

水煤浆气化炉激冷环挂渣形成机理与影响因素研究

牛 东

内蒙古伊泰煤制油有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘 要：激冷环是水煤浆气化炉关键部件，其运行稳定性影响整个气化系统。实际运行中，激冷环内壁及下降管入口常出现挂渣，严重时会导致恶性事故，是制约气化装置安稳运行的瓶颈。本文系统探究激冷环挂渣形成机理，分析关键影响因素，揭示“熔渣捕集-冷却固化-附着生长”三阶段动态演化过程。研究表明，挂渣形成是熔渣特性（如粘温特性、灰成分）、操作参数（如氧煤比、负荷、激冷水量）、设备结构（如激冷环几何尺寸、下降管倾角）及水质条件（如 pH 值、硬度、固含量）等多因素协同作用的结果。其中，熔渣临界粘度温度与实际温度场匹配度是核心内在因素，激冷环设计不合理是关键外在诱因。本文提出预防与缓解策略，为提升水煤浆气化技术可靠性与经济性提供依据和指导。

关键词：水煤浆气化炉；激冷环；挂渣；形成机理；影响因素

引言：煤炭是我国能源结构的基础，其清洁高效转化对实现“双碳”目标至关重要。水煤浆气化技术因煤种适应性强、碳转化率高等优势，成为现代煤化工核心工艺。该技术中，气化反应在高温高压下进行，生成粗合成气及大量高温液态熔渣，激冷流程被广泛用于冷却合成气、回收显热并固化熔渣。激冷环作为连接燃烧室与激冷室的关键部件，通过形成稳定水膜来淬冷高温物质并保护下降管。然而，长期运行中激冷环内部及下降管入口易形成坚硬挂渣层，初期导致激冷水量分配不均，后期可能堵塞通道，造成合成气超温、下降管烧蚀穿孔或排渣口堵塞等严重后果。挂渣问题形成机理复杂，涉及多学科交叉，目前业界认识多停留于经验层面，缺乏系统性理论支撑。因此，深入研究激冷环挂渣机理，厘清影响因素作用规律，对指导工程实践、优化设计、延长运行周期具有重要意义。

1 激冷环结构与工作原理

典型的水煤浆气化炉激冷环通常由一个环形腔室构成，上部与燃烧室底部相连，下部则与下降管（也称导气管）的入口法兰对接。激冷水从环形腔室的切向或径向入口进入，在离心力和压力驱动下，沿环形腔室内壁高速旋转，并通过一系列精心设计的开孔或缝隙，均匀地喷射到下降管的内表面上，形成一层连续、稳定的螺旋状水膜。这层水膜的主要作用有三：（1）淬冷作用：当 1400℃ 左右的高温合成气夹带着液态熔渣颗粒从燃烧室进入激冷室时，首先与这层低温（~200℃）水膜接触。剧烈的热交换使气体温度在极短时间内（毫秒级）骤降至饱和温度以下（~250℃），同时将熔渣迅速

固化。（2）洗涤作用：水膜能有效捕集成气中的细灰和未反应的碳颗粒，起到初步净化气体的作用。（3）保护作用：持续流动的水膜隔绝了高温气体与下降管金属壁面的直接接触，防止其因超温而损坏。理想状态下，所有熔渣都应被水膜捕获并随水流进入激冷室底部的渣池^[1]。然而，实际情况远比理想复杂。部分熔渣颗粒，特别是那些尺寸较大、粘性较高的颗粒，可能未能被水膜完全捕获，或者在捕获后未能及时被水流带走，从而在激冷环内壁或下降管入口的特定区域沉积下来，成为挂渣的“种子”。

2 激冷环挂渣形成机理

2.1 熔渣捕集与初始附着阶段

气化炉出口的熔渣处于过热液态，具有流动性。当这些熔渣随高速合成气流进入激冷环区域时，会遭遇两个主要的冷却介质：一是激冷环喷出的低温水膜，二是相对较冷的金属壁面。在此区域内，存在复杂的气-液-固三相流动。部分熔渣颗粒由于惯性作用，会偏离主流轨迹，撞击到激冷环内壁、下降管入口的焊缝、法兰台阶或任何微小的几何突起处。这些位置往往是流场的“死区”或低速区，湍流强度较低，不利于颗粒的再悬浮和冲刷。一旦熔渣颗粒接触到温度远低于其凝固点的金属表面，其表面会瞬间冷却并形成一层固态壳层。这层固态壳层起到了“胶水”的作用，使其牢固地粘附在壁面上，完成了挂渣的初始附着。这个阶段的成功与否，很大程度上取决于熔渣颗粒的动能、粘度以及壁面的温度和粗糙度。

2.2 冷却固化与骨架构建阶段

初始附着的熔渣层并不会立即停止生长。后续的熔渣颗粒会继续撞击到这层已有的附着物上。由于底层熔渣已经部分固化，新撞击上来的熔渣与其接触时，两者之间会发生部分熔融和融合。这种“熔渣-熔渣”的粘附力通常远大于“熔渣-金属”的粘附力，使得挂渣层能够更有效地捕获后续的熔渣颗粒。与此同时，激冷水会不断地渗透和冲刷这层新生的挂渣。但由于挂渣层内部结构复杂，可能存在微孔和裂隙，水流难以均匀渗透到其深层^[2]。这导致挂渣层呈现出一种非均匀的冷却状态：外层受水流冲刷，冷却较快，结构相对疏松；而内层靠近热源，冷却较慢，有更多时间进行晶体生长或形成更致密的玻璃体结构。这种内外结构的差异，构成了挂渣层的基本骨架。

2.3 附着生长与动态平衡阶段

随着时间的推移，挂渣层会像钟乳石一样不断向外生长。其生长速率取决于两个相反过程的竞争：一是熔渣颗粒的持续附着和沉积，这是生长的动力；二是激冷水对其的冲刷、溶解和机械剥落，这是抑制生长的因素。在大多数情况下，只要气化炉的操作条件保持稳定，挂渣层会逐渐达到一个动态平衡状态，即生长速率与剥落速率达到平衡，挂渣厚度趋于稳定。然而，一旦操作条件发生波动（如负荷大幅变化、煤质改变），或者激冷环局部流场恶化（如某个喷嘴堵塞），这种平衡就会被打破，导致挂渣加速生长。最终，当挂渣层厚到一定程度，严重阻碍了激冷水的正常流通时，便会引发前述的运行故障。

3 激冷环挂渣的关键影响因素分析

3.1 熔渣自身特性

熔渣的物理化学性质是决定其是否易于挂渣的内在根本原因。（1）粘温特性：这是最核心的指标。理想的气化用煤应产生具有“塑性”粘温特性的熔渣，即在操作温度下粘度很低（ $< 25 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ），便于流动排渣；当温度降低到一定值（临界粘度温度 T_{cv} ）时，粘度会急剧上升，迅速固化。如果煤灰的 T_{cv} 过高，意味着熔渣在离开高温区后仍能保持较长时间的低粘度状态，这使其有充足的时间和能力去润湿、铺展并牢固地粘附在相对较冷的激冷环壁面上。反之，若 T_{cv} 较低，熔渣会迅速固化成颗粒，不易形成连续的挂渣层^[3]。（2）灰成分与矿物组成：煤灰中的酸性氧化物（ SiO_2 , Al_2O_3 ）与碱性氧化物（ Fe_2O_3 , CaO , MgO ）的比例（即硅铝比和碱酸比）直接影响熔渣的熔点和粘温特性。高钙、高铁煤灰通常流

动性好，但 T_{cv} 可能较高；高硅、高铝煤灰则熔点高，流动性差。此外，灰中某些微量元素（如 Na , K , S ）的存在可能会形成低共熔混合物，改变局部区域的熔融行为，促进挂渣。（3）熔渣表面张力：表面张力决定了熔渣对固体壁面的润湿能力。表面张力越低，熔渣越容易在壁面上铺展开来，形成更大的接触面积，从而增强附着力。

3.2 操作参数

操作条件直接决定了进入激冷环区域的熔渣状态和流场环境。（1）氧煤比（ O/C ）：氧煤比是控制气化炉温度的最主要手段。提高氧煤比会提升炉温，使熔渣过热度增加，粘度降低，流动性更好，但同时也意味着离开燃烧室的熔渣携带更多热量，需要更多的激冷水来冷却。更重要的是，过高的炉温可能导致熔渣的 T_{cv} 效应被掩盖，使其在激冷环区域仍保持较强的粘附性。反之，过低的氧煤比会导致炉温不足，产生大量未熔或半熔的固态/半固态渣，这些渣粒棱角分明，更容易在激冷环处架桥、堆积。（2）气化炉负荷：负荷变化直接影响合成气流速和熔渣产量。在低负荷下，合成气流速降低，对挂渣的冲刷力减弱，同时激冷水量若未相应调整，可能导致局部水膜过厚或形成水兜，反而为熔渣沉积创造了条件。在高负荷下，虽然流速高，冲刷力强，但如果激冷水量跟不上，冷却效果不足，同样会加剧挂渣。（3）激冷水量与水质：激冷水量不足是导致挂渣恶化的直接原因。水量不足，水膜变薄甚至破裂，无法有效覆盖和冷却壁面。水质同样至关重要。硬度过高的激冷水在高温下易结垢（主要是 CaCO_3 、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ），这些水垢本身就能成为挂渣的附着基底。此外，水中的悬浮物（ SS ）也可能在低流速区沉积，与熔渣混合，加速挂渣层的形成。

3.3 设备结构与几何因素

激冷环和下降管的结构设计决定了内部流场的均匀性和稳定性。（1）激冷环开孔设计：开孔的数量、大小、角度和分布均匀性，直接决定了水膜的覆盖效果。设计不良的激冷环会产生局部干区或低流速区，这些区域极易成为挂渣的温床。例如，开孔角度不当可能导致水流直接冲击对面的壁面，形成飞溅和涡流，而非形成均匀水膜^[4]。（2）下降管入口几何形状：下降管入口与激冷环的连接方式（如是否有直段、倾角大小）会影响气流的转向和速度分布。尖锐的转角或过小的倾角会形成明显的回流区和涡流区，这些区域流速低，是颗粒沉积的理想场所。（3）制造与安装精度：焊接缺陷、法兰错边、内壁粗糙度过高等制造和安装问题，都会在微观

上创造出无数个利于颗粒捕集的“陷阱”。

3.4 其他因素

煤浆浓度与粒度分布：煤浆浓度过高或过低都会影响燃烧效率和熔渣形态。粒度过粗可能导致燃烧不完全，产生大颗粒渣；粒度过细则可能增加细灰量，影响挂渣成分。烧嘴性能：烧嘴的雾化效果和火焰稳定性决定了燃烧室内的温度场和流场均匀性。不稳定的火焰会产生局部高温或低温区，进而影响熔渣的生成和排出状态。

4 预防与缓解挂渣的对策建议

4.1 源头控制：优化煤质与配煤

严格煤质筛选：优先选用灰分低、粘温特性优良（ T_{cv} 适中）的煤种。通过实验室灰熔点测试和粘温特性测定，建立煤质数据库，为配煤提供依据。

科学配煤：对于单一煤种无法满足要求的情况，可通过配煤技术，将不同特性的煤按比例混合，以调整最终灰渣的熔融和流动特性，使其更适合气化操作。

4.2 过程优化：精细化操作与监控

精准控制氧煤比：在保证碳转化率的前提下，将炉温控制在一个既能保证熔渣良好流动性，又不至于使其 T_{cv} 过高的“甜蜜区间”。避免炉温的大幅波动。实施激冷水量的动态调节：根据气化炉负荷的变化，实时调整激冷水量，确保在任何工况下都能形成完整、有效的水膜。可以引入基于压差或温度的自动控制系统。

加强水质管理：对激冷水进行严格的软化、过滤和 pH 值调节（通常控制在 7-9），最大限度地减少结垢和悬浮物沉积的风险。

4.3 末端改进：设备结构优化

激冷环结构升级：采用计算流体动力学（CFD）模拟技术，对激冷环内部流场进行仿真，优化开孔布局 and 角度，消除涡流和低速区。可考虑采用无开孔的整体式水膜分布器或内嵌导流叶片的设计。

平滑过渡设计：将下降管入口设计成大圆弧或锥形过渡，减少气流转向带来的扰动和回流。

应用抗挂渣涂层：在激冷环和下降管入口内壁喷涂具有高导热性、低表面能（不易润湿）和耐高温腐蚀的陶瓷涂层（如 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 基涂层），从物理上阻止熔渣的附着。

4.4 在线监测与预测性维护

开发挂渣监测技术：探索利用声学、热电偶阵列或微波等非侵入式手段，对激冷环区域的挂渣情况进行在线监测。

建立挂渣预测模型：结合操作参数、煤质数据和历史运行记录，利用机器学习算法构建挂渣风险预测模型，实现从被动检修到主动预防的转变。

5 结语

水煤浆气化炉激冷环挂渣是一个由熔渣物性、操作条件、设备结构及水质环境等多因素共同驱动的复杂物理过程。其本质是在特定的温度场和流场条件下，高温熔渣被捕集、冷却、固化并附着于设备内壁的动态演化结果。本文通过系统分析，明确了熔渣的临界粘度温度（ T_{cv} ）与激冷环区域实际温度场的匹配关系是挂渣倾向的内在决定因素，而激冷环结构不合理所诱发的局部低速涡流区则是挂渣附着的关键外部诱因。解决挂渣问题不能依赖单一手段，必须采取“源头优选、过程精控、结构优化、智能预警”的综合治理策略。未来的研究应进一步深化对高温熔渣-水-金属多相界面相互作用的微观机理认识，并大力发展基于数字孪生技术的在线监测与智能诊断系统，从而为水煤浆气化技术的安全、稳定、长周期、高效率运行提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李昊. 水煤浆气化炉激冷环运行问题分析及处理[J]. 今日制造与升级, 2023, (04): 141-143.
- [2] 江明亮, 朱林军, 任德正. 浅析气化炉激冷环烧损的原因及对策[J]. 大氮肥, 2022, 45(06): 361-364.
- [3] 孙嫩霞. 气化炉激冷环结构改进[J]. 化肥设计, 2020, 58(01): 51-53.
- [4] 张亚宁, 白云波, 杜常宗. 气流床气化炉激冷环的结构分析与设计要求[J]. 煤化工, 2022, 50(06): 124-126+130.