

搅拌器安装高度对稀土萃取槽传输性能的影响

阮飞, 田震, 付晓晨, 包金小

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 包头 014010)

摘要:自行设计了具有单层倾斜式四叶片搅拌器的稀土分离萃取槽,采用 FLUENT 软件建立了稀土萃取槽三维几何模型,并利用多重参考系模型对 5 种方案(即搅拌器安装高度 H 分别为 $L/12 = 50\text{ mm}$ 、 $3L/12 = 150\text{ mm}$ 、 $5L/12 = 250\text{ mm}$ 、 $7L/12 = 350\text{ mm}$ 、 $9L/12 = 450\text{ mm}$)下萃取槽内流体流动轨迹、流速分布、低速区体积分数及混匀时间等进行了仿真研究。研究发现:搅拌器高度为 $5L/12$ 时,萃取槽内 Z 轴方向上流体流速分布合理,无明显低速区;搅拌器高度为 $7L/12$ 时,搅拌槽内低速区体积分数最低,仅为 0.936%;搅拌器高度为 $5L/12$ 时,萃取槽内各监测点混匀时间最短、在 19.3 s ~ 26.2 s 之间。研究结果表明:所设计的稀土萃取槽的搅拌器高度在 $5L/12 \sim 7L/12$ 范围内,综合性能良好,可供稀土萃取相关领域的研究和设计参考。

关键词:稀土萃取槽;搅拌器高度;数值模拟;速度分布;低速区体积分数;混匀时间

中图分类号:TF804.2

文献标志码:A

引言

稀土溶剂萃取技术是基于不同稀土元素在特定萃取溶液体系(由互不相溶的水相和有机相组成)中具有不同的分配比的基本原理,经“萃取-洗涤-反萃取”等处理环节,最终分离得到纯度较高的稀土元素的湿法冶金工艺。该工艺具有生产效率高、处理容量大、分离效果好、产品纯度高优点,目前已成为国内外提取分离稀土元素的主要工艺^[1]。

稀土萃取分离设备有多种结构,常见的基本类型包括混合澄清萃取器、塔式萃取器及离心式萃取器等。其中,混合澄清萃取器应用较为广泛,其单级反应单元主要由混合室和澄清室构成,多级反应器则含有多个混合室和澄清室^[2]。混合室内设有搅拌器,并以一定转速搅

动水相和有机相,使二者充分混合,促进萃取过程的有效进行,充分萃取后混合液进入澄清室,进行澄清和后续处理。

混合澄清萃取器属于旋转机械搅拌式反应器,其内部流场属于复杂的三维强湍流流动,混合室内的传输特性对于萃取过程有极其重要的影响。有研究人员针对此类稀土分离萃取槽内的传输过程进行了探索:逢启寿等^[3-8]采用 FLUENT 软件模拟研究了萃取槽结构、萃取槽容量、挡板类型、搅拌器结构、搅拌器空间分布、及澄清室结构等对稀土萃取槽流动混合状况的影响;罗璇^[9]等采用 FLUENT 软件研究了 250 L 具有平直叶片的混合槽的搅拌性能;赵秋月^[10]等采用 ANSYS 软件模拟了一种新型稀土混合萃取槽内的流场分布特点。

目前对于稀土萃取槽内流动混合状况方面的研究

收稿日期:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51464038);内蒙古科技大学创新基金(2015QDL25)

作者简介:阮飞(1985-),男,内蒙古商都人,讲师,硕士,主要从事冶金过程模型及仿真方面的研究,(E-mail)15201931764@163.com

侧重于对萃取槽内流动及混合状况的定性分析,对于萃取槽内流速分布、低速区体积分数等方面的工作却较为缺乏。本文在借鉴前人所做工作的基础上,自行设计了具有单层倾斜式四叶片搅拌器的新型稀土萃取槽,并借助 FLUENT 软件对所设计的稀土萃取槽混合室内的流体流动轨迹、流速分布、低速区体积分数及混匀时间等重要性能指标进行了仿真研究,以期对稀土萃取槽的研究和设计提供参考。

1 研究方法

1.1 萃取槽几何模型

简化后的萃取槽三维几何模型如图 1 所示。该萃取槽属于混合澄清萃取反应器,由于主要研究混合室内的传输特性,因此计算区域不包含澄清室部分。混合室尺寸为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm} \times 600\text{ mm}$,底部出口直径 Φ 为 70 mm 。混合室内部安装有新型单层倾斜式四叶片搅拌器,搅拌器叶片厚度 10 mm ,各叶片与 Z 轴方向呈 10° 角,四个叶片底部焊接成一体,起到加固的作用,搅拌叶片顶部设有圆形挡板。搅拌叶片有效高度为 95 mm ,有效外径 Φ 为 160 mm ,搅拌器以 150 r/min 转速沿顺时针方向搅拌、萃取槽内流体。

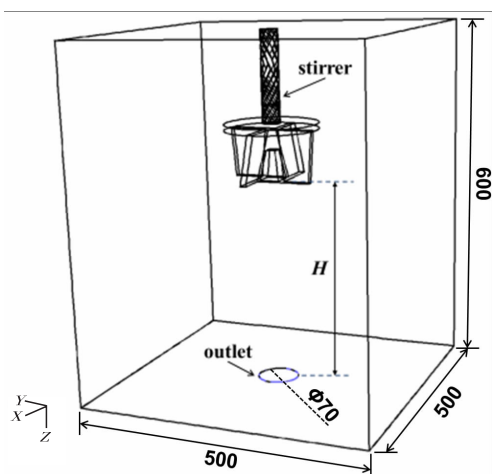


图 1 萃取槽几何模型示意图

1.2 主要控制方程

数值计算中涉及到的基本控制方程包括连续性方程、 $N-S$ 方程、 $K-\epsilon$ 双方程、质量传输控制方程等^[11-13]。

1.3 研究方案

主要研究搅拌器转速 ω 为 150 r/min 时,不同搅拌器高度即搅拌器叶片底部距混合室底部的距离 H (图 1)

对混合室内的传输特性的影响。具体研究方案见表 1。

表 1 研究方案

方案	H/mm
1#	$(L/12) = 50$
2#	$(3L/12) = 150$
3#	$(5L/12) = 250$
4#	$(7L/12) = 350$
5#	$(9L/12) = 450$

注: $L=600\text{ mm}$,为萃取槽总高度。

1.4 模拟方法及主要参数

利用 GAMBIT 软件建立萃取槽三维几何建模,并划分四面体混合网格。网格划分方案为 TGrid,网格类型为 Tet/Hybrid,搅拌槽主体部分网格尺寸为 13 mm ,搅拌器网格为 8 mm 。在此基础上,指定相应的边界条件及流体区域类型后生成 mesh 文件,然后导入 FLUENT 中,激活需要求解的基本控制方程,设置相应的初始及边界条件,其中搅拌器以转速 150 r/min 沿顺时针方向旋转,搅拌器和萃取槽相接触的界面设置为 Interface 边界条件。有机相为 P507,其密度 $\rho = 950\text{ kg/m}^3$,粘度 $\mu = 3.3 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。水相密度 $\rho = 998\text{ kg/m}^3$,粘度 $\mu = 1.0 \times 10^{-3}\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。流体在 Z 轴正向所受体积力 $g_z = 9.8\text{ m/s}^2$ 。采用多重参考系模型(MRF)模拟搅拌器转动,利用 SIMPLE 算法求解流场及压力场,收敛标准为各组控制方程的残差均小于 10^{-3} 。

2 仿真结果与讨论

2.1 萃取槽内流态分布特点

采用上述模拟方案,计算得到的萃取槽内典型流线图如图 2 所示,萃取槽内 $Z = -0.5$ 截面速度矢量图如图 3 所示(以 3#方案为例)。

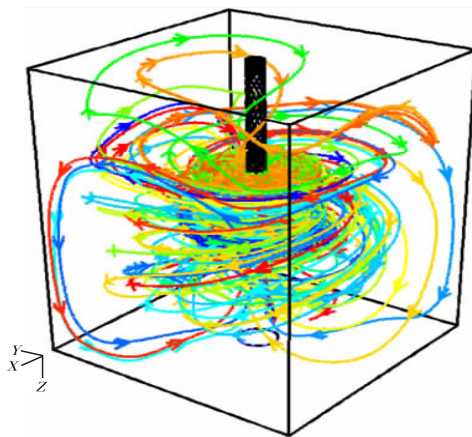


图 2 萃取槽内典型流线图

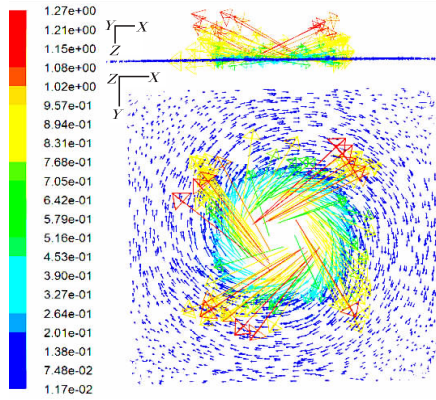


图 3 3#方案萃取槽内 $Z = -0.5$ 截面速度矢量图

从图 2 可知,在高速旋转的搅拌器的作用下,流体系统沿搅拌器转动方向做紊流流动,在 X 轴和 Y 轴方向上具有较大的分速度,此外,由于受倾斜搅拌叶片的作用,从图 3 可知,在 Z 轴方向上也具有一定的分速度,加之流动过程中受到萃取槽内壁面的限制,因此流体在按顺时针旋转的同时由内壁面附近区域流向顶部,当流体到达自由液面后,在萃取槽壁面、自由液面及搅拌器的综合作用即抽吸作用下,由靠近搅拌槽中心区域返回到萃取槽底部,完成循环过程。

2.2 萃取槽内流速分布特点

为比较不同搅拌器高度下萃取槽内沿 Z 轴方向上的流速分布规律,在 Z 轴方向上取一条线段,线段起点坐标 $(0.19, 0.19, -0.6)$,终点坐标 $(0.19, 0.19, 0)$,计算得到的该线段上流体流速分布如图 4 所示。萃取槽垂直于 Z 轴各截面速度云图如图 5 所示(以 2 #方案为例)。

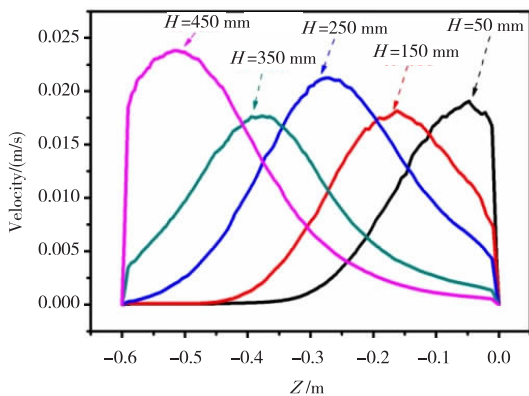


图 4 不同方案下萃取槽 Z 轴方向上流速分布曲线

从图 4 可知,萃取槽内沿 Z 轴方向上速度分布存在一定差异,在靠近搅拌叶片附近高度范围内的流体流速较高,而远离此区域的流体流速明显衰减,这一点也可从图 5 观察到;比较速度分布曲线可以发现,随着搅拌

器高度的变化,萃取槽内高速区在 Z 轴方向上的位置明显不同, $H = L/12 = 50$ mm 和 $H = 9L/12 = 450$ mm 时,萃取槽内高速区分别出现在靠近萃取槽底部和顶部的位置,并且存在非常明显的低速区; $H = 3L/12 = 150$ mm 时,也存在较为明显的低速区;而 $H = 5L/12 = 250$ mm 和 $H = 7L/12 = 350$ mm 时,高速区大致分布在靠近萃取槽中部的的位置,未发现明显的低速区,特别是 $H = 5L/12$ 时,萃取槽内不同高度上流体流动活跃,无明显低速区,由此说明搅拌器高度 H 为 $5L/12$ 时,萃取槽内 Z 轴方向上流速分布最为合理。

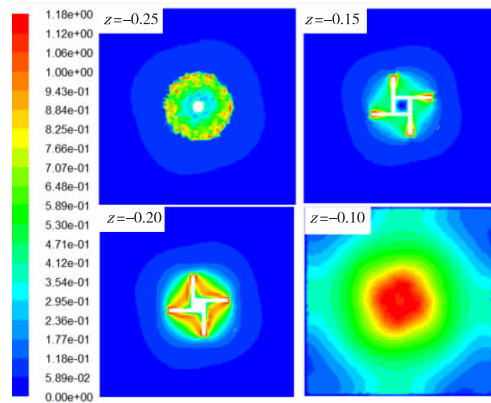


图 5 2 #方案萃取槽垂直于 Z 轴各截面速度云图

2.3 萃取槽内低速区体积分数

低速区(也称死区)体积分数是各类冶金反应器的重要性能指标。对于稀土萃取槽的低速区体积分数目前还没有成熟的数学模型来描述。一方面,鉴于一些类似的文献中取平均速度的 $1/10, 2/100, 5/100$ 等作为临界速度,用于衡量和估算低速区体积分数^[14-16],而另一方面,针对稀土萃取槽内的流速分布特点,综合考虑两方面的因素,本文采用萃取槽中流体流速低于流体区域内平均流速的千分之一的流体体积分数来衡量低速区体积分数 V_L ,即低速区体积的临界流速为 $v = v_{av}/1000$,并通过计算得到不同方案下萃取槽内的低速区体积分数,如图 6 所示。

从图 6 可知,各方案下萃取槽内低速区流体体积分数介于 $0.936\% \sim 7.732\%$ 。 $H = L/12 = 50$ mm 时,萃取槽内的低速区体积分数为 7.732% ,为各方案中最大的; $H = 3L/12 = 150$ mm 时的低速区体积分数次之,为 5.459% ; $H = 9L/12 = 450$ mm 时低速区体积约为 1.029% ,低于上述两种工况;而 $H = 5L/12 = 250$ mm 和 $H = 7L/12 = 350$ mm 时,低速区体积分数均较低,分别为

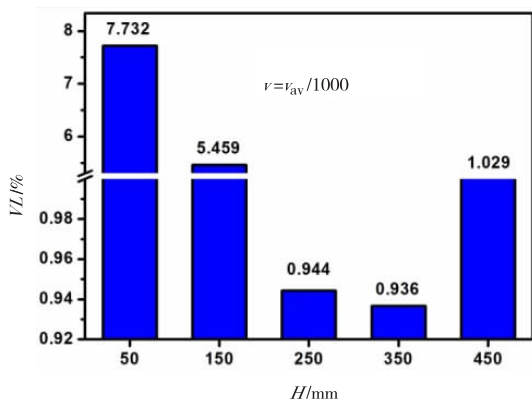
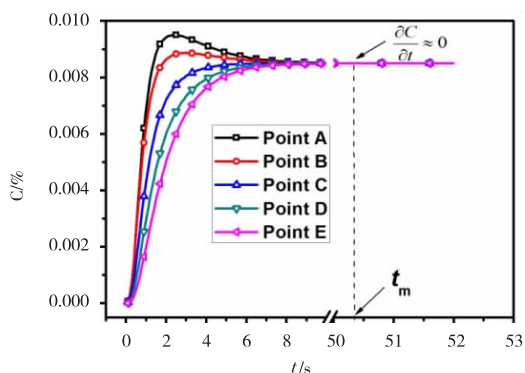


图6 各方案下萃取槽内低速区体积分数

0.944%和0.936%,这一结果与2.2小节中通过Z轴上流速分布曲线分析得到的结果非常吻合,可见搅拌器插入高度为 $7L/12$ 时,萃取槽内低速区体积分数最小,有利于萃取槽内流体的动量和质量传递。

2.4 萃取槽内流体混匀时间

在得到稳态流场的基础上,激活Species Transport模型,在萃取槽底部以坐标 $(0.15, 0, -0.02)$ 为中心,半径 $r=0.15$ m的球形区域内瞬间加入示踪剂。激活非稳态模型,模拟示踪剂在萃取槽内的非稳态扩散过程,并分别监测坐标为 $(-0.2, 0, z)$ 的个点即A点-E点处示踪剂浓度随时间的变化(A点-E点所对应的 z 值依次为 $-0.05, -0.5, -0.25, -0.35, -0.45$),得到典型的示踪剂浓度随时间变化曲线即 $C-t$ 曲线如图7所示(以1#方案为例)。

图7 1#方案各监测点处的 $C-t$ 曲线

从图7可知,同一方案中不同监测点处得到的 $C-t$ 曲线的基本形状类似,各点的起始示踪剂浓度均为0,之后迅速上升,最后逐渐趋于稳定;而进一步比较各曲线发现,各监测点浓度变化存在一定差异,这主要是由于各监测点与示踪剂加入点之间的相对位置不同造成的。将上述曲线上各点示踪剂浓度 C 对时间 t 进行数值微分

运算,找出浓度对时间的微分约等于0的点,其所对应的时间即为萃取槽内流体的混匀时间 t_m (图7)。通过计算得到各方案下不同监测点混匀时间如图8所示。

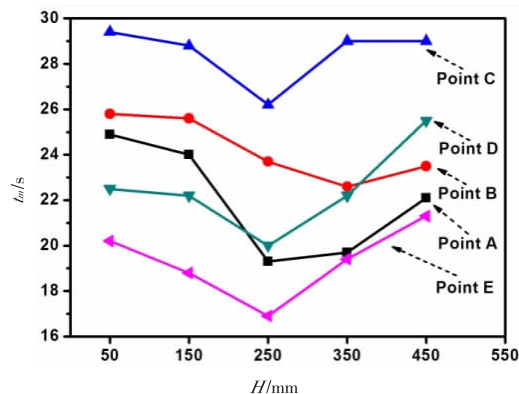


图8 各方案下不同监测点的混匀时间

从图8可知,同一方案下不同监测点的混匀时间有差异;各方案下监测点A处的混匀时间在 19.3 s~ 24.9 s之间,B点在 22.6 s~ 25.8 s之间,C点在 26.2 s~ 29.4 s之间,D点在 20.0 s~ 25.5 s之间,E点在 16.9 s~ 21.3 s之间;综合比较各方案下不同监测点混匀时间发现, $H=L/12=50$ mm和 $H=9L/12=450$ mm时,各监测点混匀时间均较长,而 $H=5L/12=250$ mm时,各点混合时间最短,在 19.3 s~ 26.2 s之间,说明其混合效率最高,上述结果与2.2和2.3小节的分析结果基本吻合,由此说明搅拌器高度为 $5L/12$ 时,混匀时间最短,萃取槽内流体混合性能较好。

综上所述,最终持稀土萃取槽搅拌器的高度确定在 $5L/12 \sim 7L/12$ 范围内,其综合冶金性能较好,这一研究结果可供稀土萃取分离反应器相关领域的研究和设计参考。

3 结论

(1) 稀土萃取槽搅拌器高度 H 为 $5L/12$ (即250 mm)时,萃取槽内Z轴方向上流体流速分布合理,无明显低速区。

(2) 各方案下萃取槽内低速区流体体积分数介于 $0.936\% \sim 7.732\%$ 之间,搅拌器高度 H 为 $7L/12$ (即350 mm)时,搅拌槽内低速区体积分数最低,为 0.936% 。

(3) 搅拌器高度 H 为 $5L/12$ 时,萃取槽内各监测点混匀时间最短,在 19.3 s~ 26.2 s之间。

(4) 自行设计的稀土分离萃取反应器,其搅拌器高度 H 在 $5L/12 \sim 7L/12$ 范围内,萃取槽综合冶金性能较好,可供稀土萃取分离反应器相关领域的研究和设计参考。

参考文献:

- [1] 唐谟堂,曹判.湿法冶金设备[M].长沙:中南大学出版社,2004:187-192.
- [2] 程福祥,吴声,廖春生,等.串级萃取理论之联动萃取分离工艺设计: I、串级萃取分离过程的邻级杂质比[J].中国稀土学报,2018,36(3):292-300.
- [3] 周雄军,逢启寿,王福辉.稀土萃取混合槽的放大设计[J].湿法冶金,2013,32(6):418-420.
- [4] 逢启寿,徐永谦.稀土萃取混合室进料口压力仿真[J].稀土,2014,35(2):68-71.
- [5] 王勇平.萃取浸出过程数值模拟及设备参数优化[D].赣州:江西理工大学,2012:24-39.
- [6] 逢启寿,李希鹏,徐金.潜室对稀土萃取槽混合室流场特性影响的模拟分析[J].制造业自动化,2017,39(9):47-49.
- [7] 龚姚腾,黄杰,徐金,等.萃取槽前室结构对两相混合过程的影响[J].湿法冶金,2018,37(2):165-169.
- [8] 逢启寿,王亮,王海辉.稀土萃取搅拌槽不同挡板的三维流场数值模拟[J].中国有色冶金,2017(5):37-40.
- [9] 罗璇,李建,杨文龙,等.稀土萃取平直双叶桨混合效果模拟分析[J].稀土,2015,36(5):146-150.
- [10] 赵秋月,张延安,刘燕,等.搅拌对箱式混合澄清槽流动性能的影响[J].东北大学学报:自然科学版,2012,33(4):559-562.
- [11] 贺友多.传输理论和计算[M].北京:冶金工业出版社,1991:22-123
- [12] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J].Computer Methods in Applied Mechanics and Engineer,1974,3(2):269-289.
- [13] 贺友多.传输过程的数值方法[M].北京:冶金工业出版社,1991:22-210.
- [14] 庞赞信,陈义胜,张怀军,等.150t LF炉单孔底吹氩搅拌特性研究[J].科学技术与工程,2014,14(35):23-26.
- [15] 陈义胜,冯磊,鲍文廷,等.双孔钢包底吹氩最佳吹气量探讨[J].冶金设备,2009(4):25-28.
- [16] 陈义胜,鲍文廷,冯磊.包钢150t LF钢包炉吹氩位置优化模拟研究[J].工业加热,2009,38(3):25-28.

The Effects of Stirrer Installation Height on Transport Properties of Rare Earth Extraction Reactor

RUAN Fei, TIAN Zhen, FU Xiaochen, BAO Jinxiao

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

Abstract: Rare earth extraction reactor with single inclined four-blade stirrer is designed, and the FLUENT software is adopted to build three dimensional geometry model of the rare earth extraction reactor. Furthermore, flow track, velocity distribution, volume fraction of low velocity zone and the mixing time of fluid in the reactor under five schemes (that is, stirrer installation height H is $L/12 = 50$ mm, $3L/12 = 150$ mm, $5L/12 = 250$ mm, $7L/12 = 350$ mm, $9L/12 = 450$ mm, respectively) are studied by use of multiple reference frame model in the FLUENT software. The study finds that the fluid velocity distribution in the direction of Z -axis is reasonable and no obvious low speed zone in the reactor when the installation height of the stirrer is $5L/12$. In addition, as the installation height of the stirrer is $7L/12$, the volume fraction of low velocity zone in the reactor is only 0.936%, at its minimum level. Besides, each monitoring point in the reactor has the shortest mixing time, in the range of 19.3 s ~ 26.2 s, as the installation height of the stirrer is $5L/12$. The results show that the stirrer height of the rare earth extraction tank is in the range of $5L/12 \sim 7L/12$, and its comprehensive performance is good, which can be used as a reference for the research and design of rare earth extraction related fields.

Key words: rare earth extraction reactor; stirrer height; numerical simulation; velocity distribution; volume friction of low velocity zone; the mixing time