

吸附技术在液体推进剂废水处理中的应用及展望

苟小莉, 刘祥萱

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 简要介绍了吸附技术的概况, 综述了吸附技术在液体推进剂废水处理中的应用现状, 包括活性炭处理偏二甲肼及胺类废水、活性氧化铝处理含氟废水的概况。介绍了吸附技术发展的新动态, 并对其在液体推进剂废水处理中的应用前景进行了展望。

关键词: 吸附技术; 液体推进剂; 废水处理; 应用; 展望

中图分类号: TQ425.217; V511

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2008)05-0022-04

Application and prospect of adsorption technology in waste water treatment of liquid propellants

GOU Xiao-li, LIU Xiang-xuan

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The general situation of adsorption technology is introduced in this paper. Its application actualities are summarized in the waste water treatment of liquid propellants, including the treatment of waste water of UDMH and amine by activated carbon and waste water containing fluorine by activated alumina. New developments of the adsorption technology are introduced and its application foreground is prospected in the waste water treatment of liquid propellants.

Key words: adsorption technology; liquid propellants; waste water treatment; application; prospect

近年来,随着我国航天事业的飞速发展,火箭推进剂的应用越来越广泛。其中,除了液氢、液氧之外,国内外使用的液体推进剂都具有不同程度的毒性。在这些液体推进剂的生产制造、储存、运输、转注、加注、发射等环节均会造成大气、水等周围环境的污染^[1]。我国是世界上水体污染较为严重的国家之一,液体推进剂的废水处理是当前航天、军事方面环境治理研究较多的课题之一。虽然吸附技术在某些液体推进剂的废水处理中已有应用,但由于其存在二次污染的问题,一直未能得到较好的发展。但是,随着吸附材料的形态、种类、吸附的实验研究方法和研究手段的不断丰富,以及其他技术与吸附技术的联合使用,使得吸附学科得到了快速发展。本文介绍了吸附技术在液体推进剂废水处理方面的应用现状,并对一些新型吸附材料及吸附研究手段等在推进剂废水处理中的应用进行了展望。

1 吸附技术处理液体推进剂废水的现状

目前,国内外常用的液体推进剂有肼类、胺类及

烃类等,这些火箭燃料的储存、运输、转注、加注,罐槽的洗消及发生跑、冒、滴漏时大量的冲洗水是废水的主要来源。液体推进剂废水中的污染成分比较复杂,以偏二甲肼废水为例,其废水中的有毒成分除偏二甲肼以外,还包括其氧化产物亚硝基二甲胺、硝基甲烷、四甲基四氮烯等^[2],其中亚硝基二甲胺是世界卫生组织公认的致癌物质。而且该废水的水量和浓度波动较大,也给废水治理带来了一定的困难。我国胺类和肼类废水是推进剂废水的主要存在形式之一^[1]。

对胺类和肼类推进剂废水的处理,研究较多的是化学处理方法,包括臭氧氧化处理、氯化法处理及催化氧化处理等。Lunn等^[3]用空气、 H_2O_2 以及 Cu^{2+} 氧化法,在弱碱性或中性溶液条件下对偏二甲肼废水进行处理。俄罗斯的 Ismagilov等^[4]提出了一套多相催化剂催化氧化法处理UDMH污水工业化的设备,该设备尺寸小、可移动,大大节约了费用。目前比较新的氧化方法还有光催化氧化技术,但由于催化剂活性和寿命的不稳定,在工程应用中还难

收稿日期: 2008-01-18

作者简介: 苟小莉(1975-),女,博士生,主要从事军事化学与烟火技术研究,029-84744976, gouxiaoli_1102@163.com; 刘祥萱(1963-),女,教授,博士生导师,主要从事化学及军用材料的研究。

以实现;由于所要求的高温、高压条件,超临界水氧化技术从安全角度考虑暂时还难以实现。

吸附技术在液体推进剂中的应用现状主要体现在以下几个方面。

1.1 活性炭处理偏二甲肼废水

通过对几种活性炭对偏二甲肼动态吸附量的研究表明,不同种类的活性炭对偏二甲肼的吸附量是不相同的。活性炭处理偏二甲肼污水的小型设备在1981年就投入了使用,设备的处理能力为 $0.5\text{ m}^3/\text{h}$,吸附剂为唐山TW-400[#]炭,空塔流速 $10\text{ m}^3/\text{h}$,吸附带长度为3 m。活性炭采用热空气再生,吹脱产生的含偏二甲肼的废水采用霍加拉特催化剂催化分解,分解产物有氮氧化物、氨、二氧化碳、二甲基亚硝胺等。经检测,各项指标均低于国家排放标准^[2]。

Hoeke开发了一种以活性炭作为催化剂,同时通入空气的活性炭处理工艺,使活性炭的处理速度加快。西北大学化学系任友贤等人也对类似工艺进行了研究,其处理对象是含有偏二甲肼、亚硝酸根、四甲基四氮烯等污染物的推进剂废水。工艺中包含两级活性炭反应槽,所用废水中偏二甲肼、四甲基四氮烯、 NO_2^- 、 CN^- 、亚硝基二甲胺、硝基甲烷的质量浓度分别为600、50、150、50、20、20 mg/L。二级处理

量为230 L废水,活性炭用 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 的热蒸汽再生。这种处理工艺复杂、操作麻烦,且由于活性炭对亚硝基二甲胺的吸附能力差,而水处理后的废水中亚硝基二甲胺的排放不能达标^[5]。

1.2 活性炭吸附法处理胺类废水^[6]

混胺废水中主要含有二甲苯胺、三乙胺。二甲苯胺为芳香族化合物,分子质量较大,极性较弱、疏水性较强,易被活性炭吸附。三乙胺为脂肪族化合物,分子质量较小,极性较大,有一定的水溶性,活性炭对其吸附能力低于对二甲苯胺的吸附。活性炭处理混胺废水的工艺流程见图1。

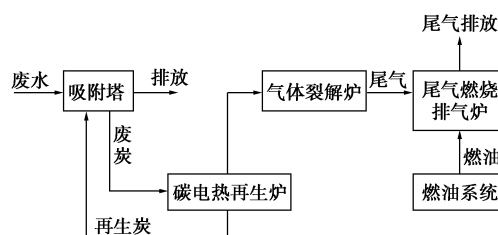


图1 活性炭处理混胺废水工艺流程图

此法处理的混胺废水的质量浓度为 $1\ 000\sim 1\ 500\text{ mg/L}$,活性炭使用太原5[#]、8[#]分柱装填,空塔流速 $10\text{ m}^3/\text{h}$,吸附带长度为 $3.2\sim 4.0\text{ m}$,出水质量浓度:三乙胺为 2 mg/L ,二甲苯胺为 0.5 mg/L 。

(上接第21页)

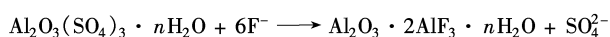
- [2] 李瑞华,洪定一.燕化公司合成润滑油装置生产水平分析及预测[J].石化技术,1994(3):139-141.
- [3] 唐占忠.乙烯齐聚制取线性 α -烯烃技术进展[J].辽宁化工,1994(2):13-17.
- [4] 丛云娥.烷基苯市场分析[J].日用化学品分析,2007,9(30):1-3.
- [5] 黄洪周.AOS原料 α -烯烃生产技术现状和今后发展建议[C]//2005表面活性剂技术经济文集,大连,2005:1-6.
- [6] 曾世虎.直链烯烃生产能力及合成工艺概况[J].化工技术经济,2003(21):14-17.
- [7] 钱伯章,朱建芳.线性烷基苯的市场分析和进展[J].江苏化工,2005,33(2):56-58.
- [8] 周爽,刘国良.线性 α -烯烃及应用[J].化学工程师,1994(6):34-36.
- [9] Skupinska J. Oligomerization of alpha-olefins to higher oligomers[J]. Chem Rev, 1991, 91(4):613-648.
- [10] Keim W, Kowaldt F H, Goddard R, et al. Novel coordination of (benzoylmethylene) triphenylphosphane in nickel oligomerization[J]. Angew Chem Int Ed Engl, 1978, 17(6):466-467.
- [11] 潘爱祥.乙烯齐聚法制取线性 α -烯烃技术进展[J].云南化工,2007,34(1):1-5.
- [12] 黄文.生产线性 α 烯烃和聚 α 烯烃的现代技术(一)[J].化工科技动态,1995,11(10):21-24.
- [13] Tomov A, Kurtev K. Binuclear nickel-ylide complexes as effective ethylene oligomerization/polymerization catalysts [J]. J Mol Catal, 1995, 103:95-103.
- [14] Small B, Brookhart M. Iron-based catalysts with exceptionally high activities and selectivities for oligomerization of ethylene to linear α -olefins [J]. J Am Chem Soc, 1998, 120(28):7143-7144.
- [15] Song C L, Tang L M, Li Y G, et al. Preparation of linear α -olefins to high-molecular weight polyethylenes using cationic α -diimine nickel: II. Complexes containing chloro-substituted ligands [J]. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2005, 44:1964-1974.
- [16] Rogers J S, Bazan G C, Sperry C K. Ethoxyboratabenzene zirconium complexes: Catalysts for α -olefin production [J]. J Am Chem Soc, 1997, 119(39):9305-9306.
- [17] Britovsek G J P, Gibson V C, Kimberley B S. Novel olefin polymerization catalysts based on iron and cobalt [J]. Chem Commun, 1998(7):849-850.
- [18] Mitsubishi Chemical Corporation. Process for producing alpha-olefin oligomer: US, 5856612 [P]. 1999-01-05.
- [19] Rainer E, Oliver H, Peter W J, et al. The role of metallacycles in the chromium-catalyzed trimerization of ethylene [J]. Organometallics, 1997, 16(8):1511-1513.
- [20] Briggs J R. The selective trimerization of ethylene to hexene [J]. Chem Soc J Chem Commun, 1989(6):674-677.
- [21] Phillips Petroleum Company. Chromium compounds and uses thereof: US, 5438027 [P]. 1995-08-01.
- [22] Killian C M, Johnson L K, Brookhart M. Preparation of linear α -olefins using cationic nickel (II) α -diimine catalysts [J]. Organometallics (Communication), 1997, 16(10):2005-2007. ■

可见,活性炭吸附法处理混胺类污水是成功的。

1.3 活性氧化铝吸附法处理含氟废水^[6]

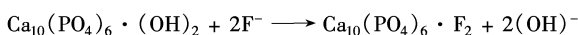
液氟是现有液体推进剂中能量最高的氧化剂,一些固体推进剂中还含有氟氨基化合物、氟碳化合物、氟氮化合物和氟硼化合物等。航天工业含氟废水来源于推进剂氟化物的原材料加工及含氟废气吸收产生的废水。吸附法处理含氟废水是将氟吸附在吸附剂表面,生成难溶的氟化物。目前,主要采用的吸附剂有活性氧化铝、磷酸三钙、氢氧化镁等,其中,活性氧化铝吸附法是深度除氟的最有前途的方法之一。

活性氧化铝即 γ 型氧化铝,比一般氧化铝的表面积大,且具有离子交换树脂的交换能力,其与氟离子的交换吸附反应如下:

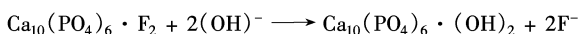


活性氧化铝的交换吸附能力达到饱和以后,采用硫酸铝、氢氧化钠等再生液进行再生,其再生效果较好且比较经济。活性氧化铝处理含氟废水时,废水原始浓度不宜太高,活性氧化铝的粒径以 0.5 ~ 2.0 mm 为宜,原水的 pH 在 5.0 ~ 6.5 时吸附容量最高。

用过磷酸钙作吸附剂时,带有羟基的磷酸钙中的 OH^- 基团与水中溶解的氟进行下面的交换反应:



交换饱和以后需用质量分数为 1% 的氢氧化钠溶液再生。其反应式如下:



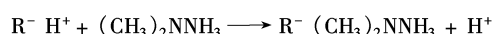
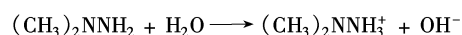
过磷酸钙吸附法是净化含氟废水比较有前途的方法。

含氟废水其他的吸附方法还有离子交换树脂吸附法、活性炭吸附法、磺化煤吸附法等。但是,当原废水中含有其他阴离子、有机物及盐类时,会对除氟效果产生较大的影响,因此限制了这些方法的推广和使用。

1.4 离子交换纤维处理偏二甲胍废水

离子交换纤维(IEF)是一种新型的纤维状离子交换材料,其直径小、离子交换层薄、传质系数大,吸附性能优于传统颗粒状离子交换剂^[7],目前已在湿法冶金、火炸药废水处理、糖汁脱色与提纯、果汁处理等方面取得了良好的应用效果^[8]。

李鑫等^[9]研究了自制的强酸性阳离子离子交换纤维对偏二甲胍废水的吸附性能,研究发现,推进剂废水中偏二甲胍质量浓度在 50 ~ 200 mg/L 时,IEF 都能够进行快速吸附。其给出的吸附机理为:



其中 $\text{R}^- \text{H}^+$ 表示离子交换剂, R^- 为固定基团, H^+ 为游离离子。

动态实验表明,流速对穿透曲线的影响较大,随着流速的增加,穿透时间缩短,废水处理量减少,柱利用率降低。与树脂相比,IEF 的吸附速率快,相同流速下对偏二甲胍废水的吸附量是树脂的 3.86 倍,适用于较高流速下的吸附操作过程。

1.5 活性碳纤维处理偏二甲胍废水

活性碳纤维(ACF)是随着碳纤维工业发展起来的一种新型吸附材料。它具有优良的结构与性能特征,与粉末及颗粒活性炭相比其含碳量高、比表面积大、微孔丰富、孔径小且分布窄,具有较大的吸附量和较快的吸附速度,再生脱附容易,工艺灵活(可制成纱、布、毡和纸等制品)。目前 ACF 已被广泛应用于化工环保、防辐射、电子、医药食品等行业,尤其是在水处理方面^[10]。

笔者所在课题组研究了活性碳纤维对偏二甲胍废水的吸附,对于质量浓度为 1 000 mg/L 的废水样,在活性碳纤维用量为 0.8 g 时,脱除率接近 90%。与颗粒活性炭相比,用量为其 1/10,而脱除效率却高于颗粒炭的脱除效率。易再生,再生后其吸附效率无明显降低,可望被用于液体推进剂废水的深度处理。

2 吸附技术的发展动向及在液体推进剂废水处理中的应用展望

目前,国外重点发展的研究领域有分子模拟、新型吸附剂、高效吸附分离过程等。我国目前吸附学科尽管发展很快,但主要处于以革新为特征的量变发展阶段。我国目前吸附学科的现状和动向主要集中在新型吸附剂的研究及实验手段、吸附剂再生等方面。

2.1 新型吸附材料的研制

目前吸附材料的主体仍然是碳质吸附剂和沸石类吸附剂,但是除传统的颗粒状外,纤维状^[11]、膜状^[12]等形状不同的吸附剂已经出现;许多新型的吸附剂,如复合吸附剂、碳纳米管、MCM-41^[13]等也已出现;吸附剂的表面改性研究越来越受到了人们的重视,通过改性吸附剂的表面性质更加丰富。如利用合适的氧化剂在适当的温度下对活性炭材料表面的官能团进行氧化处理,从而提高表面含氧官能团的含量,增强表面的极性即亲水性^[14];通过复合等

技术,吸附剂的功能丰富了。通过把活性炭与生物活性物质复合,可使吸附与生物降解相耦合;通过在硅胶表面复合热敏聚合物,可使硅胶的亲水憎水性随温度变化;吸附技术还可与催化、氧化及微波技术等联用。

随着新型及复合型吸附剂的出现,一些高效吸附剂将被应用于液体推进剂废水的处理;随着分子筛、活性炭等传统吸附剂的改性研究的深入,其孔结构得到进一步优化,使得液体推进剂废水中复杂多样的成分将有望被全部吸附在吸附剂的孔隙中,解决诸如活性炭对偏二甲肼废水中的亚硝基二甲胺吸附效果差等问题;并且,与其他技术的联用也将更有利于废水的深度处理。

2.2 实验手段

实验方法和技术研究包括 X 射线衍射表征吸附剂的孔径结构,红外光谱(IR)研究某些气-固吸附的吸附过程,核磁共振($^1\text{H-NMR}$)为 Monte-Carlo 晶格动力学模型提供参数,微量量热计法研究吸附热^[15],微分扫描量热法研究有机物与活性炭的相互作用能,电抗谱研究表面电性质对吸附的影响以及气体在活性炭和沸石上的吸附平衡,温度程序物理吸附法测吸附等温线等。分子模拟作为一种新的研究手段,可从微观和本质上认识吸附的物理和化学基础以及吸附平衡和吸附动力学,揭示、发现新的现象、新的规律和新的原理,因此已经成为当今吸附领域最热点的研究课题之一。

多种研究手段的出现,将在液体推进剂废水吸附的理论研究中起到重要作用,采用分子模拟等方法设计适合液体推进剂废水的吸附剂材料将成为未来研究的新热点。

2.3 吸附剂的再生

传统的吸附剂再生方法有热再生、药物再生、生物再生及变压脱附技术等^[16]。这些方法各有优缺点,其中加热再生法是所有再生方法中应用、研究最多也是最成熟的一种方法,但传统变温解吸法需加热的的时间很长,能量消耗大,且经多次加热冷却后,烧损严重。

目前,除了上述传统再生方法之外,应用较多的还有电化学再生法、超声波再生法、催化湿式氧化再生法、超临界流体再生法及微波辐射再生法。其中超临界流体再生法^[17]以其再生温度低,吸附剂损耗小,可收集吸附物,利于重新利用或集中焚烧,切断二次污染,再生操作连续化,再生设备占地小,操作

周期短,节约能耗等优点而有着巨大的发展潜力。微波再生^[18]则以加热速度快,节能高效,易于控制,无污染,操作简单等而得到了广泛的应用。

多种高效再生技术的出现和应用,将大大提高吸附剂的有效利用率,降低液体推进剂废水处理的费用,并将大大减少吸附技术处理此类废水时所存在的二次污染问题。

虽然吸附分离技术仍有不足之处,但随着新型吸附剂的出现和应用,新型的分离技术在工业上的成功运转,操作过程连续吸附与脱附的实现,都推动着吸附技术的发展。吸附技术将在液体推进剂废水处理中发挥越来越大的作用。

参考文献

- [1] 国防科工委后勤部. 火箭推进剂监测防护与污染治理[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993: 744 - 843.
- [2] 刘祥莹, 王焯军, 郭和军, 等. 气相色谱/质谱法分析液体推进剂偏二甲肼氧化产物[J]. 分析实验室, 2003, 22(增刊): 481 - 484.
- [3] Lunn G, Sansone E B. Oxidation of 1, 1-dimethylhydrazine(UDMH) in aqueous solution with air and hydrogen peroxide[J]. Chemosphere, 1994, 29(7): 1577 - 1590.
- [4] Ismagilov Z R, Kerzhentsev M A, Ismagilov I Z, et al. Oxidation of unsymmetrical dimethylhydrazine over heterogeneous catalysts solution of environmental problems of production, storage and disposal of highly toxic rocket fuels[J]. Catalysis Today, 2002, 75: 277 - 285.
- [5] 胡文祥. 载人航天工程火箭推进剂安全科学概论[M]. 北京: 解放军出版社, 2003: 363 - 366.
- [6] 段世铎, 谭逸玲. 界面化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990: 4 - 15.
- [7] 陈定茂. 偏二甲肼及其有关环境化学问题[J]. 环境科学丛刊, 1985, 6(3): 14 - 22.
- [8] Soldatov V S, Shunkevich A A, Sergeev G L. Synthesis, structure and properties of new fibrous ion exchangers[J]. React Polym, 1988, 7: 159 - 172.
- [9] 李鑫, 曾庆轩, 冯长根, 等. 离子交换纤维对偏二甲肼的吸附性能[J]. 过程工程学报, 2006, 6(1): 23 - 27.
- [10] 邓兵杰, 曾向东, 李惠民. 活性炭纤维及其在水处理中的应用[J]. 四川化工, 2006, 9(4): 47 - 49.
- [11] 张玉忠, 郑领英, 高从. 液体膜分离技术及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 4 - 6.
- [12] 徐勇华, 李晚谊, 王剑飞, 等. 新型介孔分子筛 Cu/MCM-41 的合成和表征及其催化氧化性能研究[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(1): 72 - 75.
- [13] 林世军, 周春晖, 王春伟, 等. 无机层粘粘土材料的制备和应用研究新进展[J]. 化工矿物与加工, 2006, 35(5): 4 - 8.
- [14] Boehm H P. Some aspects of the surface chemistry of carbon blacks and other carbons[J]. Carbon, 1994, 32(5): 759 - 769.

实验对象的流场板是镀金铝板。Tüber 等^[8]研制出用于测试的透明电池,直接观测到了液态水从扩散层中渗出到流道进而形成小水珠、水珠长大、再到堵塞流道的现象,并测量了电池性能和流道中发生水堵的关联状态,探讨了不同的空气流量、温度、空气加湿度和扩散层疏水性和亲水性对电池性能的影响。但研究得到的结论局限于 30℃、低电流密度的运行状态。Feindel 等^[9]认为 NMR 光谱的无损特性使之在多相系统在线观测上有独特的应用,他们使用 ¹H-NMR 光谱检测操作状态下 H₂/O₂ 质子交换膜燃料电池的水分布,包括流道、电流收集器、碳氢类膜电极(MEA)和膜周围的催化剂。Jürgen 等^[10]采用碳氢类膜电极 MRED(resistance and electrode diffusivity)方法,测量纯欧姆阻抗、电极的有效扩散、燃料电池的自由气体体积。纯的欧姆阻抗用来确定膜中的水含量;自由气体体积可推算出阴、阳极的水含量。

2 质子交换膜燃料电池内水管理模型

2.1 通道内水的传递

一个理想的流道设计应该在电极表面有均匀的反应物浓度和温度,相对合理的压降,整个电池的膜水合,避免进口膜失水,避免多孔电极的水淹和通道出口的水淹。质子交换膜燃料电池流体通道的设计需兼顾传递和压降特性。Ge 和 Yi^[11]最早反应物传递采用直通道,在低进口湿度时,逆流好于并流。交指型流场^[12]在完全润湿条件下好于一般流场,在高电流密度时,有助于过量水移出。Yi 等所在课题组^[13]应用对流和毛细压力扩散机理描述气体多孔电极的液体传输,提出了一个交叉梳状流道质子交换膜燃料电池的二维、两相多组分传递模型,研究了气相和液相水动力学对空气阴极质子交换膜燃料电池性能的影响。对以空气为阴极反应物的交叉梳状流道质子交换膜燃料电池进行了运行工况和设计参数的数值模拟。Li 等^[14]指出蛇型流道相比于交叉指型流道,在将反应气带入催化层进行电化学反应和从反应区及电极去除产生的水效果更好。但蛇型流道有下述问题:首先反应路径相对较长,导致明显的压降和功率损失。其次,从进口到出口反应物浓度不断降低,导致大尺寸单电池明显的能斯特损失。

最重要的是,经常导致通道进口部分膜失水和出口部分的水淹。由于大量水被反应气带入下游并聚集,这就出现了小电池行为良好而大电池行为不好的现象。其基本的原因就是缺少质子交换膜燃料电池放大定律。

Quan 和 Lai^[15]采用 VOF 模拟蛇型流道中水行为,考察了不同操作条件下(表面亲水性、通道形状和空气进口流速)水行为、水含量和两相压降,采用 VOF 模拟、伪稳态模拟得到一系列结果。这些研究工作的一个共同问题是事先假定液态水处于计算域中的某个位置,这使得模拟缺少物理真实性且属于伪稳态模拟,在提供过程的重要预见性上不是很成功。Yan 等^[16]发现,当操作电压高于 0.6 V 时流道设计对电流密度的影响可以忽略。电池行为依下列顺序逐渐升高:并行流道、Z 型流道、蛇型流道、带有挡板的 Z 型流道、带有挡板的并行流道。带有挡板的 Z 型流道有最大的压降,其后依次是蛇型流道、带有挡板的并行流道、Z 型流道、并行流道。带有挡板的并行流道是同时考虑电池行为和压降的最好选择。Xu 和 Zhao^[17]则认为通过优化流道设计可以增强通过气体扩散层(GDL)的对流,是减少阴极水淹的有效方式,同时增强传质,提高电池行为和操作稳定性。

2.2 扩散层中水的传递

Wang 和 Cheng^[18]最先提出复合相混合物模型,应用非饱和流体理论,假设多孔介质内气相压力为常数,液相分压为气相分压和毛细压力之和,并描述了阴极侧水的传递及水淹现象。Pasaogullari 等^[19]发展了复合相混合物模型,将复杂多相的多孔体系看成一种在大尺度上均匀分布的虚拟连续介质,即不同流速层中流体分子间碰撞交换动量,宏观表现为流体是以黏滞形式出现的流动,从而可以利用表面观当量参数的唯象方法进行研究。同前一类模型不同之处在于,该模型无需知道孔内气相分压。Meng 等^[20]提出的三维 PEFC 模型包含 4 个子模型用来解释两相现象:催化剂层的催化剂覆盖模型、气体扩散层的两相模型、GDL-通道截面的液体覆盖模型、气体通道的两相模型。他们首次提出了液态水在 GDL/GC 表面的界面覆盖模型,用来解释水滴在 GDL

(上接第 25 页)

[15] 张耀君,辛勤. 微量热法研究 γ -Mo₂N 催化剂表面氢的微分吸附热[J]. 物理化学学报, 2000, 16(5): 464 - 467.
[16] 立本英机,安部郁夫. 活性炭的应用技术-其维持管理及存在问

题[M]. 高尚愚,译. 南京:东南大学出版社, 2002: 30 - 125.
[17] Valce G. Supercritical carbon dioxide dsorption of organics from activated carbon and zeolite[J]. Environ Prog, 1990, 9(4): 204 - 210.
[18] 傅大放. 活性炭微波辐照再生试验[J]. 中国给水排水, 1997, 3(5): 7 - 10. ■