

用于湿法净化黑烟表面活性剂筛选的数学模型研究

谢旭文^{1,2}, 李彩亭^{1,2*}, 路培^{1,2}, 蔡志红^{1,2}, 周杨鑫^{1,2}

(1. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082; 2. 环境生物与控制教育部重点实验室(湖南大学), 长沙 410082)

摘要: 湿法净化燃煤窑炉中的黑烟, 关键在于表面活性剂对炭黑的润湿、增溶和降低表面张力作用。根据研究筛选的数学模型, 计算 AEO-9 和 SDBS 混合表面活性剂溶液的亲水亲油平衡值 HLB、临界胶束浓度 CMC 与胶束形成吉布斯自由能 ΔG_{mf}^0 。通过实验测得不同配比 AEO-9 和 SDBS 溶液的 CMC 和处于该 CMC 时黑烟的去除效率 η , 分析混合溶液中 HLB、CMC、 ΔG_{mf}^0 与 η 的关系, 建立新的数学模型。结果表明, 理论 CMC 与实测 CMC 吻合度较好; HLB 与 $\ln[\text{CMC}]$ 线性相关; ΔG_{mf}^0 与 η 存在二次函数关系。降低 CMC 可以有效增大 HLB, 增加溶解度, 减小形成胶束的吉布斯自由能, 降低表面张力, 使形成胶束的反应更容易自发进行, 有效提高黑烟去除效率。

关键词: AEO-9; SDBS; 亲水亲油平衡值; 临界胶束浓度; 吉布斯自由能; 黑烟

中图分类号: X701.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)10-2541-06

Study on the Mathematic Model About Surfactants Screening Used for Smoke Wet Purification

XIE Xu-wen^{1,2}, LI Cai-ting^{1,2}, LU Pei^{1,2}, CAI Zhi-hong^{1,2}, ZHOU Yang-xing^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Key Laboratory of Environmental Biology and Pollution Control (Hunan University), Ministry of Education, Changsha 410082, China)

Abstract: Surfactants increase wetting, solubilization of carbon black and reduce interfacial tension between surfactants and carbon black are very important for the wet removal of furnace smoke. Calculated hydrophile-lipophile balance value (HLB), critical micelle concentration (CMC) and Gibbs-free-energy (ΔG_{mf}^0) of mixed surfactants solution generated on the basis of selected mathematical models. The CMC of AEO-9/SDBS solution at different ratios and smoke removal efficiency at the CMC were gained by experiments. The relation among HLB, CMC and ΔG_{mf}^0 in mixed surfactants were analyzed. At last, new mathematic models were established about them. The results showed that the calculated data had good agreement with the experimental data. HLB was linearly correlate with $\ln[\text{CMC}]$. There was a quadratic relationship between ΔG_{mf}^0 and smoke removal efficiency. The reducing CMC could effectively increase HLB value and solubility, while the ΔG_{mf}^0 and surface tension were both decreased, which could form micelles more spontaneously and enhance smoke removal significantly.

Key words: AEO-9; SDBS; hydrophile-lipophile balance value; critical micelle concentration (CMC); Gibbs free energy; smoke

燃煤窑炉排放黑烟是由煤炭的不完全燃烧引起的, 黑烟的主要成分是炭黑和分子碳氢化合物粒子。炭黑微粒是在煤颗粒周围的富燃料区中产生的, 是煤挥发分在高温缺氧条件下进行脱氢、裂化、键合等作用后形成的高碳碳氢化合物, 是聚苯型烃类物质, 其中有相当比例的强致癌物质。烟气中的碳氢化合物在一定条件下会引起光化学烟雾污染^[1,2]。国外的能源结构以电能和石油为主, 黑烟污染的问题不突出, 因此燃煤窑炉烟气污染控制方面的报道很少。国内曾有人用另设燃烧室, 向燃烧室内喷油燃烧烟气中的炭黑, 再通过烟气降温、旋风分离、布袋收尘等技术联合处理窑炉烟气消烟问题, 但该方法投资较大, 运行成本较高, 且消烟也不理想。目前, 我国对于燃煤窑炉烟气净化的研究取得了一定成果, 但仍主要局限于除尘和脱硫两方面, 而消烟成了烟气污染控制的难题^[3,4]。在燃煤窑炉烟气净化方面, 湿

式除尘脱硫技术除尘效率较高, 具有一定的脱硫能力, 且投资低, 运行管理简便, 适合我国国情, 目前得到普遍重视和应用^[5]。

湿法除黑烟主要利用表面活性剂的 2 种作用机制: 一是通过降低表面张力, 提高炭黑粒子的运移能力; 二是利用胶束的溶解作用提高炭黑颗粒在水中的溶解度。表面活性剂溶液可以改善溶液对炭黑的润湿性能, 当该溶液在废气净化装置中与炭黑接触时, 可以去除烟气中的炭黑^[6,7]。炭黑表面有一层焦油状物质, 是疏水性的, 不能被水有效润湿, 所以, 常规的湿式除尘脱硫技术不能有效消烟。把表面活性

收稿日期: 2009-12-08; 修订日期: 2010-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878080); 长沙市科技重大专项(K0902006-31)

作者简介: 谢旭文(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为黑烟净化的方法及机制, E-mail: xiexuwen8701@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ctli@hnu.cn

剂投放进湿式除尘脱硫用的吸收液中,可以在除尘脱硫的同时实现高效消烟。

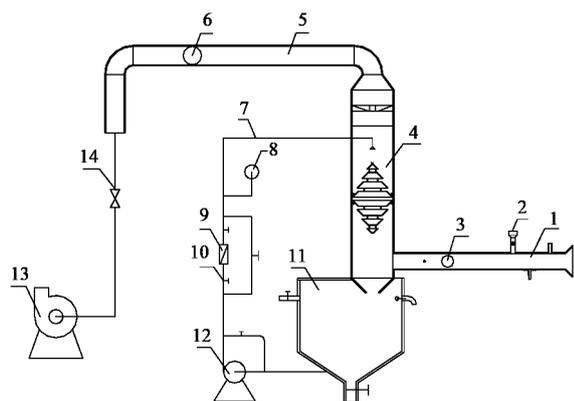
本试验研究了以阴离子表面活性剂和非离子表面活性剂作为黑烟吸收液时,表面活性剂的亲水亲油平衡值(hydrophile-lipophile balance value, HLB)和临界胶束浓度(critical micelle concentration, CMC)之间的关系,并揭示了湿法净化黑烟的去除效率(η)随吉布斯自由能(ΔG_{mf}^0)变化的规律。

1 材料与方法

1.1 实验材料与设备

实验所用试剂和材料主要有:十二烷基苯磺酸钠 SDBS(分析纯,上海陆忠化工有限公司),脂肪醇聚氧乙烯醚 AEO-9(分析纯,上海陆忠化工有限公司),去离子水,黑烟(湖南澧陵某陶瓷厂)。

实验所用仪器包括:JYW-200A 自动界面张力仪(承德精密仪器公司);METTLER AE200 电子分析天平(梅特勒托利多仪器上海有限公司);SB-3200 超声波清洗机(上海新芝生物技术研究所);伞罩型湿式除尘脱硫装置(专利号:CN200420069314.9),示意图如图 1 所示;TH-880VI 烟气采样器(武汉市天虹智能仪表厂)。



1. 进气管 2. 加料器 3. 进口管测试断面 4. 湿式洗涤器
5. 出气管 6. 出口管测试断面 7. 进水管 8. 压力表 9. 流量计
10. 阀门 11. 循环水箱 12. 泵 13. 风机 14. 风量调节阀

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Sketch of experimental equipment

实验中,黑烟由进气管进入洗涤器内,经伞形罩(呈对边反向放置)后,黑烟再通过除雾器脱水,由引风机抽出排放。吸收液由水泵从循环水箱中抽出上清液,经喷嘴喷下。洗涤后的吸收液,经排液管流入循环水箱。定期更换循环水箱中的吸收液,并定期清理沉淀污泥。吸收液的流量通过阀门调节,风量通

过风量调节阀控制。进行黑烟净化实验时,用发尘器定量发尘,在进气管的测试断面和出气管的测试断面处分别采样分析。黑烟中的炭黑通过伞形罩的惯性碰撞、拦截和吸收液的润湿、吸收及颗粒间的吸附,实现高效脱黑烟。伞形罩使得气、液、固能在最大范围内充分接触,促进了气、液、固的混合,增加了接触面积,延长了各相在洗涤器中的停留时间,有利于黑烟的净化。

1.2 实验方法

1.2.1 CMC 的测定

在一系列 100 mL 的容量瓶中加入不同量的表面活性剂贮备液,定容后放入超声波清洗机中,在功率为 40 W 的条件下超声 6 min 得到一系列不同浓度的溶液。在室温条件下,按浓度从低到高顺序依次测量表面张力,每种浓度测量 3 次取平均值。

1.2.2 伞罩型净化装置除黑烟试验

分别配制 AEO-9、SDBS 量浓度比为(1:0.5、1:1、1:1.5、1:2、1:10)的混合液作为黑烟的吸收液,在风速为 14 m/s,液气比为 0.8,黑烟浓度为 3 000 mg/m³的室温条件下,利用伞罩型湿式除尘脱硫装置进行黑烟的去除实验,在该装置的入口和出口处利用烟气采样器进行采样,根据入口和出口黑烟浓度变化得到黑烟的去除效率。

2 表面活性剂数学模型的研究

2.1 表面活性剂亲水亲油平衡值 HLB 的计算

表面活性剂为有亲水基团和亲油基团的两亲分子,具有润湿、乳化、增溶、发泡与消泡等基本作用。其亲水性如何,即是否容易溶于水,在实际应用中需要知道。HLB 表示表面活性剂的亲水基团和亲油基团具有的亲水亲油平衡值,是为选择乳化剂而提出的一个经验指标,HLB 值范围及其应用性能如表 1 所示。根据 HLB 值即可判断乳化剂的适用特性^[8],即有一定 HLB 值的乳化剂,对一定使用目的才有最佳的使用效率。

表 1 HLB 值范围及其应用性能

Table 1 Scope and application of HLB value

HLB 值	用途	HLB 值	用途
1.5 ~ 3	w/o 型消泡剂	8 ~ 18	o/w 型乳化剂
3.5 ~ 6	w/o 型乳化剂	13 ~ 15	洗涤剂
7.0 ~ 9	润湿剂	15 ~ 18	增溶剂

2.1.1 单个表面活性剂 HLB 值的计算

目前测定表面活性剂的 HLB 值已有许多方法,但大多需要进行繁琐的试验,费时较长。葛里芬最早

提出了 HLB 值计算式^[9],由计算式可立即得出 HLB 值.而对于已知结构的表面活性剂的研究和应用以及新结构的表面活性剂的分子设计来说,采用有关公式计算 HLB 值十分方便,精度一般可以满足生产和应用的需要.

表面活性剂 AEO-9 与 SDBS 的 HLB 值如表 2 所示,均采用分子结构式法,这种方法假定表面活性剂的亲油基和亲水基部分对整个分子的亲油性和亲水性的贡献仅与各部分的相对分子质量有关^[10]. $HLB = W_E/5$ 适用于亲水链为聚氧乙烯的一般非离子表面活性剂;而 $HLB = A - B \times n$ 适用范围为阴离子表面活性剂.式中, W_E 为分子中乙氧基单元占整个分子的质量分数,%; n 为表面活性剂亲油基的链长, A 、 B 为离子型表面活性剂的系数.AEO-9 与 SDBS 的亲水亲油平衡值属于水包油型乳化剂的应用范畴,而炭黑是煤的挥发分在高温缺氧条件下形成的高碳碳氢化合物,是疏水性的聚苯型烃类物质.投加这 2 种表面活性剂就可形成以水为连续相,以不溶于水的炭黑为分散相的水包油型乳状液,从而使炭黑的亲水性增强.

表 2 单个表面活性剂的 HLB 值
Table 2 HLB of single surfactant

表面活性剂名称	表面活性剂类型	计算公式	HLB
AEO-9	非离子表面活性剂	$W_E/5$	13.61
SDBS	阴离子表面活性剂	$A - B \times n$	9.45

2.1.2 混合表面活性剂 HLB 值的计算

对于混合表面活性剂来说,其 HLB 值可由组成表面活性剂的 HLB 值相加得到,即 HLB 值具有加和性.例如, A 、 B 这 2 种表面活性剂混合之后的 HLB 值可按式(1)计算^[10]:

$$HLB = (W_A \times HLB_A + W_B \times HLB_B) / (W_A + W_B) \quad (1)$$

式中, W_A 为表面活性剂 A 的质量; W_B 为表面活性剂 B 的质量; HLB_A 为表面活性剂 A 的 HLB 值; HLB_B 为表面活性剂 B 的 HLB 值.

2.2 表面活性剂临界胶束浓度 CMC 的计算

表面活性剂分子在低浓度时以单分子状或离子状分散于溶液中,表现出表面吸附、表面张力降低等界面现象;但是当表面活性剂达到一定浓度时(即临界胶束浓度),分子相开始聚集,然后逐渐增大,不少物理化学性质发生突变.增溶作用只有出现胶束后才产生,并随着 CMC 以后浓度的增加而增长.

混合表面活性剂的临界胶束浓度^[9]可以写成:

$$CMC = X_1^m CMC_1 + X_2^m CMC_2 + \dots + X_i^m CMC_i \quad (2)$$

式中 X_i^m 是胶束中表面活性剂 1 的摩尔分数.然而,由于胶束中表面活性剂的组成未经观测分析是未知的,所以式(2)对预测混合体系的 CMC 没有作用.如果是指溶液的组成,表面活性剂混合物的 CMC^[9]可以写成下式:

$$1/CMC = X_1/(f_1 CMC_1) + X_2/(f_2 CMC_2) \quad (3)$$

上式可以扩展为 3 组分或更多组分的表面活性剂体系:

$$1/CMC = X_1/(f_1 CMC_1) + X_2/(f_2 CMC_2) + X_3/(f_3 CMC_3) + \dots + X_i/(f_i CMC_i) \quad (4)$$

式中 f_i 是表面活性剂 1 在溶液中的活度系数,如果是在理想溶液中 $f_1 = f_2 = 1$ ^[9],为了简化计算,在计算复配溶液的临界胶束浓度^[6,9]时采用如下公式:

$$1/CMC = X_1/CMC_1 + X_2/CMC_2 \quad (5)$$

式中,CMC 为混合表面活性剂的临界胶束浓度, mol/m^3 ; CMC_i 为第 i 种表面活性剂的临界胶束浓度, mol/m^3 ; X_i^m 为胶束中第 i 种表面活性剂的摩尔分数; X_i 为溶液中第 i 种表面活性剂的摩尔分数.

2.3 表面活性剂吉布斯自由能的计算

根据 Gibbs-Helmholtz 公式^[11]计算表面活性剂溶液中胶束形成时的吉布斯自由能 ΔG_{mf}^0 :

$$\Delta G_{mf}^0 = RT \ln [CMC] \quad (6)$$

离子表面活性剂在胶束形成过程中的吉布斯自由能^[11]如下:

$$\Delta G_{mf}^0 = 2RT(1 + \beta) \ln [CMC] \quad (7)$$

式中 β 是对离子表面活性剂反离子结合度,它与溶液浓度、温度或链长无关,在临界胶束浓度附近等于 0.87^[12].

非离子表面活性剂胶束形成过程中的吉布斯自由能^[11]可以写为:

$$\Delta G_{mf}^0 = RT \ln [CMC] \quad (8)$$

式中,CMC 为表面活性剂的临界胶束浓度, mol/m^3 ; T 为测定温度, K; ΔG_{mf}^0 为体系的自由能, kJ/mol .

表面活性剂的 CMC 与表面活性剂的 HLB 之间有一定的对应关系.表面活性剂溶液的很多性质如表面张力、电导率、渗透压等在溶液的浓度大于 CMC 之后基本保持不变,可以用来测定表面活性剂的 HLB 值^[13].根据式(1)和式(5)计算复配体系的 HLB 和 CMC,图 2 对两者进行回归分析,可以看到 AEO-9 与 SDBS 复配体系的 HLB 随着 CMC 的升高

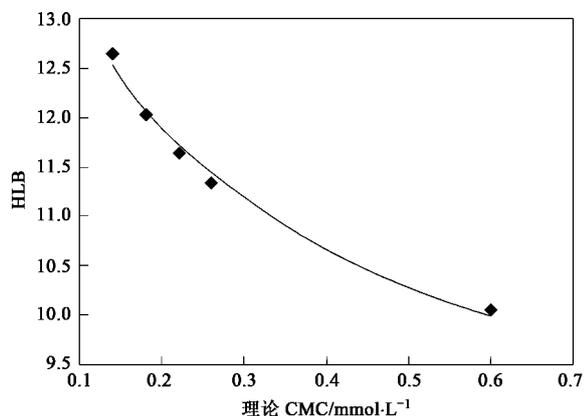


图2 HLB与理论CMC之间的关系

Fig.2 Relation of HLB and calculated CMC

而降低,拟合得到关系式: $HLB = -1.7426 \ln[CMC] - 2.9493$, 预测的趋势线可靠性高达 0.9891.

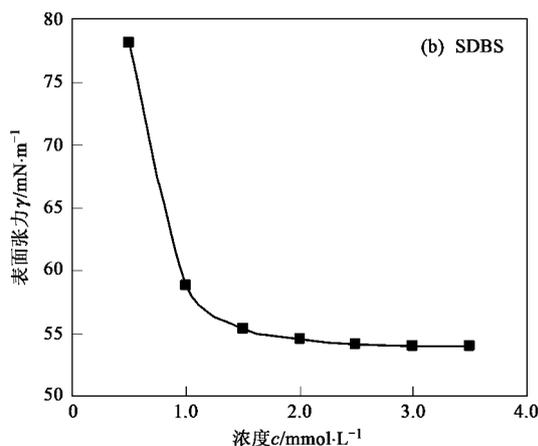
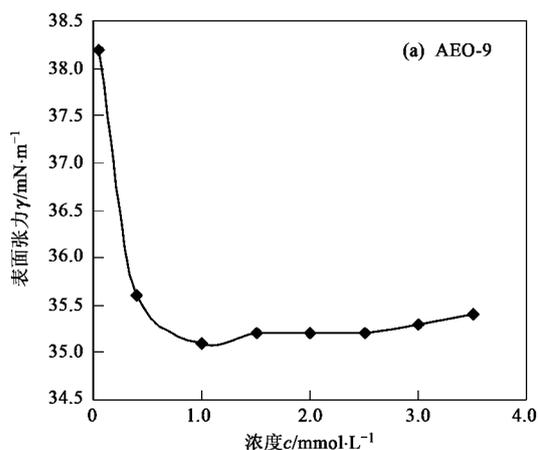


图3 单个表面活性剂的CMC

Fig.3 CMC of single surfactant

3.2 复配表面活性剂 CMC 的测定结果

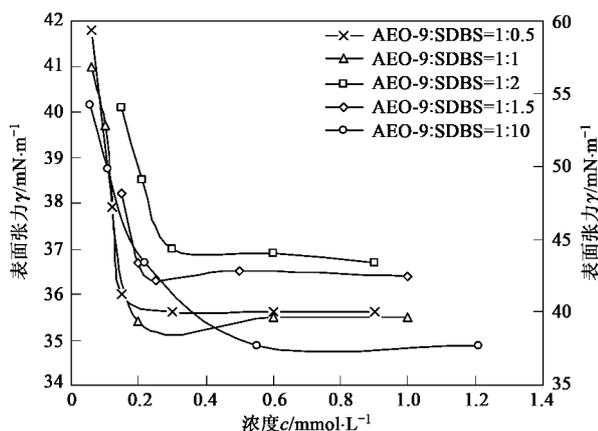
复配表面活性剂常显示出单一表面活性剂难以达到的表面特性,如复配表面活性剂到达临界胶束浓度时的表面张力有时可显著低于单一表面活性剂溶液,甚至可能出现超低表面张力等.图4是 AEO-9 与 SDBS 不同配比时表面张力随临界胶束浓度的变化趋势.可以看到,随着 SDBS 在溶液中含量增多,溶液的 CMC 越来越高,而表面张力却没有随着变小.实验测得的 AEO-9 与 SDBS 混合体系的 CMC 与式(5)计算的 CMC 数值相差 0.01 ~ 0.06 mmol/L, 相对误差 < 10%,说明式(5)能够用来预测该混合体系的 CMC.

3 结果与讨论

3.1 单个表面活性剂 CMC 的测定结果

临界胶束浓度(CMC)即表面张力值发生突变时溶液的浓度,根据表面张力仪所测张力值 γ 与表面活性剂浓度 c 作图3,可以看出随着溶液浓度的增加,表面张力值(γ)一直降低,刚开始急剧减少经过某点之后则缓慢减少,突变点处 AEO-9 与 SDBS 的浓度值(CMC)分别为 0.15 mmol/L、1.3 mmol/L. CMC 是在一定温度下某表面活性剂形成胶束的最低浓度,实际上是一个范围不宽的浓度区域,一般离子型表面活性剂的 CMC 大致在 1 ~ 100 mmol/L 之间,非离子型表面活性剂的 CMC 则要小 2 个数量级,在 0.1 mmol/L 以下^[14]. 实测值与经验值在数量级上一致,所用表面活性剂皆为分析纯,实验所得单个表面活性剂的 CMC 值可用于复配表面活性剂 CMC 的研究.

由于在非离子表面活性剂与阴离子表面活性剂混合过程中,当溶液中形成混合胶束时,离子型表面活性剂 SDBS 的极性基之间插有非离子型表面活性剂 AEO-9,从而减弱了离子型表面活性剂的离子头之间的电性斥力,更易形成胶束,结果是混合物溶液的 CMC 下降,表面张力降低.比较图3和图4,几乎全部的浓度区域间,混合物的 CMC 均低于单一表面活性剂 SDBS 的 CMC 值,这种复合体系能使表面活性增加,称之为“协同作用”.这类混合物具有比单一表面活性剂更优良的洗涤、润湿等性质,可以提高表面活性剂的稳定性,在实际生产中已取得广泛的应用^[15].



AEO-9:SDBS = 1:10 的 γ 值对应右边的纵坐标,
其余 4 种配比的 γ 值对应左边的纵坐标

图 4 复配表面活性剂的 CMC

Fig. 4 CMC of two mixed surfactants

根据图 4 所得 CMC 的实验值和式 (5) 估算的 CMC 理论值,以 5 种不同配比时的 CMC 值取常用对数作横坐标与 HLB 进行拟合分析,得到图 5 所示 2 条曲线,其中理论 CMC 与 HLB 间的数学模型为: $HLB = -1.7631 \ln[CMC] - 2.8925$,趋势线的可靠性系数为 0.99. 而实验 CMC 与 HLB 间的数学模型为: $HLB = -1.7426 \ln[CMC] - 2.9493$,趋势线的可靠性系数为 0.9891. 理论 CMC 和实测 CMC 的对数与 HLB 都有很好的线性关系,但是实测 CMC 与 HLB 拟合的趋势线更可靠. 在湿法净化黑烟表面活性剂的筛选过程中,可以根据实际情况确定所需表面活性剂的应用性能,由性能确定表面活性剂 HLB 值的范围,然后根据图 5 得到的数学模型确定表面活性剂的临界胶束浓度.

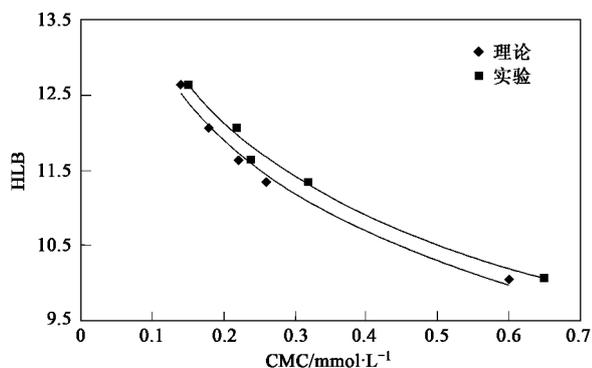


图 5 HLB 和 CMC 的关系

Fig. 5 Relation of HLB and CMC

3.3 伞罩型净化装置去除黑烟

根据上述表面活性剂的临界胶束浓度来配制吸

收液,以伞罩型湿式除尘脱硫装置进行黑烟净化实验,实验条件如 1.2.2 节所述,AEO-9 与 SDBS 复配表面活性剂吸收通过伞罩型净化装置的黑烟,经计算得到黑烟的去除效率.用式 (6) 计算胶束形成过程中的吉布斯自由能,取其绝对值为横坐标,以黑烟去除效率为纵坐标作图.如图 6 所示,对两者进行拟合,黑烟去除效率和吉布斯自由能存在二次函数关系,数学模型为:

$$Y = 0.0008X^2 - 0.0283X + 1.2174$$

式中, Y 为黑烟去除效率, X 为吉布斯自由能.

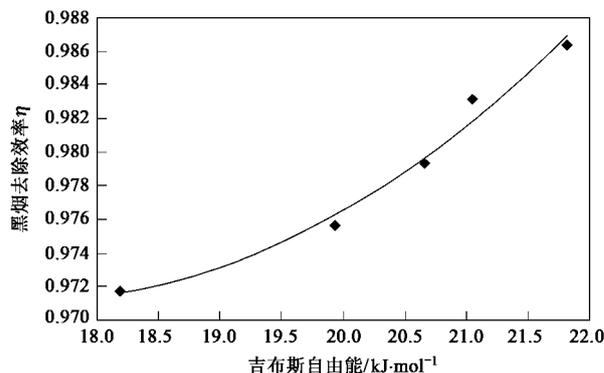


图 6 黑烟去除效率与吉布斯自由能的关系

Fig. 6 Relation between smoke removal efficiency and Gibbs-free-energy

黑烟去除效率随着吉布斯自由能的增大而减小,原因是胶束形成的吉布斯自由能为负值代表溶液中胶束的形成是自发的,负值越大说明胶束越易形成,吸收液对炭黑的增溶效果就越好.净化装置中吸收液溶解的黑烟越多,黑烟的去除效率就越高.拟合的趋势线可靠性系数为 0.9837,证明实验数据与吉布斯自由能具有较好的相关性.在湿法净化黑烟的工业应用中,可根据 AEO-9 与 SDBS 的组成来估算 CMC,由于式 (6) 给出了 CMC 与 ΔG_m^0 的关系,通过图 6 中的数学模型可预测表面活性剂的黑烟去除效率.

4 结论

(1) 实测混合表面活性剂的 CMC 与通过数学模型估算得到的理论 CMC 基本一致,相对误差均小于 10%,说明用公式 (5) 预测 AEO-9 与 SDBS 复配后的 CMC 值是可行的.

(2) 通过比较 HLB 与实测 CMC、理论 CMC 拟合趋势线可靠性系数的大小,筛选出 AEO-9 + SDBS 复配体系中 HLB 与 $\ln[CMC]$ 之间最佳的数值模型,

发现 HLB 与 $\ln[\text{CMC}]$ 存在式: $\text{HLB} = -1.7631 \ln[\text{CMC}] - 2.8925$ 的线性关系, 该数学模型适用于燃煤窑炉黑烟吸收液的选配.

(3) 黑烟的去除效率 η 和 AEO-9 + SDBS 复配体系形成胶束时的吉布斯自由能 ΔG_{mf}^0 反向相关, ΔG_{mf}^0 越小时 η 越高, 并且存在二次函数关系: $\eta = 0.0008(\Delta G_{\text{mf}}^0)^2 - 0.0283\Delta G_{\text{mf}}^0 + 1.2174$, 在特定条件下该数学模型可预测湿法除黑烟的效率.

参考文献:

- [1] Purvis C R, McCrillis R C. Fine Particulate Matter (PM) and organic speciation of fireplace emissions [J]. Environ Sci Technol, 2000, **34**(9): 1653-1658.
- [2] Do D D, Do H D. Analysis of adsorption data of graphitized thermal carbon black with a DFT-Lattice gas theory [J]. Adsorpt, 2001, **8**(4): 309-324.
- [3] Darkwa K, O'Callaghan P W. Energy usage and environmental pollution in the United Kingdom: which sector dominates? [J]. Proc Instit Mech Eng Part A, 1996, **210**: 3-14.
- [4] Shemwell B, Atal A, Leventis Y A, et al. Laboratory investigation on combined in-furnace sorbent injection and hot flue-gas filtration to simultaneously capture SO_2 , NO_x , HCl, and particulate emissions [J]. Environ Sci Technol, 2000, **34**(22): 4855-4866.
- [5] 王之顺. 窑炉烟气净化和控制燃烧相结合技术 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, **16**(1): 68-69.
- [6] Fortin J, Jury W A, Anderson M A. Enhanced removal of trapped non-aqueous phase liquids from saturated soil using surfactant solutions [J]. J Contam Hydrol, 1997, **24**: 247-267.
- [7] Dekker T J, Abriola L M. The influence of field-scale heterogeneity on the surfactant-enhanced remediation of entrapped nonaqueous phase liquids [J]. J Contam Hydrol, 2000, **42**: 219-251.
- [8] 刘程, 李江华, 等. 表面活性剂应用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 104.
- [9] 霍姆博格 K, 琼森 B, 科隆博格 B, 等. 水溶液中的表面活性剂和聚合物 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. 96-103.
- [10] 周家华, 崔英德, 吴雅红. 表面活性剂 HLB 值的分析测定与计算 II. HLB 值的计算 [J]. 精细石油化工, 2001, **4**: 38-41.
- [11] Alisa V S, Aksana M P, Anna A F. Adsorption of micelle forming and non-micelle forming surfactants on the adsorbents of different nature [J]. Colloids Surf A: Physicochem Eng Aspects, 2007, **306**: 68-74.
- [12] Rusanov A I. Micelle Formation in Aqueous Solutions of Surfactants [M]. Khimiya: St-Petersburg, 1991. 28.
- [13] 周家华, 崔英德. 表面活性剂 HLB 值的分析测定与计算 I. HLB 值的分析测定 [J]. 精细石油化工, 2001, **2**: 11-14.
- [14] 王培义, 徐宝财, 王军. 表面活性剂——合成·性能·应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007. 153.
- [15] 颜红侠, 张秋禹. 日用化学品制造原理与技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 38-40.