

# 催化裂化烟气循环再生技术对再生器的影响分析

闫鸿飞\*, 王慧, 孙世源, 杨鑫, 王龙延, 孟凡东

(中石化炼化工程(集团)股份有限公司洛阳技术研发中心, 河南 洛阳 471003)

**摘要:**催化裂化(FCC)烟气循环再生技术以部分循环再生烟气和纯氧作为再生器助燃介质,可将再生烟气中的 CO<sub>2</sub> 浓度提高至 95 v% 以上,有利于 CO<sub>2</sub> 的捕集和利用。通过模拟计算,分析了烟气循环再生技术对再生器热平衡、旋风分离器和再生效率等方面的影响,提出应考虑的影响因素,为烟气循环再生技术的工业示范应用提供参考。

**关键词:**FCC; 烟气循环; 再生; 再生器; 影响

**中图分类号:**TE624.41

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2024)S2-0366-03

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.064

## Influence of FCC flue gas circulation regeneration technology on FCC regenerator

YAN Hong-fei\*, WANG Hui, SUN Shi-yuan, YANG Xin, WANG Long-yan, MENG Fan-dong

(Luoyang R&D Center of Technology, Sinopec Engineering (Group) Co., Ltd., Luoyang 471003, China)

**Abstract:**FCC (fluidized-bed catalytic cracking) flue gas circulation regeneration technology, which can increase the concentration of CO<sub>2</sub> in the regenerated flue gas to more than 95v% through using partially recycled flue gas and pure oxygen as the combustion-supporting medium of the regenerator, is conducive to the capture and utilization of CO<sub>2</sub>. The influences of flue gas circulation regeneration technology on the heat balance, cyclone separator and regeneration efficiency of the regenerator are analyzed via simulation calculation. The influencing factors that should be considered are proposed to provide technical reference for the industrial demonstration application of flue gas circulation technology.

**Key words:**FCC; flue gas recycle; regeneration; regenerator; influence

随着全球经济发展,大量资源和能源的消耗带来 CO<sub>2</sub> 排放持续增加,CO<sub>2</sub> 温室效应不断加剧导致的气候变化问题引起了全球关注。为了应对温室气体排放造成的各种严重后果,体现大国担当,2020 年中国在联合国大会上提出了力争 2030 年前实现“碳达峰”、2060 年前实现“碳中和”的目标。据统计,全球 CO<sub>2</sub> 排放总量的 4.6% 来自炼化企业,催化裂化(FCC)装置 CO<sub>2</sub> 排放总量约占炼化企业的 25%<sup>[1]</sup>,降低催化裂化装置 CO<sub>2</sub> 的排放并进行捕集回收,对控制炼化企业碳排放具有重要意义。

目前国内外控制 FCC 装置 CO<sub>2</sub> 排放和捕集回收的技术主要有降低反应生焦、化学链燃烧 CO<sub>2</sub> 捕集、燃烧前 CO<sub>2</sub> 捕集、燃烧中 CO<sub>2</sub> 和燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集等技术<sup>[2-5]</sup>,而烟气循环再生技术作为燃烧中 CO<sub>2</sub> 捕集技术的代表,具有较好的发展前景。

### 1 催化裂化烟气循环再生技术介绍

由中石化 SEG 洛阳技术研发中心牵头组织开发的催化裂化烟气循环再生技术采用部分循环再生

烟气与空气分离获得的 O<sub>2</sub> 代替空气作为燃烧时的氧化剂,可将再生烟气中的 CO<sub>2</sub> 浓度提高至 95 v% 以上。该技术可实现低成本 CO<sub>2</sub> 捕集,是一种能够降低 FCC 装置碳排放的新型再生技术。该技术的原理示意图见图 1。

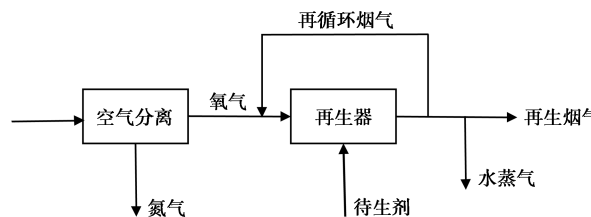


图 1 催化裂化烟气循环再生技术示意图

催化裂化待生剂的再生过程通常采用空气来提供再生反应所需要的氧,待生剂上的焦炭与空气中的氧反应生成 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,而空气中的惰性气体 N<sub>2</sub> 并不参加反应。由于空气中约含有 79 v% 的 N<sub>2</sub>,因此再生烟气中的 CO<sub>2</sub> 含量通常只有 10 v%~20 v%,难以实现富集,所以从再生烟气中捕集 CO<sub>2</sub> 就比较困难,只有当 CO<sub>2</sub> 浓度较高时才可能进行有效的捕集和利用。

收稿日期:2024-04-17;修回日期:2024-07-19

基金项目:中石化科技开发项目(122010)

作者简介:闫鸿飞(1973-),男,本科,正高级工程师,从事炼油工艺方面的研发工作,通讯联系人,yanhongfei.segr@sinopec.com。

催化裂化烟气循环再生技术将部分再生烟气循环返回至再生器,以再生烟气中的  $\text{CO}_2$  代替空气中的  $\text{N}_2$ ,同时通入纯氧,即采用  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧方式,这样就能使烟气中  $\text{CO}_2$  浓度大幅提升至 95 v%以上,烟气中富集的  $\text{CO}_2$  可以采用低温分馏提纯工艺进行捕集,使  $\text{CO}_2$  浓度达到 99 v%以上,降低  $\text{CO}_2$  捕集和提纯成本。因部分烟气循环返回至再生器,因而大幅降低了 FCC 装置的排烟量和排烟导致的热量损失,显著提高了装置的热效率。发电厂半工业的  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧试验表明,这种燃烧方式在实现  $\text{CO}_2$  富集的同时,还可获得较高的脱硝和脱硫效果,与未采用  $\text{O}_2/\text{CO}_2$  燃烧方式相比,脱硝和脱硫效率分别可达到 70%和 90%以上,综合控制温室气体和污染物排放效果显著。

## 2 催化裂化烟气循环再生技术对再生器的影响分析

烟气循环再生技术可实现催化裂化待生剂的良好再生,相对于常规空气再生,烧焦效率和烧焦强度都有明显的提高,从烧焦效果来讲,烟气循环再生完全可取代常规空气再生<sup>[6]</sup>。但由于  $\text{O}_2$  和  $\text{CO}_2$  混合气的性质与空气有较大的不同,因此对再生器的热平衡、旋风分离器和再生效率等方面都会有一定的影响。下面通过模拟计算来考察烟气循环再生对再生器各方面的影响。

### 2.1 烟气循环再生对再生器热平衡的影响

表 1 为再生器热平衡核算表。因烟气循环再生与反应系统各参数无关,因此模拟定性计算时两种再生形式与反应相关的参数都相同。由表 1 可知,焦炭燃烧热、焦炭脱附热、焦炭升温热、散热损失均与反应过程中的焦炭产率直接相关,因此两种再生

表 1 再生器热平衡核算表

项目	常规空气再生	烟气循环再生	项目	常规空气再生	烟气循环再生
入方			出方		
焦炭燃烧热	基准	基准	焦炭脱附热	基准	基准
			主风升温	基准	增大
			焦炭升温	基准	基准
			水蒸气升温	基准	基准
			散热损失	基准	基准
			循环催化剂带走热	基准	基准
			循环催化剂带烟气带走热	基准	基准
			外取热器取热	基准	减小
合计	基准	基准	合计	基准	基准

形式下这几项热量不变。水蒸气升温热相对较小,主要为吹扫、松动蒸汽及待生剂携带蒸汽,可视为不变。循环催化剂带走热与反应系统剂油比相关,因此也相同。主风升温热与主风量和烧焦介质比热相关,因此需进行模拟定量计算,进而可判断由常规空气再生变为烟气循环再生时外取热器取热量的变化。

由再生器热平衡计算可知:

$$\text{主风升温热} = \text{主风量} \times \text{流化气体比热} \times (\text{再生器温度} - \text{主风入口温度})$$

(再生器温度-主风入口温度)可视为不变,烟气循环再生时,当主风量不变,由于烟气循环混合气体介质比热<sup>[7]</sup>(见表 2)增加,因此主风升温热上升。由表 1 可知,当采用烟气循环再生代替常规空气再生时,外取热器取热负荷将降低。若外取热器要维持满负荷操作,可提高装置加工量或掺渣比以提高生焦量,从而可提升装置效益。

而当主风量减少时,则需根据具体减少比例,并结合比热变化进行详细计算来判断外取热器取热负荷变化。

### 2.2 烟气循环再生对再生器旋风分离器的影响

在常规空气再生条件下,若再生温度( $T$ )为 973 K,再生压力 3.5 atm(绝),主风机出口温度为 453 K。在 973 K 条件下  $\text{O}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2$  等纯气体的黏度( $\mu$ )可由 Thodos 公式<sup>[8]</sup>计算得到。

$$\mu = 17.78T_c^{-1/6}P_c^{2/3}M^{1/2}(4.58T/T_c - 1.67)^{0.625} \times 10^{-5} \quad (1)$$

式中: $\mu$  为纯气体的黏度, cP;  $T_c$  为物质的临界温度, K;  $P_c$  为物质的临界压力, atm;  $M$  为分子量;  $T$  为再生温度, K。

混合气体黏度( $\mu_m$ )用下式计算:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (2)$$

式中: $\mu_m$  为混合气体的黏度, Pa·s;  $\mu_i$  为常压下纯  $i$  组分的黏度, Pa·s;  $M_i$  为混合物中  $i$  组分的分子量;  $y_i$  为混合物中  $i$  组分的摩尔分数。

表 2 列出了常规再生条件下(973 K, 3.5 atm)空气、 $\text{O}_2$  与  $\text{CO}_2$  混合物的物性对比。

表 2 空气、氧气与二氧化碳混合物的物性

项目	空气	氧与二氧化碳混合物(体积比)				
		21:79	23:77	25:75	27:73	29:71
氧含量/v%	21	21	23	25	27	29
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.27	1.82	1.81	1.80	1.79	1.78
分子量/( $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ )	28.96	41.48	41.24	41.00	40.76	40.52
定压比热(453~973 K)/( $\text{kJ}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	31.25	45.39	45.06	44.74	44.42	44.10
黏度/( $\text{Pa}\cdot\text{s}\times 10^{-5}$ )	4.10	3.85	3.86	3.88	3.90	3.92

根据斯托克斯定律及离心力计算公式可以得出： $u_p \propto 1/\mu_g$ <sup>[9]</sup>，其中  $u_p$  为固体粒子在旋风分离器内的沉降速度， $\mu_g$  为气体黏度。气体的黏度越小，越有利于固体粒子的分离。由表 2 数据可知，O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合物的黏度较空气有一定程度的降低，因此，采用 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 代替空气再生时，固体粒子在旋风分离器内的沉降速度会有所提高，更有利于旋风分离器的气固分离。

### 2.3 烟气循环再生对再生器输送分离高度的影响

再生器输送分离高度计算公式<sup>[10]</sup>如下：

$$TDH/D_T = (2.7D_T^{-0.36} - 0.7) \times \exp(0.7u_f \cdot D_T^{-0.23}) \quad (3)$$

式中： $TDH$  为输送分离高度，m； $D_T$  为床层直径，m； $u_f$  为床层线速，m/s。

再生器床径通常不变，而当主风量即烧焦气体线速不变时，再生器输送分离高度  $TDH$  将不会发生变化。

因烟气循环再生烧焦效率高，当烧焦负荷不变时，主风量通常会有一定的下降，因此气体线速会有所降低，结合公式(3)可知，再生器输送分离高度  $TDH$  将会有一定程度的下降。

### 2.4 烟气循环再生对再生效率的影响

在催化裂化装置主风量一定的情况下，根据再生器焦炭燃烧化学反应式可知，与常规空气再生相比，烟气循环再生时再生器烧焦能力增加的比例  $R_C$  与 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合气体中氧气的体积分数有如下关系：

$$R_C = Y/21 - 1 \quad (4)$$

式中： $Y$  为烟气循环再生时混合气体中氧气的体积分数，v%。

据此可以计算出烟气循环再生时混合气体中不同氧气含量时的烧焦能力增加比例，见表 3。

表 3 不同氧气含量时的烧焦能力变化

O <sub>2</sub> 浓度/ v%	烧焦能力 增加比例/%	O <sub>2</sub> 浓度/ v%	烧焦能力 增加比例/%
23	9.52	27	28.57
25	19.04	29	38.10

如果催化裂化装置再生器烧焦负荷一定，那么与常规空气再生相比，烟气循环再生时再生器线速降低的比例  $R_V$  与 O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 混合气体中氧气的体积分数有如下关系：

$$R_V = 1 - 21/Y \quad (5)$$

据此可以计算出烟气循环再生时混合气体中不同氧气含量时的再生器线速减少比例，见表 4。

表 4 不同氧气含量时的再生器线速变化

O <sub>2</sub> 浓度/ v%	线速降低 比例/%	O <sub>2</sub> 浓度/ v%	线速降低 比例/%
23	8.70	27	22.22
25	16.00	29	27.59

根据表 3、表 4 数据可知，采用烟气循环再生可以明显提高再生器的效率。在主风机风量限制的情况下，可提升再生器烧焦能力，因此可提高装置处理量或掺渣比进而提高装置效益；在装置烧焦负荷一定的情况下，可适当降低主风机负荷，起到节能降耗的作用。

## 3 结论

催化裂化烟气循环再生技术可将再生烟气中的 CO<sub>2</sub> 含量富集至 95 v% 以上，有利于 CO<sub>2</sub> 的捕集和利用。但烟气循环再生技术燃烧介质的变化会对再生器操作造成一定的影响，在进行工业应用时应根据再生器实际核算情况进行相应的设备或操作调整，以保证在降低催化裂化装置碳排放的同时实现装置安全平稳长周期运行。

## 参考文献

- [1] 李秋芝, 陈曼桥, 孟凡东, 等. 催化裂化实现 CO<sub>2</sub> 捕集的技术探讨[J]. 现代化工, 2012, 32(12): 82-84.
- [2] Stockle M, Bullen T. Integrating refinery CO<sub>2</sub> reduction strategies into your refinery [C]. Proceedings of ERTC Sustainable Refining Conference, Brussels, 2008.
- [3] Ferguson S. Investment roadmap: Planning for carbon capture and storage Reducing emissions can be approached the same way as any other new capital project [J]. Hydrocarbon Processing, 2011, 90(12): 43-49.
- [4] 闵剑, 加璐. 我国碳捕集与封存技术应用前景分析[J]. 石油石化节能与减排, 2011, 1(2): 21-27.
- [5] 饶甦, 高正平, 沈来宏, 等. 二氧化碳减排及利用的现状与发展[J]. 现代化工, 2011, 31(7): 1-5.
- [6] 周璇, 闫鸿飞, 李秋芝, 等. 氧燃烧-二氧化碳捕集催化裂化技术研究[J]. 现代化工, 2013, 33(10): 96-98.
- [7] 房鼎业, 应卫勇, 朱炳辰. 加压下含甲醇混合气体定压热容、粘度与导热系数[J]. 化肥设计, 1989, (6): 31-38, 41.
- [8] 田立楠. 纯气体, 混合气体及液体粘度的计算[J]. 化肥设计, 1997, 35(6): 9-13.
- [9] 钱付平, 章名耀. 基于边界层理论旋风分离器分离效率的改进模型[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 71-75.
- [10] 陈俊武. 催化裂化工艺与工程(第二版)[M]. 北京: 中国石化出版社, 2005. ■