

# 基于臭氧前驱物钢铁厂煤相关工艺的排放特征

高雪莹<sup>1</sup>, 闫昱程<sup>1</sup>, 李 婕<sup>1</sup>, 郭利利<sup>1</sup>, 何秋生<sup>1</sup>, 李宏艳<sup>1</sup>, 王新明<sup>2</sup>

(1. 太原科技大学环境与安全学院, 太原 030024; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广州 510630)

**摘 要:**通过气袋采样-GC-MS/FID分析,研究了某钢铁厂煤相关工艺环节(出焦、烧结、球团和炼铁高炉)VOCs的排放特征,结果表明:各工序TVOCs浓度水平:球团( $12\ 531.81 \pm 6\ 318.20\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 烧结( $5\ 882.49 \pm 2\ 850.80\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 炼铁高炉( $2\ 193.43 \pm 1\ 030.18\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > 出焦( $789.66 \pm 175.93\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。苯乙烯、1-丁烯、正己烷为出焦烟气的主要化合物;1-丁烯在烧结和球团工艺过程烟气中最为富集;炼铁高炉的烟气排放主要以苯乙烯和1-丁烯为主。出焦、烧结及球团烟气中B/T(1.35~3.12)与煤燃烧特征一致,炼铁高炉烟气B/T为0.47。烯烃均为各工艺过程O<sub>3</sub>生成的最敏感组分(贡献高达51.23%~95.14%),其中1-丁烯为最敏感单体化合物。

**关键词:**钢铁厂;挥发性有机物;源成分谱;臭氧生成潜势

**中图分类号:**X511 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1673-2057.2020.02.003

挥发性有机物(VOCs)污染已成为目前最为突出的大气环境问题。许多VOCs不仅本身毒性较强,而且还是区域性大气复合污染(以O<sub>3</sub>及PM<sub>2.5</sub>为特征)的关键前体物及参与者<sup>[1-3]</sup>,其人为源排放量呈现逐年增长的态势,1995年VOCs的人为源排放量为13.1 Tg,2005年为20.1 Tg,预计到2020年可增长至25.9 Tg<sup>[4]</sup>。

源成分谱可准确反映各排放源化合物的组成特征,是进行排放源识别、排放清单建立的基础。工业源是VOCs排放的重要来源,占人为源排放总量的一半以上<sup>[4]</sup>。不同工业排放源VOCs的化学成分谱有明显差别。燃料种类会影响VOCs化学成分谱,燃煤和煤矸石电厂锅炉主要排放1-丁烯、乙烯、正己烷和苯乙烯,但燃生物质电厂锅炉主要排放C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub>的化合物、乙炔以及苯系物<sup>[5]</sup>。燃烧方式及操作条件也会影响VOCs源成分特征,露天焚烧会排放大量乙烷、乙烯、乙炔、丙醛、丙酮

和乙腈<sup>[6]</sup>,民用生物质燃烧则以苯、乙醛、甲醛、甲苯和氯甲烷为特征化合物<sup>[7]</sup>。工艺的差别也会造成VOCs排放特征的差异,喷涂行业的特征物质是甲苯、乙苯和二甲苯,而非喷涂行业(如印刷、制鞋等)中丙酮、丁酮、乙酸乙酯等OVOCs占比高达80%<sup>[8]</sup>。综合钢铁厂工序复杂,一方面各工序所用燃料、原料、操作条件均有明显差异;另一方面,当前对钢铁厂化学成分谱的研究未能涵盖各工序,现有钢铁厂相关源谱测试时间较为久远且不同研究中VOCs源成分谱之间存在差异<sup>[9-11]</sup>。更新并建立本地化的钢铁厂各工序源成分谱对开展重点工艺、重要物种VOCs的污染控制至关重要。

本研究针对某钢铁厂出焦、烧结、球团和炼铁高炉的有组织排放烟气,研究了各工序VOCs的排放特征,并利用最大增量反应性系数(MIR)估算了各工艺过程的臭氧生成潜势(OFP),以期完善我国本地化VOCs源成分谱,为制定污染控制政策提供

收稿日期:2019-11-01

基金项目:国家自然科学基金(41172316);海外及港澳学者合作研究基金(41728008);山西省研究生优秀创新项目(2019SY498)

作者简介:高雪莹(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为挥发性有机物排放及控制;通信作者:何秋生教授,E-mail:heqs@tyust.edu.cn。

针对性的科学依据。

## 1 实验和方法

### 1.1 样品采集

研究对某钢铁厂出焦、烧结、球团和炼铁高炉有组织排放烟气进行了现场采样,共获得有效样品 15 个,具体样品参数见表 1。在每个采样位置,采样点按照《固定源废气监测技术规范》进行设置。

使用泰德拉 Tedlar 采样袋进行 VOCs 样品采集。采样袋在使用前,要使用高纯  $N_2$  (99.999%) 进行清洗。在采样过程中,在不锈钢采样枪前端加上玻璃纤维滤筒以过滤去烟气中的烟尘。在将不锈钢采样枪插入采样口后,首先用泵抽取烟气 3~5 min 来排除管中的空气。采样时,通过阀来调节泵的抽取速度,使采集流量控制在 200 mL/min 左右。采样后,将采样袋室温避光保存,采样后一周内进行分析。

表 1 本研究采样点的详细信息

Tab.1 Detailed information of sampling points in this study

采样点	烟气流速/ $m \cdot s^{-1}$	烟气温度/ $^{\circ}C$	烟气湿度/ %	烟囱面积/ $m^2$	样本数
出焦	13.1	50.2	3.8	12.3	3
烧结	18.4	49.0	10.8	28.3	4
球团	3.1	45.6	10	28.3	5
炼铁高炉	16.2	63.0	4.8	12.6	3

### 1.2 样品分析

使用大气预冷浓缩仪 (Entech 7100) 对所采集样品进行预处理,然后利用气相色谱质谱 (MSD)/氢火焰离子 (FID) (Agilent 7890A/5975C, USA) 对样品进行分离、检测。

详细仪器参数及实验相关的质量控制与质量保证见 He 等<sup>[12]</sup>的研究。本研究共检出 57 种挥发性有机物单体(表 2),包括 10 种烯烃,1 种炔烃,29 种烷烃,17 种芳香烃。

表 2 本研究所检测 VOCs 化合物

Tab.2 VOCs detected in this study

序号	化合物	序号	化合物
1	乙烯	30	2,2,4-三甲基戊烷
2	丙烯	31	正庚烷
3	1-丁烯	32	甲基环己烷
4	反-2-丁烯	33	2,3,4-三甲基戊烷
5	顺-2-丁烯	34	2-甲基庚烷
6	1-戊烯	35	3-甲基庚烷

表 2(续)

序号	化合物	序号	化合物
7	异戊二烯	36	正辛烷
8	反-2-戊烯	37	正壬烷
9	顺-2-戊烯	38	正癸烷
10	正己烯	39	十一烷
11	乙炔	40	正十二烷
12	乙烷	41	苯
13	丙烷	42	甲苯
14	异丁烷	43	乙苯
15	正丁烷	44	间二甲苯
16	异戊烷	45	对二甲苯
17	正戊烷	46	苯乙烯
18	2,2-二甲基丁烷	47	邻二甲苯
19	环戊烷	48	异丙苯
20	2,3-二甲基丁烷	49	正丙苯
21	2-甲基戊烷	50	1-乙基-2-甲基苯
22	3-甲基戊烷	51	1-乙基-3-甲基苯
23	正己烷	52	1,3,5-三甲苯
24	甲基环戊烷	53	对乙基甲苯
25	2,4-二甲基戊烷	54	1,2,4-三甲苯
26	环己烷	55	1,2,3-三甲苯
27	2-甲基己烷	56	1,3-二乙基苯
28	2,3-二甲基戊烷	57	对二乙苯
29	3-甲基己烷		

## 2 结果与讨论

### 2.1 VOCs 水平

图 1 给出钢铁厂不同厂区(出焦、烧结、球团、炼铁高炉)所排挥发性有机物的总浓度水平及各组分占比。出焦、烧结、球团机、炼铁高炉的总浓度分别为  $789.66 \pm 175.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5882.49 \pm 2850.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $12531.81 \pm 6318.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $2193.43 \pm 1030.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。球团烟气 TVOCs 的浓度水平最高,可能由于球团矿是粘性很大的膨润土和含油氧化铁皮高温下焙烧而成,从而较多 VOCs 生成。其次为烧结机排放烟气,该过程中 VOCs 是由含油的氧化铁皮以及焦炭等中的挥发性物质形成,最终以气体形式排放。炼铁高炉作业是将焦炭、助熔剂和铁矿石在高温热风还原铁矿石生成熔融铁水的过程,该工序排放 TVOCs 的浓度水平远小于球团及烧结过程,张进生等通过研究烧结和炼铁过程碳组分的排放特征,发现烧结过程 OC 排放量远大于炼铁过程<sup>[13]</sup>。出焦工序是将焦煤破碎、混合后,隔绝空气下加热生成气、液、固态产物的过程。此次出焦过程有组织排放烟气 TVOCs 浓度水平与何等<sup>[14]</sup>的

研究相当。

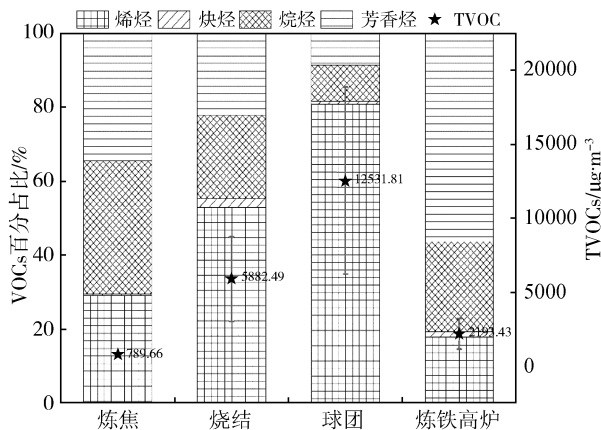


图1 各工艺过程 VOCs 总浓度水平及各组分占比

Fig. 1 Mass concentration and group weight percentages of TVOCs in each emission process

## 2.2 VOCs 成分谱

所研究钢铁厂各工艺过程 VOCs 的源成分谱见图 2, 结合图 1 各组分占比, 可以看出: 出焦过程烯烃、炔烃、烷烃和芳香烃占比分别为  $29.11 \pm 5.35\%$ 、 $0.34 \pm 0.08\%$ 、 $35.96 \pm 9.04\%$  和  $34.59 \pm 4.93\%$ , 其中苯乙烯 (23.41%)、1-丁烯 (18.61%)、正己烷 (7.93%)、十一烷 (6.13%)、异戊烷 (5.59%)、顺二丁烯 (4.35%)、乙烯 (4.00%) 和苯 (3.07%) 是占比最高的 8 种单体化合物, 约占 TVOCs 的 73.09%。烧结烟气中烯烃、炔烃、烷烃和芳香烃的百分占比分别为  $52.90 \pm 9.06\%$ 、 $2.36 \pm 0.92\%$ 、 $22.53 \pm 6.01\%$  和  $22.21 \pm 2.37\%$ , 其中 1-丁烯 (43.45%)、十一烷 (9.38%)、苯乙烯 (5.42%)、丙烯 (4.77%)、苯 (4.24%) 和乙苯 (3.73%) 为主要物种, 其质量百分数占总检测物种的 70.99%。球团工艺过程烟气以烷烃 (80.81 ± 12.03%) 为主要组分, 其中 1-丁烯占 TVOCs 的 75.58%。炼铁高炉排放的烟气中芳香烃 ( $56.35 \pm 15.58\%$ ) 占比最高, 其中苯乙烯 (49.44%) 为主要物种; 其次为烷烃 ( $24.34 \pm 6.89\%$ ) 和烯烃 ( $17.84 \pm 9.29\%$ ), 1-丁烯 (12.67%)、十一烷 (4.88%)、正己烷 (3.43%)、异丁烷 (3.42%)、异戊烷 (3.13%) 和为主要单体物种。

虽然个别工艺过程 VOCs 的主要单体化合物是一致的, 但是各物种含量占比有较大差异。为了定量比较各工艺过程源成分谱的从差异性, 本研究用分歧系数 (CD) 法比较不同工艺生产过程 VOCs 的

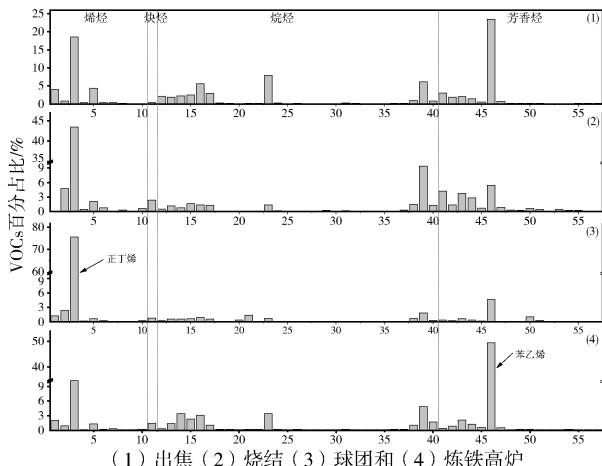


图2 钢铁厂 VOCs 源成分谱

(数字代表的化合物名称见表 2)

Fig. 2 VOCs source profiles of the emissions from (The names of the compounds represented by the numbers are shown in Tab. 2)

相似程度。具体计算公式如下:

$$CD_{jk} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \left( \frac{x_{ij} - x_{ik}}{x_{ij} + x_{ik}} \right)^2}$$

式中:  $j$  和  $k$  表示不同工艺生产过程,  $CD_{jk}$  为工艺  $j$  和  $k$  间的分歧系数,  $x_{ij}$  和  $x_{ik}$  为工艺过程  $j$  和  $k$  中单体化合物  $i$  的浓度水平 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $p$  代表所研究的各工艺过程。

CD 趋向于 0, 表示不同工艺过程源成分谱具有强相关性, 反之, CD 趋于 1, 则表示两工艺差异性极大。本研究选取 0.3 为相似与否的分界点<sup>[15]</sup>。

不同生产工艺过程 VOCs 成分谱之间的分歧系数见表 3, 本研究各工艺过程 VOCs 源成分谱分歧系数均大于 0.3 (CD 在 0.348 ~ 0.728 之间)。表明不同工艺过程 VOCs 排放的成分谱之间具有较大的差异性。

表 3 各工艺过程分歧系数

Tab. 3 CD of VOCs chemical profiles from different craft process

分歧系数	出焦	烧结	球团	炼铁高炉
出焦	0.000			
烧结	0.728	0.000		
球团	0.707	0.348	0.000	
炼铁高炉	0.360	0.630	0.583	0.000

## 2.3 BTEX 比值分析

苯/甲苯/乙苯/二甲苯 (B/T/E/X) 之间的比值特征经常用来判断 NMHCs 的来源<sup>[16]</sup>。表 4 给出了各类排放源 BTEX 的比值, 各排放源中 B:T:E:X 比

值的差异可能是由于各工艺过程所用燃料或溶剂等区别造成的。本研究出焦、烧结、球团和炼铁过程中 B:T:E:X 的值分别为 1.50:0.90:1.00:1.32、1.14:0.36:1.00:1.19、0.55:0.41:1.00:1.07 和 0.19:0.41:1.00:1.13,有别于其他燃煤<sup>[5]</sup>、汽车排放<sup>[12,17]</sup>、溶剂使用<sup>[12]</sup>及其它人为源<sup>[18-19]</sup>,因此,本研究独特的 BTEX 比值可用于 VOCs 的来源解析,特别是在钢铁厂周边地区。

众多学者对各类排放源 B/T 的值进行了研究,发现生物质燃烧、木炭及煤消耗过程释放废气中 B/T 一般大于 1<sup>[5,18]</sup>,机动车排放 B/T 值在 0.5 左右<sup>[12,17]</sup>,工业源主导 B/T 的值小于 0.2<sup>[12,19]</sup>。本研究出焦、烧结及球团烟气中 B/T 的值分别为 1.67、3.12、1.35,与煤和生物质燃烧特征一致。炼铁高炉烟气 B/T 值为 0.47 与 Shi 等<sup>[9]</sup>铁冶炼(0.24 ± 0.39)过程研究较为相似。

表 4 不同排放源 BTEX 的比值

Tab. 4 BTEX ratios from different VOCs sources.

排放源		B	T	E	X	参考文献
电厂	燃煤	0.2	0.2	1.0	1.7	[5]
	燃煤矸石	0.3	0.4	1.0	1.7	
	燃生物质	9.4	3.6	1.0	1.9	
生物质	露天焚烧	9.5	6.6	1.0	4.0	[18]
机动车相关	汽车尾气	2.4	4.2	1.0	5.2	[17]
	汽油蒸发	3.5	10.0	1.0	3.1	
溶剂使用	喷涂	0.0	0.2	1.0	3.7	[12]
	印刷	0.3	3.6	1.0	3.0	
工业园区	制造业	1.0	14.9	1.0	1.3	[9]
钢铁厂	出焦	1.5	0.9	1.0	1.3	本研究
	烧结	1.1	0.4	1.0	1.2	
	球团	0.6	0.4	1.0	1.1	
	炼铁	0.2	0.4	1.0	1.1	

## 2.4 臭氧生成潜势 (OFP)

Cheng 等<sup>[20]</sup>在研究臭氧及其前体物时发现 VOCs 的排放会引起 O<sub>3</sub> 的增长。Geng 等<sup>[21]</sup>研究发现, O<sub>3</sub> 的化学生成受 VOCs 浓度的影响,且不同的组分对 O<sub>3</sub> 生成的贡献不同。更好的了解 VOCs 的排

放特征是有效控制 O<sub>3</sub> 的重要前提。本研究利用最大增量反应性系数 (MIR) 法分析臭氧生成潜势,该方法详细介绍见 Li 等<sup>[22]</sup>的研究。具体计算方法如下:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times C_i \quad (1)$$

$$\text{OFP}_{ij} = \text{MIR}_i \times f_{ij} \quad (2)$$

式中: OFP<sub>i</sub> 为化合物 i 的臭氧生成潜势 (μg/m<sup>3</sup>), OFP<sub>ij</sub> 为排放源 j 排放单位质量的 VOCs 中化合物 i 所生成 O<sub>3</sub> 的量 (g/g), MIR<sub>i</sub> 为化合物 i 的最大增量反应性系数 (g O<sub>3</sub>/g VOCs) (依据 Carter2010 修正值), C<sub>i</sub> 代表化合物 i 的浓度 (μg/m<sup>3</sup>), f<sub>ij</sub> 代表 j 排放源中 i 化合物的质量百分数。

表 5 给出了钢铁厂所研究工艺过程前 10 种 VOCs 的 OFP, 占总 OFP 的 87.04 ~ 96.14%。各工艺过程总臭氧生成潜势的值与 TVOCs 的浓度值相似, 球团烟气 (104 362.04 μg/m<sup>3</sup>) > 烧结机 (37 614.13 μg/m<sup>3</sup>) > 炼铁高炉 (7 199.83 μg/m<sup>3</sup>) > 出焦 (3 389.52 μg/m<sup>3</sup>)。

本研究钢铁厂 4 个工艺生产过程排放 VOCs 的臭氧生成潜势敏感组分都是烯烃 (贡献高达 51.23 ~ 95.14%), 且各工艺过程 O<sub>3</sub> 生成的最敏感单体都是 1-丁烯, 其在出焦、烧结、球团和炼铁高炉的贡献分别为 1.81、4.23、7.35、1.23 g O<sub>3</sub>/g VOCs。除 1-丁烯外, 出焦过程中顺二丁烯 (0.62 g O<sub>3</sub>/g VOCs)、苯乙烯 (0.40 g O<sub>3</sub>/g VOCs)、乙烯 (0.36 g O<sub>3</sub>/g VOCs) 和间二甲苯 (0.14 g O<sub>3</sub>/g VOCs) 对 OFP 的量也有较大贡献 (占总 OFP 的 35.42%); 烧结烟气中丙烯、顺二丁烯和间二甲苯对 OFP 也有一定贡献 (17.68%); 乙烯、丙烯和顺二丁烯对球团烟气 O<sub>3</sub> 的生成也有贡献 (5.81%); 苯乙烯 (0.86 g O<sub>3</sub>/g VOCs)、顺二丁烯 (0.19 g O<sub>3</sub>/g VOCs)、乙烯 (0.18 g O<sub>3</sub>/g VOCs)、间二甲苯 (0.12 g O<sub>3</sub>/g VOCs) 和丙烯 (0.11 g O<sub>3</sub>/g VOCs) 对炼铁高炉烟气中总 OFP 贡献高达 44.43%。

表 5 各工序 VOCs 的臭氧生成潜势

Tab. 5 Ozone formation potential of VOCs emitted from different process

	出焦			烧结			球团			炼铁高炉		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c	a	b	c
乙烯	284.39	8.39	0.36	56.56	0.15	0.01	1428.31	1.37	0.11	400.39	5.56	0.18
丙烯	70.98	2.09	0.09	3 274.08	8.70	0.56	3 464.06	3.32	0.28	244.47	3.40	0.11
1-丁烯	1 429.78	42.18	1.81	24 868.42	66.11	4.23	92 156.43	88.30	7.35	2 704.72	37.57	1.23



表5(续)

	出焦			烧结			球团			炼铁高炉		
顺-2-丁烯	489.36	14.44	0.62	1 749.64	4.65	0.30	1 163.96	1.12	0.09	412.01	5.72	0.19
异戊烷	64.02	1.89	0.08	115.61	0.31	0.02	163.80	0.16	0.01	99.64	1.38	0.05
正己烷	77.66	2.29	0.10	99.73	0.27	0.02	116.59	0.11	0.01	93.23	1.29	0.04
甲苯	58.14	1.72	0.07	320.10	0.85	0.05	134.28	0.13	0.01	76.69	1.07	0.03
乙苯	49.08	1.45	0.06	666.74	1.77	0.11	250.19	0.24	0.02	142.71	1.98	0.07
间二甲苯	107.06	3.16	0.14	1628.78	4.33	0.28	448.27	0.43	0.04	265.51	3.69	0.12
苯乙烯	319.79	9.43	0.40	551.70	1.47	0.09	1010.55	0.97	0.08	1876.01	26.06	0.86
烯烃	2390.75	70.53	3.03	31255.42	83.09	5.31	99292.26	95.14	7.92	3950.74	54.87	1.80
炔烃	2.53	0.07	0.00	131.70	0.35	0.02	92.93	0.09	0.01	30.69	0.43	0.01
烷烃	299.23	8.83	0.38	1142.30	3.04	0.19	1286.64	1.23	0.10	540.50	7.51	0.25
芳香烃	697.01	20.56	0.88	5084.72	13.52	0.86	3690.20	3.54	0.29	2677.90	37.19	1.22
TVOCs	3389.52	100.00	4.29	37614.13	100.00	6.39	104362.04	100.00	8.33	7199.83	100.00	3.28

a:臭氧生成潜势的量  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; b:臭氧生成潜势的贡献%; c:单位 VOCs 生成臭氧的量  $\text{g O}_3/\text{gVOC}$ 。

### 3 结论

(1) 钢铁厂出焦、烧结、球团和炼铁高炉 TVOCs 浓度水平分别为  $789.66 \pm 175.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5 882.49 \pm 2 850.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $12 531.81 \pm 6 318.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $2 193.43 \pm 1 030.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(2) 出焦过程各组分占比相当,其中苯乙烯(23.41%)、1-丁烯(18.61%)、正己烷(7.93%)为主要化合物;烧结和球团工艺过程烟气 VOCs 均以烯烃( $52.90 \pm 9.06\%$ )、( $80.81 \pm 12.03\%$ )为主要

组分,其中主要 VOCs 单体均为 1-丁烯;炼铁高炉排放的烟气中芳香烃( $56.35 \pm 15.58\%$ )占比最高,其中苯乙烯(49.44%)为主要物种。

(3) 出焦、烧结及球团烟气中 B/T(1.35 - 3.12)与煤和生物质燃烧特征一致,炼铁高炉烟气 B/T 值 Shi 等铁冶炼过程研究相似。

(4) 本研究钢铁厂 4 个工艺生产过程排放 VOCs 的臭氧生成潜势敏感组分都是烯烃(贡献高达 51.23 ~ 95.14%),且各工艺过程  $\text{O}_3$  生成的最敏感单体都是 1-丁烯。

### 参考文献:

- [1] AN T, HUANG Y, LI G, et al. Pollution profiles and health risk assessment of VOCs emitted during e-waste dismantling processes associated with different dismantling methods[J]. Environment International, 2014, 73(4): 186-194.
- [2] ATKINSON R. Atmospheric chemistry of VOCs and NOx[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(12): 2063-2101.
- [3] KROLL J H, NG N L, MURPHY S M, et al. Secondary organic aerosol formation from isoprene photooxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(6): 1869-1877.
- [4] WEI W, WANG S, HAO J, et al. Projection of anthropogenic volatile organic compounds (VOCs) emissions in China for the period 2010-2020[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(38): 6863-6871.
- [5] YAN Y, CHAO Y, LIN P, et al. Emission characteristics of volatile organic compounds from coal-, coal gangue-, and biomass-fired power plants in China[J]. Atmospheric Environment, 2016, 143: 261-269.
- [6] WANG H, LOU S, HUANG C, et al. Source profiles of volatile organic compounds from biomass burning in Yangtze River Delta, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2014, 14(13): 818-828.
- [7] WANG S, WEI W, LI D, et al. Characteristics of gaseous pollutants from biofuel-stoves in rural China[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(27): 4148-4154.
- [8] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展[J]. 环境科学, 2017, 38: 2617-2628.
- [9] SHI J, DENG H, BAI Z, et al. Emission and profile characteristic of volatile organic compounds emitted from coke production, iron smelt, heating station and power plant in Liaoning Province, China[J]. Science of the Total Environment, 2015, 515-516: 101-108.
- [10] 王海风, 秦松, 姜曦, 等. 钢铁工业烧结过程 VOCs 减排研究进展[J]. 钢铁, 2018, 53: 1-7.

- [11] TSAI J H, LIN K H, CHEN C Y, et al. Volatile organic compound constituents from an integrated iron and steel facility[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 157(2): 569-578.
- [12] HE Q, YAN Y, LI H, et al. Characteristics and reactivity of volatile organic compounds from non-coal emission sources in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 115: 153-162.
- [13] 张进生, 吴建会, 马威, 等. 钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征[J]. *环境科学*, 2017, 38: 3102-3109.
- [14] 何秋生, 王新明, 盛国英, 等. 出焦过程中单环芳烃排放及源特征[J]. *环境科学*, 2005, 26: 17-21.
- [15] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究[D]. 南开大学, 2006.
- [16] WANG X, SHENG G, FU J, et al. Urban roadside aromatic hydrocarbons in three cities of the Pearl River Delta, People's Republic of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(33): 5141-5148.
- [17] GENTNER D R, WORTON D R, ISAACMAN G, et al. Chemical Composition of Gas-Phase Organic Carbon Emissions from Motor Vehicles and Implications for Ozone Production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(20): 11837-11848.
- [18] LI X, WANG S, DUAN L, et al. Characterization of non-methane hydrocarbons emitted from open burning of wheat straw and corn stover in China[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 044015.
- [19] CHOI S W, PARK S W, LEE C S, et al. Patterns of VOC and BTEX concentration in ambient air around industrial sources in Daegu, Korea[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2009, 44(1): 99-107.
- [20] CHENG H, GUO H, WANG X, et al. Erratum to: On the relationship between ozone and its precursors in the Pearl River Delta: application of an observation-based model (OBM) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2010, 17(8): 1491-1492.
- [21] GENG F, CAI C, TIE X, et al. Analysis of VOC emissions using PCA/APCS receptor model at city of Shanghai, China[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2009, 62(3): 229-247.
- [22] LI G, CHENG S, LI J, et al. Characterization of ambient ozone and its precursors around a coking plant [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186: 3165-3179.

## Emission Characteristics of Ozone Precursors from Steel Plants on Coal-related Processes

GAO Xue-ying<sup>1</sup>, YAN Yu-cheng<sup>1</sup>, LI Jie<sup>1</sup>, GUO Li-li<sup>1</sup>, HE Qiu-sheng<sup>1</sup>,  
LI Hong-yan<sup>1</sup>, WANG Xin-ming<sup>2</sup>

(1. College of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510630, China)

**Abstract:** VOCs source characteristics from Coal related processes (coking, sintering, pelletizing and iron smelting) in steel plant were studied using Tedlar bag sampling -GC-MS/FID analysis system. The results showed that the concentration of TVOCs in each process was as follows: pelletizing ( $12\,531.81 \pm 6\,318.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > sintering ( $5\,882.49 \pm 2\,850.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > iron smelting ( $2\,193.43 \pm 1\,030.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) > coking ( $789.66 \pm 175.93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). The most abundant compounds were styrene, 1-butene and n-hexane during coking. 1-butene was the most abundant compounds in the flue gases of sintering and pelletizing processes, and the main species from iron smelting were styrene and 1-butene. The ratios of B/T during coking, sintering and pelletizing was 1.35-3.21, which could be considered as the characteristics of coal combustion. The ratio of B/T during iron smelting was 0.47. Alkenes was the most sensitive component (contributing up to 51.23% ~ 95.14%) in the process for O<sub>3</sub> formation, and 1-butene was the most sensitive monomer compound.

**Key words:** steel plant, volatile organic compounds, source profiles, ozone formation potential