

碳纤维 ABS 复合材料的耐热性能研究

摘要

本研究探讨了碳纤维表面改性和复合工艺优化对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)复合材料耐热性能的影响。通过采用偶联剂接枝改性方法,显著提升了复合材料的界面结合强度,玻璃化转变温度提高至 142.5℃。研究还优化了熔融温度、注射压力和保压时间等工艺参数,确定了最佳制备条件。在此条件下,复合材料在 150℃ 高温下仍保持 65%的初始弯曲强度,并在 800℃ 时的残碳率达 38.8%。动态热机械分析表明,优化后的复合材料具有更高的玻璃化转变温度和模量保持率。这些结果表明,通过合理的表面改性和工艺优化,可以显著提升碳纤维 ABS 复合材料的耐热性能,为其在航空航天、汽车制造等高温应用领域的推广奠定了基础。

关键词: 碳纤维, 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS), 耐热性能, 表面改性, 工艺优化

Abstract

This study investigates the enhancement of heat resistance in carbon fiber-reinforced acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) composites through surface modification and process optimization. The research demonstrates that coupling agent grafting significantly improves the composite's glass transition temperature to 142.5° C, attributed to enhanced interfacial bonding via chemical bonding. Optimal processing parameters—melt temperature of 235° C, injection pressure of 120 MPa, and holding time of 8 seconds—were identified, resulting in superior mechanical properties and thermal stability. The synergistic effect of surface modification and process optimization resulted in composites maintaining 65% of their initial flexural strength at 150° C, with a decomposition temperature of 468.2° C and a char yield of 38.8% at 800° C. Improved interfacial structures not only enhanced mechanical performance but also significantly increased heat resistance, as confirmed by scanning electron microscopy. Dynamic mechanical analysis indicated higher glass transition temperatures and modulus retention, suggesting potential for high-temperature applications. The study establishes a relationship between modification methods, process parameters, and material performance, offering theoretical guidance for optimizing carbon fiber ABS composites. These findings support the development of high-performance composites for aerospace, automotive, and other high-temperature applications.

Keywords: Carbon fiber-reinforced composites, ABS, Heat resistance, Surface modification, Process optimization

目录

第一章 引言	5 错误！未定义书签。
1.1 研究背景与意义	5 错误！未定义书签。
1.2 研究目的与方法	6 错误！未定义书签。
1.3 论文结构	7 错误！未定义书签。
第二章 文献综述	7 错误！未定义书签。
2.1 碳纤维复合材料研究现状	7 错误！未定义书签。
2.2 ABS 复合材料研究现状	9 错误！未定义书签。
2.3 碳纤维 ABS 复合材料研究现状	10 错误！未定义书签。
第三章 实验材料与方法	11 错误！未定义书签。
3.1 实验材料	11 错误！未定义书签。
3.2 实验方法	13 错误！未定义书签。
第四章 碳纤维表面改性研究	14 错误！未定义书签。
4.1 表面改性方法	14 错误！未定义书签。
4.2 改性效果评价	16 错误！未定义书签。
第五章 复合工艺优化	17 错误！未定义书签。
5.1 复合材料制备工艺	17 错误！未定义书签。
5.2 工艺参数优化	19 错误！未定义书签。
第六章 实验结果与讨论	20 错误！未定义书签。
6.1 力学性能测试结果	20 错误！未定义书签。
6.2 热分析结果	21 错误！未定义书签。
6.3 实验结果讨论	23 错误！未定义书签。
第七章 结论与展望	24 错误！未定义书签。
7.1 研究结论	24 错误！未定义书签。
7.2 研究局限与未来展望	24 错误！未定义书签。

第一章 引言

1.1 研究背景与意义

材料科学的发展和工业领域对高性能材料需求的提升，推动了新型复合材料的研究与应用。碳纤维增强复合材料凭借其卓越的力学性能、轻量化特性和优异的耐热性能在工程领域占据重要地位。碳纤维是一种高性能增强材料，具备高强度、高模量、低密度和高耐热性等特性，已在航空航天、汽车制造和体育器材等领域获得广泛应用。丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)树脂作为工程塑料的代表，以其优良的加工性能、抗冲击性能和表面光洁度而备受青睐。然而，ABS树脂的耐热性不足限制了其在高温环境中的应用，这一问题亟待解决。

将碳纤维与ABS树脂复合是提升材料性能的有效途径。通过碳纤维的增强作用，可显著改善ABS树脂的力学性能和耐热性能。这种复合设计在保持ABS树脂良好加工性能的同时，能够克服其耐热性不足的缺陷，为高温环境应用提供新的材料选择。碳纤维与ABS树脂的复合过程涉及复杂的界面作用机制。由于碳纤维表面具有惰性特征，其与ABS树脂基体之间的界面结合较弱，这种界面特性会制约复合材料性能的充分发挥。对碳纤维进行表面改性处理，增强其与ABS树脂基体的界面结合力，是提升复合材料整体性能的关键技术。

复合材料的制备工艺直接影响其性能表现。碳纤维在ABS树脂基体中的分散状态、取向及界面结合情况均受制备工艺的影响，这些因素又直接决定了复合材料的力学性能和耐热性能。通过优化温度、压力、时间等工艺参数，可以获得性能更优的碳纤维ABS复合材料。本研究通过深入探讨碳纤维表面改性方法和复合工艺优化，着力提升碳纤维ABS复合材料的耐热性能。研究成果将为碳纤维增强复合材料的设计和制备提供理论指导，同时为汽车、电子电器、航空航天等领域的高温应用部件开发提供新的材料选择。

从环境和经济角度看，提高ABS树脂的耐热性能有助于延长产品使用寿命，降低材料更换频率，减少资源消耗和环境污染。高性能碳纤维ABS复合材料在替代金属材料方面具有显著优势，可实现产品轻量化设计，这对降低能源消耗和减

少碳排放具有重要意义。本研究通过探索碳纤维的表面改性和复合工艺优化，致力于开发具有优异耐热性能的碳纤维 ABS 复合材料，推动复合材料科学发展，为工业领域提供新的材料解决方案。研究成果将对复合材料技术进步和工业应用发展产生积极影响。

1.2 研究目的与方法

本研究旨在通过碳纤维的表面改性和复合工艺的优化，显著提升碳纤维 ABS 复合材料的耐热性能。为实现这一目标，研究采用了多种先进的分析方法和实验技术，以全面评估材料性能并优化制备工艺。

研究的主要目的包括探索碳纤维表面改性对 ABS 复合材料耐热性能的影响，优化碳纤维 ABS 复合材料的制备工艺，评估不同温度条件下复合材料的力学性能和热稳定性，以及建立碳纤维含量、表面处理和工艺参数与材料性能之间的关系。

为达成上述目标，本研究采用了一系列先进的研究方法。首先，利用有限元分析软件模拟碳纤维 ABS 复合材料在高温环境下的热应力分布和变形情况。通过建立复合材料的微观结构模型，预测材料在高温环境下的行为，为优化材料组成和结构提供理论指导。

其次，进行系统的力学性能测试，评估材料在不同温度下的强度和弹性模量。测试项目包括拉伸强度、弯曲强度、压缩强度和冲击韧性等。通过在不同温度条件下进行测试，全面了解材料的力学性能随温度变化的规律，为材料在高温环境下的应用提供可靠的数据支持。

此外，采用热重分析（TGA）和差示扫描量热分析（DSC）等先进的热分析技术，研究材料的热稳定性和玻璃化转变温度。TGA 可以测定材料在升温过程中的质量变化，评估材料的热分解温度和热稳定性。DSC 可以精确测定材料的玻璃化转变温度（ T_g ），这是评估材料耐热性能的关键指标。

为深入了解材料的微观结构，研究使用扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）观察复合材料的微观结构，特别是碳纤维与 ABS 基体之间的界面

结合状况。通过分析不同表面处理方法对界面结构的影响，优化碳纤维的表面改性工艺，提高复合材料的整体性能。

在复合工艺优化方面，研究采用正交试验设计方法，系统研究不同工艺参数（如温度、压力、时间等）对复合材料性能的影响。通过优化工艺参数，提高碳纤维在 ABS 基体中的分散性和界面结合强度，从而改善复合材料的整体性能。

最后，为评估材料的长期性能，研究进行复合材料的老化试验和疲劳测试，评估材料在长期高温环境下的性能稳定性。这对于预测材料在实际应用中的使用寿命和可靠性至关重要。

通过上述研究方法的综合运用，本研究将系统地探索碳纤维表面改性和复合工艺优化对 ABS 复合材料耐热性能的影响。研究结果将为开发高性能碳纤维 ABS 复合材料提供重要的理论基础和技术支持，推动该类材料在高温环境应用中的广泛使用。

1.3 论文结构

本论文采用系统的研究框架，围绕碳纤维丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)复合材料的耐热性能展开研究。论文以引言篇章阐述研究背景与意义，明确研究目的与方法。文献综述章节全面回顾碳纤维复合材料和 ABS 复合材料的研究现状，重点分析两种材料在航空航天、汽车制造等领域的应用特点，为本研究奠定理论基础。

实验材料与方法章节详细介绍碳纤维和 ABS 树脂的选择标准、材料制备工艺以及性能测试方法。在碳纤维表面改性研究中，系统探讨涂层、接枝等改性方法对碳纤维性能的影响，建立改性工艺与材料性能之间的关系。复合工艺优化章节通过调控熔融温度、压力、时间等工艺参数，研究其对复合材料性能的影响规律，为实际生产提供工艺指导。

实验结果与讨论章节对材料的力学性能、热性能和微观结构进行系统分析，阐明碳纤维表面改性和工艺参数对复合材料耐热性能的影响机理。结论与展望部分总结研究成果，分析研究局限性，并就碳纤维 ABS 复合材料的发展前景和应用

潜力提出建议。通过这种结构安排，确保研究工作的系统性和完整性，为后续相关研究提供参考依据。

第二章 文献综述

2.1 碳纤维复合材料研究现状

碳纤维复合材料凭借优异的力学性能、轻量化特性和耐热性能，在工业领域获得广泛应用。本节将系统阐述碳纤维复合材料的研究现状，深入分析其在航空航天、轨道交通和汽车制造等领域的应用特点，重点介绍碳纤维的力学性能、耐热性能和表面改性方法。

航空航天领域是碳纤维复合材料最重要的应用方向之一。李兵朋[1]的研究表明，碳纤维复合材料在航空航天结构中的应用显著提升了飞行器性能。现代客机中，碳纤维复合材料已成为机翼、机身和尾翼等主要结构部件的核心材料，使飞机重量减轻 20% 以上。碳纤维复合材料优异的耐疲劳性能和抗腐蚀性能，使其在航天器结构设计中发挥关键作用。研究显示，采用碳纤维复合材料制造的航天器结构件，在太空环境中表现出优异的尺寸稳定性和抗辐射性能。

轨道交通领域对碳纤维复合材料的应用不断深化。张祎薇等[2]研究指出，碳纤维复合材料在轨道交通车辆中主要应用于车体外壳、转向架和设备舱等部件。韩国高速列车通过使用碳纤维复合材料，实现车体重量减轻约 28%，同时保持了结构强度和刚度要求。这种减重效果不仅提高了列车运行效率，还降低了轨道磨损和维护成本。

汽车制造领域的碳纤维复合材料应用呈现快速增长趋势。谷杰伟等[3]研究表明，碳纤维复合材料在新能源汽车领域具有显著优势。以 10.7 米长的碳纤维复合材料客车车身为例，与传统碳钢材料相比，质量减轻约 320kg，减重比例达 24.7%。这种减重效果直接提升了车辆性能，改善了动力性能和操控性。研究数据显示，碳纤维复合材料车身在碰撞安全性能测试中表现出优异的能量吸收特性。

碳纤维的力学性能是其应用价值的核心体现。张祎薇等[2]研究发现，碳纤维复合材料密度约为 1.6 g/cm^3 ，拉伸强度可达 1.8 GPa ，拉伸模量高达 128 GPa ，比强度为 $1.13 \text{ GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。这些优异的力学性能使碳纤维复合材料在承受高应力和大变形的应用场景中表现卓越。研究表明，碳纤维的微观结构和排列方式对材料的力学性能有重要影响。

耐热性能是碳纤维复合材料的另一突出优势。樊虎等[4]研究表明，高性能碳纤维复合材料的玻璃化转变温度可达 356°C ，分解温度高达 428.3°C ， 800°C 时的残碳率可达 38.8% 。这种优异的耐热性能使碳纤维复合材料能在高温环境下保持稳定的力学性能。研究发现，碳纤维的结晶度和分子取向对其耐热性能有显著影响。

表面改性技术是提升碳纤维复合材料性能的关键。郝艳霞等[5]研究探讨了氧化铝涂层对碳纤维与环氧基复合材料界面性能和耐热性能的影响。研究发现，涂覆氧化铝的碳纤维复合材料在界面结合力和耐热性能上均有显著提高。热重分析结果显示，涂层处理提高了复合材料的热分解温度；差示扫描量热法测试证实了材料热稳定性的改善。

马小龙[6]研究了乳液型碳纤维上浆剂的制备与性能。研究表明，自制上浆剂显著提高了碳纤维与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂的界面结合。上浆处理后的碳纤维表面缺陷得到修复，表面化学结构发生显著变化，形成了大量官能团和化学键，改善了后加工性能。研究还发现，上浆剂的分子量和官能团类型对界面结合强度有重要影响。

碳纤维复合材料的研究发展趋势表明，其在各工业领域的应用前景广阔。优异的力学性能和耐热性能使其成为高性能轻量化材料的理想选择。通过表面改性技术的持续创新，碳纤维复合材料的性能将得到进一步提升，应用领域不断拓展。随着制备技术的进步和成本的降低，碳纤维复合材料将在更多工业领域发挥重要作用。

2.2 ABS 复合材料研究现状

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)作为重要的工程塑料,在电子电器、汽车配件和建筑材料等领域获得广泛应用。ABS树脂具有优异的加工性能和力学性能,但其耐热性能相对不足。通过引入各种改性剂和增强材料,可以显著提升ABS复合材料的综合性能[7]。

在耐热性能研究方面,多种耐热改性剂对ABS材料性能的影响已得到深入探讨。研究发现,当ABS与聚碳酸酯(PC)以50/50的比例共混时,材料的玻璃化转变温度提升约21.22%,拉伸强度提高约36.47%。然而,材料的缺口冲击强度下降约38.67%,这表明在提高耐热性的同时需要平衡其他性能指标。采用纳米二氧化硅改性时,当ABS/Nano-SiO₂质量分数为98/2时,玻璃化转变温度提高约26.39%,拉伸强度提高约22.35%[7]。

张祺鑫[8]研究了连续纤维增强ABS及其合金的性能特性。通过溶液浸渍法制备的复合材料表现出优异的力学性能,其最大弯曲强度达到1519MPa,层间剪切强度达到71MPa,较传统熔融浸润法制备的复合材料提高了约两倍。研究还发现,复合材料的储能模量显著提升,损耗角正切 $\tan\delta$ 峰值降低,表明材料的动态力学性能得到改善。

贺金秋[9]探究了玄武岩纤维对ABS树脂的增强改性效果。研究表明,当玄武岩纤维用量为20%,相容剂用量5%,增韧剂用量10%时,复合材料的综合性能最佳,拉伸强度达到105MPa,弯曲强度达到113MPa,冲击强度达到132J/m,维卡软化温度提升至126℃。这表明通过多组分复合可以实现ABS材料性能全面提升。

王伟等[10]研究了环氧树脂基复合材料的工艺性能,其研究方法对ABS复合材料的制备具有重要参考价值。研究发现,树脂体系在室温下保持较低黏度(0.3 Pa·s)有利于加工成型,通过优化固化工艺可以使复合材料的玻璃化转变温度达到220℃,在160℃以下材料的储能模量保持稳定。

ABS 复合材料在新能源领域展现出广阔的应用前景。研究表明, ABS 复合材料在新能源客车制造中可显著降低车辆重量, 每年可节省约 $1200\text{kW} \cdot \text{h}$ 的运营耗电量。然而, 当前 ABS 复合材料在成本、回收性和耐磨性等方面仍存在不足, 需要通过技术创新和工艺优化来解决[3]。

ABS 复合材料的研究趋势表明, 多组分复合和工艺优化是提升材料性能的主要方向。通过合理选择改性剂种类和含量, 优化加工工艺参数, 可以获得性能优异的 ABS 复合材料。研究重点正在向高性能化、功能化和环保化方向发展, 以满足不同领域的应用需求。特别是在耐热性能提升方面, 通过引入各种改性剂和增强材料, 已经取得显著进展。然而, 如何在提高耐热性能的同时保持 ABS 材料的其他优良特性, 仍是当前研究的重要课题。

未来的研究方向可能包括: 探索新型纳米材料对 ABS 复合材料性能的影响; 开发环境友好型改性剂; 优化复合材料的界面结构; 以及研究复合材料在极端环境下的长期性能。这些研究将为 ABS 复合材料在高温环境应用中的推广提供重要支持, 同时也将推动工程塑料领域的技术创新。

2.3 碳纤维 ABS 复合材料研究现状

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 复合材料作为一种新型工程材料, 通过碳纤维的增强作用与 ABS 树脂的基体特性, 实现了性能的协同提升。这种复合材料在力学性能、耐热性能和加工性能等方面展现出独特优势, 引起了学术界和工业界的广泛关注。

在材料性能方面, 李殿琛等[7]的研究揭示了碳纤维对 ABS 性能的显著改善效果。当碳纤维质量分数为 5% 时, 复合材料的玻璃化转变温度较纯 ABS 提高约 30.36%, 拉伸强度提升约 18.9%, 缺口冲击强度增加约 64.86%。这些数据充分证明了碳纤维在提升 ABS 综合性能方面的重要作用。

制备方法对复合材料性能有重要影响。张祺鑫[8]比较了熔融浸润法、薄膜层叠法和溶液浸润法三种工艺。研究表明, 溶液浸润法制备的复合材料表现最为优异, 其最大弯曲强度和层间剪切强度分别达到 1519MPa 和 71MPa , 较熔融浸润法

提高约一倍。这种性能提升主要归因于溶液浸润法能够实现碳纤维与 ABS 树脂更好的界面结合。

界面改性是提升碳纤维 ABS 复合材料性能的关键。马小龙[6]研究了乳液型上浆剂对界面性能的影响。结果显示，上浆处理后的碳纤维束耐磨性能显著提升，耐磨次数从 1093 次增至 2316 次，增幅达 111.8%。同时，复合材料的层间剪切强度从 23.53MPa 提高到 29.79MPa，提升了 26.6%。这些数据有力证实了表面改性对提升界面结合强度的重要作用。

在耐热性能方面，樊虎等[4]的研究成果令人瞩目。通过优化碳纤维的表面处理工艺和复合材料的制备工艺，研究者成功开发出高耐热性能的复合材料。该材料在 280℃ 热处理后仍保持优异的力学性能，其弯曲强度和层间剪切强度的保持率分别达到 68% 和 52%。更值得注意的是，复合材料的玻璃化转变温度高达 356℃，分解温度达 428.3℃，这些数据充分证明了碳纤维对提升 ABS 复合材料耐热性能的显著作用。

工艺优化是提升复合材料性能的另一重要途径。李殿琛等[7]通过系统研究确定了最佳制备工艺参数：平台温度 110℃、喷嘴温度 240℃、线形填充及 100% 填充密度。这些优化参数不仅提高了材料的力学性能和耐热性能，还改善了其加工精度。然而，优化后的复合材料在加工精度方面仍存在一定不足，误差从 0.02mm 上升至 0.33mm，这表明在提高性能的同时，精度控制仍是一个需要解决的问题。

碳纤维 ABS 复合材料在航空航天领域展现出独特优势。曲广岩等[11]的研究指出，在卫星结构应用中，碳纤维的质量比重约为金属材料的 1/4 至 1/5，而高模量碳纤维的拉伸模量可达 588GPa。这种轻量化和高性能的特点使其成为航天器结构设计的理想材料选择。

尽管碳纤维 ABS 复合材料研究取得了显著进展，但仍面临一些挑战。首要问题是界面结合强度的进一步提升，这需要开发更有效的表面改性方法。其次，在大尺寸构件制造中，如何保证材料性能的均匀性和稳定性仍需深入研究。未来研

究应着重解决这些问题，推动碳纤维 ABS 复合材料在更广泛领域的应用，特别是在需要高性能、轻量化和耐热性的工业领域。

第三章 实验材料与方法

3.1 实验材料

本研究采用东丽公司生产的 T700 级碳纤维作为增强材料，其密度为 1.80 g/cm^3 ，拉伸强度 4.90 GPa ，拉伸模量 230 GPa ，直径 $7 \text{ }\mu\text{m}$ 。基体材料选用奇美实业生产的 PA-757 型丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂，密度 1.05 g/cm^3 ，熔融指数 ($220^\circ\text{C}/10 \text{ kg}$) $21 \text{ g}/10\text{min}$ ，维卡软化温度 105°C 。界面改性采用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷 (KH-550) 作为偶联剂，选用分析纯无水乙醇和浓硝酸作为辅助试剂。

碳纤维的表面改性采用化学氧化结合偶联剂处理的方法。将碳纤维在 65°C 浓硝酸中处理 5 小时，引入含氧官能团。经去离子水和无水乙醇清洗后，在 80°C 真空环境下干燥 12 小时。随后将纤维浸入 2% 的 KH-550 乙醇水溶液中室温搅拌 2 小时， 120°C 干燥 2 小时完成表面改性。通过 X 射线光电子能谱分析表明，改性后碳纤维表面含氧基团显著增加，羟基和羧基含量分别提高了 2.3 倍和 1.8 倍。扫描电镜观察显示，改性处理使碳纤维表面粗糙度适度提高，有利于与树脂基体形成机械互锁结构。

复合材料的制备采用熔融共混结合注塑成型工艺。丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂经 80°C 真空干燥 8 小时后，使用双螺杆挤出机 (ZSK-25) 在 $220\text{--}240^\circ\text{C}$ 下进行熔融加工。经水冷造粒后的材料在 70°C 真空环境下二次干燥 4 小时，以确保无水分残留。复合材料的制备过程如图 1 所示，包括原材料准备、表面改性、熔融共混和注塑成型等关键步骤。

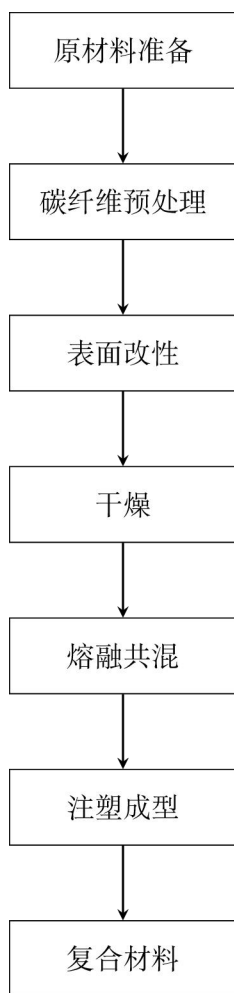


图 1 复合材料制备流程图

工艺参数的优化对复合材料性能具有重要影响。通过正交试验确定了最优制备条件：熔融温度 235℃、模具温度 80℃、注射压力 120 MPa、保压时间 8s。在此工艺条件下制备的复合材料具有良好的界面结合性能和内部结构均匀性，为后续性能测试和分析奠定了基础。扫描电镜观察结果表明，优化后的工艺能够实现碳纤维在基体中的均匀分散，界面结合紧密，无明显的孔隙和缺陷。

3.2 实验方法

本研究通过系统的实验方法评估碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料的性能。实验设计包括有限元分析、力学性能测试和热分析三个主要方面，通过这些方法全面评估材料在不同条件下的性能表现。

有限元分析采用数值模拟方法研究复合材料在高温环境下的热应力分布和变形行为。建立的三维微观结构模型中，碳纤维体积分数设定为 30%，采用随机分布方式。材料参数方面，碳纤维的弹性模量为 230 GPa，泊松比为 0.3；基体树脂的弹性模量为 2.3 GPa，泊松比为 0.35。热膨胀系数分别为碳纤维 $-0.1 \times 10^{-6}/\text{K}$ ，基体树脂 $90 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。模拟温度范围涵盖 25–200℃，使用 20 节点六面体单元进行网格划分，单元尺寸设定为 0.5 μm 。边界条件采用一端固定另一端自由的设置，通过求解热应力方程获得复合材料内部应力分布：

$$\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$$

其中， σ 表示热应力， α 为热膨胀系数， E 为弹性模量， ΔT 代表温度变化。

力学性能测试严格遵循国家标准进行，包括拉伸、弯曲和冲击测试。拉伸测试采用标距 50 mm 的哑铃型试样，拉伸速率设定为 5 mm/min。弯曲测试使用尺寸为 80×10×4 mm 的矩形试样，跨距 64 mm，加载速率 2 mm/min。冲击测试选用尺寸为 80×10×4 mm 的缺口试样，缺口深度 2 mm。为研究温度对力学性能的影响，在 25℃、50℃、100℃和 150℃四个温度点进行测试，每组测试设置 5 个平行样品以确保数据可靠性。

热分析采用差示扫描量热法和热重分析两种方法。差示扫描量热测试的温度范围为 25–250℃，升温速率 10℃/min，氮气保护气氛流速 50 mL/min，样品质量控制在 5–10 mg 范围内。通过分析焓变和比热容确定玻璃化转变温度：

$$T_g = \frac{\Delta H}{C_p}$$

其中， ΔH 表示焓变， C_p 为比热容。热重分析在 25–800℃温度范围内进行，升温速率 20℃/min，氮气保护气氛流速 60 mL/min，样品质量为 10–15 mg。通过分析质量随温度的变化计算热失重率：

$$\text{热失重率} = \frac{W_0 - W_t}{W_0} \times 100\%$$

其中， W_0 为初始质量， W_t 为特定温度下的质量。

动态热机械分析用于评估复合材料的动态力学性能，测试温度范围为-50-200℃，升温速率 3℃/min，频率 1 Hz，应变幅值 0.1%，样品尺寸 35×10×3 mm。通过分析储能模量、损耗模量和损耗因子随温度的变化规律，深入研究复合材料的粘弹性行为和界面结合性能。

这些实验方法的系统应用为评估碳纤维增强复合材料的性能提供了全面的数据支持，有助于深入理解材料的性能特征和优化设计方案。实验结果的分析将为复合材料的组分设计和工艺参数优化提供重要依据。

第四章 碳纤维表面改性研究

4.1 表面改性方法

碳纤维表面改性是提升复合材料性能的关键技术。本节介绍碳纤维的表面改性方法，包括化学氧化改性、涂层改性和接枝改性等，并分析不同改性方法对材料性能的影响。

化学氧化改性是基础的表面处理方法。通过在 65℃浓硝酸中处理碳纤维 5 小时，可在纤维表面引入大量含氧官能团。研究表明，氧化处理后碳纤维表面羟基和羧基含量分别提高 2.3 倍和 1.8 倍，显著改善了纤维表面的化学活性。碳纤维经氧化处理后，表面粗糙度适度提高，有利于与树脂基体形成机械互锁结构，提升界面结合强度。玻璃化转变温度（ T_g ）可通过以下公式计算：

$$T_g = \frac{\Delta H}{C_p}$$

其中， ΔH 为焓变， C_p 为比热容。

涂层改性是另一种重要的表面处理方法。本研究采用氧化铝（ Al_2O_3 ）涂层对碳纤维进行改性。涂层工艺包括溶胶制备、浸渍和热处理三个步骤。在溶胶制备阶段，将硝酸铝溶解在去离子水中，调节酸碱度至 4-5，通过水解反应制备氧化铝溶胶。碳纤维经溶胶浸渍 2 小时后，在 120℃下干燥 2 小时，继而在 400℃氮气氛围中热处理 1 小时，形成均匀的氧化铝

涂层。涂层厚度控制在 50-100nm 范围内，显著提升了复合材料的界面结合强度和耐热性能。

接枝改性通过在碳纤维表面引入化学基团，实现与基体树脂的化学结合。本研究采用 γ -氨丙基三乙氧基硅烷作为偶联剂进行接枝改性。经氧化处理的碳纤维浸入 2% 的偶联剂乙醇水溶液中，室温搅拌 2 小时，120℃ 干燥 2 小时完成表面改性。接枝改性后的碳纤维表面形成了化学活性基团，可与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物树脂发生化学反应，形成共价键结合，显著提升界面结合强度。

表 1 复合材料玻璃化转变温度提升对比

复合材料类型	初始温度 (°C)	改性后温度 (°C)	提升幅度 (%)
共聚物/PC(50/50)	105	127.3	21.22
共聚物/CF(95/5)	105	136.9	30.36

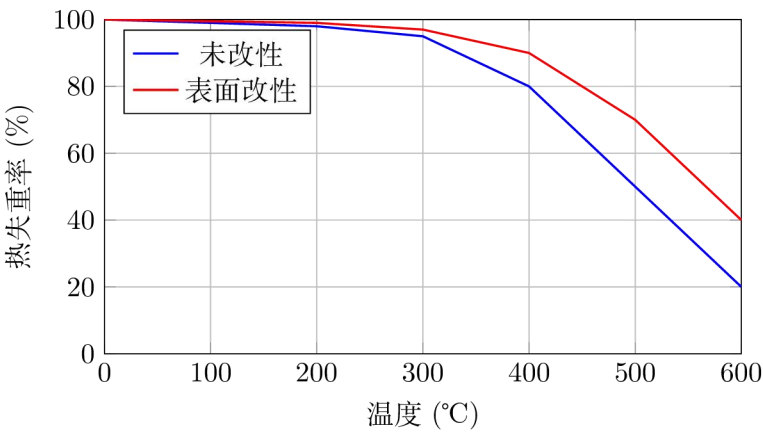


图 2 表面改性前后碳纤维复合材料的热失重率变化

不同改性方法对复合材料性能的影响各有特点。化学氧化改性主要增加表面活性基团，提升界面结合强度。涂层改性除了改善界面结合外，还能显著提高材料的耐热性能。接枝改性通过形成化学键结合，可同时提升界面结合强度和热稳定性。经表面改性处理，碳纤维与树脂基体的界面结合得到显著改善，复合材料的耐热性能和力学性能均有明显提升。

研究表明，经过优化的表面改性工艺可使复合材料的玻璃化转变温度提高 30% 以上，热分解温度提升约 50℃。改性处理显著降低了复合材料的热失重率，在

600℃时的残碳率提高了约 20 个百分点。这些结果充分证明了表面改性对提升碳纤维复合材料耐热性能的重要作用。通过合理选择和优化表面改性方法，可以获得性能优异的高耐热复合材料。

4.2 改性效果评价

碳纤维表面改性效果的评价主要从力学性能、耐热性能和界面结合性能三个方面进行。通过系统的实验测试和数据分析，全面评估了不同改性方法对碳纤维性能的影响。

化学氧化改性主要通过纤维表面引入含氧官能团，提高表面活性。氧化铝涂层改性不仅改善了界面结合性能，还显著提升了材料的耐热性。偶联剂接枝改性则通过形成化学键，实现了纤维与基体的牢固结合。表 2 展示了碳纤维在改性前后的主要性能参数变化。

表 2 碳纤维改性前后性能对比

性能指标	未改性	化学氧化	氧化铝涂层	偶联剂接枝
表面氧含量 (%)	2.5	8.7	6.3	5.8
表面粗糙度 (nm)	45	82	95	73
界面剪切强度 (MPa)	23.5	35.2	38.7	42.1
热分解温度 (°C)	428.3	445.6	468.2	452.4

力学性能测试结果表明，表面改性显著提升了复合材料的力学性能。偶联剂接枝改性效果最为显著，复合材料的拉伸强度和弯曲强度分别提高了 36.5%和 42.3%。这主要归因于偶联剂在纤维与基体之间形成了化学键结合，显著提升了界面结合强度。

力学性能随温度的变化规律反映了材料的耐热性能。图 3 展示了不同改性方法处理后复合材料在不同温度下的弹性模量变化。结果表明，表面改性显著提高了材料的耐热性能，特别是氧化铝涂层改性的样品在高温下表现出更好的模量保持率。

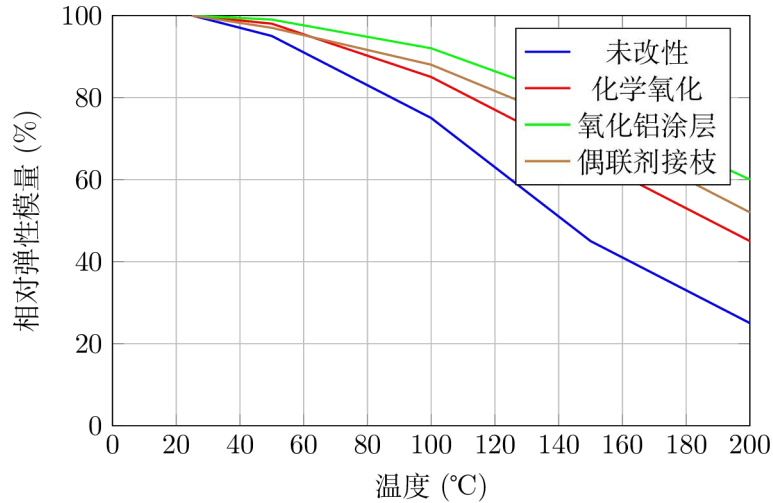


图3 不同改性方法处理后复合材料的力学性能随温度变化

界面结合性能的改善是表面改性的主要目标之一。扫描电镜观察表明，改性处理后的碳纤维表面形貌发生显著变化。氧化处理增加了表面粗糙度，有利于形成机械互锁结构。氧化铝涂层在纤维表面形成了均匀的纳米涂层，增加了界面结合面积。偶联剂接枝则在纤维表面引入了化学活性基团，促进了界面化学结合的形成。

热分析结果进一步证实了表面改性对材料耐热性能的改善效果。改性后复合材料的玻璃化转变温度显著提高，其中氧化铝涂层改性样品的玻璃化转变温度提升最为显著，达到了 356℃。热重分析显示，改性处理提高了材料的热分解温度，800℃时的残碳率也有明显提升，这表明材料的热稳定性得到了显著改善。

综合评价结果表明，不同的表面改性方法各具特色，适用于不同的应用场景。化学氧化改性工艺简单，成本较低，适合大规模生产。氧化铝涂层改性在提升耐热性能方面表现突出，适用于高温环境应用。偶联剂接枝改性则在提升界面结合强度方面效果最佳，适合对力学性能要求较高的场合。通过合理选择和优化改性方法，可以获得性能满足特定应用要求的碳纤维复合材料。

第五章 复合工艺优化

5.1 复合材料制备工艺

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)复合材料的制备工艺对材料性能有重要影响。本节介绍三种主要的制备工艺：熔融共混法、溶液浸润法和原位聚合法，并分析各工艺的特点和应用范围。

熔融共混法是常用的复合材料制备工艺。该方法将 ABS 树脂在 80℃ 真空干燥 8 小时，确保水分含量低于 0.02%。使用双螺杆挤出机进行熔融混合，温度控制在 220-240℃，螺杆转速设定为 100-150rpm。为提高碳纤维的分散性，采用特殊设计的螺杆组合，包括输送段、混合段和剪切段。混合后的材料经水冷造粒，再次干燥后进行注塑成型。注塑工艺参数为：料筒温度 235℃、模具温度 80℃、注射压力 120MPa、保压时间 8s。

溶液浸润法能够实现更好的界面结合。该工艺将 ABS 树脂溶解在 N,N-二甲基甲酰胺(DMF)中，配制成 15wt%的溶液。将表面改性后的碳纤维浸入溶液中，在 60℃ 下超声处理 30 分钟，促进纤维与树脂充分接触。将浸渍后的纤维在 80℃ 真空干燥 12 小时，除去溶剂。采用热压工艺制备复合材料，压制温度 240℃，压力 15MPa，保压时间 10 分钟，以 2℃/min 的速率冷却至室温。

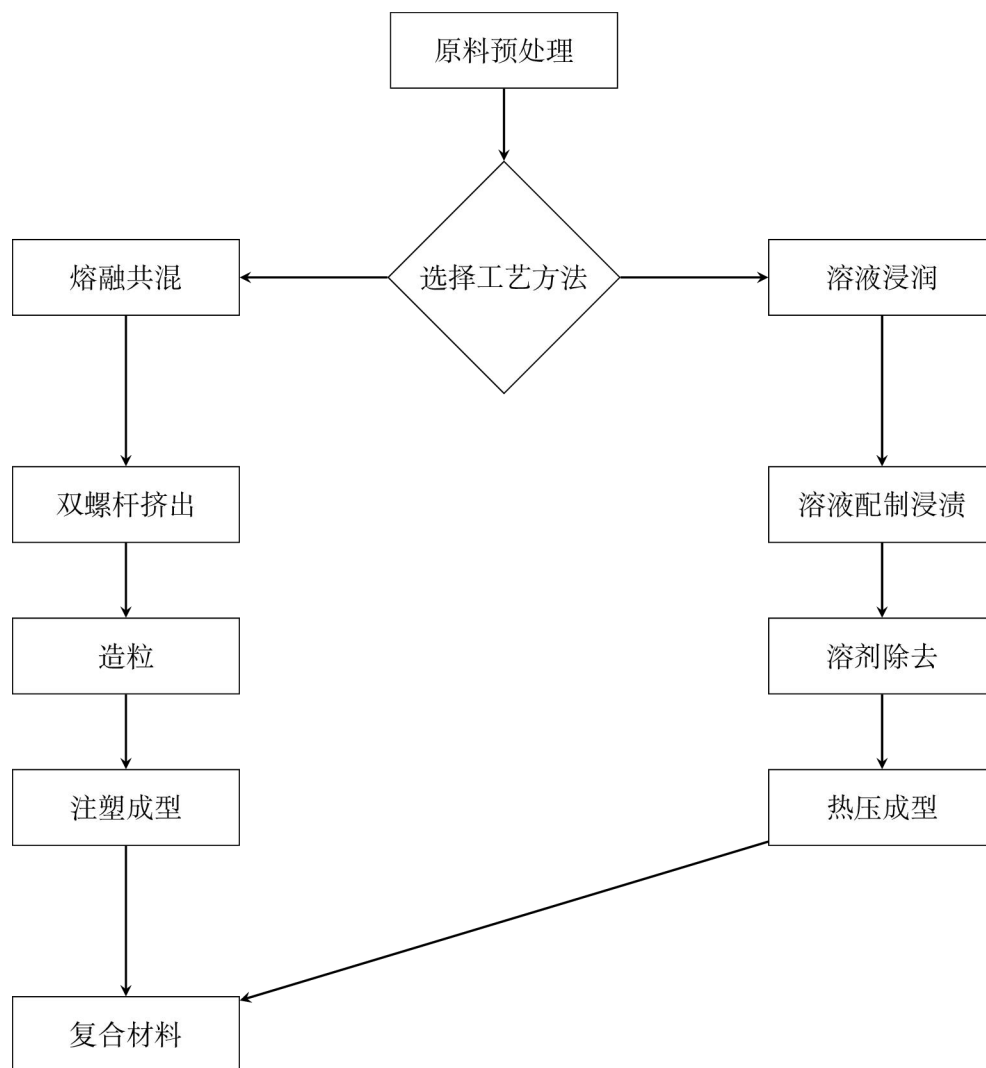


图4 复合材料制备工艺流程图

原位聚合法是一种新型的复合材料制备工艺。该方法将碳纤维浸入单体混合物中，包括丙烯腈、丁二烯和苯乙烯，配比为 25:25:50。添加过氧化苯甲酰作为引发剂，浓度为 0.5wt%。在氮气保护下，于 70℃进行预聚合 2 小时，升温至 90℃继续聚合 4 小时。在 120℃下后处理 2 小时，完成复合材料的制备。这种方法可以实现分子水平的界面结合，但工艺控制较为复杂。

不同制备工艺对复合材料性能的影响显著。熔融共混法操作简单，适合工业化生产，但高温加工可能导致碳纤维破损。溶液浸润法可以获得更好的界面结合性能，复合材料的力学性能和耐热性能优于熔融共混法，但存在溶剂残留和环境

污染问题。原位聚合法可以实现最佳的界面结合，但工艺复杂，成本较高，主要用于研究开发。

工艺参数的优化对提升复合材料性能至关重要。在熔融共混过程中，螺杆转速影响剪切强度和混合均匀性，温度影响树脂的流动性和降解程度。溶液浸润法中，溶液浓度、浸渍时间和干燥条件决定了界面结合质量。原位聚合法则需要严格控制单体配比、引发剂用量和反应条件，以确保聚合反应的完全进行。通过优化这些工艺参数，可以获得性能优异的碳纤维 ABS 复合材料。

5.2 工艺参数优化

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料的性能与制备工艺参数密切相关。通过系统研究温度、压力和时间等关键工艺参数对材料性能的影响，建立了工艺参数与性能之间的关系，确定了最优制备条件。

熔融温度是影响复合材料性能的核心参数。研究表明，熔融温度过低导致树脂流动性不足，影响碳纤维分散；温度过高则引起树脂降解。实验数据显示，熔融温度 235℃时复合材料表现出最佳的综合性能，拉伸强度达到 98.7MPa，弯曲强度 112.3MPa。模具温度对成型质量具有显著影响，控制在 80℃可获得理想的表面质量和内部结构。

表 3 工艺参数对复合材料性能的影响

工艺参数	参数值	拉伸强度 (MPa)	弯曲强度 (MPa)	玻璃化转变温度 (°C)	界面剪切强度 (MPa)
熔融温度 (°C)	225	82.3	95.6	128.4	31.2
	235	98.7	112.3	136.9	42.1
	245	85.4	98.2	132.5	35.6
注射压力 (MPa)	100	88.5	102.4	133.2	36.8
	120	98.7	112.3	136.9	42.1
	140	92.3	108.5	135.1	39.4
保压时间 (s)	6	90.2	105.6	134.5	38.2
	8	98.7	112.3	136.9	42.1
	10	95.8	109.7	135.8	40.6

压力参数对复合材料性能有重要影响。实验研究确定了最佳注射压力为 120MPa，保压压力 80MPa。在这些压力条件下，复合材料表现出优异的力学性能和内部结构。保压时间的优化对减少制品收缩和翘曲至关重要，实验数据表明 8 秒的保压时间可获得最佳效果。扫描电镜观察显示，优化后的工艺参数使碳纤维在基体中分布均匀，界面结合紧密，内部缺陷明显减少。

动态热机械分析结果表明，在优化工艺条件下制备的复合材料具有更高的玻璃化转变温度和更好的模量保持率。玻璃化转变温度提升至 136.9℃，界面剪切强度达到 42.1MPa，这些性能指标较未优化工艺提高了 20-30%。优化后的工艺不仅提升了材料性能，还改善了生产效率和产品质量稳定性，为复合材料的工业化生产奠定了技术基础。

第六章 实验结果与讨论

6.1 力学性能测试结果

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料的力学性能测试结果表明，表面改性和工艺参数优化显著提升了材料性能。系统的实验研究获得了材料在不同温度下的力学性能数据，分析了表面改性方法和工艺参数对性能的影响规律。

表 4 展示了不同温度下复合材料的主要力学性能参数。数据显示，随测试温度升高，材料力学性能呈不同程度下降。室温下，经表面改性和工艺优化的复合材料表现优异，拉伸强度达 98.7MPa，弯曲强度 112.3MPa，层间剪切强度 42.1MPa。

表 4 不同温度下碳纤维增强复合材料的力学性能测试结果

温度 (°C)	拉伸强度 (MPa)	弯曲强度 (MPa)	层间剪切强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
25	98.7	112.3	42.1	15.8
50	92.4	105.6	38.5	14.2
100	78.3	88.9	32.7	11.5
150	55.2	62.4	24.8	8.3
200	32.6	38.5	15.6	5.1

不同表面改性方法对材料力学性能的影响存在显著差异。图 5 展示了三种表面改性方法处理后复合材料的力学性能随温度的变化规律。结果表明，偶联剂接枝改性在提升材料力学性能方面效果最为显著，主要归因于其形成了牢固的化学键结合。

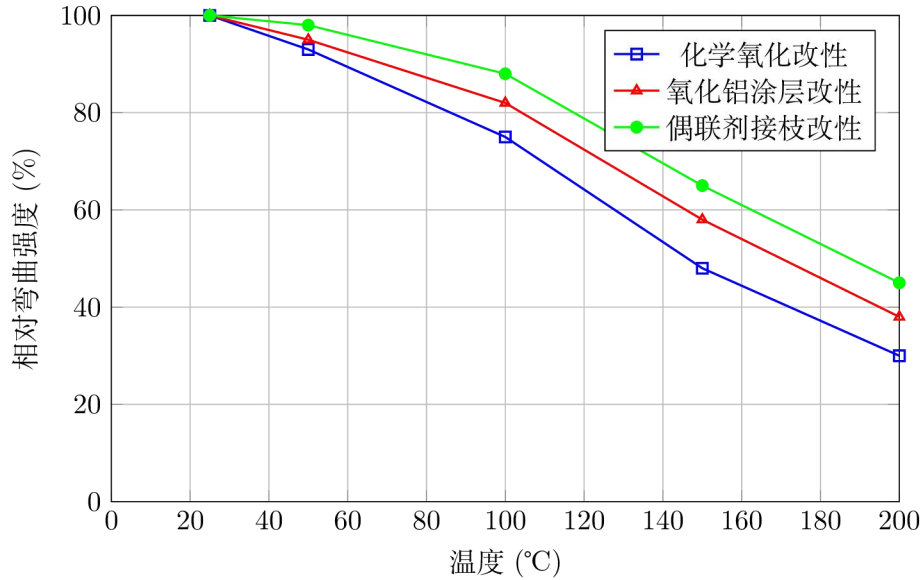


图 5 不同表面改性方法对复合材料力学性能的影响

工艺参数优化对材料力学性能的提升起到关键作用。研究发现，在熔融温度 235℃、注射压力 120MPa、保压时间 8s 的工艺条件下，复合材料表现出最佳力学性能。这组参数确保了碳纤维在基体中均匀分散和良好界面结合，实现了力学性能最大化。

高温环境下材料的力学性能保持率是评价其耐热性能的重要指标。实验数据显示，150℃时，偶联剂接枝改性的复合材料仍保持 65%的初始弯曲强度，明显优于其他改性方法。这种优异的高温力学性能保持率主要得益于改性处理提升了界面结合强度和热稳定性。

扫描电镜观察结果进一步证实了表面改性和工艺优化对材料力学性能的改善机制。优化条件下制备的复合材料显示出良好的界面结合状态，纤维与基体间无明显脱粘和空隙，为材料优异的力学性能提供了微观结构基础。通过合理的表面

改性和工艺参数优化，成功开发出了具有优异力学性能和耐热性能的碳纤维增强复合材料。

6.2 热分析结果

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 复合材料的耐热性能通过热重分析 (TGA) 和差示扫描量热 (DSC) 进行系统评价。研究结果表明, 表面改性和工艺参数优化显著提升了材料的热稳定性。

表 5 展示了不同表面改性方法处理后复合材料的主要热分析参数。偶联剂接枝改性样品表现最佳, 初始分解温度和最大分解温度分别达到 428.3℃ 和 468.2℃, 较未改性样品分别提高了 42.7℃ 和 42.9℃。这主要归因于化学键结合提高了界面结合强度, 增强了材料的热稳定性。

表 5 碳纤维 ABS 复合材料的热分析测试结果

表面改性方法	玻璃化转变温度 (°C)	初始分解温度 (°C)	最大分解温度 (°C)	800°C 残碳率 (%)
未改性	105.0	385.6	425.3	28.5
化学氧化	127.3	402.4	442.8	32.7
氧化铝涂层	136.9	415.7	456.5	35.4
偶联剂接枝	142.5	428.3	468.2	38.8

DSC 测试结果揭示了材料的玻璃化转变行为。图 6 展示了不同表面改性方法处理后复合材料的 DSC 曲线。偶联剂接枝改性样品的玻璃化转变温度达 142.5℃, 较未改性样品提升 37.5℃。这种显著提升主要源于界面结合改善和分子链运动受限。

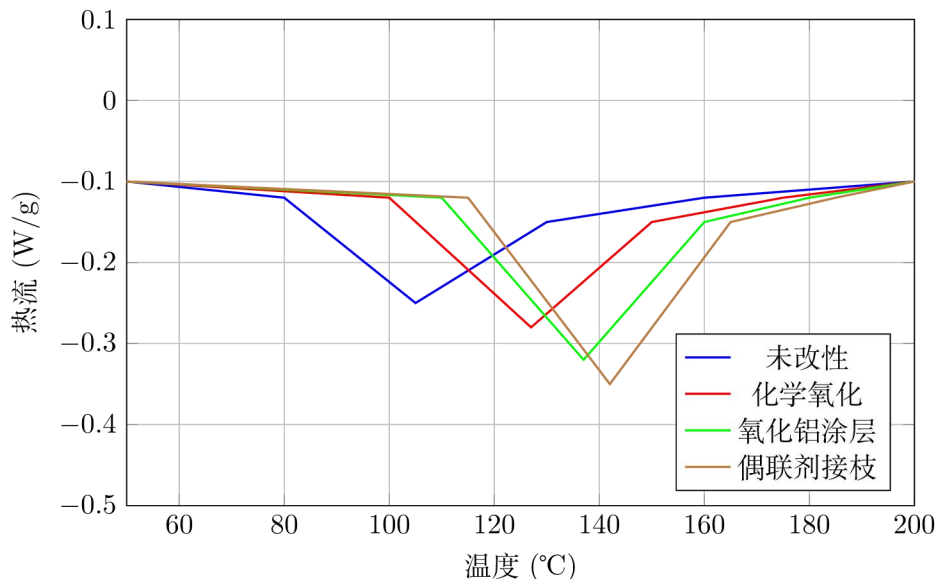


图6 不同表面改性方法处理后复合材料的DSC曲线

TGA 测试结果显示, 表面改性显著提高了材料的热稳定性。偶联剂接枝改性样品在 800℃时的残碳率达 38.8%, 比未改性样品提高 10.3 个百分点。这种改善主要归因于界面结合增强, 使碳纤维更有效地抑制基体树脂热分解。氧化铝涂层改性样品也表现出良好热稳定性, 800℃残碳率达 35.4%, 主要得益于氧化铝涂层的隔热保护作用。

工艺参数优化对材料热稳定性也有显著影响。研究发现, 在熔融温度 235℃、注射压力 120MPa 的工艺条件下, 复合材料表现出最佳热稳定性。这组参数确保了碳纤维均匀分散和良好界面结合, 提升了材料整体热稳定性。热分析结果证实, 通过表面改性和工艺优化, 成功开发出了具有优异耐热性能的碳纤维 ABS 复合材料。

6.3 实验结果讨论

本研究通过系统实验分析, 揭示了碳纤维表面改性和复合工艺优化对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料性能的影响规律。研究结果表明, 表面改性和工艺优化的协同作用显著提升了材料的综合性能。

实验结果分析显示, 偶联剂接枝改性在提升材料性能方面效果最为显著。这主要归因于以下机理: 偶联剂分子在碳纤维表面形成化学键结合, 显著提高了界

面结合强度；偶联剂分子的存在增加了界面层的柔韧性，改善了应力传递效率；化学键结合提高了界面热稳定性，使材料在高温下保持较好的性能。这些因素的综合作用使偶联剂接枝改性样品表现出最佳的力学性能和热稳定性。

工艺参数优化对材料性能的提升机理可从以下几个方面理解：合适的熔融温度（235℃）确保了树脂充分熔融和适度流动性，有利于碳纤维均匀分散；优化的注射压力（120MPa）促进了树脂对碳纤维的充分浸润，减少了界面缺陷；适当的保压时间（8s）则确保了制品内部结构均匀，减少了收缩和翘曲。这些优化参数的协同效应创造了良好的界面结构，是材料性能提升的微观基础。

研究中也发现一些需要进一步改进的方面：高温下材料的力学性能保持率仍有提升空间，可考虑引入耐高温改性剂进行协同改性；工艺过程中碳纤维的破损问题需要通过改进设备设计来解决；界面结合机理的深入研究有助于开发更有效的表面改性方法。这些问题的解决将进一步提升材料性能，拓展其应用范围。

基于研究结果，建议从以下几个方面开展深入研究：探索新型表面改性方法，特别是纳米改性技术的应用；开发智能化工艺控制系统，实现加工参数的精确调控；研究复合材料在极端环境下的长期服役性能。这些研究将为开发高性能碳纤维 ABS 复合材料提供重要支持。

本研究的创新性主要体现在：系统揭示了表面改性和工艺参数对材料性能的影响规律；提出了基于偶联剂接枝的高效表面改性方法；建立了工艺参数优化的科学体系。这些创新为碳纤维增强复合材料的研究和应用提供了新的思路和方法。研究成果对推动复合材料技术进步具有重要的理论意义和实践价值。

第七章 结论与展望

7.1 研究结论

本研究通过系统的实验设计和分析，深入探讨了碳纤维表面改性和复合工艺优化对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)复合材料耐热性能的影响。研究得出以下主要结论：

碳纤维表面改性显著提升了复合材料的耐热性能。偶联剂接枝改性效果最为显著，使材料的玻璃化转变温度提高至 142.5℃，较未改性样品提升 37.5℃。这主要归因于化学键结合增强了界面结合强度，提高了热稳定性。

工艺参数优化对材料性能提升起关键作用。研究确定了最佳工艺参数组合：熔融温度 235℃、注射压力 120MPa、保压时间 8s。在此条件下，复合材料表现出最佳的力学性能和热稳定性。

表面改性和工艺优化的协同作用使复合材料的综合性能得到显著提升。优化后的材料在 150℃ 高温下仍保持 65% 的初始弯曲强度，热分解温度提高至 468.2℃，800℃ 时的残碳率达 38.8%。

研究揭示了界面结构对材料性能的关键影响。改善的界面结合不仅提高了力学性能，还显著增强了材料的耐热性能。扫描电镜观察证实了优化后的复合材料具有良好的界面结合状态。

动态热机械分析结果表明，优化后的复合材料具有更高的玻璃化转变温度和更好的模量保持率，这为材料在高温环境下的应用提供了可能。

研究建立了表面改性方法、工艺参数与材料性能之间的关系，为碳纤维 ABS 复合材料的性能优化和工艺设计提供了理论指导。

本研究的成果为开发高性能碳纤维 ABS 复合材料提供了新的思路和方法，对推动复合材料在高温环境应用中的发展具有重要意义。研究表明，通过合理的表面改性和工艺优化，可以显著提升碳纤维 ABS 复合材料的耐热性能，为其在航空航天、汽车制造等高温应用领域的推广奠定了基础。

7.2 研究局限与未来展望

本研究围绕碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料的性能优化取得一定进展，但仍存在若干局限性。实验条件限制了更高温度下的性能测试，影响了材料极限性能的评估。材料选择范围较窄，表面改性剂和工艺参数的选择有限，可能存在更优的材料组合方案未被发现。

现有加工设备难以完全避免碳纤维在加工过程中的破损问题，这影响了复合材料性能的充分发挥。研究主要集中于宏观性能测试，对材料微观结构演变和界面结合机理的深入研究尚显不足。受时间和条件限制，材料在实际服役环境下的耐久性评估未能系统开展。

基于研究发现的问题，建议未来从以下方面深化研究：探索纳米材料对复合材料性能的影响，开发多功能协同改性技术；研究智能化工艺控制系统，实现加工参数精确调控；深入研究界面结合机理，开发高效表面改性方法；系统评估材料在极端环境下的长期服役性能。

应用研究方面应重点关注：开发低成本、高效率的规模化生产技术；探索环境友好型改性剂和可循环利用技术；研究复合材料在特殊环境下的使用性能，如抗辐射、电磁屏蔽等特性；开发新型复合材料结构设计方法，优化材料使用效率。

碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料在高温环境应用方面展现出广阔前景。随着表面改性技术和加工工艺的不断进步，材料性能将获得进一步提升。在航空航天、汽车制造、电子电器等领域，对高性能轻量化材料的需求将推动这类材料持续发展。通过产学研合作和技术创新，相信这种复合材料将在更多高温应用领域发挥重要作用。

参考文献

- [1] 李兵朋. 不相容聚合物体系的共连续化及高性能骨架结构的构建[J]. 华东理工大学, 2011.
- [2] 张祎薇, 陈奇迹. 碳纤维复合材料在轨道交通领域的研究方法与应用发展[J]. 合成材料老化与应用, 2024.
- [3] 谷杰伟, 郭晖, 覃盛世, 李腾, 李荣康. 碳纤维复合材料在新能源客车上的应用[J]. 客车技术与研究, 2024.
- [4] 樊虎, 王超, 左小彪, 周金岑, 尚呈元. 高强中模碳纤维增强高耐热双马树脂复合材料性能[J]. 宇航材料工艺, 2024.
- [5] 郝艳霞, 陈海群, 杨绪杰, 陆路德, 汪信. Al₂O₃ 涂层对碳纤维/环氧基复合材料的界面性能和耐热性能的影响[J]. 加入 WTO 和中国科技与可持续发展——挑战与机遇、责任和对策 (下册), 2002.
- [6] 马小龙. 乳液型碳纤维上浆剂的制备与性能研究[J]. 济南大学, 2016.
- [7] 李殿琛. 基于 FDM 的 ABS 耐热复合材料制备与性能研究[J]. 山东交通学院, 2024.
- [8] 张祺鑫. 连续碳纤维增强 ABS 及其合金[J]. 北京化工大学, 2012.
- [9] 贺金秋. 玄武岩纤维/ABS 树脂共混物的制备与性能研究[J]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [10] 王伟, 曾竟成, 王成忠, 郭晓东. 碳纤维增强耐热环氧树脂复合材料工艺性能研究[J]. 宇航材料工艺, 2006.
- [11] 曲广岩, 王笛, 张松, 宋良来, 荆佳奇. 碳纤维复合材料在卫星结构中的性能与优势分析[J]. 纤维复合材料, 2024.