第8卷 第1期
1987年1月

化 工 冶 金
CHEMICAL METALLURGY

Vol. 8. No. 1
January 1987

旋风进料落膜式直流转移弧型等离子体冶炼炉(plasmacan)的一种优化试验途径

陈乐山　　R.J.Munz

（中国科学院力学研究所）　　（加拿大、麦吉尔大学化工系）

摘　要

在对装置作实验研究时，如果该装置可调节的参数很多，则如何通过最少次数的试验，以实现设计意图，发现装置的最佳工况就成了突出的问题。本文从分析原料粒子在Plasmacan中的两个特征时间尺度入手（它们是：①粒子的实际停留时间；②粒子为完成设计中预期的反应而必须停留的最短时间），基于在两个不同层次上能量平衡的考虑（从全体粒子这个层次以及从单个粒子这个较细的层次），对设计及实验中可调节参数的影响作了分析与研究；并在此基础上提出了一个推荐的试验流程。按此流程来安排实验研究，可望通过较少次数的实验为Plasmacan找出最佳工况。该建议的实质是：对可以用大致合理的理论模型找出定性（或定量）解答的影响因素，就尽量靠理论来研究；只对理论在目前实在难回答的那些因素，才安排必要次数的实验研究。用这样一种理论与实验研究相结合，彼此扬长避短的策略来大大减少实验研究的次数。

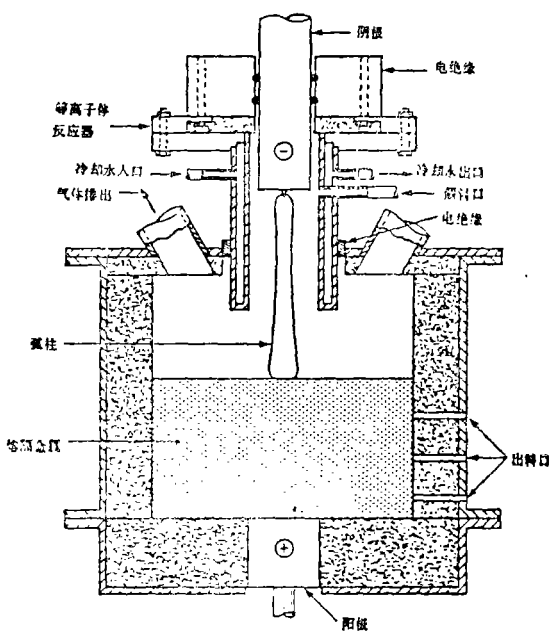

图1　Plasmacan 的结构简图

引　言

Plasmacan 的示意图见图1，它是由加拿大的Noranda研究中心最先发展的，随后又将专利卖给了Hydro Quebec及Davy Mckee公司，这后两家眼下正在做中间试验的工作。

Plasmacan 利用积存熔融金属（产品）的熔池充阳极，从而充分利用了阳极位降及电子逸出功的能量。它又用一个套筒将电弧围起来，沿套筒侧壁借气流携载把需要熔化或起化学反应的原料粉粒（直径 10～100微米）切向射入套筒；被离心力甩向套筒内壁的原料粉粒如能将套筒侧壁完全覆盖住，就可充作吸收电弧弧柱辐射热量的热汇（否则，直接到达套筒内壁的辐射热就将被冷却水作为废热而带走），从合理利用能量的观点看，这样安排是经济的。部分射入套筒的原料

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

粒子在吸够了熔化所需的热量后会熔化、并在其侧壁上逐渐汇集成一层往下滴落的熔膜（这是可以通过精心的安排来实现的）；受重力作用、熔膜在沿套筒侧壁往下流的过程中，还有机会继续进行设计所要求的某些吸热反应、转化为所期望的产品，最终收集在熔池内。这层熔膜的生成有两个好处：

①较细小的原料粉粒（如10微米左右）是易于被排出的气流带走的；一旦侧壁上有了这层熔膜存在，当未及熔化的粉粒被离心力甩向侧壁时，就增加了被熔膜粘住的可能性，从而提高了原料粒子的收集率。

②可以使某些非要在固—液相情况下才能进行的化学反应（如碳热还原反应）得以按设计要求的那样，部分或全部地在套筒内发生。而万一在套筒内竟未能生成熔膜，则预期应该发生在套筒内的那部分固—液相反应就不能完成，纵使原料粒子侥幸未被尾气带走而仍滞留在熔池内，也势必加重阳极的工作负荷，延长了冶炼时间，其后果只能是既降低了单位时间的产量，又增加了每公斤产品的能耗。

如何评价套筒的工作

由上述分析可知，套筒的设计在这类冶炼炉中占有特殊的地位；当炉子工作时，套筒内能不能像设计期望的那样生成熔膜又对Plasmacan潜在优点的发挥起着关键的作用。那么如何评价套筒工作的优劣呢？我们对套筒引进一个综合效率的概念，作为评价其工作优劣的指标。套筒的综合效率等于套筒的能量利用率与套筒的处理效率（对原料的）之乘积。

$$\text{能量效率}=\frac{\text{弧柱在套筒内释出的辐射功率}-\text{未能被粒子吸收而进入套筒冷却水的弧柱辐射功率}}{\text{弧柱在套筒内释出的辐射功率}};$$

$$\text{处理效率}=\frac{\text{实际上每秒被套筒加工到预期状态的粒子质量}}{\text{设计时希望的每秒应被套筒加工到预期状态的粒子质量}}。$$

显然，综合效率越接近于1，套筒就工作得越佳。

趋近最佳的第一个必要条件

既然我们的目标是尽量利用套筒区内弧柱的幅射功率、将一定数量的原料粒子加工处理到设计中希望达到的状态（比如说全部熔化、而且其中的百分之若干还能在套筒内完成希望进行的吸热还原反应），那么为了实现此目标，总能量在供求关系上最好是平衡的，换言之，原料粒子的喂入率应与电弧的可用功率相适应，即原料粒子喂入率（克/秒）=

$$\frac{\text{套筒中实际上可利用的弧柱辐射功率（瓦）}}{\text{单位质量的原料粒子发生所期望的变化需要的焓值（焦/克）}}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(1)$$

套筒内实际上可利用的弧柱辐射功率可从模型试验中、流经套筒内的冷却水带走的热量测得。可以近似认为，在弧柱较长时，辐射功率的绝对值基本上是气体类别、电弧电压、电流、弧长和冶炼炉几何尺寸的函数；而其相对值$\left(\frac{\text{绝对值}}{\text{电极电压}\times\text{电弧电流}}\right)$当弧柱较长、气体

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

相同、而模型炉又与真实炉几何相似时，则对两者是近似相等的。

在 Plasmacan 上的初步实验结果也表明，当原料粒子喂入率太大（比(1) 式要求的值大许多）时，未熔化粒子的比例就增加；而当喂入率太小时，虽然粒子大多熔化了，但能量利用率却很低。

趋近最佳的第二个必要条件

纵使粒子喂入率基本满足了式（1），它只表明在总体上，能量的供求关系是大体平衡的，却并不能保证能量沿粒子间的分配是及时又合理的。所谓能量分配“及时、合理”是指绝大多数粒子都能在它们滞留于套筒区的期间内，得到它们各自为完成设计时希望它们经历的变化（如熔化、吸热化学反应）所必需的那份能量，这是趋近最佳（设计时期望的状态）的第二个要求。

只是总能量沿粒子的实际分配是个极复杂的问题，它至少和弧柱辐射热传递给气体与粒子的过程或机制有关，也和粒—粒以及粒—气间的作用有关，还和粒子、气体与套筒内壁的相互作用有关；企图将所有这些相互作用都包含在一个统一而又简单的理论模型中来求答案几乎是不可能的，因此我们放宽要求，只限于去寻觅实现“及时、合理”的必要条件。为了能够找到一把恰当的尺子去度量套筒内能量向粒子的传递是否“及时”，我们不妨引入两个特征时间尺度：粒子在套筒内的停留时间与粒子熔化所需要的时间；并用它们的比值，作为衡量能量传递及时性的一种尺度。如若一个粒子在套筒内的停留时间 t_r 远小于使它熔化所需的最短时间 t_m，则该粒子在通过套筒区时可能得到的能量就远不够使它熔化，更不用说够完成进一步的固—液相吸热化学反应了；倘若射入的绝大部分原料粒子都有 $t_r/t_m<<1$，势必就很难生成熔膜，设计时希望完成的任务就将落空。

如何估计粒子熔化所需的“最短”时间 T_m

为了体现出“最短”，不妨设想一个最简单、最乐观而又理想化了的原料粒子沿套筒内壁的排列方式为基础，来近似估计一个有代表性的粒子在套筒内熔化所需的时间。为此我们假设①所有原料粒子都是球形且球径都一样，②只有单层粒子覆盖在套筒内壁上，③粒子间挨得异乎寻常地紧、以致于所有可吸收弧柱热辐射的侧面积都被粒子占满了，④它们均以同一个速度贴着套筒侧壁往下降落，⑤粒子虽贴在套筒侧壁上，但却不向壁传输热。

当炉子稳定运行时，套筒侧壁上的热流密度为 $\frac{P_s}{2\pi r_s L_s}$（瓦/CM²），P_s 为套筒区内弧柱辐射的最大可用功率（瓦），r_s、L_s 见图2。如以 ρ_p 表示需熔化的原料粒子的密度（克/c、c、），r_p 即为粒子半径（CM），$\triangle h$ 为每克粒子由注入时的温度加热到熔化所需的热量（焦耳/克），t_m 为熔化所需的时间，则有：

$$\left(\frac{4}{3}\pi r_p^3\right)\rho_p\cdot\triangle h=\frac{P_s}{2\pi r_s L_s}\cdot\pi r_p^2\cdot t_m$$

$$\therefore t_m=\frac{8\pi r_s L_s r_p \rho_p \triangle h}{3P_s}\ \text{（秒）}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\ (2)$$

由于在估算 t_m 时，作了所有粒子都有最大的、均等的机会吸收辐射热（假定②），没有任何辐

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

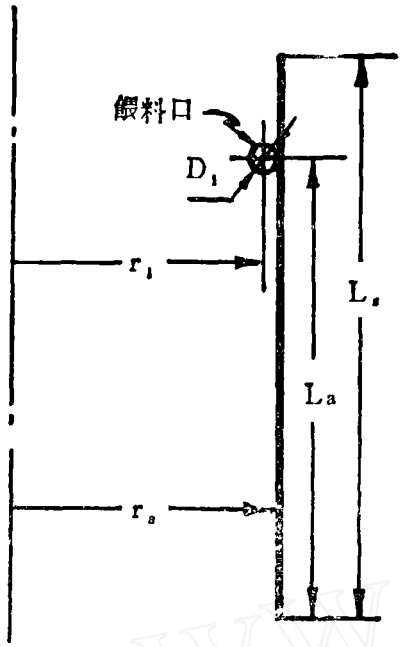

图2　图套筒示意图

射热浪费（假设③—⑤）的理想化假定，t_m理应代表为使绝大多数粒子熔化、平均需要的最短时间。

如何估计粒子的停留时间

原料粒子由载流气体夹带着通过套筒侧壁上的喂料孔、切向射入套筒；另有一股等离子体气流从阴极沿轴向也射入套筒。切向的和轴向的这两股气流在套筒内渐汇总成一股向下的轴向气流；在这股总的、轴向向下气流的携载下，更兼重力加速度的作用，原料粒子不断下落。在下落的同时，由于离心力的作用，粒子始终受到一个推向侧壁的力；当它撞壁时，它会和壁交换一部分动量，从而减慢了轴向下降的速度和原有的切向速度；粒子从壁反弹后不久，又会被离心力再度甩向侧壁。如此反复弹跳，构成一种减幅的径向振荡；假想套筒无限延伸，则总有一时刻，振荡的幅值会衰减到和套筒侧壁的粗糙度同样大小，这时我们认为粒子弹跳（或“自由”飞行）的阶段即告结束，此后粒子轴向下降的速度将大大减小（换言之，粒子在套筒内的停留时间将大大延长），其值将由固壁摩擦的规律而定。如用Z_p表示从弹跳停止的位置到注入口的轴向距离，t_{sb}表示粒子越过Z_p所化的时间（Z_p，t_{sb}的确定以下讨论），L_a代表实际上可为粒子利用的套筒轴向长度，那么①当$Z_p \leq L_a$时，通常可认为$t_r >> t_{sb}$；②当$Z_p > L_a$时，则t_r应等于粒子以弹跳方式轴向飞越L_a距离所需的时间。我们发展了一个模型来建立Z_p、t_{sb}与原料粒子特性，套筒几何特性，弧柱特性以及携载气流特性之间的定性关系，给出了Z_p、t_{sb}的定性估算办法（参阅文献〔1〕与〔2〕，〔1〕适于原料粒子的稀相输送；〔2〕则把〔1〕的方法扩展到密相输送的情况）。

三　点　解　释

一、对$Z_p > L_a$的情况，如$t_r/t_m \geq 1$，则粒子径向弹跳的振幅虽仍大于壁面粗糙度，但弹跳将因粒子表面熔化而提前结束，不妨设想这时，一当粒子温度达到熔点时，它将“粘”在套筒侧壁上，熔膜大概也将在此附近开始形成；如$t_r/t_m < 1$，则套筒内将不生成熔膜。对$Z_p \leq L_a$情况，如$t_{sb}/t_m \geq 1$，即虽然弹跳的振幅仍比壁面粗糙度为大，但弹跳将因粒子表面熔化而提前结束，不妨设想一当粒子温度达到熔点时，它将粘在套筒侧壁上，熔膜也将在此附近形成；如$t_{sb}/t_m < 1$，则由于$t_r >> t_{sb}$，再若有$L_a >> Z_p$，则通常很可能仍有$t_r/t_m > 1$，这时熔膜很可能在离Z_p不远的下方开始。

二、关于$\triangle h$。粒子可以有两种方式熔化：等温熔化，即球心与球面的温度基本相同；

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

不等温熔化，球心温度可以远低于球面温度。而粒子是否“粘”在壁上，则主要取决于球面温度；显然，等温熔化的△h（因而t_m）要比非等温熔化的△h（因而t_m）为大。为了判断熔化的方式，不妨引入两个热流量尺度；①当温差最大时（如球面温度已达熔点而球心仍为室温时），一个球形粒子靠传导输热的机制能从表面移走的热流量P_{out}（焦耳/秒）；②外界能稳定地供应给粒子表面的热流量P_{in}（焦耳/秒）。若$P_{out} >> P_{in}$，则粒子的熔化方式接近于等温熔化；反之，则粒子的熔化方式接近于非等温熔化。

三、粒子尺寸。射入套筒区的原料粒子通常都有一个尺寸分布，大粒子所需的熔化时间很可能不同于小粒子的；两者的停留时间也很可能不同。对于粒子尺寸相差不悬殊的情况，大概可用具有平均尺寸的一个粒子的经历来粗糙地表征整个粒子群在套筒内可能发生的变化。

讨 论

以上关于能量传递及时性的讨论偏于抽象，现在试着直观地看当t_r/t_m取不同值时，套筒内粒子分布的图象有何差异。图3示意性地表示于同一设备中可能发生的三种情况，其中原料粒子喂入率，粒子性质，熔化时间等都相同，唯一不同的只是粒子在套筒内的停留时间。图3a对应于$t_r/t_m<1$，即能量传递不够有效、不够及时的情况，这时因粒子降落得太快（停留时间太短），所以纵使在总量上、能量的供与求是平衡的，但落实到每个粒子具体分到的那份能量而言，却是供不应求的。作为原料粒子匆匆掠过套筒区的后果是套筒壁不能时时处处都被粒子遮住，因而有一部分弧柱辐射热是直接进入了冷却套筒壁的冷却水而浪费掉了。图3b对应于$t_r/t_m=1$，这时粒子降落得不快不慢（一个个又排列得最紧凑），套筒侧壁上每一块面积恰好都被单层原料粒子挡住，弧柱辐射热无法直接进入套筒冷却水（故辐射热没有絲毫浪费）。图3c对应于$t_r/t_m=2$，这时粒子下降得太慢了，以致套筒侧壁每一块面积上都有两层原料粒子覆盖着。单纯从不浪费弧柱幅射热的角度看，这似乎很保险，但也可能引起新的问题；①由粒子降落太慢而造成的堆积，势必使一些粒子处在另一些粒子的阴影中（例如图3c中的粒子1与2），因而在接受弧柱辐射热的问题上，粒子间不再是机会均等的了，这可能导致或加剧能量沿粒子间的不合理分配。②粒子1既在粒子2的阴影中，就

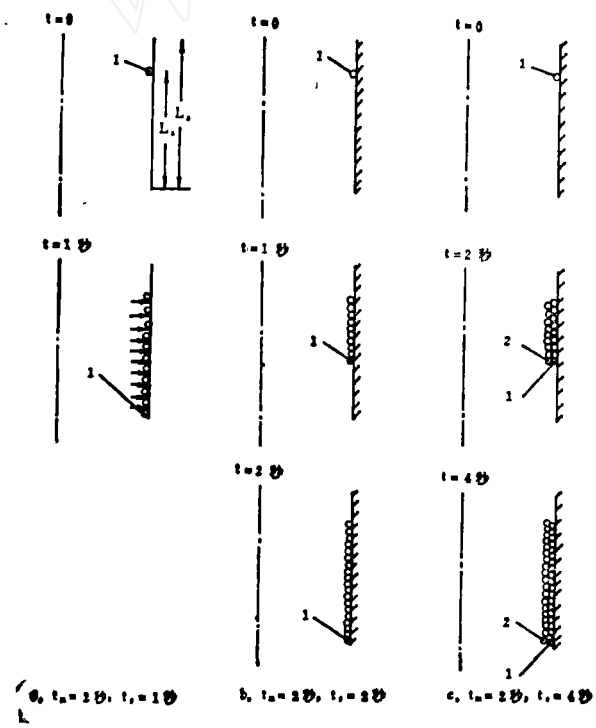

图3 由于粒子停留时间不同而造成粒子在套筒内排列状况的不同（喂入率及熔化时间对a.b.c.三种情况都一样）

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

只能靠与相邻粒子或气体的接触而得到热量，粒子1靠这种传热机制达到熔化所需的时间与（2）式预言的显然会不同，这也可能会加剧能量分配的不合理；③图3中所示粒子井然有序地排成两层的图形只是一种一厢情愿的设想，倘若有几个后射入的、远未熔化的粒子下落得略快些、又被离心力甩到粒子2上（由于粒子2碰巧享有优先接受辐射热的特权、又停留了足够长的时间来使自身熔化），他们就会被粒子"粘"成堆。这很可能是某些实验中、未熔粒子粘合成团以至于大家都得不到足够热量来熔化的原因；而当这种"团"在径向生长很快、拥塞了弧柱通道时，就可能导致电弧熄灭。这曾是在个别实验中观察到的现象；而"团"生长过快的原因之一，可能是螺旋喂料器工作不稳定所致。

上述这些粒子间可能发生的复杂的相互作用，在本文所建立的理论模型中根本未予考虑；但它们却会影响能量沿粒子间的实际分配，因此关于能量分配合理性的问题只能主要由实验来回答。本文模型目前所可能回答的只是：①当$t_r/t_m \ll 1$时，能量沿粒子的分配很难说是合理的（由"不及时"引起的"不合理"）；②当$t_r \sim t_m$或$t_r > t_m$时，能量分配的"及时性"只得到了笼统的解决；而具体到每个粒子分到的能量而言，仍有可能"贫富不均"（甚或"贫"者更"贫"、"富"者更"富"）；③对应于最大综合效率的最佳工况很可能位于$t_r \geq t_m$的区域；至于t_r/t_m具体取什么值最佳，只能由实验研究来定。

把上述内容化为一个推荐的进行实验研究的合理步骤，可具体化为图4所示的流程图。

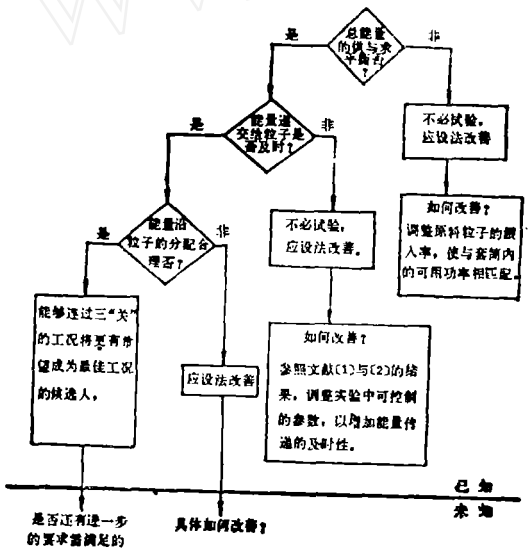

图4　推荐的实验研究流程

小　　结

Plasmacan中可调节的参数计有18个，它们是：

① 与套筒几何特性有关的参数：r_s, L_s, r_i, L_s, D_i，壁面粗糙度，套筒内沉积的可用功率在总功率中占的份额（7个）；

② 与粒子有关的参数：$\rho_p, r_p, \triangle h$，粒子尺寸分布（4个）；

③ 与套筒壁及粒子共同有关的参数：描写粒子与套筒壁相碰时动量交换情况的三个（径向、切向、轴向）动量恢复系数（3个）；

④ 与等离子气及载流气体特性有关的参数（当等离子气与载流气是同一气体时）：

气体密度ρ_g，气体粘度μ，轴向气流量，切向气流量（4个）。

一眼看来，求套筒最佳工况的问题就该在18度空间内来寻觅；即使对每个可调参数只取2个数值来试验，需作的试验研究次数也达$2^{18} \approx 2.6 \times 10^5$次，显然这既不现实，也不必要。但倘若我们接受这样一种看法，即套筒的综合效率主要取决于t_r/t_m，则问题就简化为

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

只需在一度空间内求最佳。我们在本文以及相应的姐妹篇中分别发展了有关的模型来建立t_m以及t_r各自与诸可调参数间的关系，从而实现了上述目标。即使在一维参数空间内找最佳，也还可进一步简化，即$t_r/t_m<<1$或$t_r/t_m>>1$的区域是不像会有最佳工况存在的。

参考文献

〔1〕 L.S.Chen and R.J.Munz, Modellig of the entrance region of a cyclone transferred arc plasma reactor, Presented at the 7th International Symposium on Plasma Chemistry, Eindhoven, The Netherlands, July 1985.

〔2〕 L.S.Chen and R.J.Munz, Modelling of the free flight region of a cyclone transferred arc plasma reacter, Presented at the Proceedings of the International Conferenee on Plasma Scienee & Technology, Beijing, China, P.85—91, June 1986.

An Experimental Approach to the Optimum Operational Region of the Plasmacan—A Cyclone Transferred Arc Plasma Furnace with a Layer of Falling Molten Film on Its Sleeve

L.S.Chen* and R.J.Munz

(McGill University, Department of Chemical Engineering 3480 University, St., Montreal, Quebec, Canada, H3A 2A7)

ABSTRACTS

When we do experimental research on our apparatus, how to approach its optimum by as little amounts of tests as possible and realize the intentions in our design is quite a prominent problem, especially when there are many controllable parameters in the test. In this paper, we start our work by analysing the two characteristic time scales in Plasmacan (they are: 1. the actual residence time of raw material particles, 2. the necessary shortest time for them to accomplish the expected change or reaction in designe), take into account the energy balance at two different levels (at the level of

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

whole particles and the level of individual particle), and then investigate the sinfluences of each controllable parameter of the furnace in terms of the relationship between the two time scales. Bsaed on this consideration a proposed. flow chart for expenmental research is recommended. It is expectable to substantially reduce the times of trial and error in approaching the optimum operational region for the Plasmacan if such a flow chart is followed. The strategy of the proposed idea is: In the case that a roughly reasonable and simple model seems to be able to make clear the influences of different parameters, we seek for the solution mainly by theoretical approach; only in the case that theory finds on scope for its ability at this stage (e.g. owing to the lack of available data or the lack of understanding about the relevant mechanism etc.) then we leave the answer of the question to experimental research. By way of developing and combining the strong points of both theory and experiment, it is believed that the necessary time needed for experimental research could be reduced significantly.

*L.S.Chen is a visiting scholar from the Institute of Mechanics, Beijing, China

《湿法冶金》《锗提取冶金专辑》已出版发行

《锗提取冶金专辑》是从1970—1984有关锗书刊中收集部分文章编辑而成的。专辑分概述、工艺、文摘与简迅三个部分。在概述有中：锗的矿物和矿床；锗的应用，供需状况与市场价格；国内外锗浓缩物提取工艺的现状等三篇综述文章。工艺部分有：用氢氧化铁Ⅲ从工业溶液中提取锗；从锗—镓体系中提取锗的研究；为改善锗的吸附，AH—31阴离子交换剂最佳几何构形的选择；用8—羟基喹啉衍生物萃取锗；锌电解过程中副产品锗的回收；从含锗玻璃组成物中分离回收锗的方法；高纯甲锗烷或金属锗的制备以及锗体的纯化方法等十九篇文献。文摘与简迅部分包括：发电厂煤灰胜用的可能性—发电厂煤灰作为第二锗原料资源；煤化学加工过程中分离锗的研究；氢氧化鈦是锗的共沉与浮选萃取的最佳捕收剂；用于电离辐射探测器的高纯单晶锗的制备以及高纯锗的制备。

本专辑对于从事锗及其化合物的生产、科研以及教学工作者均有一定的参考价值。欲购买单位或个人，请直接汇款给编辑部北京234信请箱《湿法冶金》编辑部收办理函购手续。每册定价2元。

核工业部北京第五研究所　《湿法冶金》编辑部

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net