

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.03.011

钢铁企业烧结工序烟粉尘排放的测试与评价

赵亮¹, 李小玲¹, 张革², 孙文强¹

(1. 东北大学 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中冶南方(武汉)威仕工炉有限公司, 湖北 武汉 430223)

摘 要: 对某钢铁企业烧结工序不同烟粉尘排放源的现场采样, 包括烧结煤粉破碎、烧结配料、烧结机头、烧结机尾和烧结矿成品筛分等工艺过程。测试了各工艺过程的除尘灰以及排放烟粉尘的粒径分布和化学组成, 分析得出除尘前烟粉尘的粒径分布和化学组成。在此基础上, 建立了烧结工序各个烟粉尘排放点的综合评价指标。通过专家调研得出了各个评价指标的权重集, 最终运用模糊综合评判法, 对烧结工序各个烟粉尘排放点进行综合评价, 得出烧结工序的重点烟粉尘排放点。结果表明, 烧结机头的 TSP 排放总量、PM_{2.5} 质量分数、PM₁₀ 质量分数和重金属元素质量分数均为最大, 是烧结工序最重要的烟粉尘排放点。

关键词: 烧结工序; PM_{2.5}; PM₁₀; 重金属; 烟粉尘排放评价

中图分类号: TF 4 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)03-0356-05

Test and Evaluation of Dust Emissions During Sintering Process in an Iron and Steel Enterprise

ZHAO Liang¹, LI Xiao-ling¹, ZHANG Ge², SUN Wen-qiang¹

(1. State Environment Protection Key Laboratory of Eco-industry, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. WISDR (Wuhan) WIS Industrial Furnace Co., Ltd., Wuhan 430223, China. Corresponding author: ZHAO Liang, E-mail: zhliang8341@163.com)

Abstract: The particulate matter size distribution and chemical element of particles both emitted and collected by precipitators from different processes, including coal broken, ingredient, sintering machine head, sintering machine tail and product screening of sintering process, were measured in site of an iron and steel enterprise. Based on the test results, the comprehensive evaluation index in each dust emission point of the sintering process were established. The weight of each evaluation index was obtained from experts. Then, each dust emission point was evaluated by the method of fuzzy comprehensive evaluation. The results showed that the sintering machine head is the most important dust emission point with the most emission quantity and the highest mass fraction of PM_{2.5}, PM₁₀ and heavy metals.

Key words: sintering process; PM_{2.5}; PM₁₀; heavy metal; evaluation of dust emission

近年来,中国大气污染日趋严重,雾霾天气多发。有研究表明,大气中可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})含量较高是造成雾霾天气的重要原因^[1]。PM₁₀和PM_{2.5}由于比表面积较大,常常吸附重金属元素,并且极易进入人体的呼吸道并积聚在肺部,会对人的健康造成严重损害。

钢铁企业作为工业烟(粉)尘排放主要贡献者之一,2013年钢铁行业烟(粉)尘排放量为61.9万t,去除效率为97.3%,排放量仅次于火电

行业 and 水泥行业,去除效率却低于火电行业 and 水泥行业^[2]。

钢铁企业颗粒物产生于钢铁生产的各个工艺过程中,其污染源分布广,且含空气体排放量大,浓度高,粉尘成分复杂^[3-5]。其中,烧结工序烟粉尘产生量为20~40 kg/t_{烧结矿},排放量约为1.02 kg/t_{烧结矿},烟粉尘排放量占钢铁企业总排放量的40%左右^[6]。烧结工序烟粉尘来源有:①原料准备;②烧结配料;③烧结机头;④烧结机尾;⑤成品整粒。

为了全面了解烧结工序 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的排放情况,本研究选取国内某年产 1 000 万 t 钢的大型钢铁联合企业烧结厂进行烟粉尘排放现场测试。该烧结厂具有 1 台年产烧结矿 354.6 万 t 的 320 m^2 烧结机。该烧结厂的烟粉尘排放源都配有高效的除尘设备。

1 测试内容与测试方法

1.1 测试内容

根据烟粉尘排放源综合评价的计算要求(具体指标见 2.3 节),需要知道除尘设备进、出口烟粉尘的粒径分布、化学成分等。由于除尘设备进口处颗粒物浓度一般都非常大,很难进行准确的监测以及该测试企业在除尘设备入口处没有开设采样口,所以本研究测试除尘设备出口烟粉尘浓度、粒径分布和化学组成。同时,取得除尘设备的除尘灰样本,测试其粒径分布和化学组成。依据除尘器出口和除尘灰的测试结果,可以得到除尘设备进口的烟粉尘浓度、粒径分布和化学组成。

1.2 测试方法

根据国内钢铁企业具体情况,本研究参考《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T16157—1996)中的相关规定,将粉尘测试点布置在各个工艺过程的排气烟囱上。

对于 TSP (total suspended particulate) 采样,

本文选用青岛崂山应用技术研究所生产的 3012H 自动烟尘(气)测试仪;对于 PM_{10} 分粒径采样,选用美国 Thermo-Andersen 公司生产的 TE-20-800 安德森分级采样器;对于除尘设备捕集颗粒物的粒径分布分析,本研究采用丹东百特仪器有限公司生产的 BT-2001 激光粒度分布仪。除此之外,本研究还应用了分析天平、干燥箱及干燥器等。安德森分级采样器可以测量空气动力学直径在 0.4 ~ 10 μm 之间的颗粒物,并分为 8 级分别采样,F 级上可以放置后备滤膜,用来捕集空气动力学直径在 0 ~ 0.4 μm 之间的颗粒物。

2 测试结果与分析

2.1 烟粉尘粒径分布

1) 煤粉破碎:由表 1 可知,煤粉破碎除尘器前 TSP 中 PM_{10} 的质量分数只有 14.82%,而 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的质量分数为 38.66%,这是因为煤粉破碎的颗粒物主要来自煤块的破碎、筛分和转运,粗颗粒居多。由图 1 可以看出,除尘器前 PM_{10} 的粒径分布频度呈双峰分布,峰值分别集中在 0.85 ~ 0.947 μm 和 2.482 ~ 2.762 μm 的粒径区间里。煤粉破碎 PM_{10} 中除尘器前 0.5 μm 以下的颗粒物质量分数比较少,且 0.2 μm 以下的颗粒物含量几乎为零。

表 1 烧结工序各个烟粉尘排放因素的评判指标
Table 1 Evaluation indicators of each discharge point of sintering process

排放点	排放总量/($kg \cdot t_{\text{烧结矿}}^{-1}$)	排放浓度/($mg \cdot m^{-3}$)	w ($PM_{2.5}$)	w (PM_{10})	w(重金属)
烧焦煤粉破碎	0.498 (1)	17.237 (0.747)	0.056 (0)	0.148 (0)	0.713 (0.905)
烧结配料	2.471 (0.716)	17.242 (0.747)	0.121 (0.622)	0.368 (0.649)	0.92 (0.851)
烧结机头	7.454 (0)	22.072 (0.515)	0.160 (1)	0.486 (1)	4.188 (0)
烧结机尾	6.462 (0.143)	32.784 (0)	0.063 (0.056)	0.216 (0.120)	0.394 (0.988)
烧结成品整粒	7.414 (0.006)	11.973 (1)	0.072 (0.142)	0.249 (0.297)	0.347 (1)

注:w ($PM_{2.5}$)和 w (PM_{10})分别为 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 在 TSP 中的质量分数;w(重金属)为 As,Cd,Co,Cr,Cu,Ni,Pb,Ti,Zn 元素的质量分数的和;括号内为无量纲化处理后的结果。

2) 烧结配料:由表 1 可知,烧结配料除尘器前 TSP 中 PM_{10} 的质量分数只有 36.81%,而且 PM_{10} 中 $PM_{2.5}$ 的质量分数也不高,这是因为配料的颗粒物主要来自原料的破碎、混合,这些过程产

生的粗颗粒相对较多。由图 2 可以看出,除尘器前 PM_{10} 的粒径分布频度呈双峰分布,峰值分别集中在 1.1 ~ 2.1 μm 和 3.3 ~ 4.7 μm 的粒径区间里。除尘器前 PM_{10} 中 1.1 μm 以下的颗粒物质量分数

比较低.

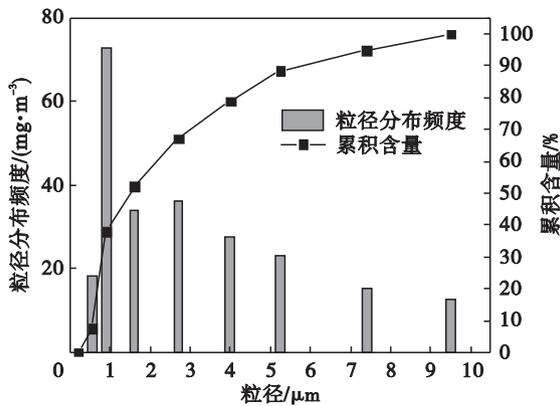


图 1 烧结煤粉破碎除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布和累积分布

Fig. 1 Particulate matter size and accumulation distribution before dust remover of coal broken

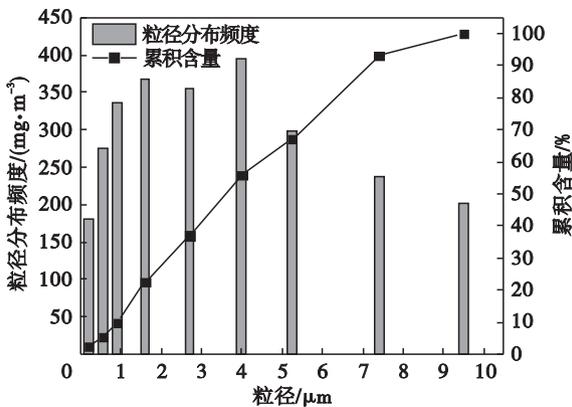


图 2 烧结配料除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布和累积分布

Fig. 2 Particulate matter size and accumulation distribution before dust remover of sintering ingredient

3) 烧结机机头:由表 1 可知,烧结机头除尘器前 TSP 中 PM₁₀ 的质量分数很高,可达 48.62%,这是因为机头的颗粒物主要来自烧结配料燃烧产生的烟尘.细颗粒物的主要生成机理为气化凝结,机头烟气中大部分颗粒物均经过了高温燃烧或加热过程,因此细颗粒含量要明显高于常温下只经过纯物理破碎的配料工艺产生的粉尘.由图 3 可知,机头除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布频度均呈单峰分布,峰值均集中在 0.4 ~ 0.7 μm 的粒径区间里.经典燃烧论认为煤粉燃烧产生的颗粒物呈双峰分布,峰值分别出现在 0.1 μm 和 1 μm 处.与纯煤粉燃烧相比,机头颗粒峰值粒径位于二者中间,这是因为烧结过程产生的颗粒物不仅包括配料燃烧产生的烟尘,还包括烧结布料过程产生的粉尘.

4) 烧结机机尾:由表 1 可知,烧结机尾除尘器前 TSP 中 PM₁₀ 质量分数为 21.58%.由图 4 可

以看出,机尾除尘器前 TSP 中 PM₁₀ 的质量分数均呈双峰分布,峰值分别集中在 0.4 ~ 0.7 μm 和 2.1 ~ 3.3 μm 的粒径区间里,因为机尾的颗粒物主要来自配料燃烧产生的烧结灰和破碎时产生的粉尘,前者细颗粒物较多,后者则粗颗粒物较多.

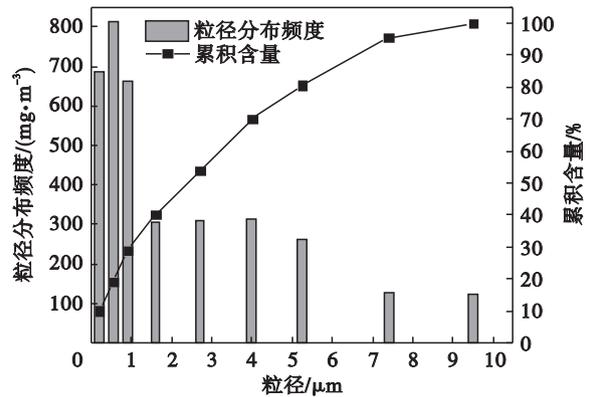


图 3 烧结机头除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布和累积分布

Fig. 3 Particulate matter size and accumulation distribution before dust remover of sintering machine head

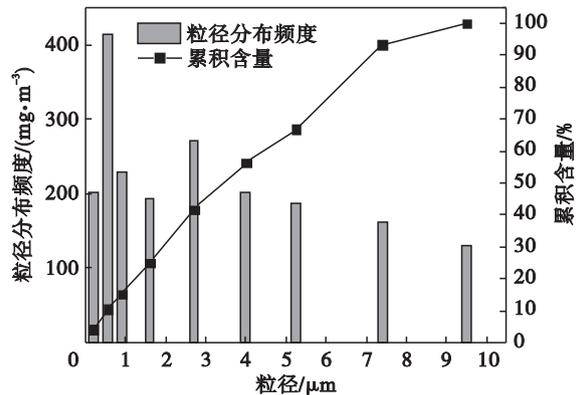


图 4 烧结机机尾除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布和累积分布

Fig. 4 Particulate matter size and accumulation distribution before dust remover of sintering machine tail

5) 成品整粒:由表 1 可知,成品整粒和烧结配料类似,除尘器前 TSP 中 PM₁₀ 的质量分数只有 24.86%,而且 PM₁₀ 中 PM_{2.5} 的质量分数也不高,这是因为整粒的颗粒物主要来自烧结矿的破碎、筛分和转运,粗颗粒居多.由图 5 可知,除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布频度呈双峰分布,峰值分别集中在 1.1 ~ 2.1 μm 和 4.7 ~ 5.8 μm 的粒径区间里.除尘器前 PM₁₀ 中 1.1 μm 以下的颗粒物质量分数比较少.

2.2 烟粉尘化学成分

由于可吸入颗粒物表面积较大,容易吸附重金属元素等有害物质,因此,对可吸入颗粒物和细颗粒物的化学成分分析尤为重要.根据采样滤膜和各除尘器除尘灰的化学成分分析,可以得到除

尘器前各排放点的化学成分,如图 6 所示.统计各个排放点除尘器后 PM₁₀ 中重金属元素含量,包括 As,Cd,Co,Cr,Cu,Ni,Pb,Ti,Zn 等元素.

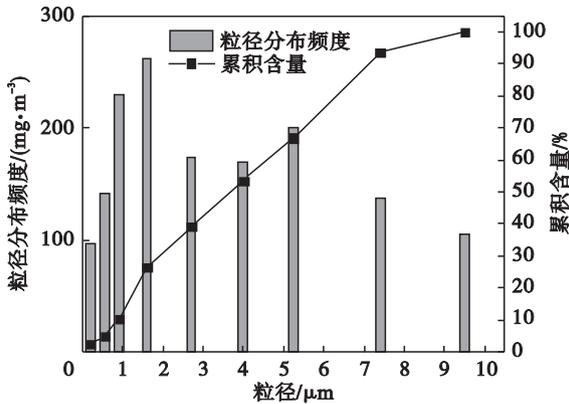


图 5 成品整粒除尘器前 PM₁₀ 的粒径分布和累积分布
Fig. 5 Particulate matter size and accumulation distribution before dust remover of product screening

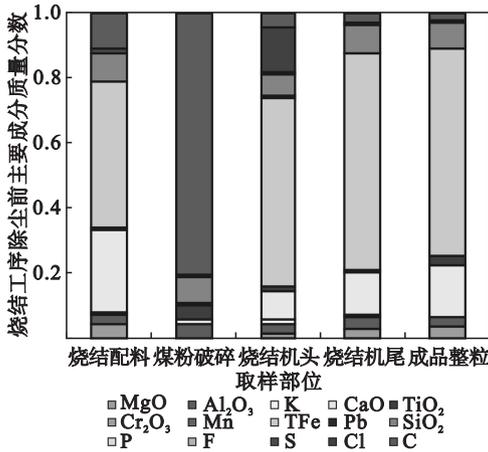


图 6 烧结工序各排放点除尘器前主要元素质量分数
Fig. 6 Mass fraction of main elements before the dust remover in each discharge point of sintering process

烧结配料排放 PM₁₀ 的主要化学成分是 TFe, CaO, C, SiO₂, MgO, Al₂O₃, 其中 TFe 和 CaO 质量分数分别为 34.63% 和 20.11%.

表 2 烧结工序烟粉尘排放点影响因素权重值

Table 2 Weighting factors of evaluation indicators of each discharge point of sintering process

序号	排放总量	排放浓度	w (PM _{2.5})	w (PM ₁₀)	w(重金属)	Σ
1	0.25	0.25	0.1	0.15	0.25	1
2	0.3	0.3	0.1	0.1	0.2	1
3	0.5	0.1	0.1	0.15	0.15	1
4	0.5	0.2	0.1	0.15	0.05	1
5	0.17	0.21	0.21	0.2	0.21	1
平均值	0.344	0.212	0.122	0.150	0.172	1

烧结煤粉破碎排放 PM₁₀ 的主要化学成分是 C, SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, CaO, TFe, 质量分数分别为 76.4%, 6.98%, 3.94%, 3.9%, 1.4% 和 1.01%, 可见煤粉主要以碳元素为主.

烧结机头排放 PM₁₀ 的主要化学成分是 TFe, Cl, CaO, SiO₂, C, K, TiO₂, Al₂O₃, MgO, S, Pb. 分析可知这些主要组分多来自烧结工艺的原料(铁矿、焦炭等),如 Fe, Si, Al 主要来源于铁矿石原料.此外,机头存在着一定比例的 Pb(1.37%).有研究表明钢铁厂近 96% 的 Pb 来自烧结,其主要来源于烧结工艺的原料,尤其是铁矿石中, Pb 含量的高低与铁矿石品位有关^[7].

烧结机尾和整粒排放 PM₁₀ 的主要化学成分是 TFe, CaO, SiO₂, 质量分数分别约为 51%, 11%, 7%. 由于机尾与机头的工艺不同,机尾包括物料的破碎、筛分和转运等机械过程,且烧结矿已经完成了高温烧结的过程,颗粒物中会混入矿石经高温产生的铁的各种化合物,因此机尾 Fe 元素占总组分的百分比会高于机头.

2.3 排放源综合评价

为了综合评价烧结工序各个烟粉尘排放点的重要性,筛选重点排放源,本研究借鉴废水污染治理技术的评价方法^[8],对烧结工序各个烟粉尘排放点进行综合评价.

各个烟粉尘排放点除尘器后的评判指标,包括 TSP 排放总量 (kg/t_{产品}), TSP 排放质量浓度 (mg/m³), PM_{2.5} 质量分数 (%), PM₁₀ 质量分数 (%) 和重金属元素的质量分数 (%), 如表 1 所示. 各个指标具有不同的量纲,因此,为了消除原始数据量纲对评价指标可加、可比性的影响,需要利用特定的运算将原始数据转换为新值,即对原始数据进行无量纲化处理,从而保证运算的正常进行,无量纲化结果如表 1 所示. 评判指标的权重矩阵 A 是根据国内 5 位专家的评分结果取的平均值,如表 2 所示.

根据表 2 中各个评判指标的权重值以及表 1

中各个评判指标的单因素评判矩阵,可根据式

(1) 计算烧结工序不同排放源的综合评价系数, 如表 3 所示.

表 3 烧结工序不同排放源的综合评价系数

Table 3 Comprehensive evaluation coefficients of each discharge point of sintering process

排放点	烧结煤粉破碎	烧结配料	烧结机头	烧结机尾	烧结成品整粒	Σ
综合评价系数	0.038 313	0.157 903	0.404 198	0.243 599	0.155 987	1

综合评价系数矩阵 B 是权重矩阵 A 和单因素评判矩阵 R 的点乘积,

$$B = A \cdot R \quad (1)$$

根据表 3, 烧结工序不同烟粉尘排放源的综合评价结果比较见图 7. 从图 7 中可以看出, 烧结工序不同烟粉尘排放源综合评价系数排序为烧结机头 > 烧结机尾 > 烧结配料 > 烧结整粒 > 烧结煤粉破碎. 由表 1 可知, 烧结工序中, 烧结机头的 TSP 排放总量最大, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的含量最多, 重金属含量也是最多. 因此, 烧结机头是烧结工序烟粉尘最重要的排放源, 其次是烧结机尾, 再次是烧结配料, 然后是烧结成品整粒, 最后是烧结煤粉破碎.

从图 7 综合评价系数和排放浓度的关系可以看出, 虽然烧结机头的烟粉尘排放浓度不是最大, 但是其综合评价系数最大. 而且, 烧结煤粉破碎的综合评价系数最小, 但是其排放浓度并不是最小. 因此, 仅以排放浓度作为烟粉尘排放点的评价指标是不科学的、不全面的, 还需考虑其他的排放特性指标.

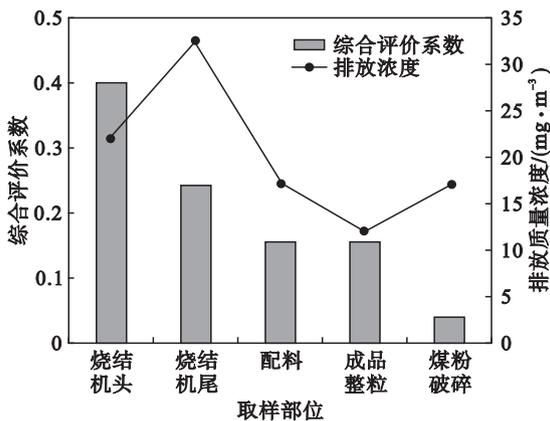


图 7 烧结工序不同排放源的综合评价系数比较
Fig. 7 Comparison of comprehensive evaluation coefficients of each discharge point of sintering process

3 结 论

除煤粉破碎外, 烧结工序其他排放点的化学成分以 TFe, CaO 为主, 其中烧结机头 S 含量较高. 仅以排放质量浓度作为烟粉尘排放点的评判

指标是片面的. 用模糊评判法评价烧结工序各个烟粉尘排放点得到综合评价系数, 排序为烧结机头 > 烧结机尾 > 烧结配料 > 烧结整粒 > 烧结煤粉破碎. 烧结机头的排放总量, $PM_{2.5}$, PM_{10} 和重金属含量均为最大, 是烧结工序最重要的烟粉尘排放点. 仅以 TSP 排放质量浓度作为烟粉尘排放点的评价指标过于单一, 应全面综合 PM_{10} , $PM_{2.5}$, 重金属元素含量等因素统筹考虑.

参考文献:

- [1] 肖致美. 大气能见度下降影响因素、来源解析及灰霾评估指标体系研究[D]. 天津: 南开大学, 2012. (Xiao Zhi-mei. Study on influence factors, source apportionment of visibility degradation and assessment index system of haze [D]. Tianjin: Nankai University, 2012.)
- [2] 陈吉宁. 2013 年环境统计年报[R]. 北京: 环境保护部, 2014. (Chen Ji-ning. Environment statistical yearbook 2013 [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, 2014.)
- [3] Mohiuddin K, Strezov V, Nelson P F, et al. Characterization of trace metals in atmospheric particles in the vicinity of iron and steel making industries in Australia [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 83(2): 74-79.
- [4] Amodio M, Andriani E, Dambruoso P R, et al. A monitoring strategy to assess the fugitive emission from a steel plant [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 79(11): 455-461.
- [5] Zhang S H, Worrell E, Wina C G, et al. Co-benefits of energy efficiency improvement and air pollution abatement in the Chinese iron and steel industry [J]. *Energy*, 2014, 78(12): 333-345.
- [6] 马京华. 钢铁企业典型生产工艺颗粒物排放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2009. (Ma Jing-hua. Emission characteristics of particulates from typical production process of iron and steel enterprises [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.)
- [7] Tsai J H, Lin K H, Chen C Y, et al. Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 148(8): 111-119.
- [8] 李蕊. 辽河流域典型造纸工业废水治理技术评价方法集成与优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2010. (Li Rui. Integration and optimization of evaluation method for treatment technology of typical papermaking wastewater at Liao River Basin [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010.)