

制药工业中 RTO 焚烧炉蓄热体材料选型与寿命预测

许建新

太仓制药厂 江苏苏州

【摘要】制药工业生产过程中产生的有机废气排放对环境构成显著压力，RTO（蓄热式热力氧化炉）作为废气治理的核心设备，其蓄热体材料的合理选型与寿命预测对运行效率和经济性至关重要。本文围绕制药行业 RTO 焚烧炉的应用背景，系统分析不同蓄热体材料的热工性能、耐腐蚀性与机械稳定性，并结合实际运行数据建立寿命预测模型，旨在为企业提供科学的材料选择依据。材料选型不仅决定能耗与处理效率，还直接关系到长期稳定运行与维护成本。通过对材料失效机理的探讨与寿命评估方法的优化，提出提升制药工业 RTO 焚烧炉运行可靠性与延长寿命的对策，对推动行业绿色发展具有现实意义。

【关键词】制药工业；RTO 焚烧炉；蓄热体材料；寿命预测

【收稿日期】2025 年 8 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 9 月 19 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250060

Material selection and life prediction of regenerators for RTO incinerators in the pharmaceutical industry

Jianxin Xu

Taicang Pharmaceutical Factory, Suzhou, Jiangsu

【Abstract】The emission of organic waste gas generated during the production process of the pharmaceutical industry poses significant pressure on the environment. As the core equipment for waste gas treatment, the Regenerative Thermal Oxidizer (RTO) relies heavily on the rational material selection and accurate life prediction of its regenerators, which are crucial to the operating efficiency and economic viability of the equipment. Focusing on the application background of RTO incinerators in the pharmaceutical industry, this paper systematically analyzes the thermal performance, corrosion resistance, and mechanical stability of different regenerator materials. Furthermore, a life prediction model is established based on actual operation data, aiming to provide enterprises with a scientific basis for material selection. Material selection not only determines energy consumption and treatment efficiency but also directly affects long-term stable operation and maintenance costs. By discussing the failure mechanism of materials and optimizing life assessment methods, countermeasures to improve the operational reliability and extend the service life of RTO incinerators in the pharmaceutical industry are proposed. This study holds practical significance for promoting the green development of the industry.

【Keywords】Pharmaceutical industry; RTO incinerator; Regenerator material; Life prediction

引言

制药工业在生产过程中会排放大量含挥发性有机物的废气，这类废气若不加以有效治理，不仅会造成环境污染，还会对人类健康构成潜在威胁。RTO 焚烧炉因其高效的热能回收和稳定的有机废气去除效果而被广泛应用，其中蓄热体作为能量储存与传递的关键部件，其性能优劣直接决定了设备的运行效率和寿命。然而，在长期运行过程中，蓄热体材料不可避免地受到高温、腐蚀及热冲击等多重因素影响，导致性能退化甚至

失效。如何在复杂工况下科学选型并准确预测其寿命，已成为制药行业节能降耗和保障稳定生产的重要课题。本文拟通过对蓄热体材料特性的系统研究和寿命预测方法的探讨，为制药工业的绿色发展与设备管理提供理论依据与实践指导。

1 制药工业 RTO 焚烧炉运行特点与蓄热体作用机理

制药工业在生产过程中产生的有机废气具有成分复杂、波动性强和排放浓度差异大的特点。RTO 焚烧

炉在治理此类废气时需要兼顾高效的热量回收与稳定的有机物去除率，其运行特点表现为连续高温环境、频繁启停和气流成分多变。这些工况对蓄热体提出了严格要求，既要保证足够的热容量以维持炉膛温度稳定，又要具备优良的传热性能，以实现废气中的有机物完全氧化^[1]。由于制药行业废气中常含酸性或碱性成分，蓄热体在运行过程中还要承受腐蚀性介质的长期侵蚀，这使得材料在高温与化学环境交替作用下更容易发生性能衰减。

RTO 焚烧炉的核心在于其热能回收循环，蓄热体正是完成这一能量交换的关键单元。在设备运行过程中，蓄热体通过周期性换向实现冷热气流的交替通过，其表面迅速吸收高温气体所携带的热量，并在冷气流进入时将储存的能量释放，从而显著降低燃料消耗。蓄热体材料的热导率、比热容和蓄热密度直接决定了系统的换热效率和能耗水平。如果蓄热性能不足，设备需要额外燃料维持燃烧温度，不仅增加运行成本，也会影响废气处理达标率。如何在保证高效换热的同时延长蓄热体寿命，是制药工业 RTO 焚烧炉设计和运维的关键问题。

在作用机理上，蓄热体长期处于高温循环环境中，反复的加热与冷却导致热应力的积累，使材料内部可能出现裂纹与剥落。废气中夹带的颗粒物和酸碱组分容易在蓄热体表面积聚或反应，造成堵塞与腐蚀，进一步降低换热效率。为了保障系统的长期稳定性，必须深入研究蓄热体在复杂工况下的热传导机理、化学稳定性和力学性能变化规律。只有在运行特点与作用机理充分揭示的基础上，才能为后续材料性能评价、寿命预测与优化策略的制定提供理论支撑。

2 蓄热体材料性能评价与适用性对比研究

蓄热体材料的性能直接影响 RTO 焚烧炉的整体运行效果，因此科学的性能评价体系是材料选型的前提。在制药工业的应用中，常用蓄热体材料包括陶瓷填料、蜂窝陶瓷、球形蓄热体以及部分高性能复合材料。这些材料在热容量、导热性、耐腐蚀性以及机械强度方面各有差异，需要通过实验数据与实际工况相结合进行综合评估。评价指标主要包括热工性能、化学稳定性、力学耐久性与成本效益比。只有在多维度指标对比中，才能选出最适合制药废气特征的蓄热体材料。

在热工性能方面，陶瓷蜂窝因其比表面积大、气体流通阻力小而得到广泛应用，其换热效率通常优于传统块体材料，但在长期高温冲击下可能产生结构变形或裂纹。球形蓄热体在受热均匀性和堆积密度上具有

一定优势，但在气流分布和压降控制方面存在局限^[2]。部分复合材料通过在陶瓷基体中引入金属或氧化物增强剂，提升了导热性与抗热震性，能够在频繁启停的 RTO 工况下保持较好的稳定性。通过对比发现，制药行业废气多含氯化氢、硫氧化物等强腐蚀介质，因此单纯强调导热性能的材料往往难以满足长期应用需求，耐腐蚀性成为评价的核心指标之一。

在适用性研究中，除关注材料的热工性能、耐腐蚀性和力学稳定性外，还必须充分考虑制药行业的运行经济性与维护周期，这两方面往往直接影响材料的长期应用价值。部分高性能复合陶瓷具备优异的抗热震和耐腐蚀特性，使用寿命远高于传统陶瓷，但其采购成本较高，加工工艺复杂，若维护与更换的整体投入超过设备在节能与环保效益方面带来的经济回报，则其大规模推广将受到限制。相较之下，常规陶瓷填料虽然造价较低，初期投资压力小，但在长期运行中易出现孔道堵塞、表面剥落与结构破损，造成频繁检修与停机，间接提高了运维成本。综合来看，适用性评价必须在性能与经济之间寻求合理平衡，并结合制药企业的废气排放特征与运行负荷，提出差异化与分层次的选材策略，从而实现节能减排、降低成本与提升环保效益的协同统一。

3 蓄热体寿命预测方法与失效机理分析

蓄热体在 RTO 焚烧炉的长期运行中不可避免地会经历热老化、化学腐蚀和机械磨损等过程，因此建立科学的寿命预测方法对于设备管理至关重要。常见的寿命预测方法包括基于实验室加速老化试验的数据外推、基于现场运行监测的状态诊断模型以及基于机理分析的数值模拟方法。实验室方法能够在短期内获得材料在高温和腐蚀条件下的性能衰减规律，但与真实工况存在差异。现场监测方法通过温度场分布、压降变化和热效率下降情况推断蓄热体的劣化程度，能够反映运行中的真实寿命。数值模拟方法则结合传热学、热力学和材料力学模型，建立蓄热体寿命预测的多场耦合模型，提升预测的准确性与适用性。

在失效机理方面，热震破坏是制药工业 RTO 蓄热体最常见的问题。由于设备频繁启停和废气温度波动，蓄热体材料会承受周期性的热膨胀与收缩，若热应力超过材料的临界承受值，就会产生裂纹并逐渐扩展。化学腐蚀则表现为酸性气体或碱性组分与材料发生反应，导致表层成分结构发生变化，形成疏松多孔的弱化层，从而降低整体力学强度^[3-7]。机械失效主要来源于废气中夹带的固体颗粒冲刷蓄热体表面，长期作用下会产

生磨损和孔道堵塞，使得气流分布不均并加速温度场恶化，进一步缩短寿命。

为了提高寿命预测的可靠性，需要将失效机理研究与预测模型有机结合。通过对蓄热体显微结构的变化规律进行表征，建立热疲劳裂纹萌生与扩展的统计模型；通过腐蚀产物的定量分析，推导不同气氛成分对寿命的影响系数；通过监测气流阻力和能耗变化，构建状态指标与寿命剩余率的映射关系。这些方法能够帮助企业 在蓄热体尚未完全失效时就提前制定维护计划，避免突发停机和经济损失，为制药工业的稳定运行提供有力保障。

4 提高蓄热体可靠性与延长使用寿命的策略

在制药工业 RTO 焚烧炉的运行实践中，提高蓄热体可靠性和延长其寿命需要从材料选择、结构优化、运行管理和维护策略等多方面综合入手。在材料层面，可以通过引入高耐腐蚀性成分、优化晶体结构和改善烧结工艺来提升抗热震性与化学稳定性。部分含氧化铝和氧化锆的复合陶瓷在耐腐蚀性和热稳定性上均优于传统陶瓷填料，能够有效减少裂纹形成与腐蚀扩展的风险。通过材料表面涂层技术，可以进一步提升蓄热体对酸性气体和颗粒冲刷的抵抗力，从而延长服役周期。

在结构优化方面，合理的蓄热体几何形态能够显著改善气流分布和温度场均匀性，从而有效降低局部热应力集中带来的破坏风险。蜂窝结构因其规则排列与较大比表面积，在气体阻力和换热面积之间实现了较为理想的平衡，特别适用于制药工业废气排放中高流量、低压降的运行工况。分级堆叠与模块化设计在结构优化中同样具有重要意义，这种方式不仅有利于气流均匀通过蓄热体，还能在局部损坏时实现分块更换，大幅减少整炉停机造成的经济损失^[8]。运行管理在寿命延长过程中扮演着核心角色，智能化控制系统通过对炉膛温度、气流压降及废气成分的实时监测，能够捕捉到蓄热体性能下降的早期迹象。通过数据反馈及时调整运行参数，可有效避免因过载、温度冲击或腐蚀性气体积聚导致的材料劣化，从而在源头上延缓蓄热体的失效进程。

在维护策略方面，建立科学的定期检查制度和寿命数据库是保障长期可靠性的核心。通过红外热像检测、气流阻力测定和化学成分分析，可以全面掌握蓄热体的健康状况。结合大数据与机器学习方法，可以对历史运行数据进行挖掘，形成寿命预测的动态模型，为企业

提供更精准的维护决策。优化更换与检修流程，减少非计划停机时间，也是提升可靠性的重要环节。通过多层次的综合措施，不仅能够有效延长蓄热体的使用寿命，还能显著提升制药工业 RTO 焚烧炉的整体运行效率和环保效益，为行业绿色可持续发展提供强有力的技术支撑。

5 结语

制药工业废气治理对 RTO 焚烧炉的高效稳定运行提出了更高要求，蓄热体材料的科学选型与寿命预测成为其中的关键环节。通过对运行特点、材料性能、失效机理及预测方法的系统研究，可以为材料选择与设备管理提供可靠依据。研究表明，只有在兼顾热工性能、耐腐蚀性与经济性的前提下，才能实现蓄热体的高效与长寿命。未来应进一步结合智能监测与数据驱动的预测模型，探索材料与运行工况的协同优化路径，为制药行业绿色可持续发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 周小天,王瑞峰,段生奎,等. 非特异性重组核酸酶在生物制药工业中的应用[J].中国生物制品学杂志,2025,38(07):850 -857+865.
- [2] 操秀英.AI 制药技术助力我国迈向“制药强国”[N].科技日报,2025-06-20(005).
- [3] 杨刚. 制药工业中动物细胞工程的运用[J].现代盐化工,2025, 52(03):22-24.
- [4] 刘恩昊. 第十届智慧制药学术产业大会举办[J].中医药管理杂志,2025,33(11):173.
- [5] 蒋海涛,刘笑颖,何文婧,等. 蓄热式热力焚烧炉（RTO）的发展趋势[J].河南科技,2024,51(24):85-89.
- [6] 刘树岭,李勇,卢主飞. 蓄热式焚烧炉 RTO 阀门密封研究[J].中国设备工程,2024,(19):159-161.
- [7] 吴娅. 某沸石转轮-蓄热式焚烧炉（RTO）工程现状评估与优化方案探析[J].化工设计通讯,2024,50(07):65-68.
- [8] 李党勇,于伟锋,张召锋. 有机废气治理蓄热式焚烧炉工艺设计[J].安装,2024,(06):73-76.

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