

绪 论

1.1 研究背景及意义

城市固废(municipal solid waste, MSW)的产生量随社会经济的发展、城市化进程的加快及居民生活水平的提高而迅速增加^[1],目前其全球的年增长率已达 8%^[2-3],预计 2050 年将达到 95 亿 t^[4],这将给城市的可持续发展和周边环境的净化带来巨大压力。为深入打好污染防治攻坚战和“蓝天、碧水、净土”保卫战,MSW 污染防治是必不可少的重要工作。生态环境部等多部门于 2021 年 12 月联合印发的《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》指出,要推动 100 个左右的地级及以上城市开展“无废城市”建设,到 2025 年,基本实现 MSW 管理信息“一张网”。MSW 的处理方法包括卫生填埋、堆肥和焚烧,其中,MSW 焚烧(MSW incineration, MSWI)具有减量化、资源化和无害化的优点^[5],是目前世界上最为成熟的废物变能源(waste-to-energy, WtE)的技术^[6-7]。国家发展改革委、住房城乡建设部发布的《城镇生活垃圾分类和处理设施补短板强弱项实施方案》中指出,“MSW 产生量在 300 吨以上的地区,要加快发展焚烧,到 2023 年基本实现原垃圾零填埋”。因此,加快建设 MSWI 处理设施是加快“无废城市”建设,实现“三化”发展的重要基础保障。“垃圾分类”“双碳”目标^[8]和“无废城市”的推进是推动城市可持续发展和绿色发展的重要举措,这使得 MSWI 行业的前景光明。在“十三五”期间,我国已新建 MSWI 电厂 254 座,MSWI 处理率约 45%,初步形成以焚烧为主的发展格局。在“十四五”期间,生态环境部突出“精准治污、科学治污、依法治污”,如统筹规划 MSWI 处理设施,鼓励利用既有 MSW 处理设施用地建设 MSWI 项目;持续推进焚烧处理能力建设,开展既有焚烧设施提标改造,以高质量发展要求优化焚烧处理技术,完善污染物处理配套设施,提高设施运行的环保水平。这一系列措施极大促进了 MSWI 行业的发展,截至 2024 年 1 月,全国 MSWI 电厂已增加至 925 座,日处置能力达 103.5 万 t。

MSWI 会释放 SO_x 、 NO_x 、重金属等常规污染物和二噁英(dioxin, DXN)等痕量有机污染物。作为具有剧毒的持久性痕量有机污染物,DXN 可分为多氯二苯并对二噁英和多氯二苯并呋喃(polychlorinated dibenzo-p-dioxins/polychlorinated dibenzofurans, PCDD/PCDF),与其短期接触会导致皮肤损伤和肝功能改变,长期接触会损害免疫系统,导致神经系统、内分泌系统

和生殖功能紊乱,影响人类生命健康乃至繁衍生存^[9-10]。为深入开展 DXN 污染防控,我国持续推进《中华人民共和国履行〈关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约〉国家实施计划》的有效实施,加强包括 DXN 在内的持久性有机污染物环境污染防控的全民行动。因 DXN 潜在的健康风险,学者已经针对其生成机理、去除和排放控制展开了广泛研究^[11-15]。研究者认为,DXN 的生成机理分为两种:一种为均相反应(高温气相反应),温度范围为 500~800℃;另一种为非均相反应(低温异相催化反应,分为前驱物催化和从头合成反应),温度范围为 200~400℃。中国颁布的《生活垃圾焚烧污染控制标准》(GB 18485—2014)对 MSWI 电厂的选址、技术、废物、运行和排放控制等做出了详细要求,并指出“生活垃圾焚烧厂运行企业对烟气中二噁英类的检测应每年至少开展 1 次”。显然,缺乏能够广泛采用的在线采样和监测技术是实现我国焚烧厂 DXN 优化减排的主要障碍之一。

新一代信息技术和人工智能(artificial intelligence, AI)随“工业 5.0”的到来而不断发展。我国处于工业化深入发展阶段,工业和信息化部公布的《“十四五”工业绿色发展规划》提出“污染物排放强度显著下降”的发展目标。针对 MSWI 过程而言,这一目标的实现有赖于高新技术的应用,进而使得建模、控制和优化朝着智能化方向发展,从而减少对专家经验的依赖,进而实现该行业的具身智能化。为洞悉燃烧过程,对焚烧炉进行模拟研究的早期尝试可追溯到 20 世纪 70 年代。Essenhigh 等最先对焚烧炉内区域进行划分,之后焚烧建模工作有了明显进展。进一步,Peters 给出了移动床的控制方程,Goh 等对固定收缩床进行数值仿真^[16]。随着模拟设备计算性能的提升,文献[17]分析了床层上 MSW 焚烧时所经历的物理化学变化,并建立了炉排上固相 MSW 和气相组分的质量、动量和传热控制方程,开发了二维床层模拟软件。若要进一步分析焚烧状况,需通过数值仿真技术模拟炉膛温度分布、气体成分甚至污染物排放浓度等详细信息。而工业焚烧炉则面临难以采用工业仪表精准长期地测量炉内气体的流量、温度和种类等难题。因此,需要借助先进仿真软件实现对 MSWI 过程的全面模拟。

计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)已被证明能够有效模拟 MSWI 过程二次风和焚烧炉结构对运行工况的影响^[18]。理论上,CFD 模拟所提供的温度场、速度场和浓度场信息可用于对 MSWI 过程的运行工况进行临界评估,进而为获得更佳的燃烧性能提供支撑。文献[19]使用 Fluent 对 MSWI 过程的二次风进行模拟,但未考虑炉排上固相 MSW 的燃烧过程。文献[20]将燃烧区域分为炉排上固相 MSW 区域和炉膛内气相组分区域,首次通过耦合两区域模型联合模拟焚烧炉内的燃烧过程;虽然炉排固相燃烧模型为非稳态一维填充床,但该方法允许进行燃料特性、操作参数和其他设计特性等参数的研究^[21]。文献[22]中采用离散元模型(discrete element method, DEM)进行模拟。但以上这些研究仅针对焚烧炉燃烧进行。Aspen Plus 是一款化工流程模拟软件^[23]。基于 Aspen Plus,文献[24]模拟 MSW 和污泥的焚烧处理流程并计算能量平衡;文献[25]建立了不同工艺下的 MSWI 发电厂全流程仿真模型,但仅是从宏观层次对 MSWI 过程进行模拟。为同时从微观和宏观视角进行各类工业过程的模拟研究,已有机构进行了大量研究。文献[23]采用 Aspen Plus 分析危险废物焚烧过程的给料量、过量空气系数等运行参数对焚烧炉温度及烟气组分浓度的影响,同时,采用 Fluent 分析了焚烧炉内的流体速度、温度和组分浓度等的分布情况;显然,两个软件的实验结果更准确地模拟了危险废物在焚烧炉内的实际燃烧状况,但两者未进行有效耦合。在石化行业,文献[26]采用 Fluent 和 Aspen Plus 共同模拟乙烯裂解炉的对流段并进行区域的耦合。

目前,工业元宇宙^[27]已逐步提上日程,其基本思想是利用 AI、区块链和数字孪生等技术实现虚拟世界和现实世界的融合。MSWI 元宇宙^[1]的概念也被研究者提出,其中,虚拟 MSWI 电厂需要通过数值仿真建模实现与现实系统的预测以及虚实互动。除了 NO_x 、 SO_2 、 HCl 、 CO 等常规污染物外,考虑到 DXN 的剧毒性和 DXN 在线采样与监测技术的限制而无法获取足量的 DXN 测量数据的问题,有必要面向典型 MSWI 电厂构建全流程 DXN 数值仿真模型,获取 DXN 机理数据并分析 DXN 的分解、再生成、吸附和排放等特性。因此,构建常规污染物和 DXN 的全流程数值仿真模型是实现 MSWI 过程具身智能化和降低 DXN 排放的前提,是实现焚烧元宇宙的基础之一。

1.2 城市固废焚烧(MSWI)过程的人工智能(AI)算法研究与验证应用现状

1.2.1 MSWI 工艺、机理、难点简述

1.2.1.1 MSWI 工艺简述

我国引进的某典型炉排炉 MSWI 的工艺流程如图 1.1 所示。

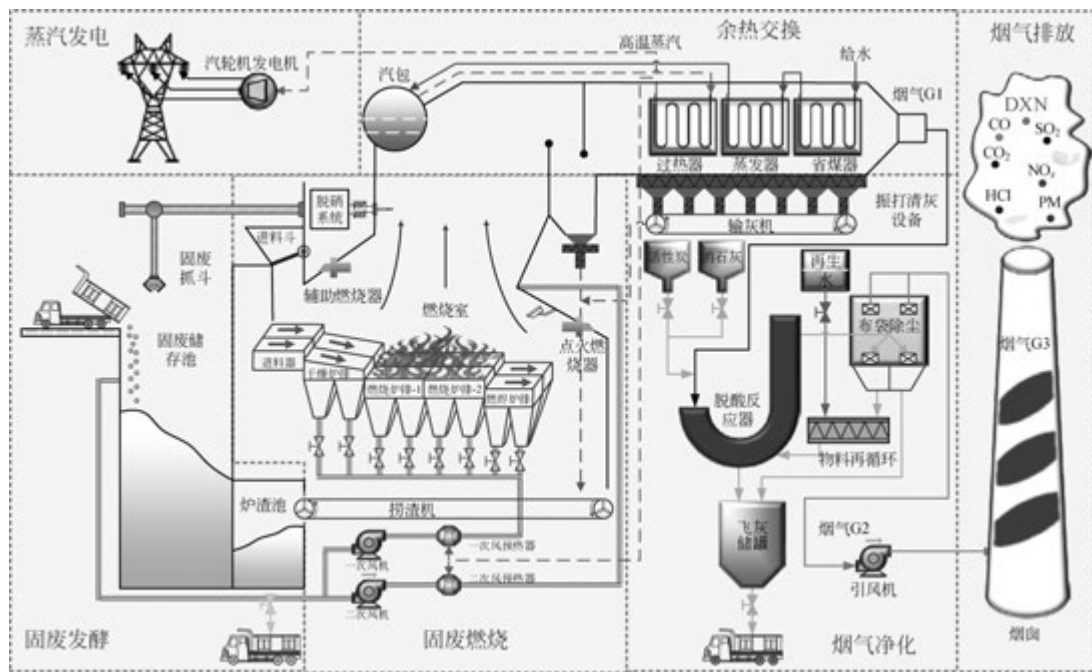


图 1.1 典型炉排炉 MSWI 过程的工艺流程

由图 1.1 可知,MSWI 过程先后经过固废发酵、固废燃烧、余热交换、蒸汽发电、烟气净化和烟气排放 6 个主要阶段,其中:

(1) 固废发酵阶段:原生 MSW 包含大量水分不利于燃烧,需在固废储存池中经 3~7 天的生物发酵,完成初步脱水后达到入炉焚烧条件再由机械抓斗投入料斗,由进料器推送至焚烧炉内,进入固废燃烧阶段。该阶段的主要辅助变量为 MSW 热值,是影响 MSWI 过程

优化决策的关键因素之一。

(2) 固废燃烧阶段：本质是在固气液等多相和热流等多场的耦合交互作用下将 MSW 转变成高温烟气和固态残渣，可分为干燥、燃烧和燃烬 3 个过程。

① 干燥过程：从 MSW 进入焚烧炉到在干燥炉排上完成全水分(表面和内在水分)析出至着火的阶段。在该过程中，表面水分随炉内温度升高而逐渐蒸发，当温度上升至 100°C 时被完全蒸发；内在水分随炉温的进一步升高而逐步析出并吸收大量热能。因此，MSW 的全水分含量与入炉热值相关，进而影响燃烧状态乃至全流程的运行工况。

② 燃烧过程：从 MSW 开始着火经强烈发光发热直至氧化反应结束的阶段，包括强氧化、热解和原子基团碰撞反应。强氧化反应表示可燃组分与氧气发生完全燃烧反应；热解反应表示在无氧或接近无氧的条件下，热辐射能量破坏含碳高分子化合物元素间的化学键或对其进行重组，析出挥发分后再进行氧化反应；原子基团碰撞反应表示原子基团电子能量的跃迁、分子的旋转和振动等行为产生红外热辐射、可见光和紫外线，进而形成火焰形态。因此，燃烧过程涉及的反应复杂多变、相互间存在强耦合性且具有多反应同步运行的特性。显然，燃烧风量和炉排速度对稳定燃烧过程至关重要。

③ 燃烬过程：从燃烧结束至燃烧完全停止的过程。经燃烧过程后，MSW 中的可燃成分以焦炭为主；在高温和一次风的作用下，焦炭与 O_2 发生氧化反应，与 CO_2 、水蒸气等发生气化反应；随后，惰性物质(气态的 CO 、 H_2O 和灰渣)逐渐增加，直至炉排上的 MSW 全部成为灰渣，进而减弱燃烧直至完全停止^[28]。因此，该过程具有燃烧程度降低、惰性物质增加、氧化剂含量相对较大、反应区温度较低等特点，延长该过程可有效提高 MSW 的热灼减率，提升减量化水平。

为保证烟气中有害物质的分解和燃烧，常采用“3T+E”的原则^[29]，即炉膛温度大于 850°C 、烟气停留时间大于 2s、烟气湍流强度及过量空气系数保持适当取值。该阶段的主要操纵变量为 MSW 进料量、炉排速度和炉膛进风量，主要被控变量为炉膛温度、烟气含氧量、蒸汽流量和燃烧线。

(3) 余热交换阶段：首先，高温烟气经水冷壁进行初步降温；其次，利用过热器、蒸发器和省煤器等设备将热能通过辐射和对流的方式传递至锅炉；再次，锅炉中的水转变为高压过热蒸汽进入蒸汽发电阶段；最后，锅炉出口烟气温度降至 200°C 。该阶段需要严格控制降温速率，主要的操纵变量为锅炉给水量，主要被控变量为锅炉蒸汽流量。

(4) 烟气净化阶段：首先，脱硝系统在 $850\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 的温度下脱除 NO_x ；其次，使用半干法脱酸工艺通过注入石灰和水对酸性气体(HCl 、 HF 、 SO_2 、重金属)进行中和；再次，活性炭对烟气中的 DXN 及重金属等物质进行吸附；最后，通过布袋除尘器脱除烟气中的颗粒物、中和反应物及活性炭吸附物，完成烟气净化。该阶段的主要操纵变量为尿素、活性炭、石灰等环保物料消耗量，主要被控变量为污染物排放浓度。

(5) 烟气排放阶段：符合国家排放标准(GB 18485—2014)的烟气通过引风机牵引经烟囱排入大气。颗粒物、 NO_x 、 SO_2 、 HCl 和 CO 等污染物的排放浓度是目前所关注的环保指标。

1.2.1.2 固废燃烧机理简述

固废燃烧机理的本质是在多相(固、气、液)多场(热、流、力)的耦合交互作用下将 MSW

转变成高温烟气和固态残渣,其示意如图 1.2 所示。

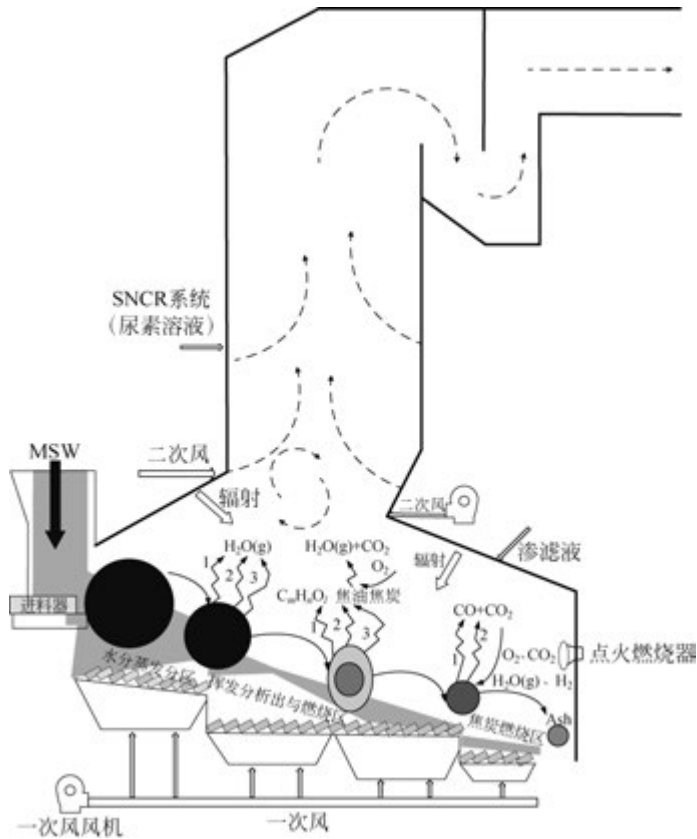


图 1.2 MSW 燃烧机理示意图

如图 1.2 可知,固废燃烧可分为干燥、燃烧和燃烬 3 个过程,其中:

(1) 从 MSW 进入焚烧炉到在干燥炉排上完成全水分(表面和内在水分)析出至着火的阶段为干燥过程。水分蒸发机理通常采用阿伦尼乌斯模型^[29]、恒温模型^[30]和平衡模型^[31]表征,其内涵是:表面水分随炉内温度升高而逐渐蒸发,当温度上升至 100℃ 时被完全蒸发;内在水分以蒸汽形态析出并吸收大量热能,其随炉温的进一步升高而逐步析出,在完成后将进入燃烧过程。由此可知,发酵后 MSW 的全水分含量会影响入炉热值,进而影响燃烧状态乃至全流程的运行工况。

(2) 从 MSW 开始着火经强烈发光发热直至氧化反应结束的阶段为燃烧过程,其在强氧化、热解和原子基团碰撞等 3 个基础反应的融合交叉中进行,其中:①强氧化反应表示可燃组分与氧气发生完全燃烧反应,产生 CO_2 、 HCl 和 H_2O ;②热解反应表示在无氧或接近无氧的条件下,热辐射能量破坏含碳高分子化合物元素间的化学键或对其进行重组,析出挥发分(包含气态的 CO 、 CH_4 、 H_2 或分子量较小的 C_mH_n 等可燃成分)后再进行氧化反应的过程;③原子基团碰撞反应表示原子基团电子能量的跃迁、分子的旋转和振动等行为产生红外热辐射、可见光和紫外线,进而形成火焰形态,其中原子基团气流包括单原子形态的 H 、 C 、 Cl 等元素,双原子的 CH 、 CN 、 OH 、 C_2 等化合物,以及多原子的 HCO 、 NH_2 、 CH_3 等

成分,其相互之间的碰撞又可促进 MSW 的热分解过程。可见,燃烧过程的机理复杂多变、相互间存在强耦合性且具有多反应同步运行的特性。在此过程中,燃烧风量和炉排速度对稳定燃烧过程至关重要。

(3) 从燃烧结束至燃烧完全停止的过程称为燃烬过程。经燃烧过程后,MSW 中的可燃成分以焦炭为主;在高温和一次风的作用下,焦炭与 O_2 发生焦炭氧化反应,与 CO_2 、水蒸气等发生焦炭气化反应;随后,惰性物质(气态的 CO 、 H_2O 和灰渣)逐渐增加,直至炉排上的 MSW 全部成为灰渣,进而减弱燃烧直至完全停止^[17]。由此可知,该过程具有燃烧程度降低、惰性物质增加、氧化剂含量相对较大、反应区温度较低等特点。因此,延长燃烧过程可有效提高 MSW 的热灼减率,提升减量化水平。

1.2.1.3 国内 MSWI 过程运行控制特性简述

基于世界银行最新的统计数据^[32]和谷等^[33],以及 Yamada 等^[34]提供的数据,各地域 MSW 组分占比如图 1.3 所示,其中我国 MSW 组分以北京市为例。

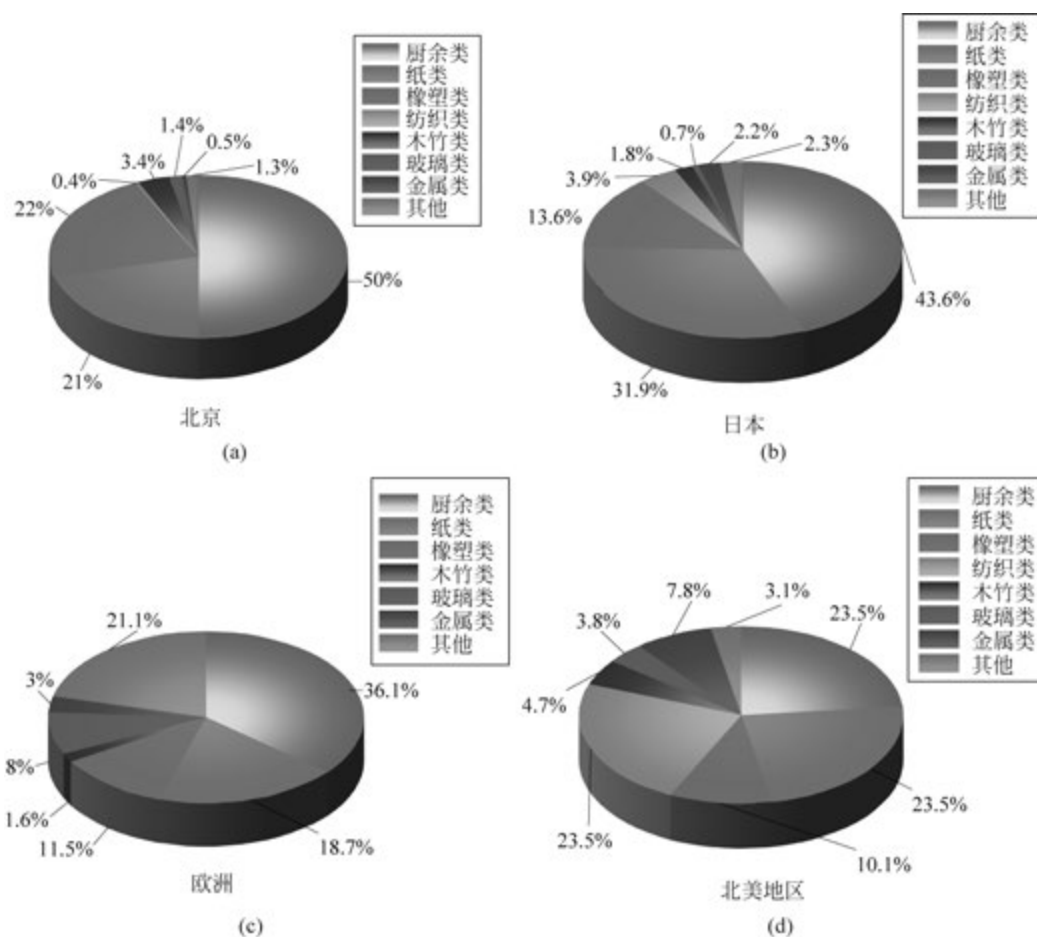


图 1.3 国内外不同国家的 MSW 组分占比

由图 1.3 可知,在 MSW 成分的长时段平均统计数据中,以北京为例的国内 MSW 中的厨余类组分的占比远高于日本、欧洲和北美,原因在于:上述发达国家和地区在 20 世纪中

期开始施行 MSW 分类,公众环保意识强;我国 MSW 的分类政策和制度目前还在完善和推广中,使得 MSW 组分存在较大的不确定性。因此,国内 MSW 的热值量级和稳定性远低于上述区域,原因在于:国外 MSW 源于分类后的可燃组分,其热值能够控制在较小的范围内波动;国内相应的管理制度还不够完善,所收集的 MSW 的热值低且波动性较大。

除在 MSW 组分与热值上的差异性外,国内在领域专家技能水平和设备运维技术方面也与国外存在差距。众所周知,日本的炉排炉技术引自欧洲,在进行本土化改造后才达到当前的领先水平。因此,我国 MSWI 过程的运行也是无法直接照搬国外技术的,这使得目前国内各厂主要采用的是依赖于领域专家(知识型工作者)的手动控制模式,其示意如图 1.4 所示。

图 1.4 中图例和符号的物理含义如表 1.1 和表 1.2 所示。

表 1.1 图 1.4 中图例的含义

| 序号 | 符号 | 物理含义 |
|----|----|----------|
| 1 | Ⓣ | 流量检测仪表 |
| 2 | Ⓢ | 蒸汽检测仪表 |
| 3 | Ⓞ | 氧气含量检测仪表 |
| 4 | ⓖ | 烟气检测仪表 |
| 5 | Ⓣ | 温度检测仪表 |
| 6 | Ⓧ | 剂量控制器 |
| 7 | ⓗ | 变频器控制器 |
| 8 | Ⓢ | 炉排速度控制器 |
| 9 | ⓕ | 挡板开度控制器 |

表 1.2 图 1.4 中符号的物理含义

| 符号 | 物理含义 | 符号 | 物理含义 |
|---|-----------|--|-----------------------------|
| r_{\max} | 被控变量设定值上限 | $u_{L,R}^{\text{Burn1-1}}$ | 燃烧炉排 1-1 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 |
| r_{\min} | 被控变量设定值下限 | $u_{L,R}^{\text{Burn1-2}}$ | 燃烧炉排 1-2 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 |
| r^* | 被控变量设定值 | $u_{L,R}^{\text{Burn2-1}}$ | 燃烧炉排 2-1 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 |
| ω_{Speed} | 炉排速度 | $u_{L,R}^{\text{Burn2-2}}$ | 燃烧炉排 2-2 段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 |
| ω_{Baffle} | 一次风挡板开度 | $u_{L,R}^{\text{BurnOut}}$ | 燃烬炉排左、右风管挡板开度控制器输出值 |
| ω_{PriAir} | 一次风流量 | u_{PriAir} | 一次风流量控制器输出值 |
| ω_{SecAir} | 二次风流量 | u_{SecAir} | 二次风流量控制器输出值 |
| $\omega_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}$ | 氨水喷入量 | $u_{\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}}$ | 氨水控制器输出值 |

续表

| 符号 | 物理含义 | 符号 | 物理含义 |
|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| w_C | 活性炭值 | u_C | 活性炭控制器输出值 |
| $w_{Ca(OH)_2}$ | 消石灰值 | $u_{Ca(OH)_2}$ | 消石灰控制器输出值 |
| $w_{LI,LO,RI,RO}^{Feeder}$ | 进料器左内、左外、右内、右外速度 | y_{Grate}^{Tem} | 炉排温度检测值 |
| $w_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}$ | 干燥炉排左内、左外、右内、右外速度 | $y_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}$ | 干燥炉排左内、左外、右内、右外温度检测值 |
| $w_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1}$ | 燃烧1段炉排左内、左外、右内、右外速度 | $y_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1}$ | 燃烧1段炉排左内、左外、右内、右外温度检测值 |
| $w_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}$ | 燃烧2段炉排左内、左外、右内、右外速度 | $y_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}$ | 燃烧2段炉排左内、左外、右内、右外温度检测值 |
| $w_{LI,RI}^{BurnOut}$ | 燃烬炉排左内、右内速度 | $y_{LI,RI}^{BurnOut}$ | 燃烬炉排左内、右内温度检测值 |
| $w_{L,R}^{Dry1}$ | 干燥炉排1段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Dry1}$ | 干燥炉排1段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{Dry2}$ | 干燥炉排2段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Dry2}$ | 干燥炉排2段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{Burn1-1}$ | 燃烧炉排1-1段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Burn1-1}$ | 燃烧炉排1-1段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{Burn1-2}$ | 燃烧炉排1-2段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Burn1-2}$ | 燃烧炉排1-2段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{Burn2-1}$ | 燃烧炉排2-1段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Burn2-1}$ | 燃烧炉排2-1段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{Burn2-2}$ | 燃烧炉排2-2段左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{Burn2-2}$ | 燃烧炉排2-2段左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $w_{L,R}^{BurnOut}$ | 燃烬炉排左、右进风管道挡板开度 | $y_{L,R}^{BurnOut}$ | 燃烬炉排左、右进风管道挡板开度检测值 |
| $u_{LI,LO,RI,RO}^{Feeder}$ | 进料器左内、左外、右内、右外速度控制器输出值 | y_{PriAir} | 一次风流量检测值 |
| $u_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}$ | 干燥炉排左内、左外、右内、右外速度控制器输出值 | y_{SecAir} | 二次风流量检测值 |
| $u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1}$ | 燃烧1段炉排左内、左外、右内、右外速度控制器输出值 | y_{FT} | 炉膛温度检测值 |
| $u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}$ | 燃烧2段炉排左内、左外、右内、右外速度控制器输出值 | y_{BSF} | 锅炉蒸汽流量检测值 |
| $u_{LI,RI}^{BurnOut}$ | 燃烬炉排左内、右内速度控制器输出值 | y_{G1OX} | G1烟气含氧量检测值 |
| $u_{L,R}^{Dry1}$ | 干燥炉排1段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 | y_{G3OX} | G3烟气含氧量检测值 |
| $u_{L,R}^{Dry2}$ | 干燥炉排2段左、右进风管道挡板开度控制器输出值 | y_{G3} | G3烟气污染物浓度 |

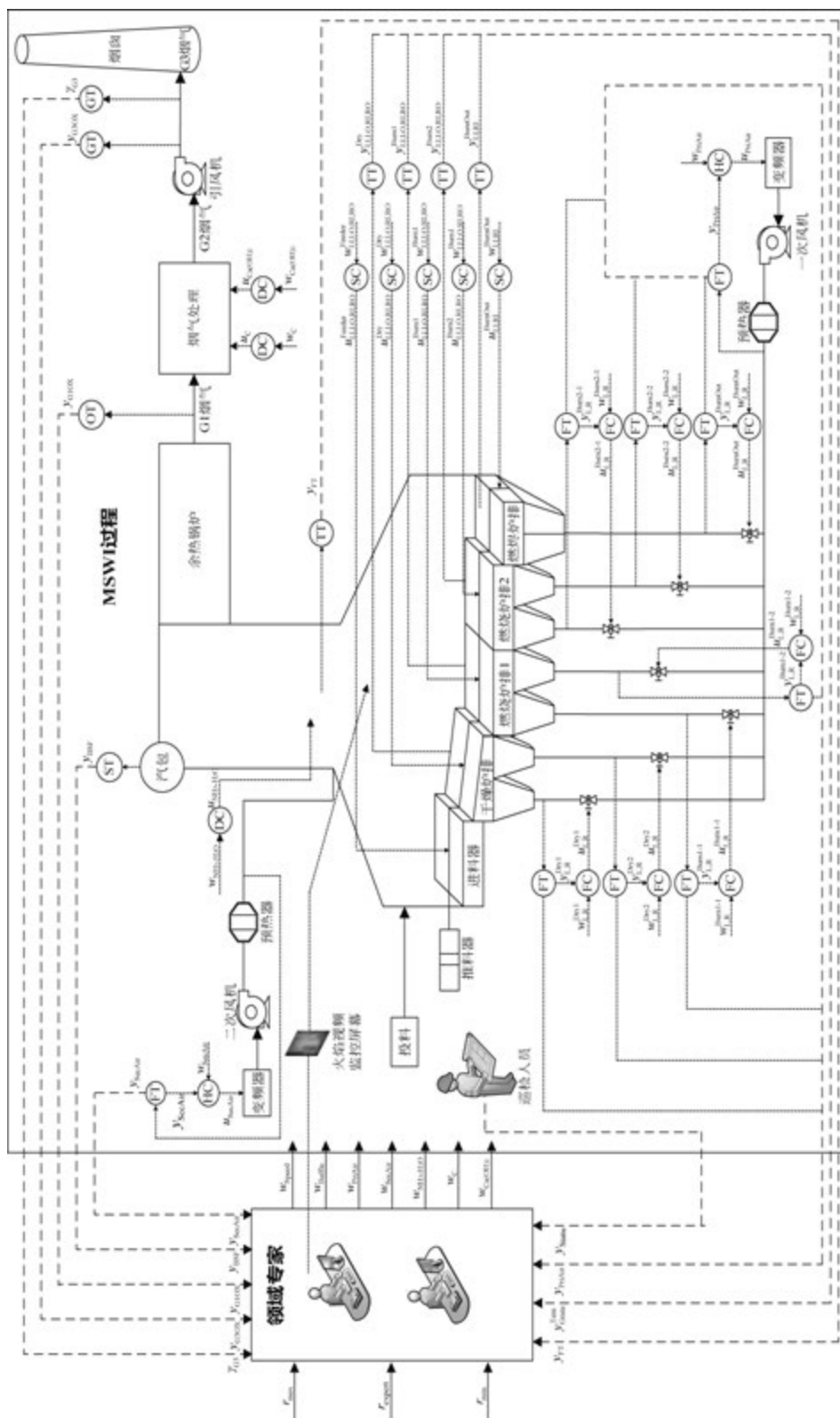


图 1.4 MSWI 过程的领域专家手动控制模式示意图

在图 1.4 中,排放气体 γ_{G3} 、炉排温度 y_{Grate}^{Tem} 、炉排速度 w_{Speed} 和挡板开度 w_{Baffle} 可分别表示为

$$\gamma_{G3} = \{\gamma_{NO_x}, \gamma_{CO}, \gamma_{CO_2}, \gamma_{Acid}\} \quad (1.1)$$

$$y_{Grate}^{Tem} = \left\{ \begin{array}{l} y_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}, y_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1} \\ y_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}, y_{LI,RI}^{BurnOut} \end{array} \right\} \quad (1.2)$$

$$w_{Speed} = \left\{ \begin{array}{l} w_{LI,LO,RI,RO}^{Feeder}, w_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}, w_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1} \\ w_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}, w_{LI,RI}^{BurnOut} \end{array} \right\} \quad (1.3)$$

$$w_{Baffle} = \left\{ \begin{array}{l} w_{L,R}^{Dry1}, w_{L,R}^{Dry2}, w_{L,R}^{Burn1-1}, w_{L,R}^{Burn1-2} \\ w_{L,R}^{Burn2-1}, w_{L,R}^{Burn2-2}, w_{L,R}^{BurnOut} \end{array} \right\} \quad (1.4)$$

其中, γ_{NO_x} 、 γ_{CO} 、 γ_{CO_2} 和 γ_{Acid} 分别表示 NO_x 、 CO 、 CO_2 和酸性气体的排放浓度。

MSWI 过程的操纵变量集分为炉内燃烧过程 (furnace combustion process, FCP) 和烟气处理过程 (flue gas clean process, FGCP) 两部分, 可表示为

$$u_{MSWI} = \{u_{FCP}, u_{FGCP}\} \quad (1.5)$$

$$u_{FCP} = \left\{ \begin{array}{l} u_{LI,LO,RI,RO}^{Feeder}, u_{LI,LO,RI,RO}^{Dry}, u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn1} \\ u_{LI,LO,RI,RO}^{Burn2}, u_{LI,RI}^{BurnOut}, u_{L,R}^{Dry1}, u_{L,R}^{Dry2} \\ u_{L,R}^{Burn1-1}, u_{L,R}^{Burn1-2}, u_{L,R}^{Burn2-1}, u_{L,R}^{Burn2-2} \\ u_{L,R}^{BurnOut}, u_{PriAir}, u_{SecAir}, u_{NH_3 \cdot H_2O} \end{array} \right\} \quad (1.6)$$

$$u_{FGCP} = \{u_C, u_{Ca(OH)_2}\} \quad (1.7)$$

进一步, 领域专家的决策过程 $f_{expert}(\cdot)$ 可描述为

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{Speed}, w_{Baffle}, w_{PriAir}, w_{SecAir} \\ w_C, w_{Ca(OH)_2}, w_{NH_3 \cdot H_2O}, u_{FCP}, u_{FGCP} \end{array} \right\} = \quad (1.8)$$

$$f_{expert} \left(\begin{array}{l} r_{max}, r^*, r_{min}, y_{FT}, y_{G1OX}, y_{BSF} \\ y_{PriAir}, y_{SecAir}, \gamma_{G3}, \gamma_{G3OX}, y_{Grate}^{Tem}, y_{Statu}, \boldsymbol{\tau} \end{array} \right)$$

其中, r_{max} 和 r_{min} 分别表示被控变量设定值的上限和下限; r^* 表示由领域专家基于多模态信息和专家经验进行决策的被控变量设定值; y_{Statu} 表示巡检人员实时反馈的状态信息; $\boldsymbol{\tau}$ 表示火焰视频信息。

本质上, 这是根据 ACC 系统的控制逻辑而归纳总结的经验, 其可简述为: 机械抓斗操作工程师凭经验完成 MSW 储池分区整备、操作抓斗均匀混合和拆解大件固废、控制发酵周期和入炉区域 MSW 热值稳定, 根据料位视频监控画面凭经验控制投料频率; 运行工程师基于多模态信息识别和预判工况变化, 凭经验对固废燃烧、余热交换和烟气净化等阶段的操纵变量进行设定。主要的操作经验可归纳为: 勤看火焰, 控制料层和火床; 勤调整进料量、送料速度和燃烧风量; 根据料层厚度、烟气含氧量及 MSW 特性确保稳定燃烧^[35]。显然, 手动操作难免存在差异性和任意性, 是影响 MSWI 过程稳定运行的核心。因此, 在该模式下的数据中蕴含的优秀规则知识和领域专家的人脑认知机制是进一步研究 MSWI 过程智