

磁场强化溶液蒸发的效果及机理^①

马 伟

(华南理工大学化工研究所, 广州 510641)

马文骥 马荣骏

(长沙矿冶研究院, 长沙 410012)

申殿邦

(沈阳冶炼厂, 沈阳 110025)

摘 要 磁场效应对含砷溶液蒸发过程实验表明, 磁场促进溶液的蒸发, 不同的磁场作用参数和不同的溶液成分, 影响效果不同, 溶液蒸发效率提高 5%~10%, 平均效率提高达 8% 以上。通过液气两相平衡、液体过热、成核和挥发等过程的分析, 认为磁场强化溶液蒸发的作用机理是磁场具有“磁致表面形核效应”。实验表明磁场降低溶液的表面张力(即单位面积自由能) 3.5%~8.3%, 从而降低了成核势垒, 促进了液体内部的能量交换。增加了汽化成核几率, 使溶液蒸发过程得以强化。

关键词 磁场效应 溶液蒸发 表面成核

中图法分类号 TQ253.23

磁场在工业、农业、国防、医学和生物工程中都有重要的作用。随着磁学理论和新型磁性材料的发展, 磁场的应用更加广泛。磁场对溶液作用时不改变物质的化学成分, 但改变物质的某些物理性质。目前, 为节能而将磁场作用于溶液的应用已有文献报道^[1-3]。在本文的研究中探讨了磁场效应对含砷废水蒸发结晶过程的影响, 测定了有关数据, 并结合溶液的汽化过程理论, 讨论磁致表面形核效应。

1 实验方法

实验用三氧化二砷和浓硫酸为分析纯试剂。溶液由可调式永磁(Nd-Fe-B 永磁材料)装置进行磁处理。

将电子输液泵、流量计用直径 0.5 cm 的硅胶管连接, 使配制好的含砷溶液以一定的流速通过磁处理装置, 通过调整流速、流经磁场次数和磁感应强度来改变实验参数。用相同的样品, 保持其它实验条件不变, 分别在有无磁

处理的情况下进行蒸发实验, 考察蒸发速率、表面张力等参数的变化。

2 实验结果与讨论

2.1 磁处理时溶液流速的选择

固定磁处理装置的磁感应强度为 0.3 T, 在 0.5~5 mL/min 的范围调整溶液流经磁场的流速, 测定不同流速下溶液的蒸发量, 得到磁处理流速对溶液蒸发效果的影响(图 1)。

从图 1 看出, 流速控制在 2 mL/min 效果比较理想。这可理解为若流速太小则溶液切割磁力线的运动速度小, 若流速太大则磁场作用时间短, 二者皆导致磁处理效果不明显。因而, 在磁场一定时其作用效果应由运动速度 and 作用时间的综合关系而确定。

2.2 磁处理次数的选择

控制流速为 2 mL/min, 改变电子输液泵的转动方向, 控制循环流动在同一方向下经过磁场的次数分别为 1~10 次, 得出磁场作用的

① 国家自然科学基金资助项目 59674018 和湖南省自然科学基金资助项目湘科计字(97)37-25

收稿日期: 1997-09-27; 修回日期: 1997-11-21 马 伟, 男, 32 岁, 博士后

效果与磁处理次数的关系(见图 2)。由图 2 可见,并不是磁处理的次数越多溶液的蒸发效果越好。按量子力学的观点,磁场传递能量是不连续的,实验结果证实了这一点,即磁处理次数在 2 次以上蒸发效果基本相同。

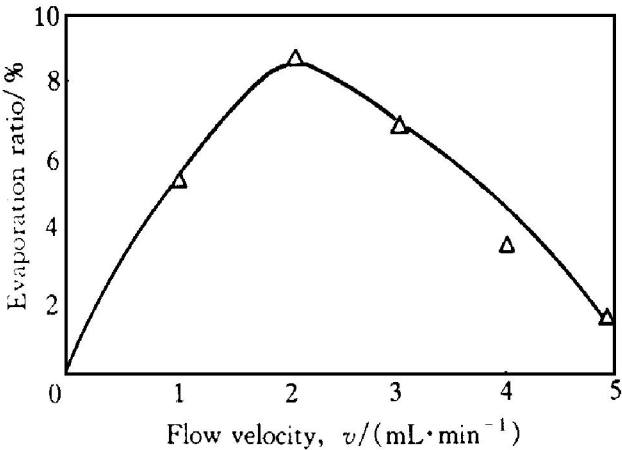


图 1 磁处理流速对溶液蒸发效果的影响
Fig. 1 Relationship between flow velocity and evaporation ratio in magnetic field

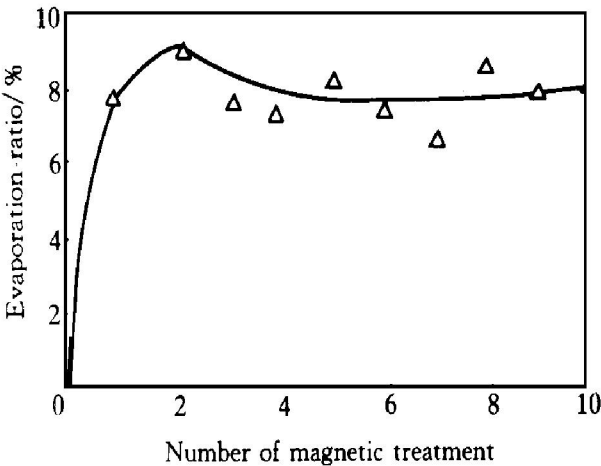


图 2 溶液流经磁场次数对蒸发效果的影响
Fig. 2 Effect of number of magnetic treatment on evaporation ratio

2.3 磁感应强度的选择

保持上述确定的流速和流过磁场的次数分别为 2mL/min 和 2 次,调节磁感应强度从 0.1~0.8 T,得到蒸发效果和磁感应强度的关系(见图 3)。实验结果显示,在磁感应强度为 0.3~0.5 T 的范围内效果较好。在大于 0.5 T 的条件下,溶液的蒸发效果并未随磁感应强度的增加而加强,这表明溶液对磁能的吸收受到很多

条件的约束。
2.4 常压下有无磁作用蒸发和结晶率的对比
磁处理速度为 2 mL/min,次数为 2,磁感应强度为 0.3 T,在相同的热负荷下实验对比结果见图 4 和图 5。

由上述结果看出,含砷溶液经磁场处理后,蒸发速度和体积结晶率均得到强化。

3 液气两相转变过程及磁场致表面效应对气泡核化势垒的作用

对于液气两相转变,由范德瓦斯(Van der

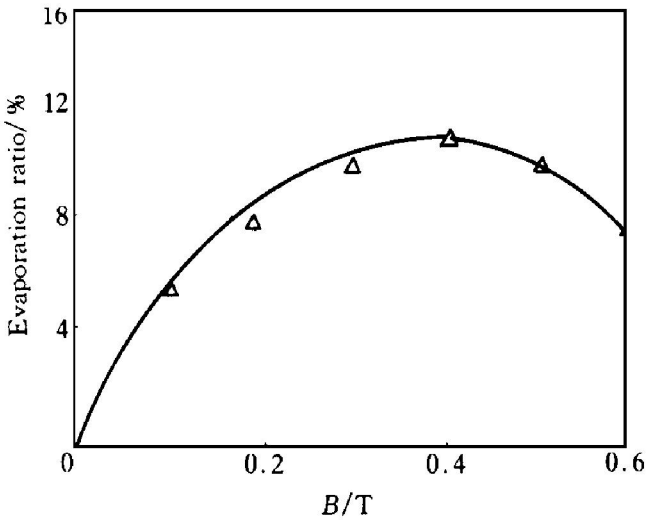


图 3 蒸发效果与磁感应强度的关系
Fig. 3 Relationship between evaporation ratio and magnetic induction intensity

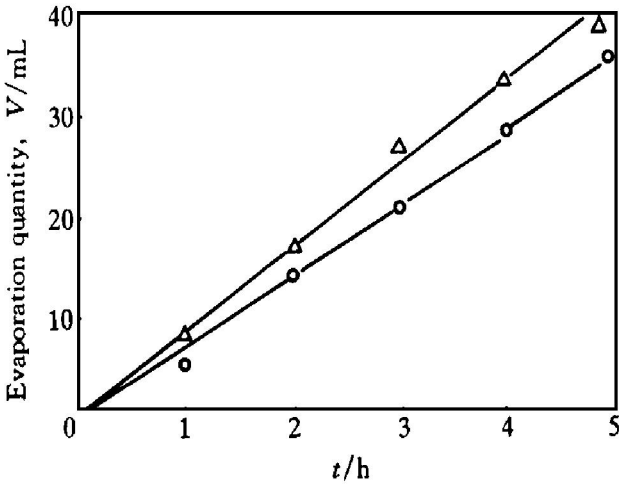
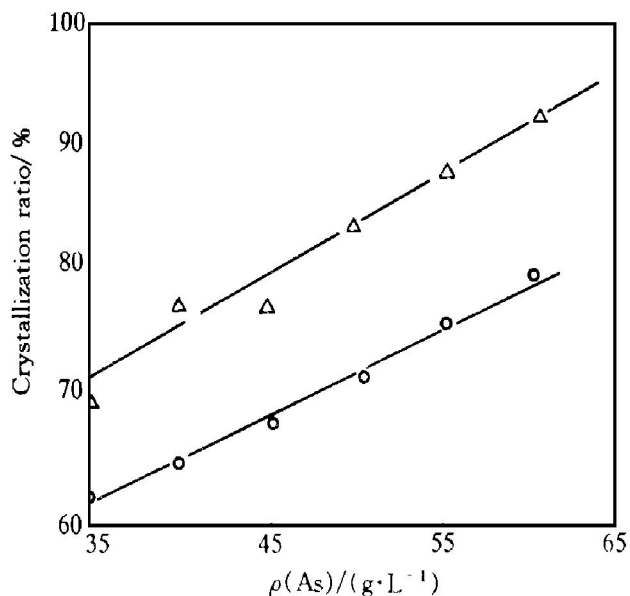


图 4 蒸发速度曲线
Fig. 4 The plot of evaporation rate
△—With magnetic field;
○—Without magnetic field

图5 As₂O₃ 体积结晶率曲线Fig. 5 Cubic crystallization ratio plot of As₂O₃

△—With magnetic field;
○—Without magnetic field

Waals) 方程描述为:

$$p = RT/(V - b) - a/V^2 \quad (1)$$

$$(\partial p / \partial V)_T = -RT/(V - b)^2 + 2a/V^3 = 0 \quad (2)$$

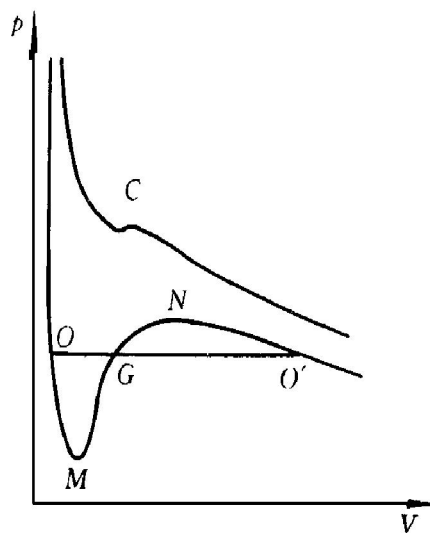
$$(\partial^2 p / \partial V^2)_T = 2RT/(V - b)^3 - 6a/V^4 = 0 \quad (3)$$

解得 $T_c = 8a/(2Trb)$ $p_c = a/27b$ $V_c = 3b$

C 为临界点, T_c , p_c , V_c 分别为临界点对应的温度、压力和体积(图6)。

当温度在 T_c 附近时存在一个液气二相共存区域。在范氏方程所示的 $OMGN O'$ 曲线上, OO' 是相平衡线, MO 是表示过热液体, 即其压强所对应的平衡温度低于该等温线的温度(液体的实际温度)。过热程度愈高, 汽化愈剧烈^[4, 5], $O'N$ 表示过饱和蒸汽, MGN 为不稳定状态, $(\partial p / \partial V)_T > 0$ 。由于系统内部物质密度的涨落, 便可形成新相, 实现相的转变。

从液体内部产生的极小气泡使得液体与溶液气泡组成二元系统, 此时液体表面张力对二相平衡与转变起很大的作用。从微小气泡的产

图6 范德瓦方程 $p - V$ 曲线Fig. 6 $p - V$ plot of Van der Waals

生逐渐长大成临界核的过程, 由于新相产生了气液界面, 故需向系统提供界面功。系统的界面吉布斯(Gibbs)自由能增加, 即 $\Delta G_A > 0$; 液体过热使过程转化为自发的, 即 $\Delta G_V < 0$ 。系统总的吉布斯自由能为

$$\Delta G = \Delta G_A + \Delta G_V \quad (4)$$

若液气界面张力为 σ , 气泡长大到气液界面面积为 A 时, 界面能为 σA , 且当液体受压力 p_0 时, 若产生压力为 p_g 、体积为 V_g 的气泡, 则必须抵抗弯曲界面附加压力 $(p_g - p_0)$ 而作功 $(p_g - p_0) V_g$, 故:

$$\Delta G_A = \sigma A - (p_g - p_0) V_g \quad (5)$$

若过热液体及气体的分子化学势分别为 μ_l 及 μ_g , 则产生 n 个分子的气泡时, 有

$$\Delta G_V = n(\mu_g - \mu_l) \quad (6)$$

因临界点时气液平衡, $\mu_l = \mu_v$, μ_v 为饱和蒸汽分子化学势, 故

$$\Delta G_V = n(\mu_g - \mu_l) = nKT \ln(p_g/p) \quad (7)$$

式中 K 为波尔兹曼(Boltzmann)常数, p 为临界核饱和蒸汽压, $KT = p_g V_g$ 。

若气泡是半径为 r 的球形, 则有

$$p_g = p_0 + 2\sigma/r$$

$$p = p_0 + 2\sigma/r_c \quad (8)$$

$$\Delta G = \sigma A - (p_g - p_0) V_g + p_g V_g \ln(p_g/p)$$

$$= 4\pi r^2 \sigma + (4/3)\pi r^3 \{ -2\sigma/r + (p_0 + 2\sigma/r) \ln[(p_0 + 2\sigma/r)/p_g] \}$$

$$(p_0 + 2\sigma/r_c)]\} \tag{9}$$
$$(\partial \Delta G / \partial r)_{T,n} = (16\pi r \sigma / 3 + 4\pi r^2 p_0) \cdot \ln[(p_0 + 2\sigma/r) / (p_0 + 2\sigma/r_c)] \tag{10}$$

对于临界核 $r = r_c$, $(\partial \Delta G / \partial r)_{T,n} = 0$, ΔG 为极大值 ΔG_c , 将 $r = r_c$ 代入式(9) 得:

$$\Delta G_c = 4\pi r_c^2 \sigma / 3 \tag{11}$$

ΔG_c 即为气泡核化势垒, 在 $r < r_c$ 时, $(\partial \Delta G / \partial r)_{T,n} > 0$, 只有 $r > r_c$ 时, $(\partial \Delta G / \partial r)_{T,n} < 0$, 气泡才能长大。

将式(8) 代入式(11) 得:

$$\Delta G_c = 16\pi \sigma^3 / [3(p - p_0)^2] \tag{12}$$

沸点时 $p \rightarrow p_0$, $\Delta G \rightarrow \infty$, 故气体不过热不可能汽化; 当外压 p_0 一定时, 液体温度高于沸点时 p 增大, σ 减少才有可能汽化。

实验测得不同砷溶液磁处理后表面张力变化(表 1)。

表 1 未经磁处理和经磁处理后的表面张力

Table 1 The surface tension of solution with and without treatment of magnetic field

$\rho(\text{As}) / (\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$\sigma / (10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1})$		$\Delta \sigma$	Change rate/ %
	Without mag.	With mag.		
2.15	7.853	7.580	- 0.273	3.5
3.02	8.540	8.167	- 0.373	4.4
9.23	9.854	9.041	- 0.813	8.3

从实验看到磁处理后表面张力减小, 并且随着溶液的成份不同, 减少的程度也有区别。

随着蒸发过程的进行及溶液中砷浓度的升高, 磁处理的效果也愈来愈明显。即经磁场作用后气泡核化势垒因表面张力的减小而减小, 临界半径也减小, 由于分子热运动引起的液体密度涨落克服更小的势垒时, 过热达到极限, 使更小的气泡得到汽化。从而提高了溶液的蒸

发速率和氧化砷的体积结晶率。这一结果与上述实验相符, 认为磁场致“表面效应”是降低了气泡核化势垒和临界半径, 同时使电位下降, 利于克服成核时的能障^[6], 达到强化蒸发过程的目的。

4 结论

磁场效应对溶液蒸发过程的促进作用, 提高了蒸发速率。溶液流经磁场的流速及流经磁场的次数、磁场感应强度等因素影响着蒸发效果, 具有合适的值才能得到较好的效果。此外、磁场作用效果的大小随着溶液中砷的浓度的增加而增大, 即与溶液的介质特性有关。理论分析认为磁场主要起到了磁致“表面效应”的作用, 促使气泡核化势垒和临界半径降低以及电位下降, 微小的气泡得以汽化, 加速了蒸发过程, 提高了蒸发效率。

REFERENCES

1 Ma Wei(马 伟), Ma Rongjin(马荣骏) and Shen Dianbang(申殿邦). The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1995, 5(4): 59.

2 Madsen H E L. Journal of Crystal Growth , 1995, 52: 94.

3 Chen Shaowei(陈绍威). Phsics(物理), 1992, 2: 109.

4 Liu Junji(刘俊吉), Shi Yuwen(史宇文) and Cao Hongbin(曹宏斌). Journal of Chemical Industry and Engineering(化工学报), 1997, 3(1): 75.

5 Kwak H Y, Sogbum L. J of Heat Transfer, 1991, 113: 717.

6 Zhuang Jie(庄 杰), Zhang Yulong(张玉龙) and Liu Xiaoyi(刘孝义). Prospect of Enviroment Science (环境科学进展), 1994, (4): 28.

EFFECTS AND MECHANISM ON STRENGTHENING EVAPORATION OF SOLUTION IN MAGNETIC FIELD

Ma Wei

Chemical Engineering Institute,

South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China

Ma Wenji, Ma Rongjun

Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy, Changsha 410012, P. R. China

Shen Dianbang

Shenyang Smelter, Shenyang 110025, P. R. China

ABSTRACT The magnetic effects on the evaporation process have been studied. The results showed that the magnetic field promoted the evaporation and crystallization of As_2O_3 , the evaporation rate increased by 5% ~ 10%, on an average of more than 8%, and the effects related to the parameter of the magnetic field and the composition of the solution. By analyzing the process of gas-liquid balance, super heat, shaping nucleus and volatilization, the “surface shaping nucleus effect” of magnetic field was revealed. The experimental results showed that the surface tension decreased by 3.5% ~ 3.8%. So the potential energy to shape nucleus was decreased and the internal energy exchange of solution was promoted. The probability of shaping nucleus in gasification was increased and the evaporation process of the solution was strengthened thereby.

Key words effect of magnetic field surface shaping nucleus evaporation of solution

(编辑 吴家泉)