RTO 装置安全风险辨识与管控措施

钟铁

内蒙古大唐国际克什克腾煤制天然气有限责任公司

摘要：随着环保法规日益严格，众多危化品相关企业配套建设 RTO 装置以处理挥发性有机物。RTO 装置工作原理为将有机废气加热至 760℃以上，使 VOCs 氧化分解，利用陶瓷蓄热体实现热量回收。然而，其处理的废气含多种易燃易爆、有毒物质，存在火灾、爆炸、中毒等风险。

关键词：RTO 装置；化工安全；风险辨识；生产管理

近年来，随着我国对挥发性有机物（VOCs）污染防治工作的持续推进，蓄热式热力氧化炉（RTO）凭借其高效的废气处理效率和显著的节能优势，在化工、涂装、印刷等行业得到广泛应用。然而，部分企业因安全风险辨识不全、措施落实不力、应急处置不当，导致 RTO 装置安全事故频发。

某煤化工公司以褐煤作为原料和燃料，每年最终生产 40 亿 m^3 天然气。项目分三期建设，一、二期装置已投产，每年天然气产能 26.6 亿 m^3。项目利用内蒙古丰富的褐煤资源，采用先进、成熟的工艺技术生产煤制天然气，实现煤炭资源的清洁转化。某煤化工公司积极践行国家环保要求，对低温甲醇洗装置二氧化碳排放气中 VOCs 气体进行彻底整治，新建 RTO 蓄热氧化焚烧装置。单套蓄热氧化焚烧装置对应低温甲醇洗单套装置，一套蓄热氧化焚烧装置设置两台 5 室蓄热氧化焚烧炉，同时二氧化碳排放气蓄热氧化焚烧处理后多余热量副产中压蒸汽，在达到环保目标的同时实现经济效益，RTO 装置区现场如图 1 所示。

图 1　RTO 装置区现场图

1　安全风险分析

RTO 装置处理的二氧化碳排放气主要成分为二氧化碳（约 85%）、氮气（12%），微量的氢气（0.12%）、一氧化碳（0.09%）、甲烷（0.91%）及其他烃类组分；焚烧炉升温使用的燃料气主要成分为甲烷。现对 RTO 装置存在的主要事故类别和安全风险分析如下。

1.1　爆炸风险

1.1.1　RTO 燃烧炉

RTO 装置需要严格控制进入混合废气的可燃气体浓度，在生产过程中若操作不当会引发炉膛爆炸。发生炉膛爆炸常见的现象有 2 种：1）起动点火时的炉膛爆炸事故。起动点火前炉膛内已经积蓄了混合可燃气体，当混合可燃气体与空气的混合比达到爆炸极限，遇点火源爆燃可导致 RTO 炉膛爆炸。2) 在引入排放气进入蓄热炉过程中或装置运行期间，若可燃气测量表测量值与实际不符，导致排放气中可燃气含量实际超出 20%，大量排放气进入蓄热炉后与空气混合，形成爆炸性气体，遇点火源可能发生闪爆。

1.1.2　蒸汽锅炉

蒸汽锅炉属于特种设备，锅炉缺水会使锅炉蒸发器受热面管子过热变形，进而引发管子爆破、炉膛损坏，处理不当甚至会导致锅炉爆炸；锅炉满水则可能导致锅水进入蒸汽管道内，造成水击，不仅使蒸汽质量降低，严重时还会导致炉管振裂。在运行过程中，因操作不当、水质不合格、水位表和安全阀等重要附件不全或失灵，以及锅炉在安装、改造和检修中存在质量问题均可造成锅炉爆炸事故。锅炉安全阀、液位计、温度计

以及压力表等未定期校验，锅炉内压力升高，无法起到泄压作用，也可能引起锅炉爆炸。

1.2 火灾风险

装置涉及的低甲排放气含有少量氢气、甲烷等气体，涉及的燃料气含有大量甲烷气体。上述气体都属于易燃气体，若发生泄漏后积聚到爆炸极限范围内，遇到适当的点火源，就可能发生火灾、爆炸事故。引起燃烧爆炸的点火源包括明火、静电火花、电气火花、摩擦及撞击产生的火花、高温表面及雷电等。因此，防止易燃气体泄漏、控制点火源是本项目安全防范的重点[1]。

1.3 中毒、窒息风险

装置处理的低甲排放气中含有大量二氧化碳、少量一氧化碳和氮气等窒息性气体。一氧化碳吸入后，轻则出现头晕、头痛等症状，过量则致意识模糊、昏迷甚至死亡。高浓度二氧化碳通过物理性窒息和酸中毒危害人体，轻度表现为头痛、呼吸急促，重度则可能导致昏迷、呼吸停止。氮气高浓度吸入会降低氧分压，引发缺氧性窒息，初期表现为烦躁、呼吸困难；重则导致意识障碍、器官衰竭。

蒸汽锅炉正常运行过程中，为防止结垢、调整锅炉水 pH 值、辅助除氧稳定水质，需向锅炉水中加入磷酸三钠药剂。磷酸三钠本身低毒，误服可能引起胃肠道刺激症状，如恶心、呕吐和腹泻；其溶液或粉尘对皮肤和眼睛有刺激性，可能引起红肿、疼痛。当这些物质泄漏在作业环境中的浓度超出允许范围时，可导致人员中毒或窒息[2]。

1.4 灼烫风险

余热锅炉的汽包、集汽箱及相关管道，RTO 炉膛及蓄热器等设备运行时，作业人员操作中需接触高温设施。尽管这些设备、设施均采用保温材料隔热，但当保温材料脱落或隔热不良时，人员接触高温设备或蒸汽可能造成烫伤。外表温度＞ 64℃的设备及管道，在人行通道和经常接触区域存在烫伤风险。

生产过程中，若设备、容器、管道及其附件存在质量问题，可能导致高温物料、蒸汽等物质跑冒滴漏，进而引发灼烫事故。

1.5 其他安全风险

装置运行中，机械伤害、触电、高处坠落以及物体打击等事故风险普遍存在。风机若防护缺失或故障，可能引发机械伤害；电气设备及线路若绝缘破损、接地不良，存在触电风险；人员在装置高处平台检修时，因防护栏缺陷或操作失误易发生高处坠落；设备部件松动、工具物料坠落等可能导致物体打击。尽管部分风险发生概率较低，但企业需定期开展安全风险辨识，强化设备防护、电气安全检查及高处作业管控，落实各项风险控制措施，将事故风险降至最低。

2 风险管控措施

2.1 爆炸

1）低甲排放气进入 RTO 蓄热室前的管道设置有可燃气体浓度检测器，实时检测混合后的可燃气体浓度是否降至设定的 LEL20% 以下，当检测浓度不合格时（3 取 2），联锁关闭进入蓄热器的两路进料切断阀，同时打开旁通切断阀将不合格的混合废气排至烟囱。

2）燃料气管道设置阻火器、切断阀及氮气吹扫管道，各燃烧器具有自动点火程序控制及超压、火焰检测功能。

3）排放气进入 RTO 炉膛管道设置

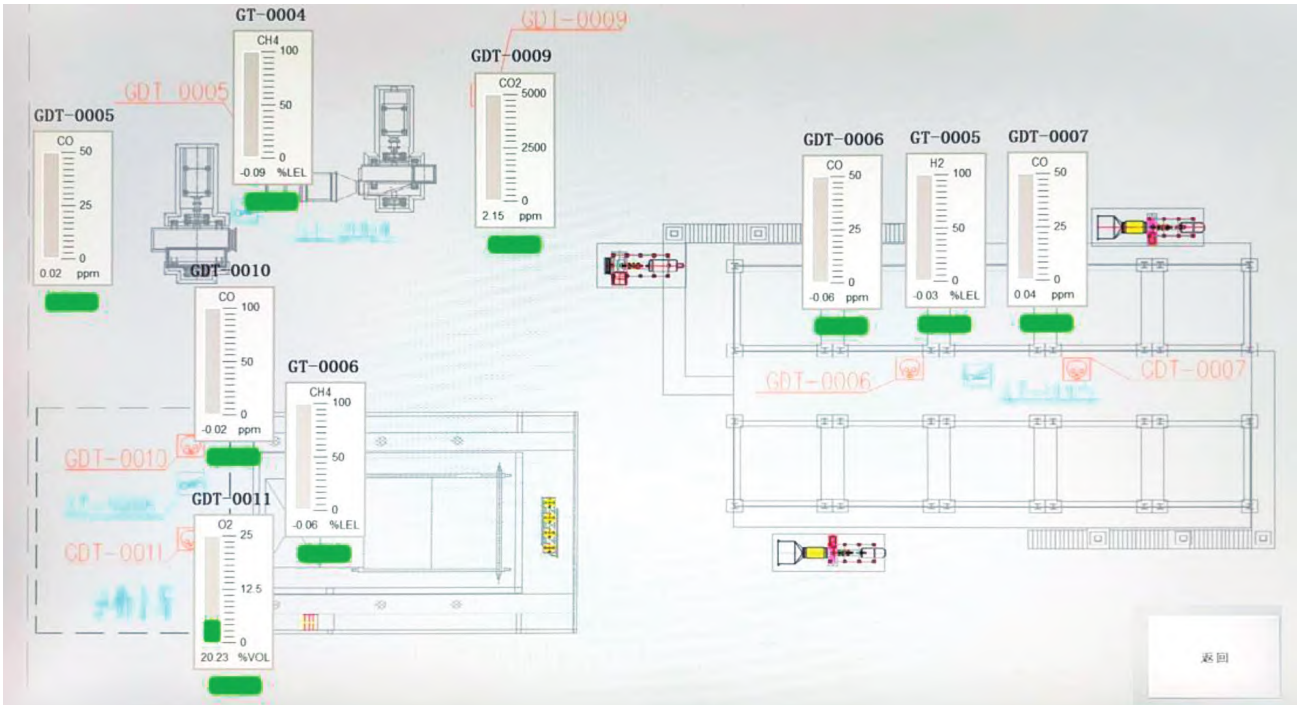

图 2 RTO 装置关键气体浓度实时监测界面

爆破片，每 5 室燃烧室设置有 3 组爆破片，可满足炉体超压的泄爆要求。

4）点火期间，必须在装置区的安全稳定前提下，进行点火操作。点火前必须通过补氧风机使用新鲜风对蓄热焚烧炉进行空气吹扫不少于 10 min，吹扫完成后，手动取样分析蓄热焚烧炉内可燃气含量 LEL ≤ 5%，方可进行点火作业 [3]。

（5）蓄热焚烧炉接收排放气前，重点关注混合尾气 LEL 在线监测仪表数值，同时每小时手动取样分析 LEL 数值同在线仪表数值进行对比，手动取样不少于 3 次，确保在线监测仪表数值准确性。

（6）RTO 装置接气后，重点关注 LEL 在线监测仪表数值变化情况，出现波动及时对表计、再循环风机、补氧风机进行检查，同时关注燃烧室温度、蓄热室温度不低于 650℃，避免因氧化不完全造成可燃气体积聚，RTO 装置关键气体浓度实时监测界面，如图 2 所示。

7）余热锅炉汽包设置有高、低水位报警及联锁功能。高水位报警时，关闭锅炉给水上水调节阀；低低水位报警时，联锁关闭烟气进入余热锅炉调节阀，同时打开烟气热旁通调节阀。

8）余热锅炉汽包、排污扩容器等压力容器，设计有安全阀、压力表、液位计、温度计等安全附件。安全阀等泄压措施满足生产时的紧急泄压要求，安全阀的开启压力小于压力容器的设计压力。

9）所有工艺、设备联锁必须保证是投用状态，不得随意拆除。

10）所有安全阀、压力表、液位计、温度计等安全设施必须按照规定时间进行检验。

图 3 展示了 RTO 装置的整体工艺流程，包括原料气经缓冲罐进入多个蓄热燃烧系统，分别经过蓄热室、燃烧室及提升阀处理后排放，同时余热通过余热锅炉回收用于产汽。系统设有助燃风机、补氧风机及再循环风机，实现燃烧效率优化与能源回用，保障了有机废气的高效净化与装置的节能运行。

2.2 火灾

1）生产装置采用密闭操作，物料全程密闭于工艺设备和管道中，阀门、法兰等连接处采用可靠密封措施，防止可燃物料泄漏。

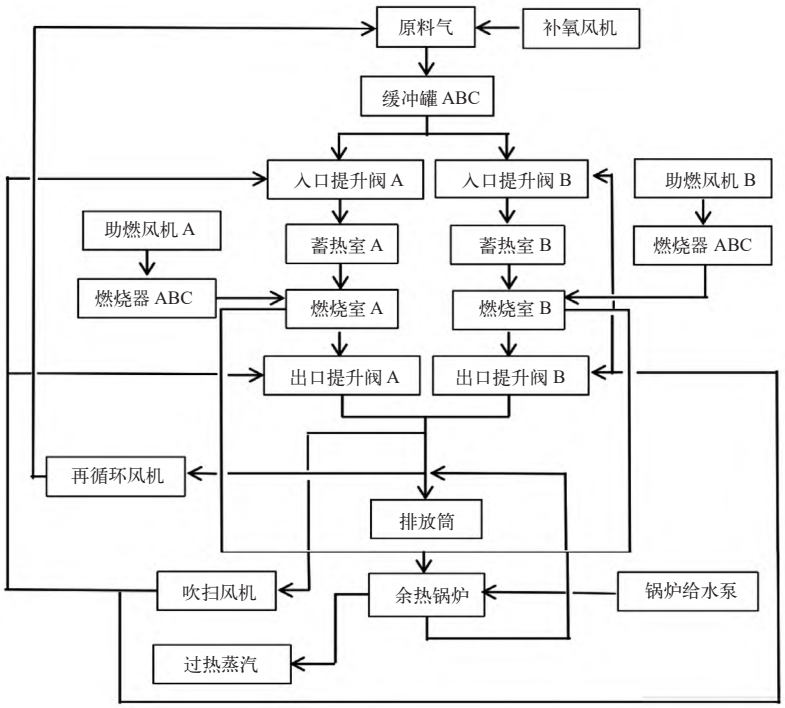

图 3 RTO 装置的整体工艺流程

2）采用 DCS 系统全程控制，重要回路配备 SIS 系统；关键部位设置温度、压力、流量、液位检测及报警装置，异常时自动调整参数，防范超温、超压引发燃爆。

3）按标准选用高规格法兰（压力等级、密封面形式）、优质垫片及紧固件，确保管道、法兰等部件符合安全规范，杜绝跑冒滴漏。

4）废气及燃料气管道在 RTO 蓄热器出入口设置紧急切断阀，事故状态下快速关闭，阻断物料泄漏路径，防止火势蔓延。

5）在燃气调压阀组、燃烧室等易泄漏区域设置甲烷、氢气等可燃气体浓度检测报警器，信号接入 GDS 系统集中管理，现场配备声光报警，确保泄漏及时发现。

6）检修后对装置进行气密性检测，日常定期检查、保养、维修设备，及时更换破损配件、填料，确保系统无泄漏，维持良好运行状态。

7）重点部位设置监控系统，随时监控装置区内情况，发现问题及时进行处理。

8）确保现场消防设施正常备用，发生火灾时可立即使用。

2.3 中毒、窒息

1）在装置易泄漏区域设置一氧化碳等有毒气体浓度检测报警器，信号接入 GDS 系统集中管理，现场配备声光报警，确保泄漏及时发现。

2）严格落实抽堵盲板制度，严禁以阀门代替盲板隔离；对高毒化学品管道，强化隔离管控，防止有毒介质窜入其他系统引发次生危害。

3）无论受限空间置换效果如何，作业人员均需根据现场风险，正确选择佩戴防毒面具、长管呼吸器或自给式空气呼吸器等防护装备，确保作业安全。

4）进入塔槽罐釜、地沟地井等受

限空间前，严格履行《受限空间作业许可证》办理程序，全面检测有毒有害气体及氧含量，严禁无证作业、冒险进入。

5）加药作业时，操作人员需穿戴耐酸碱手套、护目镜、防护口罩，避免皮肤直接接触药剂粉末或溶液。

6）若发生泄漏，立即用干燥砂土覆盖，避免冲入下水道，用洁净工具收集至专用容器处理。

7）磷酸三钠储存于干燥、通风库房，远离酸类、食品级原料，避免受潮结块。搬运时轻装轻卸，防止包装破损。

2.4 灼烫

1）对汽包、集汽箱、管道、RTO炉膛及蓄热器等高温设施，采用耐高温、抗老化保温材料全覆盖包裹，定期检查保温层完整性，发现脱落、破损及时修复。

2）对表面温度＞64℃的设备及管道，在人行通道和人员频繁接触区域设置防护围栏或隔热挡板，标注醒目的“高温烫伤危险”警示标识，禁止人员直接触碰。

3）作业人员接触高温设备时，需穿戴防烫耐高温手套、长袖工作服、防护面罩等个体防护装备；检修高温部件前，必须先泄压、降温至安全范围，严禁在设备未冷却时进行拆卸或触碰。

4）在高温作业区域配置烫伤急救药品，制定灼烫事故应急预案，定期开展演练，确保人员掌握烫伤后的紧急处理流程。

2.5 其他安全问题

1）机械传动部位必须安装固定的防护罩、防护栏等防护装置，禁止随意拆除；设备的急停按钮、限位开关等安全装置需定期检查，确保灵敏可靠。

2）制定详细的机械操作规程，明确开机前检查、运行中操作、停机后维护等要求；作业人员需经培训考核合格后上岗，严禁违规操作，杜绝设备运行时进行清理、维修等危险行为。

3）定期对机械设备进行维护保养，检查零部件磨损、润滑情况，及时更换老化、损坏部件；设备检修时，严格执行断电、挂牌上锁制度，防止误起动。

4）电气设备、线路需符合国家相关标准，定期检查绝缘性能，及时更换老化线路；配电箱、开关箱设置防雨、防尘措施，保持内部清洁，严禁私拉乱接电线。

5）电气设备外壳必须可靠接地，所有用电设备均安装漏电保护装置，定期测试其动作可靠性；临时用电需办理审批手续，由专业电工进行接线和拆除。

6）高处作业平台需稳固，满铺脚手板并固定，严禁出现探头板；设置防滑梯、通道，定期检查其稳固性，雨雪天气后及时清理积水、积雪，采取防滑措施。

3 结语

RTO装置的安全运行是环保要求与生产效益协同实现的核心保障。其运行过程中面临的爆炸、火灾、中毒窒息、灼烫及机械伤害等多重风险，需通过“技术防控＋管理强化＋应急保障”的立体化体系进行系统性应对。

未来，企业需持续深化安全、健康、环保管理体系与装置运行的深度融合，以动态风险辨识为基础，以科技赋能安全为导向，不断优化管控措施，构建“全员参与、全程受控、全面覆盖”的安全防护网络，筑牢安全生产防线，为企业绿色可持续发展奠定坚实基础。

参考文献：

[1] 段付岗，谭宏亮．甲醇生产装置安全风险分析及管控措施[J]．煤炭加工与综合利用，2018(04):60-64+8.

[2] 王震，葛祥青．RTO装置安全风险分析及管控措施[J]．中国安全生产，2021,16(10):54-55.

[3] 吴玉祥，袁拥军，郭佳燕．RTO焚烧炉系统安全风险分析及对策[J]．化学工程与装备，2023(03):241-243.

广告