

# 连续逆流重整再生器烧焦操作控制优化提升经济效益

周董董 (中国石化海南炼油化工有限公司, 海南 洋浦 578101)

**摘要:** 连续逆流重整是一套完全拥有自主知识产权的重要炼油工艺技术, 针对其再生器的操作优化也是节能创效提升装置经济效益的关键手段。本文通过优化烧焦温度、氧含量、催化剂循环和碳含量等改善再生器运行能耗, 提升烧焦效率实现装置运行经济效益的提升。

**关键词:** 逆流重整; 烧焦; 经济效益; 操作成本优化

## 1 引言

催化重整是催化剂和原料在高温和一定压力条件下进行生产的。高温低压环境有利于重整反应进行, 也会促使一些副反应如烃类的热裂解和缩合反应, 产生焦炭在催化剂表面沉积。焦炭会覆盖催化剂的活性中心, 使反应活性和选择性降低, 高辛烷值汽油和芳烃的产率都会降低, 增加操作费用使运行经济性降低, 因此需要对催化剂上的焦炭进行再生恢复其活性, 使操作经济性和产品质量提升。

## 2 装置概述

某石化有限公司 2.6Mt/a 连续重整装置采用中国石化科学研究院 (以下简称石科院) 的逆流连续重整成套技术, 该装置原料为直馏石脑油和加氢裂化重石脑油, 额定再生能力为 2800kg/h, 再生器烧焦模式为二段烧焦。该装置使用的重整反应催化剂为石科院的 PS-VI 催化剂。

该装置于 2023 年 6 月 15 日正式建成投产。在开工后再生器多次发生烧焦床层温度过高的异常工况。这种异常工况下会导致强度差的催化剂受高温破碎产生更多的粉尘<sup>[1]</sup>和反应器内构件损坏<sup>[2]</sup>等危害, 当过高温度的含碳催化剂落入至富氧环境的氧化区时会进一步燃烧导致再生器下部飞温, 除了造成上述的危害外还会进一步影响催化剂中铂金属的分散和水氯平衡, 使重整催化剂性能下降对重整反应进行负反馈调节, 影响重整产物。

## 3 逆流连续重整再生器工作原理

在催化重整装置主要有环烷烃脱氢、异构化、烷烃脱氢环化和加氢裂化等反应 (见表 1)。这些反应并不是同步进行, 而是在四个反应器的分布是有差别的。如第一反应器主要是环烷烃脱氢, 第二、三反应器是继续一反未完成的脱氢和异构化, 第四反应器是异构化和反应速度最难、速度最慢的脱氢环化反应。如图 1 所示在逆流连续重整中, 催化剂的流动方向与

物料成逆流接触, 让新鲜再生的催化剂在四反中参与反应, 提高重整产物质量。催化剂在反应器之间靠重力及提升相结合的方式循环输送, 每个反应器设置有顶部过滤器、缓冲料斗、上部料斗、下部料斗和提升阀组。循环方向从第四反应器→第三反应器→第二反应器→第一反应器, 再由第一反应器底部提升至再生器顶部靠重力依次经过一段烧焦区、二段烧焦区、氧化/氯化区、干燥区及冷却区, 然后流经氮封罐, 由氢气提升至第四反应器顶的缓冲料斗, 自流至还原段, 经还原后, 自流入第四反应器, 构成反应-再生循环。这样处理的优势是将新鲜的催化剂通过逆流的方式与最难反应的四反、三反优先接触优化整体的反应深度提升一次加工产品的质量。

表 1 催化重整主要反应的相对反应速率

反应类型	环烷烃脱氢	异构化	烷烃脱氢环化	加氢裂化
相对反应速率	30	3	1	0.5

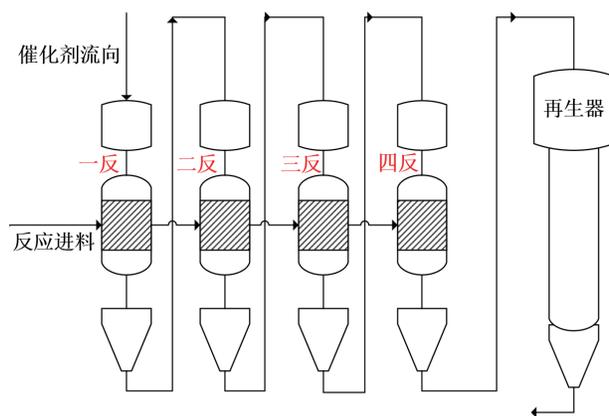


图 1 逆流连续重整再生器工作示意图

如图 2 所示烧焦区采取两段分步烧焦, 待生催化剂在环隙结构内靠重力自上而下移动, 烧焦循环气由外向内沿径向通过待生催化剂床层参与烧焦反应后, 汇集至中心筒排出<sup>[3]</sup>。本装置再生器采用先进的温度在线检测系统, 烧焦一床底一段烧焦分布其径向结构

使循环气分布更加均匀，两段烧焦区可以控制入口温度及氧含量分步燃烧，有效降低单一床层峰温，同时二段烧焦入口设有再生气循环压缩机打出的急冷气用来紧急情况时给再生器降温防止温度过高，确保烧焦充分、安全。

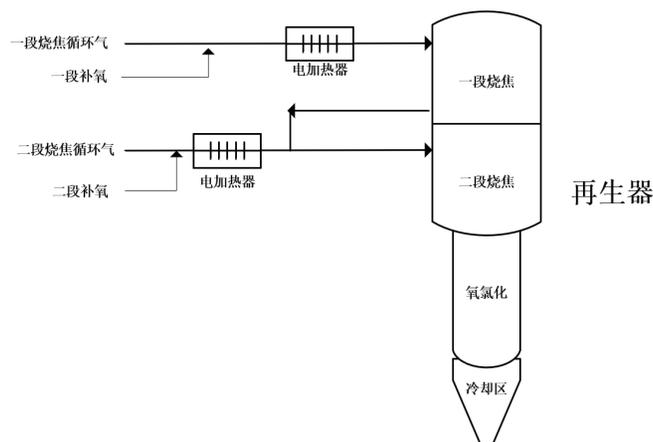


图2 再生器烧焦区局部流程

## 4 烧焦控制优化策略

### 4.1 温度控制优化

烧焦床层温度对再生器的影响十分重要。过高的温度会导致床层飞温、催化剂烧结丧失活性还会损害设备，过低的烧焦温度会烧焦不完全，导致含碳催化剂下落至富氧环境的氧氯化区。因此，确保烧焦温度处于一个适宜的范围内显得尤为重要。

在本装置中，再生器采用先进的多电偶温度在线检测系统，一段烧焦分五个床层每层六个方向均设置温度测点，二段烧焦分四个床层每层设三个温度测点，更多的温度测点可以实时准确获取再生器内不同位置的温度数据。通过控制两段烧焦入口温度和氧含量来控制烧焦床层温度分布，使含碳催化剂在一段烧焦燃烧80~90%，剩余的碳在二段烧焦完成，实现高效烧焦且保护催化剂和反应器。

### 4.2 氧含量控制优化

氧含量在烧焦过程中是非常重要的参数，一段二段入口的配氧是确保烧焦完全的重要调控手段，如果氧含量不足会导致烧焦不充分，含碳催化剂下落至富氧的氧氯化段是产生飞温导致设备损坏，过高的氧含量也会导致床层温度飞温，烧焦经济性差装置能耗高等。本装置，在一段二段烧焦入口均设置氧含量控制器，配合温度在线分析仪表的温度分布，进行准确补氧，维持烧焦高效运行。

### 4.3 催化剂循环速率

合理的催化剂循环速率是维持反应器和再生器的

关键参数。合适的循环速率可以使催化剂在再生器充分烧焦和再生，也使其在各个反应器中积累的积碳量不过高，形成良好的反应再生循环，对产品的质量和运行成本都起到关键性作用。循环速率过快或过低，都会使反再平衡被打破，过快会导致再生不充分，催化剂活性没有完全恢复使产品质量下降；过慢会导致催化剂在反应器中积累的碳含量过高导致末端反应器反应不充分，再生器负荷高、运行成本大幅度提高。

### 4.4 催化剂的积碳量

在烧焦过程中催化剂的积碳量对烧焦的影响也尤为重要。在反应器中各反应器新生成的积碳量从四反到一反逐渐降低，与其他逆流连续重整装置类似。如表2所示，国内某逆流重整装置四反生成的积碳量最多，占全部积碳量的50.40%，三反生成的积碳量占31.40%，三反和四反积碳量的总和占总积碳量的81.80%，这说明反应器的积碳基本是三反四反产生的。<sup>[4]</sup>受控于原料性质和反应温度的影响，当待生催化剂的碳含量波动较大时，要及时调整再生氧含量和循环速率，根据再生器各个测点调整烧焦负荷，维持生产稳定和运营成本优化。

表2 某逆流重整装置积碳分布

	积碳量 / %	积碳量比例 / %
第一反应器	0.13	5.4
第二反应器	0.31	12.8
第三反应器	0.76	31.4
第四反应器	1.22	50.4

### 4.5 控制优化策略

在保证产品质量和生产稳定的情况下，通过提高入口氧含量和降低入口温度使一段烧焦在保证燃烧效率的情况下具有较高的温升空间使含碳催化剂在一段烧焦燃烧80~90%。较低入口温度可以降低烧焦循环气入口电加热器负荷，一段烧焦的充分燃烧可以提高一段烧焦气出口温度使二段入口电加热器的负荷也有效降低。由于大部分碳在一段烧除，在保证出口氧含量大于0.2%情况下，二段烧焦入口补氧量可以适当减少，同时二段较低的烧焦负荷也使出口气体温度降低，降低后续水冷器和空冷器负荷达到节能目的。经过实测，后续的空冷风机停机也满足循环气温度工况。

## 5 经济分析

### 5.1 提高催化剂性能带来的效益

重整催化剂作为催化重整反应的核心，其性能直接影响重整产品质量和产量。在催化剂参与反应的过

程中, 催化剂表面会逐渐积炭, 导致活性和选择性下降。再生器的主要任务就是去除这些积炭, 恢复催化剂的性能。

本文通过优化再生器操作, 如精细化控制再生温度、氧含量以及催化剂循环量等关键参数, 可以实现更高效的烧焦过程。一方面, 能够更以较低能耗彻底地去除催化剂表面的积炭, 使催化剂活性得到更好恢复, 从而提高重整反应的转化率。使装置可以高效、连续生产高辛烷值汽油组分和芳烃, 带来了可观的销售收入增长。另一方面, 催化剂再生后恢复其选择性。使反应更倾向于生成目标产物, 减少副产物的生成。这不仅提高了产品质量, 还降低了后续分离和精制成本。因为副产物减少意味着在分离过程中所需处理的杂质减少, 节省了分离设备的能耗和操作成本。

### 5.2 降低能耗产生的效益

催化重整再生器在运行过程中消耗大量能量, 包括加热、气体输送等方面。不合理的操作往往导致能耗过高, 增加生产成本。通过优化再生器操作, 可以实现显著的节能效果。通过优化再生烧焦温度和烧焦方式精准控制再生器各段温度, 避免再生器内部局部飞温, 使烧焦温度维持在最佳区间, 能够使烧焦过程更加高效, 减少为维持烧焦所需的额外能量输入, 降低电加热器的消耗。同时, 优化后的操作可以更好地回收利用再生器内的热量。这不仅降低了生产成本, 还符合当前节能减排的环保要求, 提升了企业的可持续发展能力。

### 5.3 延长催化剂使用寿命带来的效益

催化重整的催化剂含有贵金属成分其采购成本较高, 频繁更换催化剂会大幅增加装置的运营成本。而再生器的操作情况对催化剂使用寿命有着直接影响。优化再生器操作可以减少催化剂在再生过程中的磨损和失活。如通过优化再生器温度分布, 避免催化剂因高温破碎; 优化催化剂循环量, 减少颗粒之间的过度碰撞, 降低了催化剂的机械磨损。同时, 精准的再生条件控制避免了因温度、氧含量不当等因素导致的催化剂化学结构破坏和活性中心损失。对于一个大型催化重整装置来说, 延长催化剂的寿命, 还意味着减少了因更换催化剂导致的装置停车时间, 避免了停车期间的生产损失, 进一步提高了装置的经济效益。

### 5.4 提升装置运行稳定性和生产能力带来的效益

催化重整装置的稳定运行对于生产计划的顺利执行和产品质量的稳定至关重要。再生器操作不稳定或

出现故障, 很容易导致整个装置停车或降负荷运行。

通过优化再生器操作, 能够显著提高装置的运行稳定性。减少因再生器问题导致的非计划停车次数。每次非计划停车不仅会造成产品产量损失, 还会在装置重启过程中产生物料和能源浪费。稳定的再生器操作还可以使装置在更高的负荷下安全运行。可以在不增加设备投资的情况下增加了产品产量, 提升了企业的经济效益。

综上所述, 催化重整再生器操作优化在提高催化剂性能、降低能耗、延长催化剂使用寿命以及提升装置运行稳定性和生产能力等方面都能产生显著的经济效益。通过精细化操作, 充分挖掘其潜在的经济效益, 提升企业在市场中的竞争力。

## 6 结论

在连续逆流重整再生器烧焦操作控制优化中, 各控制点紧密协同。温度在线分析仪表可以直观反映烧焦区内部温度分布, 辅助调整两段烧焦入口温度的控制策略, 保持高烧焦效率的同时保护催化剂与设备。氧含量控制采取一段入口高氧含量保持 80~90% 的烧焦负荷, 二段烧焦残碳的策略, 避免出现烧焦不足或飞温的情况, 同时保持较低的能耗。催化剂循环速率稳于合理区间, 维持待生剂碳含量与反应器中催化剂活性的平衡, 保再生质量与产品质量, 控制积碳防止再生器负荷高、运行成本高。多种参数协同控制优化, 在保证烧焦效率的同时充分利用烧焦循环气的余热减少电加热器负荷, 减少循环水用量和空冷减负荷节能效果明显, 使再生运行成本降低。各控制点环环相扣、相互支撑, 全方位提升烧焦操作精准性、经济性与安全性, 为连续逆流重整装置稳定高效运行筑牢根基, 于石化产业提质增效发挥关键效能, 对同类装置优化具深远借鉴意义, 助力行业技术精进、资源集约利用与经济效益提升稳步推进。

### 参考文献:

- [1] 陈国平, 周立进, 李学军. 重整再生器内网堵塞的危害与对策 [J]. 石油炼制与化工, 2002(04):41-44.
- [2] 张娜. 重整再生器内网损坏原因分析及改进措施 [J]. 石油石化绿色低碳, 2024,9(01):68-72.
- [3] 吴德飞, 郑晨. 逆流连续重整技术开发及工业应用进展 [J]. 石油炼制与化工, 2023,54(08):1-7.
- [4] 王卿, 徐艳龙, 艾中秋. 国内首套半再生重整改造逆流连续重整装置开工及标定 [J]. 天津化工, 2023,37(05):112-116.