

基于流场模拟的气化炉锥底砖冲刷磨损机理分析与防护措施研究

王亮亮

宁夏和宁化学有限公司 宁夏 银川 750411

【摘要】：气化炉锥底砖在高温、高压气流和煤气流的作用下，常常遭遇剧烈的冲刷磨损，这直接影响了设备的运行性能和使用寿命。本文基于流场模拟技术，分析了气化炉锥底砖在不同工况下的磨损机理。通过对流场特性的模拟，揭示了气流与锥底砖表面之间的相互作用关系，进而探讨了气化炉底部砖体的磨损原因。根据分析结果，提出了相应的防护措施，包括优化设计、材料选择和表面处理等方面。研究结果为提高气化炉锥底砖的耐磨性和延长使用寿命提供了理论依据。

【关键词】：流场模拟；气化炉；锥底砖；冲刷磨损；防护措施

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.032

1 气化炉锥底砖磨损的形成机理分析

1.1 锥底砖的工作环境及气流特性

气化炉的锥底砖在高温和强烈气流作用下工作，处于极端的使用环境中。炉内的气流由多个高温气体组成，其中包括煤气、氧气和蒸汽等，这些气体在气化炉中经过快速流动和混合，在锥底砖表面形成复杂的流场。气流的速度、温度和压力在不同的工况下变化较大，尤其是在锥底部区域，气流的湍流特性表现得尤为突出。由于这些高温气体的不断冲击，锥底砖表面不断受到强烈的气流冲刷^[1]。在这种环境下，气流携带的固体颗粒、氧化物等杂质与锥底砖表面发生碰撞、摩擦，从而导致表面的微观损伤。这些冲击磨损作用长期积累，最终使得锥底砖表面逐渐退化，影响其稳定性和耐用性。不同的气流特性，如气流的速度分布、温度梯度和湍流程度，会显著影响磨损的速率和形式。

1.2 锥底砖表面与流体的相互作用

锥底砖的表面在与气体流体的接触过程中，气流的流动特性直接影响到表面材料的磨损。气体的运动不仅伴随高速的碰撞，还包括微小颗粒的摩擦，这些颗粒往往含有高温氧化物和煤灰等，能够加剧与锥底砖表面的接触磨损。随着气流速度的提升，气流对锥底砖表面的冲击作用变得更为剧烈，从而促进了磨损的形成。气流的湍流特性也使得与表面的相互作用变得更加复杂。不同的湍流强度会导致气体在锥底砖表面产生更为复杂的流动模式，形成局部的高压区和低压区，这些变化加速了砖体材料的表面剥落。此外，气流中可能包含的化学成分，如酸性气体或高温气体，也可能对锥底砖表面产生腐蚀性作用，这与流体动力学相结合，进一步加剧了材料的磨损和损坏。

1.3 锥底砖磨损的主要因素分析

锥底砖的磨损主要来源于外部气流的冲刷作用，但在这个过程中，许多内外部因素共同作用，加剧了磨损现象。气流的速度、温度和流态是影响磨损程度的重要因素。在高速气流和高温环境中，锥底砖表面受力较大，磨损速率较快。气体中携带的固体颗粒对磨损的加剧起到了催化作用，特别是在煤气化

过程中的固体颗粒，增加了冲刷的强度。此外，锥底砖的材质和表面结构在磨损过程中也起着决定性作用。某些高温耐磨材料在特定的气流条件下可能表现出较强的抗磨损能力，而某些材料则容易出现脆性断裂或表面脱落现象，导致磨损加剧。气化炉的操作条件，如炉温波动、气流分布不均等，也对锥底砖的磨损产生影响。在不同的工作条件下，气化炉底部的气流特性及其与锥底砖的相互作用会不断变化，从而使得磨损机制更加复杂多样。

2 流场模拟技术在气化炉中应用的研究方法

2.1 流场模拟的基本原理与方法

流场模拟技术通过数学模型和数值计算方法，模拟流体在气化炉内部的运动状态、速度分布、压力变化以及温度场等物理量。该技术主要依靠流体力学中的连续介质假设，运用控制方程（如 Navier-Stokes 方程）来描述流体的运动规律。在气化炉的应用中，流场模拟常用的是 CFD（计算流体动力学）方法，这种方法能够详细描述气流的三维运动，预测气流与炉体之间的复杂相互作用^[2]。通过对流体的湍流、传热和化学反应过程进行精确模拟，能够揭示气化炉内不同区域的流动特性及其对锥底砖表面产生的影响。在气化炉中，由于气流具有较高的速度和复杂的流动模式，因此流场模拟能够帮助研究者更好地理解流体流动与热量分布对设备磨损的影响，从而为防护措施的提出提供理论依据。

2.2 模拟模型的构建与参数设置

为了实现气化炉内流场的准确模拟，需要构建一个适用于该设备的数学模型。气化炉的模型通常采用三维几何模型，精确再现炉内的空间结构，包括炉壁、底部砖体、燃烧区和气流进出口等。模型构建时，需考虑到炉内复杂的流动特性，如湍流、旋涡等，并根据气化炉的实际工况，选择合适的湍流模型（如 $k-\epsilon$ 模型或 RNG $k-\epsilon$ 模型）。在此基础上，设置适当的边界条件和初始条件，如进气流速、气流温度、压力等。参数设置的合理性直接影响模拟结果的准确性，因此，所有输入参数需要根据实验数据或者历史数据进行校正，以确保模型的可

靠性。此外，模拟过程中还需要考虑化学反应的影响，特别是在气化过程中，气体的组成和反应速率对流场的变化起到了重要作用。合理的模型构建与精准的参数设置为后续的流场分析和磨损研究提供了坚实的基础。

2.3 模拟结果的验证与分析

模拟结果的验证是流场模拟过程中的关键步骤之一，只有通过与实际实验结果或已有数据进行对比，才能判断模型的准确性。为了验证流场模拟的可靠性，通常需要进行一系列实验测试，如测量炉内气流速度、温度分布等物理量，并与模拟结果进行比对。若模拟结果与实验数据的吻合度较高，说明所构建的流场模型和参数设置是合理的。此外，还可以通过敏感性分析来检查模型中不同参数对模拟结果的影响，进一步确保模型的鲁棒性。在分析模拟结果时，研究者会重点关注气流在不同炉区的分布情况，特别是气化炉底部区域的流动特性，如气流的速度场、压力场和温度场等，分析这些流动特性与锥底砖磨损之间的关系。通过流场模拟，可以揭示出不同气流工况下的磨损机理，为提出有效的防护措施提供数据支持和理论依据。

3 气化炉锥底砖冲刷磨损的关键机理

3.1 高温气流对砖体的冲击作用

在气化炉中，高温气流以高速撞击锥底砖表面，产生强烈的冲刷效应。气化炉内的气流温度通常可达到1300℃，且气流速度较高，这些高温气流携带着大量的热量与动能。当气流冲击锥底砖时，不仅是对表面的物理冲击，还带来热传导作用。高温的气流使砖体表面局部加热，导致砖体材料的膨胀与收缩，增加了表面微裂纹的产生^[1]。随着冲击次数的积累，这些微裂纹逐渐扩展并进一步削弱了砖体的结构稳定性。此外，气流的反复冲击还可能引发表面剥落现象，导致砖体的磨损不断加剧。高温气流对锥底砖的冲击作用是气化炉底部砖体损坏的一个重要因素，它直接影响了砖体的耐久性和气化炉的运行效率。

3.2 微观层面的磨损机制

气化炉锥底砖的磨损不仅是宏观冲击的结果，微观层面的磨损机制同样起着决定性作用。气流中的固体颗粒、煤灰和氧化物等微小物质在高速气流的作用下，与锥底砖表面发生摩擦，这些微小颗粒的冲击可以导致砖体表面物质的微观剥离。当这些固体颗粒撞击到砖体表面时，会造成材料的塑性变形和表面疲劳破坏。随着磨损的进行，表面会逐渐形成一些微小的凹陷或微裂纹，这些微观损伤逐渐累积，最终可能导致砖体的片状剥落或深度裂纹扩展，进一步加速了磨损的过程。在高温环境下，表面材料的硬度和韧性也会发生变化，导致砖体更容易受到微观冲击的损害。微观磨损机制不仅加速了砖体的退化，还对气化炉的长期运行产生了深远的影响。

3.3 影响磨损程度的关键因素

气化炉锥底砖的磨损程度受多个因素的共同作用。气流的温度和速度是最直接的影响因素，温度越高，气流的动能和热能越大，冲击作用就越强，从而导致更严重的磨损。气流速度的提升同样意味着砖体表面所受的冲击频率增加，磨损速率也随之提高。此外，气流中的固体颗粒和化学成分对磨损的影响不可忽视，尤其是在气化炉中，煤气、氧化物和灰尘等颗粒物在高速气流中悬浮，这些颗粒物在流动过程中会不断地与锥底砖表面发生接触，进而加剧磨损。砖体的材质特性也是影响磨损程度的重要因素，不同的材料硬度、抗氧化性和耐高温性能决定了砖体的抗磨损能力。气化炉的操作条件如炉温、气流分布以及煤气成分的变化，都对磨损程度产生影响。当炉内气流分布不均匀或操作条件波动较大时，某些区域的磨损可能会更加严重。因此，这些关键因素的综合作用决定了锥底砖的整体磨损程度及其使用寿命。

4 防护措施的提出与应用实践

4.1 锥底砖材料的优化与选择

气化炉锥底砖的材料选择对其耐磨性和抗冲击能力至关重要。在气化炉高温、高压的工作环境下，选用具有较高耐热性、抗氧化性和耐腐蚀性的材料能够有效延长锥底砖的使用寿命。例如，高铝砖、硅砖及一些高温陶瓷材料因其优良的抗热震性和耐磨损性能，成为气化炉锥底砖的理想选择^[4]。为了进一步提升锥底砖的耐磨性，可以采用增强复合材料，如加入耐高温金属氧化物颗粒或其他耐磨成分，通过改善材料的结构和提高其硬度来抵抗气流的冲刷。此外，在材料的选择上，还需要考虑其热膨胀系数与气化炉温度波动的适应性，避免因温度变化而导致砖体的热应力破裂。材料优化不仅能够增强锥底砖的使用耐久性，还能够减缓磨损的速度，提高气化炉的长期运行效率。

4.2 锥底砖表面处理技术

对锥底砖进行表面处理能够显著提高其抗磨损能力和抗腐蚀性能。常见的表面处理方法包括热喷涂技术、激光熔覆、陶瓷涂层等。这些表面处理技术能够在锥底砖表面形成一层坚硬的保护膜，有效减少气流对砖体的直接冲刷。热喷涂技术通过将金属或陶瓷粉末喷涂到砖体表面，形成一层致密且具有良好的耐磨性的涂层，这可以显著提高砖体的表面硬度和耐腐蚀性。激光熔覆技术则利用激光加热将金属粉末熔化并沉积在表面，形成高硬度的合金层，具有极好的耐磨损效果。此外，陶瓷涂层能够有效抵抗气流中的固体颗粒冲击，提升砖体的表面光滑度，从而减少磨损。这些表面处理方法能够大幅度延长锥底砖的使用寿命，并有效降低气化炉的维护成本。

4.3 结构设计的优化与防护策略

气化炉锥底砖的结构设计优化是提高其耐磨性的另一重

要措施。在设计阶段,可以根据流场模拟结果调整锥底砖的几何形状,优化气流的分布,减少局部气流的过度冲刷。例如,通过改善锥底砖的形状,使气流在流动过程中更加均匀,避免气流速度过高的区域集中作用于某些特定部位,从而减轻磨损。为了进一步提高锥底砖的抗磨损性能,还可以在结构设计中引入耐磨衬层或增加砖体的厚度。此外,采用可更换或可修复的模块化设计也是一种有效的防护策略,能够在砖体发生局部磨损时,快速更换或修复受损部件,减少气化炉的停机时间,提高整体效率。综合运用结构设计优化与防护策略,可以最大限度地降低气化炉锥底砖的磨损速率,确保气化炉的稳定运行和延长设备的使用周期。

5 流场模拟分析在气化炉维护中的实际意义

5.1 模拟结果对气化炉运行优化的指导作用

流场模拟为气化炉的运行优化提供了科学依据。通过对气化炉内部气流的精确模拟,可以详细了解不同工况下的气流分布、温度场、压力场等参数。这些模拟结果有助于识别气流冲刷最为严重的区域,并揭示气流与炉壁、锥底砖之间的相互作用,从而为调整气化炉的运行参数提供理论支持^[5]。通过模拟结果,操作人员可以优化气流的速度和温度分布,避免过度的局部冲刷和热应力集中,从而减少设备的磨损和损坏。此外,模拟结果还可以帮助预测在不同操作条件下的炉体稳定性,为提高气化炉的整体效率和延长其使用寿命提供有效的优化方案。通过流场模拟,气化炉的运行可以更加精确和高效,减少了不必要的能源浪费和设备故障。

5.2 防护措施对气化炉耐用性的提升效果

流场模拟在分析气化炉锥底砖磨损机理时,能够为防护措施的制定提供有效依据。模拟结果可以揭示出不同防护措施对气化炉耐用性提升的具体效果。例如,通过对不同材料的耐磨

性进行模拟,可以确定最适合气化炉锥底砖的材料,进一步优化其耐热性、抗冲击性及抗腐蚀性能。此外,表面处理技术的应用效果也可通过模拟得以预测,帮助选择最佳的涂层技术或材料来延缓磨损。流场模拟还可以帮助评估结构设计优化后的效果,确保新设计能够有效分散气流压力,减少高温气流对砖体的集中冲刷。通过这些防护措施,气化炉的耐用性大幅提高,不仅延长了设备的使用周期,还降低了维修成本和停机时间,提升了气化炉的经济性和安全性。

5.3 流场模拟在设备维护与管理中的应用价值

流场模拟在气化炉设备维护与管理中的应用价值不可忽视。借助流场模拟,维护团队可以在实际设备出现问题之前,通过模拟分析提前识别潜在的故障点。模拟技术能够帮助监测气化炉内气流分布的变化,发现气流不均或局部冲刷过度的区域,从而为维护人员提供精准的维护指导。例如,通过定期的流场模拟,管理人员可以掌握气化炉内部气流和温度变化的趋势,及时发现设备的磨损或老化迹象,制定预防性维护计划,避免突发故障发生。流场模拟还可用于设备管理中的资源调配和运营策略优化,通过分析不同运行模式对设备磨损的影响,为设备的改进和更新提供数据支持。整体而言,流场模拟不仅增强了设备的预测性维护能力,还提升了气化炉的管理效率,保障了设备的长期稳定运行。

6 结语

气化炉锥底砖的磨损问题直接影响到设备的运行效率和使用寿命。流场模拟技术为分析气化炉内气流与砖体表面之间的相互作用提供了重要支持,帮助识别磨损机理并优化防护措施。材料选择、表面处理技术以及结构设计的优化都能显著提高锥底砖的耐用性。流场模拟不仅有助于气化炉的运行优化,还能在设备维护与管理中发挥重要作用,提升整体效率,降低维修成本,确保设备长期稳定运行。

参考文献:

- [1] 杜常宗,张镓铄,张亚宁,等.气化炉下降管及上升管结构激冷室多相流场模拟[J].洁净煤技术,2025,31(S1):331-336.
- [2] 周晴晴,申玲,马洋洋.冷氢化反应器硅粉进料管冲刷磨损特性数值计算[J].石化技术,2025,32(01):25-27.
- [3] 陈琳伟,冯辉彬,陈雷,等.气液固多相流条件下球阀冲刷腐蚀磨损特性研究[J].机床与液压,2024,52(15):185-191.
- [4] 周钱,钱进,王康,等.超超临界锅炉水冷壁近壁面颗粒特性及冲刷磨损研究[J].智能计算机与应用,2024,14(05):136-143.
- [5] 鲍金源,淡树林,刘克存,等.高温熔渣对水煤浆气化炉锥底砖侵蚀机理[J].洁净煤技术,2023,29(S2):624-628.