

RTO 装置在化工废气处理中的应用及其经济性解析

王池东（山东京博生物科技有限公司，山东 滨州 256800）

摘要：有机化工生产中会产生的大量化学废气，如果不对其进行有效处理，将会对工厂员工的身体健康产生严重的危害。而如果废气被直接排入到大气中，则会对生态环境造成严重的污染和破坏。RTO 装置的应用，可使化工废气中的 VOC 得到完全的焚烧，大大提高了作业场所的空气质量，为企业带来了巨大的环保效益。基于此，本文对 RTO 装置在化工废气治理中的应用进行详细的论述，并对 RTO 技术的经济性进行较为全面的分析。

关键词：RTO 装置；化工废气；应用；经济性

化学工业是国民经济的重要组成部分，但是，在化学工业生产中，不可避免的会产生许多化工废气，不但危害着人类的生命健康，而且对周围的环境也产生了严重的不良影响。因此，对化学工业而言，采用高效、节能、环保、经济的技术手段来治理化工废气，使其符合国家和当地的排放要求，是实现化学工业可持续发展的必由之路。

1 化工废气处理技术简介

近年来，随着化学工业的快速发展，废气成分日趋复杂多样。随着时间的推移，挥发性有机化合物(VOCs)的排放量逐年攀升，已逼近甚至超越氮氧化合物，成为化工企业环境治理的重中之重。一般而言，化工企业普遍采取将挥发性有机物转化为环保材料的策略后再行排放，旨在保护自然生态环境。这一举措主要基于挥发性有机物数量庞大、回收难度大且再利用所需投资巨大、经济效益不佳的考量。

目前，吸附法、生物净化法、光催化法和 RTO 法是化工废气处理中常用的几种技术。吸附法是以活性炭或者特殊的吸附剂为介质，有效地吸附和过滤废气中的污染物，主要包括吸附、解吸、冷凝和回收 4 个主要步骤。由于该技术的净化效率受到废气特性及其类型差异的影响，因此较适用于低浓度废气排放的净化处理场景；生物净化法就是引入特定微生物，借助其代谢作用将化工废气转换成无害的 CO₂ 和水。这一方法因其对含有氧、氮、硫等元素的有机或无机废气表现出色，而备受青睐；光催化处理技术则巧妙地利用光照与催化剂的协同作用，促使有机化合物发生分解反应，同样生成二氧化碳和水。在此过程中，光源的选取与催化剂类型的匹配成为了影响治理效果的关键因素之一；RTO 技术在废气处理领域已有百年历史，RTO 设备能够处理 200 余种挥发性有机化合物，通过

不断的发展和升级，如今的 RTO 装置已从双室发展到多室甚至 14 个室。相对其他技术，RTO 技术是化工废气处理中应用最为广泛的一种技术，其在有机废气处理上，净化率超过了 95%。

2 RTO 装置的工作原理

在化工生产过程中，废气在高温环境下，其温度会自然攀升至 760℃ 以上。此阶段，废气中的挥发性有机化合物(VOCs)历经氧化反应，最终转化为二氧化碳及水蒸气。此氧化过程产生的高温气体随后流经特制的陶瓷热交换体，并予以储能。之后当有新的化工废气进入时，之前储存的热能便能为其提供必要的能量处理，有效防止了废气因再次升温而引发的燃烧消耗。为确保热能的持续高效利用，通常配置两个或更多陶瓷蓄能体，以形成多个独立的蓄能空间。蓄能空间依次经历蓄热、放热及清理等流程，实现了热能的循环利用与工作效能的最大化。当放热过程完成后，随即引入大量清洁空气，以完成蓄能体的清理作业，为下一轮的热能循环做好准备。

3 RTO 装置的应用优势

高效性：RTO 装置能够实现高达 95% 甚至更高的化工废气处理率。该装置利用高温燃烧方式，有效地将有机废气中的有害物质转化成了无害的二氧化碳和水蒸气，进而达到了净化空气的目的。在设计方面，RTO 充分考虑能源的回收和再利用问题。借助于热交换系统的强大支持，其能够最大限度地回收废气燃烧过程中所产生的热量，不仅进一步提高了能源利用效率，也减少了对环境的污染，降低了企业的运营成本。

稳定性：RTO 装置在设计之初，便深入考量了废气排放的多样性与复杂性。这一设计理念使得该装置能够灵活应对各种废气成分、浓度以及流量等条件，展现出极高的适应性和灵活性。同时，为了确保设备

在各种工况下都能实现长期稳定的运行，RTO 装置采用了先进的控制系统。这一系统不仅能够实时监测设备的运行状态，还能根据废气排放的变化自动调整设备的运行参数，从而确保设备始终处于最佳工作状态。

节能性：RTO 装置通过融入尖端的热交换技术，能够高效地从废气中回收热量，最大限度地减少能源的浪费。相较于传统的直燃式焚烧炉，RTO 装置在热效率上实现了质的飞跃，其性能可以达到传统设备的数倍，不仅有助于降低企业的能源消耗，同时也大幅度减少了运行成本。

灵活性：RTO 装置能够适应不同浓度、不同组分的有机废气处理需求，并拥有广泛的风量处理范围，在设计上有着较强的灵活性，可以根据企业的具体需求进行定制化设计，确保化工废气处理系统能够精准、高效地满足特定的排放标准和环保要求。RTO 装置能够为企业提供不同的选择，使其能够根据自身的生产工艺、化工废气成分以及排放标准等因素，选择合适的废气处理方案，既满足了相关的环保要求，又保证了生产效率和经济效益。

耐用性：RTO 装置在设计与制造上，均选用优质材料及先进工艺，不但保证了产品的稳定与可靠，更大幅提高了产品的使用寿命，在苛刻的使用条件下，仍能发挥卓越的效能。此外，RTO 装置便捷高效的维护保养方式，极大减少了设备维修费用和企业的经营费用，同时确保生产过程的连续性和环保标准的符合性。

环保性：RTO 装置能高效去除化工废气中的 VOC、NOx、PM 等有害物质，大大提高了大气品质，降低了环境污染。随着公众环保意识的增强和环保法规的日益严格，企业通过实施 RTO 装置等环保措施，可以更好地实现环保标准，避免因环境污染问题而遭受经济损失甚至是相关制裁。

4 RTO 装置运行经济性分析

4.1 电费

通常，RTO 装置运行时间的设定为 24 小时，全年按 330 天运行计算。电费单价为每千瓦时 0.8 元。基于以上数据，对系统耗电量进行精确计算。同时，考虑到风机变频的影响因素，负荷率以 60% 进行估算。具体耗电情况如下：离心风机每日耗电量为 $75 \text{ 千瓦} \times 0.6 \times 24 \text{ 小时} = 1080 \text{ 千瓦时}$ ；助燃风机每日耗电量为 $7.5 \text{ 千瓦} \times 0.6 \times 24 \text{ 小时} = 108 \text{ 千瓦时}$ ；其他附件设备每日总耗电量为 1190 千瓦时。因此，在化工废气

处理过程中，RTO 装置全年运行所消耗的电量为 $1190 \text{ 千瓦时/天} \times 330 \text{ 天} = 392700 \text{ 千瓦时}$ 。进而，年运行费用为 $392700 \text{ 千瓦时} \times 0.8 \text{ 元/千瓦时} = 314200 \text{ 元}$ ，即 31.42 万元。其中，75 代表离心风机每小时的耗电量（千瓦时），7.5 则代表助燃风机每小时的耗电量（千瓦时）。

4.2 天然气费用

在化工废气处理过程中，正常天然气的消耗量应以实际工况为依据进行精确调控。通常，化工废气的浓度范围维持在 2000 至 2500mg/m³ 之间，废气入口处的温度需稳定在约 20℃，并需确保风量达到 24000Nm³/h。考虑到 VOCs 的组成，其中苯占比 80%，甲醇占比 10%，甲醛占比 10%，苯的热值为 40579kJ/kg，甲醇的热值为 21324kJ/kg。

根据此设计参数，RTO 装置实现了约 98.5% 的高效净化能力。在实际运行中，当 RTO 装置执行氧化分解任务时，处理的 VOCs 废气量可计算为 $2250 \times 24000 \times 98\% / 1000000 = 52.92 \text{ kg/h}$ 。进一步结合其主要成分的热值特性，可估算出混合气体的平均热值约为 36364kJ/kg。由此，VOCs 废气所能提供的热量 (Q_供) 经计算为 $36364 \times 52.92 = 1924382 \text{ kJ/h}$ 。而整个系统的总热量损耗 (Q_损) 则为 1242115 kJ/h 加上辅助设备的热损耗 117000 kJ/h ，合计 1359115 kJ/h 。

通过对比分析发现，Q_供 显著大于 Q_损，这一结果明确表明，在当前的化工废气处理流程中，无需额外补充天然气，系统即可实现自给自足的运行，从而有效降低了能源消耗和运行成本。

在废气冷启动过程中，对天然气的使用量进行计算，可将冷启动时间设定为 4 小时，天然气所能释放的热值核心数值为 8200kcal。通过计算，得出 RTO 装置在冷启动预热阶段需耗用天然气量为 $71 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 。进一步推算，若每年进行 4 次冷启动，则全年累计消耗的天然气总量为 $71 \times 4 \times 4 = 1136 \text{ Nm}^3$ 。关于年运行成本，根据天然气价格（假设为 3.76 元/Nm³），计算出年运行费用为 $1136 \times 3.76 = 4300 \text{ 元}$ ，即 0.43 万元。综上所述，针对化工废气的处理，RTO 装置的总投入费用为 31.82 万元。

5 RTO 装置的优化设计

5.1 匹配设计处理风量与实际风量

企业在选用 RTO 设备的过程中，要准确估算出自己的实际排放情况，并根据估算结果决定 RTO 设备的处理风量。这一流程的确定，不能仅仅基于工厂出口

风扇的空气流量，而必须综合考量工厂的有、无组织的排气来源，以确保准确地反应工厂的真实排气状况。

无组织的排放源就是指不经过指定的排放端口或者导管而被直接排放的废气；有组织排放源则是经由指定的排放端口或者导管来排放的废气。企业在确定RTO的总空气量时，应考虑到其排气回收系统是否能完全覆盖有组织和无组织两种排气来源，以使废气能被高效地回收和处理。

5.2 考虑进口浓度与排放浓度的匹配

在RTO系统的设计中，应注意系统输入的VOCs与系统输出的VOCs的匹配。如果在RTO的入口侧上的VOC的浓度被设计得太低，则在实践操作期间，将花费额外的燃烧辅助材料以保持在氧化腔室中的期望的热氧化条件，这将导致操作费用的明显增大并且减少整个系统的能量效率。此外，应当考虑到在工艺中挥发性有机化合物浓度可能出现的波动，并在RTO中设置调整区域，以保证在各种操作条件下，RTO都能够以低应用成本和高处理效率实现稳定地操作。

5.3 考虑后期运行和维护的成本

在RTO装置的应用中，对系统后期的运行与维修的经济性也应予以充分的考虑。合理和有效的设计不但保证了系统稳定的操作，而且大大减少了对设备的日常维护，因此在操作期间可以有效地降低成本。具体而言，设计人员应选择耐久、易维护材料，并对系统结构和布局进行优化，使潜在失效点最小化。同时，要考虑系统的能量消耗，提高能量的利用率，采用余热回收等先进的能量节约技术，进一步减少能量的消耗。

5.4 使用和保养应严格遵守操作规程

在RTO装置的使用和维修中，要严格遵守规定的操作程序，以保证设备的良好运转和使用。任何不适当的操作动作（例如，错误的起动和停止程序、或温度和压力的不适当控制）都会引起装置的不正常的磨损，从而增加装置的损耗。另外，不合理的维修和保养，也会降低设备的使用效率，增加企业的运营成本。因此，为了保证RTO装置的有效运转，降低不必要的维修和更换成本，实现经济和环保效用，必须对RTO装置的操作人员进行培训，使其充分了解RTO装置的工作原理，并能按照RTO装置的操作和维修程序进行操作和维修。

5.5 对排气排出系统的优化

选择适当的排气输送系统是RTO装置应用的关键。这与系统的整体效率和操作成本有关，而且与如

何高效收集和处理化工废气直接相关。因此，需要考虑生产场地的规模、形状、排气发生点的位置、配管的长度、弯曲等，按照现场排气配管的特定布置，准确地进行配管压力的计算。在确定管路压力之后，应根据实际情况选择适当的通风机。风扇的体积和压力应与管路系统匹配，从而保证废气从源头到处理装置的有效传输。如果空气量不足，则可能不能充分地收集排出气体，降低处理效率；如果压力太高，则有可能浪费能量导致操作成本增加。因此，在风机选型时，既要考虑系统运行的可靠性，又要考虑长期运行的经济性，必须对风机选型进行准确的计算，切实满足实际的要求。

5.6 单独处理无组织废气

无组织排放的废气往往具有较大的风量和较低的浓度，其中还可能夹杂着具有刺激性气味的有毒有害气体，如硫化氢、氨气等。由于此类气体的排放特点和复杂的成分组成，使得其在处理中通常需要采取特定的措施。为了确保废气处理的效率和环保标准的达标，针对此类废气，应尽可能实施单独收集处理，而不是将其混入到RTO处理流程中。这样可以有效避免因废气量的增加而导致RTO设备处理能力的超负荷，也能减少因处理无组织废气而产生的额外的运行成本。通过单独处理无组织废气，不仅可以提高废气处理的针对性和效果，还能优化整个废气处理系统的运行效率，降低整体的维护和运营成本。

6 结语

RTO装置具备提升化工废气温度至介于最大680℃至最高1050℃之间的能力。在此高温条件下，化工废气被有效分解为水分与二氧化碳，同时实现了热能由烟气向储热体的转移。此循环利用机制将所积累的热能应用于后续的化工废气分解过程中，从而在显著降低废气处理成本的同时，也提升了处理效率与质量，确保95%以上的化工废气得到有效处理，进而大幅减轻化工产业对生态环境的负面影响。

参考文献：

- [1] 王文波.RTO焚烧工艺处理VOCs废气的技术及其经济性探究[J].科学与信息化,2021.
- [2] 马红妍.沸石转轮+RTO蓄热焚烧工艺治理涂装工业VOCs废气研究[J].皮革制作与环保科技,2022(013):003.
- [3] 杨峥雄.蓄热式燃烧炉(RTO)——实用可行的VOCs化工废气处理技术[J].包装前沿,2015(6):5.