

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2020.0110

崔阳阳,刘艳梅,迟文涛,等.2020.中国集成电路制造行业 VOCs 排放特征及控制对策[J].环境科学学报,40(9):3174-3179

Cui Y Y, Liu Y M, Chi W T, et al. 2020.VOCs emission characteristics and control measures for integrated circuit manufacturing industry in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,40(9):3174-3179

## 中国集成电路制造行业 VOCs 排放特征及控制对策

崔阳阳<sup>1</sup>,刘艳梅<sup>1</sup>,迟文涛<sup>1</sup>,何丽娟<sup>1</sup>,曹西子<sup>1</sup>,丁淮剑<sup>2,\*</sup>,薛亦峰<sup>1,\*</sup>

1. 北京市环境保护科学研究院,国家城市环境污染控制工程技术研究中心,北京 100037
2. 中国电子工程设计院有限公司,北京 100840

**摘要:**中国电子信息产业发展迅速,集成电路等电子器件产量不断增加.在集成电路制造的过程中,大量有机溶剂的使用导致 VOCs 的产生和排放,从而对大气环境造成影响.为掌握集成电路制造行业 VOCs 的排放特征,系统分析了其工艺流程和产排污环节,分析了行业废气收集和治理现状,通过对典型企业 VOCs 的排放监测,获得 VOCs 排放水平;采用排放因子法核算行业 VOCs 历史排放量,并基于行业排放特征及减排潜力分析,提出了相应的污染防治对策.结果表明:在集成电路制造中,VOCs 排放环节主要集中在光刻、清洗、去胶等过程,1 m<sup>2</sup>集成电路产量约使用 87 g 有机溶剂,VOCs 产生量较大;通过采取高效的 VOCs 治理技术,集成电路制造行业有组织排放水平较低,平均浓度为 2.1 mg·m<sup>-3</sup>,但厂界无组织排放浓度相对较高,平均浓度为 0.78 mg·m<sup>-3</sup>,接近国家标准的排放限值.根据排放量核算结果,2011—2016 年中国集成电路制造行业 VOCs 排放量呈逐年上升的趋势,主要受产量增加而相应污染控制技术水平提升有限的影响,无组织排放量比重大,占排放总量的 38.1%~45.1%.

**关键词:**集成电路;VOCs;排放特征;减排潜力;控制对策

文章编号:0253-2468(2020)09-3174-06

中图分类号:X51

文献标识码:A

## VOCs emission characteristics and control measures for integrated circuit manufacturing industry in China

CUI Yangyang<sup>1</sup>, LIU Yanmei<sup>1</sup>, CHI Wentao<sup>1</sup>, HE Lijuan<sup>1</sup>, CAO Xizi<sup>1</sup>, DING Huaijian<sup>2,\*</sup>, XUE Yifeng<sup>1,\*</sup>

1. National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, Beijing 100037
2. China Electronics Engineering Design Institute Co. Ltd., Beijing 100840

**Abstract:** Electronic information industry has been developed rapidly in China, the production of electronic devices such as integrated circuit (IC) is increasing. The use of a large amount of organic solvents in IC manufacturing industry leads to the generation and emission of VOCs, which affects the atmospheric environment. In order to determine the VOCs emission characteristic of IC manufacturing industry, the process flow, pollutants emission step, the current situation of flue gas collection and treatment of which are systematically analyzed in this study, understanding the organized VOCs emission level based on the monitoring for typical enterprises. The emission factor method is adopted to calculate the VOCs emission of IC manufacturing industry, the pollution prevention and control measures are proposed based on the emission characteristics and reduction potential analysis. The results show that: the VOCs emission process is mainly from lithography, cleaning and gluing process in IC manufacturing, about 87 g organic solvents are used for 1 m<sup>2</sup> of IC production. By adopting efficient VOCs purification system, the organized emission level of IC manufacturing industry is relatively low with an average concentration of 2.1 mg·m<sup>-3</sup>, but the unorganized emission concentration at the factory boundary is relatively high with an average of 0.78 mg·m<sup>-3</sup>, which is close to the emission limit of the implementation standard. VOCs emission from IC manufacturing industry in China have the upward trend from 2011 to 2016, which mainly affected by the increase of IC production and the limited improvement of VOCs remove efficiency. The ratio of unorganized emissions is significant, accounting for 38.1%~45.1% of total VOCs emissions. Combined with the VOCs emission characteristic of IC manufacturing industry, it is considered that there is still potential in reduction of organic solvents use and control of unorganized emissions.

**Keywords:** integrated circuit (IC); volatile organic compounds (VOCs); emission characteristic; emission reduction potential; control measure

收稿日期:2020-03-02

修回日期:2020-03-30

录用日期:2020-03-30

基金项目:国家重点研发计划课题(No.2016YFC0201106);北京市环境保护科学研究院科技基金项目(No.2019-B-02)

作者简介:崔阳阳(1996—),男,E-mail:cuiyangyang@cee.com; \* 责任作者,E-mail:xueyifeng@cee.cn; dinghuaijian@ceedi.cn

## 1 引言(Introduction)

中国大气环境质量仍须进一步改善,2018年,在全国338个地级及以上城市中,217个城市环境空气质量超标,占比为64.2%。其中京津冀地区PM<sub>2.5</sub>年平均浓度为60 μg·m<sup>-3</sup>超过环境空气质量标准(35 μg·m<sup>-3</sup>)71%;O<sub>3</sub>日最大8 h平均浓度为199 μg·m<sup>-3</sup>超过标准(160 μg·m<sup>-3</sup>)24%(生态环境部,2018)。VOCs是PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>的前体物,已成为限制空气质量改善的重要因素(Zheng *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2018)。电子行业中有机溶剂的大量使用已成为VOCs的重要来源,在原环境保护部等9个部门印发的“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案中,对电子行业提出了生产过程中溶剂清洗、光刻等环节的管控要求。

VOCs污染控制对于空气质量的改善具有重要作用,但此前研究主要集中在石化、包装印刷、化工以及工业涂装等VOCs排放的重点行业上(刘文文等,2019;邹文君等,2019)。张远东等(2015)对中国电子行业总体的污染现状进行了概要分析;何梦林等(2016)结合采样与调研数据分析对广东省典型电子企业的VOCs排放特征进行了分析;柳承强(2017)通过对苏州市60家电子产品制造行业生产过程的调查,对VOCs的排放提出了控制建议,但对电子行业中重点行业类别专项研究分析较为缺乏。

集成电路制造处于电子行业产业链的中游,具有附加值高、技术密集等特点,是中国重点发展的电子行业之一。因此,本研究以集成电路制造行业作为研究对象,系统分析了其工艺流程和产排污环节,厘清行业废气收集和治理现状;对典型生产企业开展了VOCs排放监测,获得其VOCs的排放数据;同时开展了集成电路制造企业有机原辅料使用等活动水平调查,采用排放因子法核算行业VOCs排放量;基于电子行业产排污环节及减排潜力的分析,提出了污染防治对策,可为制定相关控制措施和大气环境管理决策提供参考。

## 2 材料与方法(Materials and methods)

### 2.1 行业概况

电子信息产业是指制造电子设备、电子元件、电子器件及其专用原材料的工业,可分为上、中、下游3个层次。集成电路制造属于电子器件制造行业,是电子信息产业中的中游产业,用于提供电子原材

料和零部件。近年来,在市场拉动和政策支持下,中国集成电路产业快速发展(图1),产量逐年上升(Xu *et al.*, 2007; Yuan, 2013; 王兴龙,2017; Zhang *et al.*, 2017; 王兴龙,2018; 于广河等,2018),由2011年的1.52×10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>上升到2016年的4.12×10<sup>8</sup> m<sup>2</sup>,增长率达到171%,产业发展迅速(江梅等,2011),其对大气环境的影响逐渐引起了社会的关注。

表1 2011—2016年中国集成电路产量  
Table 1 IC production in China from 2011 to 2016

年份	集成电路产量/10 <sup>8</sup> m <sup>2</sup>
2011年	1.52
2012年	1.66
2013年	3.20
2014年	3.37
2015年	3.54
2016年	4.12

中国集成电路制造行业主要分布在长三角、珠三角、京津冀等经济较为发达的地区,其中,江苏省产量最大,对中国集成电路总产量贡献了34.4%;其次是上海市,占全国年生产总量的17.3%,二者所在的长三角地区占比之和达到了51.7%。包括广东省在内的珠三角地区占比在16.6%左右(图1),这些区域集成电路行业发展迅速、产量较大,这与其具有良好的相关配套设施、交通便利、具有较多的高素质人才有关。

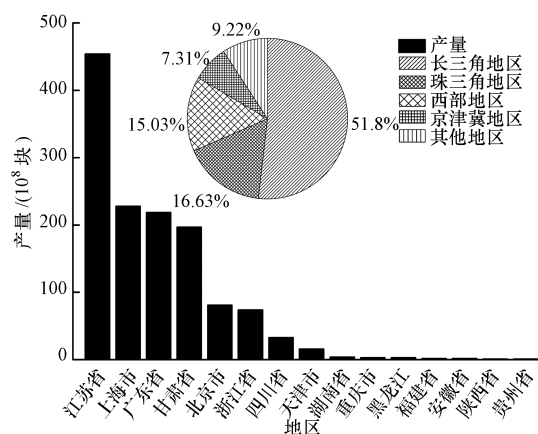


图1 2016年中国集成电路产量空间分布

Fig.1 Spatial distribution of IC production in China in 2016

集成电路由原料晶圆片经过多次重复的显影、蚀刻、薄膜沉积等步骤,最后封装而成。集成电路在生产过程中产生的污染物主要来自于单晶硅片制

造和 IC 制造 2 个过程,其中包括清洗、氧化、离子注入、显影、光刻、蚀刻、化学气相沉积等主要生产环节.这些生产环节会产生大量的有机废气、酸碱废气以及特殊类工艺废气等(图 2).其 VOCs 主要来自有机溶剂的使用,工序包括光刻、清洗、去胶等,其中光刻过程有机溶剂的使用量最大(张卿川等,2014;乔雷,2015),包括光刻胶、黏结剂、清洗剂等,这些有机溶剂在使用过程中会挥发出大量 VOCs (Wang *et al.*, 2013;夏邦寿等,2014;魏少军,2017;王迪等,2019).首先是光刻过程,这是集成电路制造过程中

VOCs 产生量最大的环节(约占总产生量的 70%~90%),此过程涉及稀释液、光刻胶、黏结剂等多种有机溶剂的大量使用;其次是清洗过程(约占总产生量的 10%~20%),有机溶剂用量通常较大,所使用的清洗剂、稀释剂等均具有较强的挥发性,此外,去胶过程也会有 VOCs 的产生.在所产生的 VOCs 中,丙酮、异丙醇、胺类等是主要的成分,均具有较强的挥发性,在生产中如未能妥善收集处理,易造成无组织大量排放的情况.

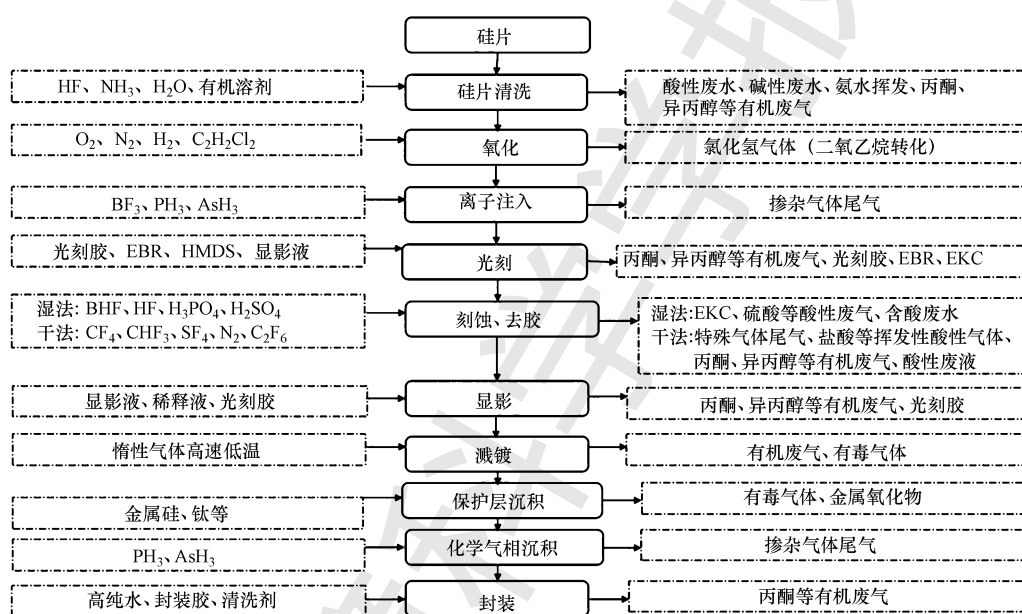


图 2 集成电路生产工艺及产污环节

Fig.2 Production process and pollutants emission of IC manufacturing

## 2.2 排放量核算

采用排放因子法对中国集成电路制造行业 VOCs 的排放量进行核算,排放因子来自原北京市环境保护局关于印发《挥发性有机物排污费征收细则》集成电路制造 VOCs 产污系数(北京市环境保护局,2015),考虑废气收集和治理技术的发展和应情况,结合活动水平数据,核算得到中国集成电路制造行业 VOCs 排放变化,并分析无组织和有组织排放的贡献比例,计算方法如式(1)所示.

$$E = \sum_{i=1}^n \{A_i \gamma_{EF} \times [(1 - \alpha_i) + \alpha_i(1 - \eta_i)]\} \quad (1)$$

式中, $E$  为 VOCs 排放量(t); $\gamma_{EF}$  为集成电路制造行业产污系数( $t \cdot m^{-2}$ ); $A_i$  为集成电路生产面积( $m^2$ ); $\alpha_i$  为行业集气效率; $\eta_i$  为行业废气处理效率.

根据对典型集成电路企业的问卷调查,可获得行业废气的平均收集效率和治理技术的去除率.结果表明,收集效率基本稳定在 90%,治理技术去除率有所增加(郑卓云等,2018),去除率由 2011 年的 80%上升到 2016 年的 85%.

## 3 结果与讨论(Results and discussion)

### 3.1 集成电路有机溶剂使用情况

集成电路制造行业是溶剂的使用源,由于原辅料中有机溶剂的大量使用,导致了末端 VOCs 的排放.掌握和了解集成电路制造行业原辅料使用情况和规律,对于 VOCs 排放管理和决策具有重要参考作用.因此,本研究对北京市 13 家集成电路制造企业(生产半导体集成电路芯片和射频集成电路等产品)原辅料有机溶剂使用情况开展调查,结果见图

3.可以看出,在所有的有机溶剂中,OK73 稀释剂(丙二醇单甲醚与丙二醇单甲醚醋酸酯 7:3 混合而成)使用量最大,占比为 61.5%,使用过程包括光刻、清洗等过程.其次是 DEV 显影液,占比为 20.8%.结合北京市集成电路的年产量,得到单位产量溶剂使用量,即  $1 \text{ m}^2$  集成电路的生产中约使用 87 g 有机溶剂,其中包括 53 g 稀释剂、18 g 显影液、9 g 光刻胶、4 g 异丙醇以及 2 g 其他有机溶剂.以一家典型的生产半导体集成电路芯片的集成电路制造企业为例,对单位产量的平均有机溶剂使用量进行校准和验证,企业主要产品为 12" 集成电路,生产面积为  $2.17 \times 10^7 \text{ m}^2$ ,使用的有机溶剂包括稀释剂、显影液、光刻胶、异丙醇等,年使用量 1875 t,对应的单位产量有机溶剂使用量约 86 g,与行业平均值基本一致.可以看出,行业有机溶剂使用强度较高,在未来,行业 VOCs 控制还须在源头上减少有机溶剂使用量和高挥发性物质.

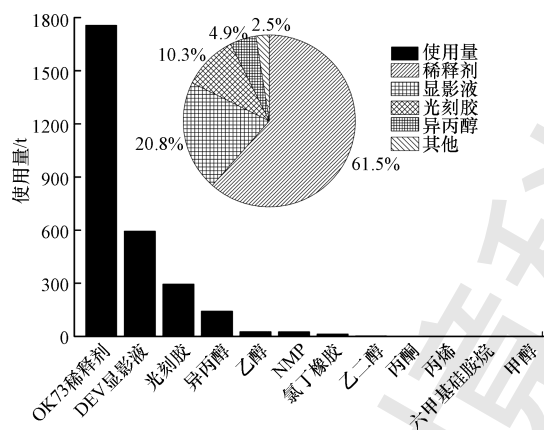


图3 集成电路制造行业有机溶剂使用情况

Fig.3 Organic solvents usage of IC manufacturing industry

### 3.2 集成电路制造行业 VOCs 排放特征

溶剂使用产生的有机废气,一部分经收集净化处理后排放,即为有组织排放(经过排气筒的污染排放).未被收集的有机废气可能通过排风系统逸散,成为无组织排放(不经过排气筒的污染排放),此外清洗过程由于使用大量有机溶剂,产生的废水及处理过程也会有部分 VOCs 排放(徐捷等,2007;魏巍,2009;陈可,2014;张世豪等,2018;赵锐等,2018;李启云,2019;王瑞文等,2019),行业总体 VOCs 污染排放过程如图 5 所示.由图 4 可见,该行业 VOCs 排放环节较多,且由于车间面积较大,废气完全收集较为困难,一部分 VOCs 会通过一般排气

系统与外部空气进行交换,从而产生大量无组织 VOCs 排放.随着国家标准《挥发性有机物无组织排放控制标准》(GB 37822-2019)的发布实施,对于涉及含 VOCs 产品使用的集成电路制造行业应进一步加强废气收集,提高废气收集处理系统效率.

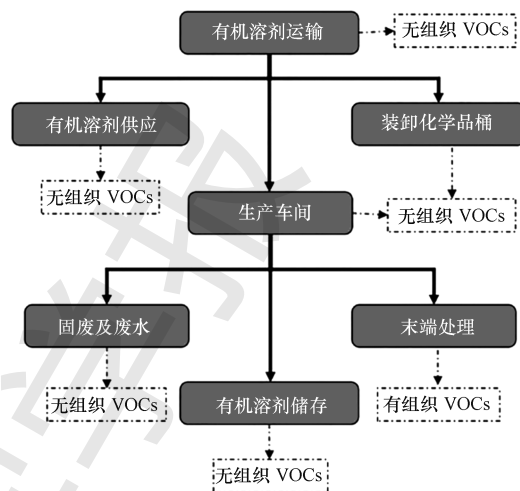


图4 集成电路制造 VOCs 排放特征

Fig.4 VOCs emission characteristic of IC manufacturing industry

对于 VOCs 有组织排放,于 2016—2017 年在不同季度对 3 家典型集成电路制造企业有机废气排放口进行监测,监测结果如图 5a 所示.可以看到,通过采用沸石浓缩转轮焚烧等净化装置处理,其有组织 VOCs 排放浓度较低,浓度为  $0.36 \sim 3.7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均浓度为  $2.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,低于北京市电子工业大气污染物排放标准(DB 11/1631-2019)第 I 时段的排放限值  $20 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .但由于有组织排放烟气量较大(约  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),总体排放量仍不可忽视.由于 VOCs 无组织排放环节多,包括有机溶剂储存运输过程、废液和废水处理过程以及生产过程中有机废气未收集排放等,导致集成电路制造行业厂界无组织排放浓度水平相对较高,监测的排放浓度为  $0.36 \sim 1.21 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均浓度为  $0.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5b),较为接近北京市大气污染物综合排放标准中无组织排放浓度限值( $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),故须引起足够的关注.

### 3.3 集成电路制造行业 VOCs 排放变化情况

利用排放因子法,结合行业平均废气收集效率及末端治理技术去除率,对 2011—2016 年中国集成电路制造行业 VOCs 排放量进行核算,并识别其有组织及无组织排放贡献情况,结果如图 6 所示.可以看出,中国集成电路制造行业 VOCs 排放量呈上升

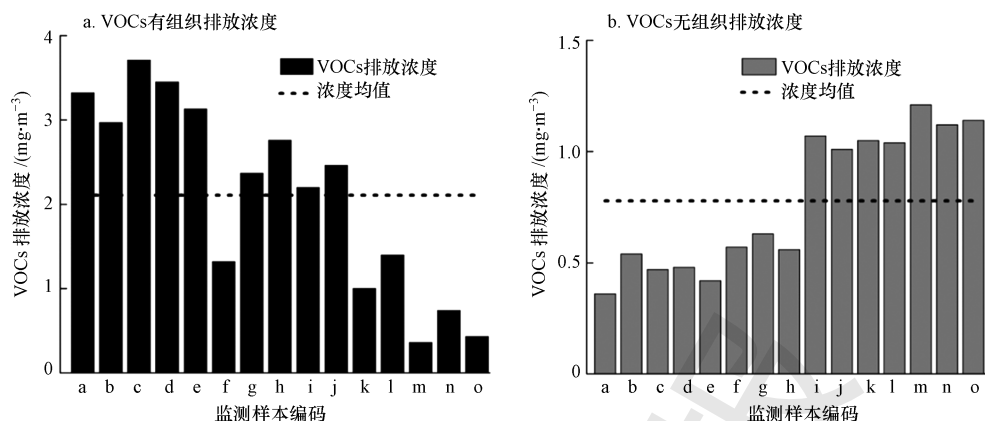


图5 典型集成电路企业 VOCs 排放浓度

Fig.5 VOCs emission concentration of typical IC manufacturing enterprise

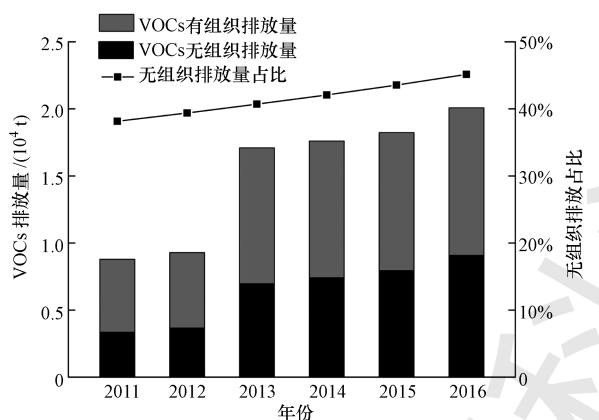


图6 2011—2016年我国集成电路制造行业 VOCs 排放量变化趋势

Fig.6 VOCs emission trend of IC manufacturing industry in China from 2011 to 2016

趋势,从2011年的8800 t增加到2016年的20000 t,年增长率为21.3%。其中2012—2013年增长率最大,达84.3%,这主要是因为经济快速增长,使得2013年集成电路产量大幅增加。相对其他电子行业子类别,集成电路制造车间废气收集效率相对较高,因此,有组织排放量仍是主导排放,约占总体排放量的58.5%。随着有机废气治理技术的发展,去除率缓慢上升,有组织排放贡献比例有所降低,从2011年的61.8%下降到2016年的54.8%。受产量增加的影响,无组织排放量继续上升,排放贡献也进一步加大。

### 3.4 减排潜力及控制对策

综合集成电路制造的生产工艺、产污环节及VOCs排放特点,可以看出行业VOCs减排潜力主要

集中在有机原辅料的减量化和低挥发溶剂的替代方面,同时应进一步提高废气收集效率和净化效率。控制策略包括以下几点。

①有机溶剂使用减量化或替代方案。优化制造工艺,减少或替代高挥发性原辅料的使用。在清洗环节,适当使用纯水对丙酮或异丙醇进行替代,或使用低挥发性的OK73或干冰替代丙酮,从源头上减少VOCs的产生。

②加强无组织排放管控。进一步提高工艺清洁生产水平,对于产生VOCs的环节应进行密闭和废气收集,如确实无法进行密闭操作,应采用局部密闭的生产方式或其他减排措施来减少其挥发逸散。对于敞开液面的VOCs排放,应采用密闭废水液面,将收集的VOCs废气排至VOCs处理系统进行处理后净化排放,同时在储存和运输过程中也要注意密闭,最大限度减少VOCs无组织排放。

③有组织VOCs废气深度治理,加强净化设施的维护和保养。采用沸石浓缩转轮焚烧等有效的VOCs治理技术,优化温度控制,定期对泵、风机、阀门、管路接头等易发生泄漏的设备与管线组件定期检测、及时修复,防止VOCs废气泄漏,加强对净化设施的日常维护和保养,确保正常使用(夏邦寿等,2014;王迪等,2019)。

## 4 结论 (Conclusions)

1)初步掌握了集成电路VOCs排放特征和有机溶剂使用规律。集成电路制造行业VOCs主要来自光刻、清洗、去胶等过程中有机溶剂的使用,其中光刻过程涉及稀释液、光刻胶、黏结剂等多种有机溶剂使用;1 m<sup>2</sup>集成电路产量约使用87 g有机溶剂,

导致 VOCs 产生量较大,行业废气收集效率较高,但无组织排放环节较多。

2)识别了集成电路制造行业有组织和无组织 VOCs 排放水平。通过采用如沸石浓缩转轮焚烧等技术等高效的 VOCs 治理技术,降低了集成电路制造行业 VOCs 有组织排放浓度(平均值为  $2.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。由于废气量较大(约  $2.5 \times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ),总体排放量仍不可忽视,因此,须加强净化设施的维护和保养。厂界无组织 VOCs 排放浓度较高(平均为  $0.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),接近现执行标准的排放限值,须引起行业内的重点关注。

3)考察了 2011—2016 年中国集成电路制造行业 VOCs 排放变化。行业 VOCs 排放量呈逐年上升趋势,从 2011 年的 8800 t 增加到 2016 年的 20000 t,年增长率为 21.3%;有组织排放量仍是主导排放,平均占总体排放量的 58.5%;受产量增加的影响,无组织排放量继续上升,排放贡献逐年加大。

4)在进行减排潜力分析的基础上,提出了集成电路行业 VOCs 控制对策。遵循综合防治的原则,从有机溶剂的减量和替代、加强无组织排放管控以及末端治理等方面进行综合治理,进一步降低行业 VOCs 排放水平。

#### 参考文献 (References):

- 北京市环境保护局. 2015. 挥发性有机物排污费征收细则[EB/OL]. 2019-11-01. <http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/xxgk/fgwj/qtjw/hbjfw/604447/index.html>,
- 陈可. 2014. 电子行业 VOCs 的源头控制与末端治理技术探讨[J]. 中国环保产业, (8): 47-50
- 何梦林, 王旒, 陈扬达, 等. 2016. 广东省典型电子工业企业挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 36(5): 1581-1588
- 江梅, 张国宁, 邹兰, 等. 2011. 有机溶剂使用行业 VOCs 排放控制标准体系的构建[J]. 环境工程技术学报, 1(3): 221-225
- 李启云. 2019. VOCs 催化燃烧治理技术进展[J]. 中国资源综合利用, 37(8): 91-93
- 柳承强. 2017. 州市电子产品制造行业挥发性有机污染物处理对策研究[D]. 苏州: 苏州科技大学
- 刘天文, 方莉, 郭秀锐, 等. 2019. 京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析[J]. 环境科学, 40(9): 3942-3948
- 乔雷. 2015. 国内外挥发性有机物(VOCs)排放标准现状概述[C]//中国环境科学学会. 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京
- 生态环境部. 2018. 2018 年中国环境公报[EB/OL]. 2019-11-01. <http://hjj.changchun.gov.cn/ywdt/zwdt/gnyw/201905/P020190530340283177962.pdf>.
- WANG H L, NIE L, LI J, *et al.* 2013. Characterization and assessment of volatile organic compounds (VOCs) emissions from typical industries[J]. Chinese Science Bulletin, 58(7): 724-730
- Wang Q L, Li S J, Dong M L, *et al.* 2018. VOCs emission characteristic and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan [J]. Atmospheric Environment, 128: 234-241
- 王迪, 赵文娟, 张玮琦, 等. 2019. 溶剂使用源挥发性有机物排放特征与污染控制对策[J]. 环境科学研究, 32(10): 1687-1695
- 王龙兴. 2017. 我国集成电路产业发展目标和“十三五”发展规划分析[J]. 集成电路应用, 34(1): 11-15.
- 王龙兴. 2018. 2018 年我国集成电路产业发展的展望[J]. 集成电路应用, 35(2): 6-9
- 王瑞文, 张春林, 丁航, 等. 2019. 电子制造业塑料件生产过程的挥发性有机物排放特征分析[J]. 环境科学学报, 39(01): 4-12
- 魏少军. 2017. 2017 年中国集成电路产业现状分析[J]. 集成电路应用, 34(4): 6-11
- 魏巍. 2009. 中国人为源挥发性有机化合物的排放现状及未来趋势[D]. 北京: 清华大学
- Xu J, Wei H P, Xiu G L, *et al.* 2007. Study on the emission of volatile organic compounds (VOCs) from semiconductor manufacture industry[J]. Environmental Science and Management, 32(10): 37-44
- 夏邦寿, 张卿川, 张绍修, 等. 2014. 电子工业废气 VOCs 排放特征及防治对策探讨[J]. 环境与可持续发展, 39(5): 81-83
- 徐捷, 魏海萍, 修光利, 等. 2007. 半导体行业挥发性有机物排放特征研究[J]. 环境科学与管理, 32(10): 37-41
- Yuan B, Hu W, Shao M, *et al.* 2013. VOC emissions evolution and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 13: 6631-6679
- 于广河, 朱乔, 夏士勇, 等. 2018. 深圳市典型工业行业 VOCs 排放谱特征研究[J]. 环境科学与技术, 41(S1): 232-236
- Zhang C, Zhou K L, Yang S L, *et al.* 2017. On electricity consumption and economic growth in China [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76: 352-368
- Zheng J, Chang M, Xie H T, *et al.* 2016. Exploring the spatiotemporal characteristic and control strategies for volatile organic compound emissions in Jiangsu [J]. Journal of Cleaner Production, 127: 249-216
- 张卿川, 夏邦寿, 杨正宁, 等. 2014. 国内外对挥发性有机物定义与表征的问题研究[J]. 污染防治技术, 27(5): 3-7
- 张世豪, 李雪梅, 丁淮剑, 等. 2018. 中国显示器件行业 VOCs 排放特征及控制对策[J]. 环境科学研究, 31(11): 1827-1834
- 张远东, 蔡瑜瑄, 侯瑞光, 等. 2015. 电子行业 VOCs 污染问题的探究[J]. 广东化工, 42(21): 129-130
- 赵锐, 黄洛萍, 张健强, 等. 2018. 成都市典型溶剂源使用行业 VOCs 排放成分特征[J]. 环境科学学报, 38(3): 1147-1154
- 郑卓云, 廖平凡, 颜敏, 等. 2018. 电子制造业注塑车间挥发性有机物排放特征及排放标准研究[J]. 广东化工, 45(4): 133-134
- 邹文君, 修光利, 鲍仙华, 等. 2019. 汽车零配件涂装过程 VOCs 排放特征与案例分析[J]. 环境科学研究, 32(8): 1358-1364