

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-056-10

# 基于多目标评价的 回转窑工艺段直接蒸发冷却送风方式优化研究

李嘉诚 孙铁柱 翁磊超

(西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710048)

**【摘要】** 为了在回转窑工艺段合理布置直接蒸发冷却设备的送风口位置, 基于 fluent 软件对回转窑的送风方式进行了模拟研究, 并通过实验数据验证了该模型的可靠性。基于某实际工程数据, 在送风量为 8700m<sup>3</sup>/h 和设备蒸发效率 59% 条件下, 对采用上送风、中送风和下送风三种方式以及在每种送风方式下设置不同出风口数量进行了模拟分析。结果表明: 上送风致使非工作区温度低于工作区温度, 冷量没有得到合理的分配, 工作区的平均温度范围为 28.49℃~29.41℃。相比之下, 中送风方式各项指标稳定, 平均温度在 27.72℃~28.78℃, 而下送风方式直接作用于工作区有效地降低了工作区温度, 平均温度为 28.08℃~28.48℃。利用层次分析法得知, 采用中送风方式时开 4 个出风口权重为 4.9, 综合性最佳; 采用下送风开 1 个出风口权重为 7.78, 综合性最差, 为回转窑工艺段的通风降温设计提供一定的参考。

**【关键词】** 蒸发冷却; 送风方式; 仿真模拟; 层次分析法

中图分类号 TU831.4 文献标志码 A

## Multi-objective Evaluation of Optimization of Direct Evaporative Cooling air supply mode in rotary kiln process section

Li Jiacheng Sun Tiezhu Wen Leichao

(School of Urban Planning and Municipal Engineering Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710048)

**【Abstract】** In order to configure direct evaporative cooling equipment in the rotary kiln process section, this paper simulates the air supply mode of rotary kiln based on fluent software, and verifies the reliability of the model through the experimental data. Based on the actual engineering data, under the condition of the air supply capacity of 8700m<sup>3</sup>/h and the evaporation efficiency of 59%, the three methods of upper air supply, middle air supply and lower air supply and the number of different air outlets in each air supply mode were analyzed. The results show that the temperature of the non-working area is lower than that of the working area, and the cold volume is not reasonably distributed, and the average temperature range of the working area is 28.49℃~29.41℃. In contrast, the indexes of the medium air supply mode are stable, with the average temperature of 27.72℃~28.78℃, while the lower air supply mode directly acts on the working area to effectively reduce the temperature of the working area, with the average temperature of 28.08℃~28.48℃. When the weight of four air outlet is 4.9, which is the best comprehensive and 7.78, the lowest comprehensive. The conclusion of this study provides an important reference and scientific basis for the ventilation and cooling design of the process section of rotary kiln.

**【Keywords】** Evaporative cooling; Air supply mode; Simulation; Analytic hierarchy process

作者简介: 李嘉诚 (2000-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: 15008662678@163.com

通讯作者: 孙铁柱 (1986-), 男, 博士, 硕士生导师, E-mail: suntiezhu66@163.com

收稿日期: 2024-04-01

## 0 引言

在现代工业生产中, 如水泥制造等高温工艺环境下, 回转窑的有效环境控制至关重要。除了高效生产设备外, 良好设计的通风降温系统对维持理想工作环境至关重要。恰当的气流组织不仅影响通风降温效果和生产效率, 也关乎工作人员的舒适性和健康。因此, 高效的送风系统对降低室内温度, 保障空气质量, 创造安全舒适的工作环境具有重要作用。

对于数值模拟气流组织对空间内的应用效果, 国内外已经进行了大量研究。万鑫等人<sup>[1]</sup>通过 CFD 模拟以及改变流场边界条件, 深入分析了内热源工业厂房的自然通风效能, 并探讨了建筑结构如进风口和排风口对通风效果的影响。模拟结果显示, 提升进风口的高度能显著增强通风效率并降低作业区域的温度; 周军莉等<sup>[2]</sup>通过 Airpak 软件, 结合 Design Builder 能耗模拟工具, 通过计算流体力学 (CFD) 深入探究了建筑开口对自然通风效能及其对建筑能耗的影响。研究以长沙的典型年气象数据作为基础, 分析了建筑的不同朝向和开口位置对自然通风及能耗的具组合策略; PaulMartin 等人<sup>[3]</sup>运用计算流体力学 (CFD) 技术对大空间内部复杂流场进行全面的数值计算, 为空调系统的优化设计提供了关键的参考; Hanzawa 等人<sup>[4]</sup>通过构建数值模拟模型, 预测了大空间内部温湿度随时间的动态分布规律, 并找到了优化气流组织的参考方案; 赵福云等<sup>[5]</sup>通过变换流场边界条件数值计算考察不同风口位置对车间内流场的影响规律; 韩敏等<sup>[6]</sup>通过建立建筑环境和工艺过程的物理模型, 采用了计算流体力学中的 Realizable  $k-\epsilon$  模型及组分运输模型作为主要的计算工具。研究中设计了传统的全新风通风、室外新风蒸发冷却通风以及室外新风蒸发冷却加热污染区环境蒸发冷却通风三种不同的通风技术方案进行模拟计算, 并对其分析比较。以上研究主要针对于改变边界条件以及通过数值模拟给出优化方案, 而忽略了送风方式及送风口数量对空间气流组织的影响, 本研究通过模拟分析比较了上送风、中送风和下送风三种方式在回转窑工艺段中的应用效果, 考虑了能源效率、经济性、舒适性和能量利用的最优化等因素。研究结果可指导实际工程设计, 为最佳送风方式的选择提供科学依据。

本研究采用多目标评价方法评估不同送风方

式的性能, 平衡提高生产效率、降低能耗和增强舒适性的需求。通过定量分析, 发展了一套系统化的评价框架, 指导未来回转窑工艺段通风降温系统的设计。综合评价有助于指导未来的通风系统设计, 促进工业环境的持续改善和优化。

## 1 研究对象

### 1.1 模型建立

本研究以榆林某回转窑工艺段为对象, 如图 1 所示, 通过现场尺寸实测建立了通风降温系统物理模型, 如图 2 所示。为简化计算, 假设<sup>[7]</sup>忽略了各朝向围护结构厚度和附属部件, 将燃烧炉视为主要散热设备, 其他设备散热量忽略不计。将送风口结构简化处理, 不考虑散湿量的影响。假设工艺段空气流动过程不可压缩且稳态, 不考虑散湿量的影响。



图 1 回转窑工艺段实景图

Fig.1 Actual drawing of the rotary kiln process section

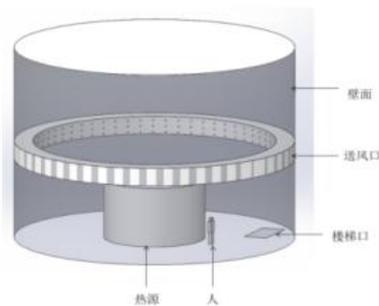


图 2 回转窑工艺段物理模型

Fig.2 Physical model of rotary kiln process section

### 1.2 控制方程

在回转窑工艺段中, 气流流动和温度分布的三维湍流流动是基于质量方程、动量方程和能量守恒定律的结果得出<sup>[8]</sup>。Fluent 软件提供了单方程模型、双方程模型 (如标准  $k-\epsilon$  模型) 等湍流模型。而本文选择的  $k-\epsilon$  模型已被证明在工业建筑模拟中表现优异<sup>[9]</sup>。本文主要涉及到的方程有连续性方程、动

量方程以及能量方程。

### 1.3 边界条件

在本文中，热源设定为热流边界<sup>[10,11]</sup>有关边界条件，将墙壁视为绝热边界条件。指定流体的速度和流量作为入口边界条件，可简单准确描述气体在送风口处的流动情况。将该回风口设置为压力出口边界条件、送风口设置为速度入口边界条件以确保流体的连续性和稳定性。人体表面也可以视为对流换热边界，即设置人体表面与环境空气之间的对流换热系数。本文所涉及的边界条件在 fluent 求解器中输入基础参数即可得到。

### 1.4 计算方法

本文采用 Fluent 求解器中的分离求解器进行模拟计算<sup>[12,13]</sup>。基于研究需求，我们选用最常用的 SIMPLE 算法。为了得到更为精确的结果，本研究对压力项采用适合于体积力流动的 Body Force Weighted 格式，而动量方程、能量方程等方程选用了二阶迎风格式。

在迭代计算中，判断结果是否收敛通常基于相对残差、关键变量监测和质量守恒三个方面的评估标准。只有当满足这三个标准时，才能判断结果达到了收敛状态<sup>[14]</sup>。

### 1.5 模型有效性验证

在数值模拟计算中，所建立的模型及相关设置的合理性直接决定了模拟结果的准确性。因此，需要对模型及相关设置进行充分的验证。本文网格划分  $3 \times 10^6$  网格， $9 \times 10^5$  网格， $4 \times 10^5$  网格以此对网格的独立性进行了验证，随着网格数量的增加计算结果准确性越来越高，综合考虑计算资源以及准确性的要求，模型采用了  $3 \times 10^6$  的网格。

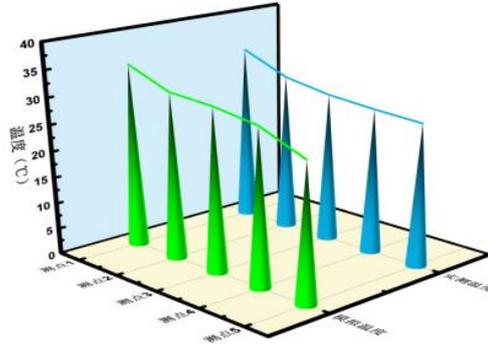
实测和模拟过程中难免会因为各种因素存在一定的误差，因此通常情况下利用 *EER* 指标来验证模型的准确性，如式 (1) 所示：

$$EER = \frac{S - M}{S} \times 100\% \quad (1)$$

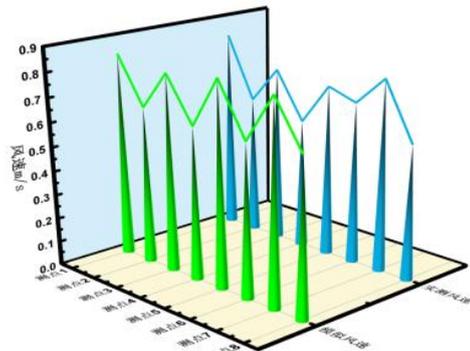
式中：*S* 为实测数据；*M* 为模拟数据。

*EER* 越小说明模型建立及参数设置的越合理，反之则说明误差大。为使模型预测精度在可接受范围内，*EER* 平均误差通常需要控制在  $\pm 15\%$  以内。如图 3 所示，利用夏季工况下工作区内多个测点的实测数据与模拟预测数据比对分析发现，温度预测的最大 *EER* 为 9.14%，最小 *EER* 为 3.70%。风速

预测的最大 *EER* 为 18.31%，最小为 1.20%。测点 *EER* 基本都保持在了  $\pm 15\%$  的可接受误差限度之内。温度预测的平均 *EER* 为 5.19%，风速预测的平均 *EER* 为 9.07%。这充分证明了所建立的数值模拟模型具备了较高的精度与可靠性，表明了数值模拟计算结果的准确性和可靠性。



(a) 测点温度与模拟数据的对比



(b) 测点速度与模拟数据的对比

图 3 测试数据与模拟数据对比

Fig.3 Compares the test data with the simulated data

## 2 回转窑工艺段送风系统评价指标

本文以工作区设计要求、热舒适性以及经济性三个角度为前提条件，对回转窑工艺段送风系统作出综合评价。

工作区设计要求选取送风温度和风速，根据 GB 50019-2015《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》和 GB 50016-2014《民用建筑暖通空调设计规范》中的相关设计要求，该榆林地区水泥厂房夏季工作地点温度不应超过  $32^\circ\text{C}$ ，工业厂房中含粉尘作业场所工作区风速不宜超过  $0.5\text{m/s}$ 。

热舒适性主要考虑 PMV、PPD 和头脚温差。PMV 指数是根据人体热平衡计算的，表明预计群体对于给出的 7 个等级热感觉投票的平均值；PPD

预测不满意百分比是根据 PMV 值可以预计出人群中对环境热舒适性预期不满意的百分比; 头脚温差是指人脚部与头部的温度差值, 差值越大, 人体舒适性越差。本文的层次结构只需选取 PPD 作为评价要求即可。

经济性选取送风温差和能量利用率。送风温差是指工作区内空气状态点的温度与送风口状态点温度之间的差值。能量利用率是指考察气流分布方式的能量利用有效性与温度有关, 因此又叫做温度效率, 计算公式如式 (2) 所示, 对于工艺性空调而言, 能量利用系数越大, 表示排风带走的能量相对室内散失的能量更多, 空气流动效果越好。

$$\eta = \frac{T_p - T_s}{T_g - T_s} \quad (2)$$

式中:  $T_p$  为排风温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_s$  为送风温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_g$  为回转窑工作区平均温度,  $^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.1 评价方法

层次分析法是用于解决多种复杂决策问题的数学模型<sup>[15]</sup>。其通过构建层次结构模型, 结合定量和定性数据简化决策过程, 适用于在复杂情境中选择最优方案。

层次分析法步骤包括: 建立层次结构模型, 构建判断矩阵, 计算权重向量, 进行一致性检验和综合评价, 通过以上步骤确定最优方案。利用评价指标, 从三个维度建立树状结构图, 如图 4 所示。在设计回转窑工艺段时, 必须满足生产设计规范对温度和风速的要求。同时, 应优先考虑更舒适的工况。最后, 在满足设计和舒适性的前提下, 经济性成为下一个重要考虑因素。

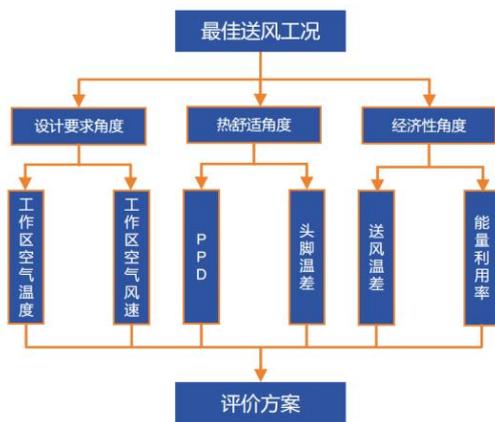


图 4 层次结构图

Fig.4 A hierarchy diagram

### 2.2 模拟参数设置

本文通过实际工程测试得出结论, 在送风量为  $8700\text{m}^3/\text{h}$ 、湿球效率为 59% 的工况下其通风效果最为优越, 则在此基础上调整送风模式及出风口数量来比较不同送风方式对回转窑工艺段气流分布的影响, 获得了相应的模拟工况, 如表 1 所示。

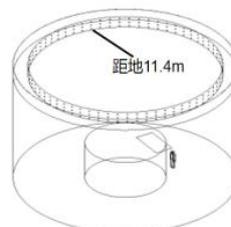
表 1 不同送风方式下回转窑工艺段的模拟工况

送风方式	工况编号	出风口数量	蒸发效率 /%	送风量 $/(m^3/h)$
上送风	A1	1	59	8700
	A2	2		
	A3	3		
	A4	4		
中送风	B1	1		
	B2	2		
	B3	3		
	B4	4		
下送风	C1	1		
	C2	2		
	C3	3		
	C4	4		

## 3 送风方式数值模拟及综合评价分析

### 3.1 上送风模拟

上送风即将冷风从工艺段内的上部送出, 这种送风方式避免了冷风与热源的直接接触, 从而提升整个系统的冷却效率。然而, 由于热空气上升, 冷空气下沉这一特性, 对于这种含高温热源的工业厂房来说这种送风方式可能会导致工作区的降温效果不理想。为研究上送风在回转窑工艺段的可行性, 本节在一定送风温度和送风量下通过改变出风口数量, 增大排风温度得到了相应的四个工况, 具体工况示意如图 5 所示。



(a) 工况 A1

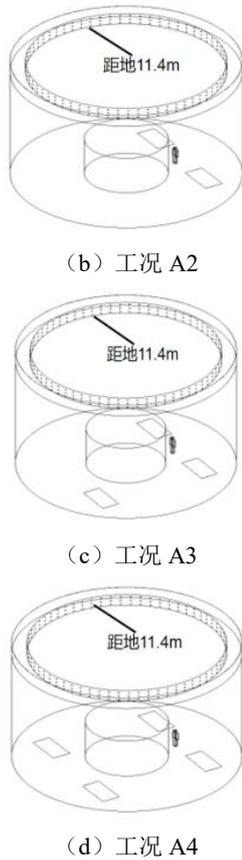


图 5 上送风下各工况模型示意图

Fig.5 Schematic diagram of each working condition model under the upper supply air

3.1.1 速度场分布

上送风下的各工况速度场分布如图 6 所示。从图中可以看出，送风口喷射出的气流在工艺段上方发生交汇现象，相互碰撞产生涡流现象，导致工艺段上方非工作区的空气流速大于下方工作区的空气流速。

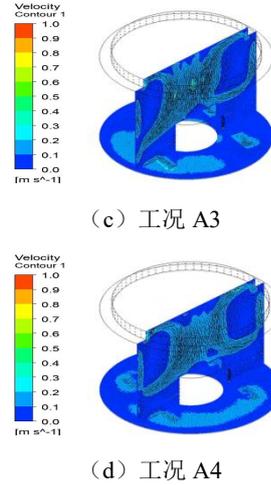
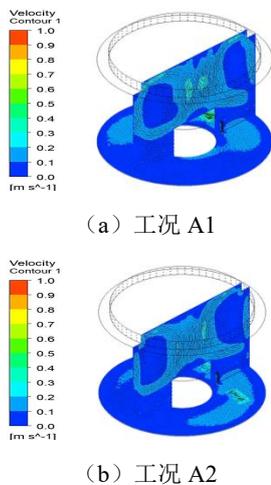


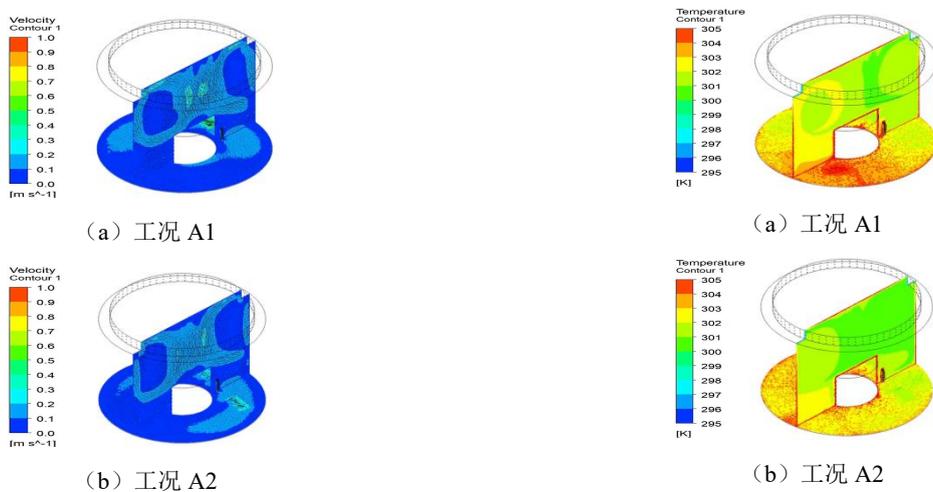
图 6 上送风下各工况速度云图

Fig.6 Cloud diagram of each working condition speed under the upper air supply force

从四种工况的工作区的平均风速数据来看，工况 A1 和 A2 的平均风速均为 0.07m/s，而工况 A3 和 A4 的风速为 0.06m/s。这表明随着出风口数量的增加虽然促成了更均匀的气流分布，但同时每个送风口的风量负担的风量有所降低，导致平均风速下降。

3.1.2 温度场分布

上送风的各工况温度场分布如图 7 所示。从图中可以明显的看出，工艺段上方非工作区的温度普遍低于其下方工作区温度。虽然上送风方式在一定程度上保证了下方工作区温度在合适的范围内，但该工艺段的通风降温目的是保证工艺段下方工作区的温度条件。因此，上送风方式存在冷量分配的不合理，造成了能量的浪费。



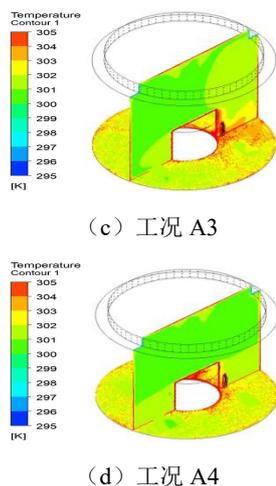


图 7 上送风下各工况温度云图

Fig.7 Cloud diagram of the temperature of each working condition under the upper supply air

从四个工况的平均温度数据来看, 当出风口为 1 个的工况 A1 的平均温度为 29.41℃, 是四个工况中最高的。随后, 随着出风口数量的增加, 平均温度逐渐下降, 到当出风口数量为 4 时工况 A4 工作区的平均温度最低为 28.49℃。

### 3.2 中送风数值模拟

中送风即冷风从工艺段内的中间区域送出, 这种送风方式能够提升整个工艺段内气流组织的均匀性, 避免了像上送风那样可能出现明显的温度梯度。因此中送风比较适合于需要整个室内气流组织均匀性分布较好的场所, 但是这种送风方式很容易受到室内空间布局的影响。本节在一定送风温度和送风量下通过改变出风口数量, 增大排风温度得到了相应的四个工况, 具体工况示意如图 8 所示。

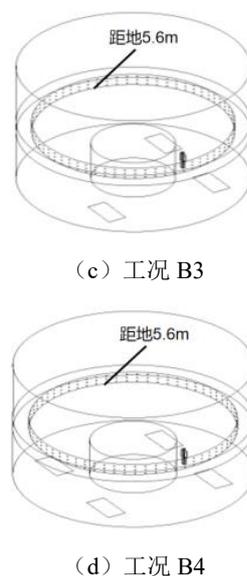
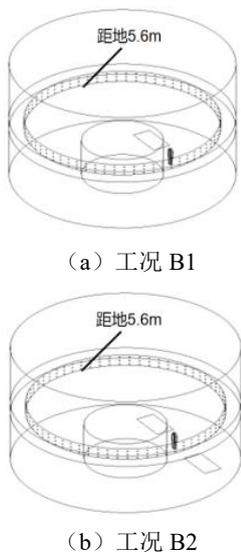
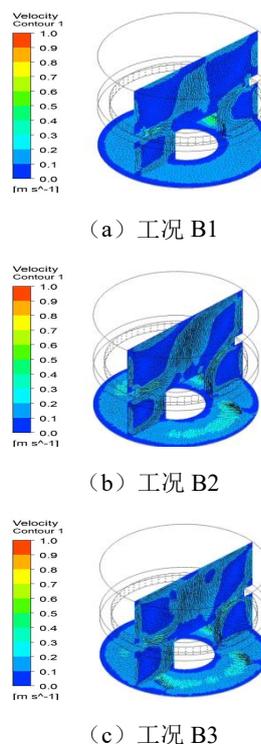
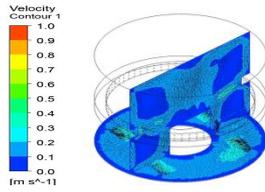


图 8 中送风下各工况速度云图  
Fig.8 Cloud diagram of the speed of each operating condition under the air supply air

#### 3.2.1 速度场分布

中送风下的各工况速度场分布如图 9 所示。从图中可以看出, 送风口喷射出的冷空气未能集中地以整股射流的形式流向工作区, 而是呈径向四周向运动。同样由于两侧气流的相互碰撞, 截面四周产生了涡流。





(d) 工况 B4

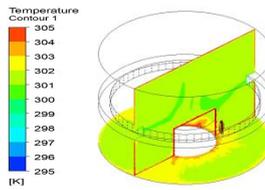
图 9 中送风下各工况速度云图

Fig.9 Cloud diagram of each working condition in air supply

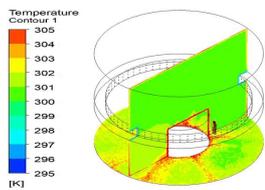
从四种工况的工作区平均风速数据来看,在只有一个出风口的工况 B1 中,工作区的平均风速相对较高,为 0.46m/s。然而,在增加到两个出风口的工况 B2 中,平均风速略有下降,达到 0.40m/s,这反映了两个出风口在空间中更均匀地分布了气流。与预期不同的是,在三个出风口的工况 B3 中,平均风速升高至 0.51m/s。而当出风口数量增加到四个的工况 B4 中,平均风速又降低至 0.32m/s。

### 3.2.2 速度场分布示意图

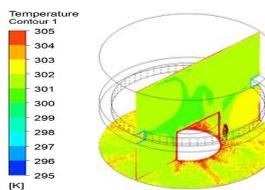
中送风下的各工况温度场分布如图 10 所示。从图中可以看出,与上送风相比,中送风在回转窑工艺段的通风降温效果更为优越。中送风带动了下方工作区的空气流动,增加了下方空气的通风换热效果。



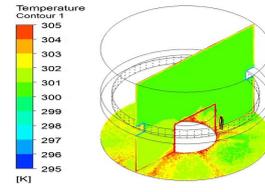
(a) 工况 B1



(b) 工况 B2



(c) 工况 B3



(d) 工况 B4

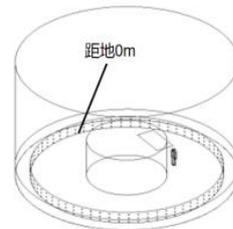
图 10 中送风下各工况温度云图

Fig.10 Cloud diagram of the temperature of each working condition under the air supply condition

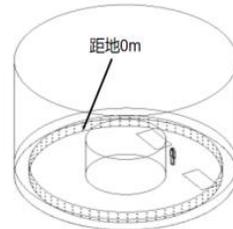
从四个工况的平均温度来看,工况 B1 中仅有一个出风口时工作区的平均温度相对较高,达到 28.47℃。在增加至两个出风口的工况 B2 中,工作区的平均温度略有下降,降至 28.15℃。然而,在增加至三个出风口的工况 B3 中,工作区的平均温度反而略微增加,达到 28.78℃。在增加至四个出风口的工况 B4 中,工作区的平均温度又开始降低,降至 27.72℃。

### 3.3 下送风数值模拟

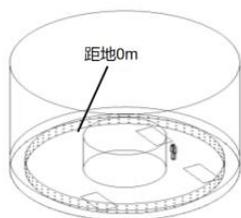
下送风即冷风从工艺段内的下部送出,这种送风方式能够快速的降低工作区的温度,提高工作区工作人员的舒适度,这种送风方式适用于人员密集且活动较频繁的场合。然后由于冷空气直接在工艺段内的下部排出,可能会导致冷热空气交换不充分,影响整个工艺段的通风降温效果。本节在一定送风温度和送风量下通过改变出风口数量,增大排风温度得到了相应的四个工况,具体工况示意如图 11 所示。



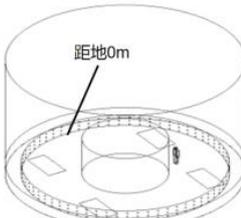
(a) 工况 C1



(b) 工况 C2



(c) 工况 C3



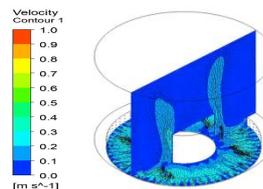
(d) 工况 C4

图 11 下送风下各工况模型示意图

Fig.11 Schematic diagram of each working condition model under air supply air

### 3.3.1 速度场分布

送风下的各工况速度场分布如图 12 所示。送风口喷射出的冷空气直接与热源直接碰撞避免了相互交汇, 没有产生涡流现象而是直接纵向流动向非工作区流动, 随着出风口数量的增强, 空气流动的纵向面积越来越小。



(d) 工况 C4

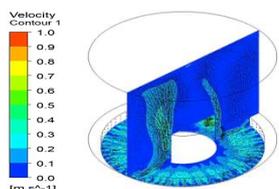
图 12 下送风下各工况速度云图

Fig.12 Cloud diagram of each working condition speed under air supply air

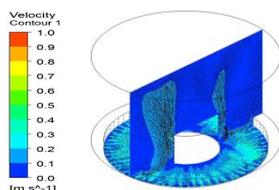
从四种工况的工作区平均风速数据来看, 在工况 C1 中, 仅有一个出风口时的平均风速最高, 达到 0.14m/s。随着出风口数量的增加, 平均风速呈现出下降的趋势。具体来说, 当出风口数量增加到两个的工况 C2 中, 平均风速降至 0.12m/s。在出风口数量增加到三个的工况 C3 中, 平均风速进一步降低至 0.11m/s。然而, 当出风口数量增加到四个的工况 C4 中, 平均风速又略有上升, 达到 0.12m/s。

### 3.3.2 温度场分布

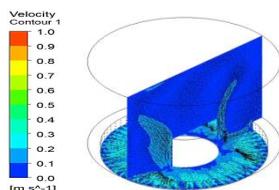
下送风下的各工况速度场分布如图 13 所示。从图中可以看出, 下方工作区的温度普遍低于上方非工作区的温度。这是由于下送风方式直接将冷风送到工作区, 确保了冷量在工作区得到了充分的利用, 避免了冷量的浪费。



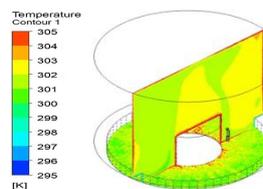
(a) 工况 C1



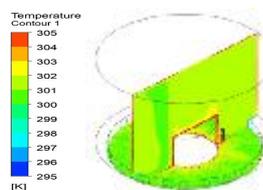
(b) 工况 C2



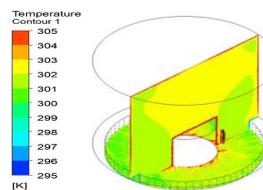
(c) 工况 C3



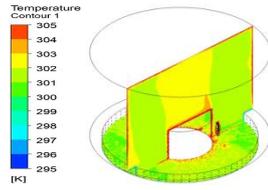
(a) 工况 C1



(b) 工况 C2



(c) 工况 C3



(d) 工况 C4

图 13 下送风下各工况温度云图

Fig.13 Cloud diagram of temperature of each working condition under air supply air

从四种工况平均温度来看，工况 C1 在仅有一个出风口时的平均温度最高，达到 28.4℃。当出风

口数量增加至两个的工况 C2 中，平均温度略微下降至 28.08℃。然而，当出风口数量增加至三个的工况 C3 中，平均温度反而略微增加，达到 28.48℃。在出风口数量增加至四个的工况 C4 中，平均温度相对于工况 C3 有所下降，为 28.36℃。

3.4 不同送风方案的综合评价

汇总各工况模拟数据计算得到的评价价值如表 2 所示，可以观察到在不同送风方式下，工作区的平均风速、温度、PPD（预期百分比不满意）、通风效率、送风温差以及头脚温差均呈现出不同的变化。

表 2 不同送风方式评价参数

Table 2 Evaluation parameters of different air supply modes

送风方式	工况编号	工作区平均风速 /(m/s)	工作区平均温度 /℃	工作区平均 /PPD	头脚温差 /℃	通风效率 /%	送风温差 /℃
上送风	A1	0.07	29.41	0.14	6.16	1.04	3.41
	A2	0.07	28.79	0.12	5.48	1.21	2.79
	A3	0.06	29.06	0.13	6.15	0.98	3.06
	A4	0.06	28.49	0.11	5.10	1.23	2.49
中送风	B1	0.10	28.47	0.09	5.38	1.13	2.47
	B2	0.11	28.15	0.08	6.40	1.14	2.15
	B3	0.10	28.78	0.11	6.24	1.07	2.78
	B4	0.12	27.72	0.07	7.30	1.25	1.72
下送风	C1	0.14	28.40	0.09	7.35	0.81	2.40
	C2	0.12	28.08	0.08	7.23	0.84	2.08
	C3	0.11	28.48	0.09	7.56	0.89	2.48
	C4	0.12	28.36	0.09	4.96	0.94	2.36

总的来讲，上送风方式在多个评价参数上表现都不太理想。其工作区平均温度较高，人体舒适度较差，尤其是 PPD 值均较高，头脚温差均较大显示出人体舒适度较低和环境满意度较差。然而，上送风方式在通风效率和送风温差方面表现较好。下送风方式工作区平均温度较低，有利于提高人体舒适度。在 PPD 方面，下送风方式的表现也较为优秀，显示出较高的人体舒适度和环境满意度。然而，该方式的通风效率较低，表明其在空气流动效果方面有待提高。中送风方式则在各项指标上表现较为平衡和稳定，其平均风速和工作区平均温度均较为适中，更符合人体舒适度的要求。在 PPD 方面，中送风方式表现优异，显示出较高的人体舒适度和环境满意度。此外，该方式的通风效率和送风温差均表现出较好的经济性和效率。

根据层次分析法得到各工况下的权重如表 3 所示，在对比分析三种送风方式上送风、中送风和下送风的各个工况后，可以得出以下结论：上送风方式中 A4 工况权重最低，为 4.09；下送风方式的 C1 工况权重最高，达到 7.75；综合考虑，上送风的 A4 工况最优，下送风的 C1 工况最差。

表 3 输出层次总排序结果

Table 3 Outputs the hierarchical total ranking results

工况	A1	A2	A3	A4
权重	6.75	5.66	5.72	4.09
工况	B1	B2	B3	B4
权重	4.74	4.78	6.27	4.81
工况	C1	C2	C3	C4
权重	7.75	5.6	6.68	5.51

## 4 结论

本文以回转窑工艺段为研究对象,采用数值模拟的方法,通过改变送风方式以及出风口的数量,对上送风、中送风等三种送风方式进行对比研究,并通过层次分析法综合评价各送风方式的优劣性。本文得出的主要结果如下:

(1) 在上送风的情况下,送风口喷射出的气流在工艺段上方发生交汇现象,相互碰撞产生涡流现象,导致上方工艺段非工作区的空气流速大于下方工作区的空气流速,致使非工作区温度低于工作区温度,冷量没有得到合理的分配。随着出风口的增加,工作区平均风速在 0.06~0.07m/s 之间,平均温度在 28.49~29.41℃ 之间。

(2) 在中送风的情况下,送风口喷射出的冷空气未能集中地以整股射流的形式流向工作区,而是呈径向四周向运动。由于两侧气流的相互碰撞,截面四周产生了涡流现象。这种分布模式有助于提高下方工作区的通风换热效果,从而使工作区温度得到更好的控制。随着出风口的增加,工作区平均风速在 0.10~0.12m/s 之间,平均温度在 27.72~28.78℃ 之间。

(3) 在下送风的情况下,送风口喷射出的冷空气直接与热源直接碰撞,避免了相互交汇,没有产生涡流现象,而是直接纵向流向非工作区流动。这种方式确保了冷量在工作区得到了充分的利用,避免了冷量的浪费。随着出风口的增加,工作区平均风速在 0.11~0.14m/s 之间,平均温度在 28.08~28.48℃ 之间。

(4) 应用层次分析法进行综合评价得出的结果显示,在送风量为 8700m<sup>3</sup>/h、湿球效率为 59% 的条件下,上送风方式中 A4 工况权重最低,为 4.09,下送风方式的 C1 工况权重最高,达到 7.75;综合考虑,中送风的 A4 工况最优,下送风的 C1 工况最差。

## 参考文献:

[1] 万鑫,苏亚欣.建筑结构对带内热源工业厂房自然通风

影响的数值研究[J].暖通空调,2009,39(11):60-64.

- [2] 周军莉,童宝龙,张泉,等.建筑开口对自然通风效果及建筑能耗影响模拟分析[J].科技导报,2012,30(18):21-26.
- [3] Martin P. CFD in the real world: HVAC&R applications; software and hardware; creating a CFD model; reducing project costs[J]. ASHRAE Journal, 1999(1):41.
- [4] Hanzawa H, Melikow A K, Fanger P O. Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces[J]. Ashrae Transactions, 1987,93:524-539.
- [5] 赵福云,成瑾,刘宝,等.不同孔板送风室内流场及热舒适全尺度实验研究[J].建筑热能通风空调,2022,41(2):31-35.
- [6] 韩敏,沈恒根.某柴油发动机试验厂房通风降温的数值模拟分析[J].建筑热能通风空调,2020,39(6):68-72.
- [7] 邹高万,贺征,顾璇.粘性流体力学[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [8] 胡善祥.新疆高海拔地区煤矿自然风压对矿井通风的影响分析[J].科技与创新,2023,(13):108-110.
- [9] Tsan-Hsing S, William W L, Aamir S. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows: Model development and validation [J]. Computers & Fluids, 1995,24(3):227-238.
- [10] 方楠.高温工业厂房中工位空调作用下的工位区流场特性研究[D].西安:西安建筑科技大学,2015.
- [11] Changqing Yang, Teng Gao, Angui Li, et al. Buoyancy-driven ventilation of an enclosure containing a convective area heat source[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021,159.
- [12] 梁爽.基于大空间厂房的CFD气流组织模拟和优化[D].天津:天津工业大学,2021.
- [13] 高婷.基于CFD数值模拟技术的大型钢铁厂房自然通风的优化设计研究[D].武汉:华中科技大学,2011.
- [14] 邵欣,韩思奇,高芦宝.ANSYS FLUENT 17.0 流场分析实例教程[M].北京:北京航空航天大学出版社,2018.
- [15] 郭金玉,张忠彬,孙庆云.层次分析法的研究与应用[J].中国安全科学学报,2008,18(5):6.