

化学团聚作用对烧结微细粉尘 除尘效率的影响

李海英, 胡秋冬*, 程欢, 张春奇, 尹贻民
(华北理工大学冶金与能源学院, 河北唐山 063210)

摘要:工业烟气中粒径 10 μm 以下的微细颗粒物通过静电除尘器捕集效率较低,以烧结烟气中微细粉尘为研究对象,采用化学团聚协同作用提高静电除尘效率。选取聚丙烯酰胺(PAM)、葡甘露聚糖(KGM)和聚合氯化铝(PAC)3种絮凝剂考察其团聚效果。结果表明,化学团聚作用显著增大了微细颗粒平均直径,其中PM10粒级的颗粒体积分数最高减少了75.608%;3种絮凝剂中KGM团聚效果最好,团聚前、后粉尘峰值粒径分别为11.565、37.825 μm ;在选取的浓度范围内,絮凝剂质量浓度越高团聚效果越好;烟气温度变化对PM2.5级别颗粒团聚效果的影响不是很显著。通过正交试验分析得出,当入口烟温为100 $^{\circ}\text{C}$ 、絮凝剂KGM质量浓度为0.1 g/L时,粉尘颗粒物峰值粒径达到40 μm 左右,除尘效果可达到97%以上。

关键词:微细粉尘;烧结;化学团聚;除尘

中图分类号:X513

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)08-0139-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.08.029

Effect of chemical agglomeration on removal efficiency of sintering fine dust

LI Hai-ying, HU Qiu-dong*, CHENG Huan, ZHANG Chun-qi, YIN Yi-min

(College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Common electrostatic precipitators usually give a lower collecting efficiency in removing the fine particulate below 10 μm in industrial flue gas. Taking fine dust in sintering flue gas as the research object, the synergistic effect of chemical agglomeration is utilized to help electrostatic precipitator improve removal efficiency to fine dust. Three kinds of flocculants are selected, including polyacrylamide (PAM), glucomannan (KGM) and polyaluminum chloride (PAC). The results confirm that chemical agglomeration can significantly increase the average diameter of fine particles, especially the maximum reduction of volume fraction of PM10 particles is 75.608%. Among three kinds of flocculants, KGM shows the best effect, over which the peak particle diameters of the dust before and after agglomeration is 11.565 μm and 37.825 μm , respectively. Within the selected concentration range, the higher the concentration of flocculants, the better the agglomeration effect. Flue gas temperature has little impact on the agglomeration effect of PM2.5 grade particles. Through orthogonal test analysis, the peak particle size of the dust will reach around 40 μm and the dust removal efficiency can exceed 97% under the conditions that the temperature of flue gas at inlet is at 100 $^{\circ}\text{C}$ and KGM concentration is 0.1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

Key words: fine dust; sintering; chemical agglomeration; dust removal

随着我国经济的快速发展,化石燃料产生的含尘烟气中颗粒物对大气环境造成严重影响。作为传统产业钢铁行业是主要的污染源之一,以京津冀地区为例,钢铁行业污染物的排放量可占到总排放量的57.8%^[1],其中烧结工序是钢铁冶炼中颗粒物的等标污染负荷比最高的工序^[2-3],常规除尘器对于颗粒物的脱除往往局限于大粒径级别,而大量未被捕集的剩余微细颗粒物的脱除是目前急需解决的问题。李小川^[4]对于粉尘中颗粒物的粒度与除尘效

果进行分析得出,随着颗粒物粒度的增加,除尘效率也有所增加。因此针对微细颗粒物难以脱除的问题,在除尘设备之前增设预处理装置,利用化学或物理的方法使颗粒物发生相互碰撞团聚,从而形成较大颗粒并被脱除。微细粉尘的团聚过程按照作用机理可分为化学团聚技术、声团聚技术、磁团聚技术、热团聚技术、光团聚技术、湍流团聚技术、电团聚技术、蒸汽相变团聚技术等^[5]。目前也有部分学者对于微细颗粒物的脱除进行了复合团聚技术的研

收稿日期:2019-10-29;修回日期:2020-06-08

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2019209522);唐山市人才资助项目(A201903006)

作者简介:李海英(1971-),女,博士,教授,研究方向为工业节能与环境保护,hlbglhy@sina.com;胡秋冬(1994-),女,硕士研究生,研究方向为工业节能与环境保护,通讯联系人,hqd0047@sina.com。

究^[6-10]。其中,化学团聚是通过絮凝剂雾云对微细颗粒物产生吸附作用,彼此之间形成液桥力,微细颗粒物之间通过架桥黏附形成较大一级的颗粒链或者颗粒团^[11]。国内外学者以电厂燃煤烟气中的微细颗粒物为研究对象^[12-17],通过加入团聚剂使微细颗粒物团聚,进而达到提高除尘效率的目的,在实践过程中取得了较好的效果。目前针对钢厂粉尘的研究报导很少,笔者针对化学团聚对钢铁烧结粉尘的除尘效果影响进行分析,以期找出采用化学团聚增强烧结微细粉尘除尘效率的最佳条件。

1 实验材料与方法

1.1 实验样品

粉尘样品选自唐山某钢厂烧结工序尾部烟道,为进一步研究微细粉尘的团聚效果^[19],原样经过 325 目筛分后进行实验。

1.2 粒度分析

一般对于颗粒粒度的测量可以采用筛分法、沉降法、电阻法、激光法、电镜法等多种方法,不同方法的检测结果各有特点^[20-21],而对于类似本研究中的实验样品微细颗粒物,可以采用电阻法、激光法、电镜法、显微镜法等进行检测,避免由于粒径较小产生测量误差。利用欧美克仪器公司生产的 LS-POP (9) 激光粒度分析仪对原始物料进行粒度分析。而为了保证团聚后颗粒不受脱料过程产生的影响,保持颗粒物形貌的完整性,避免由于挤压对颗粒表面造成破坏,将拦截颗粒物的玻璃纤维滤膜经 Leica DM6M 型光学显微镜进行微观观察,设备系统可自动识别所需颗粒物的大小、分布、空间排布状态等,通过数目的统计实现颗粒物体积分数的统计。Leica DM6M 型光学显微镜分割测量图如图 1 所示。

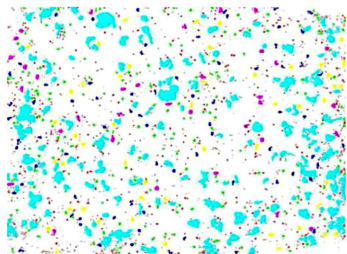


图 1 Leica DM6M 型光学显微镜分割测量图

1.3 形貌分析

为了比较团聚前后微细颗粒的大小形貌变化,利用 Hitachi S4800 型扫描电子显微镜对细微颗粒物进行形貌观察,直观揭示化学团聚方法对细微颗粒物团聚脱除的作用。

1.4 微细颗粒团聚实验平台系统

实验平台系统如图 2 所示。

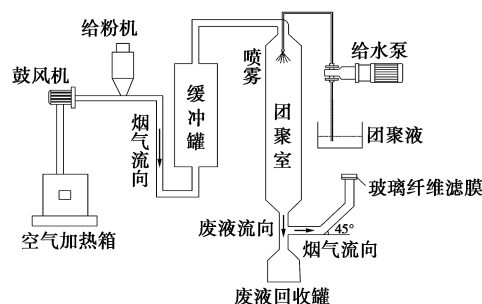


图 2 化学团聚系统图

实验过程中为更接近实际工况,先对空气进行预热,打开鼓风引风系统、给料系统、在线测量系统,引风机作用下将预先加热好的空气送入管道的同时,给粉机在管道上方以 $1 \sim 2 \text{ g/s}$ 的速度将待测粉尘均匀地送入,经缓冲罐预混形成模拟烟气,烟气由团聚室顶端进入,此时打开喷雾系统,化学絮凝剂借由微型直流隔膜水泵以喷雾的形式由团聚室上方喷入内部与烟气中的微细粉尘进行碰撞、粘结、架桥等作用,进而团聚成较大颗粒。喷雾液体以及沉降颗粒物进入废液粉尘回收装置,气体进入采样系统,系统中的玻璃纤维滤膜对烟气中的细微颗粒物进行捕集。

2 实验结果与讨论

2.1 样品初始粒度

为了比较团聚前后粉尘粒径的变化情况,首先对采集的尘样进行粒度分析,结果如图 3 所示。

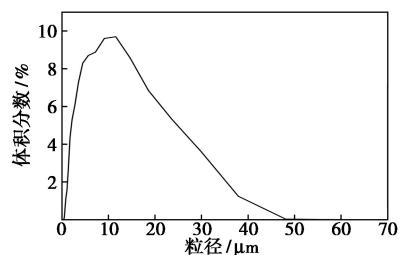


图 3 烧结粉尘粒度分布

由图 3 可知,采集的烧结粉尘粒度主要集中在 $5 \sim 40 \mu\text{m}$, 峰值粒径为 $11.565 \mu\text{m}$, 中值粒径 (D_{50}) 为 $6.282 \mu\text{m}$, 为 PM10 级的细微颗粒物,采用常规静电除尘器不易捕集脱除。

2.2 粉尘粒径对除尘效率的影响

为考察粉尘粒径对除尘效率的影响,多鹏^[22]采用数值模拟方法对粉尘粒度大小与除尘效率之间的

关系进行了数值模拟,结果如图4所示。

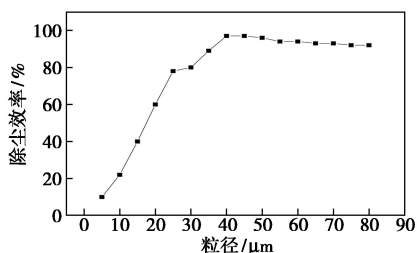


图4 粉尘粒径对除尘效率的影响

由图4可以看出,当粉尘粒径低于40 μm时,除尘效率随着粉尘粒径的增大而增大,由于粉尘在除尘器中的流场为气场和电场耦合后的复杂场,电场强度不变,颗粒物受到的电场力与粉尘粒径的二次方成正比。随着粉尘粒径的增加,电场力增大,加快了颗粒物的运动速度,提高了涡流强度,降低了粉尘运动到收尘极板的时间,提高除尘效率;当粉尘粒径超过40 μm时,粉尘颗粒物粒径的非均匀性抑制场内连续相气流的分布^[22],降低了除尘效率。

2.3 絮凝剂种类对除尘效率的影响

絮凝剂吸附作用的大小直接影响颗粒物的团聚效果,吸附作用越强,颗粒物之间架桥作用则越强。入口烟温为室温、浓度均为0.1 g/L的有机絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)、葡甘露聚糖(KGM)和无机高分子絮凝剂聚合氯化铝(PAC)3种絮凝剂作用后烧结烟气中颗粒物粒径的变化情况如图5所示。

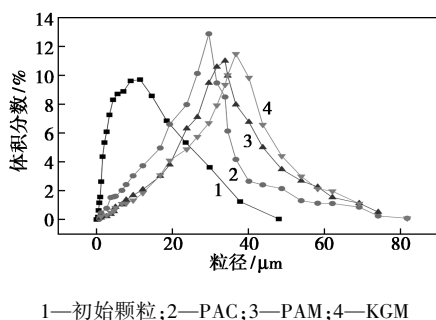


图5 团聚剂种类对细微颗粒物团聚长大的影响

絮凝剂对于颗粒物的吸附作用主要由本身包含的活性基团体现出来,且有机絮凝剂包含的活性基团量明显多于无机絮凝剂,因此有机絮凝剂对于颗粒物的团聚作用明显高于无机絮凝剂。由图5可以得出,团聚前后细微颗粒物粒径均呈现单峰分布,且团聚后峰值明显右移,峰值粒径由未经团聚的11.565 μm提高到29.688~37.825 μm,颗粒物长大效果显著。3种化学絮凝剂之间的团聚效果由高到低依次为KGM>PAM>PAC,作用后峰值粒径分别为

37.825、33.963、29.688 μm,除尘效率分别可达到95.108%、87.7%和80%,与同一级别原始粉尘中PM10的19.5%的除尘效率相比,KGM、PAM、PAC除尘率分别提高了75.608%、68.2%以及60.5%,对比得KGM除尘效率最高。

由于常规除尘设备对于粒径在10 μm以下的颗粒物的捕集效率较低^[6,12],针对PM10、PM2.5级别的颗粒物,研究了不同种类团聚剂作用前后体积分数的变化情况,结果如表1所示。

表1 团聚剂种类对PM2.5、PM10级别颗粒物的影响 %

	原始粒径	团聚剂		
		PAC	PAM	KGM
PM2.5	15.830	1.715	0.338	0.486
PM10	64.661	13.592	6.212	5.906

由表1中可以看出,团聚作用后颗粒物的体积分数明显下降。3种絮凝剂作用后PM2.5级别颗粒物体积分数分别下降15.344%、15.492%、14.115%;PM10级别颗粒物体积分数分别下降了58.755%、58.449%、51.069%。在同等条件下,化学团聚对于PM10级别的微细颗粒物的作用效果较强。

2.4 入口烟气温度对除尘效率的影响

改变入口烟气温度,喷入团聚室内的化学絮凝剂雾云的温度随之产生变化,吸附活性也发生改变,入口烟温对微细颗粒物团聚效果的影响如图6所示。

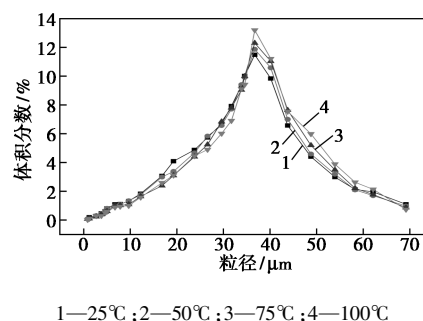


图6 烟气温度对细微颗粒物团聚的作用

由图6可以看出,对质量浓度为0.1 g/L的KGM溶液,在25、50、75、100°C的温度条件下,同级别颗粒物的团聚效果随着入口烟气温度的上升在缓慢提高,表明入口烟气温度对于颗粒物团聚的效果有所提高但影响不是很明显,有机絮凝剂KGM对于微细颗粒物的吸附活性随着环境温度的升高也有略微提高,25、50、75、100°C温度下,峰值粒径分别由

原始的 11.565 μm 提高到 31.790 4、33.962 6、34.645 2 μm 和 36.806 2 μm, 相对应的粉尘峰值粒径除尘效率分别由原来的 26.332% 提高到 82.76%、86.41%、91%、92.41%, 因此, 温度的升高有助于颗粒物的团聚, 提高除尘效率。

改变入口烟温, 化学团聚对 PM10、PM2.5 级别的细微颗粒物的团聚情况如表 2 所示。

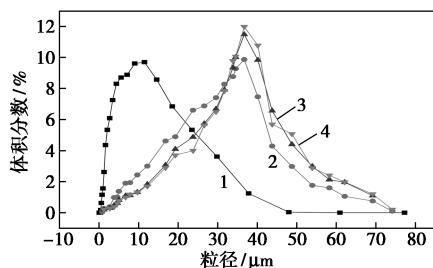
表 2 烟气温度对 PM2.5、PM10 级别颗粒物的作用 %

入口烟温/℃	25	50	75	100
PM2.5	0.486	0.499	0.426	0.417
PM10	5.906	5.807	5.084	4.616

由表 2 中可以看出, PM10、PM2.5 两个级别的颗粒物体积分数的变化趋势与全粒径段颗粒物随温度变化的趋势基本相同。PM2.5 级别颗粒物随温度的变化不是很明显, 而 PM10 相较于 PM2.5 级别颗粒物在同种温度条件下的除尘效率有所提高。当入口烟温达到 100℃ 时, 同粒级颗粒物的所占比例比室温(25℃)下降 1.29%。

2.5 絮凝剂质量浓度对除尘效率的影响

絮凝剂溶液以喷雾的形式进入团聚室内, 絮凝剂质量浓度越高黏度越大。在 100℃ 下, 絮凝剂质量浓度对除尘效率的影响如图 7 所示。



1—初始粒径; 2—0.05 g/L; 3—0.10 g/L; 4—0.15 g/L

图 7 团聚剂质量浓度对细微颗粒物团聚的作用

由图 7 中可以看出, 絮凝剂的质量浓度提高, 增加了微细颗粒物与雾化液滴的碰撞机率, 因此微细粉尘团聚效果逐渐增强。0.05、0.1、0.15 g/L 3 种质量浓度作用下粉尘峰值粒径分别由原来的 11.565 μm 提高到 36.612、37.825 μm 和 38.215 μm。对于同一粒级颗粒物, 根据粉尘粒径与除尘效率的关系得出粉尘除尘效率由原来的 19.5% 分别提高到 92.465%、94.792% 以及 95.108%。3 种质量浓度作用效果对比发现, 同种絮凝剂质量浓度越大, 越有利于颗粒物团聚, 粉尘除尘效率越高。

团聚剂质量浓度对 PM2.5、PM10 级别颗粒物

的作用结果如表 3 所示。

表 3 团聚剂质量浓度对 PM2.5、PM10 级别颗粒物的作用 %

原始粒径	团聚剂质量浓度/(g·L ⁻¹)			
	0.05	0.1	0.15	
PM2.5	16.131	1.116	0.787	0.782
PM10	64.706	10.487	5.951	5.748

由表 3 可知, PM10 级别下降比例为 54.219%、58.755%、58.958%, PM2.5 级别下降比例分别为 15.015%、15.344%、15.349%。原因是由于化学絮凝剂质量浓度的大小决定絮凝剂中高分子链的多少, 质量浓度越高, 高分子链越多, 对于微细粉尘作用越大。由实验结果可知, 0.15 g/L 和 0.1 g/L 质量浓度条件下两者的提升效果变化并不明显, 且质量浓度 0.15 g/L 以上的团聚剂由于黏度较高, 雾化效果较差, 因此在实际钢铁除尘应用中可以选取 0.1 g/L 的化学团聚剂。

2.6 细微颗粒物化学团聚前后形貌分析

为探究化学团聚对细微颗粒物形貌的作用效果, 利用扫描电子显微镜(SEM)对团聚前后的颗粒物进行观察, 结果如图 8 所示。

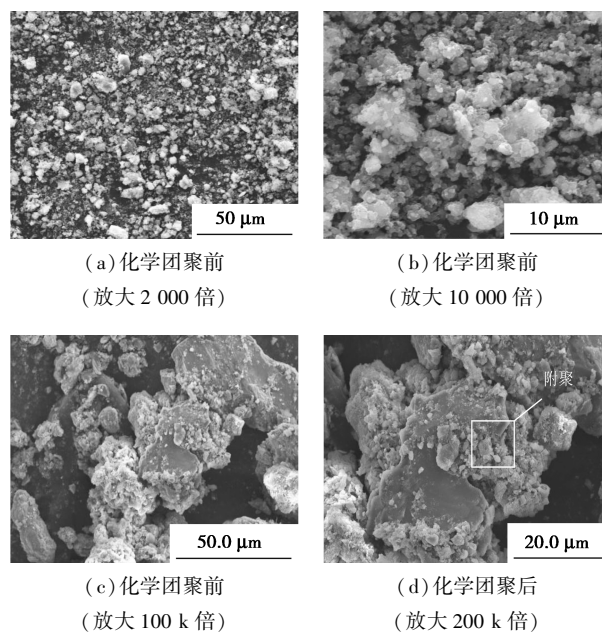


图 8 细微颗粒物化学团聚前后有微观形貌

由图 8 中可以看出, 化学团聚中, 微细颗粒物在化学絮凝剂的作用下进行大量的聚集, 在粒径较大的颗粒物表面附着一层微细颗粒物并且形成稳定的团聚状态。经过化学团聚作用之后形成的颗粒物粒径变大并且表面由于颗粒物之间的架桥和亚微米颗

粒的附聚,导致团聚后的颗粒物表面光滑度明显下降。

3 除尘效率的正交实验

3.1 数值选取

为了研究不同工况下微细颗粒物团聚效果对除尘效率影响的最优方案,采用正交实验模拟3种因素的最优组合,以絮凝剂种类作用的峰值粒径(A)、絮凝剂质量浓度(B)、入口烟温(C)为考察因素,设计三因素三水平的 $L_9(3^4)$ 的正交试验,如表4所示。

表4 烧结粉尘除尘效率正交实验

水平数	$A/\mu\text{m}$	$B/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$C/^\circ\text{C}$
1(KGM)	36.806	0.05	50
2(PAM)	33.963	0.10	75
3(PAC)	29.688	0.15	100

3.2 实验结果

$L_9(3^4)$ 正交试验分配与实验结果如表5所示。

表5 $L_9(3^4)$ 正交分配及结果

试验号	因素			除尘效率/ %
	A	B	C	
1	1	1	1	0.85
2	1	2	3	0.97
3	1	3	2	0.83
4	2	1	2	0.69
5	2	2	3	0.89
6	2	3	1	0.77
7	3	1	3	0.91
8	3	2	1	0.84
9	3	3	2	0.73
K_1	2.65	2.45	2.46	
K_2	2.35	2.70	2.25	
K_3	3.48	2.33	2.77	
k_1	0.88	0.82	0.82	
k_2	0.78	0.90	0.75	
k_3	1.16	0.78	0.92	
R	0.38	0.12	0.17	

由表5可以看出,絮凝剂种类、絮凝剂质量浓度以及入口烟温对除尘效率影响的程度大小依次为:絮凝剂种类、入口烟温和絮凝剂质量浓度。结合正交试验结果,最佳实验条件为 $A_1B_2C_3$,即在 100°C 的条件下,选用质量浓度为 0.1 g/L 的有机絮凝剂

KGM,对微细颗粒物的作用效果最佳,峰值粒径的除尘效率达到97%以上。

4 结论

选取PAM、KGM和PAC3种絮凝剂进行钢铁厂烧结烟气微细粉尘的团聚作用研究,研究了不同种类絮凝剂、质量浓度及入口烟气温度条件下化学团聚作用对烧结微细粉尘除尘效率的影响,最后采用正交实验分析了不同工况下微细颗粒物团聚效果对除尘效率的最优方案,得出如下结论:

(1)同一条件下,有机絮凝剂的活性基团吸附性高于无机絮凝剂,选取的3种絮凝剂中作用效果由高到低为 $\text{KGM} > \text{PAM} > \text{PAC}$,对于 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 级别颗粒物体积分数分别下降15.344%、75.608%,团聚后粉尘峰值粒径最高达到 $37.825\ \mu\text{m}$,除尘效率最高达到95.108%。

(2)改变入口烟温时同粒级颗粒物的团聚效果随着入口烟气温度的上升在缓慢提高,对于颗粒物团聚的效果有所提高但影响不是很明显。

(3)同一温度下,同种絮凝剂质量浓度越高,团聚效果越好。但在实际运行中发现质量浓度越高,黏度的增大会严重影响雾化效果,对除尘产生不利影响。

(4)通过正交实验得出,当粉尘处于进口烟温为 100°C 、絮凝剂KGM质量浓度为 0.1 g/L 的条件下, PM_{10} 级别颗粒物化学团聚后粉尘峰值粒径达到 $40\ \mu\text{m}$,除尘效率由19.5%提高到97%以上。

参考文献

- [1] 杨晓东,张玲,姜德旺.钢铁工业废气及 $\text{PM}_{2.5}$ 排放特性与污染控制对策[J].工程研究-跨学科视野中的工程,2013,5(3):240-251.
- [2] 李海英,张春奇,张宇擎.烧结烟气半干法脱硫微细颗粒物特征分析[J].化工进展,2019,38(4):2022-2029.
- [3] 李小川.气流场中粉尘颗粒流动行为与湿法净化[D].北京:中国矿业大学,2013.
- [4] 李海英,张春奇,刘东.细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 团聚除尘技术的研究进展[J].环境工程,2018,(9):93-98.
- [5] 赵汶,刘勇,鲍静静,等.化学团聚促进燃煤细颗粒物脱除的试验研究[J].中国电机工程学报,2013,(20):52-58.
- [6] 颜金培,陈立奇,杨林军.润湿剂促进燃煤细颗粒物声波团聚脱除的实验研究[J].燃料化学学报,2014,(10):1259-1265.
- [7] Chen H, Luo Z, Jiang J, et al. Effects of simultaneous acoustic and electric fields on removal of fine particles emitted from coal combustion[J]. Powder Technology, 2015, 281(11): 12-19.

(下转第149页)

- [J].现代化工,2018,38(2):14-19,21.
- [2] Zeeshan Nawaz. Light alkane dehydrogenation to light olefin technologies: A comprehensive review [J]. *Reviews in Chemical Engineering*, 2015, 31(5):413-436.
- [3] Sattler J J H B, Ruiz-Martinez J, Santillan-Jimenez E, *et al.* Catalytic dehydrogenation of light alkanes on metals and metal oxides [J]. *Chemical Reviews*, 2014, 114(20):10613-10653.
- [4] 晁念杰, 李博, 李长明, 等. 丙烷催化脱氢制丙烯工艺及催化剂的研究进展 [J]. *当代化工*, 2019, 48(8):1806-1810, 1815.
- [5] 朱士贞. 新型球形氧化铝颗粒的制备及其在丙烷脱氢中的性能研究 [D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [6] 卜婷婷, 李秋颖, 荀文甲, 等. 丙烷脱氢 Cr 系催化剂的研究进展 [J]. *石油炼制与化工*, 2017, 48(11):103-110.
- [7] 郭敏, 潘大海, 贺敏, 等. 负载型铬基催化材料的制备与应用 [J]. *化工进展*, 2013, 32(9):2143-2149.
- [8] Al-Zahrani S M, Jibril B Y, Abasaed A E. Selection of optimum chromium oxide-based catalysts for propane oxidehydrogenation [J]. *Catalysis Today*, 2003, 81(3):507-516.
- [9] 谭晓林, 马波, 张喜文, 等. Cr 系丙烷脱氢催化剂研究进展 [J]. *化工进展*, 2010(1).
- [10] 徐国皓, 徐华胜, 余金鹏, 等. 多级孔 HZSM-5 分子筛的制备及其催化丙烷脱氢反应性能 [J]. *精细化工*, 2019, 36(5):892-897, 912.
- [11] 柏林洋. PtSnNa/ZSM-5 催化剂的改性及其丙烷脱氢性能研究 [D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [12] 张帆, 聂颖颖, 缪长喜, 等. Cr/NaZSM-5 催化剂上 CO₂ 氧化丙烷脱氢反应 [J]. *高等学校化学学报*, 2012, 33(1):96-101.
- [13] Li Y, Wang T, Wu C, *et al.* Gasoline-range hydrocarbon synthesis over cobalt-based fischer-tropsch catalysts supported on SiO₂/HZSM-5 [J]. *Energy & Fuels*, 2008, 22(3):1897-1901.
- [14] 吴煜, 刘学军, 张怡, 等. Pt/ZSM-5-Al₂O₃ 催化的脂肪酸甲酯加氢脱氧反应 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2018, 34(5):70-77.
- [15] 何霖, 韩伟, 谭亚南, 等. 用于甲醇合成丙烯的 ZSM-5 分子筛、制备方法及其应用: 中国, CN102259014A [P]. 2011-05-31.
- [16] Strizhak P, Zhokh A, Trypolskyi A. Methanol conversion to olefins on H-ZSM-5/Al₂O₃ catalysts: Kinetic modeling [J]. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 2018, 123:247-268.
- [17] 周皓. 丙烷催化脱氢制丙烯的研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2016.
- [18] 蔡奇, 杨玉旺, 吴同旭, 于海斌, 等. Mg 对 Cr₂O₃/Al₂O₃ 催化剂及其丙烷脱氢性能的影响 [J]. *石油炼制与化工*, 2016, 47(3):72-76.
- [19] Udumak S, Anthony R G. Isobutane dehydrogenation on chromia/silica-titania mixed oxide and chromia/γ-alumina catalysts [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1996, 35(1):47-53.
- [20] Shee D, Sayari A. Light alkane dehydrogenation over mesoporous Cr₂O₃/Al₂O₃ catalysts [J]. *Applied Catalysis A General*, 2010, 389(1-2):155-164.
- [21] Weckhuysen B M, Schoonheydt R A. Alkane dehydrogenation over supported chromium oxide catalysts [J]. *Catalysis Today*, 1999, 51(2):223-232.
- [22] 刘道兰. 丙烷非氧化脱氢新型铬系催化剂的设计及应用研究 [D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2016.
- [23] Hakuli A, Kytökiivi A, Krause A O I, *et al.* Initial activity of reduced chromia/alumina catalyst inn-butane dehydrogenation monitored by on-line FT-IR gas analysis [J]. *Journal of Catalysis*, 1996, 161(1):393-400.
- [24] 闵恩泽. 工业催化剂的研制与开发——我的实践与探索 [J]. *化工时刊*, 1998, (5):40-43. ■
- (上接第 143 页)
- [8] Luo Z, Chen H, Wang T, *et al.* Agglomeration and capture of fine particles in the coupling effect of pulsed corona discharge and acoustic wave enhanced by spray droplets [J]. *Powder Technology*, 2017, 312:21-28.
- [9] Yan J, Chen L, Yang L. Combined effect of acoustic agglomeration and vapor condensation on fine particles removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 290:319-327.
- [10] 颜金培, 陈立奇, 杨林军, 等. 声波与相变耦合协同湿法烟气脱硫细颗粒脱除 [C]: 2016 中国环境科学学会学术年会, 海口, 2016.
- [11] Ye Z, Biswas P. Submicrometer particle formation and control in a bench-scale pulverized coal combustor [J]. *Energy & Fuels*, 2001, 15(3):130-130.
- [12] Elayyan H S B, Bouziane A, Waters R T. Theoretical and experimental investigation of a pulsed ESP [J]. *Journal of Electrostatics*, 2002, 56(2):219-234.
- [13] Helble J J. A model for the air emissions of trace metallic elements from coal combustors equipped with electrostatic precipitators [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 63(2-3):125-147.
- [14] Senior C L, Helble J J, Sarofim A F. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion sources [J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 65:263-288.
- [15] Rajniak P, Mancinelli C, Chern R T, *et al.* Experimental study of wet granulation in fluidized bed; Impact of the binder properties on the granule morphology [J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2007, 334(2):92-102.
- [16] Zhang G, Zhang L, Wang J, *et al.* Improving acoustic agglomeration efficiency by addition of sprayed liquid droplets [J]. *Powder Technology*, 2017, 317:181-188.
- [17] 赵永椿, 张军营, 魏凤, 等. 燃煤超细颗粒物团聚促进机制的实验研究 [J]. *化工学报*, 2007, (11):2876-2881.
- [18] 杨玉巍, 曲迪, 王晓辉. 烧结作业全流程技术研究 [J]. *世界有色金属*, 2016, (17):138-140.
- [19] 李强. 影响烧结机电除尘器除尘效率的分析与治理研究 [J]. *中国冶金*, 2013, 23(6):44-49.
- [20] 王荣. 不扩束激光粉尘粒度分布测试系统的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [21] 胡松青, 李琳, 郭祀远, 蔡妙颜. 现代颗粒粒度测量技术 [J]. *现代化工*, 2002, (1):58-61.
- [22] 多鹏. 转炉静电除尘器数值模拟与工艺优化 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2017. ■