

燃煤脱硫技术研究现状及发展趋势

苗 强

(北京低碳清洁能源研究所,北京 102209)

摘 要:为开发具有自主知识产权的燃煤脱硫技术,论述了国内外燃煤脱硫技术现状,重点介绍了干法、湿法和半干法烟气脱硫技术主要工艺及流程,并对燃煤脱硫技术发展趋势进行展望。湿法烟气脱硫技术最为成熟,已得到大规模工业化应用,但由于投资成本高还需对工艺和设备进行优化;干法烟气脱硫技术不存在腐蚀和结露等问题,但脱硫率远低于湿法脱硫技术,须进一步开发基于新脱硫原理的干法脱硫工艺;半干法烟气脱硫技术脱硫率高,但不适合大容量燃烧设备。最后提出未来应重点创新脱硫原理;研发多联产工艺或多级脱硫工艺,重点开发生产硫酸铵化肥和硫酸镁化肥等副产品的脱硫工艺;开发低廉、高效、多功能的复合型和可再生循环利用的脱硫剂、催化剂或吸附剂及其脱硫工艺;研发新型辅助脱硫技术,扩大工艺适用范围。

关键词:燃煤;烟气脱硫;湿法;干法;半干法

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)02-0059-05

Research status and progress of steam coal desulfurization technologies

MIAO Qiang

(National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, Beijing 102209, China)

Abstract: In order to develop steam coal desulfuration technologies with proprietary intellectual property rights, the status of steam coal desulfuration technologies at home and abroad was introduced. The core processes and flows of dry, wet and semidry method flue gas desulfuration technologies were highlighted. The results showed that, the wet method was mature and realized a large-scale industrial application, while the complicated process increased cost. The dry method didn't have corrosion and condensation problems, but the desulfuration efficiency was lower. The desulfuration efficiency of semidry method was higher, while it wasn't suitable for large-capacity combustion devices. At last, the author pointed out that it should focus on desulfuration principle innovation, multiple-products process or multi-stage desulfuration process development which produced the byproduct of ammonium sulfate and magnesium sulfate fertilizers. The cheap, more efficient and multifunctional composite and recyclable desulfurizer, catalyst and absorbent as well as new assistive desulfuration technologies should be determined as the key research fields.

Key words: steam coal; flue gas desulfuration; wet method; dry method; semidry method

0 引 言

煤炭是我国主要能源,我国能源现状决定未来 30 年仍将是煤为主的能源结构。我国煤炭的 80% 用来燃烧,燃煤不可避免会造成 SO_x 、 NO_x 和粉尘等有害物质的排放,并成为大气环境的主要污染源,如 PM_{2.5}、酸雨、光化学烟雾等。因此,在加强煤炭清洁转化利用的基础上,大力发展燃煤污染物

防治技术尤为重要。减少燃煤 SO_x 排放的措施主要有燃煤前脱硫,燃烧中脱硫和燃烧后脱硫 3 种,其中,燃烧后脱硫即烟气脱硫能快速控制 SO_x 排放,脱硫率高,是主流的燃煤脱硫技术。近年来,国内外学者开展了大量燃煤烟气脱硫技术研究。孙玮^[1]开发了并流氨法脱硫工艺,杨叔衍等^[2]开发了双塔式氨法脱硫工艺,魏雄辉等^[3-4]开发了多元醇复合溶液和复合醇胺溶液吸附脱硫工艺,但这些工艺至今

收稿日期:2015-02-02;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.013

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(GB9300120009)

作者简介:苗 强(1965—),男,山西岢岚人,副研究员,硕士,从事煤化工方面的知识产权挖掘和研究工作。E-mail:miaoqiang@nicenergy.com

引用格式:苗 强.燃煤脱硫技术研究现状及发展趋势[J].洁净煤技术,2015,21(2):59-63.

MIAO Qiang. Research status and progress of steam coal desulfuration technologies[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2): 59-63.

未得到大规模工业应用。目前我国燃煤脱硫技术成本居高不下,主要原因是核心技术装备由外国跨国公司垄断,如以石灰石/石灰-石膏法(W-FGD)^[5]为代表的湿法烟气脱硫工艺和以活性炭吸附-再生法^[6]为代表的干法烟气脱硫工艺被包括三菱重工、美国ABB公司和芬兰IVO公司等跨国公司垄断。因此,开发具有自主知识产权的成熟燃煤脱硫技术尤为重要。笔者论述了国内外燃煤脱硫技术现状、比较了各种燃煤脱硫技术的优缺点,并对燃煤脱硫技术的发展趋势和可能实现的技术突破进行展望,以期为实现我国燃煤脱硫技术发展起到推动作用。

1 湿法烟气脱硫技术

1.1 石灰石/石灰-石膏法

湿法烟气脱硫工艺的代表是石灰石/石灰-石膏法(W-FGD),相对而言,W-FGD法最为成熟、效率高、操作简单,但投资巨大、耗水量大、占地面积大、系统复杂,易结露对设备造成腐蚀,需要对水进行再处理,易产生二次污染。特别是采用钙基脱硫剂吸收 SO_2 ,生成 CaSO_3 和 CaSO_4 ,由于溶解度较小,2种物质极易在脱硫塔内和管道内结垢,堵塞管道,为克服这一缺点,后来发展了双碱法烟气脱硫技术^[7]。

筱田直晴等^[5]开发了一种用石灰石浆清洗燃烧废气的排烟脱硫方法。该方法包括将浆液中的 CaSO_3 氧化成石膏的氧化工序,将来自氧化工序的浆液循环至吸收工序的循环工序,以及在排出一部分循环工序的浆液并分离回收石膏的同时将剩余的浆液返回到上述循环系统的分离工序。其特征是在分离工序中采用能使浆液分离成上溢流和下溢流的分离器,对浆液进行超声波照射,促使石膏粒子从石灰石粒子中分离出来,并使石灰石粒子移至上溢流侧,而石膏粒子移至下溢流侧。

陈然振^[8]提出了一种副产石膏的烟气脱硫技术。通过除尘、脱硫塔内鼓泡吸收和中和,使烟气中 SO_2 进行脱硫反应,再通过空气氧化与消石灰反应形成石膏结晶,经离心脱水后形成石膏产品。

刘忠生^[9]提出了一种利用工业废水和废渣进行湿法烟气脱硫的方法。将含有机酸盐或有机酸的工业废水、废渣加入石灰(石)湿式烟气脱硫系统中,对于含有机酸或盐较少而含其他有机物较多的

工业废水,可经过湿式空气氧化,增加其有机酸或盐的含量后再加入烟气脱硫系统中。

一之濑利光等^[10]提出了一种排烟脱硫方法。在燃烧炉内投入石灰石,在与燃烧炉排气烟道相接的脱硫烟道内喷水,由燃烧炉与脱硫烟道之间的气/气加热器加热脱硫烟道排出气,将从脱硫烟道排气中回收的灰分以浆料形式向烟道脱硫装置内喷雾。

1.2 氨法

从技术成熟度和应用前景来看,氨法是仅次于W-FGD法的烟气湿法脱硫技术。

孙玮^[1]提出了一种并流氨法烟气脱硫工艺。烟气进入预洗涤塔后与硫酸铵饱和溶液并流接触,烟气被绝热饱和,冷却至脱硫塔;烟气进入脱硫塔后自下而上流过循环喷淋层,经洗涤脱硫、除雾器除雾后排出脱硫塔。预洗涤塔内因热烟气而蒸发浓缩的硫酸铵溶液送往硫酸铵分离系统,制成硫酸铵化肥出售,其分离滤液送回预洗涤塔再浓缩结晶。

杨叔衍等^[2]提出了一种双塔式氨法脱硫工艺。烟气脱硫过程在由预洗涤塔与脱硫塔组成的双塔中进行。由于预洗涤塔与脱硫塔的浆液保持一定的浓度梯度,操作及运行稳定,同时减少了浆液对脱硫塔塔内件的磨损,延长了设备的使用寿命。预洗涤塔分为除尘、降温、浓缩段,脱硫塔下部为氧化段,中部为主吸收段,上部为水洗段。预洗涤塔与脱硫塔均设置有喷淋装置。该方法操作简便、净化后烟气中的气溶胶少、硫酸铵产品回收率高。

1.3 多元醇、胺或醇胺复合溶液吸附法

多元醇、胺或醇胺复合溶液吸附法的特点是吸附剂-多元醇、胺或醇胺复合溶液可经再生重复使用,表现出较好的应用前景和经济效益。

魏雄辉等^[3-4]提出了多元醇复合溶液和复合醇胺类溶液脱除气体中 SO_x 的方法。将多元醇与有机酸或有机酸盐混合成多元醇复合溶液及乙二醇或聚乙二醇与含氮碱性基团的羟羧基有机化合物混合成复合醇胺类溶液,将其与含 SO_x 气体接触,吸收气体中 SO_x 。吸收了 SO_x 的溶液用加热法、真空法、气提法、超声波法、微波法和辐射法等方法再生,释放出 SO_2 和 SO_3 副产品,再生后的溶液可循环使用。

Hakka^[11]使用多元胺盐吸附剂从气体中脱除 SO_2 , SO_2 吸附过程可在温度低于 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下进行,产生的废吸附剂可在至少1个胺基保持盐的条件下进

行再生并循环使用。

1.4 海水烟气脱硫法

彭斯干等^[12-13]研究了纯海水工业烟气脱硫方法和曝气法海水烟气脱硫工艺,适用于脱除沿海工业装置排放烟气中的 SO_2 等酸性物质。将一部分海水送往洗涤塔洗涤烟气中的酸性气体,再将洗涤后的酸性海水与剩余部分海水混合,然后对混合后的海水鼓入空气。用于洗涤酸性气体的海水水量为总水量的 $1/3 \sim 4/5$ 。

1.5 双碱法

吴忠标等^[7]研究了浓碱双碱法烟气脱硫工艺。烟气被吸收塔中吸收液吸收 SO_2 后排出,吸收液从塔底抽出,大部分进入吸收器内脱硫,吸收 SO_2 后的吸收液回到吸收塔底部;另一小部分进入再生池,向再生池中加入再生碱和补充水进行再生,再生后浆液经过澄清池澄清后,澄清液送到泵前池中并加入补充碱,再进入吸收塔中,与吸收液一起循环进入吸收器;澄清池内的 CaSO_3 和 CaSO_4 沉淀物经过滤变为滤渣;滤液送回吸收液循环系统中循环利用。

2 干法烟气脱硫技术

干法烟气脱硫是在无液相介入完全干燥的状态下进行,反应产物为干粉状,不存在腐蚀、结露等问题,但脱硫率远低于湿法脱硫技术。

2.1 活性炭吸附-再生法

在干法烟气脱硫技术中,活性炭吸附-再生法^[6,14]最为成熟,已有数种工艺在日本、德国、美国等实现工业应用。活性炭吸附-再生法采用活性炭吸附 SO_2 并将吸附的 SO_2 催化氧化为 SO_3 ,再与水结合生成硫酸。具有代表性的工艺是鲁奇法和日本的东电法,但也存在设备昂贵、投资高、系统复杂和场地占用大等缺点,优点在于脱硫过程中可以多联产生硫酸。

活性炭吸附 SO_2 后,在其表面形成的硫酸存在于活性炭微孔中,降低了其吸附能力,因此需将微孔中的硫酸取出,使活性炭再生。再生方法包括洗涤再生和加热再生 2 种。活性炭吸附-再生脱硫技术中的吸附剂除活性炭外,还可采用活性焦、分子筛、硅胶等吸附介质。

Kobayashi Takafuru 等^[6]提出了一种活性炭烟气脱硫装置。采用多孔碳纤维材料制备的活性炭吸

附烟气中的 SO_2 ,利用活性炭的催化作用和烟气中的氧将 SO_2 氧化为 SO_3 ,之后用水吸附 SO_3 ,使之变为硫酸,并从活性炭中除去和回收。在上述方法中,可同时使用多个活性炭纤维吸附塔,保持一个活性炭纤维吸附塔进行洗涤再生,水洗后可获得浓度 20% 的浓硫酸,再经浸没式燃烧蒸发器浓缩,可得到浓度 65% 的硫酸。为了避免烟气中的粉尘覆盖活性炭纤维表面,影响吸附效果,烟气在进入吸附塔前需先经除尘器除尘。该方法脱硫率可达 85%。

小林敬古等^[14]提出了一种排烟脱硫工艺。通过将平板状的平板活性炭纤维薄板和波板状的波板活性炭纤维薄板交替层叠,形成通路在上下方向延伸的状态,构成催化剂的活性炭纤维层。将生成硫酸的水利用毛细孔渗透均匀添加到催化剂的活性炭纤维层中,去除 SO_x 。

2.2 循环流化床法

张颖等^[15]研究了 W 型循环流态化的干法烟气脱硫工艺。该工艺将烟气分为 2 路,一路通过烟气引射加速装置从脱硫塔下部区域的前后两侧处以一定角度和流速向下喷入脱硫塔中,另一路通过烟气布风装置从脱硫塔下部区域的底部向上以一定流速均匀给风,使烟气在脱硫塔下部区域先向下运动,然后在脱硫塔底部携带流态化的脱硫剂颗粒转弯 $100^\circ \sim 180^\circ$ 后向上流动,形成 W 型烟气流场后,进入脱硫塔上部区域,使烟气与脱硫剂颗粒发生剧烈混合和反应,其间脱硫剂吸收烟气中的硫。

2.3 膜分离法

范晓丹等^[16]研究了应用于低浓度烟气脱硫的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合膜脱硫工艺。该工艺采用膜分离技术对低浓度烟气进行脱硫,所述 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合膜包括 $\text{K}_2\text{O}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{K}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合膜。

2.4 辐照法

朱彤等^[17]提出了一种烟气脱硝(氮)脱硫剂,可分别或同时有效脱除烟气中 NO 、 NO_2 和 SO_2 。程祖海等^[18]提出了一种激光烟气脱硫脱硝方法。被激光束辐照微粒化后的吸收剂和催化剂混合物粒级为微米或亚微米量级,呈悬浮状态在烟气中迅速扩散;吸收剂比表面积大,且表面温度高,能提高反应速率,减小 SO_2 、 NO_x 反应所需气固接触时间。

2.5 等离子体法

岳建华等^[19-20]提出了一种高温等离子体烟气

脱硫剂及脱硫方法,该脱硫剂主要由金属镁和铈氧化物等成分构成,质量分数分别为 65% ~ 90%、10% ~ 35%,脱硫率可达 100%,具体方法为:将高温等离子体烟气脱硫剂直接喷入炉膛或炉尾部烟道内的烟气中,使之与烟气充分混合、反应,进行脱硫。顾璠等^[21]提出了一种低温等离子体吸附催化烟气脱硫装置及脱硫方法。将吸附催化剂低温等离子化,含硫烟气与反应器中低温等离子化的吸附催化剂反应,将 SO_2 吸附并转换为 SO_3 ,再送入浓硫酸池转化为 H_2SO_4 ,通过纤维除雾器排出洁净气体。黎英豪^[22]提出了一种烟气电子化学干法脱硫装置,适用于不能用湿法脱硫的北方寒冷地区和缺水地区,其原理为将烟气中的 SO_2 等离子体化,再与固体脱硫层进行快速化学反应而脱硫。

2.6 氧化铜/氧化铝法

张世超等^[23]提出了一种 $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米可再生烟气脱硫剂及制备方法。通过控制起始物 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的加入量和整个制备体系的温度及反应时间达到对活性 CuO 存在形式的控制,实现脱硫剂中活性组元 CuO 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 载体表面的良好分布, SO_2 在 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 载体表面 CuO 单分子层上进行吸收。制得的 $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米可再生烟气脱硫剂,具有优异的脱硫和还原能力。

3 半干法烟气脱硫技术

半干法烟气脱硫技术是介于湿法脱硫技术和干法脱硫技术之间的一种脱硫技术,其脱硫效率高于干法脱硫工艺,但不太适合大容量的燃烧设备,所以大型电厂应用较少。典型的半干法烟气脱硫工艺是喷雾干燥脱硫技术^[24]。

3.1 喷雾干燥法

俞乔力等^[24]研究了一种电子束-喷雾干燥半干法烟气脱硫工艺。该工艺由 3 台立式湿式设备组成,其中压力式喷雾干燥器既能使铵盐溶液干燥、造粒,又能使含 SO_2 和 NO_x 的烟气降温、增湿;烟气被立式冷却辐照塔降温、增湿和电子束照射,生成铵盐气溶胶微粒;该微粒被筛板式吸收塔分离、清洗成铵盐溶液。

3.2 氧化钙-增湿活化法

张凡等^[25]提出了一种半干半湿烟气脱硫处理方法。向脱硫塔内输送脱硫剂、脱硫灰;向烟道、塔

内喷水雾使脱硫剂增湿活化,收集增大增重后沉淀的烟尘,将处理后的脱硫灰输出制成建材产品。该方法使用 CaO 作为脱硫剂。

3.3 循环流化床法

卢长柱^[26]研究了一种双回料循环流化床半干法脱硫工艺。烟气进入除尘器预除尘,直接分离出烟气中 70% ~ 80% 的粉煤灰,除尘器预除尘后烟气送入循环流化床反应塔中脱硫,从反应塔脱硫后的烟气再经除尘器除尘,经引风机、烟囱排出;净化后的烟气部分再循环与预除尘后的烟气汇入反应塔;脱硫灰经位于循环流化床反应塔底部的引射式喷嘴通过风机送至反应塔;烟气的一部分经旋风分离器分离出烟气送回除尘器底入口,粉煤灰通过给料机送入料斗及反应塔。该工艺中,脱硫剂为用水和压缩空气雾化的石灰乳。

4 燃煤烟气脱硫技术发展趋势

1) 创新烟气脱硫原理。美国陶氏化学公司正开发一种新的脱硫脱硝技术,其技术思路是选取一种还原性极好的碳材料将 SO_2 和 NO_x 分别还原为单质硫(硫磺)和 N_2 ,并形成 CO_2 , N_2 和 CO_2 作为无害气体排放,硫磺作为副产品回收和利用。该工艺如果开发成功,将是脱硫技术领域一次质的飞跃。

2) 研发脱硫技术的多联产工艺或多级脱硫工艺。重点开发生产硫酸铵化肥和硫酸镁化肥等副产品的脱硫工艺;同时按照烟气中 SO_2 和 NO_x 浓度进行多级脱硫、脱硝成为燃煤烟气脱硫技术发展的重要趋势。

3) 开发新的湿法和干法脱硫剂、催化剂或吸附剂。开发低廉、高效、多功能的复合型和可再生循环利用的脱硫剂、催化剂或吸附剂及其脱硫工艺,以降低脱硫成本,提高脱硫率。

4) 研发新型辅助脱硫技术。在不改变原工艺条件的基础上,加以辅助脱硫技术手段可明显提高脱硫效率,如超声波、微波、电子辐射、等离子体和电化学催化等技术手段;同时研发新型辅助脱硫手段,提高针对性,扩大工艺适用范围,提高脱硫率。

5 结 语

燃煤烟气脱硫技术种类繁多,但真正实现大规模工业应用的成熟脱硫技术并不多,且这些成熟脱

硫技术大多为少数国外大公司所垄断。随着国家环保政策的日益严厉,人们环保意识逐渐增强,燃煤脱硫技术研究成果不断涌现。我国的并流氨法工艺、双塔氨法工艺、多元醇复合溶液和复合醇胺溶液吸附工艺具有流程简单、脱硫率高等特点,并表现出良好的工业应用前景和可观的经济效益。未来应创新烟气脱硫原理,研发脱硫技术的多联产工艺或多级脱硫工艺,重点开发生产硫酸铵化肥和硫酸镁化肥等副产品的脱硫工艺,开发新的湿法和干法脱硫剂、催化剂或吸附剂,研究新型辅助脱硫技术,实现我国烟气脱硫技术的飞跃发展。

参考文献:

- [1] 孙 玮. 氨法烟气脱硫装置及其工艺: 中国, 200410066557. 1 [P]. 2006-03-29.
- [2] 杨叔衍, 刘新亚. 双塔式氨法脱硫工艺: 中国, 201010282630. 4 [P]. 2011-01-05.
- [3] 魏雄辉, 邹美华, 于学春, 等. 多元醇复合溶液脱除气体中 SO_x 的方法: 中国, 201310682382. 6 [P]. 2014-03-12.
- [4] 魏雄辉, 邹美华, 于学春, 等. 复合醇胺类溶液脱除气体中 SO_x 的方法: 中国, 201310481557. 7 [P]. 2014-01-08.
- [5] 筱田直晴, 多谷淳, 鬼塚雅和, 等. 排烟脱硫方法: 中国, 87106325 [P]. 1988-06-15.
- [6] Kobayashi Takafuru, Yasutake Akinori, Kurisaki Takashi. Flue gas desulfurization device: Japan, 10157478 [P]. 1991-12-21.
- [7] 吴忠标, 莫建松, 程常杰, 等. 浓碱双碱法烟气脱硫工艺: 中国, 03141594. 6 [P]. 2004-02-18.
- [8] 陈然振. 副产石膏的烟气脱硫技术及装置: 中国, 97108252. 9 [P]. 1999-04-14.
- [9] 刘忠生. 一种烟气脱硫方法: 中国, 01114170. 0 [P]. 2003-01-29.
- [10] 一之濑利光, 德田君代, 甲斐昭一, 等. 排气脱硫装置: 中国, 96107404. 3 [P]. 1997-02-05.
- [11] Hakka Leo E. Removal and recovery of sulphur dioxide from gas streams: America, US5019361 [P]. 1991-05-28.
- [12] 彭斯干, 廖康敏. 纯海水工业烟气脱硫方法: 中国, 99114641. 7 [P]. 2000-08-09.
- [13] 彭斯干, 唐崇武. 曝气法海水烟气脱硫工艺及其曝气装置: 中国, 95119389. 9 [P]. 1996-11-06.
- [14] 小林敬古, 安武昭典, 栗崎隆, 等. 排烟脱硫装置和排烟脱硫设备以及排烟脱硫装置的运行方法: 中国, 200510075598. 1 [P]. 2006-01-04.
- [15] 张 颀, 张 泽, 李雄浩. W 型循环流态化的干法烟气脱硫方法: 中国, 03125273. 7 [P]. 2004-04-14.
- [16] 范晓丹, 张襄桦. 应用于低浓度烟气脱硫的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合膜: 中国, 200510014668. 2 [P]. 2006-03-01.
- [17] 朱 彤, 丁 杰. 一种烟气脱硝(氮)脱硫剂: 中国, 03136387. 3 [P]. 2005-01-19.

- [18] 程祖海, 余文峰. 一种激光烟气脱硫脱硝方法: 中国, 00114677. 7 [P]. 2002-01-16.
- [19] 岳建华, 丁 杰. 高温等离子体烟气脱硫剂: 中国, 00132191. 9 [P]. 2001-08-15.
- [20] 岳建华, 丁 杰. 高温等离子体烟气脱硫方法: 中国, 00132192. 7 [P]. 2001-08-15.
- [21] 顾 璠, 叶 丹. 低温等离子体吸附催化烟气脱硫装置及其脱硫方法: 中国, 200410041453. 5 [P]. 2005-03-23.
- [22] 黎英豪. 烟气电子化学干法脱硫装置: 中国, 95101395. 5 [P]. 1996-06-05.
- [23] 张世超, 陈 歆. $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纳米可再生烟气脱硫剂及其制备方法: 中国, 200510087042. 4 [P]. 2006-02-01.
- [24] 俞乔力, 权 田. 电子束湿法烟气脱硫工艺: 中国, 01103123. 9 [P]. 2001-08-29.
- [25] 张 凡, 姚允升. 半干半湿烟气脱硫与处理方法及其系统: 中国, 01120584. 9 [P]. 2003-02-26.
- [26] 卢长柱. 双回路循环流化床半干法脱硫工艺: 中国, 200610170813. 0 [P]. 2007-11-07.

(上接第 58 页)

- [3] 刘 吉, 刘有智. 固定床内传热参数的估算[J]. 华北工学院学报, 1998, 19(1): 26-29.
- [4] 陈裕中, 陈锦文, 王金波. 固定床内传热参数的估计与分析[J]. 化学工程, 1992, 20(1): 12-25.
- [5] 谭世韶. 固定床反应器的传热研究[J]. 太原工业大学学报, 1987 (3): 41-50.
- [6] 季永新. 固定床反应器的传热系数的计算[J]. 南京林业大学学报, 1992, 16(1): 81-85.
- [7] 刘 吉, 李玉安, 赵 培. 固定床反应器传热参数的求取[J]. 高效化学工程学报, 1998, 12(1): 39-43.
- [8] 叶长桑, 邢鼎生, 王中来. 应用正交配置法模拟固定床吸附过程[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 97-100.
- [9] 赵 薇. 固定床反应器有效导热系数的研究进展[J]. 小氮肥设计技术, 2002, 23(3): 1-6.
- [10] 程振名, 袁渭康. 一个大范围适用的固定床传热参数估计方法[J]. 化学工业与工程, 1997, 14(1): 1-7.
- [11] 濮家驹, 温蕴华, 史红勤. 固定床有效导热系数及壁给热系数的试验测定及其关联式[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 1984(1): 24-35.
- [12] 刘玉兰, 吴勇强, 徐志刚, 等. 固定床有效导热系数的研究[J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(2): 130-134.
- [13] 陈裕中, 王金波, 陈锦文. 用正交配置技术估计固定床内的传热参数[J]. 化工学报, 1990, 41(2): 219-225.
- [14] 王中来, 李育伟, 叶长桑. 正交配置表的构造及其在吸附偏微分方程数值解中的应用[J]. 离子交换与吸附, 1998, 14(1): 59-67.
- [15] 陈裕中, 赵福龙. 正交配置法及其在计算固定床反应器方面的应用[J]. 石油化工, 1984, 13(1): 58-69.
- [16] 朱炳辰. 化学反应工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 154.