金属铍真空蒸馏过程中加热方式对温度场及流场的影响模拟研究①

赵珊[1]，程全中[2]，袁方[2]，王建强[1]，郭欣欣[3]，王勇[2]
（1.河北工程大学 能源与环境工程学院，河北 邯郸 056038；2.中国科学院过程工程研究所，北京 100190；3.石家庄云浦化工设备有限公司，河北 石家庄 050000）

摘　要：为测得液态金属铍在高温真空蒸馏过程中蒸发面流速、蒸发面温度、流动情况等关键参数，并以此优化温度场、流场和设备，使用 Fluent 软件模拟蒸馏进度分别为 5%、20%、40%、60%、80%和 95%时的液态金属铍的温度场及流场分布，并对比恒定温度底部加热、恒定温度侧面加热、恒定温度侧面+底部加热、恒定功率侧面+底部加热 4 种不同加热方式的优劣。结果表明，相对于恒定温度底部加热或恒定温度侧面加热，恒定温度侧面+底部加热可以有效解决蒸馏后期整体平均温度严重降低的情况，有利于降低能耗和保持温度场整体均匀性。对比了恒定功率与恒定温度 2 种加热模式，得出恒定温度加热模式在平均温度、温度均匀性等方面优于恒定功率加热模式。

关键词：铍；真空蒸馏；温度场；流场；加热方式
中图分类号：TG146.2　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.021
文章编号：0253-6099(2026)01-0125-06

A Simulation Study on Influence of Heating Mode on Temperature Field and Flow Field During Vacuum Distillation of Beryllium Metal

ZHAO Shan[1], CHENG Quanzhong[2], YUAN Fang[2], WANG Jianqiang[1], GUO Xinxin[3], WANG Yong[2]
(1.*School of Energy and Environmental Engineering*, *Hebei University of Technology*, *Handan* 056038, *Hebei*, *China*; 2.*Institute of Process Engineering*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*; 3.*Shijiazhuang Yunpu Chemical Equipment Co.*, *Ltd.*, *Shijiazhuang* 050000, *Hebei*, *China*)

Abstract: To obtain key parameters such as evaporation surface velocity, evaporation surface temperature and flow conditions of liquid metal beryllium during high-temperature vacuum distillation, and then to optimize the temperature field, flow field and equipment accordingly, Ansys Fluent was used to simulate the distributions of temperature and flow fields of liquid metal beryllium in distillation at completion rate of 5%, 20%, 40%, 60%, 80% and 95%, respectively. Four heating modes, including constant-temperature bottom heating, constant-temperature side heating, constant-temperature side-and-bottom heating and constant-power side-and-bottom heating, were compared with each other for investigating advantages and disadvantages. The results show that, compared with constant-temperature bottom heating or constant-temperature side heating, the constant-temperature side-and-bottom heating mode can effectively mitigate severe drop in the overall average temperature in the late distillation stage, which is conducive to reducing energy consumption and maintaining a stable temperature field, and also brings overall uniformity in heating. Based on a comparison, it is found that constant-temperature heating mode is better than constant-power heating in terms of average temperature and temperature uniformity.

Key words: beryllium; vacuum distillation; temperature field; flow field; heating method

铍(Be)是地壳中的一种稀有碱土金属，其丰度约为 0.000 3%[1]。铍具有优异的物理和化学特性(如低密度、高熔点、高比刚度和耐腐蚀)，是制作惯性制导系统[2]、航空航天材料[3]、核反应装置材料[4-5]的关键

① **收稿日期**：2025-09-02
基金项目：国家重点研发计划(2021YFC2902301)
作者简介：赵珊(2001—)，女，山东临沂人，硕士研究生，主要研究方向为稀有金属提纯的温度控制。E-mail：3293972219@qq.com
通信作者：王建强(1975—)，男，河北邯郸人，硕士，副教授，主要从事传热方面的教学和科研工作。E-mail：wjqqiuhuimin@163.com

战略金属。在我国,通常采用中频炉常压镁热还原工艺[6]制备金属铍珠。但是,铍矿(主要为绿柱石)[7]解离过程中带入的铁、铬、镍、铝、铜等金属杂质和氟、氯、氧等非金属杂质无法通过镁热还原工艺去除,还会新增镁等夹杂[8]。因此,仍需通过真空蒸馏等工艺对铍珠进行进一步提纯。

真空蒸馏是稀贵金属精炼提纯的主要手段,它具有流程短、消耗小、金属回收率高、基本无三废等优点。真空蒸馏应用于铍的提纯亦有尝试,真空蒸馏过程中高挥发性夹杂如镁可蒸馏去除[9]。但是,真空蒸馏生产高纯铍在一个高温、高真空的密闭环境中进行,不同蒸馏过程下金属液的蒸发面流速、蒸发面温度、流动情况等参数难以测量。金属液和坩埚的温度场和流场处于未知状态,需要通过软件模拟来得到温度场和流场的分布状况,以期为高纯铍的制备提供技术支撑。

1 模拟方法

1.1 模拟区域及边界条件

坩埚的截面为开口较大的“U”形,如图1所示。中间阴影区域为液态金属Be,其余部分为坩埚。由于坩埚较高,需要对加热方式进行调整,选出合适的加热方式。假设液面为恒定温度边界条件,液面温度为1 442 ℃。采用恒定温度底部加热时,坩埚底部温度为1 480 ℃,设为恒定温度边界条件,其余边界为辐射散热。采用恒定温度侧面加热时,坩埚侧面温度为1 480 ℃,设为恒定温度边界条件,其余边界为辐射散热。采用恒定温度侧面+底部加热时,所有壁面温度均为1 480 ℃,设为恒定温度边界条件。采用恒定功率加热时,对坩埚的两侧和底部进行加热,热通量为1 000 W/m^2。金属Be的质量为40 kg时开始蒸馏,液态金属Be的高度随蒸馏进度的变化见表1。

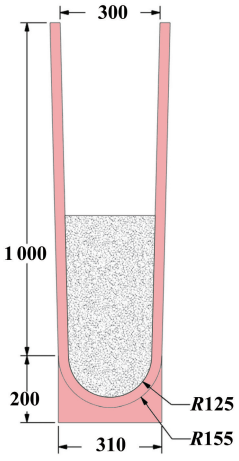


图1 模拟区域的二维示意图(单位:mm)

Fig. 1 Two-dimensional diagram of simulated area

表1 液态金属Be的高度随蒸馏进度的变化

Table 1 Height of liquid metal Be corresponding to distillation completion progress

蒸馏进度/%	高度/mm
0	552
5	545
20	522
40	484
60	428
80	262
95	113

1.2 物性参数

1.2.1 密度和比热容

液态金属Be与固态金属W的密度和比热容见表2。

表2 液态金属Be与固态金属W的密度和比热容

Table 2 Densities and specific heat capacities of liquid metal Be and solid metal W

金属名称	密度/(kg·m^{-3})	比热容/[J·(kg·K)$^{-1}$]
Be	1 848	1 820
W	19 350	149

1.2.2 黏度

液态金属Be的黏度μ(Pa·s)计算公式[10]为:

$$\mu = A\exp\left(\frac{H}{RT}\right) \tag{1}$$

式中:A和H均为常数;T为液态金属Be的实时温度,K;R为气体常数,R=8.314 J/(mol·K)。

A和H可用式(2)和式(3)求得:

$$A = \frac{5.7\times10^{-2}(MT_m)^{\frac{1}{2}}}{V_m^{\frac{2}{3}}\exp[H\mu/(RT_m)]} \tag{2}$$

$$H = 1.2\,T_m^{1.2} \tag{3}$$

式中:M为Be的相对原子质量,取值9;T_m为Be的熔点,1 551 K;V_m为Be的摩尔体积,48 500 mm^3/mol。

由式(1)~(3)计算可以得到液态金属Be的黏度μ_{Be}(Pa·s)与温度T的关系为:

$$\mu_{Be} = 2.69\times10^{-3}\exp\left(\frac{8\,156.79}{8.314T}\right) \tag{4}$$

1.2.3 热膨胀系数

根据固态金属体积膨胀系数与熔点之间的经验关系式,可推出液态金属Be的密度膨胀系数Λ的表达式[10]为:

$$\Lambda \approx \frac{-0.23D_\infty}{T_b} \tag{5}$$

式中:T_b为Be的沸点,3 243 K;D_∞为绝对零度时

Be 的密度,kg/m^3。

D_∞ 可表示为:

$$D_\infty = \rho_m - \Lambda T_m \tag{6}$$

式中 ρ_m 为 Be 的密度,1 848 kg/m^3。

热膨胀系数 β 与 Λ 的关系如下:

$$\beta = -\frac{\Lambda}{\rho_m} \tag{7}$$

由式(5)~(7)计算可得,液态金属 Be 的热膨胀系数 β 为 7.97×10^{-5} K^{-1}。

1.2.4　热导率

液态金属 Be 的热导率 $\lambda_{Be,l}$[W/(m·K)]与温度 T 存在以下关系[10]:

$$\lambda_{Be,l} = 1.22 \times 10^{-2} T \tag{8}$$

对于固态金属 W 的热导率 $\lambda_{W,s}$[W/(m·K)],采用多项式拟合文献[11]中的关系式,得到:

$$\lambda_{W,s} = 209.04 - 0.16T_W + 5.40 \times 10^{-5} T_W^{\ 2} \tag{9}$$

式中 T_W 为固态金属 W 的实时温度,K。

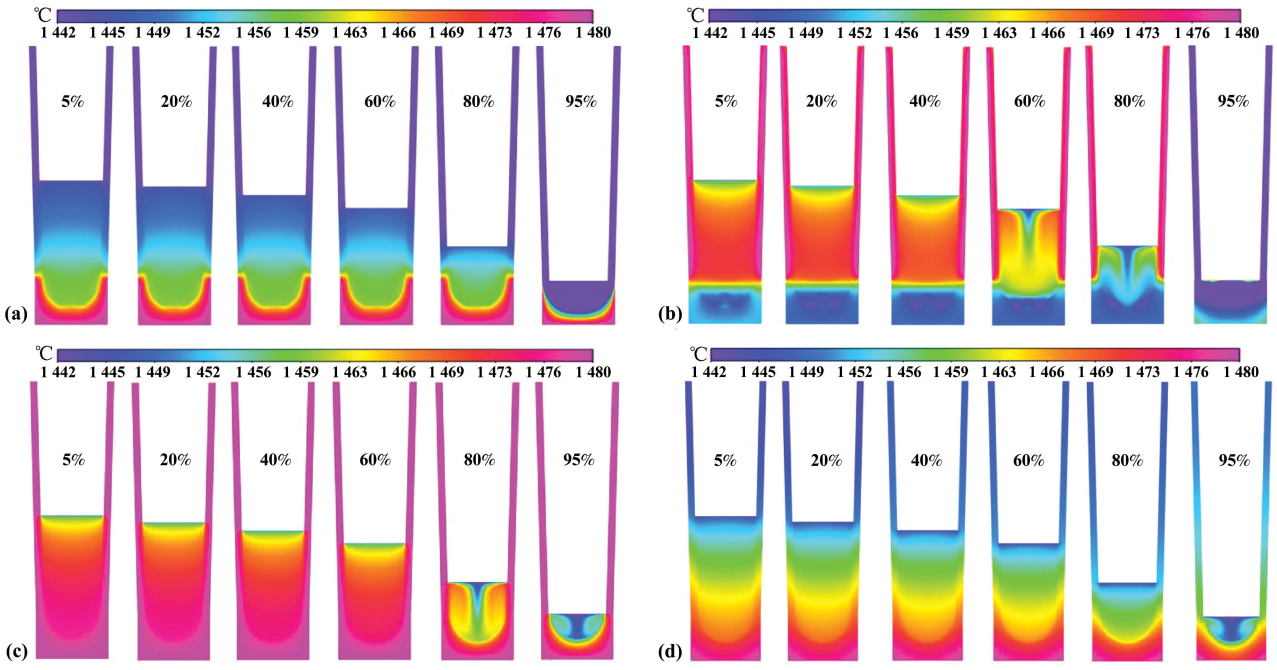
1.3　模拟过程及计算方法

利用 Ansys Student Fluent 2024R1 软件对建立的模型进行模拟,分别设置 4 种不同加热方式的边界条件进行计算。采用压力基求解器;采用 Boussinesq 假设近似处理流体密度;采用 SIMPLEC 算法[12]进行压力与速度耦合;梯度离散方法采用 Least Squares Cell Based 方式,控制方程离散采用 Second Order Upwind 格式。

2　结果与讨论

2.1　不同加热方式下的温度场分布

不同加热方式下,坩埚及液态金属 Be 的温度场如图 2 所示。从图 2 可知,在全部蒸馏过程中,恒定温度底部加热、恒定温度侧面+底部加热和恒定功率侧面+底部加热时,液态金属 Be 的下部温度高于上部温度;恒定温度侧面加热时,液态金属 Be 的下部温度低于上部温度。



(a) 恒定温度底部加热;(b) 恒定温度侧面加热;(c) 恒定温度侧面+底部加热;(d) 恒定功率侧面+底部加热

图 2　坩埚及液态金属 Be 的温度场

Fig. 2　Temperature field of liquid metal Be in crucible

4 种加热方式的平均温度随蒸馏进度的变化如图 3 所示。从图 3 可知,恒定温度侧面+底部加热方式的平均温度为 1 452~1 472 ℃,高于其余加热方式,且温度曲线随蒸馏进度的变化较小,温差在±20 ℃以内。与恒定温度侧面+底部加热类似,恒定功率侧面+底部加热时温度曲线随蒸馏进度的变化也较小,温差在±5 ℃以内,但其平均温度整体较低,最高平均温度低于1 446 ℃。恒定温度底部加热和恒定温度侧面加热在蒸馏进度 80%~95%时,平均温度出现显著降低的情况,温差较大。其中恒定温度侧面加热蒸馏进度 95%时,平均温度相比蒸馏进度 80%时降低 153 ℃,恒定温度底部加热时,温降为 79 ℃。

综上所述,在蒸馏过程中,恒定温度侧面+底部加热的平均温度高于恒定温度侧面加热、恒定温度底部

加热和恒定功率侧面+底部加热。这表明在设定温度下,恒定温度侧面+底部加热拥有更小的热损失和更高的温度达成率,是更好的加热方式[13],且恒定温度侧面+底部加热时温差也较小。由温差分析可知,恒定温度侧面+底部加热可以有效解决蒸馏后期整体平均温度严重降低的情况,是更优的加热方式。结合以上分析,恒定温度侧面+底部加热更有利于能耗降低和温度场保持。

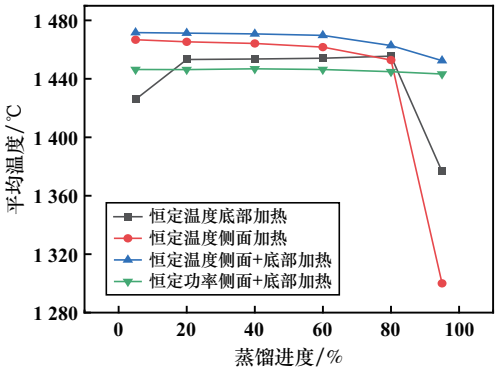


图 3 4 种加热方式的平均温度随蒸馏进度的变化图

Fig. 3 Variation of average temperature with distillation completion progress by four heating modes

除最高温与最低温的温差外,蒸馏温度场的温度均匀性也是判定温度控制方式的重要指标之一,不同蒸馏进度下温度场平均温度的均匀性会严重影响后期蒸馏进度[14]。4 种加热方式的温度均匀性随蒸馏进度的变化如图 4 所示,温度均匀性越接近 1,表明温度越均匀。由图 4 可知,蒸馏进度 5%~80%时,恒定温度侧面+底部加热的温度均匀性更好,为 0.91~0.93,仅在 80%~95%时低于恒定温度底部加热;恒定温度底部加热在 5%~80%时处于较低的水平,为 0.82~0.91。恒定温度侧面加热和恒定功率侧面+底部加热整体温度均匀性较低,且均出现下降趋势。综上所述,恒定温度侧面+底部加热更有利于温度均匀性的保持。

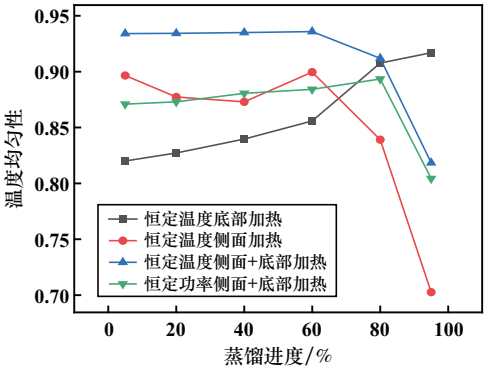
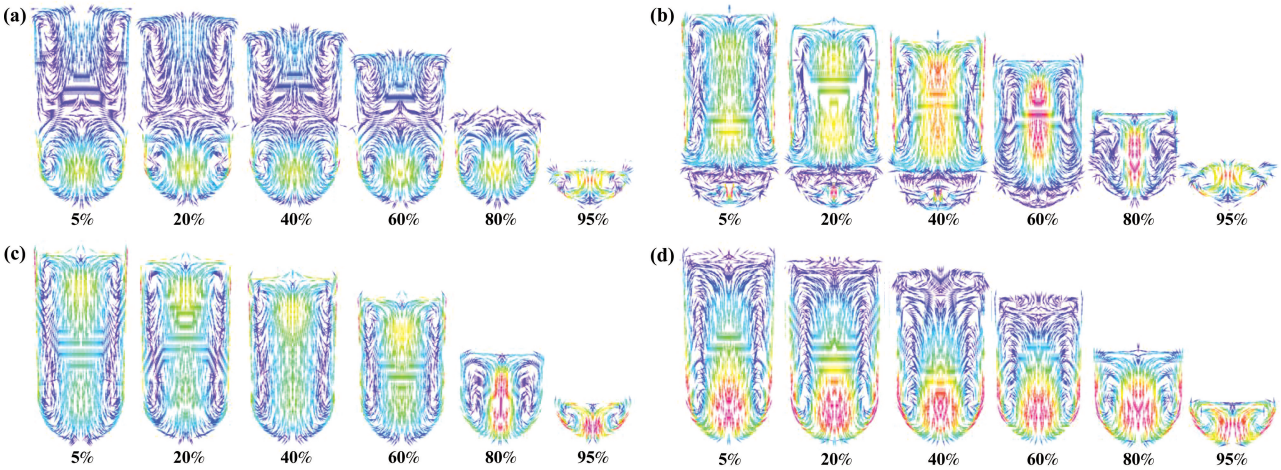


图 4 4 种加热方式的温度均匀性随蒸馏进度的变化图

Fig. 4 Variation of temperature uniformity with distillation completion progress by four heating modes

2.2 不同加热方式下的流场分布

图 5 是坩埚及液态金属 Be 的速度矢量图。从图 5 可以看出,蒸馏进度 5%~60%时,无论是采用恒定温度底部加热、恒定温度侧面加热和恒定温度侧面+底部加热,还是采用恒定功率侧面+底部加热时,液态金属 Be 的上部和下部均会在左右两侧各生成一个漩涡,但漩涡的大小位置略有不同。恒定温度底部加热和恒定温度侧面加热的上、下部互不流通,而恒定温度侧面+底部加热、恒定功率侧面+底部加热时液态金属 Be 能进行充分的扰动。随着蒸馏进度增加,坩埚内的液态金属 Be 会逐渐减少,液态金属 Be 体内因流动形成的漩涡也会逐渐减少,当蒸馏进度达到 95%时,液态金属 Be 内仅存在一对左右分布的漩涡,此时漩涡的大小位置大致相同。

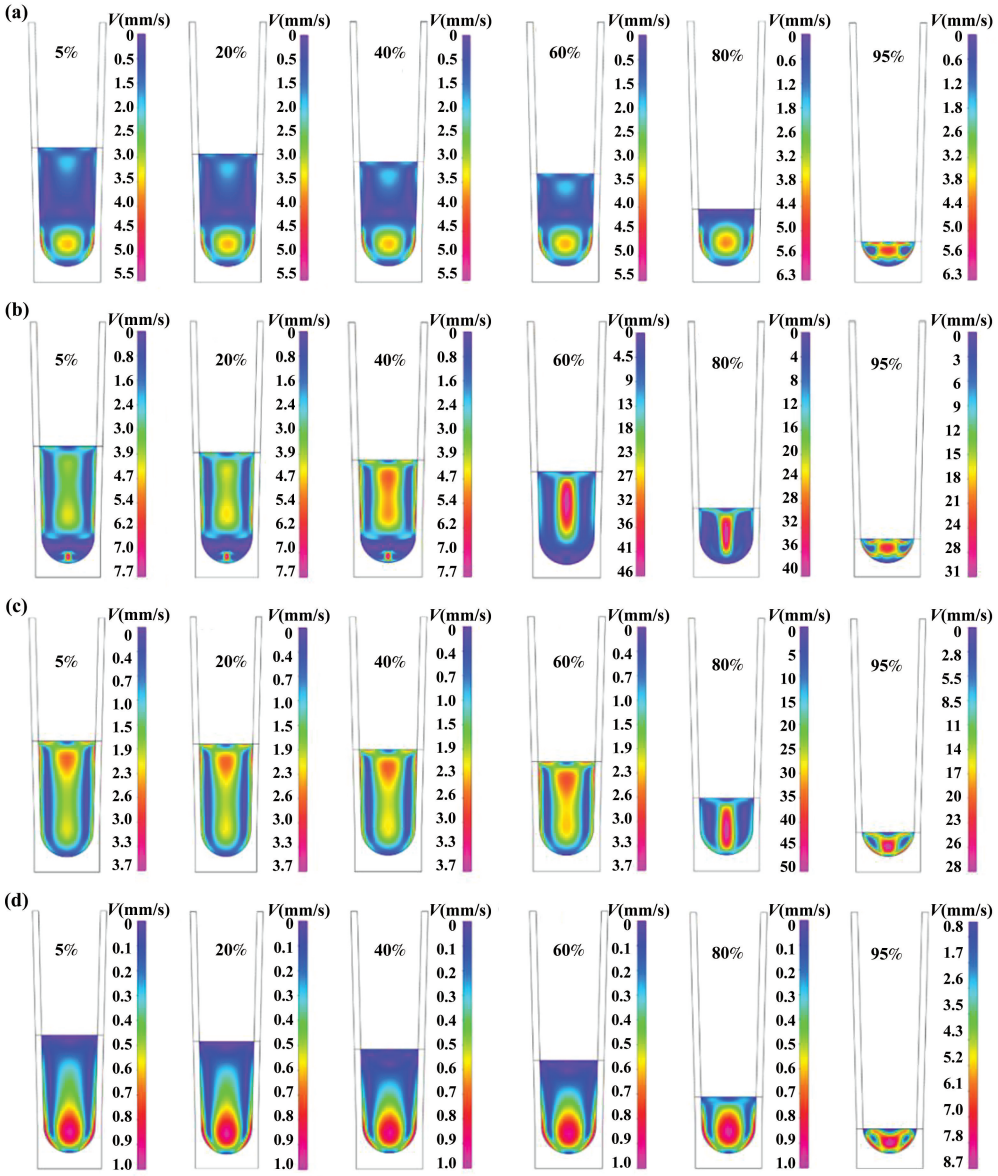


(a) 恒定温度底部加热;(b) 恒定温度侧面加热;(c) 恒定温度侧面+底部加热;(d) 恒定功率侧面+底部加热

图 5 坩埚及液态金属 Be 的速度矢量图

Fig. 5 Velocity vector field of liquid metal Be in crucible

坩埚及液态金属 Be 的流场如图 6 所示。从图 6 可知,随着坩埚内液态金属 Be 逐渐减少,4 种加热方式下坩埚内液态金属 Be 的流速逐渐增加。蒸馏进度 5%~95%时,恒定温度底部加热流速从 5.5 mm/s 增加至 6.3 mm/s,恒定温度侧面加热流速从 7.7 mm/s 增加至 31 mm/s,恒定温度侧面+底部加热流速从 3.7 mm/s 增加至 28 mm/s,恒定功率侧面+底部加热流速从 1.0 mm/s 增加至 8.7 mm/s。



(a) 恒定温度底部加热;(b) 恒定温度侧面加热;(c) 恒定温度侧面+底部加热;(d) 恒定功率侧面+底部加热

图 6　坩埚及液态金属 Be 的流场

Fig. 6　Flow field of liquid metal Be in crucible

真空蒸馏中,更快的金属液蒸发面流速能够有效提升蒸发速率,加速整体蒸馏过程[15]。4 种加热方式的蒸发面平均流速随蒸馏进度的变化如图 7 所示。从图 7 可知,4 种加热方式的蒸发面平均流速均随蒸馏进度增加而提升。其中,蒸馏进度 5%~20%时,恒定温度侧面加热和恒定温度侧面+底部加热的蒸发面平均流速较高,为 2.4~2.5 mm/s。蒸馏进度 60%时,恒定温度侧面加热的蒸发面平均流速显著增大到 9.28 mm/s,而恒定温度侧面+底部加热的平均流速保持在 2.7 mm/s 左右,但是蒸馏进度 80%~95%时,恒定温度侧面+底部加热的蒸发面平均流速快速上升至 15.1 mm/s,远高于其他加热方式。恒定温度底部加热和恒定功率侧面+底部加热的蒸发面平均流速均较低,除在蒸馏临近结束时会出现猛增的现象外,其蒸发面平均流速均在 1.38 mm/s 以下。结合以上分析,为保证整体蒸馏进程均有较高的蒸发面平均流速,应尽可能选择恒定

温度侧面加热和恒定温度侧面+底部加热。

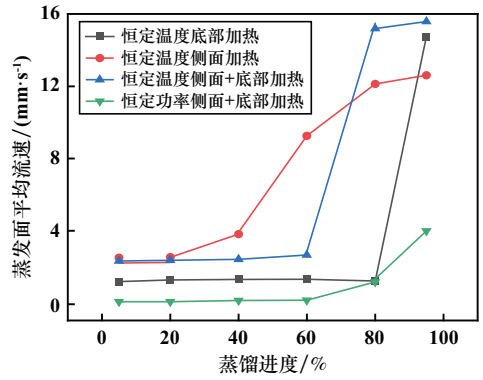


图 7 4 种加热方式的蒸发面平均流速随蒸馏进度的变化

Fig. 7 Variation of average evaporation surface velocity with distillation completion progress by four heating modes

真空蒸馏中,流体的流速均匀程度表明了金属内部的传质效率及蒸馏速率的高低[16]。4 种加热方式的流速均匀性随蒸馏进度的变化如图 8 所示,流速均匀性越接近 1 表明流速越均匀。从图 8 可知,恒定温度侧面+底部加热的整体流速均匀性更好,为 0.71~0.81。随着蒸馏持续进行,恒定功率侧面+底部加热流速均匀性逐渐增加,蒸馏进度 80%、95%时流速均匀性分别为 0.78、0.82。其次是恒定温度底部加热整体波动较小,在 0.71~0.75 范围内,但均匀度较低。恒定温度侧面加热流速均匀性波动起伏大且整体水平不高。

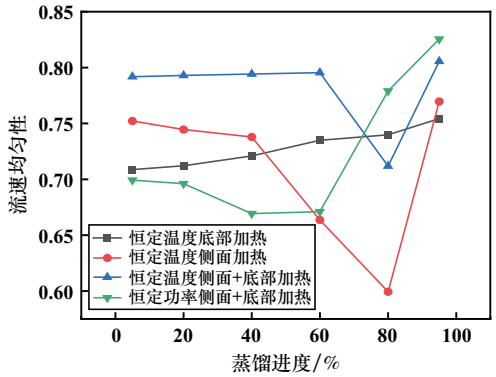


图 8 4 种加热方式的流速均匀性随蒸馏进度的变化

Fig. 8 Variation of velocity uniformity with distillation completion progress by four heating modes

综上所述,结合整体流速均匀性和均匀性随蒸馏进度波动规律,恒定温度侧面+底部加热均优于恒定功率侧面+底部加热、恒定温度底部加热、恒定温度侧面加热。应优先选择恒定温度侧面+底部加热。

3 结论

1) 温度场模拟结果表明:恒定温度侧面+底部加热可以有效解决蒸馏后期整体平均温度严重降低的情况,更有利于能耗降低和温度场保持,也是整体均匀性更好的加热方式。

2) 流场模拟结果表明:蒸馏过程中液态金属 Be 的上部和下部均会在左右两侧各形成一个漩涡,但漩涡的大小位置略有不同。恒定温度底部加热、恒定温度侧面加热的上、下部互不流通,而恒定温度侧面+底部加热、恒定功率侧面+底部加热时液态金属 Be 能进行充分的扰动。

3) 综合分析液态金属 Be 在坩埚内的平均温度、温度均匀性、蒸发面平均流速和流速均匀性,选用恒定温度侧面+底部的加热方式更有利于减少蒸馏过程中的能耗,提升蒸馏效率。

参考文献(References):

[1] 符剑刚,蒋进光,李爱民,等. 从含铍矿石中提取铍的研究现状[J]. 稀有金属与硬质合金, 2009,37(1):40-44.
FU Jiangang, JIANG Jinguang, LI Aimin, et al. The latest development of beryllium extraction from beryllium-containing ore[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2009,37(1):40-44.

[2] 郭耀军. 金属铍表面微力学行为及性能[D]. 银川:宁夏大学, 2024.
GUO Yaojun. Micromechanical behavior and properties of metal beryllium surface[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024.

[3] 毛素荣,李光明,钟乐乐,等. 铍的选矿研究现状和展望[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(6):17-24.
MAO Surong, LI Guangming, ZHONG Lele, et al. Present situation and prospect of mineral processing of beryllium[J]. Nonferrous Metals Mieral Processing Section, 2022(6):17-24.

[4] WRÓBLEWSKA M, BLANCHET D, LYOUSSI A. A review and analysis of the state of the art on beryllium poisoning in research reactors[J]. Annals of Nuclear Energy, 2021,163:108540.

[5] 郭凯琪. 分子动力学模拟研究晶体各向异性特征对金属铍本征塑性的影响[D]. 沈阳:东北大学, 2022.
GUO Kaiqi. Study on the effect of crystal anisotropy on the intrinsic plasticity of beryllium by molecular dynamics simulation[D]. Shenyang: Northeastern University, 2022.

[6] MORANA S J, SIMONS G F. Beryllium extracted by the fluoride process[J]. JOM, 1962,14(8):571-574.

[7] 王星. 新疆某锂钽铌铍多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):198-202.
WANG Xing. Beneficiation of lithium-tantalum-niobium-beryllium polymetallic ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):198-202.

[8] REVUTSKIY A V, SYRNEV B V, LOPATIN V Y, et al. Study of reinforcing phase formation at the grain boundaries of sintered beryllium[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2021,62(1):125-131.

(下转第 136 页)

roasting of copper smelting flue dust[J]. Environmental Pollution, 2023,330:121809.

[13] LI Q Z, LAI X T, LIU Z X, et al. Thiourea-assisted selective removal of arsenic from copper smelting flue dusts in NaOH solution[J]. Hydrometallurgy, 2024,224:106246.

[14] GUO X Y, SHI J, YI Y, et al. Separation and recovery of arsenic from arsenic-bearing dust[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015,3(3):2236-2242.

[15] 迟晓鹏,许佳妍,翁威,等. 铜冶炼烟尘选择性湿法脱砷及有价元素的同步回收[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(4):8-13.
CHI Xiaopeng, XU Jiayan, WENG Wei, et al. Selective wet removal of arsenic and simultaneous recovery of valuable elements from copper smelting dust[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(4):8-13.

[16] CHEN Y, LIAO T, LI G B, et al. Recovery of bismuth and arsenic from copper smelter flue dusts after copper and zinc extraction[J]. Minerals Engineering, 2012,39:23-28.

[17] 王晓阳,王文祥,方红生,等. 以碱性焙烧-水浸工艺从白银炉电收尘中选择性除砷及浸出动力学研究[J]. 湿法冶金, 2022,41(3):267-273.
WANG Xiaoyang, WANG Wenxiang, FANG Hongsheng, et al. Selective removal and leaching kinetics of arsenic from electric dust collection of silver furnace by alkaline roasting-water leaching[J]. Hydrometallurgy of China, 2022,41(3):267-273.

引用本文:游乐明,张曙光,章旭福,等. 白烟尘碱性焙烧-两段酸浸综合处理工艺研究[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):131-136.
YOU Leming, ZHANG Shuguang, ZHANG Xufu, et al. Comprehensive process of alkaline roasting and two-stage acid leaching for white dust[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):131-136.

(上接第130页)

[9] 张吉强,金雷,罗江山,等. 熔体铍中杂质Fe、Al和Mn的局域结构和动力学过程[J]. 稀有金属材料与工程, 2024,53(11):3046-3052.
ZHANG Jiqiang, JIN Lei, LUO Jiangshan, et al. Local structure and dynamics procedure of impurities Fe, Al and Mn in melt beryllium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024,53(11):3046-3052.

[10] IIDA T, GUTHRIE R I L. The physical properties of liquid metals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1988.

[11] 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, 2001.
Editorial board of design manual for nonferrous metallurgical furnaces. Design manual for nonferrous metallurgical furnaces[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2001.

[12] 张磊. 真空蒸馏提纯金属铽的杂质分布模型研究[D]. 北京:北京有色金属研究总院, 2020.
ZHANG Lei. Distribution models of impurities in terbium metal purified by vacuum distillation[D]. Beijing: Beijing General Research Institute for Nonferrous Metals, 2020.

[13] 王双平. 粗银真空分离与提纯理论及实验研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2023.
WANG Shuangping. Silver coarse vacuum separation and purification of theory and experiment research [D]. Kunming: University of Science and Technology, 2023.

[14] 张师凡. 三种稀土合金真空蒸馏分离提纯的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2023.
ZHANG Shifan. Study on vacuum distillation separation and purification of three rare earth alloys[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2023.

[15] 李亚星. 真空蒸馏提纯锑杂质分离行为研究[D]. 长沙:中南大学, 2023.
LI Yaxing. Study on separation behavior of antimony impurities purified by vacuum distillation[D]. Changsha: Central South University, 2023.

[16] 王芸芸. 金属镁真空蒸馏过程温度场及流场的模拟研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2022.
WANG Yunyun. Magnesium metal vacuum distillation process of temperature field and flow field simulation study[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.

引用本文:赵珊,程全中,袁方,等. 金属铍真空蒸馏过程中加热方式对温度场及流场的影响模拟研究[J]. *矿冶工程*, 2026,46(1):125-130.
ZHAO Shan,CHENG Quanzhong,YUAN Fang,et al. A simulation study on influence of heating mode on temperature field and flow field during vacuum distillation of beryllium metal[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):125-130.