

塔式锌精馏炉热工诊断与节能分析

曾平生^{1,2}, 黄正宗³, 郑关平², 李泽方³, 陈 录², 闫红杰³, 刘 柳³

(1. 中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083;

2. 深圳市中金岭南有色金属股份有限公司 韶关冶炼厂, 广东 韶关 512024;

3. 中南大学 能源科学与工程学院, 湖南 长沙 410083)

[摘要] 韶关冶炼厂对火法炼锌工艺中塔式锌精馏炉实施了“煤改气”工程改造, 改造后, 出现了高热值燃料与原生燃烧系统不匹配的问题, 表现为炉膛温度分布不均、天然气燃烧不完全以及系统热效率低等。本文基于热平衡计算, 对该塔式锌精馏炉采用多种测量仪器进行热工测试, 并进行诊断分析与模拟仿真, 结果表明: B[#]塔的热效率为 52.79%; 燃烧室温度、天然气烧嘴支管压力以及气体喷口流量均分布不均, 换热室内烟气与空气存在串气现象。节能改造建议从 3 个方面入手: 优化天然气系统的烧嘴结构与布置方式, 采用主动配风燃烧; 优化调整回流比、蒸发比、入炉 B[#]锌温度等工艺参数; 强化余热梯级回收利用。

[关键词] 火法炼锌; 塔式锌精馏炉; 煤改气; 热工测试; 热平衡; 温度分布; 热效率; 节能改造

[中图分类号] TF813; TF806.27 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2022)06-0045-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2022.06.007

作为火法炼锌工艺的关键设备, 塔式锌精馏炉主要根据金属沸点不同, 运用连续分馏原理将杂质金属(主要是铅、铁、镉等)分离, 以获得精锌或 1~3 级锌, 具有产锌纯度高、原料适应性强、可同时富集其他金属的优势, 主要应用于我国的韶关冶炼厂、葫芦岛锌厂等企业^[1]。

为应对我国能源低速增长、产能过剩、优质能源增长受阻等问题, 天然气作为一种具有极大发展潜力的清洁能源逐渐被广泛应用。然而, 随着铅锌冶炼厂“煤改气”工程的实施, 天然气替换煤气成为新燃料, 火法炼锌工艺的关键设备塔式锌精馏炉在实际运行过程中出现了高热值燃料与原生燃烧系统不匹配的问题, 主要表现在炉膛温度分布不均、天然气

燃烧不完全以及系统热效率低等方面^[2-3]。因此, 针对铅锌冶炼厂中塔式锌精馏炉进行热工诊断与节能改造尤为重要。

冶金炉窑热平衡指在一定时间内炉子热量收入和热量支出在数量上的平衡关系, 表示冶金炉窑热量收支的统计计算与诊断分析^[4]。通过热工综合测试与诊断分析, 能够从数据上直观得到当前冶金炉的运行状况与存在问题, 进而提出针对性改造措施。目前, 关于塔式锌精馏炉的相关研究较为丰富^[5-10], 而针对锌精馏炉的热工测试研究则较少。蔡军林^[11]采用热电偶和测温仪对塔式锌精馏炉内煤气的燃烧状况进行热工测试, 发现燃烧室内烟气温度存在一定的不均匀性, 温度从上至下呈现递减的趋势。巫辉明^[12]对塔式锌精馏炉的旧烟道系统进行热工测试, 指出目前烟道系统难以满足增加产量的要求, 并提出阻力更小的烟道改造优化方案。张全等^[13]针对不同厚度 ZnO 结瘤层的塔盘进行热工综合测试, 发现随着 ZnO 结瘤层厚度的增加, 传入塔盘内的热量急剧减少, 这将影响塔式锌精馏炉的产能。

受限于早期热工测试仪器的发展水平, 上述研究中热工测试难以全面获取塔式锌精馏炉的运行信

[收稿日期] 2022-10-17

[作者简介] 曾平生(1974—), 男, 江西吉安人, 高级工程师, 主要从事有色金属冶炼工作。

[通信作者] 闫红杰(1977—), 男, 河南商丘人, 教授, 博士, 主要从事热工过程及设备的数值仿真与优化、流程工业节能技术、冶金过程中多相场耦合作用下相间传递机理等方面的科研工作。

[引用格式] 曾平生, 黄正宗, 郑关平, 等. 塔式锌精馏炉热工诊断与节能分析[J]. 中国有色冶金, 2022, 51(6): 45-53.

息,并且目前关于塔式锌精馏炉的相关热工测试研究较少。因此,本文以韶关冶炼厂现有塔式锌精馏炉为研究对象,针对以天然气作为燃料的锌精馏炉进行热工综合测试,通过获取锌精馏炉在正常生产条件下的各项热工参数,了解该炉的能流分布状况,挖掘其节能减排潜力并提出相应的节能技术改造建议,进一步优化热工操作参数及制度。

1 热工综合测试

1.1 工艺流程

图1为火法炼锌工艺中塔式锌精馏炉的生产流程示意图。锌精馏炉的最小组合单元为三塔式,即2座铅塔配备1座镉塔,此外,可根据无镉锌量配备无镉锌塔(又称B[#]塔),以减少镉塔负荷。粗锌物料

(块状或液态)由起重机加入熔化炉中,熔化后的粗锌液经加料管导入铅塔塔盘。燃烧室内由燃气管道输送的天然气与经换热室预热后的高温空气快速混合燃烧,释放大量热量,进而向塔盘传热;蒸发盘内的粗锌液受热蒸发,低沸点的高镉锌蒸气上升经过回流盘进入冷凝器,冷凝后的高镉锌液由加料管导入镉塔塔盘,进行相似的分馏过程,获取精镉并同时富集镉金属。高沸点的粗铅、硬锌、B[#]锌等液态混合物下降并通过下延部进入精炼炉,降温分层后可分别获得粗铅、硬锌、锌渣以及B[#]锌。天然气燃烧产生的高温烟气在换热室内预热吸入的空气后排出,汇集至总烟道内,并流向余热锅炉进一步实现余热利用,最终经收尘排向大气。铅塔、镉塔和B[#]塔结构相似,仅处理物料以及分馏产物略有不同。

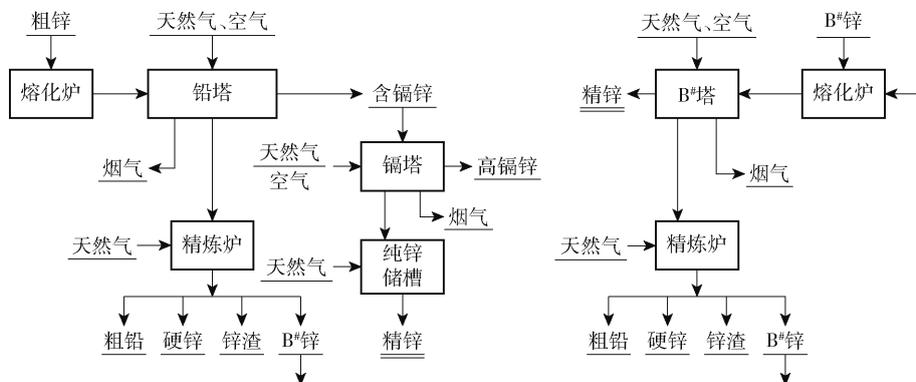


图1 塔式锌精馏炉生产流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the production process of the tower-type zinc refining furnace

塔式锌精馏炉B[#]塔的结构如图2所示。由图2可知,塔盘在竖直方向上堆叠布置,主要可分为蒸发盘与回流盘。以燃烧室顶部的压密砖为分界线,燃烧室内部基本布置为蒸发盘,回流盘则位于压密砖上部。在生产过程中,燃烧室内天然气燃烧加热塔盘,蒸发盘内锌液受热蒸发,所形成的精锌蒸气上升进入回流盘。在回流盘的外部散热条件下,部分精锌蒸气液化返回蒸发盘并再次蒸发,从而达到多次提纯的目的。其中,燃烧室内高温烟气和蒸发盘壁面的温度分布与锌液的蒸发效率密切相关,回流盘的散热条件则对分馏产品的产量与质量具有极大影响。因此,合理优化蒸发盘的受热条件和回流盘的散热条件将是锌精馏炉增产降耗与节能减排的重要手段。

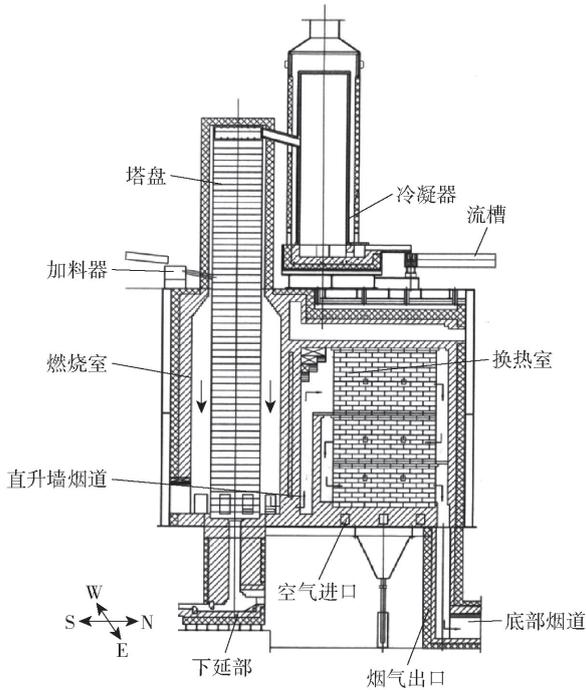
1.2 测定范围

由于铅塔、镉塔和B[#]塔结构相似,分馏原理相同,仅处理物料与产品有差异。因此,综合各塔的稳定运行情况,选取B[#]塔为测试对象,以燃烧室与换热室为热平衡体系,主要分为2部分:①从加料管的入炉物料B[#]锌到塔盘顶部出口的精锌和下延部出口的粗铅、硬锌、B[#]锌为止;②从入炉天然气、空气至底部烟道出口的烟气为止。

1.3 测定基准

锌精馏炉的测定基准包括基准温度、基准压力和测定周期等。

- 1) 基准温度采用标准温度,即20℃。
- 2) 基准压力为1个标准大气压,即101 325 Pa。
- 3) 热平衡计算单位采用MJ/h。

图2 塔式锌精馏炉(B[#]塔)结构示意图^[1]Fig.2 Schematic diagram of the tower type zinc refining furnace (B[#] tower)^[1]

4) 温度、压力、流量、烟气成分等物理参数的测定必须在炉况相对稳定,各生产参数无明显波动,无设备故障时同步进行。

5) 测定周期为1周,测定单元为1个工班,每个工班为8 h。

1.4 测量仪器

所有测试用的仪器、仪表和计量装置在检修期内,并且所有大型仪器设备测试前送回厂家或在实验室进行了标定。测试仪器仪表见表1。

表1 热工综合测试仪器仪表

Table 1 Instruments for the comprehensive thermal test

序号	仪器仪表	测量参数
1	烟气分析仪	烟气成分
2	奥氏气体分析仪	烟气成分
3	低温红外枪	炉体表面温度
4	红外线成像仪	炉体壁面和管道表面温度
5	S分度铂铑热电偶	直升烟道烟气温度和炉膛温度(0~1 600℃) 底部烟道烟气温度(0~1 100℃)
6	K分度热电偶	和粗锌液、锌渣等熔体温度(0~900℃)
7	智能压力风速风量仪	底部烟道烟气流速
8	干湿球温度计	炉体环境和大气温度、湿度
9	微差压变送器	预热空气压力、炉膛压力、直升烟道压力、烟气出口压力
10	电动微型隔膜泵	抽取直升烟道烟气、换热室出口烟气、底部烟道烟气

1.5 热工计算

塔式锌精馏炉的热工综合测试以测试数据为主,主控室数据为辅,当无法获得测试数据时,使用主控室锌精馏炉平稳运行时的记录数据。有色金属行业标准《重有色冶金炉窑热平衡测定与计算方法(塔式锌精馏炉)》(YS/T 118.12—1992)提供了以煤气为燃料的塔式锌精馏炉热平衡计算方法,本文结合此次热工综合测试的锌精馏炉实际运行情况,基于该行业标准计算了以天然气为燃料的塔式锌精馏炉能量收支情况。因此,当燃料改为天然气时,塔式锌精馏炉B[#]塔的热量收支情况如表2所示。

表2 塔式锌精馏炉B[#]塔热平衡表Table 2 Heat balance of tower B[#] of tower-type zinc refining furnace

符号	项目	热收入/ (MJ·h ⁻¹)	百分比/%	符号	项目	热支出/ (MJ·h ⁻¹)	百分比/%
Q ₁	天然气燃烧热	6 766.82	90.71	Q' ₁	精锌蒸气带走热	2 922.03	39.17
Q ₂	天然气带人物理热	2.89	0.04	Q' ₂	B [#] 锌、硬锌、粗铅、锌渣带走热	453.79	6.08
Q ₃	空气带人物理热	45.64	0.61	Q' ₃	回流锌蒸发热	1 206.81	16.18
Q ₄	入炉B [#] 锌带人	644.50	8.64	Q' ₄	出炉烟气带走热	2 405.97	32.25
ΣQ	合计	7 459.84	100.00	Q' ₅	精馏炉表面散热	204.63	2.74
				ΔQ'	差值	266.62	3.57
				ΣQ'	合计	7 459.84	100.00

由表 2 可知, 锌精馏炉热量总收入比热量总支出多 266.62 MJ/h, 占热量总收入的 3.57%, 所测数据误差满足工程误差要求。误差主要来源于温度的测量误差、经验参数的取值误差以及锌精馏炉表面散热损失被低估等。

结合表 2 中的热工测试结果, 塔式锌精馏炉热效率的计算见式(1)。

$$N_{lx} = \frac{Q_{\text{eff}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q'_1 + Q'_2 + Q'_3 - Q_4}{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4} \times 100\% \quad (1)$$

式中: Q_{eff} 为锌精馏炉的有效热, MJ/h; Q_{in} 为锌精馏炉的总热收入, MJ/h; Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 以及 Q'_1 、 Q'_2 、 Q'_3 的含义及取值如表 2 所示。代入相关数值可得: $N_{lx} = 52.79\%$ 。

根据综合计算结果, 绘制塔式锌精馏炉的热流图, 如图 3 所示。

由图 3 可知, 在精馏炉的收入热量中, 天然气的燃烧热占据主导地位, 而在其支出热量中, 出炉烟气带走的热量高达 32.25%, 导致了锌精馏炉较大的热损失, 节能改造可考虑减小烟气量或强化烟气的余热利用。此外, B[#] 锌、硬锌和锌渣等带走热和回流锌蒸发热共占总热收入的 22.26%, 此部分较高的占比削弱了精锌的蒸发热, 对锌精馏炉的生产效率不利, 可针对精锌、B[#] 锌、回流锌的成分、比例等从工

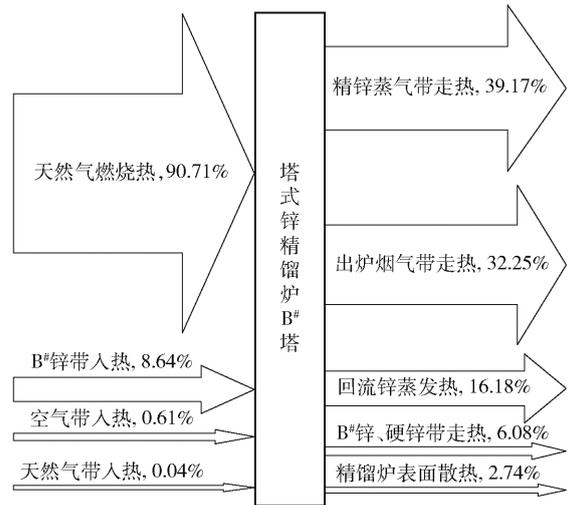


图 3 塔式锌精馏炉 B[#] 塔热流图

Fig. 3 Heat flow diagram of tower B[#] of tower-type zinc refining furnace

艺角度进行调控, 有利于提高精锌产量, 降低产品单位能耗。

表 3 为塔式锌精馏炉 B[#] 塔的主要耗能指标。由表可知, 锌精馏炉 B[#] 塔的单位产品热耗为 5.74×10^6 kJ/t, 以韶关冶炼厂当前所采用的天然气为燃料, 根据其热值, B[#] 塔的单位产品能耗为 $168.91 \text{ Nm}^3/\text{t}$, 折算标煤为 $195.72 \text{ kgce}/\text{t}$ 。

表 3 塔式锌精馏炉 B[#] 塔主要能耗指标

Table 3 Main energy consumption indicators of tower B[#] of tower-type zinc refining furnace

序号	名称	符号	单位	计算公式	数值
1	单位产品热耗	Q_{CH}	kJ/t	$(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \times 1000/A$	5.74×10^6
2	单位炉料热耗	Q_{LL}	kJ/t	$(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \times 1000/B$	3.05×10^6
3	单位产品燃料消耗	Q_{RL}	m^3/t	$(Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \times 1000/(Q_{\text{DW}} \times A)$	168.91

注: A: 指 B[#] 塔中精锌产量; B: 指 B[#] 塔中 B[#] 锌加入量; Q_{DW} : 指天然气的低位发热量。

2 热工诊断及分析

2.1 燃烧室温度

热工测试过程中, 在利用热电偶测量燃烧室上、中、下部不同测点处烟气温度的基础上, 通过采取不同的热电偶插入深度, 可进一步获取燃烧室内不同位置的温度分布, 如图 4 所示。由图可知, 在精馏炉东部, 燃烧室空间内温度场表现出“三角形”的分布规律, 即燃烧室上部和下部的温度较低, 而中部的温度更高, 东墙南侧尤为显著; 而在精馏炉西部, 整个

燃烧室的南侧温度均相对更高。此外, 在燃烧室西墙上部南侧, 热电偶的插入深度越大, 烟气温度越高, 高温区越靠近塔盘, 表明火焰较长, 而在其他部位, 此现象较不明显; 在西墙南侧中部, 当插入深度为 1500 mm 时, 烟气温度最高, 高温区处于燃烧室的中央位置, 而西墙北侧则略微不同; 在西墙下部, 同一测点热电偶的不同插入深度所测得的温度相差不大, 仅 1700 mm 深度时温度较低 (西墙南侧下部 1700 mm 测点因仪器损坏无法获得有效数据)。

综上, 锌精馏炉燃烧室东西部的温度分布不对

称,南北侧温度分布差异性较大,并且炉膛整体温度分布不均匀;燃烧室上下部的最大温差为 106.5℃,东西部的最大温差为 98.5℃,同一测点热电偶不同插入深度的最大温差为 24.5℃。因此,为了提高精锌产量和系统热效率,应尽可能消除精馏炉东西部运行工况的差异性,并合理提高燃烧室温度分布的均匀性。

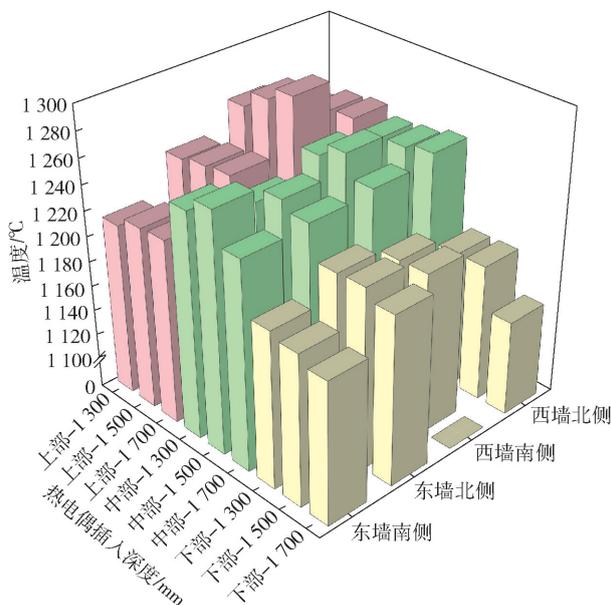


图4 塔式锌精馏炉燃烧室温度分布

Fig. 4 Temperature distribution in the combustion chamber of the tower-type zinc refining furnace

由于热电偶测温的局限性,测点温度值不能较好地反映燃烧室内高温烟气整体的温度分布情况,并且与精锌产量密切相关的塔盘壁面温度也难以直接测量。因此,本文在热工综合测试的基础上采用数值模拟的手段进一步探究燃烧室内烟气以及塔盘壁面的温度分布。图5列出了锌精馏炉燃烧室某一纵截面的烟气温度分布和塔盘壁面的温度分布模拟结果。由图5(a)可知,燃烧室内空间的温度场呈“三角形”分布,即燃烧室上部北侧和中部南侧的空气喷口附近有高温火焰形成,而高温烟气下行主要沿着北侧运动,这形成了典型的“三角形”高温区。此外,由于天然气燃烧形式不合理,燃烧室顶部与中下部形成了显著的低温区,中下部的大面积低温区尤为突出。烟气高温区与低温区交叉所形成的温度不均匀分布将会对蒸发盘的受热条件造成不利影响。在图5(b)中,塔盘壁面的温度场与燃烧室烟气

温度分布相对应,即高温区位于塔盘中上部,顶部与中下部温度则较低,塔盘壁面温度的不均匀分布不仅不利于塔内精锌的蒸发速率,还会降低塔盘的使用寿命。因此,应合理优化天然气的燃烧形式来提高炉膛以及塔盘的温度分布均匀性。

2.2 烧嘴压力与气体喷口流量

表4为精馏炉东西部天然气烧嘴支管压强的测量结果。由表可知,无论精馏炉东西部还是同侧不同层的天然气支管,其压强的差异均较大,这将直接影响每个烧嘴的燃烧状况,进而导致燃烧室内温度分布不均,精馏炉东西部炉温不对称。因此,为合理提高燃烧室温度分布的均匀性,建议针对每个天然气烧嘴进行独立的监测与调节,并采用配风式的燃烧方式进行独立调控。

表4 塔式锌精馏炉天然气烧嘴支管压力

Table 4 Piping pressure for natural gas burners in the tower-type zinc refining furnace

天然气烧嘴支管压力	项目	数值/Pa
东墙天然气支管	第一层天然气烧嘴支管	54.0
	第二层天然气烧嘴支管	439.5
西墙天然气支管	第一层天然气烧嘴支管	56.0
	第二层天然气烧嘴支管	16.5

由于锌精馏炉热工测试过程中燃烧室内气体喷口的流量均无法直接测量,考虑到气体喷口流量对炉内天然气燃烧情况的极大影响,本文对燃烧室内天然气的燃烧过程进行仿真计算,所监测的气体喷口流量比例如图6所示。由图6可知,与燃烧室相连接的预热空气管道气体喷口以及天然气管道烧嘴口的流量分布不均匀,空气管道甚至存在小流量喷口,这均不利于天然气的燃烧行为。因此,为提高炉内天然气的燃烧效率,建议采用气体喷口流量均匀的新型气体管道结构。

2.3 换热室串气

换热室顶部预热空气总道中预热空气的成分分析结果如表5所示。由表可知,东墙和西墙预热空气总道中均检测到了 CO_2 、 CO 、 NO 和 NO_2 等气体,这表明换热室中烟气与空气存在串气现象。由于西墙空气总道中检测到的 NO 、 NO_2 等气体含量较高,可以推断精馏炉西部换热室内烟气与空气的串气现象更为严重,这可能是东西部燃烧室温度分布不对称的原因之一。

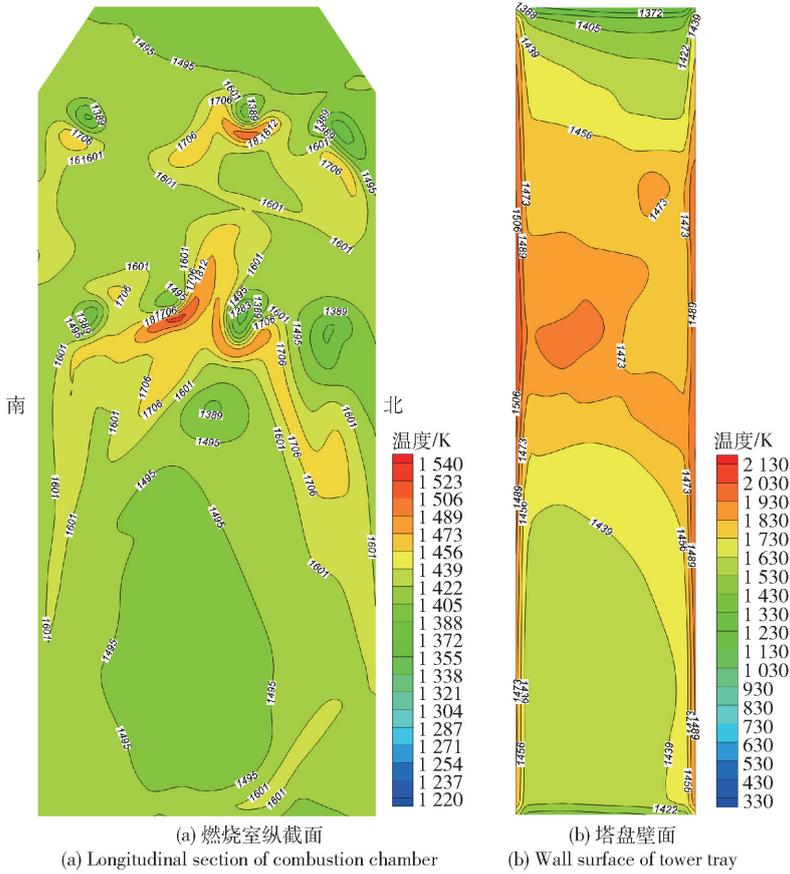


图5 塔式锌精馏炉燃烧室温度云图

Fig.5 Temperature contours in the combustion chamber of the tower-type zinc refining furnace

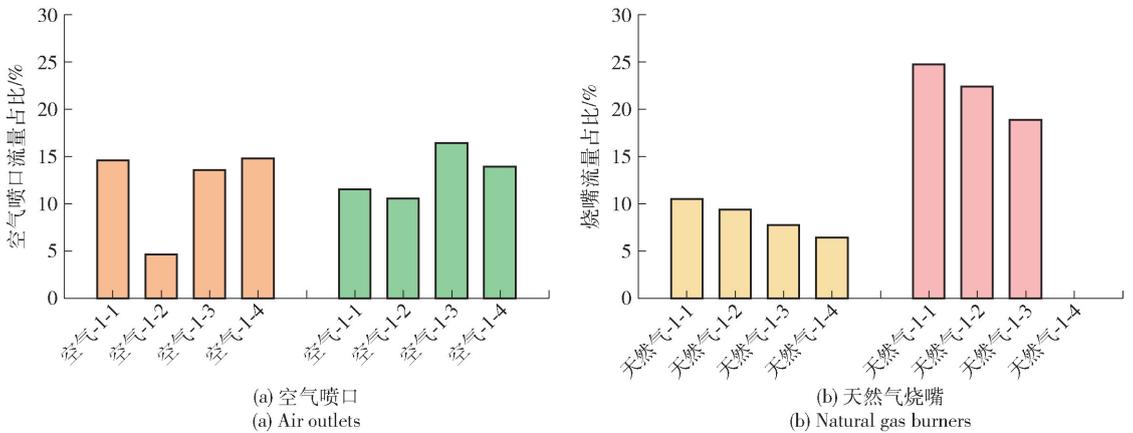


图6 塔式锌精馏炉燃烧室气体喷口流量比例

Fig.6 Flow percentage of gas outlets in the combustion chamber of the tower-type zinc refining furnace

表5 塔式锌精馏炉燃烧室入口处预热空气成分

Table 5 Preheated air composition at the inlet of the combustion chamber of the tower-type zinc refining furnace

预热空气成分	O ₂ /%	CO ₂ /%	CO/(mg·m ⁻³)	NO/(mg·m ⁻³)	NO ₂ /(mg·m ⁻³)
东墙预热空气总道测点	20.34	0.35	1.25	1.34	0
西墙预热空气总道测点	20.16	0.45	2.5	13.0	4.11

由于换热室处于负压状态,换热室内的高温烟气会吸入冷空气,从而形成漏风,导致烟气体量增加,热损失增大。为进一步分析燃烧室的燃烧情况,抽取直升烟道内烟气进行成分分析,分析结果如表6所示。基于直升烟道内烟气中 O_2 与 CO_2 的平均含量,查表可知燃烧室内的过量空气系数约为1.145。因此,换热室的漏风系数约为0.595,这表明精馏炉换热室的漏风量较大。为减少烟气体量,降低烟气带走的热损失以提高热效率,建议加强换热室的密封性,减少漏风。

表6 塔式锌精馏炉直升烟道内烟气成分

Table 6 Flue gas composition in the updraft flue of the tower-type zinc refining furnace

直升烟道内烟气成分	$O_2/\%$	$CO_2/\%$	$CO/\%$
东侧直升烟道清扫孔	1.7	8.9	0.1
西侧直升烟道清扫孔	4.1	7.5	0.2

3 节能改造途径

塔式锌精馏炉的节能改造途径主要包括3个方面:①合理组织炉膛内的燃烧过程,提高温度均匀性与塔盘蒸发效率;②对余热进行梯级回收利用;③优化调整工艺参数,协同优化精留炉能质流分布。

3.1 优化天然气燃烧形式,提高塔盘蒸发效率

为解决当前精馏炉换热室内高温烟气与助燃空气串气、天然气烧嘴支管压力不均等现象所导致的天然气烧嘴燃烧状况各异、燃烧室温度分布不均以及东西部炉况不对称等问题,提高炉内温度分布均匀性,提升塔盘蒸发效率,可进一步优化精馏炉内天然气的燃烧形式。

针对天然气供应点偏集中,易导致天然气的快

速混合燃烧和局部温度过高的问题,可优化烧嘴的布置形式与结构。由于入炉空气实行分级控制,并且仅依靠炉内负压的吸气式送风存在风量不可控且难以精准调节的问题,使得炉内存在燃烧不完全的现象,可进一步采用主动配风,合理分配天然气量与助燃空气量比例,从而实现天然气的完全燃烧,提升燃烧热效率。此外,为实现炉况快速响应与精准调控,建议提高精馏炉数字化程度,添加仪器仪表,实现炉内温度均匀性在线监测、入炉空气量和天然气量的监测与调控、烟气成分监测与 NO_x 控制等。

在火法炼锌工艺中,为保证塔盘内物料的最佳蒸发效率,燃烧室内蒸发盘外壁面的理想受热条件一般可考虑为整体均匀分布或沿竖直方向梯度分布两种情况。由于冷物料自蒸发盘顶部进入塔盘,并且回流盘中液化后温度较低的锌液也自蒸发盘顶部再次流入塔盘,蒸发盘顶部或中上部需要吸收更多热量来支持锌液的升温与汽化,因此蒸发盘外壁面在竖直方向上由高到低的温度梯度分布显然更加符合工艺需求。基于此,可通过优化天然气的燃烧形式,来合理匹配燃烧室内高温烟气与塔盘壁面的温度分布,即水平方向上均匀分布,竖直方向上梯度分布,避免形成“三角形”分布,以期促进塔盘的蒸发效率。

3.2 优化调整工艺参数,降低单位产品能耗

基于热工测试结果,表7列出了精馏炉B#塔的物料配比关系。与铅塔设计经验值相比,B#塔的冷凝比偏低,精锌产量较低,可认为入炉物料中金属铅、铁杂质含量较高。当回流比 P_2 取最大值时,蒸发比 P_4 却仍低于平均设计水平,这表明冷凝比 P_5 仍具有较大的提升空间。回流比 P_2 与回流盘的散热条件密切相关,较大的回流比能够提高分馏产品的质量,但也会增加蒸发盘的工作负荷。

表7 塔式锌精馏炉B#塔内物料分配比

Table 7 Material distribution ratio of tower B# of tower-type zinc refining furnace

塔别	P_1 (加料比)	P_2 (回流比)	P_3 (下部排料比)	P_4 (蒸发比)	P_5 (冷凝比)
B#塔	1.0	0.275(估)	0.496	0.807	0.532
铅塔	1.0	0.20~0.35 原料含铅、铁高时,取最大值	0.25~0.30 原料含铅、铁高时,取最大值	0.95~0.98 原料含铅、铁高时,取最小值	0.63~0.75 原料含铅、铁高时,取最小值
镉塔	1.0	0.45~0.55 原料含镉高时,取最大值	0.985~0.995 原料含镉高时,取最小值	0.455~0.565 原料含镉高时,取最大值	0.005~0.015 原料含镉高时,取最大值

根据生产现场检测,回流盘外壁面的散热损失较为严重,散热量约为 5.8×10^4 kJ/h,壁面热流密

度可达 841.5 W/m²。在入炉物料与产品成分不变的情况下,每减少1 kg/h的回流锌,单位产品热耗

降低 4.41×10^3 kJ/t, B[#]塔每天可节约 4.05 m^3 的天然气。因此,可对回流盘外壁面的散热条件进行合理优化,实现回流比 P_2 的主动调控,以在精锌产品的产量与质量两方面寻求最佳平衡。

通过强化熔化炉的保温效果来提高 B[#]锌的入炉温度,入炉温度的提高将减少 B[#]锌升温至沸点的显热,在同等的天然气供热量情况下能够增加精锌的蒸发量,从而间接提高精锌的产量。同时,可进一步优化调整入炉 B[#]锌、精锌、产出 B[#]锌、硬锌等物料中锌的成分比例,实现精准调控。如提高入炉 B[#]锌中锌元素占比,降低产出 B[#]锌、硬锌、锌渣等物料中锌元素占比,即可提高精锌中锌元素占比,在精锌纯度一定时,可提高精锌产量。

此外,为进一步优化精馏炉工艺参数,协同优化炉子能质流分布,实现精准定向调控,可结合生产情况与经验,建立精馏炉数字化信息监测平台,开发设计精馏炉自动控制系统,指导现场生产,以达到系统性节能降耗的目的。

3.3 强化余热梯级回收利用,提升炉子热效率

由热工测试结果可知,高温精锌蒸气在冷凝器中放热冷凝,形成液态精锌。为保证精锌蒸气快速冷凝放热,冷凝器一般半裸露在自然环境中,直接向周围环境散热。精锌蒸气冷凝散热量可按式(2)计算。

$$Q_1 = Q'_1 - m_2 \cdot C_4 \cdot (t_1 - t_0) \quad (2)$$

式中: Q_1 是精锌蒸气在冷凝器中的散热量, kJ/h; m_2 是精锌产量, kg/h; t_1 是冷凝器中锌液的温度, 取 $650 \text{ }^\circ\text{C}$; t_0 是基准温度, $^\circ\text{C}$; C_4 为 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ 时液态金属锌的比热, kJ/(kJ \cdot °C), 取 0.502。

代入数据计算可得精锌蒸气的冷凝散热量为 2.51×10^6 kJ/h, 相当于 B[#]塔热量总收入的 33.66%, 具有较大的回收利用价值。

此外,高温烟气可进行余热回收利用。由热工测试结果可知,换热室的漏风系数为 0.595,漏风量较大。漏风导致烟气体量增大,提高了烟气带走的热损失,降低了换热室烟气余热利用效率。因此,有必要采取措施提高换热室的密闭性以减少漏风。此外,为节约天然气并抑制 NO_x 生成,可选用或设计适用、高效的换热器为天然气燃烧提供合理的空气预热温度,并在保证换热室出口烟气温度处于合理的范围内充分利用换热室烟气余热,实现烟气余热梯级利用。

由热工测试结果可知,底部烟道烟气平均温度为 $551.8 \text{ }^\circ\text{C}$,余热锅炉入口烟气温度约为 $360 \text{ }^\circ\text{C}$,管道烟气运输损失热量约为 9.02×10^5 kJ/h,相当于 B[#]塔热量总收入的 12.1%,具有较大余热回收利用空间,冬天时该项热损失将会进一步增大。

4 结论

本文针对塔式精馏炉 B[#]塔进行了热工综合测试与初步仿真计算,获得了精馏炉内温度、压强和烟气成分等关键数据。基于热工测试结果对精馏炉进行了热工诊断与分析,并提出相应的节能改造建议。

1) 采用天然气为新燃料后,塔式精馏炉的热效率为 52.79%;热工测试与仿真计算结果表明,燃烧室内温度分布不均匀,天然气烧嘴支管压力不均匀,气体喷口流量不均匀,换热室内高温烟气与助燃空气存在串气现象。

2) 节能改造建议从以下 3 个方面入手:① 优化天然气燃烧形式,包括烧嘴结构与布置方式的优化,采用主动配风燃烧等;② 优化调整工艺参数,如调整回流比、蒸发比、入炉 B[#]锌温度和入炉 B[#]锌、精锌、产物 B[#]锌成分等;③ 强化余热梯级回收利用,主要包括精锌蒸气冷凝散热量的利用、底部烟道至余热锅炉之间烟气管道散热量的回收、换热室与余热锅炉中烟气余热的梯级利用。

[参考文献]

- [1] 梅焜,周萍. 有色金属炉窑设计手册[M]. 长沙:中南大学出版社, 2018: 745-803.
MEI Chi, ZHOU Ping. Handbook for nonferrous metal furnace and kiln design [M]. Changsha: Central South University Press, 2018: 745-803.
- [2] 刘永富. 精馏塔煤改气的生产实践[J]. 中小企业管理与科技(下旬), 2018: 166-167.
LIU Yongfu. The production practice of changing coal into gas in distillation column [J]. Management & Technology of SME, 2018: 166-167.
- [3] 张光,杨长江,谭德成. 锌焙烧多膛炉系统节能技术的深化研究及改进[J]. 有色冶金节能, 2018, 34(1): 37-39.
ZHANG Guang, YANG Changjiang, TAN Decheng. Study and improvement on energy saving technology of multi-hearth furnace in zinc roasting [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2018, 34(1): 37-39.
- [4] 陈鸿复. 冶金炉热工与构造[M]. 北京:冶金工业出版社, 1999.
CHEN Hongfu. Thermal engineering and construction of metallur-

- gical furnace[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1999.
- [5] 李新民. 韶冶塔式锌精馏炉燃烧室的改进[J]. 中国有色冶金, 2005, 34(6): 57-60.
- LI Xinmin. Improvement of combustion chamber of tower-type zinc re-distillater[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2005, 34(6): 57-60.
- [6] 谢锴, 梅焱, 张全, 等. 韶冶冶炼厂塔式锌精馏炉燃烧室热工数值仿真与结构优化[J]. 有色金属, 2003, 55(2): 43-46.
- XIE Kai, MEI Chi, ZHANG Quan, et al. Combustion chamber simulation and structure optimization of zinc fractionating tower in Shaoguan smelter[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(2): 43-46.
- [7] 鄂加强, 张全, 梅焱, 等. 基于煤气掺混天然气下锌精馏铅塔燃烧室内烟气传热能力研究[J]. 工业加热, 2002(3): 5-8.
- E Jiaqiang, ZHANG Quan, MEI Chi, et al. Study on capacity of heat transfer about fumes in combustion chamber of lead column in the zinc refining based on nature gas mixed into coal gas[J]. Industrial Heating, 2002(3): 5-8.
- [8] 李亚冰. 锌精馏炉用蓄热室内热工过程数值计算及优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- LI Ya-bing. Numerical calculation and optimization of thermal process in regenerator for zinc distillation regenerative furnace [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [9] 王立元. 天然气塔式锌精馏炉的设计与应用[J]. 工业炉, 2003(1): 31-34.
- WANG Liyuan. Designing and application for nature gas heating tower type zinc rectification furnace[J]. Industrial Furnace, 2003(1): 31-34.
- [10] HANKO G, LEBLEU A, SIBONY M, et al. Optimization of the New-Jersey refining process[M]//Lead-Zinc 2000. John Wiley & Sons, Inc., 2013: 481-496.
- [11] 蔡军林. 锌精馏铅塔燃烧室诊断与优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- CAI Junlin. Diagnosis and optimization research in combustion chamber of lead column in the zinc refining [D]. Changsha: Central South University, 2002.
- [12] 巫辉明. 韶冶冶炼厂锌精馏二系统烟道优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.
- WU Huimin. The optimal research on the second flue system of zinc refinery in Shaoguan smelter[D]. Changsha: Central South University, 2005.
- [13] 张全, 鄂加强, 梅焱, 等. 基于 ZnO 结瘤下 SiC 塔盘导热性能研究探讨[J]. 有色金属(冶炼部分), 2002(1): 39-42.
- ZHANG Quan, E Jiaqiang, MEI Chi, et al. Study on and discussion about heat conduction capability of SiC tray due to ZnO agglomeration[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2002(1): 39-42.

Thermal diagnosis and energy saving analysis of a tower-type zinc refining furnace

ZENG Ping-sheng^{1,2}, HUANG Zheng-zong³, ZHENG Guan-ping², LI Ze-fang³, CHEN Lu²,
YAN Hong-Jie³, LIU Liu³

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Shaoguan Smelter, Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonfermet Co., Ltd., Shaoguan 512024, China;

3. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the implementation of the “coal to gas” project in the zinc pyrometallurgical process of a smelter in Shaoguan, problems of mismatch between high calorific value fuels and the existing combustion system occurred in the key equipment such as zinc refining column. These problems include uneven temperature distribution in the hearth, incomplete combustion of natural gas, low thermal efficiency of the system, etc. In this paper, based on heat balance calculation, thermal tests, followed by diagnostic analysis and simulation, were conducted to the zinc refining column using a variety of measuring instruments. The results show that the thermal efficiency of tower B# is 52.79%. Through the thermal diagnosis and simulating calculation, it can be seen that the temperature of the combustion chamber, the pressure of the branch pipe of the natural gas burner and the flow rate of the gas outlets are unevenly distributed, the phenomenon of blow-by exists between the off-gas and preheated air in the heat exchange chamber. In addition, the energy saving and consumption reduction of the zinc refining furnace can be achieved by optimizing the nozzle structure and arrangement of natural gas system, applying air distribution combustion method with active air supply, optimally adjusting the process parameters such as reflux ratio, evaporation ratio, the feeding temperature of tower B# and strengthening the waste heat gradient recovery and utilization.

Key words: zinc pyrometallurgy; tower-type zinc refining furnace; coal to gas; thermal test; heat balance; temperature distribution; thermal efficiency; energy saving retrofit