

沙钢活性焦解析塔腐蚀分析及操作改进实践

邵久刚¹, 毛瑞¹, 苏航¹, 张涛¹, 李先祥², 张涛涛²

(1. 江苏省(沙钢)钢铁研究院,江苏 张家港 215625;2. 江苏沙钢钢铁有限公司,江苏 张家港 215625)

摘要:针对解析塔列管频繁出现的腐蚀问题,本文对腐蚀区域列管的内外部形貌、成分进行了分析研究,并结合解析工艺流程特点和高温氯腐蚀机理,确定了沙钢解析塔加热段列管的腐蚀过程,认为冷凝腐蚀是加热段列管出现腐蚀的诱因,高氯粉尘堆积在列管表面生成低熔点共熔体是加速列管腐蚀的关键。在腐蚀研究明确之前,沙钢活性焦解析塔曾连续出现两次使用不足6个月即出现腐蚀漏风的情况,导致活性焦解析效果差影响烟气净化效果,最后活性焦和烧结机均被迫进行了长时间的停机检修。在明确腐蚀过程之后,基于腐蚀机理对实际操作中存在的问题进行了分析,通过实施加装筛分装置、氮气流量精确控制、稳定和提高了抽气段负压以及机头灰外排等操作,彻底解决了加热段列管腐蚀问题。

关键词:活性焦; 解析塔; 加热段列管; 腐蚀机理

中图分类号:X757

文献标志码:A

文章编号:1000-8764(2025)02-0135-08

doi:10.13403/j.sjqt.2025.02.035

Corrosion analysis and operation improvement practice of Shagang activated coke parsing towers

SHAO Jiugang¹, MAO Rui¹, SU Hang¹, ZHANG Tao¹, LI Xianxiang², ZHANG Taotao²

(1. Research Institute of Iron and Steel of Jiangsu Province (Shagang), Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China;

2. Jiangsu Shagang Steel Co., Ltd., Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the frequent corrosion problems of the parsing towers row tubes, the internal and external morphology and composition of the row tubes in the corrosion area are analyzed and studied, and the characteristics of the parsing process and the high-temperature chlorine corrosion mechanism are combined to determine the corrosion process of the heating section of the parsing towers, and believe that condensation corrosion is the cause of corrosion in the heating section row tubes, and the accumulation of high-chlorine dust on the surface of the row tubes to form a low melting point eumelt is the key to accelerate the corrosion of the row tubes. Before the corrosion study is clear, the activated coke parsing towers of Shagang has two consecutive cases of corrosion and air leakage after less than 6 months of use, resulting in poor active coke parsing effect and affecting the gas purification effect, and finally the activated coke and sintering machine are forced to shut down for a long time. After clarifying the corrosion process, the problems existing in the actual operation are analyzed based on the corrosion mechanism, and the corrosion problem of the heating section is completely solved by installing a screening device, accurately controlling the nitrogen flow, stabilizing and increasing the negative pressure of the extraction section and exhausting ash from the head.

Key words: activated coke; parsing towers; heating section row tube; corrosion mechanism

活性焦烟气脱硫脱硝技术由于具有优异的烟 气净化效果、没有废物外排以及能够回收硫资源

收稿日期:2024-05-17; 修回日期:2024-10-11

作者简介:邵久刚(1987—),男,研究员,从事冶金环保及资源能源综合利用工作。

通信作者:毛瑞(1988—),男,高级工程师,从事冶金环保及资源能源综合利用工作。

等特点,近年来在钢铁领域得到了快速发展,并成为了应用最为广泛的烟气净化工艺之一。廖继勇等^[1]介绍了活性炭净化技术在烧结领域的应用,指出活性炭可将烧结烟气中的多种污染物同时高效去除,与其他技术相比具有明显的技术优势。赵利明^[2]介绍了活性炭净化技术在宝钢 3[#]烧结机的应用,展示了活性炭技术具有的资源回收、深度节水、高度环保等特点。随着应用的增多,活性炭吸附技术也发展了不同的工艺流程,如两级活性炭吸附和逆流式活性炭吸附等^[3-5]。虽然技术应用逐步增多,但是随着投运时间的延长,活性焦系统也出现了一些问题,主要体现在设备故障多、设备维护量大以及检修频次高等,其中解析塔腐蚀和解析效率低是经常出现的问题之一。王月聪等^[6]在活性炭烟气净化解析塔问题分析及工艺优化中,通过对塔体结构、加热段参数、冷却段操作方式等研究,提出了优化改进措施,在解析能力获得提升的同时也延长了解析塔使用寿命。在安钢烧结活性焦脱硫脱硝制酸系统存在的问题及处理中,贺志国等^[7]分析了提升解析塔解析效率的方法,同时为了确保解析塔内的惰性氛围和富硫气体的顺利导出,提出了根据循环速度计算运载氮气流量的方法。在烧结活性焦脱硫脱硝工程存在的问题及应对措施中,王梁等^[8]对解析塔加热段和冷却段的腐蚀原因进行了分析,并从解析塔温度、操作、氮气流量等角度提出了改进意见。

为了实现超低排放,从 2018 年开始沙钢陆续建设了 9 套活性焦系统,其中烧结 3 套、球团 1 套、焦化 5 套。在稳定运行 2 年左右后,各套活性焦系统陆续出现了一些问题,其中解析塔腐蚀漏风比较典型。解析不彻底的活性焦吸附和催化性能较差,再次加入净化塔时会明显降低系统的运行效果^[9-10]。沙钢解析塔出现腐蚀后,最直接影响是活性焦解析后硫质量分数由 1.5%~1.8% 升高至 2.5% 左右。随着解析不彻底的活性焦进入净化塔,氨水用量逐步增加至正常水平的两倍以上,导致脱硝困难,烧结被迫减产应对。除了影响烟气净化能力外,对于采用正压操作的解析塔,腐蚀漏风会导致烟气外泄产生环保事故,对于采

用负压操作的解析塔,腐蚀漏风后会吸入空气导致活性焦着火,不仅经济损失巨大而且还会造成严重的安全隐患。

解析塔腐蚀是活性焦烟气净化工艺中的关键共性问题之一,其中冷凝腐蚀最为常见,尤其是在解析塔的装料段、冷却段和排料段,由于温度变化区间涵盖了富硫烟气露点,因而操作不当极易出现冷凝腐蚀。除以上区域外,解析塔加热段也出现过腐蚀案例,以往技术人员一般也将原因也归咎于冷凝腐蚀。但是通过进一步分析发现该原因解释并不充分,因为加热段正常工作温度在 400 ℃ 左右,即使在异常低温阶段会出现冷凝腐蚀,但是一般异常低温不会持续太久,在恢复正常温度后腐蚀就会停止。在实际生产中,即使在长期稳定运行未出现异常升降温条件下,解析塔加热段也会出现腐蚀漏风,说明在正常工作条件下加热段腐蚀也会持续进行,因此将加热段腐蚀原因归结于冷凝腐蚀具有一定的局限性。本文围绕沙钢解析塔顽固性腐蚀治理实践,分析了加热段列管腐蚀的特殊机理,其中由列管表面积灰引起的高温氯腐蚀是沙钢解析塔腐蚀的关键原因。同时,对沙钢以往解析塔操作中存在的问题和后续的改进措施进行了详细阐述,以期为业内类似问题的治理提供参考。

1 解析塔工作原理及常见腐蚀分析

1.1 解析塔工作原理

从吸附塔出来的活性焦硫质量分数一般在 3.0%~4.5%,部分情况下甚至会超过 5%,这些硫主要以硫酸的形式占据了活性焦绝大部分的微孔,除硫酸外还会有较多的铵盐、灰尘等占据活性焦其余的孔隙。对于吸附塔排出的活性焦,由于孔隙被占据,使得活性焦失去了大部分的吸附和脱硝催化能力。为确保活性焦重复循环使用,降低生产成本和保证净化效果,必须要对吸附塔中更换出来的活性焦进行解析再生,使其恢复吸附和脱硝催化功能。解析塔由多段列管换热器和料仓组成,按照功能作用区分从上到下分为装料段、加热段、脱气段、冷却段和排料段 5 个主要部分^[6],解析塔结构及各段温度分布如图 1 所示。

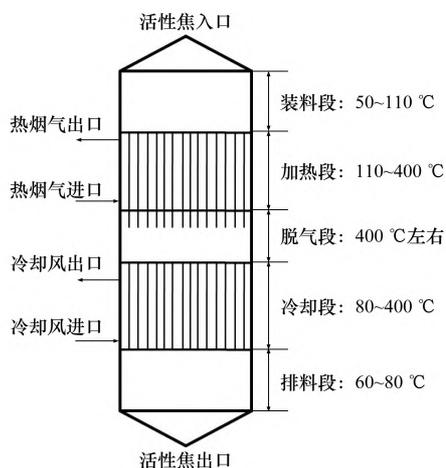


图1 解析塔结构及各段温度分布

Fig. 1 Structures of regeneration tower and temperature distribution in each section

装料段起到一定的缓冲作用,其主要目的是确保循环系统中的活性焦平稳均匀的进入解析塔列管,防止在不同列管间出现偏流现象,料流的均匀分布是实现高效均匀解析的基础。同时在装料段也会通入一定流量的氮气作为安保气体,其在防止活性焦加热过程中着火的同时,后续也会起到富硫烟气载气的作用。

加热段主要作用是利用列管间的高温烟气将活性焦加热至一定温度以上,通过释放在净化塔中吸附的硫、铵盐等实现活性焦吸附催化性能的恢复,是整座解析塔的工作核心。加热段为列管式结构,活性焦在列管内部依靠自身重力由上到下运动,解析过程发生的主要化学反应:



脱气段是一段类似料仓的结构,在活性焦料层上部存在较大的空区,加热段产生的气体和上部通入的氮气由此处被风机抽出送至制酸系统。解析气能否及时排出对保证解析效果和防止设备腐蚀均具有重要作用,因此抽气段的压力控制非常重要。

冷却段的作用是将解析后的活性焦安全降至规定温度以下,防止解析后的活性焦遇到空气燃烧。冷却段与加热段结构类似,不同的是冷却段列管外部通入的是冷空气。

排料段与装料段结构类似,作用是将冷却后

的活性焦均匀平稳排入循环系统。

1.2 常见腐蚀分析

解析塔主要为金属结构,而解析出的富硫烟气中含有大量的 SO_2 、 HCl 、 HF 等强酸性腐蚀气体,所以一般解析塔腐蚀主要是由于操作不当,造成塔内出现强酸冷凝水而引起。根据实验室研究结果,200℃左右活性焦中的解析反应即开始明显发生,所以在装料段和加热段的过渡阶段解析反应已经开始,在加热段和冷却段的过渡阶段解析反应仍在进行,这两处解析出的气体极易因为温度降低而出现冷凝酸液导致腐蚀发生。

以上冷凝腐蚀出现的原因主要包括两方面:一是因为参数控制不当,主要包括氮气流量和各区段压力,导致富硫烟气无法及时排出甚至出现倒流,当富硫烟气进入到温度低于露点的区域后,在金属表面就会产生冷凝酸液导致腐蚀;二是因为解析塔保温效果差或侧壁存在漏点导致温度异常偏低,酸性气体在侧壁表面产生冷凝液导致腐蚀。

这种常见的酸腐蚀一般出现在解析塔上部和下部的温度过渡区域,通过提高保护氮气流量和抽气段负压,促进富硫烟气由解析塔上下两侧的低温段向中部高温段流动,并在抽气段被及时抽走,可以极大缓解这类腐蚀问题。

2 解析塔腐蚀机理分析

2.1 解析塔腐蚀情况

沙钢烧结活性焦解析塔曾出现过连续两次加热段寿命不足6个月的情况,严重影响了烧结和活性焦系统的稳定运行。与上述常见腐蚀不同,沙钢解析塔的装料段、冷却段、排料段等温度过渡区域腐蚀相对较少,顽固性腐蚀区域集中在温度最高的加热段下部,列管上部基本完好,如图2所示。加热段列管材质为304不锈钢,其下部正常工作温度在400℃左右,与装料段和冷却段相比,加热段只有在工作温度异常时才会出现冷凝腐蚀,在工况恢复正常后冷凝腐蚀就会终止,因此除冷凝腐蚀外沙钢解析塔一定还存在其他未知的腐蚀原因。

正常列管和腐蚀列管的内部形貌对比如图3所示。由图3可知,正常的列管表面十分光滑,



图 2 腐蚀列管总体情况

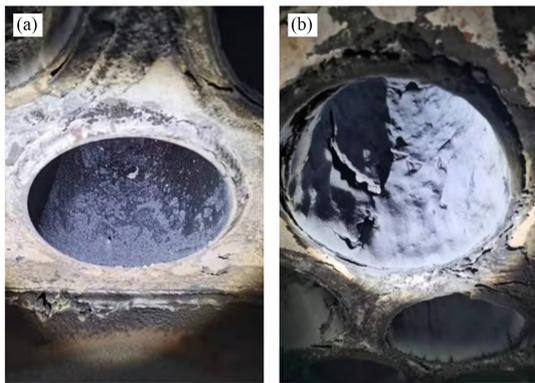
Fig. 2 General situation of corrosion tubes



(a) 内侧; (b) 外侧

图 4 腐蚀列管的内、外侧形貌

Fig. 4 Morphology of inner side and outer side of corrosion tube



(a) 未腐蚀; (b) 腐蚀

图 3 未腐蚀的列管和腐蚀的列管结构

Fig. 3 Structure of normal tube and corrosion tube

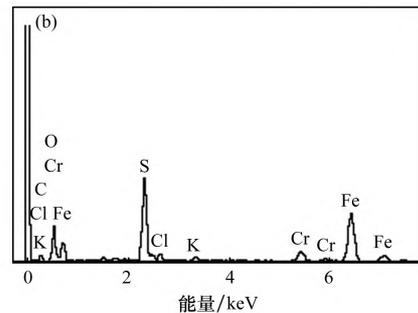
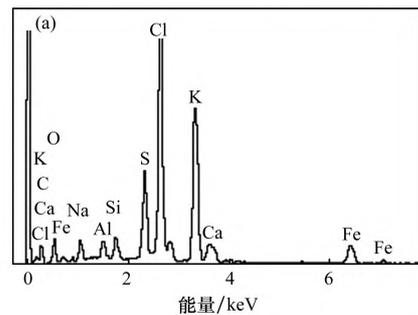
仅有少量灰尘和炭粉覆盖在上面。与正常列管相比,已腐蚀的列管内侧粗糙并且存在明显的层层剥落情况,几乎所有腐蚀列管均具有相同的特征。为了明确列管腐蚀原因,对腐蚀列管进行了取样,通过列管内、外侧成分变化对腐蚀原因进行分析。腐蚀列管的内、外侧形貌对比如图 4 所示。由图 4 可以看出,列管内侧金属表面附着一层均匀的物质,具有一定的强度,在正常活性焦运动过程中其仍然能稳定存在,并且表面特征比较均一,可以推测该层物质是由液相转变而形成的。

腐蚀列管内、外侧附着物的能谱分析结果如表 1 和图 5 所示。由表 1 与图 5 可知,由附着物成分可知腐蚀列管呈现明显的硫、氯腐蚀特征。其中内侧附着物中氯、钾含量高,氯腐蚀特征明显。外侧附着物中硫、铁含量高,硫腐蚀特征明显。正常工况条件下列管外侧与热废气接触,主要成分是 N_2 、 CO_2 以及少量 O_2 , 腐蚀成分较少,总体属于氧化气氛。列管内侧与活性焦和解析气接触,

表 1 腐蚀管道内、外侧附着物能谱分析结果(质量分数)

Table 1 Energy spectrum analysis of inner side and outer side of corrosion tubes

项目	C	O	S	Cl	K	Cr	Fe
列管内侧	5.88	19.39	8.25	26.84	23.64	—	7.72
列管外侧	2.83	24.35	20.58	1.82	1.30	5.29	43.82



(a) 内侧; (b) 外侧

图 5 管道内、外侧能谱元素分析

Fig. 5 Energy spectrum analysis of inner and outer side of corrosion tubes

解析气中含有高浓度的 SO_2 、 HCl 等强腐蚀性气体,总体属于还原气氛。此外,活性焦中除含有自身磨损产生的炭粉外,还会同时带入烧结烟气

中的大量粉尘,尤其是电除尘器难以捕捉到的高氯、钾、钠粉尘。

根据腐蚀列管的内、外侧成分对比可知,由于列管内侧中氯元素和钾元素含量最高,因而可以推测来自于解析气和粉尘中的氯、钾很可能是引起腐蚀的关键。列管外侧氯和钾含量较少,说明粉尘和氯元素并未对列管外侧腐蚀产生明显影响。在列管腐蚀漏气后,解析气中的 SO_2 在与热烟气中的 H_2O 和 O_2 接触后生成了硫酸,进而对列管外侧也产生腐蚀。列管内侧属于还原气氛, SO_2 与金属较难反应,列管外侧属于氧化气氛, SO_2 较容易与金属发生反应,因此气氛不同是内、外侧硫元素差异较大的原因。根据以上分析可以推断列管腐蚀是由内向外进行的,即列管内表面在腐蚀性气体和粉尘作用下先出现了腐蚀,随着腐蚀加剧列管开始漏气,外表面在泄露的腐蚀气体和氧气作用下也出现了腐蚀。

2.2 高温氯腐蚀

在钢铁领域酸性气体低温冷凝导致的硫、氯腐蚀较为常见,通过材质提升,如利用高铬不锈钢替代普碳钢,通常可以缓解腐蚀问题。沙钢解析塔加热段列管原材质即为高铬不锈钢,同时加热段列管工作温度也较高,因而发生冷凝腐蚀的概率较低。但是在实际应用中腐蚀速度仍然较快,推测很有可能是发生了高温氯腐蚀。高温氯腐蚀在垃圾焚烧领域较为常见,尤其是在金属表面有氯盐沉积条件下,由于氯化物可以与其他物质结合形成低熔点的共晶混合物,因而会大大加速金属材料在高温区域的腐蚀速率^[11]。姜磊等^[12]在研究生物质混煤燃烧过程中的腐蚀机理时,发现生物质直接燃烧过程中的腐蚀主要由积灰中的 KCl 造成,表面堆灰引起金属腐蚀的过程如图6所示。

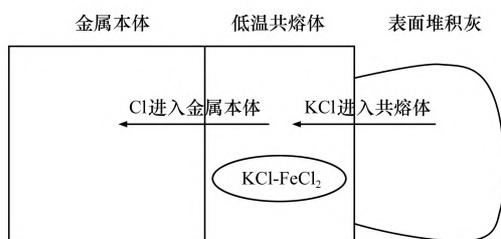


图6 表面堆灰引起的腐蚀机理示意

Fig. 6 Schematic diagram of corrosion mechanism caused by surface dust deposition

吴峰在高温氯腐蚀的特点研究中分析了腐蚀与管壁温度之间的关系,表明在温度低于露点和 $500 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 两个区间内腐蚀比较严重,原因是在低于露点时存在冷凝腐蚀,而在 $500 \sim 700\text{ }^\circ\text{C}$ 范围内主要是由于管壁上的积灰造成的腐蚀。同时对不同氧化物在含氯化物熔盐中的溶解性研究还发现,氧化铬的溶解度要远大于 Fe_3O_4 ,因而在高温有积灰状态下高铬合金的腐蚀速度相对而言还要更快一些^[13]。

解析塔在停开机阶段容易出现冷凝腐蚀,当系统内粉尘较多时,加热段列管的工作条件又符合高温氯腐蚀的特征,因而沙钢解析塔加热段列管的腐蚀分析和解决需要综合考虑低温氯腐蚀和高温氯腐蚀,尤其要侧重表面堆灰引起的腐蚀速率更快的高温氯腐蚀。

2.3 腐蚀机理及腐蚀步骤

根据解析塔实际腐蚀状况和高温氯腐蚀分析结果,可以推断解析塔加热段列管腐蚀机理及腐蚀步骤如下。

2.3.1 FeCl_2 和 FeO 的生成

解析塔检修或热风炉临时停机时,当塔内解析气体未彻底排空而温度已经降至酸露点,且保护氮气过早关停时,会发生以下反应:



其中,反应式(4)和(6)在高温、低温条件下均可以发生,反应式(5)只有在低温条件下才会发生。在系统正常运行时,内部仍有少量残氧(估计在0.5%左右),一部分由密封氮气带入,一部分由活性焦装料过程带入,所以反应式(6)在系统正常运行时仍会进行,但是其总量很少。以上反应虽然可以在列管表面发生,但是在没有大范围出现冷凝水或氧气存在条件下反应进行程度较低,不会导致出现严重腐蚀。

2.3.2 低熔点共熔体的形成及电化学反应

由于烧结除尘系统老化,导致大量粉尘伴随烟气进入到活性焦系统,这些粉尘在净化塔内被捕集,然后与活性焦一起进入到解析塔。在解析塔内发现大量粉尘堆积,粉尘主要成分如表2所

示。由表 2 分析可知, KCl 是其中的主要物相。根据前文分析可知当高氯灰在金属表面堆积后容易导致出现积灰氯腐蚀, 并且温度越高腐蚀越严重, 其中 KCl 的作用尤为突出, 因为 KCl 和 FeCl_2 可以形成熔点为 355 °C 的共熔体^[12]。

表 2 解析塔内堆积灰尘主要成分(质量分数)

in regeneration tower									%
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	
4.99	0.36	1.19	2.08	18.48	23.56	25.98	4.86	13.05	

综合以上内容, 加热段列管腐蚀机理及腐蚀步骤: 在停开机过程中不可避免会生成一定量的 FeCl_2 , 加热段列管下部的正常工作温度在 400 °C 左右, 当粉尘进入到列管下部并在表面黏结后, 其中的 KCl 会与列管表面的 FeCl_2 形成低熔点共熔体而产生液相。出现液相后, 一方面会诱导加速金属铁与烟气发生电化学反应产生更多的 FeCl_2 , 另一方面也会黏结更多的粉尘, 并产生更多的液相。随着 FeCl_2 生成增多以及 KCl 的累积, 液态共熔体会进一步将其他粉尘黏结形成瘤状物, 当积累到一定程度后就会与列管本体脱落造成腐蚀漏风。

3 实际操作中存在的问题及改进措施

3.1 实际生产中存在的问题

根据腐蚀机理和腐蚀步骤对实际操作进行了总结分析, 发现存在以下问题:

(1) 电除尘设备老化严重并且只有三个电场, 导致进入到活性焦系统的粉尘含量长期在 100 mg/m³ 以上, 远高于 < 50 mg/m³ 的活性焦系统设计要求的, 大量粉尘进入解析塔是加速腐蚀的关键原因。

(2) 以往解析塔氮气流量无监测和调节手段, 氮气流量过低时不仅无法将解析气充分带走, 而且还会导致塔内氧含量升高, 促进列管表面出现氧化加剧腐蚀。

(3) 解析塔热风炉停开频繁, 导致塔内温度波动大, 尤其当温度降低至露点以下时, 解析气中含有的大量 HCl、SO₂ 等气体会冷凝附着在列管表面造成腐蚀。

(4) 解析塔与制酸系统距离较远, 过长的富硫烟气管道压差高, 导致抽气段负压波动频繁, 且时常有正压的情况, 富硫烟气抽不净也容易导致腐蚀。

3.2 改进措施

(1) 烧结源头减少粉尘和 HCl 生成。电除尘由三电场改为四电场可以显著提高烟气粉尘的去除能力, 进而减少进入到活性焦系统的粉尘量, 但是电场改造周期较长, 短时间内难以发挥作用。三电场机头灰成分如表 3 所示, 通过与解析塔内堆积灰尘对比可知两者十分接近, 因而可以认为塔内积灰主要来源于未被电场捕集到的灰尘。以往三电场机头灰全部重新进入烧结配料系统, 造成钾、氯等有害元素循环富集。因而为了减轻粉尘对腐蚀的影响, 对三电场机头灰全部进行外排处理, 不再进入烧结系统, 以实现从源头减少粉尘和 HCl 的生成。

表 3 三电场机头灰主要成分(质量分数)

dust collector								%
Na ₂ O	K ₂ O	Cl	Fe ₂ O ₃	SO ₃	CaO	SiO ₂	MgO	
4.32	33.9	27.52	8.75	11.02	2.35	0.89	0.12	

(2) 增加筛分装置。原有活性焦系统只在解析塔后配置了一套筛分装置, 为了减少进入解析塔的粉尘, 利用检修机会在解析塔之前增加了一套筛分装置, 进入解析塔的粉尘量明显减少。

(3) 精确控制氮气流量。项目建设时未配备解析塔氮气流量计量装置, 氮气流量控制不当也是造成腐蚀出现的原因之一。为了实现氮气流量的精确控制, 首先在上下部安装了氮气流量计和调节阀, 然后根据料速对氮气流量进行控制, 确保列管内部氧体积分数低于 0.5%。此外, 每次停开机时提前提高氮气流量, 确保在低温范围内可以将解析气体充分排出, 减少升降温阶段解析气体的冷凝。

(4) 增加风机提高抽气段负压。为了减少抽气段负压波动并防止出现正压, 在洗涤塔和制酸系统之间增加了一台风机。增加风机后, 抽气段压力平均由 -100 Pa 降低到了 -400 Pa 左右, 压力波动频率和幅度也明显降低, 并且正压也得到

了彻底消除,为保证富硫烟气充分排出提供了重要保障。

(5) 解析塔定期排空操作。每半年至少进行一次解析塔排空操作,并对解析塔各段及列管积灰进行清理,清理干净后再重新装炭投用。

4 实施效果及结论

(1) 围绕腐蚀机理对实际生产中导致腐蚀的因素进行了分析并提出了优化建议,各项措施应用后取得了较好的效果。前两代解析塔生命周期分别为2021年7月至2021年12月,以及2021年12月至2022年5月,平均寿命不超过6个月。最近一代解析塔自2022年5月更换以来已连续稳定运行超过2年,未出现新的列管腐蚀,加热段列管腐蚀问题得到了有效解决。

(2) 通过腐蚀机理研究发现,在加热段工作条件下不锈钢和普碳钢抗腐蚀能力差异较小,列管腐蚀主要与操作方式有关,因此沙钢加热段材质已由不锈钢改为了普碳钢,建设成本不到原来的一半。

(3) 氮气流量和抽气段负压对于排空富硫烟气和减少冷凝腐蚀至关重要,日常操作中要对其进行精细管控。

(4) 在解析塔日常操作和维护中除了要防止出现冷凝酸腐蚀外,也要加强对高温氯腐蚀的重视,尤其是要防止列管内的粉尘堆积和堵塞。对于前端除尘效果差的活性焦系统,在活性焦进入到解析塔前要将粉尘筛分干净,同时要定期进入解析塔检查,防止内部积灰。

参考文献:

- [1] 廖继勇,周末,李小敏. 活性炭净化技术在烧结烟气治理领域的应用[J]. 烧结球团,2012,37(4):61-63.
LIAO Jiyong, ZHOU Mo, LI Xiaomin. Application of activated carbon purification technology in the field of sintering flue gas control[J]. Sintering and Pelletizing, 2012,37(4):61-63.
- [2] 赵利明. 活性炭烟气净化技术在宝钢股份宝山基地3[#]烧结机的应用[J]. 烧结球团,2017,42(6):5-10.
ZHAO Liming. Application of activated carbon flue gas

purification technology in 3[#] sintering machine of Baoshan base of Baosteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2017,42(6):5-10.

- [3] 汪庆国,黎前程,李勇. 两级活性炭吸附法烧结烟气净化系统工艺和装备[J]. 烧结球团,2018,43(1):66-72.
WANG Qingguo, LI Qiancheng, LI Yong. The art of activated coke in sintering flue gas two-stage purifying process and equipment[J]. Sintering and Pelletizing, 2018,43(1):66-72.
- [4] 韩建,阎占海,邵久刚. 逆流式活性炭烟气脱硫脱硝技术特点及应用[J]. 烧结球团,2018,43(6):13-18.
HAN Jian, YAN Zhanhai, SHAO Jiugang. Technical characteristics of counter flow active carbon-flue gas desulphurization and denitrification process and its application[J]. Sintering and Pelletizing, 2018,43(6):13-18.
- [5] 柳领君,张玉亭,魏全伟. 烧结/球团烟气活性焦脱硫脱硝技术研究[J]. 环境生态学,2020,2(9):66-70.
LIU Lingjun, ZHANG Yuting, WEI Quanwei. Study on sintering/pellet flue gas desulfurization and denitrification technology of activated coke[J]. Environmental Ecology, 2020,2(9):66-70.
- [6] 王月聪,代兵,张治良. 活性炭烟气净化解析塔问题分析及工艺优化[J]. 烧结球团,2021,46(2):82-88.
WANG Yuecong, DAI Bing, ZHANG Zhiliang. Problem analysis and process optimization of stripper of activated carbon flue gas purification[J]. Sintering and Pelletizing, 2021,46(2):82-88.
- [7] 贺志国,关红兵,陈志兵. 安钢烧结活性焦脱硫脱硝制酸系统存在的问题及处理[J]. 河南冶金,2022,30(2):21-24.
HE Zhiguo, GUAN Hongbing, CHEN Zhibing. Problems and solutions on the desulfurization, denitrification and acid production system for sintered flue gas in Anyang steel[J]. Henan Metallurgy, 2022,30(2):21-24.
- [8] 王梁,赵海亮. 烧结活性焦脱硫脱硝工程存在的问题及应对措施[J]. 烧结球团,2022,47(3):104-113.
WANG Liang, ZHAO Hailiang. Problems existing in desulfurization and denitrification engineering of sintered activated coke and countermeasures[J]. Sintering and Pelletizing, 2022,47(3):104-113.

- [9] 王斌,李玉然,熊劲,等. 活性炭法烟气净化工艺解析过程试验研究[J]. 河北冶金,2019(S1):72-76.
WANG Bin, LI Yuran, XIONG Jin, et al. Experimental study on analytical process of flue gas purification process by activated carbon method[J]. Hebei Metallurgy, 2019(S1):72-76.
- [10] 乔骊竹,张威力,彭汉忠等. 解析参数对活性焦再生过程及再生效果的影响[J]. 钢铁,2022,57(6):159-166.
QIAO Lizhu, ZHANG Weili, PENG Hanzhong, et al. Influence of desorption parameters on regeneration process and regeneration effect of activated coke[J]. Iron and Steel, 2022, 57(6):159-166.
- [11] 马海涛. 高温氯盐环境中金属材料的腐蚀[D]. 大连:大连理工大学,2003:7-24.
MA Haitao. High temperature corrosion of metallic materials induced by chloride salts[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003:7-24.
- [12] 姜磊,王永征,余滔,等. 生物质混煤燃烧过程中硫氯成分协同腐蚀作用机理探析[J]. 电站系统工程,2013,29(3):1-4.
JIANG Lei, WANG Yongzheng, YU Tao, et al. Study on synergy corrosion mechanism of sulfur-chlorine during biomass and coal co-firing[J]. Power System Engineering, 2013, 29(3):1-4.
- [13] 吴峰. 高温氯腐蚀的特点[J]. 电站系统工程,2003,19(1):13-15.
WU Feng. Characteristics of chlorine corrosion at high temperature[J]. Power System Engineering, 2003, 19(1):13-15.

(上接第 94 页)

- [15] 王泽红,楚文城,孔令斌,等. 落重试验测定矿石粉碎特性参数[J]. 金属矿山,2014(9):85-89.
WANG Zehong, CHU Wencheng, KONG Lingbin, et al. Comminution parameters detection of the ore by drop-weight tests[J]. Metal Mine, 2014(9):85-89.
- [16] ZHANG Z X, OUCHTERLONY F. Energy requirement for rock breakage in laboratory experiments and engineering operations: A review[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55(2):629-667.
- [17] LVOV V, CHITALOV L. Semi-autogenous wet grinding modeling with CFD-DEM[J]. Minerals, 2021, 11(5):485.
- [18] CLEARY P W, HILTON J E, SINNOTT M D. Modelling of industrial particle and multiphase flows[J]. Powder Technology, 2017, 314:232-252.
- [19] AALI H, KAZEMI S, LARIJANI R S, et al. CFD-DEM modeling of breakage of non-spherical particles in fluidized beds[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2023, 189:593-605.
- [20] ZBIB H, EBRAHIMI M, EIN-MOZAFFARI F, et al. Comprehensive analysis of fluid-particle and particle-particle interactions in a liquid-solid fluidized bed via CFD-DEM coupling and tomography[J]. Powder Technology, 2018, 340:116-130.
- [21] KUANG S B, ZHOU M M, YU A B. CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review[J]. Powder Technology, 2020, 365:186-207.
- [22] 宦秉炼,段希祥,况世华,等. 磨机钢球直径半理论公式的改进研究[J]. 昆明理工大学学报,2002,27(1):10-16.
HUAN Binglian, DUAN Xixiang, KUANG Shihua, et al. Research on the Revision of the Half-Theory Formula to Determine Mill Steel Ball Size[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2002, 27(1):10-16.

(上接第 111 页)

- XU Yong. Study on the reaction between mullite/corundum refractories and alkali-doped deposition materials[J]. Refractories & Lime, 2013, 38(5):39-45.
- [23] 曹亚然,徐博,王铮铮,等. Al_2O_3 对熔融态高炉渣结构与黏度影响的分子动力学模拟[J]. 烧结球团,2022,47(6):57-65.
CAO Yaran, XU Bo, WANG Zhengzheng, et al. Molecular dynamics simulation of effect of Al_2O_3 on structure and viscosity of molten blast furnace slag[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(6):57-65.