

硫磺回收装置节能降耗措施及效益分析

潘斯南（中海油惠州石化有限公司，广东 惠州 516086）

摘 要：自环境保护、节能降耗上升至国家战略高度以后，石化企业积极推进节能减排相关改革工作，其中，石化企业全面开展能源有效回收利用工作，其中包括硫磺回收。基于此，本文将诸多节能降耗措施应用到某石化工厂的硫磺回收装置当中，包括烟气余热回收利用的对策、凝结水替代除氧水产蒸汽策略、蒸汽透平替代电机驱动制硫燃烧鼓风机措施等，分析各项节能降耗措施的应用要点，然后对比分析其效益，以期提高能源、资源的回收利用率，促进石化企业长远发展。

关键词：中石化；硫磺回收装置；节能降耗

0 引言

现阶段，国家的总目标是向节能降耗型转变，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》《“十四五”原材料工业发展规划》均提到石化化工行业要以改革创新为根本动力，加快产业改造提升，提高本质安全和清洁生产水平等要求。硫磺回收装置是产能型的装置，拥有巨大的节能效果，梳理节能降耗措施要点、分析措施效益是必要的。

1 硫磺回收装置主要耗能情况

某化工工厂主要业务以炼油为主，按照装置的工艺流程来看，其主要划分为两部分，分别为硫磺回收和尾气处理。装置采用克劳斯硫磺回收工艺，装置能耗如表 1 所示：

表 1 装置能耗

类别	消耗量	能量换算系数	能耗 kg (标油)	单位能耗 kg/t (标油 / 原料)
凝结水 (t/h)	-14.567	7.65kg 标油 / t	-111.44	-3.69
循环水 (t/h)	1528.38	0.10kg 标油 / t	152.84	5.06
燃料气 (t/h)	0.31	950kg 标油 / t	294.50	9.74
除氧水 (t/h)	23.731	9.20kg 标油 / t	218.33	7.22
0.35MPa 蒸汽 (t/h)	2.147	66kg 标油 / t	141.70	4.69
电 (kW · h)	1274.66	0.23kg 标油 / kW · h	293.17	9.70
1.0MPa 蒸汽 (t/h)	-25.82	88kg 标油 / t	-2272.16	-75.18
合计			-1283.06	-42.45

根据表 1 数据可知，案例工厂的硫磺回收装置的单位消耗是 -42.45kg/t，总能耗为负值，意味着其发

挥着产能作用，根据其数据，主要是凝结水 4.0MPa 蒸汽产能，其余为耗能项。进一步对其耗能项进行分析，其中，耗能来源是相关设备，包括鼓风机（制硫 / 尾气）、基本、照明及仪表等设备。其中，主要制硫鼓风机年耗电量较大，为 $634.20 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，在总耗电量中占比 59.23%；其次是机泵，年耗电量为 $183.05 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，占比 17.10%；之后是尾气鼓风机，年耗电量及其占比分别为 $156.38 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$ 、14.60%；最后是照明、仪表等用电，年耗电量为 $97.08 \times 10^4 \text{kW} \cdot \text{h}$ ，占比为 9.07%。

2 现阶段硫磺回收装置节能降耗措施及要点

2.1 烟气余热回收利用的节能降耗措施

本文案例工程选择在工厂尾气焚烧炉后增设蒸汽发生器，一方面回收烟气余热，另一方面获得更多蒸汽，合理减少蒸汽消耗量。具体改造方案如下：

案例工厂的硫磺回收装置的尾气焚烧炉后尝试建立尾气余热锅炉及蒸汽过热器，但仍无法降低排烟温度，数值在 255℃ 左右，对于含有硫元素的烟气，排烟温度在 150℃ 即可，该温度不会导致硫冷凝，进而腐蚀生产设备，另一方面也为烟气余热回收提供明确方向。为降低装置热能损失，增加蒸汽发生器及尾气余热锅炉以后，用于生产低压蒸汽，以此降低能量损失，同时确保装置自产低压蒸汽量充足。改造后，烟气余热逐一经过蒸汽过热器、尾气余热锅炉实现热量回收，此时的烟气温度有所降低，可满足 0.35MPa 饱和蒸汽的生产需要，从而作为再生塔底热源补充应用。在该改造方案下，硫磺回收装置所产出的 0.35MPa 饱和蒸汽可增加 1.069t/h，按照工厂所在地区的蒸汽价格来看，每吨计 70 元，除氧水每吨 12.88 元，这意味着改造后每年可增加的经济效益为 48.36 万元。

要想实现这一经济效益，需先投入蒸汽发生器，

案例工厂选用的蒸汽发生器的所需传热系数、总传热系数与换热量余量分别为 $138\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、 $165\text{kcal/h} \cdot \text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 、20%，满足工厂换热需求。整体投资费用为 15.76 万元，改造期间的管道费用为 0.79 万元，共需投入 16.55 万元。

2.2 基于凝结水产蒸汽的节能降耗措施

为降低除氧水消耗量，达成蒸汽和凝结水能够循环利用的目的，借此实现装置的节能降耗，还可以利用凝结水代替除氧水产蒸汽。围绕硫磺回收装置的生产过程，在利用凝结水代替除氧水产蒸汽时，主要根据中压落实节能降耗措施，具体如下：

2.2.1 中压凝结水代替应用

案例中工厂的硫磺回收装置中的转化器前的加热器要 4.542t/h 的中压饱和蒸汽，但在装置生产过程中，基于中压除氧水的中压饱和蒸汽产量为 16.041t/h 。针对这一生产流程与现状，在中压凝结水的代替使用下，中压饱和蒸汽总量有所提升，数据为 18.18t/h ，除去生产消耗的蒸汽，还剩 13.638t/h 用来过热蒸汽中的生产操作。经过尾气加热消耗环节后，综上所述，经代替应用改造，共节约 3.423t/h 的中压除氧水，降低 4.542t/h 的凝结水产量，提高 1.119t/h 的中压过热蒸汽产量。

2.2.2 经济评价

根据上述改造方案及结果，可节省除氧水 12.37t/h ，减少 14.26t/h 的凝结水。按照当地相关资源的价格，除氧水、 0.35MPa 低压蒸汽、 4.0MPa 过热蒸汽、凝结水的价格分别为 12.88、70、120、3 元/吨，装置可每年增加的经济效益计算为：

$$(12.37 \times 12.88 + 120 \times 1.119 + 70 \times 0.772 - 14.26 \times 3) \times 24 \times 330 = 304.87 \text{ (万元)}$$

但期间涉及硫磺回收装置相关改造投资，所需经费在 30 万元左右。

2.3 基于蒸汽透平驱动的节能降耗措施

蒸汽透平的配置主要用于优化硫磺回收装置的蒸汽系统，主要目的在于梯级开发能量并分级利用。在强化硫磺回收装置的节能降耗属性时，可以将其作为电机驱动制硫燃烧炉鼓风机的替代品。在本次案例工厂中，选用单级背压式蒸汽透平。

目前，根据工厂装置现状，透平入口蒸汽是 4.0MPa 蒸汽为主，其焓值为 -12752.75kJ/kg ，透平出口蒸汽主要为 0.35MPa 蒸汽，其焓值为 -13205.43kJ/kg 。透平功率的计算公式为：(透平入口蒸汽焓 - 透平出口蒸汽焓)

$\times$ 蒸汽用量；蒸汽效率的计算公式为：压缩机轴功率 / 透平功率。根据工厂设备台账已知，制硫燃烧炉鼓风机轴功率为 755kW ，蒸汽效率 85%，根据公式计算可知，透平功率 888kW ，过热蒸汽用量 7.064t/h 。

根据上文可知，案例工程的硫磺回收装置生产过程带来的 4.0MPa 过热蒸汽量为 12.618t/h ，与透平蒸汽需求量相比，可有效满足。在该情况下，要想明确其经济效益，判断是否能够实现运行费用的节省，需落实以下经济计算：

①电机驱动下的鼓风机运行费用。按照当地电价 $0.56 \text{ 元/kW} \cdot \text{h}$ ，对于一台功率为 755kW 的电机，其每年运行费用为： $755 \times 0.56 \times 24 \times 330 = 334.86 \text{ (万元)}$ ；

②蒸汽透平下的鼓风机运行费用。按照当地 4.0MPa 过热蒸汽和 0.35MPa 蒸汽的价格（120 元/吨和 70 元/吨），其每年运行费用为： $7.064 \times (120 - 70) \times 24 \times 330 = 279.73 \text{ (万元)}$ 。

通过对比鼓风机每年的运行费用，发现相较于原本的电机驱动，在运行费用上每年可节省 55.12 万元，但需要增设蒸汽透平设备一台，投资费用在 200 万元左右，从短期经济效益来看，投资成本相对较高。

2.4 基于焚烧炉降温调整的节能降耗措施

2.4.1 改造方案

降温期间循环水消耗是造成案例工厂硫磺装置降温的主要问题，因此，为避免循环水消耗，应从降温调整角度出发加以调整。结合案例工厂硫磺回收装置进行节能降耗处理时，应明确温度降低所带来的变化，将实践后发现，吸收剂吸收效果与温度之间存在负相关关系，即降温增强吸收效果。

案例工厂地处北方区域，气温水平相对较低，从降温方面实现节能降耗时，可构建“水冷+空冷”方案，借助环境优势而减少硫磺回收装置在运行期间的循环水损耗量。“水冷+空冷”方案改造过程如下：准备空冷器，将其添加至贫胺液后冷器、贫富液换热器之间，扩大环境优势实现降温。该改造方案能够最大限度借助外部环境促进节能降耗目标的实现，大幅降低循环水，且该方案灵活度较高。

为确保上述改造方案的实现，需合理选择新增空冷器的规格、性能与型号，确保空冷器运用之后可切实发挥出应用效果。在案例工厂硫磺回收装置节能降耗处理时，对于干式空冷器的出口温度加以控制，要求至少 60°C ，但对于案例工厂硫磺回收装置而言，该温度仍达不到标准，故并选用湿式空冷器。湿式空冷器

符合该次改造方案要求,且具备操作灵活性,在冬季等低气温环境中,无需额外喷水雾亦可起到保护设备设施的效果,并可控制循环水应用量,而在夏季等高温场景中,此时依托水分蒸发实现硫磺回收装置降温效果。对案例工厂所运用的空冷器参数进行统计,如下所示:换热面积为 251m^2 ,外形宽度与长度分别为 5700mm 、 3100mm ,管径厚度 2.5mm ,设置有 561 根换热管,喷淋泵与电机功率分别为 5.5kW 、 18.5kW 。

2.4.2 经济性评价

为了解案例工厂该次降温改造的经济效益,以最不利工况(夏季高温工况)为依据进行经济性评价分析。夏季温度较高,为实现降温需运用空冷器喷射水雾,结合案例工厂实际情况计算最不利工况下的关键运行参数,如下所示:贫胺液的流量与进口温度、出口温度分别为 22.06kg/s 、 61.4°C 、 40.0°C ,换热余量、粘度分别为 2.32% 、 0.87cp 。在夏季最不利条件下需将贫胺液温度从 61.4°C 降低至 40.0°C ,当负荷过大时则不会对贫胺液产生降温效果,此时直接运用水冷器进一步降温即可。

明确最不利工况运行条件后,采用仿真模拟方式进行运算,发现在降温期间将会出现循环水消耗,共计 9.03t/h ,能够满足标准。按照上述运行数据测算经济性指标,通过核算发现,在原有方案下,降温过程造成的循环水消耗量较多,为 33.04t/h ,而仿真模拟后发现改造后的循环水消耗量仅 9.03t/h ,由此在循环水消耗量方面产生了能源节约,进一步计算得出年度节约量,为 22.60 万吨,按照当地水费价格(0.60 元/吨)计算后,发现在循环水消耗量节约的同时,可降低大约 15.70 万元的成本。从运行费用角度来看,按照以往运行数计算,得出以往全年运行费用需消耗 13569 万元,而改造后的运行费用约 12.62 万元,由此可见,该次改造具有较高的经济效益。

2.5 基于焚烧炉参数优化的节能降耗措施

硫磺回收装置在运行过程中难免消耗部分能量,在案例工厂中,其中,燃料气消耗占总能耗的 27% ,属于主要能耗项。因此,案例工厂在提高装置节能降耗水平时,也注重燃料消耗量的控制,选择的入手点为尾气焚烧炉参数优化。

案例工厂的硫磺回收装置的尾气焚烧炉对温度的要求在 $540\sim 800^\circ\text{C}$ 之间,一旦低于该温度区间,将出现硫化物、氢气燃烧不充分的情况,然而,若高于 800°C ,则会造成燃料气的浪费。因此,需要优化的

焚烧炉参数是焚烧温度。最终案例工厂确定,将焚烧温度优化至 640°C ,过热蒸汽相应的温度是 365°C 。

在经济效益方面,通过优化温度参数,燃料气可节省 $77.28\text{Nm}^3/\text{h}$,按照当地的燃料气价格优化可带来的经济效益增长为 121.19 万元。

3 对比分析硫磺回收装置节能降耗效益

通过上述五种节能降耗手段,所能带来的增加的经济效益依次为 48.36 万元、 304.87 万元、 55.12 万元、 3.08 万元、 121.19 万元、 162.34 万元,共计 694.96 万元;节能措施落实需要投入的资金费用依次为 16.55 万元、 30 万元、 200 万元、 20 万元、 256.55 万元;投资回收期依次需要 0.34 年、 0.10 年、 3.63 年、 3.25 年、 0.37 年。

根据上述各项数据发现,节能降耗举措2.4的投资成本偏高,节能降耗措施2.5的节能效果一般,从回收周期来看,需要较长时间方能实现投资成本的回收,故优选其余三种节能降耗方式改造硫磺回收装置,改造投资回收期不到一个月,每年可增加 474 万元的经济效益,能够实现显著节能效果。

4 结论

综上所述,为强化硫磺回收装置的节能降耗效果,减少不必要的资源、能源浪费,可通过回收利用烟气温余热、优化尾气焚烧炉温度参数、利用凝结水代替除氧水产蒸汽的方式改造硫磺回收装置,以此满足新时期生产工作需要。

参考文献:

- [1] 曹东,夏林,蒋芙蓉,等. Cansolv 尾气处理装置对天然气净化厂的影响及优化措施探讨[J]. 石油与天然气化工, 2022, 51(6): 139-146.
- [2] 李欣, 罗丝露, 沈晓燕, 等. 硫磺回收装置低负荷运行节能参数调整[J]. 石油石化节能, 2021, 11(11): 9-12.
- [3] 董浩峰, 黄卫存, 朱元彪. 硫磺回收装置循环气吹硫绿色停工工艺[J]. 宁波化工, 2021(3): 43-48.
- [4] 姬智裕, 董晓博. 论硫磺回收装置的能耗分析以及节能优化措施研究[J]. 化工管理, 2021(21): 121-123.
- [5] 刘巍. 硫磺回收装置能耗分析及节能措施探讨[J]. 辽宁化工, 2021(4): 3-5.
- [6] 马越. 硫磺回收装置能耗分析及节能措施探讨[J]. 石化技术, 2022(12): 11-13.
- [7] 刘铁. 洛阳石化硫磺回收装置节能减排优化措施[J]. 中外能源, 2021(6): 25-27.