

基于拓扑规则 Pb-S-O 体系优势区图的绘制与应用

姚腾猛¹, 谭军¹, 刘常青¹, 李洁¹, 陈启元¹, 王辉², 廖舟², 张平民¹

(1. 中南大学 化学化工学院 有色金属资源化学教育部重点实验室, 长沙 410083;
2. 株洲冶炼集团股份有限公司, 株洲 412000)

摘要: 应用相律对 Pb-S-O 体系内组分进行分析, 确定了该体系可能存在的 4 个三凝聚相点。结合拓扑规则和相关平衡反应的热力学计算, 绘制该体系三凝聚相点之间的两种关联图: α 型平面拓扑图和 β 型平面拓扑图。分析结果表明: β 型平面拓扑图与传统 Pb-S-O 体系优势区图一致, 说明可以基于拓扑规则绘制 Pb-S-O 体系优势区图; α 型平面拓扑图可以解释 Kivcet 炼铅工艺在高氧位、高硫位条件下直接生成大量粗金属 Pb 的现象。

关键词: Pb-S-O 体系; 优势区图; 拓扑规则; 热力学计算; Kivcet 法

中图分类号: TF812 文献标志码: A

Plotting and application of predominance area diagram of Pb-S-O system based on topological rules

YAO Teng-meng¹, TAN Jun¹, LIU Chang-qing¹, LI Jie¹, CHEN Qi-yuan¹,
WANG Hui², LIAO Zhou², ZHANG Ping-ming¹

(1. Key Laboratory of Resources Chemistry of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Zhuzhou Smelter Group Co., Ltd., Zhuzhou 412000, China)

Abstract: The components of Pb-S-O system were analyzed with phase rule, and four coexisting points of three condensed phases were determined. The relation-diagrams among coexisting points of three condensed phases for the Pb-S-O system, which were denoted as α plane topological diagram and β plane-topological diagram, were plotted based on topological rules and thermodynamic calculation of related equilibrium reactions. The results show that the β plane-topological diagram is in accordance with the predominance area diagram of Pb-S-O system calculated by traditional methods, indicating that this method is feasible to plot predominance area diagram of Pb-S-O system. Meanwhile, α plane-topological diagram can be used to elucidate the phenomenon of which crude lead is generated under high oxygen and sulfur pressures during Kivcet process.

Key words: Pb-S-O system; predominance area diagram; topological rules; thermodynamic calculation; Kivcet process

Pb-S-O 体系优势区图是高温炼铅过程热力学分析的重要工具, 对火法炼铅工艺具有指导意义。在火法炼铅工艺中, Kivcet 法是一种新型的直接炼铅法, 主要包括氧化、还原和烟化 3 个冶金化学过程, 该法具有节能、高效、环保等优点^[1]。氧化阶段, 在 Kivcet

闪速功能区中鼓入 95%(体积分数)的工业纯氧, 铅精矿在悬浮状态下氧化形成高硫位并生成大量粗铅, 这是 Kivcet 直接炼铅法的一个重要特点^[2-3]。采用优势区图来解释直接炼铅原理已有相关报道^[4-5], 但这些优势区图给出的直接炼铅区域较窄, 氧位、硫位相对较

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2010AA065201, 2011AA061003)

收稿日期: 2012-05-22; 修订日期: 2012-11-19

通信作者: 谭军, 副教授, 博士; 电话: 0731-88877364; E-mail: yytanjun@163.com

低, 工艺上较难控制。

CHAKRABOTI 和 JHA^[6]应用基因算法分析了 Pb-S-O 体系的热力学, 但仅考察了蒸汽组分的反应平衡。SCHUHMANN 等^[7]建立了 Pb-S-O 体系直接炼铅的热力学平衡模型, 但热力学计算及优势区图只反映了氧压和温度的影响, 没有对硫压的影响进行进一步分析。KELLOGG^[8]通过构建 Pb-S-O 体系的平衡方程, 得到了 PbSO_4 、 PbOPbSO_4 、 $(\text{PbO})_2\text{PbSO}_4$ 和 $(\text{PbO})_4\text{PbSO}_4$ 等组分的热力学数据, 但未通过热力学计算建立相应的优势区图。ERIC 和 TIMUCIN^[9]对 Pb-S-O 体系凝聚相进行了热力学分析, 虽然得到了 Pb-PbS 和 PbO-PbSO_4 熔体的优势区图, 但没有反映 Pb 、 PbS 、 PbO 和 PbSO_4 等单组分的稳定存在区域。

利用计算机绘制优势区图的传统方法主要有逐点法、线消除法和凸多边形法等^[10-11]。优势区图由共存点和单变线构筑而成, 结合地理绘图中的拓扑思路^[12], 可以确定优势区图的构型。地图中的点、线将平面分隔成多个区域, 用有限的颜色可给多个区域填色而且存在多种填色方式^[13]。根据此思路, 有限的指定物种在平面图中也有多种分布方式, 由于每一组分在优势区图中具有唯一稳定存在的区域, 所以可确定优势区图的构筑方式。

本文作者对 Pb-S-O 体系的凝聚相共存点进行热力学计算^[14-15], 以基于拓扑规则的方式绘制 Pb-S-O 体系优势区图, 并将其用于解释 Kivcet 直接炼铅过程。

1 相律与拓扑分析

在含 N 个组分 r 个独立化学反应的体系中, 独立组元 $n=N-r$, 相律可表示为

$$f=N-r-\Phi+2 \quad (1)$$

式中: f 为自由度; Φ 为体系的相数; 2 表示温度和压力两个变量。

Pb-S-O 体系内凝聚态组分可能有 Pb 、 PbO 、 PbO_2 、 PbS 、 PbS_2 、 PbSO_4 、 $\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ 和 $2\text{PbO}\cdot\text{PbSO}_4$ 等^[5], 气态组分可能有 S 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 、 O_2 、 SO_2 和 SO_3 等^[16]。对于 Pb-S-O 体系, 独立组元 n 始终为 3, 体系最多只能 5 相共存, 其中 1 个气相, 4 个凝聚相。在以氧位 $\lg p(\text{O}_2)$ 和硫位 $\lg p(\text{S}_2)$ 为坐标的劣势区图中, 为了简单表示金属硫化物高温反应的平衡条件, 选定 4 个理想凝聚相为 Pb 、 PbO 、 PbS 和 PbSO_4 。

若温度恒定, 当自由度 $f=0$ 时, $\Phi=4$, 即气相和 3 个凝聚相共存, 此时可能形成 4 个三相(凝聚相)点:

$A(\text{Pb}, \text{PbS}, \text{PbO})$, $B(\text{PbS}, \text{PbO}, \text{PbSO}_4)$, $C(\text{Pb}, \text{PbS}, \text{PbSO}_4)$ 和 $D(\text{Pb}, \text{PbO}, \text{PbSO}_4)$ 。当自由度 $f=1$ 时, $\Phi=3$, 即气相和两个凝聚相共存, 此时在优势区图上表现为一条单变线。

A 、 B 、 C 和 D 4 个三相点在优势区图处于不同的位置, 每个三相点由 3 种不同的凝聚相共存形成, 以 γ 、 δ 、 ϵ 和 ζ 表示 Pb 、 PbO 、 PbS 和 PbSO_4 4 个凝聚相, 2 个凝聚相间用单变线隔开。结合地图填色的拓扑思路, 存在如图 1 中(a)、(b)和(c) 3 种类型的平面图。由于每类平面图可以旋转且存在多种填充方式, 在此, 将此类平面图定义为拓扑图。

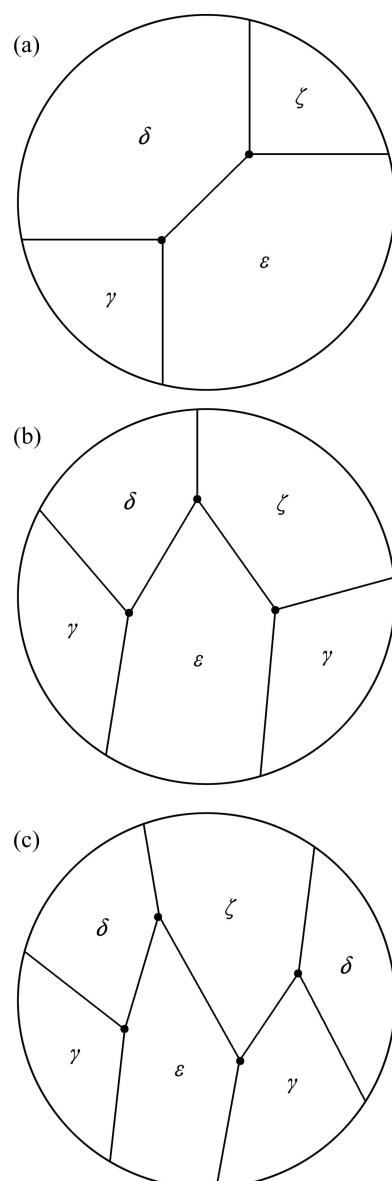


图 1 组合方式不同的 3 类拓扑图

Fig. 1 Three kinds of topological diagrams with different combination modes: (a) Two coexisting points; (b) Three coexisting points; (c) Four coexisting points

在优势区图中,由于同一凝聚相不能在多个区域同时存在,则只能利用图1中(a)类拓扑图来构造优势区图,且若直角坐标系选取的位置不同,优势区图的构型也会不同。在以氧位 $\lg p(O_2)$ 和硫位 $\lg p(S_2)$ 为坐标的优势区图中,根据Pb、PbO、PbS和PbSO₄的热力学稳定存在区域,Pb-S-O体系优势区图可能为图2

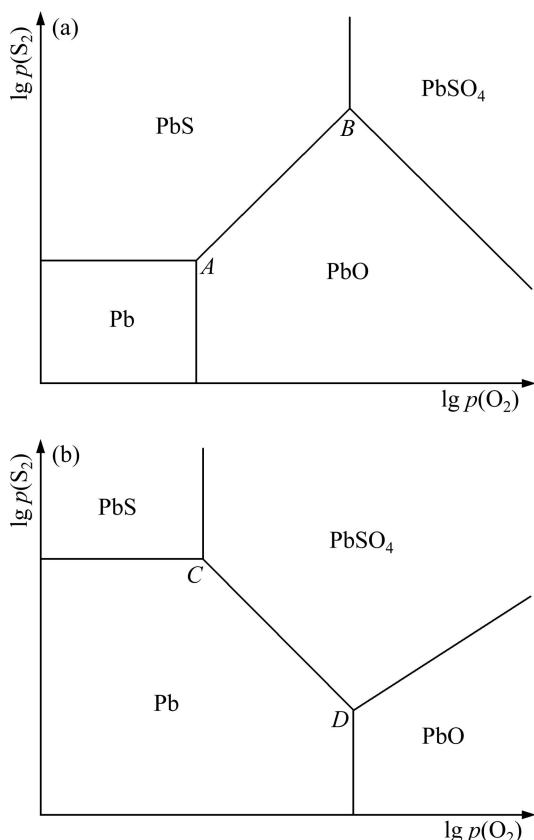


图2 三凝聚相共存点构成的两类Pb-S-O体系拓扑图
Fig. 2 Two kinds of topological diagrams of Pb-S-O system comprised of three condensed phases coexisting points: (a) α type; (b) β type

表1 α 型平面拓扑图三相点平衡反应及其热力学表达式

Table 1 Equilibrium reactions of coexisting points of three condensed phases and their thermodynamic expressions in α plane-topological diagram

Coexisting point	Equilibrium reaction	Thermodynamic expression	Reaction No.
A_i	$2\text{PbS} = 2\text{Pb} + \text{S}_2$	$K_2^\Theta = \frac{(p(\text{S}_2)/p^\Theta)a^2(\text{Pb})}{a^2(\text{PbS})} = \exp\left(-\frac{\Delta_{r_2}G_m^\Theta}{RT}\right)$	(2)
	$2\text{PbO} = 2\text{Pb} + \text{O}_2$	$K_3^\Theta = \frac{[p(\text{O}_2)/p^\Theta]a^2(\text{Pb})}{a^2(\text{PbO})} = \exp\left(-\frac{\Delta_{r_3}G_m^\Theta}{RT}\right)$	(3)
B_i	$\text{PbSO}_4 = \text{PbS} + 2\text{O}_2$	$K_4^\Theta = \frac{a(\text{PbS})[p(\text{O}_2)/p^\Theta]^2}{a(\text{PbSO}_4)} = \exp\left(-\frac{\Delta_{r_4}G_m^\Theta}{RT}\right)$	(4)
	$2\text{PbSO}_4 = 2\text{PbO} + \text{S}_2 + 3\text{O}_2$	$K_5^\Theta = \frac{a^2(\text{PbO})[p(\text{S}_2)/p^\Theta][p(\text{O}_2)/p^\Theta]^3}{a^2(\text{PbSO}_4)} = \exp\left(-\frac{\Delta_{r_5}G_m^\Theta}{RT}\right)$	(5)

中(a)和(b)两类拓扑图中的一种。

如图2中(a)和(b)所示,三相点A(Pb、PbS、PbO)和B(PbS、PbO、PbSO₄)构筑了一种平面图(α 型平面拓扑图),三相点C(Pb、PbS、PbSO₄)和D(Pb、PbO、PbSO₄)构筑了另一类型的平面图(β 型平面拓扑图)。

热力学分析表明,Pb-S-O体系中A、B、C和D4个三相点都是可能存在的宏观状态, α 型平面拓扑图表示三相点A和B共存时优势区图的构型, β 型平面拓扑图表示三相点C和D共存时优势区图的构型。

2 热力学计算

根据拓扑思路确定了Pb-S-O体系的两种平面拓扑图: α 型拓扑图和 β 型拓扑图,为了精确绘制这两种拓扑图,需要对体系三相点和单变线位置进行热力学计算。

对于 α 型平面拓扑图,三相点 A_i (Pb、PbS、PbO)和 B_i (PbS、PbO、PbSO₄)分别由表1所示两组反应同时平衡确定,同时建立相应热力学关系表达式。给定温度为1200、1300和1400 K,根据相应的热力学数据^[17],且理想凝聚相的活度 $a=1$,联立求解可得三相点 A_i 和 B_i 对应的硫位和氧位值,结果如表2所列。

同理,对于 β 型平面拓扑图,三相点C_i(Pb、PbS、PbSO₄)和D_i(Pb、PbSO₄、PbO)分别由表3所示两组反应同时平衡确定,建立相应热力学关系表达式并得到相应温度下 C_i 和 D_i 对应的硫位和氧位值,结果如表4所列。

恒温条件下,Pb-S-O体系平面拓扑图中单变线由

表2 α 型平面拓扑图三相点氧位及硫位值Table 2 Oxygen and sulfur pressures of coexisting points of three condensed phases in α plane-topological diagram

T/K	Coexisting point	$\lg [p(O_2)/\text{Pa}]$	$\lg [p(S_2)/\text{Pa}]$
1 200	A ₁	-3.767	-0.005
	B ₁	-3.888	-0.127
1 300	A ₂	-2.503	1.074
	B ₂	-2.583	0.993
1 400	A ₃	-1.431	1.978
	B ₃	-1.471	1.939

表3 β 型平面拓扑图三相点平衡反应及其热力学表达式Table 3 Equilibrium reactions of coexisting points of three condensed phases and their thermodynamic expressions in β plane-topological diagram

Coexisting point	Equilibrium reaction	Thermodynamic expression	Reaction No.
C_i	$2\text{PbS} = 2\text{Pb} + \text{S}_2$	$K_2^\ominus = \frac{[p(\text{S}_2)/p^\ominus]a^2(\text{Pb})}{a^2(\text{PbS})} = \exp(-\frac{\Delta_{r_2}G_m^\ominus}{RT})$	(2)
	$\text{PbSO}_4 = \text{PbS} + 2\text{O}_2$	$K_4^\ominus = \frac{a(\text{PbS})[p(\text{O}_2)/p^\ominus]^2}{a(\text{PbSO}_4)} = \exp(-\frac{\Delta_{r_4}G_m^\ominus}{RT})$	(4)
D_i	$2\text{PbO} = 2\text{Pb} + \text{O}_2$	$K_3^\ominus = \frac{[p(\text{O}_2)/p^\ominus]a^2(\text{Pb})}{a^2(\text{PbO})} = \exp(-\frac{\Delta_{r_3}G_m^\ominus}{RT})$	(3)
	$2\text{PbSO}_4 = 2\text{PbO} + \text{S}_2 + 3\text{O}_2$	$K_5^\ominus = \frac{a^2(\text{PbO})[p(\text{S}_2)/p^\ominus][p(\text{O}_2)/p^\ominus]^3}{a^2(\text{PbSO}_4)} = \exp(-\frac{\Delta_{r_5}G_m^\ominus}{RT})$	(5)

表4 β 型平面拓扑图三相点氧位及硫位值Table 4 Oxygen and sulfur pressures of coexisting points of three condensed phases in β plane-topological diagram

T/K	Coexisting point	$\lg [p(O_2)/\text{Pa}]$	$\lg [p(S_2)/\text{Pa}]$
1 200	C_1	-3.888	-0.005
	D_1	-3.767	-0.492
1 300	C_2	-2.583	1.074
	D_2	-2.503	0.753
1 400	C_3	-1.471	1.978
	D_3	-1.431	1.819

反应(2)~(5)确定, 反应(2)~(4)为单一气相组分, 故对应的单变线均为与相应坐标轴垂直的直线段。反应(5)达到平衡时, 氧位和硫位的单变线方程如式(6)所示:

$$\lg[p(O_2)/p^\ominus] + 3\lg[p(S_2)/p^\ominus] = -0.4343 \frac{\Delta_{r_5}G_m^\ominus}{RT} \quad (6)$$

由式(6)可知, 一定温度下, $\lg p(O_2)$ 与 $\lg p(S_2)$ 呈线性关系, 给定氧位值可得相应的硫位值, 即得到平面拓扑图中的一个点, 再结合相应三相点即可作出反应(5)对应的单变线, 在1 200、1 300和1 400 K时PbO与PbSO₄之间的单变线方程给定的对应氧位值和硫位值如表5所列。

表5 PbO与PbSO₄单变线方程中的相关氧位及硫位值Table 5 Related oxygen and sulfur pressures of single variation equation between PbO and PbSO₄

Plane-topological diagram	T/K	$\lg [p(O_2)/\text{Pa}]$	$\lg [p(S_2)/\text{Pa}]$
α type	1 200	-4.000	0.208
	1 300	-3.000	2.243
	1 400	-2.000	3.527
β type	1 200	-3.000	-2.792
	1 300	-2.000	-0.757
	1 400	-1.000	0.527

3 平面拓扑图的绘制和分析

在一定温度下,以氧位 $\lg p(O_2)$ 为横坐标,硫位 $\lg p(S_2)$ 为纵坐标,由表 2 可确定三相点 A_i (Pb、PbS、PbO) 和 B_i (PbS、PbO、 $PbSO_4$) 的位置,由表 4 可确定三相点 C_i (Pb、PbS、 $PbSO_4$) 和 D_i (Pb、 $PbSO_4$ 、PbO) 的位置,再结合表 5 所列数据绘制出 1 200、1 300 和 1 400 K 时 Pb-S-O 体系 α 型和 β 型平面拓扑图,分别如图 3~5 所示。

图 3~5 中三相点 A_i 、 B_i 、 C_i 和 D_i 的氧位和硫位值都随温度的升高而增大,但 α 型拓扑图中 A_i 与 B_i 或 β 型拓扑图中 C_i 与 D_i 在数值上都很接近,即相应的热力学条件较难控制和实现。

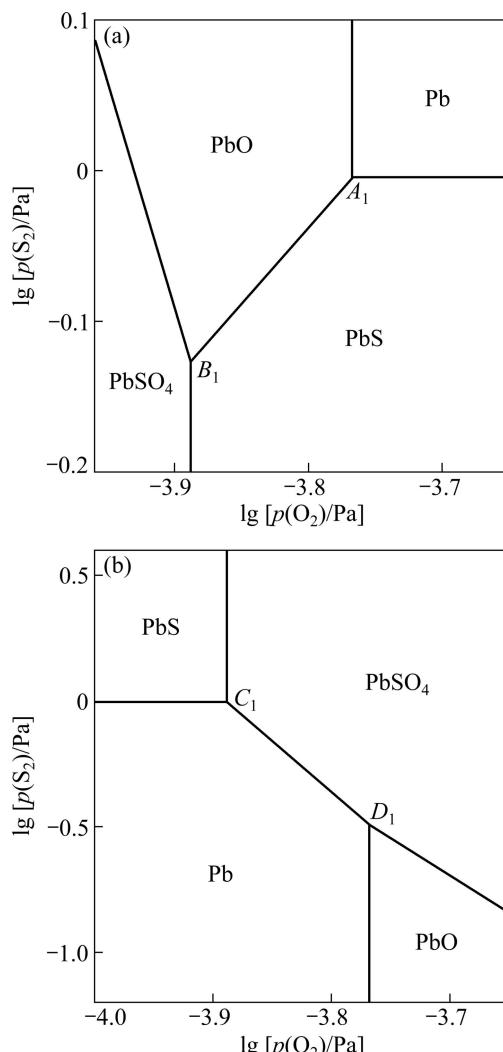


图 3 1 200 K 时 Pb-S-O 体系的平面拓扑图

Fig. 3 Plane-topological diagrams of Pb-S-O system at 1 200 K: (a) α type; (b) β type

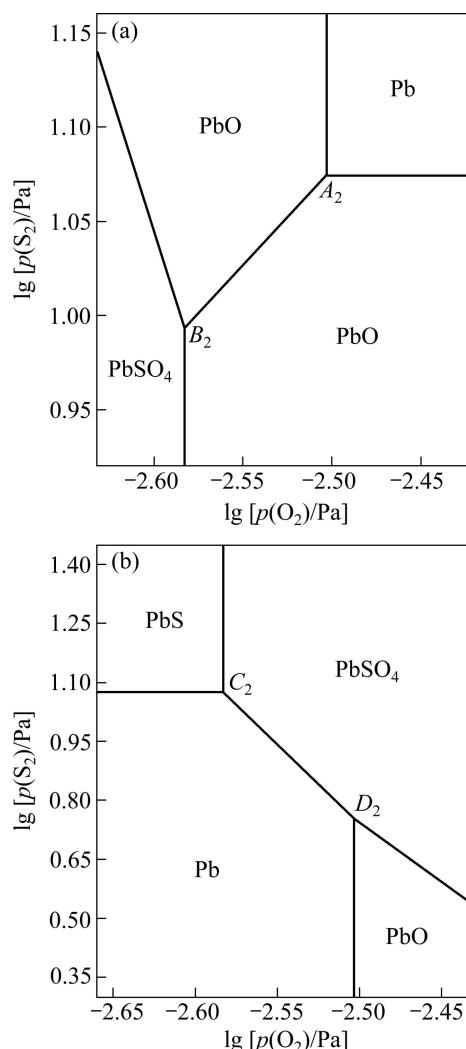


图 4 1 300 K 时 Pb-S-O 体系的平面拓扑图

Fig. 4 Plane-topological diagrams of Pb-S-O system at 1 300 K: (a) α type; (b) β type

α 型拓扑图中,当硫位降低时,反应(2)朝生成 PbS 的方向进行;氧位降低时,反应(3)朝生成 PbO 方向进行。即硫位或氧位降低时 Pb 不稳定,这违背相应热力学稳定存在准则——硫位或氧位降低时金属 Pb 应为稳定相。同理,结合反应(2)~(5)及相应的氧位和硫位值, α 型拓扑图中 PbO、PbS 和 $PbSO_4$ 的存在区域在热力学上也是不稳定的,而 β 型拓扑图中 Pb、PbS、PbO 和 $PbSO_4$ 的存在区域则是稳定的。

三相点 $C(Pb, PbS, PbSO_4)$ 和 $D(Pb, PbO, PbSO_4)$ 共同构筑了 β 型拓扑图,4 个凝聚相的存在区域都符合热力学稳定存在准则。事实上, β 型平面拓扑图与传统的 Pb-S-O 体系平面优势区图^[4]是一致的,故可以认为 β 型平面拓扑图就是本研究中要绘制的 Pb-S-O 体系优势区图。值得注意的是, β 型拓扑图中凝聚相的分布与图 2(b)相符,而常见的 Zn-S-O、Cu-S-O 和

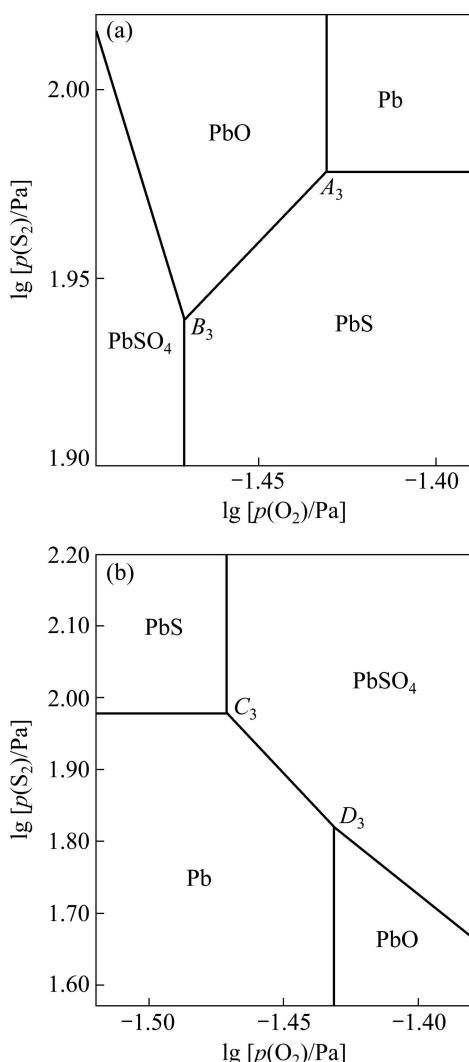


图 5 1400 K 时 Pb-S-O 体系的平面拓扑图

Fig. 5 Plane-topological diagrams of Pb-S-O system at 1400 K: (a) α type; (b) β type

Ni-S-O 体系优势区图^[18]中相关凝聚相的分布与图 2(a)相符, 这一差别反映铅冶炼工艺具有一定的特殊性。在传统的火法冶金模式中, 铜和镍是通过硫化精矿造熔锍后吹炼产生的, 而铅和锌是通过硫化精矿造氧化物后碳热还原产生的, 且铅精矿焙烧成氧化物不如锌精矿彻底^[5]。

铅冶炼工艺最大的特殊性在于 Kivcet 直接炼铅工艺, 而对铜、镍和锌 3 种金属, 仍没有由其精矿直接冶炼成金属的工艺。对此, 如果应用 α 型 Pb-S-O 体系平面拓扑图, 就可以很好解释铅冶炼具有直接炼铅的特殊工艺。

在直接炼铅工艺中, 将 95% 的工业纯氧喷入 Kivcet 炉闪速区内形成高氧位, 呈悬浮状态的 PbS 精矿颗粒瞬间被氧化生成 Pb 和 PbO, 并在闪速区内形

成高硫位, 由于产生的 SO₂ 及时排出参与制酸, PbSO₄ 的生成量较少。在此条件下, 三相点 A(Pb、PbS、PbO) 与三相点 B(PbS、PbO、PbSO₄) 共存形成如图 3~5 所示的 α 型拓扑图。在 α 型拓扑图中, Pb 存在于氧位、硫位同时较高的区域, 虽然此状态在热力学上不稳定, 但这可用于解释 Kivcet 炼铅工艺在高氧位和高硫位的条件下出现大量粗金属 Pb 的现象。

α 型拓扑图表明三相点 A 和 B 同时存在时的拓扑逻辑关系, β 型拓扑图表明三相点 C 和 D 同时存在时的拓扑逻辑关系^[19], 两种拓扑图都符合热力学平衡原理。Kivcet 炉中进行的是高温多元多相的复杂过程, 冶炼过程符合何种拓扑图与具体条件有关, 当条件有利于三相点 A 和 B 共存时, 利用 α 型拓扑图就可解释 Kivcet 炉闪速功能区直接出铅的现象。

4 结论

1) Pb-S-O 体系的两个三凝聚相点间存在多种组合方式, 基于拓扑规则确定了优势区图的两种类型: α 型拓扑图和 β 型拓扑图。对两种拓扑图中的三相点和单变线进行严密地论证和计算, 以氧位、硫位为坐标绘制了 α 型和 β 型拓扑图。

2) 表示三相点的关系时符合拓扑规则, 绘制拓扑图时也严格遵循热力学平衡共存的原理。因此, 用氧位、硫位为坐标轴绘制的拓扑图是合理的。 α 型平面拓扑图中 Pb、PbS、PbO 和 PbSO₄ 的存在区域在热力学上不稳定, 但可用于解释 Kivcet 炉闪速区直接出铅的现象; β 型平面拓扑图中 Pb、PbS、PbO 和 PbSO₄ 的存在条件都是稳定的, 与传统的 Pb-S-O 体系优势区图表现出一致性, 说明基于拓扑规则可以绘制 Pb-S-O 体系优势区图。

REFERENCES

- [1] CHAUDHURI K B, KOCH M, PATINO J L. The technical-scale realization of the Kivcet process for lead[J]. Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 1980, 73(817): 146–150.
- [2] 蒋继穆. 我国铅锌冶炼现状与持续发展[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(S1): 52–62.
JIANG Ji-mu. Status and sustainable development of lead and zinc smelting industry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(S1): 52–62.
- [3] SANNIKOV Y I, LIAMINA M A, SHUMSKIJ V A, GRININ Y A, RADASHIN M V. A physical and chemical description of the Kivcet lead flash smelting process[J]. Canadian Mining and

- Metallurgical Bulletin, 1988, 91(1022): 76–81.
- [4] 彭容秋. 铅冶金[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2004: 65–66.
PENG Rong-qiu. Metallurgy of lead[M]. Changsha: Central South University Press, 2004: 65–66.
- [5] 彭容秋. 铅锌冶金学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 180–183.
PENG Rong-qiu. Metallurgy of lead-zinc[M]. Beijing: Science Press, 2003: 180–183.
- [6] CHAKRABORTI N, JHA P K. Pb-S-O vapor system re-evaluated using genetic algorithms[J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2004, 25(5): 421–426.
- [7] SCHUHMANN R J, CHEN P C, PALANISAMY P, SARMA D H R. Thermodynamics of converting lead sulfide[J]. Metallurgical Transactions B, 1976, 7(1): 95–101.
- [8] KELLOGG H H. Critical evaluation of the thermochemical properties of lead sulfates[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1989, 20(1): 77–85.
- [9] ERIC R H, TIMUCIN M. Thermodynamic analysis of the direct converting of lead sulphide[J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1989, 89(2): 33–39.
- [10] LINKSON P B, PHILLIPS B D. Computer methods for the generation of E_h —pH diagrams[J]. Miner Sci Eng, 1979, 11(2): 65–79.
- [11] FRONING M H, SHANLEY M E, VERINK E D. An improved method for calculation of potential — pH diagrams of metal-ion-water systems by computer[J]. Corrosion Science, 1976, 16(6): 371–377.
- [12] 宋小冬, 钮心毅. 地理信息系统实习教程(ArcGIS 9.x)[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 300–313.
SONG Xiao-dong, NIU Xin-yi. The practical tutorial of geographic information system (ArcGIS 9.x)[M]. Beijing: Science Press, 2007: 300–313.
- [13] 马俊海, 王文福, 邱向前. 现代地图学理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨地图出版社, 2008: 120–128.
MA Jun-hai, WANG Wen-fu, QI Xiang-qian. The theory and technology of modern cartography[M]. Harbin: Harbin Cartographic Publishing House, 2008: 120–128.
- [14] 刘小文, 杨建广, 李静, 陈永明, 孙亚辉, 唐漠堂. $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{CO}_3$ 体系热力学分析及应用[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(1): 310–314.
LIU Xiao-wen, YANG Jian-guang, LI Jing, CHEN Yong-ming, SUN Ya-hui, TANG Mo-tang. Thermodynamic analysis of $\text{Bi}_2\text{S}_3\text{-ZnO-Na}_2\text{CO}_3$ and its application[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(1): 310–314.
- [15] 马爱琼, 蒋明学. TiB_2 合成反应机理的优势区相图分析[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(6): 1409–1414.
MA Ai-qiong, JIANG Ming-xue. Predominance area phase diagram analysis about synthetic reaction mechanism of TiB_2 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(6): 1409–1414.
- [16] de ASHOK K, CHAKRABORTI N. Thermodynamic analysis of the Pb-S-O vapor system[J]. Materials Research and Advanced Techniques, 1985, 76(8): 538–541.
- [17] BARIN I. 纯物质热化学数据手册[M]. 程乃良, 等, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 1273–1306.
BARIN I. Thermochemical data of pure substances[M]. CHENG Nai-liang, et al, transl. Beijing: Science Press, 2003: 1273–1306.
- [18] 张传福, 刘海霞, 钟大龙, 曾德文. 硫化镍精矿熔炼的热力学分析[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 805–810.
ZHANG Chuan-fu, LIU Hai-xia, ZHONG Da-long, ZENG De-wen. Thermodynamical analysis of smelting process of nickel sulfides concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 805–810.
- [19] ARMSTRONG M A. 基础拓扑学[M]. 孙以丰, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2010: 1–17.
ARMSTRONG M A. Basic topology[M]. SUN Yi-feng, transl. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2010: 1–17.

(编辑 陈卫萍)