

玻璃熔窑中天然气/氢气混合燃料的燃烧过程仿真研究

韩建军¹, 曾健华¹, 曹志强³, 王 静¹, 陈淑勇^{3,4}, 刘 超¹, 李路瑶^{1,2}

(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. 武汉理工大学信息学院, 武汉 430070; 3. 中建材玻璃新材料研究院集团有限公司, 安徽 蚌埠 233000; 4. 玻璃新材料创新中心(安徽)有限公司, 安徽 蚌埠 233000)

摘 要: 推动硅酸盐材料制造过程的低碳排放对于实现碳达峰、碳中和总体战略目标意义重大。本工作以平板玻璃窑炉为基础, 采用数值模拟方法开展氢能在玻璃窑炉中应用的基础研究。分析采用天然气/氢气混合燃料对玻璃窑炉燃烧空间温度场/速度场分布、燃烧生成烟气成分的影响, 预测氢能在玻璃窑炉中应用的可行性。结果表明, 采用天然气/氢气混合燃料为玻璃液熔化提供能量, 可以保证玻璃窑炉温度制度稳定。采用天然气/氢气混合燃料供能, 燃料燃烧速率加快, 释放热量集中, 掺氢体积比为20%及以上时, 燃烧形成的火焰长度会明显缩短, 而热烟气在窑炉内停留时间延长。对比基础窑炉, 采用掺氢比例40%的燃料, 窑炉总烟气排放质量减少了4.13%, CO₂排放质量减少了12.50%, 烟气中NO_x浓度由1 093 mg·Nm⁻³ (干燥, 8% O₂条件下)增加至1 282 mg·Nm⁻³ (干燥, 8% O₂条件下)。为推动氢能在硅酸盐制造领域的应用还需开展燃烧系统设计、耐火材料侵蚀等方面研究, 以解决氢能在大型窑炉中应用存在的问题。

关键词: 玻璃熔窑; 氢气; 燃烧过程; 仿真

中图分类号: TQ172 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)09-2179-09

网络出版时间: 2023-07-06



Simulation of Combustion Process of Natural Gas/Hydrogen Hybrid Fuel in Glass Furnace

HAN Jianjun¹, ZENG Jianhua¹, CAO Zhiqiang³, WANG Jing¹, CHEN Shuyong^{3,4}, LIU Chao¹, LI Luyao^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070; 2. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. CNBM Research Institute for Advanced Glass Materials Group Co., Ltd, Bengbu 233000, Anhui, China; 4. Innovation Center for Advanced Glass Materials (Anhui) Co., Ltd, Bengbu 233000, Anhui, China)

Abstract: Promoting the low carbon emission of silicate material manufacturing is of great significance to achieve the overall strategic goal of carbon peaking and carbon neutrality. In this paper, the application of hydrogen energy on a flat glass furnace was investigated by a numerical simulation method. The effect of natural gas/hydrogen hybrid fuel on the temperature/velocity fields and the composition of flue gas was analyzed to comprehensively evaluate the feasibility of hydrogen utilization in glass furnace. The results show that the combustion of natural gas/hydrogen hybrid fuel can ensure the temperature stability of glass furnace. Compared to natural gas, the burning rate of natural gas/hydrogen hybrid fuel is improved, and the heat release of fuel combustion is more concentrated. As the proportion of hydrogen increases to 20% or above, the flame length significantly shortens, and the residence time of flue gas at glass furnace increases. In the furnace with a hydrogen proportion of 40%, the total flue gas is reduced by 4.13%, and the CO₂ emission is reduced by 12.50%, while the emission NO_x concentration is increased from 1 093 mg·Nm⁻³ (dry with 8%O₂) to 1 282 mg·Nm⁻³ (dry with 8%O₂). A further investigation on combustion system design, refractory erosion and other aspects is proposed to solve the problems of hydrogen application in large glass furnace and promote the utilization of hydrogen energy in silicate materials manufacturing.

Keywords: glass furnace; hydrogen energy; combustion process; simulation

收稿日期: 2023-03-30. 修订日期: 2023-04-10.

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3603302); 国家自然科学基金青年项目(52102030); 湖北省自然科学基金青年项目(2021CFB072).

第一作者: 韩建军(1970—), 男, 博士, 研究员。

通信作者: 李路瑶(1991—), 女, 博士, 助理研究员。

Received date: 2023-03-30. Revised date: 2023-04-10.

First author: HAN Jianjun (1970—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: hanjj@whut.edu.cn

Correspondent author: LI Luyao (1991—), female, Ph.D., Research assistant.

E-mail: liluyao91@whut.edu.cn

硅酸盐材料作为支撑国家基础设施建设和国民经济快速发展的重要材料,其制造存在高能耗、高污染、高排放等问题,是除电力系统以外的第 2 大 CO₂ 排放源。双碳战略目标的提出对硅酸盐材料制造提出了重大挑战^[1-2]。

玻璃熔化阶段所需能量主要来源于化石燃料燃烧,燃烧产生的 CO₂ 排放占玻璃生产过程中总排放的 60%以上^[3]。在平板玻璃行业,采用天然气等清洁燃料替代石油焦、重油等廉价燃料^[4],提高燃料燃烧效率,强化窑炉保温和余热利用是提高能源利用效率、减少碳排放的重要措施^[5-6]。而要实现碳中和目标则必须考虑使用清洁“无碳”能源,如氢能、光电、风电等^[7]。电熔技术目前主要应用在中小型特种玻璃窑炉。大型平板玻璃窑炉能源消耗量大,大规模引入电熔技术受电力价格、能源供应稳定性制约,且须对窑炉结构、配套设施和工艺进行优化调整,成本高,技术难度大^[8]。

氢能作为一种清洁、高效、安全、可持续的新能源,被视为 21 世纪最具发展潜力的清洁能源^[9]。目前氢能在航空航天、汽车、石油、冶金、电子工业、食品加工等方面具有成熟应用^[10-11]。氢气在平板玻璃生产过程中主要用于与氮气混合作为锡槽内保护气体,现有浮法玻璃生产线配备有制氢站^[12]。而实现氢能在玻璃工业窑炉中的大规模应用还需解决氢能制备、储存、输运等问题^[13]。把氢气掺混入天然气管网中可以解决长距离、大规模铺设氢气运输管道的问题,极大减少了氢气输运成本。将天然气/氢气混合燃料用于窑炉供能可以一定程度降低燃料成本,减少 CO₂ 排放,对于设备和工业改革技术要求也下降。

目前,已有天然气掺氢在燃气轮机和发动机中应用的研究报道。大型玻璃窑炉对温度制度、窑炉气氛控制,污染物排放浓度等要求严格。国外开展了氢气、天然气/氢气用于玻璃窑炉的试验研究。2020 年,德国 FlammaTec 公司和捷克 Glass Service 公司联合设计开发了适用于 H₂ 和 O₂ 燃烧的燃烧器,以减少玻璃制造过程的碳排放^[14]。2021 年,英国皮尔金顿有限公司成功开展了使用氢能制备浮法玻璃的试验,表明采用氢能替代天然气熔制玻璃,实现玻璃工业脱碳是可行的^[15]。2022 年,日本电子硝子株式会社与 Taiyo Nippon Sanso 株式会社共同开发的氢氧燃烧器可根据需要调整天然气与氢气的混合比例和流量,并通过进一步优化氢氧燃烧技术,提高了氢氧燃烧的能量利用效率^[16]。法国圣戈班结合

原材料和能源的脱碳技术,采用回收的碎玻璃为原材料,以可再生的绿色能源,如沼气、绿氢、脱碳电力供能,率先实现了平板玻璃的零碳生产^[17]。

中国开展天然气掺氢的应用研究起步较晚,现有文献集中于对天然气掺氢燃烧特性和燃烧机理进行研究报道^[18-21]。在大型窑炉中开展氢能试验研究成本高、定量研究困难,有一定安全风险,目前尚无氢能在大型窑炉中应用的报道。相比天然气等传统化石燃料,氢气燃烧反应迅速,火焰传播速度快,对燃烧热量释放和窑炉温度分布有重要影响,且氢气燃烧产物含有高浓度水蒸汽,对于窑炉内物料反应及耐火材料侵蚀的作用不明确。

基于此,研究以平板玻璃窑炉为基础,采用数值模拟方法开展氢能在玻璃窑炉中应用的仿真研究,探究不同天然气掺氢比例对窑炉火焰分布、温度场/速度场分布,及燃料燃烧产物的影响。探讨氢能在大型玻璃窑炉中应用存在的问题和难点,为优化玻璃窑炉燃烧系统和耐火材料选型,指导窑炉工艺调控,维持窑炉安全稳定运行,推动氢能在玻璃制造乃至硅酸盐材料制造方面的应用提供理论指导。

1 玻璃窑炉模型构建

1.1 玻璃窑炉生产参数

研究基于 600 t·d⁻¹ 浮法玻璃窑炉开展数值模拟研究。基础玻璃窑炉燃烧空间具有 6 对小炉,小炉末端连接蓄热室,每隔 20 min 进行换向。小炉喷枪以天然气为燃料、空气为助燃气体,其中燃料消耗量为 5 000 Nm³·h⁻¹,空气过剩系数为 1.05~1.10。窑炉结构和各小炉燃料分配比例如文献[22]所述。

1.2 不同案例天然气掺氢比例

在不同模拟案例中,燃料燃烧供应的总能量相同。天然气掺氢比例为氢气体积与混合燃料总体积之比,各模型掺氢比、燃料热值和燃料消耗量、助燃空气量如表 1 所示。为减少燃料喷射速率对火焰形态的影响,各模型通过调整喷枪孔径大小,保持燃料喷射速度基本不变。

1.3 玻璃窑炉数值模型建立

研究采用捷克 Glass Service 公司开发的 Glass Furnace Model 软件建立玻璃窑炉三维数值模型。模型几何结构及网格划分如图 1 所示,模型采用正交网格进行划分。窑炉模型中燃料燃烧过程采用有限速率/涡耗散模型对反应物和生成物的传输进行求解。窑炉内辐射传热过程采用 DO(Discrete

Ordinates)模型进行求解。燃料和高温烟气的湍流过程采用 Standard $k-\varepsilon$ 模型进行求解。

建模采用的耐火材料热物性参数、边界条件等基于前期研究进行设定^[22-23]。熔窑模型以有限体积法 FVM(Finite Volume Method)离散变量, 采用 SCGS (Symmetrical Coupled Gauss-Seidel)对称耦合 Gauss 矩阵算法对模型连续方程、动量方程和能量守恒方程进行迭代求解, 并求解相关湍流模型、辐

射模型、化学反应模型。计算完成经后处理得到窑炉内燃料燃烧温度场、烟气流场、烟气主要成分浓度场等相关物理场。

1.4 燃烧反应模型建立

对玻璃窑炉中燃料燃烧化学反应进行模拟, 其中天然气主要成分为甲烷, 甲烷燃烧的化学反应如式(1)所示, 氢气燃烧的化学反应如式(2)所示。

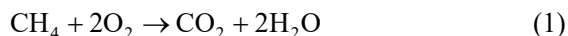
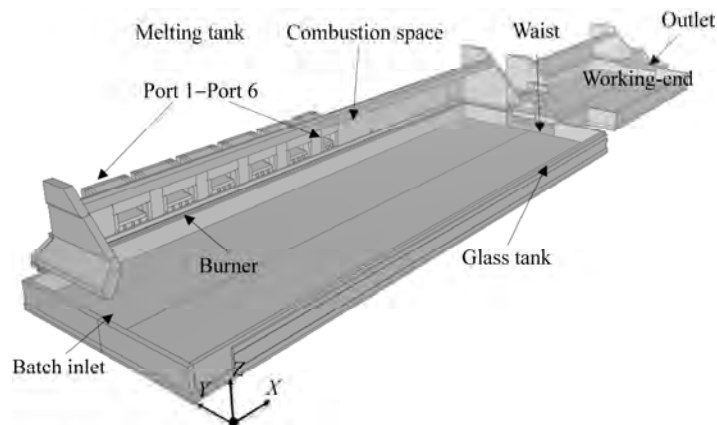


表 1 天然气掺氢燃料燃烧参数

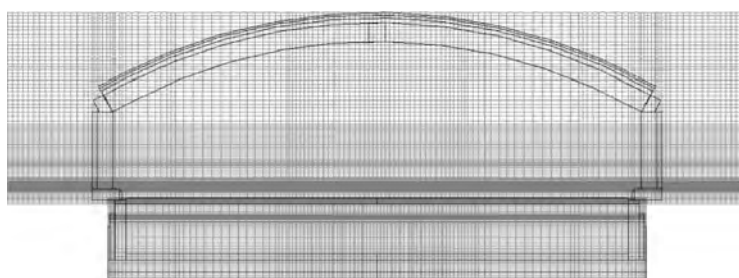
Table 1 Combustion parameters of natural gas mixed with hydrogen fuel

Model number	$\varphi(\text{H}_2)/\%$	Heat value of mixed fuel $/(kJ \cdot \text{Nm}^{-3})$	Mixed fuel consumption $/(Nm^3 \cdot h^{-1})$	Combustion air $/(Nm^3 \cdot h^{-1})$
Basic case	0	36 606	5 000	52 607
H ₂ -10%	10	34 131	5 363	52 184
H ₂ -20%	20	31 655	5 782	51 695
H ₂ -30%	30	29 180	6 272	51 124
H ₂ -40%	40	26 705	6 854	50 446

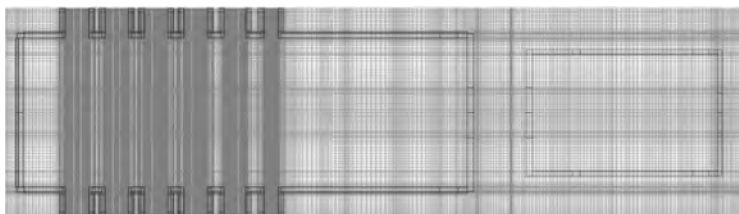
φ —Volume fraction.



(a) Geometry of glass furnace



(b) Grid at cross-section of glass furnace



(c) Grid at horizontal plane of glass furnace

图 1 玻璃窑炉模型几何结构及网格划分图

Fig. 1 Geometry and grid of glass furnace model



研究采用有限速率/涡耗散模型求解反应物和生成物的组分输运方程。在燃烧初始阶段, 采用 Arrhenius 方程进行动力学计算, 控制点火源。当火焰被点燃, 计算的涡耗散反应速率一般会低于 Arrhenius 反应速率, 此时反应速率由大涡混合时间尺度 k/ε 控制。Arrhenius 反应速率方程如式(3)所示, 大涡混合时间尺度 k/ε 决定的反应速率计算如式(4)~式(5)所示^[23], 最终反应速率由式(4)或式(5)计算得到较小项决定。有限速率/涡耗散模型综合考虑了化学反应速率和湍流流动对燃料燃烧过程的影响, 模拟结果精度高, 适应性广。

$$R_{\text{Arrh}} = e^{\frac{k_1 - k_2}{RT}} \cdot [\text{CH}_4]^{r_{\text{CH}_4}} \cdot [\text{O}_2]^{r_{\text{O}_2}} \quad (3)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min_R \left(\frac{Y_R}{v'_{R,r} M_{w,R}} \right) \quad (4)$$

$$R_{i,r} = v'_{i,r} M_{w,i} A B \rho \frac{\varepsilon}{k} \frac{\sum_P Y_P}{\sum_j v''_{j,r} M_{w,j}} \quad (5)$$

其中: k_1 和 k_2 为动力系数; r_{CH_4} 和 r_{O_2} 是燃烧反应指数, 上述系数决定了 Arrhenius 反应速率; ρ 为密度; u 为气流速度; k 为湍动能; ε 为湍动耗散率; Y_P 为反应产物 P 的质量分数, Y_R 为某一反应物 R 的质量分数; A 为经验常数, 取值为 4.0; B 为经验常数, 取值为 0.5。 $v'_{i,r}$ 为反应物 i 在反应 r 的化学反应计量系数; $v''_{j,r}$ 为反应产物 j 在反应 r 的化学反应计量系数; $M_{w,i}$ 为物质 i 的分子量; $M_{w,j}$ 为物质 j 的分子量。

燃料反应模型中, 计算燃料燃烧的 Arrhenius 有限速率方程的动力系数与燃料种类相关。天然气燃烧的 Arrhenius 有限速率方程的动力系数 $k_1 = 26.07$, $k_2 = 2.027 \times 10^8 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 燃烧反应指数 $r_{\text{CH}_4} = 0.2$, $r_{\text{O}_2} = 1.3$ 。氢气燃烧的 Arrhenius 有限速率方程的动力系数 $k_1 = 34.54$, $k_2 = 1.0 \times 10^8 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$, 燃烧反应指数 $r_{\text{H}_2} = 1.0$, $r_{\text{O}_2} = 1.0$ 。对比天然气, 氢气发生燃烧反应的动力项 $\left(e^{\frac{k_1 - k_2}{RT}} \right)$ 更大, 随燃料浓度增加反应速率增加更快。

2 结果与讨论

2.1 燃烧空间温度场分布

图2为不同模型燃烧空间中心对称面和4#小炉中心横截面的温度场分布。由图2可见, 由于氢气燃烧反应速率大, 释放热量分布区域更集中。燃料

掺氢比为 10% 时, 燃烧形成火焰中心高温区域长度与基础模型基本一致。当燃料掺氢比例为 20% 及以上时, 火焰中心高温区域明显缩短, 如图 2 中 1 680 °C 等温线所示, 其中, 基础模型 1 680 °C 火焰面长度为 10.6 m (窑炉熔化部宽度为 12.5 m)、掺氢比例为 10%~40% 模型中 1 680 °C 火焰面长度依次为 10.6、10.0、9.8、9.6 m。采用天然气掺氢混合燃料供能, 燃料燃烧速率加快, 掺氢比例为 20% 及以上时, 燃烧形成的火焰长度会明显缩短。

对比其他模型, 掺氢比例为 10% 和 20% 模型燃料燃烧形成火焰末端高温区域 (1 640 °C 等温线) 面积较大, 表明火焰末端未燃燃料相对较多, 部分燃料在火焰末端完全燃烧释放热量, 导致火焰末端形成高温区域面积较大。

图 3 为熔化部碓顶耐火材料中心线温度。由图 3 可见, 由于各模型燃料供应总能量和各小炉燃料分配比例不变, 各模型燃烧空间碓顶中心线温度变化趋势基本一致。相比基础模型, 掺氢比例为 20% 及以上模型, 燃料燃烧形成火焰随着掺氢比例增加长度明显缩短, 燃烧释放热量集中在窑炉喷火口和窑炉中心面附近, 因而碓顶耐火材料中心线温度随掺氢比例增加而略微提高, 其中, 基础模型碓顶耐火材料最高温度为 1 600 °C、掺氢比例为 40% 模型碓顶最高温度为 1 605 °C。

图 4 为统计得到的各小炉预热空气平均温度和出口烟气平均温度。由图 4 可见, 采用天然气掺氢燃料后, 消耗助燃空气量减少, 预热空气平均温度升高。其中, 1#小炉预热空气平均温度明显升高, 平均温度升高 20~60 °C, 2#~6#小炉预热空气平均温度升高 10~20 °C。相比预热空气, 采用天然气掺氢燃料窑炉出口烟气温度没有明显升高。采用天然气掺氢燃料窑炉, 其预热空气温度提高与窑炉消耗的助燃空气量减少有关。其中, 掺氢比例为 10% 和 20% 的玻璃窑炉, 各小炉预热空气平均温度明显升高; 窑炉燃料掺氢比例增大至 30% 和 40%, 燃烧产生的烟气体积减少, 烟气携带热量减少, 通过烟气换热进行助燃空气预热, 得到预热空气的温度基本维持稳定, 不随掺氢比例增大而继续提高。

2.2 燃烧空间流场分布

图 5 为各模型燃烧空间燃料燃烧产生烟气流线分布。由图 5 可见, 1#小炉前和 4#小炉后热烟气湍流较强, 2#小炉、3#小炉、4#小炉燃烧产生的烟气直接流向对侧小炉, 部分烟气转向燃烧空间前端和

末端形成湍流, 与燃烧空间充分热交换。统计各模型烟气在窑炉内的停留时间, 掺氢比例为 0~40% 窑炉, 热烟气平均停留时间依次为 11.69、11.91、

12.41、12.52、12.58 s, 随着燃料中氢气比例增加, 热烟气在窑炉内的停留时间延长, 有助于烟气与窑炉充分热量交换。

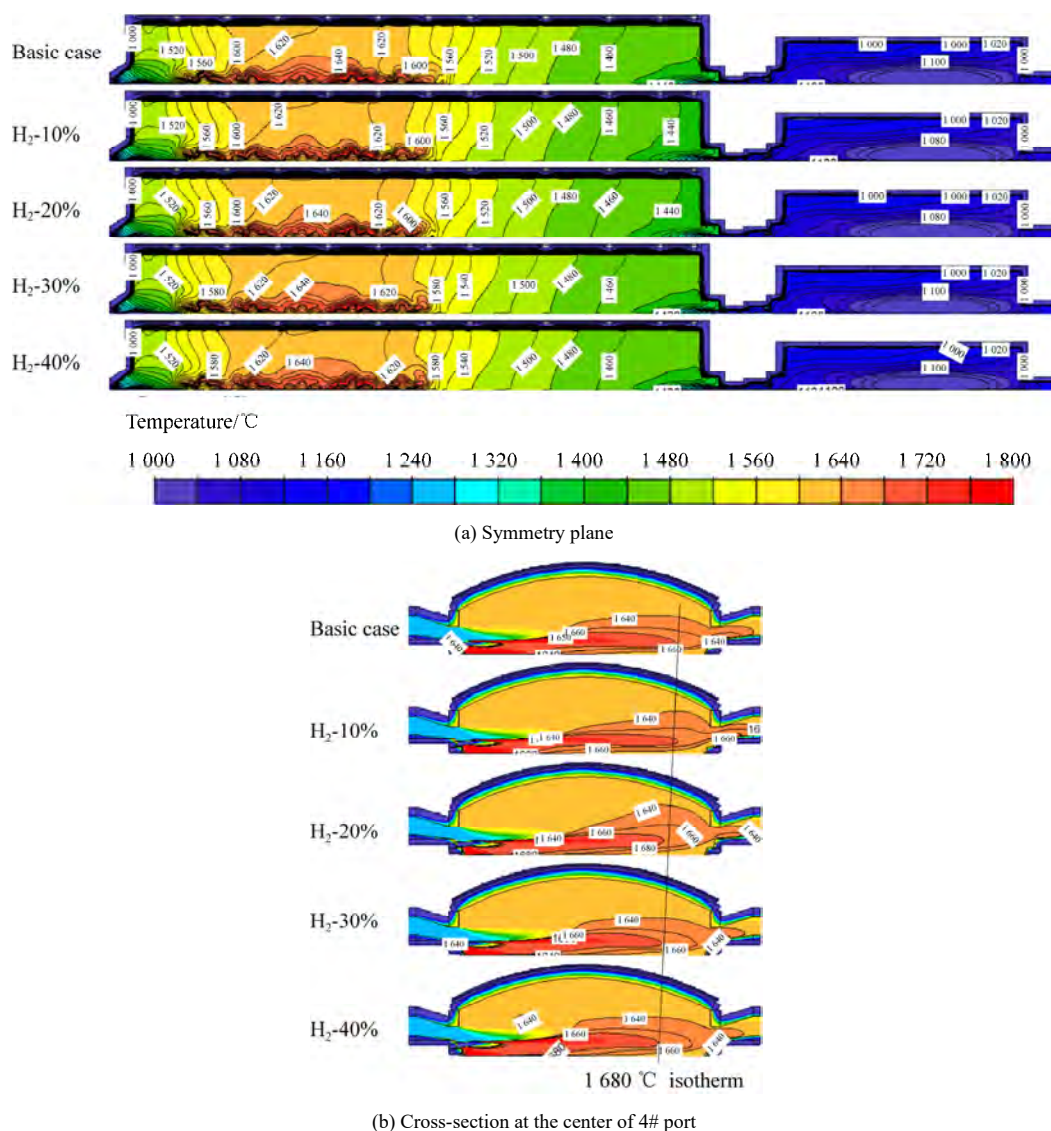


图 2 燃烧空间温度场分布
Fig. 2 Temperature fields of combustion space

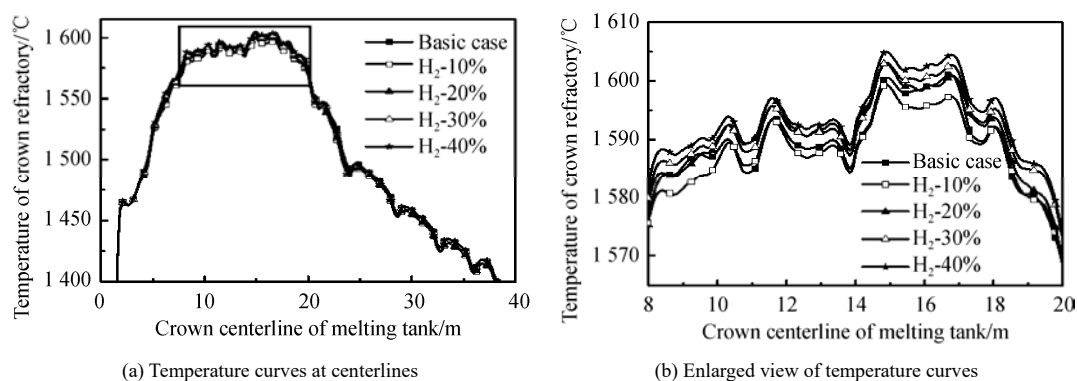


图 3 熔化部碇顶温度
Fig. 3 Crown temperature at melting tank

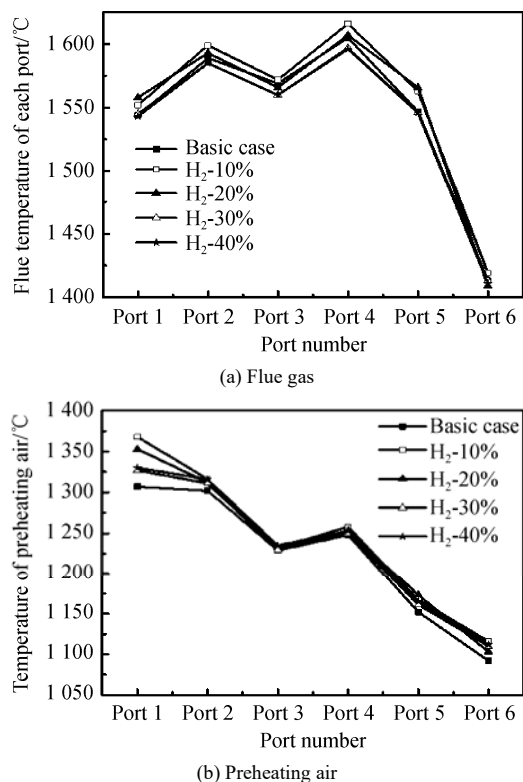


图4 各小炉助燃空气平均预热温度和出口烟气平均温度
Fig. 4 Average temperature of preheating air and flue gas

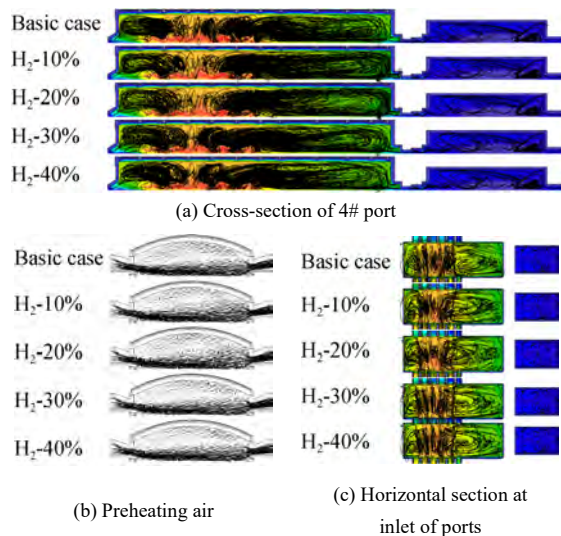


图5 燃烧空间烟气流线分布

Fig. 5 Streamlines distribution of flue gas at combustion space

对比其他模型, 掺氢比例为 10% 和 20% 窑炉热烟气在燃烧空间中部即开始形成明显的旋流, 烟气沿碓顶材料回流(见图 5b)。其余模型热烟气在对侧小炉附近才开始形成旋流。掺氢比例为 10% 和 20% 窑炉中, 烟气提前形成旋流沿碓顶耐火材料回流是导致 4# 小炉火焰末端形成面积较大高温区域的原因之一, 该处高温区域靠近小炉对侧胸墙, 会加剧胸墙的高温冲刷侵蚀。

2.3 燃料和燃烧产物分布

图 6 为 4# 小炉中心横截面 H₂ 浓度分布。由图 6 可见, 各模型随着掺氢比例增加, 窑炉燃烧空间的 H₂ 浓度增大, 统计掺氢比例为 0~40% 模型小炉出口 H₂ 平均浓度, 依次为 0.06% (质量分数)、0.14%、0.23%、0.32%, 表明燃料中掺氢比例增加, 出口小炉中未完全燃尽的 H₂ 浓度增加。燃料燃烧过程和掺氢比例需要基于燃料安全燃烧极限进行调控, 其中氢气爆炸极限是 4.0%~75.6%。

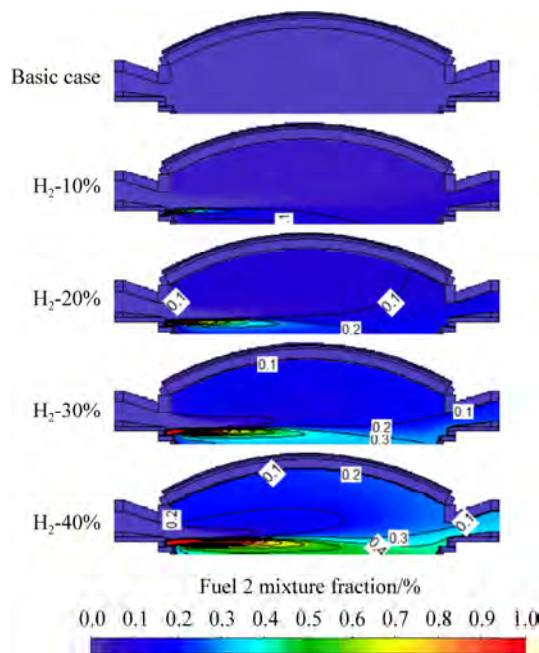


图6 各模型 4# 小炉中心横截面 H₂ 浓度分布
Fig. 6 H₂ concentration distribution at the cross-section of 4# port

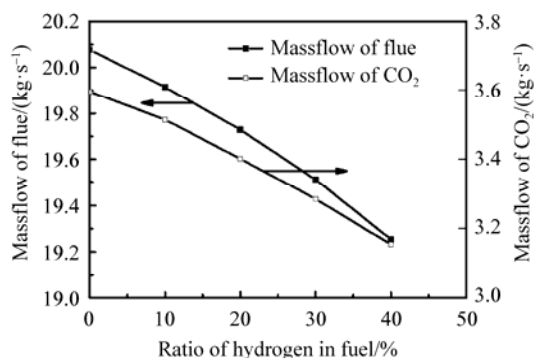
表 2 为统计得到不同掺氢比例窑炉模型小炉出口排出的主要烟气含量和 NO_x 浓度。由表 2 可知, 玻璃窑炉采用空气进行助燃, 助燃空气中 78% 为氮气, 因此烟气成分中 N₂ 含量较高, 高达 66%~67%。烟气中可燃成分 CH₄、CO、H₂ 等基本燃烧完全, 烟气中的残氧量约为 2.20%, 表明窑炉采用的空气过剩系数比较合理。

窑炉采用天然气掺氢燃料, 随着掺氢比例增大, 烟气中 CO₂ 浓度降低, H₂O 浓度升高。掺氢比例由 0 增加至 40%, 烟气中 CO₂ 浓度由 11.48% 降低至 10.35%, H₂O 浓度由 18.28% 升高至 20.30%。

图 7 为统计得到各模型烟气排放量和 CO₂ 排放量。由图 7 可见, 由于采用天然气掺氢燃料后燃烧消耗的助燃空气量减少, 最终排放烟气总量也减少。对比基础模型, 掺氢比例为 40%, 总烟气排放量由

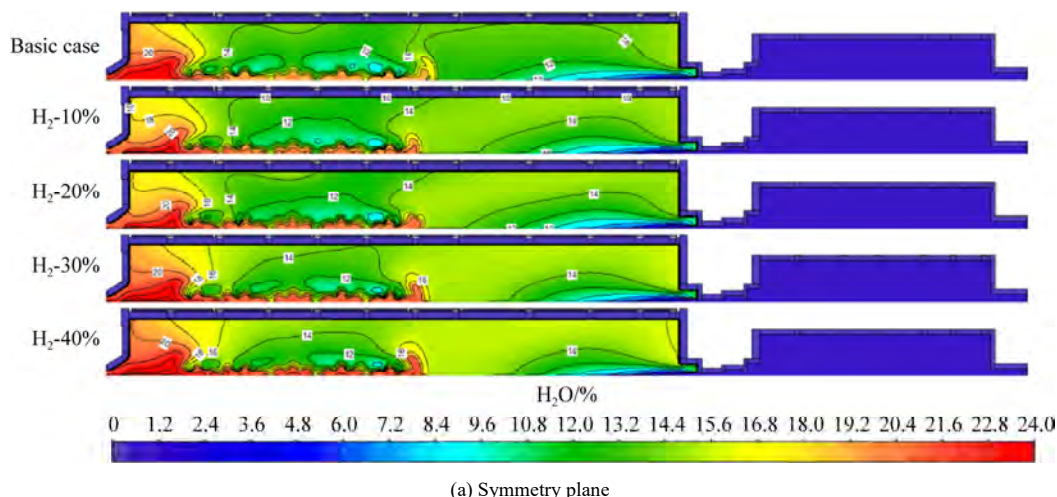
表 2 燃烧烟气主要成分含量和 NO_x 浓度Table 2 Ratios of main components and the NO_x concentration of flue gas

Model number	$\varphi(\text{O}_2)/\%$	$\varphi(\text{N}_2)/\%$	$\varphi(\text{CO}_2)/\%$	$\varphi(\text{H}_2\text{O})/\%$	$\varphi(\text{CO})/\%$	$\varphi(\text{CH}_4)/\%$	$\text{NO}_x/(\text{mg}\cdot\text{Nm}^{-3})$ (Dry, 8% O_2)
Basic case	2.15	67.25	11.48	18.28	0.02	0.01	1 093
H_2 -10%	2.18	66.98	11.28	18.65	0.06	0.04	1 092
H_2 -20%	2.24	66.85	10.98	19.05	0.04	0.03	1 284
H_2 -30%	2.15	66.64	10.68	19.68	0.03	0.01	1 283
H_2 -40%	2.13	66.37	10.35	20.30	0.03	0.01	1 282

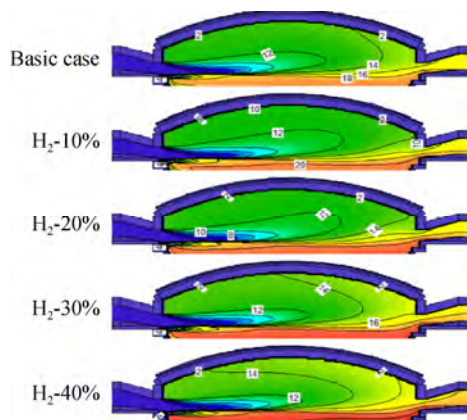
图 7 各模型烟气排放量和 CO_2 排放量Fig. 7 Emission of flue gas and CO_2 in each models

$20.08 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减少至 $19.25 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 减少比例为 4.13%。 CO_2 排放量由 $3.60 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减少至 $3.15 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, CO_2 排放重量减少 12.50%。此时, 氢气燃烧提供能量占燃料燃烧提供总能量的 18%。

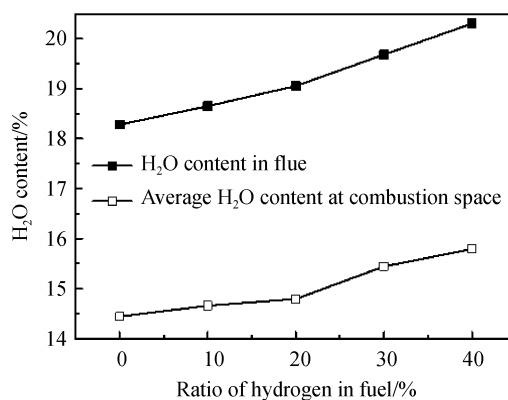
图 8 为燃烧空间 H_2O 蒸汽浓度分布和统计得到窑炉 H_2O 蒸汽的平均浓度。由图 8 可见, 窑炉内 H_2O 蒸汽浓度较高区域主要集中在窑炉前端和燃料燃烧区域, 窑炉前端 H_2O 蒸汽产生与配合料反应有关, 该区域生成的 H_2O 蒸汽含量为 20%~30%。1#~6#小炉位置对应的 H_2O 蒸汽浓度较高区域, 主要来



(a) Symmetry plane



(b) Cross-section of 4# port

(c) Average H_2O vapor concentration at melting tank图 8 燃烧空间 H_2O 蒸汽浓度分布Fig. 8 H_2O vapor concentration distribution at combustion space

自于燃料燃烧反应产生。随着燃料掺氢比例增加, 燃料燃烧产生的 H_2O 蒸汽含量增多, 燃烧空间内 H_2O 蒸汽浓度增大, 燃烧空间内耐火材料周围的 H_2O 蒸汽含量也不断升高。掺氢比例为 40%, 统计得到窑炉熔化部 H_2O 蒸汽的平均浓度由 14.44% 增加至 15.79%, 增加比例为 1.35%。对比窑炉排放烟气中 H_2O 蒸汽含量, 窑炉燃烧空间内 H_2O 蒸汽浓度相对较低, 这是由于窑炉内大量燃料和助燃空气输入, 使燃烧生成的 H_2O 蒸汽被稀释。而燃烧空间中 H_2O 蒸汽浓度增大可促进高温熔融玻璃液的碱蒸汽挥发, 需要结合实验开展碱蒸汽挥发和耐火材料侵蚀的相关研究, 为预测窑炉内耐火材料侵蚀过程, 优化窑炉结构和耐火材料选型提供参考。

NO_x 生成机制主要包含 3 种: 燃料型 NO_x 、瞬时型 NO_x 、热力型 NO_x 。燃料型 NO_x 主要与燃料中含有的 N 元素含量有关, 燃料中 N 元素含量越高, 燃烧反应生成的 NO_x 量越多。而天然气掺氢的混合燃料中 N 元素含量极少, 生成的燃料型 NO_x 可以忽略。瞬时型 NO_x 生成与燃料燃烧反应过程中产生的 CH —等自由基团有关, CH —等自由基团将 N_2 氧化生成 NO_x 。瞬时型 NO_x 生成量较小, 模拟求解过程中仅考虑热力型 NO_x 生成对排放的 NO_x 污染物浓度的影响。

由表 2 还可以看出, 基础模型和掺氢比例 10% 窑炉生成 NO_x 浓度相对较低, 分别为 $1\,093\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下) 和 $1\,092\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下)。掺氢比例为 20%~40% 窑炉生成 NO_x 浓度依次为 $1\,284\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下), $1\,283\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下), $1\,282\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下)。对比基础模型, 采用掺氢比例为 20%~40% 混合燃料生成 NO_x 浓度相对较高, NO_x 排放浓度增量为 17.38%。

表 2 统计 NO_x 排放浓度仅考虑热力型 NO_x , 热力型 NO_x 生成速率与燃料燃烧温度呈正相关, 当燃料燃烧反应温度高于 $1\,500\text{ }^\circ\text{C}$ 时, NO_x 生成速率随温度升高迅速增加。

图 9 为统计得到窑炉燃烧空间温度频率分布。由图 9 可见, 各模型燃烧空间温度频率最大值位于 $1\,625\text{ }^\circ\text{C}$ 附近, 对应于燃料燃烧集中释放热量的区域。基础模型和掺氢比例 10% 模型温度频率最大值对应 $1\,624\text{ }^\circ\text{C}$, 掺氢比例为 20%~40% 模型温度频率最大值对应 $1\,627\text{ }^\circ\text{C}$ 。掺氢比例为 20%~40% 模型燃料燃烧集中释放热量的区域, 其对应温度比基础模型和掺氢比例 10% 模型的温度高, NO_x 生成速

率大, 导致窑炉排放 NO_x 浓度比基础模型和掺氢比例 10% 模型高。为保证最终排放烟气中 NO_x 浓度符合排放标准 ($700\text{ mg}\cdot\text{Nm}^{-3}$, 干燥, 8% O_2 条件), 需提高烟气处理的脱硝效率。

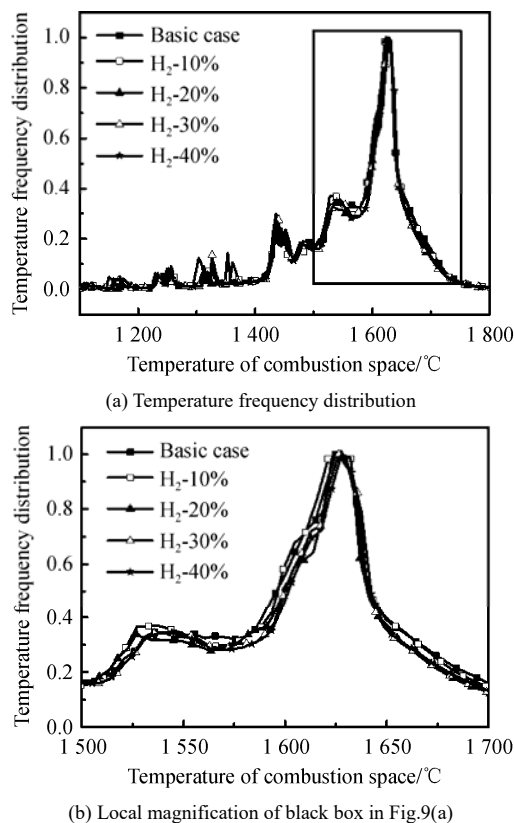


图 9 窑炉燃烧空间温度频率分布
Fig. 9 Temperature frequency distribution of combustion space

各模型中采用的燃料供应总能量和分配比例相同, 其燃烧空间温度制度基本一致, 因此得到池窑内玻璃液熔化温度分布和对流循环速率基本一致, 表明采用天然气掺氢燃料供能可保障窑炉温度制度, 有助于玻璃液稳定充分熔化, 该研究对此不做进一步深入探讨。

3 结论

1) 玻璃窑炉采用天然气掺氢混合燃料供能, 燃料燃烧速率加快, 释放热量集中, 掺氢比例为 20% 及以上时, 燃烧形成的火焰长度会明显缩短。掺氢比例由 0 增加至 40%, 窑炉中 4# 小炉燃烧形成的火焰中心高温区域 (温度不小于 $1\,680\text{ }^\circ\text{C}$) 长度由 10.6 m 缩短至 9.6 m, 碓顶耐火材料最高温度由 $1\,600\text{ }^\circ\text{C}$ 增加至 $1\,605\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 天然气掺氢比例由 0 增加至 40%, 热烟气在

窑炉内的停留时间延长, 热烟气的平均停留时间由 11.69 s 延长至 12.58 s, 有助于烟气与窑炉充分热量交换, 提高窑炉热效率。

3) 对比基础窑炉, 采用天然气掺氢混合燃料供能, 当掺氢比例为 40%, 氢气燃烧供能占燃料总能量 18% 时, 窑炉总烟气排放量由 $20.08 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 减少至 $19.25 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 减少比例为 4.13%。 CO_2 排放量由 $3.60 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 减少至 $3.15 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 减少比例为 12.50%。而窑炉排出烟气中 H_2O 含量由 18.28% 升高至 20.30%, 窑炉熔化部 H_2O 蒸汽含量由 14.44% 增加至 15.79%。

4) 基础窑炉和掺氢比例 10% 窑炉生成 NO_x 浓度相对较低, 分别为 $1\ 093 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下) 和 $1\ 092 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下)。掺氢比例为 20%~40% 窑炉燃料燃烧集中释放热量的区域对应温度比基础窑炉和掺氢比例 10% 窑炉的温度高, NO_x 生成速率大, 生成 NO_x 浓度相对较高, 依次为 $1\ 284 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下), $1\ 283 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下), $1\ 282 \text{ mg} \cdot \text{Nm}^{-3}$ (干燥, 8% O_2 条件下)。

参考文献:

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23.
- [2] 张锁江, 张香平, 葛蔚, 等. 工业过程绿色低碳技术[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 511-521.
ZHANG Suojiang, ZHANG Xiangping, GE Wei, et al. Bull Chin Acad Sci(in Chinese), 2022, 37(4): 511-521.
- [3] 何峰, 金明芳, 赵玉华, 等. 浮法玻璃窑炉用燃料及其烟气污染物排放特性与治理技术分析[J]. 玻璃, 2019, 46(3): 18-25.
HE Feng, JIN Mingfang, ZHAO Yuhua, et al. Glass(in Chinese), 2019, 46(3): 18-25.
- [4] 马玉聪. 碳减排对平板玻璃熔化技术发展影响[J]. 玻璃, 2021, 48(4): 30-33.
MA Yucong. Glass(in Chinese), 2021, 48(4): 30-33.
- [5] 贾子强, 方广, 牛晨晨, 等. 玻璃材料对我国碳中和目标实现的贡献浅析[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(2): 367-375.
JIA Ziqiang, FANG Guang, NIU Chencheng, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2022, 41(2): 367-375.
- [6] 刘志强. 平板玻璃工业企业碳中和实施途径[J]. 玻璃, 2022, 49(4): 1-7.
LIU Zhihai. Glass(in Chinese), 2022, 49(4): 1-7.
- [7] 王勇, 曹元辉, 张萌, 等. 碳中和背景下建材行业未来发展趋势探讨[J]. 中国建材科技, 2022, 31(3): 97-99.
WANG Yong, CAO Yuanhui, ZHANG Meng, et al. China Build Mater Sci Technol(in Chinese), 2022, 31(3): 97-99.
- [8] 马玉聪. 浮法玻璃大功率电熔化工艺可行性分析[J]. 玻璃, 2022, 49(6): 21-24.
MA Yucong. Glass(in Chinese), 2022, 49(6): 21-24.
- [9] BARRETO L, MAKIHIRA A, RIAHI K. The hydrogen economy in the 21st century: a sustainable development scenario[J]. Int J Hydrog Energy, 2003, 28(3): 267-284.
- [10] 张海龙. 中国新能源发展研究[D]. 长春: 吉林大学, 2014.
ZHANG Hailong. Research on new energy development in China(in Chinese, dissertation). Changchun: Jilin University, 2014.
- [11] 王永钢. 浅谈浮法玻璃工厂氮氢站设计[J]. 中国玻璃, 2005(2): 20-23.
WANG Y. China Glass(in Chinese), 2005(2): 20-23.
- [12] YUE M L, LAMBERT H, PAHON E, et al. Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, applications, trends and challenges[J]. Renew Sustain Energy Rev, 2021, 146: 111180.
- [13] CHMELAR JOSEF, JANDACEK PETR, VOJTECH PETR, et al. Method and burner of hydrogen combustion in industrial furnace, especially in a glass furnace or a furnace for metal melting, by means of a multi nozzle burner[P]. WO/2021/233530, 2021-11-25.
- [14] Architectural glass production powered by hydrogen in world first [EB/OL]. [2021-08-31]. <https://www.pilkington.com/en-gb/uk/news-insights/latest/architectural-glass-production-powered-by-hydrogen-in-world-first>.

※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※ ※



韩建军, 研究员、博士生导师, 担任武汉理工大学科学技术发展院院长, 兼任中国硅酸盐学会电子玻璃分会理事、中国建筑材料联合会科技教育委员会委员、湖北省科学技术协会委员。入选教育部新世纪人计划。主要研究方向为玻璃低能耗制备、玻璃与非晶态材料、特种功能玻璃、特种功能玻璃光纤及薄膜, 开发了多种特种功能玻璃产品及相关制备技术, 相关产品应用在民用、医疗、信息显示等领域。参编教材和专著 7 套, 申报专利 60 余件, 在玻璃领域重要期刊发表论文 120 余篇。



李路瑶, 博士, 武汉理工大学汽车工程学院助理研究员, 主要从事玻璃窑炉仿真和浮法成形过程研究, 致力于高效节能和清洁燃烧技术在玻璃生产过程中的应用。主持国家自然科学基金青年基金, 国家重点研发计划子课题, 校企合作等项目 5 项。