

# 自动喷水系统对锡精炼结晶化性能评价

王瑞山, 韦加柱, 陈麒阳

红河绿地环保科技发展有限公司, 云南 蒙自

收稿日期: 2022年7月26日; 录用日期: 2022年8月26日; 发布日期: 2022年9月2日

---

## 摘要

通过试验研究和数据分析表明, 结晶机自动喷水能使槽内温度梯度分布更合理, 槽内结晶状态更稳定。结晶机自动喷水系统能改善粗锡产品质量, 提高产品质量和产量的稳定性。本实验通过对喷水点与喷水量控制统计, 为电热结晶机自动化喷淋结晶控制提供了理论依据。

## 关键词

锡精炼, 结晶化, 自动喷水, 性能评价

---

# Performance Evaluation of Tin Refining Crystallization by Automatic Water Spraying System

Ruishan Wang, Jiazhu Wei, Qiyang Chen

Honghe Green Ground Environmental Protection Science & Technology Development Co., Ltd., Mengzi Yunnan

Received: Jul. 26<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 26<sup>th</sup>, 2022; published: Sep. 2<sup>nd</sup>, 2022

---

## Abstract

Automatic water spraying system was used for tin refining crystallization. The results show that automatic water spraying can make the temperature gradient distribution in the crystallizer more reasonable and the crystallization state more stable. Crystallizer automatic water spraying system can improve the quality of crude tin products, and improve product quality and yield stability. This experiment provides a theoretical basis for automatic spraying crystallization control of electrothermal crystallizer through controlling statistics of spraying point and spraying quantity.

## Keywords

### Tin Refining, Crystallization, Automatic Water Spraying, Performance Evaluation

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

锡的结晶分离法是将含铅、铋的锡熔液降温冷却，产生晶体和液体，在融析分离作用下降低铅、铋在晶体中的含量，实现锡的提纯[1] [2]。连续结晶机作为锡精炼过程三大工序中的重要技术和设备，自1975年投入应用以来，连续结晶机虽然经过40余年的应用，但其装备水平基本上停留在发明初期的水平，虽经过一些改进但依旧停留在初期人工经验操作的水平上，操作工在结晶槽面手持喷水喷头对结晶槽某个局部进行降温实现锡液的冷却结晶，从而实现将锡与铅、铋等杂质的分离[3] [4]。

前期研究发现，通过调整粗锡进料量、喷水量等参数，能有效改善锡精炼过程的结晶状态和结晶机槽面温度等参数，这为电热连续结晶机的自动化提供了参考，但人工机械喷水难以实现喷水过程喷水方式、方向及喷水量的精准操作和安全控制[5] [6]。开发结晶机自动喷水系统，将实现“传统的人工槽面喷水不可控作业模式”向“远程自动喷水可控模式”转变，有效改进结晶机人工喷水工艺现状。

本文主要围绕锡冶炼结晶机自动喷水系统对锡精炼的结晶性能进行评价分析，为电热结晶机由人工作业改进为模拟人工自动控制提供基础理论数据，以及后续自动控制的工艺参数的设定奠定基础。

## 2. 电热结晶机的运行原理

### 电热结晶机结构与运行原理

电热连续结晶机的结构见图1所示，主要由电炉体、螺旋器、传动机和电气控制4部分组成。电热结晶机是在具有一定坡度、带有螺旋叶片的电热U型槽内进行除铅、铋。物料(锡液)入槽后开始降温，使其产生晶体和液体，依靠螺旋转动，螺旋上的叶片将锡的晶体和液体混合物上提，使晶体进入熔析段，在每一段温度梯度下产生新的晶体和液体，使晶体逐步提纯。当晶体上提到槽头，物料温度接近232℃时，达到精锡的标准。

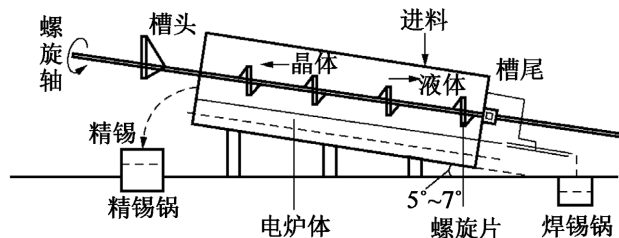


Figure 1. Schematic diagram of electrothermal crystallizer structure  
图1. 电热结晶机结构示意图

依据 Pb-Sn 二元合金相图如图2所示，在理想情况下，晶体含铅量以及液体含铅量与平衡温度有如下对应关系：

$$X = (232 - t) / 127.8$$

$$Y = (232 - t) / 1873$$

式中,  $X$  为液体含 Pb 量, %;

$Y$  为晶体含 Pb 量;

$t$  为平衡温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

由上述两式可以看出, 在同一温度下, 液体含铅量是晶体含铅量的 14.6 倍, 晶体含铅量比液体含铅量小得多[7] [8]。

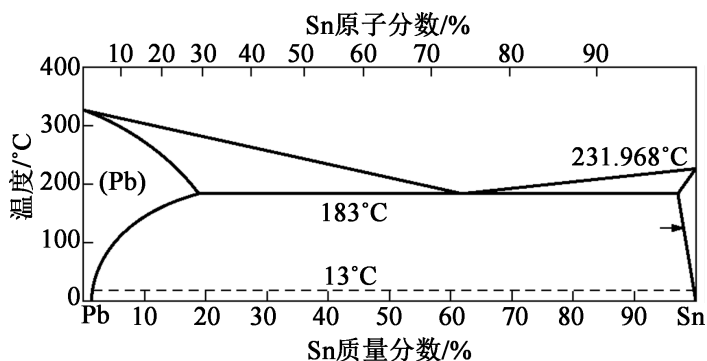


Figure 2. Binary phase diagram of Pb-Sn  
图 2. Pb-Sn 体系二元相图

由于温度与成分存在严格对应的关系, 并且温度的控制比成分的控制更易于实现, 因此在实际中总是通过对温度的调控来达到对成分的控制。在其他条件相同时, 当槽头温度等于或略高于  $232^{\circ}\text{C}$  时, 得到精炼锡的质量最好; 当槽头温度降低时, 精炼铅的质量明显变差。

### 3. 试验

#### 3.1. 试验研究内容

根据上述对电热结晶机运行原理和关键控制指标的分析, 电热结晶机的 U 型槽的长度; 电热结晶机的安装倾角; 电热结晶机螺旋器转速; 三项正要控制条件, 在设计和安装时已经确定, 故不开展实验调查。

此次实验研究重点, 主要针对结晶机人工控制过程, 操作人员根据对 U 型槽内锡晶体和锡熔液混合情况的观察, 对 U 型槽内某一点位因温度过高, 致使物料不能冷却形成锡结晶与锡液进行分离除杂质。为了实现过程控制, 操作人员根据观察对 U 型槽内温度较高的区域, 造成锡晶体和锡熔液分离不好的区域进行喷水降温, 实现物料中锡结晶和锡熔液在螺旋器搅拌下的充分混合和结晶分离, 最终达到融析除杂质的目的。

实验的目的是通过对结晶机温度区域与喷水量之间关系的研究, 摸索出电热结晶机人工喷水操作规律, 最终实现电热结晶机喷水自动控制的人工智能模拟操作。

实验课题组根据电热结晶机操作人员的操作经验和现场调查将电热结晶机的加热 U 型槽按长度 6.1 米, 从槽尾向槽头移动 0.6 米为基准, 按 1 米的距离依次将结晶机划分为 1~5 段不同的温度控制区域进行实验研究, 对 1~5 段温区的控制温度; 喷水量; 喷水时间; 技术参数进行统计调查研究。以确定各个温度控制区域人工模拟控制参数。实验主要内容详见表 1。

**Table 1.** Experiment contents**表 1.** 实验内容

序号	名称	收集形式
1	结晶机人工喷水位置确定	对电热结晶机喷水区域进行合理划定
2	结晶机人工喷水 1 次/90min	记录操作工人喷水次数
3	结晶机人工喷水后温度	记录操作工人喷水后的温度
4	结晶机人工喷水水量	记录流量计每次的用水量

### 3.2. 试验设备

为获取准确的实验数据实验组购置了计时器、高精度的测温仪和电磁流量计对实验过程的数据进行准确计时、计量详见表 2。

**Table 2.** Test equipment lists**表 2.** 设备清单

序号	设备名称	型号	台/套	用途
1	计时器(秒表)	HS-80TW-1DF	4 台	对喷水作业过程进行计时
2	高精度工业测温仪	海康 H10	2 台	对喷水作业过程进行测温
3	高精度电磁流量计	DN-15	1 台	对喷水作业过程喷水量进行计量

### 3.3. 计算方法

结晶机喷水量的理论值计算公式如下：

$$c = \frac{Q}{m(t-t_0)}$$

$C$ ——表示比热容；

$Q$ ——吸收或释放的热量，J；

$m$ ——表示物体的质量，kg；

$t_0$ ——表示物体的初温， $^{\circ}\text{C}$ ；

$t$ ——表示物体的末温， $^{\circ}\text{C}$ 。

## 4. 结果与讨论

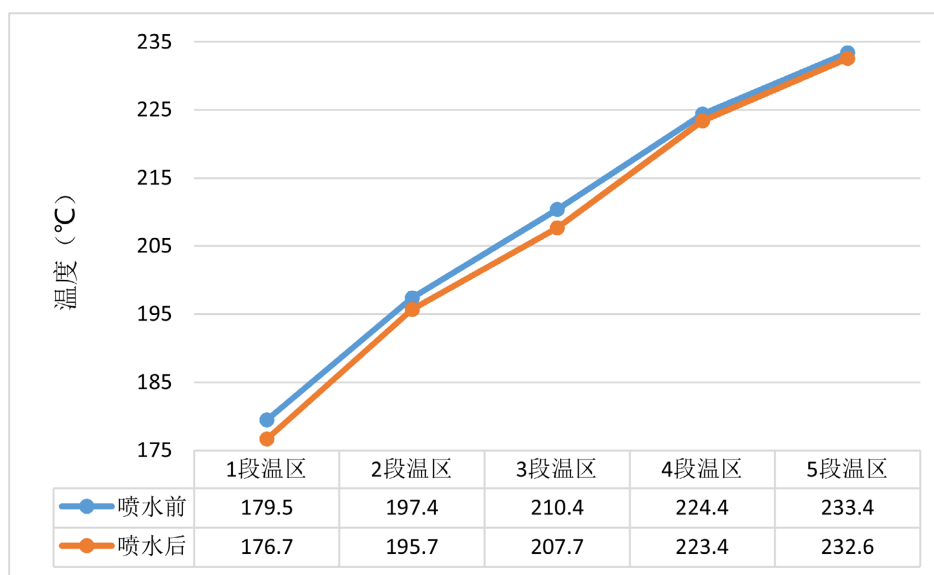
### 4.1. 结晶机温度的变化情况

按照实验方案对电热结晶机按照 1~5 段温区的划分，开展了 5 周的温度测量，详见表 3 (电热结晶机 1~5 段温度统计表)。

从表 3 可以看出，通过对电热结晶机的 U 型槽内 1~5 段温区温度为期五周的监测，温区喷水前后的温度平均值为：1 段温区由  $193^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  降至  $182^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；2 段温区由  $208^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  降至  $196^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；3 段温区  $214^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  降至  $208^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；4 段温区  $222^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  降至  $220^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；5 段温区  $237^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  降至  $235^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。喷水的重要区段为 1~3 段，喷水降温的幅度为  $10^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ；4~5 段，喷水降温的幅度为  $5^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。电热结晶机 1~5 段喷水前后槽内平均温度变化趋势图见图 3。采用自动喷水后，槽内温度有所降低。

**Table 3.** Temperature statistics of each section of electrothermal crystallizer 1~5 (°C)**表 3.** 电热结晶机 1~5 段温度统计表(°C)

序号	时间周期	喷水前后温度	1 段温区平均值	2 段温区平均值	3 段温区平均值	4 段温区平均值	5 段温区平均值
1	第一周	喷水前	185.1	202.4	210.4	219.3	233.4
		喷水后	181.5	193.5	205.5	218.8	231.9
2	第二周	喷水前	183.4	198.2	213.4	221.4	240.3
		喷水后	183.9	195.8	209.8	220.4	239.7
3	第三周	喷水前	176.4	200.4	214.2	226.4	236.4
		喷水后	173	197.4	208.4	225.2	235.5
4	第四周	喷水前	187.5	199.3	214.9	216.3	239.1
		喷水后	182.4	197	210.6	215.7	238.7
5	第五周	喷水前	179.5	197.4	210.4	224.4	233.4
		喷水后	176.7	195.7	207.7	223.4	232.6
	平均值	喷水前	<b>182.38</b>	<b>199.5</b>	<b>212.7</b>	<b>221.6</b>	<b>236.5</b>
		喷水后	<b>179.5</b>	<b>195.9</b>	<b>208.4</b>	<b>220.7</b>	<b>235.7</b>

**Figure 3.** Trend of temperature variation before and after spraying water of electrothermal crystallizer 1~5**图 3.** 电热结晶机 1~5 段喷水前后温度变化情况

#### 4.2. 结晶机喷水量的变化情况

查阅资料得知各物料的比容热:

铅: 130 J/(kg·°C); 锡: 235 J/(kg·°C);

水: 4200 J/(kg·°C); 汽化热: 2258 J/kg;

设定: 水的温度为 20°C 水蒸汽温度为 120°C;

物料成份: 锡含量: 95%; 铅含量 0.5%;

结晶机型槽内锡的总质量为 30,000 kg, 平均分为 5 段每段的质量分别为 600 kg 进行计算。可以得出电热结晶机各段的喷水量见表 4。

**Table 4.** Statistical results of water spraying of electrothermal crystallizer 1~5

**表 4.** 电热结晶机 1~5 段喷水量统计表

类别	1 段温区	2 段温区	3 段温区	4 段温区	5 段温区	备注
喷水前温度(°C)	182.38	199.5	212.7	221.6	236.5	
喷水后温度(°C)	179.5	195.9	208.4	220.7	235.7	
24 小时理论耗水量(kg)	1106.46	1406.16	1636.74	330.3	322.74	合计: 4802.4 kg
24 小时实际平均用水量(kg)	2809 kg (人工实验过程采 1 台流量计进行计量, 24 小时用水量的期间值为 2707.4~3009 kg 之间)					

根据在现实验记录及分析。结晶机平均产量为 28 t/d; 用水量为 2.8~3.0 t/d; 螺旋控制的转速在 0.6 r/min 至 0.8 r/min; 进料流量为 1.2~1.3 t/h。二段进料口表观温度在 195°C~190°C 波动, 原料成分的波动, 螺旋器的转速及进料流量会发生改变, 表观温度是重要控制条件, 由于人工操作原因每个操作工人观察和喷水时间和喷水量的控制不一样人工喷水时间未进行有效整理。

### 4.3. 结晶机自动喷水效果

以生产粗锡 10 吨/班生产线开展远程自动喷水试验, 对比其与模拟人工半自动喷水, 分析其自动喷水对铅、铋含量的影响, 其效果见表 5。

**Table 5.** The effect of the operation of automatic water spraying on crystallizer

**表 5.** 自动喷水对结晶机运行的效果

喷水模式	铅合格率(%)	铋合格率(%)
模拟人工喷水	98.50	88.60
自动喷水	99.68	98.50

对比分析认为, 自动喷水有利于铅、铋杂质的有效去除, 提升粗锡产品的纯度。自动喷水生产的产品中, 铅含量为 0.0068%、铋含量 0.0138%, 均低于《锡锭》(GB/T 728-2010)的标准。其中铅合格率达 99.68%, 铋合格率 98.50%。产品质量和产量稳定均能得到有效保障。

## 5. 结论

通过试验研究和数据分析表明, 结晶机自动喷水能使槽内温度梯度分布更合理, 槽内结晶状态更稳定。结晶机自动喷水系统能改善粗锡产品质量, 提高产品质量和产量的稳定性。本实验通过对喷水点与喷水量控制统计, 为电热结晶机自动化喷淋结晶控制提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] 闫宇飞, 罗海燕, 张海洲, 等. 电热结晶机在粗锡精炼中物理化学原理及操作控制[J]. 冶金自动化, 2013(S1): 163-165.
- [2] 金晓明, 曾祥镇. RGA 理论及其在连续结晶分离过程关联分析中的应用[J]. 昆明工学院学报, 1992(5): 70-78.
- [3] 申子星. 电热连续结晶机的动态数字模型建模与仿真[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2007.
- [4] 魏兵. 锡精炼结晶机温控系统开发与研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2005.

- [5] 谢云华, 陈麒阳, 李周华, 等. 锡精炼电热连续结晶机喷水自动化探索与实践[J]. 云南冶金, 2020, 49(3): 141-144.
- [6] 李周华, 谢云华, 陈麒阳, 等. 锡精炼电热连续结晶机自动喷水系统开发与应用[J]. 有色设备, 2020, 34(4): 62-67.
- [7] 张晓萍. 电热连续结晶机的智能控制[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [8] 张晓慧. 电热螺旋结晶机的设计和改进[J]. 工程设计与研究, 1997(4): 13-15.