

## 漆包线行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究

王宇楠<sup>1</sup>,叶代启<sup>1\*</sup>,林俊敏<sup>1</sup>,叶焯德<sup>2</sup>,付名利<sup>1</sup> (1.华南理工大学环境工程系,工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室,广东 广州 510006; 2.东莞泽龙线缆有限公司,广东 东莞 523000)

**摘要:** 根据“源头追踪”思路,结合生产工艺调查,现场采样及实验分析,研究了漆包线制造过程中挥发物有机物(VOCs)从原物料输入到产品输出(原物料输入、净化销毁、泄露、逸散、最终排放、产品残留)各环节的排放特征.结果表明,共检出 41 种 VOCs,从原物料输入的 VOCs,有 81.1%得到了销毁,3.5%从涂料储槽,供漆系统等环节逸散,2.6%从炉膛出口及其他环节泄露,8.4%经管道有组织排放,只有极少部分残留在产品中.主要排放的 VOCs 成分是乙苯、甲酚、二甲酚、苯酚、二甲苯、N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺.VOCs 排放系数为(24.75±6.52)g VOCs/kg 漆包线.采用排放系数法估算了 2010 年全国漆包线行业 VOCs 的排放量和 2015 年的预期排放量分别为 2.62 万 t 和 3.19 万 t.

**关键词:** 漆包线; 挥发性有机物; 源头追踪; 排放特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)06-0980-08

**A study on emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from enameled wire industry.** WANG Yu-nan<sup>1</sup>, YE Dai-qi<sup>1\*</sup>, LIN Jun-min<sup>1</sup>, YE Chi-de<sup>2</sup>, FU Ming-li<sup>1</sup> (1.Key Laboratory for Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, Department of Environmental Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2.Jeton Cable Works Corporation Limited, Dongguan 523000, China). *China Environmental Science*, 2012,32(6): 980-987

**Abstract:** The emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from raw materials input to products output (raw materials input, destruction, leakage, fugacity, final emission, products output) were studied in enameled wires manufacturing processes based on the concept of source-tracing, production process investigations, on-site sampling and experimental analysis. The results showed that 41 kinds of VOCs were detected, 81.1% VOCs from raw materials were destroyed, 3.5% escaped from paint storage tank, paint supply system, etc. 2.6% leaked from furnace outlet and other links, 8.4% emitted from organized emission pipes, only few were remain in products. The main emitted constituents of VOCs were ethyl benzene, methyl phenol, dimethyl phenol, phenol, dimethyl benzene, NMP, DMF. The emission factor was (24.75±6.52) g VOCs/kg enameled wires. The emission of VOCs from enameled wire manufactures in the year 2010 was 2.62 million tons and it would reach 3.19 million tons in the year 2015 were estimated by emission factor method.

**Key words:** enameled wire; volatile organic compounds (VOCs); source-tracing; emission characteristics

2010年,我国漆包线产量为115.2万t<sup>[1]</sup>,成为世界第一生产大国.漆包线在生产过程中使用了大量的有毒溶剂和稀释剂(简称混合溶剂),这些挥发性有机物(VOCs)大多以废气方式排放至大气中,严重影响周围环境空气质量及人群健康.

近年来,国内外不少学者对我国人为源VOCs污染排放开展了相关的研究工作<sup>[2-5]</sup>,但针对工业源具体行业VOCs的排放特征鲜有报道.在有关行业VOCs排放特征的研究中<sup>[6-10]</sup>,大多数文献集中于废气排放环节单方面的研究,对行业VOCs流动整个过程的物质变化、组成分布仍

缺少全面细致的研究.

本研究依据“源头追踪”思想,对漆包线生产各环节中的VOCs进行物质流向跟踪,用不锈钢采样罐等工具采样,用HS、GC-MS等实验方法进行分析,研究了漆包线行业VOCs的排放特征和组成分布,旨在为控制漆包线行业VOCs污染提供可靠的污染源数据支持.

收稿日期: 2011-09-23

基金项目: 环保公益性行业科研专项项目(2011467003); 大气污染控制广东高校工程技术研究中心建设项目(GCZX-A0903)

\* 责任作者, 教授, cedqye@scut.edu.cn

## 1 研究方法 with 调研数据

### 1.1 “源头追踪”研究思路

源头追踪是指在行业中对 VOCs 从原物料输入到最终排放物质流动全过程的分析研究。

用“源头追踪”方法研究工业行业 VOCs 排放特征时,应结合行业生产工艺流程,调查清楚区域内 VOCs 流向情况<sup>[1]</sup>.VOCs 的流动一般是从最初原物料输入开始,一部分经管道收集后送往净化装置销毁,由管道排向大气;一部分在此过程中泄露逸散至大气中;另有一部分被回收利用,或残留在废水、废弃物、产品中(图 1).VOCs 源头追踪思想体现了行业 VOCs 的物料衡算。

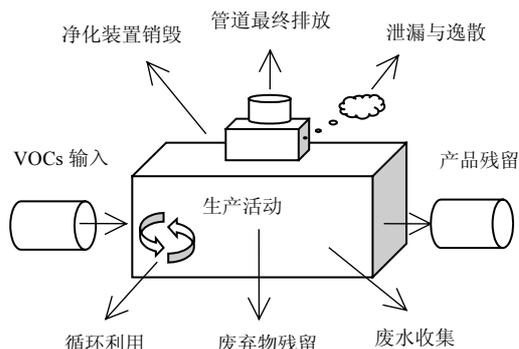


图 1 基于物料衡算的 VOCs 源头追踪

Fig.1 VOCs source-tracing based on the material balance

### 1.2 漆包线生产工艺及 VOCs 流向

漆包线生产工艺分为放线、退火、涂漆、烘培、冷却、收线.根据“源头追踪”思路,主要将研究分为以下 7 个环节(图 2):(1)原物料输入环节,

指涂料(主要由纯有机溶剂和固体树脂组成)中所含的 VOCs(I:Input);(2)管道初始收集 VOCs 环节(C:Collection);(3)管道最终排放 VOCs 环节(E:Emission);(4)净化装置销毁 VOCs 环节(D:Destruction),其中, $D=C-E$ ;(5)泄漏环节:主要来自烘炉出口、排废风机轴承、管道阀门、法兰或其它管道连接元件处泄露的 VOCs(L:Leakage);(6)逸散环节,主要来自油漆储槽内有机溶剂的挥发、供漆系统、润滑剂使用等逸散的 VOCs(F:Fugacity);(7)产品残留环节,成品中残留的 VOCs(O:Output).

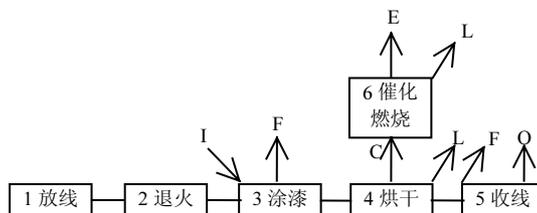


图 2 漆包线生产工艺流程及 VOCs 流动示意

Fig.2 Production process of enameled wires manufacture and VOCs flow process

### 1.3 生产信息调查

选取在国内生产规模、生产工艺、废气处理水平上具有行业代表性的东莞泽龙线缆有限公司为调查对象.通过现场调研,收集企业提供的年生产报表、物质安全生产资料表、物料使用情况表等,结合中国电器工业协会电线电缆分会提供的数据资料,经过整理,计算及归纳,得出现阶段我国漆包线行业生产的基本信息(表 1).

表 1 漆包线行业生产信息

Table 1 Production information of enameled wire industry

品种	市场份额(%)	代表产品	涂料/产品(kg/kg)	耗时(h/kg)
聚酯漆包线	20.2	QZ	Z:0.15	0.035
聚氨酯漆包线	19.4	QA	A:0.15	0.035
聚酯亚胺漆包线	18.6	QZY	EI*:0.15	0.035
复合层漆包线	18.4	Q(ZY/XY)	EI*:0.15 AI:0.06	0.036
自黏漆包线	18.2	QZYN	EI*:0.15 SB:0.10	0.036
其他漆包线	5.2			

注:涂料 Z 表示聚酯,A 表示聚氨酯,EI 表示聚酯亚胺,AI 表示聚酰胺亚胺,SB 表示自黏涂料.\*涂料经稀释后所得值

选取聚酯漆包线(QZ)、聚氨酯漆包线(QA)、聚酯亚胺漆包线(QZY)、聚酯亚胺/聚酰胺酰亚胺复合层漆包线[Q(ZY/XY)]、自黏性聚酯亚胺漆包线(QZYN)5类漆包线生产过程中各环节的VOCs为研究对象。

## 2 样品采集与分析

对5种漆包线生产过程中所用的涂料,排放的VOCs废气以及产品进行采集,用实验方法分析各环节中VOCs的物质组分及含量。

### 2.1 样品采集

按照USEPA TO-15A 不锈钢采样罐方法<sup>[12]</sup>采集有组织管道及无组织排放的有机废气。采样前采样罐被检验无目标化合物并抽成真空,并且在最前端连接一装有无水硫酸钠及棉花的玻璃吸收管。采样时打开罐阀门,通过限流阀调节流量以满足采样时间的要求,直至内外气压相等。采样流量为400mL/min,采样时间为5min。

用15mL的干净玻璃瓶采集约10mL的各种类型涂料,密封保存。用采样袋采集约50cm的各种型号的漆包线,密封保存。

### 2.2 排气流量及VOCs排放量的确定

2.2.1 排气流量的测定 参照《固定源废气监测技术规范》<sup>[13]</sup>中的相关方法,使用KB-6A型风速仪、卷尺、水银温度计、S型皮托管、U型压力计、Wi70022型烟气含湿量检测器、HJ03-2003P型数字大气压力表等仪器工具,测定有组织管道及无组织泄露逸散点的大小尺寸、废气流速、废气温度、废气全压及静压、废气含湿量、大气压力等。

干排气流量计算公式:

$$Q_i = 3600 \times F_s \times V_s \times \frac{B_a + P_a}{101325} \times \frac{273}{273 + t_s} \times (1 - X_{sw}) \quad (1)$$

式中: $Q_i$ 为标准状态下*i*环节的干排气流量, $m^3/h$ ;  $F_s$ 为测点的断面面积, $m^2$ ;  $V_s$ 为测点的平均废气流速, $m/s$ ;  $B_a$ 为大气压力,Pa;  $P_a$ 为测点的废气静压,Pa;  $t_s$ 为测点的废气温度, $^{\circ}C$ ;  $X_{sw}$ 为测点废气的水分含量,%。

### 2.2.2 各排放环节的VOCs排放量计算公式

$$A_i = C_i \times Q_{si} \times K_i \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中: $A_i$ 为每千克漆包线生产时在*i*环节的VOCs排放量, $g/kg$ ;  $C_i$ 为*i*环节的VOCs排放浓度, $mg/m^3$ ;  $Q_{si}$ 为标准状态下*i*环节的干排气流量, $m^3/h$ ;  $K_i$ 为每千克漆包线的生产用时, $h/kg$ 。

### 2.3 标样配制

准确称取苯、甲苯、N,N-二甲基甲酰胺、乙苯、对二甲苯、间二甲苯、苯乙烯、邻二甲苯、1,3,5-三甲苯、苯酚、1,2,3-三甲苯、1,2,4-三甲苯、仲丁基苯、茚满、N-甲基吡咯烷酮、邻甲酚、间甲酚、对甲酚、2,5-二甲酚、1,2,4,5-四甲苯、2,4-二甲酚、2,6-二甲酚、1,2,3,4-四甲苯、3,5-二甲酚、2,3-二甲酚、萘、3,4-二甲酚等标准样品各50.0mg,置于100mL容量瓶中,用甲醇定容至100mL。另外,准确称取50.0mg正十四烷作为内标物,置于100mL容量瓶中,用甲醇定容至100mL。

### 2.4 样品分析

2.4.1 废气样品分析 用全自动的预浓缩/GC/MS(Preconcentration Entech 7100/ GCMS-QP2010)系统进行废气样品分析。Entech 7100首先抽取样品50mL捕集在1/4英寸的液氮冷阱中,经除水和除CO<sub>2</sub>过程后样品进入气相色谱分离,最后被质谱检测器分析。色谱柱为DB-5MS(30m×0.25mm i.d×0.25μm),载气为氦气。升温程序:始温40 $^{\circ}C$ ,保持4min,以5 $^{\circ}C/min$ 的速率升到250 $^{\circ}C$ ,保持6min。分流比1:18,柱流量:1ml/min,进样口温度:220 $^{\circ}C$ 。质谱条件:EI源,电压:2000V,离子源温度:200 $^{\circ}C$ ,扫描范围:45~450amu。挥发性有机物的种类通过化合物的相对保留时间和质谱图来鉴别,浓度通过内标法计算。

2.4.2 涂料样品分析 称取2g涂料样品,置于25mL容量瓶中,加甲醇至标线处,超声震荡10min后用一次性有机系过滤头(0.20μm)过滤。取10μL样品到20mL顶空瓶中,顶空进样器(Combi-xt PAL)顶空温度设置为200 $^{\circ}C$ ,顶空时间为45min,色谱质谱设置程序同上。

2.4.3 漆包线样品分析<sup>[14]</sup> 称取2g漆包线样品,卷绕在φ9mm的玻璃棒上,用刀片切断,将漆包线样放入20mL顶空瓶中,均匀散开在瓶底,加盖密封,顶空温度与顶空时间设置同上,色谱质谱设置程序同上。

### 3 实验结果

在上述色谱质谱条件下,在同一条件下进样 3 $\mu$ L 混合标准样品,进行 5 次平行分析,测试其中挥发性组分的含量,计算该方法的精密度(表 2).

#### 3.1 精密度试验

表 2 挥发性组分的保留时间、特征离子、回收率以及相对标准偏差

Table 2 Retention time, characteristic ions, recovery rate, RSD of the volatile constituents

挥发性组分	色谱保留时间(min)	定性用特征离子 ( <i>m/e</i> )	定量用特征离子 ( <i>m/e</i> )	内标法校正因子	回收率(%)	相对标准偏差(%)
苯	2.957	52,77,78	78	0.843	95.3	1.78
甲苯	5.288	65,91,92	91	0.862	98.2	1.82
N,N-二甲基甲酰胺	5.612	42,44,73	73	1.232	96.3	2.28
N-甲氧基甲酰胺	6.521	46,47,75	47	1.00	N.A.	N.A.
乙苯	8.308	51,91,106	106	1.051	98.9	1.73
对二甲苯	8.424	91,105,106	106	1.114	96.4	1.86
间二甲苯	8.984	91,105,106	106	1.123	99.5	1.66
苯乙烯	9.314	78,103,104	104	0.874	102.3	1.43
邻二甲苯	9.402	91,105,106	106	1.121	97.5	1.58
正十四烷	10.82	57,71,198	57	-	-	-
1,3,5-三甲苯	12.236	77,105,120	120	0.923	98.2	1.84
苯酚	12.643	65,66,94	94	0.864	96.5	1.24
1,2,3-三甲苯	12.659	77,105,120	120	0.895	97.7	1.63
1,2,4-三甲苯	13.395	77,105,120	120	0.933	98.4	1.67
仲丁基苯	13.509	91,105,134	105	0.872	99.7	1.34
乙酰苯	13.846	105,120	105	1.00	N.A.	N.A.
邻-异丙基苯	13.988	91,119,134	119	1.00	N.A.	N.A.
萘满	14.332	115,117,118	117	1.213	98.6	2.23
N-甲基吡咯烷酮	14.457	70,98,99	99	1.255	99.4	1.97
1-甲基-3-丙基苯	14.881	105,106,134	134	1.00	N.A.	N.A.
苯丙酮	14.892	105,106,134	105	1.00	N.A.	N.A.
邻甲酚	15.016	79,107,108	108	0.863	96.8	1.69
1-乙基-3,5-二甲苯	15.114	91,119,134	134	1.00	N.A.	N.A.
1-甲基-4-丙基苯	15.385	91,119,134	134	1.00	N.A.	N.A.
间甲基苯乙酮	15.718	119,134	119	1.00	N.A.	N.A.
间甲酚	15.746	79,107,108	108	0.921	98.6	1.57
邻甲基苯乙酮	15.771	119,134	119	1.00	N.A.	N.A.
对甲酚	15.938	79,107,108	108	0.876	95.2	1.43
2-乙基-1,4-二甲苯	15.984	91,119,134	134	1.00	N.A.	N.A.
1,2,4,5-四甲苯	16.956	91,119,134	134	0.927	100.5	1.96
4-甲基苯戊酮	17.065	91,119,134	119	1.00	N.A.	N.A.
2,4-二甲酚	17.944	77,107,122	122	1.033	97.5	1.64
2,6-二甲酚	17.993	77,107,122	122	1.125	96.2	1.66
1,2,3,4-四甲苯	18.096	91,119,134	134	0.861	99.3	1.94
4-乙基苯酚	18.515	77,107,122	122	1.00	N.A.	N.A.
3,5-二甲酚	18.595	77,107,122	122	0.946	99.2	1.71
2,3-二甲酚	18.864	77,107,122	122	0.924	97.7	1.68
萘	19.018	127,128,129	128	1.158	96.2	2.10
3,4-二甲酚	19.308	77,107,122	122	1.027	97.3	2.21
3,4-二甲基苯乙酮	19.462	133,148	133	1.00	N.A.	N.A.
2-乙基-5-甲基酚	20.65	91,121,136	121	1.00	N.A.	N.A.
3-乙基-5-甲基酚	21.24	91,121,136	121	1.00	N.A.	N.A.

注:N.A-由于缺乏标准品,校正因子以1.00计,回收率和精密度未测定

#### 3.2 回收率试验

定量进样 5 $\mu$ L 由 2.3 节(1)配制的混合标样

溶液,测试各挥发性组分的加标回收率.结果回收率均高于90%,平均达到95%以上(表2).

### 3.3 检测限

将混合标样溶液稀释配制成一系列不同浓度的溶液,用微量注射器准确进样3 $\mu$ L,以色谱峰高是基线噪声的3倍作为标准来计算检测限.结果表明,在选定条件下,各挥发性组分检测限均达到10<sup>-8</sup>( $\omega$ ).

### 3.4 定性定量结果

在选定的色谱质谱条件下,对QZ,QA,QXY,Q(XY/ZY)-2/200,SBEIW五种漆包线生产各环节所采集的VOCs样品进行GC-MS分析,共检出41个峰(表2)[占总峰面积的(95.5 $\pm$ 1.7)%],所得质谱图经计算机质谱数据库检索,结合标准组分对照其相对保留时间,最终确定了26种化合物.

**3.4.1 原物料输入环节检测结果** 在Z、A、EI、AI、SB 5种涂料中分别检出30、28、33、6、19种挥发性有机物.各种涂料的挥发性有机组分大致相同,主要为芳香烃和酚类.其中聚酯(Z)涂料中含量最多的VOCs是苯酚、对甲酚、间甲酚和二甲基甲酰胺(占59.84%);聚氨酯(A)涂料中含量最多的是乙苯、对甲酚、苯酚、3,5-二甲酚和间二甲苯(占66.13%);聚酯亚胺(EI)涂料中含量最多的是苯酚、对甲酚、1,2,3-三甲苯(占48.63%);聚酯亚胺酰亚胺(AI)涂料中含量最多的是N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺、间二甲苯(占85.11%);自黏涂料(SB)中含量最多的是苯酚、间二甲苯、邻二甲苯、乙苯、对甲酚(占78.2%).各种涂料的挥发性有机组分含量如图3所示.

Z、A、EI、AI、SB 5种涂料的固体含量分别为31.4%、28.0%、38.2%、29.0%、20.6%.

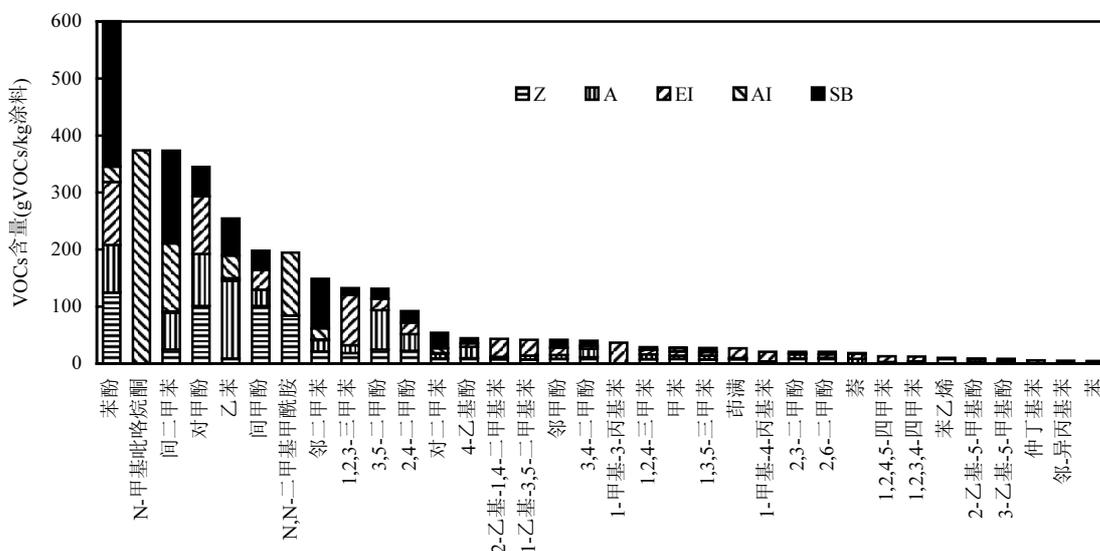


图3 原物料输入环节VOCs组分图谱

Fig.3 VOCs constituents of raw materials input

**3.4.2 排放环节VOCs检测结果** 漆包线生产排放的VOCs主要来源于管道的有组织排放,以及炉口泄露,敞开漆槽、供漆系统逸散等无组织排放.不同漆包线不同排放环节检测到的VOCs有数量上的差异,但大致成分相同.从QZ、QA、QXY、Q(ZY/XY)、QZYN 5类漆包线生产线上

分别检出35、35、38、40、38种挥发性有机物,主要为芳香烃和酚类,这与涂料的使用种类有关.管道初始收集的VOCs浓度为2000~3000mg/m<sup>3</sup>,管道排放的VOCs浓度为150~300mg/m<sup>3</sup>;车间无组织排放中,炉口泄露浓度在30~60mg/m<sup>3</sup>之间,敞开漆槽液面逸散浓度约在1000~2000mg/m<sup>3</sup>.

QZ 生产线上排放的 VOCs 主要为苯酚、对甲酚、间甲酚和二甲基甲酰胺(占 55.85%);QA 生产线上排放的 VOCs 主要是乙苯、对甲酚、苯酚、3,5-二甲酚、间甲酚(占 57.88%);QXY 生产线上排放的 VOCs 主要是苯酚、对甲酚、1,2,3-三甲苯、间甲酚、3,5-二甲酚(占 48.46%);Q(ZY/XY)生产线上 AI 炉排放的 VOCs 主要是 N-甲基吡咯烷酮、间二甲苯、二甲基甲

酰胺、乙苯(占 83.18%);QZYN 生产线上 SB 炉排放的 VOCs 主要是苯酚、间二甲苯、邻二甲苯、乙苯、间甲酚、对甲酚、对二甲(约占 78.66%)、乙苯、甲酚、二甲酚、苯酚、二甲苯、N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺是漆包线 VOCs 排放的特征污染物,各类漆包线 VOCs 排放环节(包括有组织排放以及无组织排放环节)的挥发性有机物组分如图 4 所示。

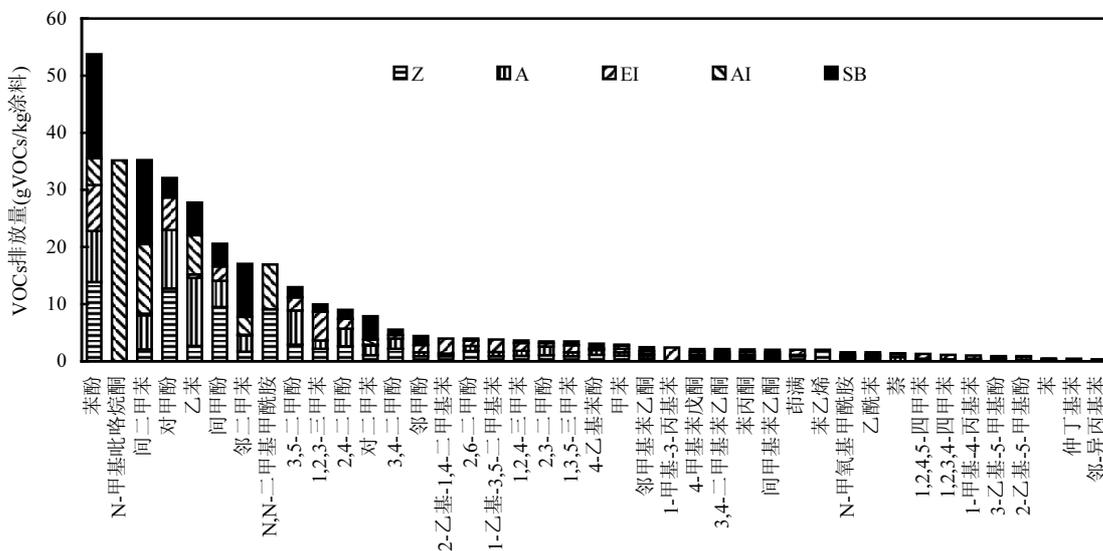


图 4 排放环节 VOCs 组分图谱

Fig.4 Constituents of VOCs emission

VOCs 排放环节与原物料输入环节相比较,物质组成和含量大致相同,副产物可能是芳香烃、酚类与其他杂质之间发生取代、消除等化学反应而产生,如邻(间)甲基苯乙酮、乙酰苯、3,4-二甲苯苯乙酮、苯丙酮、4-甲基苯丙酮等等,物种种类繁多但数量较少,含量较低。

漆包线生产排放的芳香烃和酚类,毒性较大,对人体危害较大,其中苯酚和萘属于高毒性物质。与我国《大气污染物综合排放标准》<sup>[15]</sup>和《恶臭污染物排放标准》<sup>[16]</sup>对照,只有甲苯、二甲苯、苯、苯乙烯、酚类属于“受控物质”,仍有相当的指标暂未列入标准。

3.4.3 漆包线残留 VOCs 检测结果 在 QZ、

QA、QXY、Q(ZY/XY)、QZYN 五种漆包线中分别检出 22、23、23、25、23 种挥发性有机物,主要组分为乙苯、甲酚、二甲酚、苯酚、二甲苯、N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺,VOCs 残留量约为 $(5.06 \pm 1.47) \times 10^{-5} \text{kgVOCs/kg}$  漆包线,各种漆包线检出的挥发性有机组分如图 5 所示。

各环节的实验数据是 2009~2010 年期间对该企业相关漆包线生产过程中各环节的 VOCs 进行大量样品采集,实验分析后得到的平均结果,整体数据误差范围在 $\pm 2.5\%$ 之间。

### 3.5 物料衡算

综合实验结果,对 5 种漆包线生产各环节中的 VOCs 进行全过程物料衡算,结果如表 3 所示。

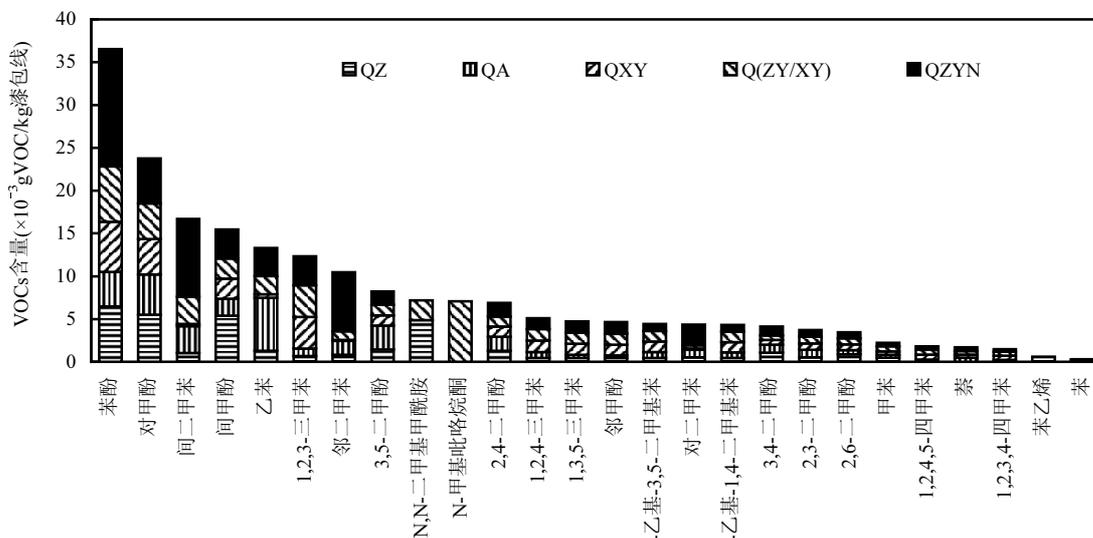


图5 残留环节 VOCs 组分图谱  
Fig.5 Constituents of VOCs residual

表3 漆包线生产 VOCs 物料衡算

Table 3 Material balance calculation of VOCs in the enameled wires manufacture

漆包线	VOCs(gVOCs/kg 漆包线)							完整性(%)
	原物料输入	销毁	泄露	逸散	管道排放	产品残留	排放系数	
QZ	102.90	83.14	2.57	3.60	8.64	0.04	19.72	95.24
QA	100.80	81.14	2.32	3.33	8.27	0.038	19.62	94.34
QXY	92.70	74.44	1.85	2.78	7.42	0.036	18.23	93.33
Q(ZY/XY)	135.30	109.59	3.79	5.14	11.64	0.053	25.65	96.23
QZYN	172.10	140.78	5.16	6.88	15.14	0.065	31.26	97.64
平均	120.76	97.82	3.14	4.35	10.22	0.046	22.90	95.36

计算公式:

总输入量(Gross Input,  $G_{IN}$ )= I(原物料输入);

总产出量(Gross Output,  $G_{OUT}$ )= D(销毁)+ L(泄露)+ F(逸散)+ O(产品残留)+ E(管道最终排放),其中  $D=C$ (管道初始收集)- $E$ (管道排放);

以不明方式排放量  $X = G_{IN} - G_{OUT}$ ;

排放系数( $G_{VOCs}$ )为= $L+F+E+X$ ;

$$VOCs \text{ 物料衡算完整性} = \frac{G_{OUT}}{G_{IN}} \times 100\%$$

在漆包线行业现有生产工艺及废气处理水平下,从原物料输入的 VOCs,约有 81.1%被销毁,3.5%从储槽、供漆系统等环节逸散,2.6%从炉膛出口及其他环节泄露,8.4%经过管道有组织排放,只有极少部分残留在产品中.VOCs 排放系数为(24.75±6.52)gVOCs/kg 漆包线,见图 6.

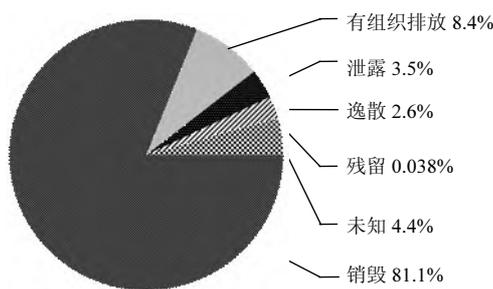


图6 漆包线行业 VOCs 物料衡算

Fig.6 The material balance calculation of VOCs in the enameled wire manufactures

对漆包线企业排放特征的实验研究已掌握有 90%以上的 VOCs 流通量,物料衡算完整性达到(95.48±2.15)%.以不明方式存在的 VOCs,可能来自于排废风机轴承、管道阀门、法兰或其他管道连接元件处泄露逸散的 VOCs,也可能部分来

自于采样仪器、方法及实验误差.从整体上而言,以不明方式存在的 VOCs 量比例较低,物料衡算数据具有较高的完整性.

### 3.6 漆包线制造业 VOCs 排放量估算与预测

根据调研及相关资料<sup>[1]</sup>,2010 年我国漆包线生产量为 115.2 万 t,漆包线的产业规模为:聚酯漆包线占 20.2%,聚氨酯漆包线占 19.4%,聚酯亚胺漆包线占 18.6%,复合层漆包线占 18.4%,自粘漆包线占 18.2%,其他漆包线占 5.2%.根据表 3 中不同漆包线的 VOCs 排放系数计算,全国 2010 年漆包线行业 VOCs 总排放量约为 2.62 万 t.按照我国漆包线产业“十二五”规划,未来 5 年漆包线制造平均增长按 4%计算,假设生产工艺和处理水平不变,2015 年我国漆包线行业 VOCs 排放总量约为 3.19 万 t(图 7),约为 2010 年的 1.2 倍.

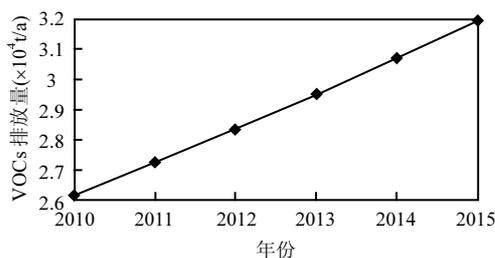


图 7 全国漆包线行业 VOCs 排放量预测

Fig.7 The projection of VOCs emission from enameled wire manufactures

## 4 结论

4.1 在漆包线生产过程中,用源头追踪思路对 VOCs 流动全过程的物质组成、含量、分布、排放特征进行了研究,共检出 41 种挥发性有机物.

4.2 在漆包线行业现有生产工艺及废气处理水平下,从初始溶剂输入的 VOCs,有 81.1%得到了销毁,3.5%从涂料储槽,供漆系统等环节逸散,2.6%从炉膛出口及其他环节泄露,8.4%经管道有组织排放,只有极少部分残留在产品中,物料衡算完整性达到(95.48±2.15)%.

4.3 乙苯、甲酚、二甲酚、苯酚、二甲苯、N-甲基吡咯烷酮、二甲基甲酰胺是漆包线行业 VOCs 排放的特征污染物,VOCs 排放系数为(24.75±6.52)g VOCs/kg 漆包线.

4.4 2010 年全国漆包线行业 VOCs 的排放量为 2.62 万 t,预计到 2015 年将达到 3.19 万 t.

### 参考文献:

- [1] 高峰,张志昌.“十二五”绕组线行业发展思考 [C]//2010 漆包线行业节能减排技术论坛论文集. 上海:中国电器工业协会电线电缆分会,2010:1-5.
- [2] 曹国良,安心琴,周春红,等.中国区域反应性气体排放源清单 [J]. 中国环境科学,2010,30(7):900-906.
- [3] 席劲璞,武俊良,胡洪营,等.工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析 [J]. 中国环境科学,2010,30(11):1558-1562.
- [4] Wei W, Wang S, Chatani S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(20): 4976-4988.
- [5] Bo Y, Cai H, Xie S. Spatial and temporal variation of historical anthropogenic NMVOCs emission inventories in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008,8:7297-7316.
- [6] 贾红,陈长虹,黄成.炼焦过程排放挥发性有机物的排放特征和组成分布研究 [J]. 上海环境科学,2008,27(6):231-237.
- [7] 魏玉梅,张清宇,田伟利.合成革企业二甲基甲酰胺排放清单的初步建立 [J]. 环境科学研究,2010,23(5):555-558.
- [8] 徐捷,魏海萍,修光利.上海市半导体行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究 [J]. 上海环境科学,2007,26(5):198-206.
- [9] 张春洋,马永亮.中式餐饮业油烟中非甲烷碳氢化合物排放特征研究 [J]. 环境科学学报,2011,31(8):1768-1774.
- [10] 曲健,华彤,潘明杰,等.电线电缆行业漆包线生产工艺废气中有机物的 GC/MS 测定 [J]. 中国环境监测,1998,14(5):13-14.
- [11] 刘希平.VOC 自厂排放系数建立之探讨与建议 [J]. 工业污染防治(台湾),2008,106:117-119.
- [12] EPA. Compendium method TO-15, determination of volatile organic compounds (VOCs) in air collected in specially-prepared canisters and analyzed by gas chromatography/mass spectrometry (GC/MS) [R]. 1999:10-14.
- [13] HJ/T 397-2007 固定源废气监测技术规范 [S].
- [14] 刘贵忠,汤洪汉,王忠友,等.漆包线残留挥发性有机物 HS-GC-MS 法测定分析 [J]. 电线电缆,2004,2:28-30.
- [15] GB16297-1996 大气污染物综合排放标准 [S].
- [16] GB14554-93 恶臭污染物排放标准 [S].

**致谢:** 本研究的前期工作基础由环保公益性行业科研专项项目及大气污染控制广东高校工程技术研究中心建设项目其他成员单位协助完成,在此表示感谢.

**作者简介:** 王宇楠(1984-),男,广东惠州人,华南理工大学硕士研究生,主要从事挥发性有机污染物研究.