文章编号：1008-1542（2026）00-0000-00

燃烧器布置方式对热处理炉内流场的影响

乔方琪[1]，米翠丽[2]，武　哲[1]，崔海亭[1]，张　凯[1]，蒋静智[1]

（1.河北科技大学机械工程学院，河北石家庄　050018；

2.河北建投能源科学技术研究院有限公司，河北石家庄　050051）

摘　要：针对辊底式热处理炉中传统旋流燃烧器布置后带来的温度均匀性较低的问题，提出一种基于燃气分级技术的低氮燃烧器在辊底式热处理炉内的布置方式。首先，将已经模拟的优化后的低氮燃烧器以四种不同的布置方式置于热处理炉上；其次，采用 ANSYS Fluent 软件系统模拟低氮燃烧器在热处理炉上不同的布置方式对炉内温度均匀性的影响；最后，通过对比温度分布云图及储氢罐放置位置水平温度变化图等，确定燃烧器最佳布置方式。结果表明：相比燃烧器在热处理炉其他三种布置方式，分别在 y=100 mm 以及 y=700 mm 水平位置间隔均匀布置，且错位间距为 400 mm 更能增强对流，有助于提高炉内均温性，还能带来能耗的降低。在设计低氮燃烧器后针对辊底式热处理炉内燃烧器的布置问题给出一种具体方式，为辊底式热处理炉的均温性设计提供了优化方向。

关键词：燃烧学；低氮燃烧技术；温度均匀性；储氢罐加热；数值模拟

中图分类号：TK174　　**文献标识码：**A

Effect of burner arrangement on flow field in heat treatment furnace

QIAO Fangqi[1], MI Cuili[2], WU Zhe[1], CUI Haiting[1], ZHANG Kai[1], JIANG Jingzhi[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China;

2.Hebei Jiantou Energy Science and Technology Research Institute Company Limited, Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

Abstract : In order to solve the problem of low temperature uniformity caused by the arrangement of traditional swirl burners in the roller hearth heat treatment furnace, proposes a arrangement of low nitrogen burners in the roller hearth heat treatment furnace based on gas classification technology. First of all, the optimized low nitrogen burners that have been simulated are placed on the heat treatment furnace in four different arrangements ; secondly, ANSYS Fluent software system is used to simulate the influence of different arrangement of low nitrogen burners on the temperature uniformity in the heat treatment furnace. Finally, by comparing the temperature distribution cloud map and the horizontal temperature change map of the hydrogen storage tank, the optimal arrangement of the burner is determined. The results show that compared with the other three arrangements of the burner in the heat treatment furnace, the horizontal positions of y = 100mm and y = 700mm are evenly arranged, and the dislocation spacing is 400mm, which can enhance the convection, help to improve the temperature uniformity in the furnace, and also bring about the reduction of energy consumption. After designing the low nitrogen burner, a specific way is given for the arrangement of the burner in the roller hearth heat treatment furnace, it provides an optimization direction for the temperature uniformity design of the roller hearth heat treatment furnace, and provides a systematic blueprint for the transformation of the whole industrial heating processing equipment.

收稿日期：2025-10-24；修回日期：2025-12-10；责任编辑：冯民
基金项目：国家自然科学基金（52406087）；驻冀高校重大科技专项（241080407）；中央引导地方科技发展资金项目（246Z4502G）
第一作者简介：乔方琪（2001—），女，河北保定人，硕士研究生，主要从事热流体方面的研究。
通信作者：蒋静智，教授。E-mail：jjzhi2000@126.com

Keywords: science of combustion; low nox combustion technology; temperature uniformity; hydrogen storage tank heating ;numerical simulation

天然气热处理炉在热处理行业逐步推广，对天然气热处理炉的研究日益深入[1-4]。热处理炉内的温度均匀性是反映热处理炉加工性能的核心指标之一[5]，直接决定热处理产品的质量、性能和可靠性，同时也是影响高压气瓶热处理质量的关键因素。

目前，提升热处理炉均温性主要围绕仿真优化、结构改进与智能控制 3 个层面展开。在仿真层面，文献[6-7]通过建立非稳态传热模型、优选湍流模型（如 Realizable k–ε）来精准预测温度场；在结构层面，文献[8-9]通过优化工件摆放位置与热电偶布点策略，有效改善了炉内流场与温度场的均匀性；在控制层面，文献[10-11]引入智能控制技术，实现了±5 ℃的精确控温。此外，针对辊底炉等特定炉型，学者们也关注了测温精度与运行风险等工程实际问题[12-14]。尽管这些方法显著提升了设备性能，但当前技术水准仍难以完全满足航天等高精领域对±5 ℃的严苛均温要求[8,15]。

为解决上述问题，本文提出了一种储氢瓶在辊底式热处理炉内进行加工时使炉温更均匀的燃烧器排布方式，其中包括空炉以及将常用尺寸储氢罐放置进热处理炉后的炉膛，并对模拟进行修正和优化设计，以期得到最优的燃烧器布置方式。

1　模型建立

1.1　物理模型

热处理炉所用的低氮燃烧器模型结构图如图 1 所示。燃烧器中心燃气管半径 r_1 为 8 mm；中心燃气管上的喷口半径 r'_1 为 1.5 mm，喷口位于中心燃气管侧面，共 8 个；一次静叶栅内径 R_1 为 9 mm，外径 R'_1 为 24 mm；二次燃气管半径 r_2 为 8 mm，轴向分布，共 4 根；二次静叶栅内径 R_2 为 46 mm，外径 R'_2 为 59 mm；静叶栅片的厚度 δ 为 2 mm。燃烧器的材质为不锈钢，具有良好的耐腐蚀性和耐高温性，能够承受燃烧中的高温和化学腐蚀。中心燃气管、一次静叶栅、二次燃气管、二次静叶栅和外壳按顺序从内向外同心装配组成该低氮燃烧器。所用燃料为天然气。

热处理炉模型结构图如图 2 所示。该炉长 l 为 14 000 mm，宽 b 为 800 mm，高 h 为 800 mm。燃烧器在热处理炉两侧等间距 2 400 mm 放置。技术参数如表 1 所示。

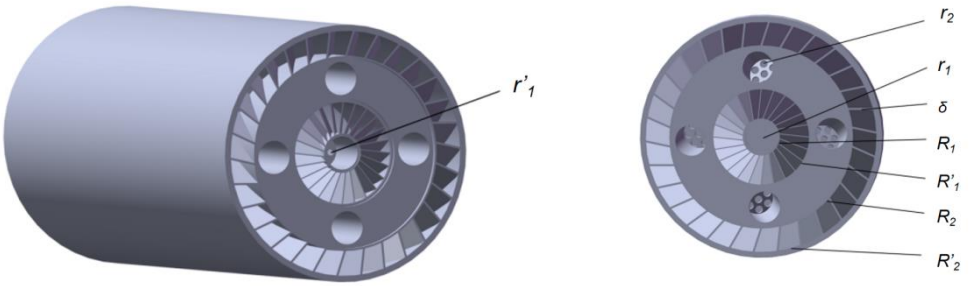


图 1　低氮燃烧器模型结构图

Fig. 1 Low nitrogen burner model structure diagram

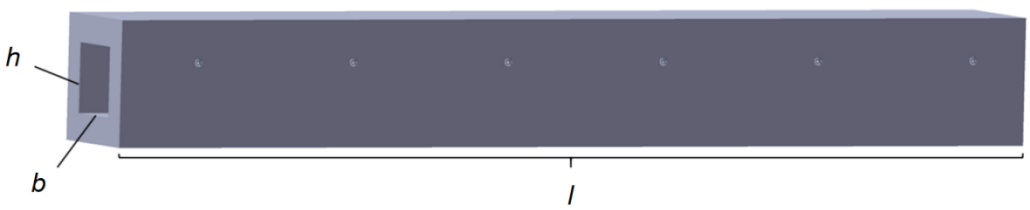


图 2　热处理炉模型结构图

Fig. 2 Structure diagram of heat treatment furnace model

表 1　热处理炉技术参数

Table 1 Technical parameters of heat treatment furnace

模拟工况	数值
炉膛有效尺寸	14 000 mm×800 mm×800 mm
燃料种类	天然气
燃烧器数量/个	12
加热温度/K	300~1 373
NO*x* 排放/（mg/m^3）	≤200
储氢罐尺寸	*R*300 mm×12 000 mm

由于该模拟结构复杂，需要大量的计算，为了简化计算，假设空气和燃料在进入燃烧器之前是均匀分布的，并忽略辊轮的影响。

1.2 数学模型与方法

在本文中，利用 Fluent 2022 R1 对该低氮燃烧器的燃烧过程进行数值模拟[16]，所有数据均来自有限元软件 ANSYS Fluent 2022 的数值模拟仿真。模拟计算采用 3D、稳态模型；流体为不可压缩流体，选取 Pressure-Based（压力基）求解法，离散方法为有限体积法，压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法，压力项采用 PRESTO! 格式，动量、能量、组分及湍流方程均采用二阶迎风格式。考虑到燃烧器旋流特性和网格数量，本文选择可实现的 *k-ε* 湍流模型进行数值模拟，以提高计算效率[17-18]。整体选用 Power Law 方法进行求解，除能量方程残差为 10^{-6} 外，其余方程残差均为 10^{-3}。为方便运算，模拟松弛因子压力设定为 0.3，动量为 0.7，其余均为 1。所有燃烧器入口边界条件均设置为速度入口，炉子的出口边界条件设置为压力出口，虽然在炉子壁面处设置有保温层，但不是绝对绝热，因此设置壁面条件为高温自然对流，入口流量的计算取决于入口流速，出口压力设置为大气压。模拟的工况条件见表 2。

表 2　模拟工况条件

Tab.2 Simulated operating conditions

模拟工况	数值
一级燃气入口速度/（m/s）	9.1
二级燃气入口速度/（m/s）	1.4
空气入口速度/（m/s）	5.25
燃气温度/K	300
空气温度/K	600

为保证准确度的同时节省计算量，根据燃烧器的特点在数值计算中采用以下基本假设[错误!未找到引用源。]：天然气中甲烷体积分数为 1 且视为理想气体，遵循理想气体状态方程；气体与壁面之间无相对滑动。

1）根据质量守恒和能量守恒建立的 N-S 流动控制方程矢量表达形式如下[16]：

$$\rho\frac{\mathrm{D}u}{\mathrm{D}t}=\rho X-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{1}{3}\mu\frac{\partial\theta}{\partial x}+\mu\nabla u_i,$$

$$\rho\frac{\mathrm{D}v}{\mathrm{D}t}=\rho Y-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{1}{3}\mu\frac{\partial\theta}{\partial y}+\mu\nabla v_i, \qquad (1)$$

$$\rho\frac{\mathrm{D}w}{\mathrm{D}t}=\rho Z-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{1}{3}\mu\frac{\partial\theta}{\partial z}+\mu\nabla w_i,$$

$$\theta=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}, \qquad (2)$$

式（1）中：等式左边项代表惯性力项；□∇□□、□∇□□、□∇□□代表黏性力项；μ 为黏性系数；ρ 为流体密度；p 是压力；式 (2)中 u、v、w 为 t 时刻点 (x, y, z) 处的速度分量。

2）标准 *k-* ε 模型的湍流动能 *k* 方程如下：

$$\rho\frac{Dk}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M, \tag{3}$$

3）标准 *k*- *ε* 模型的耗散率 *ε* 方程如下：

$$\rho\frac{D\varepsilon}{Dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{4}$$

式中：$G_k=-\rho\overline{u_i' u_j'}\frac{\partial u_j}{\partial x_i}$，为由平均速度梯度引起的湍流动能；$G_b=\beta g_i\frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial T}{\partial x_i}$，为由于浮力影响引起的湍流动能；$Y_M$为可压速湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响；湍流黏性系数$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$。

4）N2 链式反应方程式[20]：

$$\begin{cases} O_2\leftrightarrow O+O \\ O+N_2\leftrightarrow NO+N \\ N+O_2\leftrightarrow NO+O \\ N+OH\leftrightarrow NO+H \end{cases}, \tag{5}$$

5）能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j h)=-p\frac{\partial u_j}{x_j}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j})+\Phi+S_h, \tag{6}$$

式中：等号左边为单位流体总能量在单位时间内对时间的变化率；等号右边$-p\frac{\partial u_j}{\partial x_j}$为表面压力对流体微元所做的功，$\frac{\partial}{\partial x_j}(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j})$为热传导引起的单位体积能量变化，$\Phi$ 为黏性作用机械能转化为热能的部分；S_h 为化学反应热、相间热量交换以及自定义的体积热源项。

1.3 网格无关系验证

本文的物理模型在长宽高方向差异较大，为了提高计算效率并保证关键区域的精度，采用了非结构化的分区网格策略，在烧嘴射流区域及近壁区进行了局部加密，并在壁面生成了 3 层边界层网格以精确解析温度梯度。尽管模型整体长宽比较大，但绝大部分控制在 50 以内，最大倾斜度低于 0.8，满足 Fluent 求解器的计算要求。

本文所有模型均采用 Fluent Meshing 软件进行结构化网格划分，为得到最优网格数量，进行网格无关性验证。为了证明网格划分的质量不会影响模拟过程中的模拟结果，在相同的工作条件下使用网格数 290.45 万、314.80 万、333.55 万、349 万、375 万和 420.51 万进行数值模拟。数值模拟结果如图 3 所示，随着网格数量的增加，燃烧室出口的平均温度逐渐减小并趋于稳定，相比之下，当网格数到达 349 万时再增加网格数量，数值计算结果几乎没有差异。考虑到计算机的性能，本文选择了网格数 349 万进行模拟。

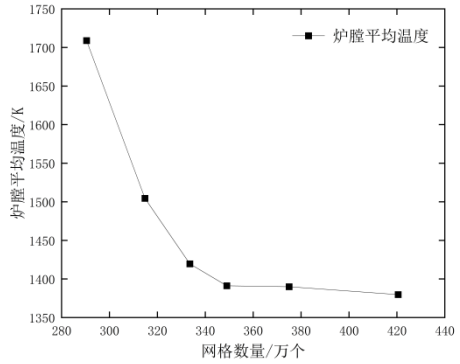


图 3　网格无关性验证

Fig. 3 Grid independence verification

1.4　模型可靠性验证

为确保仿真模型的模拟结果与预期概念模型的一致性，准确反映真实系统的行为和特性，为后续分析和决策提供可靠依据。根据吴奕滨等[21]的热处理炉内温度均匀运行测试，利用本文所用模型，将其简化为 300 mm×300 mm×300 mm 的炉膛进行模拟，同时燃烧器按照正视面左侧和右视面左侧各纵向排列 3 个燃烧器的方式布置，湍流流动模型采用带旋流修正的 k-e 湍流模型，湍流燃烧模型采用通用有限速率模型，设置为速度入口，压力出口进行模拟。在 0 mm、150 mm、300 mm 高度水平面上各取五个点（每个平面四条边线中点和平面中心点）进行观测，模拟结果如图 4 所示，各点模拟温度与实验温度相差在 20℃以内。因此，本仿真设计的模型能够通过验证，能够满足预定的精度和可靠性要求。

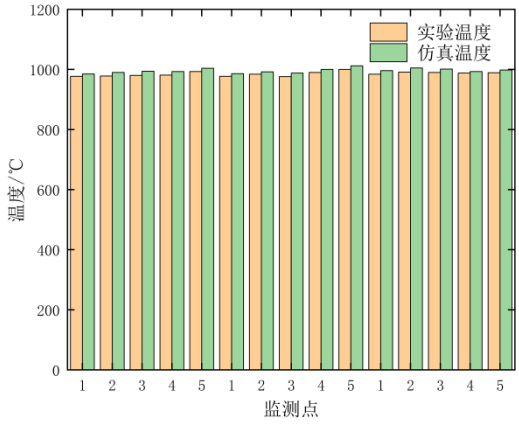


图 4　模型可靠性验证

Fig. 4 Model reliability verification

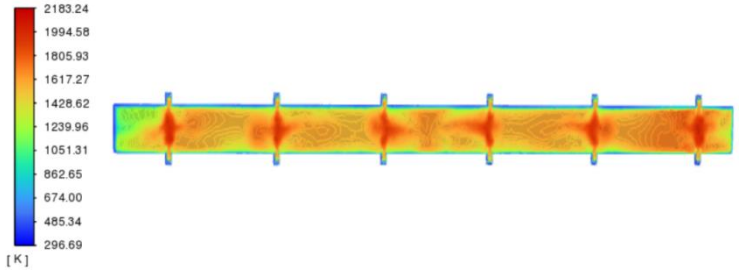
2　结果与讨论

2.1　燃烧器的布置方式对炉内温度均匀性的影响

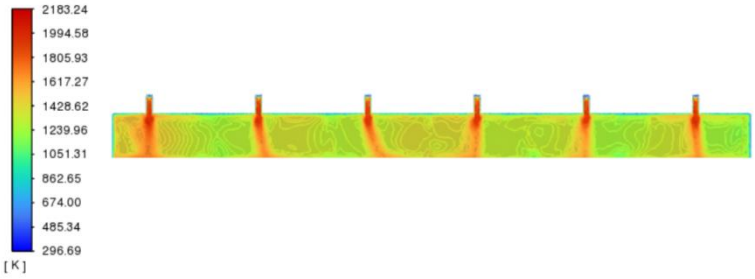
燃烧器的布置方式会直接且显著地影响温度均匀性和最高温度值，它决定了炉内涡旋、回流区的位置和强度。燃烧器喷出的高速射流结构是混合冷热流体、传递能量的关键。

图 5—7 分别为所设计辊底式热处理炉内燃烧器的四种排布方式（燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置、燃烧器分别在 y=100 mm 以及 y=700 mm 位置对冲均匀布置、燃烧器分别在 y=100 mm 以及 y=700 mm 位置间隔均匀布置和燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置时）xy 平面、xz 方向燃烧器中心所

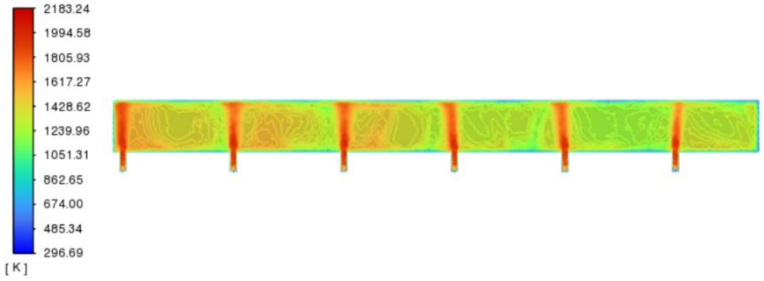
在平以及 *yz* 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图。



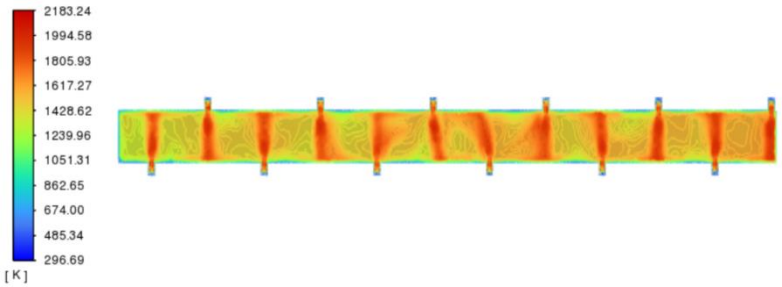
a） 燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置



b） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置



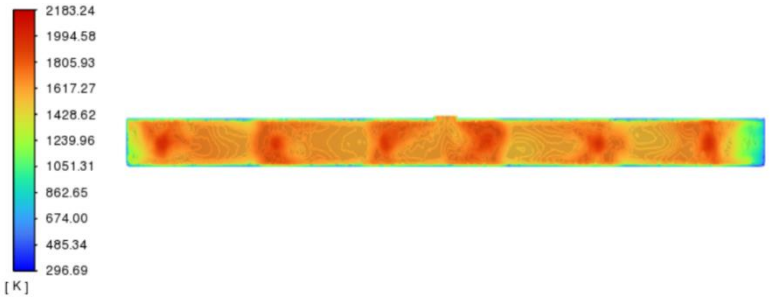
c） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置



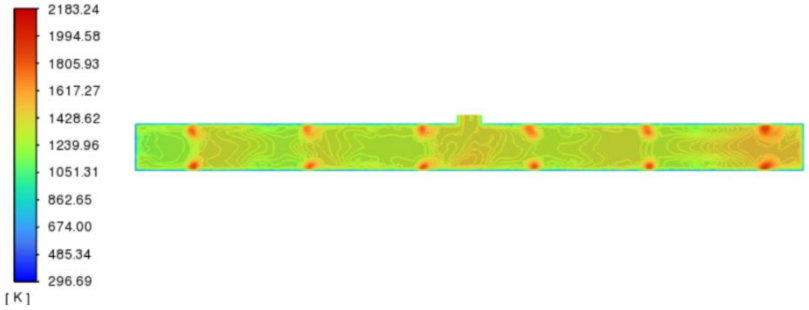
d） 燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置

图 5 *xz* 方向燃烧器中心所在平面温度云图

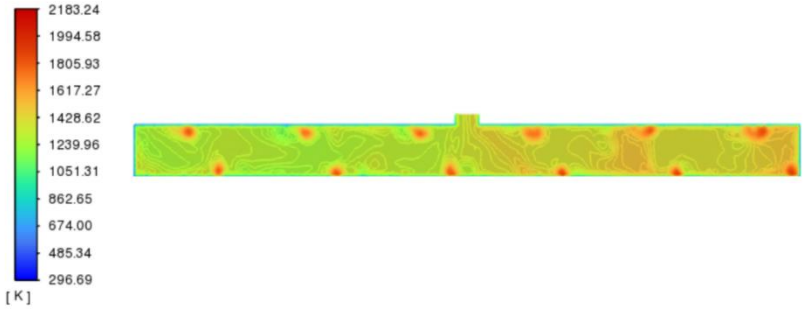
Fig. 5 The plane temperature cloud diagram of the burner center in the *xz* direction



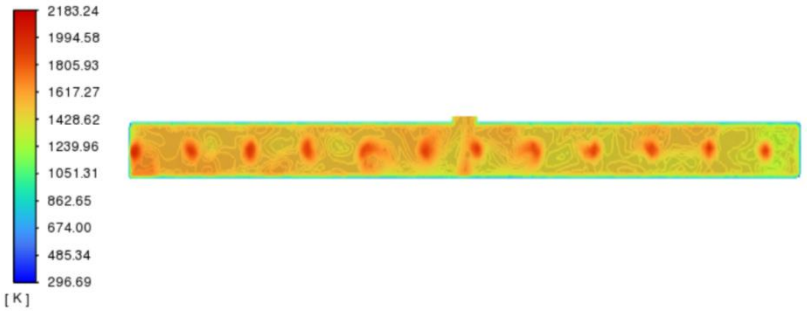
a） 燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置



b） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置



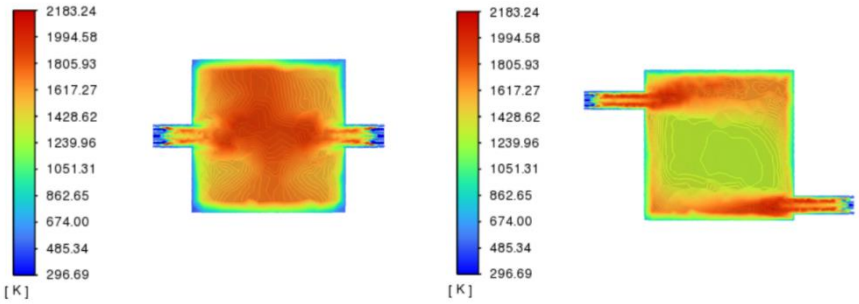
c） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置



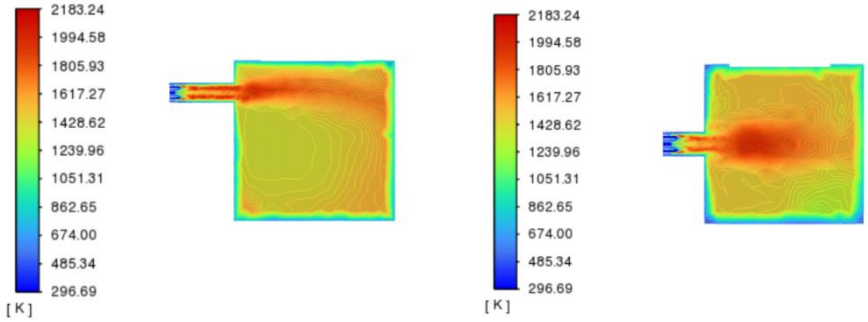
d） 燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置

图 6 *xy* 平面温度云图

Fig. 6 *xy* plane temperature cloud



a） 燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置 b） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置



c） 燃烧器分别在 *y*=100 mm 和 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置 d） 燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置

图 7 *yz* 方向燃烧器中心所在平面温度云图

Fig. 7 Plane temperature cloud diagram of burner center in *yz* direction

图 5 为 4 种布置方式 *xz* 方向燃烧器中心所在平面温度云图。由图 5 a）可以看出，当燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置时，存在多个明显的高温区域，这些高温区域大致呈等间距分布，与等间距燃烧器布置有关。温度云图清晰地显示出强烈的热分层。炉膛中部（燃烧器高度）温度最高，整个炉膛形成了多个“橄榄形”的温度分布。在高温区域之间，温度有所降低，说明热量在区域间有传递和扩散，且整体温度场的分布较为有序。由图 5 b）—d）可以看出，当燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置时、分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置时和在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置时，燃烧器工作能够有效释放热量。温度场在三维空间上分布更为均匀。高温区不再局限于一个狭窄的平面，而是被“打散”并分布到更大的体积内。在燃烧器之间的区域，温度以燃烧器为中心向周围逐渐降低，符合热传导、热对流等热传递规律。整体来看，温度场分布相对有序，没有出现局部过热或过冷的极端不均匀情况，说明燃烧器的布置以及炉内的热环境控制较好，有利于热处理过程中工件受热均匀。但图 5 c）燃烧器布置开始在炉膛口位置，使热量在边界处聚集，应合理设计此距离。

图 6 为 4 种布置方式 *xy* 平面温度云图。由图 6 a）可以看出，当燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置时，在燃烧器轴线所在的水平线上，由于射流的直接冲击和碰撞，形成了一个高温、高湍流强度的区域。但在该平面的上方和下方，由于缺乏直接的动量输入，温度相对较低，但还是整体高于在两侧上下布置的方式。由图 6 b）、c）可以看出，当燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置时和分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置时，炉膛内的温度较为均匀，除燃烧器布置区域及周围区域与其他区域温度相差较大外，大部分区域温度分布在 1 300 K 左右。整体温度场分布较为有序，虽燃烧器区域温度高，但相邻区域温度过渡自然，使工件各部分能按照预期的温度变化进行相应的热处理反应。由图 6 d）可以看出，与图 6 a）相似，燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置时，在中心位置上有很多燃烧器布置位置的高温区域，从颜色上看，比 b）、c） 2 种布置方式的颜色更深，即高温区域的最高温更高，同时除中心区域外的高温区更多，使得平均温度更高。

图 7 为 4 种布置方式 *yz* 方向燃烧器中心所在平面温度云图。撞击后的气流主要向上下 2 个方向偏转。但由于上下对称，且缺乏持续的驱动力，这股分流的气流速度迅速衰减，在到达炉顶/炉壁后形成较弱的下沉/上升流，最终在炉膛上半部和下半部形成两个大而弱的回流旋涡。这两个旋涡的换质换热量不足，导致顶部和底部成为“流动死区”。由图 7 d）可以看出火焰在炉膛中部喷射，且长度超过炉膛长度的一半，该位置是储氢罐放置位置，以上两种方式都会直接将火焰喷射到储氢罐表面，使储氢罐存在局部高温的情况，影响工件质量。反观图 7 b）、c），燃烧器在炉膛侧面上下布置，使火焰形成高温圈包裹住炉膛中部位置，形成中部等温圈，这个强大的主体环流不断地将中心区域的热气体搅拌、输运至顶部和底部角落，同时将角落的冷气体带回高温区加热，这样火焰不仅不会直冲储氢罐，还会使储氢罐受热和升温均匀，从而极大地改善了温度均匀性。

图 8 为 4 种布置方式炉膛内最高温度和平均温度对比图，由图可知，炉膛两侧燃烧器一侧上一侧下布置时总体上最高温度低于两侧燃烧器同高度布置，平均温度也更贴近设定值；此外，两侧上下两个平面的燃

烧器间隔布置的最高温度又低于对冲布置，而平均温度相差不大。

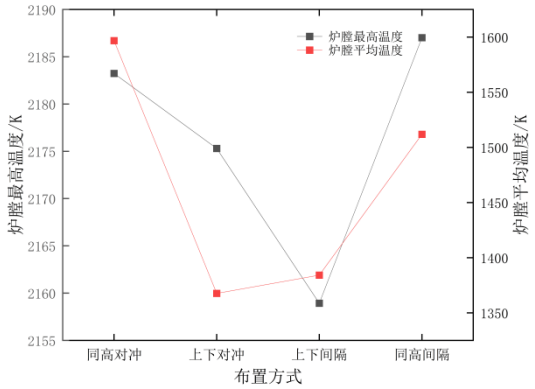


图 8　4 种布置方式炉膛内最高温度和平均温度对比

Fig. 8 Comparison of the maximum temperature and average temperature in the furnace of the four layouts

综上所述，在炉膛侧面分别上下布置时成功激发了三维的、立体的强对流循环，有利于提升炉内温度均匀性，同时通过减少低温区面积，使得更多炉膛空间处于有效工艺温度范围内，有助于提高热利用效率，还可能带来能耗的降低。而上述模拟燃烧器在炉膛 y=100 mm 以及 y=700 mm 位置间隔均匀布置时，左侧第一个燃烧器距离左侧壁面只有 200 mm，使火焰的高温聚集在壁面处无传递空间，因此下一步研究第一个燃烧器布置距左侧壁面不同距离（即炉膛两侧燃烧器的错位间距）对炉内温度均匀性的影响。

2.2　两侧燃烧器的错位间距对炉内温度均匀性的影响

由 2.1 结论所示，以上 4 种燃烧器布置方式中燃烧器分别在 y=100 mm 以及 y=700 mm 位置间隔均匀布置时表现更为良好。在确定了采用两侧壁上下交错布置这一方案后，本次 Fluent 模拟研究进一步聚焦于该布置方式中的另一个设计参数：燃烧器的错位间距。如图 8 所示，研究在一侧壁的燃烧器（如上层的 A1）与对侧壁相应位置燃烧器（如下层的 B1）在水平方向（沿炉长）上的距离对炉内流场、温度分布及均匀性的影响规律，从而找到一个最优的错位间距，使得炉膛三维空间内的温度均匀性达到最佳。

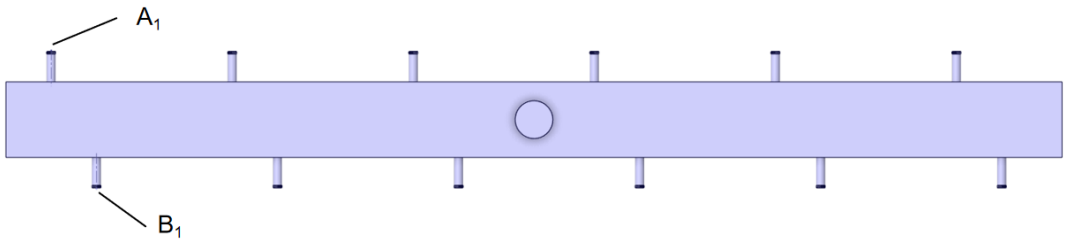
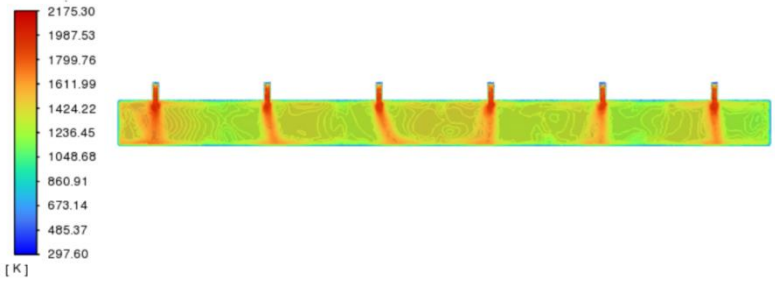


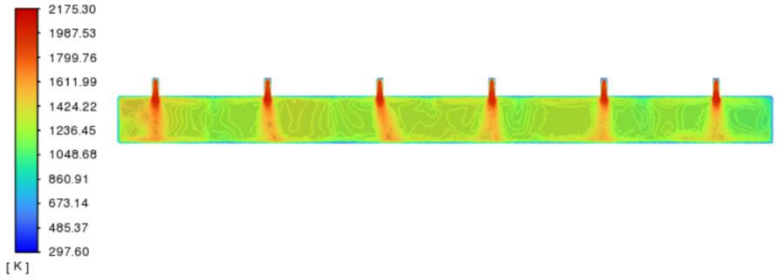
图 9　燃烧器布置图

Fig. 9 Burner layout

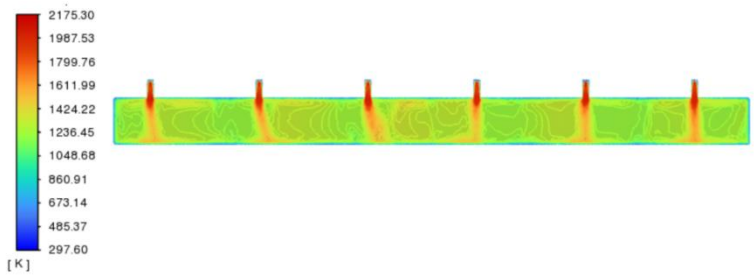
图 10—13 分别为所设计辊底式热处理炉内燃烧器在热处理炉 y=100 mm 以及 y=700 mm 位置间隔均匀布置时不同错位间距（0、200 mm、400 mm 和 600 mm）xy 平面、xz 方向燃烧器中心所在平、xz 平面以及 yz 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图。



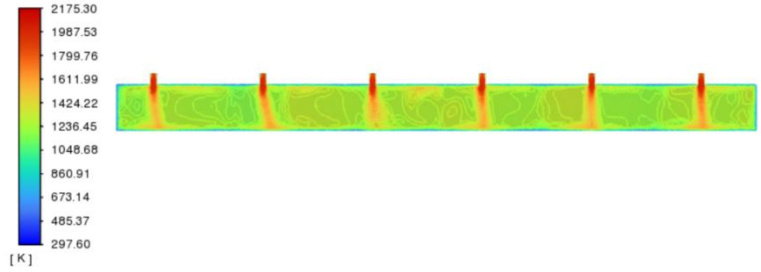
a） 错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



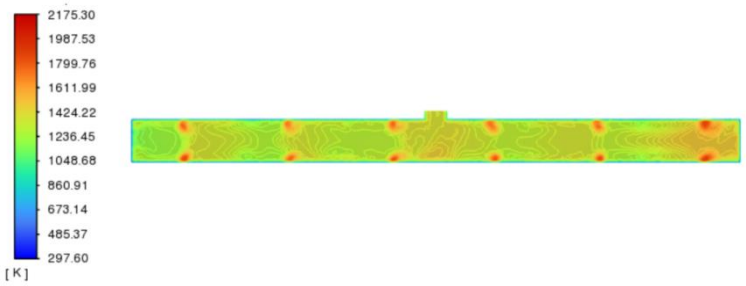
c） 错位间距为 400 mm



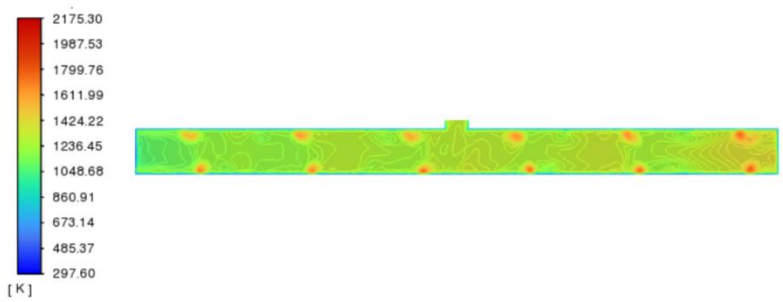
d） 错位间距为 600 mm

图 10　*xz* 方向燃烧器中心所在平面温度云图

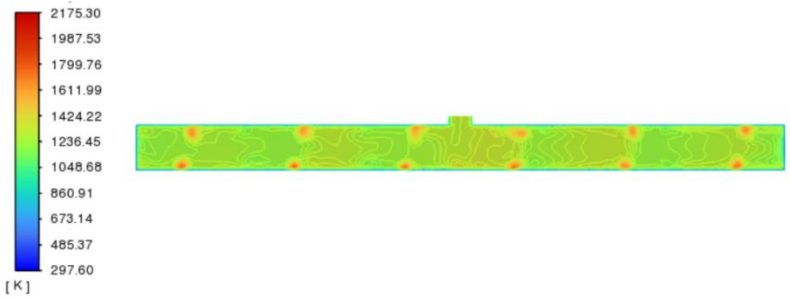
Fig. 10 The plane temperature cloud diagram of the burner center in the *xz* direction



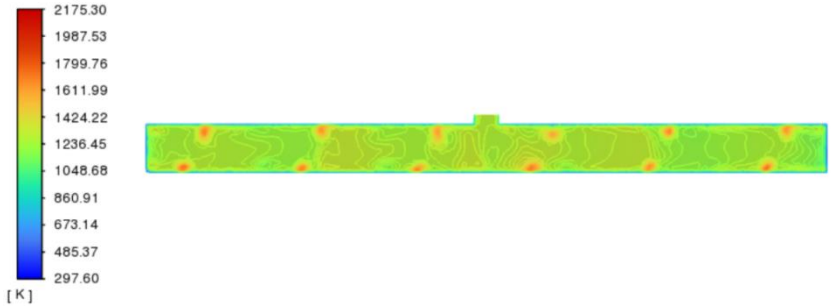
a） 错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



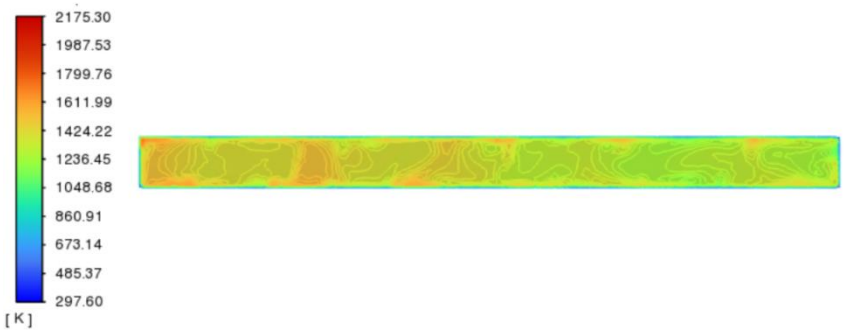
c） 错位间距为 400 mm



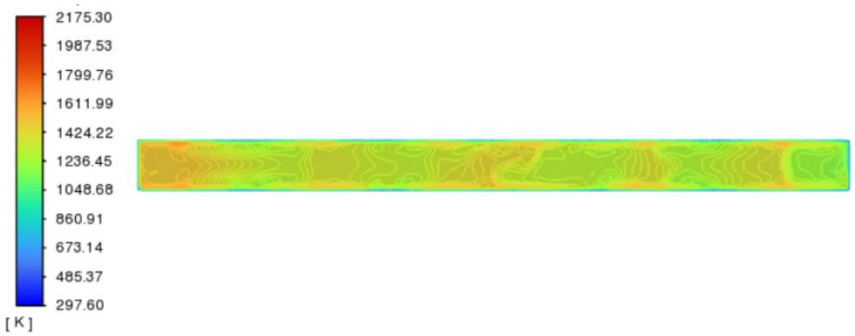
d） 错位间距为 600 mm

图 11 *xy* 平面温度云图

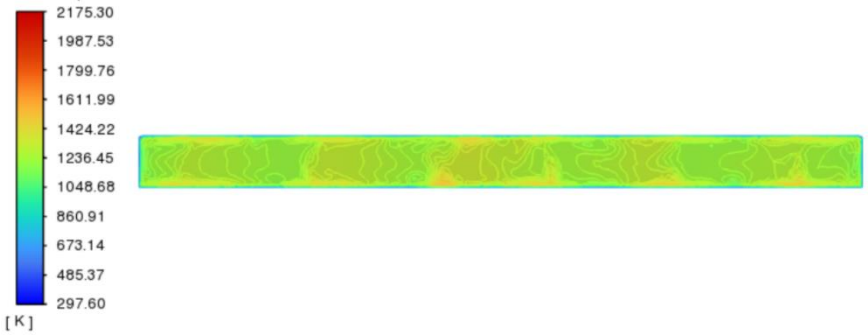
Fig. 11 *xy* plane temperature cloud



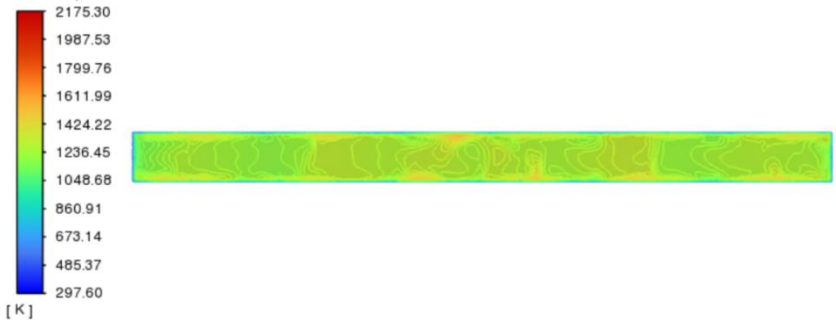
a） 错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



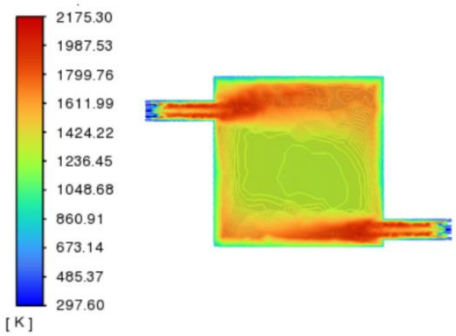
c） 错位间距为 400 mm



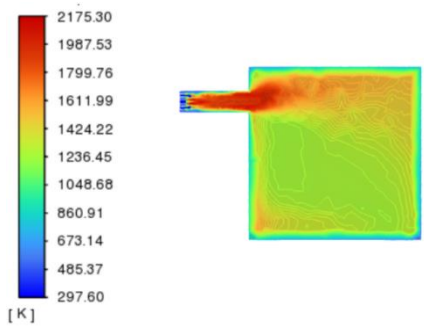
d） 错位间距为 600 mm

图 12 *xz* 平面温度云图

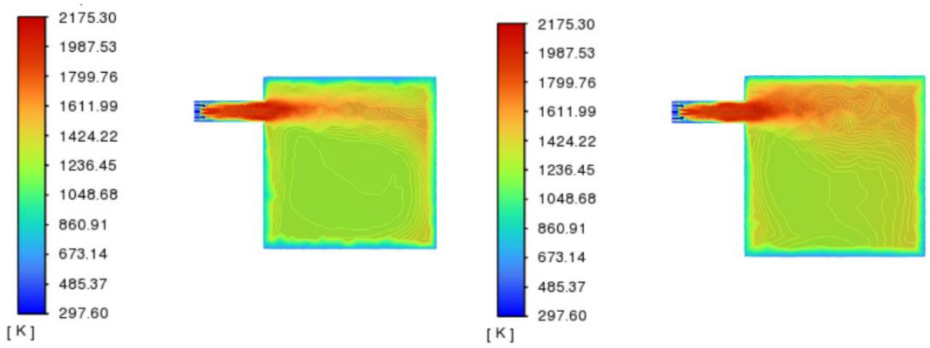
Fig. 12 *xz* plane temperature cloud



a） 错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



c） 错位间距为 400 mm　　d） 错位间距为 600 mm

图 13　*yz* 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图

Fig. 13 The simulated temperature cloud diagram of the plane where the center of the burner is located in the *yz* direction

图 10—12 分别为 4 种错位间距 *xz* 方向燃烧器中心所在平面、*xy* 平面和 *xz* 平面的温度云图。由图 10 a）、b）可知，当错位间距为 0 和 200 mm 时，由于错位较小，无法形成一个稳定、贯穿整个炉膛空间的大尺度主体循环流。整个流场的能量被分散消耗在无数个局部的小摩擦中，而不是用于驱动整体的气体循环，同时温度分布极不均匀，在射流直接冲击点或射流交叉点，会出现小而集中的高温点，而在这些热点之间，特别是沿着炉膛的中心线，会延伸出明显的低温“通道”或“岛屿”（如图 11 a）、b）所示）。其次火焰在燃烧器出口处过早与对侧的火焰相遇，使其只能在局部混合，无法实现全局的热量均衡，热量留在射流路径和冲击点附近，无法被有效输送到远离射流的区域，所以在炉膛的四个角落以及炉顶、炉底的中心区域，很容易形成流动死区，这些区域的温度显著偏离设定值。适当增大错位间距后，由图 12 c）可知，当错位间距设置为 400 mm 时，炉膛角落处的高温区域消失，解决了流动死区问题，其次，红色热点变浅，即火焰的最高温度降低，从整个云图与图 12 a）、b）的对比来看，温度几乎集中在 1 300 K，少数高温带达到 1 400 K。持续增加错位间距到 600 mm 时，如图 12 d）所示，虽然大体情况与 400 mm 时类似，但其喷射的热量被高速射流捆绑，直接带到了撞击点，而没有在炉膛内充分扩散，且在炉膛的四个角落会出现明显的低温区域，这是因为低速区的气体无法从主流中获得足够的热量。

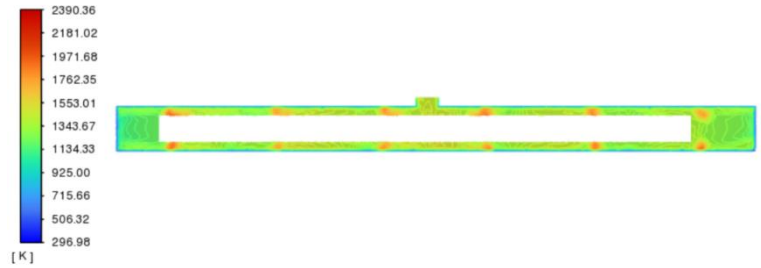
图 13 为 4 种错位间距 *yz* 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图。由图 13 a）可知，当错位间距为 0 mm 时，对冲的两个燃烧器之间形成气流漩涡，但此漩涡为二维的，使高温集中在包裹圈内，不能完全扩散到相邻燃烧器的中间位置，这样会使热处理炉内的温度分布呈规律的阶梯状分布，不能使炉膛均匀受热。由图 13 b）—d）可知，火焰射流有足够的空间发展，并通过对侧燃烧器之间的区域，与对侧壁面碰撞后，被引导形成一个稳定且贯穿整个炉膛的大尺度螺旋形环流，高效地将热量从高温区输运到低温区，实现了有效的整体混合。但值得注意的是图 13 b）由于错位间隔小，仍然能受到对侧相近燃烧器的影响，热量较为杂乱。

综上所述，燃烧器的错位间距并非越大或越小越好，而是存在一个最优值。在本文中，错位间距为 400 和 600 mm 时炉膛内能够激发出一个强度大、范围广且稳定的环流，实现高效热混合。

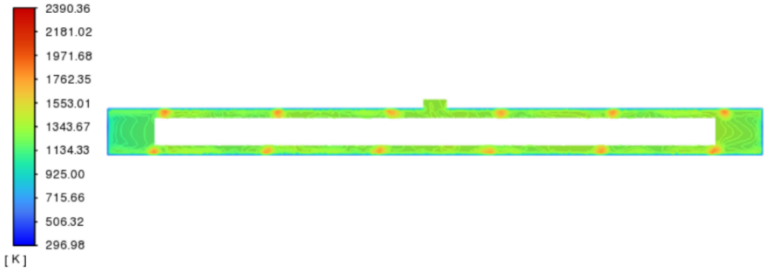
2.3　放入储氢罐后错位间距对炉内温度均匀性的影响

经 2.2 模拟后，初步认为错位间距为 400 mm 时最优。但上述模拟是理想状态下未放入任何工件的条件下模拟，接下来在炉膛内放入长 12 000 mm、半径为 300 mm 的储氢罐，研究错位间距为 0、200 mm、400 mm 和 600 mm 时对炉膛内的温度均匀性的影响，从而确定最优的错位间距。

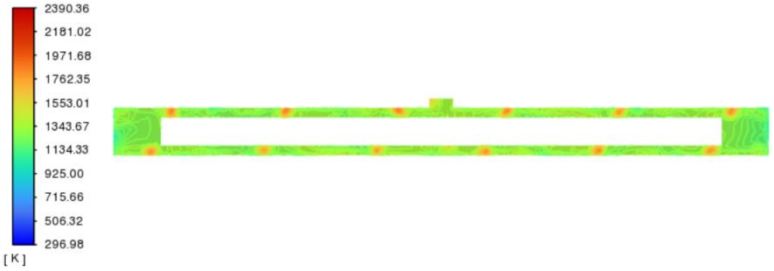
图 14、15 分别为 4 种错位间距下将储氢罐放入热处理炉后 *xy* 平面和 *xz* 平面的温度云图。在放置大型工件后，在于引导气流绕过储气罐，从而形成一个均匀包裹工件的旋流场，这是实现周向均匀加热的关键。由图 14 可以看出，相对于 a）和 b）中左右端的颜色不一，在炉膛 4 个角落，温度相对较低，形成了较大的纵向和横向温度梯度，难以将热量有效地传递到炉膛核心区域的情况来说，c）和 d）图中的颜色均匀，意味着储氢罐在热处理炉内有一个较为稳定的升温环境，均匀性显著改善，周向温差明显减小。



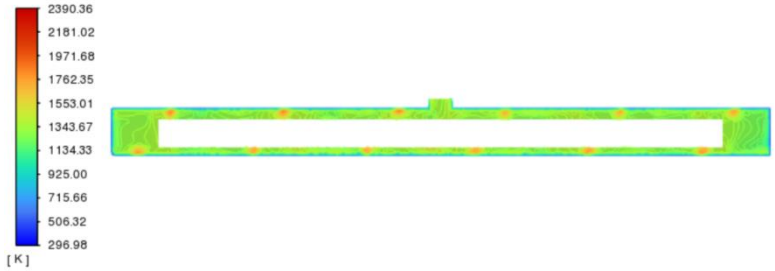
a）错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



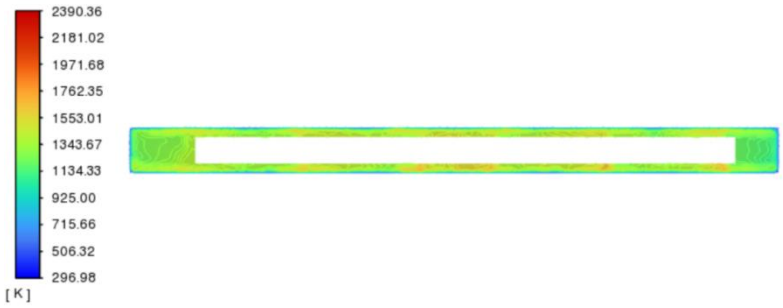
c） 错位间距为 400 mm



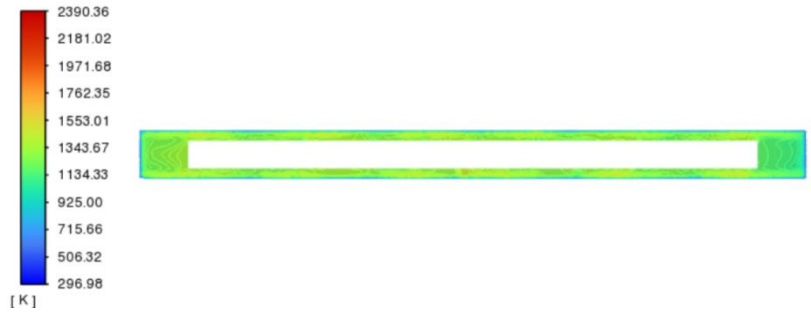
d） 错位间距为 600 mm

图 14 *xy* 平面温度云图

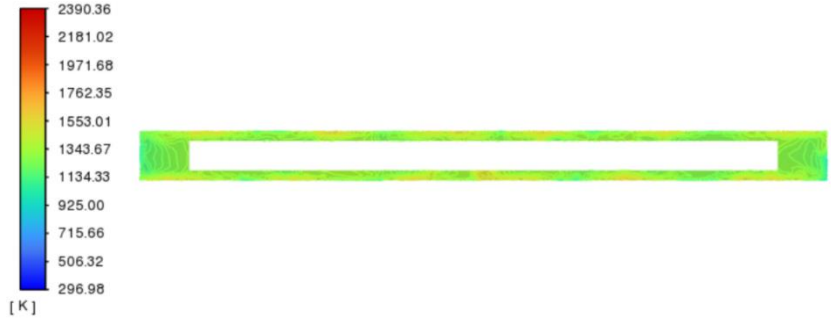
Fig. 14 *xy* plane temperature cloud



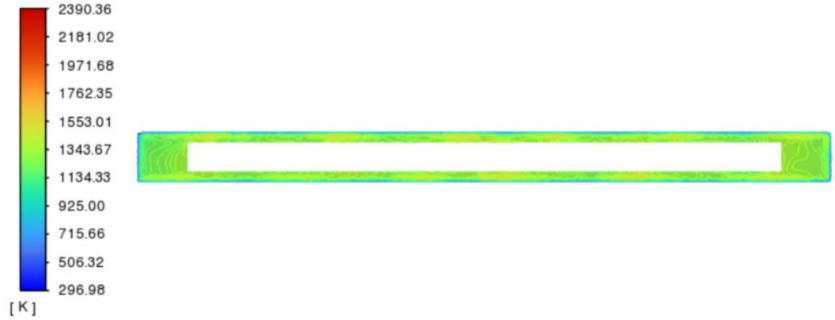
a）错位间距为 0 mm



b） 错位间距为 200 mm



c） 错位间距为 400 mm

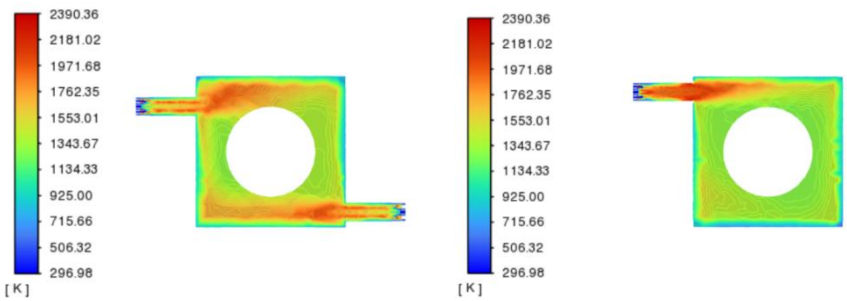


d） 错位间距为 600 mm

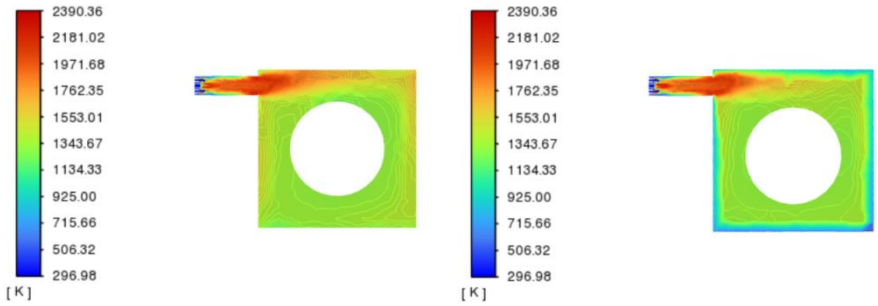
图 15 *xz* 平面温度云图

Fig. 15 *xz* plane temperature cloud

图 16 为 4 种错位间距下将储氢罐放入热处理炉后 *yz* 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图。由图 16 a）可知，火焰可能会直接触碰到储氢罐，造成储氢罐的局部过热而受热不均，同时储氢罐周围的等温线较为杂乱，不能使储氢罐置于良好的等温环境中；相比之下图 16 c）、d）的储氢罐周围等温线规律有序，火焰长度适中，也没有直接喷射到工件上，而是热量在强大的热浮力驱动下，形成贯穿整个炉膛高度的、强烈的自然对流循环。高温烟气上升至顶部后，沿炉壁下降，形成了一个大范围的环流包裹住储氢罐，有效地将热量带到了炉膛的各个角落，让储氢罐外表面暴露在均温环境下，炉内最大温差显著降低。



a）错位间距为 0 mm　　b） 错位间距为 200 mm



c） 错位间距为 400 mm　　d） 错位间距为 600 mm

图 16　*yz* 方向燃烧器中心所在平面的模拟温度云图

Fig. 16 The simulated temperature cloud diagram of the plane where the center of the burner is located in the *yz* direction

综合考虑热处理炉在不同一错位间距下的整体表现，在本次设定的研究条件和范围内，最终确定燃烧器的最佳布置方式为两侧分别在高度 100 mm 和 700 mm 平面以交错间距 400 mm 交错布置。这样既可以使储氢罐置于均匀的炉温下受热，提高储氢罐质量，还能够间接减少能耗。

3　结　语

利用流体计算软件 FLUENT，在提出耦合旋流燃烧和燃气分级技术的新型低氮燃烧器设计后将其应用到辊底式热处理炉中，考虑不同燃烧器的布置方式对热处理炉内温度均匀性的影响，模拟研究了多组燃烧过程，主要结论如下。

1）相比于燃烧器在热处理炉中心高度位置对冲均匀布置、燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置对冲均匀布置和燃烧器在热处理炉中心高度位置间隔均匀布置时三种布置方式，燃烧器分别在 *y*=100 mm 以及 *y*=700 mm 位置间隔均匀布置成功激发了三维的、立体的强对流循环，有助于提高热利用效率，还可能带来能耗的降低。

2）在本文中，错位间距为 400 mm 和 600 mm 时炉膛内能够激发出一个强度大、范围广且稳定的环流，实现高效热混合。

3）最终确定在本文工况下，在热处理炉内放入储氢罐后燃烧器的最佳布置方式为两侧分别在高度 100 mm 和 700 mm 平面以交错间距 400 mm 交错布置。此时炉内的温度均匀性更好，同时也降低了保持了低氮氧化物的排放。

本文在所设计结构与运行参数下，结合优化后的低氮燃烧器给出了使此辊底式热处理炉温度更为均匀的燃烧器的布置方式。为辊底式热处理炉的均温性设计提供了优化方向，对工业加工设备的改造和环境污染控制具有参考价值。但在本文研究过程中，燃烧器的假设和热处理炉的简化都会使模拟结构与真实结论有所差异。在后续研究中，拟逐步减少假设，并研究更多因素对炉内均温性的影响，以探究最优结构。

参考文献/References:

[1] 朱伟素,董斌,柳昊.辊底式热处理炉加热模型的研究与应用[J].工业加热,2015,44(4):53-54.
ZHU Weisu,DONG Bin,LIU Hao.Study and application of heating model for roller-hearth heat treatment furnace[J].Industrial Heating,2015,44(4):53-54.

[2] 董京帅.辊底式热处理炉和淬火机的 PLC 控制系统[J].自动化应用,2014(7):57-58.
DONG Jingshuai.PLC control system of roller hearth heat treatment furnace and hardening machine[J].Automation Application,2014(7):57-58.

[3] 杨小兵,江华.高速烟气环流技术在辊底式热处理炉上的应用[J].工业加热,2021,49(1):24-26.
YANG Xiaobing,JIANG Hua.Application of the high-speed glue gas circulation technology in roller hearth heat treatment furnace[J].Industrial Heating,2021,49(1):24-26.

[4] 张成林,石向东,杨攀,等.热处理技术与装备的发展现状及趋势[J].热处理技术与装备,2025,46(4):56-63.
ZHANG Chenglin,SHI Xiangdong,YANG Pan,et al.Development and trend of heat treatment technology and equipment[J].Heat Treatment Technology and Equipment,2025,46(4):56-63.

[5] 江智轩,邵锦.热处理炉温度均匀性分析与研究[J].热处理技术与装备,2022,43(1):56-59.
JIANG Zhixuan,SHAO Jin.Analysis and research on temperature uniformity of heat treatment furnace[J].Heat Treatment Technology and Equipment,2022,43(1):56-59.
[6] PRIELER R,HUBERT J,LI D,et al.An anisotropic phase-field crystal model for heterogeneous nucleation of ellipsoidal colloids[J].Journal of Physics:Condensed Matter,2009.DOI:10.1088/0953-8984/21/46/464110.
[7] REZAZADEH N,HOSSEINZADEH H,WU Binxin.Effect of burners configuration on performance of heat treatment furnaces[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2019,136:799-807.
[8] MIRZAEI S,BOHLOOLI ARKHAZLOO N,MORIN J B,et al.Influence of heating elements layout on temperature uniformity in a large size heat treatment furnace[J].Case Studies in Thermal Engineering,2024.DOI:10.1016/j.csite.2024.105062.
[9] 谢康,张荣明,付嘉宝,等.电加热辊底炉中热电偶位置对炉温均匀性的影响[J].工业炉,2024,46(5):49-54.
XIE Kang,ZHANG Rongming,FU Jiabao,et al.Influence of thermocouple position on furnace temperature uniformity in an electrically heated roller hearth furnace[J].Industrial Furnace,2024,46(5):49-54.
[10]申国强,柳海涛,陈刚,等.提高燃气炉回火工艺炉温均匀性的研究与应用[J].铸造,2023,72(3):320-325.
SHEN Guoqiang,LIU Haitao,CHEN Gang,et al.Research and application of improving temperature uniformity during tempering for gas heat treatment furnace[J].Foundry,2023,72(3):320-325.
[11]张雪霞.辊底式连续热处理炉温度均匀性测试[J].金属热处理,2019,44(6):207-210.
ZHANG Xuexia.Temperature uniformity survey in continuous roller hearth furnace[J].Heat Treatment of Metals,2019,44(6):207-210.
[12]王俊.辊底式热处理炉过程控制系统及应用[J].冶金与材料,2018,38(5):78.
[13]沈彬彬.宽厚板热处理炉炉底辊结瘤成因及对策[J].中国新技术新产品,2021(21):59-61.
SHEN Binbin.Causes and countermeasures of buildup on hearth rollers in heavy plate heat treatment furnaces[J].New Technologies and New Products of China,2021(21):59-61.
[14]杨超.辊底式热处理炉炉底辊损坏形式及对策分析[J].冶金与材料,2021,41(4):27-28.
[15]MAYRHOFER M,KOLLER M,SEEMANN P,et al.Assessment of natural gas/hydrogen blends as an alternative fuel for industrial heat treatment furnaces[J].International Journal of Hydrogen Energy,2021,46(41):21672-21686.
[16]刘宇佳,李勇,付天亮,等.基于 Fluent 软件的辊底式热处理炉数值分析[J].金属热处理,2014,39(8):128-131.
LIU Yujia,LI Yong,FU Tianliang,et al.Simulation of roller hearth heat treatment furnace based on Fluent software[J].Heat Treatment of Metals,2014,39(8):128-131.
[17]PENG Jing,CHEN Deqi,XU Jianjun,et al.CFD simulation focusing on void distribution of subcooled flow boiling in circular tube under rolling condition[J].International Journal of Heat and Mass Transfer,2020.DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119790.
[18]江旭昌.皮拉得多风道煤粉燃烧器的应用[J].水泥技术,1999(5):27-29.
JIANG Xuchang. The application of Pillard multi-channel pulverized coal burner[J].Cement Technology,1999(5):27-29.
[19]唐广通,李欣,蒋静智,等.分形翅片对三套管相变蓄热器蓄热性能的影响[J].河北科技大学学报,2024,45(6):573-581.
TANG Guangtong,LI Xin,JIANG Jingzhi,et al.Effect of fractal fins on the heat storage performance of three-casing phase change accumulator[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2024,45(6):573-581.
[20]FU Zaiguo,GAO Huanhuan,ZENG Zhuoxiong,et al.Generation characteristics of thermal NO_x in a double-swirler annular combustor under various inlet conditions[J].Energy,2020.DOI:10.1016/j.energy.2020.117487.
[21]吴奕滨,龚俊杰,沈星,等.航空制件燃气热处理炉的炉内温度均匀性[J].材料与冶金学报,2025,24(1):62-69.
WU Yibin,GONG Junjie,SHEN Xing,et al.Temperature uniformity in gas heat treatment furnace for aviation parts[J].Journal of Materials and Metallurgy,2025,24(1):62-69.