

团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—20XX

高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技 术规范

Technical Specifications for Regenerative Thermal Oxidation and Waste
Heat Recovery of High-Concentration VOCs Waste Gas

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中 国 工 业 节 能 与 清 洁 生 产 协 会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 总体要求 2

5 处理工艺与技术 2

 5.1 技术原理 2

 5.2 工艺路线 3

 5.3 技术指标 3

 5.4 爆炸性计算 4

 5.5 安全控制 4

 5.6 节能降碳指标 5

6 二次污染控制 6

 6.1 废气 6

 6.2 废水 6

 6.3 固废 6

 6.4 噪声 6

图 1 高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技术原理示意图..... 3

图 2 高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技术工艺路线3

表 1 各种温室气体的 GWP100 值及大气寿命期.....5

前 言

本文件按照《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》（GB/T 1.1-2020）的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：新疆新业能源化工有限责任公司、新疆大学、西安昱昌环境科技有限公司。

本文件主要起草人：。

高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技术规范

1 范围

本文件规定了高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用的总体要求、处理工艺与技术、二次污染控制等。
本文件适用于化工、制药、涂装、煤矿等行业内高浓度、大风量的VOCs或甲烷废气处理，同样适用于高能源消耗领域内高温烟气余热回收的资源化利用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期的对应版本适用本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 20426 煤炭工业污染物排放标准
GB 3095 环境空气质量标准
GB 31571 石油化学工业污染物排放标准
GB 31572 合成树脂工业污染物排放标准
GB/T 2589 综合能耗计算通则
GB/T 13234 用能单位节能量计算方法
GB/T 28750 节能量测量和验证技术通则
GB/T 32045 节能量测量和验证实施指南
GB/T 36574 产业园区废气综合利用原则和要求
GB/T 40009 废轮胎、废橡胶热裂解技术规范
GB/T 40200 工业有机废气净化装置性能测定方法
HJ 644 环境空气 挥发性有机物的测定 吸附管采样-热脱附/气相色谱-质谱法
HJ/T 75 固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测技术规范
HJ 76 固定污染源烟气（SO₂、NO_x、颗粒物）排放连续监测系统技术要求及检测方法
HJ 1093 蓄热燃烧法工业有机废气治理工程技术规范
HJ 2016 环境工程 名词术语

3 术语和定义

GB/T 40009和HJ 2016界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

挥发性有机物 volatile organic compounds; VOCs

参与大气光化学反应的所有有机化学物质。对低温甲醇洗等化工生产装置排放气中的VOCs，以“非甲烷总烃”作为控制指标。

[来源：GB/T 40009 废轮胎、废橡胶热裂解技术规范，3.1有修改]

3.2

非甲烷总烃 non-methane hydrocarbon

除甲烷以外所有碳氢化合物的总称（以碳计）。

[来源：GB/T 40009 废轮胎、废橡胶热裂解技术规范]

3.3

蓄热氧化装置 regenerative thermal oxidizer

利用蓄热体交替储存和释放热量，将废气中的挥发性有机物在高温下氧化分解为二氧化碳和水，并实现热能回收的废气净化设备，通常由燃烧室、蓄热室、切换阀门及控制系统等组成。

3.4

余热锅炉 exhaust-heat recovery boiler

将工业过程（如化工、燃烧等）排放的废热（烟气、工艺气等）作为热源，产生蒸汽或热水的换热设备，通常由蒸发受热面、过热器、省煤器及汽包等组成，不直接燃烧燃料。

4 总体要求

- 4.1 本文件所述高浓度VOCs是指非甲烷总烃含量 $\geq 5000 \text{ mg/m}^3$ 。
- 4.2 高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用技术应符合国家产业政策、行业污染防治技术政策以及其他有关规定。
- 4.3 高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用技术的选择以安全环保、工艺可靠、经济合理为原则，以求在投资和运行费用中找到平衡。
- 4.4 高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用技术采用蓄热式热氧化工艺，并配套余热锅炉充分利用RTO装置内多余的热量副产蒸汽。
- 4.5 余热锅炉副产中高压蒸汽为主。
- 4.6 烟气氧浓度参数的控制需综合考虑VOCs废气去除率和节能等因素，以设计工况为基准时，烟气中氧含量的过剩系数需满足出口氧含量为3%，确保补氧空气的气量。
- 4.7 RTO装置所需的稀释空气应优先从VOCs治理装置界区高空取气，用于补氧配风。对于冬季寒冷地区，应优先采用空气反吹，在反吹口入口掺入余热锅炉热烟气，避免冬季寒冷空气对蓄热体的影响，提高蓄热效率。
- 4.8 应设置分液装置，收集管路输送过程中由于温度降低冷凝下来的液态或废气中的过饱和水。
- 4.9 燃烧室炉温应控制到 920°C 以上，工艺废气、稀释空气和燃料气的混合气在达到废气处理温度之后至少保证1.5s的停留时间，确保废气中可燃组分完全氧化。
- 4.10 高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用工艺系统应配置有氧含量分析仪，实时监测RTO出口烟气中的氧气量，保障出口烟气达标。
- 4.11 RTO装置需采用频繁动作的换向阀来改变气体流动方向，换向阀需满足：快速动作；高度密封，少泄露；阀的结构材料要求耐磨，并且耐有机化合物冷凝引起的腐蚀。
- 4.12 新建煤化工企业，高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用工程应与主体工程同时设计、同时施工、同时投入使用。
- 4.13 高浓度VOCs废气蓄热氧化及余热利用设施和相关构筑物应按照GB/T 42866和GB/T 36574的相关规定，设计、建设和安装有关防腐蚀、防泄漏设施和废气综合利用装置。
- 4.14 本标准最终非甲烷总烃排放浓度小于 20 mg/m^3 ，满足中华人民共和国生态环境部《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南（2020年修订版）》（环办大气函[2020]340号）中对A类企业规定的非甲烷总烃排放标准小于 20 mg/m^3 的要求。

5 处理工艺与技术

5.1 技术原理

蓄热氧化炉（RTO），其原理是在高温下将可燃组分氧化成 CO_2 和 H_2O ，从而净化废气，并回收废气分解时所释放出来的热量，热回收效率达到95%以上。

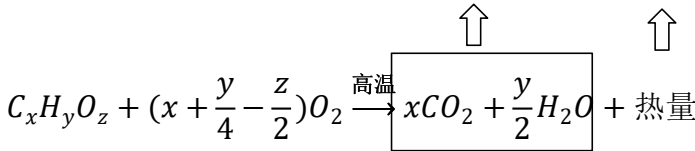


图 1 高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技术原理示意图

5.2 工艺路线

5.2.1 根据中华人民共和国生态环境部《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南（2020 年修订版）》（环办大气函[2020]340 号）规定，非甲烷总烃排放标准为小于 20mg/m³ 可评为 A 类企业，重污染天气下 A 类企业可自由停限产。采用“一级 RTO+余热回收锅炉”→“二级 RTO 深度治理”的技术路线对某些行业高浓度 VOCs 废气进行治理，可实现 VOCs 超低排放。

5.2.2 一级 RTO 按照取热节能设计，最大化回收尾气中热量，二级 RTO 按照深度治理设计，保证排放达标。可根据废气实际浓度和排放指标决定是否增设二级 RTO。工艺路线如下图所示：

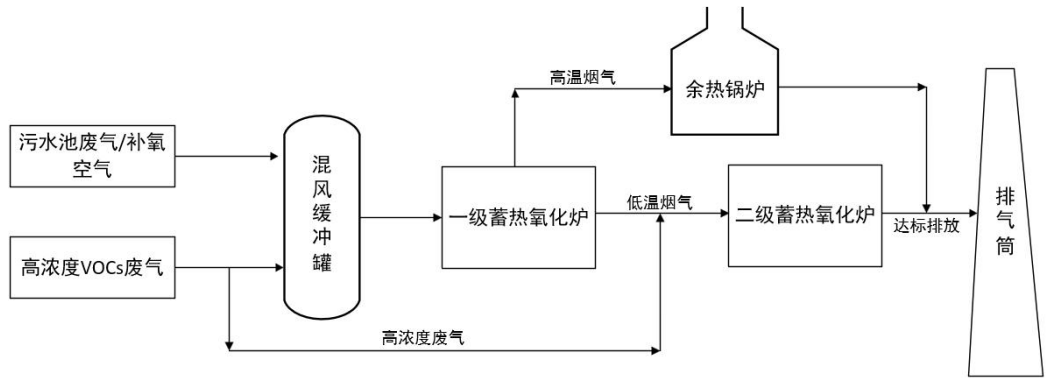


图 2 高浓度 VOCs 废气蓄热氧化及余热利用技术工艺路线

- 5.2.3 一方面对于一部分高浓度废气，如煤化工低温甲醇洗废气，其氧含量低，需通过补氧保证充分燃烧；另一方面需确保进入 RTO 的废气浓度始终在安全范围内。根据 HJ 1093 等标准，进入 RTO 的废气浓度必须低于最易爆组分或混合气体爆炸极限下限最低值的 25%。
- 5.2.4 若企业有污水池废气资源可利用，可用污水池废气作为补氧空气，需前端增设除湿/除水预处理设施。
- 5.2.5 混风罐后设置 LEL 分析仪，用于监测尾气浓度，并且设置爆炸下限连锁，防止尾气浓度超出设计工况。
- 5.2.6 为保证废气经过 RTO 燃烧处理后达标，可对废气进行二级 RTO 燃烧处理。从原始废气抽取部分高浓度废气（设置调节阀）与一级 RTO 出口低温烟气混合进入二级 RTO，满足二级 RTO 自运行，可节省燃料气消耗量，达到环保与节能目的。
- 5.2.7 根据热量衡算，若废气燃烧后除自运行热量消耗以外，还有余热可以利用，可从一级 RTO 顶部抽取高温烟气进入余热锅炉系统进行余热回收产蒸汽，具有显著经济效益。
- 5.2.8 每台 RTO 设置有单独的吹扫风机、启炉风机、助燃风机、燃烧机系统。
- 5.2.9 排气筒上需预留采样孔（带阀），并按照 HJ/T 75 和 HJ 76 设置在线监测系统（CEMS），用于分析烟囱排放出来的烟气，并在取样口附近设置平台、梯子等满足 GB 50051 要求。
- 5.2.10 烟气在线监测设备设置需要满足 HJ 76、HJ/T 75、DB37/T 3535 相关要求。

5.3 技术指标

技术指标应满足以下条件：

- a) 焚烧温度：≥920℃（760-1000℃程序可调）；

- b) 废气在燃烧室滞留时间：>1.5 秒；
- c) 蓄热室热交换效率：≥95%；焚烧去除率：≥99.5%；
- d) RTO 外壁温升：≤环境温度+40℃，或炉体表面温度<60℃（部分热点除外）；
- e) 净化后气体温升：30℃-40℃或净化后气体排气温度小于 100℃。

5.4 爆炸性计算

5.4.1 多种可燃气体混合物的爆炸极限计算

两组元或两组元以上可燃气体或蒸汽混合物的爆炸极限，可应用各组元已知的爆炸极限，按照 Le Chatelier 公式计算。需要注意的是，该式仅适用于各组元不反应、燃烧时无催化作用的可燃气体混合物。如果混合气体中含有空气组分时，应首先将其占用的体积分数扣除后，再按公式（1）进行计算：

$$L_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{L_i}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中：

L_m ——混合气体爆炸极限，%；

L_i ——i 组分的爆炸极限，%；

y_i ——不包括空气组分 i 组分的摩尔分数或体积分数，%；

注：计算需注意 $\sum_{i=1}^n y_i = 1$

5.4.2 含有惰性气体可燃气体混合物的爆炸极限计算

可燃气体种类众多，其与不同的惰性气体可形成各种组合，有时难以通过已有的图表或手册，来直接得到混有特定惰性组分的某种可燃气体混合物的爆炸极限。此时，可以应用公式（2）来近似估算有惰性气体混入的多组分可燃气体混合物的爆炸极限：

$$L'_m = L_m \times \frac{1 + \frac{B}{1-B}}{100 + L_m \times \frac{B}{1-B}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中：

L'_m ——含有惰性气体的爆炸极限，%；

L_m ——混合物中可燃部分的爆炸极限，%；

B ——惰性气体体积分数。

5.5 安全控制

5.5.1 可增设 DCS 或 PLC 系统进行控制。

5.5.2 浓度控制：废气进入 RTO 前设置 LEL 浓度在线检测装置，控制废气进入 RTO 的浓度<25% LEL，设置三级报警点（报警值可调），一级报警点为 20% LEL，二级报警点为 22% LEL，三级报警点为 25% LEL。LEL 达到一级报警点时报警，达到二级报警点时联锁控制开启新风阀；当达到三级报警点时，紧急排放阀打开，同时废气阀关闭，新风阀开启。

5.5.3 燃烧机控制：RTO 燃烧系统选用知名品牌燃烧器和阀组，符合国际安全标准，配备火焰检测器，能快速关断燃气，点火管路采用双电磁阀；安全控制功能包括点火成功，点火失败等故障信号反馈系统；燃料气比例调整；助燃风机风压不足和风压过高不开燃料气；燃气压力不足自动报警；燃气压力高自动报警；燃气泄露自动报警。

5.5.4 温度控制：炉膛燃烧室温度实时监测，并设置有双热电偶对其监测数据判断。设置三级报警点（报警值可调），当炉内温度升高，超过一级报警点报警提示，达到二级报警点设定值时，高温旁通阀打开，

排放多余的温度；当 RTO 温度超过三级报警点设定值时，关闭废气阀，全开紧急排放阀和新风阀，使 RTO 设备完全通过新鲜风降温。

- 5.5.5 废气流量控制：废气管道上可设置流量计，或根据风机运行频率参数，当低于设定值时，可选择运行的炉子台数。
- 5.5.6 炉膛到烟囱中间有高温旁通阀，高温阀控制信号与炉膛温度连锁，当温度过高超温时，高温旁通阀会自动打开释放过多的热量，保护炉膛。
- 5.5.7 系统在废气入口处设置有紧急排放阀，可在 RTO 故障或者维护停机的时候紧急排放。
- 5.5.8 在炉体进、出风口设置有压差变送器，用来观测蓄热陶瓷的工作情况，检测是否堵塞或者破损。
- 5.5.9 系统开机流程设置有扫膛过程，用于清扫炉膛内残留的有机废气和燃料，避免点火时发生爆闪。
- 5.5.10 系统设置安全急停按钮，当 RTO 区域发生危险情况时，拍下急停可以避免更大损失的发生。
- 5.5.11 锅炉汽包液位低于一定值，执行停机程序。锅炉集气箱压力高于一定值，执行停机程序。
- 5.5.12 大风量、高浓度 VOCs 废气处理系统风机可根据项目实际情况，配置风机，一用一备，进出口设置切换阀，当一台风机出现故障时，可启动另一台风机保证系统正常运行。

5.6 节能降碳指标

- 5.6.1 节能降碳指标主要由节能量和碳减排量来衡量。《温室气体排放核算与报告要求》（如《省级温室气体清单编制指南》）明确了区域层面的核算方法。
 - 5.6.2 节能量应根据 GB/T 13234、GB/T 28750、GB/T 32045 或具体领域相关国家标准、指南等技术性文件对技术应用案例每年节约的能源总量（折算为吨标准煤）进行测算。其中，节能率是指年节能量与年校准能耗的比值。
 - 5.6.3 碳减排量是指技术应用后每年避免或减少排放的温室气体总量（折算为二氧化碳当量），应根据应用案例实际情况，选择适用的评价方法（如已发布的国家标准、指南等技术性文件或已备案的国家温室气体自愿减排方法学），对技术应用案例温室气体年减排量进行测算。其中，碳减排率是指温室气体年减排量与基准线年排放量的比值。
 - 5.6.4 能源折标系数可参照国标 GB/T 2589 进行计算，其中，电力折标系数按等价值 0.303kgce/kW·h 计算。主要能源品种的排放系数参考：煤炭为 2.66 tCO₂/tce，石油为 1.73 tCO₂/tce，天然气为 1.56 tCO₂/tce，电力为 0.5703 kgCO₂/kW·h。
 - 5.6.5 碳减排量、碳减排率计算按公式（3）：
年碳减排量=甲烷减排碳减排量+余热锅炉替代燃煤碳减排量- RTO 电耗碳排放量.....(3)
 - 5.6.6 甲烷减排碳减排量计算按公式（4）：
年碳减排量=年甲烷处理量×（GWP_{CH₄} - GWP_{CO₂}）.....(4)
- 根据中国目前在温室气体核算中使用 IPCC AR6 的 GWP 值，即 CH₄ 为 27，CO₂ 为 1。

表 1 各种温室气体的 GWP100 值及大气寿命期

Gas	AR-GWP100	Lifetime
CO ₂	1	N/A
CH ₄ (biogenic)	27.0	11.8
CH ₄ (fossil-combustion)	27.0	11.8
CH ₄ (fossil-fugitive and process)	29.8	11.8
N ₂ O	273	109

注：数据来源：IPCC 第六次评估第三工作组报告《Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change》。

- 5.6.7 余热锅炉替代燃煤碳减排量计算按公式（5）：
年碳减排量=年蒸汽产量×（蒸汽焓值-给水焓值）/锅炉效率/煤炭热值×煤排放系数.....(5)
- 5.6.8 RTO 电耗碳排放计算按公式（6）：

年碳排放量=年电耗量×电力排放系数.....(6)

5.6.9 碳减排率计算按公式（7）：

碳减排率=碳减排量/基准线年排放量.....(7)

基准线年排放量包括甲烷完全未处理引起的碳排放和使用燃煤锅炉引起的碳排放。

5.6.10 节能量按公式（8）：

节能量=余热锅炉折标准煤量-RTO 电耗折标准煤..... (8)

5.6.11 节能率计算按公式（9）：

节能率=节能量/年校准能耗.....(9)

年校准能耗可考虑为余热锅炉折标准煤量作为基准场景。

6 二次污染控制

6.1 废气

6.1.1 氮氧化物（NO_x）

NO_x的产生主要有三种途径，1）热力型：在温度超过 1400℃，氮气与氧气可生成 NO_x，RTO 燃烧室最高温度不超过 950℃，故不会产生热力型 NO_x；2）燃料型：含氮有机物经过氧化生成 NO_x，如果燃料中或者废气中有含氮有机物或氨气，会有燃料型 NO_x生成，可根据 NO_x 预估生成量和排放限制确定选用 SCR 或者 SNCR 脱硝方式；3）快速型：快速型氮氧化物只有在富燃的情况下产生，且产生量极小，一般在总 NO_x 生成量的 5%以下，本项目不考虑快速型 NO_x。

6.1.2 颗粒物

该废气治理工艺无颗粒物产生。

6.1.3 含硫、卤素有机物

当废气中含 S、Cl 等元素有机化合物时，经过高温焚烧后会产生 SO₂、HCl 等二次污染物，因此对燃烧尾气需要进一步处理，可增设脱硫、碱洗装置后处理工艺，达标后方可排放。从而避免腐蚀设备，形成酸雨，污染大气。

6.2 废水

装置、管道可设置排液管道，定期排出装置运行以及检修时产生的废水（可接入厂区污水处理装置处理）。

6.3 固废

RTO 蓄热陶瓷长期使用后若失效，属于一般工业固废，可由厂家回收再生或安全填埋，无危险废物产生。

6.4 噪声

风机加装消音器，蒸汽放空口安装放空消声器，设置基础减振垫。