

热塑性碳纤维复合材料构件结构设计与性能优化研究

赵玲芳^{1,2} 刘鸣晨² 安宇航² 杨姝蕾² 窦南南^{2*} 韩 宇³

1. 天津大学材料科学与工程学院 天津 300372

2. 天津中科先进技术产业有限公司 天津 300392

3. 天津爱思达新材料科技有限公司 天津 300304

摘 要: 热塑性碳纤维复合材料构件的结构设计与性能优化研究,旨在探索如何通过创新设计方法和材料改性技术,提升构件的力学性能、加工效率和环境适应性。本研究综合运用有限元仿真、界面改性技术和制备工艺优化等手段,深入分析了结构参数对构件性能的影响,并提出针对性的优化策略。研究结果显示,通过合理的铺层设计和界面改性,可以显著提高复合材料的强度和韧性;同制备工艺的优化降低生产成本,提升材料的可回收性。本研究为热塑性碳纤维复合材料在高端制造领域的应用提供理论依据和技术支持。

关键词: 热塑性碳纤维复合材料; 结构设计; 轻量化; 仿真设计; 性能优化

1 热塑性碳纤维复合材料的基础特性

1.1 碳纤维的性能特点

碳纤维(CF)是由有机纤维在惰性气氛中经高温碳化制得的一种高性能材料,具有一系列独特的性能特点。第一、碳纤维具有高强度和高比模量,这意味着它能够在承受巨大负荷的同时,保持较小的形变。相较于传统材料如钢材,碳纤维的强度更大,而密度却更低,仅为钢材的1/4左右。这种特性使得碳纤维成为制造轻质高强度结构件的首选材料。第二、碳纤维具有优异的热性能和化学稳定性,它的热膨胀系数小,热导性好,能够在极端温度条件下保持稳定的性能。碳纤维还具有良好的耐腐蚀性,能够耐受浓盐酸、硫酸等强酸的腐蚀和浸渍。第三、碳纤维还具备阻尼减震降噪等特性。这使得它在制造需要良好减震性能的产品时具有显著优势。第四、碳纤维的质量轻、弯曲性好、可加工性好,适用于不同的构件形状。其设计自由度大,成型较方便,能满足不同产品性能的要求。这些特性使得碳纤维在航空航天、高端机械、医疗等领域都有着广泛的应用前景。

1.2 热塑性树脂的性能特点

热塑性树脂是一类具有受热软化、冷却硬化性能的树脂材料。其分子结构通常为线型,这使得它们在加热时可以软化并流动,便于成型加工;而在冷却后则可以硬化,保持所需的形状和性能。热塑性树脂的显著优点之一是加工成型简便,它们可以在较低的温度和压力下进行成型加工,无需复杂的设备和工艺。这使得热塑性树脂在制造复杂结构件时具有显著优势^[1]。热塑性树脂还具有良好的韧性、损伤容限和介电常数,它们能够吸

收和分散外力作用下的能量,从而防止材料发生断裂或破损。热塑性树脂还具有良好的电学性能,可用于制造电气和电子设备中的绝缘材料和导电材料。值得注意的是,热塑性树脂还具有良好的可循环性和可回收性,它们可以通过加热重塑实现循环利用,大大降低了废弃物的产生。这一特性使得热塑性树脂在当今环保要求日益严格的背景下具有更加广阔的应用前景。

1.3 热塑性碳纤维复合材料的优势

热塑性碳纤维复合材料结合了碳纤维的高强度、高模量与热塑性树脂的可加工性、可回收性,展现出独特的优势。首先,热塑性碳纤维复合材料具有卓越的力学性能,碳纤维作为增强体,赋予了复合材料高强度和高模量的特性。这使得复合材料能够承受极端条件下的复杂载荷,并保持较小的形变。热塑性树脂基体使得材料在加工过程中易于塑形,便于复杂结构的成型。其次,热塑性碳纤维复合材料具有良好的可加工性和成型灵活性,热塑性树脂基体使得复合材料在加热条件下易于塑形和流动,便于制造复杂形状和结构的产品。加工周期短、效率高,降低了生产成本。热塑性碳纤维复合材料具有优异的可回收性和环保性,它们可以通过加热重塑实现循环利用,大大降低了废弃物的产生。这一特性符合可持续发展的理念,使得热塑性碳纤维复合材料在环保要求日益严格的今天具有更加广阔的应用前景。另外,热塑性碳纤维复合材料还具有其他一系列优点。如高韧性、抗冲和损伤容限等,这些特性使得复合材料在承受外力作用时能够保持较好的完整性和稳定性。热塑性碳纤维复合材料还具有较好的耐腐蚀性、耐磨损性和耐热性等性能,能够在极端环境下保持稳定的性能。

项目: 天津市科技计划项目: 22YFYSHZ00090

2 热塑性碳纤维复合材料构件的结构设计方法

2.1 复合材料结构设计流程

热塑性碳纤维复合材料构件的结构设计是一个复杂而系统的过程,需要综合考虑材料的性能特点、构件的载荷条件、制造工艺以及使用环境等多个因素。首先,进行需求分析,明确构件的使用目的、工作环境以及所承受的载荷类型和大小,这是设计的基础。只有深入了解构件的实际需求,才能为后续的设计提供准确的依据。接着,进行初步设计,根据需求分析的结果,确定构件的大致形状、尺寸和结构布局。在这一阶段,需要充分利用热塑性碳纤维复合材料的性能优势,设计出既满足强度要求又尽可能轻质的构件。然后,进行详细设计,对初步设计进行细化,包括铺层设计、连接设计、细节处理等。这一阶段需要运用专业的设计软件和分析工具,对构件进行精确的力学分析和优化,以确保其在实际使用中的可靠性和耐久性。最后,进行设计验证和评估,通过实验测试、仿真分析等手段,对设计结果进行验证和评估,确保其满足设计要求和标准。如果发现问题或不足,需要及时调整和优化,直到达到最佳的设计效果^[2]。

2.2 铺层设计

铺层设计是热塑性碳纤维复合材料构件结构设计中的关键环节之一。铺层设计的好坏直接影响到构件的力学性能和使用寿命。在进行铺层设计时,需要充分考虑材料的各向异性特点,合理选择铺层角度和铺层顺序,铺层角度的选择应根据构件的受力情况来确定,以充分发挥碳纤维的强度和模量优势。铺层顺序的合理规划也有助于提高构件的抗疲劳性能和损伤容限。铺层设计还需要考虑制造工艺的限制和要求,例如,热塑性树脂的流动性、固化温度和时间等因素都会对铺层设计产生影响。因此在设计过程中需要与制造工艺人员密切合作,确保设计的可行性和实用性。

2.3 连接设计

连接设计是热塑性碳纤维复合材料构件结构设计中的另一个重要环节。连接件的性能直接影响到整个构件的强度和稳定性。在进行连接设计时,需要充分考虑连接部位的受力情况和材料的性能特点。选择合适的连接方式和连接件类型,如机械连接(螺栓、铆钉等)或胶接连接等。还需要对连接部位进行精确的力学分析和优化,以确保其在实际使用中的可靠性和耐久性。连接设计还需要考虑制造工艺的限制和要求,例如,热塑性碳纤维复合材料的加工温度和固化时间等因素都会对连接设计产生影响。在设计过程中需要与制造工艺人员密切

合作,确保连接的可行性和实用性。同时还需要对连接部位进行必要的加强和防护处理,以提高其抗疲劳性能和耐久性。

3 热塑性碳纤维复合材料构件的仿真设计

3.1 仿真设计软件与工具

热塑性碳纤维复合材料构件的仿真设计依赖于一系列专业的软件和工具。这些软件和工具不仅具备强大的计算和分析能力,还能提供直观的可视化界面,帮助设计师更好地理解 and 优化设计。常用的仿真设计软件包括有限元分析(FEA)软件,如Abaqus、ANSYS等。这些软件能够模拟复杂的力学行为,包括应力、应变、位移等,为设计师提供精确的仿真结果。还有一些专门用于复合材料仿真的软件,如Patran/Nastran、Composite Design and Analysis等,它们能够更准确地模拟复合材料的各向异性和层间性能。除了软件外,仿真设计还需要借助一些辅助工具,如三维建模软件(如SolidWorks、CATIA等)用于构建构件的几何模型,以及数据处理软件(如MATLAB、Python等)用于分析和处理仿真数据。

3.2 仿真设计流程

热塑性碳纤维复合材料构件的仿真设计流程通常包括以下几个步骤:首先,进行几何建模,根据设计要求,使用三维建模软件构建构件的几何模型。这一步骤是仿真设计的基础,模型的准确性直接影响到后续仿真结果的可靠性。其次,进行材料属性定义。在仿真软件中,根据热塑性碳纤维复合材料的性能参数,如弹性模量、泊松比、强度等,定义材料的属性。这一步骤是确保仿真结果准确性的关键。然后,设置边界条件和载荷,根据构件的实际使用情况,设置合理的边界条件和载荷^[3]。边界条件包括固定约束、位移约束等,载荷则包括静力载荷、动力载荷等。这一步骤是模拟构件实际受力情况的重要环节。接下来,进行网格划分,将几何模型划分为一系列小的单元,即网格。网格的划分质量和密度直接影响到仿真结果的精度和计算效率。在进行网格划分时,需要综合考虑计算资源和仿真精度。最后,运行仿真并分析结果,在仿真软件中运行仿真计算,得到构件的应力、应变、位移等仿真结果。然后,使用数据处理软件对仿真结果进行分析和处理,评估构件的性能是否满足设计要求。

3.3 仿真结果的验证与修正

仿真结果的验证与修正是确保仿真设计准确性的重要步骤。验证是指通过实验测试或其他手段,对仿真结果进行验证和比对,以评估其准确性。修正则是根据验证结果,对仿真模型或参数进行调整和优化,以提高仿

真结果的准确性。在进行仿真结果验证时,可以选择与仿真条件相似的实验进行测试,如静力实验、疲劳实验等。通过比较仿真结果与实验结果,可以评估仿真的准确性,并找出可能存在的问题和误差来源。在进行仿真结果修正时,需要根据验证结果对仿真模型或参数进行调整。例如,可以调整材料的性能参数、边界条件和载荷设置等,以提高仿真结果的准确性。还可以对网格划分进行优化,以提高仿真计算的精度和效率。

4 热塑性碳纤维复合材料构件的性能优化

4.1 界面改性技术

在热塑性碳纤维复合材料中,纤维与基体之间的界面结合力是影响材料整体性能的关键因素之一。界面结合力的强弱直接决定了复合材料在受力时的应力传递效率和材料的耐久性。因此通过界面改性技术提高纤维与基体之间的界面结合力,是提升热塑性碳纤维复合材料综合性能的有效途径。界面改性技术主要包括化学改性、物理改性和纳米改性等方法。化学改性是通过在纤维表面引入特定的官能团或化学键,增强纤维与基体之间的化学反应和物理吸附,从而提高界面结合力。物理改性则是通过改变纤维表面的形貌和粗糙度,增加纤维与基体的机械啮合作用,提高界面结合强度。纳米改性则是利用纳米材料(如纳米粒子、纳米纤维等)对纤维表面进行修饰,通过纳米效应提高界面结合力和材料的整体性能。通过界面改性技术,不仅可以显著提高热塑性碳纤维复合材料的界面结合力,还可以改善材料的抗疲劳性能、耐磨损性能和耐热性能等。界面改性技术还可以提高材料的加工性能和成型质量,为复合材料的广泛应用提供有力支持。

4.2 制备工艺优化

制备工艺是影响热塑性碳纤维复合材料性能的重要因素之一。通过优化制备工艺,不仅可以提高材料的性能,还可以降低生产成本和能耗。在制备过程中,需要严格控制温度、压力、时间等工艺参数,以确保材料的均匀性和稳定性。同时,还需要采用高效的成型技术和设备,如热压成型、注塑成型等,以提高生产效率和产品质量。还可以通过改进制备过程中的废料处理和回收

技术,减少生产过程中的能耗和损耗。例如,可以采用热塑性树脂的循环再利用技术,将生产过程中的废料进行回收和再利用,降低生产成本和环境影响。通过制备工艺的优化,不仅可以提高热塑性碳纤维复合材料的性能和质量,还可以实现绿色生产和可持续发展。

4.3 高性能纤维与树脂的选择

高性能纤维与树脂的选择是提高热塑性碳纤维复合材料整体性能的关键。碳纤维作为复合材料的增强体,其性能直接影响复合材料的强度和模量^[4]。因此选用高性能的碳纤维(如高强度、高模量碳纤维)可以显著提高复合材料的力学性能。同时,热塑性树脂作为复合材料的基体,其性能也直接影响复合材料的整体性能。选用高性能的热塑性树脂(如高韧性、高耐热性树脂)可以提高复合材料的抗冲击性能、耐热性能和耐化学腐蚀性等。在选择高性能纤维与树脂时,需要综合考虑材料的性能、成本、加工性能以及环境友好性等因素。

结束语

本研究通过对热塑性碳纤维复合材料构件的结构设计与性能优化进行深入探讨,不仅揭示了材料性能与结构参数之间的内在联系,还为复合材料的实际应用提供了宝贵的经验和指导。未来,随着材料科学和制备技术的不断进步,热塑性碳纤维复合材料将在更多领域展现出其独特的优势和潜力。期待更多的研究者能够加入到这一领域,共同推动热塑性碳纤维复合材料技术的创新与发展。

参考文献

- [1]李宁,陈晨.有限元分析在复合材料结构设计中的应用[J].航空材料学报,2020,40(2):1-9.
- [2]张龙,解妙霞,张林杰.纤维增强热塑性复合材料与金属连接技术的研究进展[J].焊管,2024,47(02):8-16+44.
- [3]李娜,柯红军,汪东,等.碳纤维表面改性及其对热塑性复合材料界面性能影响的研究进展[J].现代化工,2024,44(02):72-75.
- [4]李源,张琦,夏礼,栋,庄毅,张师军.碳纤维增强热塑性复合材料成型工艺研究进展[J].现代塑料加工应用,2022,34(5):52-55.