

脱硫系统浆液循环泵磨损机理与延寿技术研究

单俊洁 陈新昊

华电潍坊发电有限公司 山东潍坊 261000

DOI: 10.12238/ems.v7i11.16051

[摘要] 在燃煤电厂湿法脱硫系统中, 浆液循环泵作为核心设备, 长期处于高浓度、高氯离子、含固量且呈酸性的恶劣工况, 其过流部件(如叶轮、蜗壳、前后护板等)面临严重的磨损问题。本文深入剖析了浆液循环泵的主要磨损机理, 包括冲蚀磨损、气蚀损坏、腐蚀磨损及其协同效应。研究表明, 这些磨损机理相互作用, 显著影响泵的运行效率、可靠性和使用寿命, 导致维护成本大幅增加。基于对磨损机理的分析, 本文从材料升级、结构优化、表面工程技术、运行维护策略四个维度, 提出了全面的延寿技术方案。通过案例分析验证, 采用高铬耐磨合金、双相不锈钢、优化水力模型、加装耐磨涂层以及实施精细化运行维护等措施, 可有效将泵的大修周期延长 1-2 倍, 具有显著的经济效益和推广价值。

[关键词] 脱硫系统; 浆液循环泵; 磨损机理; 延寿技术; 冲蚀磨损; 气蚀损坏; 腐蚀磨损

一、引言

(一) 研究背景

湿法石灰石-石膏脱硫工艺凭借其高效的脱硫效率, 已成为燃煤电厂控制二氧化硫排放的主流技术。在该工艺中, 浆液循环泵扮演着至关重要的角色, 被誉为“FGD 系统的核心”。它负责将吸收塔内的浆液不断循环输送, 使其与烟气充分接触, 从而实现脱硫目的。

然而, 浆液循环泵的工作环境极为恶劣。其输送的介质是高浓度的酸性浆液, pH 值通常在 4-6 之间, 其中含有大量的氯离子、硫酸根离子等腐蚀性成分, 同时还夹杂着石膏、飞灰等固体颗粒。在这种极端工况下, 浆液循环泵极易发生磨损现象。磨损不仅会导致泵的效率下降, 增加能耗, 还会引发频繁的故障停机。据统计, 浆液循环泵的备件费用和维护成本在整个脱硫系统维护费用中占比极大, 给电厂的正常运营带来了沉重的经济负担。

(二) 研究意义

深入研究浆液循环泵的磨损机理, 对于开发有效的延寿技术具有重要的理论依据。通过揭示磨损的本质, 能够为制定针对性的防护措施提供科学指导, 从而保障脱硫系统的安全、稳定、高效运行。

同时, 提出经济有效的解决方案, 可显著降低电厂的运营维护成本, 提高企业的经济效益。此外, 确保脱硫系统的稳定运行, 有助于减少二氧化硫等污染物的排放, 提高环保可靠性, 符合当前绿色发展的要求。

(三) 国内外研究现状

国内外学者和企业针对渣浆泵的磨损问题开展了大量研究, 并在耐磨材料、水力设计、表面工程等领域取得了一定的进展。

在耐磨材料方面, 高铬铸铁、双相不锈钢等材料因其优异的耐磨和耐腐蚀性能, 已被广泛应用于渣浆泵的制造。同

时, 高分子材料如超高分子量聚乙烯、橡胶等也在一些特定工况下得到了应用。

在水力设计方面, 通过优化泵的流道结构、叶轮形状等, 可有效降低浆液在泵内的流动阻力, 减少冲蚀和气蚀的发生。例如, 采用扭曲叶片设计能够改善流场分布, 提高泵的运行效率。

在表面工程技术领域, 热喷涂、激光熔覆等技术被用于在泵的过流部件表面形成耐磨涂层, 以提高其抗磨损能力。这些技术的应用在一定程度上延长了渣浆泵的使用寿命。

尽管国内外研究取得了不少成果, 但针对燃煤电厂湿法脱硫系统中浆液循环泵的特定工况, 仍有许多问题需要进一步研究和解决, 以开发出更适合的磨损防护技术。

二、浆液循环泵磨损机理分析

浆液泵的磨损是一个复杂的过程, 涉及多种磨损机制的共同作用, 主要包括冲蚀磨损、气蚀损坏、腐蚀磨损以及它们之间的协同效应。

(一) 冲蚀磨损

冲蚀磨损是浆液循环泵最主要的磨损形式之一。其机理是浆液中的固体颗粒(主要是石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、未反应的石灰石 CaCO_3 以及粉煤灰等)在高速流动的过程中, 对泵的金属表面产生冲刷、切削和撞击作用。

在叶轮出口、蜗壳隔舌等部位, 由于浆液流速高且方向改变剧烈, 固体颗粒对金属表面的冲击作用尤为明显, 容易形成沟槽、凹坑和穿孔等磨损痕迹。

冲蚀磨损的程度受到多种因素的影响。颗粒的硬度越高、形状越尖锐, 对金属表面的切削和撞击能力就越强, 磨损就越严重; 颗粒浓度越高、粒径越大, 单位时间内与金属表面接触的颗粒数量就越多, 磨损量也会相应增加; 浆液的流速是影响冲蚀磨损的关键因素, 磨损量与流速的 3 次方甚至更高次方成正比, 流速的微小增加都可能导致磨损量的大幅上

升;此外,颗粒的冲击角度也会对磨损程度产生影响,一般来说,冲击角度在 30° - 90° 之间时,冲蚀磨损最为严重。

(二) 气蚀损坏

气蚀损坏是由于泵内局部压力低于该温度下浆液的饱和蒸汽压时,液体发生汽化产生气泡。这些气泡随流体运动到高压区时,会骤然溃灭,产生极高的微射流和冲击波。这些微射流和冲击波反复冲击金属表面,导致材料疲劳剥落,从而形成气蚀损坏。

气蚀损坏的表现形式为金属表面出现蜂窝状或海绵状的孔洞群,多发生在叶轮进口、叶片背面等低压区域。

影响气蚀损坏的因素主要包括进口压力、浆液温度、叶轮进口设计以及泵的安装高度等。进口压力越低,越容易导致局部压力低于浆液的饱和蒸汽压,从而引发气蚀;浆液温度升高,其饱和蒸汽压也会升高,增加气蚀发生的可能性;叶轮进口设计不合理,如进口流速过高、流道突然扩大或缩小等,会导致局部压力降低,促进气蚀的产生;泵的安装高度过高,会使泵的净正吸头(NPSHa)小于必需汽蚀余量(NPSHr),从而引发气蚀。

(三) 腐蚀磨损(化学腐蚀与电化学腐蚀)

腐蚀磨损是化学腐蚀和电化学腐蚀共同作用的结果。

化学腐蚀是指浆液中的 Cl^- 、 F^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子以及低 pH 环境对金属基体产生的化学侵蚀,破坏金属表面的保护膜,使金属不断被腐蚀溶解。

电化学腐蚀则是由于介质中形成了原电池效应。在金属材料中,由于成分不均、存在应力差异等原因,会形成不同的电极电位。在腐蚀性介质中,这些不同的电极之间会发生电化学反应,导致金属的溶解加速。

腐蚀磨损的协同效应十分显著。腐蚀会软化金属表面,使其更容易被颗粒冲蚀掉;而冲蚀又会不断剥除金属表面的腐蚀产物,暴露出新鲜的金属表面,加速腐蚀过程。这种“ $1+1>2$ ”的协同效应是导致浆液循环泵磨损加剧的主要原因之一。

(四) 磨损形貌与位置特征

浆液循环泵不同部位的磨损形貌和位置具有一定的特征。

叶轮是磨损较为严重的部件之一。叶片工作面主要受到冲蚀磨损,在高速流动的浆液中,固体颗粒不断冲击叶片工作面,形成沟槽和凹坑;叶轮进口边同时受到气蚀和冲蚀的作用,容易出现蜂窝状孔洞和磨损痕迹;叶片背面则主要发生气蚀损坏,形成海绵状的孔洞。

蜗壳和护套的隔舌部位由于受到高速浆液的冲刷,磨损较为严重,容易出现沟槽和磨损变形;volute 内壁也会受到浆液的冲刷和腐蚀,产生一定程度的磨损。

前护板和后护板与叶轮配合的间隙处,由于高速泄漏流

的冲蚀作用,容易出现磨损,导致间隙增大,影响泵的运行效率。

三、浆液循环泵延寿技术研究

基于对浆液循环泵磨损机理的深入分析,要实现泵的延寿,需要从多个方面采取综合措施,包括材料升级、结构设计与水力优化、表面工程技术以及运行与维护优化等。

(一) 材料升级技术

选择合适的耐磨耐蚀材料是延长浆液循环泵使用寿命的关键。目前常用的材料主要有以下几种:

高铬铸铁如 Cr27,具有较高的硬度,耐磨粒磨损性能极佳,适用于浆液中固体颗粒硬度较高、磨损较为严重的工况。但高铬铸铁的韧性较差,对大颗粒撞击和气蚀较为敏感,在使用过程中容易出现断裂等问题。

双相不锈钢如 CD4MCu、2205,具有优异的耐氯离子点蚀和应力腐蚀开裂能力,韧性好,适用于腐蚀性强、磨粒较软的工况。但其硬度相对较低,在高磨损工况下的使用寿命相对较短。

高分子材料如超高分子量聚乙烯(UHMW-PE)、橡胶(如天然橡胶),具有良好的弹性和耐磨性,尤其适合吸收颗粒冲击能,可有效减轻冲蚀磨损。但高分子材料不耐高温,在较高温度的浆液中容易老化失效。

在材料选择时,应根据具体的浆液特性,如 Cl^- 浓度、pH 值、含固量、颗粒硬度等,进行综合考虑,选择性价比最高的材料。

(二) 结构设计与水力优化

通过优化泵的结构设计和水力参数,可以有效减少磨损的发生。

降低流速是减少冲蚀磨损的有效措施。在满足扬程和流量要求的前提下,适当加大流道口径,降低设计流速。例如,将叶轮出口流速从 28m/s 降至 23m/s,可大幅降低冲蚀速率,因为磨损量与速度的 3 次方甚至更高次方成正比。

优化叶型设计采用高效、低脉流的扭曲叶片设计,能够改善泵内的流场分布,减少涡流和脱流现象的发生,从而降低气蚀发生的概率。

减少流道中的锐角,将流道设计得平滑顺畅,避免急转弯和尖锐过渡,可降低浆液在流动过程中的局部阻力,减少冲蚀磨损。

(三) 表面工程技术

表面工程技术是提高浆液循环泵过流部件耐磨性和耐腐蚀性的有效手段,主要包括耐磨涂层和表面改性等。

耐磨涂层方面,碳化钨热喷涂(WC-Co)具有极高的硬度和优异的耐磨粒磨损性能。采用超音速火焰喷涂(HVOF)技术,可以使涂层致密,结合强度高,能够有效保护金属表面

免受磨损。陶瓷涂层如 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 ，硬度高，耐化学腐蚀性好，适用于腐蚀性较强的工况。

表面改性技术中，激光熔覆技术是一种较为先进的方法。它将耐磨合金粉末（如 Ni 基 + WC）与基体表面一起熔化，形成冶金结合的熔覆层。该熔覆层厚度大，结合力极强，能够显著提高部件的使用寿命。

这些表面工程技术主要用于易损件的表面强化和旧件修复，具有较高的性价比。

（四）运行与维护优化

科学合理的运行与维护策略对于延长浆液循环泵的使用寿命至关重要。

保证良好的工况，严格控制石灰石粉粒度、浆液浓度、pH 值等参数在设计范围内。石灰石粉粒度越小，浆液反应越充分，可减少固体颗粒对泵的磨损；浆液浓度过高，会增加泵的运行负荷和磨损程度；pH 值控制不当，会加剧腐蚀磨损。

预防气蚀的发生，定期检查入口滤网，防止滤网堵塞导致进口压力降低；确保吸入侧管路密封良好，避免漏气，以维持进口压力的稳定；监测泵的振动和噪音，早期发现气蚀迹象，并及时采取措施进行处理。

定期旋转备泵，避免浆液在停泵时沉积固结，造成启动困难或叶轮不平衡。备泵的定期运行还可以及时发现潜在问题，确保其在需要时能够正常投入使用。

采用状态检修方式，通过振动分析、性能监测等手段，实时掌握泵的运行状态，预测磨损情况，制定计划性停机检修方案，避免突发故障造成的损失。

四、案例分析

（一）案例一：某 600MW 电厂

该电厂的浆液循环泵原采用普通 Cr 铸铁叶轮，由于其耐磨性能有限，在恶劣的工况下，叶轮的使用寿命仅为 6-8 个月，频繁的更换不仅增加了维护成本，还影响了脱硫系统的稳定运行。

为解决这一问题，电厂采用了 HVOF 喷涂碳化钨涂层的叶轮和护板。碳化钨涂层具有极高的硬度和优异的耐磨性能，能够有效抵抗浆液中固体颗粒的冲蚀磨损。

经过改造后，叶轮和护板的使用寿命延长至 18 个月以上，检修费用降低了 40%，显著提高了电厂的经济效益和脱硫系统的运行稳定性。

（二）案例二：某沿海电厂（ Cl^- 浓度高）

该沿海电厂由于地理位置的原因，浆液中 Cl^- 浓度较高，采用高铬铸铁叶轮时，腐蚀磨损现象严重，叶轮甚至出现了脆性断裂，严重影响了泵的正常运行。

针对这一情况，电厂改用了 CD4MCu 双相不锈钢叶轮。CD4MCu 双相不锈钢具有优异的耐氯离子腐蚀性能，能够在高

Cl^- 浓度的环境下保持良好的稳定性。

运行 24 个月后发现，叶轮仅出现均匀磨损，无腐蚀坑和裂纹，预计使用寿命可达 3 年，有效解决了高 Cl^- 浓度工况下的腐蚀磨损问题。

五、结论与展望

（一）结论

浆液循环泵的磨损是冲蚀、气蚀和腐蚀等多种机理耦合作用的结果，它们之间的协同效应显著，加剧了泵的磨损程度。

要实现浆液循环泵的延寿，是一项系统工程，需要结合材料升级、结构设计与水力优化、表面工程技术以及运行维护等多个方面进行综合治理。

采用高性能耐磨耐蚀材料（如高铬合金、双相钢）和先进的表面工程技术（如 HVOF 喷涂、激光熔覆）是当前延长浆液循环泵使用寿命最有效、最经济的手段。

精细化的运行维护对保障泵的长期稳定运行至关重要，能够及时发现和解决潜在问题，减少故障停机时间。

（二）展望

未来，在浆液循环泵磨损机理与延寿技术研究方面，还有以下几个发展方向：

新材料开发方面，金属基复合材料（MMC）、非晶合金涂层等具有优异的力学性能和耐磨耐蚀性能，有望在浆液循环泵上得到应用，进一步提高泵的使用寿命。

智能运维方面，利用大数据和 AI 算法，建立泵的健康状态预测与预警系统，实现智能诊断和预见性维护。通过对泵的运行参数、振动、温度等数据的实时监测和分析，能够提前预测泵的磨损状态和故障风险，及时采取维护措施，提高设备的可靠性和运行效率。

同时，还需要进一步深入研究磨损机理的协同作用，开发出更加针对性的防护技术，为浆液循环泵的长期稳定运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 芮锦勇. 脱硫浆液循环泵振动问题分析与处理[J]. 机电技术, 2024, (06): 91-94. DOI: 10.19508/j.cnki.1672-4801.2024.06.019.
- [2] 曾会华. 石灰石-石膏湿法脱硫系统设备腐蚀等问题浅析及防范措施[J]. 化工管理, 2014, (32): 161-163+165.
- [3] 严萍, 邢莉霞. 电厂脱硫系统运行中遇到的问题及对策[J]. 能源与环境, 2013, (05): 101-102.
- [4] 岳海, 张劲松, 李继宏, 等. 脱硫浆液循环泵叶轮磨损问题分析[J]. 华北电力技术, 2012, (04): 67-70. DOI: 10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2012.04.011.
- [5] 黄积业. 脱硫浆液循环泵压力下降原因分析及处理[J]. 热力发电, 2010, 39 (05): 87-89.