

均一粒径下 Oslo 冷却结晶器的流场分布特征 研究及结构优化

黄金豪, 卢杰, 欧阳灿

(长沙有色冶金设计研究院有限公司, 湖南长沙 410019)

[摘要] Oslo 结晶器作为连续工业结晶过程中常用的一种典型结晶器,其结晶效果直接影响最终结晶产品质量。本文使用 CFD 流体模拟软件,计算了均一粒径下进料降液管最低点距结晶器底部不同高度条件(500 mm、700 mm、900 mm、1 100 mm、1 300 mm、1 500 mm)下结晶器中固相的分布情况,获得降液管内插深度对 Oslo 结晶器内部流场的影响规律,确定最优的降液管结构设计尺寸,并进行优化。结果表明,在进料降液管最低点距结晶器底部 900 mm 时,Oslo 冷却结晶器可以正常运行,且有利于高浓度物料的出料。基于此模拟结果,对进料降液管结构进行优化,在进料降液管的底部增加一段变径管。该结构能够有效改善结晶器内部流场分布,提高出料晶体的浓度,并为 Oslo 冷却结晶器的结构设计提供参考。

[关键词] Oslo 结晶器; 均一粒径; 流场分布; 进料管; 流体模拟

[中图分类号] TQ051.63 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)03-0052-06

DOI:10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.03.009

0 引言

连续工业结晶过程在化工、湿法冶金生产中处于重要地位,特别在目前新兴的新能源行业,对锂、钠、钒盐产品的需求量和质量要求相当高。结晶器作为锂、钠、钒盐等生产过程中的关键设备,其结晶效果直接影响最终产品的优劣。

Oslo 结晶器是工业中常用的一种典型结晶器^[1],适用于不易结垢物系的中小规模结晶。在 Oslo 结晶器中,颗粒具有流动非线性、分布不均匀性和流域多态性的特点,不同粒径的晶体颗粒在

一定的流场下会呈现出不同的流动特征,其差异直接或间接地影响结晶过程,从而影响晶体的最终性质。

由于结晶过程的影响因素众多,传统的实验研究存在周期长、设备造价昂贵、检测手段受限等问题。运用计算机手段对结晶过程行模拟,充分理解流体在结晶器内的流体力学性质与固体颗粒分布情况,有利于结晶过程的设计、控制和优化^[2]。计算流体动力学(CFD)模拟解决了实验过程常常受到物理模型和环境限制的问题,为 Oslo 结晶器的内部流场研究提供了一种省时、经济和数据详细完整的有效研究方法^[3]。因此,利用模拟手段研究结晶器的宏观特性,探索结晶过程规律,对结晶器与结晶过程的优化设计、工程放大与过程强化具有重要意义。

李娜等^[4]优化了多尺度耦合模型,采用 ANSYS14.5 模拟了 KCl 在 Oslo 结晶器内连续冷却结晶过程的流体流动状态,发现在结晶器结构不变的情况下,循环流速对流场分布影响较大,进而影响晶体生长过程及晶体在结晶器内的整体分布。傅笑言^[5]模拟了扑热息痛连续结晶搅拌釜内的流场,考察了不同搅拌桨转速、不同颗粒直径的速度场和浓度场,给出了强化混合效果的操作条件,粒

[收稿日期] 2024-10-11

[作者简介] 黄金豪(1993—),男,硕士,工程师,主要从事冶炼烟气制酸、湿法冶炼氧压浸出、钠钾锂盐提纯等领域非标设备的设计与研发。

[引用格式] 黄金豪,卢杰,欧阳灿.均一粒径下 Oslo 冷却结晶器的流场分布特征研究及结构优化[J].绿色矿冶,2025,41(5):52-57.

HUANG Jinhao, LU Jie, OUYANG Can. Study on flow field distribution characteristics and structural optimization of Oslo cooling crystallizer under uniform particle size condition[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 52-57.

径小于 $10\ \mu\text{m}$ 的固体颗粒在流场中能完全追随溶液的流动, 粒径 $19\sim 100\ \mu\text{m}$ 的粒子在 $200\ \text{r/min}$ 以上的转速下能够有较好的分布, 粒径大于 $100\ \mu\text{m}$ 的粒子即使转速高于 $300\ \text{r/min}$, 也会出现明显的分级现象。Al-Rashed 等^[6] 运用欧拉-欧拉模型与标准 $K-\epsilon$ 模型, 通过计算流体力学手段研究了不同粒径的氯化钠晶体颗粒在不同大小的 Oslo 结晶器中的空间浓度分布差异, 发现将实验室规模的结晶器直接放大至工业规模存在极大风险。覃滢兰等^[7] 建立了 CFD-PBM 耦合模型, 模拟搅拌结晶器中的间歇冷却结晶过程, 并与实验结果进行对比, 结果表明适当加入晶种可以避免新晶体成核造成的高过饱和度, 从而获得平均粒径大、颗粒数多的粒度分布。

本文采用计算流体力学技术, 模拟了 Oslo 冷却结晶器内均一粒径颗粒的流体动力学状态, 通过改变降液管内插深度, 获得最优的降液管结构尺寸, 并在此基础上研究出一种新的降液管结构, 有效改善了结晶器内部流场分布情况。

1 模型建立

1.1 几何模型

Oslo 冷却结晶器的几何模型如图 1 所示。结晶器底部为球形封头设计, 能改善料液流动状态, 不会形成死区; 结晶室上部不断扩大的断面, 能降低循环流速, 利于晶粒分级沉降, 使晶粒不参与循环, 大幅减少循环泵对晶体颗粒的破坏; 料液从降液管上部进料, 从结晶器下部出料, 大大减少短路温差损失的可能, 促进微粒溶解, 降低细晶数量。

各部分结构的基本几何参数为: 直径 $4\ 800\ \text{mm}$, 直段高度 $4\ 000\ \text{mm}$, 锥段高度 $3\ 700\ \text{mm}$, 循环进料口直径 $600\ \text{mm}$, 循环排料口直径 $600\ \text{mm}$, 出料口直径 $100\ \text{mm}$ 。

1.2 网格划分及独立性检验

根据 Oslo 冷却结晶器几何尺寸, 建立流体域模型并进行网格划分。合理生成计算所需要的网格是保证求解精度的前提。本文采用非结构正四面体网格进行划分, 由于降液管、循环排料管和出料管附近的流场较为复杂, 局部差异性大, 流体流动较强烈, 故采用较为密集的四面体网格, 结晶器内其他区域采用较为稀疏的四面体网格。

进行网格独立性检验时, 通常选取计算资源能

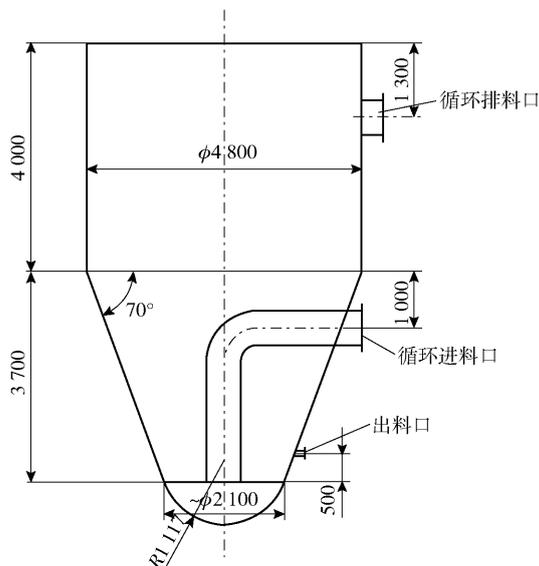


图 1 Oslo 冷却结晶器几何模型

够接受、精度中等的网格作为基准网格, 本文选用的基准网格数量为 55 万。在基准网格基础上进行细化和粗化时, 网格数量增加或者减少的标准是通常不小于 20%, 本文以成倍的网格数量来进行细化和粗化。

选取循环排料口 outlet1 和出料口 outlet2 两个截面固相浓度的平均值作为独立性检验的监测数据, 分别对比相同计算模型、求解设置和操作条件下不同网格数量的监测数据, 具体检测数值与相对误差见表 1。从表 1 中可以看出, 108 万网格与 244 万网格的检验结果误差均控制在 5% 以内, 因此, 本文选择 108 万的网格作为后续计算的标准网格, 最终的网格模型如图 2 所示。

表 1 网格独立性检验结果

网格数量/ 万	Outlet1 固 相浓度/%	相对误差/ %	Outlet2 固 相浓度/%	相对误 差/%
18	5.2	—	5.7	—
55	4.5	13.46	6.2	8.77
108	4.2	6.67	5.9	4.84
244	4	4.76	5.7	3.39

1.3 参数设置

1.3.1 物性参数

本文研究的物料为偏钒酸铵晶浆, 液相为溶液, 密度为 $1\ 050\ \text{kg/m}^3$, 黏度为 $0.001\ \text{Pa}\cdot\text{s}$, 固相为偏钒酸铵晶体, 其密度为 $2\ 300\ \text{kg/m}^3$, 开启欧拉-欧拉模型的颗粒属性后不考虑固相黏度。

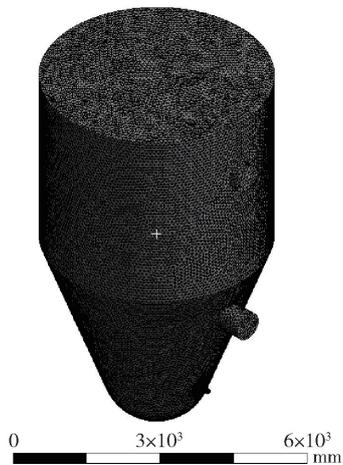


图2 Oslo 冷却结晶器网格模型

1.3.2 操作参数

本文所研究的 Oslo 结晶器采样目标为粒径 100 μm 的偏钒酸铵晶体,因此模拟时使用均一粒径模型,进料口物料中的晶体颗粒直径为 100 μm,体积分数为 4.6%,流速为 1 m/s。

1.3.3 边界条件

采用欧拉-欧拉模型以及标准 $K-\epsilon$ 湍流模型进行流场模拟,主相为溶液,次相为颗粒。考虑重力和颗粒主黏度,忽略颗粒摩擦黏度。相间作用力考虑曳力,颗粒间碰撞恢复系数设置为 0.9。结晶器的壁面定义为 wall,自由液面表面定义为 symmetry,进料口定义为速度进口,循环排料口和出料

口定义为压力出口,不考虑回流。

2 进料管内插深度模拟分析

在 Oslo 冷却结晶器中,冷却后的物料形成过饱和溶液,通过降液管进入结晶室,过饱和溶液与降液管底部的晶体接触,促进晶体不断成长,料液经结晶器底部往上流动,搅动底部的晶体,同时往上流动,随着产生往上走的力与晶体重力、流体阻力等不同作用力之间的相互作用,实现晶体分级、分离,从而使晶体颗粒悬浮于液流形成粒度分级的流化床,实现晶体有效控制和粒度分级,生产的晶体质量好、均匀。

本文对降液管的内插深度进行了模拟研究,分别对降液管最低点距结晶器底部 500 mm、700 mm、900 mm、1 100 mm、1 300 mm、1 500 mm 的流体模型进行计算,得到不同结构尺寸下固相的分布情况。结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,当降液管底部距离结晶器底部 700 mm 或者更近时,偏钒酸铵晶体已经达到了完全悬浮的状态,结晶器所有区域的固相浓度接近均一,连续操作过程中结晶器底部流体可以连续更新,大部分晶体会从循环排料口参与整体循环。在该降液管结构尺寸下,Oslo 冷却结晶器可以正常运行,但不利于实现高浓度物料的出料,生产效率不高。

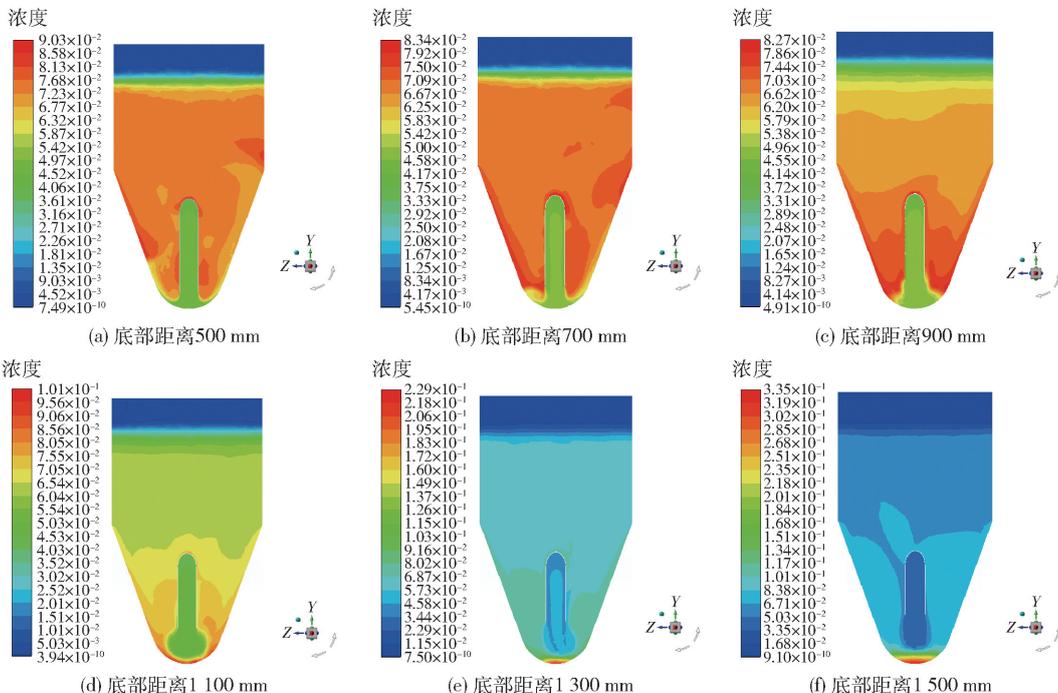


图3 不同进料管内插深度固相分布情况

当降液管底部距离结晶器底部 900 mm 时,偏钒酸铵晶体处于悬浮的状态,结晶器内物料形成分层,下部固相浓度高,上部固相浓度低,底部无晶体沉降,连续操作过程中结晶器底部流体可以连续更新,少部分晶体从循环排料口参与整体循环。在该降液管结构尺寸下,Oslo 冷却结晶器可以正常运行,且有利于实现高浓度物料的出料,有利于减小结垢堵塞的概率,提高生产效率。当降液管距离结晶器底部 1 100 mm 时,虽然也能够形成分层,但在结晶器底部开始形成了少量的晶体沉降,连续操作过程中结晶器底部流体无法连续更新,结垢堵塞的概率增大,一定程度上会对 Oslo 冷却结晶器的正常运行造成影响。

当降液管底部距离结晶器底部 1 300 mm 或者更远时,结晶器底部形成了一定量的晶体沉降,连续操作过程中结晶器底部流体无法连续更新,且沉降的体积随着距离的变大而增大,溶液中的固相浓度降低,少部分晶体从循环排料口参与整体循环。在该降液管结构尺寸下,结垢堵塞的概率大幅提高,Oslo 冷却结晶器难以正常运行,严重影响生产效率。

综上所述,Oslo 冷却结晶器降液管内伸长度对流场分布情况的影响规律为:降液管越长,距离结晶器底部越近,物料对底部的冲刷效果越好,运行时结垢堵塞的概率越小,结晶器内晶体悬浮程度越高,参与循环的晶体越多,降液管越短,距离结晶器底部越远,物料对底部的冲刷效果越差,底部发生晶体沉降的区域越大,结晶器内悬浮程度越低,参与循环的晶体越少。

3 进料管结构改进

设计合理的降液管结构,要求在保证底部晶体悬浮的条件下,适当减弱晶体流化床中下部颗粒的流动强度,降低晶体破碎频率,为结晶器底部晶体提供适宜的生长环境。

根据降液管内插深度的模拟结果,降液管最低点距离结晶器底部距离为 900 mm 是本文所研究的 Oslo 冷却结晶器的最优结构尺寸。该尺寸下的流场速度分布云图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,物料在降液管底部流出后以一定的速度冲击设备底部,避免了晶体发生沉降,但同时该冲击力使得溶液中的部分晶体颗粒在高于出料口的位置发生悬浮。因此,若要提高出料口物料中的晶体浓度,减小降液管出口的物料流速和冲击范围是有效的解决办法。

因此,若要提高出料口物料中的晶体浓度,减小降液管出口的物料流速和冲击范围是有效的解决办法。

为此,本文进行大量的尝试,对降液管结构进行改进,最终获得了如图 5 所示的结构。

改进后的降液管结构在原始结构的基础上增加了一段变径管,小径端与降液管相连,直径为 600 mm,大径端为出料端,截面积约为进料端的 1.65 倍,变径段的长度为 480 mm。使用该结构后,降液管下部与设备底部的距离缩短,由原来的 900 mm 变为了 420 mm。这种结构的设置一方面能够更精确对底部区域进行冲击,避免沉降,另一方面降低出口物料流速,减小冲击力,防止晶体的过度悬浮。通过模拟分析,获得如图 6 所示的速度分布云图以及图 7 所示的固相分布情况。

为准确分析结构改进前后物料流出降液管后的速度大小,将距结晶器底部 0.1 m、0.2 m、0.3 m 三个水平截面的平均速度进行对比,计算数据见表 2。

表 2 改进前后不同水平截面物料的平均速度 m/s

结构	底部距离/m		
	0.1	0.2	0.3
原始结构	0.39	0.4	0.37
改进结构	0.36	0.36	0.34

从表 2 可知,物料流出降液管的速度因为截面积的变大而有所降低。此外,从图 6 可以看出,改进后的结构能够保证在对底部物料产生足够冲击的同时有效减少冲击影响的范围。

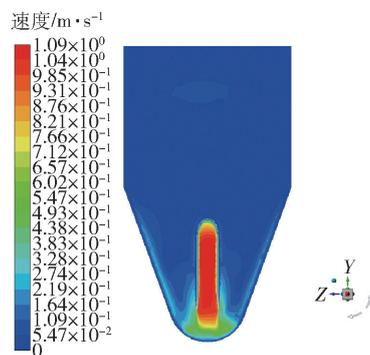


图 4 降液管距底部 900 mm 时的速度分布云图

由图 7 可以看出,使用改进后的降液管结构,固相浓度整体分布情况与改进前相似,偏钒酸铵晶体处于悬浮的状态,结晶器内物料形成分层,下部固相



图5 降液管改进结构示意图

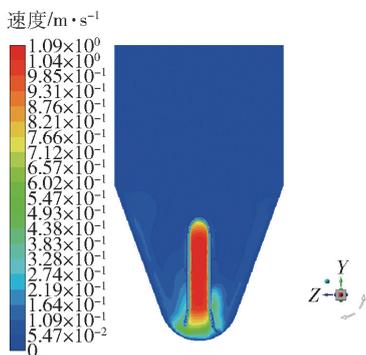


图6 降液管改进后的速度分布云图

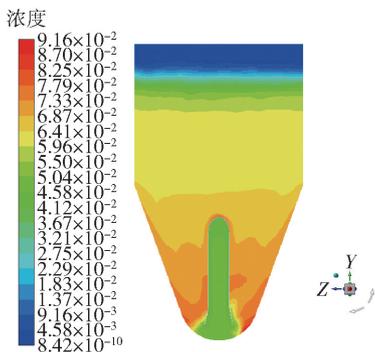


图7 进料降液管改进后的固相分布情况

浓度高,上部固相浓度低,底部无晶体沉降,少部分晶体从循环排料口参与整体循环。改进前,纵截面固相浓度的最大值为 8.27%;改进后,纵截面固相浓度的最大值为 9.16%,表明结晶器下层的晶体含量得到了提高,更有利于高浓度物料的出料。经过

计算,改进前物料出口截面的平均固相浓度为 7.4%,改进后物料出口截面的平均固相浓度为 7.8%,说明改进后的进料降液管结构能够有效提高出料晶体的含量。

4 结论

本文采用 CFD 流体模拟软件,对偏钒酸铵结晶过程中的 Oslo 冷却结晶器进行研究,计算了均一粒径下进料降液管最低点距结晶器底部 500 mm、700 mm、900 mm、1 100 mm、1 300 mm、1 500 mm 时 Oslo 结晶器内部流场状况,结果表明距离为 900 mm 时 Oslo 冷却结晶器可以正常运行,且有利于高浓度物料的出料。在此基础上,根据流场分布特征,通过大量模拟,研究出一种新的降液管结构,即在原结构基础上在降液管底部增加一段变径管,该结构能够有效改善结晶器内部流场分布情况,提高出料晶体的体积分数,同时为今后 Oslo 冷却结晶器的结构设计提供参考。

[参考文献]

- [1] 张友森,汪炎,孔韡,等. 结晶技术在高盐工业废水处理中的应用研究[J]. 工业用水与废水, 2024, 55(3): 1-6.
- [2] 蔡维玲. 奥斯陆结晶器多相流场研究[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
- [3] 袁爱武,黄金豪. 基于 CFD 流场模拟的大型卧式反应釜结构研究[J]. 有色设备, 2024, 38(3): 58-63.
- [4] 李娜,沙作良,杨兴红,等. Oslo 结晶器晶体粒径分布特征的 CFD 模拟[J]. 天津科技大学学报, 2015, 30(4): 45-49.
- [5] 傅笑言. 基于 CFD 耦合的扑热息痛结晶过程模拟与优化研究[D]. 天津:天津大学, 2018.
- [6] Al-Rashed M H, Wójcik J, Plewik R, et al. Multiphase CFD modeling: Fluid dynamics aspects in scale-up of a fluidized-bed crystallizer[J]. Chemical Engineering and Processing, 2013, 63: 7-15.
- [7] 覃渚兰,张磊,都健. 间歇冷却结晶过程的 CFD-PBM 数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(3): 231-240.

Study on Flow Field Distribution Characteristics and Structural Optimization of Oslo Cooling Crystallizer under Uniform Particle Size Condition

HUANG Jinhao, LU Jie, OUYANG Can

(CINF Engineering Co., Ltd., Changsha 410019, China)

Abstract: Oslo crystallizer is a typical crystallizer commonly used in continuous industrial crystallization process, and its crystallization effect directly affects the quality of the final crystallization product. In this paper, CFD fluid simulation software was used to calculate the distribution of solid phase in the crystallizer at different heights (500 mm, 700 mm, 900 mm, 1 100 mm, 1 300 mm, 1 500 mm) from the lowest point of the feed downcomer to the bottom of the crystallizer under uniform particle size. The influence of the insertion depth of the downcomer on the internal flow field of the Oslo crystallizer was obtained, and the optimal design size of the downcomer structure was determined and optimized. The results show that when the lowest point of the feed downcomer is 900 mm from the bottom of the crystallizer, the Oslo cooling crystallizer can operate normally and is conducive to the discharge of high-concentration materials. Based on the simulation results, a variable diameter tube is added at the bottom of the feed downcomer. This structure can effectively improve the distribution of the flow field inside the crystallizer, increase the concentration of the discharged crystal, and provide a reference for the structural design of the Oslo cooling crystallizer.

Key words: Oslo crystallizer; uniform particle size; flow field distribution; feed pipe; fluid simulation