

非金属衬里材料在烟气脱硫装置上的应用

许兰飞^{1,2}, 崔新安^{1,2}, 刘希武^{1,2}, 李晓炜^{1,2}

(1. 中石化炼化工程集团洛阳技术研发中心, 河南 洛阳 471003;

2. 中国石油化工集团石油炼化设备防腐蚀研究中心, 河南 洛阳 471003)

摘 要:催化裂化再生装置中产生的烟气是炼油企业污染物的主要来源。根据国家环保标准的要求,炼厂必须采用烟气脱硫装置(FGD)来控制二氧化硫的排放。烟气脱硫装置所处腐蚀环境极为恶劣,若不采取有效的防护措施,将影响整个系统的安全稳定运行。烟气脱硫装置如果整体采用耐蚀合金材料,价格昂贵。介绍了适用于烟气脱硫装置的几种非金属衬里及其性能和应用区域,包括橡胶衬里、玻璃鳞片树脂衬里、耐蚀胶泥、耐蚀砖板衬里、整体玻璃钢等常用非金属衬里,以及聚脲、纳米复合涂料等新型高性能防腐蚀涂料等。橡胶衬里的耐化学腐蚀性和抗介质渗透性较好,但耐温性差,一般用于机械负荷大而内部环境温度较低的区域,如吸收塔内部、浆液系统和烟道。玻璃鳞片树脂衬里的综合性能较好,被广泛应用于烟道、吸收塔等烟气脱硫装置的各个区域。玻璃钢衬里多用于脱硫系统中的输送管道和吸收塔内喷淋管道等部位。胶泥和耐蚀砖板衬里是应用较早的防腐蚀技术,其抗冲击性能差。聚脲和纳米复合涂料是重防腐蚀涂料,是FGD装置腐蚀防护的新技术,虽然在炼厂脱硫装置中有一些应用,但其使用效果还有待证明。

关键词:烟气脱硫;衬里;涂料;橡胶;玻璃鳞片树脂;聚脲

中图分类号:TG174.446; TE986

文献标识码:A

文章编号:1001-3660(2015)12-0033-08

DOI:10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.006

Application of Non-metallic Linings in Flue Gas Desulfurization Plant

XU Lan-fei^{1,2}, CUI Xin-an^{1,2}, LIU Xi-wu^{1,2}, LI Xiao-wei^{1,2}

(1. Luoyang R&D Center of Technology Sinopec Engineering Co., Ltd, Luoyang 471003, China;

2. Anti-corrosion Research center of SINOPEC Petrochemical Equipments, Luoyang 471003, China)

ABSTRACT: Flue gas generated by the catalytic cracking regenerator is the main pollution source from oil refining enterprises. According to national environmental protection standards, flue gas desulfurization (FGD) plant must be used to control emissions of sulfur dioxide. FGD plant is in an extremely corrosive environment. Without effective protection measures, it will affect the safe and stable operation of the whole system. Because the corrosion-resistant alloy material for overall use in FGD is expensive, the nonmetallic material for linings is an important alternative. The article introduced several nonmetal linings in FGD device and their

收稿日期: 2015-10-27; 修订日期: 2015-11-25

Received: 2015-10-27; Revised: 2015-11-25

作者简介: 许兰飞(1987—),女,山东人,硕士,助理工程师,主要从事石化装置腐蚀与防护研究。

Biography: XU Lan-fei(1987—), Female, from Shandong, Master, Assistant engineer, Research focus: corrosion and protection of petrochemical equipments.

通讯作者: 崔新安(1964—),男,河南人,教授级高工,主要从事石化装置腐蚀与防护研究。

Corresponding author: CUI Xin-an(1964—), Male, from Henan, Professor, Research focus: corrosion and protection of petrochemical equipments.

properties and application, including common nonmetal lining (rubber lining, glass resin flake lining, corrosion-resistant cement, corrosion-resistant brick lining, and whole fiberglass reinforced plastic) and novel high-performance anti-corrosion coatings (polyurea and nanometer composite coatings, etc.). Rubber lining has good chemical corrosion resistance and anti-permeability against media, but its temperature resistance is poor, so rubber lining is generally used in the region of large mechanical load and at low temperatures, such as internal part of absorption tower, slurry system and low-temperature flue. Glass flake resin lining has favorably comprehensive performance, which is widely applied in various areas of the flue gas desulfurization device, such as the flue, the absorption tower and so on. FRP lining is often used in pipeline of the desulfurization system and spray pipe in the absorption tower and other sites. Corrosion-resistant cement and brick lining are the earlier applied anti-corrosion technologies with poorer impact resistance compared with other non-metallic linings. Polyurea and nanometer composite coating are heavy-duty coatings and new technologies for protection of FGD equipment from corrosion. Even though they have some applications in the refinery desulfurization device, their performance remains to be proved.

KEY WORDS: flue gas desulfurization; lining; coating; rubber; glass flake resin; polyurea

随着我国高硫进口原油加工量的增加及催化进料掺渣比的提高,催化裂化再生烟气中 SO_2 、 NO_x 及颗粒物的排放也相应增加,这大大加剧了环境污染的程度。根据国家环保标准的要求,必须采用烟气脱硫 (FGD) 装置控制二氧化硫的排放。除尘后的高温烟气含有 SO_2 、 SO_3 、 HCl 、 HF 、 NO_x 、烟尘、水汽等成分,导致金属腐蚀和磨损同时发生,腐蚀环境恶劣^[1-5],因此 FGD 装置所用材质必须具有良好的耐蚀性、耐磨性和耐温性。

FGD 装置的选材有两大类——耐蚀金属材料和非金属材料衬里。在整体采用耐蚀金属材料价格昂贵或性能达不到要求的情况下,相对便宜的非金属耐蚀材料衬里是一种重要的防腐手段。目前,湿法 FGD 装置常用的非金属衬里材料有橡胶衬里、玻璃鳞片衬里、耐蚀胶泥、耐蚀砖板和整体玻璃钢。近年来开发的一些新型高性能涂料,如聚脲和纳米复合涂料等^[6-15],在烟气脱硫装置中也得到一些应用。

1 常用非金属衬里

1.1 橡胶衬里

烟气脱硫吸收塔内的腐蚀环境苛刻,橡胶衬里应满足下述要求^[16-18]:1) 对水蒸汽、 SO_2 、 HCl 、 O_2 及其他气体具有较低的渗透性(如果介质渗透到衬里与基体之间,不仅会导致基体金属的腐蚀,还会产生膨胀或溶胀力,导致衬里层脱落);2) 抗硫酸、硝酸及盐等化学腐蚀;3) 耐应力腐蚀(衬里与基体的膨胀系数存在差异,膨胀量不同,会在界面间形成热应力,继而引发或加剧缺陷的扩展,最终导致衬里的剥离);4) 抗冲刷腐蚀(烟气携带灰尘和催化剂颗粒在高速流动过程

中与喷淋浆液逆向接触,对塔壁及塔内件造成冲刷和摩擦);5) 与碳钢间的粘结性能良好。一般的橡胶衬里都能耐受酸、碱、无机盐及多种有机物的腐蚀,并且具有良好的综合性能^[19],但满足对水蒸汽、 SO_2 、 HCl 、 O_2 和其他气体的低渗透性要求的只有少数几种。

压力差存在时会导致渗透过程的发生。由于压力梯度的存在,气体通过衬里从压力高的一侧向压力低的一侧渗透,直到衬里两侧压力相等。通常,利用材料的渗透系数来表征材料的抗渗透能力^[20]。渗透系数可用以下公式计算:

$$P = \frac{q \cdot s}{A \cdot \Delta p \cdot t}$$

式中: P 为渗透系数; q 为气体量; s 为衬层厚度; A 为衬层表面面积; Δp 为气体分压; t 为渗透时间。

图 1^[20] 显示了在不同温度、常压的条件下,典型天然橡胶、氯丁二烯橡胶和丁基橡胶中水蒸汽的渗透系数,可见随着温度的升高,渗透系数增大。结果表明,在湿式系统中,丁基橡胶 (IIR 指丁基橡胶,CIIR 指氯化丁基橡胶,BrIIR 指溴化丁基橡胶) 比天然橡胶 (NR)、氯丁二烯橡胶 (CR) 或丁腈橡胶 (NBR) 具有

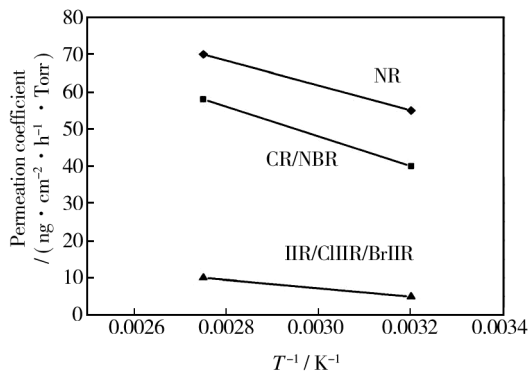


图 1 橡胶衬里的渗透系数

Fig. 1 Permeation coefficients of rubber lining

显著优势。此外,相比于聚酯和乙烯基酯树脂等其他材料而言,丁基类橡胶对水蒸汽的渗透系数也较低,见表 1^[21]。

表 1 橡胶及其他材料对水蒸汽的渗透性
Tab. 1 Water vapor permeation of rubber and other materials

渗透系数/(ng·cm ⁻¹ ·h ⁻¹ ·Torr ⁻¹)	38 ℃ (100 ℉)	71 ℃ (160 ℉)
矿物薄片填充乙烯基酯(VE)	2.1	4.6
乙烯基酯树脂(树脂)	7.0	15.0
聚酯(UP)	14.0	32.0
布罗姆丁基橡胶(BIIR)	4.0	9.0
氯化丁基橡胶(CIIR)	5.0	12.0
氯丁二烯橡胶(CR)	44.0	94.0

在烟气脱硫装置中广泛应用的橡胶有丁基橡胶、溴化丁基橡胶和氯化丁基橡胶。根据国内的一些研究结果,丁基橡胶在湿法脱硫装置中具有较好的耐腐蚀效果^[22-24],并且其耐磨性、抗渗透性较好,但耐温差性能差,因此一般用于机械负荷大而介质或内部环境温度较低的区域,如吸收塔喷淋和除雾区域、浆液系统和烟道等^[25-27]。

1.2 玻璃鳞片树脂衬里

玻璃鳞片涂料作为最有效的重防腐涂料,在烟气脱硫装置中主要用作衬里,按照其使用部位与特点,可以分为低温鳞片涂料(小于 100 ℃)、高温鳞片涂料(可达 160 ℃)和耐磨鳞片涂料等。它是以耐蚀树脂为主要成膜物质,以薄片状玻璃鳞片为填料,再配以各种添加剂制成的厚浆型涂料^[28]。例如,鳞片防腐衬里是以综合性能较好的乙烯基酯树脂材料为主,加入 10%~40% 片径不等的玻璃鳞片等材料制得。乙烯基酯树脂、鳞片构成胶泥的骨架结构,增强了胶泥的强度,更重要的是,固化后,胶泥中的扁平型玻璃鳞片在树脂连续相中呈平行重叠排列,从而形成致密的防渗层结构,大大延长了介质的渗透路径,具有良好的抗渗性^[29-31]。原理见图 2。

与冷衬橡胶衬里相比,玻璃鳞片树脂衬里具有明显的优点,二者的性能对比见表 2。首先,在施工方法上,鳞片涂料较橡胶衬里简单,易修补。其次,在耐温性方面,鳞片涂料比橡胶衬里高得多。由于冷衬橡胶材料的最高使用温度为 90 ℃,故以橡胶为主导材料的防腐蚀内衬通常在高温原烟气烟道上配套采用耐高温鳞片涂料。鳞片涂料和橡胶衬里的耐磨性对

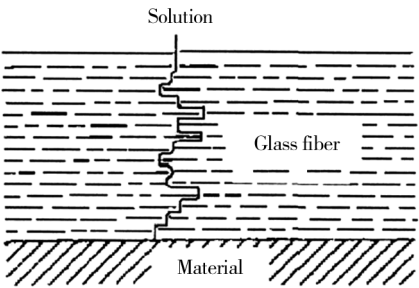


图 2 玻璃鳞片涂层抗渗透效果示意
Fig. 2 Diagram of permeation effect of glass resin lining

比研究表明:在无腐蚀环境条件下,鳞片衬里的耐磨性优于丁基橡胶及天然橡胶,略次于氯丁橡胶,但在经腐蚀介质浸泡后,橡胶的耐磨性急剧下降,而鳞片衬里的耐磨性几乎无变化^[32-33]。另外,表 1 中的水蒸汽渗透结果表明,乙烯基酯树脂鳞片衬里的抗渗透性最好。由于玻璃鳞片树脂衬里具有优良的抗渗透性及高的耐蚀性、耐磨性、耐热性,被广泛应用于烟道、吸收塔等烟气脱硫装置的各个区域。

表 2 鳞片衬里和橡胶衬里性能对比
Tab. 2 Performance comparison between flake lining and rubber lining

对比指标	鳞片衬里	冷衬橡胶
抗介质渗透性	很好	好
界面粘结强度	好	良
抗应力腐蚀	好(热应力环境需补强)	好(>80 ℃环境不可用)
抗热老化	好	差
耐温性	好(最高可达 200 ℃)	低温(≤80 ℃)下好,高温下差
耐磨性	好	低温(≤60 ℃)下好,高温下差
衬层修补性	好	差
施工性	好	差
对基体要求	适中	较高

1.3 玻璃钢

玻璃钢(Fiberglass Reinforced Plastic, FRP)又称为玻璃纤维增强塑料,是由高强度的玻璃纤维和树脂复合而成的新型复合材料,兼具结构性和功能性。玻璃纤维提供 FRP 的强度和刚性,树脂提供 FRP 的耐化学性和韧性^[34-36]。玻璃钢具有轻质、高强度、绝缘隔热、耐蚀等特点,制品可一次性成型,成品维修较为方便。

使用玻璃钢制作大型的脱硫塔相当困难,主要是

模具问题^[37],而对于制作管道、法兰、阀门等,玻璃钢是一种很好的材料。国外有采用整体玻璃钢烟道的。但是,玻璃钢容易产生加工缺陷,如气泡、裂纹等,加之烟气脱硫条件苛刻,显得安全可靠不足,使用温度范围相对较窄(须小于 80 ℃)。因此,玻璃钢多用于脱硫系统中的输送管道和吸收塔内喷淋管道等部位。据国外资料介绍,玻璃钢已在湿法脱硫系统的吸收塔塔体、集液器、除雾器、浆液输送管道以及烟道、烟囱等部位得到了成功应用^[38]。与发达国家相比,由于缺少相关的制造技术和评价方法,我国用于烟气脱硫系统的玻璃钢制品还比较少^[39]。

1.4 胶泥和耐蚀砖板衬里

耐蚀砖板衬里是在金属或混凝土设备的内壁,以耐腐蚀胶泥粘贴一层或几层耐酸、碱、盐溶液腐蚀的砖板,从而起到对设备的防腐蚀作用^[40]。耐蚀砖板衬里是化工设备中使用较早的防腐蚀技术之一,其适用范围取决于所选用砖板和胶泥的物理性能和耐腐蚀性能。目前,我国用于烟气脱硫装置的砖板主要是花岗岩和铸石板^[41]。砖板衬里具有施工简单、材料成本低、耐蚀性能好等优点,但是其抗冲击性能较差,韧性不好,大多数材料的传热效果不佳,粘结缝容易发生泄漏^[42]。

耐腐蚀砖板衬里用粘结剂俗称胶泥,按其成膜物质的不同,主要分为无机硅酸盐胶泥和树脂胶泥两大类,包括钠水玻璃胶泥、钾水玻璃胶泥、环氧胶泥、酚醛胶泥、呋喃胶泥、聚酯胶泥六个品种以及以这几种胶泥为主体的改性胶泥等^[29]。由于硅酸盐胶泥孔隙率高,粘结力差,不耐中性化学介质和碱类,在稀硫酸、稀醋酸中抗腐蚀性能差,目前正逐渐被树脂胶泥替代。

2 新型高性能防腐蚀涂料

高性能防腐蚀涂料又称为重防腐蚀涂料(Heavy-

duty Coating)或长效防腐蚀涂料,是指能够在恶劣腐蚀环境中长期防腐蚀的一种涂料。重防腐涂料的首要特点是涂层的厚膜化^[43—45]。常用防腐涂料的涂层干膜厚度一般为 100 μm 或 150 μm 以上,而重防腐涂料的干膜厚度一般在 200 μm 或 500 μm 以上,厚者可达 500 ~ 1000 μm,甚至 2000 μm。厚膜为涂料的长寿命提供了可靠的保证^[46]。烟气脱硫设备处于恶劣的腐蚀环境中,新型高性能防腐蚀涂料的开发对保证烟气脱硫装置的长效稳定运行具有重要意义。

2.1 聚脲

聚脲涂料是 20 世纪 80 年代发展起来的一种无污染、无溶剂环保涂料,由异氰酸组分与端氨基聚醚和胺扩链剂组分反应形成。聚脲最大的特点是具有 100% 固含量,固化速度非常快,能在高湿度、低温下(-20 ℃也能固化)瞬间固化施工^[46]。其典型性能为:1) -45 ~ 170 ℃可长期使用,能承受 180 ℃热冲击;2) 5 ~ 10 s 凝胶,10 min 实干;3) 与水泥砂浆的粘结强度 ≥ 4 MPa,与钢板基材的粘结强度 ≥ 10 MPa。

喷涂聚脲弹性体技术是一种在物体表面快速成型的无溶剂、无污染厚涂层施工技术。该技术是在反应注射成型(Reaction injection molding, RIM)技术的基础上,于 20 世纪 70 年代中后期发展起来的。曾经历了纯聚氨酯、聚氨酯/脲、纯聚脲三个阶段^[47—48],见表 3。

聚脲的问题主要是:体系干燥太快,层间的附着力差,特别是在混凝土上,对底材的润湿、附着力、表面质量都很差,耐高温性能也较差。另外,由于喷涂聚脲时凝胶时间短,该技术对设备的精度等各方面也提出了更高的要求^[49—50]。聚脲主要用作脱硫塔衬里,如中石化广州分公司、巴陵石化分公司、武汉分公司、荆门石化等企业采用双循环新型湍冲文丘里除尘脱硫技术^[51],在烟气脱硫装置综合塔内使用了聚脲涂

表 3 聚脲技术发展的三个阶段
Tab.3 Three development stages of polyurea technology

阶段	体系	异氰酸酯组分	树脂组分	主要优/缺点
第一代	聚氨酯	MDI 基	EO 封端多元醇、二醇扩链剂、催化剂	优点:价格低 缺点:对水敏感,极易发泡,力学性能差等
第二代	聚氨酯(脲)	MDI 基	EO 封端多元醇、芳香二胺扩链剂、催化剂、端氨基聚醚、芳香二胺扩链剂	优点:价格适中 缺点:发泡,力学性能一般
第三代	聚脲	MDI 基	端氨基聚醚、芳香二胺扩链剂	优点:对温、湿度不敏感,力学性能好,耐老化性能突出 缺点:价格高

层。此外,若施工方法或使用工况条件不当,聚脲内衬易出现鼓包、脱落情况。

2.2 纳米复合涂料

纳米复合乳液/涂料系列产品为有机高分子-无机纳米粒子复合材料,具有优异的耐化学腐蚀性、抗腐蚀介质渗透性、优异的机械强度及性能、优异的基材附着力、高耐温性、耐热冲击性、低线膨胀系数、高抗老化性、高使用寿命及优异的施工及维修便捷性等特点^[52],可代替衬胶、衬塑、衬聚脲、鳞片胶泥、花岗岩、耐酸瓷砖、耐酸水泥、呋喃、乙烯基及环氧树脂手糊玻璃钢等传统工艺,并适用于高低温环境。

有关试验表明,纳米复合乳液/涂料的抗化学渗透性是玻璃钢的 4 倍以上,部分产品可高达玻璃钢的 6~7 倍,在很大程度上解决了因“返锈”而导致衬层剥离、脱落的问题,同时对解决衬层的溶胀及开裂问题效果显著,广泛应用于各化学工业级工程中作为重防腐层的内衬。在烟气脱硫装置中,主要用于具有重防腐要求的脱硫尾气烟囱、烟道、脱硫塔、吸收塔等碳钢设备衬里。工业应用案例未见相关文献报道。

3 烟气脱硫装置衬里材料选择

湿法烟气脱硫系统常用防腐材料的性能见表 4。根据不同的腐蚀环境条件、衬里材料特性和各区域腐蚀环境对衬里材料的影响,选择合适的衬里材料,是降低造价及检维修费用,延长设备使用寿命,保障烟气脱硫装置稳定运行的有效措施。

根据本国的燃料质量、环保要求和经济水平,各国在选择脱硫设备的材质方面也不尽相同。在湿法 FGD 装置中大量采用耐蚀合金材料的造价很高,目前,我国湿法烟气脱硫系统不同区域非金属衬里材料的选择如下^[1,37,53-54]:1)烟气换热器本体采用玻璃鳞片树脂;2)烟气换热器至吸收塔入口烟道采用玻璃鳞片树脂;3)吸收塔塔体采用碳钢+橡胶内衬或碳钢+鳞片树脂内衬;4)吸收塔浆液池采用玻璃鳞片或丁基橡胶;5)吸收塔喷淋和除雾区域采用玻璃鳞片树脂或丁基橡胶;6)吸收塔出口烟道至烟气换热器采用玻璃鳞片树脂;7)烟气换热器至烟囱采用玻璃鳞片树脂;8)循环管道采用碳钢衬胶或玻璃钢管道。国外公司湿法烟气脱硫装置的选材情况^[16]见表 5。

表 4 湿法烟气脱硫系统常用的防腐材料及性能特点^[1]
Tab.4 Anticorrosion materials and performance characteristics of wet flue gas desulfurization system

防腐材料	造价比	特点	使用范围
镍基整体合金	3.1~4.4	耐酸(小于 15% 盐酸,小于 70% 硫酸),耐碱,在低 pH 值和氯离子较高的环境中防腐性能优良,具有较高的强度与塑性。	多用于恶劣的腐蚀环境,如入口烟道干湿界面。
玻璃鳞片树脂衬里	1.0	具有优良的抗渗透性、高的耐蚀性能和耐磨性,高温玻璃鳞片树脂能耐 160 ℃,有较强的粘结强度、附着力和抗冲击强度,防腐性能良好。	广泛应用于烟道、吸收塔等烟气脱硫装置的各个区域。
橡胶衬里	1.5	具有耐酸碱腐蚀性、耐磨性、可粘结性和一定的机械强度,防腐性能良好,但是耐温性差,易老化,对基体要求较高,施工难度大。	一般用于机械负荷大而介质或内部环境温度较低的区域,如吸收塔喷淋和除雾区域、浆液系统和烟道等。
玻璃钢	1.1~1.6	具有耐腐蚀性、耐热性、耐磨性,防腐性能良好,但是制作大型脱硫塔相当困难,容易产生加工缺陷,如气泡、裂纹等。	多用于浆液输送管道、吸收塔内喷淋管道和除雾器。

表 5 国外公司湿法 FGD 装置防腐蚀材料应用
Tab.5 Application of anti-corrosion materials in wet FGD device from foreign companies

公司名称	脱硫剂	吸收塔内衬	循环泵	塔内浆液管	塔外浆液管
三菱重工	石灰石浆液	玻璃鳞片衬里	衬胶离心泵	外鳞片内衬胶	碳钢内衬胶
日立公司	石灰石浆液	玻璃鳞片衬里		外鳞片内衬胶	碳钢内衬胶
川崎重工	石灰石浆液	鳞片或橡胶衬里	衬胶离心泵	外鳞片内衬胶	碳钢内衬胶
IHI	石灰石浆液	鳞片或橡胶衬里	衬胶离心泵	碳钢内、外衬胶	碳钢内衬胶
巴高克	石灰石浆液	橡胶衬里	衬胶离心泵	碳钢内、外衬胶	碳钢内衬胶
比肖夫	石灰石浆液	鳞片或橡胶衬里		碳钢内、外衬胶	碳钢内衬胶
ABB	石灰石浆液	橡胶衬里	合金叶轮	碳钢内、外衬胶	碳钢内衬胶
GESSI	石灰石浆液	鳞片或橡胶衬里		同径玻璃钢管	碳钢内衬胶

4 结语

烟气脱硫装置所处腐蚀环境极为恶劣,若不进行有效的防护,将影响整个系统的安全稳定运行。目前,用于FGD装置的材料有耐蚀合金、橡胶衬里、玻璃鳞片树脂衬里、整体玻璃钢、耐蚀砖板衬里、胶泥和重防腐涂料等。由于整体采用耐蚀合金材料价格昂贵,因此一般仅在腐蚀严重区域贴衬。采用非金属材料衬里是一种重要的防护手段。玻璃鳞片树脂衬里和橡胶衬里是烟气脱硫装置应用最为广泛的非金属衬里材料。近年来新开发的一些高性能防腐涂料具有优异的性能,但是其使用情况还有待实践检验。

参考文献

- [1] 时瑞生. 湿法烟气脱硫系统的腐蚀原因及防腐材料的选择[J]. 有色冶金节能, 2008(3): 61—64.
SHI Rui-sheng. Corrosive Reasons for the Wet Flue Gas Desulfurization System and Choice of Anti-corrosion Material[J]. Energy Saving of Non-ferrous, 2008(3): 61—64.
- [2] 朱晓光. 浅析脱硫烟气对系统的腐蚀成因及防护措施[J]. 锅炉制造, 2010(4): 38—40.
ZHU Xiao-guang. Discussion on the Flue Gas Corrosion of WFGD and the Protection Measure[J]. Boiler Manufacturing, 2010(4): 38—40.
- [3] 王海宁, 蒋达华. 湿法烟气脱硫的腐蚀机理及防腐技术[J]. 能源环境保护, 2004, 18(5): 22—24.
WANG Hai-ning, JIANG Da-hua. Anticorrosive Technology of Wet Flue Gas Desulfurization[J]. Energy Environmental Protection, 2004, 18(5): 22—24.
- [4] 李守信, 赵毅, 王德宏. 烟气脱硫系统的防腐蚀问题[J]. 华北电力大学学报, 2000, 27(4): 70—74.
LI Shou-xin, ZHAO Yi, WANG De-hong. Anticorrosive Problem of Flue Gas Desulfurization System[J]. Journal of North China Electric Power University, 2000, 27(4): 70—74.
- [5] 殷晓红, 张金丽, 佟瑶, 等. 燃煤电厂脱硫系统腐蚀分析及防腐措施[J]. 黑龙江电力, 2012, 34(2): 128—130.
YIN Xiao-hong, ZHANG Jin-li, TONG Yao, et al. Corrosion Analysis and Anti-corrosion Measure of Desulphurization System for Coal-fired Power Plant[J]. Heilongjiang Electric Power, 2012, 34(2): 128—130.
- [6] 关亚静. 烟气脱硫装置的防腐材料[J]. 河北电力技术, 2000(3): 28—29.
GUANG Ya-jing. Anticorrosive Materials of Flue Gas Desulfurization Plant[J]. Hebei Electric Power, 2000(3): 28—29.
- [7] 王小平, 张立. 有关应用在烟气脱硫领域的橡胶衬里3个标准的比较[J]. 中国电力, 2002, 35(3): 66—68.
WANG Xiao-ping, ZHANG Li. Comparisons of Three Standards about Rubber Linings Applied in the Flue Gas Desulfurization Field[J]. Electric Power, 2002, 35(3): 66—68.
- [8] 王天堂, 陆士平. VEGF鳞片胶泥在烟气脱硫装置中的应用[J]. 电力环境保护, 2002, 18(4): 42—45.
WANG Tian-tang, LU Shi-ping. Application of VEGF Scale Daub in FGD Equipment[J]. Electric Power Environmental Protection, 2002, 18(4): 42—45.
- [9] 龚峻, 姜一青. 玻璃鳞片在600MW机组烟囱防腐上的应用[J]. 浙江电力, 2011(1): 46—49.
GONG Jun, JIANG Yi-qing. Application of Glass Flake to Anti-corrosion of Chimney for 600 MW Units[J]. Zhejiang Electric Power, 2011(1): 46—49.
- [10] 王安琴, 陈九磅, 王平. 燃煤电厂湿法脱硫烟囱的防腐蚀复合涂层研究[J]. 涂料工业, 2013, 43(10): 39—43.
WANG An-qin, CHEN Jiu-bang, WANG Ping. Study on Compound Anti-corrosion Coatings Used for Wet Process Desulfurization Chimney in Coal Fired Power Plant [J]. Paint & Coatings Industry, 2013, 43(10): 39—43.
- [11] 南洋, 程艾琳, 田丰, 等. 玻璃钢烟囱在电厂脱硫系统中的应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2012(6): 73—76.
NAN Yang, CHENG Ai-lin, TIAN Feng, et al. The Application of FRP Chimney in Power Plant Desulfurization System [J]. FRP/Composites, 2012(6): 73—76.
- [12] 王忠熬, 吴恒刚. 泡沫玻璃砖在烟囱防腐中的应用[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(2): 45—47.
WANG Zhong-ao, WU Heng-gang. Application of Foam Glass Tiles in the Stack Anti-corrosion[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(2): 45—47.
- [13] 白学利, 王玉山, 郎鑫焱, 等. GD-APC杂化聚合材料在湿烟囱防腐改造中的应用[J]. 华北电力技术, 2012(5): 21—24, 32.
BAI Xue-li, WANG Yu-shan, LANG Xin-yan, et al. Application of GD-APC Hybrid Polymeric Materials in Anti-corrosion Transformation of Wet Stack[J]. North China Electric Power, 2012(5): 21—24, 32.
- [14] 李征. 喷涂聚脲在烟囱内衬防腐中的应用[J]. 现代涂料与涂装, 2010(12): 14—17.
LI Zheng. Application of Polyurea Spray Anticorrosion in the Lining of the Chimney[J]. Modern Paint & Finishing, 2010(12): 14—17.
- [15] 潘忠文, 张学双. 一种新防腐体系应用于湿烟囱的可行性探讨[J]. 电力科技与环保, 2012, 28(3): 61—62.
PAN Zhong-wen, ZHANG Xue-shuang. Discussion on Feasibility of a New Preservative System Applied to Wet Chimney [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2012, 28(3): 61—62.

- [16] 游春桃,林海波,黄海涛,等. 对石灰石-石膏法脱硫装置吸收塔衬里橡胶的应用研究[J]. 化工设备与管道, 2007,44(2):22—25.
YOU Chun-tao, LIN Hai-bo, HUANG Hai-tao, et al. Application Research of Lining Rubber in Absorber in Desulfurization Construction by Using Limestone-gypsum Method[J]. Process Equipment & Piping, 2007,44(2):22—25.
- [17] CASSIDY P E, AMINABHAVI T M. Water Permeation through Elastomers and Plastics[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1983(56):594—618.
- [18] 黄硕,吴仲岩,易辉,等. 疏水型自清洁涂料的制备与性能研究[J]. 表面技术, 2012,41(1):106—108.
HUANG Shuo, WU Zhong-kui, YI Hui. Fabrication and Properties of a Self-cleaning Hydrophobic Coating[J]. Surface Technology, 2012,41(1):106—108.
- [19] 天华化工机械及自动化研究设计院. 腐蚀与防护手册第4卷 工业生产装置的腐蚀与控制[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
Tianhua Chemical Machinery and Automation R&D Institute. Corrosion and Protection Manual, Volume 4: Corrosion and Control of the Industrial Production Equipment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [20] BERGER Wolfgang, KAEMPFFER Max. Resin Based Linings vs. Rubber Linings in FGD Scrubber Heads[C]//NACE Corrosion/2005. USA:[s. n.], 2005:05385.
- [21] HELMUT D R, RULLMANN H. Water Permeability of Rubber Linings and Effects of Temperature, Rubber Type and Rubber Thickness[C]//NACE Corrosion/2001. USA:[s. n.], 2001:01435
- [22] 赵凯. 玻璃鳞片树脂和橡胶衬里在湿法脱硫吸收塔上的应用[J]. 有色设备, 2008(6):30—32.
ZHAO Kai. Application of Glass Resin Flake and Rubber Lining in Wet Desulphurization Absorption Tower[J]. Non-ferrous Metallurgical Equipment, 2008(6):30—32.
- [23] 左景尹,左禹. 腐蚀数据与选材手册[M]. 北京:化学工业出版社, 1995.
ZUO Jing-yi, ZUO Yu. Corrosion Data and Material Selection Manual[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1995.
- [24] 钱寒东. 溴化丁基橡胶性能研究[J]. 世界橡胶工业, 2004,31(12):6—11.
QIAN Han-dong. Research on Properties of BIIR[J]. World Rubber Industry, 2004,31(12):6—11.
- [25] 王春玉,刘建秋. 石灰石-石膏湿法吸收系统高效运行的分析[J]. 环境工程, 2009,27(6):74—76.
WANG Chun-yu, LIU Jian-qiu. Analysis of Efficient Operation of Limestone-Gypsum Desulfurization System[J]. Environmental Engineering, 2009,27(6):74—76.
- [26] HELMUT D R, RULLMANN H. Rubber Lining for FGD Scrubbers for Waste Incinerator Plants[A]//NACE Corrosion/1999. USA:[s. n.], 1999:86.
- [27] FENNER J. Re-lining of Scrubbers in Flue Gas Desulfurization Plants[A]//NACE Corrosion/1999. USA:[s. n.], 1999:635.
- [28] 天华化工机械及自动化研究设计院. 腐蚀与防护手册第3卷 耐蚀非金属材料及防腐施工[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.
Tianhua Chemical Machinery and Automation R&D Institute. Corrosion and Protection manual, Volume 3: Corrosion Resistant Non Metallic Materials and Anti-corrosion Construction[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [29] 毛永吉. 发电厂烟气脱硫设备防腐涂料的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2006.
MAO Yong-ji. Research of Anticorrosion Coating in Flue Gas Desulfurization[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [30] 张贻刚,李淑英. 烟气脱硫装置中玻璃鳞片涂层的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2010,31(2):161—163.
ZHANG Yi-gang, LI Shu-ying. Corrosion Behavior of Glass Flake Coating in Flue Gas Desulphurization System[J]. Corrosion & Protection, 2010,31(2):161—163.
- [31] 梁磊. 乙烯基酯树脂鳞片材料在火电厂氨法烟气脱硫系统中的应用[J]. 腐蚀与防护, 2012,33(2):167—170.
LIANG Lei. Application of VEGF Flake Coating Ammonia Method FGD System in Power Plant[J]. Corrosion & Protection, 2012,33(2):167—170.
- [32] 赵礼金. 发电厂湿法烟气脱硫 FGD 橡胶防腐和玻璃鳞片防腐的比较[J]. 能源工程, 2008(6):55—57.
ZHAO Li-jin. Comparison of Rubber and Glass Flake Used as Anti-corrosion Materials in Flue Gas Desulphurization Systems[J]. Energy Engineering, 2008(6):55—57.
- [33] 曾邵,王天堂,陆士平. 烧结烟气脱硫装置的耐蚀材料选择及结构设计探讨[J]. 烧结球团, 2011,36(4):53—58.
ZENG Shao, WANG Tian-tang, LU Shi-ping. Selection of Corrosion Resistant Material for Sintering Waste Flue Gas Desulphurization Device and Its Structural Design[J]. Sintering and Pelletizing, 2011,36(4):53—58.
- [34] 杨小兵,马申,田树桐,等. 玻璃钢在燃煤发电厂烟囱中的应用研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2008(1):207—210.
YANG Xiao-bing, MA Shen, TIAN Shu-tong, et al. Research on Application of Glass Fiber Reinforced Plastic to Chimney for Coal-fired Power Plants[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2008(1):207—210.
- [35] BURFORD David P. Materials Testing during the Chiyoda CT-121 Scrubber Project at Georgia Power's Plant Yates[C]//NACE Corrosion/2001. USA:[s. n.], 2001:01405.
- [36] KELLEY Don H. Cost Effective Materials for Flue Gas Desulfurization (FGD) [C]//NACE Corrosion/1996. USA:

- [s. n.], 1996: 398.
- [37] HAWKINS Robert C. Field Construction of Large Diameter, Corrosion Resistant FRP Equipment [C]//NACE Corrosion/1998. USA: [s. n.], 1998: 450.
- [38] 李宝顺, 赵丽丽, 周驰, 等. 湿法烟气脱硫装置的腐蚀与防护[J]. 化工机械, 2009, 36(6): 640—643.
LI Bao-shun, ZHAO Li-li, ZHOU Chi, et al. Corrosion of the Wet Flue Gas Desulphurization (FGD) Systems and Prevention [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2009, 36(6): 640—643.
- [39] 魏荭, 乔光辉. 玻璃钢在电厂湿法烟气脱硫装置中的应用研究[J]. 中国能源, 2001(7): 21—23.
WEI Hong, QIAO Guang-hui. Research and Application Cases of FRP in Wet FGD Devices [J]. Energy of China, 2001(7): 21—23.
- [40] 王鑫. 电厂脱硫设备的防腐与防护对策研究[J]. 中国新技术新产品, 2010(18): 21.
WANG Xin. Corrosion and Protection Research of Power Plant Desulfurization Equipment [J]. China New Technologies and Products, 2010(18): 21.
- [41] 徐湘细. 实用防腐蚀工程施工手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
XU Xiang-xiang. Practical Anti-corrosion Engineering Construction Manual [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [42] 郭长荣. 砖板衬里用胶泥的选择[J]. 全面腐蚀控制, 1995(2): 25—31.
GUO Chang-rong. Choice of Cement in Using Brick Lining [J]. Total Corrosion Control, 1995(2): 25—31.
- [43] 庞启财. 新一代重防腐涂料技术——有机聚合物改性聚硅氧烷涂料[J]. 中国涂料, 2004(4): 30—33.
PANG Qi-cai. New Generation of Heavy-duty Anticorrosion Coatings—Silicone Coatings Modified with Organic Polymers [J]. China Paint, 2004(4): 30—33.
- [44] 冯辉霞, 崔锦峰, 俞树荣, 等. 重防腐涂料及其应用[J]. 全面腐蚀控制, 2005, 19(5): 1—3.
FENG Hui-xia, CUI Jin-feng, YU Shu-rong, et al. Heavy-duty Anticorrosive Coatings [J]. Total Corrosion, 2005, 19(5): 1—3.
- [45] 胡涛, 石莹莹, 周云, 等. 重防腐涂料的应用研究[J]. 现代涂料与涂装, 2008, 11(1): 1—4.
HU Tao, SHI Ying-ying, ZHOU Yun. Application and Development of Heavy-duty Coatings [J]. Modern Paint & Finishing, 2008, 11(1): 1—4.
- [45] 李国来, 张感盛, 管从胜. 重防腐涂料[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999.
LI Guo-lai, ZHANG Gan-sheng, GUAN Cong-sheng. Heavy-duty Coating [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999.
- [46] 王安苓. 燃煤发电厂湿烟卤防腐耐磨涂层研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014: 11—13.
WANG An-ling. Research on Anti-corrosion and Wear-resistance Coating Used on Wet-process Desulfurization in Coal-fired Chimney [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014: 11—13.
- [47] 李鑫茂. 聚脲防护涂层耐候老化及耐介质腐蚀性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011: 4—6.
LI Xin-mao. Study on Polyurea Protective Coating for Weather Resistance and Corrosion Resistance [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2011: 4—6.
- [48] 徐菲. 金属防护用聚脲涂层附着性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2012.
XU Fei. Study on Adhesion Properties of Polyurea Coatings for Metal Protection [D]. Qingdao: Qingdao Technological University, 2012.
- [49] 李荣光, 刘明辉, 汤兵, 等. 聚脲涂层的耐阴极剥离性能研究[J]. 油气储运, 2008, 27(3): 33—35.
LI Rong-guang, LIU Ming-hui, TANG Bing, et al. A Study on the Cathodic Disbonding Properties of Polyurea Coating [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(3): 33—35.
- [50] 王宝柱, 刘培礼. 关于聚脲热点问题的探讨[J]. 中国涂料, 2009, 24(10): 23—26.
WANG Bao-zhu, LIU Pei-li. Discussion on the Hot Issues of Polyurea [J]. China Coatings, 2009, 24(10): 23—26.
- [51] 李海. 催化裂化装置再生烟气污染物净化方案研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013: 9—14.
LI Hai. Study of FCC Regenerated Flue Gas Pollutant Purification Scheme [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2013: 9—14.
- [52] 韩恩厚, 刘福春, 柯伟. 纳米复合涂料的研究与应用[C]//全国腐蚀与防护青年学者走入宝钢学术交流会. 上海: 出版者不详, 2004.
HAN En-hou, LIU Fu-chun, KE Wei. Research and Application of Nanocomposite Coatings [C]// Corrosion and Protection to Baosteel for Young Scholars of Academic Exchange. Shanghai: [s. n.], 2004.
- [53] 欧阳明辉, 刘焕安, 叶际宣. 燃煤电厂烟气脱硫系统湿烟卤的腐蚀及防护[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5): 12—16.
OUYANG Ming-hui, YE Huan-an, YE Ji-xuan. Corrosion and Protection of Wet Stack in FGD System of Coal Fired Power Plant [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(5): 12—16.
- [54] 金东春, 蒋诚, 李治国. 无旁路脱硫系统的腐蚀与防腐问题研究[J]. 浙江电力, 2012(11): 65—68.
JIN Dong-chun, JIANG Cheng, LI Zhi-guo. Research on Corrosion and Anticorrosion of Non-bypass Desulphurization System [J]. Zhejiang Electric Power, 2012(11): 65—68.