第 49 卷第 2 期　　硅　酸　盐　学　报　　Vol. 49，No. 2
2020 年 2 月　　JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY　　February，2021
http://www.gxyb.cbpt.cnki.net　　**DOI**：10.14062/j.issn.0454-5648.20200486

浮法工艺玻璃带成形过程的模拟分析

陈淑勇，李从云，王照猛，马立云，左泽方

(1. 浮法玻璃新技术国家重点实验室，安徽 蚌埠 233000；2. 硅基材料安徽省实验室，安徽 蚌埠 233000；
3. 中建材蚌埠玻璃工业设计研究院有限公司，安徽 蚌埠 233018)

摘　要：建立了浮法工艺玻璃成形过程的玻璃带三维(3D)与 Thin-Film 模型，采用 Ansys Polyflow 软件对 600 t/d 锡槽内玻璃带成形过程进行了模拟研究，与 3D 模拟结果对比表明，Thin-Film 模型可准确、高效地模拟玻璃带成形过程。根据玻璃带成形过程模拟结果，讨论了锡槽不同区域内玻璃带的成形状态，进一步模拟分析了玻璃带纵向与横向温度分布条件对不同厚度玻璃成形过程的影响，得到了 4mm 与 10 mm 浮法玻璃成形过程的较优成形温度条件。

关键词：浮法；玻璃；成形；数值模拟
中图分类号：TQ171　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)02–0340–07
网络出版时间：2021–01–06

Simulations on Glass Ribbon Forming Behavior in Float Process

CHEN Shuyong, *LI Congyun*, *WANG Zhaomeng*, *MA Liyun*, *ZUO Zefang*
(1. State Key Laboratory of Advanced Technology for Float Glass, Bengbu 233000, Anhui, China;
2. Silica-based Materials Laboratory of Anhui Province, Bengbu 233000, Anhui, China;
3. CNBM Bengbu Design and Research Institute for Glass Industry Co., Ltd., Bengbu 233018, Anhui, China)

Abstract: A three dimensional(3D) model and a thin-film model were proposed for the glass ribbon forming process in float process. The forming process of glass ribbon in a 600 t/d tin bath was simulated *via* a software named Ansys Polyflow. Compared to the 3D model, the thin-film model is demonstrated to be more accurate and effective for the simulation of glass ribbon forming process. According to the simulation results, the forming process of glass ribbon in each zone of the tin bath was discussed. The influences of longitudinal and transverse temperature distributions on the forming process were analyzed for glass ribbons with different thicknesses. Finally, the optimized forming temperature condition is obtained for glass ribbon with a thickness of 4 mm or 10 mm, respectively.

Keywords: float; glass; forming; numerical simulation

浮法玻璃工艺是熔融玻璃液漂浮在熔融锡液表面形成平板玻璃的成形工艺。浮法工艺具有玻璃表面质量高、成形厚度范围广、生产规模大等优势，已成为当今平板玻璃行业的主要生产工艺[1]。锡槽是浮法玻璃成形的关键设备，玻璃液连续流入充满保护气体的锡槽，并漂浮于锡液表面，玻璃液在重力、表面张力、拉引力共同作用下形成一定厚度的平整玻璃带[2]。

熔融玻璃液在锡槽中的成形过程涉及到复杂的多相流体流动与传热过程。为降低模型复杂度，一般针对玻璃带、锡液、气氛部分独立进行模拟分析。玻璃带是由熔融玻璃液在熔融锡液表面上铺展摊平形成，玻璃带的流动行为直接决定了浮法玻璃的成形质量，国内外研究者对此进行了长期研究。Narayanaswamy[3–4]建立了浮法玻璃低温拉薄过程的有限元模型，模拟研究了玻璃带的拉伸和流动过程。Popov[5–6]建立了玻璃带 Thin-Film 模型的控制方程组，并分析了一维简化条件下玻璃液的流动行为。邵宏根等[7]采用三维有限元方法模拟分析了 5 mm 浮法玻璃成形过程中拉边机作用，以及玻璃的应力、

收稿日期：2020–06–30。　修订日期：2020–07–16。
基金项目：安徽省科技重大专项计划项目(17030901004)资助。
第一作者：陈淑勇(1987—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2020–06–30.　**Revised date:** 2020–07–16.
First author: CHEN Shuyong (1987–), male, Ph.D., Senior Engineer.
E-mail: chenshuyong1987@gmail.com

位移、厚度分布。Kamihori 等[8]建立了玻璃带成形、锡槽传热与锡液流动的耦合数值模型，模拟结果与锡槽生产实测数据吻合良好。Chaloupka[9]采用 FEniCS 有限元软件包建立了玻璃带 Thin-Film 方程求解器，分析了扩展系数、拉引速度、拉边机等对玻璃带厚度的影响。邢志斌[10]采用 Ansys Polyflow 模拟了玻璃液在锡槽内的铺展成形过程，分析了不同厚度条件下玻璃带的轮廓形状、速度分布和厚度分布。

针对浮法玻璃锡槽内的玻璃带成形过程，详细讨论了玻璃带三维(3D)模型与 Thin-Film 模型的控制方程，以及玻璃带的平衡厚度。进一步给出了玻璃带简化模型，利用 Ansys Polyflow 软件，分别采用 3D 与 Thin-Film 模型对玻璃带成形过程进行了模拟，并详细讨论了 Thin-Film 模型的准确性与有效性。最后采用 Thin-Film 模型模拟研究了玻璃带纵向与横向温度分布对不同厚度玻璃成形过程的影响，得到了玻璃带成形过程的流动特性，并分析了温度条件对玻璃带成形过程的厚度分布影响。

1　玻璃带成形过程数值模型

本研究的锡槽模型范围为锡槽八字砖出口至锡槽收缩段，即包含了抛光区、徐冷区、成形区与部分冷却区。基于锡槽系统几何结构与流动状态的对称性，仅考虑锡槽 y 方向一半结构，如图 1 所示[1,9]。假设玻璃液在锡槽八字砖区内形成了等厚、流速完全发展的均匀玻璃带，其浮于锡液上方的厚度为 H_1、没入锡液的厚度为 H_2，总厚度为 H。

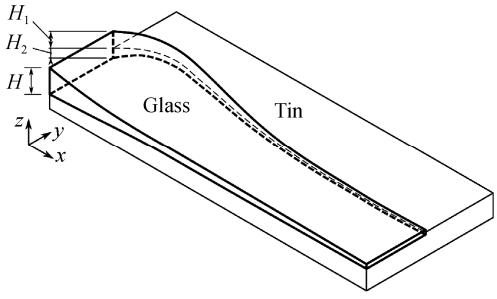


图 1　锡槽中玻璃带形状示意图
Fig. 1　Geometry of glass ribbon in tin bath

1.1　玻璃带成形过程控制方程

如前文所述，为简化模型，仅考虑锡槽内玻璃液。假设熔融玻璃液为不可压 Newton 流体，且不考虑玻璃带传热过程，图 1 所示锡槽模型中玻璃液成形过程控制方程如下[9]：

$$\nabla\cdot\boldsymbol{u}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\nabla\cdot(\boldsymbol{uu})=\frac{1}{\rho_{\mathrm{G}}}[\nabla p+\mu\nabla\cdot(\nabla\boldsymbol{u}+(\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}})]+\boldsymbol{g} \tag{2}$$

式中：∇ 为 Nabla 算符；$\boldsymbol{u}$ 为玻璃液流速，m/s；t 为时间，s；p 为压力，Pa；μ 为玻璃液黏度，Pa·s；T 为转置算符；ρ_{G} 为玻璃液密度，kg/m^3；$\boldsymbol{g}$ 为重力加速度，m/s^2。

在重力与表面张力作用下，漂浮于高密度液体表面的有限厚度液体，其平衡厚度如下[5,11]：

$$H_{\mathrm{eq}}=\sqrt{\frac{2\gamma}{\rho_{\mathrm{G}}(1-\rho_{\mathrm{G}}/\rho_{\mathrm{T}})g}} \tag{3}$$

$$\gamma=\gamma_{\mathrm{G}}+\gamma_{\mathrm{GT}}-\gamma_{\mathrm{T}} \tag{4}$$

式中：H_{eq} 为平衡厚度，m；ρ_{T} 为锡液密度，kg/m^3；γ 为扩展系数，N/m；γ_{G}、γ_{GT}、γ_{T} 分别为玻璃液与气氛、玻璃液与锡液、锡液与气氛之间的表面张力，N/m。

1.2　Thin-Film 模型

锡槽内玻璃成形过程中，其厚度方向(Z 方向)特征尺度远远小于宽度与长度方向，适用于 Thin-Film 模型[12]。对控制方程(1)、(2)在 Z 方向上积分并化简，得到 Thin-Film 控制方程[5,9]：

$$\frac{\partial H}{\partial t}+\nabla\cdot(H\bar{\boldsymbol{u}})=0 \tag{5}$$

$$\frac{\partial(H\bar{\boldsymbol{u}})}{\partial t}+\nabla\cdot(H\bar{\boldsymbol{u}}\bar{\boldsymbol{u}})=\frac{1}{\rho_g}\nabla\boldsymbol{\sigma} \tag{6}$$

式中：H 为玻璃带厚度，m；$\bar{\boldsymbol{u}}$ 为玻璃带厚度方向平均速度，m/s；$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力张量，N/m。定义如下：

$$\bar{\boldsymbol{u}}=\frac{1}{H}\int_{-H_1}^{H_2}\boldsymbol{u}\mathrm{d}z \tag{7}$$

$$\boldsymbol{\sigma}=[-P+2\mu H(\nabla\cdot\bar{\boldsymbol{u}})]\boldsymbol{\delta}+\mu H(\nabla\bar{\boldsymbol{u}}+(\nabla\bar{\boldsymbol{u}})^{\mathrm{T}}) \tag{8}$$

$$P=\rho_{\mathrm{G}}(1-\frac{\rho_{\mathrm{G}}}{\rho_{\mathrm{T}}})g\frac{H^2}{2} \tag{9}$$

其中：H_1、H_2 分别为锡液面以下与以上玻璃带的厚度，H=H_1+H_2；$\boldsymbol{\delta}$ 为 Kronecker 符号；P 为重力导致的压力积分项，是玻璃带自由摊平的驱动力。玻璃带 Thin-Film 模型的自由边界处，满足压力与扩展系数应力平衡[5,9]，即 P=γ，可导出式(3)所示的玻璃带平衡厚度。

2　玻璃带成形过程的 Polyflow 模拟

为简化锡槽内玻璃带数值模型的复杂性，假设除玻璃液黏度外，所涉及物性均认为常数(850 ℃数据)，如表 1 所示。按照所用物性参数，玻璃液在锡液表面的扩展系数 γ=0.369 3 N/m，平衡厚度 H_{eq}=6.98 mm。

对于图 1 所示的锡槽内玻璃带流动过程，涉及

玻璃液、锡液、气氛三相相互作用，其模拟十分复杂。在锡槽温度范围内，玻璃液的黏度远远高于锡液与气氛，锡液与气氛黏滞阻力可忽略[5]。因此，在第 1 节所讨论的玻璃带模型基础上，将锡液表面简化为刚性光滑水平面，即物性参数简化为：$\rho'_{\mathrm{T}}=\infty$，$\gamma'_{\mathrm{GT}}=\gamma'_{\mathrm{T}}$ [5]，简化模型如图 2 所示，W_0、H_0 分别为玻璃带入口的宽度与厚度，L 为玻璃带长度。

表 1 玻璃液与锡液物性参数

Table 1 Physical properties of molten glass and molten tin

Material	Density/(kg·m^{-3})[1]	Viscosity/lg(μ/Pa·s)[10]	Surface tension/(N·m^{-1})[1]
Molten glass	2 493	–2.811 5+4 638.022 5/(T–230.26)	0.364 4
Molten tin	6 560	–3.097	0.511 3
Molten glass–Molten tin			0.516 6

Note: T is temperature in Celsius degree.

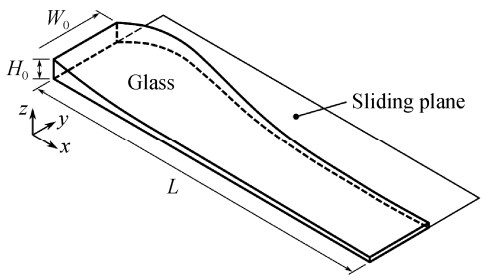


图 2 玻璃带简化模型示意图

Fig. 2 Sketch of simplified glass ribbon model

2.1 玻璃带 3D 模型

在前述简化条件下，引入图 1 所示模型中玻璃带没入锡液部分的影响，图 2 所示的简化模型中物性参数需修正为：

$$\gamma'_{\mathrm{G}}=\gamma \tag{10}$$

$$g'=(1-\rho_{\mathrm{G}}/\rho_{\mathrm{T}})g \tag{11}$$

上述简化模型中玻璃液平衡厚度公式为 $H_{\mathrm{eq}}=\sqrt{2\gamma'_{\mathrm{G}}/\rho_{\mathrm{G}}g'}$，展开后与式(3)相同。

2.2 玻璃带 Thin-Film 模型

与 3D 模型类似，在本文简化条件下，Thin-Film 模型方程组(5)~(9)中的压力项将修正为[5]：

$$P'=\rho_{\mathrm{G}}g'\frac{H^2}{2} \tag{12}$$

简化玻璃带 Thin-Film 模型的自由边界仍需满足压力与扩展系数应力平衡，即 $P'=\gamma$，展开后也可导出玻璃带平衡厚度公式(3)。

2.3 玻璃带 3D 与 Thin-Film 模拟结果对比

根据前文所述锡槽玻璃带模型与边界条件，采用基于有限元方法的 CFD 软件 Ansys Polyflow 2019 R3，分别采用前文所述 3D 与 Thin-Film 玻璃带模型，对锡槽内玻璃带的成形过程进行了模拟。

浮法玻璃锡槽的拉引量为 600 t/d，采用徐冷拉薄工艺，原始板宽为 4 000 mm。玻璃液入口温度取为 1 050 ℃，出口温度为 750℃，假设玻璃带温度在 x 方向上线性变化，且在 y 方向上温度均匀；玻璃液入口流速分布符合 Jeffery Hamel 流动[9]，即流速满足如下公式：

$$(u_{x,0},u_{y,0})=\frac{G}{\alpha H_0\rho_{\mathrm{G}}}\left(\frac{L_{\mathrm{c}}}{y^2+L_{\mathrm{c}}^2},\frac{y}{y^2+L_{\mathrm{c}}^2}\right) \tag{13}$$

式中：$u_{x,0}$、$u_{y,0}$ 分别为入口玻璃液 x、y 方向流速，m/s；G 为玻璃液质量流率，kg/s；α 为八字砖夹角，rad；$L_{\mathrm{c}}=W_0/2\tan(\alpha/2)$；$H_0$、$W_0$ 分为玻璃液入口厚度与宽度，m。

在无拉边机条件下，玻璃带模型的边界条件如表 2 所示，其中拉引速度根据平衡厚度与板宽估算得到。玻璃带边缘处，玻璃带 3D 模型施加自由表面边界，玻璃带 Thin-Film 模型施加法向应力边界，应力值为扩展系数 γ。

表 2 玻璃带模型边界条件

Table 2 Boundary conditions of glass ribbon model

Inlet thickness/mm	Inlet width/m	Restrictor angle/rad	Inlet flow rate/(kg·s^{-1})	Pull velocity/(mm·s^{-1})	Length/m
30	3	0.389π	6.944	105	30

Polyflow 软件基于有限元方法，采用模拟结果的质量守恒性，即出入口流量误差表征计算精度，模型网格独立性分析如图 3 所示。对于 3D 和 Thin-Film 模型，随网格数量的增加，计算量均呈递增趋势，且增速逐渐变大；而进出口流量偏差呈递减趋势，且逐渐趋缓。综合考虑计算量与精度，本文以流量偏差 0.05%为标准，3D 和 Thin-Film 模型分别选用 7 000 与 42 000 网格。

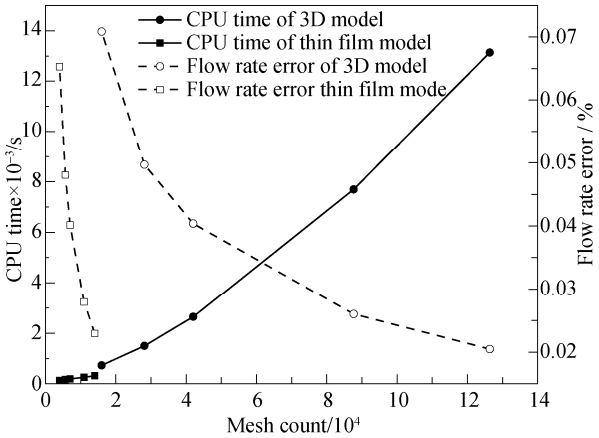


图 3　计算量与精度随网格数量的变化

Fig. 3　Chart of computation cost and precision with mesh count

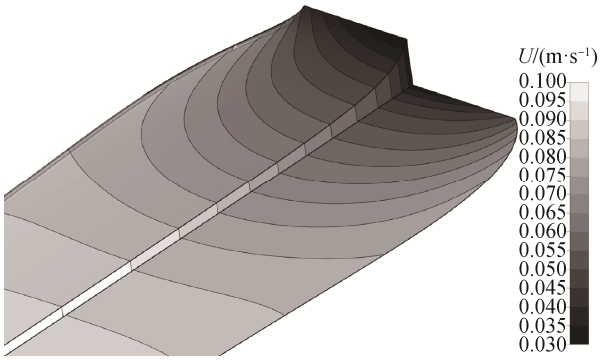


图 4　玻璃带速度分布模拟结果对比(*z* 方向放大 20 倍)

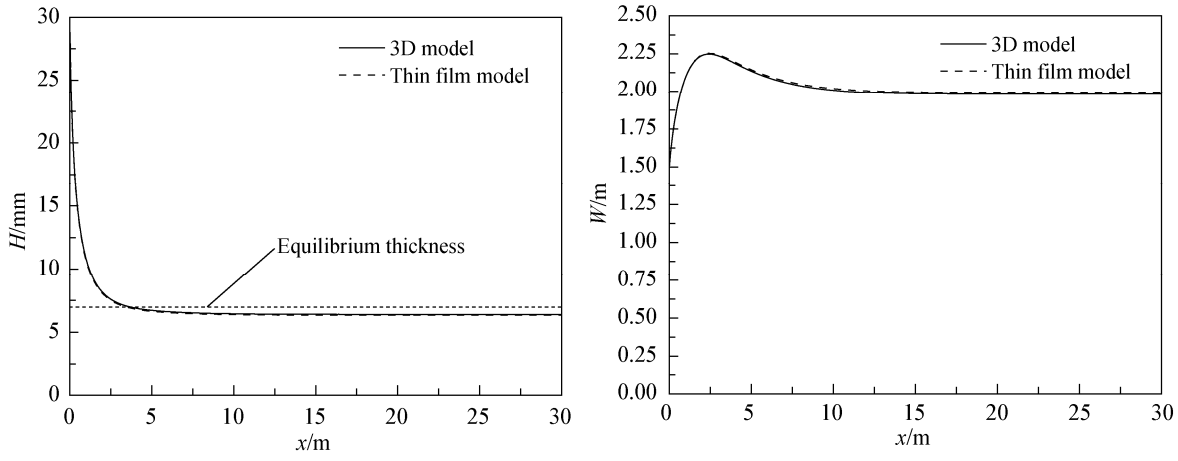
Fig. 4　Velocity distribution results of glass ribbon (20×zoom in *z* direction)

玻璃带成形过程速度分布模拟结果如图 4，左侧为 3D 模型结果，右侧为 Thin-Film 模型结果。均匀厚度的玻璃带进入抛光区后，玻璃液在重力、表面张力作用下，形成图 4 所示向两侧扩展的流动特征；玻璃带达到自然厚度后，玻璃液以均匀速度向前流动。

由 3D 模型对称面处流速分布可知，玻璃带厚度方向上流速一致，符合 Thin-Film 模型的适用条件。对比两模型结果可知，3D 与 Thin-Film 模型玻璃带轮廓与速度分布结果基本一致。

由图 5 所示玻璃带厚度与宽度分布可知，在无拉边机时，玻璃带的厚度与宽度变化主要发生在抛光区；玻璃带达到平衡厚度之前宽度逐渐变宽，最宽处约为 1.5 倍入口宽度；而达到平衡厚度后，玻璃带宽度出现一定收缩，并在 10 m 左右处达到稳定。由玻璃带厚度分布可知，由于拉引力的作用，玻璃带的最终成形厚度小于平衡厚度。对比两模型结果，3D 与 Thin-Film 模型玻璃带厚度与宽度模拟结果分布趋势一致，偏差均在±1%以内。

根据以上分析，Thin-Film 模型可以获得与 3D 模型一致的模拟结果，但 Thin-Film 模型是基于 2D 网格，网格数量远低于 3D 模型，其计算效率与稳定性均明显优于 3D 模型。



(a) Thickness result　　(b) Width result

图 5　玻璃带厚度与宽度模型结果对比

Fig. 5　Thickness and width results of glass ribbon

3　温度条件对玻璃带成形的影响

分别对薄玻璃(4 mm)、自然厚度玻璃(7 mm)、厚玻璃(10 mm)工况，模拟分析了玻璃液温度分布条件对玻璃带成形的影响。拉边机距离玻璃带边缘距离 100 mm，各厚度下拉边机参数如表 3 所示。由于拉边机机头尺寸远远小于玻璃带宽度与长度，因此，采用在网格节点施加速度的方式实现拉边机对玻璃带的作用。

表 3 拉边机参数[10]

Table 3 Parameters of edge rollers

Item	Position/ m	Ribbon thickness of 4 mm		Ribbon thickness of 10 mm	
		Velocity/(mm·s^{-1})	Angle/(°)	Velocity/(mm·s^{-1})	Angle/(°)
Roller 1	9.8	44.83	1	134.92	–4
Roller 2	11.6	49.17	1	122.5	–5
Roller 3	13.4	56.67	2	107.5	–5
Roller 4	15.2	65	3	98.33	–5
Roller 5	17	76.67	2	92.5	–5
Roller 6	18.5	90	2	76.67	–5
Roller 7	20			56.67	–4
Pull	30	174.1		69.64	

3.1 纵向温度条件影响

所研究的八字砖至收缩段锡槽模型，可分为抛光、徐冷、成形、冷却 4 个区域。本节分析抛光区温降对玻璃带成形过程的影响，玻璃带纵向温度条件如表 4 所示，通过调整冷却区温降速率使各算例玻璃带出口温度保持一致。采用前文所述玻璃带 Thin-Film 模型与物性参数，对不同纵向温度条件下的玻璃带成形过程了进行模拟分析。

表 4 玻璃带纵向温度条件

Table 4 Longitudinal temperature condition of glass ribbon

Zone	Length/m	Cooling rate/(℃·m^{-1})						
		TX-30	TX-20	TX-10	TX0	TX+10	TX+20	TX+30
Polishing zone	5	16	14	12	10	8	6	4
Gradual cooling zone	4	10	10	10	10	10	10	10
Forming zone	12	10	10	10	10	10	10	10
Cooling zone	9	7	8	9	10	11	12	13

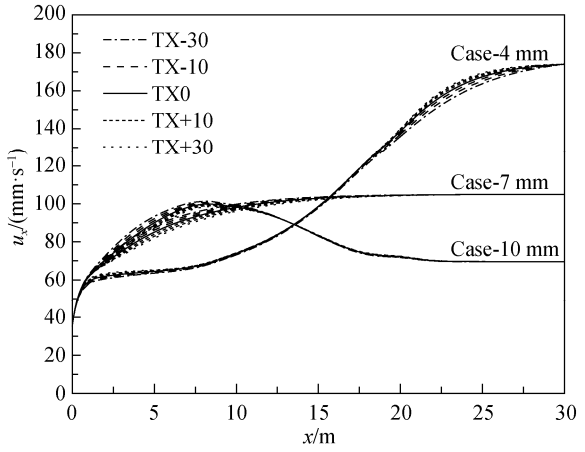


图 6 纵向温度条件对玻璃带中心线处拉引速度影响

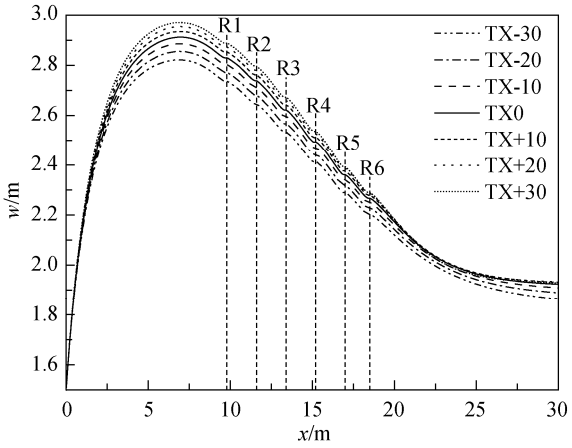
Fig. 6 Influence of longitudinal temperature condition on pull velocity along glass ribbon center line

由图 6 所示玻璃带拉引速度分布表明：低于平衡厚度的玻璃带成形过程中(Case-4 mm)，由于拉边机线速度呈前低后高分布(表 3)，玻璃带在抛光区与徐冷区拉引速度较低，而在成形区在拉边机作用下呈线性增大，以实现玻璃带的拉薄；无拉边机的玻璃带成形过程中，玻璃带拉引速度逐渐增大，并在成形区入口处达到出口拉引速度；高于平衡厚度的玻璃带成形过程中，拉边机线速度呈前高后低分布(表 3)，玻璃带在抛光区与徐冷区拉引速度分布与无拉边机工况类似，而在进入成形区后，拉引速度线性降低，达到玻璃带堆厚的效果。

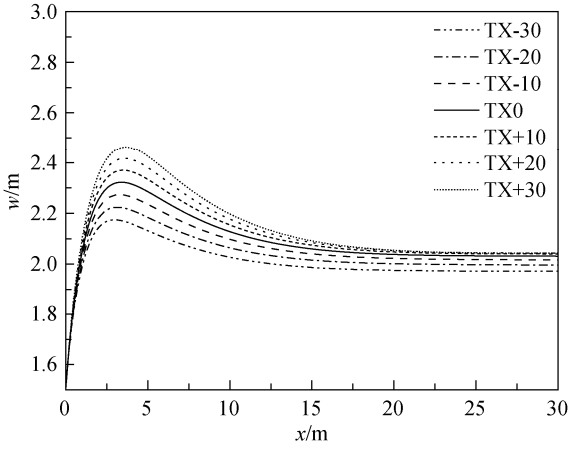
在成形区内，各温度分布条件下玻璃带速度分布基本一致，这体现了拉边机对玻璃带拉引速度的控制作用；而在成形区以外区域，玻璃带拉引速度通过黏性剪切作用影响前部玻璃带，因此，温度的影响主要体现在拉引速度明显变化的区域，即薄玻璃工况的冷却区，厚玻璃工况的徐冷区。

根据图 7 所示玻璃带宽度分布结果，可观察得到不同厚度玻璃在成形过程中的宽度变化规律：薄玻璃成形过程中，玻璃带拉引速度前低后高，玻璃带在抛光区与徐冷区显著扩展，其宽度接近入口宽度的两倍，随着成形区玻璃带拉引速度的增大，玻璃带在纵向拉引作用下，其宽度逐渐收缩；自然厚度玻璃成形过程中，玻璃带在抛光区铺展变宽，达到平衡厚度后在拉引力作用下逐渐收缩至出口宽度；厚玻璃成形过程中，玻璃带拉引速度前高后低，

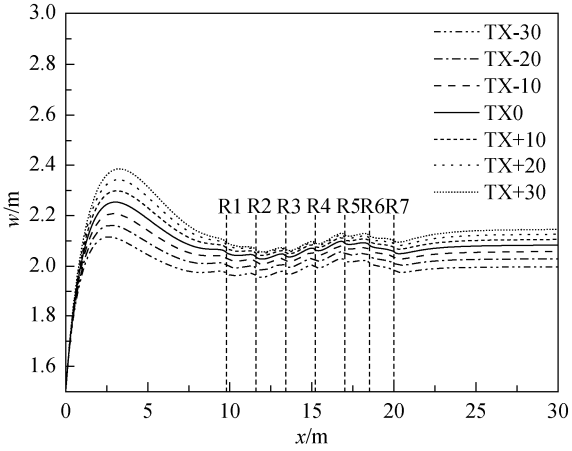
玻璃带在拉边机的堆厚作用下，维持与出口基本一致的宽度。



(a) Case 4 mm



(b) Case 7 mm

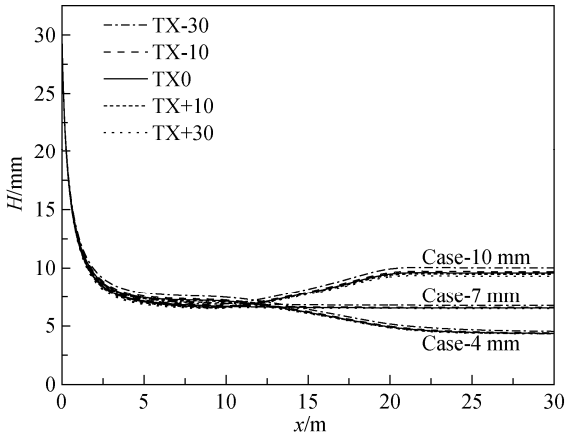


(c) Case 10 mm

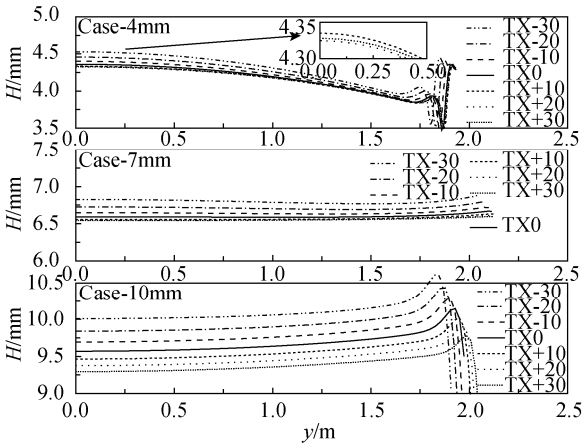
图 7　纵向温度条件对玻璃带宽度分布影响

Fig. 7　Influence of longitudinal temperature condition on glass ribbon width (*w*)

由图 7 所示宽度分布结果可发现，温度条件对玻璃带宽度分布影响主要发生在抛光区。这是由于在抛光区内，玻璃带在表面张力、重力共同作用下铺展至平衡厚度，而黏性剪切作用是影响该过程的主要因素。随着抛光区温度升高，玻璃带铺展越快、玻璃带越宽，进而显著影响了成形区玻璃带的成形过程。



(a) Thickness distribution along center line in *x* direction



(b) Thickness distribution along y direction at outlet

图 8　纵向温度条件对玻璃带厚度分布影响

Fig. 8　Influence of longitudinal temperature condition on glass ribbon thickness (*H*)

玻璃带厚度分布如图 8 所示。由纵向厚度分布可知：在抛光区、徐冷区内，各厚度玻璃的厚度分布基本一致；进入成形区后，在拉边机作用下逐渐达到产品厚度。由出口厚度分布可知，薄玻璃呈中心厚边部薄的分布，厚玻璃呈中心薄边部厚的分布，而自然厚度玻璃的横向厚度最为均匀。这是由于拉边机仅作用于玻璃带边部，造成了玻璃带的横向厚度偏差。

由图 8 所示结果可发现，玻璃带温度分布条件对玻璃带最终成形厚度有明显影响。对于薄玻璃(Case-4mm)，适当提高抛光区温度，可提高抛光区玻璃带宽度(图 7a)，有利于玻璃带的拉薄(图 8b)，

但抛光区温度过高会造成玻璃带拉薄效果变差(Case-4 mm 温度条件 TX+30)；而对于厚玻璃(Case-10 mm)，降低抛光区温度，可限制抛光区玻璃液过分铺展(图 7c)，有利于玻璃带的堆厚。对于本文所研究玻璃带模型，4mm 玻璃的较优成形温度条件为 TX+20，10 mm 玻璃的较优成形温度条件为 TX-30。

3.2 横向温差影响

玻璃带横向厚薄差是影响浮法玻璃质量重要指标。根据前文分析，成形区拉边机仅作用于玻璃带边部，造成了玻璃带横向厚度分布不均的问题。对此，本节分析了成形区玻璃带横向温差对玻璃带横向厚薄差的影响。假设成形区玻璃带横向温度为线性分布，模拟分析了横向温差为–10、–5、0、+5、+10 ℃/m 条件下的玻璃带厚度分布，算例以 TY## 形式命名，其中##为横向温差。

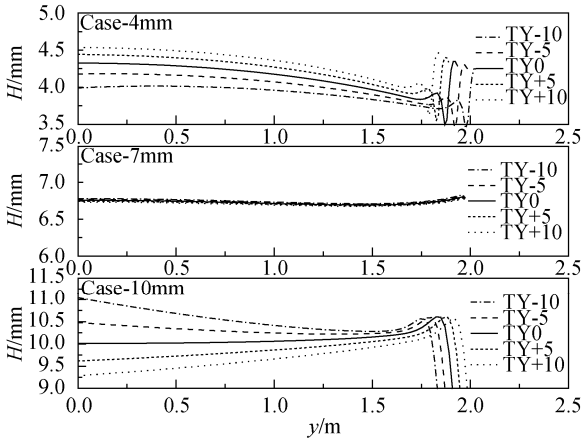


图 9 横向温度条件对玻璃带厚度分布影响

Fig. 9 Influence of transverse temperature condition on glass ribbon thickness

成形区不同横向温度分布条件下，玻璃带出口厚度分布如图 9 所示。成形区横向温度条件对不同厚度玻璃成形影响如下：对于薄玻璃(Case-4 mm)，降低玻璃带边缘温度，可提高玻璃带横向厚度均匀性，并可降低拉薄过程的板宽收缩；对于自然厚度玻璃(Case-7 m)，成形区横向温度分布影响较小；对于厚玻璃(Case-10 mm)，成形区玻璃带横向温差将导致明显的横向厚薄差，玻璃带横向温度均匀分布时具有较高的横向厚度均匀性。

4 结论

针对浮法工艺，建立了锡槽内玻璃成形过程的 3D 与 Thin-Film 玻璃带模型，并采用 Ansys Polyflow 软件对 600 t/d 锡槽进行了模拟研究。与 3D 模型结果对比表明，Thin-Film 模型可基于 2D 网格准确模拟玻璃带的成形过程，且 Thin-Film 模型计算量远低于 3D 模型。根据 Thin-Film 模型模拟结果，得到了不同厚度玻璃带的成形过程：薄玻璃成形过程中，拉边机线速度呈前低后高分布，玻璃带在抛光区充分铺展变宽，进入成形区后在拉边机作用下实现纵向拉薄；厚玻璃成形过程中，拉边机线速度呈前高后低分布，抛光区较高的拉引速度限制了玻璃带的铺展，进入成形区后在拉边机作用下实现玻璃带的堆厚。

模拟分析了玻璃带纵向与横向温度分布条件对不同厚度玻璃成形过程的影响，发现薄玻璃较优的成形温度条件为适当提高抛光区温度、降低成形区玻璃带边缘温度，厚玻璃较优的成形温度条件为适当降低抛光区温度、维持成形区玻璃带横向温度均匀。即 4 mm 厚度玻璃成形过程的较优成形温度条件为抛光区纵向温降 6 ℃/m、成形区横向温降 10 ℃/m，10 mm 厚度玻璃成形过程的较优成形温度条件为抛光区纵向温降 16 ℃/m、成形区横向温度均匀分布。

参考文献:

[1] 张战营, 刘缙, 谢军. 浮法玻璃生产技术与设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[2] 陈正树. 浮法玻璃[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1997.

[3] NARAYANASWAMY O S. A one-dimensional model of stretching float glass[J]. J Am Ceram Soc, 1977, 60(1/2): 1–5.

[4] NARAYANASWAMY O S. Computer simulation of float glass stretching[J]. J Am Ceram Soc, 1981, 64(11): 666–670.

[5] POPOV V V. Flow of a viscous film over the surface of an inviscid fluid[J]. J Appl Mech Tech Phys, 1982, 23(2): 188–194.

[6] POPOV V V. Flow of a viscous film with free boundaries in the one-dimensional approximation[J]. J Appl Mech Tech Phys, 1983, 24: 507–509.

[7] 邵宏根, 毛清华, 庞世红, 等. 浮法玻璃成型过程的数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(8): 1025–1028.
SHAO Honggen, MAO Qinghua, PANG Shihong, et al. J Chin Ceram Soc, 2004, 32(8): 1025–1028.

[8] KAMIHORI T, IGA M, KAKIHARA S, et al. An integrated mathematical model of float process[J]. J Non-Cryst Solids, 1994, 177: 363–371.

[9] CHALOUPKA T. Mathematical modelling of glass forming process[D]. Prague: Charles University in Prague, 2014.

[10] 邢志斌. 浮法玻璃液流搅拌与成形行为的工程仿真及验证性研究[D]. 秦皇岛：燕山大学, 2017.
XING Zhibin. Engineering Simulation and Verification of Molten-glass Stirring and Forming Behavior of Float Glass (in Chinese, dissertation). Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

[11] LANGMUIR I. Oil lenses on water and the nature of monomolecular expanded films[J]. J Chem Phys, 1933, 1(11): 756.

[12] PEGLER S S, WORSTER M G. Dynamics of a viscous layer flowing radially over an inviscid ocean[J]. J Fluid Mech, 2012, 696: 152–174.