

# 炭黑生产过程中反应炉的结构优化与传热传质性能研究

元明明

山西焦化集团有限公司 山西 临汾 041600

**摘要：**炭黑是重要的功能性碳材料，其生产关键在于反应炉内复杂的物理、化学过程，而反应炉结构设计影响炉内能量、物质传递及化学反应效率，关乎炭黑产品的收率、质量等关键指标。本文从工程热物理与化工过程强化角度，剖析油炉法炭黑反应炉中燃烧室等关键部件的结构特征及其对传热传质的作用机制。结合相关基本原理，探讨各结构单元如何协同调控高温气流场等时空演化。基于此，提出以“强化混合、精准控温、高效终止”为核心的结构优化思路，并给出几何构型等方面具体优化方向。研究表明，合理结构优化可提升炭黑品质一致性与可控性，提高能源利用效率，助力炭黑工业绿色、高效、智能化发展。

**关键词：**炭黑；反应炉；结构优化；传热；传质；过程强化

## 引言

炭黑作为众多工业领域的关键功能性填料，尤其在轮胎制造业中作用重大，但传统油炉法生产工艺在能效、环保与产品控制上面临挑战，如能耗大、碳排放高、产品质量稳定性不足等，因此，通过反应装备创新设计精准高效调控炭黑生成过程成为行业技术升级关键。在油炉法炭黑生产中，反应炉是“心脏”，其内部传热、传质与化学反应高度耦合，炭黑品质由反应炉结构决定，精良设计可引导气流、建立精确温度历程、有效终止反应，结构上的任何缺陷都可能导致局部过热、混合不良、反应时间失控等问题，从而劣化产品质量或降低收率。鉴于此，本文采用基于第一性原理的工程分析方法，将反应炉视为连续流动反应器，解析各单元结构功能及对整体性能的贡献，揭示结构与性能内在联系，提出优化原则，助力工程师科学设计。

## 1 炭黑反应炉的结构组成与功能解析

典型的油炉法炭黑反应炉沿气流方向可划分为四个主要功能区：燃烧室（Combustion Chamber）、喉管（Throat）、反应段（Reaction Zone）和急冷段（Quench Zone）。每个区域都有其特定的结构形式和工程目的。

### 1.1 燃烧室：能量的源泉

燃烧室是反应炉的起始部分，其核心任务是高效、稳定地燃烧，为后续的炭黑生成提供所需的高温热源。其结构通常为一个圆筒形或略呈锥形的腔体。从传热角度看，燃烧室的设计需最大化燃料的燃烧效率，即确保燃料与空气充分、快速混合，以实现近乎完全的燃烧。这要求燃烧器喷嘴的布局、一次风与二次风的配比及入口角度必须经过精心设计，以在有限空间内形成强烈的湍流涡旋，促进动量交换与热量释放。一个高效的燃烧

室能产生均匀、稳定的高温核心区，为原料油的瞬间裂解提供理想的热环境。从传质角度看，燃烧产物（主要是高温的 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 及过剩 $\text{O}_2$ ）构成了后续反应的载气。这些气体的流量、成分和温度直接影响原料油裂解的动力学路径。因此，燃烧室不仅是热源，也是反应气氛的“调制器”。

### 1.2 喉管：混合与加速的咽喉

喉管是连接燃烧室与反应段的狭窄通道，其直径远小于燃烧室出口。这一收缩结构的设计极具匠心，其作用体现在两个层面：首先，根据流体力学中的文丘里效应，当高速气流通过喉管时，流速急剧增加，静压显著降低。这个低压区对于从侧壁或中心喷入的原料油雾滴具有强大的抽吸作用，能极大地促进油滴与高温燃气的初始混合。良好的初始混合是保证所有油滴几乎在同一时刻、同一环境下开始裂解的前提，这对于获得粒径分布窄、性能均一的炭黑产品至关重要。其次，喉管的加速作用使整个气流体系进入一个高度湍流的状态。强烈的湍流脉动极大地增强了分子间的扩散速率，即强化了传质过程<sup>[1]</sup>。在炭黑生成的早期阶段（成核期），活性自由基和碳簇需要通过扩散相互碰撞才能形成稳定的晶核。喉管创造的高湍流环境为此提供了有利条件。

### 1.3 反应段：炭黑生成的主战场

离开喉管后，气流进入反应段。该段通常设计为一个扩张角较小的锥形管道。其结构设计直接决定了炭黑颗粒的最终形态。在反应段内，炭黑的生成经历了从初级粒子形成到聚集体构建的完整过程。这个过程对温度和时间极为敏感。温度过高或停留时间过长，会导致初级粒子过度石墨化，比表面积下降；反之，若温度不足或时间太短，则反应不完全，收率低下，且可能产生大

量焦油等副产物。因此，反应段的长度和扩张角是两个关键的结构参数。足够的长度保证了必要的反应停留时间；而适当的扩张角则用于调控气流速度的衰减速率，从而间接控制温度的下降梯度。理想情况下，反应段应能维持一个从入口到出口平滑、可控的温度衰减曲线，使得炭黑颗粒在最佳的“生长窗口”内完成其结构发育。此外，反应段的内壁通常需要承受极高的热负荷。其结构还需考虑耐火材料的布置与冷却方式，以确保设备的长期安全运行。

#### 1.4 急冷段：反应的精准终止器

当炭黑颗粒发育到预定状态时，必须立即终止其生长。这通过在急冷段向高温烟气中喷入雾化水来实现。急冷段的结构设计目标是实现“瞬间、均匀、彻底”的冷却。“瞬间”要求急冷喷嘴的位置必须精准，通常紧邻反应段出口。延迟喷射会导致炭黑过度生长。“均匀”则对喷嘴的布局 and 雾化效果提出了高要求。多点环形布置的喷嘴能确保冷却水与烟气在横截面上充分接触，避免出现局部冷却不均，从而防止部分炭黑因过热而劣化<sup>[2]</sup>。“彻底”意味着喷水量和雾化粒径需经过精确计算，以确保在极短距离内（通常不到1米）将烟气温度从约1500°C骤降至900°C以下，有效冻结炭黑的微观结构。急冷段的结构虽看似简单，但其对最终产品质量的“定型”作用无可替代。一个设计不当的急冷系统，会使前面所有精心调控的努力付之东流。

### 2 结构参数对传热传质性能的影响机制

反应炉各部分的结构并非孤立存在，它们通过气流、热量和物质的传递紧密耦合，共同塑造了炉内的整体物理场。

#### 2.1 喉管尺寸与混合效率

喉管直径是影响初始混合效率的首要因素。直径过小，虽然能产生更强的抽吸力和更高的流速，但会带来两个问题：一是系统压降过大，增加风机能耗；二是过高的流速会缩短原料油在高温区的有效停留时间，可能导致裂解不完全。反之，直径过大，则无法形成足够的负压来有效喷射原料油，导致油滴与燃气混合不均，部分油滴可能直接撞击炉壁形成结焦，不仅降低收率，还会损坏设备。因此，喉管直径的选择是一个在混合效率、压降损失和反应时间之间寻求最佳平衡的过程。

#### 2.2 反应段几何与温度-时间历程

反应段的长度（L）与入口/出口直径比（ $D_{in}/D_{out}$ ）共同决定了气流的膨胀特性和速度剖面。较长的反应段提供了更长的反应时间，有利于提高炭黑收率，但也增加了设备投资和热损失。较小的扩张角能使气流速度缓慢

下降，有助于维持一个相对平缓的温度梯度，这对于生产高结构炭黑（需要较长的聚并时间）是有利的。相反，较大的扩张角会导致气流迅速减速，温度快速下降，更适合生产高比表面积的低结构炭黑。本质上，反应段的几何结构是在“时间”和“温度”这两个维度上对炭黑生长过程进行编程。优秀的结构设计，就是为特定牌号的炭黑产品编写出最合适的“生长程序”。

#### 2.3 急冷系统布局与终止精度

急冷喷嘴的数量、角度、距反应段出口的距离以及水雾的SMD（索特平均直径）都是关键的结构相关参数。喷嘴数量不足或布局不对称，会造成烟气横截面上的温度分布不均，导致同一批次产品内部质量差异。喷嘴距离过远，反应已过度进行；距离过近，则高温可能损坏喷嘴本身。水雾粒径过大，蒸发吸热慢，冷却效果差；粒径过小，则可能被气流直接带走，未能充分参与换热。因此，急冷段的结构优化，核心在于实现空间上和时间的双重精准控制。

### 3 面向高性能炭黑生产的反应炉结构优化策略

基于以上对结构-性能关系的剖析，我们可以提炼出一套系统性的结构优化策略。

#### 3.1 优化目标的再定义

传统的优化往往只关注单一目标，如最大化收率。然而，在现代炭黑工业中，我们需要一个多目标协同的视角：（1）产品质量目标：精确控制N2SA（比表面积）、DBP吸油值（结构性）等核心指标，并保证批次间的一致性。（2）过程效率目标：最大化炭黑收率，最小化单位产品的燃料和急冷水消耗。（3）运行可靠性目标：减少结焦、挂渣等非计划停车事件，延长设备寿命。

#### 3.2 具体的结构优化方向

##### 3.2.1 燃烧室的精细化设计

传统燃烧室多采用简单的直筒结构配中心燃料喷嘴，其火焰形态和高温区分布较为固定，难以适应不同工况需求。优化方向在于引入流场主动调控机制。例如，可将一次风入口设计为切向或螺旋状通道，在燃烧室内形成稳定的强旋流场。旋流不仅能延长燃料在高温区的停留时间，提高燃尽率，还能通过离心效应将高温烟气集中于轴线区域，形成清晰的“热核”，为后续原料油的轴向喷射提供更集中的热源<sup>[3]</sup>。同时，可考虑采用分级送风结构：内层为富燃料区，用于快速点火和初始升温；外层为富氧区，用于完成深度燃烧并控制氮氧化物生成。这种分级结构通过风道隔板或环形风室的几何分隔来实现，无需复杂控制系统，却能显著改善燃烧稳定性与温度场均匀性，为炭黑裂解提供更洁净、更可控

的热环境。

### 3.2.2 喉管的柔性化设计

当前多数反应炉的喉管为固定内径，一旦建成便难以更改。这导致在切换不同品质原料油（如高芳烃油与低芳烃油）时，往往需要牺牲部分效率或产品质量。为此，可探索一种“准柔性”喉管结构。具体而言，可在喉管内壁设置一层可微调的水冷夹套，通过调节冷却水量间接改变有效流通截面；或在喉管入口处设置一组可径向微动的耐热合金导流片，通过机械联动装置在有限范围内调整喉口直径。这种设计虽不实现连续无级调节，但足以覆盖常见原料油的操作窗口。更重要的是，它赋予了反应炉更强的工况适应能力，使同一台设备能经济地生产多个牌号产品，提升资产利用率。

### 3.2.3 反应段的模块化与功能梯度化

传统的等扩张角锥形反应段对所有生长阶段施加了相同的“减速规则”，缺乏过程调控的自由度。理想的反应段应根据炭黑生成的不同阶段动态调整其“生长节奏”。为此，可将反应段划分为2-3个串联的子段，每段采用不同的扩张角。例如，第一子段（紧接喉管）采用极小的扩张角（甚至微收缩），以维持高流速和高温，确保裂解反应彻底完成并促进大量晶核形成；第二子段采用中等扩张角，允许气流适度减速，为初级粒子的碰撞聚并提供充足时间和适宜温度，从而构建高结构炭黑所需的链枝状聚集体；若需生产超高比表面积产品，则可增设第三子段，采用较大扩张角或局部扩径结构，促使温度快速下降，及时“冻结”细小粒子<sup>[4]</sup>。各子段之间通过法兰连接，便于制造、安装与未来维护更换。这种模块化思想不仅提升了控制精度，也为产品开发提供了灵活的硬件平台。

### 3.2.4 急冷系统的智能化集成

虽然急冷本身是一个终止动作，但其执行质量直接决定产品“定型”的成败。结构上，应摒弃单一环管喷淋的简单模式，转而采用多层级、多角度的立体喷淋网络。例如，在主急冷环上方5-10 cm处增设一个辅助预冷环，喷入少量细雾进行初步降温，为主急冷创造更平稳的入口

条件；主急冷环则采用交错布置的实心锥与空心锥喷嘴组合，前者用于快速吸热，后者用于增强横向混合。所有喷嘴的安装座应设计为快拆式，并预留备用接口，以便根据实际运行经验进行布局微调。此外，急冷段内壁应采用光滑过渡的流线型设计，避免任何突变或死角，防止湿炭黑在此沉积结块，确保系统长期稳定运行。

### 3.3 结构优化的系统性思维

必须强调的是，对任何一个局部结构的改动，都可能对上下游产生连锁反应。例如，加长反应段虽能增加停留时间，但也会导致出口温度更低，可能影响后续余热锅炉的效率。因此，结构优化绝非简单的“头痛医头，脚痛医脚”，而必须秉持系统工程的思想，将反应炉视为一个有机整体，追求全局最优而非局部最优。

## 4 结语

炭黑反应炉结构是其内在物理化学过程的外在呈现。本文解析燃烧室等四大核心部件功能，阐明几何特征调控流场等，影响炭黑生产传热传质效率。高性能反应炉结构设计遵循特定原则，燃烧室高效清洁输入能量，喉管瞬间均匀混合原料与热载体，反应段精确执行温度-时间历程，急冷段毫秒级精准终止反应。未来反应炉结构优化将更精细化、柔性化、智能化，这要求工程师有扎实知识及跨尺度、系统性设计理念。不断深化对“结构-过程-产品”链条的理解，炭黑制造业有望在保证产品质量时，大幅降低资源消耗与环境影响，迈向高质量发展新阶段。

### 参考文献

- [1]陈涛,新型金属反应炉在炭黑生产中的研发与应用.甘肃省,嘉峪关大友嘉能精碳科技股份有限公司,2023-01-05.
- [2]袁景彬,李岗领,刘江红.双切线软质炭黑反应炉内运动状态研究[J].广州化工,2022,50(23):163-164.
- [3]陈炳宏,周慧勤,王治安,等.白炭黑反应生产工艺设计浅析[J].流程工业,2025,(01):54-57.
- [4]李良良,王敏,燕增峰.炭黑生产过程中的节能降耗分析[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(19):33-34.