

# 15 kA 稀土熔盐电解槽炉底结瘤形成机制与对策

伍永福<sup>1</sup>, 马守营<sup>1</sup>, 王振峰<sup>1</sup>, 边雪<sup>2</sup>, 刘中兴<sup>1</sup>, 柳云龙<sup>3</sup>

(1. 内蒙古科技大学 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110004;  
3. 四川江铜稀土有限责任公司, 四川 冕宁 615601)

[摘要] 稀土金属镨钕合金生产过程中, 易在熔盐电解槽炉底形成结瘤, 不但影响生产的连续化, 还对产品质量产生影响, 目前相关文献多集中在结瘤产物成分及电解参数对结瘤的影响方面, 鲜有文献对结瘤形成机理进行研究。本文分析了炉底结瘤物形貌和结晶物组成, 发现结瘤物的成分为氧化钕、氧化镨、氟氧化钕以及少量氟化钕和金属钕。采用数值模拟的方法对电解流场进行了分析, 得出炉底结瘤物形成原因: 加料速度过快是形成结瘤物的主要原因, 氟氧化钕的熔点比熔盐高, 易在石墨坩埚台阶上沉积形成结瘤物; 稀土金属出炉时会带走大量的热, 导致炉底温度出现较大变化, 氧化钕在温度较低的区域容易析出, 沉积在石墨坩埚台阶上; 电解槽底部区域熔盐的流动性较差, 使得在石墨坩埚台阶上析出的产物不能随熔盐流动而沉积。通过控制下料速度和保持合理电解温度, 可以避免过剩的物料或者析出物料在坩埚台阶上沉积, 及时清理炉底和台阶上积料可以控制结瘤物的增长速度。

[关键词] 稀土熔盐电解; 镨钕合金; 结瘤物; 形成机制; 数值模拟; 加料速度; 电解温度; 氧化钕析出

[中图分类号] TF845; TF803.2+7 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2023)04-0081-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2023.04.011

目前, 熔盐电解是由稀土氧化物制备高质量稀土金属的重要方法<sup>[1-2]</sup>, 但在稀土金属特别是镨钕合金生产过程中, 炉底结瘤的问题始终困扰着生产过程, 给稀土金属生产的大型化和连续化造成巨大的困难<sup>[3-5]</sup>。因此, 研究结瘤物的组成及结构、分析结瘤物的形成原因、提出控制方法, 对提高镨钕合金的产品质量, 降低生产成本具有重要意义。

关于电解槽炉底结壳问题, 有学者对铝电解过程做了大量研究<sup>[6-8]</sup>, 一般认为温度和氧化物溶解行为对结壳影响很大。关于稀土电解槽结瘤问题, 郭海涛等<sup>[9]</sup>、高钰奇等<sup>[10]</sup>曾对3kA电解结瘤物进行了详细分析, 发现结瘤物的主要成分为氟氧化钕。

蒙毅等<sup>[11-12]</sup>探究了电解时长和结瘤生成初始位置对结瘤物形成的影响并探究结瘤物的成因及对电解的影响, 发现长时间的电解会导致结瘤物形貌发生较大改变, 进而加速结瘤物的生长。上述研究结果对稀土结瘤物的成因分析提供了参考, 但是鲜有文献利用流场分析炉底结瘤物的形成机理。本文通过结瘤物形貌和结晶物组成分析, 尝试利用数值模拟分析流场导致结瘤形成的基本机理, 并提出相应的解决措施, 为降低稀土电解过程结瘤现象提供参考。

## 1 稀土电解工艺及机理

本文研究的15 kA稀土电解槽为上插式稀土电解槽, 模型中包括石墨阳极、电解质、石墨坩埚、钨阴极。电解槽的剖面如图1所示。电解在1050℃的高温环境下, 用NdF<sub>3</sub>-LiF电解质体系电解Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 获得液态金属Nd, 同时会在石墨阳极内表面生成大量气体带动电解质循环。其中NdF<sub>3</sub>-LiF的比例为83%:17%, 电解质密度由试验测定得到, 为3.844 g·cm<sup>-3</sup>。氧化钕、氧化镨粉末从电解槽上部液面定时少量加入。

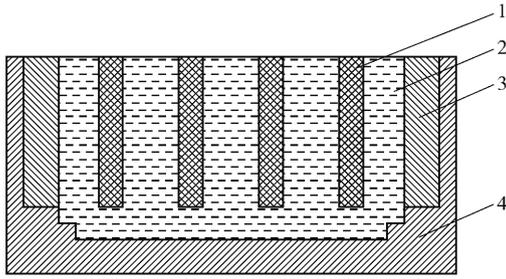
[收稿日期] 2023-01-22

[第一作者] 伍永福(1974—), 男, 汉族, 湖南祁阳人, 博士, 教授, 主要研究稀土冶金过程的数值模拟。

[通信作者] 王振峰(1984—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为喷雾热解。

[基金项目] 国家自然科学基金(51964039); 内蒙古自然科学基金(2022LHMS05004, 2021GG0103); 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室开放基金(2021H2275)。

[引用格式] 伍永福, 马守营, 王振峰, 等. 15 kA 稀土熔盐电解槽炉底结瘤形成机制与对策[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(4): 81-87.



1—钨阴极；2—电解质；3—石墨阳极；4—石墨坩埚

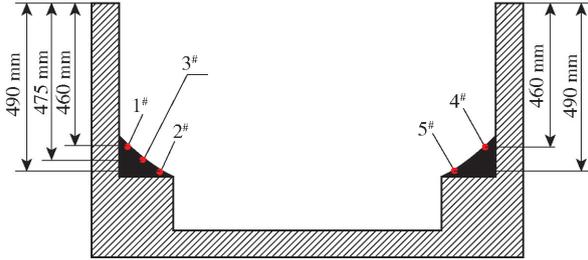
图1 15 kA 稀土电解槽结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the 15 kA rare earth electrolytic cell structure

## 2 试验介绍

### 2.1 结瘤物取样

稀土电解槽在长时间运行后,一般会在石墨坩埚台阶上沉积形成结瘤,在15 kA 电解槽停炉后,取炉底结瘤物作为分析样品,结瘤截面及结瘤取样位置简图如图2所示。1#~5#分别代表左上、左下、中间、右上、右下5个位置。



1#—左上；2#—左下；3#—中间；4#—右上；5#—右下

图2 结瘤物的典型形状

Fig.2 Typical shape of the nodulation material

### 2.2 分析方法

对取得的结瘤物进行X射线荧光光谱分析,分析结瘤物的元素组成;取图2中停炉后石墨坩埚台阶上炉底结瘤物的左上、左下、中间、右上、右下5个位置的样品进行X射线衍射分析、岩相分析;对电解槽流场进行数值模拟分析,通过分析样品中物质的组成、物质的分布及熔体的流动情况进一步探究结瘤物形成的原因。

### 2.3 模拟方法

采用CFD Fluent模拟电解槽流场分布。使用欧拉两相流模型进行模拟,两相流方程见式(1)~(3);流体的流动符合 $k-\varepsilon$ 湍流双方程,见式(4)和

式(7)。

$$\frac{\partial(\rho u_x u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_x)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_x)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \rho X \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_x u_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_y)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left( 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \right] + \rho Y \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_x u_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y u_z)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z u_z)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left( 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \right] + \rho Z \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}K)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i K)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{\text{eff}} \partial K}{\sigma K \partial x_i} \right) + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$G = \mu_r \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

$$\mu_r = \rho C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\varepsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\bar{\rho}u_i \varepsilon)}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\mu_{\text{eff}} \partial \varepsilon}{\sigma \varepsilon \partial x_i} \right) + \frac{\varepsilon}{K} (C_{\varepsilon 1} G - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (7)$$

由于流体为不可压缩流体,连续性方程见式(8)。

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

研究流场可以分析观察电解质中各物质的运动轨迹,进而分析石墨台阶处结瘤物形成的原因。通过计算得到气体入口速度为0.003 93 m/s。为了在简化模型的同时确保电解槽流场仿真的真实性,作出如下假设:①气泡上浮是熔体流动驱动力;②电解质为不可压缩流体;③电解质均匀连续;④石墨阳极不发生形变。

## 3 结果与讨论

### 3.1 结瘤物的元素组成

对取得的结瘤物样品进行X射线荧光光谱分

析,结果见图3。由图3可知,结瘤物的元素组成中钕元素含量最大,质量分数约占48.766%;氟、镨、

镧元素在结瘤物中也占据相当大的比重。

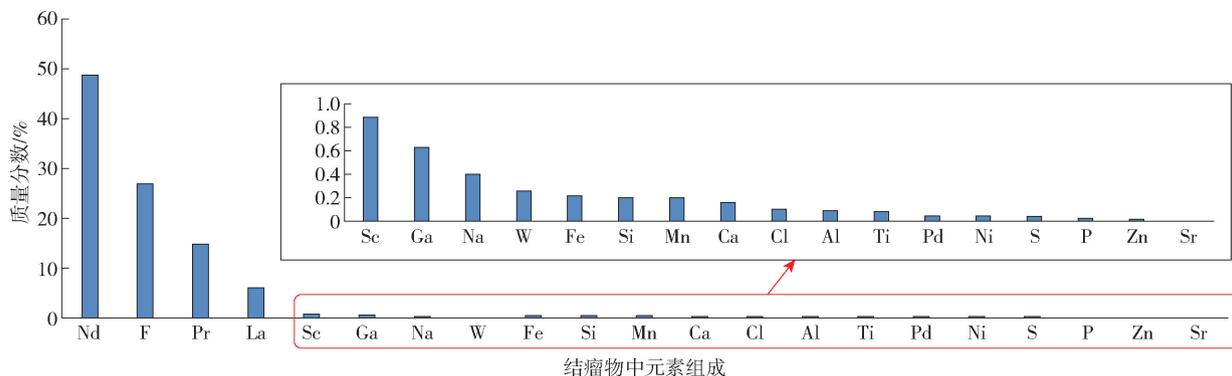


图3 结瘤物的元素组成(质量分数%)

Fig. 3 Elemental composition of the nodule with the content (mass fraction%)

### 3.2 结瘤物的物相分析

对炉底结瘤物样品进行X射线衍射分析,结果见图4。由图4可知,结瘤物的氧化物组成中氧化钕在结瘤物中的比重较大,质量分数约占47.694%,氟氧化物的质量分数约为27.414%,氧化镨的质量分数约为14.627%,氧化镧的质量分数约为5.924%,其他物质的含量较少。

图4表明,结瘤物5个部位的样品XRD分析图谱大致相同,通过查询XRD标准卡片可知,稀土熔盐电解槽炉底结瘤物的主要成分是氟氧化钕、氟化钕、氧化钕以及氧化镨。所以可以确定在X射线荧光光谱分析中检测出的氟氧化物是氟氧化钕。

非常小,使得原料在此处沉积;另外由于加料过快,过剩的氧化钕会与氟化钕发生反应生成氟氧化钕,这与X射线荧光光谱分析中结瘤物含有大量的氟氧化物相符合,且XRD分析进一步证明该氟氧化物为氟氧化钕。

### 3.3 岩相分析

对5个位置的样品制样,并作岩相分析,结果显示5个位置的样品结构相似,如图5所示。结合XRD分析可知,图中颜色呈现为灰色的物质是氧化钕和氧化镨,颜色呈现为黑色的物质是氟氧化钕。结瘤物体积分数(线段法)为:氧化钕和氧化镨约占70%,氟氧化钕约占29%,金属钕小于1%。岩相分析结果为:①氧化钕和氧化镨呈现出不规则形状;②氟氧化钕呈不规则块状掺杂其中;③金属钕呈星点状浸染于氟氧化钕中,位于氟氧化钕晶体与氟化钕晶体填隙结构。

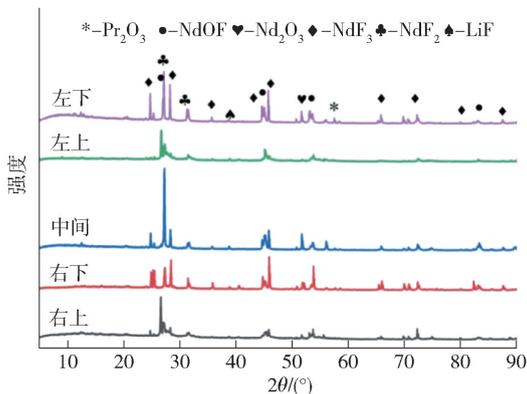
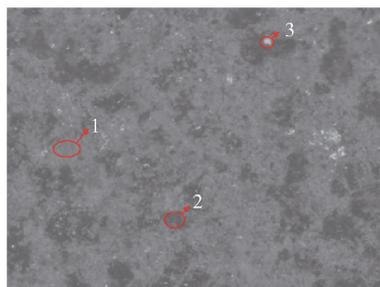


图4 结瘤物X射线衍射图

Fig. 4 X-ray diffraction diagram of the nodule

结瘤物成分中存在着大量氧化钕和氧化镨,分析原因,可能是电解期间加料速度过快,导致大量的原料在石墨坩埚台阶处堆积,且台阶处的熔体流速



1—氧化钕和氧化镨; 2—氟氧化钕; 3—金属钕

图5 结瘤物单偏光反光照片

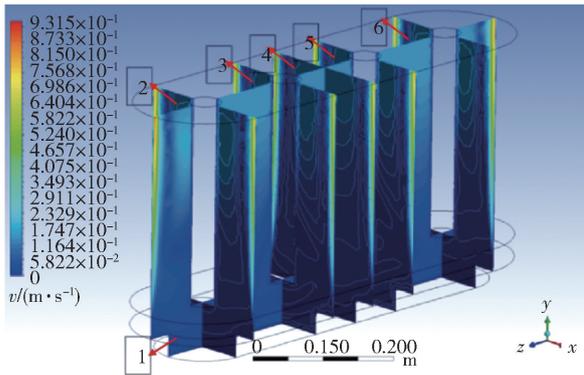
Fig. 5 The nodule reflect light polarization light

由XRD分析得到结瘤物生成原因是加料速度

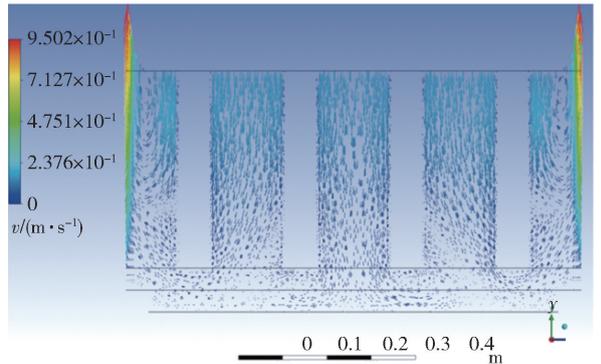
过快,导致氧化钨和氧化锆先在石墨台阶处堆积,其中部分氧化钨和氟化钨又会反应生成氟氧化钨,氟氧化钨密度大、熔点高,会在炉底台阶处形成结瘤,掺杂在未溶解的原料中。在形成期间,会夹杂着少量的氟化钨以及呈分散状的微小金属钨晶粒。

### 3.4 流场分析

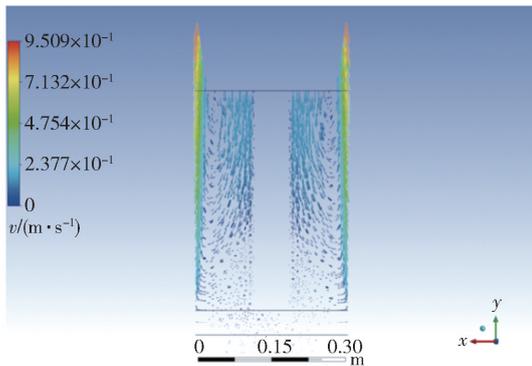
稀土电解槽 CFD 模拟熔盐速度云图如图 6 所示。图(a)为多切面熔盐速度云图,沿着阴极轴心在  $z$  方向建立截面 1,在  $x$  方向建立截面 2、3、5、6,并在截面 3、5 之间建立平行截面 4。



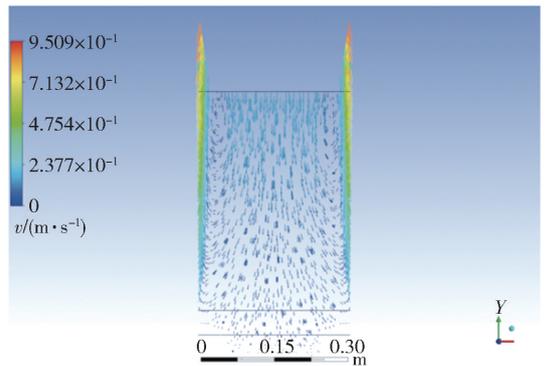
(a) 多切面熔盐速度云图



(b) 截面1速度矢量图



(c) 截面3速度矢量图



(d) 截面4速度矢量图

图 6 熔盐速度矢量图

Fig. 6 Molten salt velocity vector diagram

从图 6 可以看到,在阳极内侧表面流体速度大于阴极表面熔盐流速,越远离阳极表面,流体流速越小。同时,在阳极内表面靠近液面处,流体速度最大。这是因为气泡在阳极内表面生成,并在上升的过程中产生凝聚,逐渐变大,当达到液面附近时,气泡产生破裂扰动熔盐流场,所以在阳极内表面靠近液面处熔盐流速达到最大。

熔体的流动区域主要集中在阴、阳极之间,这是因为阴、阳极之间是电解的主要发生区域,阳极表面发生电化学反应生成的气泡上浮对熔体产生的作用力,以及电场产生的电磁力是这部分区域中熔盐流动的主要驱动力,而电解槽底部区域受气泡上浮的作用力影响较小,熔体基本上没有流动速度。

由于熔盐熔体内存在大量的离子,电磁力对熔体的作用也不容忽视。电磁力主要分布在电极之间,对电解质存在一定的搅动效应,在电解槽底部区域由于阴、阳极产生的磁场方向相反使得电磁力较弱。

因此,电解槽底部区域流动缓慢,存在流动死区。图 7 为低速熔盐流动速度云图,可以看出,电解槽底部区域和石墨台阶处为低速流动区域,速度低于 0.039 m/s。电解槽底部区域速度较小,有利于析出金属的收集;而石墨台阶处流速较小,会使得物料在此处堆积,因此,在此处堆积的原料与电解质反应的析出产物会在石墨坩埚台阶上沉积,形成结瘤。

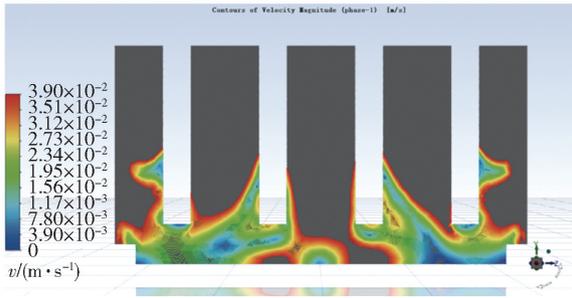


图7 低速熔盐流动速度云图

Fig.7 Cloud map of low-speed molten salt flow speed

## 4 结瘤物形成的原因分析及控制方法

### 4.1 原因分析

由结瘤物形貌分析及流场数值模拟可知,稀土电解槽炉底生成结瘤物的原因主要有以下几个方面。

1) 下料速度过快。在稀土电解过程中,氧化钕在电解质中可以溶解 2% ~ 4%。当加料速度过快时,一方面未溶解的氧化钕和氧化镨会堆积在台阶处,另一方面当电解质中氧化钕的质量分数超过 4%,未溶解的氧化钕会与氟化钕反应生成氟氧化钕,由于氟氧化钕的熔点比熔盐高且密度大,易在石墨坩埚台阶上沉积,最终形成难以清理的结瘤物。

2) 炉温的影响。氧化钕的溶解度会因温度的改变而发生变化,其溶解度一般随温度的升高而升高。在电解一段时间后,稀土金属出炉时要带走大量的热,导致炉膛底部温度偏低,而熔体中的部分氧化钕也随着温度的降低析出,最终在炉底的石墨坩埚台阶处沉积生成结瘤物。

3) 金属接收器中由于生成的金属液滴入带动周围的电解质运动,使得金属接收器内部不容易生成结瘤物,而石墨坩埚台阶上方区域的熔体流动速度太小,使得析出物沉积生成结瘤物。

4) 流场的影响。电解质的低速流动使得部分未溶解的氧化钕、氧化镨及反应生成的少部分氟氧化钕在石墨台阶处堆积,其间,流场会偶尔卷动生成的金属液残星落入石墨台阶处,最终形成未溶解的原料中夹杂着少量的氟化钕以及呈分散状的微小金属钕晶粒的现象。

### 4.2 控制方法

生成的结瘤物熔点高,物质坚硬且难以清理,如果不即时清理的话,结瘤物会随着电解时间的增加

而不断增长,严重时甚至导致停产,需要采取相应措施减缓结瘤及影响。

1) 控制加料速度。根据电解反应速率来合理地加入氧化钕、氧化镨等原料,避免原料在石墨台阶处堆积,同时避免过剩的氧化钕与氟化钕反应生成沉积物;15 kA 稀土电解槽下料时间间隔一般控制在 60 s 左右较为合适。

2) 保持炉温稳定。在电解槽底部区域做好保温措施,在电解生成稀土金属出炉后,待到炉底温度稳定在 1 050 ℃ 左右再下料电解。

3) 当石墨坩埚台阶上有析出物沉积时,应及时清理,防止形成结瘤物。

## 5 结论

本文在分析 15 kA 稀土熔盐电解槽炉底结瘤物形貌和结晶物组成的基础上,采用数值模拟的方法对电解流场进行了分析,研究了结瘤物形成机理,得出以下结论。

1) 稀土熔盐电解槽炉底结瘤物的成分主要有氧化钕、氧化镨、氟氧化钕以及少量氟化钕和金属钕组成。加料速度过快是形成结瘤物的主要原因,氟氧化钕的熔点比熔盐高,易在石墨坩埚台阶上沉积,最终形成难以清理的结瘤物。

2) 在稀土金属出炉时会带走大量的热,导致炉底温度出现较大变化,氧化钕在温度较低的区域容易析出,生成的氟氧化钕也容易在石墨坩埚台阶上沉积。

3) 在稀土电解槽底部区域熔盐的流动性较差,使得在石墨坩埚台阶上析出的产物因不能随熔盐流动而沉积,逐渐形成结瘤物。

4) 控制下料的速度,使其保持在合理的区间,避免过剩的物料在坩埚台阶上沉积。保持电解温度在合理的区间变化,避免因温度降低导致物料析出而沉积,及时清理炉底和台阶上积料可以控制结瘤物的增长速度。

### [参考文献]

- [1] 刘玉宝. 稀土金属及其合金制备与应用研究进展[C]//中国稀土学会 2021 学术年会论文摘要集, 2021: 63.  
LIU Yubao. Research progress in the preparation and application of rare earth metals and their alloys [C]// Abstract set of the 2021 Annual Conference of Chinese Rare Earth Society, 2021: 63.
- [2] 刘玉宝, 陈国华, 于兵, 等. 熔盐电解法制备稀土金属技术研究进展[J]. 稀土, 2021, 42(5): 133 - 143.

- LIU Yubao, CHEN Guohua, YU Bing, et al. Research progress of preparation of rare earth metals by molten salt electrolysis [J]. Rare Earth, 2021, 42 (5): 133 - 143.
- [3] 刘玉宝, 陈国华, 于兵, 等. 稀土熔盐电解过程出金属技术研究进展[J]. 稀土, 2018, 39(2): 134 - 140.
- LIU Yubao, CHEN Guohua, YU Bing, et al. Progress in metal technology for electrolysis of rare earth molten salt [J]. Rare Earth, 2018, 39 (2): 134 - 140.
- [4] 王祥生, 王志强, 陈德宏, 等. 稀土金属制备技术发展及现状[J]. 稀土, 2015, 36(5): 123 - 132.
- WANG Xiangsheng, WANG Zhiqiang, CHEN Dehong, et al. Development and current status of rare earth metal preparation technology [J]. Rare Earth, 2015, 36 (5): 123 - 132.
- [5] 熊云鹏. 基于 CFD 的稀土金属电解出炉技术研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- XIONG Yunpeng. Research on rare earth metal electrolysis technology based on CFD [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.
- [6] 张晓东. 浅谈电解槽的伸腿肥大[J]. 中国金属通报, 2016 (9): 92 - 94.
- ZHANG Xiaodong. On the extended leg hypertrophy of the electrolytic cell [J]. China Metal Bulletin, 2016(9): 92 - 94.
- [7] 杨酉坚. 氧化铝在冰晶石体系中溶解行为的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- YANG Youjian. Dissolution behavior of alumina in icillar system [D]. Shenyang: Northeastern University, 2016.
- [8] 杨酉坚, 李有才, 王兆文, 等. 铝电解中氧化铝溶解过程及结壳行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2021, 42(1): 55 - 61.
- YANG Youjian, LI Youcai, WANG Zhaowen, et al. Alumina dissolution process and crust behavior in aluminum electrolysis [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2021, 42 (1): 55 - 61.
- [9] 郭海涛, 高俊梅, 张小琴, 等. 3 kA 钕电解槽炉底结瘤分析[J]. 包头钢铁学院学报, 2003(4): 310 - 312.
- GUO Haitao, GAO Junmei, ZHANG Xiaoqin, et al. Analysis of 3 kA neodymium electrolytic tank [J]. Journal of Baotou Iron and Steel Institute, 2003(4): 310 - 312.
- [10] 高钰奇, 刘中兴, 李扬磊, 等. 稀土电解过程中氧化钕颗粒在不同工况下运动轨迹分析研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(6): 37 - 43.
- GAO Yuqi, LIU Zhongxing, LI Yanglei, et al. Analysis of neodymium oxide particles during rare earth electrolysis [J]. China Casting Equipment and Technology, 2020, 55(6): 37 - 43.
- [11] 蒙毅, 刘欢, 李纯, 等. 铜工业电解条件下结瘤的生长行为研究[J]. 湿法冶金, 2021, 40(5): 446 - 450.
- MENG Yi, LIU Huan, LI Chun, et al. Study on growth behavior of copper industry under electrolysis [J]. Wet-hydrometallurgy, 2021, 40 (5): 446 - 450.
- [12] 蒙毅, 刘欢, 李纯, 等. 铜电解短路的阴极电流变化与结瘤形貌[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(1): 262 - 270.
- MENG Yi, LIU Huan, LI Chun, et al. Cathodic current change of copper electrolysis short circuit [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32 (1): 262 - 270.

## Formation mechanism and countermeasures of nodules at furnace bottom of 15 kA rare earth molten salt electrolysis cell

WU Yongfu<sup>1</sup>, MA Shouying<sup>1</sup>, WANG Zhenfeng<sup>1</sup>, BIAN Xue<sup>2</sup>, LIU Zhongxing<sup>1</sup>, LIU Yunlong<sup>3</sup>

(1. School of Energy and Environment, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

3. Sichuan Jiangtong Rare Earth Co. Ltd., Mianning 615601, China)

**Abstract:** In the production process of rare earth metal praseodymium neodymium, it is easy to form nodules at the bottom of the molten salt electrolytic cell, which not only affects the continuity of production, but also affects the product quality. At present, most of the related literatures focus on the composition of nodules and the influence of electrolytic parameters on nodules. Few literatures have studied the mechanism of nodule formation. In this paper, the morphology and crystal composition of the furnace bottom nodule are analyzed. It is found that the composition of the nodule is neodymium oxide, praseodymium oxide, neodymium oxyfluoride and a small amount of neodymium fluoride and metal neodymium. The numerical simulation method was used to analyze the electrolytic flow field, and the reason for the formation of nodules at the bottom of the furnace was obtained. The main reason for the formation of nodules is that the feeding speed is too fast, and the melting point of neodymium oxyfluoride is higher than that of molten salt, and it is easy to deposit on the steps of graphite crucible to form nodules. Rare earth metals will take away a lot of heat when they leave the furnace, resulting in a large change in the temperature of the furnace bottom, and neodymium oxide is easy to precipitate in the lower temperature area and deposit on the steps of graphite

crucible. The fluidity of the molten salt at the bottom of the electrolytic cell is poor, so that the products precipitated on the steps of the graphite crucible cannot be deposited with the flow of the molten salt. By controlling the feeding speed and maintaining a reasonable electrolysis temperature, excess materials or precipitated materials can be avoided to deposit on the crucible step. The growth rate of nodules can be controlled by cleaning the bottom of the furnace and the accumulated materials on the step in time.

**Key words:** rare earth molten salt electrolysis; praseodymium neodymium; nodules; formation mechanism; numerical simulation; feed speed; electrolysis temperature; neodymium oxide precipitation

## 展现有色行业的韧性和活力 上半年有色工业运行总体呈现环比向好势头

7月28日,中国有色金属工业协会召开2023年上半年有色金属工业经济运行情况新闻发布会。有色协会党委书记、副会长兼新闻发言人陈学森通报上半年有色金属工业经济运行情况,并回答媒体记者和企业代表的提问。

陈学森表示,上半年,面对复杂严峻的国际环境和经济复苏乏力的世界经济,有色金属行业、有色金属企业在以习近平同志为核心的党中央坚强领导下,认真贯彻落实党中央、国务院决策部署,坚持稳中求进工作总基调,围绕行业高质量发展这一首要任务,积极化解出口下降、传统消费放缓、成本上升、价格下跌等因素对产业运行的影响,环比呈现恢复性向好态势,展现出有色金属行业的韧性和活力。

6月份,规模以上有色金属企业工业增加值同比增长6.8%,环比提高2个百分点。1~6月份,规模以上有色金属企业工业累计增加值同比增长5.6%,增幅较上年同期提高0.6个百分点,较全国规模以上企业工业增加值增幅高出1.8个百分点。其中,对行业增加值贡献最大的是有色冶炼与压延加工,6月份增加值增幅达到了9.1%,环比提高2个百分点,上半年累计增加值增幅达到7.4%,高于全国规上制造业3.2个百分点。从总体来看,上半年有色金属工业运行总体呈现出环比向好的势头,规模以上有色金属工业企业增加值符合预期,与疫情前4年即2016-2019年平均值基本相当。

根据现阶段国内外宏观经济环境,结合有色协会发布的各项指数报告,陈学森对下半年有色金属工业主要指标进行了预判。他表示,从总体来看,在不出现“黑天鹅”事件的前提下,下半年有色金属工业生产、投资将保持增长势头,主要有色金属价格、规模以上有色金属企业效益同比持平,基本能够达到疫情前有色金属行业平均水平。具体表现在以下5个方面:一是全年有色金属工业增加值增幅有望保持在5.5%左右;全年按新口径统计的十种常用有色金属产量增幅在6%左右;二是全年有色金属行业固定资产投资增幅有望保持在10%左右;三是下半年铜铝等矿山原料进口有望继续保持增长,未锻轧铝及铝材出口降幅有望放缓;四是预计下半年主要有色金属价格仍以震荡为主基调,部分金属品种或略有回升,从总体来看,主要有色金属价格全年跌幅将较上半年收窄;五是预计下半年规模以上有色金属企业实现利润降幅将逐步收窄,全年规模以上有色金属企业实现利润降幅约在20%左右。

(资料来源:中国有色金属报)