

---

中 国  
喷射冶金协调委员会  
辽 宁 省  
金 属 学 会

---

# 沈阳喷射冶金和钢的精炼学术会议 论文集

PROCEEDINGS OF SHENYANG SYMPOSIUM  
ON INJECTION METALLURGY AND SECONDARY  
REFINING OF STEEL

中 国      沈 阳

SHENYANG, LIAONING, THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA

# 前 言

继一九八二年十一月在上海举行的国际喷射冶金学术会议后，现在又在沈阳举行第二届喷射冶金和钢的二次精炼国际学术会议。参加本次会议的代表来自澳大利亚、巴基斯坦、加拿大、中国、法国、芬兰、印度、日本、挪威、瑞典、瑞士、美国、西德等十三个国家。会议代表集中对近十几年来世界冶金工业中各类预处理精炼技术的发展和效果进行讨论和学术交流，与会代表向大会提出了37篇论文，内容十分丰富，涉及的范围包括：

- 喷射及精炼过程理论
- 喷射及精炼装备和技术
- 喷射及精炼工艺和冶金效果
- 铁水预处理

可以预期，本届学术会议将促进国际间和国内外冶金学学术界和工业界在喷射冶金和钢的二次精炼方面的技术交流。为此，会议组织委员会决定委托冶金部《特殊钢》杂志编辑部将会议文集《Proceedings of Shenyang Symposium on Injection Metallurgy and Secondary Refining of Steel》翻译出版，供国内冶金工作者参考。译文不妥或不清楚之处可参照英文版订正。

本文集（除国内论文外）译自《Proceedings of Shenyang Symposium on Injection Metallurgy and Secondary Refining of Steel》1984年9月，各论文由李伟立、胡国胜、杨大利、裴文国、陆丁正、马登科等译校，肖泽强总校。

沈阳喷射冶金和钢的二次精炼学术会议学术组

一九八四年九月



# 目 录

1. 中国喷射冶金和钢二次精炼技术的发展……………中国, 杨栋等

## ——· 喷射冶金及精炼理论 ·——

2. 气体喷入液体时气—液二相区内气—液混合体的物理行为……………日本, 森一美等  
3. 二次钢包精炼中碱土金属的作用……………西德 T. 耳尔珈玛, 中国, 赵风林  
4. 铁液和熔渣间铬反应动力学……………日本, 川合保治等  
5. 底吹转炉内渣、铁所含元素的化学势能……………日本, 后藤等  
6. 炉外精炼的气相定炭法研究……………中国, 张鉴等  
7. 气泡流—射流的过渡及其对喷嘴磨损的影响……………瑞典, S. 葛斯塔夫森等  
8. 喷吹钢包内气液两相区结构的研究和流场数学模化……………中国, 何庆林等  
9. 气体喷入液体时流场与混合时间的测量……………西德, H. C. 德罗曼等  
10. 往铅渣中喷射粉末……………中国, 屠宝洪

## ——· 喷粉及精炼技术 I ·——

11. 小钢厂二次精炼新设备……………瑞典, B. 特韦 洛斯  
12. 蒂森公司的炼钢新技术——喷射冶金……………西德, 哈·泊·哈斯特  
13. “VI” 钢包精炼法的冶金效果……………中国, 孙钟尧等  
14. 克虏伯公司的二次精炼及生产技术……………西德, L. 菲 格 等  
15. 配用ASEA—SKF钢包炉的电炉炼钢……………瑞典, J. 林多斯  
16. Lectromelt精炼装置—综合精炼金锭……………美国, R. D. 格雷

## ——· 工 艺 及 冶 金 ·——

17. 应用钢包喷粉生产低合金特殊钢的实际经验……………芬兰, M. 派尔佩利等  
18. 钙处理16Mn钢中氮的行为……………中国, 徐匡迪等  
19. 200吨转炉钢包喷吹稀土合金粉工艺研究……………中国, 崔卓铭等  
20. 小型钢包应用喷粉工艺处理低合金钢的实践……………中国, 上海钢研所等

21. 喷射冶金在冰铜与粗铜精炼中的应用.....瑞典, T. 雷勒等
22. 镁在钢精炼中的应用趋势.....挪威, 斯·克·沙克西纳
23. HB—40钢包精炼炉基础研究及钢的质量分析.....中国, 侯树庭等
24. 铁素体不锈钢F179在VOD冶炼过程中最佳工艺的获得.....中国, 叶济生等
25. 喷吹工艺对轴承钢(GCr15)夹杂物的控制及性能的影响.....中国, 官延生
26. LBE法的适用性.....法国, 格·丹尼尔等
27. 太钢18吨氩氧炉的生产实践.....中国, 太原钢铁公司等

#### ——· 喷 粉 及 精 炼 技 术 I ·——

28. 炼钢工艺发展中的耐火材料改进.....西德, G. 庆格尔等
29. 液态金属加热和喷吹工艺中应用等离子加热器.....挪威, J. A. 巴肯等
30. 新型钙粉及其在连铸钢喷吹处理中的应用.....法国, J. M. 亨利等
31. 利用喂线法进行钢液终处理.....西德, W.J. 哈洛特

#### ——· 铁 水 予 处 理 ·——

32. 苏打灰处理铁水和钢水的精炼特性.....日本, 水渡英昭等
33. 喷吹钠盐处理铁水的工业试验.....中国, 知水等
34. 5吨铁水包中用石灰基熔剂脱磷试验.....瑞典, G. 卡尔森等
35. 铁水沟顶部喷吹连续予处理.....日本, 山田健三特
36. 用予处理的铁水生产低磷高碳钢.....日本, 秋园川三等
37. 140吨铁水包喷粉脱硫试验研究.....中国, 谢平川等

# 中国喷射冶金和钢二次精炼技术的发展

杨 栋 卢尚汉

(中国,冶金工业部)

## 摘 要

为了改善特殊钢质量、提高生产效率、降低生产成本,中国钢铁工业部门采用了喷射冶金和二次精炼技术。本文概述了中国钢铁工业部门应用喷射冶金和二次精炼技术的现状;展望了它的将来;还详细介绍了喷射冶金和钢包精炼技术在中国的发展过程。

## 引 言

为了满足提高钢的质量,节省能源消耗和降低生产成本的要求,炼钢过程将不可避免地成为一个分段过程。对转炉炼钢法来说,先进行预铁水处理(脱硫和脱磷),在顶吹、底吹和顶底复吹转炉中只是脱碳,从而发展了少渣精炼法。至于电炉炼钢,自从超高功率电弧炉问世以来,它的功能就只是熔化废钢而已。随着炼钢工艺发展成一个分段过程,二次精炼技术(或称钢包精炼)就变得越来越重要了。

本文对中国钢铁工业部门应用喷射冶金和二次精炼技术的特点和现状作一概述。

## 一、铁水预处理

中国的铁水预处理设备分布情况如图1和表1所示。铁水预处理的目的是三个:一是为了达到超低含硫量;二是为了充分利用中国的资源;三是为了降低高炉能耗。中国冶金工作者所研究的重要课题是找出一种新型脱硫剂,用它来代替成本高、能耗大的

$\text{CaC}_2$ 。中国冶金工作者力图用 $\text{CaO}$ 粉或者 $\text{CaO}-\text{CaCO}_3-\text{C}$ 粉来进行铁水脱硫。在实验室和中间试验中得到了一些很有价值的结果<sup>[1]</sup>。

瑞典冶金研究院和北京钢铁研究总院的研究人员正在合作寻找一种有效且经济的脱硫粉剂,估计不久将可得到满意的结果。利用直接从矿石中得到的廉价天然苏打灰进行铁水预处理,即脱磷、脱硫和提取钒、铌、钛及其它元素是利用资源方面的重大进步<sup>[2,3]</sup>。

随着中国转炉炼钢的迅猛发展,铁水预处理设备定将得到稳定的发展。

## 二、真空脱气

真空脱气技术在中国钢铁工业中的应用始于五十年代。当时在大连、太原、大冶和上海有一些带机械真空泵的小钢包脱气设备(5至15吨)。由于处理时间长、温降大、脱氢少,这些设备到1960年基本上都不用或被取代了。真空处理的主要目的是通过脱气对钢水进行精炼。真空处理的脱气反应基本

中国的铁水预处理设备

表1

| 工 厂   | 武 钢                                       | 上钢一厂               | 宝 钢                | 包 钢                                                                     | 攀 钢                                                |
|-------|-------------------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 方 法   | KR                                        | 喷 粉                | 向混铁车喷粉             | 喷 粉                                                                     | 喷粉或KR                                              |
| 容量(吨) | 100                                       | 30                 | 300                | 150                                                                     | 120                                                |
| 目 的   | 深度脱硫                                      | 脱 硫                | 脱 硫                | 脱硫和提铌                                                                   | 脱 硫<br>脱 磷<br>提 钒                                  |
| 结 果   | (S) $\leq 0.003\%$<br>(CaC <sub>2</sub> ) | (S) $\leq 0.005\%$ | (S) $\leq 0.003\%$ | (S) $< 0.025\%$<br>(P) $< 0.007\%$<br>(Nb) $< 0.007\%$<br>(C) $> 3.0\%$ | (S) 0.01—0.02%<br>(P) 0.01—0.02%<br>(V) 0.05—0.10% |

上按下式进行:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{A}{V} \times K' (C - C_i)$$

式中A: 气—液界面面积

V: 钢水体积

C: 钢水中气体浓度

C<sub>i</sub>: 真空容器中气体浓度

K': 传质系数

t: 时间

采用增加上式中A和K'值的方法可改善脱气反应的效果。分析了上述情况, 上海冶金机修总厂采用真空注流脱气加渣洗的方法取代了钢包真空脱气法。图2为真空注流加渣洗法的示意图。经这种方法处理的钢中含硫、氧和氢量分别为0.003%、0.004%和0.0002%。该厂采用这种方法已有二十年历史, 生产了六十万吨电工钢<sup>[4]</sup>。

1966年在大冶钢厂首次采用100吨RH设备对特殊钢进行真空脱气处理。根据他们的经验在1969和1970年分别在上海和包头安装了两台100吨RH设备, 用于生产大型锻件。

随着脱气设备在大型钢厂的使用, RH处理方法和真空注流脱气处理方法对优质电工钢、滚珠轴承钢、低碳钢和大型锻件的生

产大有帮助。表2为中国真空脱气设备的分布情况。

喷射技术和真空处理联合应用是一项很有意义的精炼技术, 它将引起冶金工作者的广泛注意。目前在中国钢铁部门中正在进行一些调查工作, 寻求RH+IJ和LF+IJ等的设备和工艺的最佳配合条件<sup>[5]</sup>。工业性试验的结果表明: 处理后的氢、氧、硫含量分别为1.35ppm、49.4ppm和0.0048%。经RH+IJ处理的大型锻件的冲击韧性比平炉常规工艺生产的提高了39.5—46.4%<sup>[6]</sup>。

### 三、钢包精炼

在转炉或电炉炼钢之后的二次精炼主要功能如下:

- (1) 去氢(去氮)
- (2) 碳氧化或真空脱碳
- (3) 脱硫
- (4) 增碳和加合金
- (5) 去除非金属夹杂
- (6) 控制非金属夹杂形状
- (7) 均匀化学成份和温度

通过这些炉后处理的冶金效果, 显著地提高了转炉和电炉的产量和产品质量。图3

中国的真空脱气设备

表2

| 容量(吨)<br>设备 | 工 厂 | 上海冶金<br>机修总厂 | 大 冶<br>钢 厂 | 上海重型<br>机 器 厂 | 包 头<br>机器厂 | 武 钢 | 富拉尔基<br>重 机 厂 | 太 原<br>重机厂 | 宝 钢 |
|-------------|-----|--------------|------------|---------------|------------|-----|---------------|------------|-----|
| R H         |     |              | 100        | 50/100        | 50         | 100 |               |            | 350 |
| 真空注流脱气      |     | 15           |            | 50/100*       |            |     | ~100*         | 100/150*   |     |

\*大型锻件的真空浇注。

为各种精炼过程冶金效果的比较。

### 3.1 吹氩搅拌

通过透气砖从钢包底部吹入氩气是一项成本低而且可以广泛采用的技术。经吹氩处理,可得到温度和成份均匀的连铸用钢水和非金属夹杂少的低合金钢。目前中国吹氩钢的年产量已达730万吨以上。

实际上由于钢水表面暴露在大气中,会被空气二次氧化,吹氩处理对脱氧和去除非金属夹杂的效果不大;在BOF和BOH过程中钢水与高氧化性的渣接触也会被二次氧化;所以吹氩的作用主要是调温。为了解决这一问题,鞍钢第三炼钢厂采用了加合成渣的办法(高碱度、低氧化性)。采用这一办法可使脱硫率达到60—70%,并且对大夹杂物的去除特别有效<sup>[7]</sup>。此外,真空吹氩处理是钢包真空脱气和吹氩处理的结合,采用真空吹氩加上合成渣处理可达到很高的脱气、脱氧和脱硫率。在中国,这种方法已被很多特殊钢厂用来生产超纯净钢。

### 3.2 钢包精炼炉

从六十年代末期以来,中国很多设计和生产钢包精炼设备的单位对钢包精炼技术作了大量的研究(包括钢包炉、电磁搅拌、蒸汽喷射泵系统等)<sup>[8]</sup>。七十年代中期,在北京钢铁学院和北京钢铁研究总院的帮助下,北京钢厂进行了第一台20吨LRF炉的工

业性试验(带加热装置、电磁搅拌和真空处理)。同时,北京重机厂和北方工业公司新乡厂引进了两台分别为100吨和35吨的ASEA-SKF钢包炉。1981年上钢五厂安装了第一台国产50吨LF炉。抚顺钢厂也引进了一台50吨VAD设备。表3为中国钢包炉精炼设备的分布情况。

在中国,滚珠轴承钢和高强度合金结构钢等高纯净钢是采用电炉炉加上钢包炉精炼工艺生产的。这样可以保证钢中的含氢量小于2ppm,滚珠钢中总氧量小于25ppm,不锈钢中含氧量小于50ppm;通过真空脱氧、电磁或吹氩搅拌使夹杂物大为减少,并能精确控制温度。如今从事钢包精炼技术研究的冶金工作者的重要任务是不但要提高特殊钢的质量,而且提高产量。这样能提高生产效率,如图4所示。

以上钢五厂为例,该厂采用EF-LF工艺年产12万吨滚珠轴承钢。事实证明钢包精炼工艺也能提高电炉生产的产量。原来采用常规工艺炼滚珠钢的还原期为40—60分钟,采用了EF-LF工艺后降低为5—10分钟,详细结果请参见<sup>[9]</sup>。

### 3.3 精炼不锈钢

由于在实际生产中采用了各种新技术,近来不锈钢冶炼技术有惊人的发展。北京钢铁学院和大连特殊钢厂研制了一种电炉加真

中国的钢包精炼炉

表3

|       | ASEA-SKF |          |         | LF         |       |       | VAD        |                |
|-------|----------|----------|---------|------------|-------|-------|------------|----------------|
| 工 厂   | 北京重机厂    | 北方工业公司新乡 | 北京钢厂    | 上钢五厂       | 陕西钢厂  | 齐 钢   | 抚顺钢厂       | 上海钢研所          |
| 容量, 吨 | 50/100   | 35       | 20      | 35/50      | 15/30 | 35/50 | 30/60      | 5              |
| 年 份   | 1975     | 1975     | 1978    | 1981       | 1985  | 1985  | 1982       | 1982           |
| 产 品   | 合金结构钢    | 合金结构钢    | 滚 珠 轴承钢 | 滚珠钢<br>不锈钢 |       |       | 滚珠钢<br>不锈钢 | 不 锈 钢<br>合金结构钢 |

空处理的新脱碳装置—VOD炉, 用于冶炼不锈钢<sup>[10]</sup>。根据他们的经验, 在1978年安装了容量为25吨的设备。目前中国大部分钢包炉是加氧枪进行真空脱碳, 即用VOD炉来生产不锈钢的(见表4)。第一台AOD试验炉是在北京钢铁研究总院合作下, 于1973年在太原钢铁公司投产。AOD炉炼不锈钢当然有很多优点, 但由于中国氩气短缺, 所以仅于1982年在太原钢铁公司安装了一台18吨AOD炉。表5为不锈钢精炼工艺的比较。不锈钢二次精炼的比例将随着产量的稳定增加而增加。

#### 四、喷射冶金

自1977年以来, 中国对喷射冶金的理论、设备和工艺进行了系统的研究。到1980年已经在工业生产中广泛使用, 主要用于:

——铁水预处理

——电弧炉炼钢的强化

——钢包喷粉精炼

——高铬钢的脱磷

——在1982年上海学术讨论会<sup>[11]</sup>和1983年瑞典黎里国际会议上<sup>[12]</sup>, 报导了中国喷射冶金的发展及其在工业上的应用情况。此后又有了新的进展, 简单介绍如下:

##### 4.1 新安装的设备

一台由北京钢铁研究总院设计的110吨钢包喷粉站已在鞍山第二炼钢厂交付使用<sup>[13]</sup>。迄今为止已处理了200炉, 设备操作顺利, 冶金效果良好。齐齐哈尔钢厂生产了一种适用于铸钢车间的喷粉设备。上海钢铁研究所在上钢三厂安装了一台15/30吨特殊钢喷粉处理设备<sup>[14]</sup>。处理后钢的组织 and 特性

中国的不锈钢二次精炼工艺

表4

| 工 厂  | 大 连 | 太 原 | 抚 顺     | 上 钢 五 厂         | 上海钢研所 | 上 钢 三 厂 |
|------|-----|-----|---------|-----------------|-------|---------|
| 方 法  | VOD | AOD | VAD/VOD | 钢包炉+氧枪<br>(VOD) | VOD   | VOD     |
| 容量 吨 | 25  | 18  | 30/60   | 35/50           | 5     | 25      |



中国钢厂不锈钢精炼工艺的比较 (18-8不锈钢)

表5

| 项 目 \ 工 艺       |                   | (包括ASEA-SKF和<br>LF+氧枪) | AOD     | (常规工艺)          |
|-----------------|-------------------|------------------------|---------|-----------------|
| 精炼前的含碳量%        |                   | 0.3-0.5                | 1.0-1.8 | 0.3-0.4         |
| 精炼前的含铬量%        |                   | 18                     | 18      | 10-12           |
| 精 炼 时 间(分)      |                   | 70-90                  | 45-70   | 100-120<br>(降碳) |
| 铬 回 收 %         |                   | 98-99                  | 98-99   | 89-91           |
| 成品含 碳、<br>氮、 氢量 | C<br>%            | <0.01                  | ≤0.015  | ≤0.05           |
|                 | %                 | -0.005                 | -0.007  | -0.02           |
|                 | H<br>ppm          | 2                      | 3-4     | 5-7             |
|                 | 金属铬和铬铁消耗量<br>kg/T | 0-5                    | 0-5     | 40-70           |

达到了电渣炉工艺的水平<sup>[15]</sup>。图5为近年来中国喷粉设备的增加情况。

#### 4.2 改善了钢的质量

采用了喷粉技术后,低合金高强度钢的机械性能和加工性能得到明显改善,使生产厂家和客户都在经济上得利。齐齐哈尔钢厂和北京钢铁学院得到了一些滚珠钢喷粉处理的有趣结果,详情可参见<sup>[16]</sup>。很多工厂在生产超低硫钢时采用喷粉工艺来连续控制极低的含硫量。

#### 4.3 理论研究和新技术的发展

中国冶金工作者对喷射冶金过程的热力学、动力学和数学模型作了进一步研究<sup>[17]</sup>

[18][19]。

东北工学院研究了精炼过程中大尺寸夹杂物的行为<sup>[20]</sup>。为了了解吸氮机理和喷粉处理钢的机械性能,上海工业大学在鞍钢和上钢三厂的合作下进行了有效的研究工作<sup>[21]</sup>。

随着喷射冶金在中国钢铁工业中的应用以及各大学、研究单位的理论研究的深入,中国的喷射冶金技术将得到迅速发展。这里,我们还想强调一下,在中国,不久的将来会实现低能耗的高炉生产、铁水预处理、少渣无渣炼钢、钢水炉外精炼和连铸的新型生产流程,达到以较低的能耗和成本生产出优质钢材的目的。

### 参 考 文 献(略)

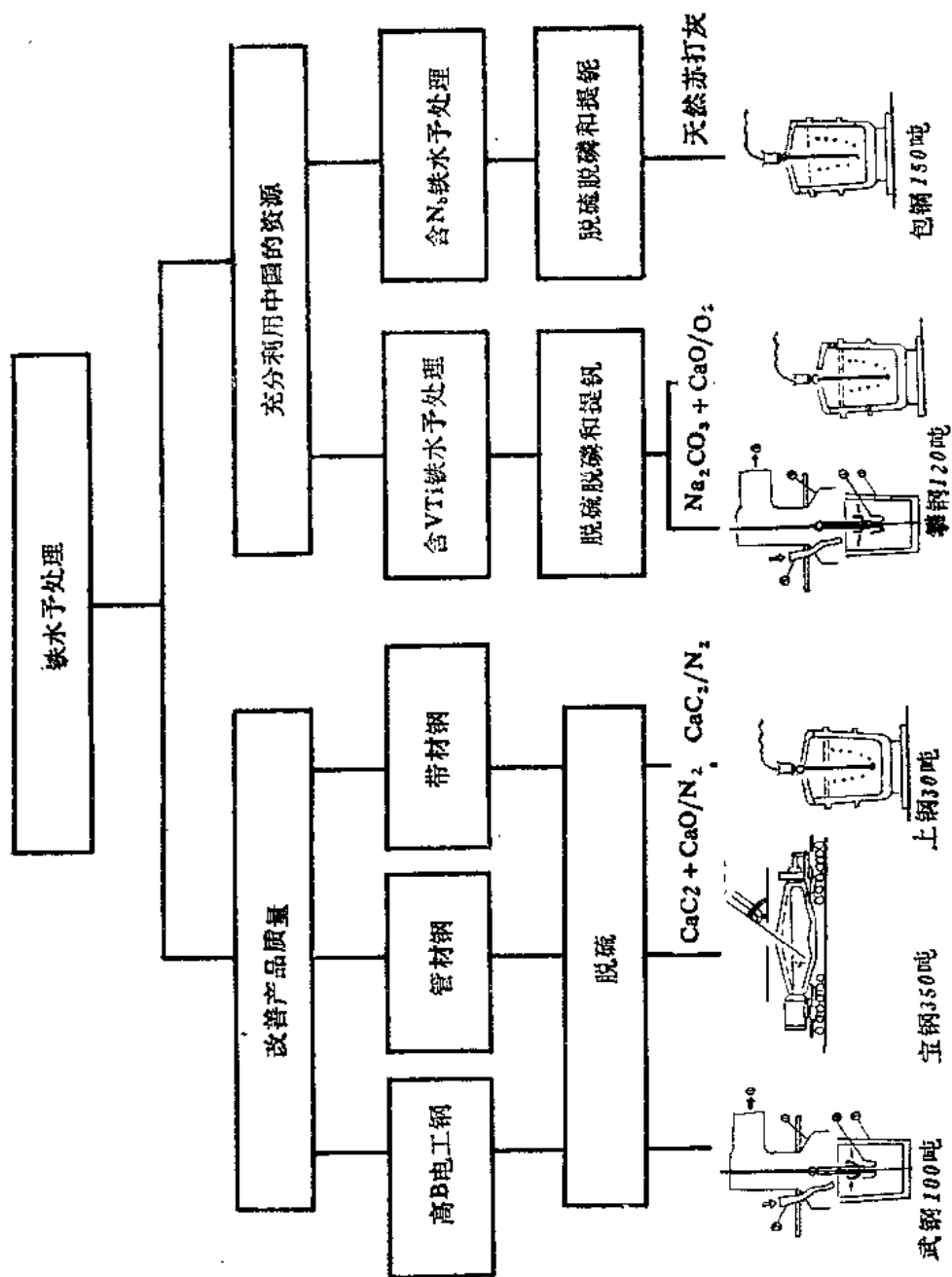


图 1、中国钢铁工业的铁水预处理示意图

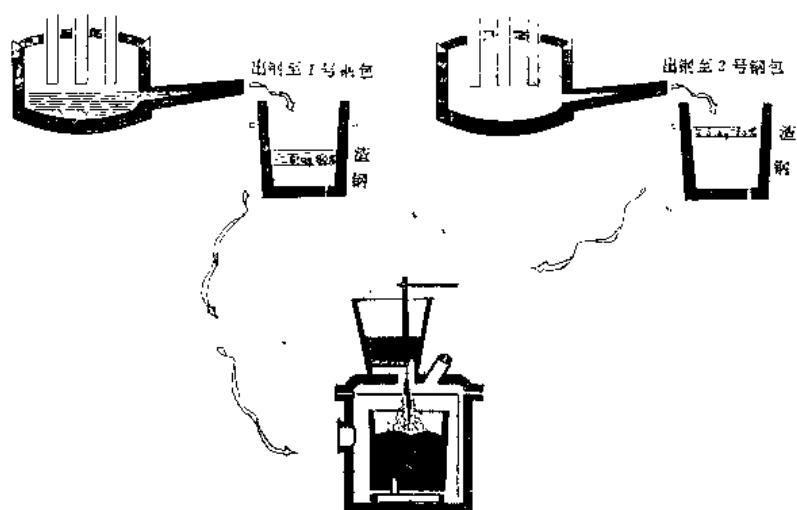


图2、真空注流加渣洗处理

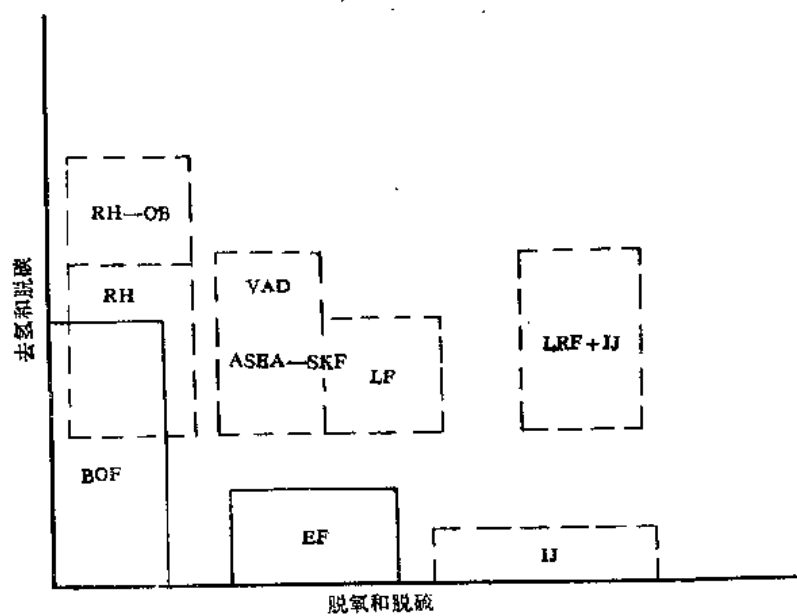


图3、钢包冶金功能的比较

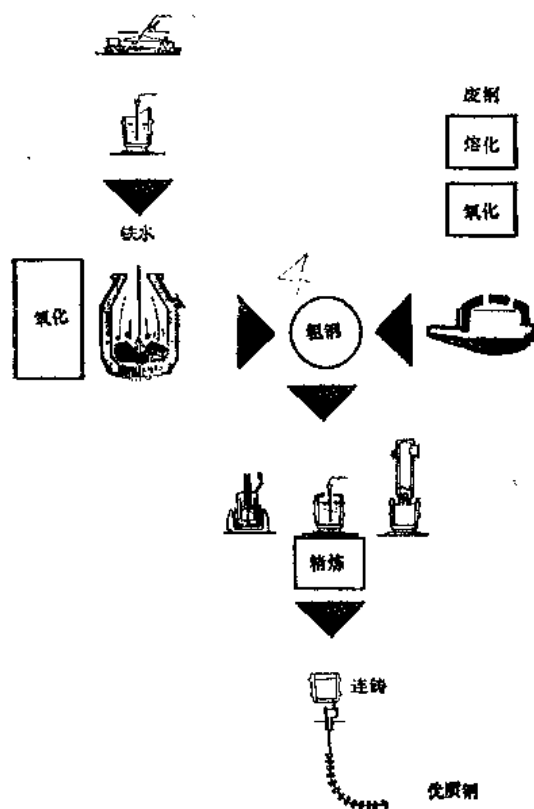


图 4、炼钢的过程

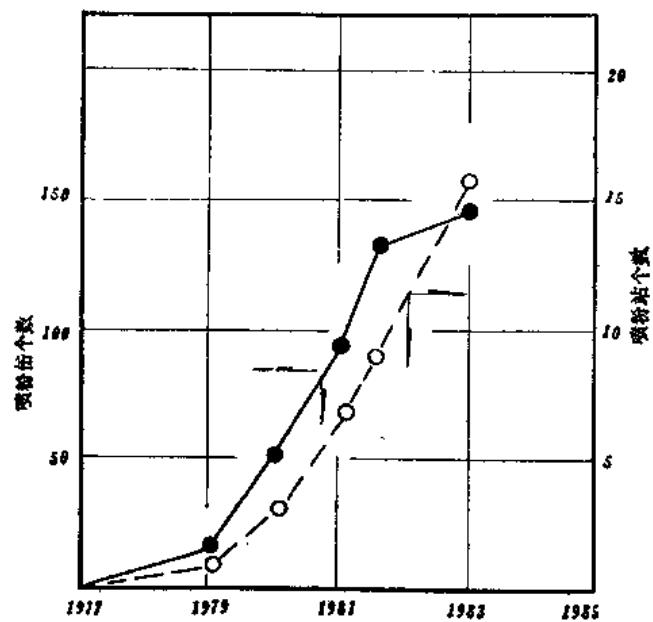


图 5、近年来喷粉设备的增加

## 参 考 文 献

1. Xu Kuang—Di «Injection phenomena in extraction and refining of metals» Newcastle, 1982, April. England.
2. Report on “pretreatment of hot metal” Bantou Inst. of Steel. 1982 (unpublished)
3. Report on “Desulphurization and extraction of V of Panzhihua hot metal” Beijing Inst. of Chemical metallurgy. 1981. (unpublished)
4. Du fun et al; «Vacuum treatment of Silicon Steel» 1978. Conference of Shanghai society of metals.
5. Xu Kuang—Di «VIIth International conference on vacuum refining and special melting» Tokyo, 1982, Nov.
6. K. Rui et al; «Scaninject III» Lulea 42: 1—17
7. 鞍钢三炼钢顶渣吹Ar
8. 北京钢厂钢包炉鉴定会资料
9. 上钢五厂LF炉资料
10. 大连钢厂及钢铁学院在日本《国际真空冶金及特种冶炼会议》上的文章
11. Yong Dong, Lu Shanhan «Shanghai Symposium on injection metallurgy» Nov, 1982, Shanghai
12. Yong Dong et al; «Scaninject III, part I» 17: 1—20, June 15—17, 1983.
13. 钢研院、鞍钢二炼钢110 T钢包喷吹资料
14. 齐钢铸铁喷粉设备
15. 上钢研、上三钢包喷吹设备鉴定会资料
16. 钢院、齐钢：轴承钢喷吹资料
17. Guan Yu Long et al; «Shanghai Symposium on injection metallurgy» 3—5 Nov., 1982, P 60—73
18. Hsiao Tse—Chiang et al; «Shanghai Symposium on injection metallurgy» 3—5 Nov., 1982, P 107—123
19. Guo Hong Zhi; M Sc Thesis, Beijing University of iron and Steel technology, 1983
20. 东工：“大颗粒夹杂物行为及防止”
21. 上工大：“喷吹中N的行为及其对钢质量的影响”



# 气体喷入液体时气—液二相区内 气—液混合体的物理行为

森一美、佐野等

(日本,名古屋大学)

## 一、序 言

把气体喷入液体可有效地得到强烈的搅拌和很高的反应速度。为了进一步认识这一过程,必须研究液体内部气液二相区的行为。在过去的研究工作中,作者集中研究了在水银和水中喷口附近的射流行为<sup>[1]—[4]</sup>。

本文第一部分,结合过去把氮气喷入水银或水的研究,研究氮气喷入水中的情况,观察了射流在初始形成区的行为。第二部分是把气体喷入水银,测量了气体的滞留比,分析了气—液混合体的向上流动。

## 二、射流在初始形成区的行为

### 1. 试验方法

水容器的内部尺寸是宽40厘米,长50厘米,高100厘米。装了一个有机玻璃窗口以便观察。容器底部是一块有机玻璃板,在其中心装有喷咀。水深为50厘米。以不同流量把氮气喷入水中,最大流量为8000厘米<sup>3</sup>/秒。用高速摄影机直接观察喷射时射流的行为。

### 2. 结果

#### 气泡流和射流

可用矩形波来代表气泡的形成,该波的

高和宽分别为最大的根部直径( $d_m$ )和气泡形成时间。图1为矩形波的例子,说明氮气喷入水中时先后形成气泡的情景。这里要区别二种现象:一是形成各种根部直径不等的气泡,称之为气泡流;另一是各种时间范围内根部直径( $d_m$ )表观上与喷口直径( $d_0$ )相符,这时喷入的气体以连续的气流离开喷口,称之为射流。图1展示了气泡流期、射流期转化的情况。

图2是用直径为0.2厘米的喷口把氮喷入水中时,射流时间比与气体流量间的关系,图中还有向水中或水银中喷射氮气时的数据。喷氮气要比喷氮气在高得多的气体流量下才开始出现射流。还发现与其它模型相比,氮—水模型中气泡流会更突然地转向射流。

图3为气体喷入水银和水中时射流时间比与名义马赫数 $M'$ 的关系,这里 $M'$ 是名义气体流速与音速之比。图中的点线和虚线分别是喷氮和喷氮时的亚音速—音速界面。根据流体力学对界面的 $M'$ 值作了理论计算<sup>[2]</sup>。

由图3可见,开始出现气泡流向射流转化的 $M'$ 临界值很近似于亚音速—音速界面值。非常有意义的是临界值几乎与气体、液体的物理性能无关。

最重要的发现是在音速流动区才出现射

流<sup>[1][4]</sup>。在这区域, 喷口出口处的气体压力大于液体静压力, 而且随流速增大而增大。可以假设, 在喷口出口处流速等于音速的射流, 一离开出口就会变成超音速的射流了<sup>[3][4]</sup>。在此超音速射流区内, 气流的线速度大于压力波的传播速度。因此由于射流振动、中断而引起的气流波动就不会深入到超音速射流区。这样, 喷入的气体就会在音速流动区形成稳定的射流。

由图3可知, 与向水中喷气相比, 向水银中喷气时为达到某个射流时间比, 要求有高得多的 $M'$ 。对水来说, 喷氮气时此值也要比喷氮时要高。这里, 流体密度的比值( $\rho_g/\rho_l$ )可作校正系数使用。

上述发现可归结为下述结论, 即溶池运动对气体射流的稳定性有影响, 该稳定性随气体密度的增加或液体密度的减少而增加。

#### 喷口附近气体射流的连接和分离

照片1是五张用高速摄影机连续拍摄的喷入气体属于气泡流流动的照片。为进行定量观察, 请注意在第一个与第二个气泡间的连接和分离行为。在照片1的头三张照片上, 可看到第一个气泡点样从正在形成的第二个气泡上分离出来。在第四张照片中, 可以看到形成的气泡又与原来的第一个气泡相连接了。最后一张照片表明二个气泡合并后形成的气泡是怎样离开的。

根据上述观察, 测定了“无连接”的时间, 这是从第一个气泡脱离气源起, 直至紧接着脱离的气泡与正在形成的第二个气泡相连接为止的时间间隔。由此, “无连接”时间比就是照片中“无连接”时间的总和与总时间的比。“无连接”时间比若为100%, 则说明喷入的气体只形成分离的气泡。而这时间比为0%, 就证明只形成连续的气泡。

图4为氮气喷入水中时, “无连接”时间比与流量的关系。图中的“连接”表示喷入

气体形成连续的气泡。随气体流量的增加, 分离减少, “无连接”时间比变小。但是气泡流行为是逐步变化的, 以至很难找出, 高于该流量时喷入气体主要形成连续的气泡的临界气体流量。

比较向水中喷入氮和氦的结果就可看出, 喷入气体的密度较大时, 分离现象就较少。虽然在水银系统内无法测定“无连接”时间, 但可假设, 与向水中喷气相比, 向水银中喷气时, 要达到一定的“无连接”时间比, 所需的气体流量要大得多。这些不同气泡流行为可能来自决定喷入气体与液体相互作用的不同的物理性能。

#### 与以前研究的比较

许多研究工作者曾把注意力集中在射流行为的突变上<sup>[5][6]</sup>。但是这些研究中, 没有给出流动状态的合理定义, 也未确立不同流动状态的准数。

雷斯和查克雷<sup>[5]</sup>在研究亚音速区水下气体射流的行为时, 发现高速喷射时在喷口出口处先后气泡间几乎是连续合并, 这就形成了类似射流的气泡柱。他们也得到气泡流向射流转化的临界条件。

霍菲尔和勃里姆康麦根据对不同液体中气体射流行为所作的研究, 区分了二种不同的流动状态: 气泡流和稳定的射流。他们用射流行为图表达了他们的结果, 见图5。这里, 修正的弗洛德数 $Fr'$ 为

$$Fr' = \frac{\rho_g v_0^2}{\rho_l d_0 g} \quad (1)$$

式中 $v_0$ 为喷口出口处气体的名义流速。图5中阴影区就是霍菲尔和勃里姆康麦所得的结果。

在图5中也标出本研究得到的出现射流时的临界 $Fr'$ 值。由图可见, 本研究的气泡流—射流转化与霍菲尔和勃里姆康麦的气泡流—射流转化较为不同。

菲里阿斯和罗伯逊<sup>[7]</sup>发现, 向水中喷入



氮和氢时,在喷口出口处,当  $N_i = 0.4 \sim 0.5$  时气体射流就停止横向的扩展。这里  $N_i$  为喷射数,由下式确定:

$$N_i = 3.3 Fr'^{2/5} \cdot (\rho_g / \rho_l)^{3/5} \quad (2)$$

他们的结果也在图 5, 6 中标出,为二虚线所划定的区域。在图 5 中还有雷斯等人<sup>5</sup>所得的临界  $Fr'$  值。由图 5 可见,其他人得到的气泡流—射流转化临界值与本工作的不符。

在图 6,作了“无连接”时间比为 30%、

20%和 10%时  $Fr'$  值与  $\rho_g / \rho_l$  的关系线,图中还有菲里阿斯和罗伯逊的结果。可见,“无连接”时间比为 30% 的线与菲里阿斯等人提出的准数相符。由此推得,菲里阿斯等人观察到的临界现象与本研究中发现的主要是形成连接气泡的现象相符合。

表 1 为以前的研究和本研究的临界  $Fr'$  值的比较。表 1 中  $Fr'$  值彼此很接近。根据这点,可推断,霍菲尔等,雷斯等和菲里阿斯等观察到的与本研究观察到的是相同的气

射流行为突变的临界  $Fr'$  值,与其它研究工作的比较

表 1

|                        | 喷入方向 | $d_0$    | 喷入气体 | 临界 $Fr'$ |
|------------------------|------|----------|------|----------|
| 霍菲尔与勃里姆康麦 <sup>6</sup> | 水平   | 0.325 厘米 | 空气   | 250      |
| 雷斯和查克雷 <sup>5</sup>    | 垂直   | 0.32     | 空气   | 120      |
| 菲里阿斯和罗伯逊 <sup>7</sup>  | 水平   | 0.32     | 氮    | 135~230  |
| 本工作“无连接”时间比 = 30%      | 垂直   | 0.2      | 氮    | 170      |

泡连接的临界行为。

麦克耐伦和金<sup>9</sup>观察了向水喷气时达到稳定射流状态的临界条件。图 5 中用实线表示了他们的结果,喷口直径  $d_0$  为 0.2 厘米,这与本研究结果符合得很好。看来他们对气泡流和稳定射流的射流行为所下的定义与本作者的很接近。

### 三、水银中气体滞留比的决定和二相区流体流动的分析

#### 1. 实验方法

用一个内径 15 厘米,高 40 厘米的不锈钢圆筒作水银容器,池深 14 厘米。从容器底部中心的喷口喷入氮气,喷口直径为 1 或 2 毫米。根据喷口条件,气体流量在 550 至 2200 厘

米<sup>3</sup>/秒间变动。

用电阻探针技术检测水银池中的气体。设计了可同时把池内七点的数据输入微型计算机的电子设备。最快采样时间是 4 微秒左右,测量时间为 10~35 秒。

#### 2. 试验结果

图 7 表示气体流量  $V_g$  为 550 厘米<sup>3</sup>/秒,喷口直径  $d_0$  为 1.2 毫米气体滞留比(或<sup>2</sup>(体体积比)的分布图。可见,在容器中心线上气体滞留比最大,并在向二相区\*边界移动时逐步变小。除了临近喷口地方,二相区逐步扩展,随着喷口垂直距离( $h$ )的增大气体滞留比减少。二相区因卷入周围的液体而扩展。在  $h > 30$  毫米的区域里, A、B 的分布图极为相似。在  $h < 30$  毫米的区域里, A、B 的分布图就有所区别,这与喷口直径有关。

\* 射流(JET)和气泡二相区(Plume)两个名词分别用来表示吹气时,由喷吹气流的惯性力(前者)和气泡浮力(后者)所引起的运动状况。