

# 防水建筑材料制造业全过程清洁生产整治提升方案设计

王瑞晨<sup>1,2</sup> 姜立峰<sup>3</sup> 党春阁<sup>1</sup> 林雨琛<sup>1</sup> 范光宇<sup>4</sup> 李子秀<sup>1#</sup>

(1.中国环境科学研究院清洁生产与循环经济研究中心,国家环境保护生态工业重点实验室,北京 100012;

2.中北大学化学工程与技术学院,山西 太原 030051;3.贵州茅台股份有限公司,贵州 遵义 564501;

4.北京首创大气环境科技股份有限公司,北京 100176)

**摘要** 近年来,随着国内房地产业的快速发展,防水建筑材料制造业规模不断扩大,正逐渐成为推动中国经济发展的重要产业之一。同时,国内防水建筑材料制造企业暴露出技术装备落后、管理粗放、环境污染严重等问题,限制了行业进一步发展。秉承清洁生产理念,全面分析防水建筑材料制造业污染物产排特征,从合规性与源头控制、物料贮存和使用管理要求、生产过程管理要求、末端治理管理要求等方面提出全过程清洁生产整治提升方案,并结合行业发展现状和政策背景,分析促进防水建筑材料制造业全过程整治提升的难点,提出合理化建议,为行业实现高质量绿色发展提供参考。

**关键词** 防水建筑材料 全过程 整治提升 清洁生产 污染防治

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2023.05.024

**Design of the whole process renovation and improvement program of waterproof building materials manufacturing cleaner production** WANG Ruichen<sup>1,2</sup>, LOU Lifeng<sup>3</sup>, DANG Chungel<sup>1</sup>, LIN Yuchen<sup>1</sup>, FAN Guangyu<sup>4</sup>, LI Zixiu<sup>1</sup>. (1.Research Center of Cleaner Production and Circular Economy, State Environmental Protection Key Laboratory of Ecological Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; 2. School of Chemical Engineering and Technology, North University of China, Taiyuan Shanxi 030051; 3. Kweichow Moutai Co., Ltd., Zunyi Guizhou 564501; 4. Beijing Capital Air Environmental Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100176)

**Abstract:** In the recent years, with rapid development of realty business in China, the scale of waterproof building materials manufacturing has continued expanding. Gradually, this industry has becoming one of the mainstay industries to promote the economy of China. However, waterproof building materials production enterprises have exposed many problems, such as backward technology and equipment, extensive management, and heavy environmental pollution, which limits further development of the industry. Following the concept of cleaner production, the characteristics of pollutants generation and discharge in waterproof building materials manufacturing were analyzed comprehensively. A whole process improvement program for waterproof building materials manufacturing cleaner production was designed from the aspects like compliance and source control, material storage and use management, production process management, end treatment management, and so on. According to current industry's status and policy, difficulties and suggestions were offered for the further development of waterproof building materials manufacturing, so as to provide references for the realization of high-quality green development of the industry.

**Keywords:** waterproof building materials; whole process; renovation and improvement; cleaner production; prevention and control of pollution

防水建筑材料制造业与我国基础设施建设和房地产的发展紧密相关,在发展经济、改善人民生活水平、解决就业等方面发挥着重要作用。但是,目前我国防水建筑材料制造业整体呈现行业市场规模大,龙头企业稀少,中小企业甚至家

庭作坊式企业数量众多的局面,普遍存在污染物无组织排放、环境管理不规范等问题<sup>[1]</sup>。在当前打赢“污染防治攻坚战”、不断推进实现“碳达峰、碳中和”目标的政策背景下,防水建筑材料制造业的清洁生产水平亟待提升。针对单个企业逐

第一作者:王瑞晨,男,1997年生,硕士研究生,主要从事清洁生产政策与技术的研究。# 通讯作者。

一进行环境诊断和升级改造,不仅在很大程度上造成了人力财力的浪费,也对行业整体水平的提升收效甚微。因此,本研究对我国防水建筑材料制造业发展现状进行了总结,重点梳理了各类防水建筑材料的生产企业存在的关键共性问题,进而对防水建筑材料制造业全过程清洁生产整治提升方案进行设计,并分析难点,给出建议。

## 1 我国防水建筑材料制造业发展现状

随着我国基础设施建设不断加强,防水建筑材料制造业近年一直保持着快速发展态势。据不完全统计,目前我国防水建筑材料生产企业有4 000余家,具有建筑防水施工资质的企业有12 589家,行业市场规模在2 500亿元以上<sup>[2]</sup>。防水建筑材料制造业产品主要包括沥青类防水卷材、高分子类防水卷材和防水涂料等<sup>[3]</sup>。

据中国建筑防水协会统计,2021年全国防水建筑材料产量合计约为40.92亿m<sup>2</sup>,较上年增长8.41%。其中,沥青类防水卷材(包括改性沥青类和自黏橡胶沥青类防水卷材)占59.65%,高分子类防水卷材占9.92%,防水涂料占25.94%,新型防水建筑材料占4.04%,玻纤胎沥青瓦等其他防水材料占0.45%。

另据中国建筑防水协会对2016—2021年的统计数据显示,防水建筑材料制造业规模以上企业数量受新冠疫情影响在2019—2020年有所下降,但总体呈持续增长态势(见图1)。行业前10家企业的产品市场占有率从2015年的15%到2020年已上升至25%,行业集中度虽有提高,但整个行业主要由

中小企业构成的特征仍然明显。

## 2 主要防水建筑材料生产工艺与产排污分析

不同防水建筑材料生产工艺排放的特征污染物不同。高分子类防水卷材和防水涂料在生产过程中不产生沥青烟,车间内粉尘和悬浮颗粒物较少,环保压力相对较小。沥青类防水卷材生产过程中产生的沥青烟含有萘、菲、酚、呋唑、吡啶、吡咯、吡啶、茚等100多种化合物,其中数十种对人体具有遗传毒性、致突变性和致癌性,特别是其中的苯并芘具有强致癌作用<sup>[4-6]</sup>。以下是主要防水建筑材料生产工艺的产排污节点分析。

### 2.1 沥青类防水卷材

沥青类防水卷材生产工艺分为有胎卷材和无胎卷材两种生产路线<sup>[7-8]</sup>。其中主要的产排污情况包括:使用燃气导热油炉加热产生含SO<sub>2</sub>和氮氧化物的废气;原料沥青卸料、搅拌配料、浸油涂布、对辊成型、覆膜等过程容易有沥青烟、粉尘和挥发性有机物(VOCs)等的无组织排放(见图2)。另外,沥青改性时温度高达240~260℃,超过沥青的闪点温度,具有安全隐患,需要特别注意。

### 2.2 高分子类防水卷材

高分子类防水卷材是以合成树脂、合成橡胶或者两者共混体系为原料,加入一定量助剂和填料经过塑炼、混炼、压延或挤出成型、硫化、冷却定型等主要工艺制成的片状可卷曲防水材料<sup>[9-10]</sup>,其常规生产工艺及产排污节点如图3所示。其中,聚氯乙烯(PVC)等塑料类防水卷材生产过程中的特征污染物为粉尘和VOCs,粉尘主要产生于物料输送、投加及助剂应用过程,少量聚合物单体和低聚物在加热条件下也会从物料中逸散。橡胶类防水卷材在生产过程中塑炼、混炼工序多为敞开式,在高温条件下物料容易解离出微量单体和有害分解物,主要是烷烃和烯烃的衍生物<sup>[11]</sup>。

### 2.3 防水涂料

防水涂料生产工艺基本都采用密封的反应釜,主要产排污节点在物料投放、反应、放料口灌装等环节。如人工投放物料会导致粉尘和VOCs排放;反应釜内物料在加热条件下反应,部分工艺所需负压环境,都会导致部分VOCs和粉尘随反应釜顶端的抽气管道排出。放料口灌装环节多采用快速分装工艺,液料从出料口流出至包装桶这一过程中会有低浓度VOCs排放。

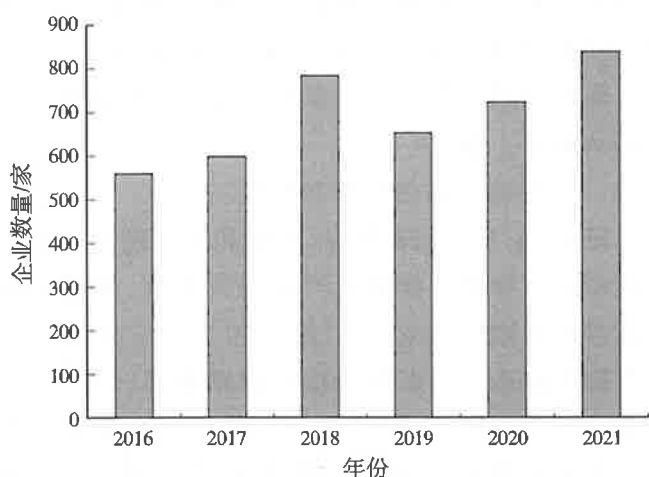


图1 2016—2021年中国防水建筑材料制造业规模以上企业数量

Fig.1 The number of enterprises above designated size in Chinese waterproof building materials manufacturing from 2016 to 2021

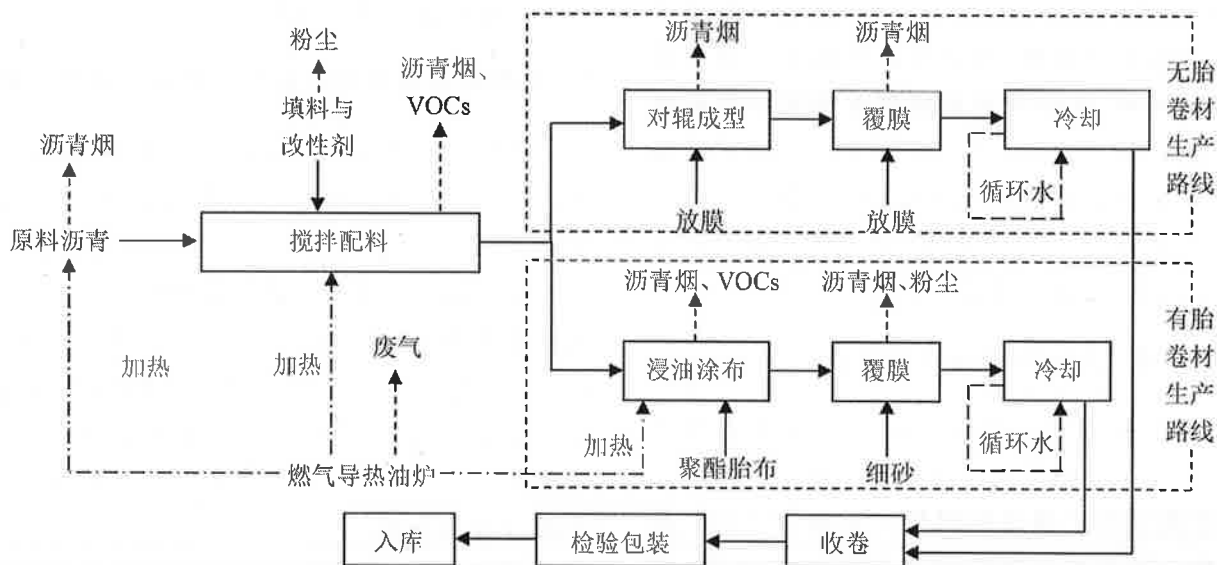


图 2 沥青类防水卷材生产工艺及产排污节点

Fig.2 The production process and pollution discharge node of bituminous waterproof rolling materials

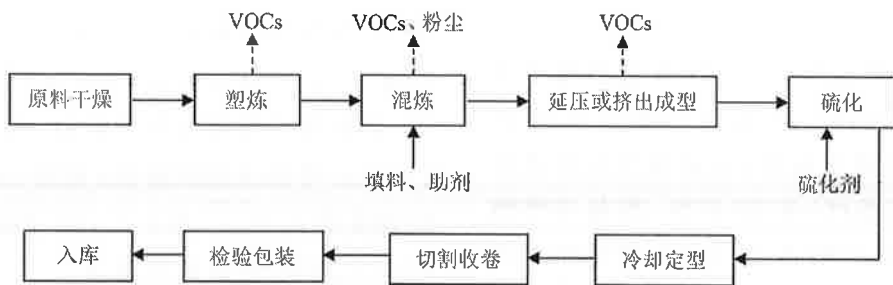


图 3 高分子类防水卷材常规生产工艺及产排污节点

Fig.3 The production process and pollution discharge node of common polymer waterproof rolling materials

### 3 防水建筑材料制造业全过程清洁生产整治提升方案设计

#### 3.1 方案设计思路

以促进行业绿色可持续发展、改善区域大气环境、逐步实现防水建筑材料制造企业清洁生产为目标,通过资料收集、检测分析、专家研讨等方式,提出具有行业特色的全过程清洁生产整治提升方案,详细技术路线见图 4。

#### 3.2 全过程清洁生产整治提升方案要求

##### 3.2.1 合规性与源头管理

合规性方面,企业应严格遵循国家相关法规做好环境影响评价和“三同时”验收工作,依法办理排污许可证,并按照规定种类和排放量合规排放污染物。源头管理方面,由于原材料带入的污染物不仅会直接影响产品质量还会伴随至整个产品的生产和使用过程,因此企业需要重点管控。

以目前产量最多、环保压力最大的沥青类防水卷材生产为例,原料选用高标准石油沥青可以减少软化剂的加入,在降低加热温度和生产能耗的同时

也可以减少沥青烟的产生,还可以提高产品耐久度。目前常被企业用作软化剂的废机油通常成分复杂,含有大量多氯联苯、多环芳烃及重金属等有毒有害物质,会对人体健康造成危害<sup>[12]</sup>。再如,废橡胶粉中所含的硫化物是防水建筑材料生产和使用过程中臭气的主要来源,可以使用热塑性弹性体(SBS)和无规聚丙烯(APP)改性剂替代废橡胶粉,同时可以降低沥青改性时的加热温度,减少烟气排放<sup>[13-14]</sup>。

防水建筑材料制造业合规性与源头控制具体要求归纳在表 1 中。

##### 3.2.2 物料储存和使用管理要求

目前,企业在物料储存、运输和装卸过程中普遍采取粗放式管理。物料及产品露天堆放、储运管理混乱等不合规行为造成了粉尘和 VOCs 排放。所以在物料储运和使用中应保持管路密闭,对污染物实现全过程封闭式回收,VOCs 废气用管道集中收集到末端处理系统,回收的粉料可回用,即使对于无法实现密闭的环节企业也应加强现场管理。

防水建筑材料制造业物料储存和使用管理具体要求归纳在表 2 中。

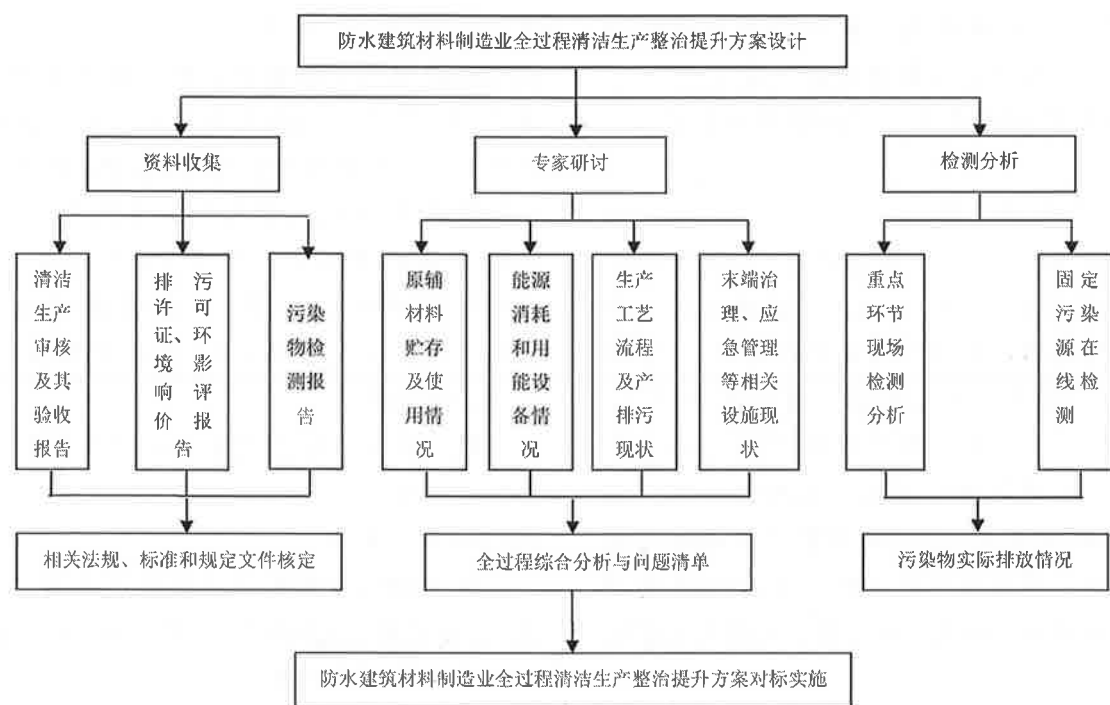


图4 方案设计技术路线

Fig.4 The technology roadmap of the program design

表1 合规性与源头控制要求

Table 1 The requirements for compliance and source control

| 内容     | 要求                                                                                                                 |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 合规性要求  | 参照《环境影响评价法》严格执行环境影响评价制度和验收制度,获得环评批复,并通过“三同时”验收<br>参照《排污许可管理办法(试行)》和《排污许可证申请与核发技术规范 工业固体废物(试行)》依法办理和登记排污许可证,合规排放污染物 |
| 源头管理要求 | 选用符合《建筑石油沥青》(GB/T 494—2010)的石油沥青;杜绝废机油作为软化剂;采用 SBS 和 APP 改性剂;禁止使用废橡胶粉                                              |

表2 物料储存和使用管理要求

Table 2 The requirements for material storage and use management

| 内容         | 要求                                                                                                                                                                                     |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 原料沥青       | 液体沥青运输、储存、装卸等过程密闭。卸沥青槽密闭,沥青采用密闭管道输送、投加,沥青槽及沥青储罐废气经密闭收集后引至废气处理系统<br>固体沥青应储存于原料库内,采取密闭或苫布遮盖等防护措施,禁止露天堆放和敞开式卸料。沥青、软化油储罐设置围堰,围堰内做防渗防腐处理                                                    |
| 滑石粉等粉料     | 装卸输送管道应保持密闭,储罐呼吸口处安装粉尘收集装置,鼓励安装高位报警装置,防止发生爆仓造成粉尘逸散                                                                                                                                     |
| 液态 VOCs 物料 | 采用密闭管道输送投加物料,储存、装卸等过程密闭,采用非管道运输方式转移时,应采用密闭容器、罐车,卸车管路连接口密封,杜绝跑冒滴漏现象                                                                                                                     |
| 矿物粉粒状物料    | 砂、页岩片等矿物粉粒状物料的转移、输送、装卸过程中产尘点应采用袋式除尘、滤筒除尘等工艺进行处理。除尘器卸灰口应采取遮挡等抑尘措施。除尘灰采取袋装、罐装等密闭措施收集、存放和运输,不得直接卸落到地面                                                                                     |
| 有机液储罐      | 储存真实蒸气压 $\geq 76.6$ kPa 的挥发性有机液体储罐,应采用低压力罐、压力罐储存或其他等效措施<br>储存 $27.6 \text{ kPa} \leq \text{真实蒸气压} < 76.6 \text{ kPa}$ 且储罐容积 $\geq 75 \text{ m}^3$ 的有机液体储罐,应采用浮顶罐并在浮顶与罐壁之间加装双重高效密封或固定顶罐 |

### 3.2.3 生产过程管理要求

防水建筑材料制造企业在生产过程中普遍存在搅拌罐投料手工投放、成型工段封闭程度不一、覆膜撒砂工序收集效率较低等容易造成粉尘逸散和无组织排放的问题。对此,建议生产线采用全密闭、自动化技术,有效把控产品质量和环境监测。配料可引

入液下快速分散投料技术,以提高改性沥青分散融化效率和配料安全性,避免由于粉料挥洒带来的粉尘污染。物料研磨可采用高剪切分散机替代传统研磨机,高剪切分散机基于剪切原理对物料进行粉碎和混合,效果好且能耗低,能大幅度提高改性沥青成品料的细腻度,可有效解决改性沥青类防水卷材表

面质量问题<sup>[15]</sup>。对配料罐、浸油槽等污染物产排节点必须按照相关国标要求进行密封并配备集气装置,以削减生产过程中的污染物无组织排放<sup>[16-18]</sup>。

防水建筑材料制造业生产过程管理具体要求归纳在表 3 中。

3.2.4 末端治理管理要求

防水建筑材料生产过程中危害大、污染重的污染物主要是沥青烟和 VOCs。目前多数企业采用喷淋塔水洗、填料或活性炭吸附等低效净化工艺,处理效果不好。少数企业采用电捕焦油塔和紫外(UV)光解净化器组合工艺,但存在维护难度大、运行成本高的问题,且 UV 光解废灯管属于危险废弃物。另有蓄热式燃烧处理工艺,通过陶瓷蓄热体储存高温烟气的热量,用于预热需要处理的废气,也存在建设投资较大、能耗较高的问题,仅适用于处理大流量的 VOCs 废气<sup>[19]</sup>。

末端治理需要遵循污染物分类治理的原则,应选用高效低耗的先进设备,将沥青烟和 VOCs 根据产排污节点进行分类收集和处理。推荐采用雾化喷

淋和电捕焦油塔净化沥青烟,处理后沥青烟可降至 20 mg/m<sup>3</sup> 以下,处理效率达 97% 以上<sup>[20]</sup>。VOCs 的处理建议选用超重力旋转填料床净化工艺,此工艺利用旋转产生的强大离心力强化气液两相的传质过程<sup>[21]</sup>,与传统填料塔相比,传质系数可以提高 1~3 个数量级,同时还具有气相压降低、占地面积小、开停车方便、建设和运维成本低等优点。此外,企业应注重管网设计,根据废气的组成、浓度、处理量等参数选择适宜风量的风机,收集处理过程应保持管路和设施密闭。

防水建筑材料制造业末端治理管理具体要求归纳在表 4 中。

3.2.5 其他要求

防水建筑材料制造企业现场环境、环境管理制度、台账资料、环境监测、分表计电、安全管理和应急管理等其他要求归纳在表 5 中。

4 促进防水建筑材料制造业全过程清洁生产整治提升的难点与建议

表 3 生产过程管理要求  
 Table 3 The requirements for production process management

| 内容   | 要求                                                                                                                                                                     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 搅拌配料 | 禁止人工开盖直接投料,应采用密闭管路输送,以减少工艺过程中的无组织排放。鼓励采用液下加(投)粉体原料工艺,以提高液料和粉料的混合分散效率,减少污染物排放                                                                                           |
| 浸油涂布 | 浸油池、涂油池等尽量形成全密闭作业空间,鼓励塑钢结构二次密闭。车间废气捕集率不低于 90%                                                                                                                          |
| 覆膜   | 撒砂覆膜机应密闭或安装高效集气装置,废气捕集率不低于 90%                                                                                                                                         |
| 废气收集 | 废气输送管道应符合《大气污染治理工程技术导则》(HJ 2000—2010),在负压下运行,泄漏检测不应超过 500 μmol/mol<br>排风罩(集气罩)应符合《排风罩的分类及技术条件》(GB/T 16758—2008)。风速应不低于《局部排风设施控制风速检测与评估技术规范》(AQ/T 4274—2016)规定的 0.3 m/s |

表 4 末端治理管理要求  
 Table 4 The requirements for end treatment management

| 内容     | 要求                                                                                                                                                                                                                                 |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 废气     | 废气密闭收集至末端治理设施,废气排放需满足苯并芘排放质量浓度≤0.3 μg/m <sup>3</sup> ,无组织排放监控质量浓度≤0.008 μg/m <sup>3</sup> ;非甲烷总烃排放质量浓度≤120 mg/m <sup>3</sup> ,无组织排放监控质量浓度≤4.0 mg/m <sup>3</sup> ;沥青烟排放质量浓度≤40 mg/m <sup>3</sup> ,生产设备不得有明显的无组织排放现象存在 <sup>1)</sup> |
| 粉尘     | 除尘器至少两周进行 1 次检查和清灰,以保证设备的正常运转和使用,任何时候粉尘沉积厚度不应超过 3.2 mm。颗粒物排放质量浓度≤120 mg/m <sup>3</sup> ,无组织排放监控质量浓度≤1.0 mg/m <sup>3</sup>                                                                                                          |
| 废水     | 禁止含油废水外排,循环水池应保持密闭。建议增加废水处理系统进一步处理喷淋洗涤循环水,并做好相关转运台账记录                                                                                                                                                                              |
| 固废     | 一般固废包括废包装、除尘灰、生活垃圾等,应按照国家规范要求建设贮存场所,分类贮存<br>危废贮存场所应设置警示标志,危废容器和包装物粘贴危废识别标志,执行双人双锁制度。由有处置资质的单位统一处置,严格执行危废转移计划审批和转移联单制度 <sup>2)</sup>                                                                                                |
| 污染治理设施 | 污染治理设施应保证在生产设施启动前开机,在生产设施运营全过程(包括启动、停车、维护等)保持正常运行,在生产设施或自身存积的气态污染物全部净化后再停机。设备的主要操作参数和运行维护记录至少保存 3 年                                                                                                                                |

注:1)相关要求参考文献[22];2)相关要求参考文献[23]。

表 5 其他要求  
Table 5 The requirements for others

| 内容     | 要求                                                                                                                                        |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 现场环境   | 厂区和车间地面应实施硬化,内外环境保持干净整洁,管理有序。危废储存点、废气排放点或监测点等应有明显标识。严禁堆放与生产无关的物品<br>对管道、接口、阀门、法兰等点位建立定期巡查制度,确保生产过程中无跑冒滴漏现象<br>厂区污水收集和排放系统等各类污水管线设计清晰,雨污分流 |
| 环境管理制度 | 建立健全环境管理制度及操作规程,并在环保公示栏张贴,加强员工相关方面的培训                                                                                                     |
| 台账资料   | 台账资料齐全、规范,具体包括:1)环评审批手续(环评报告及批复、环保竣工验收报告等);2)有效期内的排污许可证正副本;3)有效期内的监测报告;4)与有资质公司签订的危废处置协议,危废转移联单,危废管理台账;5)污染防治设施运行及维护台账                    |
| 环境监测   | 污染防治设施废气进口和废气排口应设置永久性采样口,安装符合《气体参数测量和采样的固定装置》(HJ/T 1—92)的要求,废气采样口在采样结束后及时封闭。每季度至少开展 1 次废气监测                                               |
| 分表计电   | 污染治理设施与生产设备严格实行分表计电,确保治污设施正常运转,不因生产设备断电而影响治污设施运行,确保各项污染物稳定达标排放                                                                            |
| 安全管理   | 设置安全管理机构,配备安全管理人员,建立完善的安全管理制度、安全生产岗位操作规程等,强化现场安全生产设备设施管理,安全生产标识和安全防范措施到位                                                                  |
| 应急管理   | 厂区建造事故应急池并保持常空状态,事故应急池、初期雨水池和循环水池不能共用<br>制定重污染天气应急预案和突发环境事件应急预案并在环保部门备案,每年进行 1 次以上的应急培训和演练,并将方案和总结记录留存,不得挪用应急救援物资                         |

#### 4.1 在产业聚集地区推广全过程提升方案

目前,防水建筑材料制造业在我国正处于高速发展时期,产业规模变大但集中度不足。建议选取一批产业聚集区域内具有代表性和影响力的企业推行全过程整治提升方案,培育、树立行业标杆企业,引领周边企业逐步实现转型升级。同时,加强政策引导,淘汰规模偏小、环保水平较低的家庭作坊式企业,减轻区域环境治理压力。鼓励工艺不齐整、设备较落后的小微企业间横向联合,打造闭环产业链,加快生产工艺改造和技术升级。可根据区域发展规划,在防水建筑材料制造企业较集中的地区实施园区化管理,园区整体依照全过程整治提升方案进行设计,构建起源头削减、过程控制、末端治理相结合的精细化生产模式,优化产业结构,助力区域经济高质量发展<sup>[24]</sup>。

#### 4.2 加快防水建筑材料制造行业规范体系建设

受房地产市场快速扩张以及行业监管缺失等因素影响,我国防水建筑材料制造业发展模式粗放,环境管理不规范问题突出。对此,建议相关部门引领行业协会尽快制定新的行业准入标准,并出台国家层面的《防水建筑材料制造业清洁生产评价指标体系》《防水建筑材料制造业污染防治可行技术指南》等技术支撑文件,从政府层面对防水建筑材料制造企业产能扩大、污染防治等方面进行技术指导。同时强化环保监督管理机制,环保监察部门不定期对辖区内防水建筑材料制造企业开展废气监督性检

测。鼓励企业配备便携式大气污染物快速检测设备,及时了解自身排污状况。通过构建完备的行业规范体系,联合执法部门加强市场监管,以规范市场秩序、提升全产业链质量、促进行业持续走绿色发展道路。

#### 4.3 探索防水建筑材料制造业减污降碳路径

随着国家“双碳”战略的推进和“产业升级与绿色低碳相融合”理念的不断深入,未来防水建筑材料制造业需要从原辅材料和能源、生产过程、产品使用和回收等方面进行优化,从源头削减污染物和温室气体,努力探索行业的减污降碳协同发展路径<sup>[25]</sup>。建议相关规划部门尽快组织编写《中国防水建筑材料制造企业温室气体排放核算方法与报告指南》,建立完善的防水建筑材料制造业温室气体统计核算制度,并将重点排放企业纳入全国碳市场配额管理单位名单中。鼓励企业自行开展碳盘查活动,结合相关政策法规和发展状况制订具有自身特色的“双碳”行动方案,为防水建筑材料制造业未来实现“双碳”目标做出战略规划。

### 5 结 语

(1) 秉持清洁生产理念,结合不同规模和产品企业的调研结果,厘清了各类防水建筑材料制造企业的产排污情况,从而设计了防水建筑材料制造业全过程清洁生产整治提升方案,并为企业提供指导性建议,为相关部门监督执法提供参考。

(2) 从当前行业现状和国家发展战略角度出发,总结了行业全过程整治提升的难点,并提出建议。

## 参考文献:

- [1] 李坛,韩女,刘星,等.国外建筑防水技术对我国的启示[J].施工技术,2021,50(9):1-3,7.
- [2] 尚华胜.建筑防水行业标准化体系研究[D].武汉:湖北工业大学,2018.
- [3] 《建筑防水材料及应用技术评价的研究》课题组.建筑防水材料及应用技术评价的研究[J].中国建筑防水,2010(增刊1):27-37.
- [4] XU T,SHI H Q,WANG H,et al.Dynamic evolution of emitted volatiles from thermal decomposed bituminous materials [J].Construction and Building Materials,2014,64:47-53.
- [5] HONG C H,LEE C H,YU H S,et al.Benzopyrene, a major polyaromatic hydrocarbon in smoke fume, mobilizes Langerhans cells and polarizes Th2/17 responses in epicutaneous protein sensitization through the aryl hydrocarbon receptor[J].International Immunopharmacology,2016,36:111-117.
- [6] LIANG M,REN S,FAN W,et al.Characterization of fume composition and rheological properties of asphalt with crumb rubber activated by microwave and TOR[J].Construction and Building Materials,2017,154:310-322.
- [7] 童光勇.自粘式防水卷材施工新工艺研究[D].绵阳:西南科技大学,2018.
- [8] 赵长才,占飞.自愈型非自粘弹性体改性沥青防水卷材的研制[J].新型建筑材料,2017,44(6):81-85.
- [9] 雍奎刚,孙晓丹.高分子防水卷材的应用及发展[J].塑料科技,2008,36(12):60-64.
- [10] 韩文俊.树脂/废胶粉热塑性弹性体的制备与性能研究[D].北京:北京化工大学,2004.
- [11] 许春明,李莹,张和平.三元乙丙橡胶防水卷材热解分析[J].火灾科学,2010,19(2):96-103.
- [12] 张康.废机油的直接资源化利用及改性分级利用研究[D].太原:太原理工大学,2018.
- [13] CHEN Z R,CAO D W,ZHAO W Z,et al.Study on properties of modified asphalt by the thermoplastic elastomer (TPE) compound[J].Advanced Materials Research,2012,598:404-498.
- [14] SONG Y L,ZHAO N,ZHANG Y,et al.Low-temperature performance and its microstructure of SBS modified asphalt under condition of aging[J].Materials Science and Engineering,2018,439:042056.
- [15] 许其峰.超剪切均质机关键结构可靠性分析与研究[D].无锡:江南大学,2006.
- [16] HJ 2000—2010,大气污染治理工程技术导则[S].
- [17] 关伟,陈忠林,张炜晨,等.沥青烟治理现状及工艺路径分析[J].辽宁大学学报(自然科学版),2016,43(4):374-380.
- [18] 檀春丽,张澜夕.《防水卷材行业大气污染物排放标准》解析[J].中国建筑防水,2016,44(4):37-40.
- [19] 吴桂平.蓄热式燃烧技术在有机废气处理项目的应用[J].能源与环境,2021(4):56-58.
- [20] 刘章现,蔡宝森,张胜华.电捕法净化焙烧炉沥青烟气[J].环境科学与技术,2006,29(7):92-93.
- [21] 张春阳.超重力吸收法回收气体中异丙醇的工艺研究[D].太原:中北大学,2020.
- [22] GB 16297—1996,大气污染物综合排放标准[S].
- [23] GB 18597—2001,危险废物贮存污染控制标准[S].
- [24] 王欢芳.我国产业集群低碳发展水平及升级模式研究[D].长沙:中南大学,2013.
- [25] 李海生,谢明辉,李小敏,等.全过程一体化构建减污降碳协同制度体系[J].环境保护,2022,50(增刊1):24-29.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2022-04-10)

(上接第723页)

- [39] TAMADONI A,QADERI F.Optimization of soil remediation by ozonation for PAHs contaminated soils[J].Ozone: Science & Engineering,2019,41(5):454-472.
- [40] WANG J,ZHANG X,LI G.Compositional changes of hydrocarbons of residual oil in contaminated soil during ozonation [J].Ozone: Science & Engineering,2013,35(5).
- [41] CHU L,CANG L,SUN Z,et al.Reagent-free electrokinetic remediation coupled with anode oxidation for the treatment of phenanthrene polluted soil[J].Journal of Hazardous Materials,2022,433:128724.
- [42] DUGAS T R,LOMNICKI S,CORMIER S A,et al.Addressing emerging risks: scientific and regulatory challenges associated with environmentally persistent free radicals[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2016,13(6):573.
- [43] LI H,PAN B,LIAO S,et al.Formation of environmentally persistent free radicals as the mechanism for reduced catechol degradation on hematite-silica surface under UV irradiation [J].Environmental Pollution,2014,188:153-158.
- [44] LI H,GUO H,PAN B,et al.Catechol degradation on hematite/silica-gas interface as affected by gas composition and the formation of environmentally persistent free radicals [J].Scientific Reports,2016,6(1):1-9.
- [45] LAI L,JI H,ZHANG H,et al.Activation of peroxydisulfate by V-Fe concentrate ore for enhanced degradation of carbamazepine: surface  $\equiv V(III)$  and  $\equiv V(IV)$  as electron donors promoted the regeneration of  $\equiv Fe(II)$  [J].Applied Catalysis B: Environmental,2021,282:119559.
- [46] SUN Y,ZHAO J,ZHANG B T,et al.Oxidative degradation of chloroxylenol in aqueous solution by thermally activated persulfate: kinetics, mechanisms and toxicities [J].Chemical Engineering Journal,2019,368:553-563.

编辑:黄 苇 (收稿日期:2022-03-31)