

冶富银, 革海银, 李明, 等. 石灰石-石膏法废水对氨法脱硫硫酸铵结晶影响[J]. 净水技术, 2023, 42(2):125-131.

YE F Y, GE H Y, LI M, et al. Effect of limestone-gypsum wastewater on crystallization of ammonium sulfate in ammonia desulfurization[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(2):125-131.

石灰石-石膏法废水对氨法脱硫硫酸铵结晶影响

冶富银¹, 革海银¹, 李明¹, 李军¹, 杜乾辉¹, 顾杉¹, 黄帮福^{2,*}

(1. 云南天朗节能环保集团有限公司, 云南安宁 650302; 2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 云南昆明 650093)

摘要 为充分发挥氨法脱硫系统自身优势, 避免石灰石-石膏法废水外排造成污染环境, 文中采用一期氨法脱硫预洗塔母液和料液槽母液作为溶剂, 二期石灰石-石膏法各类脱硫废水作为溶质, 深入研究添加各类废水对硫酸铵结晶及其晶体影响。研究表明: 向一期预洗塔、料液槽硫酸铵母液中添加二期各类石灰石-石膏法废水, 均可使硫酸铵结晶量明显增加, 尤其添加脱硫塔浆液; 添加各类废水后预洗塔母液结晶的硫酸铵晶体平均粒径均比未添加废水的晶体大, 添加各类废水 40.0 mL 之后料液槽母液的硫酸铵结晶量增加缓慢; 晶体形貌主要受不同废水元素所致。100.0 mL 预洗塔硫酸铵母液较优的脱硫塔浆液添加体积为 40.0 mL, 100.0 mL 料液槽硫酸铵母液较优的脱硫塔浆液添加体积为 50.0 mL。相关研究成果可为烧结烟气石灰石-石膏法废水循环利用提供新思路。

关键词 石灰石-石膏法 废水 氨法 硫酸铵 结晶 影响

中图分类号: TQ09 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2023)02-0125-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.02.016

Effect of Limestone-Gypsum Wastewater on Crystallization of Ammonium Sulfate in Ammonia Desulfurization

YE Fuyin¹, GE Haiyin¹, LI Ming¹, LI Jun¹, DU Qianhui¹, GU Shan¹, HUANG Bangfu^{2,*}

(1. Yunnan Tianlang Energy Saving & Environmental Protection Group Co., Ltd., Anning 650302, China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract In order to give full play to the advantages of the ammonia desulfurization system and avoid the pollution of the environment caused by the discharge of limestone-gypsum wastewater, this paper adopted the mother liquor of the first-stage ammonia desulfurization prewash tower and the mother liquor of the feed tank as the solvent, and the second-phase limestone-gypsum desulfurization wastewater was used as the solute, deeply studied the effect of adding various types of wastewater on the crystallization of ammonium sulfate and its crystals. The following conclusions were obtained. Added various types of second-stage limestone-gypsum wastewater to the first-stage prewash tower and the ammonium sulfate mother liquor in the feed tank could significantly increase the amount of ammonium sulfate crystals, especially adding desulfurization tower slurry. The average particle size of ammonium sulfate crystals crystallized from the mother liquor of the prewash tower after adding various types of waste water was larger than that of the crystals without adding waste water. After adding 40.0 mL of various types of waste water, the crystallization amount of ammonium sulfate in the mother liquor of the feed tank increased slowly. The crystal morphology was mainly caused by different wastewater elements. 100.0 mL pre-wash tower ammonium sulfate mother liquor was preferably added in a volume of 40.0 mL of desulfurization tower slurry, and 100.0 mL feed tank ammonium sulfate mother liquor was preferably added in a volume of 50.0 mL of desulfurization tower slurry. Relevant research results can provide new ideas for recycling of sintered flue gas limestone-gypsum wastewater.

Keywords limestone-gypsum method wastewater ammonia process ammonium sulfate crystallization influence

[收稿日期] 2022-07-07

[基金项目] 云南省应用基础研究计划面上项目(202001AT070029); 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室开放基金(FMRUlab-20-4); 天朗集团校企合作项目(TLJT-2021-HJKJ-FW-24-1)

[作者简介] 冶富银(1979—), 男, 副高级工程师, 主要从事钢铁烧结烟气脱硫脱硝研究, E-mail: 411534380@qq.com。

[通信作者] 黄帮福, 男, 博士, 副教授, 主要从事钢铁烟气多污染物治理工作, E-mail: kmusthbf@163.com。

钢铁烧结工序排放的烟气具有排放量大、温度波动大、水分含量高、成分复杂、SO₂ 和 NO_x 排放量大等特点^[1-3]。其中排放的 SO₂ 占到整个钢铁企业排放量的 50%, SO₂ 被人体吸入后会破坏肝脏中的酶活动, 进而导致肝病。因此, 针对烧结烟气 SO₂ 治理是钢铁企业污染物治理重点。

昆钢新区二期采用石灰石-石膏法对烧结烟气进行脱硫, 石灰石-石膏湿法脱硫是世界上应用最多、技术最成熟的脱硫工艺, 该工艺已广泛应用于处理钢铁烧结烟气^[4]。为保证脱硫系统正常运行, 需排出一部分浆液, 即脱硫废水, 此脱硫废水中悬浮物、硬度、重金属、油类、氨氮含量与烧结工艺原材料性质密切相关。一般情况下, 烧结烟气脱硫废水呈弱酸性, 悬浮物、钙镁离子、重金属、油类、氨氮等含量较高, 且变化幅度较大^[5-6]。与此同时, 昆钢新区一期已采用氨法对烧结烟气进行脱硫处理, 其具有较好脱硫效果, 脱硫率高达 95% 以上, 且无二次污染; 其副产品硫酸铵还具有较好的经济价值, 常用作农肥, 含有的氮、硫元素不仅能改善土壤, 还可提高农作物品质和产量^[7-8]。如能将新区二期石灰石-石膏法脱硫废水回用至一期氨法脱硫系统, 不仅可解决石灰石-石膏法脱硫废水处理难题, 而且能发挥氨法脱硫系统本身优势, 消耗石灰石-石膏法脱硫废水。但添加石灰石-石膏法脱硫废水对氨法脱硫硫酸铵母液结晶的具体影响还需深入研究。

为充分发挥氨法脱硫系统自身优势, 避免石灰石-石膏法脱硫废水外排造成污染环境, 且研发出某集团大气治理所产生废水闭环利用新方法, 本文以一期氨法脱硫预洗塔母液和料液槽母液作为溶剂, 二期石灰石-石膏法各类脱硫废水作为溶质, 采用负压蒸发、冷却结晶、筛分法等深入研究添加各类废水对氨法脱硫硫酸铵母液结晶及其晶体影响。相关研究成果可为石灰石-石膏法脱硫废水处理及循环利用提供新思路。

1 试验

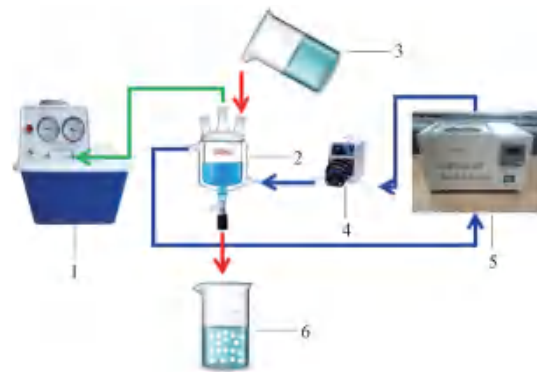
1.1 试验试剂

本文选用的硫酸铵母液(溶剂)为昆钢新区一期烧结烟气氨法脱硫系统内预洗塔和料液槽硫酸铵母液(2022-04-06); 所添加的石灰石-石膏法脱硫废水为昆钢新区二期烧结烟气石灰石-石膏法脱硫各类废水(2022-04-13)。预洗塔硫酸铵母液和料

液槽硫酸铵母液中添加的溶质均为冷凝水、循环水、废水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)、脱硫塔浆液)。此外, 采用无水乙醇清洗冷却结晶后的硫酸铵晶体。

1.2 试验设备

试验采用如图 1 所示的蒸发结晶设备, 开展添加石灰石-石膏法脱硫废水对硫酸铵母液结晶影响研究。试验仪器如表 1 所示。



注: 1—循环水真空泵; 2—三颈真空反应器; 3—加料烧杯; 4—蠕动泵; 5—恒温水浴装置; 6—冷却结晶烧杯。

图 1 蒸发结晶设备

Fig. 1 Evaporative Crystallization Equipment

1.3 试验方法

如图 1 所示, 试验先将恒温水浴装置中的水加热至 75 °C, 通过加料装置将预洗塔或料液槽硫酸铵母液(100 mL)和石灰石-石膏法脱硫各类废水(30、40、50 mL)混合后, 加入至三颈真空反应器内, 打开循环水真空泵使三颈真空反应器内的真空度达到 -0.080 ~ -0.075 MPa; 打开蠕动泵使恒温水浴装置中的水通过导管输送到三颈真空反应器夹层内, 而后再回流至恒温水浴装置中; 当三颈真空反应器内的混合溶液固液比达到 20% 后, 将液体通过下料装置流入冷却结晶装置; 将所得晶体进行抽滤后放入 100 °C 干燥箱干燥 3 h; 将干燥好的硫酸铵晶体放入振动筛分机进行筛分、称量; 每一种相同石灰石-石膏法脱硫废水添加量做 3 组平行试验, 将所得硫酸铵晶体质量取平均值。此外, 采用微距观察各条件下的硫酸铵晶体形貌。

1.4 粒径研究方法

针对硫酸铵晶体粒径选择筛分法^[9-10]进行研究, 并采用式(1)~式(2)计算晶体平均粒径。

表 1 试验仪器
Tab. 1 Experimental Instruments

序号	仪器	型号	生产商	国别
1	循环水真空泵	SHB-III	南京文尔仪器设备有限公司	中国
2	三颈夹套反应器	G. G-17	上海垒固仪器有限公司	中国
3	加料烧杯	B6035	上海阿拉丁生化科技股份有限公司	中国
4	蠕动泵	BT600MH	保定创锐泵业有限公司	中国
5	恒温水浴装置	HH-1	上海帅登有限公司	中国
6	冷却结晶烧杯	B6035	上海阿拉丁生化科技股份有限公司	中国

$$\bar{L} = \sum_{i=1}^n (\omega_i \times L_i) \quad (1)$$

$$L_i = \omega_i \times l_i \quad (2)$$

其中： \bar{L} ——晶体的平均粒径，mm；

ω_i ——筛分 i 档质量分数；

L_i ——筛分 i 档的平均粒径，mm；

l_i ——筛分 i 档的标准孔径，mm。

晶体粒径分布采用变异系数(CV)研究,计算方法如式(3)。

$$CV = 100\sigma/MS \quad (3)$$

其中： σ ——标准偏差；

MS ——粒度中最大值,是指筛下累计质量分数为 50%时所对应的筛孔大小,mm。

CV 值越小代表晶体粒径分布越集中,其值越大代表晶体粒径分布越分散。

2 试验结果与分析讨论

2.1 二期各类废水对一期预洗塔硫酸铵母液结晶影响

(1) 不同种类废水对预洗塔母液结晶量影响

根据试验溶剂和溶质,采用图 1 的蒸发结晶试验装置,研究了向一期预洗塔硫酸铵母液中添加各类脱硫废水后的结晶量,结果如图 2 所示。

如图 2 所示,预洗塔硫酸铵母液中加入各种废水后,混合溶液的结晶量均比未加入废水的预洗塔硫酸铵母液多。其中,预洗塔硫酸铵母液中添加脱硫塔浆液时其结晶量增加最多,其次是添加废水后的结晶量同样较多,而冷凝水、循环水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)的加入对硫酸铵结晶量影响不大。分析其原因,通过对不同种类的废水检测,发现废水和脱硫塔浆液中含有大量 SO_4^{2-} ,可为硫酸铵母液提供更多的 SO_4^{2-} 与 NH_4^+ 结合机会,更好地促进其溶液中的 NH_4^+ 转化成硫酸铵,从

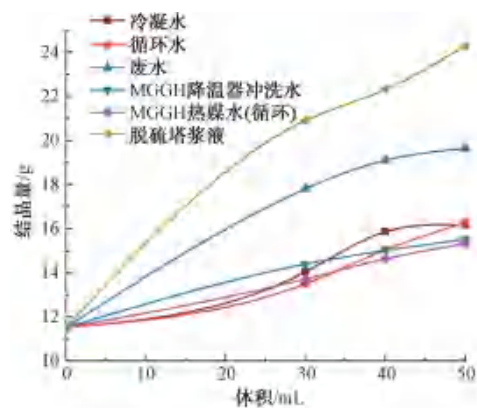


图 2 废水添加种类对预洗塔硫酸铵母液结晶量的影响

Fig. 2 Effect of Different Wastewater Adding on Crystallization Amount of Ammonium Sulfate Mother Liquor in Prewash Tower

而获得更多硫酸铵晶体。但随各类废水添加量增加,硫酸铵母液中能与 NH_4^+ 反应的 SO_4^{2-} 含量有限,导致结晶量增加不明显。添加脱硫塔浆液的硫酸铵母液结晶量比添加废水结晶量多,是因为脱硫塔浆液中含有大量溶解性总固体、悬浮物和 Ca^{2+} ,导致加入脱硫塔浆液后有一部分溶解性总固体、悬浮物以及形成少量 $CaSO_4$ 附着在硫酸铵晶体表面,致使结晶量明显增加^[11-13]。

(2) 不同种类废水对预洗塔母液所结晶硫酸铵晶体粒径影响

针对一期预洗塔硫酸铵母液添加二期冷凝水、循环水、废水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)、脱硫塔浆液各条件下获得的硫酸铵晶体,采用筛分法[式(1)~式(3)]进行平均粒径和 CV 值分析,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,在预洗塔硫酸铵母液中添加各类废水所产生的硫酸铵晶体平均粒径均比未添加废水的硫酸铵晶体大,但大部分 CV 值同时也较大。为获得较优晶体,选择合适的废水添加量时,首先考虑

表 2 不同种类废水对预洗塔母液结晶硫酸铵晶体平均粒径和 CV 值影响

Tab. 2 Influence of Different Wastewater Adding on Average Particle Sizes and CV Values of Ammonium Sulfate Crystallized by Ammonium Sulfate Mother Liquor in Prewash Tower

废水种类	废水体积/mL	母液体积/mL	硫酸铵晶体	
			平均粒径/mm	CV 值
-	0.0	100.0	0.627	391.162
冷凝水	30.0	100.0	0.757	328.661
	40.0		0.921	340.017
	50.0		0.846	294.541
循环水	30.0	100.0	0.810	418.014
	40.0		0.792	386.804
	50.0		0.867	415.769
废水	30.0	100.0	0.799	356.447
	40.0		0.785	437.571
	50.0		0.738	405.493
MGGH 降温器冲洗水	30.0	100.0	0.888	328.279
	40.0		0.759	343.972
	50.0		0.784	515.614
MGGH 热媒水(循环)	30.0	100.0	0.823	467.494
	40.0		0.785	487.014
	50.0		0.636	467.770
脱硫塔浆液	30.0	100.0	0.681	367.521
	40.0		0.667	328.223
	50.0		0.653	485.986

能使结晶量增加的废水及其同等条件下的添加量,故脱硫塔浆液较佳;再综合考虑该废水对硫酸铵平均粒径和 CV 值的影响。综合图 2 与表 2,在预洗塔硫酸铵母液中添加各类废水后晶体平均粒径均比未添加废水的晶体大;添加 50.0 mL 各类废水[冷凝水、循环水、废水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)和脱硫塔浆液]所产生的结晶量最多,尤其是添加脱硫塔浆液;且添加脱硫塔浆液 40.0 mL 时的硫酸铵晶体粒径 CV 值明显比添加 50.0 mL 时小。分析原因:添加不同种类废水后,各种废水中含有大量 SO_4^{2-} ,能为硫酸铵晶体提供大量形核中心^[14-15],增加了硫酸铵晶体形核率,促使硫酸铵晶体均匀生长,获得平均粒径较大的硫酸铵晶体。

综上所述,为保证较优的硫酸铵结晶效果,选择在 100.0 mL 预洗塔硫酸铵母液中添加脱硫塔浆液 40.0 mL。

(3) 不同种类废水对预洗塔母液所结晶硫酸铵晶体形貌影响

为探究不同种类废水对一期预洗塔硫酸铵母液所结晶硫酸铵晶体形貌的影响,采用超微距观察晶体,表征结果如图 3 所示。图 3(a)为未添加废水的预洗塔硫酸铵母液所结晶晶体,可看出存在大量片状硫酸铵晶体;图 3(b)为添加 MGGH 降温器冲洗水后母液所结晶晶体,观察到出现片状且透明的晶体;添加冷凝水[图 3(c)]、MGGH 热媒水(循环)

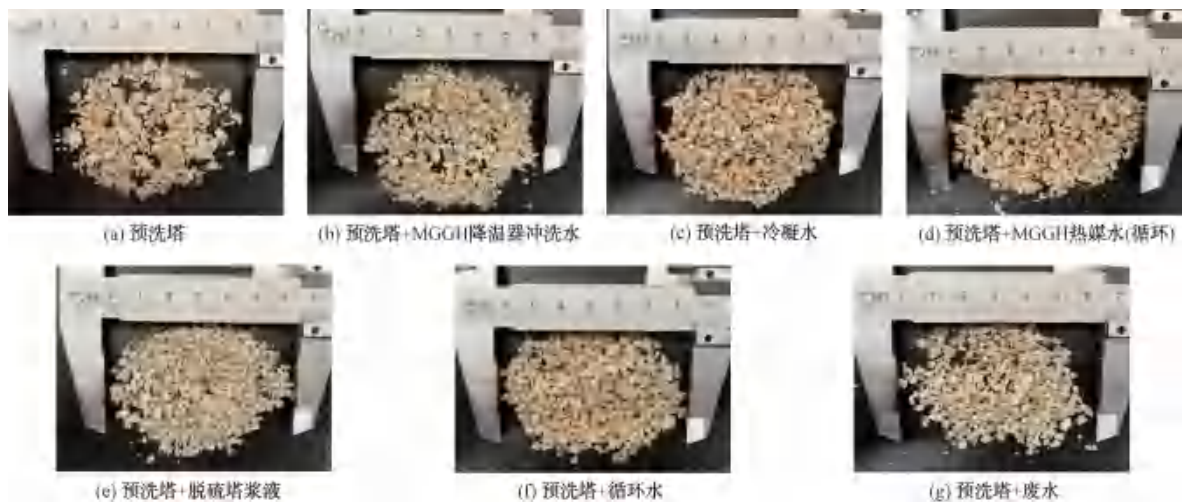


图 3 添加不同种类废水后预洗塔母液所结晶硫酸铵的晶体形貌

Fig. 3 Crystal Morphology of Ammonium Sulfate Crystallization from Mother Liquor of the Prewash Tower after Different Wastewater Adding

[图 3(d)]、脱硫塔浆液[图 3(e)]、循环水[图 3(f)]和废水[图 3(g)]各条件下母液结晶的硫酸铵颗粒较大;其中添加脱硫塔浆液和废水条件下获得的硫酸铵晶体表面附着了大量小颗粒。分析原因是添加各种废水对硫酸铵晶体形貌的影响源于不同废水中所含元素不同,导致促进或是阻碍了晶体生长^[16],进而形成不同晶体形貌;其中添加脱硫塔浆液和废水后的硫酸铵晶体表面附着小颗粒,原因是此两种废水中均含有大量溶解性总固体。

2.2 二期各类废水对一期料液槽硫酸铵母液结晶影响

(1) 不同种类废水对料液槽母液结晶量影响

采用图 1 所示的蒸发结晶试验装置,研究一期料液槽硫酸铵母液中添加二期各类脱硫废水后的结晶量,结果如图 4 所示。

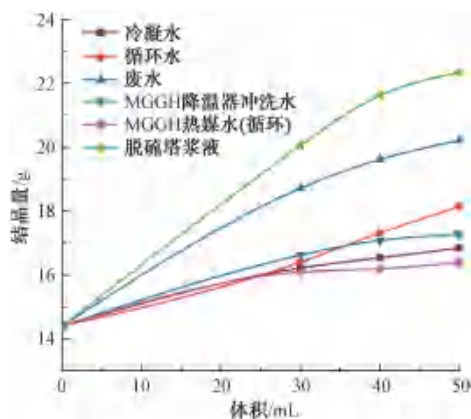


图 4 添加各类废水对料液槽硫酸铵母液结晶量影响

Fig. 4 Effect of Different Wastewater Adding on Crystallization Amount of Ammonium Sulfate Mother Liquor in Feed Tank

如图 4 所示,在料液槽母液中添加各类废水[冷凝水、循环水、废水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)、脱硫塔浆液]后,料液槽母液的硫酸铵结晶量均会随着废水体积的增加而增加。添加脱硫塔浆液和废水后的结晶量随添加体积的增加而增加较明显,而添加冷凝水、循环水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)后的料液槽母液所产生的硫酸铵结晶量随添加量的增加缓慢增加。脱硫塔浆液和废水含有的大量 SO_4^{2-} ,能更好地促进料液槽中的 NH_4^+ 转化成硫酸铵^[14-15],导致结晶出更多硫酸铵晶体,而冷凝水、循环水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)中所含的 SO_4^{2-} 较少,故

添加后对料液槽结晶量增加较少。而后随各种废水添加量的增加对母液结晶量影响较小,原因是料液槽中所含 NH_4^+ 有限,无法使结晶量持续增加。

(2) 不同种类废水对料液槽所结晶硫酸铵晶体粒径影响

针对一期料液槽母液中分别添加冷凝水、循环水、废水、MGGH 降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)、脱硫塔浆液后所得硫酸铵晶体进行平均粒径和 CV 值分析,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同种类废水对料液槽母液结晶硫酸铵晶体平均粒径和 CV 值影响

Tab. 3 Influence of Different Wastewater Adding on Average Particle Sizes and CV Values of Ammonium Sulfate Crystallized by Ammonium Sulfate Mother Liquor in the Feed Tank

废水种类	废水体积/mL	母液体积/mL	平均粒径/mm	CV 值
-	0.0	100.0	0.875	435.103
冷凝水	30.0	100.0	1.032	403.437
	40.0	100.0	0.893	500.218
	50.0	100.0	0.922	438.780
循环水	30.0	100.0	0.776	443.609
	40.0	100.0	0.828	353.007
	50.0	100.0	0.878	571.152
废水	30.0	100.0	0.687	403.607
	40.0	100.0	0.727	502.974
	50.0	100.0	0.685	437.389
MGGH 降温器冲洗水	30.0	100.0	1.000	487.401
	40.0	100.0	1.014	426.576
	50.0	100.0	0.921	445.155
MGGH 热媒水(循环)	30.0	100.0	1.010	478.996
	40.0	100.0	0.928	444.855
	50.0	100.0	0.882	384.423
脱硫塔浆液	30.0	100.0	1.001	469.793
	40.0	100.0	0.813	359.428
	50.0	100.0	0.793	306.305

由表 3 可知,在料液槽母液中添加各类废水后平均粒径和 CV 值均有波动。为选择最适合的废水种类时,首先考虑的是选择能使料液槽结晶量增加最多的废水,同时在保证结晶量增加较多条件下,再综合考虑平均粒径和 CV 值等因素。研究表明:添加 50.0 mL 各类废水[冷凝水、循环水、废水、MGGH

降温器冲洗水、MGGH 热媒水(循环)和脱硫塔浆液]所产生的结晶量最多,尤其是添加脱硫塔浆液。但当添加各类废水体积为 40.0 mL 之后,料液槽母液所获得的硫酸铵结晶量增加缓慢。分析原因是添加不同种类废水后,各种废水所含大量 SO_4^{2-} 能为硫酸铵晶体生长提供大量形核中心^[14-15],增加了硫酸铵晶体形核率,促进了硫酸铵结晶量增长;但结合实验现象发现在蒸发结晶过程中,真空度过大,导致料液槽母液沸腾,使得硫酸铵晶体无法较好长大。

综上所述,为保证较优的硫酸铵结晶效果,选择在料液槽硫酸铵母液中添加脱硫塔浆液 50.0 mL,该条件下所得硫酸铵晶体不仅结晶量最多且 CV 值最小,为料液槽硫酸铵母液结晶条件较合适的废水添加量。

(3) 不同种类废水对料液槽所结晶硫酸铵晶体形貌影响

为研究添加不同种类废水对一期料液槽母液所

结晶硫酸铵晶体形貌影响,采用超微距观察晶体,结果如图 5 所示。未添加废水的料液槽原母液所结晶的硫酸铵晶体[图 5(a)]出现了较多片状晶体;添加 MGGH 降温器冲洗水[图 5(b)]、冷凝水[图 5(c)]、MGGH 热媒水(循环)[图 5(d)]、废水[图 5(e)]和脱硫塔浆液[图 5(f)]的料液槽母液所结晶硫酸铵晶体粒径较均匀,但存在少量树枝状晶体;添加循环水[图 5(g)]的料液槽母液所结晶硫酸铵晶体出现大量针状和片状,而片状和针状晶体在离心时易碎,进而堵塞设备;因此,生产中应尽量避免针状和片状晶体产生。分析原因:添加不同废水后晶体形貌发生改变,是由于不同废水所含元素及其含量不同,从而促进或阻碍了晶体生长;添加废水和脱硫塔浆液后硫酸铵晶体表面附着了小颗粒,原因是此两种废水含有大量溶解性总固体和脱硫塔浆液中含有大量悬浮物,可能会影响硫酸铵晶体品质。

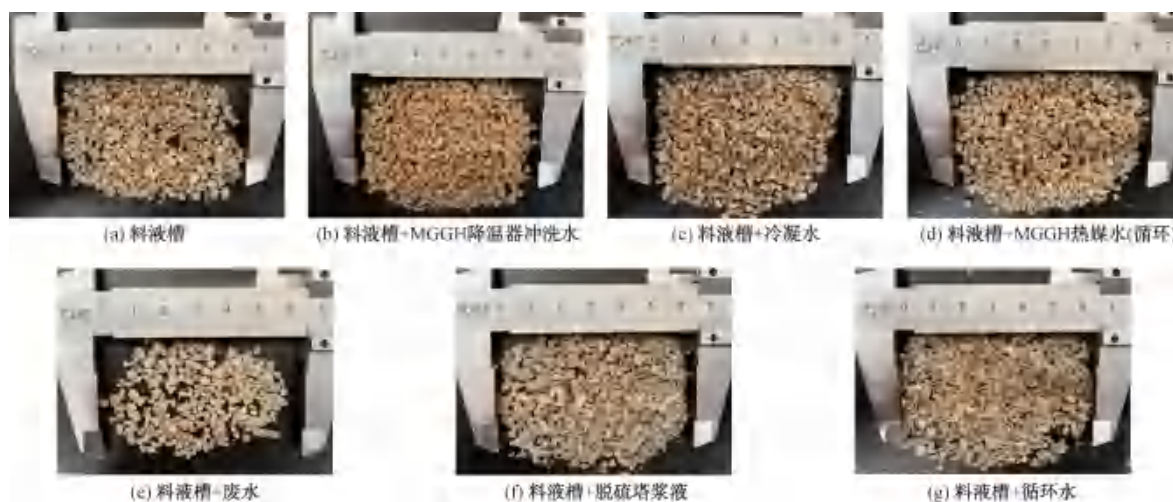


图 5 添加不同种类废水后料液槽母液所结晶硫酸铵的晶体形貌

Fig. 5 Crystal Morphology of Ammonium Sulfate Crystallization in Mother Liquor of the Feed Tank after Different Wastewater Adding

3 结论

(1) 向一期预洗塔、料液槽硫酸铵母液中添加各类二期石灰石-石膏法脱硫废水,均可使硫酸铵结晶量明显增加,且添加脱硫塔浆液时硫酸铵母液结晶量增加最多。

(2) 添加各类废水后预洗塔母液结晶的硫酸铵晶体平均粒径均比未添加废水的晶体大。分析原因可能是各种废水中含有大量 SO_4^{2-} , 能为硫酸铵晶体提供大量形核中心,增加了硫酸铵晶体形核率,促使

硫酸铵晶体均匀生长,获得平均粒径较大和 CV 值较小的硫酸铵晶体。添加各类废水体积为 40.0 mL 之后料液槽母液结晶的硫酸铵结晶量增加缓慢,分析表明:虽然 SO_4^{2-} 提供大量形核中心,增加了硫酸铵晶体形核率,但试验过程真空度过大导致料液槽母液沸腾,使得硫酸铵晶体无法较好长大。

(3) 预洗塔与料液槽硫酸铵母液在添加各类废水后,晶体形貌影响因素主要是不同废水所含元素差别所致,表现为促进或是阻碍晶体生长。添加废

水和脱硫塔浆液后硫酸铵晶体表面附着小颗粒,原因是两种废水中含有大量溶解性总固体和脱硫塔浆液中含有大量悬浮物。

(4)为获得较优硫酸铵晶体,选择在 100.0 mL 预洗塔硫酸铵母液中添加脱硫塔浆液 40.0 mL、100.0 mL 料液槽硫酸铵母液中添加脱硫塔浆液 50.0 mL。相关研究可为石灰石-石膏法脱硫产生的废水回用至氨法脱硫和优化硫酸铵结晶提供理论支撑。

参考文献

- [1] 郭婷, 李建军. 烧结烟气特点及脱硝技术研究[J]. 四川化工, 2018, 21(6): 47-49.
GUO T, LI J J. Study on characteristics of sintering flue gas and denitration technology[J]. Sichuan Chemical Industry, 2018, 21(6): 47-49.
- [2] LI J, HE X, PEI B, et al. The ignored emission of volatile organic compounds from iron ore sinter process[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 77(3): 282-290. DOI: 10.1016/j.jes.2018.08.007.
- [3] YI H, ZHONG T, LIU J, et al. Emissions of air pollutants from sintering flue gas in the Beijing-Tianjin-Hebei area and proposed reduction measures[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 304: 126958. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126958.
- [4] 赵春丽, 吴铁, 伯鑫, 等. 钢铁行业烧结烟气脱硫现状及协同治理对策建议[J]. 环境工程, 2014, 32(10): 76-78, 103.
ZHAO C L, WU T, BO X, et al. The status quo of sintering flue gas desulfurization of iron & steel industry and pollutants co-treatment suggestion[J]. Environmental Engineering, 2014, 32(10): 76-78, 103.
- [5] MAINA P, MBARAWA M. Investigating effects of zeolites as an agent to improve limestone reactivity toward flue gas desulfurization[J]. Energy & Fuels, 2011, 25: 2028-2038. DOI: 10.1021/ef200156c.
- [6] 李希昌, 周玉春. 烧结烟气脱硫技术比较浅析[J]. 能源与环境, 2010(4): 102-103.
LI X C, ZHOU Y C. Comparative analysis of sintering flue gas desulfurization technology[J]. Energy and Environment, 2010(4): 102-103.
- [7] WU X, WU K, ZHANG Y, et al. Comparative life cycle assessment and economic analysis of typical flue-gas cleaning processes of coal-fired power plants in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142(4): 3236-3242. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.10.146.
- [8] 田贺忠, 郝吉明, 赵喆, 等. 燃煤电厂烟气脱硫石膏综合利用途径及潜力分析[J]. 中国电力, 2006, 39(2): 64-69.
TIAN H Z, HAO J M, ZHAO Z, et al. Utilization and potential analysis of FGD gypsum in coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2006, 39(2): 64-69.
- [9] 刘宝树, 种悦晖, 孙华, 等. 均一化大颗粒硫酸铵结晶高效制备工艺研究[J]. 无机盐工业, 2017, 49(6): 77-80.
LIU B S, ZHONG Y H, SUN H, et al. High efficiency preparation of homogeneous large granular ammonium sulfate crystals[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2017, 49(6): 77-80.
- [10] ROOSTAEI M, SOROUSH M, HOSSEINI S A, et al. Comparison of various particle-size distribution-measurement methods: Role of particle shape descriptors[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2020, 23(4): 1159-1179.
- [11] 许小静, 张圆圆, 郑鹏艳, 等. 氨法脱硫中杂质对硫酸铵结晶的影响[J]. 煤炭转化, 2020, 43(6): 75-83.
XU X J, ZHANG Y Y, ZHENG P Y, et al. Effects of impurities on ammonium sulfate crystallization in ammonia desulfurization[J]. Coal Conversion, 2020, 43(6): 75-83.
- [12] ONASCH T, MCGRAW R, IMRE D. Temperature-dependent heterogeneous efflorescence of mixed ammonium sulfate/calcium carbonate particles[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2000, 104(46): 10797-10806. DOI: 10.1021/jp0024064.
- [13] 王荣荣, 施云海, 李伟, 等. 间歇冷却结晶中硫酸铵晶体粒度及形态调控[J]. 化学工程, 2016, 44(5): 32-37.
WANG R R, SHI Y H, LI W, et al. Regulation of size and morphology of ammonium sulfate crystals in batch-cooling crystallization[J]. Chemical Engineering (China), 2016, 44(5): 32-37.
- [14] 殷萍, 卫宏远. pH 值对硫酸铵溶解度及结晶介稳区的影响[J]. 化学工业与工程, 2009, 26(2): 137-140.
YIN P, WEI H Y. Effect of pH on the solubility and crystallizing metastable zone of ammonium sulfate[J]. Chemical Industry and Engineering, 2009, 26(2): 137-140.
- [15] 陈勇, 王森, 刘庆, 等. 盐效应和共同离子效应对方解石溶解度的影响及其地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016, 40(6): 33-39.
CHEN Y, WANG M, LIU Q, et al. Effect of salts and common ions on solubility of calcite and its geological implications[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016, 40(6): 33-39.
- [16] 高毅颖, 张懿, 王静康, 等. 不同类型媒晶剂对硫酸铵晶体形态学指标的影响[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3575-3579.
GAO Y Y, ZHANG Y, WANG J K, et al. Effect of crystallization additives on crystal morphology of ammonium sulfate[J]. CIESC Journal, 2011, 62(12): 3575-3579.