



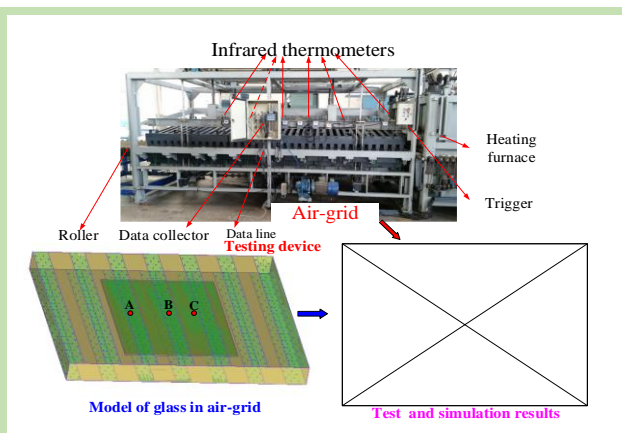
Cooling characteristics and influencing factors of glass quenching process

Gaowei YUE^{1,2*}, Chongchong WAN¹, Lu WANG¹, Yanbing LI²

1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China

2. Luoyang Landglass Machinery Incorporated Company, Luoyang, Henan 471000, China

Abstract: Cooling law of high temperature glass in air-grid plays an important role in the stress of tempered glass, and there are many factors that affect the cooling law of glass. However, because glass moves fast in air-grid, it is very difficult to test the real-time temperature change of high-temperature glass. Moreover, the test of glass cooling for each influencing factor greatly increases the workload of workers. So the physical model of glass cooling in air-grid was established to numerically simulate the cooling law, and in order to verify the reliability of the model, the cooling law of high temperature glass had been tested in air-grid with infrared thermometers under the set parameters. After the high temperature glass entered into the air-grid, the glass temperature at different times presented a strip, which reflected the nonuniformity of glass cooling, but on the whole, the glass temperature gradually decreased with the quenching time, and the glass temperature decreased with quenching time in a negative index. The numerical simulation results were in good agreement with the test results. Then the physical model was applied to simulate the cooling law of high temperature glass with the effect of wind pressure, wind temperature, distance from nozzle to glass, speed out of the heating furnace, and round-trip speed in air-grid. The results showed that the glass temperature decreased exponentially with the wind cooling time. The greater the wind pressure was and the lower the wind temperature was, the faster the glass cooling was, that was, the wind pressure and the wind temperature had a significant influence on the cooling law of glass. Secondly, the distance of the nozzle to glass had a certain effect on the glass cooling, and the effect of speed out of the heating furnace, and round-trip speed in air-grid was not obvious. This study provided important theoretical basis for setting technological parameters of tempered glass production process.



After the high temperature glass entered into the air-grid, the glass temperature at different times presented a strip, which reflected the nonuniformity of glass cooling, but on the whole, the glass temperature gradually decreased with the quenching time, and the glass temperature decreased with quenching time in a negative index. The numerical simulation results were in good agreement with the test results. Then the physical model was applied to simulate the cooling law of high temperature glass with the effect of wind pressure, wind temperature, distance from nozzle to glass, speed out of the heating furnace, and round-trip speed in air-grid. The results showed that the glass temperature decreased exponentially with the wind cooling time. The greater the wind pressure was and the lower the wind temperature was, the faster the glass cooling was, that was, the wind pressure and the wind temperature had a significant influence on the cooling law of glass. Secondly, the distance of the nozzle to glass had a certain effect on the glass cooling, and the effect of speed out of the heating furnace, and round-trip speed in air-grid was not obvious. This study provided important theoretical basis for setting technological parameters of tempered glass production process.

Key words: glass tempering; surface temperature; cooling law; air-grid; numerical simulation

收稿: 2019-11-01, 修回: 2019-12-20, 网络发表: 2020-01-30, Received: 2019-11-01, Revised: 2019-12-20, Published online: 2020-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 41772163)

作者简介: 岳高伟(1977-), 男, 河南省漯河市人, 副教授, 主要从事钢化玻璃工艺技术研究, E-mail: mxlygw@163.com.

引用格式: 岳高伟, 万重重, 王路, 等. 玻璃钢化淬冷降温特征及影响因素. 过程工程学报, 2020, 20(8): 947-958.

Yue G W, Wan C C, Wang L, et al. Cooling characteristics and influencing factors of glass quenching process (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(8): 947-958, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.219337.

玻璃钢化淬冷降温特征及影响因素

岳高伟^{1,2*}, 万重重¹, 王路¹, 李彦兵²

1. 河南理工大学土木工程学院, 河南 焦作 454000

2. 洛阳兰迪玻璃机器股份有限公司, 河南 洛阳 471000

摘要: 对风栅中玻璃的降温规律进行了实验测试, 建立了玻璃降温的风栅模型, 数值模拟了风压、风温、喷嘴到玻璃距离、出炉速度和玻璃摆动速度对玻璃降温规律的影响。结果表明, 玻璃降温曲线的模拟结果与测试结果基本一致, 即玻璃温度均随淬冷时间呈负指数降低。风压越大、风温越低, 玻璃降温越快, 即风压、风温对玻璃的降温规律影响显著。喷嘴到玻璃距离对玻璃降温有一定影响, 出炉速度、玻璃摆动速度对玻璃降温规律的影响不明显。

关键词: 玻璃钢化; 表面温度; 降温规律; 风栅; 数值模拟

中图分类号: TQ171.732

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)08-0947-12

1 前言

钢化玻璃以其优越的物理性能得到日益广泛的应用, 而随着市场需求的多样化, 对钢化玻璃的质量要求也不断提高^[1,2]。玻璃的物理钢化以水平钢化炉最常见, 玻璃的急速冷却是钢化过程中控制钢化品质的重要环节^[3-8]。因此, 众多学者针对玻璃冷却过程及工艺控制进行了大量研究。唐秋华等^[9]通过建立玻璃钢化冷却的数学模型, 采用 ANSYS 软件数值模拟冷却过程玻璃温度分布随时间变化情况, 分析了玻璃钢化冷却过程中玻璃板关键处和关键时刻的温度。史强等^[10]、Fcirill 等^[11]、Monnoyer 等^[12]通过建立热-流-固耦合的急冷超薄玻璃物理钢化模型, 采用 Fluent 软件模拟分析了不同孔口类型、孔阵列排布等射流下玻璃急冷过程中的温度变化规律, 为实现超薄玻璃的物理钢化技术提供科学依据。赵德清等^[6]、王宏博等^[13]基于空气射流冷却玻璃的流场特征, 数值分析了玻璃上、下风栅最佳配对距离, 使钢化玻璃上、下面应力一致。岳高伟等^[14]通过建立中厚玻璃冷却模型, 数值模拟了玻璃冷却过程的温度场和应力场, 为中厚玻璃降温工艺提供依据。张克丽等^[15]通过分析玻璃钢化冷却工艺, 对集风箱结构进行了优化设计, 并分析了优化后集风箱结构下钢化玻璃质量的影响因素。郭卫等^[8]选用不同钢化炉, 采用不同的工艺参数对玻璃进行钢化处理及表面应力测试, 分析了不同玻璃钢化时的合理工艺。杨邦鏊等^[16]运用分子动力学方法, 研究了不同冷却速率对 Lennard-Jones 体系凝固过程中结构与动力学性质的影响, 结果表明, 冷却速率越快, 玻

璃转变温度越高; 冷却速率越慢, 结晶温度越高, 结晶程度也越高; 扩散系数和平均配位数在体系发生玻璃转变时都有一个缓变的过程, 表明了过冷液相区的存在。

综上所述, 玻璃冷却过程中变温规律是影响玻璃钢化质量的重要因素, 但玻璃冷却过程受诸多因素影响, 如风压、风温、风栅到玻璃的距离、玻璃出炉速度, 玻璃在风栅中的摆动速度等, 在生产操作中, 仅凭经验调节势必增加废品率^[17]。因此, 本工作对玻璃冷却过程的温度变化规律进行了测试, 同时通过建立玻璃冷却物理模型, 数值模拟分析了不同因素对玻璃冷却过程降温规律的影响, 为钢化玻璃生产过程中冷却工艺和参数设置提供理论依据。

2 玻璃出炉温度测试

由于加热炉内温度很高(660~700℃)且玻璃在加热炉内运动, 导致玻璃在加热炉内升温过程的温度极难测试, 因此, 只能测试玻璃出炉瞬间的温度, 即在出炉端正上方安装红外温度扫描仪(温度测量的不确定度为 0.05 K), 对玻璃出炉温度(上表面温度)进行扫描, 分析加热后玻璃的表面温度。图 1(a)为长 800 mm、宽 600 mm、厚 5 mm 的玻璃在加热后的出炉温度扫描图(炉内温度 680℃, 加热时间 200 s)。

沿玻璃 a-b(a1-b1, a2-b2)方向和 c-d(c1-d1, c2-d2)方向提取测得的玻璃温度如图 1(b)和 1(c)所示。可以看出, 虽然玻璃出炉温度有波动, 存在一定的不均匀性, 但总体上, 加热后玻璃温度在很小范围内波动, 其均值约为 909.7 K, 以此作为模拟风栅中玻璃降温的初始温度。

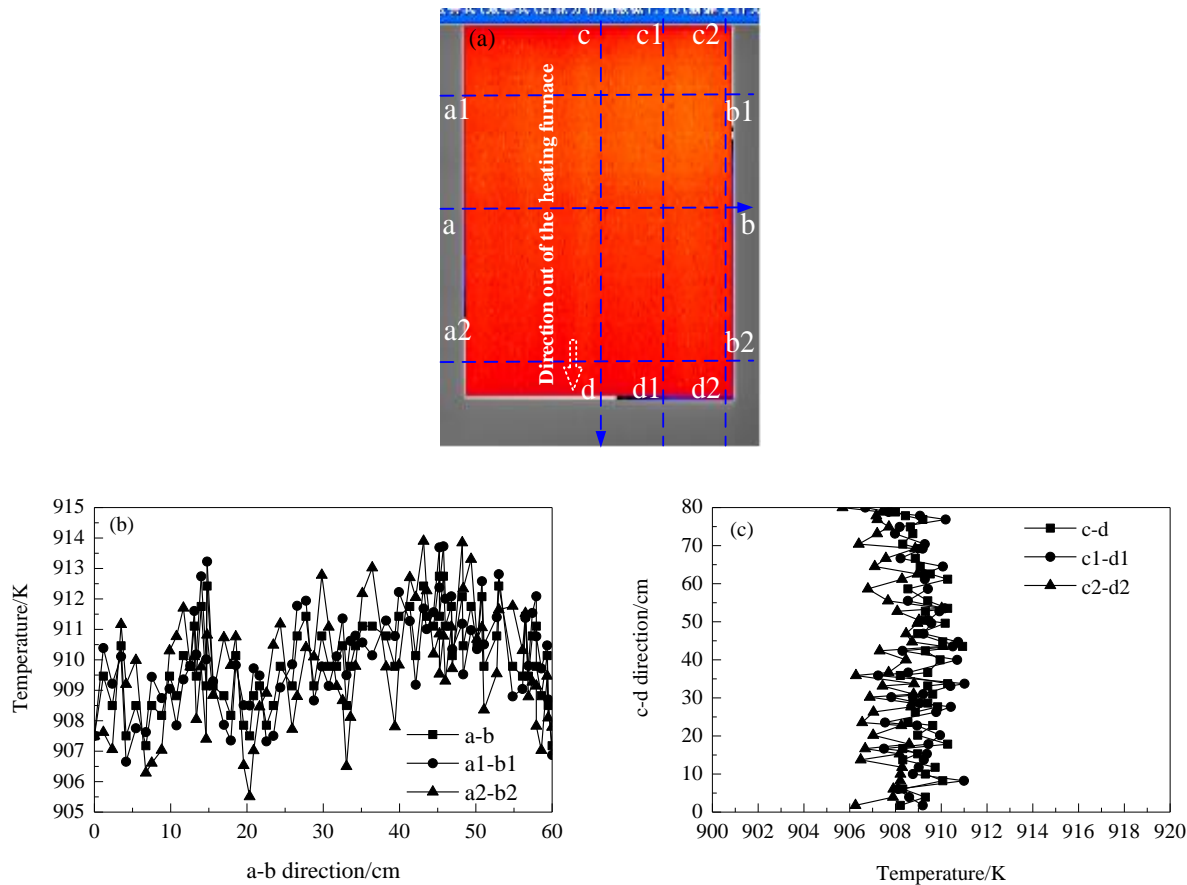


图 1 玻璃出炉温度测试结果
Fig.1 Test results of glass temperature out of heating furnace

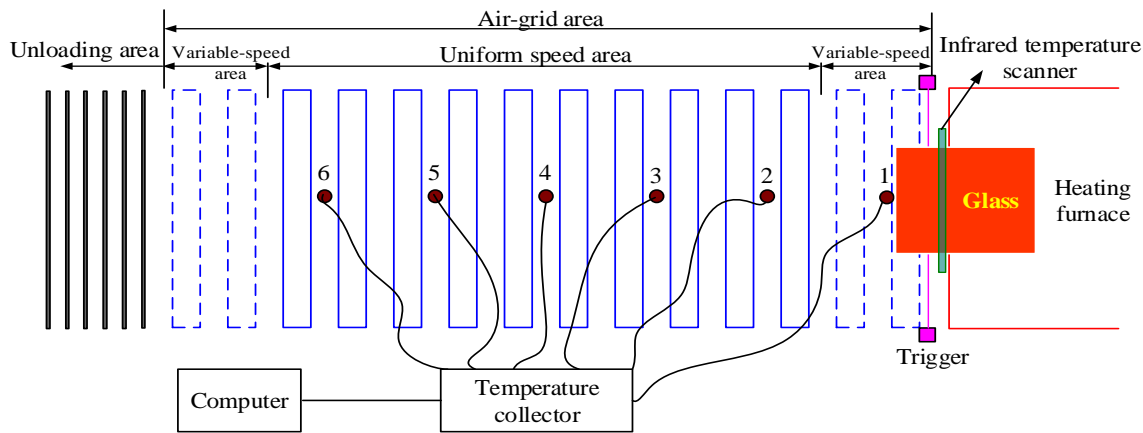


图 2 测温仪布置示意图
Fig.2 Schematic diagram of thermometers arrangement

3 玻璃淬冷降温测试

3.1 实验装置

为测试玻璃在风栅中冷却过程的降温规律, 在风栅上部间隔一定的距离安装了 6 个 FST600-400B 红外测

温仪(湖南菲尔斯特传感器有限公司)。为尽可能在间隔时间均匀的情况下进行测试, 将 6 个红外测温仪等间距布置, 并将其测得的温度通过数据采集装置(PLC, 江苏东华测试技术股份有限公司)存储在电脑上, 如图 2(示意图)和图 3(实物图)所示。当玻璃从加热炉进入风栅瞬

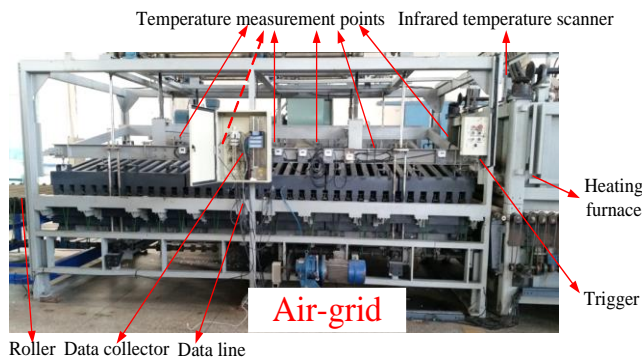


图3 红外测温装置

Fig.3 Infrared thermometer device

间, 会隔断触发器发出的光线, 即开始计时。

玻璃上设置 3 个测温点(A, B, C), 如图 4 所示, 沿玻璃出炉方向, 分别距前端 75, 200 和 300 mm。当玻璃上设定的测温点运动至红外测温仪正下方时采用 HS45 编码器(上海正基实业有限公司)对该点测温并记录。

3.2 实验测试结果与分析

在鼓风机相对风压 4.28 kPa、气流温度 26 °C(室温)、上/下风栅喷嘴到玻璃距离(出风口到玻璃距离)分别为 15/15 mm、玻璃出炉速度 0.5 m/s、玻璃在风栅中摆动速度 0.2 m/s 的条件下, 对进入风栅的玻璃进行快速降温。

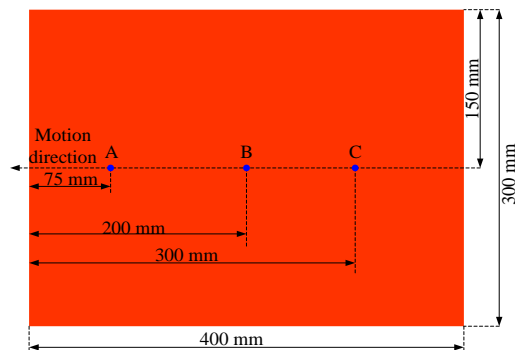


图4 玻璃测温点设置

Fig.4 Glass temperature measuring point setting

分别对 3 块相同试样玻璃(编号 No.1, No.2 和 No.3)进行测温, 各测温点(A, B, C)的温度变化曲线如图 5 所示。可以看出, 同一块玻璃不同位置(A, B, C)的降温规律一致, 均随淬冷时间呈负指数降低, 而不是呈线性降低, 其拟合曲线的相关系数均在 0.98 以上(见表 1)。虽然定量上高温玻璃进入风栅的初始冷却阶段有些差别, 但差别不大, 这主要是因为高温玻璃进入风栅时, 前端环境温度相对较低(还未与玻璃换热), 因而玻璃前端位置处的温度降低稍快一点。但总体来看, 在相同条件下, 不同玻璃及不同位置处的温度变化规律可认为是一致的。

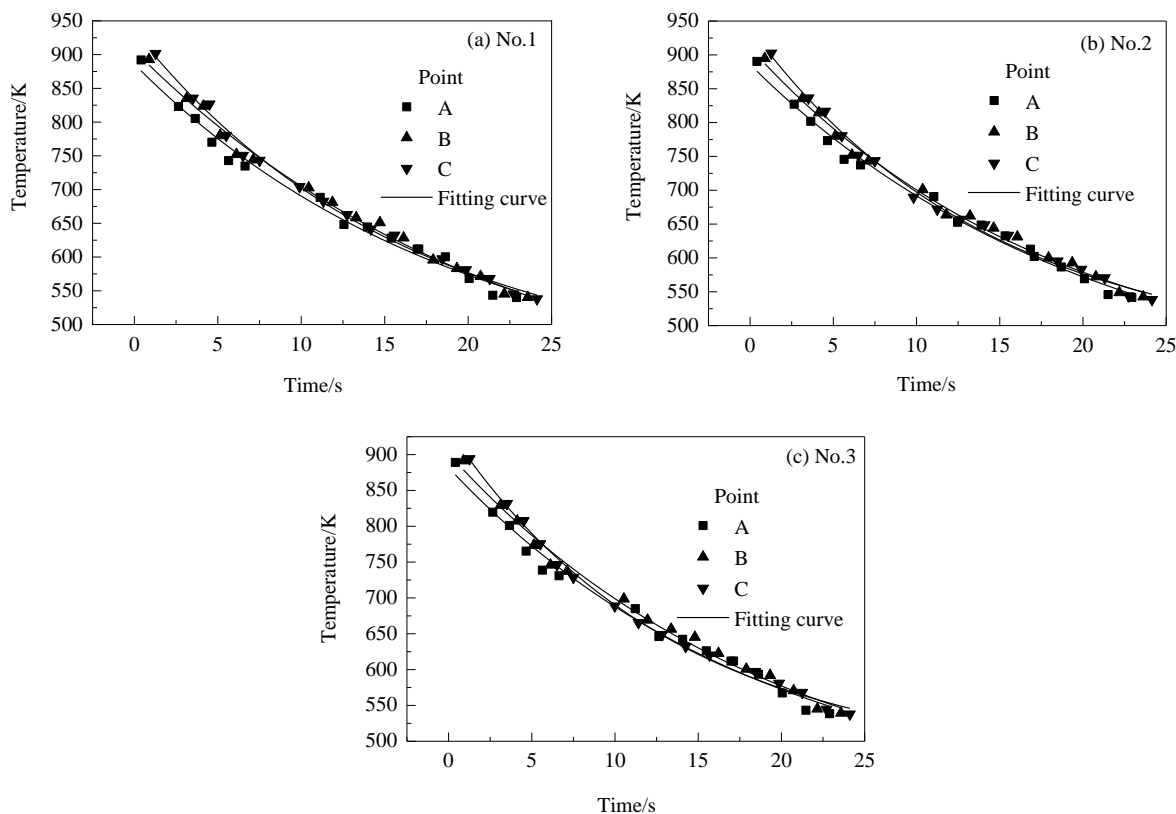


图5 玻璃降温规律测试结果

Fig.5 Test results of glass cooling law

表 1 拟合参数
Table 1 Fitting parameters

Measuring point		Fitting formula	Correlation coefficient
No.1	A	$T=400.19+485.85\exp(-t/19.4)$	0.9855
	B	$T=347.69+558.52\exp(-t/22.4)$	0.9916
	C	$T=429.57+505.55\exp(-t/16.21)$	0.9944
No.2	A	$T=380.25+505.62\exp(-t/20.64)$	0.9896
	B	$T=411.82+498.87\exp(-t/18.29)$	0.9924
	C	$T=456.45+483.24\exp(-t/14.36)$	0.9940
No.3	A	$T=403.47+478.48\exp(-t/19.21)$	0.9845
	B	$T=393.19+508.20\exp(-t/19.68)$	0.9907
	C	$T=467.97+466.92\exp(-t/13.46)$	0.9962

4 玻璃淬冷降温数值模拟及分析

4.1 物理模型

考虑到风栅实物结构的复杂性, 对其进行合理的简化, 相似几何模型如图 6 所示。为减少网格及计算量, 模型中风栅长度和宽度尺寸适当减小, 冷却风栅内流体

域尺寸为长 825 mm×宽 600 mm×厚 65 mm, 中间玻璃尺寸为长 400 mm×宽 300 mm×厚 5 mm。数值计算过程中对玻璃上的测温点进行调取和分析。采用非结构化网格进行网格生成, 如图 7 所示, 壁面及出口网格尺寸由软件自行调节。

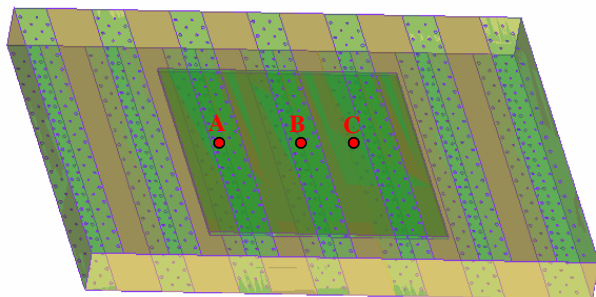


图 6 玻璃在风栅中淬冷几何模型
Fig.6 Geometric model of glass quenching in air-grid

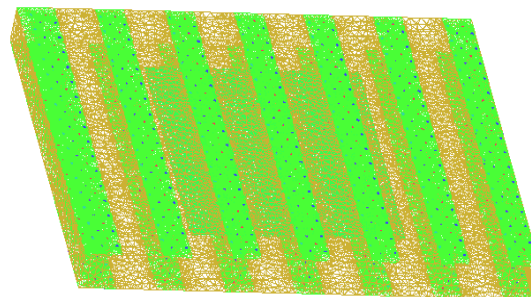


图 7 模型网格划分
Fig.7 Grid partition of model

钢化炉中的冷却工艺一般分为急冷段和冷却段两部分, 才使玻璃温度降低到人手能接触的温度。急冷过程是表面应力形成的过程, 也是整个冷却工艺中的最重要部分。即在加热工艺稳定的前提下, 急冷过程工艺水平将直接影响钢化玻璃的质量。

4.2 空气-玻璃对流换热基本方程

常温空气通过喷嘴射向运动玻璃的表面, 与高温玻璃进行换热, 流体基本方程包括连续方程、动量方程、能量方程和状态方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = \rho g \vec{k} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T = K_a / (\rho C_v) \nabla^2 T \quad (3)$$

$$p = \rho R T \quad (4)$$

式中, \vec{V} 为气流速度向量(m/s), \vec{k} 为单位向量, t 为时间(s), μ 为气流的动力粘度(Pa·s), K_a 和 C_v 分别为气流热传导系数[(W/(m·K))]和定容比热[J/(kg·K)], ρ , p 和 T 分别为风场气流的密度(kg/m³)、气压(Pa)和气流温度(K), $R=8.314$ J/(mol·K)为气体常数。

对于玻璃表面与气流换热, 热流密度为

$$q = h(T_f - T_w) \quad (5)$$

式中, q 为热流密度[J/(m²·s)], T_f , T_w 分别为流体温度和玻璃表面温度(K), $h=55$ W/(m²·K)为表面换热系数。

气流与玻璃表面对流换热导致玻璃温度降低, 热流密度与玻璃厚度方向的温度梯度成正比:

$$q = \lambda \partial T_g / \partial y \quad (6)$$

式中, T_g 为玻璃厚度方向任一位置温度(K), y 为导热方

向坐标(垂直玻璃面), λ 为玻璃的传热系数[W/(m²·K)]。

4.3 参数设置和计算方法

(1) 材料设置: 玻璃密度为 2500 kg/m³、表面换热系数 $h=55$ W/(m²·K), 比热容 C_p 和传热系数 λ 均随温度升高而增大^[18-20], 如图 8 所示, 比热容和传热系数与温度的关系可采用下式表示:

$$\begin{cases} C_p = 1200.45 - 1410.99e^{-0.00366T} & (R^2 = 0.9978) \\ \lambda = 1.271 + 0.045e^{0.003T} & (R^2 = 0.9941) \end{cases} \quad (7)$$

(2) 边界条件设置: 入口采用压力入口边界, 由于风栅上、下表面的喷嘴送风方向各异, 将送风口共分为 8 组, 分别为其设置送风方向; 根据不同的方案设置入口静压及入口气流的温度。玻璃板表面采用耦合传热方法计算。出口选用压力出口边界。

(3) 动网格参数设置: 由于玻璃板在冷却过程中来回运动, 故采用动网格技术, 为玻璃板面及其耦合面设定动网格参数, 并设定动网格区域。

(4) 求解器的控制: 速度-压力耦合采用 PISO 算法。

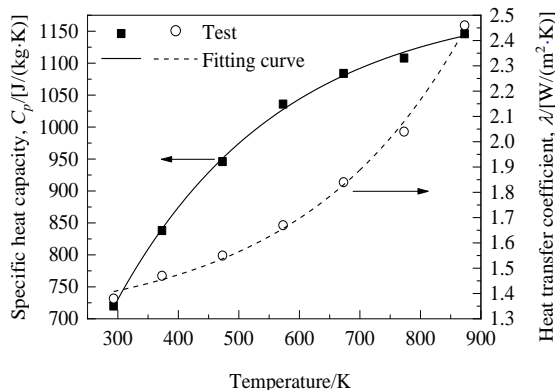


图 8 比热容和传热系数随温度的变化规律

Fig.8 The change laws of specific heat capacity and heat transfer coefficient with temperature

由于模型出口较多, 计算中适当降低松弛因子以免迭代发散。

(5) 初始化: 先使用默认的参数进行初始化, 然后 patch 为固体域和流体域设定不同初始化温度。

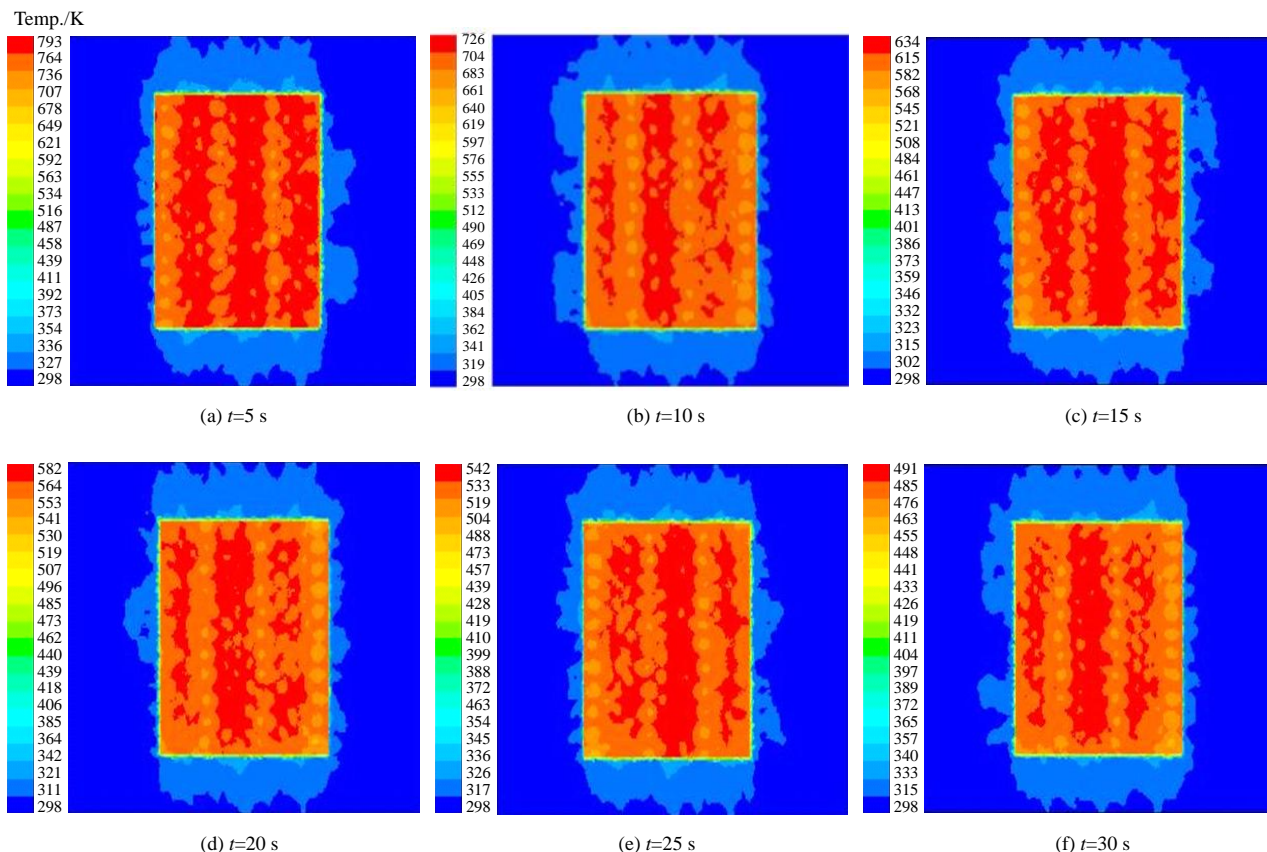


图 9 玻璃温度变化云图

Fig.9 Cloud charts of glass temperature change

4.4 数值模拟结果与分析

为了验证模型的可靠性, 需将模拟得到的玻璃表面

温度变化规律与实际测试温度进行对比。因此,模型中参数选取与实验一致: 风流入口压力 4.28 kPa、风温 26℃、玻璃进入风栅时的温度为玻璃出炉温度 909.7 K、进入风栅时玻璃运动速度(玻璃出炉速度) 0.5 m/s、返回时玻璃运动速度(摆动速度) 0.2 m/s (此后以此速度在风栅中往返运动)、上/下喷嘴到玻璃的距离为 15/15 mm。

因为玻璃在流体域内往返运动(即摆动), 因此, 为清楚了解玻璃在不同时刻(不同位置)的温度特征, 需追踪玻璃所到区域, 并截取玻璃所在区域的温度云图, 即在风栅中玻璃温度变化过程, 如图 9 所示。可以看出, 高温玻璃进入风栅后, 玻璃温度随淬冷时间延长逐渐降低, 如玻璃最初进入风栅时温度为 909.7 K, 经过淬冷 5, 10, 15, 20, 25 和 30 s 后, 玻璃最高温度降低至 793, 726, 634, 582, 542 和 491 K。玻璃表面温度有一定差别, 这是因为喷嘴正下方对应的玻璃位置由于冷风直接作用温度相对低。玻璃在风栅中运动时, 不同时刻喷嘴正下方玻璃的位置也在改变, 因此, 玻璃温度云图显示玻璃温度呈条带状, 这种温度条带位置时刻变化, 这也是玻璃降温不均匀的一种体现。

图 10 为玻璃在风栅中降温规律数值模拟结果和测试结果对比, 可以看出, 无论是变化趋势还是定量结果,

数值模拟的玻璃降温曲线与测试结果基本一致, 充分表明了采用该模型对玻璃在风栅中降温规律进行数值模拟是切实可行的。

5 淬冷玻璃降温影响因素数值分析

玻璃钢化淬冷过程中的影响因素众多, 主要有风压、风温、喷嘴与玻璃间距、玻璃出炉速度(即玻璃进入风栅速度)和摆动速度。基于上述淬冷玻璃物理模型, 数值计算分析不同因素对玻璃降温的影响。

5.1 风压影响

钢化风压是影响玻璃钢化程度和钢化效果最为重要的工艺参数之一。为了分析风压对玻璃降温规律的影响, 分别设定风压为 1.28, 1.86, 2.52, 3.31, 4.28 和 4.81 kPa, 其他条件均按照模拟设定值。

图 11 为不同风压下玻璃不同位置处的降温曲线, 可以看出, 不同风压下, 玻璃温度随淬冷时间延长的变化趋势相同, 均呈负指数减小, 但风压对玻璃的降温速率影响显著, 风压越大, 玻璃降温越快。这是因为风压越大, 冷风流量越大, 与玻璃对流换热效率越高, 玻璃温度降低越快。

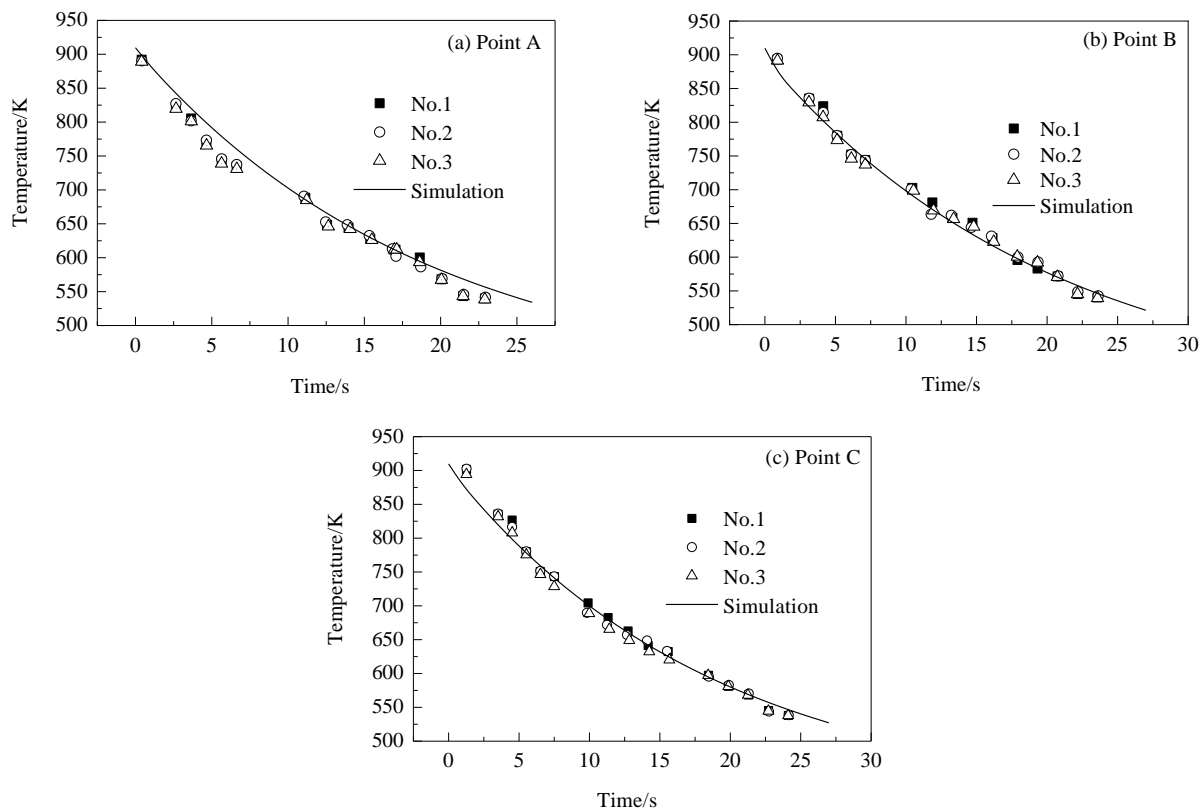


图 10 玻璃表面降温规律对比
Fig.10 Comparison of cooling laws of glass surface

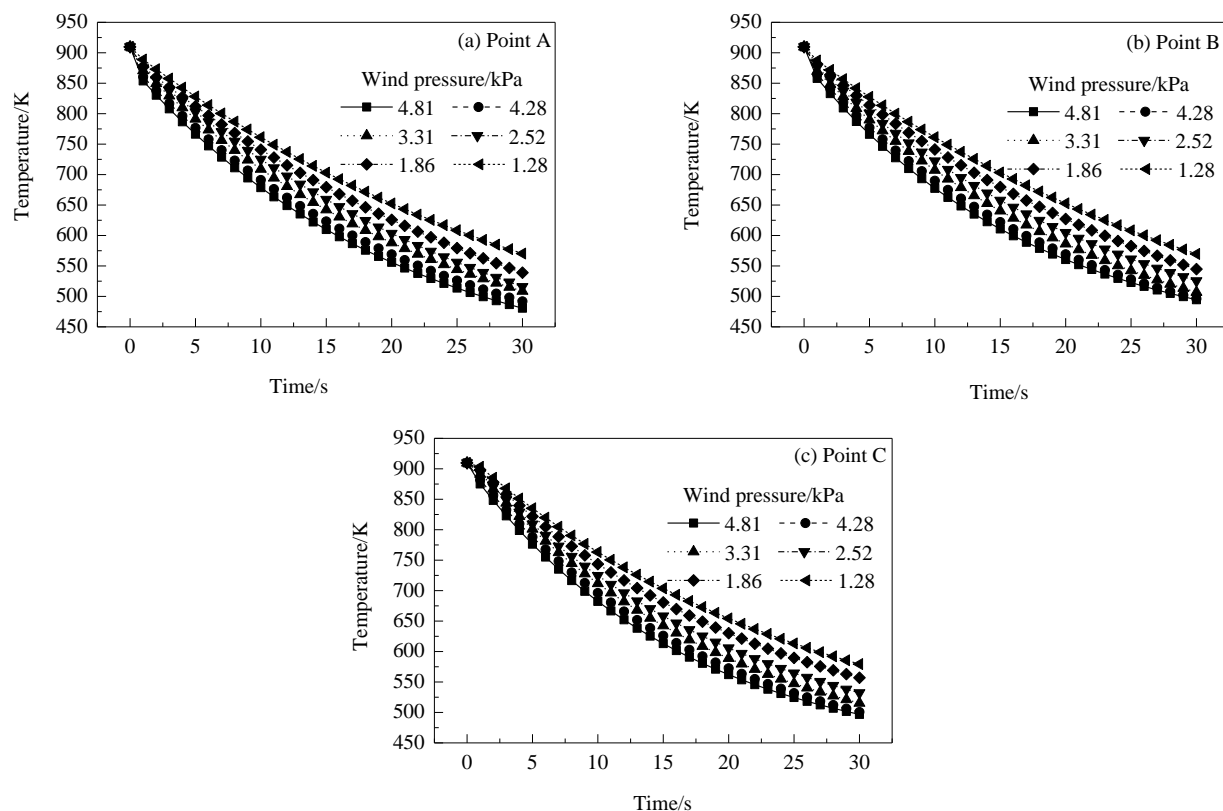


图 11 风压对玻璃降温规律的影响

Fig.11 Effects of wind pressure on glass cooling law

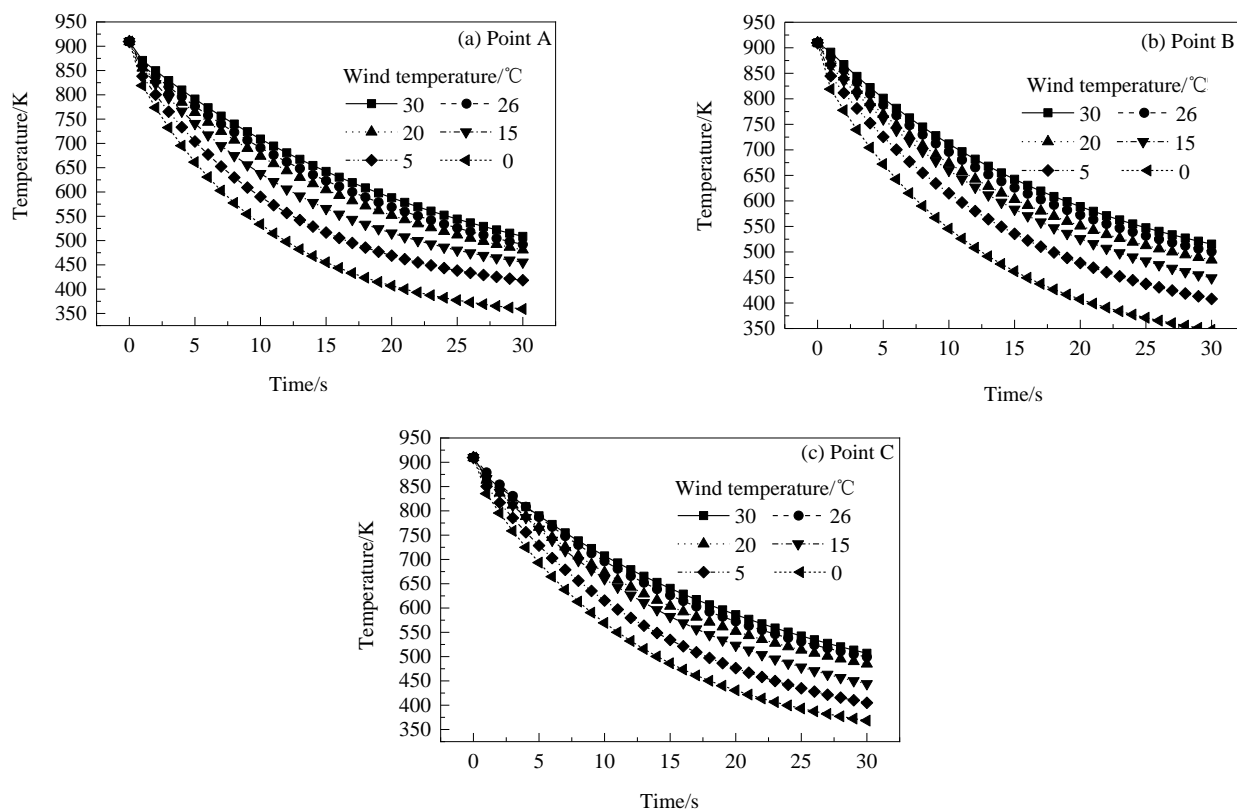


图 12 风温对玻璃降温规律的影响

Fig.12 Effects of wind temperature on glass cooling law

5.2 风温影响

由于季节及区域不同, 温度差别较大, 进而考虑淬冷温度对玻璃降温规律的影响。分别设定风温 0, 5, 15, 20, 26 和 30 °C, 其他条件均按照模拟设定值。

图 12 为不同淬冷温度下玻璃的降温规律, 可以看出, 风温对玻璃降温速率影响十分明显, 风温越低, 玻璃降温越快。这与实际生产过程中不同季节(其他参数不变)玻璃的钢化应力差别较大的现象一致。且随风温降低, 玻璃的降温速率逐渐增大。因此, 为了生产同一品质的钢化玻璃, 在不同季节时, 应适当调整风压以协调风温带来的影响。

5.3 喷嘴到玻璃距离影响

风流出口(喷嘴)到玻璃的距离不同, 风流在玻璃表面形成的对流程度也存在一定差别, 即对玻璃的换热效

率也不同。在本研究中仅考虑上风栅的变化(下风栅到玻璃距离不变), 分别设定上风栅到玻璃的距离为 10, 15, 20, 25 和 30 mm, 其他条件均按照模拟设定值。

图 13 为上风栅到玻璃的距离不同时淬冷玻璃的降温规律, 可以看出, 随上风栅到玻璃距离减小, 玻璃的降温速率变大, 即上风栅到玻璃的距离越小, 玻璃的降温效果将更明显。但总的来看, 风栅到玻璃距离对玻璃降温有一定的影响, 但这种影响不是很显著, 且在生产过程中, 一般也不宜调节风栅高度来改变玻璃的降温速率。同时, 风栅距玻璃越近, 虽然气流能在一定程度上加快降低玻璃的温度, 但由于气流与玻璃距离很近(15 mm), 气流达到玻璃表面时速度很大(约 30~45 m/s), 且玻璃温度较高时处于粘弹性状态, 使玻璃在气流冲击部位发生明显变形, 其不平整度也增大^[21]。

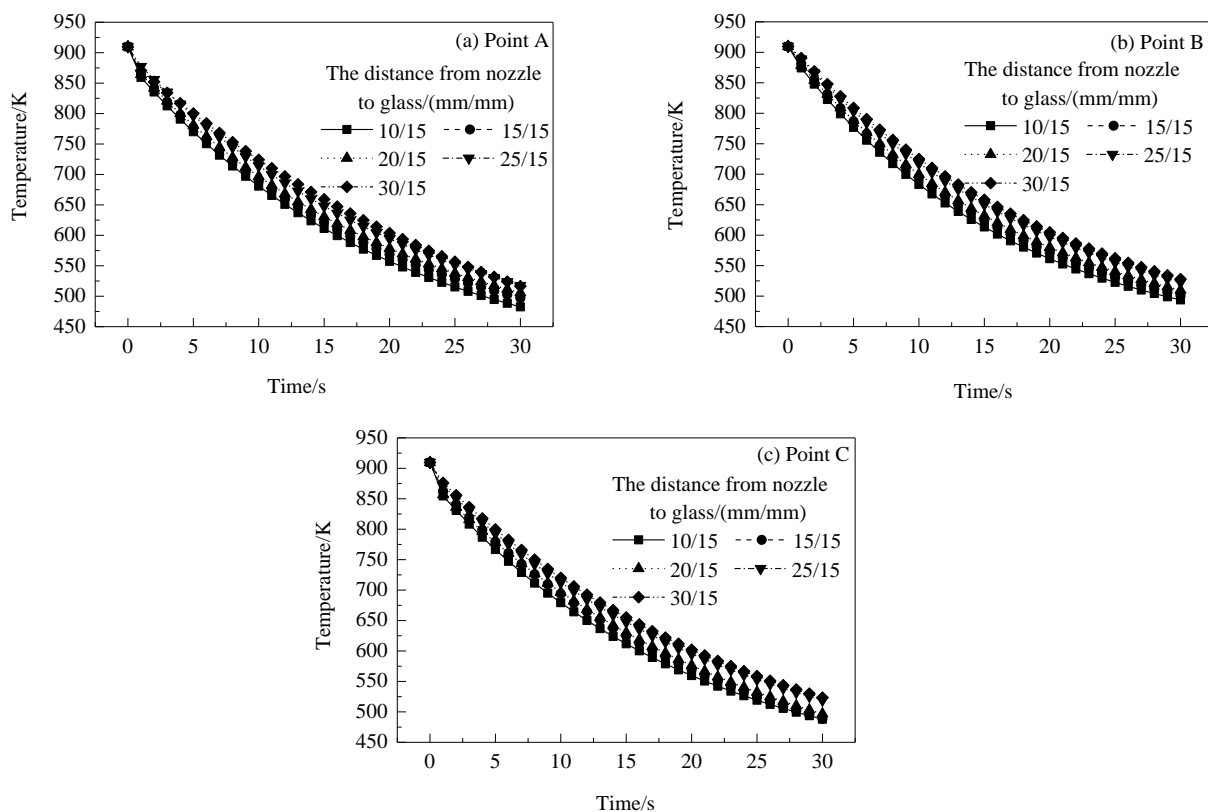


图 13 喷嘴到玻璃距离对玻璃降温规律的影响

Fig.13 Effects of distance from nozzle to glass on glass cooling law

5.4 玻璃出炉速度影响

玻璃从加热炉出来, 进入风栅的速度(运动至风栅另一端)分别设定为 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 和 0.6 m/s, 其他条件均按照模拟设定值。

图 14 为高温玻璃以不同速度从加热炉出来, 进入风栅, 运动至风栅另一端, 而后以 0.2 m/s 速度在风栅

中往复运动过程中的温度变化规律。可以看出, 不同出炉速度下, 玻璃的降温曲线基本重合, 表明玻璃出炉速度对玻璃的降温影响不大, 近似认为出炉速度对玻璃温度的变化规律没有影响。

5.5 摆动速度影响

玻璃进入风栅后, 在风栅中做往返运动(摆动速度),

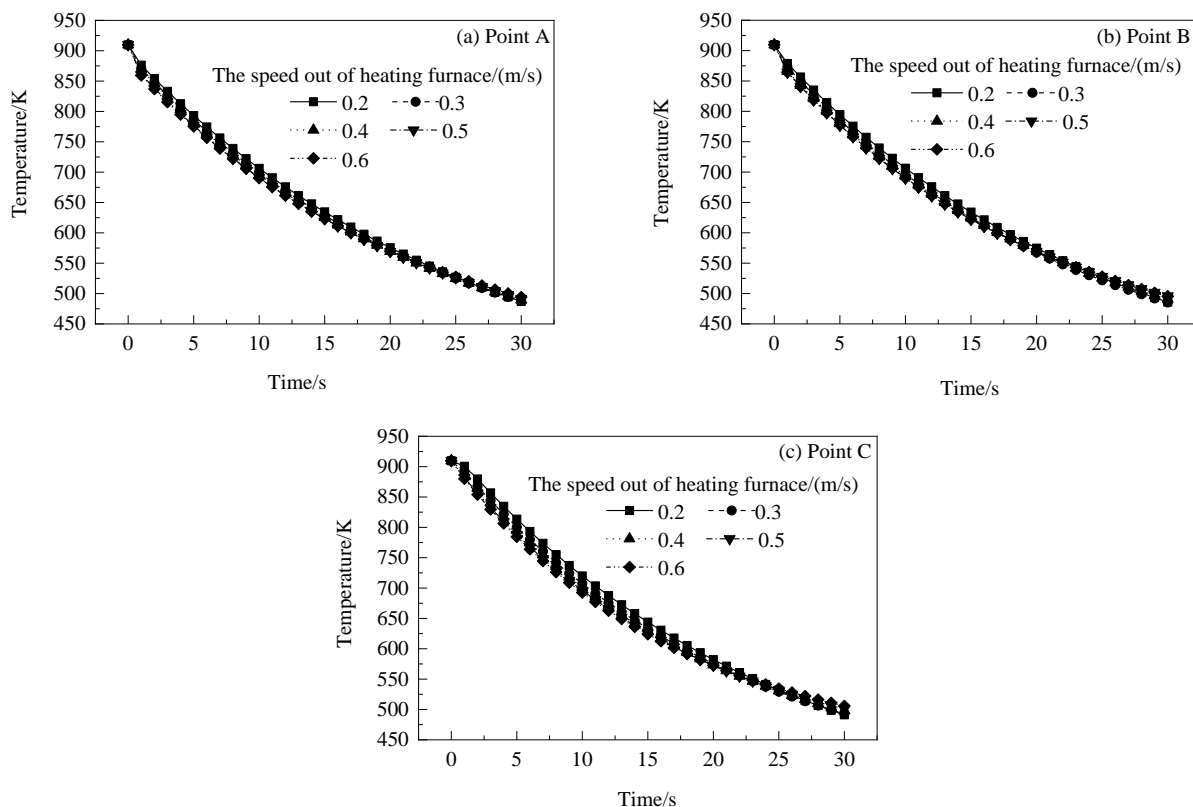


图 14 玻璃出炉速度对玻璃降温规律的影响

Fig.14 Effects of glass speed out of heating furnace on glass cooling law

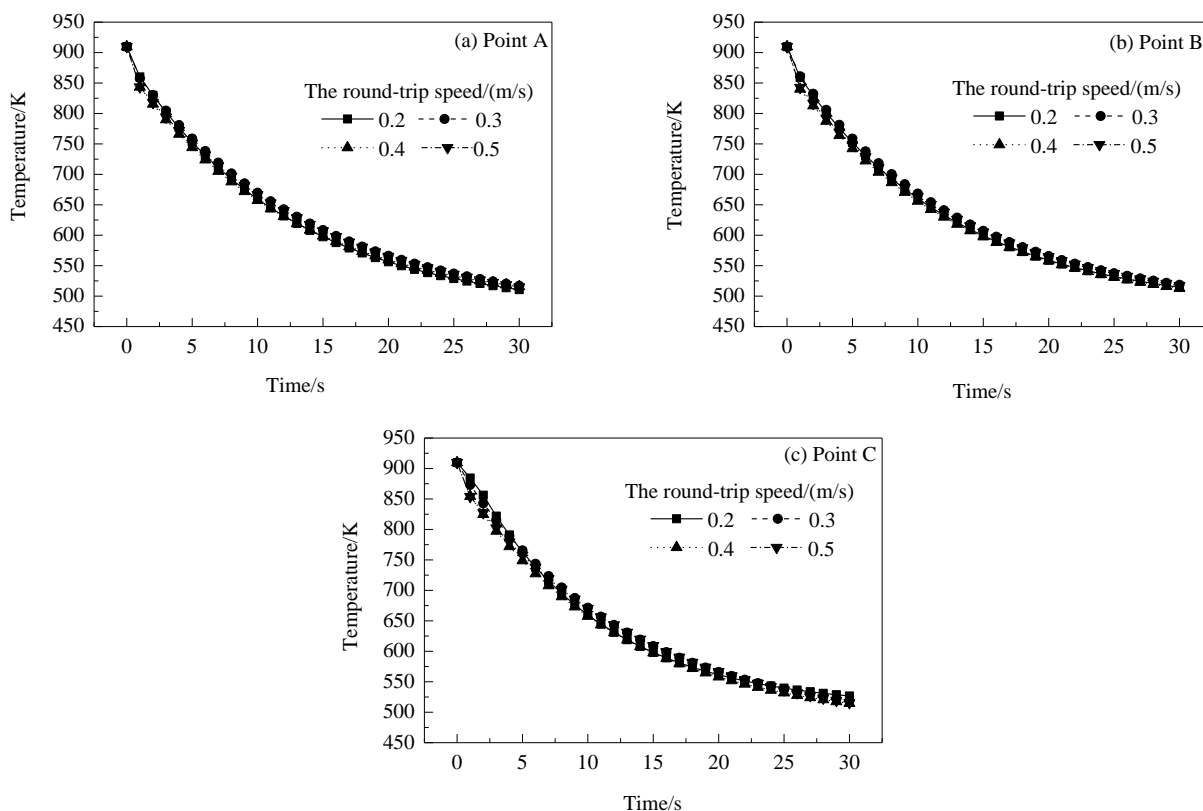


图 15 玻璃在风栅中的摆动速度对玻璃降温规律的影响

Fig.15 Effects of glass round-trip speed in air-grid on glass cooling law

分别设定速度为 0.2, 0.3, 0.4 和 0.5 m/s, 其他条件均按照模拟设定值。

图 15 为玻璃以不同速度在风栅中往返运动时温度变化规律。可以看出, 玻璃在风栅中以不同速度摆动过程中, 同一位置的温度曲线基本重合, 仅在定量上稍有差异, 但可不予考虑, 即在风栅中玻璃摆动速度几乎不对其降温规律产生影响。但在生产中, 摆动速度过小将增大玻璃冷却不均匀性, 而摆动速度过大可能导致冷却过程玻璃破碎, 应根据玻璃厚度选择合理的摆动速度。

6 结 论

高温玻璃在风栅中的温度变化规律直接决定了玻璃的钢化质量, 因此, 开展玻璃在风栅中降温规律的研究, 将对钢化玻璃生产提供重要的理论依据。本工作采用实验测试和模拟计算相结合的方法, 理论分析了风压、风温、喷嘴到玻璃距离、出炉速度和玻璃摆动速度对玻璃降温规律的影响, 得到以下结论:

(1) 高温玻璃进入风栅后, 不同时刻的玻璃温度呈条带状, 虽然体现了玻璃降温的不均匀性, 但总体上玻璃温度随淬冷时间呈负指数降低, 而不是线性降低。相同条件下, 无论是变化趋势还是定量结果, 玻璃降温曲线的模拟结果与测试结果基本一致, 即计算模型切实可行。

(2) 不同风压下, 玻璃温度随淬冷时间具有相同的变化趋势, 但风压越大, 玻璃降温越快, 即风压对玻璃的降温速率影响显著。风温越低, 玻璃降温越快, 降低速率逐渐增大。

(3) 随上风栅到玻璃距离减小, 玻璃的降温速率变大。虽然风栅到玻璃距离对玻璃降温有一定的影响, 但这种影响不是特别显著。生产过程中, 考虑玻璃的平整性, 风栅到玻璃距离不宜过小。

(4) 不同出炉速度下, 玻璃的降温曲线基本重合; 玻璃在风栅中的不同摆动速度下的降温规律几乎完全一致, 即玻璃出炉速度和玻璃在风栅中的摆动速度对玻璃的降温规律几乎没有影响。

参考文献

- [1] 赵旭东. 预热工艺对钢化玻璃性能的影响 [J]. 渭南师范学院学报, 2015, 30(14): 58–62.
Zhao X D. Influence of preheating process on the properties of tempered glass [J]. Journal of Weinan Normal University, 2015, 30(14): 58–62.
- [2] 王立祥, 李勇, 嵇书伟. 浅析玻璃物理钢化的冷却工艺及影响质量的因素 [J]. 玻璃, 2010, 5: 34–38.
Wang L X, Li Y, Ji S W. Discussion on the cooling technology and

- quality influencing factor of tempered glass [J]. Glass, 2010, 5: 34–38.
- [3] 程金树, 朱连英, 楼贤春. 玻璃钢化方法的探讨 [J]. 材料导报, 2012, 26(20): 135–137.
Cheng J S, Zhu L Y, Lou X C. Method discussion of glass tempering [J]. Materials Review, 2012, 26(20): 135–137.
- [4] Nielsen J H, Olesen J F, Poulsen P N, et al. Simulation of residual stresses at holes in tempered glass: a parametric study [J]. Materials and Structures, 2010, 43(7): 947–961.
- [5] 李会平, 李冬生, 王云正. 玻璃钢化加热过程的初步分析 [J]. 材料导报, 2012, 26(12): 137–144.
Li H P, Li D S, Wang Y Z. Preliminary analysis of heating up process for glass tempering [J]. Materials Review, 2012, 26(12): 137–144.
- [6] 赵德清, 唐仪, 黄志刚. 基于 Fluent 的钢化玻璃淬冷系统流场的建模与仿真 [J]. 机电工程技术, 2016, 45(4): 1–6.
Zhao D Q, Tang Y, Huang Z G. Glass toughening system modeling and simulation of flow field based on fluent [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2016, 45(4): 1–6.
- [7] 许伟光. 浅谈影响钢化玻璃平整度因素及处理对策 [J]. 玻璃与搪瓷, 2011, 39(1): 10–12.
Xu W G. Talking about flatness problems of tempered glass and their solution [J]. Glass & Enamel, 2011, 39(1): 10–12.
- [8] 郭卫, 童树庭, 朱雷波. 玻璃钢化工艺过程与钢化应力的研究 [J]. 建筑材料学报, 2005, 8(1): 100–104.
Guo W, Tong S T, Zhu L B. Study of temper processing and temper stress in glass [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(1): 100–104.
- [9] 唐秋华, 吴再豪, 余震, 等. 玻璃钢化冷却过程的建模与仿真 [J]. 机械设计与制造, 2014, 12: 152–158.
Tang Q H, Wu Z H, Yu Z, et al. Modeling and simulation of cooling process within glass toughening [J]. Machinery Design & Manufacture, 2014, 12: 152–158.
- [10] 史强, 丁建宁, 樊宝伟, 等. 射流冷却超薄玻璃的数值模拟研究 [J]. 常州大学学报(自然科学版), 2017, 29(1): 12–21.
Shi Q, Ding J N, Fan B W, et al. Numerical simulation of jet cooling ultra-thin glass [J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2017, 29(1): 12–21.
- [11] Fcirill O G, Isopi G M. Glass tempering heat transfer coefficient evaluation and air jets parameter optimization [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5): 1173–1179.
- [12] Monnoyer F, Lochegnies D. Heat transfer and flow characteristics of the cooling system of an industrial glass tempering unit [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(17): 2167–2177.
- [13] 王宏博, 周君山, 张克丽, 等. 玻璃钢化设备的节能方法与关键技术 [J]. 装备制造技术, 2015, 9: 59–63.
Wang H B, Zhou J S, Zhang K L, et al. Energy saving method and key technology of glass tempering equipment [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015, 9: 59–63.
- [14] 岳高伟, 刘慧, 吴恒博, 等. 玻璃钢化季节性调压数值模拟 [J]. 过程工程学报, 2019, 19(2): 345–353.
Yue G W, Liu H, Wu H B, et al. Numerical simulation of seasonal wind pressure regulating for tempered glass [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2019, 19(2): 345–353.
- [15] 张克丽, 王鸿博, 周军山, 等. 钢化玻璃冷却系统中集风箱结构的分析与探索 [J]. 玻璃, 2015, 10: 37–39.
Zhang K L, Wang H B, Zhou J S, et al. Analysis and exploration of blast box structure in cooling system for tempered glass [J]. Glass,

- 2015, 10: 37–39.
- [16] 杨邦鏊, 孙永丽, 孙亚娟, 等. 冷却速率对 Lennard–Jones 体系凝固过程中结构与动力学性质的影响 [J]. 原子与分子物理学报, 2015, 32(4): 647–652.
- Yang B Q, Sun Y L, Sun Y J, et al. Effects of cooling rates on structures and kinetic properties during solidification process of the Lennard–Jones system [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2015, 32(4): 647–652.
- [17] 苗恩铭. 平板热传导时间的分析 [J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 121–123.
- Miao E M. Analysis of temperature conduction in flat plate with time changing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 121–123.
- [18] Zhou H M, Xi G D, Li D Q. Modeling and simulation of residual stresses during glass bulb pressing process [J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2007, 50(1): 103–117.
- [19] Irza E M. Mathematical model of the formation of residual stresses in glass bodies of revolution in the process of cooling [J]. Materials Science, 2008, 44(2): 156–162.
- [20] Ajovalasit A, Petrucci G, Scafidi M. Photo elastic analysis of edge residual stresses in glass by automated “test fringes” methods [J]. Experimental Mechanics, 2012, 52(8): 1057–1066.
- [21] 王立祥, 李勇, 嵇书伟. 浅析玻璃物理钢化冷却工艺及影响质量的因素 [J]. 玻璃, 2010, 5: 34–38.
- Wang L X, Li Y, Ji S W. Discussion on the cooling technology and quality influencing factors of tempered glass [J]. Glass, 2010, 5: 34–38.