

中国金属学会冶金过程物理化学学会

第五届冶金过程动力学和反应工程学  
学术会议论文集

PROCEEDINGS OF THE FIFTH SYMPOSIUM  
ON METALLURGICAL KINETICS AND  
REACTION ENGINEERING

October 1991

中国·济南

Ji'nan, China

# 目 录

冶金反应工程学的发展 ..... 蔡志鹏 魏季和 曲英(1)

## 一、冶金过程的动力学研究

1. 氧化镍矿盐酸浸出动力学研究 ..... 康大平 柯家骏(14)
2. Fe-FeO(CaF-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-CaO)电极反应: 交换电流密度和扩散系数 ..... 向顺华 魏季和 贾继华(22)
3. 冶金熔池搅拌操作下的流动和传质 ..... 曲英 F.Oeters(31)
4. 磁铁精矿球团氧化反应动力学研究 ..... 梁儒全 赫冀成(48)
5. 顶底复吹条件下熔池传质的研究 ..... 张家芸 宋秀安(56)
6. 等离子体冶炼含氮不锈钢的研究 ..... 范光前 高瑞贞 刘述临等(65)
7. 含碳球团的冶金特性研究 ..... 周渝生 杨天钧 吴铿等(74)
8. 含碳锰矿团块中的添加剂 ..... 彭梦陇 张森 蒋国昌等(86)
9. 锰熔融还原反应现象的 X 线动态显示 ..... 郭曙强 蒋国昌 徐匡迪(92)
10. 球团内碳酸盐分解过程模型 ..... 黄典冰 孔令运(103)
11. 顶吹氧底吹氧和天然气复吹转炉熔池搅拌能的分析  
以及对冶金反应的影响 ..... 唐萍 颜广庭等(113)
12. 底吹氧及天然气复吹过程碳磷氧化速度及其影响因素 ..... 唐萍 颜广庭等(124)

## 二、能源利用和传热问题

13. 熔盐中煤氧浸没燃烧数学模拟 ..... 郭占成 王大光 许志宏(131)
14. 超高温条件下加速粉煤燃烧的传热、传质条件估计 ..... 陈燕茹 刘述临(142)
15. 炉内辐射换的 Monte-Carlo 方法计算 ..... 李保卫 贺友多(148)
16. 微波加热与铁矿石还原 ..... 黄务涛(154)
17. 含碳团块—铁浴式熔融还原的能量预测 ..... 徐匡迪 蒋国昌 张晓兵等(162)
18. 电炉煤粉—氧气助熔技术喷吹工艺的研究与实践 ..... 沈颀身 范光前 毕云江等(182)
19. 顺流层状燃煤过程的数学模型 ..... 张付信 王尚槐等(192)
20. 钢包流股温度的数学模型 ..... 周宏 曲英(201)

### 三、冶金过程的数学模型

21. 关于高炉无料钟布料炉料分布模型研究 ..... 段国绵 杨天钧 周渝生等(215)
22. 竖炉球团的运动行为 ..... 梁儒全 赫冀成(224)
23. 水平管密相气力输送分层流动模型 ..... 洪江 沈颐身 刘述临(229)
24. 球团竖炉过程数学模型 ..... 梁儒全 赫冀成(247)
25. 电渣重熔体系中的磁场—数学模拟与直接测量 ..... 刘应书 魏季和 向顺华等(259)
26. 板坯连铸机中间包流场研究 ..... 贺友多 刘中兴(266)
27. 轴承钢真空吹氩精炼搅拌功率控制的数学模型研究 ..... 李士琦 王平 米浩等(275)
28. 连铸结晶器内传热及应力模型 ..... 徐烈鹏 张晓兵 汪建农(286)
29. 退火炉改造的研究 ..... 麻永林 张捷宇 贺友多(299)
30. 电磁铸造实验和数值模拟 ..... 韩至成(306)

### 四、冶金过程物理模拟研究

31. 双室炼铜熔池传质过程的研究 ..... 袁志昌 彭济时(318)
32. 气泡在液—液界面上的生长规律 ..... 李新海 陈新民 莫鼎成等(328)
33. 顶底复吹转炉底吹喷嘴端部蘑菇体的冷模拟研究 ... 张晓兵 曹兆民 李洪利等(334)
34. 泡沫陶瓷结构参数对金属液流动行为的影响 ..... 高洪吾 马红军 杨长贺等(344)
35. “液体—颗粒”体系水力学研究方法的探讨 ..... 张荣生 谢效方 何平等(352)
36. 细孔多管式底吹元件的流动特性实验研究 ..... 蔡志鹏 马恩祥 钱占民等(361)
37. 连铸中间包的水模型研究 ..... 杨森龙 樊养颐(369)
38. 炼钢中底吹条件下熔池混合特性的探讨 ..... 何平 邓开文 张荣生(379)
39. VOD 过程单孔—三孔拉瓦尔氧枪对比及速度场模拟研究 ..... 沈宗斌等(386)
40. 在线测量系统及其应用 ..... 魏伟胜 蔡志鹏(394)

# 冶金反应工程学的回顾及展望

蔡志鹏 魏季和 曲英

## 摘 要

从学科发展的角度, 简略回顾了冶金反应工程学的兴起、形成和发展历程; 扼要综述了我国在该学科领域内的研究工作和取得的进展; 对其发展前景作了展望; 并就我国如何进一步发展该学科提出了一些想法和建议。

关键词: 冶金反应工程, 回顾, 展望, 中国

## 一、冶金反应工程学的发展历程与现状

冶金与化工本共属于同一学科范畴, 美国《化学工程》(Chemical Engineering)杂志的前身即为《化工与冶金工程》(Chemical and Metallurgical Engineering), 直到 1942 年才把冶金学科分离出去, 名为“化学工程”。五十年代, 化学工程发生了质的飞跃, 一个重要的标志是“传递过程原理”这一分支学科的建立, 并由此而促进了“化学反应工程学”学科的形成和发展。

鉴于冶金和化工的很多共性, 不言而喻, 完全可以运用化学反应工程学的理论和方法来研究冶金过程及工程问题。还在五十年代中期, 我国冶金学家叶渚沛就指出, 本来并没有理由把冶金与化工割裂开来, 它们的过程都涉及动量的传递、能量的传递、物质的传递和化学反应; 之所以将它们分开, 只是因为相对而言冶金过程的温度较高、规模较大, 有其自己的特殊性而已; 因此, 应用动量、热量、质量传递和化学反应的原理来研究冶金过程, 开发和研究新型冶金设备是我国冶金工作者的重要任务之一<sup>[1]</sup>。这正是“冶金反应工程学”的基本思想。

1960 年, Machlin<sup>[2]</sup>发表了其著名论文“真空感应精炼的动力学理论”, 应用流体力学概念和原理, 从传质出发分析和探讨了真空感应精炼过程, 提出了一个全新的真空感应精炼过程数学模型, 并以该模型对真空感应精炼过程中的一些精炼反应, 诸如蒸发、脱硫、脱氧和坩反应等, 作了定量处理和估计, 所得结果与不少研究进的实验定均相当吻合, 对实际精炼过程颇具指导意义, 如果说叶渚沛首先预见到必将出现冶金反应工程学这样的边缘学科, 那么, Machlin 的工作则在实际上揭开了冶金过程研究的新篇章, 开创了冶金反应工程学的先例, 引起了不少冶金工作者的极大兴趣和重视, 使人们开始更多地运用数学方法来分析和研究冶金过程和体系及其控制, 至六十年代末, 据不完全统计, 发表的有关冶金反应工程学方面的学术论文达 200 余篇。

进入七十年代以后, 已初具雏型的冶金反应工程学获得了迅速、持续的发展, 在国际冶金学术会议(例如文献[3-12])及主要的冶金刊物上, 有关的研究成果越来越多地涌现出

来。与此同时，一些专著也相继问世。例如，“冶金反应工程学”(1972)<sup>[13]</sup>，“Rate Phenomena in Process Metallurgy”(1971)<sup>[14]</sup>，“Transport Phenomena in Metallurgy”(1973)<sup>[15]</sup>，“Process Optimization with Applications in Metallurgy and Chemical Engineering”(1973)<sup>[16]</sup>，“Gas-Solid Reactions”(1976)<sup>[17]</sup>，“Rate Processes of Extractive Metallurgy”(1979)<sup>[18]</sup>，“Fluid Flow Phenomena in Metals Processing”(1979)<sup>[18]</sup>，“Fluid Flow Phenomena in Metals Processing”(1979)<sup>[19]</sup>，“Математическое Моделирование Сталеплавильных Процессов”(1978)<sup>[20]</sup>，“Математическое Описание и Расчеты Сталеплавильных Процессов”(1982)<sup>[21]</sup>，“Физическое Моделирование в Металлургии”(1984)<sup>[22]</sup>，“The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations”(1988)<sup>[23]</sup>，“Mathematical Modeling Strategies in Materials Processing”(1989)<sup>[24]</sup>，“The Mathematical and Physical Modelling of Tundish Operations”(1989)<sup>[25]</sup>，“Engineering in Process Metallurgy”(1989)<sup>[26]</sup>，等等。这些著作或紧密结合冶金阐述了传输现象的基本原理，或对应用这些原理分析和研究各种冶金过程及体系已取得的成果作了较系统的概括和总结。它们既表明冶金反应工程学进入了一个新的阶段，又进一步推动和促进其更快地发展，及至1987和1989年两次成为AIME年会“提取冶金讲座”(Extractive Metallurgy Lecture)的主题<sup>[27,28]</sup>。现在，冶金反应工程学已经成为冶金学科中一个十分活跃的、极有前途的、仍在发展中的新领域，它的兴起、形成和发展，已经并将进一步给古老的冶金学科增添新的活力，带来新的生机。

有必要指出，“冶金反应工程学”的提法始于日本，而欧美冶金界则使用“冶金过程数学(物理)模拟”、“冶金(的)过程工程”(Metallurgical Process Engineering)等名称，这与冶金反应工程学作为一新兴学科尚不成熟不无关系。事实上，随着该学科的不断发展，“冶金反应工程学”这一名称已为越来越多的冶金工作者所接受，欧美冶金界也已有人开始正式使用<sup>[26,29]</sup>。

我国在冶金反应工程学方面最早的实质性的研究是叶渚沛用化学流体力学、传热和热能平衡对高炉强化冶炼的分析<sup>[1]</sup>。1981年以后，翻译和出版了“冶金反应工程学”<sup>[30]</sup>、“冶金中的传热和传质现象”<sup>[31]</sup>、“提取冶金速率过程”<sup>[32]</sup>、“冶金中的流体流动现象”<sup>[33]</sup>和“冶金过程的数学物理模拟”<sup>[125]</sup>等专著，这对加速冶金反应工程学在我国的传播和发展很有裨益。1982年4月，召开了全国冶金反应动力学及第二届炼钢理论学术讨论会，会上宣读的42篇论文中一半以上属冶金的反应工程学领域<sup>[34]</sup>。这次会议是对我国在该学科领域内研究成果的首次大检阅，在国内引起了很大的反响，中国科学院技术科学部对其也极为重视，挑选了两篇论文作为同年8月召开的学部委员会扩大会议的特邀报告<sup>[35]</sup>。此后，该领域的学术活动一直十分活跃，1982年10月正式组建的冶金反应动力学学组做了大量很好的组织、引导工作。为适应冶金反应工程学在我国的发展，1990年初又易名为冶金反应工程学学组。在1982年至今近十年的时间里，已召开了包括这次济南会议在内的四次全国性的学术会议<sup>[36-39]</sup>和一次专题讨论会(钢铁生产过程数学模型学术讨论会，1989年5月，上海宝钢，只印了论文摘要)，总计入选论文约220篇，有效地促进了我国冶金反应工程学学术水平的提高和学术队伍的成长。

\*注：加\*号者已有中文译本

冶金反应工程学这一学科的产生和发展,给冶金工程教育以巨大的冲击和影响,冶金工程教育面临如何尽速进行自身的调整、改造和完善以适应冶金科学和技术的这种发展趋势的艰巨任务。在过去的十余年间,我国在这方面也做了很多颇有成效的工作。各高等院校相继为冶金专业开设了冶金传输原理和冶金反应工程学等课程,成立了相应的教研室;有关院校召开了两次冶金反应工程学教学研讨会;编写和出版了“冶金反应工程学导论”<sup>[40]</sup>、“冶金反应工程学”<sup>[41]</sup>,以及与冶金反应工程学密切相关的“动量、热量、质量传输原理”<sup>[42]</sup>和“冶金工程数学”<sup>[43,44]</sup>等教材和专著;作为冶金继续工程教育的重要组成部分,积极开展了这方面的继续教育;等。所有这些都为冶金反应工程学在我国的发展打下了良好的基础。

还值得提到的是,国家自然科学基金委员会已正式将冶金反应工程学列为优先资助的学科之一,《化工冶金》则开辟了“冶金反应工程学”专栏<sup>[45]</sup>,为我国冶金反应工程学的发展创造了较好的环境,提供了一些必要的条件。现在,一支具有一定学术水平和数量的、很有生气的、从事该学科教学和科研工作的科技队伍已在我国形成,且正在不断发展和壮大。

## 二、冶金反应工程学在我国的进展

近十年来,冶金反应工程学在我国发展较快,在学术上取得了相当大的进展。大体说来,所进行的研究工作有:各种冶金反应器内流动和传质的数学物理模拟,各种冶金反应动力学的研究,金属凝固过程的研究,冶金过程及体系最优化的研究,有关测试技术和研究手段的开发及改进等几个方面。

### 1. 钢铁冶金反应器内流动和传质的数学物理模拟

反应器内的流动和传质特性是设计反应器及其操作工艺的重要依据,而混合特性则是评价反应器设计及操作合理程度常用的一个综合性指标。所谓混合特性,对连续式反应器来说,就是停留时间分布;对间歇式反应器而言,即混合时间。在冶金和化工中,测定反应器混合特性常用的实验方法是既简便又可靠的示踪剂法。基于这些考虑,对喷射冶金、炉外精炼、转炉吹炼、连续炼钢等过程作了不少研究。例如,研究了底吹惰性气体搅拌条件下的情况,提出了可用以估计气泡搅拌所能抽引的钢液循环流量的“全浮力”模型<sup>[46]</sup>,由该模型估算的结果可推得混合时间;以耐火材料作为测块在60吨钢包内进行的钢液表面流速的直接测量证实了该模型的可靠性和适用性,该研究是开发喷射冶金(SL法)的主要理论基础工作之一。又如,对顶底复合吹炼转炉熔池<sup>[47,48]</sup>和连铸中间包与结晶器<sup>[49-52]</sup>内的混合特性作了水力学模拟研究,所得结果为工业设备的设计和提供了有用的信息。在VOD过程流动和传质的水模型实验研究中,借助由微机控制的多路探针在线快速测量系统,较精确地测定了VOD条件下受顶吹超音速射流冲击的熔池表面的形状及凹坑尺寸,并建立了相应的定量关系,为预测实际过程中顶吹射流冲击下熔池表面的几何参数提供了较可靠的基础<sup>[53]</sup>。

数学模拟是研究冶金反应器内发生的传输现象和过程的又一种强有力的工具, 准确地讲, 数学模拟技术不仅包含数学模型的建立及其解析法或数值方法的求解, 而且还必须包含以实际过程(包括实验室试验、中间试验及工业试验)或模拟实验等对数学模型的验证和模型中所用系数的测定, 以及可靠性和适用性已获证实的数学模型对实际过程的应用和预测。对于冶金中常遇到的轴对称圆柱形反应器中流场的分析, 较方便的是涡量流函数法。应用该法业已对钢包搅拌、顶吹和顶底复吹转炉熔池、连铸中间包(非圆柱的对称形容器)内的速度分布作了数值分析。这些工作取得了较好的结果, 或有新的发现, 或对前人的工作有所改进和修正。例如, 应用流场的数值解讨论了钢包喷吹时熔体的流动, 发现熔池的混合不仅仅由钢液的循环所致, 还有紊流脉动的贡献<sup>[54]</sup>; 进而对熔渣下金属熔池的流动现象作了数学模拟和物理模拟及测定<sup>[55]</sup>, 结果均表明, 渣层的存在并不改变金属液循环流动的基本方向, 但使流动速度及紊流动能显著降低; 在处理顶吹和顶底复吹气体射流与熔池间的动量传递时, 使用了更切合实际情况的凹陷液面边界条件, 并取消了对称轴处涡量边界条件中人为引入的可调参数<sup>[56,57]</sup>。

对于异形反应器内三维流场的数学模拟, 也已做了一些工作, 例如, 应用 ADC 法, 即人工阻尼法(Artificial Damping and Compressibility Method)计算了连铸结晶器内的流场<sup>[58]</sup>; 以 SIMPLE 法(Semi-Implicit Pressure Linked Equations)计算了连铸中间包<sup>[59,60]</sup>和薄板坯连铸结晶器<sup>[61]</sup>内钢液的流场等; 但为数不多, 尚待进一步开展。

如何确定紊流粘度是冶金反应器内流场分析的关键问题之一, 目前大多仍采用  $k-\epsilon$  双方程模型。但是, 用激光测速仪测定的水力模型内的紊流动能分布<sup>[62]</sup>表明, 由  $k-\epsilon$  模型计算得的结果与实测值相差较大, 可见  $k-\epsilon$  模型还有不足之处, 这对于复杂、异形反应器内的紊流流动更为明显。对于同时存在紊流和层流的情况, 曾试用了低雷诺数下的修正的  $k-\epsilon$  模型, 取得了较好的效果<sup>[61]</sup>。在实际工程问题的计算中, 可代之以适当的有效粘度经验公式。采用相应的有效粘度经验式计算得的连铸中间包内钢液的流速, 与应用  $k-\epsilon$  模型所得的结果相比, 相对误差不超过 10%, 而计算量却大大减少<sup>[63]</sup>。

相比之下, 对传质的研究要少得多, 冶金过程的特殊性和不可避免地受流体流动及传热的影响使研究工作的复杂性和难度大大增加。尽管如斯, 我国在这方面也取得了一些进展。结合我国的实际情况, 对高炉喷煤粉时风口燃烧带的传输现象和化学反应作了数学模拟<sup>[64,65]</sup>, 所得结果对选择合理的高炉喷煤粉操作参数有一定的效用。基于扩散的渗透理论和薄膜理论, 提出了一个新的电渣重熔过程化学反应及传质模型<sup>[66,67]</sup>。该模型适用于任何钢和合金的电渣重熔过程, 应用于低碳低合金钢的实验室<sup>[68]</sup>和工业规模<sup>[69]</sup>重熔过程, 以及高合金钢的重熔过程<sup>[70-72]</sup>, 都取得了很好的结果, 可为控制电渣重熔产品的成分提供切实的依据。

氧气喷枪是转炉炼钢过程中的关键设备之一, 无论是顶吹还是顶底复吹转炉过程, 从传递原理的角度来分析认识和掌握超、亚音速射流的特性及其对熔池的作用是极其重要的。尤其是近年来, 发展了二次燃烧氧枪, 可使冶炼过程中产生的 CO 在炉内供给二次 O<sub>2</sub> 燃烧直接利用其热能, 不但可以化渣快、缩短冶炼时间、多加废钢、大幅度提高产量, 而且从能源利用上找出了一条较为合理的途径, 应用流体动力学原理和相似原理模拟生产转炉所用氧枪, 对超、亚音速射流特性及其对熔池的作用进行了比较详细的模型实验研究, 并且应用于生产实际取得了满意的效果<sup>[73]</sup>。应用传递原理、相似分析和气体动力

学,研究了上述现象的紊流特性及对射流速度传统的衰减表达不足之处并进行了修正<sup>[74,75]</sup>,采用多点快速采样在线测量系统对大型转炉氧枪和双流道二次燃烧氧枪射流流场进行了实测研究<sup>[76,77,78]</sup>,并且创造性的提出了动量叠加模型且与实测值相当吻合<sup>[79]</sup>,近年来中科院化冶所已建成了密封式、现代化的大型转炉氧枪实测研究实验室,并且已经为许多钢厂复吹转炉顶枪和底枪进行了实测研究<sup>[80,81]</sup>,取得了较好的生产效果。

## 2.2 有色冶金过程的数学和物理模拟

底吹氧气连续炼铅(QSL法)是一种极有前途的高效低耗新工艺,在反应器内既有渣和金属的流动及传质,又有底吹气体的搅拌和气液混合,属多相流动的异型连续式反应器,对该过程进行了水模型实验研究<sup>[82]</sup>,提出了鉴别氧化段底吹喷嘴布置合理性的新判据,由此可以确定喷嘴间距是否合理,搅拌充分与否,有无死区等,并用二维热膜探针测速仪测定的速度场证实了所作结论。该研究表明,在氧化段,由于强烈的底吹搅拌,情况相当接近于理想混合状态,相应的混合时间仅为平均停留时间的14%;因此,尽量缩短氧化段长度,将隔墙前移,有利于减少返混。还曾把QSL系统视为拟均相体系研究了该过程的动力学,用扩散模型描述渣层的非理想流动,导出了包括氧化段和还原段的过程数学模型,并由求得的解作出了转化率和反应速率常数、轴向有效扩散系统(Dc)的诺模图,结果与实验室及工厂数据相吻合<sup>[83]</sup>,按照此项研究,当Dc很小时可以不设置隔墙而在同一反应器内分段实现氧化和还原两种不同的反应。这些结果对推动我国采用连续炼铅和在生产实践中掌握操作有重要意义。

为控制和预报转炉冶炼冰铜时的吹炼进程及终点,考虑了给定的吹炼时间 $\tau$ 和风量B下所生成的 $\text{SO}_2$ 量(表征冰铜中FeS和 $\text{Cu}_2\text{S}$ 氧化速率的参数),提出了一个数学模型,此即用以控制转炉吹炼冰铜过程的所谓的 $\text{SO}_2$ -B- $\tau$ 法<sup>[84]</sup>,还曾对底吹过程及侧吹炼钢过程喷射区内气液上升速度、气泡大小和含气率分布等作了物理模拟和实验研究<sup>[85]</sup>,由建立的数学模型得到的结果与实验值相当一致。

## 2.3 冶金反应动力学的研究

冶金反应的动力学直接影响冶金过程的效率,对反应器的设计和操作也有很大的影响,对于有色冶金尤其如此,因为有色金属的矿石,其成分往往很复杂,品位低,矿物结构也各不相同,近年来,对各种冶金反应动力学的研究很多,例如,在有色冶金领域,对我国的一水硬铝石型铝土矿进行过浸出动力学的实验研究<sup>[86]</sup>,发现浸出反应由化学反应所控制,且为可逆反应。之后,又进一步用力学方法作了溶出实验<sup>[87]</sup>,显著提高了溶出速率,也进一步证实了化学反应为过程速率控制环节的结论。研究了铜精矿焙砂的氨浸<sup>[88]</sup>、氧化铅的多元醇碱性溶液浸出<sup>[91]</sup>等的动力学;Cu(I)电积过程动力学<sup>[92]</sup>和还原机理<sup>[93]</sup>;铜、镍、铁等的硫化动力学和高硅含硫氧化铜矿 $\text{H}_2+\text{CaO}$ 还原的动力学<sup>[94]</sup>;固态碳还原二氧化锡<sup>[95]</sup>及气体还原剂还原氧化铅<sup>[96]</sup>的动力学;高镁钛铁矿球团选择性氯化的动力学<sup>[97]</sup>;硫化锑和氧化锑的挥发动力学<sup>[98]</sup>;等等。

在钢铁冶金方面,针对我国铁矿资源情况,分析和实验研究了钒钛磁铁矿竖炉还原<sup>[99]</sup>和此种铁矿球团氢气还原<sup>[100]</sup>的动力学,所得结果对攀枝花铁矿的利用和生产实践是有益的;研究了铁矿石逆流式移动床还原的动力学,建立了还原过程数学模型,并在规



模较大的实验室移动床还原装置中得到了实验验证<sup>[104]</sup>。对 LD 转炉前期脱磷<sup>[102]</sup>和生产条件下电弧炉喷粉脱磷<sup>[103]</sup>、喷吹钢包中渣金属间氧化-还原反应<sup>[104]</sup>等喷吹过程反应动力学作了研究；应用多组分耦合反应动力学模型分析了以氧化钙粉剂对铁水进行同时脱硫脱磷预处理和以碳酸钠系粉剂对含钒铁水提钒及同时脱硫脱磷预处理的实际过程<sup>[105]</sup>，为预测和监控铁水预处理过程提供了一种可能的途径；研究了铬铁矿<sup>[106]</sup>和氧化锰<sup>[107]</sup>等熔融还原的动力学；在实验室条件下研究了镍基高温合金真空电弧重熔过程中镁的挥发动力学<sup>[108]</sup>，在工业生产条件下研究了铁基高温合金真空电弧重熔过程中锰的挥发动力学<sup>[109]</sup>，分别导出了可用以控制重熔锭中镁和锰含量的关系式；等等。

关于渣金属反应的动力学，通常是在反应达到稳态的前提下按双膜理论处理的，无法确定反应速率随时间的变化。在研究电渣重熔过程中合金元素的氧化时，利用 Fick 第二定律求解了渣金属两相内的浓度场，导出了反应速率随时间变化的表达式<sup>[66,67]</sup>。这是一种有特色的研究冶金过程动力学的处理方法<sup>[110]</sup>。

## 2.4 凝固过程的研究

凝固过程是火法冶金中一个十分重要的过程，冶炼出的化学成分合格的液态金属必须“凝固”成具有一定形状和组织的坯料或铸件。事实上，无论是铸件，还是锻造和轧制、挤压等的产品，在很多场合下，它们的组织和性能都与凝固方法密切相关。如果不考虑可能发生的化学反应，金属熔体的凝固过程是金属由液态经液固共存态向固态演变的相当复杂的物理过程。由于温度高，温差大，又属动态变化，用现有的测试方法来研究金属熔体的凝固过程有许多困难；因此，有关这类问题的研究，人们现在大多基于反应工程学的原理，应用数学和物理模拟的方法，描述冶金中凝固过程的微分方程往往具有非齐次项和非线性的定解条件，有关的物性参数也随凝固过程的进行而发生变化。

十余年来，国内在连续铸钢凝固传热的数学模拟方面做了不少研究，诸如对普碳钢的板坯连铸凝固传热建立了一维数学模型，并将该模型推广应用于不同钢种的板坯连铸<sup>[111,112]</sup>；建立和求解了方坯连铸凝固传热的二维数学模型<sup>[113,114]</sup>；等等。凝固理论的研究对我国发展连铸生产起了重要作用。考虑到自然对流的影响，对钢锭凝固传热过程作了数学模拟，同时得到了相应的温度场和自然对流场，并对此过程作了物理模拟，验证了数学模型估计的结果<sup>[115]</sup>。钢锭凝固传热模型是钢锭液芯轧制<sup>[116]</sup>和钢锭帽口设计<sup>[117,127]</sup>的理论基础，起到了降低能耗和提高金属收得率的作用。此外，还对重熔钢锭、大型铸件和空心锭等的凝固传热进行了研究；金属雾化快速凝固过程等的研究也在进行。

## 2.5 最优化方法在冶金中的应用研究

从某种意义上说，研究冶金过程和体系的根本目的，就是要在搞清过程和体系中发生的各种现象的基础上，定量地分析过程和体系的特性，从而选择最适宜的设备(或设计)和操作条件，进行合理的设计和操作，在产品的产量、质量、原材料消耗及成本、资源综合利用、节能和环境保护等诸多方面达到和获得最好的效果，亦即实现过程和系统的静态或动态最优化。近年来，我国在冶金过程及体系最优化方面的研究已日渐开展。根据小方坯连铸凝固传热数学模拟的结果，对小方坯连铸二次冷却条件的最优化作了研究，并对具体生产操作进行了二次冷却条件的优化<sup>[116]</sup>；在数学模拟的基础上，对工业用镇静钢锭模帽

部的优化设计作了实验研究<sup>[117]</sup>；对钢锭模壁的优化设计，在钢锭传热模型的基础上，进一步计算模壁内的温度场和应力场，探讨应力分布均匀化的措施，为提高钢锭模寿命奠定了基础<sup>[127]</sup>。应用线性规划研究配料计算模型，在不增加投资的情况下可使钢铁生产配料工作达到优化，不锈钢配料优化计算，吨钢配料成本降低 72 元，烧结配料优化计算也有了显著效果<sup>[119]</sup>。应用动态规划原理，对炼铁—预处理—炼钢多工序生产的系统优化也进行了初步尝试<sup>[118]</sup>。

## 2.6 测试技术和研究手段的改进及开发

十余年来，一些研究单位和高等院校陆续配置了一些新的测试仪器和研究手段，如热线(膜)风速仪、激光测速仪、图象分析仪、高速摄影机、导热系数测定仪、超声测试技术、流动显示技术，以及中型计算机和各种型号的微型计算机等，在相当大的程度上改善了我国冶金反应工程学领域科学研究的条件，取得了很好的效果。中国科学院化工冶金研究所 1974 年引进的一维激光测速仪和热线风速仪为冶金过程物理模拟带来了很大的方便，做了大量研究工作；北京科技大学 1985 年引进的二维激光测速仪使国内二维流场的研究工作取得了新的进展；应用流动显示技术和二维激光测速仪模拟研究底吹熔池紊流场取得了新的成果；东北工学院也引进了一批近代测试仪器，建立了一个测试中心。除了引进以外，还自行开发和研制了一些测试技术和仪器设备，它们对我国冶金反应工程学的发展也作出了一定的贡献。例如，开发和研制了既可以直接观察和研究造钎熔炼、熔融还原、熔盐电解等高温冶金过程，也可以用于测定冶金熔体的密度、表(界)面张力等物理性能的高温冶金熔体 X 射线透视实验技术和装置<sup>[120,121]</sup>，有效地克服了研究高温冶金过程时无法观察和跟踪反应及各相变化历程的困难，是实验技术和研究方法上的一个突破；开发了微机控制的快速自动采样在线测量系统<sup>[122]</sup>，为研究和确定 VOD 过程高速射流冲击液面形成的凹坑，以及底吹过程中气液上升速度分布、气泡大小和含气率分布等获取了大量数据<sup>[53]</sup>；开发了测定熔渣氧渗透率<sup>[123]</sup>和高温冶金熔体中磁场<sup>[124]</sup>的装置，对于与实际电渣重熔时的成分基本相符的  $\text{CaF}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$  系熔渣，在压力为 1atm 的纯氧气氛下，于 1680—1810K 的温度范围内，测得的氧渗透率为  $3 \times 10^{-19} \sim 1 \times 10^{-17} \text{mol O}_2 \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ；在实验室电渣重熔过程中测得的体系内的磁场分布与基于 Maxwell 方程组所作数学模拟的结果基本一致。

## 三、展望及建议

综上所述，在短短三十年间，冶金反应工程学作为冶金的一个新的分支学科，已经获得了很大进展，使冶金科学和技术发生了很大的变化。尽管它还很不成熟，但现有的成就和效果清楚地显示了其强大的生命力和潜力。可以预期，随着科学技术的进步，特别是一些相关学科的进步，冶金反应工程学必将以更快的速度日臻完善和成熟，进而更有力地推动和促进冶金科学和技术的发展。

在我国，冶金反应工程学的发展已有一个良好的开端，有关的研究工作也十分活跃，方兴未艾，成果喜人，有些已应用于工业实践，对改进和开发工艺过程起了很好的作用，

收到了良好的效果。但是，与国际先进水平相比，差距仍然很大，主要在于人员不足，科研经费短缺，仪器设备较落后，课题嫌分散，重点欠突出，缺乏系统而切实可行的战略规划，自身的优化程度不高，等等。与生产实际的结合也还不够好，这当然也与冶金反应工程学本身还很年轻有关，并非急功而能求成的，还需作更多的努力。面对这种情势，必须采取强有力的措施，巩固和扩大冶金反应工程学的科技队伍；包括加速和深化冶金工程教学的改革，更合理地设置高等院校冶金类专业的课程，制订新的教学计划和大纲，进一步开展在职科技人员的继续工程教育等；鼓励和加强国际及国内的学术交流和合作，包括相关学科间的交流和合作；面向生产实际，承担国家重大项目，通过各种可能渠道获得更多的研究经费和支持；制订既适应该学科的发展又符合我国国情的战略规划，使我国的冶金反应工程学能获得更大的进展，为我国冶金工业的发展和现代化发挥其应有的作用，作出更大的贡献。

我们建议今后应该着重开展以下几个方面的研究工作：

1. 各类冶金反应器内流场的研究，以异型、非对称反应器内的三维流场、气-液-固多相流流场、高速和超高速射流及载粒射流、等离子射流、电磁场作用下的流动现象等的数学和物理模拟为主；
2. 多相流测试技术的开发研究；
3. 冶金过程中传热的研究，侧重于连铸、快速凝固、熔融还原、炉外精炼等过程中的传热；
4. 冶金过程中的传质和综合传质研究，特别是紊流条件下的传质；
5. 冶金过程的数学及计算机模拟；
6. 过程及系统的放大和工程优化设计，以及新型冶金设备的开发研究，包括反应器理论研究，各种新型反应器的开发和高技术应用等；
7. 冶金过程专家系统和人工智能的研究；
8. 多相复杂冶金反应宏观动力学；
9. 冶金过程系统工程和决策；
10. 冶金熔体传输性能的研究，包括电磁场、动量传递、传热和传质等有关参数测定(原理、方法及装置等的研究)，已有数据的分析、评价、筛选，编写实用冶金熔体传输性能手册。

我们也建议国家自然科学基金委员会、中国科学院、中国金属学会、冶金工业部以及各冶金企业等有关方面能给予更多的重视和支持，为进行这些研究创造和提供更多、更好的条件。

## 参考文献

- [1] 化工冶金(纪念叶渚沛所长逝世十周年专刊),<sup>○</sup>1981; 2(3):1
- [2] Machlin E S. Trans. Met. Soc. AIME, 1960; 218(2):314
- [3] Mathematical Models in Metallurgical Process Development, Iron and Steel Institute, London, 1970

- [4] *Mathematical Process Models in Iron and Steelmaking*, The Metals Society, London, 1975
- [5] *Physical Chemistry of Process Metallurgy*, The Richardson Conference, London, Inst. Min. Met., 1974
- [6] *Kinetik Metallurgischer Vorgänge bei der Stahlerstellung*, The Schenck Conference, Verlag Stahleisen m. b. H., Dusseldorf, 1972 (英译本: *Kinetics of Metallurgical Processes in Steelmaking*, 1975)
- [7] *Proc. of the Darken Conf., Physical Chemistry in Metallurgy*, U.S.S. Steel, 1976
- [8] *Proc. Int. Conf. Injection Metallurgy*, Lulea, Sweden, 1977; *Proc. 2nd Int. Conf. Injection Metallurgy*, Lulea, Sweden, 1980
- [9] *Proc. 3rd Process Technology Conf.*, AIME, Pittsburgh, 1982
- [10] *Proc. Int. Symp. Continuous Casting of Steel Billets*, Can. Inst. Min. Met., Vancouver, 1985
- [11] *Proc. TMS-AIME Extractive Metallurgy Symp. Mathematical Modelling of Materials Processing Operations*, The Metallurgical Society, Warrendal, PA, 1987
- [12] *Proc. 6th Int. Iron Steel Congress*, The Iron and Steel Inst. of Japan, Nagoya, 1990
- [13] 鞭岩, 森山昭. *冶金反应工学*, 养贤堂, 1972
- [14] Szekey J, Themelis N J. *Rate Phenomena in Process Metallurgy*, Wiley-Interscience, 1971
- [15] Geiger G H, Poirier D R. *Transport Phenomena in Metallurgy*, Addison-Wesley Publishing Company, 1973
- [16] Ray W H, Szekey J. *Process Optimization with Applications in Metallurgy and Chemical Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 1973
- [17] Szekey J, Evans N J, Sohn H Y. *Gas-Solid Reactions*, Academic Press, New York, 1976
- [18] Sohn Hong Yong, Wadsworth M E et al. *Rate Process of Extractive Metallurgy*, Plenum Press, New York, 1979
- [19] Szekey J. *Fluid Flow Phenomena in Metals Processing*, Academic Press, 1979
- [20] Сургучев Г Д. *Математическое Моделирование Сталеплавильных Процессов*, «Металлургия», Москва, 1978
- [21] Бигеев А М. *Математическое Описание и Расчеты Сталеплавильных Процессов*, «Металлургия», Москва, 1982
- [22] Марков Б Л, Кирсанов А А. *Физическое Моделирование в Металлургии*, «Металлургия», Москва, 1984
- [23] Szekey J, Evans J W, Brimacombe J K. *The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations*, John Wiley, New York, 1988
- [24] Szekey J, Wahnsiedler W E. *Mathematical Modeling Strategies in Materials Processing*, John Wiley, New York, 1989
- [25] Szekey J, Ilegbusi O J. *The Mathematical and Physical Modelling of Tundish Opera-*

- tions, Springer-Verlag, New York, 1989
- [26] Guthrie R I L. Engineering in Process Metallurgy, Clarendon Press, Oxford, 1989
- [27] Szekely J. Met. Trans., 1988; 19B: 525
- [28] Brimaçombe J K. Met. Trans., 1989; 20B: 291
- [29] Octers F, Gorl E. Proc. of the Elliott Symp., 中文译文见钢铁, 1991; 26; No.2, 70; No.3, 59
- [30] 鞭岩, 森山昭著, 蔡志鹏, 谢裕生译: 冶金反应工程学, 科学出版社, 1981
- [31] 盖格G H, 波伊里尔D R著, 俞景禄, 魏季和译: 冶金中的传热传质现象, 冶金工业出版社, 1981
- [32] Sohn H Y, Wadsworth M E等著, 郑蒂基译: 提取冶金速率过程, 冶金工业出版社, 1984
- [33] Szekely J著, 彭一川, 徐匡迪, 樊养颐译: 冶金中的流体流动现象, 冶金工业出版社, 1985
- [34] 冶金反应动力学及第二届炼钢理论学术讨论会论文集, 中国金属学会冶金物理化学学术委员会、炼钢学术委员会, 重庆, 1982.4.
- [35] 中国科学院技术科学部委员会扩大会议文件、报告汇编, 中国科学院技术科学部, 1982
- [36] 第二届冶金反应动力学学术会议论文集, 中国金属学会冶金过程物理化学学术委员会, 鞍山, 1984.5.
- [37] 第三届冶金过程动力学和反应工程学学术会议论文集(上卷为《化工冶金》, 1985, No.4; 下卷为《金属论坛》(重庆金属学会主办, 1986, No.1), 中国金属学会冶金过程物理化学学会, 成都, 1986.5.
- [38] 第四届冶金过程动力学和反应工程学学术会议论文集, 中国金属学会冶金过程物理化学学会, 马鞍山, 1988.4.
- [39] 第五届冶金过程动力学和反应工程学学术会议论文集, 中国金属学会冶金过程物理化学学委会, 济南, 1991.10.
- [40] 曲英, 刘今: 冶金反应工程学导论, 冶金工业出版社, 1988
- [41] 肖兴国主编: 冶金反应工程学, 东北工学院出版社, 1989
- [42] 高家锐主编: 动量、热量、质量传输原理, 重庆大学出版社, 1987
- [43] 魏季和: 冶金工程数学(上册), 冶金工业出版社, 1988
- [44] 魏季和: 冶金工程数学(下册), 冶金工业出版社, 1988
- [45] 化工冶金, 1988; 9(3): 75
- [46] T.C. Hsiao (肖泽强), Lehner T, Kjellberg B. Scand. J. Met., 1980; 9: 105
- [47] 张荣生, 陈龙根, 周毅生: 冶金部钢铁研究总院学报, 1983; 3(1): 14
- [48] 施哲, 谢蕴国, 何秋昆等: 同38: 214
- [49] 蔡开科, 李绍舜, 黎学玛等: 同36: 217
- [50] 张荣生, 黄梅, 李伟立等: 冶金部钢铁研究总院学报, 1986; 6(3): 7
- [51] 谢蕴国, 施哲, 卞良才等: 同38: 249
- [52] 杨森龙, 樊养颐: 同39

- [53] 梁云, 蔡志鹏, 钱占民, 马恩祥: 同37(上): 72
- [54] Qu Ying, Liang Yun. SCANINJECT III, 1983: 21-7
- [55] 曲英, 杨健, 徐保美: 金属学报, 1990; 26(3): B157
- [56] 张家芸, 杜嗣深, 魏寿昆: 同36: 394
- [57] 杜嗣深, 张家芸, 李英, 魏寿昆: 同37(上): 123
- [58] 张凤禄, 蒋智: 同37(上): 145
- [59] 贺友多: 金属学报, 1988; 24: B79
- [60] 贺友多, 刘中兴: 同39:
- [61] 王来华: 博士学位论文, 冶金部钢铁研究总院, 1990
- [62] 王尚槐: 同37(上): 139
- [63] 曲英, 王利亚: 同37(上): 152
- [64] 谢裕生, 车秀珍, 李琪: 同36: 229
- [65] 赫冀成: 同38: 318
- [66] Wei Chiho(魏季和), Mitchell A. Proc. 3rd Process Technology Conf., AIME, Pittsburgh, 1982: 232
- [67] 魏季和, Mitchell A. 金属学报, 1984; 20(5): B261
- [68] 魏季和, Mitchell A. 金属学报, 1984; 20(5): B280
- [69] 魏季和, Mitchell A. 金属学报, 1987; 23(3): B126
- [70] Вэй Чихо(魏季和). Проблемы специальной электрометаллургии, 1987; No.2: 6
- [71] WEI Jihe (Wei Chiho 魏季和). Chin. J. Met. Sci. Technol., 1989; 5(4): 235
- [72] 魏季和: 金属学报, 1988; 24(增刊1): SB1
- [73] 蔡志鹏, 谢裕生, 夏安武: 钢铁, 1980; 15(1): 14
- [74] 蔡志鹏等: 化工冶金, 1983; 491: 37
- [75] 马恩祥, 蔡志鹏等: 钢铁, 1983; 18(7): 28
- [76] 马恩祥, 蔡志鹏等: 钢铁研究学报, 1989; 1(3): 1
- [77] Tsai Chihpeng et al. Proceeding of the 6th International Iron and Steel Congress, 1990; Vol. 1: 402
- [78] Ma Enxiang et al. *idem*, :415
- [79] 涂鸿, 蔡志鹏等: 化工冶金, 1989; 10(3): 84
- [80] 马恩祥, 蔡志鹏等: 钢铁, 1990; 25(9): 17
- [81] 蔡志鹏等: 同39
- [82] 蔡志鹏, 梁云等: 同37(上): 113
- [83] 杨静霞: 同37(下): 94
- [84] 刘纯鹏, 华一新, 陆跃华: 同37(上): 167
- [85] 魏伟胜等: 化工冶金, 1988; 9(1): 78
- [86] 刘今, 吴若琼, 李晋尧: 同36: 51
- [87] 刘今, 吴若琼: 同38: 119
- [88] 陈劲松, 柯家骏: 同36: 37
- [89] 柯家骏, 王臣: 同37: 43

- [90] 柯家骏, 岳东良: 同38: 93
- [91] 康大平, 柯家骏: 同39:
- [92] 陈世瑄, 余仲兴: 同36: 96
- [93] 陈世瑄, 余仲兴, 周帮娜等: 同37(上): 58
- [94] 刘纯鹏等: 同36: 62; 119
- [95] 黄治家, 张韵华, 何芬, 李振家: 同36: 10
- [96] 陶东平, 李振家: 同37(上): 50
- [97] 虞宝煜, 叶尚云: 同36: 19
- [98] 曾水平, 李振家, 查治楷: 同38: 83
- [99] 湛灿伦: 同36: 164
- [100] 史建福, 谢嘉, 张无限: 同36: 183
- [101] 谢涌, 秦民生: 金属学报, 1984; 20(5): B249
- [102] 吴宗良: 同36: 133
- [103] 关启德: 同36: 286
- [104] 肖泽强, 利塔卡里 P. 同36: 303
- [105] 许允元, 钟良才: 同38: 1
- [106] 肖泽强, 肖艳萍: 化工冶金, 1989; 10(2): 75
- [107] 顾利平, 丁伟中, 徐匡迪等: 同38: 13
- [108] 傅杰, 王惠等: 金属学报, 1983; 19: B82
- [109] 傅杰, 胡尧和, 赵俊华等: 同36: 154
- [110] 魏寿昆: 同36: 1
- [111] 蒋冠珞: 第一届中国炼钢学术会议论文集, 1981: 434
- [112] 蔡开科, 吴元增: 同34: 109
- [113] 夏奇, 严友梅: 同38: 342
- [114] 黎学玛, 李士琦, 马廷温: 同38: 352
- [115] 董履仁, 韦远: 同37(上): 104
- [116] 夏奇, 严友梅: 同38: 380
- [117] 王怀春, 薛志明, 王殿成等: 同38: 371
- [118] 曲英, 汪怡, 潘小伟: 高炉—转炉系统脱硅工艺过程最优化, 钢铁生产过程数学模型学术讨论会, 上海, 1989.5.
- [119] 李士琦, 马廷温, 韩华: 优化配料模型及其应用, 钢铁生产过程数学模型学术讨论会, 上海, 1989.5.
- [120] 黄克雄, 李晶等: 全国第五届冶金过程物理化学年会论文集, 西安, 1984: 406
- [121] 姚荣根, 汤静桐等: 第六届冶金过程物理化学学术会议论文集(下), 重庆, 1986: 209
- [122] 魏伟胜, 蔡志鹏等: 同37(上): 162
- [123] 魏季和, 向顺华, 刘宗远: 同38: 408; 化工冶金, 1989; 10(2): 87; Selected Papers of EC & M(China)—1989, 1990: 18
- [124] 刘应书, 魏季和, 向顺华, 任永莉: 同39:

- [125] Szekely J等著, 蔡开科译: 冶金过程的数学物理模拟, 冶金工业出版社, (待出版)
- [126] 刘铁树, 鲍福民, 钱勤生: 宝钢生产工艺系统数学模型简解, 钢铁生产过程数学模型学术讨论会, 上海, 1989.5.
- [127] 第六届全国炼钢年会论文集, 包头, 1990,8: 317; 324; 368

## **Metallurgical Reaction Engineering in Retrospect and Prospect**

TSAI Chihpeng WEI Chiho Qu Ying

### **Abstract**

The history of rise, formation and development about metallurgical reaction engineering passed in review with the viewpoint of the development of sciences. The research works and the obtained advances in China in the field of this science were summarized briefly. Its prospects for developing were forecast. And some ideas and suggestions were proposed for how to develop further the science in China.

**Keywords:** Metallurgical reaction engineering,  
Retrospect, Prospect, China



# ·氧化锑矿盐酸浸出动力学研究<sup>①</sup>

康大平<sup>②</sup> 柯家骏

(中国科学院化工冶金研究所)

## 摘 要

研究了氧化锑矿( $\text{Sb}_2\text{O}_4$ )在盐酸溶液中的浸出动力学。实验结果表明,该浸出溶解过程属于多相固-液反应,可以用收缩核模型描述该浸出过程的动力学。主要的影响因素是浸出温度和盐酸浓度。在 50-90℃ 实验温度范围内,测得的表现活化能值为 15.2kcal/mol (63.5kJ/mol)。推论该浸出过程为化学反应速率所控制。

## 一、前 言

我国锑矿资源居世界前列,湖南锡矿山是我国最大的锑矿及锑产品基地<sup>[1]</sup>。针对湖南锡矿山矿务局提供的一种含高价锑的难处理氧化锑矿的利用问题,结合湿法冶金提取锑白工艺的需要<sup>[2]</sup>,开展该氧化锑矿盐酸浸出动力学的研究。

由矿石物相分析知道,该氧化锑矿主要以  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  和  $\text{Sb}_6\text{O}_{13}$  (系  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  的缺陷结构) 两种形式存在,在一定浓度的 HCl 溶液中前者可以溶解,而后者则困难,需进行适当还原后才能溶解。 $\text{Sb}_2\text{O}_4$  中既有五价锑,也有三价锑,在 HCl 溶液中的总反应式可表示为:



关于  $\text{Sb}_2\text{O}_4$  在 HCl 溶液中的浸出动力学研究,尚未见有文献报道。本文将重点在这方面开展实验研究,查明有关此反应过程的影响因素及控制步骤,以指导工艺过程的开发。

## 二、固-液浸出模型的建立

颗粒状固体在溶液中浸出时,随着固体被溶解进入溶液,颗粒会不断缩小,通常可用收缩核模型来描述该浸出溶解过程<sup>[3]</sup>。如果在浸出过程中没有新的致密固体产物层在颗粒表面上生成,以及在较高的搅拌速度下进行浸出以消除表面液膜扩散因素影响时,该过程

①国家自然科学基金资助的项目

②现在湖南锡矿山矿务局研究所工作