

13 t 大型海绵钛反应器内部温度场模拟研究

贺永东¹ 陈德明² 孙小涵³ 刘洪贵² 陈艳华¹ 周云英² 赵亿坤¹
(1.新疆大学物理科学与技术学院; 2.新疆湘晟新材料科技有限公司; 3.武汉大学)

摘 要 利用 Fluent 平台模拟 13 t 海绵钛反应器绝热、对流及强制风冷工况,不同加料速度下反应器的温度场分布和变化曲线。结果发现,在绝热及自然对流工况下,反应区温度随加料速度增大而升高,加料速度为 705 kg/h 时温度比 505 kg/h 时高 180 K;强制风冷工况下,在 405、505、605、705、805 kg/h 的加料速度下的温度场与 405 kg/h 时自然对流时的温度场相近,有效控制和改善了温度分布。反应初期,反应器温度随时间延长快速上升,在 505 kg/h 的加料速度下,经 3.44 h,反应区温度达到峰值为 1 358 K,在 16.67 h 后温度稳定在 1 262 K;加料速度为 705 kg/h,经 1.67 h,温度峰值为 1 434 K,15.28 h 后稳定在 1 307 K。

关键词 Fluent 热场模拟;海绵钛,镁热还原反应,还原罐,温度场

中图分类号 TG146.23;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation of Temperature Field in a 13 t Large-scale Titanium
Sponge Reduction Reactor

He Yongdong¹, Chen Deming², Sun Xiaohan³, Liu Honggui², Chen Yanhua¹, Zhou Yunying², Zhao Yikun¹

(1.School of Physics and Technology, Xinjiang University; 2.Xinjiang Xiangsheng New
Material Technology Co., Ltd.; 3.Wuhan University)

Abstract: Fluent platform was used to simulate the heat insulation, natural convection and forced air cooling of a sponge titanium reactor with capacity of 13 t, as well as the temperature field distribution and variation curves of the reactor under different feeding rates. The results indicate that under the condition of heat insulation and natural convection, the temperature in reaction zone is increased with the increase of the feeding rate, where the rate of 705 kg/h is 180 K higher than that of 505 kg/h. At forced air cooling, the temperature field with feed rates of 405, 505, 605, 705 and 805 kg/h is similar to that with 405 kg/h under natural convection, which effectively controls and improves the temperature distribution. The simulation results reveal that the temperature is increased rapidly firstly, and reaches the peak value of 1 358 K at 500 kg/h for 3.44 h, which is stable at 1 262 K after 16.67 h. When feeding rate is 705 kg/h, the temperature reaches the peak of 1 434 K after 1.67 h, and then becomes stable at 1 307 K after 15.28 h.

Key Words: Fluent Thermal Field Simulation, Titanium Sponge, Magnesium Thermal Reduction Reaction, Reactor, Temperature Field

收稿日期:2020-10-30;**修改稿收到日期:**2021-03-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51661031,51861033);新疆维吾尔自治区科技厅重点研发计划资助项目(2020B02006)

第一作者简介:贺永东,男,1965 年出生,教授,乌鲁木齐(830046),E-mail:hydongq@126.com

引用格式:贺永东,陈德明,孙小涵,等. 13 t 大型海绵钛反应器内部温度场模拟研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):956-960.

HE Y D, CHEN D M, SUN X H, et al. Simulation of temperature field in a 13 t large-scale titanium sponge reduction reactor[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):956-960.

[3] 陈境焕,李海艳,林景亮. 基于深度学习的零件点云分割算法研究[J]. 机电工程,2020, 37(3): 326-331.

[4] 陈飞. 铸铁件清理机器人通信与监控系统研究与开发[D]. 长沙:湖南大学,2016.

[5] 陈一鸣. 铸件清理机器人打磨轨迹规划研究[D]. 长春:吉林大学,2019.

[6] 高奎. 基于点云信息的异型铸件机器人打磨规划技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

[7] HU Q Y, YANG B, XIE L H, et al. RandLA-Net: Efficient semantic segmentation of large-scale point clouds[A].Computer Vision and Pattern Recognition[C].Piscataway, 2020.

[8] LI Y Y, BU R, SUN M C, et al. Advances in Neural Information Processing Systems[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2018.

[9] 殷亚军,徐巧志,周建新,等. 考虑铸型强度的球墨铸铁件冒口设计方法[J]. 铸造工程,2020, 44(5): 33-39.

[10] 张卫华,魏兵,袁森. 铸铁件收缩模数法冒口设计[J]. 铸造技术,1998(4): 3-5.

[11] SAVVA M, YU F, SU H, et al. Large-scale 3D shape retrieval from ShapeNet Core55: SHREC'17 track[A]. Workshop on 3D Object Retrieval[C]. Goslar, 2017.

[12] QI C R, SU H, MO K, et al. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition[M]. Piscataway: IEEE, 2017.

[13] QI C R, YI L, SU H, et al. Advances in Neural Information Processing Systems[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2017.

(编辑:刘晨辉)

Ti 及其合金因具有密度小、比强度高、耐热、无磁、可焊等特点,在工业、农业、国防、医疗、航空航天、交通运输、建筑装饰、体育休闲领域应用广泛^[1~3]。

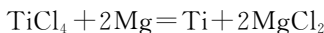
Ti 及其合金生产技术难度大^[4],俄罗斯等采用 I 型串联还蒸联合方法,单炉产量为 7.5 t 左右^[5]。美国采用真空还蒸工艺,单炉产能 10 t 左右。日本海绵钛单炉规模从 4.7 t 扩大到 10 t,最近正在开发 13 t 还蒸炉^[6]。我国从 1958 年开始海绵钛生产研究,先后研发了 5 t 倒 U 型还原蒸馏联合炉及其配套工艺技术^[7,8],自主研发加技术引进 7.5 t I 型还蒸炉、12 t 倒 U 型炉,产能超过 10 万 t/a^[9]。与国外先进水平相比,我国海绵钛还蒸装置存在电耗高、致密部位多、等级率低、产品品质稳定性不够等问题^[10,11]。

目前全球海绵钛生产朝着设备大型化、产能规模化、质量高纯化、控制自动化等方向发展,并继续探索低成本、连续化生产技术。TiCl₄ 镁热还蒸工序是钛产业技术难度最大的工序^[12]。影响大型海绵钛还原罐生产周期和产品电耗的主要因素是还原期间还原罐内部的传热传质条件^[13]。国外关于海绵钛还原-蒸馏过程的传热传质理论研究报道很少^[14]。国内大多围绕海绵钛工艺制度开展研究,镁热法生产海绵钛还原过程的传热与流动问题研究报道很少^[15,16]。还原过程涉及传热、传质和化学反应的复杂过程^[16]。为控制还原罐内温度,需要研究还原罐内温度场的分布情况,相关工业试验难度和成本很高,而利用 Fluent 软件模拟则提供了一条很好的研究途径^[17,18]。

因此,本课题基于 Fluent 软件,结合生产现场,动态采集还原过程的温度参数,对目前国内最大炉型(13 t 炉)反应釜的内部温度场变化进行数值模拟,利用模拟结果指导和修整生产实践,为工艺改进与优化提供参考。

1 模拟模型

模拟过程中,假定海绵钛还原过程满足:还原罐内液体为连续、均匀介质;还原反应仅在气-液界面上进行,界面区作为还原热源;冷却水和 MgCl₂ 带走的显热视为 0,这部分能量等效转化为通过还原罐壁散热排出;忽略低价 Ti 还原反应,罐内仅发生如下反应:



1.1 数学模型

选择镁热还原 TiCl₄ 反应器还原能量方程为^[12]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho E) + \nabla \cdot [v(\rho E + p)] = \nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}} \nabla T - \sum h_j \bar{J} + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})] \quad (1)$$

式中, τ 为时间,s; ρ 为密度,kg/m³;E 为能量,J; $\vec{v}$ 为流体运动速度,m/s; p 为压力,Pa; λ_{eff} 为有效导热系数,W/(m·K);T 为热学温度,K; h_j 为组分 j 的焓,J; $\bar{J}$ 为组分 J 的扩散通量,mol/(m²·s); $\bar{\tau}_{\text{eff}}$ 为有效粘性耗散系数,Pa;方程式右边为 $\nabla \cdot [\lambda_{\text{eff}} \nabla T - \sum h_j \bar{J} + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \vec{v})]$ 为综合传热、组分扩散、粘性耗散、MgCl₂ 放出和冷却水循环引起的能量转移。

考虑还原罐为圆柱体,选用二维坐标建立还原罐数学模型,还原过程热量微分方程为:

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

式中,C 为比热容,J/(kg·K);x、y 分别为二维空间两个方向;u 为反应物在 X 轴向运动速度,m/s;v 为反应物在 Y 轴向运动速度,m/s; λ 为传热系数,W/(m²·K)。

1.2 参数模型

假设罐内 Mg-MgCl₂-TiCl₄ 混合液体为连续均匀介质,其密度与粘度计算如下:

$$\rho = \sum_{i=1}^n X_i \rho_i, \mu = \sum_{i=1}^n X_i \mu_i \quad (3)$$

式中, X_i 为混合介质中 i 组分质量分数,%; ρ_i 与 ρ 分别为 i 组分及混合介质密度,kg/m³; μ_i 与 μ 分别为组分 i 及混合介质的粘度,Pa·s。在还原温度工况下,MgCl₂ 与海绵钛导热系数分别为 4 和 8 W/(m·K),远低于 Mg 液导热系数 97.33 W/(m·K),模拟采用 Mg 液导热系数代表还原罐内液体导热系数。

1.3 几何模型

13 t 炉还原罐内部流体的几何模型见图 1,模拟区域为 6.0 m×2.0 m 的还原罐计算区域,还原罐分成 3 部分,上部为气态 TiCl₄ 区,中部为液态 Mg 区,下部为海绵钛与 MgCl₂ 区,还原反应在液态 Mg 与 TiCl₄ 界面上进行。以 Mg 液位高度中线与还原罐中心垂线交点为坐标原点,垂线向上方向为 Y 轴,计算区域划分为

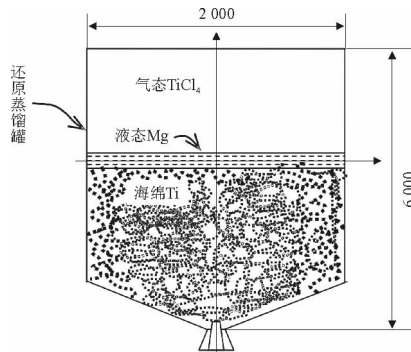


图 1 海绵钛还原罐几何模型

Fig.1 The geometric model of titanium sponge reactor

300×100 的交错网格。以还原罐壁为边界,在反应区界面位置,给定还原罐内的热源参数:包括初始温度为 1 000 K,Mg 热还原反应放热量为 5.19×10^5 J/mol。在计算区域边壁上,需根据散热条件设置热损失通量,根据 13 t 大型海绵钛还原罐现场生产条件,设置计算区域底部边界温度条件。

1.4 传热模型

还原过程产生的热量少部分通过排放 MgCl₂带走,大部分是由罐壁通过辐射、空气对流以及冷却水与罐壁传热等综合传热带走。为简化计算,模拟过程将 MgCl₂和冷却水带走的热量等效转化为还原罐壁散热;单位时间内、单位面积罐壁散热量为对流传热、辐射传热功率之和,反应期还原罐壁散热热流密度和总散热量为:

$$q = c_s [(T_{\text{壁}}/100)^4 - (T_{\text{环}}/100)^4] + \alpha_{\text{壁}} F_{\text{壁}} (T_{\text{壁}} - T_{\text{环}}) \tag{4}$$
$$Q = q \cdot F_{\text{壁}}$$

式中, q 为器壁对流、辐射传热功率之和, $W/(m \cdot K)$; c_s 为黑度系数, $W/(m \cdot K)$; $T_{\text{壁}}$ 为罐壁温度,K; $T_{\text{环}}$ 为环境温度,K; $\alpha_{\text{壁}}$ 为器壁与大气环境综合传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; $F_{\text{壁}}$ 为还原罐散热面积, m^2 ; Q 为还原罐壁散热量的总

和,J。

1.5 反应模型

根据式(1)的 Mg 热还原反应,热量可能来源于: $TiCl_4 + 2Mg = Ti + 2MgCl_2 - 519$ kJ/mol 反应放出的热量,考虑 Mg 液界面为热源位置,取 TiCl₄加入速度为 405、505、605、705、805 kg/h 时,对应热流密度为 63 330、72 400、84 500、96 500、108 600 W/m²。

2 试验分析讨论

2.1 绝热工况下温度场分布

在绝热工况下,假设 Mg 为液态、TiCl₄ 为气态,不同 TiCl₄加入速度下还原罐内温度场分布见图 2(Mg 热还原反应 1 h 后),反应区液面温度见表 1。根据表 1 可知,TiCl₄加入速度越大,还原罐内温度越高。TiCl₄加入速度为 705 kg/h 时反应区温度比 505 kg/h 高出 180 K;TiCl₄加入速度为 805 kg/h 时反应区温度比 405 kg/h 高出 350 K。长时间反应,会造成海绵钛硬心和罐壁超温,降低海绵钛质量并危及生产安全。为控制还原罐温度,需对还原罐进行散热降温。

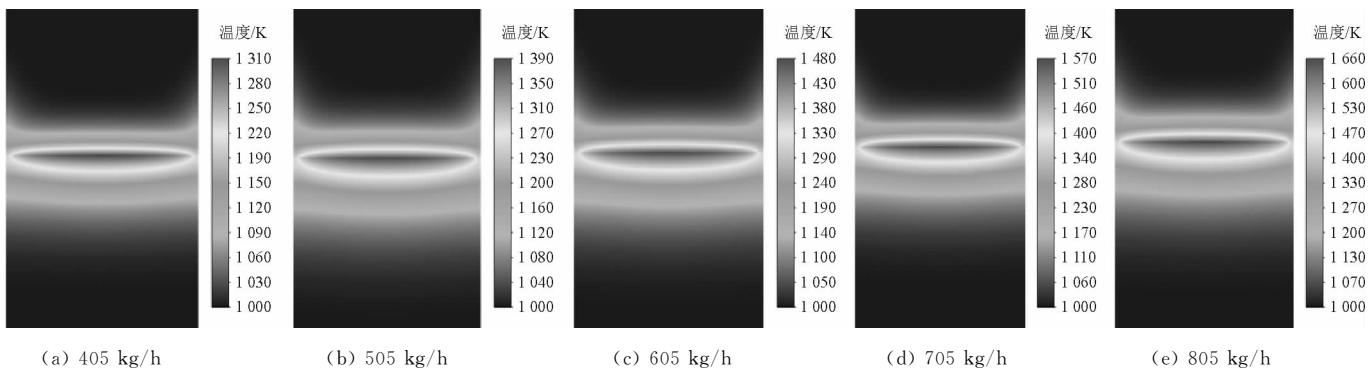


图 2 绝热工况下还原罐内温度场模拟结果

Fig.2 The simulation results of temperature fields in adiabatic condition

表 1 绝热工况下还原罐反应区不同加料速度时的液面温度

Tab.1 Temperature of liquid surface in adiabatic condition with different feeding speed					
加料速度/(kg · h ⁻¹)	405	505	605	705	805
表面温度/K	1 310	1 390	1 480	1 570	1 660

2.2 自然对流工况下温度场

试验模拟将冷却水带走热量和 MgCl₂带走显热等效转化为罐壁散热,在自然对流工况下,将还原罐壁总传热系数设定为 10 W/(m² · K),对 13 t 大型还原罐(反应中期 TiCl₄加入速度为 505 kg/h)内液体温度场分布进行模拟,还原罐内温度场分布见图 3 和表 2。可以看出,TiCl₄加入速度为 505 kg/h 时,还原罐中心温度为 1 380 K,罐壁温度在 770~1 200 K 区间,与现场测定温度一致,验证了该模型的准确性。

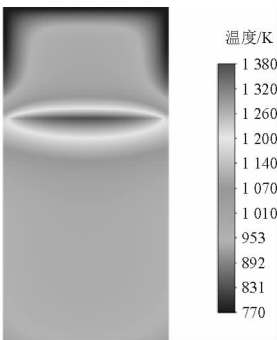


图 3 TiCl₄加入速度为 505 kg/h 时还原罐内温度场计算结果

Fig.3 The calculation results of temperature fields with feeding speed of 505 kg/h

在自然对流工况下,TiCl₄加入速度为 405、505、605、705、805 kg/h 时,还原罐内温度场见图 4。还原罐

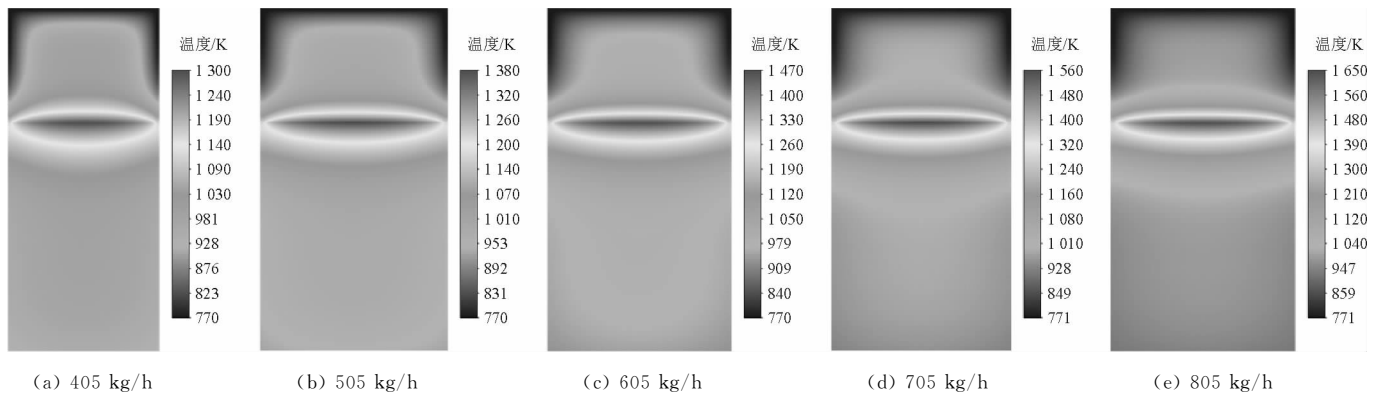


图 4 自然对流工况不同 TiCl_4 加入速度下还原罐内温度场模拟结果

Fig.4 The simulation results of temperature fields in natural convection condition with different feeding speeds

表 2 自然对流工况时温度场模拟值

Tab.2 Temperature field simulation values in natural convection condition

加料速度/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	中心温度/K	罐壁温度/K
405	1 300	770~1 140
505	1 380	770~1 200
605	1 470	770~1 260
705	1 560	771~1 320
805	1 650	771~1 390

反应区与罐壁温度见表 2。由图 3、图 4 及表 2 可知,反应区中心和罐壁温度随 TiCl_4 加入速度增加而升高。 TiCl_4 加入速度由 405 kg/h 增大到 805 kg/h,反应区中心温度由 1 300 K 升高到 1 650 K。为确保海绵钛质量和生产安全,需加强还原罐散热,强制风冷是控制反应区温度、防止还原罐壁超温的主要措施。

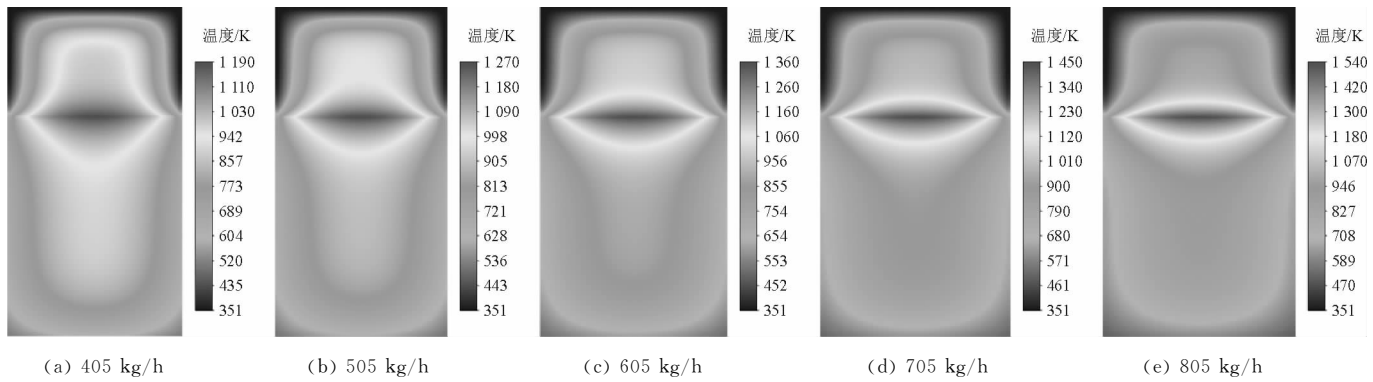


图 5 强制对流工况下不同 TiCl_4 加入速度时还原罐内温度场模拟结果

Fig.5 The simulation results of temperature fields with different feeding speeds in forced air cooling condition

表 3 强制风冷工况下温度场模拟结果

Tab.3 Temperature field simulation in forced air cooling condition

加料速度/($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	中心温度/K	罐壁温度/K
405	1 190	351~942
505	1 270	351~998
605	1 360	351~1 060
705	1 450	351~1 120
805	1 540	351~1 180

前期试验表明,还原罐反应区温度控制在 1 473 K

2.3 强制对流工况下温度场

根据经验,强制风冷工况下,综合传热系数的取值范围为 $10 \sim 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,试验模拟将冷却水带走热量和 MgCl_2 带走显热等效转化为罐壁散热,设定还原罐壁总传热系数为 $150 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,在 TiCl_4 加入速度为 405、505、605、705、805 kg/h 时,还原罐温度场分布见图 5,还原罐反应区中心温度与罐壁表面温度见表 3。由图 5 和表 3 可知, TiCl_4 加入速度为 705 kg/h 和 805 kg/h 时,还原罐内温度低于自然对流工况下 605 kg/h 和 705 kg/h 时,对应区域温度,强制风冷在 705 kg/h 和 805 kg/h 时,中心区温度较自然对流 705 kg/h 和 805 kg/h 时对应区域温度低 110 K,可有效控制还原罐内温度。

2.4 TiCl_4 加入速度与反应区温度稳定过程模拟

试验模拟将冷却水带走热量和 MgCl_2 带走显热等效转化为罐壁散热。在强制风冷工况下 TiCl_4 加入速度为 505 kg/h 时,还原罐壁综合传热系数设定为 50

$W/(m^2 \cdot K)$, $TiCl_4$ 加入速度为 705 kg/h,取罐壁综合传热系数为 $150 W/(m^2 \cdot K)$,还原罐反应区温度-时间曲线模拟结果见图 6。由图 6a 可知,Mg 热还原反应罐反应区温度变化经历快速升高,随后降低,最后趋于稳定的变化。反应初期,反应区温度随时间延长快速上升, $TiCl_4$ 加入速度为 505 kg/h 时,反应 3.44 h 后, $TiCl_4$ 与 Mg 液界面温度达到峰值 1 358 K,随后,温度逐渐降低,在 16.67 h 后温度稳定在 1 262 K。 $TiCl_4$ 加入速度为 705 kg/h 时, $TiCl_4$ 与 Mg 液界面温度经历 1.67 h 后达到峰值 1 434 K,随后,温度逐渐降低,15.28 h 后温度稳定在 1 307 K(见图 6b)。可见, $TiCl_4$ 加入速度越大,由于反应区空间尺寸较小,反应温度达到稳定所需时间越短。

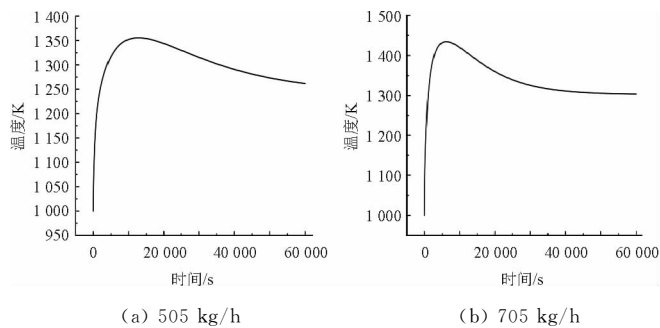


图 6 $TiCl_4$ 加入速度与反应区温度-时间曲线模拟结果
Fig.6 Simulation results of temperature-time curve with different feeding speeds

3 结 论

(1)绝热及自然对流工况下,还原罐内温度随 $TiCl_4$ 加入速度的增大而升高,加料速度为 705 kg/h 时,罐内温度比 505 kg/h 时高 180 K。

(2)强制风冷工况下, $TiCl_4$ 加入速度为 405、505、605、705、805 kg/h 时,罐内温度与自然对流工况(加料速度为 405 kg/h 时)温度场相近; $TiCl_4$ 加入速度为 705 kg/h,还原罐中心区温度为 1 400 K,罐壁温度为 351~1 120 K,与 13 t 大型还原罐现场实测结果一致。与自然对流工况相比,同等 $TiCl_4$ 加入速度中心区温度低 110 K。说明强制风冷可有效控制和改善还原罐内温度分布。

(3)镁热还原反应区温度变化经历快速升高、随后降低,最后趋于稳定的变化历程。反应初期,反应区温度随时间延长快速上升, $TiCl_4$ 加入速度为 505 kg/h 时,反应 3.44 h, $TiCl_4$ 与 Mg 液界面温度达到峰值 1 358 K,随后,温度逐渐降低,在 16.67 h 后温度稳定在 1 262 K; $TiCl_4$ 加入速度为 705 kg/h 时, $TiCl_4$ 与 Mg 液界面

温度经 1.67 h 后达到峰值 1 434 K,随后,温度逐渐降低,在 15.28 h 后温度稳定在 1 307 K。

参 考 文 献

- [1] 丁子文.海绵钛生产装备现状分析[J].中国金属通报, 2019(2): 118-120.
- [2] 盛卓,李开华,苗庆东,等.基于 Miedema 模型海绵钛的铁杂质来源研究[J].有色金属: 冶炼部分, 2019(6): 24-29.
- [3] 姜宝伟.攀钢全流程海绵钛工艺技术及其高品质生产[J].钢铁钒钛, 2020, 40(1): 164-168.
- [4] 何泽玉,李晓飞,牛丽萍,等.海绵钛副产品氯化镁高温气相氧化还原罐内流场的模拟研究[J].钛工业进展, 2019, 36(4): 36-42.
- [5] 任玉毅.海绵钛中杂质引入及控制研究[J].河南科技, 2018(22): 139-141.
- [6] 郑汝宁,张燕.海绵钛生产过程的能耗分析及新技术的提出[J].世界有色金属, 2018(3): 288-289.
- [7] 贾子松.海绵钛生产用 $TiCl_4$ 计量加料器的改进研究[J].中国设备工程, 2018(23): 74-76.
- [8] 陈百均.海绵钛生产对还原罐壁强制散热的探讨[J].湖南有色金属, 2018(4): 25-27.
- [9] 李金泽.一种镁法海绵钛生产液体氯化镁循环散热的探讨[J].湖南有色金属, 2018(3): 30-32.
- [10] 张瑶.还原液位控制对海绵钛生产的影响研究[J].轻金属, 2017(8): 47-50.
- [11] 胡耀强.海绵钛生产工艺综述[J].科技视界, 2016(8): 1-2.
- [12] 张静,陈德明,谢丽娟,等.基于 Fluent 软件对海绵钛反应器内部温度场的模拟[J].钛工业进展, 2013(5): 35-39.
- [13] 盛卓,李开华,苗庆东,等.7.5 t I 型炉海绵钛真空蒸馏生产工艺研究[J].钢铁钒钛, 2016, 36(6): 29-34.
- [14] 李亮,李开华,苗庆东,等.海绵钛生产过程还原周期影响因素研究[J].有色金属: 冶炼部分, 2015(8): 27-30.
- [15] 安鸿浩,吴复忠,金会心.镁热法生产海绵钛还原设备换热过程分析[J].有色金属: 冶炼部分, 2015(1): 34-36.
- [16] 邹建新.镁热法海绵钛生产中还蒸过程反应体系能量与传热分析[J].攀枝花科技与信息, 2015(4): 26-34.
- [17] 邹建新,王能为,杨成.镁热法生产海绵钛还原过程中的强化传热[J].轻金属, 2015(7): 41-47.
- [18] 陈松,肖素芬,王春明,等.攀枝花产海绵钛氢化脱氢动力学[J].功能材料, 2014(1): 11 123-11 125.

(编辑:刘晨辉)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com