

## 二氧化硒气相扩散系数实验研究

吴小龙, 罗光前, 邹仁杰, 方 灿, 李 显, 姚 洪  
(华中科技大学煤燃烧与低碳利用全国重点实验室, 武汉 430074)

**摘 要:** 针对扩散管法无法有效对固体的气相扩散系数测量的问题, 设计开发了气相扩散系数测量系统, 研究了二氧化硒在不同气体体系、不同体系温度下的气相扩散系数. 基于 Stefan 扩散管模型, 推导出与固体物质质量变化相关的扩散系数计算公式. 通过开发的测量系统对萘在空气中的扩散系数进行测量, 发现与文献中测量值相近, 进一步验证了实验方法的准确性. 通过在单工况气体氛围和混合工况气体氛围中的实验, 修正了 FULLER 公式中的系数值, 拟合得出在 393 ~ 433 K 范围内  $\text{SeO}_2$  气相扩散系数的公式. 结果表明: 在单工况气体氛围中, 实验值和模型计算值的误差均在 10% 以内, 且拟合后曲线的  $R^2 > 0.97$ ; 在混合工况下, 拟合后曲线的  $R^2 > 0.95$ , 验证了修正后模型的准确性.

**关键词:** 气相扩散系数; 二氧化硒; 气流量; Stefan 扩散管法; FULLER 公式

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)03-0279-07

## Gas-Phase Diffusion Coefficient of Selenium Dioxide

Wu Xiaolong, Luo Guangqian, Zou Renjie, Fang Can, Li Xian, Yao Hong

(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the diffusion tube method cannot effectively measure the gas-phase diffusion coefficient of solids, a gas-phase diffusion coefficient measurement system was designed and developed, and the gas-phase diffusion coefficients of selenium dioxide were investigated in different gas systems and at different system temperatures. Based on the Stefan diffusion tube model, the formula for calculating the diffusion coefficient related to the mass change of solid material was derived. Measurements of the diffusion coefficient of naphthalene in air by the developed measurement system were found to be similar to the measured values in the literature, which further verified the accuracy of the experimental method. The coefficient values in the FULLER formula were corrected experimentally in both single-case gas atmosphere and mixed-case gas atmosphere, and the formula for the diffusion coefficient of  $\text{SeO}_2$  in the gas phase in the range of 393—433 K was fitted. The results show that the errors between the experimental and model calculated values are within 10% and the  $R^2$  of the fitted curves is greater than 0.97 in single-condition gas atmosphere, and the  $R^2$  of the fitted curves is greater than 0.95 in mixed condition, which verifies the accuracy of the modified model.

**Keywords:** gas-phase diffusion coefficient; selenium dioxide; air flow rate; Stefan diffusion tube method; FULLER formula

收稿日期: 2024-06-03.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52206142).

作者简介: 吴小龙(2000—), 男, 硕士研究生, wx1721@hust.edu.cn.

通信作者: 罗光前, 男, 博士, 研究员, guangqian.luo@mail.hust.edu.cn; 邹仁杰, 男, 博士, rzou@hust.edu.cn.

作为一个以煤炭为主体能源的国家,煤炭发电对于我国的能源安全与经济发展有着重要的意义. 根据《中国电力行业年度发展报告 2022》,2021 年我国煤电发电量达到 50 426 亿千瓦时,比上一年增长 8.9%,占全国总发电量的 60.06%,可知煤炭发电目前很长一段时间内仍是我国主要的电力来源. 在对燃煤机组进行超低排放改造行动后,煤中的痕量污染元素的问题凸显了出来,例如硒、汞等. 其中,硒的过量排放对人体健康和环境的危害极大,我国煤中硒平均含量为 0.12 ~ 56.7  $\mu\text{g/g}$ ,远高于世界煤中硒的含量 0.2 ~ 10  $\mu\text{g/g}$ <sup>[1]</sup>. 因此,需要开发燃煤过程中烟气硒污染物排放的控制技术.

在高温的煤粉炉燃烧条件下,煤中的硒绝大部分转化为气态  $\text{SeO}_2$  的形式释放出来<sup>[2]</sup>,国外通过洗选的技术来降低硒的排放,然而我国煤中硒含量较高,且脱除率较低,无法满足硒排放的要求. 湿法烟气脱硫系统(WFGD)对于以  $\text{SO}_2$  为主的污染物的脱除技术已经较为成熟,脱除率可达到 98% 以上. 由于硫和硒元素在元素周期表内处于同一主族,物理和化学性质方面部分相似,且  $\text{SO}_2$  和  $\text{SeO}_2$  同为酸性易溶气体,故理论上 WFGD 对于硒的脱除也应有效果. 通过统计国内外的 7 台机组对于硒脱除效果发现,脱除率在 19% ~ 82%<sup>[3-9]</sup>,说明 WFGD 对于硒污染物脱除技术还不成熟,有很大的提升空间.

$\text{SeO}_2$  和  $\text{SO}_2$  脱除率方面的重大差异原因之一在于浓度的不同,脱硫塔入口处  $\text{SO}_2$  的浓度为 500 ~ 2 000  $\text{mg/m}^3$ ,远大于  $\text{SeO}_2$  的 1 ~ 1 000  $\mu\text{g/m}^3$ ,根据双膜传质理论<sup>[10]</sup>,气液两相接触时,两相间有一个相界面,相界面两侧存在传质薄膜,在相界面上气液两相相互平衡,在气液界面两侧的膜层内,溶质以分子扩散的形式进行运动,气体分子传质通量和传质面积、传质系数和浓度差有关,其中浓度差对于传质通量大小起到了决定性作用. 对于  $\text{SO}_2$ ,分子扩散速率较慢,其传质阻力主要集中在气膜与液膜内,总传质阻力可近似视为气膜阻力和液膜阻力的总和,当  $\text{SO}_2$  浓度很低时,气侧阻力作用增强,对于脱硫塔入口处浓度更低、浓度最多达到  $\text{SO}_2$  的 1/500 的  $\text{SeO}_2$ ,气相传质系数的变化对于总传质系数变化起到主导作用,因此需要获得气相传质系数的大小. 根据 Frossling 关联式,可知气相传质系数和气相扩散系数的关系表达式,为此,亟需通过实验得到气相扩散系数来为之后比较不同浓度下  $\text{SeO}_2$  的传质吸收量,修正并完善极低浓度下的双膜模型,构建硒的传质吸收方程.

尽管有许多实验方法可用于测量扩散系数,但是这些方法中只有少数几种可应用于扩散组分在常温

常压下以固体存在的体系,其中应用较为广泛的是 Stefan 扩散管法<sup>[11]</sup>,其原理是向扩散管中加入组分 A,使其向上扩散,在玻璃管口处测量组分 A 的浓度,期间固体表面随着蒸发扩散而降低,通过固体表面高度和玻璃管出口气体浓度的变化确定扩散系数的数值. 然而在本实验中,难点有以下几点:在单位时间内,组分质量浓度损失较小,需要精密测量;组分 A 在管壁上的吸附对扩散的影响;称量时吸收空气中的水蒸气. 针对以上几点,解决方案是:通过使用测量精度高的电子天平,在水平管壁上缠绕加热带以保证管内温度一致尽可能减少吸附在壁面上的影响,在测量环境中放置硅胶颗粒保持空气干燥来减小实验测量误差.

本实验填补了前人对  $\text{SeO}_2$  气相扩散系数研究领域的空白,搭建了与  $\text{SeO}_2$  在脱硫塔内传质吸收之间的桥梁,对进一步探究塔内痕量气态硒的传质吸收机制和硒污染物的脱除有着重要意义.

## 1 实验方法

### 1.1 实验装置

实验装置主要由气体扩散管、恒温砂浴锅两部分组成. 其基本流程如图 1 所示.  $\text{SeO}_2$  粉末在扩散管的底部受热升华,其蒸气沿垂直向上方向扩散,扩散到竖直管管口处时,被气体送入扩散管的另一端进入装有  $\text{NaOH}$  溶液的吸收瓶中被吸收.

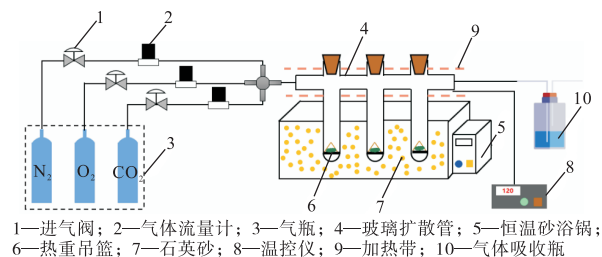


图 1 气相扩散系数实验装置示意

Fig.1 Experimental device diagram of gas phase diffusion coefficient

实验时,先将砂浴锅调节至所需温度,通入气体,并调整温控仪使加热带加热至所需温度,以避免  $\text{SeO}_2$  蒸气在管壁冷凝. 调节温控仪的示数使加热带加热至所需温度以保持水平管段内温度恒定. 当竖直扩散管内温度和温控仪示数相同时,将装有  $\text{SeO}_2$  粉末的热重吊篮用细铁丝送入扩散管底部,之后迅速将细铁丝抽出,塞上橡胶塞. 保持气体流速和温度恒定,每隔 30 min 将热重吊篮取出用电子天平测一次质量,测量精度为 0.000 1 g,恒温砂浴锅的温度精度

为 1℃.

其中,热重吊篮的底径为 10 mm,高度为 1.45 mm,厚度为 0.14 mm,SeO<sub>2</sub> 粉末平铺到吊篮中,初始高度为 1~1.2 mm,吊篮中固体的传热对测试结果影响很小,可以忽略不计.如图 2 所示,气体扩散管为内径 17 mm 的 T 型玻璃管.加工时,需要注意垂直管段和水平管段的垂直度,以防止气体流入垂直管段,两管焊接的地方要光滑,防止造成涡流产生实验误差.为了让气体能平稳地流经垂直段管口,水平管段前端在设计时应保留一定的长度,即气体扩散管的右通气管(出气段)长度应大于 5*d*(*d* 为水平通气管段的管径)、左通气管(进气段)长度应大于 8*d*.此外,为了更好地进行平行实验,该实验装置中的气体扩散管平行垂直设置了 3 个,可在 2~3 个不同扩散管中放置同种吊篮和物质.经多次重复性实验,结果表明,实验的重复性较好,并且用多管测定同种固体的气相扩散系数时各测量值之间误差较小,保持在 8% 之内,故可认为各个扩散管之间的相互干扰基本不存在.

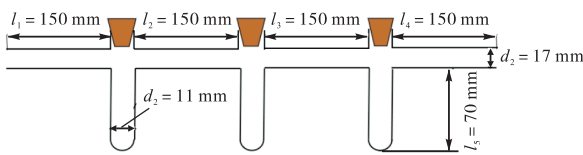


图 2 玻璃扩散管相关尺寸  
Fig.2 Relevant dimensions of glass diffusion tube

### 1.2 计算方法

如图 3 所示,在一定温度条件下,在竖直细长的玻璃管底端放入固体 A,不与 A 发生反应的气体 B 在管口处缓慢水平流过,固体 A 升华成气体并穿过 B 的气层发生扩散,装置保持在一个恒定的温度下,由于 A 不断被消耗,其质量将随时间不断减小,体积将随时间不断减小,故固体表面高度也会随着时间不断下降,扩散距离 *L* 也将随时间而变.图 3 表示的是两个不同的时刻固体表面所处的位置:一个是  $\theta = 0$  时的位置,另一个是  $\theta = Q$  时的位置.在发生扩散的时间内,固体 A 的表面位置的变化是总扩散途径的一个很小的量,且  $0 \sim \theta$  是一个较长的时间间隔(譬如 30 min),则在此间隔的任意瞬间,可认为组分 A 经过停滞组分 B 进行拟稳态扩散.

在双组分的混合体系中,A 相对于静止坐标的扩散通量  $N_A$  可用(1)式表示

$$N_A = -D_{AB}C \frac{dx_A}{dy} + (N_A + N_B) \cdot x_A \quad (1)$$

式中: $x_A$  表示组分 A 的摩尔分数,对于理想气体的

混合物,有  $C = p/RT$ ,  $x_A = p_A/p$  代入式(1)中可得组分 A 的扩散通量的表达式:

$$N_A = \frac{D_{AB}p}{RTL} \ln \frac{p - p_{AL}}{p - p_{AO}} \quad (2)$$

式中: $p_{AL}$  是垂直管段的出口处气体中组分 A 的分压,由于 A 不断被气体 B 带走,一般可认为  $p_{AL} = 0$ ;  $p_{AO}$  是固体表面上组分 A 的分压,可视为在扩散温度下固体 A 的饱和蒸气压.

另一个方面,也可以用固体质量随时间的变化率来表示 A 的扩散通量,即:

$$N_A = \frac{1}{M_A S_0} \cdot \frac{dM}{d\theta} \quad (3)$$

式中: $M_A$  表示组分 A 的分子量; $S_0$  为热重吊篮的底面积.

令  $C = M + p_{AL}S_0L_0$ ,代入式(3)和式(2)联立,并对联立后式子分离变量后对  $\theta$  积分可得:

$$\theta = \frac{RT \left[ (C - M_Q)^2 - (C - M_0)^2 \right]}{2M_A D_{AB} p \rho_{AL} S_0^2 \ln \frac{p}{p - p_0}} \quad (4)$$

在进行测定时,只需记录时间  $\theta$  和相同时间间隔内(本实验为 30 min)质量的差值,即可得到时间  $\theta$  和  $(C - M_Q)^2$  的一次函数图线,所得的直线斜率设为  $k$ ,那么可得扩散系数  $D_{AB}$  表达式为

$$D_{AB} = \frac{RT}{2kM_A p \rho_{AL} S_0^2 \ln \frac{p}{p - p_0}} \quad (5)$$

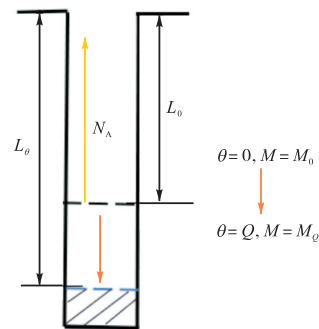


图 3 测定装置示意  
Fig.3 Schematic diagram of measuring device

## 2 结果与讨论

### 2.1 进气方式选择及气体流速对扩散系数测量结果的影响

本实验采取前端吹气的方法进行测量,该进气方式的优点在于使扩散管管口处压力保持在微负压(和当地大气压相比较)或零压差的状态,这样可以

将升华至扩散管管口的蒸气及时带走,从而满足 Stefan 扩散公式和分子自然扩散的基本条件. 故采用吹气方式往装置内通入气体以增加测量结果的准确性.

本实验中,调节  $N_2$  的流量在 100 ~ 700 mL/min 的范围内,扩散管径为 17 mm,扩散距离为 70 mm,体系温度为 150 °C,扩散时间为 2.5 h,每间隔 30 min 进行一次称重,分别测量  $SeO_2$  在  $N_2$  中的扩散系数,实验结果如图 4 所示.

由图 4 可知, $N_2$  的流量在 100 ~ 300 mL/min 时, $SeO_2$  的扩散系数值偏小,这是由于气体流量太小不足以把管口的  $SeO_2$  蒸气带走以保持管口  $SeO_2$  的分压为零;随着  $N_2$  流量的增加,在 400 ~ 600 mL/min 的范围内, $SeO_2$  的扩散系数趋近于稳定;当流量大于 600 mL/min,会在扩散管管口出现拔气现象,影响扩散系数测定的准确性. 因此在 400 ~ 600 mL/min 的气流量区间内符合拟稳态扩散,可以在此范围内选择来测定扩散系数. 后续实验中选取的气流量均为 500 mL/min.

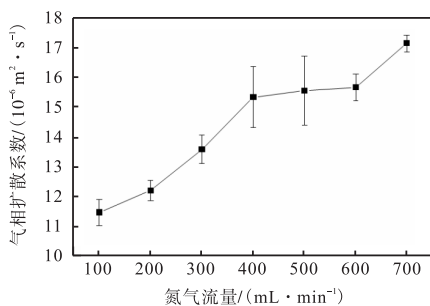


图 4 二氧化硒在不同氮气流量下的扩散系数

Fig.4 Diffusion coefficient of selenium dioxide under different nitrogen flow rates

### 2.2 萘在空气中扩散系数测量结果准确性的比较

在空气流量为 500 mL/min,扩散时间为 2.5 h 的工况下,每隔 30 min 进行一次称重,测量萘在空气中的气相扩散系数. 实验结果如表 1 所示,由表 1 可知,实测值和文献值<sup>[12]</sup>之间的误差在 5% 以内,吻合度较高,证明了测试方法的可行性及实验数据的可靠性和准确性.

表 1 萘扩散系数实测值与文献值比较

Tab.1 Comparison between the measured value of naphthalene diffusion coefficient and the literature value

温度/K	实测值/( $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ )	文献值/( $10^{-6} m^2 \cdot s^{-1}$ )	偏差/%
290	6.691	6.455	-3.53
295	6.489	6.671	2.80
300	7.226	6.891	-4.64
305	7.308	7.115	-2.64

实验过程中可能产生误差的原因有:萘在室温下升华导致在取出吊篮称重的过程中有微量的萘升华了;实验室周围气流的扰动;称重时萘吸收了空气中的水蒸气;萘蒸气可能吸附在管壁上;扩散管处气压略低于大气压;管口不平滑造成涡流等.

### 2.3 $SeO_2$ 在各单工况气氛中扩散系数测量值与 FSG 模型计算值比较

为得到  $SeO_2$  在不同气体氛围内的气相扩散系数,在扩散时间为 2.5 h、扩散管径为 17 mm、扩散距离为 70 mm、空气流量为 500 mL/min 的工况下,间隔 30 min 对热重吊篮进行称重,分别测定了  $SeO_2$  在  $N_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$  中在 393 ~ 433 K 下的扩散系数,并在每个温度下做了 3 组平行实验,如图 5 ~ 7 所示,实测值和 FSG 模型计算值相比较后发现偏差均在 10% 之内,证明了该测试方法的准确性.

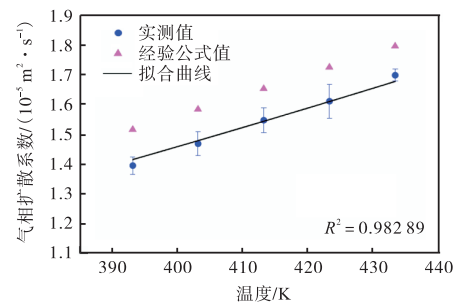


图 5 二氧化硒在氮气中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.5 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide in nitrogen at different temperatures

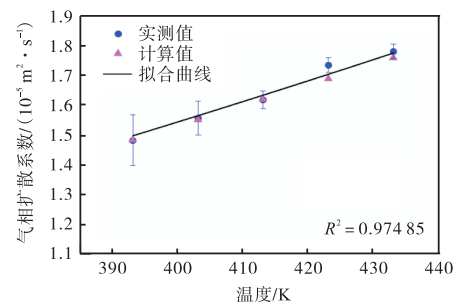


图 6 二氧化硒在氧气中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.6 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide in oxygen at different temperatures

FSG 模型<sup>[13]</sup>是 Fuller 于 1966 年提出的一种预测二元气相扩散系数的模型. 该模型是基于硬球模型得到的 Chapman-Enskog 方程的基础上,结合 153 组二元气体工况得到的 340 个实验数据,然后利用非线性最小二乘法回归分析得到的计算二元气体扩散系数的半经验公式:

$$D_{AB} = \frac{0.0101T^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \left[ (\sum v_A)^{1/3} + (\sum v_B)^{1/3} \right]^2} \quad (6)$$

式中： $D_{AB}$  为 A、B 二元气体的扩散系数； $T$  为气体的温度； $M_A$ 、 $M_B$  分别为组分 A、B 的摩尔质量， $\sum v_A$ 、 $\sum v_B$  分别是组分 A、B 的分子扩散体积。

由于该公式适用于计算常见的二元气体之间的扩散，如  $H_2$ 、 $O_2$ 、 $CO_2$ 、 $N_2O$ 、 $NH_3$  等。但是对于如  $SeO_2$  参与的二元体系中的扩散系数却尚无研究。故该公式中温度  $T$  前的系数需要通过实验进行修正，以满足该工况下的要求。设修正值为  $k$ ，修正后的公式为

$$D_{AB} = \frac{kT^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{P \left[ (\sum v_A)^{1/3} + (\sum v_B)^{1/3} \right]^2} \quad (7)$$

通过对实验数据进行拟合，可得到  $SeO_2$  在不同气体氛围中气相扩散系数的计算表达式，修正后的系数  $k$  如表 2 所示。

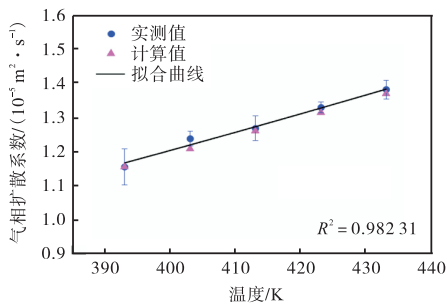


图 7 二氧化硒在二氧化碳中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.7 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide in carbon dioxide at different temperatures

表 2 不同体系中修正后的  $k$  值

Tab.2 Value of  $k$  after correction in different systems

体系	$k$
$SeO_2-N_2$	0.009 44
$SeO_2-O_2$	0.010 20
$SeO_2-CO_2$	0.010 21

### 2.4 $SeO_2$ 在混合气氛中拟合后的扩散系数计算公式

为了得到  $SeO_2$  在不同混合气体氛围内的气相扩散系数，在总气体流量为 500 mL/min，扩散时间为 2.5 h 的工况下，每隔 30 min 进行一次称重，总气体流量为 500 mL/min 的工况下，分别测定了  $SeO_2$  在  $V_{N_2} : V_{O_2} = 4 : 1$ 、 $V_{N_2} : V_{O_2} = 1 : 1$ 、 $V_{CO_2} : V_{O_2} = 4 : 1$  的氛围中在 393 ~ 433 K 下的扩散系数，并在每个温度下进行 3 组平行实验。

类比单气体氛围的 FULLER 公式，通过对实验数

据进行拟合，可得到  $SeO_2$  在两种气体混合的氛围中温度和气相扩散系数的计算表达式：

$$D_{ABC} = \frac{kT^{1.75} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{a}{M_B} + \frac{b}{M_C}}}{P \left[ (\sum v_A)^{1/3} + a(\sum v_B)^{1/3} + b(\sum v_C)^{1/3} \right]^2} \quad (8)$$

公式中  $D_{ABC}$  为物质 A 在 B、C 两种混合气体组分中扩散系数，其中  $a$  表示气体 B 在混合气体中的体积分数， $b$  表示气体 C 在混合气体中的体积分数。 $T$  为混合气体体系的温度， $M_A$ 、 $M_B$ 、 $M_C$  分别表示组分 A、B、C 的摩尔质量， $\sum v_A$ 、 $\sum v_B$ 、 $\sum v_C$  分别表示组分 A、B、C 的分子扩散体积。拟合后  $k$  值如表 3 所示。如图 8 ~ 10 所示， $R^2 > 0.95$ ，拟合效果较好，

表 3 三元体系中修正后的  $k$  值

Tab.3 Value of  $k$  after correction in Terry systems

体系	$k$
$SeO_2, V_{N_2} : V_{O_2} = 4 : 1$	0.009 96
$SeO_2, V_{N_2} : V_{O_2} = 1 : 1$	0.010 08
$SeO_2, V_{CO_2} : V_{O_2} = 4 : 1$	0.010 03

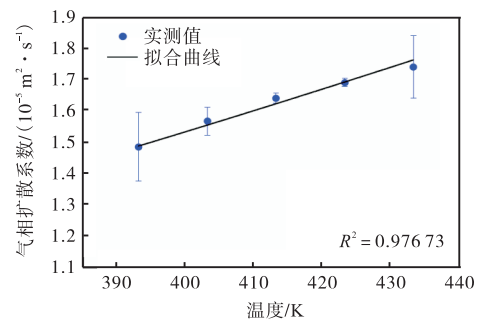


图 8 二氧化硒在氮气和氧气体积比 4 : 1 氛围中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.8 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide at different temperatures in the atmosphere of nitrogen : oxygen = 4 : 1

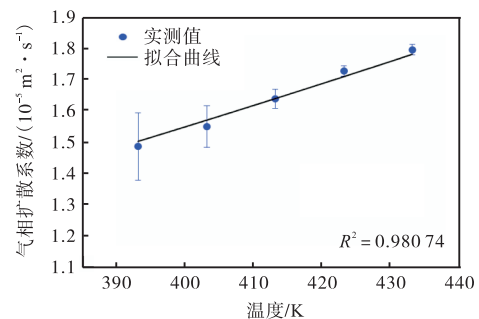


图 9 二氧化硒在氮气和氧气体积比 1 : 1 氛围中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.9 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide at different temperatures in the atmosphere of nitrogen : oxygen = 1 : 1

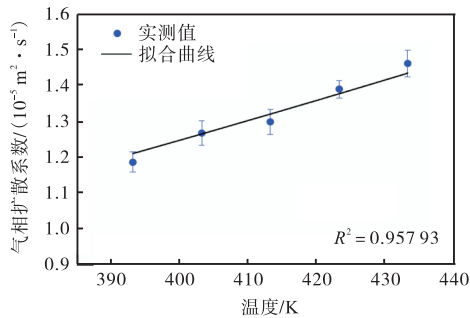


图10 二氧化硒在二氧化碳和氧气体积比 4 : 1 氛围中不同温度下的扩散系数及拟合曲线

Fig.10 Diffusion coefficient and fitting curve of selenium dioxide at different temperatures in the atmosphere of carbon dioxide : oxygen = 4 : 1

与实际测量值相吻合,证明了修正后混合气体氛围中扩散系数计算表达式的准确性.

### 3 结 论

(1) 基于 Stefan 扩散管模型,推导出与固体质量变化相关的扩散系数计算表达式,通过该表达式和实验装置对萘在空气中的扩散系数进行测量计算,发现与文献中测量值相近,进一步验证了实验方法的准确性.

(2) 通过在单工况气体氛围中进行平行实验,修正了 FULLER 公式中的系数值,并拟合得出在 393 ~ 433 K 下  $\text{SeO}_2$  气相扩散系数的计算表达式;在混合工况气体氛围中进行平行实验,拟合得到在 393 ~ 433 K 下  $\text{SeO}_2$  在二元混合气体中扩散系数计算表达式.结果表明:在单工况气体氛围中,实验值和 FSG 模型计算值的误差均在 10% 以内,  $R^2 > 0.97$ ; 在混合工况中拟合得到的曲线  $R^2 > 0.95$ , 拟合效果较好,证明了修正后模型的准确性.

### 参考文献

[1] Hu J, Sun Q, He H. Thermal effects from the release of selenium from a coal combustion during high-temperature processing: A review[J]. *Environmental Science Pollution Research*, 2018, 25(14): 13470-13478.

[2] Song G, Xu W, Liu K, et al. Transformation of selenium during coal thermal conversion: Effects of atmosphere and inorganic content[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 205: 106446.

[3] Wang J, Zhang Y, Wang T, et al. Effect of modified fly ash injection on As, Se, and Pb emissions in coal-fired power plant[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 380: 122561.

[4] Senior C, Tyree C, Meeks N, et al. Selenium partitioning and removal across a wet FGD scrubber at a coal-fired power plant[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(24): 14376-14382.

[5] Wang J, Zhang Y, Liu Z, et al. Coeffect of air pollution control devices on trace element emissions in an ultralow emission coal-fired power plant[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 33(1): 248-256.

[6] Tang Q, Liu G, Yan Z, et al. Distribution and fate of environmentally sensitive elements (arsenic, mercury, stibium and selenium) in coal-fired power plants at Huainan, Anhui, China[J]. *Fuel*, 2012, 95: 334-339.

[7] Córdoba P, Font O, Izquierdo M, et al. The retention capacity for trace elements by the flue gas desulphurisation system under operational conditions of a co-combustion power plant[J]. *Fuel*, 2012, 102: 773-788.

[8] Senior C, Blyther G, Chu P. Multi-media emissions of selenium from coal-fired electric utility boilers[C]// *Proc Air Quality VIII Symposium*. Crystal City, VA, 2011.

[9] Cheng C, Hack P, Chu P, et al. Partitioning of mercury, arsenic, selenium, boron, and chloride in a full-scale coal combustion process equipped with selective catalytic reduction, electrostatic precipitation, and flue gas desulfurization systems[J]. *Energy & Fuels*, 2009, 23(10): 4805-4816.

[10] Whitman W. The two-film theory of gas absorption[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1962, 5: 429-433.

[11] 徐洪峰, 王国香, 史继诚, 等. 二元气体扩散系数的

- 一种测定方法[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(5): 90-92.
- Xu Hongfeng, Wang Guoxiang, Shi Jicheng, et al. A method for measuring the diffusion coefficient of binary gas[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2012, 33(5): 90-92(in Chinese).
- [12] Goldstein R, Cho H H. A review of mass transfer measurements using naphthalene sublimation[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1995, 10: 416-434.
- [13] Fuller E N, Schettler P D, Giddings J C. New method for prediction of binary gas-phase diffusion coefficients[J]. *Industrial & Engineering Chemistry*, 1966, 58(5): 18-27.