碳纤维复合材料矿用低压变压器结构设计 with 静压模拟研究展示了 CFRP 在矿用设备中的应用前景。

采用 CFRP 制作变压器外壳和绝缘结构,可以在满足防爆要求的前提下减轻设备重量。静压模拟分析验证了 CFRP 结构的承载能力,优化了铺层设计和几何构型,为工程样机的开发奠定了基础。

5.4 其他工业应用

塑料制品在体育运动训练中的应用包括碳纤维自行车、玻璃钢滑雪板、聚碳酸酯头盔等。这些轻质高强塑料制品在提高运动性能、保障运动安全方面发挥了重要作用。塑料制品的轻质特性降低了运动员的负重,高强特性保证了器材的耐用性和安全性。

中空板环保包装在洗衣机产品中的应用展示了轻质高强材料在绿色包装领域的价值。中空板包装具有重量轻、强度高、可回收等优点,替代传统木质或纸质包装可以减少木材消耗、降低运输成本。这一应用体现了轻质高强材料在绿色制造和循环经济中的潜力^[25]。

6 讨论与展望

6.1 当前发展成就与问题反思

经过多年发展,轻质高强结构材料的研究与应用取得了显著成就。铝合金、钛合金等轻质金属材料性能持续提升,增材制造、大型铸造等技术不断突破;碳纤维、玻璃纤维、天然纤维复合材料应用日益广泛,界面工程、混杂化设计等策略显著改善了材料性能;新型材料如金属有机框架材料展现出独特的功能特性。

然而,轻质高强结构材料的发展仍面临诸多挑战。一是制备成本较高,高性能纤维、高端合金及其复合材料的制备工艺复杂、能耗大,限制了其在成本敏感领域的规模化应用。二是界面结合强度不足,纤维与基体之间的界面是复合材料的薄弱环节,环境因素(湿热、冻融等)会加速界面退化。三是长期耐久性有待验证,新型材料在实际服役环境下的长期性能数据积累不足,制约了其在关键承载结构中的应用。四是回收利用体系不完善,纤维增强复合材料的回收技术尚不成熟,废弃物的资源化利用率低。

6.2 未来发展趋势

展望未来,轻质高强结构材料将呈现以下发展趋势:

多材料混杂化。单一材料难以同时满足轻质、高强、高韧、耐腐蚀等多元化需求,多材料混杂设计成为重要发展方向。金属-纤维混杂层压板、纤维-纤维混杂复合材料等通过不同材料的优势互补,实现

综合性能的协同提升。基于拓扑优化的多材料布局设计,可以在结构的不同区域按需分配材料,实现最优的轻量化效果。

智能化与多功能化。轻质高强结构材料将向智能化和多功能化方向发展。将传感元件、驱动元件集成到材料内部,实现结构健康监测、自感知、自诊断、自适应等功能。碳纤维复合材料本身就是良好的传感材料,可以通过电阻变化监测自身应变和损伤状态。自修复功能材料的开发,可以使材料在使用过程中自主修复微裂纹,延长使用寿命。

绿色可持续发展。环保意识的增强推动轻质高强材料向绿色可持续方向发展。天然纤维复合材料、生物基树脂、可回收热塑性复合材料等绿色材料的研发受到重视。可设计、可拆卸、可回收的材料-结构一体化设计理念,使材料在生命周期结束后可以高效回收再利用,实现资源闭环循环。

先进制造技术。增材制造、连续纤维 3D 打印、自动化铺丝铺带等先进制造技术的成熟,将推动轻质高强结构材料的精密化、定制化、高效化制造。数字孪生技术将实现制造过程的全流程仿真和优化,提高产品一致性和合格率。

7 结论

本文系统综述了轻质高强结构材料的发展与应用研究进展。在轻质高强金属材料方面,选区激光熔化技术实现了高性能铝合金的精密成形,大型铝合金铸造技术不断突破尺寸和性能瓶颈,钛合金在轨道交通领域的应用为装备轻量化提供了新途径。在纤维增强复合材料方面,碳纤维复合材料在建筑工程加固、能源装备等领域展现出广阔应用前景,玻璃纤维复合材料在海洋工程中表现出良好的耐腐蚀性能,天然纤维混杂复合材料为绿色制造提供了新选择。在材料制备与性能优化方面,界面工程策略显著提升了复合材料的界面结合强度,数值模拟方法为材料结构设计提供了重要工具,损伤检测技术为结构安全服役提供了保障。

当前,轻质高强结构材料正朝着多材料混杂化、智能化多功能化、绿色可持续化、先进制造技术等方向发展。尽管仍面临制备成本较高、界面结合强度不足、长期耐久性有待验证、回收利用体系不完善等挑战,但随着材料科学、制造技术和设计方法的不断进步,轻质高强结构材料必将在航空航天、轨道交通、建筑工程、能源装备等领域发挥越来越

重要的作用,为实现结构轻量化和可持续发展作出更大贡献。

参考文献

- [1] Xiao H, Sultan H T M, Shahar S F, et al. High Velocity Impact Response and Damage Analysis of Hybrid Aluminum/Carbon Fiber/Pineapple Leaf Fiber Laminates for Automotive Structure Using TOPSIS Method[J]. Journal of Natural Fibers, 2025, 22(1).
- [2] Zhao Q, Zhao L C, Wu H Y, et al. A novel Al-Mg-Mn-Zr-Ti alloy with an excellent strength-ductility combination prepared via selective laser melting[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025, 33(1): 20.
- [3] Kalehsar E H, DarvishaliNezhad A. Dynamic Stability Analysis of Laminated Composite Plates Using Meshless Methods[J]. International Journal of Mechanics and Materials in Design, 2025, 22(1): 9.
- [4] Alexe G G, Carp B G, Tiganescu V T, et al. Enhancing the Performance of Materials in Ballistic Protection Using Coatings—A Review[J]. Technologies, 2025, 14(1): 13.
- [5] Liang R R, Wang Y K, Han Z, et al. Structural Exploration of Zirconium Metal-Organic Frameworks Through Linker Desymmetrization and Modulator Compensation[J]. Advanced Materials, 2025, 38(10): e14373.
- [6] 陈海丽. 塑料制品在体育运动训练中的应用[J]. 塑料工业, 2025, 53(12): 181.
- [7] 陈晓阳. 住宅建筑轻质隔墙板裂缝成因及抗裂施工技术研究[J]. 中华民居, 2025, 18(12): 178-180.
- [8] 沈偲然. 大跨度空间索膜结构风致振动响应及抗风优化策略[C]//2025 工程创新与可持续发展经验交流会论文集(上), 2025: 50-52.
- [9] 刘琦, 王军, 张海涛, 等. 高性能大型铝合金铸造技术现状及展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(12): 1236-1248.
- [10] 刘兆金, 宋春元, 徐鼎皓, 等. 高速动车组转向架构架钛合金材料应用[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(12): 58-62.
- [11] 殷皓天, 霍发力, 嵇春艳, 等. 玄武岩混凝土组合结构浮式防波堤失效模式试验研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(23): 158-164.
- [12] 段德馨, 王天赐, 梁建, 等. GFRP 筋增强混凝土板耐火性能试验与数值分析[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(12): 226-243.
- [13] 陈茗, 史芷丞, 陈凤翔, 等. 界面工程策略赋能纤维增强树脂基复合材料研究进展[J]. 高分子学报, 2025, 56(12): 2246-2261.
- [14] 俞迪. 复合材料加固既有建筑结构的疲劳性能分析[C]//第十三届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集, 2025: 300-302.
- [15] 刘丁憧. 碳纤维复合材料加固混凝土构件的效果评估研究[J]. 科学技术创新, 2025, (22): 131-134.
- [16] 赵羚淞, 贾志欣, 刘立君, 等. 纤维增强复合材料金属层压板研究进展[J]. 塑料工业, 2025, 53(11): 1-9.
- [17] 董超, 郭宝兵, 李发全. 纸质增强材料在建筑工程抗震结构加固中的应用[J]. 华东纸业, 2025, 55(11): 13-15.
- [18] 苏洁, 于良建, 崔维明, 等. 中空板环保包装在洗衣机产品中的应用[C]//2025 年中国家用电器技术大会论文集(3), 2025: 73-77.
- [19] 郭经峰. 高强铝合金杆塔风振系数研究[J]. 电工技术, 2025, (21): 198-200.
- [20] 董鑫, 赵运超. CFRP 加固混凝土结构的设计计算与施工要点[J]. 四川建材, 2025, 51(11): 174-176.
- [21] 张鹏飞. 基于电磁与声发射的碳纤维复合材料拉索缺陷成像及损伤检测技术研究[D]. 河北大学, 2025.
- [22] 祖安, 张红奎, 沈航, 等. 碳纤维复合材料矿用低压变压器结构设计及静压模拟研究[J]. 煤矿机械, 2025, 46(11): 133-136.
- [23] 邓胜杰, 陈景毅, 杨荣轩, 等. 船用 5083 铝合金薄板便携式激光装焊工艺研究[J]. 焊接技术, 2025, 54(10): 84-89.
- [24] 张微敬, 胡宜洲, 王泽强. 带有部分碳纤维复合材料(CFRP)拉索的开口索穹顶结构静力性能分析[J]. 工业建筑, 2025, 55(10): 65-72.
- [25] 杨文燕, 李武洲, 高硕, 等. 玻璃纤维多腔拉挤成型工艺及应用前景[J]. 国际纺织导报, 2025, 53(05): 1-12.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS