

## 科技研究

## 碳纤维氧化炉温度场分布优化对碳纤维性能的影响

周德明<sup>1</sup> 傅春峰<sup>2</sup> 金振峰<sup>3</sup>

浙江精工集成科技股份有限公司 浙江绍兴 312030

DOI: 10.12238/jpm.v6i3.7827

[摘要] 本研究以碳纤维氧化炉温度场分布优化对碳纤维性能的影响为主题,通过分析碳纤维氧化原理及温度场分布影响因素,探讨了温度场优化方法包括等离子氧化技术、组合技术应用及装置改进策略等。研究了温度场优化后碳纤维力学性能、密度变化及热传导性能等方面的变化。得出温度场分布优化可提高碳纤维性能、生产效率降低成本和能耗的结论,并对未来研究方向进行了展望包括技术创新、进风方式优化、纤维特性研究、性能拓展及可持续发展等。

[关键词] 碳纤维; 氧化炉; 温度场分布; 性能优化

## Optimization of temperature field distribution of carbon fiber oxidation furnace on carbon fiber performance

Zhou Deming<sup>1</sup> Fu Chunfeng<sup>2</sup> Jin Zhenfeng<sup>3</sup>

Zhejiang Seiko Integrated Technology Co., LTD., Zhejiang Shaoxing 312030

[Abstract] In the present study, the influence of temperature field distribution optimization on the performance of carbon fiber oxidation furnace is discussed. The changes of mechanical properties, density change and heat conduction properties of carbon fiber after temperature field optimization are studied. The conclusion is drawn that the optimization of temperature field distribution can improve the performance of carbon fiber, production efficiency and reduce the cost and energy consumption, and the future research directions including technological innovation, air inlet optimization, fiber characteristics research, performance expansion and sustainable development.

[key words] Carbon fiber; oxidation furnace; temperature field distribution; performance optimization

## 引言

碳纤维作为一类高性能的材料在航空航天、汽车、运动装备等范畴得到了广泛运用,凭借其出色的力学性能、热导性能以及较低的密度成为了理想的结构材料。碳纤维的氧化流程在其生产里属于关键环节,并且氧化炉当中温度场的分布状况直接左右着氧化成效,从而对碳纤维的最终性能产生影响,本文意在凭借对氧化炉温度场分布的优化,探究其给碳纤维力学性能、密度以及热传导性能带来的作用给出有效的温度把控手段,用以提升生产效率、降低能耗并且完善碳纤维的整体性能。

## 1. 理论基础

## 1.1 碳纤维氧化原理

碳纤维的生产流程主要涵盖预氧化与碳化这两个阶段当中预氧化属于关键的一环,在这个进程里聚丙烯腈(PAN)原丝于特定温度下产生一连串繁杂的化学反应,涵盖环化、脱氢以及氧化等等构建出沿纤维轴向取向的稳固高分子架构。在氧化反应期间纤维的表面逐步生成氧化层增进其稳定性与抗热性能,给后续的碳化工艺奠定基础,温度场的分布对于氧化过程的推进极为重要,温度过高或者过低都会致使氧化反应出现不完全或者过度的情况,进而对碳纤维的最终性能造成影响。

## 1.2 温度场分布的影响因素

温度场分布被多种要素所影响当中氧化炉的结构规划属于最为关键的要素之一,不同类别的氧化炉(像侧吹风式、垂直吹风式以及中央到两端吹风式)其进风形式和气流流动形式存在差别致使炉内温度分布呈现出均匀的状况。比方说侧吹风式的炉内在进出口端的温度容易形成温差而垂直吹风式的炉在处理多层丝束时,鉴于热风难以穿透或许会造成温度分布的不均衡。除开这些工艺气体的冷热交替、废气的排放以及炉体的密封性能等也会对炉内温度的均匀程度产生作用,尤其是纤维丝束的排列方式和间隙大小会对气流的流动特性造成影响,从而给温度场的分布带来影响。

## 2. 温度场优化方法

## 2.1 氧化炉装置的改进

伴随碳纤维生产工艺的持续进步,增进氧化炉温度场的均匀性变成优化生产效率以及提升产品质量的关键趋向,对于这一难题已经有众多技术改进的方案顺势出现。其中一种增强预氧化炉温场均匀性的装置被予以提出,并凭借改进炉体构造和气流循环系统来优化温度场的分布,该装置涵盖炉体、第一连通管路、多个风机以及密封单元等核心组成部分,通过风机和管路系统有效地调控炉腔内的热气流保证不同区域的温度维持一致。

在这个装置里炉体的设计引入了处于内炉门与外炉门之间的中部空腔结构,经由连通管路和风机的协同配合,能够将气流引领至不同炉腔的上部与下部以此达成温度的动态调控。中部空腔的密封单元能够切实防止热气流的泄漏,更进一步提升温度分布的均匀程度。另外装置还增添了多个精密调控管路可以精准把控温度在不同区域之间的流动与变化,保障了预氧化过程的稳定性,这些改进不但提升了炉体的热效率还强化了碳纤维氧化过程的可控性,最终达成了相对均匀的温度分布为高质量碳纤维的生产给予了技术支撑,图1为氧化炉改进装置的风场原理图、图2为氧化炉腔体分布图:

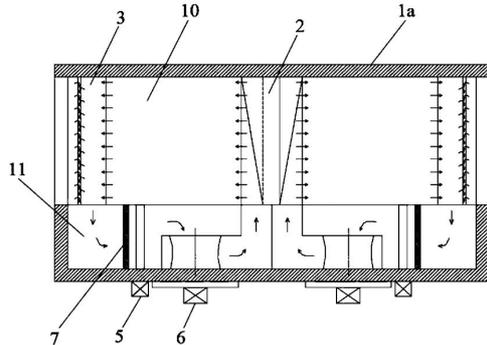


图1 风场原理图

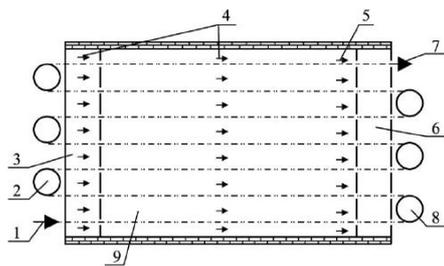


图2 腔体分布图

## 2.2 创新技术应用

为了更进一步增进氧化炉的工作效率和温度场分布均匀程度,近些年来一些创新技术的运用在碳纤维生产当中获取了广泛的关注。等离子氧化技术即为其中一种新兴的技术,相较于传统的氧化方式等离子氧化不但提升了氧化速率,还明显降低了能量耗费具备更高的经济性和可持续性,等离子氧化技术借助电场激发气体分子生成离子从而加快氧化反应的推进,这一流程能够在较低温度下达成对纤维表面的氧化处置,降低了能源的浪费并且提高了氧化效率。除开等离子技术之外红外辐射、射频加热等新型加热技术的联合运用,也给氧化炉的温控系统带来了具有革命性的突破。这些技术经由加热原理的优化切实地提高了氧化炉内的热风流动速率和均匀程度,进而优化了炉内温度场的分布。特别是红外辐射技术其能够通过高效的能量传递让炉体内的每一个部分都能够迅速达到预定温度,缩减了氧化时间并且规避了由于局部温差过大所引发的碳纤维质量不稳定的问题。

在微波氧化工艺这一方面施行微波加热与等离子技术的联合运用,能够于较低的能耗状况下,迅速把原丝加热到所需的温度并凭借表面处理增强碳纤维的力学性能和化学稳定性。该工艺不单降低了对传统炭化炉的依靠,还明显削减了碳纤维生产进程中的能量消耗以及二氧化碳排放,具备较强的环境友好特性和可持续特性。另外余热回收与利用技术的运用也为碳纤维氧化炉的节能降耗给予了有效的解决办法。借助多级余热回收系统氧化炉排放的废气能够被再度利用,用以加热新鲜空气或者气体以实现预定的反应温度,这一技术不但极大程度地

降低了氧化设备的能源耗费,还切实减少了废气的排放对环境保护具备积极的作用。

## 2.3 多区温控技术

伴随着智能化技术的进步,多区温控技术逐步变成提高碳纤维氧化炉温度控制精度和稳定性的重要手段。针对碳纤维预氧化炉内繁杂的温度变动和不均匀状况,融合传热学与流体力学的原理研究人员给出了多区温控技术,借由在炉体内设定多个温控区域并且依照不同区域的温度需要实施精细把控。一种前沿的多区温控技术运用了快速粒子群优化算法(PSO)和模糊控制器相融合的形式经由对碳纤维预氧化工艺展开深入剖析,规划了一种带有调整因子的模糊控制算法用于实时追踪设定的温度曲线。快速粒子群优化算法凭借动态调节模糊控制器的参数,达成了对炉内温度的快速回应和精准把控。该技术能够在保障温度场均匀性的同时极大程度提高预氧化炉的工作效率,并保证温度精度抵达预设值。此外基于此技术,温控机构的规划进一步增进了温度控制的精度和响应速率,温控机构涵盖实时温度监控、风速控制以及加热元件调节等功能通过DSP处理器与变频器的协同作业,能够精准把控炉腔内各个区域的温度保证温度不偏离设定值。

## 3.性能变化分析

### 3.1 力学性能变化

温度场分布的优化对于碳纤维的力学性能具备关键影响,特别是在碳纤维的预氧化进程里的温度把控。研究显示温度的提升会给碳纤维增强复合材料的应力和变形带来显著作用,在特定的温度区间内碳纤维的应力伴随温度的增高呈现上升态势。不过当温度超出某一临界数值,复合材料里的树脂会开始变软致使碳纤维增强复合材料的承载能力显著降低。持续加热至更高温度时纤维的应力增加态势会逐步趋向平缓,甚至出现降低的情况,这一现象表明温度的控制直接左右着碳纤维的力学性能,尤其在氧化过程中的体现格外显著。

优化氧化炉的温度场分布有利于达成碳纤维在氧化过程中均匀受热的状态,防止局部出现过热或者过冷的情况,保证纤维的结构变化更为均匀。这种均匀的加热能够推动碳纤维在氧化过程中构建出更为稳定的高分子量聚合物结构,进而切实提升其强度、弹性模量等力学性能。譬如运用创新技术像是等离子氧化技术以及红外辐射与射频加热的组合,能够进一步优化温度分布让热量更为均匀地传递到碳纤维表面,降低温度波动对力学性能的不良影响,通过精准把控氧化炉的温度场碳纤维的力学性能能够得到显著增强,为后续的炭化过程给予更有力的支撑确保最终产品具备更高的强度和更优的耐用性,图3为均匀温度场氧化炉。



图3 均匀温度场氧化炉

### 3.2 密度与结构变化

在碳纤维的预氧化进程中温度场的恰当调节能够推动碳纤维原丝的环化、脱氢和氧化等反应,让碳纤维在微观结构方面获得充分优化。在均匀的温度场中碳纤维能够构建出更为紧密的结构增进碳原子之间的键合,以此提升碳纤维的密度强化

