

复杂体系中物质饱和蒸气压测试装置的设计及有效性检验

付中华, 张延玲, 王玉刚, 李士琦, 韩先会

(北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要:为了更好地控制 Zn、Pb 等重金属在熔融处理过程中的挥发行为, 需要确切了解复杂体系中 Zn、Pb 等重金属化合物的饱和蒸气压、活度等重要的热力学参数。本研究描述了利用气流携带法测定复杂体系中 Zn、Pb 等重金属饱和蒸气压的试验装置的设计、安装和数据有效性检验过程。研究过程中利用该装置测定了不同温度条件下标准物质 NaCl 的饱和蒸气压并与文献参考值进行对比, 结果显示测量值与文献参考值吻合较好; 同时, 测定了不同温度条件下 FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃ 体系中 ZnCl₂ 的饱和蒸气压, 结果显示 970~1 030 K 温度范围内上述体系中 ZnCl₂ 蒸气压随温度升高而升高, 且 ZnCl₂ 蒸气压的对数与温度的倒数呈线性关系, 与前人研究结果呈现出相似的趋势, 说明利用该装置测试的数据是有效和可靠的。

关键词: 气流携带法; 饱和蒸气压; 标准物质; NaCl; ZnCl₂

中图分类号: TF803.1

文献标志码: A

Designing and testing of apparatus to measure matter's saturated vapor pressure in complex system

FU Zhong-hua, ZHANG Yan-ling, WANG Yu-gang, LI Shi-qi, HAN Xian-hui

(School of Metallurgical and Ecological Engineering,

University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to effectively control the vaporization behaviors of heavy metals such as zinc and lead in smelting process, it is necessary to obtain the basic knowledge such as the saturated vapor pressure and activities of heavy metals in complex system. In this work, the process of designing, installing and testing of the apparatus, which tends to be applied for the measurements of the saturated pressure of zinc and lead chlorides in complex system by using of transpiration method, was introduced. This apparatus was used to measure the saturated vapor pressure of standard substance NaCl. The testing results show that the value obtained agrees reasonably well with the reference data. Additionally, the saturated vapor pressures of ZnCl₂ in FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃ system were tested at different temperatures. And a linear relationship between the logarithmic value of the vapor pressure of ZnCl₂ ($\ln p$) and the reciprocal of temperature ($1/T$) is observed, which is similar with the previous research. All of these data above indicate that the present apparatus is suitable for detecting the vapor pressures of metal chlorides at high temperature.

Key words: transpiration method; saturated vapor pressure; standard substance; NaCl; ZnCl₂

垃圾焚烧飞灰及金属冶炼过程中产生的部分粉尘由于重金属如 Zn、Pb、Cd 等含量较高, 已被世界各国明确规定为危险废弃物, 必须经过特殊处理。熔融处理目前是一种比较有应用前景的方法^[1-2]。为了有效

控制熔融处理过程中 Zn、Pb 等重金属的挥发行为, 需要确切了解该类物质在所处体系中的饱和蒸气压、活度等重要的热力学参数。垃圾焚烧飞灰及工业粉尘中常见的基体组成是 CaO、SiO₂、FeO/Fe₂O₃、Al₂O₃

等,同时含有部分 K、Na、S、Cl 以及重金属 Zn、Pb、Cr 等^[3-5]。在熔融处理过程中,这些成分构成了一个复杂的多元熔渣/熔盐体系。对于重金属来说,在该熔渣/熔盐体系中的饱和蒸汽压是决定其挥发行为的重要热力学参数。前人关于 Zn、Pb 等重金属在高温下的挥发行为做了大量的研究工作,包括在气相凝固相中的分配比^[6-7]、挥发动力学^[8-9]以及热力学平衡计算^[10-11]等。但从可获得的资料来看,关于复杂体系中 Zn、Pb 等重金属的饱和蒸汽压、活度等重要的热力学参数,除了本文作者前期研究中获得的部分结果^[12]外,尚未见到其它方面的报道。

本文作者重点阐述了利用气流携带法测定复杂体系中重金属物质饱和蒸汽压的实验装置的设计、安装、以及数据有效性检验过程。利用该装置测定不同条件下 Zn、Pb 化合物的饱和蒸汽压,进而了解其活度信息,并分析各因素如温度、基体成分等的影响趋势,为有效控制熔融处理垃圾焚烧飞灰及工业粉尘过程中 Zn、Pb 等重金属的分离回收过程,提供重要的理论依据。

1 气流携带法的测试原理

气流携带法的原理是选定一种惰性气体(即携带气体)在处于测试温度下的试样上方流过,当待测试样的蒸气被携带气体饱和时,混合气体中试样的分压即等于该物质在同温度下的饱和蒸汽压。结合理想气体的状态方程,可得到待测样品饱和蒸汽压与样品失重关系如下^[13-14]:

$$p = \Delta m RT / (MV) \quad (1)$$

式中: M 为挥发气体的摩尔质量, g/mol; R 为摩尔气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度, K; Δm 为质量损失, g; V 为气体体积; m^3 。

测试过程中,携带气体流速是非常重要的参数:流速过高时,由于试样蒸气在携带气流中未达到饱和,致使蒸汽压测试值低于其饱和蒸汽压;若流速过低,由于浓度差和温度差引起的气相扩散造成了过多的蒸发损失,致使蒸汽压测试值偏高。因此,测试过程中必须找到一个适中的流速区间,在此区间内气相中试样蒸气分压(即蒸汽压)与携带气体的流速无关,该流速条件下测得的蒸汽压值即为该试验温度条件下待测物质的饱和蒸汽压。如图 1^[15]所示,图中水平线段对应的与气流速度无关的蒸汽压值即为待测物质在该温度条件下的饱和蒸汽压。

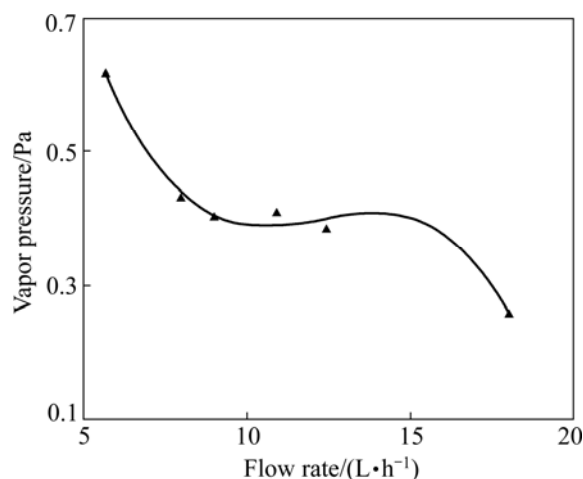


图 1 蒸汽压随携带气体流速变化的关系曲线^[15]

Fig.1 Variation of pressure versus flow rate of carrier gas^[15]

2 实验装置的设计、安装及数据有效性检验

2.1 实验装置概况

本实验设计的测试装置包括 5 部分:1)携带气体源。携带气体选用纯 Ar,以恒定的速度通入反应区。2)导入系统。本实验采用密封性较好的硬塑胶管,同时在反应管横截面上放置耐高温的绝缘塞保证反应区饱和蒸汽向入口外面的气相扩散很低,以致可以忽略的程度。3)蒸汽饱和区。放在瓷舟中的固体试样置于这个区域的中部,测试过程中保证试样温度均匀并防止发生不必要的化学反应,维持试样的饱和蒸汽分压不变。4)导出系统。本实验采用硬塑胶管作为气体导出系统,同时在反应管横截面上放置耐高温的绝缘塞,使气相扩散于出口处减至最小。5)控制系统。包括控温系统,气体质量流量计用以控制携带气体流速。装置简图如图 2 所示。为了保证气体流速控制稳定,本研究采用的是 D07-7CM 型气体质量流量计,流量规格为 1~5 L/min,它具有精度高、响应速度快、稳定可靠等特点。

2.2 试验步骤

以纯 Ar 为气流载体,实验过程控制 Ar 流量和实验温度。实验结束后,将样品处于 Ar 气流保护中冷却,并测量样品质量损失。具体试验步骤为:首先制取样品并应用万分之一电子天平称量其质量 m_1 ;调整试样使其置于石英管中间位置;预通 Ar 气 1 h,流量控制在 4~5 L/min,驱除炉膛空气;控制实验温度,

首先在 10 min 内将炉膛温度由室温升至 600 , 并恒温 50 min , 恒温的目的是为了保持炉膛温度稳定, 避免过快到达目标温度时经常出现的较大的温度波动, 同时也可以更彻底地去除样品中可能包含的 H₂O 等在高温条件下易挥发、进而会破坏试验所要求的气-固相平衡状况, 之后在 10 min 内将温度快速升至指定的实验温度, 并迅速调整 Ar 流量为实验值, 保持恒温 35 min 后, 使样品冷却至室温, 实验过程中全程吹 Ar, 具体温度控制程序如下图 3 所示; 取出样品后称量样品剩余质重 m_2 , 则实验质量损失 $\Delta m = m_1 - m_2$ 。

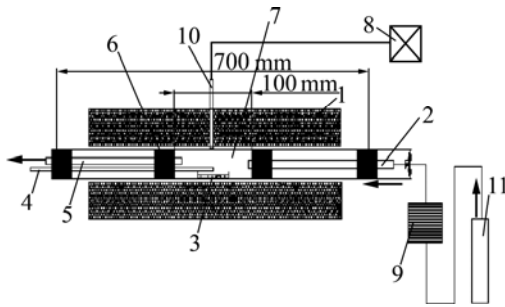


图 2 测试装置简图

Fig.2 Schematic diagram of equipment: 1—Electric furnace; 2—Gas input; 3—Sample; 4—Thermal couple; 5—Gas output; 6—Insulated plug; 7—Silica tube; 8—Temperature controller; 9—Gas mass flow meten; 10—Thermal couple; 11—Ar

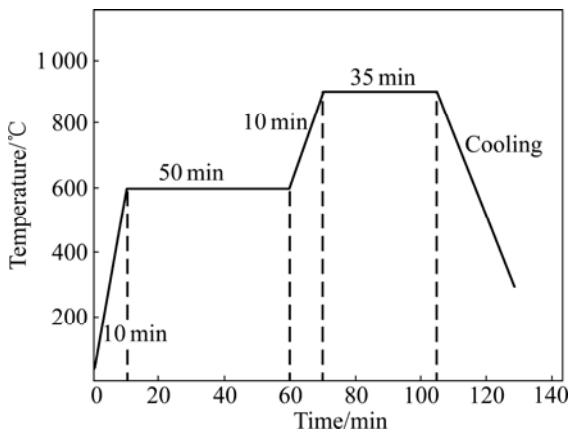


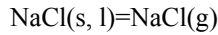
图 3 实验温度控制程序

Fig.3 Controlling program of experimental temperature

2.3 数据有效性检验

为了预测实验装置测试结果的有效性, 本实验通过气流携带法测定标准物质 NaCl 的饱和蒸气压, 并与相应的文献参考值进行比较。实验在不同 Ar 流量下测得 NaCl 的质量损失, 再由式(1)求出 NaCl 的蒸气压值。由克劳-克伯方程可知, 纯物质的饱和蒸气压与温度的关系为 $\ln p$ 与 $1/T$ 成线性关系。

NaCl 的挥发过程可描述为



该过程的吉布斯自由能为

$$\Delta G^\ominus = \Delta H^\ominus - T\Delta S^\ominus = -RT \ln K^\ominus \quad (2)$$

式中: $K^\ominus = p/p^\ominus$; ΔH^\ominus 为 NaCl 挥发的标准焓变, J/mol; ΔS^\ominus 为 NaCl 挥发的标准熵变, J/(mol·K); T 为绝对温度, K; p^\ominus 为标准大气压, Pa; p 为 NaCl 的饱和蒸气压, Pa; R 为摩尔气体常数。

ΔH^\ominus 、 ΔS^\ominus 可以看作定值, 由式(2)可得:

$$\ln p = -A/T + B \quad (3)$$

本研究过程中, 测得了不同温度条件下纯 NaCl 物质的饱和蒸气压, 并与文献[16]中相应数值进行对比, 其结果如下图 4 所示。

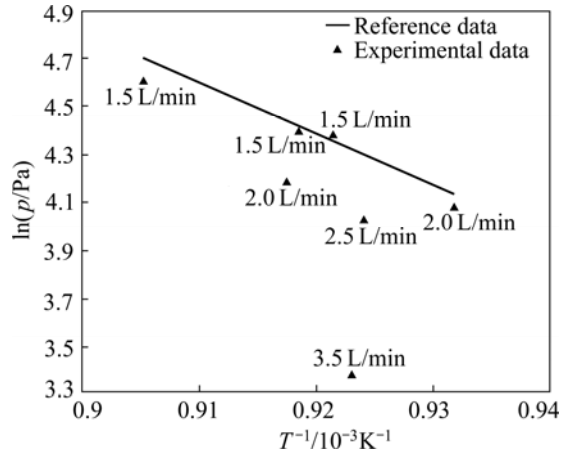


图 4 NaCl 蒸气压测量值与文献[16]参考值的比较

Fig.4 Comparison of experimental pressures of NaCl with values in Ref.[16]

图 4 中直线为 NaCl 物质的饱和蒸气压的文献参考值, 三角形实点为本研究实际测量值。由图 4 可以看出, 携带气体流量控制在 1.5 L/min 的 3 个测量点以及流量在 2.0 L/min(样品温度较低 1 073 K)的 1 个点都落在直线附近, 显示这 4 个测量值与文献参考值吻合较好, 而其它 3 个测量值, 携带气体流量分别控制在 2.0(样品温度较高: 1 090 K)、2.5 和 3.5 L/min 的 3 个点均较文献参考值偏低, 且流量越高偏差越大。这说明了两个问题, 一是携带气体流量在 2.0 L/min 以上属于高速区, 试样蒸气在气流中尚未达到饱和, 因此蒸气压测试值偏低; 而 1.5 ~ 2.0 L/min 为一个适中的流速区间, 本试样蒸气在气流中达到饱和状态。此外, 该测试数据与文献参考值一致, 说明利用本装置测试的数据是有效和可靠的。

3 FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃体系中 ZnCl₂ 蒸气压的测量

3.1 样品制备

本研究以 FeO-CaO-SiO₂ 为基本渣系,选择如图 5 所示的 3 种渣成分。为了研究不同基体组成对 Zn、Pb 挥发的影响,设计 3 种不同组成的渣样,它们分别为 F 渣(高 FeO 含量),C 渣(高 CaO 含量),S 渣(高 SiO₂ 含量),这 3 种渣具有相同且较低的熔点 1 150 。每种渣再配以 5% Al₂O₃。

选取纯化学试剂:纯 Fe 粉、Fe₂O₃、CaO、SiO₂、Al₂O₃,并按图 5 所示的成分组成(F 渣、C 渣、S 渣)称取各种试剂质量,充分混合后放入真空感应炉内的刚玉坩埚中(外套石墨坩埚)。试验之前先抽真空,之后充入 Ar 气,以保证造渣过程在 Ar 气氛中进行,控

制温度为 1 200 。渣样熔化后冷却至室温。实验后得到不同渣样的化学成分如表 1 所列。

试验样品中的 Zn 以 ZnO 形式加入,而 Cl 元素以 CaCl₂ 的形式加入。ZnO 与渣相的初始浓度分别设置为 10%和 90%,CaCl₂ 量按与 ZnO 相同的量添加,即本实验样品的组成为 90%渣+10%ZnO+CaCl₂ (n(ZnO):n(CaCl₂)=1:1)。

3.2 挥发气体种类分析

3.2.1 热力学计算

本研究应用 FactSage^[17]热力学软件,基于吉布斯自由能最小化原则,模拟分析了 Zn 在含 Cl 的 FeO-CaO-SiO₂-Al₂O₃ 体系中的挥发行为。计算使用的是 FactSage 软件自身的热力学数据库,标定产物有气相、液相、纯固体、渣及固溶体等,温度设置为 673~1 873 K,总压为 1.01×10⁵ Pa,指定气氛为纯 Ar。计算结果

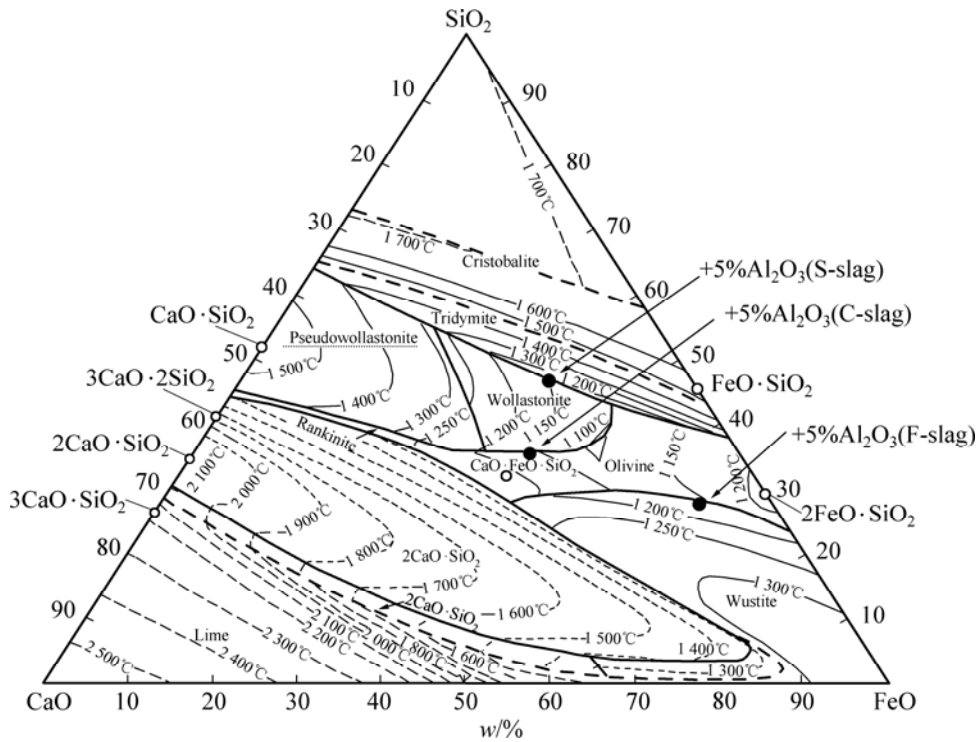


图 5 FeO-CaO-SiO₂三元相图

Fig.5 Phase diagram of FeO-CaO-SiO₂ system

表 1 3 种渣样的化学组成

Table 1 Chemical components in each kind of slag (mass fraction, %)

Sample	w/%						Basicity
	FeO	Fe ₂ O ₃	MFe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	
S-slag	20.5	11.0	2.1	43.7	16.6	5	0.38
C-slag	18.5	10.2	6.7	34.2	22.4	5	0.65
F-slag	45.9	4.7	6.5	26.9	6.7	5	0.25

如图 6 所示。从图 6 可以看出, 本试验样品中可能产生的 3 种挥发气体有 $ZnCl_2$ 、单质 Zn 以及 $FeCl_2$ 。而低温下以 $ZnCl_2$ 为主, 随温度的升高, 单质 Zn 及 $FeCl_2$ 气体生成加剧。1 000 K 以下单质 Zn 及 $FeCl_2$ 气体所占比例很小。因此, 当本实验温度选择为(1 000±30) K 时, 从热力学上看, 样品中的挥发气体应该主要为 $ZnCl_2$, 而单质 Zn 气体以及 $FeCl_2$ 气体可以忽略。

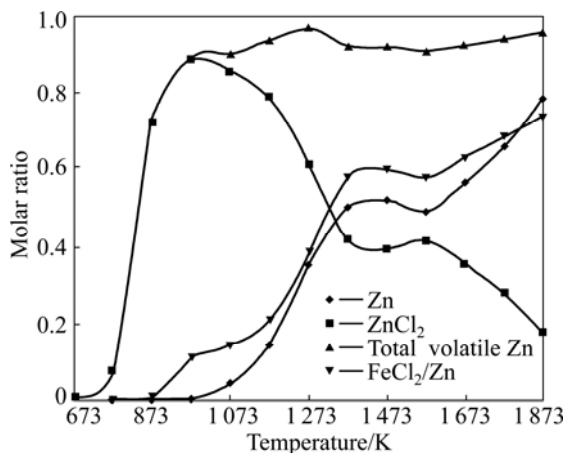


图 6 F 渣中 Zn 挥发物与温度的关系

Fig.6 Relationship between zinc volatile in F-slag and temperature

3.2.2 实验验证

为了证实以上通过热力学计算得到的结论, 本研究做了部分预备试验。在样品中没有加入 $CaCl_2$ 情况下进行挥发实验, 样品组成为 90%F 渣+10% ZnO , 实验测定结果如表 2 所示。

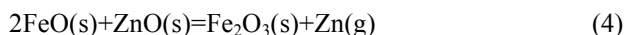
表 2 样品为 ZnO 和 F 渣的热失重试验结果

Table 2 Results of thermogravimetric tests of ZnO and F-slag samples

Temperature/K	m_1/g	m_2/g	$\Delta m/g$
1 045	24.115 0	24.116 7	-0.001 7
1 165	24.116 7	24.121 3	-0.004 6
1 321	24.081 6	23.927 5	0.154 1

从表 2 可以看出, 在 1 045 和 1 165 K 下, Δm 为负值, 这是由系统误差造成的, 可以认为 Δm 为 0, 样品没有产生质量损失, 说明单质 Zn 气体没有生成。前面热力学计算表明, 温度越高, 单质 Zn 生成越容易, 说明当温度低于 1 165 K 时单质 Zn 气体不可能形成。

另外, 在该实验条件下单质 Zn 气体的生成反应如式(4)所示:



式(4)说明, FeO 含量越大, Zn 越容易产生。本实验所用 F 渣中 FeO 含量最大, 都没有单质 Zn 生成, 由此可以推知, 在 C 渣和 S 渣的实验条件下, Zn 单质更难以生成。前人研究^[18-19]表明, 体系中 Cl 的增加对 Zn 等重金属氯化物的生成有促进作用, $CaCl_2$ 的加入有利于 $ZnCl_2$ 的生成, 降低 Zn 在体系中的浓度, 从而不利于单质 Zn 的生成, 因而加入 $CaCl_2$ 时 Zn 单质更加难以生成。

由此可知, 在温度低于 1 165 K 时, 单质 Zn 在本实验条件下难以形成, Zn 只以 $ZnCl_2$ 一种形式挥发, 这说明试验过程中 Zn 元素的损失均是由 $ZnCl_2$ 气体的挥发造成的, 这一结论对于后面的化学分析以及 $ZnCl_2$ 蒸气压的测定非常重要。

3.3 样品分析

试验样品冷却后, 经 ICP 等离子光谱分析仪测得其中元素 Zn 和 Fe 的浓度, 与试验前 Zn 和 Fe 的质量进行对比, 进而可得到试验过程中 Zn 和 Fe 的挥发量, 可表示为 $w(Zn)_{loss}$, $w(Fe)_{loss}$ 。由前面实验及热力学分析可知, Zn 只以 $ZnCl_2$ 的形式挥发出来, 则有:

$$w(ZnCl_2)=w(Zn)_{loss} \times 136/65 \quad (5)$$

得到了 $ZnCl_2$ 的挥发量后可由式(1)计算得到 $ZnCl_2$ 的蒸气压。

由于篇幅所限, 关于本分析方法中的各元素衡算问题以及相应的误差分析, 详见文献[20]。

3.4 结果与讨论

本研究在测试过程中严格遵守气流携带法测试原理, 首先测定的是不同携带气体流速下对应的样品质量损失(或由公式计算得到的蒸气压), 绘制 $p-v$ 图, 寻找与流速无关的区间, 进而确定待测样品的饱和蒸气压。

图 7 所示为 1 030 K 下 C 渣体系 $ZnCl_2$ 蒸气压随 Ar 流速的关系。从图 7 可以看出, 流速 v 在 4~4.5 L/min 时, 实验所测蒸气压值基本不变, 此时 $ZnCl_2$ 蒸气压测量值不随 Ar 流速的变化而变化, 可认为样品中挥发的 $ZnCl_2$ 蒸气在本流速范围内达到饱和, 对应的气相中的分压为该条件下 $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压。

用相同的方法测得其它温度条件下 C 渣体系中 $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压, 结果如图 8 所示。

由图 8 可以看出, $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压随温度的升高而急剧升高, 且在所测温度范围内 $CaO-SiO_2-FeO-Al_2O_3$ 体系中 $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压的对数与温度

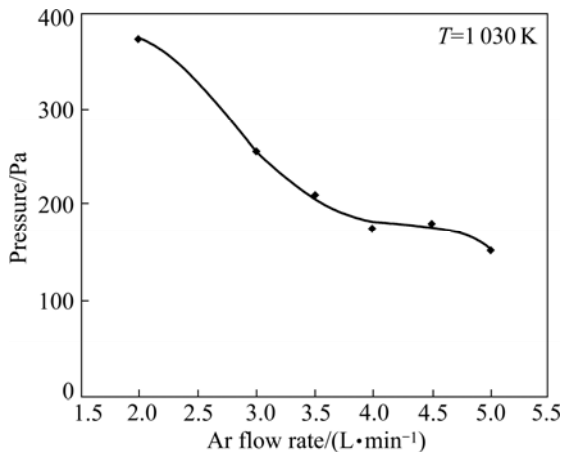


图7 C渣中 ZnCl₂ 蒸气压与 Ar 流速的关系

Fig.7 Relationship between ZnCl₂ pressure in C-slag and Ar flow rate

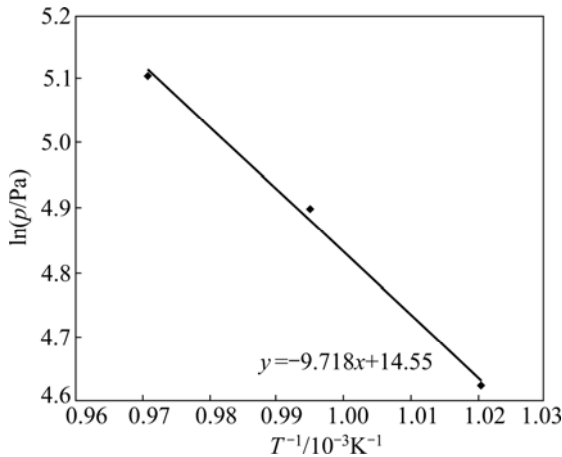
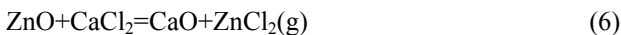


图8 C渣中 ZnCl₂ 饱和蒸气压与温度的关系

Fig.8 Relationship between saturated pressure of ZnCl₂ in C-slag and temperature

的倒数呈较好的线性关系。该体系中 ZnCl₂ 的产生可用式(6)表示：



且，

$$\ln \frac{p(\text{ZnCl}_2)}{1013025} \frac{a(\text{CaO})}{a(\text{ZnO})a(\text{CaCl}_2)} = -\frac{\Delta H^\ominus}{RT} + \frac{\Delta S^\ominus}{R} \quad (7)$$

式中： $p(\text{ZnCl}_2)$ 为 ZnCl₂ 的饱和蒸气压； $a(\text{CaO})$ 为 CaO 的活度； $a(\text{ZnO})$ 为 ZnO 的活度； $a(\text{CaCl}_2)$ 为 CaCl₂ 的活度； T 为反应温度，K； ΔH^\ominus 为温度 T 下反应(6)的焓变，J/mol； ΔS^\ominus 为温度 T 下反应(6)的熵变，J/(mol·K)； R 为摩尔气体常数，J/(mol·K)。

图8中的数据显示，ZnCl₂ 蒸气压的对数 $\ln p$ 与

$1/T$ 之间线性关系较好，结合式(7)可知，在挥发过程中，样品的 $a(\text{CaO})/[a(\text{ZnO})a(\text{CaCl}_2)]$ 始终保持为常数，这与本论文作者前期研究结果呈现出相似的趋势^[12]。

本论文作者前期研究工作^[12]中曾应用 Knudsen 法测得了相同体系中 ZnCl₂ 的饱和蒸气压。与本研究结果的对比如表3所列。表3所列的前期研究^[12]中的试验点对应的渣相分别表示为 C'、S'、F'，这3个渣样在配料时其成分点同样对应于图5所示的 C、S、F 渣三点，但由于造渣时间和炉次不同实际得到的渣相成分与本实验中的 C 渣、S 渣、F 渣略有不同，详见文献^[12]。由表3可以看出，本研所得结果与前期结果^[12]有一定差别，且随温度的升高二者差值呈现出减小的趋势。本研究的测试值基本大于 Knudsen 测定的结果，原因主要有以下几方面：1)本研究中 ZnO 的初始浓度设定为 10%，而前期研究中设定为 5%，因此本研究结果得到的 ZnCl₂ 蒸气压显然会大于前者；2)随温度的升高，二者差距呈逐渐降低趋势，因为 ZnCl₂ 蒸气压随温度升高呈指数性增加(其对数与温度的倒数呈线性关系)，所以随着温度的升高由初始浓度不同产生的差异被逐渐掩盖；3)高温条件下的个别点(如 F 渣中)利用 Knudsen 测定的结果明显高于本研究结果，由于 Knudsen 测量方法要求测试反应器内必须是稀薄气体，且溢出气体分子之间不能产生碰撞，因此其测量结果在远低于 100 Pa 的情况下会更准确。从这个角度来讲，本实验结果更为可信；4)如前所述，前期研究中对应的 C'、S'、F' 渣虽然配料成分与本研究一致，但其实际成分与本研究的 C、S、F 渣分别略有不同(详见文献^[12])，这也是导致研究结果不完全一致的一个原因。

表3 文献^[12]中 ZnCl₂ 饱和蒸气压与本研究结果的对比

Table 3 Comparison of saturated pressure of ZnCl₂ in Ref.[12] and in study

Condition	This study	Ref.[12]
C'-slag, 980 K	102	5
C'-slag, 1 005 K	134	20
C'-slag, 1 030 K	165	90
S'-slag, 1 030 K	194	95
F'-slag, 1 030 K	232	330

4 结论

1) 利用本研究设计、安装的试验装置对 NaCl 标

准物质的饱和蒸气压进行了测量,结果与文献值相吻合,说明利用本装置测定的数据是有效和可靠的。

2) 在本实验条件下,Zn以金属氯化物 $ZnCl_2$ 的形式存在,Zn单质难以生成, $FeCl_2$ 挥发量很少,可以忽略。

3) 在 $FeO-CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 体系中,在970~1030 K下,对Zn挥发物 $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压进行测量,结果表明随温度的升高, $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压急剧增大, $ZnCl_2$ 的饱和蒸气压的对数与温度的倒数之间呈较好的线性关系。

4) 本研究与前期利用Knudsen喷射法测试得到的 $FeO-CaO-SiO_2-Al_2O_3$ 体系中 $ZnCl_2$ 饱和蒸汽压相比有一定差值,原因一方面是两种情况下Zn的初始浓度不同,另一方面是不同的测试方法由于原理不同所对应的测试压力范围不同。

REFERENCES

- [1] CHOU S Y, LO S L, HSIEH C H, CHEN C L. Sintering of MSWI fly ash by microwave energy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(1): 357-362.
- [2] REIJNDERS L. Disposal, uses and treatments of combustion ashes: A review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2005, 43(3): 313-336.
- [3] YOO J M, KIM B S, LEE J C, KIM M S, NAM C W. Kinetics of the volatilization removal of lead in electric arc furnace dust [J]. *Materials Transactions*, 2005, 46(2): 323-328.
- [4] ABDEL-LATIF M A. Fundamentals of zinc recovery from metallurgical wastes in the Enviroplas process [J]. *Minerals Engineering*, 2002, 15(11): 945-952.
- [5] YOSHIIIE R, NISHIMURA M, MORITOMI H. Influence of ash composition on heavy metal emissions in ash melting process [J]. *Fuel*, 2002, 81(10): 1335-1340.
- [6] JAKOB A, STUCKI S, KUHN P. Evaporation of heavy metals during the heat treatment of municipal solid waste incinerator fly ash [J]. *Environ Sci Technol*, 1995, 29(9): 2429-2437.
- [7] WOBST M, WICHMANN H, BAHADIR M. Distribution behavior of heavy metals investigated in a laboratory-scale incinerator [J]. *Chemosphere*, 2001, 44(5): 981-987.
- [8] ABANADES S, FLAMANT G, GAUTHIER D. Kinetics of heavy metal vaporization from model wastes in a fluidized bed [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36(17): 3879-3884.
- [9] FALCOZ Q, GAUTHIER D, ABANADES S, FLAMANT G, PATISSON F. Kinetic rate laws of Cd, Pb, and Zn vaporization during municipal solid waste incineration [J]. *Environ Sci Technol*, 2009, 43(6): 2184-2189.
- [10] VERHULST D, BUEKENS A. Thermodynamic behavior of metal chlorides and sulfates under the conditions of incineration furnaces [J]. *Environ Sci Technol*, 1996, 30(1): 50-56.
- [11] ABANADES S, FLAMANT G, GAGNEPAIN B, GAUTHIER D. Fate of heavy metals during municipal solid waste incineration [J]. *Waste Manage Res*, 2002, 20(1): 55-68.
- [12] ZHANG Yang-ling, SHIBATA E, KASAI E, NAKAMURA T. Vapor pressure of zinc and chloride in the $Fe_2O_3-CaO-SiO_2-Al_2O_3$ slag system [J]. *Materials Transaction*, 2006, 47(5): 1341-1346.
- [13] PANKAJAVALLI R, ANTHONYSAMY S. Vapour pressure and standard enthalpy of sublimation of H_3BO_3 [J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, 362(1): 128-131.
- [14] JEEVAN T S A, AROCKIASAMY S, MATHEWS T, RAGHUNATHAN V S, NAGARAJA K S. Evaluation of enthalpy of sublimation of $Zr(tmhd)_4$ by using thermogravimetric transpiration method [J]. *Materials Letters*, 2008, 62(25): 4170-4172.
- [15] PANKAJAVALLI R, MALLIKA C, SREEDHARAN O M, RAGHUNATHAN V S, PREMKUMAR P A, NAGARAJA K S. Thermal stability of organo-chromium or chromium organic complexes and vapor pressure measurements on tris(2,4-pentanedionato)chromium(III) and hexacarbonyl chromium(0) by TG-based transpiration method [J]. *Chemical Engineering Science*, 2002, 57(17): 3603-3610.
- [16] KUBASCHEWSKI O. *Metallurgical thermochemistry* [M]. London: Pergamon Press Ltd., 1979: 25-50.
- [17] BALE C W, CHARTRAND P, DEGTEROV S A, ERIKSSON G, HACK K, MAHFOUD R B, MELANÇON J, PELTON A D, PETERSEN S. Factsage thermochemical software and databases [J]. *Calphad*, 2002, 26(2): 189-228.
- [18] WANG K S, CHIANG K Y, LIN S M, TSAL C C, SUN C J. Effects of chlorides on emissions of toxic compounds in waste incineration: Study on partitioning characteristics of heavy metal [J]. *Chemosphere*, 1999, 38(8): 1833-1849.
- [19] CHAN C C Y, KIRK D W. Behaviour of metals under the conditions of roasting MSW incinerator fly ash with chlorinating agents [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 1999, 64(1): 75-89.
- [20] 张延玲, 付中华, 李士琦, 王玉刚, 符显斌. 复杂体系中锌铅氯化物饱和蒸气压的测试研究[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 已录用.
ZHANG Yan-ling, FU Zhong-hua, WANG Yu-gang, LI Shi-qi, Fu Xian-bin. Experimental research on vapor pressure measurements of zinc and lead chlorides in complex system [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010. (in pressing)

(编辑 何学锋)