



DAIYONGNIAN LUNWENXUAN

YOUSE YEJIN JI ZHENKONG YEJIN

戴永年论文选

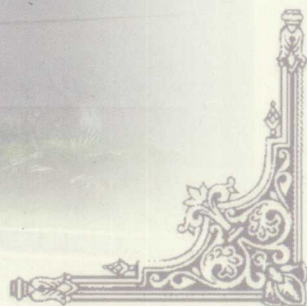
——有色冶金及真空冶金

● 戴永年 著



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>



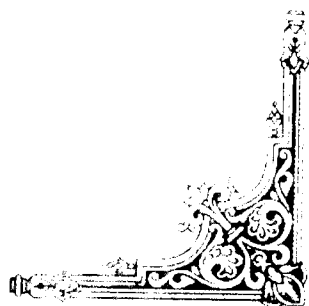
戴永年论文选

——有色冶金及真空冶金

戴永年 著

北 京
冶金工业出版社

2009



内 容 提 要

本书为戴永年院士论文选,分为五个部分,主要介绍了戴永年院士在真空冶金和锡冶金方面所做的工作及所获得的研究成果。主要内容涉及真空冶金的原理、二次资源的回收利用、真空冶金新工艺、锡冶金原理及工艺。此外,本书还收录了部分关于有色金属冶炼及深加工、金属提纯、电池材料方面的文章。

本书可供冶金及材料领域的科研、生产、设计、管理和教学人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

戴永年论文选:有色冶金及真空冶金/戴永年著. —北京:
冶金工业出版社, 2009. 1

ISBN 978-7-5024-4784-7

I. 戴… II. 戴… III. ①有色金属冶金—文集 ②真空
冶金—文集 IV. TF8-53 TF13-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 214270 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 postmaster@cnmip.com.cn

责任编辑 张熙莹 美术编辑 李 心 版式设计 张 青

责任校对 刘 倩 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-4784-7

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2009 年 1 月第 1 版, 2009 年 1 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.25 印张; 513 千字; 332 页; 1-2000 册

68.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

云南地处横断山脉、属高原地区，矿藏丰富，为历来人民重视的资源财富。个旧的锡、东川的铜早已开采。其他许许多多的矿藏在近代也发挥了重要的作用。这些宝藏使我倾心于矿冶事业。

自 1947 年进入云大矿冶系读书，至今已半个世纪。大学毕业后，承担了锡冶金等有色金属冶金课，教学和科学研究都在矿冶方面。曾去中南矿冶学院冶金系研究生班学习，向中国的周则岳、赵天从和前苏联的彼斯库诺夫、克里沃森科等教授学习，内容都集中在有色金属冶金。教学和科研中多次去国内有色金属冶金厂和俄、美、德等国学习、考察。在厂里学到许多宝贵的东西，使书本上的知识在实践中得到了验证。认识到矿冶工作已经生产了大量的金属材料，为人类进步作出了巨大贡献；同时也感到工厂生产还存在一些问题，需要改进。如：污染环境、深加工不足、经济效益较低等。矿冶工程应提高各种金属的产量，深加工，产出多种产品，满足日益增长的社会需要；减少能耗，对环境无污染，创造更高的经济效益和社会效益。

真空冶金技术的发展也只经历了半个多世纪，其许多应用基础问题仍有待于深入研究，如真空条件下的物理化学反应过程、物质运动、能量传递等过程规律，真空装置中温度场的分布，真空反应器的设计与强化等。冶金及材料工业今后的任务更为艰巨，前景更加广阔。传统冶金技术需要改造，以现代科学技术为基础的新的冶金技术和材料需要创造，以推动冶金技术不断向前发展。

文集中一部分是属于“有色金属真空冶金”这个新的领域。例如我们研制的新型立式和卧式真空炉，现应用于中国、巴西、玻利维亚、美国以及东南亚等国，共有 90 多台真空炉建在 50 多个单位，因此得到国家级和省部级的一些奖励。这几篇文章希望能够起到“引玉”的作用。愿我国有色金属真空冶金事业创新成果涌现，日益蓬勃发展。

这些论文完成时，得到国内外和校内外的老师、领导、同事、同学、亲友以及妻子赵瑞芳和家人的关怀、支持，在此向他们致以衷心的感谢。

本书论文多数是在国内外的学术刊物、学术会议上发表的部分文章。在文中难免有不当之处，恳请读者指正！

作 者
2008 年 12 月

目 录

有色金属真空冶金

金属在真空中的挥发性	3
Separation of Various Elements in Crude Metal or Alloy during Vacuum Distillation	10
铅-锡合金真空蒸馏分离	18
铅锡合金（焊锡）真空蒸馏	28
Vacuum Distillation of Lead-Tin Alloy	37
Vacuum Distillation (VD) of Crude Tin to Remove Antimony	48
炭渣真空蒸馏的初步探讨	55
Thermodynamic Behavior of Lead-Antimony Alloy in Vacuum Distillation	64
The Separation of Pb-Sb Alloys by Vacuum Distillation	68
Treating Zinc Crust by Vacuum Distillation	76
Zinc Vacuum Distilling Recovery from Dipping Galvanizing Residue	83
真空中锌合金分离及锌的提纯	89
粗镉真空蒸馏精炼除铊估算	98
有色金属的真空冶金	103
重有色金属的真空冶金	115
真空冶金技术在铜铅锌冶金中综合利用方面的应用	125
氧化镁真空碳还原制镁	134
Vacuum Metallurgy-an Important Direction in Reforming Conventional Nonferrous Metallurgy	140
Advances on Vacuum Metallurgy of Nonferrous Metals	146
Прогрессивные Направления Вакуумной Дистилляции Цветных Металлов в Китае	160
Некоторые Особенности Вакуумного Рафинирования Металлов	166
The View of Present Metallurgical Technique of Nonferrous Metals and Application of Metallurgical Furnaces	171

有 色 冶 金

云南有色金属工业发展探讨	185
有色金属生产发展和科研产业化	190
金属及矿产品深加工	196

锡 冶 金

提高锡的选冶总回收率的途径——低品位锡精矿的处理	203
锡精矿还原熔炼中铁与锡的关系	209
合金的性质与氧化物的还原	216
含锡物料烟化过程的分析	226
用鼓风炉强化锡的熔炼	236
焊锡真空蒸馏脱铅扩大试验	243
用精锡配制焊锡合理性的探讨	253
我国锡冶金技术的发展	257
锡生产的发展趋势	263
锡的应用和炼锡厂的产品品种	270
锡深加工产品发展战略研究	273

粗 铋 及 硅 的 精 炼

高铅铋除铅精炼研究	309
硅产品深加工与节能减排	315

高 能 电 池

锂离子电池和轻型电动车的发展	325
锂离子二次电池材料及其器件发展动态	329



有色金属真空冶金

YOUSEJINSHU ZHENKONG YEJIN

有色金属真空冶金
有色冶金
锡冶金
粗锑及硅的精炼
高能电池

金属在真空中的挥发性^①

戴永年 夏丹葵 陈 燕 蔡晓兰
杨 斌 李金华 邓智明 魏宗平

摘 要: 对 Zn, Cd, Pb, Sb 等金属的挥发速率与温度和压力的关系做了研究, 结合国外的数据, 归纳提出典型曲线和表达式, 曲线以临界压力 p_{crit} 为界分两部分, 高于 p_{crit} , 残余气体起主要作用, 金属挥发速率 ω 随压力增大而减小, 有 $\lg \omega = a - bp_{\text{残}}$; 小于 p_{crit} 时, 金属的蒸气压起决定作用, ω 在一定温度时为定值。此规律对实践有重要意义, 如确定作业的真空度, 温度, 加大设备生产率, 不污染环境, 在真空中不氧化金属, 不使金属溶解气体, 还可以脱除金属中的气体等。

关键词: 真空度; 挥发性; 金属的挥发速率

现代冶金及材料的发展中, 金属的挥发性起着重要的作用, 特别在较高温度和真空的条件下是这样, 但迄今这方面的研究不多, 数据少, 人们不能据以估计(半定量或定量地)某些过程的趋势, 选择适宜的条件。

本文在一些实验研究^[1,2]的基础上阐明金属挥发性和压力的关系, 列出前人的一些工作^[3], 从而得到一些规律性的认识。

例如冶金技术发展, 在历史上确定锌的火法提炼是应用锌的挥发性(锌的沸点为 906℃), 在 1200℃ 以上还原氧化锌产生锌蒸气, 使气体冷却, 凝结成金属锌, 并且在 1100℃ 左右使粗锌挥发, 精馏成纯度高的锌, 这些作业都是在常压下进行的。

然而, 在近半个世纪以来, 真空技术应用到冶金中, 日益广泛, 产生很好的结果。这样必然提出问题: 火法生产锌, 精炼粗锌, 在什么压力下进行为宜? 传统的常压作业在今天应当如何看待?

因此研究锌的挥发性就成为重要的事。

同样, 除锌之外, 如: Cd、As、Sb、Pb、Bi 等金属都有同样的情况。

进一步, 在金属及合金材料生产中, 应用其挥发性也是近来提出的, 并日益显示其重要性。

总之, 在现代冶金及材料工业中, 进一步了解金属的挥发性, 有重要意义。

1 实验结果

经过实验研究, 对 Cd、Zn、Pb、Sb 等金属得到如图 1 ~ 图 4 所示的结果, ω 为蒸发速率。

① 本文发表于《昆明工学院学报》, 1994, 19(6): 26 ~ 32。云南省应用基础研究基金支持项目。

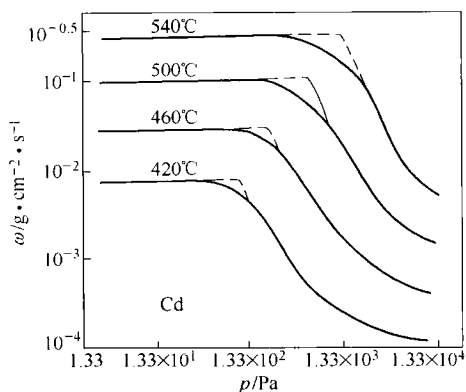


图1 纯镉在不同温度下的 p - ω 关系

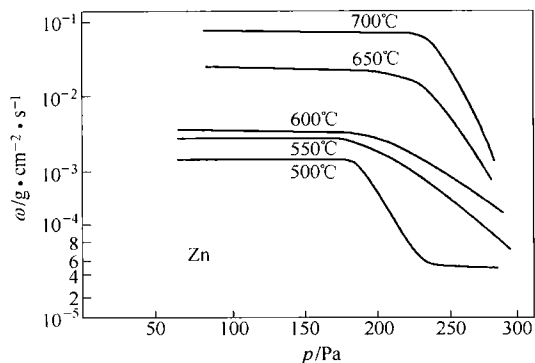


图2 纯锌在不同温度下的 p - ω 关系

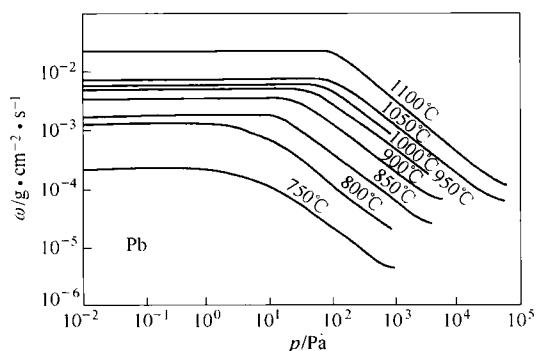


图3 纯铅在不同温度下的 p - ω 关系

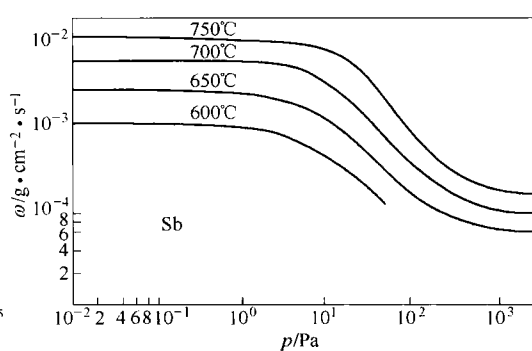


图4 纯锑在不同温度下的 p - ω 关系

2 前人的工作

在文献中^[3]列出一些金属与合金元素的挥发性和温度与压力的关系如图5所示。

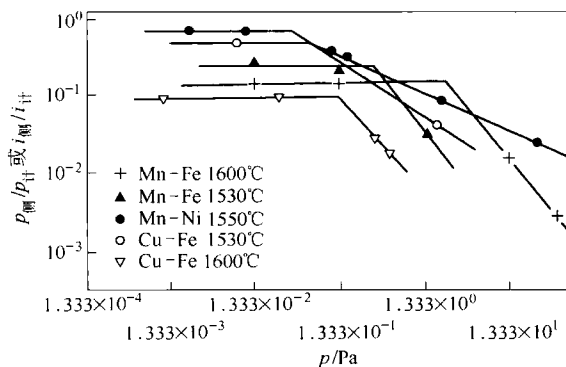


图5 残余气体压强对相应金属蒸发速率的影响

图中每条曲线的转折点的压力称为临界压力 (critical pressure) p_{crit} 。许多研究者提出一些金属及合金的 p_{crit} 和相应的温度值, 见表1^[3]。

表 1 一些金属和合金的“临界压强”和相应温度^[4]

蒸发金属	基体金属	工作温度/℃	相应的蒸气压/Pa	临界残余气体压强/Pa
Zn	Zn	465 ^①	73.31 ^①	39.99
Zn	Zn	440 ^②	39.99 ^①	8.00
Zn	Zn	421 ^①	18.66 ^①	13.33
Ag	Ag	1050	14.66	20.00
Ag	Ag	1150	79.98	41.32
Al	Al	1050	0.25	1.33
Al	Al	1150	1.47	5.33
Al	Al	1250	6.67	4.67
Mn(0.75% ~ 10%)	Ni	1550	约 39.99 ~ 399.90	约 13.33
Mn(0.1% ~ 5%)	Fe	1530	2.67 ~ 133.30	约 26.66
Mn(0.1% ~ 5%)	Fe	1600	5.33 ~ 266.60	约 133.30
Mn(0.7% ~ 0.1%)	Fe	1580	5.33 ~ 39.99	9.33
Cu(1% ~ 5%)	Fe	1530	1.33 ~ 26.66	约 4.00
Cu(0.2% ~ 4.5%)	Fe	1600	1.33 ~ 26.66	约 4.00
Al(63.8%)	Si(32.7%)	1035 ~ 1245	2.40	6.67

①计算值；
②在 497℃ 试验值。

3 结果讨论

3.1 共性

可以看到上述这些工作数据有共同的性质，如图 6 所示，在一定温度有这样一条曲线，表达金属挥发速率与压力的关系，温度升高，曲线上移。

曲线的特点是：当压力大于 p_{crit} 时，金属的挥发速率 $\omega(\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s}))$ 随着压力 $p(\text{Pa})$ 增大而减小；当压力小于 p_{crit} 时，则压力减小， ω 不变，为一定值， p_{crit} 为曲线的转折点处的压力。

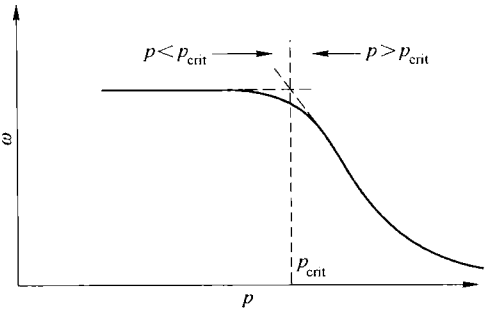


图 6 金属蒸发的 $p-\omega$ 曲线

3.2 模型

为了解释这种共性，作者考虑一种模型，如图 7 所示。

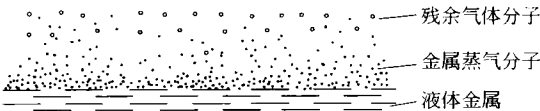


图 7 液体金属上方存在着残余气体分子和金属蒸气分子

图7表明液体金属上方存在着残余气体分子和金属蒸气分子,这两种气体分子构成对液体金属继续挥发的阻力,继续挥发的金属气体分子飞出液面后会有一部分与上面已有的两种气体分子相碰撞,而返回金属液体。

用此模型可以说明阻力变化对金属挥发影响情况。

第一种残余气体分子,它存在的多或少,显示的阻力就大或小,它存在的量决定于抽空程度,即真空度;强化抽气系统则能减少残余气体分子数量;阻力降低,则金属挥发速度增大。

第二种阻力是金属气体分子在金属液体表面上方存在,它的多或少,构成对继续蒸发的金属分子外移的阻力大或小;它的数量取决于金属的饱和蒸气压 p_i^0 ; 当温度一定, p_i^0 为定值,阻力也成为定数。

p_{cm} 是残余气体和金属饱和蒸气压力交替成为主要阻力的界限。

4 由气体分子运动阐明金属挥发曲线

上述实验的规律和解释,由分子运动来分析,得到进一步的说明。

若物质蒸发在单位时间内形成气体分子 N 个,当其向冷凝器运动时若有 1 个分子与已有气体分子(残余气体分子和物质已蒸发并存在空间的分子)碰撞,则 N_0 个分子就减少一个。经过路程 x 后剩下 N 个,再经过 dx 路程,又减少 dN 个($-dN$ 表示 N 的减量)。

蒸发分子的平均自由程为 λ ,则在单位长度的路程上每个分子碰撞数为 $1/\lambda$,在 dx 路程上每个分子碰撞 dx/λ 次, M 个分子在 dx 路程上平均碰撞 Ndx/λ 次。因此,分子数的减少量为

$$-dN = \frac{1}{\lambda} \cdot N \cdot dx$$

即

$$\frac{-dN}{N} = \frac{dx}{\lambda}$$

取定积分

$$\ln N = -\frac{x}{\lambda} + C \quad (1)$$

C 为积分常数,按假设 $x=0$ 时 $N=N_0$,代入上式

$$\ln N_0 = C$$

代入式(1)

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{x}{\lambda}$$

或

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (2)$$

N/N_0 随 x 增大而成指数衰减,故当分子经过的路程 x 较长时, N/N_0 就很小,如图8所示^[5]。

物质蒸发分子数为 N_0 ,经过 x 路程到达冷凝器的分子数为 N ,则应有

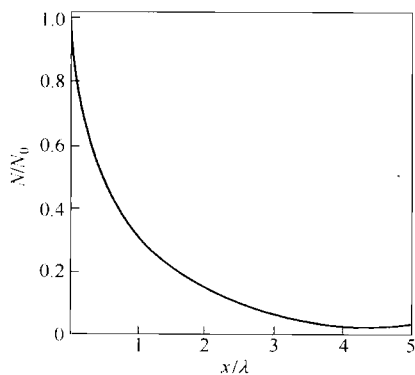


图8 $\frac{N}{N_0} - \frac{x}{\lambda}$ 的关系

$$\alpha = N/N_0 \quad (3)$$

式中 α ——适应系数。

由 $\lambda = K/p$, K 为常数, 则有

$$-x/\lambda = -xp/K$$

从式 (2)

$$\begin{aligned} \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) &= -\frac{x}{\lambda} = -\frac{xp}{K} \\ \lg(N/N_0) &= -\frac{xp}{2.303K} \\ \frac{N}{N_0} &= 10^{-\frac{xp}{2.303K}} \end{aligned}$$

系统的压力 $p = p_{\text{残}} + p_i$, $p_{\text{残}}$ 是残余气体压力, p_i 是 i 物质的蒸气压力, 则

$$N = N_0 \times 10^{-(p_{\text{残}} + p_i)x/(2.303K)}$$

即

$$\lg N = \lg N_0 - (p_{\text{残}} + p_i)x/(2.303K)$$

以单位时间和单位面积逸出的分子数计, 则 $N_0 = \omega_{\text{max}}$ (最大蒸发速率), $N = \omega$ (蒸发速率), 得

$$\lg \omega = \lg \omega_{\text{max}} - (p_{\text{残}} + p_i)x/(2.303K) \quad (4-1)$$

并由式 (3) 有

$$\lg \alpha = - (p_{\text{残}} + p_i)x/(2.303K) \quad (5-1)$$

从式 (4-1) 和式 (5-1) 可以讨论压力变化时的情况:

(1) 当系统的压力大于 p_{crit} 时, $p_i \ll p_{\text{残}}$, 则 $p_{\text{残}} + p_i \approx p_{\text{残}}$, 式 (4-1) 成为:

$$\lg \omega = \lg \omega_{\text{max}} - p_{\text{残}}x/(2.303K)$$

当温度一定, 设备不变时, ω_{max} , x 和 K 都是定值, 则

$$\lg \omega = a - bp_{\text{残}} \quad (4-2)$$

式中, a 和 b 为常数。

式 (4-2) 表明: 温度一定, $p_{\text{残}} > p_{\text{crit}}$ 范围内, $\lg \omega - p_{\text{残}}$ 为直线关系, $p_{\text{残}}$ 减小, ω 增大。

同时由式 (5-1) 得

$$\lg \omega = -bp_{\text{残}} \quad (5-2)$$

表明 $p_{\text{残}}$ 的变化也影响 α (蒸发系数), $p_{\text{残}}$ 增大, α 减小。

(2) 当 $p_{\text{残}}$ 与 p_i 相近时,

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{残}} + p_i \approx 2p_{\text{残}} \\ \lg \omega &= a - b(p_{\text{残}} + p_i) \approx a - 2bp_{\text{残}} \\ \lg \alpha &= -b(p_{\text{残}} + p_i) \approx -2bp_{\text{残}} \end{aligned} \quad (4-3)$$

(3) 当 $p_{\text{残}}$ 减少到 $p_{\text{残}} < p_i$ 时, 则 $p_{\text{残}} + p_i \approx p_i$, 得

$$\lg \omega = a - bp_i \quad (4-4)$$

式中, p_i 取决于 p_i^0 , 温度一定时 p_i^0 为定值, p_i^0 也将不变, 则

$$\lg \omega = a - bc = d \quad (4-5)$$

式中, c 和 d 皆为常数。

因此, 在一定温度下, 当 $p_{\text{残}} \ll p_i$ 时, ω 为定值。

(4) $(p_{\text{残}} + p_i)$ 不会为零, 式 (4-1) 右边第二项不会为零, 故 ω 不会等于 ω_{max} , α 总小于 1。在极限的情况下 ω 接近 ω_{max} , α 接近于 1。

5 金属挥发规律在实践中的作用

(1) 确定作业的真空度。在某一温度下使金属蒸发, 从图 1 ~ 图 4 中可以看到, 在大气压下金属的挥发速率较低, 降低系统内的压力, ω 随之升高, 达到 $p = p_{\text{crit}}$ 时, ω 达到最高值, 以后再降低压力, ω 不变。

因此, 使金属蒸发的作业, 应当在系统内压力为该金属在该温度时的临界压力下, 可保持金属挥发最快, 此时的 ω 与大气压下相比约高于 10^2 倍。

压力小于 p_{crit} 很多是没有必要的, 它无助于提高金属的挥发速率, 反而要使用更多的抽空设备, 造成不必要的、过多的消耗。

(2) 金属挥发速率大约 10^2 倍, 将对设备和作业消耗产生深刻的影响。在相同温度下, 设备中同样的蒸发面, 生产率将增大约 10^2 倍。若生产的规模不变, 则所需的设备可相应地缩小, 设备的基本建设投资会随之减小, 设备作业的维持性消耗将会降低。

(3) 作业的温度可以降低。例如铅在常压下的沸点为 1740°C , 故过去很少有人考虑铅冶金中使用铅蒸发的方法, 因为铅的沸点比较高, 若将铅仅加热到 1100°C , 在 10^5 Pa 压力下其挥发速率只有 $10^{-4} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 以下 (相当于 $0.0036 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$), 但抽空到 10^2 Pa 的压力下, 挥发速率增大到 $3.6 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 甚至温度只升到 1000°C , 压力保持 10^2 Pa , 挥发速率还在 $0.03 \sim 0.3 \text{ t}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。在工业上已可以实现, 勿需加热到 1740°C 。

同样原因, Pb 、 Bi 、 Sb 等都可以考虑用较低温度的真空挥发的方法来冶炼, 铅的真空精炼已在生产上实现^[1~5]。

(4) 真空设备为密闭容器, 在其中金属进行蒸发和冷凝, 往外排的气体量极其稀少, 都经过真空泵, 故极易处理到无污染环境的程度, 可以认为是无污染或极少污染的冶金过程。

(5) 真空中残余气体很少, 其中的氧气就更为微少, 在真空中蒸发金属不会或极微发生氧化, 例如锌、铅、铈等金属在真空中蒸发再冷凝成金属都不会氧化。

(6) 真空中残余气体分压很低, 金属熔化再凝结时不会溶解气体。若原金属中有气体在真空中熔化和冷凝还能将其脱除, 铝液在真空中脱氢就是例子。

6 结论

金属与合金的挥发速率与温度和压力的关系具有一定的共同性, 在一定温度有图 6 的曲线, 其主要特点是:

(1) 压力大于 p_{crit} , ω 随压力增大而减小, 有 $\lg \omega = a - bp$ 的关系。

(2) 压力等于 p_{crit} , ω 达到最大值。

(3) 压力小于 p_{crit} , ω 为定值, 不受压力变化而影响。

(4) p_{crit} 与金属的饱和蒸气压 p_i^0 有关, p_i^0 只决定于温度, 故温度一定时 p_{crit} 为定值。

此规律性对实践工作有重要的影响。

参 考 文 献

- [1] 夏丹葵, 戴永年. 纯锌挥发规律研究. 有色金属. 1992, 44 (2): 53 ~ 55.
- [2] 陈燕. 金属镉真空蒸馏基本规律的研究: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明工学院真空冶金研究所, 1989.
- [3] Winkler O. Bakish R. 真空冶金学. (英文版 1971). 上海: 上海科学技术出版社, 1980, 21 ~ 38.
- [4] 戴永年, 赵忠. 真空冶金. 北京: 冶金工业出版社, 1988, 14 ~ 41.
- [5] 张树林. 真空技术物理基础. 沈阳: 东北工学院出版社, 1988, 18 ~ 80.

Separation of Various Elements in Crude Metal or Alloy during Vacuum Distillation^①

Dai Yongnian

Abstract: The feasibility to vacuum distillation of a crude metal or an alloy was discussed. The equilibrium relationship between vapor phase and liquid phase in A-B System—— $p_A/p_B = \beta_A a^*/b$ has been derived. The separation coefficient $\beta_A = r_A p_A / (r_B p_B)$ is a judgment criterion. By calculation p_A/p_B , the equilibrium composition diagram of vapor phase and liquid phase was drawn. By use of the equation derived by M. Olette, the relationship among the volatilization amounts of various impurities in a crude metal (y_i) was further solved. $1 - (x/100) = C = (1 - y_i/100)^{1/\alpha_i}$. From y_i value obtained in practice, α_i , β_i and then can be calculated. The correct volatilization order of various impurities was obtained. These results can be applied to determine the practical conditions (temperature, vacuum degree, type of distillation furnace, times of distillation and control of product composition) in distillation of a crude metal or an alloy.

1 Introduction

Refining and separation of various impurities from nonferrous crude metals by vacuum distillation have many the advantage of high metal recovery, impurities recovered in metallic state, flow-sheet simplified, good environmental protection, low operation costs and incomplex equipment. So in recent years this method has been adopted widely.

Vacuum distillation has also been studied and used in separation of various elements from nonferrous alloys and the area of its application is being extended rapidly.

At this situation, some problems have been put up: What kind of impurities can be removed from crude metals? What kind of alloys can be separated by vacuum distillation? In present paper, attempts have been made to answer these problems and combine with practical results to analyse some valuable data obtained from test-work on vacuum distillation of crude tin and Pb-Sn alloy.

2 Evaluation of distillability for separation of various elements from crude metals and alloys

2.1 Evaluation by boiling points or vapor pressures of pure substances

Usually, the boiling points of various elements in crude metals and alloys at pure state or their vapor pressures at the same temperature ($p_i^\ominus$) are compared. The boiling points of some elements, namely the temperatures at vapor pressure of 1 atmosphere are shown in Table 1.

① 本文发表于 1989 年 TMS 年会论文集。

Table 1 Boiling points of some metal elements

Element	Hg	As	Cd	Zn	Ti	Bi	Sb	Pb	In	Ag	Sn
Boiling point/°C	357	603	765	907	1460	1564	1678	1740	2073	2200	2623

As shown in Table 1, the difference between boiling points of lead and zinc is 833°C, so it is determined that Pb-Zn alloy or crude lead containing zinc can be separated one another by vacuum distillation due to great difference in their boiling points. For the same reason, the similar substances such as Sn-Pb alloy or crude tin containing with lead, cadmium in Zn-Cd alloy or crude zinc and so on can also be separated by vacuum distillation.

On the other hand, the $p_A^\ominus$ and $p_B^\ominus$ of element A and B at the same temperature can be calculated, if $p_A^\ominus \neq p_B^\ominus$, it is considered that element A and B can be separated by vacuum distillation.

In this evaluation, the difference of action forces between atoms of elements in alloys is not put into consideration, so, for some materials the regularity described above can not be adopted and sometimes an impractical result occurs. Alloys of Pb-Bi, Sn-As-Pb and so on belong to such materials. For example, at the part of rich lead(crude lead, >90% Pb) in Pb-Sb alloy, lead is selectively volatilized during distillation, and at the part of rich antimony(crude antimony, >90% Sb), antimony is preferentially volatilized into gas phase. When crude tin containing arsenic and lead, lead is selectively volatilized into gas phase rather than arsenic.

2.2 Evaluation by practical vapor pressure

When evaluation, not only the values of $p_A^\ominus$ and $p_B^\ominus$ must be considered, but also much attention should be paid to activity a_i of each component(or activity coefficient r_i) and their contents of percentage(a^* stands for A, b for B) or mole fractions N_A and N_B , that is, the practical vapor pressures p_A and p_B produced after the solution of A and B is formed. Since

$$p_i = r_i N_i p_i^\ominus \quad (1)$$

Here, the change range of N_i is very large, it may be up to several orders of magnitude and that of r_i is of the same extent.

For example

Pb-Zn system(650°C)

End in rich lead $r_{Zn}^\ominus = 7.94$

End in rich zinc $r_{Pb}^\ominus = 34.6$

Cu-Zn system(500°C)

End in rich copper $r_{Zn}^\ominus = 0.014$

End in rich zinc $r_{Cu}^\ominus = 0.018$

The difference between two $r_{Zn}^\ominus$ in above binary systems is two orders of magnitude.

The change of r_i and N_i has great influence on p_i , so, for evaluating separation of elements, it is more perfect by use of p_i than by use of $p_i^\ominus$.

2.3 Evaluation by separation coefficient

Because of the molecular weight of each substance is different at the same practical vapor pressure, it is also different mass in gas. This can be shown by a simple example: at condition of