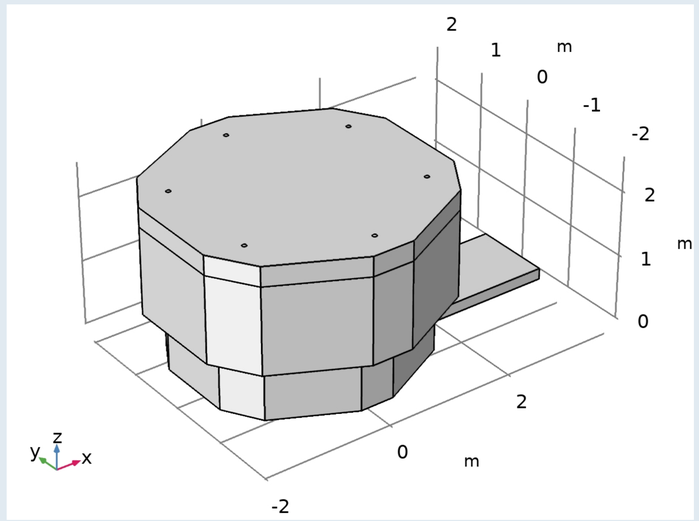
日用玻璃陶瓷电熔窑的数值模拟研究

Numerical Simulation of Electric Melting Furnace for Household Glass-ceramics

宋小姣　彭诚　叶贞杰　关康

华南理工大学 材料科学与工程学院，广州 510640



电-热-流多物理场耦合 | 30 t/d 全电熔窑三维模型 | 温度均匀性优化

一 研究背景 / Introduction

日用玻璃陶瓷外观乳白、易清洁，广泛用作餐具。全电熔窑是其生产中最重要的热工设备，依靠钼电极将电能转化为焦耳热直接加热玻璃液，熔制过程是决定产品质量的关键工序。窑内电场、温度场与流场强烈耦合：温度分布不均会引起玻璃液对流异常、熔制不充分，直接影响产品质量与窑炉寿命。传统设计依赖经验试凑，难以准确预测窑内工况，制约了日用玻璃陶瓷的高端化生产，亟需系统的多物理场数值模拟研究。

二 研究方法 / Methodology

基于 COMSOL Multiphysics 建立 30 t/d 全电熔窑三维多物理场耦合模型，包含三个物理场：① 电流（准静态）——计算电势与电流密度分布，焦耳热作为热源项；② 固体与流体传热——计算窑壁散热与玻璃液导热、对流；③ 层流——求解熔融玻璃液流动。主要控制方程如下：

电流场：$\nabla\cdot(\sigma\nabla\varphi)=0$　　焦耳热源：$Q=\sigma|\nabla\varphi|^2=J\cdot E$

能量方程：$\rho C_p(\partial T/\partial t+u\cdot\nabla T)=\nabla\cdot(\lambda\nabla T)+Q$

动量方程（层流）：$\rho(u\cdot\nabla)u=-\nabla p+\mu\nabla^2u+\rho g$

物性耦合：$\sigma=\sigma(T)$，$\mu=\mu(T)$

耦合方式：电场通过焦耳热源 Q 进入能量方程；温度通过 Boussinesq 浮力项驱动流动，并通过温度相关物性 σ(T)、μ(T) 反作用于电场与流场，实现电-热-流双向耦合。采用分离式求解器逐场迭代至收敛；经网格无关性验证，并以窑炉实测温度校核模型（相对偏差 < 10 %）。

三 结果与讨论 / Results and Discussion

- 模型验证：模拟温度与窑炉实测数据相对偏差 < 10 %，准确可靠
- 电场分布：电流集中于电极附近，电极表面电流密度 < 1 A/cm²
- 温度场：玻璃液整体稳定在 1300~1400 ℃，热点位于电极区
- 流场特征：窑内形成双环流结构（中心内环 + 电极外环），自然对流主导
- 工艺优化：电极位置 D = 0.4 m、配合料层厚度 t = 0.3 m 时温度最均匀

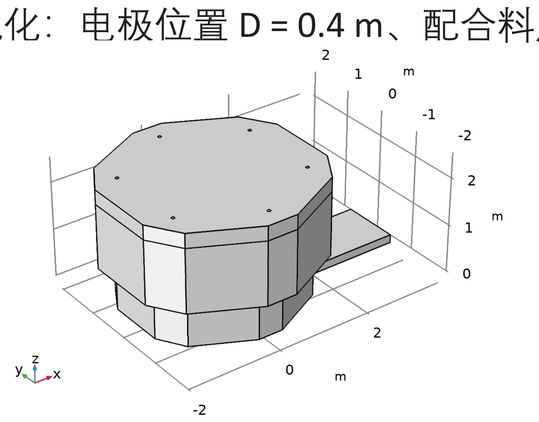


图1 30 t/d 全电熔窑三维几何模型

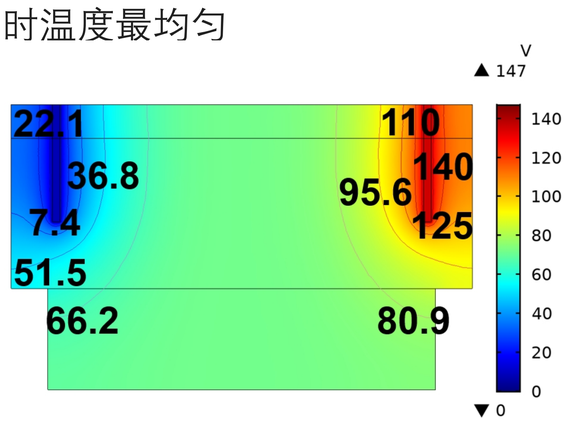


图2 窑体纵截面电势分布

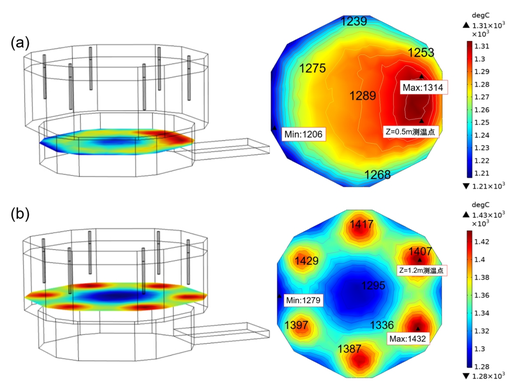


图3 Z = 0.5 m 与 Z = 1.2 m 截面温度场

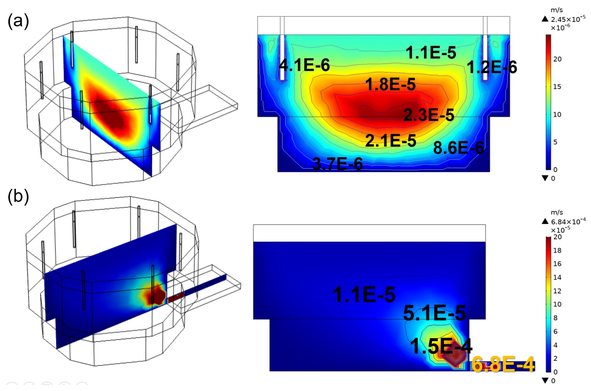


图4 X = 0 m 与 Y = 0 m 截面涡流分布

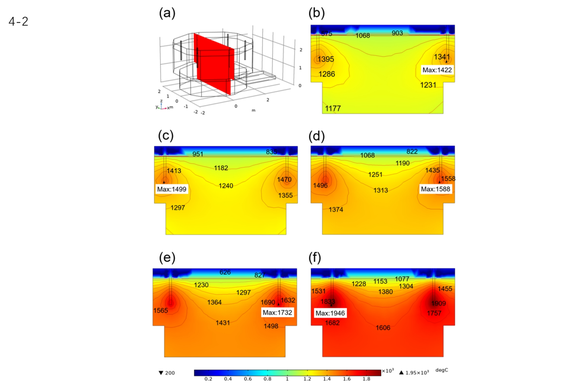


图5 不同钼电极位置 D 下的温度分布

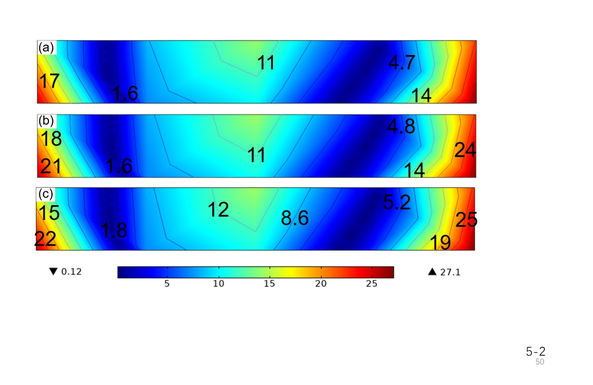


图6 壁面换热系数 k 对流液洞温度均匀性的影响

四 结论 / Conclusions

- 建立了经验证的 30 t/d 全电熔窑电-热-流双向耦合模型，可准确预测窑内多物理场分布
- 优化得到最佳工艺参数：电极位置 D = 0.4 m、配合料层厚度 t = 0.3 m
- 揭示了双环流形成机制：中心内环流加热配合料，电极外环流强化电极区传热
- 减小壁面换热系数、提高电压均可显著改善流液洞玻璃液温度均匀性
- 模型可直接指导全电熔窑电极布置与熔制工艺参数设计，为窑炉数字化设计提供工具