

## 10kA 底部阴极稀土熔盐电解槽流场的模拟

王 军<sup>1,2</sup>, 张作良<sup>2</sup>, 涂赣峰<sup>1</sup>, 吴文远<sup>1</sup>

(1. 东北大学 材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004;

2. 内蒙古科技大学 材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014010)

**摘 要:** 针对当前上插阴、阳极结构稀土熔盐电解槽存在的一些弊端, 设计了 10kA 底部阴极电解槽, 并用商业 CFD 软件 FLUENT 对该槽型中的流场进行了数值模拟, 得到三种极距下电解质和阳极气体的速度分布, 发现该槽型的设计是合理的。

**关键词:** 稀土; 电解槽; 流场; 底部阴极; 数值模拟

**中图分类号:** TF845

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-0277(2012)02-0064-05

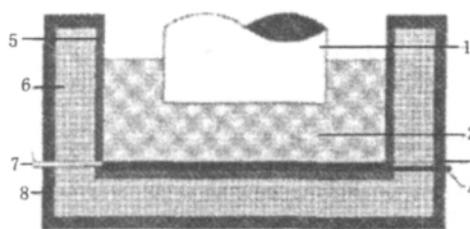
现阶段金属钽的生产通常采用氟化物熔盐体系氧化物电解法。在稀土熔盐电解过程中, 电解质的流动对电解生产过程的稳定性和电流效率都有很大的影响。一方面, 电解质的循环流动会使稀土氧化物快速、均匀的溶解于电解质之中, 也会使电解质的温度更加均匀; 另一方面, 电解质的剧烈运动会使稀土金属难以收集, 而且运动的电解质会将溶解于其中的稀土金属带到阳极区而被氧化, 从而降低了电流效率。因此, 流动对电解过程的影响是双重<sup>[1]</sup>的。

本文是在文献 [2, 3] 研究基础上, 针对所设计槽型(图 1), 使用商业 CFD 软件 FLUENT 对槽中的流场进行了模拟计算, 分析了极距的改变对流场的影响, 以期克服电解槽原设计模式的不足, 实现其结构和工艺的优化设计。

## 1 物理模型和数学模型

稀土电解槽内的电解质运动比较复杂, 并且属于湍流流动, 对电解质流场进行数值模拟时, 为了简化计算, 通常作出如下假设: (1) 忽略电解质中氧化钽颗粒的影响; (2) 电解质中的流动视为稳态、不可压缩流; (3) 电解质视为等温流体, 无热量传递; (4) 阳极产生的气体是电解质的主要推动力; (5) 忽略

阳极侧面电流, 假设阳极底掌电流密度均匀。



1 - 石墨阳极; 2 - 电解质; 3 - 液态金属阴极; 4 - 钨导体  
5 - 绝缘材料; 6 - 耐火砖; 7 - 钨管; 8 - 钢槽

图 1 底部阴极电解槽剖面图

Fig. 1 Cross-section drawing of bottom-cathode-structure electrolytic cell

视熔体为不可压缩流体, 求解流场所用到的基本方程组为: 连续方程, 动量方程, 描述湍流运动的  $k-\varepsilon$  两方程。它们的通用方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i\phi) = \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_i}\right) + S \quad (1)$$

式中:  $\rho$  表示密度,  $\mu$  表示速度,  $x$  表示坐标,  $\phi$  是广义变量,  $\Gamma$  是相应于  $\phi$  的广义扩散系数,  $S$  是广义源相。

在圆柱坐标系下, 各方程展开为:

1. 连续方程

\* 收稿日期: 2010-11-30

基金项目: 内蒙古自治区自然科学基金项目资助(200607010712)

作者简介: 王 军(1968-), 男, 山西浑源人, 博士研究生, 副教授, 从事有色金属冶金、稀土冶金方面的研究。

$$\frac{u_\gamma}{\gamma} + \frac{\partial u_\gamma}{\partial \gamma} + \frac{1}{\gamma} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2. 动量方程

r 方向:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_\gamma}{\partial t} + u_\gamma \frac{\partial u_\gamma}{\partial \gamma} + \frac{u_\theta}{\gamma} \frac{\partial u_\gamma}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{\gamma} + u_z \frac{\partial u_\gamma}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial \gamma} + \mu_{eff} \left[ \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \gamma \frac{\partial u_\gamma}{\partial \gamma} \right) + \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2 u_\gamma}{\partial \theta^2} + \right. \\ & \left. \frac{\partial^2 u_\gamma}{\partial z^2} - \frac{u_\gamma}{\gamma^2} - \frac{2}{\gamma^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right] + F_\gamma + \rho g_\gamma \end{aligned} \quad (3)$$

θ 方向:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial t} + u_\gamma \frac{\partial u_\theta}{\partial \gamma} + \frac{u_\theta}{\gamma} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\gamma u_\theta}{\gamma} + u_z \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial \gamma} + \mu_{eff} \left[ \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \gamma \frac{\partial u_\theta}{\partial \gamma} \right) + \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \right. \\ & \left. \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial z^2} - \frac{u_\theta}{\gamma^2} - \frac{2}{\gamma^2} \frac{\partial u_\gamma}{\partial \theta} \right] + F_\theta + \rho g_\theta \end{aligned} \quad (4)$$

z 方向:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial u_z}{\partial t} + u_\gamma \frac{\partial u_z}{\partial \gamma} + \frac{u_\theta}{\gamma} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) \\ &= -\frac{\partial p}{\partial \gamma} + \mu_{eff} \left[ \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \gamma \frac{\partial u_z}{\partial \gamma} \right) + \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2 u_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right] + \\ & F_z + \rho g_z \end{aligned} \quad (5)$$

式中  $u_r$ 、 $u_\theta$ 、 $u_z$  分别为径向、圆周方向和轴向的速度  $F_r$ 、 $F_\theta$ 、 $F_z$  分别为在各个方向上的体积力,在稀土熔盐电解槽中,体积力即为电磁力  $F_b$ 。

3.  $k - \varepsilon$  两方程

k 方程:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial k}{\partial t} + u_\gamma \frac{\partial k}{\partial \gamma} + u_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ &= \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \gamma \frac{\partial k}{\partial \gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

ε 方程:

$$\begin{aligned} & \rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_\gamma \frac{\partial \varepsilon}{\partial \gamma} + u_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) \\ &= \frac{1}{\gamma} \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \gamma \frac{\partial \varepsilon}{\partial \gamma} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (7)$$

两方程中的  $G_k$  是由于平均速度梯度引起的湍动能  $k$  的产生项,由下式计算:

$$\begin{aligned} G_k = & \mu_t \left\{ 2 \left( \frac{\partial u_\gamma}{\partial \gamma} \right)^2 + 2 \left[ \left( \frac{u_\gamma}{\gamma} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \left( \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right)^2 + \right. \\ & \left. \left( \frac{\partial u_z}{\partial \gamma} + \frac{\partial u_\gamma}{\partial z} \right)^2 + \left[ \gamma \frac{\partial}{\partial \gamma} \left( \frac{u_\theta}{\gamma} \right)^2 \right] \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

它们中的有关参数按照 Launder 和 Spalding<sup>[4,5]</sup> 给出的值:  $C_\mu = 0.09$ ,  $C_1 = 1.44$ ,  $C_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

对于湍流流动,有效粘度系数  $\mu_{eff}$  包括湍流粘度  $\mu_t$  和分子粘度系数  $\mu$ :

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (9)$$

$\mu_t$  由湍流的两个特征参数  $k$  和  $\varepsilon$  所决定:

$$\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon \quad (10)$$

2 流场的数值模拟

2.1 工艺参数和物性参数

表 1、表 2 分别为设计槽型的相关工艺参数和物性参数<sup>[6-9]</sup>。

表 1 稀土电解槽的工艺参数

Table 1 The related parameters of rare earth electrolytic cell

工作电流 / A	阳极电流 密度 / (A/m <sup>2</sup> )	电解温度 / °C	电解质组成
10000	9467	1050	87% NdF <sub>3</sub> - 13% LiF - Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

表 2 物性参数

Table 2 Physical parameters of materials

电解质密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	阳极气体密度 / (kg/m <sup>3</sup> )	电解质粘度 / (pa · s)	阳极气体粘度 / (pa · s)
3850	0.296	4.95 × 10 <sup>-3</sup>	4.881 × 10 <sup>-5</sup>

考虑到电解槽的轴对称性,只对半槽且在二维空间进行计算。

2.2 边界条件及计算方法

由于模拟的是半槽,把半槽横断面定义为对称面。在对称面上,垂直于对称面的速度分量为 0。同时,所有变量沿对称面法向方向的导数都为 0。

阳极气体是以气泡的形式释放的,取气泡的当量直径平均值为 1 cm。把阳极底掌作为阳极气体的入口,单位时间单位面积上的气体生成率为<sup>[10]</sup>:

$$q = \frac{iRT}{4FP} \quad (11)$$

式中  $q$  为气体生成率, m<sup>3</sup> / (s · m<sup>2</sup>);  $i$  为阳极电流密度, A/m<sup>2</sup>;  $R$  为通用气体常数, 8.314 J / (mol · K);  $T$  为绝对温度, K;  $F$  为法拉第常数, 96487 C / mol;  $P$  为大气压力, 101325 Pa。把阴极表面定义为电解质的速度入口,给定一初始速度。

除了对称面和入口,电解质上表面定义为压力出口,其他边界都为壁面。壁面上使用无滑移边界

条件。

采用 CFD 商业软件 FLUENT 进行求解。求解器使用分离式求解器,多相模型为欧拉两相模型,并采用标准  $k-\varepsilon$  双方程模型,压力-速度耦合为相耦合 SIMPLE 算法。为了改善收敛性,使用了欠松弛因子。

### 2.3 计算结果及分析

图 2、图 3、图 4 分别为极距分别为 0.1 m、0.12 m 和 0.14 m 时的电解质和阳极气体的流场分布示意图。为了清楚地显示流场,对矢量图中箭头的大小和疏密进行了处理。

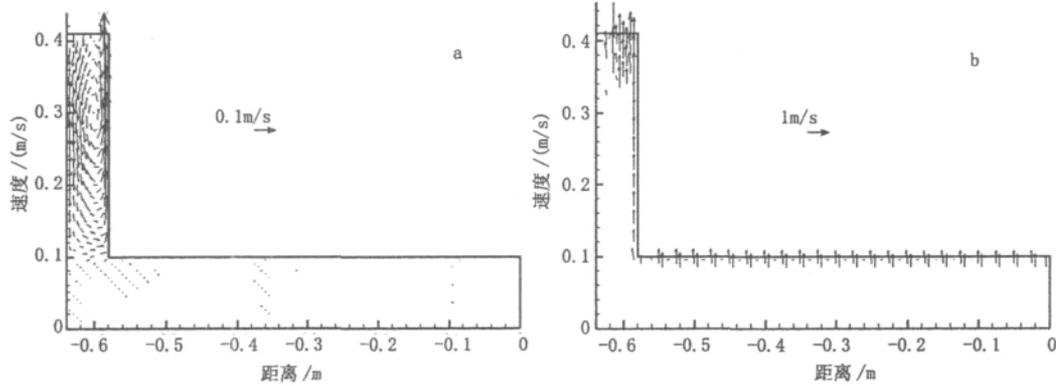


图 2 极距 0.1 m 时电解质 (a) 和阳极气体 (b) 流场

Fig. 2 Predicted electrolyte and anode gas flow pattern with polar distance 0.1 m

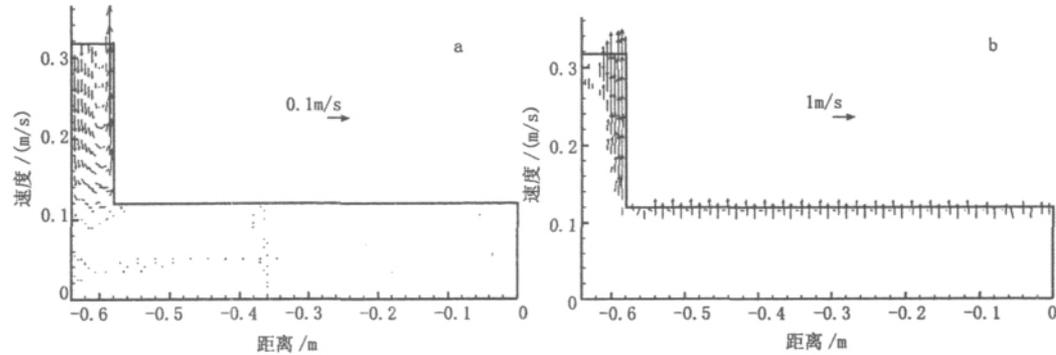


图 3 极距 0.12 m 时电解质 (a) 和阳极气体 (b) 流场

Fig. 3 Predicted electrolyte and anode gas flow pattern with polar distance 0.12 m

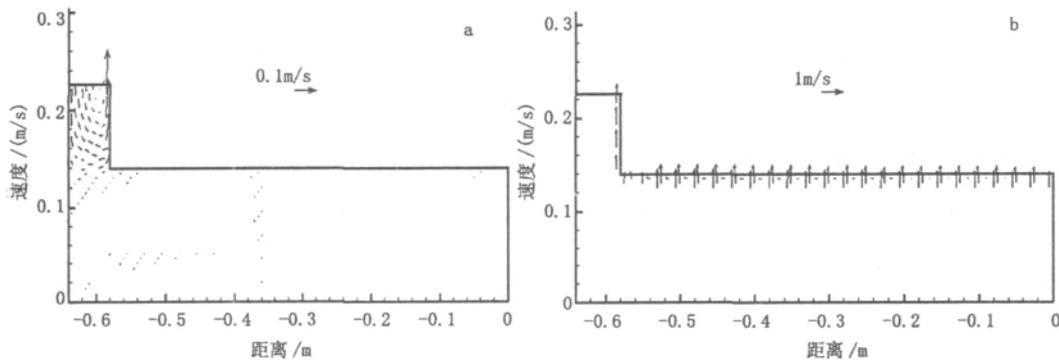


图 4 极距 0.14 m 时电解质 (a) 和阳极气体 (b) 流场

Fig. 4 Predicted electrolyte and anode gas flow pattern with polar distance 0.14 m

由图 2 ~ 图 4 可以得出: (1) 对开发的底部阴极稀土电解槽中的流场进行了数值模拟, 结果表明流场分布很好。(2) 阳极气体产生于阳极底掌后, 气体的初始速度很小, 立刻受到电解质的阻碍作用, 而电解质平面几乎为静止状态, 可以认为两相间的碰撞为弹性碰撞, 这样阳极气体对阴、阳极间电解质的作用必然会很小, 弹回的气泡沿着阳极底掌面向阳极端部运动。在端部, 气泡聚集、合并, 导致速度发生突变, 然后沿着阳极侧壁迅速逸出。这有利于阴极表面金属的收集, 防止金属的二次氧化, 可是会造成电解质成份和温度的不均匀。(3) 在阳极气体的作用下, 阳极侧壁和槽壁间的电解质形成一个大循环, 会加速氧化钽的溶解, 溶解后的氧化钽会被带到阴、阳极间参与反应, 使生产过程顺利进行。靠近阳极侧壁处的电解质以较快的速度上升, 到达表面后, 在自身重力的作用下又以较快的速度沿着槽壁流回槽内。下降过程中, 速度逐渐减小, 这是因为受到来自阳极端部的气体和下部电解质的共同作用使然。(4) 在极距增大过程中, 电解质和阳极气体的运动变化趋势是基本一致的, 只是它们的最大流速在减小, 而阳极气体在产生后所受到的电解质的反作用力在增强, 同时阳极侧壁与槽壁间的循环也在缩小, 这是电解质水平降低的缘故。

### 3 结论

1. 对目前流行的上插式阴、阳极结构的电解槽进行改造, 借鉴铝电解槽型结构, 开发底部阴极稀土电解槽, 得到很好的流场分布, 提高稀土电解的生产效率。

2. 阳极底掌产生的气体对阴、阳极间电解质的扰动很小, 这有利于阴极表面金属的收集, 防止金属的

二次氧化, 可是会造成电解质成份和温度的不均匀。

3. 电解质和阳极气体的最大速度随着极距的增大在减小; 阳极侧壁和槽壁间的大循环会加速氧化钽的溶解, 溶解后的氧化钽会被带到阴、阳极间参与反应, 使生产过程顺利进行。

4. 通过对比, 极距为 0.12 m 时的底部阴极电解槽是较为理想的槽型, 此时电解质的最大速度为 0.248 m/s, 阳极气体的最大速度为 1.39 m/s。

#### 参考文献:

- [1] 尹小东. 稀土熔盐电解槽电磁场、流场的研究以及节能降耗的探讨[D]. 包头: 包头钢铁学院, 2002.
- [2] 王军, 王春慧, 涂赣峰, 等. 10kA 底部阴极稀土电解槽热平衡计算[J]. 稀土, 2008, 29(5): 61-63.
- [3] 王军, 张作良, 涂赣峰, 等. 10kA 底部阴极稀土熔盐电解槽电场的模拟[J]. 稀土, 2010, 31(4): 36-39.
- [4] Launder B E, Spalding D B. The numerical computations of turbulent flows [J]. Computer Method in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2): 269-289.
- [5] Launder B E, Spalding D B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [M]. London: Academic press, 1972.
- [6] 郑天仓, 任永红, 毛裕文. NdF<sub>3</sub>-LiF-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系粘度的研究[J]. 稀土, 2000, 21(6): 33-36.
- [7] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧, 等. NdF<sub>3</sub>-LiF-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系熔盐密度的研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2000, 143(4): 7-10.
- [8] 刘奎仁, 陈建设, 魏绪钧. 钽电解阳极产物的研究[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 1118-1121.
- [9] 《有色冶金炉设计手册》编委会. 有色冶金炉设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [10] Solheim A, Johansen S T, Rolseth S, et al. Gas driven flow in Hall - Heroult cells [J]. Light metals, 1989, 245-252.

### Simulation of the Flow Field in 10kA Bottom - cathode - structure Rare Earth Electrolytic Cell

WANG Jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Zuo-liang<sup>2</sup>, TU Gan-feng<sup>1</sup>, WU Wen-yuan<sup>1</sup>

(1. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** In allusion to some disadvantages existed in the current rare earth molten salt electrolytic cell with parallel - interpolation - structure of anode and cathode, 10kA bottom - cathode - structure rare earth electrolytic cell was designed and

the commercial CFD software FLUENT was used to simulate the flow field. Then the velocity distributions of electrolyte and anode gas for three kinds of polar distance were obtained and the result reveals the design of the new electrolytic cell is reasonable.

**Key words:** rare earth; electrolytic cell; flow field; bottom-cathode - structure; numerical simulation

---

## 我国自主制成高性能稀土永磁磁共振系统

2012 年 1 月 8 日,包头市稀宝博为医疗系统有限公司自主研发、具有完全知识产权的首台高性能 0.45T(特斯拉)稀土永磁磁共振系统顺利调试完成,发往中东。这标志着全球规模最大的一体化永磁磁共振生产基地正式建成下线。

磁共振成像(MRI)是当今医学诊断中最有效的临床影像诊断设备之一,被用于人体各部位的检查,尤其对肿瘤的早期诊断和软组织病变诊断具有不可替代的作用。

MRI 按成像主磁场形成方式可分为超导 MRI 和永磁 MRI 两种。超导 MRI 磁场强度高、成像物理环境好,但制造工艺和使用成本“双高”,其磁场维持需有产自美国的液态氦,价格昂贵,国内医院无法普及。永磁 MRI 的制造、使用成本低,但传统永磁 MRI 磁场强度低,成像物理环境受涡流、剩磁破坏及磁场均匀性限制,系统成像质量低于超导 MRI 系统。

稀宝博为于 2010 年 4 月组建,成立一年半即建立了年产 300 台一体化永磁 MRI 的生产基地,并组建了同行业规模最大、配置最全面的研发团队。该团队利用独创的动态平衡技术解决了困扰永磁 MRI 多年的涡流、剩磁和磁场均匀等行业性、世界性难题,使永磁 MRI 系统的成像物理环境达到了超导 MRI 系统的标准,从而使系统的常规临床诊断图像达到了超导系统的水平,而其价格仅为超导系统的 1/3。

我国有 16000 家县级以上的医院, MRI 的普及程度仅为发达国家的 1/20。稀宝博为生产基地的落成投产,将为解决基层民众“看病贵、看病难”的社会难题作出贡献。

[中国稀土网站]