

新加坡综合废物管理设施外置式沼气过热炉 产品设计开发实践

葛健 吴杨 崔云晗
中国电力工程有限公司 北京 100048

摘要: 新加坡Tuas Nexus IWMF项目通过外置式沼气过热炉(BGSH)设计,实现垃圾焚烧与污水处理的协同增效。该设备采用独立L型结构,以沼气为燃料(甲烷含量55%-75%),将蒸汽温度从440°C提升至480°C,使电厂热效率达50%(传统电厂约38%),年碳减排20万吨。设计克服了H₂S腐蚀(550-3000ppm)、低温启动(350°C)等挑战,配备低NO_x燃烧器(排放<100mg/Nm³)和两段式水预热器,确保年运行8000小时。项目建成后日处理垃圾2900吨,年发电198万MWh(90%入电网),为全球首个水务-固废一体化设施,推动东南亚废物资源化技术输出。

关键词: 废物管理; 沼气过热; 热效率; 排放

1 项目的背景与目的

新加坡政府致力于推动环保和可持续发展,通过建设Tuas Nexus项目实现垃圾焚烧、污水处理和废物回收的协同合作。新加坡政府的想法是让位于新加坡西边的大士再生水厂(Tuas Water Reclamation Plant,缩写:TWRP)和垃圾综合处理厂(Integrated Waste Management Facility,缩写:IWMF)协同合作,实现能量自给。

该项目不仅能够有效处理大量垃圾,还能通过厌氧消化产生沼气作为燃料,减少对传统能源的依赖。项目由新加坡公用事业局管理的大士供水回收厂(Tuas Water Reclamation Plant),以及新加坡环境局管理的综合废物管理设施(Integrated Waste Management Facility)组成,是全球第一个从构思阶段就致力于通过协同效应节约成本和优化土地利用的集垃圾焚烧、污水处理和废物回收于一体的综合废物管理设施。

项目旨在通过先进的废物处理技术,提高资源利用率,减少环境污染,实现废物变废为宝。Tuas Nexus项目整体投资(含污水处理厂)95亿新元,IWMF分为两期建设,一期投资15亿新元,每期处理垃圾量达到2900吨/天,建成后将成为新加坡乃至东南亚地区最大的垃圾发电项目。

Tuas Nexus不仅能同时处理污水与垃圾,还能让两者产生“一加一大于二”的协同效果。污水处理产生的副产品,可用作废物处理的资源,反之亦然。两者相互变废为宝,产生的能源完全实现自给自足。

作者简介: 葛健(1981.10-)男,汉族,硕士研究生,高级工程师,研究方向为热能与动力工程、新能源研究。

综合废物管理设施可将食物垃圾经压榨处理成浆状,与经大士供水回收厂脱水后的污泥混合起来,通过厌氧微生物消化后产生可发电的沼气,效能比单独提炼高出四成。

产生的沼气将在综合废物管理设施内燃烧,提高热能效率和发电量。除了满足Tuas Nexus的电力需求,多余电力还会输送回新加坡全国电网,预计能为多达30万个四房式组屋单位供电。

IWMF由吉宝西格斯(Keppel Seghers, KS)、中国港湾(China Harbour, CHEC)和新加坡科技工程有限公司海事部门(ST Engineering Marine, ST)组成的联合体,为国家环境局(National Environmental Agency, NEA)设计并建造。沼气过热器的设计与供货由新加坡科技工程有限公司海事部门负责。沼气过热炉位于废物焚烧炉外部,通过燃烧沼气将每个废物焚烧炉产生的主蒸汽温度从约440°C提升至480°C,显著提高废物发电设备的效率。每期IWMF项目中将包含4台废物焚烧炉及两台蒸汽轮机发电机。

作为联合体负责人,吉宝西格斯还将负责整体项目管理,废物焚烧炉设施、湿法烟气清洁系统。中国港湾将承担该项目的民用,结构和环境美化范围,而ST工程的海事部门将负责MRF,电力岛和电厂余量的建设。

本项目的实施将向世界充分展示Tuas Nexus项目的先进性,使新加坡成为世界综合废物利用管理的先进典型国家。

项目建成后将成为全球首个从规划阶段即整合水务与固废处理的设施,被新加坡永续部誉为“可持续城市化的范式转型”。

项目联合体计划将项目成功经验进行技术输出，项目建成后将IWMF的模式及成功经验推广至东南亚（越南、印尼已启动类似项目前期研究）。

2 项目的核心技术亮点及挑战

2.1 供水厂与废物综合利用协同处理系统

废物综合管理设施与供水回收厂的物理整合，以实现共享能源与资源，此方案为世界首创。

污水处理厂的脱水污泥与废物综合管理设施的厨余垃圾共同进行厌氧发酵实现沼气产量提升40%。

废物综合管理设施的发电量满足水处理厂及设施自身用电需求后实现电量入网外输。

废物处理能力

项目一期的焚烧垃圾量2,900吨/天，厨余及污泥协同消化量400吨/天，物料回收量（MRF）250吨/天。二期的垃圾处理能力将提高至5,800吨/天，厨余及污泥协同消化量提高至800吨/天，物料回收量（MRF）将提高至500吨/天。垃圾分拣可实现金属、塑料、纸张的分拣。垃圾焚烧炉采用风冷炉排及湿法烟气净化的方案。

环保与经济效益

项目采用的协同设计方案可减少占地2.6公顷，实现年碳减排20万吨CO₂。年发电量：198万MWh（自用10%，余90%入电网）。

相对于传统电厂约38%的热效率，项目通过协同设计，利用外置式沼气过热炉将蒸汽温度提高至480℃，烟气余热梯级利用将排烟温度降低至210℃等技术措施，将项目热效率提升至50%。

项目挑战与应对

项目中的高硫沼气（H₂S ≤ 3000ppm）带来了管道、阀门等的腐蚀风险，为化解此风险，项目中的沼气管路全部采用SS316阀组，并配置了在线pH监控系统。

3 外置式沼气过热炉总体设计要求

外置式沼气过热炉的设计开发，旨在提高垃圾焚烧锅炉产生的蒸汽温度，从而提升发电效率。外置式沼气过热炉采用沼气作为燃料提供热量，将垃圾焚烧炉产生过热蒸汽温度提高至480摄氏度，不但实现了垃圾的综合资源化利用，避免了沼气进入焚烧炉燃烧而导致的结焦和积灰等问题，还提高了电厂效率（现有的垃圾焚烧发电厂受限于高温腐蚀等问题，普遍采用中温中压的主汽参数），实现能源的高效利用。外置式沼气过热炉作为IWMF的关键设备之一，其设计开发实践对于项目的成功实施具有重要意义。

采用独立L型结构能够对比传统内置式过热器有效的避免结焦积灰。此外，外部过热器的设计应有助于在锅

炉年度清洗后重启期间更快地达到所需的最低过热温度（以尽量缩短蒸汽供入汽轮机的时间，结合使用沼气燃烧器，以更快地达到所需的过热器温度。

外部沼气过热器的设计能在不预处理H₂S的情况下处理沼气。烟气注入袋式除尘器和LT-ECO之间的主烟气管道。沼气过热器的出口烟气温度与主烟气管道内的温度接近且出口温度足够高，以防止SO₂含量的酸冷凝。外部沼气过热器的设计可以在不预处理H₂S的情况下处理沼气。

沼气过热器的设计应确保即使沼气过热器关闭（无沼气供应），WTE锅炉和涡轮机也能继续长时间运行。这包括考虑WTE锅炉和新蒸汽集管之间的温度损失，以及避免在BIO-ECO中沸腾。此外，装置的整体控制系统应保持稳定，不会因沼气过热器突然停运而导致汽轮机跳闸。

该系统的设计应尽量缩短在锅炉年度手动清洗后达到汽轮机所需最低蒸汽温度所需的时间。

BGSH设计要求

沼气过热炉采用“L”型结构，室内布置。（标准工况下蒸汽入口压力5.8MPa，蒸汽温度从440℃加热到480℃）。在各种正常运行条件下，沼气过热炉蒸汽出口温度偏差在480±2℃以内。沼气过热炉满足入口温度为350至500℃波动范围要求，满足入口压力5.5至6.4MPa波动范围的要求。蒸汽进出口压降低于0.15MPa。水侧进出口压降低于0.13MPa。

系统的给水入口温度为130℃（满足105-150℃之间波动范围的要求），为了避免低温腐蚀，采用水-水热交换器将进入沼气过热器水预热器的水从130℃加热到170℃。入口压力通常在9Mpa左右，设计入口压力需要满足9Mpa到14.5Mpa之间波动，在启动情况下，垃圾焚烧锅炉的蒸汽温度将低于正常的440℃，沼气过热炉能在350℃的蒸汽温度下运行。

BGSH需能够在沼气供应波动的情况下稳定运行，并能在蒸汽温度低至350℃时启动。

为提高沼气过热炉的效率，沼气过热炉在蒸汽过热器后布置水预热器。沼气过热炉的出口烟气温度为210℃。沼气过热炉出口不设置烟窗，设置烟道挡板。沼气过热炉为室内布置，位于锅炉运转层平台以上。

IWMF一期项目中设计了4台外置式沼气过热炉，每2台过热炉对应1台汽轮机。设备主要包含燃烧器，过热器，给水预热器，水水热交换器，绝热炉膛，保温材料，阀门及配件，钢结构，平台楼梯，连接管道及支吊架，控制系统及仪表。

沼气过热器位于废物焚烧炉外部，独立布置，每台过热炉可独立操作。能给适应沼气供应波动，能够在最小至最大负荷范围内无限制运行。

沼气过热炉具备低温启动能力，在启动阶段，蒸汽温度低于正常440°C时，沼气过热器能够稳定工作至350°C。水预热器将烟气冷却至210°C后排入主烟气管道。

沼气参数

序号	名称	化学式	单位 (VOL%)	标准数值	波动范围
1	二氧化碳	CO ₂	%	29.5	
2	氮气	N ₂	%	1	
3	水	H ₂ O	%	9.5	
4	甲烷	CH ₄	%	60	55-75
5	硫化氢	H ₂ S	ppm	3000	550-3000
6	低位发热量		KWh/Nm ³	5.97	
7	沼气温度			140	140-180

性能保证指标

每台过热炉年可利用率不低于8000小时，保证其中一台过

热器满足全年8760小时不间断运行。单台过热炉的噪声在设备表面1米处不能超过75dB(A)。在11%O₂干基条件下，NO_x排放需控制在100mg/Nm³以下（对于所有日平均值）。CO排放量需小于50mg/Nm³（11%O₂干基条件下每半小时平均），20毫克/Nm³（11%O₂干基条件下日均值）。

4 外置式沼气过热炉设计方案

考虑燃烧器辐射热的影响，为防止过热器底部管排形变带来的爆管问题，在对流过热器前错列布置2排光管省煤器，完全遮挡对流过热器，有效减少辐射热，大幅度降低过热器底部管排形变量。

沼气过热炉的热水流程、蒸汽流程及烟风流程设计如下：

热水流程：热水进口→水水换热器→水预热器→前置省煤器→水水换热器→热水出口。

蒸汽流程：蒸汽进口→一级减温器→膜式壁过热器→对流过热器→二级减温器→蒸汽出口。

烟风流程：送风机→燃烧器→绝热燃烧室→前置省煤器→膜式壁过热器→对流过热器→水预热器→烟气挡板

4.1 过热器设计

膜式壁过热器管子规格Φ42×5，材质SA213T22，布置于锅炉膜式壁周围，利用膜壁余热初步加热蒸汽。WTE炉产生的440°C的过热蒸汽通过连接管进入加热炉膜式壁过热器，在膜式壁过热器中加热后由出口集箱引出，膜式壁过热器进出口集箱的尺寸为Φ219x16，材质为

SA213T22。沼气过热炉的设计燃料为100%沼气（标称甲烷含量为60%，甲烷含量范围为55-75%），用于点火和稳定燃烧。燃烧器能够在30-100%的燃烧器负荷下高效运行。进入沼气过热炉的沼气压力为100kPa，温度为140°C（最大可达180°C）。设计工况下，沼气过热炉设备出口烟气截止阀后烟气压力约为-3000Pa（表压）。沼气成分见下表：

SA213T22。

锅炉对流过热器也布置在竖井烟道内，采用光管顺列布置，管子为Φ42×5，材质SA213T91。将蒸汽加热至480°C后由出口集箱引出，出口集箱尺寸为Φ273x25，材质为SA213T22。

减温器：布置于过热器进出口处，通过喷水调节蒸汽温度，确保稳定输出。减温器尺寸为Φ273x20，材质为SA213T22。减温器的控制由DCS完成。

4.2 水预热器设计

给水预热器采用2段式设计，给水预热器第一段布置在对流过热器前，采用Φ32×3光管，错列布置，管子材质为：SA210A1；集箱为Φ159x10，集箱材质为：SA106B。水预热器第二段布置在尾部竖井烟道最上面，采用鳍片管错列布置，管子为Φ32×3，材质SA210A1，集箱尺寸为Φ159x10，材质为SA106B。2段水预热器通过1根外置Φ60×3连接管连接。

统设置不超过20%的烟气再循环，管道从烟气挡板阀前至燃烧器风机入口。

4.3 燃烧器设计

燃烧器采用NO_x燃烧器，专门设计用于燃烧沼气，具有高效、低排放的特点。能够满足严格的环保要求。燃烧器配备燃气气动安全关断阀和燃气气动调节阀，确保沼气供应的稳定性和安全性。

燃烧控制系统采用硬冗余PLC控制系统，确保设备的安全稳定运行。系统配备多种安全连锁保护装置，如燃料系统自动检漏、炉膛前后吹扫、自动点火和程序启停等。

燃烧控制系统采用西门子硬冗余PLC控制系统，具备高可靠性和易操作性。系统配备多种安全连锁保护装

置,如燃料系统自动检漏、炉膛前后吹扫、自动点火和程序启停等。通过DCS系统对沼气参数进行实时监控,确保设备的安全稳定运行。

燃烧器设计将按照炉膛和燃气温度和燃气压力设计,达到满足排放要求和技术设计规范要求和调节比达到4:10。燃烧器设计带有19% FGR满足NOX排放100mg/Nm³,CO排放小于50mg/Nm³,

考虑到沼气燃料气高温和带有H₂S组份和水分问题,为了防止酸性腐蚀影响设备使用寿命问题出现,燃烧器所有沼气燃料气阀组和燃气枪均特殊设计配置,材料使用不锈钢316材料,以保障设备适合沼气运行工况和运行寿命要求,阀门高温材料设计满足140~180度沼气温度要求。

燃料适应性:燃烧器专为沼气燃料设计,适应甲烷含量55%-75%范围内的沼气供应。

低NO_x设计:采用低NO_x燃烧技术,确保排放达标。

自动调节:具备自动调节功能,根据负荷变化调整沼气供应量及风量,保持稳定燃烧。

5 结论与展望

项目建成后,新加坡40%的废物将由这两座巨型工厂协同处理。Tuas Nexus IWMF项目通过污水处理厂和垃圾焚烧厂的协同合作,实现资源互补和能源自给自足。沼气作为燃料的高效利用不仅减少了废物排放,还提高了

发电效率。

Tuas Nexus 垃圾焚烧发电厂是新加坡的第六家垃圾焚烧发电厂,它说明了资源效率的循环经济原则,将是最紧凑的工厂,也将是新加坡现有垃圾焚烧发电厂中最节能的。

Tuas Nexus IWMF项目通过污水处理厂和垃圾焚烧厂的协同合作,不仅能够处理多种废物类型,还能通过厌氧消化产生沼气作为燃料,减少对传统能源的依赖。

新加坡IWMF项目中的外置式沼气过热炉系统设计先进、结构合理、性能优越。外置式沼气炉成功实现了垃圾焚烧锅炉产生蒸汽温度的提升,从而提高了发电效率。随着项目的逐步实施和推广应用,外置式沼气过热炉将在废物处理和能源利用领域发挥更加重要的作用。同时,系统采用模块化设计、低NO_x燃烧技术及高效换热元件等措施,确保了高效、环保、可靠的运行效果。该项目的成功实施将为新加坡乃至东南亚地区的废物处理和能源利用提供宝贵经验和示范效应。

参考文献

- [1]金辉,葛健,王永堂,崔云晗.城市生活垃圾焚烧发电技术的研究及应用[J].科技创新导报,2021(33):134-140.
- [2]于亮辰,张鲁芳.潍坊市固体废物污染管理存在的问题及优化建议[J].中国资源综合利用,2025,43(05):211-213.