

羰基硫、CS₂ 水解催化剂及脱硫机理研究 现状与进展

张晓东¹ 易红宏^{1,2*} 唐晓龙^{1,2} 赵顺征^{1,2} 韩文¹ 马传博¹

(1.北京科技大学能源与环境工程学院,北京 100083;

2.工业典型污染物资源化处理北京市重点实验室,北京 100083)

摘 要 羰基硫(COS)、CS₂ 等有机硫广泛存在于煤制气、纤维厂尾气和黄磷尾气等工业尾气中,对人体健康和生态环境造成了严重危害。催化水解法能将 COS、CS₂ 在低温下水解为 H₂S 和 CO₂,而产物 H₂S 可被进一步催化氧化成单质 S 回收利用。主要对近几年在单独催化水解 COS、CS₂ 及对两种气体协同催化水解的研究成果进行总结,包括负载型催化剂和非负载型催化剂,与此同时,对 COS、CS₂ 水解产物 H₂S 的产生机理进行了综述,并对催化剂表面硫酸盐的产生和失活催化剂再生进行了分析,旨在为后续开发单独催化水解 COS、CS₂ 及二者协同水解,以及降低水解产物 H₂S 硫酸盐化的催化剂制备提供理论指导。

关键词 催化水解,羰基硫,CS₂,水解产物,硫酸盐化,再生

Research progress of COS,CS₂ catalytic hydrolysis and desulfurization mechanism

Zhang Xiaodong¹ Yi Honghong^{1,2} Tang Xiaolong^{1,2} Zhao Shunzheng^{1,2}
Han Wen¹ Ma Chuanbo¹

(1.School of Energy and Environmental Engineering,Beijing University of Science and
Technology,Beijing 100083;2.Beijing Key Laboratory of Resource-oriented Treatment of
Industrial Pollutants,Beijing 100083)

Abstract Organic sulfide such as carbonyl sulfide (COS) and carbon disulfide (CS₂) are widely coexisted in the industrial tail gas,for example,coal-gas,fiber tail gas,coke oven gas,yellow phosphorus tail gas and so on.They are one of the important atmospheric pollutants, which have caused serious problems to human health and ecological environment.The method of catalytic hydrolysis can hydrolyze COS and CS₂ into H₂S and CO₂ at low temperature, while the product H₂S can be oxidized into single S and recycled by catalytic oxidation. The related research achievements of catalysts in hydrolysis of COS,CS₂ and concerted catalysis of two gases were summarized both in supported catalyst and unsupported catalyst.Meanwhile,the production mechanism of H₂S in hydrolysis COS,CS₂ and the formation of sulfate on the surface of deactivated catalyst were reviewed.A reference to the development and application of the way that hydrolysis COS,CS₂ or both gases was provided,and provided theoretical guidance for reducing H₂S sulfation in the preparation of the catalyst.

Key words catalytic hydrolysis,carbonyl sulfide,carbon disulfide,hydrolysate,sulfation,regeneration

当今社会,气态含硫污染物的排放受到了社会的广泛关注。含硫废气一般可以分为两类:有机硫和无机硫,有机硫主要包含羰基硫(COS)、CS₂、甲硫醇(CH₃SH)等,无机硫主要是 H₂S 和 SO₂。其

中 COS、CS₂ 广泛存在于碳一化工行业废气^[1-2]、焦炉尾气^[3-4],以及黄磷尾气^[5]中,具有腐蚀性强、毒性大和含量低等特点,它们的存在会降低设备寿命^[6],痕量的 COS、CS₂ 就会造成下游催化剂的中毒

基金项目:青年科学基金(51808037)

作者简介:张晓东(1994-),男,硕士研究生,主要从事催化水解法脱除高炉煤气中的 COS、CS₂ 的研究、环境功能材料等。

联系人:易红宏(1976-),女,教授,博士研究生导师,主要研究方向为环境污染控制与治理、环境功能材料等。

失活。

COS 和 CS₂ 的净化方式一般分为湿法和干法^[7]。湿法脱硫是指从原料气或尾气中分离 COS 和 CS₂, 经富集, 然后再转化为元素 S 或者硫酸盐。湿法脱硫包括: 液相催化水解、有机胺类溶剂吸收法^[8]等, 成本较高, 不适用于低浓度 COS、CS₂ 的净化^[9]。干法脱硫是用催化剂将 COS、CS₂ 直接脱除或转化后再净化的过程, 主要包括: 吸附法^[10-11]、水解法^[12-13]、加氢转化法^[14]、氧化法^[15]、分子筛脱硫等。脱硫精度高, 对于低浓度的原料气或尾气, 能取得较好的脱硫效果。其中水解法脱除 COS、CS₂ 具有效率高、反应温度低的特点。并且水解产物是 H₂S 和 CO₂, H₂S 可以被氧化成单质 S 回收利用^[16]。

目前 COS、CS₂ 的净化主要以单一级处理为主, 但存在催化剂易中毒、硫容低的问题^[17-18], 所以有必要对 COS、CS₂ 的催化水解及二者的协同净化, 以及水解催化剂的失活和再生进行研究。笔者将从 COS、CS₂ 水解催化剂的研究现状、水解机理、催化剂的失活和再生 4 个方面来介绍, 并对未来的研究方向进行展望。

1 水解催化剂的研究现状

自然条件下, COS、CS₂ 水解的速度很慢, 使用催化剂可以加快水解速率, 不同活性组分的水解催化剂对 COS、CS₂ 催化水解效率有很大影响^[19]。COS、CS₂ 水解催化剂主要包括负载型和非负载型两类, 负载型水解催化剂主要是基于活性炭的非金属氧化物载体^[20]和以 γ -Al₂O₃ 和 TiO₂ 为代表的金属氧化物载体^[21-22]。而非负载型水解催化剂主要包括类水滑石化合物。因为水滑石具有化学组成可调, 经焙烧后可形成混合均匀的氧化物等优良性状而受到了越来越多的关注^[23]。

1.1 负载型水解催化剂

COS、CS₂ 水解催化剂的金属氧化物载体主要为 γ -Al₂O₃ 和 TiO₂, γ -Al₂O₃ 作为载体研究的比较广泛。为了使 COS、CS₂ 能更好的和催化剂接触, 通常使用球粒状 γ -Al₂O₃ 代替粉末状, 王晓鹏^[16]以 Al₂O₃ 小球为载体, 采用等体积浸渍法负载 La₂O₃-ZrO₂-K₂O, 中温催化水解 CS₂, 能达到 90% 的去除率。Aboulayt^[24] 和 Saur^[25] 等比较了 γ -Al₂O₃、TiO₂、ZrO₂ 在低温下 (100℃) 催化水解 COS, 发现活性由高到低为 TiO₂ > γ -Al₂O₃ > ZrO₂, 认为载体

表面的酸碱基团类型不同是产生差异的主要原因。Yue 等^[26]研究表明纳米 TiO₂ 和 ZrO₂ 作为水解催化剂时, 达到 90% 去除率需要的温度分别为 210℃ 和 205℃, 然而以 γ -Al₂O₃ 为催化剂时, 温度需高出 130~135℃, 造成活性差异的原因是 TiO₂ 表面能产生更高的活化能以及有更多游离的碱性羟基基团。Laperdrix 等^[27]比较了 γ -Al₂O₃ 和 TiO₂ 催化水解 CS₂ 的实验, 结果表明, 在不含 H₂S、SO₂、无氧的条件下, γ -Al₂O₃ 水解活性高于 TiO₂, 反之则 TiO₂ 的活性较高。为了提高催化剂的水解活性和抗硫酸盐性能, 制备复合型金属氧化物载体具有很大的应用前景, 刘伟等^[28]研究表明, 纳米钛离子经过 500℃ 高温焙烧后转变为金红石结构 TiO₂, 负载 2% Al₂O₃, 在不同的实验条件下催化水解 CS₂, 明显地提高了水解转化率和抗硫酸盐性能。

活性炭优异的性能常被用做 COS、CS₂ 水解催化剂的载体^[29]。不同种类的活性炭含有不同的官能团, 因此, 空白活性炭对 COS、CS₂ 具有一定的脱除能力。Wang 等^[30]考察了不同种类活性炭对催化水解 CS₂ 的影响, 研究发现木质活性炭 > 煤质活性炭 > 椰壳活性炭, BET 表征分析后认为木质活性炭所含的微孔或大孔占比较大。李凯^[7]以微波椰壳活性炭和微波煤质活性炭为催化剂, 同时催化水解 COS、CS₂, 发现椰壳活性炭具有较好的脱除效果, X 射线衍射分析认为煤质活性炭表面含有 S 氧化物, 容易与活性组分 Na、K 结合形成硫酸盐, 阻塞孔道。何丹^[31]以煤质活性炭为载体, 考察了等体积浸渍法和溶胶-凝胶法对催化水解 CS₂ 的影响, 结果表明, 溶胶-凝胶法制备的水解催化剂具有更好的水解活性。原因是等体积浸渍的过程中活性组分不能够进入活性炭的孔道结构, 而溶胶-凝胶法引入的活性成分能够进入活性炭的骨架, 与载体之间的结合相当牢固。COS、CS₂ 水解催化剂的活性组分一般选用碱金属、碱土金属和过渡金属氧化物, 王红妍等^[32-33]以煤质活性炭为载体, 分别负载一定量的 Fe₂O₃、MnO 在低温条件具有较高的脱硫精度, 适用于黄磷尾气中微量 COS 的脱除。阮昊天^[5]以烟杆基制备活性炭负载一定量 ZnO、CuO、Fe₂O₃、CoO、NiO, 同时脱除 COS、CS₂、H₂S, 在 60℃ 下能取得 100% 去除的效果。

1.2 非负载型水解催化剂

非负载型水解催化剂主要是以类水滑石为主,

类水滑石层板离子可调、比例可调等特性使得催化剂的化学性能、表面形态等得到了极大的改善^[34]。赵顺征^[35]以金属硝酸盐为原料,采用共沉淀法制备了 Zn/Al 和 Ni/Al 二元类水滑石,微量 Ce 的添加可以使水解催化剂表面形态趋于一致,从而提高催化活性。李倩等^[36]采用共沉淀法合成了 Cu/Ni/Fe 三元类水滑石水解 CS₂,当反应温度为 70℃,空速为 2000h⁻¹,进口浓度为 340mg/m³,相对湿度为 0.67%时,该催化剂具有最好的脱硫效果和工作疏容。Guo 等^[37]合成了 MgAlCe 类水滑石化合物,在 50℃催化水解 COS,100%去除能维持 80min。研究发现最佳的制备条件为 Al:Ce 比为 16:1,合成 pH 为 9,焙烧温度为 600℃。

由此可见,影响类水滑石水解 COS,CS₂ 效率的关键因素是离子种类、摩尔比、焙烧温度和 pH 等。典型负载型水解催化剂和非负载型水解催化剂的对比见表 1。由表 1 可见,与负载型水解催化剂相比,类水滑石可以通过改变金属离子的种类和配比制备二元类和多元类水滑石,经焙烧后,形成的金属氧化物具有较高的比表面积,可以形成更多的酸碱活性中心,因此在环境催化领域应用的越来越广泛^[38]。

表 1 典型负载型水解催化剂和非负载型水解催化剂的对比

特点	负载型水解催化剂		非负载型水解催化剂	
	Al ₂ O ₃	TiO ₂	活性炭	类水滑石
优点	表面活性好 吸附性能好 球状强度高	碱性羟基基团多 表面活化能高 抗硫酸化	孔结构丰富 比表面积大 吸附性能好 价廉易得	结构种类多样 层间阴离子可调 水解活性好
缺点	比表面积小 抗硫性能差	抗压强度高 难以成型	易受到反应 条件的限制	制备过程复杂

2 COS、CS₂ 催化水解机理

COS、CS₂ 属于碱催化反应,目前关于 COS、CS₂ 水解机理有很多报道,但所得出的机理并不完全相同。原因在于不同水解催化剂所对应的反应路径不同。George^[39]提出了“协调机理”理论解释催化剂表面碱性在 COS 催化水解反应中的影响,认为在水解过程中,OH⁻ 和水覆盖在催化剂的表面,COS 因为离子偶极作用而吸附在催化剂表面,然后进行水解反应。Fiedorow 等^[40]使用红外光谱研究

Al₂O₃ 水解 COS 的机理,研究发现,Al₂O₃ 表面的 OH⁻ 可以吸附 COS,形成中间产物硫代碳酸盐^[41],硫代碳酸盐迅速分解后形成 CO₂ 和 H₂S。

而一些研究认为,COS 首先吸附在催化剂的碱性中心上,然后与吸附在碱性中心上的水进行反应。王会娜^[42]以复合金属氧化物为催化剂研究 COS 的水解机理,认为 COS 首先吸附在活性中心上并形成中间体,吸附态的水与吸附态的 COS 反应。

而对于 CS₂ 的水解机理,目前的研究认为,CS₂ 催化水解是碱催化反应,而 COS 是水解中间体^[43],郭晓汾^[44]利用红外光谱研究了氧化铝对 CS₂ 的催化水解反应,认为 CS₂ 在活性位点上有两种吸附路径,一种是活化吸附,CS₂ 与活性位点上已经吸附活化的 H₂O 反应,将部分 CS₂ 催化水解,另一种是解离吸附,生成的中间产物 COS 进一步与 H₂O 反应生成 H₂S。王丽等^[45]认为,CS₂ 首先在催化剂的碱性位点上水解生成中间产物 H₂S 和 CO₂,然后 H₂S 在氧化中心被氧化生成单质硫和硫酸盐。

3 水解催化剂的失活

催化剂的失活一般认为是硫沉积或者硫酸盐化导致碱性位点减少或者比表面积降低^[46]。水解催化剂表面碱中心的碱质量浓度和生成的单质硫、硫酸盐对催化剂的活性有很大的影响^[47],反应温度越高,越有利于硫酸盐的生成。Wang 等^[48]的研究表明在催化剂的表面生成高浓度的硫酸盐和单质硫会降低催化剂的比表面积和水解活性。王会娜^[42]研究发现,COS 在催化剂表面发生水解反应生成的 CO₂、H₂S、单质 S 等物种会抑制催化水解反应。在有氧气存在时,会加剧硫酸盐的形成,从而导致催化剂的活性降低^[49]。所以,良好的抗氧化性是减缓 COS、CS₂ 水解催化剂失活的一个重要因素。

因此,抑制水解催化剂失活主要从以下几方面考虑,首先,尽可能地降低反应温度,减少催化剂表面硫沉积和硫酸盐的生成。另一方面,反应体系中氧含量不能过高。除此之外,可以优化催化剂表面的官能团类型和分布以获得适宜的碱性位点^[50]。

4 水解催化剂的再生

在水解过程中,催化剂表面会生成固体硫酸盐物种和单质硫,覆盖住催化剂的活性中心和堵塞孔道结构,最终导致催化剂失活,但失活的催化剂中活

性组分含量很高,因此有必要进行再生。

赵顺征^[35]采用碱浸渍、水洗、烘干、焙烧的方法对Zi/Ni/Al三元类水滑石进行再生,研究发现使用NaOH+Na₂CO₃的再生液效果最好。何丹^[31]则比较了水洗再活化,碱洗再活化,碱洗-热再活化的再生效果。结果发现水洗再活化和碱洗-热再活化能去除催化剂表面沉积的硫酸盐,但同时也可能会将一部分的碱性基团洗去。李凯^[7]研究了水洗再生,N₂加热吹扫再生,碱洗再生,水洗+N₂加热吹扫+碱洗再生对微波椰壳活性炭再生的影响。结果表明,N₂加热吹扫能使催化剂表面的部分硫酸盐和亚硫酸盐物种分解为SO₂,并不能使所有的硫酸盐分解。

5 结语及展望

现有的COS、CS₂水解催化剂如Al₂O₃、TiO₂,不仅可以作为催化剂,还可以负载活性组分。而活性炭负载贵金属、碱金属、过渡金属、碱土金属也被广泛用于催化水解COS、CS₂。此外,类水滑石因为其组成和结构的可调控性,在水解COS、CS₂方面将有良好的研究前景。未来实现COS、CS₂的协同净化和增强催化剂的抗硫性主要从以下两方面来进行。

(1)降低反应温度和优化催化剂表面的官能团类型和分布可以有效地减少硫酸盐在催化剂表面的沉积,降低水解催化剂表面的氧自由基可以减少H₂S在催化剂表面的氧化。

(2)开发稳定性好,抗硫酸盐能力强和硫容高的COS、CS₂水解催化剂将有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Yang Y, Su H S. Environmental impacts of products in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(9): 4102-4109.
- [2] Jiang M, Wang Z H, Ning P, et al. Dust removal and purification of calcium carbide furnace off-gas [J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2014, 45(3): 901-907.
- [3] Wang Z, Jiang M, Ning P, et al. Thermodynamic modeling and gaseous pollution prediction of the yellow phosphorus production [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(21): 12194-12202.
- [4] Liu Yongchun, He Hong, Ma Qingxin. Temperature dependence of the heterogeneous reaction of carbonyl sulfide on magnesite oxide [J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2008, 112(13): 2820-2826.
- [5] 阮昊天. 烟杆基生物炭载体催化剂同时脱除H₂S、COS和CS₂的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [6] 王丽, 吴迪塘, 王树东, 等. 稀土氧化物CeO₂脱除二硫化碳的研究[J]. *中国稀土学报*, 2005, 12(S1): 35-39.
- [7] 李凯. COS、CS₂水解催化剂的开发及机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- [8] 刘家河. COS常低温脱除技术进展[J]. *广州化工*, 2013, 41(19): 22-24.
- [9] 刘娜. HCN、COS和CS₂催化水解及其水解产物协同净化的研究进展[J]. *化工进展*, 2018, 37(1): 302-310.
- [10] Wang Y J, Chen S Y, Chen H, et al. Removal of carbonyl sulfide from CO₂ stream using AgNO₃-modified NaZSM-5 [J]. *Energy Chem*, 2013, 22: 902-906.
- [11] Qiu J, Ning P, Wang X, et al. Removing carbonyl sulfide with metal-modified activated carbon [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 10(1): 1-8.
- [12] 赵顺征. 镍基COS深度净化材料的微观构型设计与实验研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016.
- [13] Li Q, Yi H, Tang X, et al. Preparation and characterization of Cu/Ni/Fe hydrotalcite-derived compounds as catalysts for the hydrolysis of carbon disulfide [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 284: 103-111.
- [14] Wang X, Xu W, Liu N, et al. Synthesis of metallic Ni-Co/graphene catalysts with enhanced hydride sulfurization activity via low-temperature plasma approach [J]. *Catalysis Today*, 2015, 256: 203-208.
- [15] Shen C, Wang Y J, Xu J H, et al. Synthesis of TS-1 on porous glass beads for catalytic oxidative desulfurization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 259(10): 552-561.
- [16] 王晓鹏. 中温二硫化碳水解催化剂制备及动力学研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [17] 何丹. 低温催化水解二硫化碳技术的研究进展[J]. *化学工程与工业*, 2011, 28(3): 62-66.
- [18] 王广建, 田爱秀, 陈晓婷, 等. COS水解催化剂及其脱硫机理研究进展[J]. *炼油技术与工程*, 2017, 47(9): 37-40.
- [19] 刘家河. COS常低温脱除技术进展[J]. *广州化工*, 2013, 41(19): 22-24.
- [20] Sakanishi K, Wu Z H, Akimitsu M, et al. Simultaneous removal of H₂S and COS using activated carbons and their supported catalysts [J]. *Catalysis Today*, 2005, 104: 94-100.
- [21] 陈杰, 李春虎, 赵伟, 等. 羰基硫水解转化脱除技术及面临的挑战[J]. *现代化工*, 2005, 25(增刊): 293-295.
- [22] 王丽, 李福林, 吴迪塘, 等. 低温催化水解二硫化碳的研究[J]. *天然气化工*, 2005, 30(1): 1-5.
- [23] Zhao Shunzheng, Yi Honghong, Tang Xiaolong, et al. Characterization of Zn-Ni-Fe hydrotalcite-derived oxides and their application in the hydrolysis of carbonyl sulfide [J]. *Applied Clay Science*, 2012, 56: 84-89.
- [24] Aboulayt A, Mauge F, Hoggan P E, et al. Combined FT-IR,

- reactivity and quantum chemistry investigation of COS hydrolysis at metal oxide surfaces used to compare hydroxyl group basicity[J]. *Catalysis Letters*, 1996, 39(3): 213-218.
- [25] Saur O, Bensitel M, Saad A B M, et al. The structure and stability of sulfated alumina and titania[J]. *Journal of Catalysis*, 1986, 99(1): 104-110.
- [26] Yue Y, Zhao X, Hua W, et al. Nanosized titania and zirconia as catalysts for hydrolysis of carbon disulfide[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2003, 46(3): 561-572.
- [27] Laperdrix E, Justin I, Costentin G, et al. Comparative study of CS₂ hydrolysis catalyzed by alumina and titanite[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 1998, 17: 167-173.
- [28] 刘伟, 宣宗伟, 崔作林, 等. 氢电弧等离子体法制备纳米钛粒子脱硫性能研究[J]. *分子催化*, 2004, 18(3): 224-230.
- [29] 金国杰, 樊惠玲, 上官炬, 等. 活性炭对二硫化碳和水的共吸附动力学的热重研究[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(4): 379-381.
- [30] Wang L, Guo Y, Lu G, et al. Effect of activated carbon support on CS₂ removal over coupling catalysts[J]. *Journal of Natural Gas Chemistry*, 2011, 20(4): 397-402.
- [31] 何丹. 活性炭基 CS₂ 水解催化剂筛选及动力学研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.
- [32] Yi H H, Zhao S Z, Tang X L, et al. Deactivation and reactivation of the KOH impregnated Fe-Cu-Ni/AC catalyst for hydrolysis of carbon disulfide[J]. *Catalysis Communications*, 2014, 56: 106-109.
- [33] 王红妍, 易红宏, 唐晓龙, 等. 改性活性炭催化水解羰基硫[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(3): 848-852.
- [34] Yi Honghong, Zhao Shunzheng, Tang Xiaolong, et al. Influence of calcination temperature on the hydrolysis of carbonyl sulfide over hydrotalcite derived Zn-Ni-Al catalyst[J]. *Catalysis Communications*, 2011, 12(15): 1492-1495.
- [35] 赵顺征. 类水滑石衍生氧化物催化水解 COS 研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [36] 李倩, 易红宏, 唐晓龙, 等. 反应条件对 Cu/Ni/Fe 类水滑石去除 CS₂ 的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5763-5769.
- [37] Guo H, Tang L, Li H, et al. Influence of the preparation conditions of MgAlCe catalysts on the catalytic hydrolysis of carbonyl sulfide at low temperature[J]. *RSC Advances*, 2015, 5(26): 20530-20537.
- [38] 闫林霞. Cu-Al 类水滑石衍生氧化物低温催化水解 HCN[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [39] George Z M. Kinetics of cobalt-molybdate-catalyzed reactions of SO₂ with H₂S and the hydrolysis of COS[J]. *Journal of Catalysis*, 1974, 32(2): 449-458.
- [40] Fiedorow R, Leaute R, Dalla Lana I G. A study of the kinetics and mechanism of COS hydrolysis over alumina[J]. *Journal of Catalysis*, 1984, 85(2): 339-348.
- [41] Liu J F, Liu Y C, Xue L, et al. Oxygen poisoning mechanism of catalytic hydrolysis of OCS over Al₂O₃ at room temperature[J]. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 2007, 23(7): 997-1002.
- [42] 王会娜. 中温羰基硫水解催化剂制备及其动力学研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2007.
- [43] 赵西平. 纳米氧化物与 CS₂ 催化水解和 VOC 光催化氧化[D]. 上海: 复旦大学, 2003.
- [44] 郭晓汾. CS₂ 在氧化铝基催化剂上的吸附行为和水解机理的研究[D]. 太原: 太原工业大学, 1996.
- [45] 王丽, 李福林, 吴迪镛, 等. 催化水解-氧化耦合一步法脱除二硫化碳的研究[J]. *燃料化学学报*, 2004, 32(4): 466-470.
- [46] Wang H Y, Li H H, Tang X L, et al. Catalytic hydrolysis of COS over calcined CoNiAl hydrotalcite-like compounds modified by cerium[J]. *Applied Clay Science*, 2012, 70: 8-13.
- [47] Wang Li, Wang Shudong, Yuan Quan. Removal of carbon disulfide: experimental and modeling results[J]. *Fuel*, 2010, 89(7): 1716-1720.
- [48] Wang L, Wu D G, Wang S, et al. Coupling catalytic hydrolysis and oxidation for CS₂ removal[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008, 20: 436-440.
- [49] Liu Yongchun, He Hong, Xu Wenqing, et al. Mechanism of heterogeneous reaction of carbonyl sulfide on magnesium oxide[J]. *J Phys Chem A*, 2007, 111: 4333-4339.
- [50] 姚远, 王睿. 改性活性炭材料烟气脱硫研究进展[J]. *石油化工*, 2008, 37(1): 198-202.

收稿日期: 2018-12-21

欢迎订阅《化工新型材料》, 邮发代号 82-816。

2020 年全年定价 480 元/年, 台港澳 240 美元/年, 国外 240 美元/年