第 48 卷第 2 期
2020 年 2 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 2
February，2020

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190485

玻璃熔窑池底多排鼓泡技术的数值模拟

陈淑勇[1,2]，彭 寿[1,2,3]，马立云[1,2]，朱雪梅[1,2]，陶天训[2]，王 东[1,2]，左泽方[2,3]

(1. 浮法玻璃新技术国家重点实验室，安徽 蚌埠 233000；2. 中建材蚌埠玻璃工业设计研究院有限公司，安徽 蚌埠 233000；
3. 中国建材国际工程集团有限公司，上海 210070)

摘 要：利用 GFM(Glass Furnace Model)软件，对瓶罐马蹄焰玻璃熔窑进行了数值建模，模拟研究了熔窑池底多排鼓泡技术的应用效果。根据熔化部池底设置 1~3 排池底鼓泡工况下的 GFM 模拟结果，分析了池底多排鼓泡技术对熔窑内玻璃液温度与液流分布、热效率及玻璃液质量的影响，发现池底多排鼓泡技术对提高熔窑热效率、玻璃液质量以及熔化率具有显著作用。

关键词：玻璃熔窑；多排鼓泡；数值模拟；熔化率；热效率
中图分类号：TQ171 **文献标志码**：A **文章编号**：0454–5648(2020)02–0147–08
网络出版时间：2019–12–13

Simulation of Multi-Row Forced Bubbling for Glass Furnace

CHEN Shuyong[1,2], *PENG Shou*[1,2,3], *MA Liyun*[1,2], *ZHU Xuemei*[1,2], *TAO Tianxun*[2], *WANG Dong*[1,2], *ZUO Zefang*[2,3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Float Glass, Bengbu 233018, Anhui, China;
2. CNBM Bengbu Design and Research Institute for Glass Industry Co., Ltd., Bengbu 233018, Anhui, China;
3. China Triumph International Engineering Co., Ltd., Shanghai 210070, China)

Abstract: An end-port furnace for container glass was simulated *via* the glass furnace model (GFM) software, and the performance of multi-row forced bubbling was analyzed. The influence of multi-row bubbling on the temperature and circular flow distribution of glass melt, furnace heat efficiency, glass quality was discussed according to the simulation results of furnaces with 1 to 3 rows of forced bubbling at melter bottom. It is indicated that the multi-row bubbling technique for glass furnace could enhance the heat efficiency, glass quality and melting rate of the furnace.

Keywords: glass furnace; multi-row forced bubbling; numerical simulation; melting rate; heat efficiency

随着社会经济的飞速发展，环境保护与资源高效利用愈发重要。玻璃行业作为传统的高耗能、高污染行业，其耗能与排放主要集中于玻璃熔窑部分，因此，玻璃熔窑的节能降耗日趋迫切。出现于 20 世纪 50 年代的鼓泡技术，因其具有显著的搅拌、促进熔化等作用以及改善火焰与玻璃液间的热交换效果，在多种玻璃熔窑上得到了广泛应用[1–4]。

鼓泡技术作为一种有效的强制熔化技术，可有效促进玻璃液均化、改善各层玻璃液间的热量传递，同时具有成本低廉的优势。鉴于鼓泡技术的重要作用，国内外学者开展了大量研究工作，以深入理解鼓泡对窑内玻璃液温度场、流场分布的影响。Pchelyakov 等[5]理论分析了鼓泡对玻璃液流的影响，给出了鼓泡喷嘴的布置要求，阐述了鼓泡对熔窑熔化率的提高作用。Ungan 等[6]建立了玻璃熔窑鼓泡的数值模型，模拟结果表明鼓泡可在玻璃液中形成新的循环流，并对玻璃液传热产生显著的增强作用。20 世纪 70 年代中期起，我国开始将鼓泡技术应用于瓶罐玻璃池窑[7]，此后将鼓泡技术逐步应用于多种玻璃熔窑，并对多种不同类型的鼓泡技术进行了

收稿日期：2019–07–09。 修订日期：2019–09–03。
基金项目：安徽省科技重大专项计划项目(18030901074)资助。
第一作者：陈淑勇(1987—)，男，博士，高级工程师。
通信作者：彭 寿(1960—)，男，硕士，教授级高级工程师。

Received date: 2019–07–09. **Revised date:** 2019–09–03.
First author: CHEN Shuyong (1987–), male, Ph.D., Senior Engineer.
E-mail: chenshuyong1987@gmail.com
Correspondent author: PENG Shou (1960–), male, Master, Professor.
E-mail: ceo@ctiec.net

研究分析。乐军[8]采用物理模拟技术研究了鼓泡技术对窑内玻璃液温度的影响，发现鼓泡对玻璃液温度有明显的提高作用，且较适宜的鼓泡位置为距加料口 2/5 窑长处。王澍德[9]、梅德馨[10]介绍了鼓泡技术在玻璃熔制中的作用，详细阐述了玻璃熔窑选用鼓泡技术应注意的问题，分析了玻璃熔窑应用鼓泡技术的经济性。宋力昕等[11]利用 Flutank 软件，研究了鼓泡对熔制玻璃质量、产量的影响，发现鼓泡技术可使案例浮法窑炉产量提高 23%。汤小慧等[4]采用 Flutank 软件对玻璃熔窑的池窑部分进行模拟研究，热耗分析结果表明，应用池底鼓泡后熔窑热耗可降低 3%~5%。Qi 等[12]采用 Fluent 软件模拟分析了鼓泡位置对玻璃液流与传热的影响，结果表明，适当的鼓泡可显著提高窑炉热效率与玻璃液质量。

前述文献中对玻璃熔窑鼓泡技术的模拟研究，仅考虑了玻璃池窑部分，将火焰空间影响简化处理为热边界条件，研究结果存在一定的局限性。为系统化研究鼓泡技术对玻璃熔窑的影响，本工作采用玻璃熔窑专用模拟软件 GFM(Glass Furnace Model, Glass Service, Inc.)，对熔窑火焰空间与玻璃池窑进行耦合模拟，重点研究熔化区池底多排鼓泡对窑内玻璃液温度场、流场分布的影响规律，详细分析了不同鼓泡条件下的熔窑能耗、玻璃液流分布与质量指标。

1 玻璃熔窑池底鼓泡技术

玻璃池窑池底鼓泡技术将适量净化气体通过鼓泡装置由熔窑池底鼓入玻璃液内，上升的气泡推动周围的玻璃液形成一个速度较大的环流，强化玻璃液的对流，增强底层、表层玻璃液间的混合与热交换，降低表面玻璃液温度，促进玻璃液的澄清与均化，具有改善玻璃液质量的作用[2, 4]。目前的生产实践中，瓶罐窑设置池底鼓泡时通常位于窑坎前，与窑坎共同起到屏障作用，阻止熔化区中未熔化好的玻璃液进入澄清区，改善玻璃液澄清质量。

根据池底鼓泡工作原理，在池窑底部设置双排或多排鼓泡时，将在池窑中形成多个环流，如图 1 所示，进一步加强玻璃液的对流与热量交换，可增加火焰空间传热效率、提高玻璃液温度，从而改善玻璃液质量。为深入理解熔窑池底多排鼓泡的应用效果，采用数值模拟方法进行了模拟实验研究。

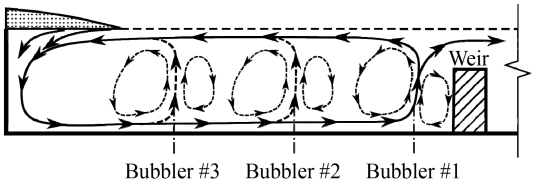


图 1 池底多排鼓泡与玻璃液流示意图

Fig. 1 Sketch of multi-row bubbling and circulation flows

2 玻璃熔窑 GFM 数值模拟

随着数值模拟技术与计算机硬件的飞速发展，数值模拟已经成为系统研究玻璃熔窑的重要手段[13–14]。熔窑数值模拟研究具有效率高、费用低，且易于调整熔窑结构参数的特点，并可根据模拟结果统计分析熔窑的运行状况与玻璃液质量，在熔窑设计、工艺优化等方面具有广泛应用[15]。采用数值模拟方法对玻璃熔窑熔化区池底设置单排或多排池底鼓泡后的运行状态进行研究，具体分析多排鼓泡对熔窑热效率、玻璃液温度场与流场、熔化与澄清质量的影响。

由于玻璃熔窑的窑池与火焰空间涉及了不同的物理、化学过程，GFM 软件将玻璃熔窑分割为窑池模型(Glass Model, GM)和火焰空间模型(Combustion Model, CM)独立进行建模，通过边界数据交换的方式进行模型耦合(CM-GM coupling)，从而实现对整个玻璃熔窑的耦合模拟[16–17]。根据 Choudhary 等[18]对玻璃熔窑数值模拟应用的总结对比，玻璃熔窑池底与表面玻璃液温度 GFM 模拟值与实测值偏差在 10 ℃以内，表明了 GFM 软件模拟结果的可靠性。

根据玻璃熔窑内玻璃液流场、温度场模拟结果，可追踪玻璃液在窑内的运动轨迹，进而可统计得到表征熔窑运行质量的停留时间分布、熔窑质量因子数据，包括熔化因子、澄清因子、均化因子，分别用于表征熔窑运行工况下的熔化、澄清、均化质量[15, 17]。

2.1 案例玻璃熔窑

以某生产绿玻的 130 m^2 瓶罐马蹄焰窑为研究对象，模拟分析池底多排鼓泡技术对熔窑运行状态的影响。所研究熔窑主要尺寸如图 2 所示，燃料为发生炉煤气(热值为 6 200 kJ/Nm^3，0 ℃)，助燃气为预热空气，设计熔化率为 2.3 t/(d·m^2) (拉引量为 300 t/d)，设计能耗为 970 kCal/kg (4 055 kJ/kg)。原料工艺参数如下：碎玻璃含量 50%，配合料熔成率 82.5%、含水量 4%，入窑温度 30 ℃。

如图 2 所示，案例熔窑在 11.48 m 处设有窑坎，原始设计中在窑坎前 1.3 m 处设有 14 支池底鼓泡(Bubbler #1)。在熔窑原始设计基础上，熔化区中部与未熔配合料末端分别增设 Bubbler #2 与 Bubbler

#3，模拟研究池底多排鼓泡技术对玻璃熔窑运行状态的影响，重点分析池底鼓泡设置对提高熔化区玻璃液流速、增强玻璃液与空间的传热作用。为降低对池壁的侵蚀，Bubbler#2 与 Bubbler#3 每排设置

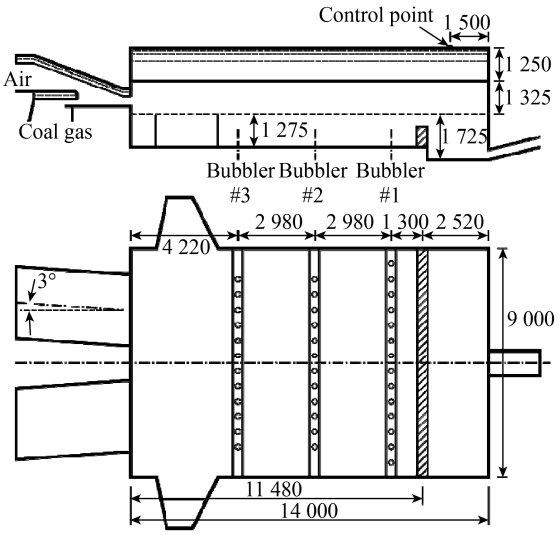


图 2　案例玻璃熔窑结构与尺寸

Fig. 2　Structure and dimension of sample glass furnace

12 支，各排池底鼓泡安装位置与鼓泡气量见表 1。

2.2　物性与操作参数

案例熔窑模拟分析所用配合料与玻璃液物性参数取自 GFM 软件数据库，如表 2 所示。

熔窑操作参数通过边界条件引入模型中，其中，窑炉外表面自然对流散热系数为 $h_{wall}=8.38+1.67\times10^{-3}T_{wall}$，环境温度为 30 ℃。所研究马蹄焰熔窑含有空气和煤气蓄热室，对其进行建模计算需要耗费大量计算机时。本工作以热回收边界简化处理蓄热室，通过余热回收效率 η_{reg} 表征蓄热室的热量回收作用[16]。根据生产数据，熔窑的空气蓄热室、煤气蓄热室的余热回收效率分别为 65%、45%。

表 1　熔窑池底鼓泡设置参数

Table 1　Setting and operation parameters of forced bubbling

Bubblers	Distance to weir/m	Count	Gas flow rates per bubbler/(L·min^{-1})
Bubbler #1	1.30	14	1.00
Bubbler #2	4.28	12	0.80
Bubbler #3	7.26	12	0.60

表 2　配合料与玻璃液物性参数

Table 2　Physical properties of batch and molten glass

Items	Density/(kg·m^{-3})	Kinematic viscosity/(m^2·s^{-1})	Thermal expansion coefficient/(K^{-1})	Heat capacity/(J·kg^{-1}·K^{-1})	Effective thermal conductivity/(W·m^{-1}·K^{-1})	Emissivity	Reaction heat/(J·kg^{-1})
Batch	1 500	0.2		1 200	$0.5+6\times10^{-22}T^7$	0.5	600 000
Molten glass	2 543.04–0.146 67T	exp[–16.895+16 182/(T–313.25)]	6.36×10^{-5}	1 223+0.12T	9.716 8–0.015 9T+1.616×10$^{-5}T^2$	0.95	

Note: T is temperature in Kelvin.

3　多排鼓泡对熔窑影响分析

采用第 2 节所述玻璃熔窑 GFM 模型与边界条件，对图 2 所示马蹄焰熔窑进行建模，模拟分析不同池底鼓泡设置对熔窑运行状态的影响。

3.1　多排鼓泡对熔窑热效率影响分析

为分析池底鼓泡对玻璃液与火焰空间热交换的增强作用，对表 3 所示不同鼓泡设置工况下的熔窑进行了 GFM 模拟，各模型中控制熔窑投料量、燃料量、助燃风量等工艺参数保持不变。各池底鼓泡工况下的熔窑温度与热效率对比如图 3 所示。

根据熔窑温度、热效率模拟结果可知，池底鼓泡数量、位置对熔窑玻璃液温度与热效率有明显影响：单排池底鼓泡工况下，启用窑坎前方鼓泡 Bubbler#1 时效率最高；双排池底鼓泡工况下，启用鼓泡 Bubbler#1、Bubbler#2 时效率最高；同时，在所研究工况下，熔窑热效率随着鼓泡排数增多而升高，相应的玻璃液平均温度、出口温度升高，碹顶温度下降。相比熔窑原始设计方案，三排池底鼓泡工况具有更高的热效率，玻璃液温度提升超过 20 ℃，碹顶温度下降约 15 ℃，熔窑热效率提升约 2%。

在案例马蹄焰窑中，窑坎前方熔化区存在温差驱动的玻璃液循环流(如图 1 所示)，窑坎前方附近的鼓泡位于熔化区循环流的液流上升区，鼓泡的强

表 3　等热负荷熔窑案例鼓泡参数

Table 3　Bubbling parameters of furnace cases with fixed heat load

Case	Bubbling setting	Bubbling flow rates/(L·min^{-1})
Q-B1.1	Bubbler #1	1.00
Q-B1.2	Bubbler #2	1.00
Q-B1.3	Bubbler #3	1.00
Q-B2.1	Bubbler #1, Bubbler #2	1.00, 0.80
Q-B2.2	Bubbler #1, Bubbler #3	1.00, 0.60
Q-B2.3	Bubbler #2, Bubbler #3	1.00, 0.60
Q-B3	Bubbler #1, Bubbler #2, Bubbler #3	1.00, 0.80, 0.60

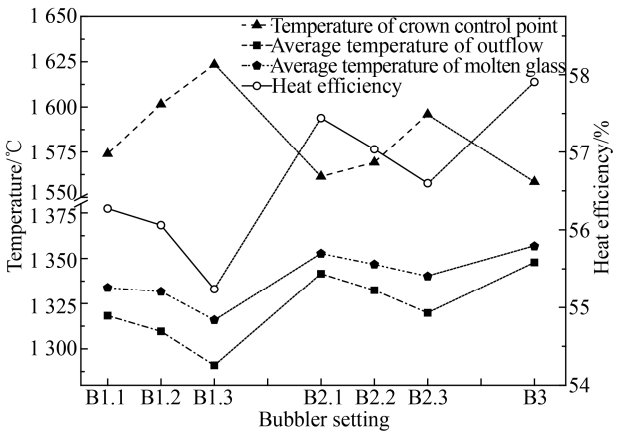


图 3 等热负荷不同池底鼓泡设置工况下熔窑温度、热效率对比

Fig. 3 Comparison of temperature and heat efficiency of furnaces with different bubbling settings under the same heat load operation condition

制对流作用可有效促进的熔化区整体循环流强度，加强表层高温玻璃液与池底低温玻璃液的对流混合；而距离窑坎较远的鼓泡位于熔化区循环流中间区域，主要加强了局部区域的表层与池底玻璃液对流混合，对熔化区整体循环流的加强作用有限。因此，鼓泡设置于窑坎前方附近可显著加强熔化区玻璃液循环与传热；远离窑坎的鼓泡具有加强局部玻璃液对流的作用，对加强熔化区玻璃液循环与传热有一定促进作用。综上所述，熔窑池底多排鼓泡依次布置于窑坎前方时，对熔化区热效率具有有效的提升作用。

3.2 多排鼓泡对熔窑质量影响分析

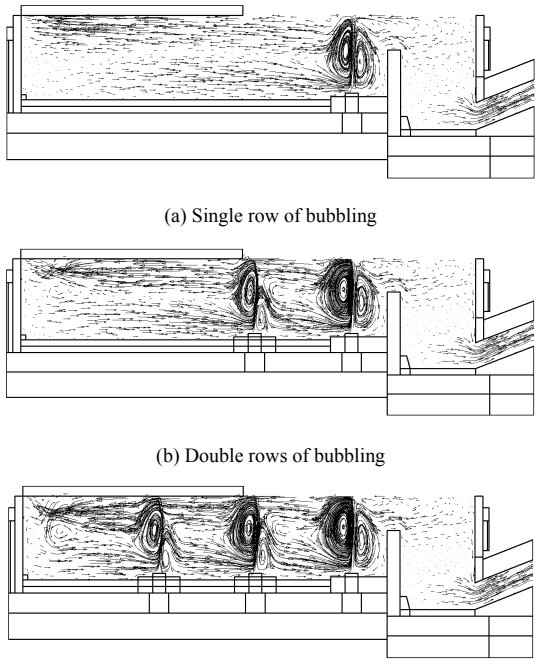
在玻璃熔窑实际生产中，通常采用碹顶温度进行工艺控制，因此，本节控制各算例碹顶控温点(见图 2)温度为(1 575±0.5) ℃，进一步分析池底多排鼓泡对熔窑运行状态的影响。根据 3.1 节分析结果，单排鼓泡设置于 Bubbler #1 位置效果较优，双排鼓泡设置于 Bubbler #1、Bubbler #2 位置效果较优，三排鼓泡效果优于单排与双排鼓泡。因此，本节模拟分析中，仅考虑表 4 所示的池底鼓泡设置方案进行对比分析。

表 4 等控制温度熔窑案例鼓泡参数

Table 4 Bubbling parameters of furnace cases with fixed controlling temperature

Case	Bubbling setting	Bubbling flow rates/(L·min^{-1})
T-B1	Bubbler #1	1.00
T-B2	Bubbler #1, Bubbler #2	1.00, 0.80
T-B3	Bubbler #1, Bubbler #2, Bubbler #3	1.00, 0.80, 0.60

3.2.1 玻璃液流分析 池底鼓泡技术直接影响熔窑内玻璃液的流动形态，根据 GFM 模拟结果，本节分析了不同池底鼓泡布置对玻璃液流的影响，结果如图 4、图 5 所示。



(a) Single row of bubbling

(b) Double rows of bubbling

(c) Three rows of bubbling

图 4 竖直中心截面玻璃液流模拟结果(*Z* 方向放大 1 倍)

Fig. 4 Simulated stream lines of glass flow in the center slice of the furnace (2×zoom in *Z* direction)

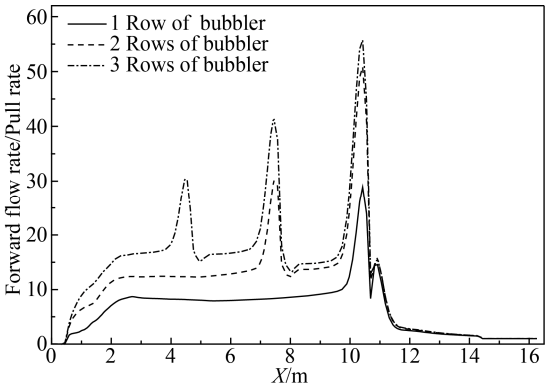


图 5 玻璃液前进流量分布模拟结果

Fig. 5 Simulated results of forward glass flow rates

根据图 4 和图 5 所示玻璃液流对比结果可知，鼓泡 Bubbler#1 作用于窑坎前方的玻璃液上升流区域，可有效增强窑坎前部缓流区的玻璃液流速、提高熔化区主循环流量；鼓泡 Bubbler#2 与 Bubbler#3 所带动的玻璃液流有一部分进入熔化区主循环流，同时在鼓泡区之间形成了区域性的玻璃液循环流。除主循环流外，各池底鼓泡在有效作用区域内均形

成了强烈的局部对流，其强度约为熔化区主循环流的 2~3 倍，影响区域约为 1.5 m，促进了池底与表层玻璃液对流混合。相比熔窑原始设计方案，双排、三排鼓泡可分别提高熔化区玻璃液循环流量 50%、100%以上，具有显著的强化玻璃液对流、提高玻璃液混合质量的作用。

3.2.2　温度统计分析　　温度是评价玻璃熔窑运行质量的关键参数。根据 GFM 模拟结果，统计了窑内玻璃液温度分布情况，如图 6、图 7 所示。

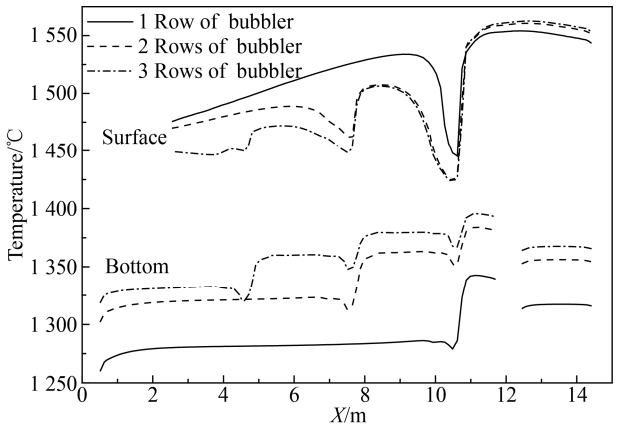


图 6　竖直中心截面处表面与池底玻璃液温度分布

Fig. 6　Surface and bottom temperature distribution of glass at furnace center slice

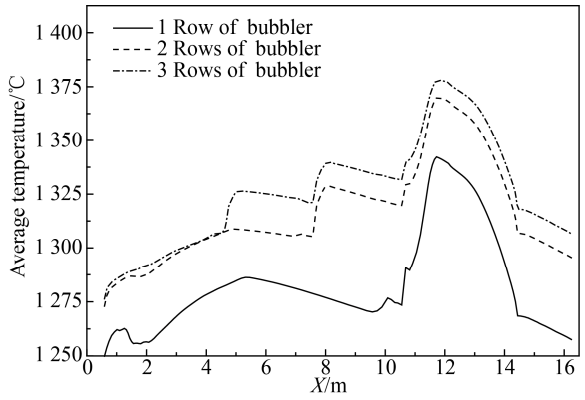


图 7　玻璃液前进流平均温度分布

Fig. 7　Average temperature distribution of forward glass flow

在熔化区，玻璃液前进流(成形流)为池底处液流。由于瓶罐绿玻的颜色较深，玻璃液红外辐射透过性较差，造成熔化区池底玻璃液前进流温度较低，玻璃液表层与池底存在很大温差，严重限制了玻璃液质量。多排鼓泡技术的应用，其强制对流作用显著改善了池底低温玻璃液与表层高温玻璃液的对流混合，降低了玻璃液表层温度，有助于提高玻璃液吸热效率；同时提高了池底前进流玻璃液的温度，有助于提升玻璃液熔化质量。根据图 6 熔窑中心线玻璃液温度对比结果可知，三排鼓泡工况下，熔化区熔窑中心线表层玻璃液温度可下降 25 ℃以上、池底玻璃液温度可提升 50 ℃以上，同时每排鼓泡可使池底玻璃液温度产生 20~30 ℃的温度提升；由图 7 所示熔窑前进流平均温度对比结果可发现，三排鼓泡工况下，配合料下方玻璃液前进流温度可提升 25 ℃以上，熔化区其他区域玻璃液前进流温度可提升 35 ℃以上，将有利于提高玻璃液质量。

未熔配合料的形状反映了玻璃熔窑的熔化能力[19]。案例熔窑内火焰空间温度变化较小，配合料形状主要受下方玻璃液温度分布的影响。

不同工况下的配合料形状如图 8 所示，可发现随着池底鼓泡排数的增多，配合料窑长方向长度明显减小，并沿窑宽方向向中心扩展。这是由于随着鼓泡排数的增多，熔化区主循环显著增强(图 5)，推动配合料向后运动；表层玻璃液温度的下降(图 6)，使得配合料熔化相对变缓，造成配合料向窑宽中心处扩展。因此，池底设置多排鼓泡，可将未熔配合料限制在投料熔化区，有效防止“跑料”发生[1]，有助于提高玻璃液熔化质量。

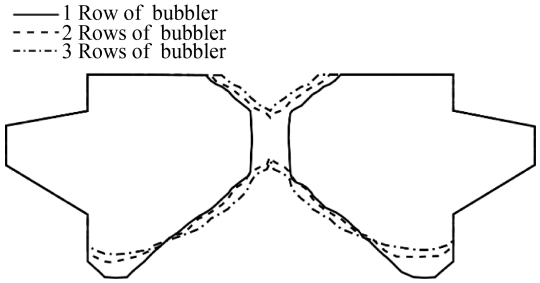


图 8　配合料形状模拟结果

Fig. 8　Simulated results of batch shape

3.2.3　质量指标分析　　基于熔窑模拟结果，根据玻璃液流场进行轨迹追踪的情况，对玻璃液在窑内的停留时间分布、熔窑质量因子进行了统计分析。对于同一熔窑(包括不同工况)，熔窑质量因子的统计平均值越高，表明熔窑的整体运行状态越好，玻璃液质量越高；此外，玻璃液的质量往往取决于熔化、澄清效果最差的玻璃液液流，故应考察质量因子的最小值(统计分布最低的 1%处)，以分析窑内是否存在质量过低的玻璃液流动轨迹[17]。

由表 5 所示对比结果可知，玻璃液停留时间随池底鼓泡排数增多呈轻微下降趋势，这是由于多排鼓泡有效提升了玻璃液温度，玻璃液流动性增强，同时在鼓泡的强制对流作用下，造成玻璃液停留时

表 5 玻璃液停留时间及质量因子统计

Table 5 Statistical results of glass residence time and quality index

Case	Residence time/h		Melting index/10^6		Fining index/10^6		Mixing index	
	Least 1%	Average	Least 1%	Average	Least 1%	Average	Least 1%	Average
T-B1	4.38	32.74	0.77	7.45	0.51	11.15	1.75	19.16
T-B2	3.55	32.50	0.89	9.92	1.41	19.40	1.87	26.85
T-B3	3.37	32.48	0.98	10.73	1.96	22.80	2.16	32.32

间有所下降；玻璃液各质量因子均随池底鼓泡排数增多而显著提升，这是由于玻璃液质量因子主要取决于玻璃液的温度与液流分布，池底多排鼓泡的增强传热与强化对流作用，显著提高了玻璃液的温度与对流混合，因此玻璃液的熔化、澄清、均化质量均得到了明显的改善。相比于熔窑原始设计方案，三排池底鼓泡工况下，玻璃液熔化因子、澄清因子、均化因子可分别提升 25%、100%、20%以上。综上所述，熔窑内设置多排池底鼓泡，对熔窑玻璃液熔化、澄清、均化质量具有显著提升作用。

4 池底鼓泡对熔化能力的影响分析

熔窑内玻璃液的流速与循环流量随着熔化率的提高而增大，需提高鼓泡气量以获得一致强度的鼓泡搅动作用；同时，熔化耗热随着熔化率的提高而增高，需提高空间温度以保证熔窑的正常运行。各熔化率工况下的鼓泡流量与空间温度控制如表 6 所示。

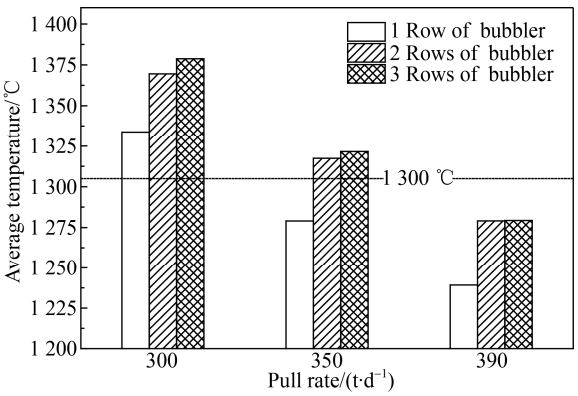
表 6 不同熔化率熔窑参数表

Table 6 Operation parameters of furnace with different melting rates

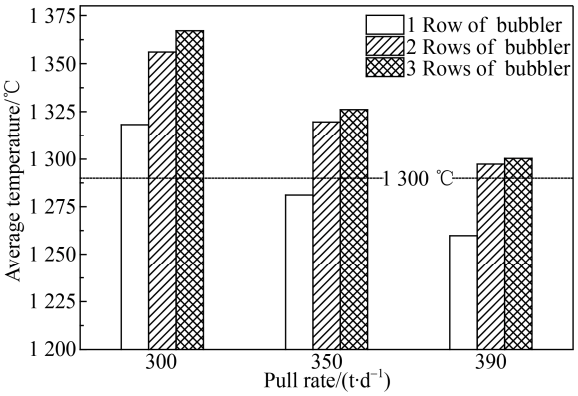
Melting rate/ ($t·d^{-1}·m^{-2}$)	Pull rate/ ($t·d^{-1}$)	Control temperature/℃	Bubbling flow rate/($L·min^{-1}$)		
			#1	#2	#3
2.3	300	1 575	1.00	0.80	0.60
2.7	350	1 575	1.20	0.96	0.72
3.0	390	1 580	1.50	1.20	0.90

根据图 9 所示模拟对比结果可知，熔化率由 2.3 t/(d·m^2)提升至 3.0 t/(d·m^2)时，能耗可降低 10%以上，且多排鼓泡工况下，流液洞玻璃液平均温度可维持在 1 300 ℃左右，可满足后续工段的工艺需求。同时，对比图 9 所示温度指标结果可发现，多排鼓泡相比单排鼓泡对熔窑平均温度有明显提升作用，但随着熔化率的提高，三排鼓泡相比双排鼓泡工况的熔窑温度指标提升效果逐渐减小。这是由于随着熔化率提高，玻璃液流速增大，池底鼓泡的强化对流作用相对减弱所导致。

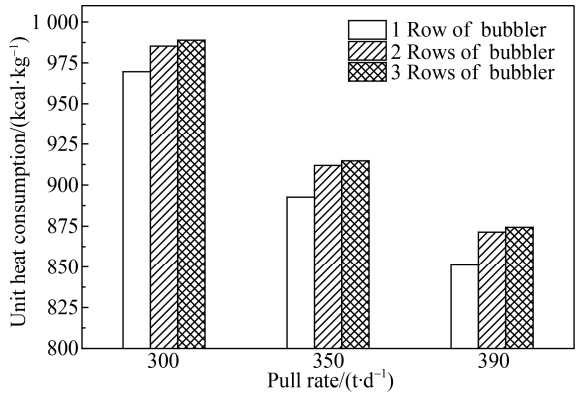
为进一步对比分析多排鼓泡对熔窑熔化能力的提升效果，统计分析了熔窑质量因子，如表 7 所示。



(a) Average temperature of molten glass



(b) Average temperature at outlet



(c) Unit heat consumption

图 9 不同熔化率工况下池底鼓泡设置对熔窑温度、能耗影响对比

Fig. 9 Comparison of temperature and heat consumption of furnaces with different melting rates and bubbling settings

表 7　不同熔化率工况下玻璃液停留时间及质量因子统计

Table 7　Statistical results of glass residence time and quality index with different melting rates

Melting rate/(t·d^{-1}·m^{-2})	Case	Residence time/h		Melting index/10^6		Fining index/10^6		Mixing index	
		Least 1%	Average	Least 1%	Average	Least 1%	Average	Least 1%	Average
2.7	B1	4.95	28.11	0.50	3.95	0.00	4.32	1.67	14.48
	B2	4.10	28.04	0.65	5.34	0.42	6.07	1.97	20.78
	B3	3.92	28.08	0.70	5.56	0.52	6.62	2.03	23.86
3.0	B1	4.02	25.31	0.28	2.56	0.00	2.75	1.26	12.12
	B2	4.17	25.30	0.49	3.44	0.05	2.93	1.55	17.49
	B3	3.88	25.23	0.52	3.47	0.07	3.04	1.57	19.17

综合对比表 5 与表 7 结果可知，提升熔化率后，熔窑内玻璃液平均停留时间与质量因子明显下降，这是由熔化率提升所引起的玻璃液流速提高、玻璃液温度降低所导致的。各熔化率工况下，多排池底鼓泡仍具有明显提升熔窑运行质量的效果，尤其是澄清因子最小值指标，单排鼓泡工况下已出现澄清质量过低的问题。同时，随着熔化率的提高，三排鼓泡相比双排鼓泡工况的熔窑质量指标提升效果逐渐减小，与前文温度指标结果一致。

根据以上分析结果，相比原始单排鼓泡方案，双排池底鼓泡具有显著提升熔窑熔化能力与熔制质量的作用，而三排池底鼓泡的提升效果随熔化率提高而降低。

5　结论

对案例瓶罐绿玻马蹄焰熔窑的模拟分析表明，池底多排鼓泡依次布置于窑坎前方，可有效提升熔窑热效率；在设计熔化率条件下，池底多排鼓泡技术可提高熔化区玻璃液循环流量 50%~100%以上，有效防止未熔配合料“跑料”发生，提升熔化区玻璃液前进流温度 25 ℃以上，显著提高熔窑玻璃液熔化、澄清、均化质量。不同熔化率条件下模拟结果表明，多排池底鼓泡具有显著提升熔窑熔化能力与改善熔制质量的作用。

对于拉引量一定的玻璃熔窑，池底多排鼓泡可提高熔窑热效率与玻璃熔制质量，有助于提高产品良品率；而对于质量要求不高的玻璃熔窑，池底多排鼓泡可以提升熔窑熔化能力。因此，池底多排鼓泡技术的深入研究与推广应用，对低透热性颜色玻璃熔窑的品质提升、节能降耗具有积极意义。

参考文献:

[1] 毛秋翔. 45 m^2 马蹄焰玻璃熔窑的综合节能改造[J]. 能源工程, 1998(2): 29–30.
MAO Qiuxiang. Energy Eng (in Chinese), 1998(2): 29–30.

[2] 张祖德. 玻璃熔窑池底鼓泡技术[J]. 上海建材, 2002(1): 29–30.
ZHANG Zude. Shanghai Build Mater (in Chinese), 2002(1): 29–30.

[3] 陈晓红. 池底鼓泡技术在浮法玻璃熔窑上的应用[J]. 中国玻璃, 2002, 27(3): 13–15.
CHEN Xiaohong. Chin Glass (in Chinese), 2002, 27(3): 13–15.

[4] 汤小慧, 诸葛勤美. 玻璃熔窑鼓泡技术[J]. 玻璃, 2009, 36(10): 16–17.
TANG Xiaohui, ZHUGE Qinmei. Glass (in Chinese), 2009, 36(10): 16–17.

[5] PCHELYAKOV K A, ASTANIN V I, SIBIRYAKOV V A. Improvement of the process of bubbling molten glass[J]. Glass Ceram, 1970, 27(9): 507–510.

[6] UNGAN A, VISKANTA R. Effect of Air Bubbling on Circulation and Heat Transfer in a Glass-Melting Tank[J]. J Am Ceram Soc, 1986, 69(5): 382–391.

[7] 孙承绪. 玻璃窑炉热工计算及设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
SUN Chengxu. Thermal calculation ad design for glass furnace (in Chinese). Beijing: China Architecture & Building Press, 1983.

[8] 乐军. 玻璃熔窑鼓泡对温度分布的影响[J]. 华东理工大学学报, 1990, 16(3): 274–281.
LE Jun. J East Chin Univ Sci Technol (in Chinese), 1990, 16(3): 274–281.

[9] 王澍德. 脉冲式鼓泡技术及其应用[J]. 玻璃与搪瓷, 2004, 32(3): 36–39.
WANG Shude. Glass Enamel (in Chinese), 2004, 32(3): 36–39.

[10] 梅德馨. 最新玻璃熔窑鼓泡技术——低频鼓泡和精密控制低频鼓泡[J]. 玻璃与搪瓷, 2008, 36(3): 39–44.
MEI Dexin. Glass Enamel (in Chinese), 2008, 36(3): 39–44.

[11] 宋力昕, 乐军, 姜宏. 池窑鼓泡对熔制玻璃质量和产量的影响[J]. 硅酸盐通报, 2003, 22(3): 29–35.
SONG Lixin, LE Jun, JIANG Hong. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2003, 22(3): 29–35.

[12] QI Z H, SUN B H, XU L Y. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in glass tank furnace after bubbling[J]. Adv Mater Res, 2011, 328–330: 426–430.

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

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

[15] LOCH H, KRAUSE D. Mathematical Simulation in Glass Technology[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002.

[16] 陶天训, 倪晶晶, 陈淑勇, 等. 玻璃配合料预热技术的理论与模拟分析[J]. 硅酸盐学报, 2018, 46(7): 1040–1048.
TAO Tianxun, NI Jingjing, CHEN Shuyong, et al. J Chin Ceram Soc, 2018, 46(7): 1040–1048.

[17] 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): 279–287.
PENG Shou, CHEN Shuyong, MA Liyun, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 279–287.

[18] CHOUDHARY M K, VENUTURUMILLI R, HYRE M R. Mathematical modeling of flow and heat transfer phenomena in glass melting, delivery, and forming processes[J]. Int J Appl Glass Sci, 2010, 1(2): 188–214.

[19] 邓臻禄. 玻璃配合料窑外预分解与熔化澄清机理的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
DENG Zhenlu. Pre-reacting behavior of glass batch and glass melting and fining mechanism (in Chinese, dissertation). Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013.