

高分子水凝胶贴无菌化制造过程能耗优化与绿色生产技术

何希津

浙江银达生物技术有限公司 浙江 金华 321000

【摘要】：高分子水凝胶贴因具备良好的生物相容性、保湿性及药物缓释能力，在医用敷料、化妆品等领域应用日益广泛。无菌化是其制造过程的核心要求，然而传统无菌化制造技术存在能耗高、资源浪费严重、环境污染等问题，与当前绿色制造的发展理念相悖。本文针对高分子水凝胶贴无菌化制造过程中的能耗问题，系统分析了原料预处理、交联成型、无菌处理及后加工等关键环节的能耗特征，探讨了各环节能耗过高的成因。在此基础上，从绿色能源替代、工艺参数优化、高效设备研发及循环生产模式构建等方面，提出了能耗优化策略与绿色生产技术路径，旨在为高分子水凝胶贴制造行业降低能耗、减少环境影响，推动其向绿色化、可持续化方向发展。

【关键词】：高分子水凝胶贴；无菌化制造；能耗优化；绿色生产；可持续发展

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.037

1 引言

生物医药与健康产业发展推动下，高分子水凝胶贴市场需求持续增长。因其直接接触人体皮肤或创面，无菌化制造成为生产关键环节。但多数企业采用的传统无菌工艺以高能耗保障无菌指标，既增加生产成本，又引发能源浪费与环境压力。在全球能源危机与环保意识提升背景下，绿色制造已成行业共识，高分子水凝胶贴制造行业面临迫切的节能减排需求。如何在保障无菌质量的前提下优化能耗、开发绿色技术，是行业核心课题。开展相关研究对提升行业竞争力、推动可持续发展具有重要现实与理论价值。

2 高分子水凝胶贴无菌化制造的能耗特征分析

2.1 制造流程及能耗分布概况

高分子水凝胶贴无菌化制造涵盖原料预处理、水凝胶体系构建、交联成型、无菌处理、裁切包装及质量检测等多环节，各环节能耗差异显著。其中无菌处理与交联成型是能耗核心，合计占比超 60%，是能耗控制关键。原料预处理与裁切包装虽单环节能耗较低，但工序繁琐、设备众多，累计能耗不容忽视。质量检测能耗占比最小，却直接关乎产品安全，不可为降本而简化。明确各环节能耗分布，是精准优化的基础，可为节能策略制定提供依据。

2.2 关键环节能耗过高的成因解析

2.2.1 原料预处理环节

原料预处理环节主要包括高分子原料的提纯、溶解、混合以及辅料的分散等操作，该环节能耗主要来源于搅拌设备、加热装置及过滤设备的运行。在传统工艺中，为确保高分子原料充分溶解和均匀混合，往往采用长时间高温加热和高速搅拌的方式，导致能耗大幅增加。一方面，部分企业选用的搅拌设备效率低下，桨叶结构设计不合理，物料混合过程中能量损耗严重，为达到预期混合效果不得不延长搅拌时间；另一方面，加热系统缺乏有效的温度控制机制，加热温度高于实际需求，且

热量传递效率低，大量热量通过设备表面散热流失，未能充分作用于物料体系。

2.2.2 交联成型环节

交联成型是形成高分子水凝胶三维网络结构的核心环节，直接决定了水凝胶贴的物理性能和使用效果，该环节能耗主要来自于交联反应所需的能量输入，如热能、光能等。目前行业内应用较广泛的交联方式包括热交联和紫外光交联。热交联工艺中，为促使交联反应充分进行，需要将物料置于高温环境下持续加热，传统加热设备多采用电阻加热或蒸汽加热，热转换效率低，大量能量未参与反应而被浪费。同时，部分企业为追求生产效率，盲目提高加热温度和延长加热时间，不仅增加了能耗，还可能导致水凝胶性能下降。紫外光交联工艺虽然避免了高温加热带来的部分问题，但传统紫外灯能耗高、使用寿命短，且光源分布不均匀，为保证交联均匀性，需要增加紫外灯数量或延长照射时间，同样造成了能耗的不合理消耗。

2.2.3 无菌处理环节

无菌处理环节是保障高分子水凝胶贴使用安全的关键，也是整个制造过程中能耗最高的环节，其能耗主要用于灭菌设备的运行、灭菌介质的制备及灭菌环境的维持。当前应用较多的无菌处理技术包括湿热灭菌、干热灭菌、辐射灭菌及环氧乙烷灭菌等。湿热灭菌和干热灭菌均需将产品或生产环境加热至特定高温并维持一定时间，传统灭菌设备的加热系统热效率低，升温速度慢，且灭菌后降温过程缺乏有效的能量回收机制，导致大量热能被直接排放。辐射灭菌虽然灭菌效果好、处理时间短，但辐射设备的运行需要消耗大量电能，且设备维护成本高。环氧乙烷灭菌需要在特定的温度、湿度和压力环境下进行，环境调控过程能耗巨大，同时环氧乙烷的制备和回收也需要消耗额外能量。

2.2.4 后加工及包装环节

后加工及包装环节主要包括水凝胶贴的裁切、分拣、包装

及灭菌后的二次检测等操作,该环节能耗主要来源于裁切设备、包装机械及检测仪器的运行。在传统裁切工艺中,设备裁切精度低,往往需要预留较大的裁切余量,导致原料浪费的同时,也增加了设备的运行负荷和能耗。包装环节中,部分企业仍采用人工包装与机械包装相结合的方式,生产效率低,且包装机械多为老旧设备,能耗高、自动化程度低。此外,包装材料的灭菌处理也需要消耗一定能量,若采用传统的高温灭菌方式,不仅能耗高,还可能对包装材料的性能造成影响。

3 高分子水凝胶贴无菌化制造能耗优化策略

3.1 绿色能源替代传统能源

能源结构优化是实现高分子水凝胶贴无菌化制造能耗降低的重要途径,采用绿色能源替代传统化石能源,可从根本上减少能源消耗带来的环境影响和成本压力。太阳能、风能、生物质能等可再生能源具有清洁、环保、可再生的特点,是理想的替代能源。在生产车间屋顶及周边空旷区域安装太阳能光伏板,可将太阳能转化为电能,为车间照明、小型设备运行及部分加热环节提供能源支持。对于地处风能资源丰富区域的企业,可配套建设小型风力发电装置,与太阳能发电形成互补,提高能源供给的稳定性。此外,利用生物质能技术,将生产过程中产生的高分子废料转化为生物质燃料,用于加热环节,实现能源的循环利用。

3.2 工艺参数精准优化

针对各制造环节能耗过高的问题,通过对工艺参数进行精准优化,可在保证产品质量的前提下,实现能耗的有效降低。在原料预处理环节,采用响应面法、正交试验法等先进的实验设计方法,系统研究搅拌速度、加热温度、加热时间、原料配比等参数对溶解效果和能耗的影响,建立能耗与工艺参数之间的数学模型,确定最优的工艺参数组合。例如,通过优化搅拌桨叶结构和搅拌速度,提高物料混合效率,缩短搅拌时间;采用梯度加热方式,根据原料溶解特性分段控制加热温度,避免不必要的高温加热。在交联成型环节,针对热交联工艺,通过精准控制加热温度和加热时间,避免过度交联;对于紫外光交联工艺,优化紫外灯的功率、数量和排布方式,提高光源利用率,同时引入光强传感器实时监测紫外光强度,根据交联反应进程自动调节光源输出,确保能量输入与反应需求精准匹配。在无菌处理环节,根据产品特性和无菌要求,选择最合适的灭菌方式,避免多重灭菌叠加。

3.3 高效节能设备研发与应用

设备是制造过程的核心载体,研发和应用高效节能设备是实现能耗优化的关键手段。在原料预处理环节,推广应用高效节能搅拌设备,采用新型桨叶结构和变频调速技术,根据物料混合阶段的不同需求,自动调节搅拌速度,提高搅拌效率,降低能耗。引入高效加热装置,如电磁感应加热设备、红外加热

设备等,这类设备热转换效率高、加热速度快,可有效减少热量损失。在交联成型环节,研发新型紫外光交联设备,采用LED紫外灯替代传统紫外灯,LED紫外灯具有能耗低、使用寿命长、光强稳定等优点,可显著降低能耗。对于热交联工艺,开发新型高效热传导设备,采用真空加热或微波加热技术,提高热量传递效率,确保物料受热均匀,缩短加热时间。在无菌处理环节,推广应用低温等离子体灭菌设备、脉动真空灭菌器等高效节能灭菌设备。低温等离子体灭菌设备灭菌温度低、灭菌时间短、能耗低,且对环境友好;脉动真空灭菌器可有效排除灭菌腔内的冷空气,提高灭菌效率,降低能耗。在后加工环节,引入高精度裁切设备,采用激光裁切技术,提高裁切精度,减少裁切余量,降低原料浪费和设备能耗。推广全自动包装生产线,实现从裁切、分拣到包装的全程自动化操作,提高生产效率,降低人工成本和设备能耗。

3.4 构建循环生产模式

构建循环生产模式,实现原料、能源和废弃物的循环利用,是推动高分子水凝胶贴制造行业绿色发展的重要方向。在原料循环利用方面,建立原料回收机制,对生产过程中产生的裁切废料、不合格产品等进行分类回收和处理。通过破碎、溶解、提纯等工艺,将回收的高分子原料重新用于水凝胶体系的构建,减少原料浪费。同时,与原料供应商建立合作关系,推广使用可降解高分子材料和再生原料,降低对原生资源的依赖。在能源循环利用方面,引入余热回收系统,对灭菌设备、加热装置等产生的余热进行回收利用,用于车间供暖、原料预热等环节,提高能源利用效率。

4 高分子水凝胶贴绿色生产技术的发展方向

4.1 新型无菌化技术研发

新型无菌化技术的研发是推动高分子水凝胶贴绿色生产的核心动力,未来应重点关注低能耗、高效率、环境友好的无菌化技术。低温等离子体灭菌技术具有灭菌温度低、灭菌速度快、无残留、能耗低等优点,是当前无菌化技术的研究热点。通过深入研究低温等离子体的发生机制、作用原理及对水凝胶性能的影响,优化等离子体发生装置和灭菌工艺参数,提高灭菌效率和均匀性,扩大其在高分子水凝胶贴无菌化处理中的应用范围。此外,光动力灭菌技术、高压脉冲电场灭菌技术等新型灭菌技术也具有广阔的发展前景。光动力灭菌技术利用光敏剂在特定波长光照射下产生的活性氧杀灭微生物,具有选择性强、对产品损伤小、能耗低等特点;高压脉冲电场灭菌技术通过高强度脉冲电场破坏微生物的细胞膜结构,实现灭菌效果,具有处理时间短、能耗低、无化学残留等优势。加大对这些新型无菌化技术的研发投入,推动其产业化应用,可有效降低无菌处理环节的能耗和环境影响。

4.2 智能化制造技术融合应用

智能化制造技术与高分子水凝胶贴无菌化制造过程的深度融合,是实现能耗精准控制和生产效率提升的重要手段。引入工业机器人、智能传感器、物联网、大数据等先进技术,构建智能化生产体系。在生产过程中,通过智能传感器实时采集各环节的温度、压力、湿度、能耗、物料浓度等关键参数,并将数据传输至大数据平台进行分析处理。利用大数据分析技术建立能耗预测模型,提前预判能耗变化趋势,为工艺参数调整和能源调度提供科学依据。通过物联网技术实现设备之间的互联互通和远程控制,对生产设备进行实时监控和故障诊断,及时发现并解决设备运行过程中出现的问题,避免因设备故障导致的能耗浪费和生产中断。引入工业机器人替代人工完成裁切、包装、分拣等重复性劳动,提高生产效率和操作精度,降低人工成本和人为因素对产品质量的影响。同时,利用人工智能算法对生产过程进行全局优化,实现各环节的协同运作,最大限度提高生产效率和能源利用效率。

4.3 绿色包装材料研发与应用

包装材料作为高分子水凝胶贴产品的重要组成部分,其绿色化发展也是实现整体绿色生产的关键环节。传统包装材料多为不可降解的塑料材料,不仅造成严重的环境污染,其灭菌处理也需要消耗大量能量。研发和应用可降解、环保型包装材料,如聚乳酸(PLA)、聚羟基脂肪酸酯(PHA)等生物可降解塑料,这类材料在自然环境中可被微生物降解,不会造成环境污染。同时,优化包装材料的结构设计,采用轻量化包装,减少包装材料的使用量,降低原料消耗和运输过程中的能耗。此外,开发新型无菌包装技术,如无菌阻隔包装、活性包装等,在保

证包装无菌性的前提下,简化包装工艺,降低包装环节的能耗。推动包装材料的回收再利用,建立包装材料回收体系,实现包装废弃物的资源化利用,进一步提升整个生产过程的绿色化水平。

5 结论

高分子水凝胶贴无菌化制造过程的能耗优化与绿色生产技术研发,是推动行业实现可持续发展的必然要求,也是应对能源危机和环境压力的重要举措。本文通过对高分子水凝胶贴无菌化制造各环节能耗特征的系统分析,发现无菌处理、交联成型是能耗消耗的主要环节,其能耗过高的成因主要包括能源结构不合理、工艺参数优化不足、设备效率低下及生产模式落后等。针对这些问题,从绿色能源替代、工艺参数优化、高效设备研发及循环生产模式构建等方面提出了相应的能耗优化策略,并指出新型无菌化技术研发、智能化制造技术融合应用及绿色包装材料研发是未来绿色生产技术的发展方向。

实现高分子水凝胶贴无菌化制造的能耗优化与绿色生产,需要企业、科研机构及政府部门的协同合作。企业应加大对绿色生产技术和设备的投入,积极推广应用先进的节能技术和工艺;科研机构应加强基础研究和关键技术攻关,为行业发展提供技术支撑;政府部门应出台相关的政策法规和激励措施,引导和推动行业向绿色化方向发展。通过各方共同努力,有望实现高分子水凝胶贴制造行业能耗的显著降低,减少环境影响,提升行业整体竞争力,推动行业实现高质量、可持续发展。未来,随着新型技术的不断涌现和应用,高分子水凝胶贴无菌化制造过程的绿色化水平将进一步提升,为生物医药与健康产业的发展注入新的活力。

参考文献:

- [1] 张正国.天然高分子生物材料在新型医用敷料中的运用[J].化学工程,2025,53(6):前插 4.
- [2] 基于水溶性高分子材料的中药新型给药系统-水凝胶贴剂的研究与开发[J].中国科技成果,2019,20(7):22-23.
- [3] 侯雪梅.水凝胶贴剂基质的机理和应用研究[D].上海:第二军医大学,2010.