第 49 卷第 12 期
2021 年 12 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 12
December，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20210806

电助熔供能比例对电子玻璃熔化过程影响的数值模拟

曹志强[1,2]，韩建军[1]，张 冲[2]，李路瑶[1]，胡开文[1]，谢 俊[1]，朱明柳[2]

(1. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室，武汉 430070；
2. 中建材蚌埠玻璃工业设计研究院有限公司，安徽 蚌埠 233000)

摘 要：电子信息技术的快速发展推动超薄电子玻璃市场不断扩大，电子玻璃生产向大型化、薄型化和柔性化方向发展。开发适用于大吨位电子玻璃窑炉的综合供能方式及能量调控方法是实现高品质电子玻璃稳定量产的前提。采用数值模拟技术对电子玻璃窑炉在不同电助熔供能比例条件下的运行状态进行分析，探究了电助熔供能比例对玻璃液熔化质量、窑炉传热效率及电极工作环境的影响。结果表明：电助熔供能比例为 67.70%时，燃烧空间传热较少，维持池窑表面玻璃液高温状态的难度明显升高。池窑电极总功率采用 1 300~1 400 kW 及以上时，电极最大工作电流接近电极材料使用极限将导致电极侵蚀加剧。采用电助熔供能比例为 57.89%时，得到玻璃液熔化质量相对较优，可实现电子玻璃熔窑服役周期内高效稳定运行。

关键词：电子玻璃；电助熔；能量调控；数值模拟
中图分类号：TQ172　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)12–2809–08
网络出版时间：2021–11–22



Numerical Simulation of Glass Melting Process in Electronic Glass Furnace with Different Electric Energy Ratios

CAO Zhiqiang[1,2], *HAN Jianjun*[1], *ZHANG Chong*[2], *LI Luyao*[1], *HU Kaiwen*[1], *XIE Jun*[1], *ZHU Mingliu*[2]
(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;
2. CNBM Bengbu Design and Research Institute for Glass Industry Co., Ltd., Bengbu 233018, Anhui, China)

Abstract: Ultra-thin electronic glass becomes popular due to the rapid development of electronic information technology, and electronic glass tends to be large, thin and flexible. The development of comprehensive energy supply and energy regulation method for the large tonnage electronic glass furnace to ensure the melting quality of electronic glass is a premise of realizing the large-scale and stable production of high-quality electronic glass. In this paper, the operating state of electronic glass furnace with different electric power ratios was analyzed *via* numerical simulation. The influence of electric energy ratio on the glass melting quality, heat transfer efficiency and working environment of electrode was investigated. The results show that energy transferred from combustion space is obviously reduced at an electric energy ratio of 67.7%, and it is more difficult to gain the high-temperature glass at the surface of glass tank. Moreover, the maximum electric current density of electrodes is the serviceability limit of electrode materials in a total electric power range of 1 300–1 400 kW, greatly accelerating the electrode erosion. The better glass melting quality is obtained when an electric energy supply ratio is 57.89%. Moreover, the efficient and stable operation of electronic glass furnace during service period was obtained.

Keywords: electronic glass; electric boosting; energy regulation; numerical simulation

电子信息技术的快速发展使得用于光电显示器件的超薄电子玻璃市场不断扩大，电子玻璃生产向大型化、薄型化和柔性化方向发展[1]。目前可以大规模生产高品质电子信息显示玻璃的公司，主要有美国康宁、日本旭硝子、电气硝子等公司，其生产线以生产 8.5 代基板玻璃为主。由于电子显示产品

收稿日期：2021–09–12。　修订日期：2021–10–29。
基金项目：浮法玻璃新技术国家重点实验室开放课题基金资助(2020KF10)；中央高校基本科研业务费专项资金资助(2020IVA095)。
第一作者：曹志强(1983—)，男，硕士研究生，高级工程师。
通信作者：韩建军(1970—)，男，博士，研究员。

Received date: 2021–09–12.　**Revised date:** 2021–10–29.
First author: CAO Zhiqiang (1983–), male, Master candidate, Senior Engineer..
E-mail: caozq@ctiec.net
Correspondent author: HAN Jianjun (1970–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: hanjj@whut.edu.cn

的大型化发展趋势，目前新建的 10.5 代/11 代线也不断增多。国内电子玻璃生产起步较晚，凯盛集团、彩虹集团和东旭集团等公司通过自主创新和集成创新，以及中外合资等方式先后建立了 5 代、6 代和 8.5 代玻璃基板生产线[2–3]，然而高品质电子玻璃的主流市场仍被国外电子玻璃产商所垄断。2018 年，中国建材集团采用自主研发的浮法生产线成功实现 0.12 mm 超薄玻璃下板[4]。但目前国内电子玻璃产能低，用于高端信息显示的电子玻璃尚未形成大规模稳定量产，远不能满足我国信息显示行业对高品质电子玻璃的需求。

采用浮法工艺能够满足多种厚度和板宽规格的基板玻璃生产，且单线产能较大，可实现基板玻璃的高效制备。然而目前应用的电子玻璃组成以无碱铝硼硅玻璃为主，该玻璃熔融温度高、黏度大、玻璃液澄清困难。窑炉作为供应优质玻璃液的关键结构，实现大尺寸基板玻璃高效制备对窑炉熔化能力也提出了更高要求。而且基板玻璃对玻璃液的均匀性要求极高，目前尚无相关理论指导电子玻璃窑炉设计。针对高熔化温度电子玻璃窑炉结构设计和工艺优化的研究，因属于高机密垄断技术，相关研究文献报道较少。因此开发设计适用于大吨位玻璃熔化的电子玻璃窑炉，保证电子玻璃熔化澄清质量是实现高品质电子玻璃大规模稳定量产的前提[5]。

电子玻璃窑炉主要采用全氧燃烧和电辅助加热综合供能，窑炉内热场、流场、电场之间相互耦合作用，最终决定窑炉内玻璃液熔化过程[6]。窑炉内电熔技术的引入可明显提高玻璃液温度，加快玻璃液流循环，对于促进电子玻璃充分熔化有重要作用[7–8]。而燃料燃烧供能热量由池窑表面向池底方向传递，池窑表面玻璃液温度较高，可加快配合料层熔化，及形成沿池窑深度方向的温度梯度促进玻璃液对流循环，加快气泡澄清。结合全氧燃烧和电辅助加热综合供能的电子玻璃窑炉结构形式，协调电熔系统产生的强制玻璃液对流与池窑内玻璃液自然对流的相互作用，力求促进玻璃液的充分熔化，这些是电子玻璃窑炉设计时必须突破的技术难题[9]。

数值仿真技术作为研究玻璃熔窑运行状态的一种有效手段，可直观反映电子玻璃在燃料燃烧、电熔技术等综合供能条件下玻璃液的温度分布和液流状态，进一步分析玻璃液在热场、流场、电场等物理场耦合作用下的熔化过程[10–11]。

本研究采用数值仿真技术对采用全氧燃烧和电熔技术的大吨位电子玻璃熔窑运行状态进行模拟，研究不同燃料供能和电能比例对窑炉传热过程，及池窑内玻璃液温度分布和液流状态的影响，探究实现电子玻璃高效熔化及窑炉稳定运行的能量调控方法，为高品质电子玻璃的稳定量产提供理论指导。

1 生产参数及数值模型

1.1 熔窑生产参数

基于日熔化量为 45 t 的电子玻璃熔窑构建数值模型。窑炉熔制玻璃为无碱铝硼硅玻璃，建模所需的玻璃液性质参数见表 1 所示。玻璃配合料中碎玻璃含量(质量分数)为 30%。窑炉燃烧空间以天然气为燃料，氧气助燃。燃烧空间采用 4 对喷枪，燃料分配比例依次为 26%、28%、28%、18%，窑炉两侧 4 对喷枪采用错位排布安装进行燃料燃烧供能。池窑底部安装有 5 排电极辅助供能，每排 6 支电极，电极电功率均匀分配。各模型消耗的燃气量和电助熔总功率如表 2 所示。

表 1 玻璃液热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of molten glass

Density/(kg·m^{-3})	Kinematic viscosity/(m^2·s^{-1})	Specific heat/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Effective thermal conductivity/(W·m^{-1}·K^{-1})	Electrical conductivity/(Ω^{-1}·m^{-1})
$2\,522.2 - 0.081\,1 \cdot T$	$e^{-22.62 + 32\,552/T}$	$922.47 + 0.27 \cdot T - 5.98 \times 10^{-5} \cdot T^2$	$0.74 + 0.000\,89 \cdot T - 2.44 \times 10^{-8} \cdot T^2 + 3.49 \times 10^{-8} \cdot T^3$	$e^{3.81 - 2\,518.17/(T - 580.36)}$

T is temperature of liquid glass.

表 2 各模型燃料消耗量和电助熔总功率

Table 2 Fuel supply and electric power in each case

Model number	Fuel consumption/(Nm^3·h^{-1})	Electric power/kW
Case 1	332.5	900
Case 2	315.0	1 000
Case 3	297.5	1 100
Case 4	280.0	1 200
Case 5	262.5	1 300
Case 6	245.0	1 400

1.2 数值模型

1.2.1 数学模型　采用 Glass Furnace Model 软件构建电子玻璃窑炉模型，文献[12]进行模型选择和参数设定以对模型涉及的燃烧、熔化、对流、电加热等复杂过程进行计算。模型计算过程中需求解的控制方程如下：

质量守恒方程：

$$\partial\rho/\partial t+\nabla(\rho\cdot V)=0 \tag{1}$$

动量守恒方程：

$$\partial(\rho\cdot V)/\partial t+\nabla(\rho\cdot V\cdot V)=-\nabla P+\nabla(\mu\cdot\nabla V)+\rho g+F_v \tag{2}$$

能量守恒方程：

$$\partial(\rho H)/\partial t+\nabla\cdot(\rho H\cdot V)=\nabla(\lambda/C_p\cdot\nabla H)+\nabla(q_c+q_r)+Q_J \tag{3}$$

其中：ρ 为流体密度；V 为流体速度；P 为流体所受压力；μ 为流体黏度；F_v 为流体作用力；H 为热焓；λ 为导热系数；C_p 为热容；q_c+q_r 为热传导和热辐射热流，Q_J 为电加热热源。

1.2.2 电助熔模型　电助熔模型中采用 Maxwell 电磁场定律对玻璃液电场进行计算，需求解的控制方程如下。

其中，电势计算公式如下：

$$\nabla\cdot\sigma\nabla\varphi=0 \tag{4}$$

电流密度计算公式如下：

$$J=\sigma\nabla\varphi \tag{5}$$

$$\nabla\varphi=\nabla\varphi_{re}+\nabla\varphi_{im} \tag{6}$$

单位体积玻璃液内部产生 Joule 热功率如下：

$$Q_J=\frac{1}{2}\sigma(|\varphi_{re}|^2+|\varphi_{im}|^2) \tag{7}$$

式中：σ 为玻璃液电导率；φ 为玻璃液电势；φ_{re} 为玻璃液电势的实部；φ_{im} 为玻璃液电势的虚部；Q_J 为单位体积玻璃液内产生的 Joule 热功率。

1.3 模型边界条件

电子玻璃窑炉模型中边界条件设置见表 3 所示。

表 3　模型边界条件设置

Table 3　Boundary conditions in glass furnace model

Boundary condition position	Fuel inlet of burner	Oxygen inlet	Exhaust outlet	Batch inlet	Glass outlet	Insulation surface of glass furnace
Boundary condition type	Mass flow inlet	Mass flow inlet	Mass flow outlet	Mass flow inlet	Mass flow outlet	Natural convection heat transfer
Boundary condition	V_{fuel} calculated according to fuel consumption, T_0=30 ℃	V_{oxygen} calculated according to oxygen supply, T_0=30 ℃	$V_{exhaust}$= –(V_{fuel} +Vo_{xygen})	V_{batch} =0.56612 kg/s, T_0=40 ℃	V_{glass} = –0.520 83 kg/s	Ambient temperature T_a=30 ℃

V_{fuel} is mass flow rate of fuel inlet; T_0 is initial temperature of fuel/ oxygen/ batch; V_{oxygen} is mass flow rate of oxygen inlet; $V_{exhaust}$ is mass flow rate of exhaust outlet, and the negative value representatives the outlet boundary; V_{batch} is mass flow rate of batch materials; V_{glass} is mass flow rate of glass outlet; T_a is ambient temperature.

2 模拟结果与讨论

2.1 燃烧空间温度分布和传热分析

为探讨各模型中燃料燃烧供能和电能比例对池窑内玻璃液温度分布和液流循环的影响，各模型中池窑获得总能量输入，即燃烧空间辐射/对流传递能量与电助熔提供能量总和基本维持不变。计算得到各模型中燃烧空间传递能量、电助熔提供能量，及两种不同能量比例见表 4 所示。

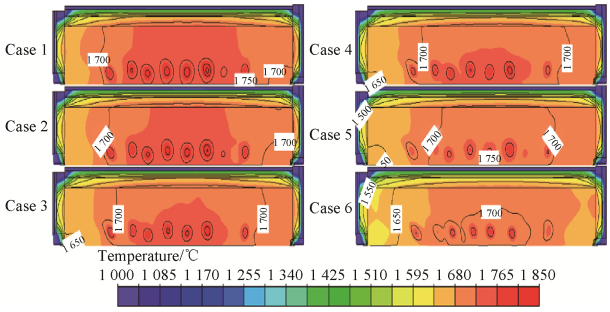
表 4　各模型燃烧空间传递能量和电助熔提供能量

Table 4　Energy supplied by combustion space and electric boosting systems

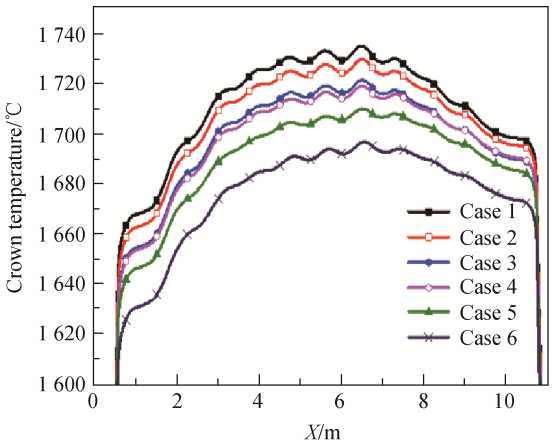
Model number	Heat transferred from combustion space/kW	Electric boosting energy/kW	Ratio of electric energy to total energy at glass tank/%	Energy transfer efficiency of combustion space/%
Case 1	1 166	900	43.56	37.02
Case 2	1 074	1 000	48.22	35.99
Case 3	976	1 100	52.99	34.63
Case 4	873	1 200	57.89	32.92
Case 5	771	1 300	62.77	31.01
Case 6	668	1 400	67.70	28.78

各模型中随着电助熔供能比例增加，燃料消耗量减少，燃烧空间向玻璃池窑传递的能量减少，能量传递效率也明显降低。燃烧空间向玻璃池窑传递能量包括碹顶耐火材料和火焰的辐射

传热，以及燃烧烟气流动带来的对流传热，其中传递热量总量与燃烧空间和池窑的温度相关。图 1a 为各模型燃烧空间中心对称面的温度分布图，电子玻璃窑炉燃烧空间燃料消耗量减少，燃烧空间碹顶耐火材料、火焰及烟气的温度均明显降低，导致燃烧空间向池窑玻璃液和配合料层的辐射和对流传热能力下降，燃烧空间向池窑的传热总量和传热效率也降低。图 1b 为各模型碹顶中心线温度，模型 Case 1 到 Case 6，碹顶中心线温度降低约 40 ℃，碹顶最高温度由 1 735 ℃降低至 1 696 ℃。燃烧空间温度降低可大大减缓高温对碹顶等耐火材料的腐蚀，以及高温烟气对胸墙耐火材料的冲刷，有助于延长熔窑燃烧空间耐火材料的服役周期。



(a) Symmetry plane



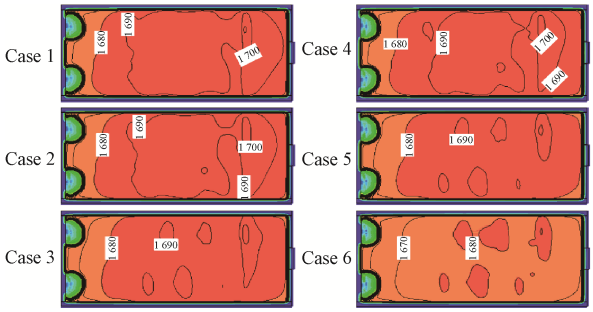
(b) Center line of crown refractory

图 1 燃烧空间温度分布

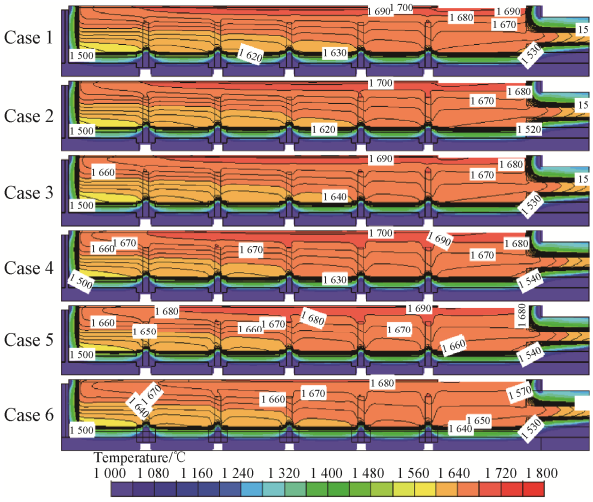
Fig. 1 Temperature field at combustion space

2.2 玻璃池窑温度分布

图 2 为各模型池窑表面和池窑中心对称面玻璃液温度。图 3 为池窑表面和池底中心线玻璃液温度曲线及表面和池底温差。如图 2 和图 3 所示，各模型中池窑表层玻璃液温度较高，底层玻璃液温度较低，玻璃液温度沿池深方向呈逐渐降低趋势。且各模型随着燃料供能比例减少，燃烧空间向池窑传递热量减少，模型 Case 1 到 Case 5 池窑表面玻璃液温度逐渐降低，模型 Case 5 相比 Case 1 降低约 7 ℃。其中模型 Case 6 玻璃液面温度显著降低，相比于 Case 1 降低约 15 ℃。结果表明：模型 Case 6 采用 67.70%电助熔供能，燃烧空间向玻璃池窑传递能量较少，维持池窑表面玻璃液高温状态的难度显著增加。



(a) Glass level



(b) Symmetry plane

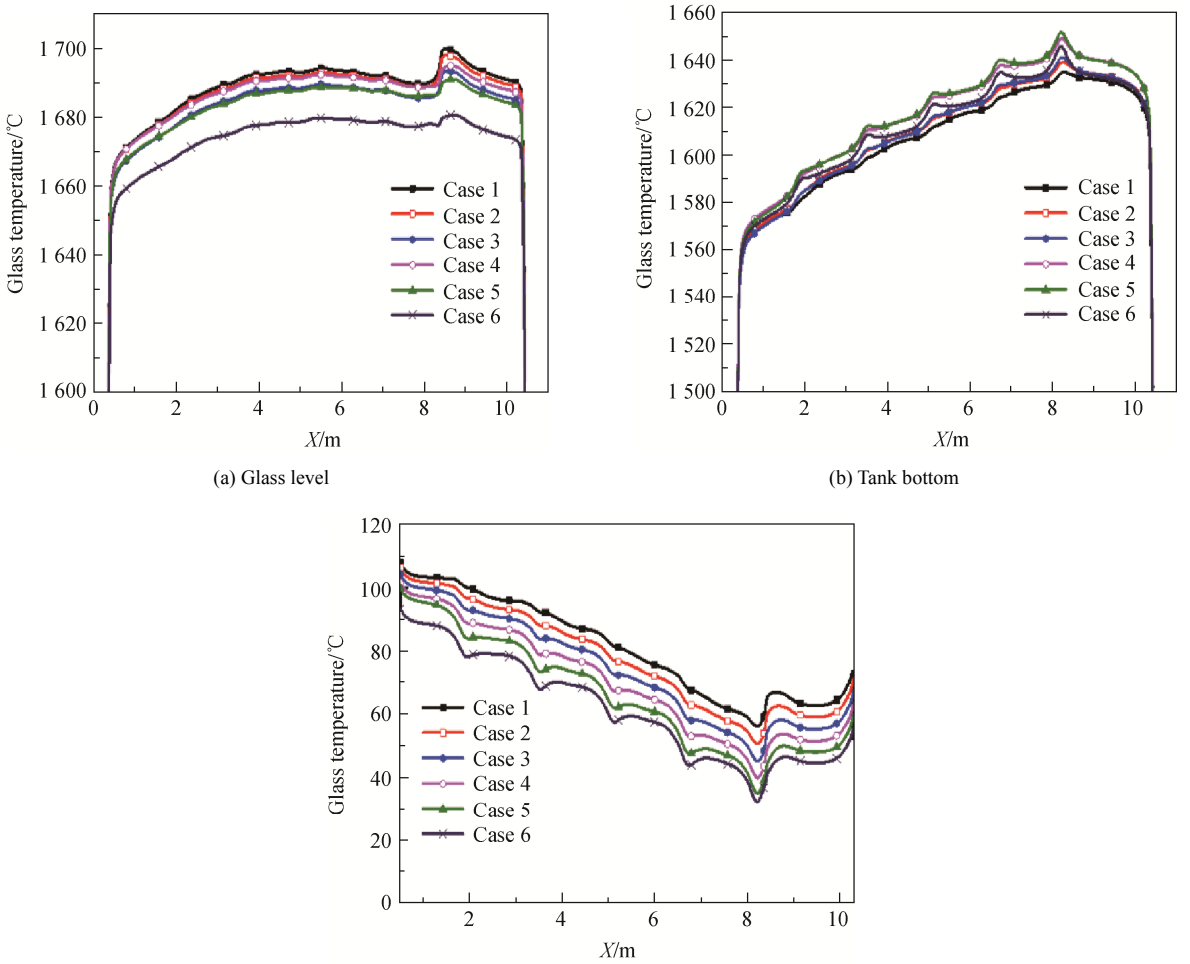
图 2 玻璃池窑温度分布

Fig. 2 Temperature contour at glass tank

而模型 Case 1 到 Case 5 电助熔供能比例增加，电加热对池窑底层玻璃液加热效果显著，池底玻璃液温度逐渐升高约 16 ℃。模型 Case 6 由于池窑表面玻璃液温度明显降低，表层高温玻璃液向池底传热的能力急剧下降，导致 Case 6 池底玻璃液温度相比 Case 5 降低约 6 ℃。综合燃烧空间传热和电助熔加热对池窑内玻璃液温度的影响，模型 Case 4 和 Case 5 玻璃液高温区域范围较大。

对比各模型池窑表面和池底温差，电助熔供能比例增加，池窑表面和池底玻璃液温差逐渐减小。模型 Case 1 池窑表面和池底玻璃液之间温差范围约

为 56~108 ℃，模型 Case 6 池窑表面和池底玻璃液之间温差范围约为 32~93 ℃，模型 Case 6 池窑温差相比 Case 1 减少约 20 ℃。且相比于普通建筑玻璃池窑熔化部表面和池底玻璃液之间 200~300 ℃的温差[8]，电子玻璃池窑采用了较高比例电助熔供能，其池窑表面和池底玻璃液之间温差明显减小。



(a) Glass level　(b) Tank bottom

(c) Temperature difference between glass level and tank bottom

图 3　玻璃液温度曲线

Fig. 3　Glass temperature curve

2.3　玻璃池窑流场

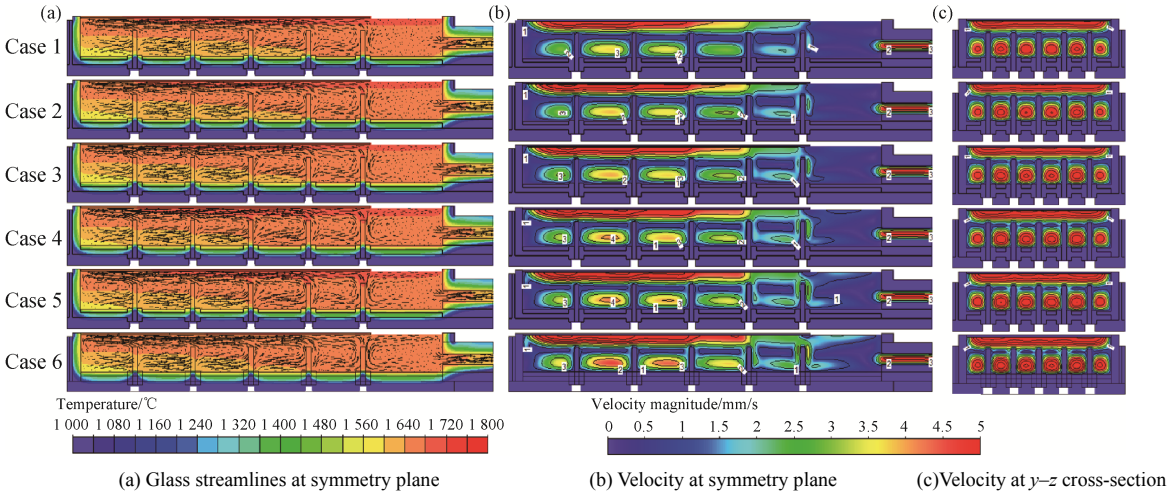
图 4 为各模型池窑中心对称面玻璃液流线分布和速度分布。模型 Case 1 到 Case 6 池窑表层和底层玻璃液温度梯度逐渐减小，不利于池窑内玻璃液自然对流形成。然而由于各模型中电助熔供能比例增加，电极周围形成的由池底流向池窑表面的强制玻璃液对流加剧，如图 4 所示。此时电助熔形成的强制玻璃液对流占主导，电极区域末端和流液洞之间区域玻璃液流速也随电助熔供能比例增加而增大，池窑整体玻璃液对流循环明显加快。

表 5 为计算得到各模型玻璃液平均流速，Case 1 到 Case 6 玻璃液平均速率快速增大，由 2.02 mm/s 增加至 2.57 mm/s。其中电极区域由池底流向池窑表面的上升速率显著增大可带动池底气泡上浮，加快玻璃液澄清。

然而，如图 4c 所示，Case 5 和 Case 6 电助熔功率为 1 300 kW 和 1 400 kW 时，电极区域池窑玻璃液横向对流加快，部分电极所处位置玻璃液流速显著增大，加快电极材料侵蚀，缩短电极使用寿命。

池窑内电极功率增加及玻璃液流速增大也会加快电极材料侵蚀，须严格控制电极材料工作电流/焦耳热功率[13]。统计各模型电极最大工作电流密度和最大焦耳热密度，模型 Case 1 到 Case 6 电助熔功率由 900 kW 增加至 1 400 kW，池窑内电极最大工作电流密度由 0.52 A/cm^2 增加至 0.65 A/cm^2，电极最大焦耳热功率密度也由 1 900 kW/m^3 增加至 3 000 kW/m^3。窑炉采用的氧化锡电极可承受最大工作电流密度为 0.70 A/cm^2 [14]，模型 Case 5 和 Case 6 电极最大工作

电流接近氧化锡电极材料服役极限，需严格控制电极工作电流，避免加快电极材料侵蚀。



(a) Glass streamlines at symmetry plane (b) Velocity at symmetry plane (c)Velocity at y–z cross-section

图 4 玻璃液流线分布和速度分布

Fig. 4 Glass streamlines and velocity fields

表 5 各模型玻璃液平均速度和上升速率

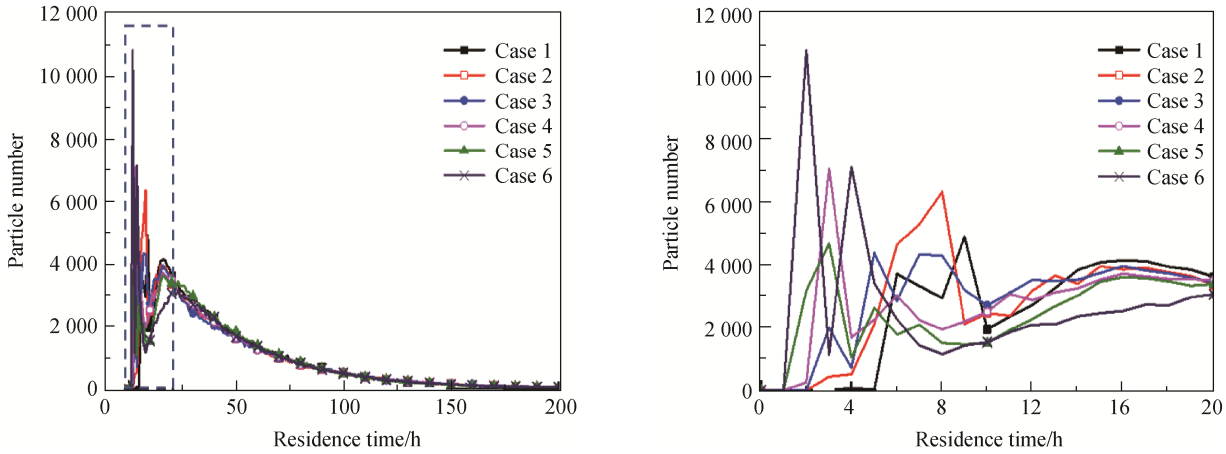
Table 5 Glass average velocity V and V_z in each case

Model number	V/(mm·s^{-1})	I_{max}/(A·cm^{-2})	J_{max}/(kW·m^{-3})
Case 1	2.02	0.52	1 900
Case 2	2.09	0.55	2 100
Case 3	2.06	0.58	2 300
Case 4	2.28	0.60	2 500
Case 5	2.35	0.65	2 800
Case 6	2.57	0.65	3 000

V is average velocity of glass flow; I_{max} is maximum electric current density; J_{max} is maximum Joule heat density.

2.4 玻璃液熔化质量分析

为进一步分析电助熔供能比例对池窑内玻璃液熔化过程的影响，采用示踪粒子追踪玻璃液由投料口到流液洞的流动路径，记录示踪粒子在池窑停留时间，及示踪粒子在不同位置的温度和流速。统计各模型玻璃液示踪粒子停留时间分布，如图 5 所示。表 6 为计算得到各模型玻璃液最小停留时间、最小质量因子和平均停留时间、平均质量因子。模型 Case 1 到 Case 6 各模型池窑体积和玻璃液熔化量不变，统计得到玻璃液平均停留时间也基本不变。然而，模型 Case 1 到 Case 6 玻璃液在池窑内对流循环速度不断增大，一部分移动较快的示踪粒子在池窑内的流动速度也增大，导致这部分玻璃液粒子到达出口的时间缩短，如图 5 所示，模型 Case 1 到 Case 6 中停留时间小于 10 h 的示踪粒子数量明显增多，统计得到玻璃液在池窑内的最小停留时间也迅速缩短由 6.77 h 减少至 2.44 h。



(a) Residence time distribution (b) Enlarged view of dotted box

图 5 玻璃液示踪粒子停留时间分布

Fig. 5 Residence time distribution of glass particles

表 6　各模型玻璃液停留时间和质量因子

Table 6　Glass residence time and quality indexes in each case

Model number	Minimum residence time/h	Average residence time/h	Minimum melting index× 10^{-6}	Average melting index×10^{-6}	Minimum fining index×10^{-6}	Average fining index×10^{-6}	Minimum mixing index	Average mixing index
Case 1	6.77	48.30	6.39	44.72	4.12	26.95	2.90	32.32
Case 2	5.85	48.21	5.57	45.16	3.68	27.82	2.73	33.07
Case 3	3.98	48.21	3.55	44.65	2.22	26.78	2.39	33.75
Case 4	3.20	48.22	2.95	46.94	1.95	31.06	2.16	35.11
Case 5	2.94	48.26	2.66	46.60	1.70	30.27	2.06	35.94
Case 6	2.44	48.33	2.53	54.49	1.24	27.56	1.86	38.32

图 6 为具有最小停留时间的示踪粒子在池窑内流动路径，相邻粒子之间的时间间隔为 10 min。受电极区域玻璃液对流影响，各模型中示踪粒子在电极区域范围内移动速度均较大，电极区域之后示踪粒子移动速度变慢。对比不同模型，随着 Case 1 到 Case 6 池窑整体玻璃液对流强度增加，具有最小停留时间的示踪粒子在池窑内流动速度增大，其中，示踪粒子在电极区域与流液洞之间范围内流动明显加快，最终导致玻璃液在池窑内最小停留时间明显缩短。

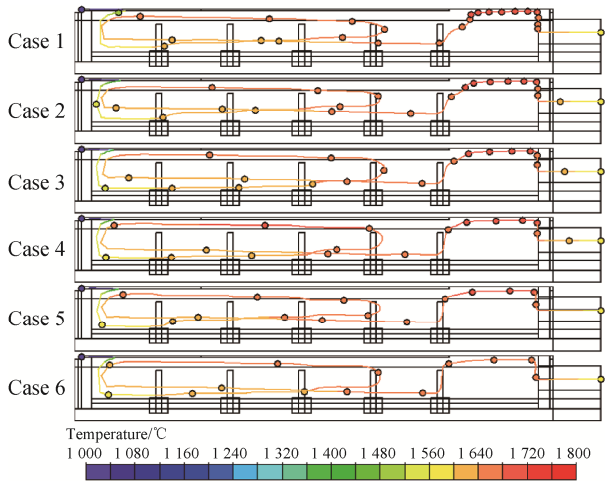


图 6　具有最小停留时间的示踪粒子在池窑内流动路径

Fig. 6　Trajectories of glass particles with minimum residence time

池窑内决定玻璃液熔化质量的影响因素众多，停留时间、熔化温度、玻璃液对流强度等都对玻璃液熔化质量有重要影响。综合各因素影响，采用式(8)~式(10)分别计算玻璃液熔化质量因子、澄清质量因子和均化质量因子，以评估玻璃液熔化、澄清、均化质量[12, 15]。

熔化质量因子：

$$M_{\mathrm{melt}}I=\int_0^{t_{\mathrm{end}}}\frac{T}{\mu}d\tau \tag{8}$$

式中：T 为玻璃液温度；μ 为玻璃液黏度；t_{end} 为玻璃液在池窑内的停留时间。

澄清质量因子：

$$F_{\mathrm{fin}}I=\int_0^{t_{\mathrm{end}}}\frac{(T-T_{\mathrm{fining}})^b}{\mu^c}d\tau(T>T_{\mathrm{fining}}) \tag{9}$$

其中：T_{fining} 为玻璃液澄清的起始温度，取 1 600 ℃；b 和 c 分别为温度和黏度对玻璃液澄清过程的影响指数，b 和 c 分别取 1.5 和 0.5。

均化质量因子：

$$M_{\mathrm{mix}}I=\int_0^{t_{\mathrm{end}}}\frac{4\|\mathrm{grad}v\|^{2/3}\cdot D_{\mathrm{r}}^{1/3}}{3(d^{2/3})}\mathrm{d}\tau\cdot \tag{10}$$

式中考虑了不均质的扩散系数、尺寸及其在池窑内的停留时间，玻璃液对流强度对玻璃液均化质量的影响。其中$\|\mathrm{grad}\ v\|$为玻璃液粒子局部的速度梯度；D_{r} 为池窑内不均质的扩散系数，玻璃液中常见的不均质组成主要有 Al_2O_3、SiO_2 和 ZrO_2，取这 3 种代表性不均质在玻璃液中的扩散系数均值 $1.5\times10^{-12}\ m^2/s$；d 为不均质的直径，厘米级的不均质条纹对玻璃液均匀性影响较大，通过玻璃液局部扩散消失耗费时间较长，研究对直径 0.01 m 不均质条纹在池窑内的均化效果进行讨论[12,15]。

式(8)~式(10)中各项质量因子均与玻璃液在池窑内的停留时间呈正比，各项质量因子数值越大，表明玻璃液相应质量越好。如表 6 所示，随着模型 Case 1 到 Case 6 玻璃液最小停留时间缩短，计算得到玻璃液最小熔化质量因子、最小澄清质量因子和最小均化质量因子均逐渐减小，表明这部分玻璃液粒子在池窑内的熔化、澄清、均化质量均逐渐降低。其中，模型 Case 5 和 Case 6 由于玻璃液最小停留时间缩短，计算得到玻璃液最小熔化质量因子和最小澄清质量因子均显著减小，不利于玻璃液充分熔化、澄清。

对比各模型玻璃液平均质量因子，模型 Case 4 和 Case 5 由于玻璃液高温区域范围较大，计算得到

玻璃液平均熔化质量因子和平均澄清质量因子均较大。且由于 Case 4 和 Case 5 池窑采用电助熔产生的强制玻璃液对流强度相对较大，玻璃液流速率梯度较大，计算得到玻璃液平均均化质量因子也较大。结果表明：模型 Case 4 和 Case 5 池窑玻璃液平均熔化、澄清、均化质量相对较优。综合对比各模型玻璃液熔化质量、熔窑传热效率及电极工作电流、电极周围玻璃液流速等因素，模型 Case 4 采用电助熔供能比例为 57.89%时，得到玻璃液熔化质量相对较优，且可保证熔窑传热效率及电极服役周期，实现电子玻璃熔窑服役周期内高效稳定的工作状态。

3 结论

1) 窑炉采用电助熔供能比例增加，燃烧空间和池窑表面玻璃液温度均降低，燃烧空间传热效率也明显下降；电助熔供能比例为 67.70%时，燃烧空间传热较少，维持池窑表面玻璃液高温状态的难度明显增大。

2) 窑炉采用电助熔供能比例增加，池窑表面和池底玻璃液温差不断下降，池窑玻璃液存在的自然对流强度变弱，电助熔形成的强制对流占主导，池窑整体对流循环速度增加，玻璃液在池窑最小停留时间缩短。

3) 池窑电极总功率采用 1 300~1 400 kW 及以上时，电极周围玻璃液流速显著加快，且电极最大工作电流接近电极材料使用极限将导致电极侵蚀加剧，缩短电极材料服役寿命。

4) 采用电助熔供能比例为 57.89%时，得到玻璃液熔化质量相对较优，且可保证熔窑传热效率及电极服役周期。

参考文献:

[1] 李娜, 苗向阳, 黄小楼, 等. 电子玻璃产业发展及检测现状[J]. 新材料产业, 2020(1): 17–19.
LI Na, MIAO Xiangyang, HUANG Xiaolou, et al. Adv Mater Ind (in Chinese), 2020(1): 17–19.

[2] 李绍丰, 施占国, 樊进军. 开发 TFT–LCD 用玻璃基板技术思考[J]. 玻璃, 2013, 40(6): 22–26.
LI Shaofeng, SHI Zhanguo, FAN Jinjun. Glass (in Chinese), 2013, 40(6): 22–26.

[3] 刘志海. 我国超薄玻璃发展历程浅析[J]. 玻璃, 2020, 47(8): 9–14.
LIU Zhihai. Glass (in Chinese), 2020, 47(8): 9–14.

[4] 孙振. 蚌埠成功生产 0.12 mm 超薄电子触控玻璃[N]. 人民日报, 2018-4-27(12).
SUN Zhen. People's daily (in Chinese), 2018-4-27(12).

[5] GB/T 20314—2017. 液晶显示器用薄浮法玻璃[S]. 全国工业玻璃和特种玻璃标准化技术委员会, 2017.
GB/T 20314—2017. Thin float glass for liquid crystal display (LCD) applications (in Chinese) [S]. Beijing: National Technical Committee for standardization of industrial glass and special glass, 2017.

[6] 闫兰飞. 200t/d 高铝电子玻璃熔窑电助熔技术工程仿真研究[D]. 燕山大学, 2016.
YAN Lanfei. Engineering simulation research of 200 t/d high-aluminum electronic glass in an electric boost melting furnace (in Chinese, dissertation). Qinhuangdao: Yanshan University, 2016.

[7] LI H, XING Z, XU S, et al. 3D simulation of borosilicate glass all-electric melting furnaces [J]. J Am Ceram Soc, 2014, 97(1): 141–149.

[8] LI L, LIN H-J, HAN J, et al. Three-dimensional glass furnace model of combustion space and glass tank with electric boosting [J]. Mater Transact, 2019, 60(6): 1034–1043.

[9] 何怀胜, 王小虎, 李震. 平板显示基板玻璃窑炉能量技术分析及运行管理[J]. 玻璃, 2019, 46(10): 32–34.
HE Huaisheng, WANG Xiaohu, LI Zhen. Glass (in Chinese), 2019, 46(10): 32–34.

[10] VISKANTA R. Review of three-dimensional mathematical modeling of glass melting [J]. J Non-Cryst Solids, 1994, 177: 347–362.

[11] ABBASSI A, KHOSHMANESH K H. Numerical simulation and experimental analysis of an industrial glass melting furnace [J]. Appl Thermal Eng, 2008, 28(5/6): 450–459.

[12] 彭寿, 陈淑勇, 马立云, 等. 卡脖宽度对玻璃熔窑能耗及运行质量影响的模拟[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 1–9.
PENG Shou, CHEN Shuyong, MA Liyun, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 1–9.

[13] 蒋亚丝. 光学玻璃进展(9): 二氧化锡电极[J]. 玻璃与搪瓷, 2019, 47(1): 49–55.
JIANG Yasi. Glass Enamel (in Chinese), 2019, 47(1): 49–55.

[14] 王保平, 沈玉国, 刘文瑞. TFT 基板玻璃窑炉用电极对比分析[J]. 玻璃搪瓷与眼镜, 2020, 48(4): 48—53.
WANG Baoping, SHEN Yuguo, LIU Wenrui. Glass Enamel Ophth Opt (in Chinese), 2020, 48(4): 48–53.

[15] Glass Furnace Model 4. 17 User's guide [M]. Vsetín: Glass Service Inc. 2015.