含氰废水中铜锌分步回收工艺研究

秦广林
(山东黄金矿业科技有限公司,山东 莱州 261400)

摘要: 在金精矿氰化过程中,铜、锌等矿物部分进入到液体中,导致其质量分数逐渐升高。为净化含氰液体,实现铜、锌的高效回收,本文在对相关物质络合稳定常数分析的基础上,确定锌沉淀 pH 值为 5.99,铜沉淀 pH 值为 3.69。试验中,通过对含氰液体进行不同 pH 值、硫化钠用量和反应时间试验,产出品位分别为 42.97% 、58.33% 的锌、铜产品,锌、铜的沉淀率分别达到了 94.13% 和 98.30% 。该工艺的研发,达到了净化贫液中铜、锌络合离子分步回收的目的,有效降低了铜、锌离子质量分数,实现了含氰废水中铜、锌资源化的综合利用,处理后的贫液在浸出过程有利于提高金精矿中金、银的浸出率。

关键词: 黄金; 氰化; 浸出; 回收; 金精矿
中图分类号: TD953; X703 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000 - 8764(2022) 04 - 0113 - 06
doi: 10.13403/j.sjqt.2022.04.062

Research on fractional reduction process of copper and zinc from cyanide-containing wastewater

QIN Guanglin
(*Shandong Gold Mining Technology Co.*, *Ltd.*, *Laizhou* 261400, *Shandong*, *China*)

Abstract: In the process of cyanidation of gold concentrate, such minerals as copper and zinc partially enter into the liquid, resulting in a gradual increase in its mass fraction. In order to purify the cyanide-containing liquid and realize the efficient recovery of copper and zinc, it is determined that the pH values of zinc precipitation and copper precipitation are 5.99 and 3.69 respectively based on the analysis of complexation stability constants of related substances. Through the test of different pH values, sodium sulfide dosage and reaction time of cyanide-containing liquids, the yield grades of zinc and copper reach 42.97% and 58.33%, respectively, and the precipitation rates of zinc and copper reach 94.13% and 98.30%, respectively. The R&D of this process achieves the purpose on fractional reduction of purifying the copper and zinc complexation ions in the barren liquor, effectively reducing the mass fraction of copper and zinc ions, realizing the comprehensive utilization of copper and zinc resource recovery in cyanide-containing wastewater, while the treated barren liquor is conducive to improving the leaching rate of gold and silver in the gold concentrate during the leaching process.

Key words: gold; cyanidation; leaching; recovery; gold concentrate

在黄金湿法冶炼工艺中,氰化法以其高效、适用性强的特点,占有主导地位[1-2]。在氰化浸出工艺中,贵液一般经过锌粉置换等工艺回收其中的金、银,产生的贫液返回氰化浸出作业继续使用。贫液经过长期循环使用后,其中的重金属和盐分不断积累,造成操作困难和工艺指标的恶化,因此需要对贫液进行净化处理[3]。目前,含氰废水处理工艺主要有酸化法、硫酸锌法、次氯酸盐法和因科法等[4-5]。

在某冶炼公司的生产工艺中,来料金精矿经过磨矿后进入浸前浮选工艺流程。在浮选中,将来料金精矿分为高铜、高硫和低硫金精矿,

收稿日期: 2021 - 08 - 06; **修回日期**: 2021 - 09 - 22
作者简介: 秦广林(1983—) ,男,高级工程师,从事选矿冶金技术研发管理方面的工作。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中高铜产品含有铜、铅、锌等矿物。3 种产品经浓缩和过滤后分别进入对应的氰化浸出系统，浸出贵液用锌粉进行置换，产生的贫液返回氰化系统。在浸出过程中发现，高铜金精矿中约有 50% 的铜和少量的锌进入到浸出贵液中；贵液经锌粉置换后，产生的贫液返回系统继续使用。在生产中，贫液中的铜、锌质量分数逐渐升高，造成浸出指标恶化。一般采用酸化法处理高铜金精矿产生的贫液，产出含铜、锌等金属的混合产品。

本文通过对铜、锌络合离子的稳定常数进行分析，确定铜、锌分步沉降 pH 值，以产出品位及销售价格更高的产品，并达到贫液中铜、锌络合离子分步沉淀的目的，实现含氰废水中铜、锌资源化的综合利用。

1 理论计算

工艺从含氰液体中分别回收铜、锌时，能够分别产出两种含铜、锌的高品位硫化物产品。在沉淀过程中，主要的平衡反应主要包括：HCN 的生成和 H_2S 的解离、铜和锌的硫化沉淀、含氰配体的解离和沉淀物的生成过程[6-7]。

在反应过程中，铜、锌的沉淀反应式如下。

$$CN^- + H^+ \rightarrow HCN \quad (1)$$

$$2Cu(CN)_4^{3-} + 8H^+ + S^{2-} \rightarrow Cu_2S\downarrow + 8HCN \quad (2)$$

$$Zn(CN)_4^{2-} + S^{2-} \rightarrow ZnS\downarrow + 4CN^- \quad (3)$$

由式(1) ~ (3) 可以看出，在反应过程中，金属(络) 离子中的金属与硫离子在不同条件下可生成金属硫化物沉淀，同时释放氰化氢和游离氰[8-9]。

1.1 相关常数

由于铜具有多种含氰络合形式，其相互间存在复杂的平衡关系，在计算过程中，认为铜氰络合物以 $Cu(CN)_4^{3-}$ 的形式存在为主。硫化锌有两种存在形式，其中 α-ZnS 溶度积更低，理论上更易于生成，溶液中铁离子均以 $Fe(CN)_6^{4-}$ 的形式存在[10]。

计算过程均采用 25 ℃理论常数，以浓度值近似替代活度值，具体数据如表 1 所示。

表 1 计算过程所用常数

Table 1 Constants used in the calculation process

溶度积						
Cu_2S	CuS	α-ZnS	CuSCN	$Cu_2[Fe(CN)_6]$	$Zn_2[Fe(CN)_6]$	$HCN = H^+ + CN^-$
2.5×10^{-48}	6.3×10^{-36}	1.6×10^{-24}	4.8×10^{-15}	1.3×10^{-16}	4.0×10^{-16}	6.2×10^{-10}

弱酸解离常数		络合稳定常数	
$H_2S = H^+ + HS^-$	$HS^- = H^+ + S^{2-}$	$Cu(CN)_4^{3-}$	$Zn(CN)_4^{2-}$
1.3×10^{-7}	7.1×10^{-15}	5.0×10^{-28}	2.0×10^{-17}

1.2 沉淀过程 pH 计算

1.2.1 锌沉淀 pH 计算

在贫液中，液体中的锌主要以 $Zn(CN)_4^{2-}$ 为主，由表 1 可知其络合稳定常数为 2.0×10^{-17}。

锌氰络合物在酸性体系中反应计算如下。

$$Zn(CN)_4^{2-} \rightleftharpoons (Zn)^{2+} + 4CN^- \quad K_d = 2.0\times10^{-17} \quad (4)$$

在 0.008 mol/L 的溶液中，通过计算可知：$C(Zn^{2+}) = 1.51\times10^{-4}$ mol/L；$C(CN^-) = 6.03\times10^{-4}$ mol/L。

$$HCN \rightleftharpoons H^+ + CN^- \quad K_a = 6.2\times10^{-10} \quad (5)$$

在含氰液体中，当 $C(H^+)\cdot C(CN^-) \geqslant K_a$ 时，溶液中会有 HCN 气体溢出。由于氰化氢的弱酸解离常数为 6.2×10^{-10}，由此可计算出当 $C(H^+) = 1.03\times10^{-6}$ mol/L 时，产生氰化氢气体，此时，溶液 pH 值为 5.99。由于贫液中的游离氰随氰化氢气体排出，$Zn(CN)_4^{2-}$ 络合离子的解离反应向右进行。

需要说明的是，通过上述计算，在试验溶液中 Zn^{2+} 浓度为 1.51×10^{-4} mol/L，加入理论量的 Na_2S，溶液中的硫离子浓度为 8.46×10^{-6} mol/L，锌离子浓度为 1.51×10^{-4} mol/L，通过

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

下列计算：$C(Zn^{2+}) + C(S^{2-}) = 1.28 \times 10^{-9} > K_{sp}(ZnS) = 1.628 \times 10^{-24}$。

所以，在高铜贫液中直接加入硫化钠也可产生 ZnS 沉淀。由于在铜沉淀过程需要在更低的 pH 值条件下进行，所以，为了加速 ZnS 沉淀的产生，在锌沉淀阶段对液体 pH 值用硫酸进行调节。

1.2.2　铜沉淀 pH 计算

在贫液中，铜主要以 $Cu(CN)_4^{3-}$ 为主，由表 1 可知其络合稳定常数为 5.0×10^{-28}，通过计算在 0.13 mol/L 的溶液中，氰根离子浓度为 7.6×10^{-7} mol/L，氰根离子浓度为 3.04×10^{-6} mol/L。由于氰化氢的弱酸解离常数为 6.2×10^{-10}，故可得出当溶液中的 pH 值小于 3.69 时，$Cu(CN)_4^{3-}$ 的解离反应向右进行，生成氰化氢气体，同时生成黑色的 Cu_2S 沉淀。

铜氰络合物在酸性体系中反应计算如下。

$$Cu(CN)_4^{3-} \rightleftharpoons Cu^+ + 4CN^- \quad K_d = 5.0 \times 10^{-28} \tag{6}$$

在 0.13 mol/L 的溶液中，通过计算可知：$C(Cu^+) = 7.60 \times 10^{-7}$ mol/L，$C(CN^-) = 3.04 \times 10^{-6}$ mol/L。

$$HCN \rightleftharpoons H^+ + CN^- \quad K_a = 6.2 \times 10^{-10} \tag{7}$$

当 $C(H^+) \cdot C(CN^-) \geqslant K_a$ 时，溶液中开始有 HCN 气体溢出，铜氰络合物解离向右进行，溶液中 Cu^+ 逐渐增多。由此可计算出 $C(H^+) = 2.04 \times 10^{-4}$ mol/L，pH 值为 3.69。

2　试验原料与方法

2.1　试验原料与设备

试验所使用的样品为某冶炼公司高铜精矿浸出后产生的贫液，样品中主要成分化验结果如表 2 所示[11-12]。由表 2 可以看出，高铜贫液中主要回收金属铜质量浓度为 8.22 g/L，锌质量浓度为 0.55 g/L。

表 2　试验样品的成分分析

Table 2　Composition analysis of test samples

项目	Cu	Zn	Pb	SCN^-	SO_4^{2-}	CN^-
质量浓度/(g·L^{-1})	8.22	0.550	0.01	26.98	40.42	3.9
摩尔浓度/(mol·L^{-1})	0.13	0.008	微量	0.47	0.42	0.15

试验试剂主要有 $Na_2S \cdot 9H_2O$(分析纯)、浓硫酸、氢氧化钠，试验设备有真空抽滤机、洗气瓶、三头反应釜、磁力搅拌器、量筒、pH 计、秒表、恒压分液体漏斗。

2.2　试验方法

在室温条件下密闭的通风橱内进行试验，锌、铜沉淀阶段产生的氰化氢和硫化氢气体，用 5% 浓度的 NaOH 溶液进行三级吸收。试验过程中加入的 $Na_2S \cdot 9H_2O$ 理论用量分别按式(2)、(3)进行计算。

锌沉淀过程：取 500 mL 高铜贫液加入到放置在磁力搅拌器上的反应釜中，打开磁力搅拌器使转子带动贫液旋转，设定转子转速为 300 r/min；将 pH 计插入到贫液中，用恒压分液漏斗将硫酸缓慢加入到贫液中，直到达到所需 pH 值，当 pH 值稳定后加入理论需要量 2.0 倍的 $Na_2S \cdot 9H_2O$；试验过程中采用秒表计时，反应达到设定时间后，关闭磁力搅拌器。反应后的液体用真空抽滤机进行固液分离，液体留存供后续铜沉淀使用。

铜沉淀过程：将锌沉淀阶段过滤后的液体，加入到放置在磁力搅拌器上的反应釜中，设定磁力搅拌器中转子转速为 300 r/min；用恒压分液漏斗将硫酸缓慢加入到贫液中，直到达到所需 pH 值，pH 值稳定后加入理论需要量 2.0 倍的 $Na_2S \cdot 9H_2O$，试验过程采用秒表计时，反应达到预定时间后，关闭磁力搅拌器。反应后的液体用真空抽滤机进行固液分离。

3　试验结果与讨论

3.1　锌沉淀试验

3.1.1　不同 pH 值

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

在硫化钠加入量为理论计算量2.0倍，反应时间为5 min的条件下，在不同pH值条件下进行试验，试验结果如表3所示。

表3 不同pH值条件下试验结果

Table 3 Test results under different pH values

pH值	离子浓度/(mg·L^{-1})		沉淀率/%	
	Cu	Zn	Cu	Zn
12	7 957	247.20	3.20	54.79
10	7 900	220.60	3.90	59.66
8	7 895	150.30	3.96	72.51
6	7 780	32.07	5.36	94.13
4	6 330	4.80	23.00	99.12

由表3可以看出，pH值变化对金属离子沉淀率影响较大。当pH值小于8.0时，锌沉淀率快速增加，在pH值为6.0时，锌沉淀率达到94.13%；在pH值大于6.0时，贫液中铜的沉淀率较低，当pH值小于6.0时，铜开始沉淀，pH值为4.0时铜的沉淀率已经达到23.00%。为了保证锌沉淀产品中较低的含铜量，确定该试验的pH值为6.0。

3.1.2 硫化钠用量

在硫化钠用量试验中，调节液体pH值为6.0，反应时间为5 min。因在硫酸加入过程中，不可避免的会生成硫化氢气体，所以，硫化钠实际使用量应大于理论计算量。试验结果如表4所示。

由表4可以看出，在药剂加入量为1.0到3.0倍的范围内，随着药剂用量的增加，锌沉淀率先增加后逐渐趋于稳定。药剂加入量为理论计算量的2.0倍即可。

表4 不同硫化钠用量条件下试验结果

Table 4 Test results under different dosage of sodium sulfide

药剂用量/倍	离子质量浓度/(mg·L^{-1})		沉淀率/%	
	Cu	Zn	Cu	Zn
1.0	7 857	121.36	4.42	77.81
1.5	7 800	86.68	5.12	84.15
2.0	7 780	32.07	5.36	94.13
2.5	7 785	31.88	5.30	94.17
3.0	7 780	31.88	5.36	94.17

3.1.3 反应时间

在调节液体pH值为6，药剂用量为理论用量2.0倍的条件下，进行反应时间试验。试验结果如表5所示。

表5 不同反应时间试验结果

Table 5 Test results of different reaction time

反应时间/min	离子质量浓度/(mg·L^{-1})		沉淀率/%	
	Cu	Zn	Cu	Zn
3	8 115	44.60	1.29	91.84
5	7 780	32.17	5.36	94.13
7	7 769	32.00	5.49	94.15
9	7 759	32.90	5.62	93.97
11	7 720	32.90	6.09	93.98

由表5可以看出，反应时间从3 min到11 min的变化过程中，高铜贫液中锌的沉淀率先升高后趋于稳定。所以，反应时间为5 min时即可达到终点。

3.2 铜沉淀试验

在铜沉淀阶段中，加入理论计算量2.0倍的硫化钠，在反应时间为5 min的条件下进行试验，试验结果如表6所示。

表6 不同pH值条件下试验结果

Table 6 Test results under different pH values

pH值	浓度/(mg·L^{-1})		沉淀率/%	
	Cu	Zn	Cu	Zn
4.0	6300.2	4.80	23.36	99.12
3.5	504.3	1.29	93.87	99.76
3.0	139.8	0.74	98.30	99.86
2.5	96.3	1.04	98.83	99.81
2.0	61.5	1.34	99.25	99.75

从表6可以看出，在pH值小于4.0时，铜沉淀率明显增加，考虑到随着pH值的逐渐降低，会向液体中引入大量的硫酸根。所以，确定铜沉淀阶段的pH为3.0时。此时，铜沉淀率为98.30%，锌沉淀率为99.76%。

在反应时间为5 min，硫化钠加入量为理论计算量的2.0倍时，铜、锌已经达到了较高沉淀率，不再进行药剂用量和反应时间试验。

3.3 尾液氰化浸出试验

为了验证处理尾液对高铜金精矿浸出率的

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

影响，在浸出试验中，对高铜贫液与处理尾液浸出效果进行对比，试验条件：液固比为 2∶1、高铜金精矿质量为 500 g；pH 值控制在 11 ~ 12；氰化钠质量分数控制为 0.07%；浸出时间为 96 h。试验结果如表 7 所示。

表 7　高铜贫液与处理尾液氰化浸出对比试验

Table 7　Comparison test of cyanide leaching of high copper lean liquor and tail liquor

浸出试验	高铜精矿品位/(g·t^{-1})		浸渣品位/(g·t^{-1})		浸出率/%	
	Au	Ag	Au	Ag	Au	Ag
高铜贫液	585.35	759.60	2.15	636.27	99.63	16.24
尾液			1.88	253.73	99.68	66.60

从表 7 可以看出，通过该工艺处理后的尾液对高铜精矿进行浸出试验，处理后的液体金、银浸出率均高于高铜贫液直接浸出效果，尾液可直接用于氰化浸出作业。

3.4　沉淀产品检查

对沉淀产品中的铜、锌两种元素进行分析，分析结果如表 8 所示。

表 8　沉淀产品结果分析表

Table 8　Analysis of precipitation product results

产品名称	含水率/%	品位/%	
		Cu	Zn
锌产品	60.85	2.04	42.97
铜产品	58.63	58.33	1.58

从表 8 可以看出，锌产品和铜产品经过滤后，含水率分别为 60.85% 和 58.63%。锌产品中锌品位为 42.97%，铜品位为 2.04%。铜产品中铜品位为 58.33%，锌品位为 1.58%。

锌产品中含铜主要是在锌沉淀加入 H_2SO_4 的过程中由于局部 H^+ 浓度较大，生成不可返溶的 Cu_2S 沉淀。铜产品中含锌的原因是实验室不能对锌沉淀进行彻底过滤，有少量的锌沉淀进入到铜沉淀过程中。

4　结　论

(1) 通过理论分析，某冶炼公司贫液中锌沉淀 pH 值为 5.99，铜沉淀 pH 值为 3.69。

(2) 在试验中，确定锌沉淀 pH 值为 6.0，锌沉淀率为 94.13%；铜沉淀 pH 值为 3.0，铜沉淀率为 98.30%。锌产品中锌质量分数为 42.97%，铜产品中铜质量分数为 58.33%。

(3) 工艺实现了贫液中铜、锌产品的分离，降低贫液中金属质量分数的同时，减少了硫酸用量，增加了企业经济效益。

参考文献：

[1] 玉涵，胡显智. 氰化及非氰化提金方法综述[J]. 云南冶金，2010(3)：9 - 12.
YU Han，HU Xianzhi. Review of cyanide and non cyanide gold extraction methods[J]. Yunnan metallurgy，2010(3)：9 - 12.

[2] 黄礼煌. 金银提取技术[M]. 第 2 版. 北京：冶金工业出版社，2001：133 - 273.
HUANG Lihuang. Gold and silver extraction technology[M]. 2nd Edition. Beijing：Metallurgical Industry Press，2001：133 - 273.

[3] 兰新哲，张聪惠，党晓娥，等. 提金氰化物回收循环再用技术研究新进展[J]. 黄金科学技术，1999，7(3)：40 - 45.
LAN Xinzhe，ZHANG Conghui，DANG Xiaoe，et al. New research progress in cyanide recovery and recycling technology for gold extraction[J]. Gold science and technology，1999，7(3)：40 - 45.

[4] 胡杨甲，贺政，赵志强，等. 氰化浸出废水处理方法研究进展[J]. 中国矿业，2015(增)：219 - 223.
HU Yangjia，HE Zheng，ZHAO Zhiqiang，et al. Research progress on cyanide leaching wastewater treatment[J]. China mining，2015(increase)：219 - 223.

[5] 梅治福，丁成，王莹，等. SO_2/Air 法处理含氰尾矿浆氧化反应器的设计与应用[J]. 黄金，2015，36(12)：44 - 46.
MEI Zhifu，DING Cheng，WANG Ying，et al. Design and application of oxidation reactor for treating cyanide bearing tailings slurry by SO_2/Air method[J]. Gold，2015，36(12)：44 - 46.

[6] 兰新哲，张聪惠等. 提金氰化物回收循环再用技术新进展[J]. 黄金科学技术，1999，7(3)：40 - 45.
LAN Xinzhe，ZHANG Conghui，et al. New progress in cyanide recovery and recycling technology for gold extraction[J]. Gold science and technology，1999，7(3)：40 - 45.

[7] 大连工学院无机化学教研室. 无机化学[M]. 北京：人民教育出版社，1978.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Department of inorganic chemistry of Dalian Institute of Technology. Inorganic chemistry [M]. Beijing: People's Education Press,1978.

[8] 卢宜源. 贵金属冶金学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社,1994: 165 – 167.
LU Yiyuan. Precious metal metallurgy[M]. Changsha: Central South University of Technology Press,1994: 165 – 167.

[9] 李俊杰,魏进超,刘昌齐. 活性炭法多污染物控制技术的工业应用[J]. 烧结球团,2017,42(2) 79 – 85.
LI Junjie, WEI Jinchao, LIU Changqi. Combined desulfurization,denitrification and reduction of air toxice using activated coke[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2) : 79 – 85.

[10] 高继贤,刘静,曾艳,等. 活性焦(炭)干法烧结烟气净化技术在钢铁行业的应用与分析(I):工艺与技术经济分析[J]. 烧结球团,2012,37(1) : 65 – 69.
GAO Jixian,LIU Jing,ZENG Yan,et al. Application and analysis of activated coke(carbon) dry sintering flue gas purification technology in iron and steel industry(I) -process and technical economic analysis [J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(1) : 65 – 69.

[11] 苏玉栋,李咸伟,范晓慧. 烧结过程中 NO_x 减排技术研究进展[J]. 烧结球团,2013,38(6) : 41 – 54.
SU Yudong, LI Xianwei, FAN Xiaohui. Research progress of NO_x emission reduction technology in sintering process[J]. Sintering and Pelletizing,2013,38(6) : 41 – 54.

[12] 廖继勇,储太山,刘昌齐,等. 烧结烟气脱硫脱硝技术的发展与应用前景[J]. 烧结球团,2008,33(4) : 1 – 5.
LIAO Jiyong, CHU Taishan, LIU Changqi, et al. Development and application prospect of sintering flue gas desulfurization and denitration technology [J]. Sintering and Pelletizing, 2008,33(4) : 1 – 5.

(上接第112页)

[3] 张文强,肖洪,高冰,等. 唐钢1号高炉高比例球团矿冶炼工业试验[J]. 炼铁,2019,38(2) : 13 – 16.
ZHANG Wenqiang,XIAO Hong,GAO Bing,et al. commercial test of high-rate pellet smelting in Tangshan steel's No. 1 bf [J]. Ironmaking,2019,38(2) : 13 – 16.

[4] 叶恒棣,胡兵,魏进超. 链箅机—回转窑球团 NO_x 超低排放技术研究[J]. 烧结球团,2020,45(1) : 55 – 60.
YE hengdi,HU Bing,WEI Jinchao. Research on technology of ultra-low NO_x emission from grate-rotary kiln pelletizing process[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(1) : 55 – 60.

[5] 牛强,罗津晶,郑锦森,等. 臭氧氧化技术同时脱除烟气中NO和 SO_2 的试验研究. [J]. 广东化工,2020,12(47) : 159 – 161.
NIU Qiang, LUO Jinjing, ZHENG Jinsen, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO and SO_2 in flue gas[J]. Guangdong Chemical Industry,2020,12(47) : 159 – 161.

[6] 赵南. 臭氧氧化结合湿法同时脱硫脱硝工艺及吸收添加剂研究[D]. 杭州: 浙江大学,2015.
ZHAO Nan. Experimental study on simultaneous wet absorption of SO_2 and NO_x combined with ozone oxidation and investigation on absorption additives[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2015.

[7] 王智化,周俊虎,魏林生,等. 用臭氧氧化技术同时脱除锅炉烟气中 NO_x 及 SO_2 的试验研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(11) : 1 – 5.
WANG Zhihua, ZHOU Junhu, WEI Linsheng, et al. Experimental research for the simultaneous removal of NO_x and SO_2 in flue gas by O_3 [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(11) : 1 – 5.

[8] 李东明,陈盛健,李凯. $PM_{2.5}$ 预荷电直通式袋滤器在山钢日照炼钢除尘中的应用[J]. 工业安全与环保,2019,45(6) : 61 – 64.
LI Dongming, CHEN Shengjian, LI Kai. Application of $PM_{2.5}$ pre-charged straight-through bag filter in in Rizhao Steelmaking dust removal[J]. Industrial Safety and Environmental Protection,2019,45(6) : 61 – 64.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net