

# Formation mechanism and control method of slag layer in compressed gas flow bed gasification process

Yao Luo

National Energy Group Xinjiang Hami Energy Chemical Co., Ltd., Hami, Xinjiang, 839000, China

## Abstract

Against the backdrop of continuously increasing global energy demand and increasingly stringent environmental requirements, clean and efficient conversion of coal has become a key issue in the energy sector. The pressurized fluidized bed gasification process, with its significant advantages of high carbon conversion rate, excellent gas quality, and low pollutant emissions, occupies an important position in the modern coal chemical industry and is one of the core technologies for achieving clean utilization of coal. This article focuses on in-depth research on the formation mechanism and control methods of slag layer in pressurized fluidized bed gasification process. By systematically explaining the basic principles of pressurized fluidized bed gasification process, analyzing the physical and chemical processes of slag layer formation, and clarifying the influencing factors of slag layer formation. Based on the understanding of the formation mechanism, targeted slag layer regulation methods are proposed and analyzed with practical cases. The research results will help optimize the operation of pressurized fluidized bed gasification process, improve the stability and gasification efficiency of gasifier operation, and provide theoretical and practical support for clean and efficient conversion of coal.

## Keywords

pressurized fluidized bed gasification process; Formation mechanism of slag layer; Regulatory methods; Clean coal conversion

# 加压气流床气化工艺中渣层形成机制及调控方法

罗瑶

国家能源集团新疆哈密能源化工有限公司，中国·新疆哈密 839000

## 摘要

在全球能源需求持续攀升与环保要求愈发严苛的双重背景下，煤炭清洁高效转化成为能源领域的关键课题。加压气流床气化工艺凭借碳转化率高、煤气品质优良、污染物排放低等显著优势，在现代煤化工产业中占据重要地位，是实现煤炭清洁利用的核心技术之一。本文聚焦于加压气流床气化工艺中渣层形成机制及调控方法展开深入研究。通过系统阐述加压气流床气化工艺的基本原理，分析渣层形成的物理化学过程，明确渣层形成的影响因素。基于对形成机制的理解，针对性提出渣层调控方法，并结合实际案例进行分析。研究成果有助于优化加压气流床气化工艺操作，提高气化炉运行稳定性和气化效率，为煤炭清洁高效转化提供理论与实践支持。

## 关键词

加压气流床气化工艺；渣层形成机制；调控方法；煤炭清洁转化

## 1 引言

在全球能源需求量不断增加和环保意识增强的背景下，煤炭的洁净高效利用已成为当前能源研究的焦点。加压气流床气化技术因具有高的碳转化率、煤气品质好和污染物排放低等优点，被广泛用于现代煤化工领域。加压气流床气化过程中渣层的生成及演变规律直接关系到气化炉的稳定性及气化效果。合理的渣层可以起到保护气化炉壁面、减轻耐火材料腐蚀的作用；但在气化过程中，由于渣层形状或厚度的不正常，会造成气化炉结渣、堵塞等问题，从而影响到气化

过程的连续与安全，尤其当气化炉水冷盘管区域出现渣层异常时，不仅可能加剧盘管表面的结渣倾向，还可能因局部热负荷失衡导致盘管磨损或腐蚀加速，进一步威胁气化系统的稳定运行。因此，开展加压气流床气化过程中渣层生成机理与调控方法的研究，是实现气化过程工艺优化，提高气化设备运行可靠性与经济性的关键。

## 2 加压气流床气化工艺基本原理

### 2.1 工艺概述

加压气流床气化技术是将煤粉与气化剂（氧气、水蒸气）混合喷射到气化炉中，在 1200-1600℃、压力 2.5-6.5MPa 的条件下，使煤中碳氧元素转化成粗煤气（其中 H<sub>2</sub>、CO 为粗煤气的主要成分），实现煤炭的气化转化。该过程具有非常

【作者简介】罗瑶（1991-），男，中国湖南娄底人，本科，工程师，从事煤气化研究。

高的反应速率和较强的气化能力：煤粉 - 气化剂在高速流动中充分混合，增大了反应物的接触面积、提升了反应速率，从而实现快速高效的气化。同时，该工艺适用于不同煤种(包括年轻褐煤至高变质程度无烟煤)的煤气化，所得合成气品质优异，既可作为合成氨、甲醇、煤制油等化工产品的原料气，又可应用于联合循环发电等场景，还能通过废热回收等方式实现能量梯级利用，最终达成煤炭资源的高效利用与洁净转化。

## 2.2 气化炉结构与工作流程

加压气流床气化炉通常由气化室、激冷室(或废热锅炉)等部件构成。煤粉与气化剂经烧嘴喷射进入气化室，在气化室中快速点火、燃烧，发生气化反应，形成高温的合成气及炉渣。合成气是携渣下行，按照生产流程可采取激冷流，在此过程中，合成气与水直接接触，炉渣迅速降温凝固，并将合成气冷却。还可以使用废热锅炉，将合成气的热量转化为水蒸气，然后再对其进行冷却处理，蒸汽并入管网供其他用户使用。气化过程中的温度、压力及物料停留时间是影响气化反应及渣层生成的主要因素<sup>[1]</sup>。

## 3 渣层形成机制

### 3.1 渣层形成的物理化学过程

加压气流床气化是煤中矿物质在高温条件下发生的一系列物理和化学变化，并在此基础上生成熔渣。首先，煤炭里的矿物经过高温融化，变成了液体的炉渣。在气化炉中，由于气流的影响，炉渣与壁面或其它固体颗粒相互碰撞、粘附。在连续的气化过程中，不断产生新的炉渣，使附着于壁面或固体粒子上的渣层逐渐堆积而成。

从化学上讲，煤炭中的矿物组成十分复杂，有硅铝酸盐、碱金属化合物、碱土金属化合物等。在高温气化过程中，矿物间会产生化学反应，产生新的化合物。比如，硅铝酸盐与碱金属氧化物发生反应，会产生低熔点共熔物质，从而降低熔渣粘度，利于渣流及渣层的形成。此外，在气化过程中，炉渣与  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等气体组分之间还存在着一定的化学反应，进而对渣层的稳定性产生重要影响。

### 3.2 渣层形成的影响因素

#### 3.2.1 煤质特性

煤的煤质特征是影响渣层形成的重要因素。矿物质的含量、成分及熔点是影响熔渣形成的主要因素。一般而言，煤中矿物质含量愈高，其气化时生成的熔渣越多，且越易形成厚渣层。不同矿物的熔点及化学特性各不相同，如碱金属和碱土金属化合物因其熔点偏低而导致其总熔点下降，低温时即为液态，利于渣层的生成与流动。然而，高熔点矿物(如刚玉、石英等)会使炉渣粘度增大，不利于渣层均匀化。另外，煤的变质作用对渣层的生成也有一定的影响，如褐煤等新煤，其矿物质含量高、活性高，在气化时更易发生化学反应，生成的渣层特性也不同于烟煤、无烟煤等高阶煤。

#### 3.2.2 气化操作条件

气化操作条件对渣层的生成有很大的影响。高温对渣层的形成起着关键作用，高温可加速矿物的快速熔融，并可降低其粘度，从而加速渣层的流动，改善渣层分布。但是，高温易造成渣流过大，不能在炉壁上形成有效的保护渣层，还会加重耐火材料的腐蚀；低温会增加熔渣的粘性，降低其流动性，从而造成气化炉的结渣和堵塞。在一些以生物质为原料的气化生产过程中，由于初始温度设定过低，气化炉内的熔渣粘性过大，在运行短短数小时后就出现了结渣堵塞问题，致使整个气化系统被迫停止运行进行清理，给生产造成了严重的经济损失。由此可见，精准调控气化操作条件中的温度参数，对于保障渣层的合理生成、维持气化炉的稳定高效运行至关重要。

同时，压力也在一定程度上影响了渣层的形成。压力作用下，气化速度提高，合成气流速增加，气流携渣能力增加，有可能改变炉内渣的空间分布及运动轨迹，从而对渣层生成产生重要影响。另外，气化剂的成分及比例(氧水比)也会对气化过程进行程度及炉内温度场的分布产生间接的影响。比如，氧含量的提高使反应温度升高，有利于渣的生成与流动；同时，加入适当的水蒸气，可以调整炉中的温度，从而对炉渣的成分、粘度等有一定的影响。

#### 3.2.3 气化炉结构

气化炉的结构设计对渣层形成有着重要影响。气化炉的形状、大小及烧嘴设置方法对炉中气体的分布及流动状况都有一定的影响。合理的炉型设计可以实现煤粉与气化剂的有效混合，确保气化过程的充分进行，并在炉壁上形成一层均匀、稳定的渣层。如选择合理的炉型(圆柱形、锥形等)及烧嘴角度，可有效降低炉内气流偏流、旋涡等，防止渣层在局部地区过量堆积或不均匀。另外，内衬材料特性也会影响渣层 - 壁面间的粘附力及交互作用，不同耐火材料对渣层的润湿性能及抗侵蚀能力存在差异，进而影响渣层的稳定性及使用寿命<sup>[2]</sup>。

## 4 渣层调控方法

### 4.1 煤质优化调控

#### 4.1.1 配煤技术

采用配煤技术，可调节入炉煤种，改善渣层结构及性能。针对不同煤种的矿物质含量、成分及熔点，采用适当的配比进行掺混，以达到灰熔点、粘度等性能指标。比如，通过对高灰熔点和低灰熔点的煤的适当配比，可以获得合适的灰熔点，从而在气化时保持较好的流动性能，并在壁面上形成一层稳定的保护性渣层。通过合理配比，达到均衡硫、氮等其它组分，达到降低污染排放的目的。实践中，为实现渣层优化、高效利用，还需进行大量试验与资料分析，才能优选出最优配比。

#### 4.1.2 煤的预处理

同时，对原煤的预处理也是煤质优化和渣层调控的一

种有效手段。常用的预处理方法有水洗、加入助熔剂等。洗选法能有效地脱除煤炭中的一些矿物、杂质，并使其灰份下降，从而降低气化时的炉渣排放量。同时，通过洗选，可以改变煤中矿物的组成，降低有害组分（如高熔点矿物等）的生成。在煤中添加石灰石、白云石等可使煤灰熔点下降的材料。该助熔剂与煤炭中的矿物质在高温条件下发生反应，生成低熔点共熔化合物，提高了其流动性，有利于渣层的生成与控制。在合理选用助熔剂时，应充分考虑其对气化工艺及合成气品质的影响，以防止在气化过程中引入过多的杂质，或影响气化反应。

## 4.2 操作条件优化调控

### 4.2.1 温度控制

对气化温度的准确控制是实现渣层控制的关键。在实际生产过程中，应根据煤的特点，结合气化炉的工作要求，选择合理的气化温区。通过调整气化剂的流速及比例，可以有效地调控气化过程中释放出的热量，达到调控气化温度的目的。如在渣层粘度大，流动性差的情况下，可通过增大氧流量使其升温，使其粘度下降；相反，如果渣层内的流速过大，对耐火材料有一定的冲刷作用，可以减少氧的流速，或增大水蒸气的含量，从而使气化温度下降。在此基础上，通过在气化炉中安装的温度传感器，对气化过程中的温度进行实时监控，并配合先进的控制技术，精确地控制气化过程中的温度，保证渣层的质量。

### 4.2.2 压力调节

适当调整气化压力，有助于优化渣层。在一定的条件下，适当升高气化压力，可增大合成气流速，强化气相携渣能力，实现炉渣在气化炉中的均匀分配，利于形成稳定的渣层。但是，过高的压力不仅会提高装置的投资及操作费用，而且还会对气化过程及装置的密封性能产生影响。为此，应针对气化技术及装置的特性，选用适宜的气化压力，并结合实际操作中的渣层状况作相应的调整。比如，在气化炉底处出现了大量的渣层时，可适当地减小压力，降低气流对渣块的挟渣阻力，促使熔渣的排出<sup>[3]</sup>。

### 4.2.3 气化剂配比调整

对气化剂比例进行优化，可实现对渣层的有效控制。除了通过调节氧气和水蒸气的比例来控制温度外，还可以根据渣层的性质调整二者的比例。比如，在炉渣粘度高的情况下，提高水蒸气的含量，可使炉渣的粘度下降，流动性得到提高；如果需要增大气化反应速率和温度，可以适当提高含氧量。此外，还通过添加CO<sub>2</sub>等其它气化剂，研究其对渣层生成及气化的影响，探寻最佳的气化剂配比，实现对渣层的精确控制。

## 4.3 气化炉结构优化调控

### 4.3.1 炉型改进

通过对气化炉结构的改造，可以使气化炉中的气体分布得到更好的控制，进而达到最优渣层的目的。比如，通过渐扩或渐缩的炉型设计，可以实现炉内气体流动的均匀分布，降低气流偏流、旋涡等现象，防止局部区域内的熔渣过量堆积。在此基础上，通过增加导流板、折流板等装置，实现对气流与渣流方向的定向调控，促使渣层均匀化。因此，在设计新的炉型时，可采用计算机模拟与试验研究相结合的手段，综合评价各种炉型的性能，筛选出最符合渣层调节与气化技术需求的炉型。

### 4.3.2 烧嘴优化

烧嘴型式及其布局对渣层的形成有很大的影响。通过对喷嘴形状、尺寸、角度等参数的优化，进一步提高煤粉与气化剂的混合效率，实现气化过程的充分进行，并实现炉渣的均匀分布。适当地调整烧嘴组的布局，例如多个烧嘴组的对称排列，可改善炉况，避免局部高温、低温区的产生，有利于稳定地形成渣层。另外，还可以从改善烧嘴体的冷却模式、延长烧嘴体的寿命及可靠性等方面来保证气化炉的平稳运行。

## 5 结论

加压气流床气化过程中，渣层的生成受煤质特性、气化操作条件、气化炉结构等诸多因素的影响，是一项十分复杂的物理与化学过程。因此，对其形成机理进行深入研究，弄清各种因素对其的影响规律，是对其进行有效控制的前提。本文采用煤质优化、操作条件优化及炉型优化等手段，实现对渣层生成与特性的有效调控，从而提升气化炉内操作稳定性与气化效果。在生产实践中，应结合不同煤种、不同技术要求，采用不同的控制手段，形成合理的渣层调节方案。与此同时，随着我国煤化工的持续发展，对渣层的生成机理及调控方法的研究也亟待深入，探索出更为高效、环境友好的渣层处理工艺，为实现煤的洁净高效利用奠定坚实的理论基础。

## 参考文献

- [1] 刘建宇.气流床加压煤气化技术研究进展[J].山西化工,2023,43(12):36-38.
- [2] 冯宜鹏,张志萍,魏国强,等.高含氮木质废弃物加压气化含氮污染物生成研究[J].太阳能学报,2023,44(03):253-259.
- [3] 陈寅.气流床煤气化技术分析[J].化工设计通讯,2021,47(07):36-38.
- [4] 林再福,宫勋,丁茂.加压气流床煤气化单元技术及工艺选择分析[J].中国盐业,2020,(15):44-47.