

基于数值模拟的转炉煤气富氧燃烧优化研究

王德胜

唐钢国际工程技术有限公司项目运营部, 河北 唐山

收稿日期: 2025年10月20日; 录用日期: 2025年11月20日; 发布日期: 2025年12月4日

摘要

本文基于Fluent软件对转炉煤气富氧燃烧进行模拟计算研究优化方案, 通过对比分析数值计算得到的速度分布和温度分布图, 探索富氧浓度、燃气热值和氧气分流比等因素对转炉煤气燃烧的影响。得到以下结论: 富氧浓度越大, 转炉煤气核心区域的燃烧越剧烈, 其温度越高, 但随着富氧浓度的增大, 其助燃气体的流量减少, 不利于热量的传导。热值越高的转炉煤气反应更剧烈, 导致核心反应区温度更高, 同时高温进一步增强燃烧反应。但燃气热值增高的同时, 其进入燃气入口的气流会减少, 燃烧区域的气流速度会降低, 不利于热量的扩散。随着氧气分流比的升高, 两侧气流速度会升高, 有利于热量传递, 但燃烧区域核心位置的氧气浓度会降低, 使得燃烧反应不充分, 因此使用环氧烧嘴燃烧时要选择燃气和氧气混合充分的氧气分流比。

关键词

转炉煤气, 富氧燃烧, 传热, 氧气分流比

Research on Optimization of Oxygen Enriched Combustion of Converter Gas Based on Numerical Simulation

Desheng Wang

Project Operation Department of Tanggang International Engineering Technology Co., Ltd., Tangshan Hebei

Received: October 20, 2025; accepted: November 20, 2025; published: December 4, 2025

Abstract

This article is based on Fluent software to simulate and optimize the oxygen rich combustion of converter gas. By comparing and analyzing the velocity and temperature distribution maps obtained from numerical calculations, the influence of factors such as oxygen concentration, gas

calorific value, and epoxy ratio on the combustion of converter gas is explored. The following conclusion can be drawn: the higher the oxygen enrichment concentration, the more intense the combustion in the core area of the converter gas, and the higher its temperature. However, as the oxygen enrichment concentration increases, the flow rate of the combustion supporting gas decreases, which is not conducive to heat conduction. The higher the calorific value of the converter gas, the more intense the reaction, resulting in a higher temperature in the core reaction zone, while the high temperature further enhances the combustion reaction. But as the calorific value of gas increases, the airflow entering the gas inlet will decrease, and the airflow velocity in the combustion area will decrease, which is not conducive to the diffusion of heat. As the epoxy ratio increases, the airflow velocity on both sides will increase, which is conducive to heat transfer. However, the oxygen concentration in the core position of the combustion zone will decrease, resulting in insufficient combustion reaction. Therefore, when using an epoxy burner for combustion, it is necessary to choose an epoxy ratio that is fully mixed with gas and oxygen.

Keywords

Converter Gas, Combustion, Heat Transfer, Epoxy Ratio

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

转炉煤气作为钢铁生产流程中的伴生产物，是极具利用价值的二次能源之一[1]。我国是钢铁生产大国，自1996年以来钢铁产量一直位于世界第一。2024年我国的粗钢产量为10.05亿吨左右。每生产1吨钢可生产90~120 m³的转炉煤气[2]。现阶段，我国的转炉煤气产量巨大。转炉煤气中含有二氧化碳等可燃成分，若不回收利用直接排放，会造成巨大的能源浪费，与我国的可持续性发展战略不符。国家节能减排政策不断推进[3]，冶金行业推行节能型生产工艺迫在眉睫[4]，我国钢铁企业要实现“负能炼钢”，必须充分回收利用转炉煤气[5]。

转炉煤气利用方式分为资源化利用方式和燃料化利用两种[6]。资源化利用方式是指将转炉煤气用作化工生产的原料，以生产不同的化工用品，如甲醇、乙醇、乙二醇等[7]。燃料化利用方式是将转炉煤气作为燃料用于钢包烘烤、加热锅炉、与高炉煤气等煤气掺混后加热加热炉、用于燃气发电等[8]。转炉煤气资源化方式更加环保固碳，但相对地工艺复杂、投资成本较高，钢铁企业对转炉煤气的主要利用方式还是燃料化利用[9]。采用转炉煤气作为燃料进行生产加热，不仅可以降低生产成本，而且操作简单，但直接燃烧加热效果较差[10]。如果可以优化转炉煤气的燃烧，增强其燃烧效果，则可以提高钢铁企业对转炉煤气的利用率，让能源利用效提升，降低钢铁企业外购能源的消耗，还可以减少钢铁企业的碳排放，响应国家节能减排的环保政策。

为优化燃烧，提高燃烧效率，许多学者进行了相关研究。许多研究人员通过优化燃烧器结构来优化燃烧。李磊等人[11]采用加压、控温的方式增强了转炉煤气的燃烧效果；刘校端等人[12]设计了一种新型预混燃烧器，调节了燃烧过程中的火焰形状和燃烧强度提高了工艺的加热效果，还有效地减少了CO的生成量；薄守石等人[13]提出了一种扩散式燃烧器，使得火焰长度与设计炉膛长度相适应，优化了加热效果。也有一些研究人员使用富氧燃烧技术优化了燃烧效果。富氧燃烧[14]是指在燃烧过程中使用氧气浓度高于普通空气的气体作为助燃气体。姚广等人[15]在加热窑炉时应用富氧燃烧技术，有效地提高了窑炉的

内部温度，强化了燃烧效果；Kennedy 等人[16]提高燃烧时的氧气浓度，发现烟气排放量大大减少，排烟热损失降低；Czakiert 等人[17]研究了富阳循环流化床环境中煤炭燃烧，发现随着氧浓度的提高，燃料燃尽率提高、烟气散失带来的热损失减少；Wu 等[18]研究人员发现，提高氧气浓度可以加热速率，并且由于氮气含量的降低，进一步减少了燃料的使用；Qiu 等[19]人在研究天然气的富氧燃烧时发现，采用这种技术可以显著减少天然气的使用量；张发辉等[20]人将富氧燃烧技术应用到热风炉中，发现富氧燃烧可以使用低发热值煤气来代替高发热值煤气。综合上述可知现有的燃烧优化研究已经形成多路径探索，但仍存在明显的局限。李磊、刘校端等人研究的新型燃烧器虽然可以提高燃气燃烧效率，但新型燃烧器改动成本较高，且只能在特定加热条件下采用，不具备普遍适用性；姚广等人的研究充分证明了富氧燃烧技术对于燃烧效果的增强，但现有富氧燃烧技术的研究都只是将富氧燃烧作为独立优化手段，少有将富氧燃烧技术与燃烧器优化结合起来一起研究。本研究采用一种新型燃烧器，该燃烧器的设计主要在于烧嘴，制作成本相对较低，研究过程中将富氧燃烧技术与新型燃烧器结合进一步提高燃气的燃烧效果，能在大部分燃气加热过程中使用，针对性解决转炉煤气燃烧效率低导致利用不足的问题。本研究可以提高转炉煤气的利用率，降低钢铁企业的燃烧成本，减少工业废气排放，并为后续低品质燃料高效燃烧的优化提供新的研究思路。

2. 几何模型

本研究为优化转炉煤气燃烧采用了一种新型环氧烧嘴，烧嘴具有燃气入口和氧气入口两种入口，其中心处是直径为 0.025 m 圆形中心氧气入口，中心氧气入口紧邻外侧是内直径为 0.055 m 外直径为 0.08 m 的环形燃气入口，最外侧是八个直径为 0.01 m 圆形环氧入口，烧嘴如图 1 所示。

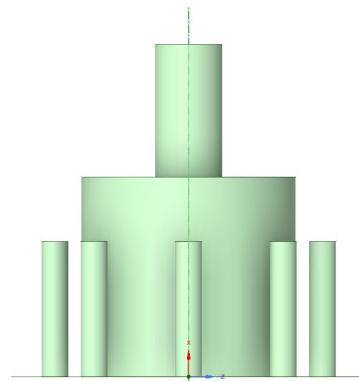
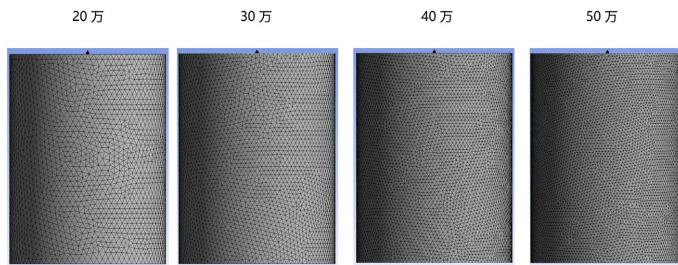


Figure 1. Epoxy burner
图 1. 环氧烧嘴

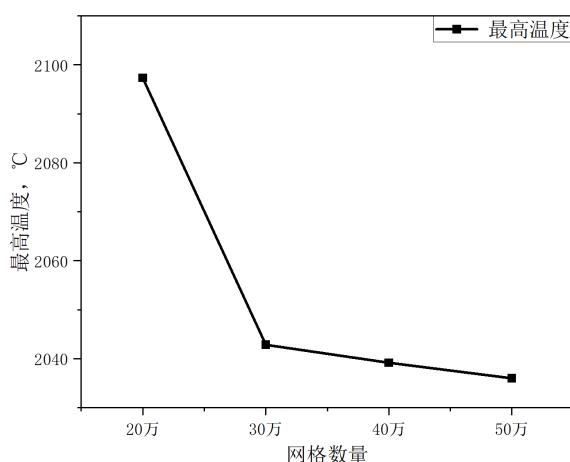
为研究转炉煤气通过环氧烧嘴后与氧气结合的燃烧效果，在烧嘴下方构建一个供燃气燃烧的加热炉炉体，加热炉炉体是一个直径为 2 m，高度为 1.5 m 圆柱体。

3. 网格划分及网格无关性验证

在模拟计算中，网格划分作为连接几何模型与数值计算的核心环节，网格的质量是保证准确数值模拟计算的前提。本研究采用的是 Fluent meshing 软件生成的模型网格。该网格体系经独立性验证，确保在满足计算精度要求的同时，有效控制计算成本。对烧嘴及烧嘴以下炉体的网格划分图如图 2 所示。

**Figure 2.** Grid division diagram**图 2.** 网格划分图

取不同网格数量下计算出的最高温度进行对比如图 3 所示, 以 50 万网格数量计算出的最高温度为基准, 网格数量 30 万以上时, 相对误差在 1% 以下, 网格数量小于 30 万时其相对误差较大, 网格数量越多占用的计算资源越多, 故在建模时选择 30 万网格数进行建模继而进行后续的数值计算。

**Figure 3.** Maximum temperature under different grid numbers**图 3.** 不同网格数量下的最高温度

4. 模型设置及模型验证

4.1. 模型设置

使用 Fluent 模拟计算时, 设置合适地模型是确保模拟结果准确性、可靠性和有效性的核心前提。本次模拟采用的湍流模型为 $k-\varepsilon$ 湍流模型。该模型通过求解湍流动能(k)和湍流耗散率(ε)来表征湍流特性, 该模型具有精确模拟边界层流动、自由剪切流动及回流区流动等湍流现象的能力, 在处理复杂流场时具有较高的预测准确性[21], 同时保持计算效率和稳定性[22]。

辐射模型采用 DO 辐射模型。辐射换热是热量传递的主要方式之一, 辐射模型的选择至关重要。在 Fluent 平台提供的五种辐射模型中, DO 模型覆盖了整个光学厚度范围, 并求解从表面到表面的辐射到参与燃烧问题的辐射等问题, 在较大计算域中能提供更高的精度和更真实的辐射换热效果, 特别是在高温、反应剧烈的燃烧过程中[23], 且计算成本适中[24], 故选择 DO 辐射模型。

燃烧模型选用有限速率模型(Species Transport)。有限速率模型是比较通用的一种燃烧模型[25], 应用范围广泛, 可以用于计算非预混燃烧、预混燃烧、部分预混燃烧等不同的燃烧类型, 适合化学反应速率与流动、混合过程时间尺度相当的非平衡态燃烧场景, 适用于本次模拟计算[26]。在有限速率模型下选择

有限速率/涡耗散速率模型(Finite-Rate/Eddy-Dissipation)，有限速率/涡耗散速率模型能够同时考虑有限速率化学反应和湍流耗散速率，反应速率区俩者较小值，可以避免出现过度预测高温的问题。

4.2. 模型准确性验证

确保其在相关工业场景下的适用性。由于本研究中所使用的燃烧器采用了独特设计，目前公开文献中暂无与本研究特定燃烧器完全匹配的实验数据。文献“蓄热式钢包烘烤的数值模拟”[27]中采用焦炉煤气燃烧烘烤钢包，其研究内容与本研究类似，可以用于验证本研究中使用的物理模型。选取文献中已公开的钢包预热相关实验数据与工况参数，对本文模型进行交叉验证，该文献中的钢包几何图像及测温点位置如图 4 所示。

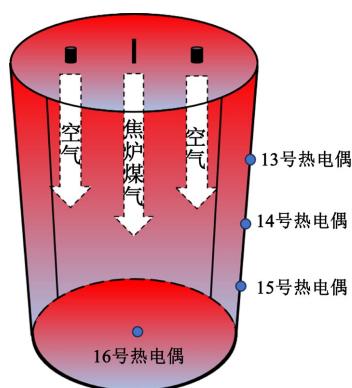


Figure 4. Geometric model diagrams in literature
图 4. 文献中的几何模型图

该文献针对焦炉煤气在空气助燃条件下的钢包预热过程展开专项研究，其设定的关键工况参数具体如下：实验所用钢包为工业级标准结构，底部直径精确控制为 3.24 m，整体高度为 4.06 m；燃料供给方面，焦炉煤气的体积流量稳定维持在 $430 \text{ m}^3/\text{h}$ ，以保障燃烧过程的连续性与稳定性；助燃空气的初始预热温度设定为 26°C ，确保温度波动控制在允许范围内。验证结果如图 5 所示，整体误差在 5% 左右，计算误差在可接受范围内，可以认为数值模拟结果能用于后续数值模拟计算，证明了数学模型的真实性和可靠性。

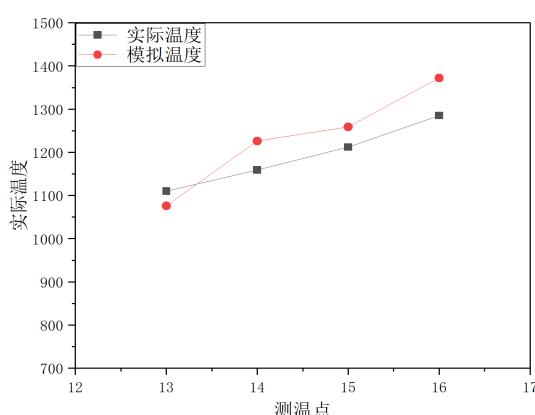


Figure 5. Comparison chart of measured temperature and simulated temperature
图 5. 实测温度与模拟温度对比图

5. 边界条件及计算工况

5.1. 边界条件

1) 氧气入口设置为速度入口, 具体速度由计算得到, 湍流强度为 10%, 中心氧气及环氧入口的水利直径分别为 0.025 m、0.01 m, 温度为 25°C。根据单一变量原则, 在模拟不同富氧浓度的助燃气体时, 应改变总助燃气体的流量, 确保流入烧嘴与转炉煤气反应的氧气流量相同。不同富氧浓度对应的氧气流量如表 1 所示。

Table 1. Combustion supporting gas composition flow meter
表 1. 助燃气体成分流量表

富氧浓度	60%	80%	1
O ₂ 含量	60%	80%	1
N ₂ 含量	40%	20%	0
气体流量	1479.37 m ³ /h	1109.53 m ³ /h	887.62 m ³ /h

2) 燃气入口设置为速度入口, 其具体速度由计算得到, 湍流强度为 10%, 燃气入口的水利直径为 0.00625 m, 温度为 25°C。转炉煤气的主要燃烧成分是 CO, 通过改变转炉煤气中的 CO 含量, 改变转炉煤气的热值。根据单一变量原则, 在模拟不同热值的转炉煤气时, 应改变燃气体的流量, 确保流入烧嘴燃气总热值相同。不同热值的转炉煤气的成份及流量如表 2 所示。

Table 2. Composition and flow table of converter gas
表 2. 转炉煤气成份及流量表

燃气热值(kcal/m ³)	1200	1300	1400
CO 含量	39.9%	43%	46.5%
CO ₂ 含量	24.1%	21%	17.5%
N ₂ 含量	35.4%	35.4%	35.4%
O ₂ 含量	0.6%	0.6%	0.6%
气体流量(m ³ /h)	4076.31	4416	4755.69

- 3) 将圆柱燃烧空间底圆设为压力出口, 其直径为 2 m, 设置压力为大气压强。
- 4) 其余所有壁面均设为绝热壁面。

5.2. 计算工况

本文研究转炉煤气燃烧优化的方法, 探索燃气热值、富氧浓度、氧气分流比三种因素对转炉煤气燃烧效果的影响规律。其中燃气热值是指单位体积的转炉煤气完全燃烧时所释放出的热量, 是影响燃烧温度与热效率的基础参数; 富氧浓度是指助燃气体中氧气体积分数, 作为燃烧反应的关键驱动因素, 富氧浓度直接影响燃烧效率; 氧气分流比为通过中心氧气入口的氧气流量与通过环氧气入口的氧气流量的比值。本次模拟将进行三组对照以探索三种不同因素对转炉煤气燃烧优化效果的影响, 模拟工况如表 3 所示。

Table 3. Simulated operating conditions
表 3. 模拟的工况

	富氧浓度	燃气热值	氧气分流比
富氧浓度对照组	60%	1300 kcal/m ³	1:1
	80%	1300 kcal/m ³	1:1
	1	1300 kcal/m ³	1:1
燃气热值对照组	80%	1200 kcal/m ³	1:1
	80%	1300 kcal/m ³	1:1
	80%	1400 kcal/m ³	1:1
氧气分流比对照组	80%	1300 kcal/m ³	1:1
	80%	1300 kcal/m ³	1:2
	80%	1300 kcal/m ³	1:3

6. 计算结果

6.1. 富氧浓度

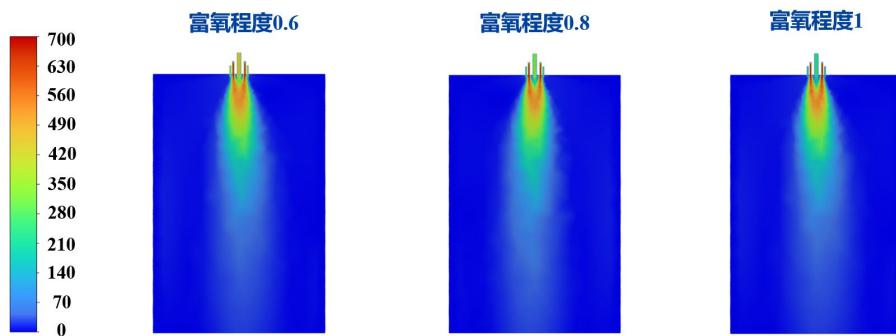


Figure 6. Velocity distribution map under different levels of oxygen enrichment
图 6. 不同富氧浓度下的速度分布图

燃气热值为 1300 kcal/m³, 助燃气体的氧气分流比为 1:1 时, 助燃气体的富氧浓度逐渐增大时的速度分布如图 6 所示。富氧程度从 0.6 提升到 1, 燃烧区域中最大速度分别为 668.39 m/s、671.46 m/s、674.62 m/s, 燃烧区域内最大速度越来越高, 这是因为随着助燃气体的富氧程度的提高, 转炉煤气的燃烧越来越剧烈[28], 流体因热胀冷缩而加速的效果越强。随着富氧浓度逐渐增大速度场分布发生了显著变化。氧气入口处富氧浓度为 0.6 时颜色最深, 随着富氧浓度增大其颜色逐渐变浅。这是由于富氧浓度低时, 从氧气入口流入的助燃气体流量更大, 其流速更快, 当富氧浓度增大, 助燃气体流量逐渐降低, 流速随之降低。富氧浓度 0.6 到富氧浓度 0.8 时, 其速度分布范围变广。随着富氧浓度增大, 燃烧反应速率加快, 热释放量增加, 流体运动速度提高。富氧浓度为 0.8 到 1 时, 速度分布范围变小, 这是随着富氧浓度进一步加大, 虽然燃烧反应速率增加, 但助燃气体流量进一步减少, 使得燃烧区域速度分布范围减少。富氧浓度增加, 助燃气体流量降低, 其氧气入口速度降低, 燃烧区域速度也降低, 同时富氧浓度的增加使得燃烧反应更加剧烈[29], 从而导致燃烧区域的速度场分布范围扩大。

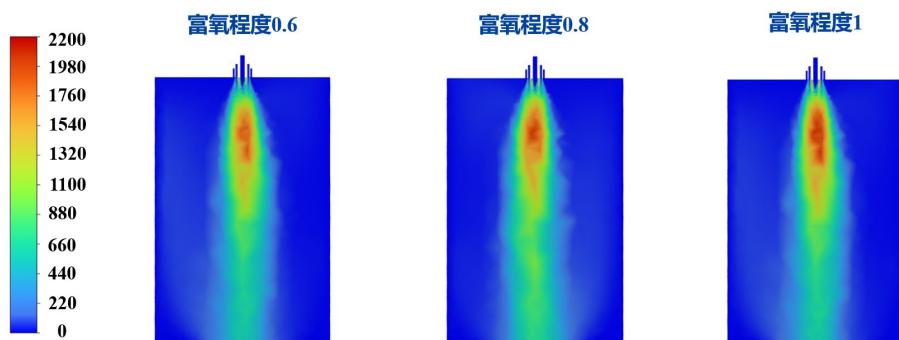


Figure 7. Temperature distribution map under different degrees of oxygen enrichment
图 7. 不同富氧浓度下的温度分布图

燃气热值为 1300 kcal/m^3 , 助燃气体的氧气分流比为 1:1 时, 助燃气体的富氧浓度逐渐增大时的温度分布如图 7 所示。随着富氧浓度的逐渐增大, 燃烧区域内的最高温度越来越高, 分别为 1906.06°C 、 1928.76°C 、 2042.83°C ; 燃烧区域的平均温度先增后减, 富氧浓度为 0.6 时, 平均温度为 136.37°C ; 富氧浓度为 0.8 时, 平均温度为 147.19°C ; 富氧浓度为 1 时, 平均温度为 133.82°C 。这是因为随着富氧浓度的增加, 燃烧变得更加剧烈[29], 燃烧区域核心温度明显升高。结合速度分布, 随着富氧浓度增加, 其速度分布区域先增加后缩小, 富氧程度为 0.8 时热量传递效果最佳。综合来说, 富氧浓度为 0.8 时, 燃烧区域平均温度最高, 燃烧效果最佳。

6.2. 燃气热值

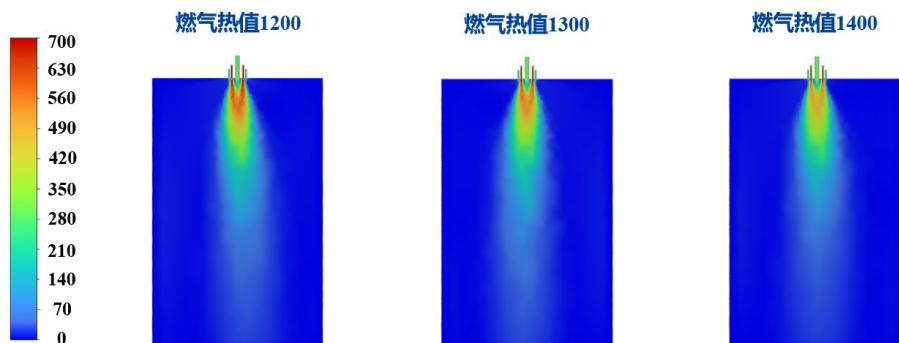


Figure 8. Velocity distribution diagram under different gas calorific values
图 8. 不同燃气热值下的速度分布图

富氧浓度为 0.8, 助燃气体的氧气分流比为 1:1 时, 燃气热值增大时的速度分布如图 8 所示。燃气热值从 1200 kcal/m^3 提升到 1400 kcal/m^3 , 燃烧区域中最大速度分别为 622.54 m/s 、 671.46 m/s 、 724.37 m/s 。随着燃气热值的增加, 燃烧区域内最大速度越来越高, 这是由于随着燃气热值的增加, 燃烧区域内转炉煤气的燃烧越来越剧烈, 流体因热胀冷缩而加速的效果越强[30]。从图中可以看出, 随着燃气热值逐渐增大, 燃烧区域的速度场颜色逐渐变浅。这是由于随着燃气热值的逐渐升高, 进入燃气入口的流量越来越低, 其速度就越小, 速度场分布图的颜色越来越浅。同时, 随着燃气热值的逐渐增大, 其速度分布范围逐渐缩小。这是因为虽然燃气热值增大时, 燃烧反应更剧烈[29], 热释放量增大, 流体流动速度会有一定升高, 但转炉煤气含有大量不燃烧气体, 燃气热值低时这些气体流量更大, 气体流动范围更广。

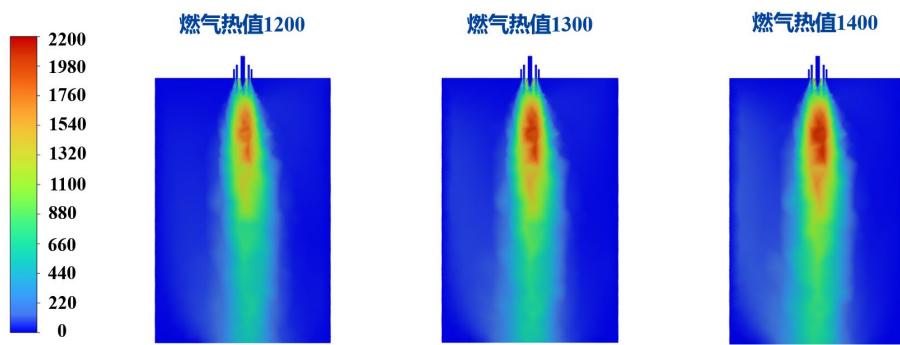


Figure 9. Temperature distribution diagram under different gas calorific values
图 9. 不同燃气热值下的温度分布图

富氧浓度为 0.8，助燃气体的氧气分流比为 1:1 时，燃气热值增大时的温度分布如图 9 所示。随着燃气热值的从 1200 kcal/m^3 逐渐增大到 1400 kcal/m^3 ，最大温度分别为 1866.92°C 、 1928.76°C 、 2130.86°C ，燃烧区域的最大温度逐渐升高；燃烧区域的平均温度先增后减，燃气热值为 1200 kcal/m^3 ，平均温度为 124.66°C ；燃气热值为 1300 kcal/m^3 时，平均温度为 147.19°C ；燃气热值为 1400 kcal/m^3 时，平均温度为 144.81°C 。从图中可以明显看出，随着燃气热值的增大，燃烧区域核心高温区温度明显升高，同时，其核心高温区域范围明显扩大。这是由于虽然加入烧嘴的总热量相同，但热值越高的转炉煤气反应更剧烈[29]，导致核心反应区温度更高，同时高温进一步增强燃烧反应。但燃气热值增高的同时，其速度场分布范围会减少，不利于热量的扩散，所以燃烧区域的平均温度先增后减，综合来说热值 1300 kcal/m^3 时燃烧效果最好。

6.3. 氧气分流比

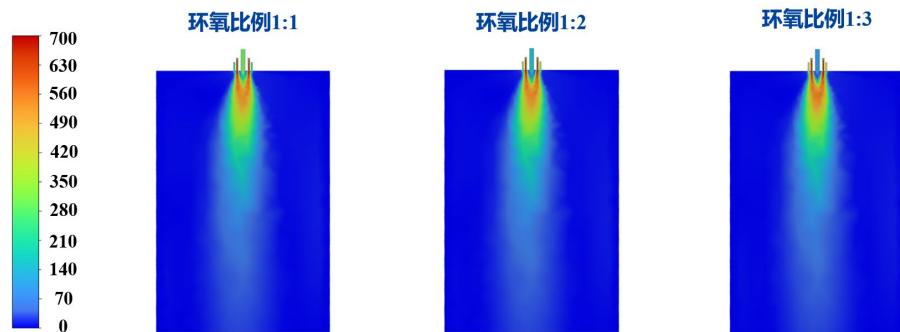


Figure 10. Velocity distribution diagram under different oxygen ratios
图 10. 不同氧气分流比下的速度分布图

富氧浓度为 0.8，燃气热值为 1300 kcal/m^3 ，氧气分流比增大时的速度分布如图 10 所示。气体流动状态是影响燃烧的重要因素[31]。随着氧气分流比从 1:1 到 1:3，燃烧区域内的最大速度逐渐降低，分别为 671.46 m/s 、 669.64 m/s 、 668.60 m/s ，最大速度逐渐降低。烧嘴最中心入口和外侧入口是氧气入口，燃料入口位于两者中间。从图中可以看出，燃烧区域的速度分布呈放射状，中心氧气入口处速度最大，随着环氧比例的增大，中心入口气体的速度逐渐减小。这主要是因为环氧比例增大意味着氧气的相对流量减少，导致中心氧气入口处的流量降低，从而引起速度的下降。中心氧气入口处速度最大，气体速度的减小不利于热量的传递。因为气体速度越大，其湍流程度越高，有利于高温烟气与低温气体之间的热量传

递。转炉煤气和氧气喷射进燃烧区域，转炉煤气与氧气接触反应产生高温烟气，烟气到达燃烧区域边缘碰撞后改变流动方向，在边缘形成旋流区域，气体旋流有助于包内气体的均匀混合，减少高温烟气的直接排出[32]，同时由于旋流的扰动作用可以破坏气流的边界层强化燃烧区域的热量传递，有助于内部温度的提升[33]。旋流越明显，对包内气体混合和热量传递的促进作用也越强。助燃气体的总流量一定，氧气分流比越大，燃烧区域的流体速度越小，对热量传递越不利。

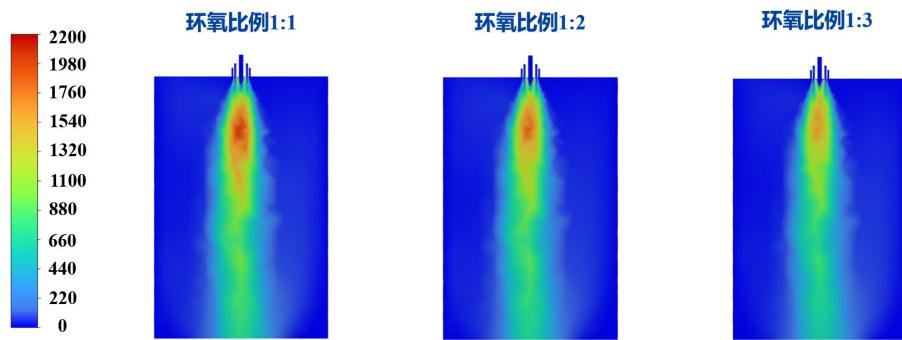


Figure 11. Temperature distribution diagram under different epoxy ratios
图 11. 不同氧气分流比下的温度分布图

富氧浓度为 0.8，燃气热值为 1300 kcal/m^3 ，氧气分流比增大时的速度分布如图 11 所示。随着氧气分流比的逐渐增大，燃烧区域内的最高温度逐渐降低，分别为 1928.76°C 、 1829.38°C 、 1784.83°C ，这是因为随着氧气分流比的变化，核心区域氧气浓度越来越低，最高温度越来越低；燃烧区域的平均温度先增后减，氧气分流比为 1:1 时，平均温度为 147.19°C ；氧气分流比为 1:2 时，平均温度为 143.26°C ；氧气分流比为 1:3 时，平均温度为 138.69°C 。从图中可以看出，随着氧气分流比的增大，燃烧区域内的核心区域颜色越来越浅。这是由于随着氧气分流比的增大，中心氧气入口的助燃气体流量越来越少，燃烧核心区域的氧气浓度降低，核心区域的温度降低。虽然氧气分流比增大能够增加两侧助燃气体流量，使得速度分布变得更广，提高热量的横向传递效率[34]，但燃烧区域核心温度降低，燃烧反应不充分，释放热量减少，且随着氧气分流比的增大导致流体速度降低，使得燃烧区域整体的传热降低，不利于燃烧优化，氧气分流比 1:1 时，燃烧效果最佳。

7. 结论

本文基于 Fluent 软件进行的数值模拟计算，研究了采用新型烧嘴并使用富氧燃烧技术转炉煤气的燃烧优化方案，通过分析数值计算出的速度分布图和温度分布图，探索了富氧浓度、燃气热值和氧气分流比三种因素对转炉煤气燃烧的影响，得到以下结论：

- 1) 通过对不同富氧浓度的模拟计算结果，证明了富氧浓度越大，转炉煤气核心区域的燃烧越剧烈，其温度越高，但随着富氧浓度的增大，其助燃气体的流量减少，不利于热量的传导。
- 2) 通过对不同燃气热值的模拟计算结果，证明了热值越高的转炉煤气反应更剧烈，导致核心反应区温度更高，同时高温进一步增强燃烧反应。但燃气热值增高的同时，其进入燃气入口的气流会减少，燃烧区域的气流速度会降低，不利于热量的扩散。
- 3) 通过对不同氧气分流比的模拟计算结果，证明了随着氧气分流比的升高，两侧气流速度会升高，有利于热量传递，但燃烧区域核心位置的氧气浓度会降低，使得燃烧反应不充分，要选择转炉煤气和氧气混合最充分的氧气分流比进行燃烧。

参考文献

- [1] 韩娟, 周建安, 李小勇, 等. 150 t 转炉高温烟气喷吹煤粉回收煤气工业实践[J]. 炼钢, 2023, 39(5): 90-96.
- [2] 包向军, 陈凯, 郎秀萍, 等. 基于深度学习的转炉煤气发生量预测模型[J]. 钢铁, 2024, 59(1): 67-74.
- [3] 张汉隆. 基于数字仿真模型的钢铁长流程碳排放优化[J]. 冶金工程, 2022, 9(1): 80-91.
- [4] 马庆涛. 转炉煤气净化回收方式的研究与应用[J]. 冶金工程, 2015, 2(1): 8-14.
- [5] 董立峰, 柏洪升. 转炉煤气自动回收系统的研究与应用[J]. 炼钢, 2010, 26(6): 64-66.
- [6] Musial, D., Szwaja, M., Kurtyka, M. and Szwaja, S. (2022) Usage of Converter Gas as a Substitute Fuel for a Tunnel Furnace in Steelworks. *Materials*, **15**, Article 5054. <https://doi.org/10.3390/ma15145054>
- [7] 冯俊小, 温俊云, 刘江, 等. 转炉烟气余能回收利用技术发展现状与展望[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(17): 7183-7193.
- [8] 杨静. 浅析双碳目标下转炉煤气的利用[J]. 冶金与材料, 2024, 44(5): 46-48.
- [9] 任冰朗. 高温转炉煤气与焦炉煤气混合重整研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [10] 张金鹏. 转炉炼钢初末期煤气回收利用的新方法研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2021.
- [11] 李磊, 韦炳扬. 燃烧低热值转炉煤气麦尔兹窑生产操作优化实践[J]. 工业炉, 2017, 39(2): 30-33.
- [12] 刘校端, 涂福泉, 李文恺, 等. 石灰回转窑低热值煤气燃烧器结构优化[J]. 烧结球团, 2025, 50(4): 170-177.
- [13] 薄守石, 徐汝超, 郝兆龙, 等. 新型扩散式燃烧器燃烧特性数值模拟优化研究[J]. 热加工工艺, 2025, 10(14): 1-8.
- [14] 苏俊林, 潘亮, 朱长明. 富氧燃烧技术研究现状及发展[J]. 工业锅炉, 2008(3): 1-4.
- [15] 姚广, 章文明, 王雷, 等. 富氧燃烧对窑炉内部热传递特性的影响和优化[J]. 中国水泥, 2025(7): 60-62.
- [16] Kennedy, L.A., Saveliev, A.V., Bingue, J.P. and Fridman, A.A. (2002) Filtration Combustion of a Methane Wave in Air for Oxygen-Enriched and Oxygen-Depleted Environments. *Proceedings of the Combustion Institute*, **29**, 835-841. [https://doi.org/10.1016/s1540-7489\(02\)80107-9](https://doi.org/10.1016/s1540-7489(02)80107-9)
- [17] Krzywanski, J., Czakiert, T., Muskala, W., Sekret, R. and Nowak, W. (2010) Modeling of Solid Fuels Combustion in Oxygen-Enriched Atmosphere in Circulating Fluidized Bed Boiler: Part 1. The Mathematical Model of Fuel Combustion in Oxygen-Enriched CFB Environment. *Fuel Processing Technology*, **91**, 290-295. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.011>
- [18] Wu, K., Chang, Y., Chen, C. and Chen, Y. (2010) High-Efficiency Combustion of Natural Gas with 21-30% Oxygen-Enriched Air. *Fuel*, **89**, 2455-2462. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.02.002>
- [19] Qiu, K. and Hayden, A.C.S. (2009) Increasing the Efficiency of Radiant Burners by Using Polymer Membranes. *Applied Energy*, **86**, 349-354. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.05.013>
- [20] 张发辉, 杨智强, 杨琳, 等. 富氧燃烧技术在热风炉中的应用[J]. 冶金能源, 2024, 43(5): 3-7.
- [21] 杜慧勇, 任家毅, 李可, 等. 基于 CFD 的工业炉甲醇燃烧器旋流火焰优化[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2025, 46(5): 1-9, 117.
- [22] 李峰, 饶智, 谭华, 等. 基于 Fluent 的多功能烤房流场分析及结构优化[J]. 湖北农业科学, 2025, 64(7): 171-177.
- [23] 唐晨昊. 煤粉预热解燃烧器数值模拟与结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2025.
- [24] 谈和平, 夏新林, 刘林华, 等. 红外辐射特性与传输的数值计算——计算热辐射学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006: 141-145.
- [25] 周硕. 燃气型低氮燃烧器的数值模拟与结构优化研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2022.
- [26] 梁铸. 双旋流低氮燃烧器在燃气锅炉中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2025.
- [27] 季乐乐, 贺东风, 徐安军, 等. 蓄热式钢包烘烤的数值模拟[J]. 钢铁, 2013, 48(4): 76-81.
- [28] 毛宇, 韦耿, 李嘉晔, 等. 水泥窑炉富氧燃烧技术试验研究[J]. 洁净煤技术, 2025, 31(S1): 299-307.
- [29] 王继萍. 长钢高炉提高焦炭负荷冶炼生产实践[J]. 冶金工程, 2020, 7(4): 219-223.
- [30] Robin, V., Mura, A. and Champion, M. (2011) Direct and Indirect Thermal Expansion Effects in Turbulent Premixed Flames. *Journal of Fluid Mechanics*, **689**, 149-182. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.409>
- [31] 秦绪锋, 王凤良, 程常桂, 等. 底吹氩钢包内流动及界面传热行为的数值模拟研究[J]. 炼钢, 2024, 40(5): 49-59.
- [32] 闫红杰, 谢环宇, 胡卫文, 等. 铜浮渣转炉燃烧与传热过程数值模拟[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(11): 3775-3791.

- [33] Shen, J., Li, F., Li, Z., Wang, H., Shen, Y. and Liu, Z. (2019) Numerical Investigation of Air-Staged Combustion to Reduce NOX Emissions from Biodiesel Combustion in Industrial Furnaces. *Journal of the Energy Institute*, **92**, 704-716.
<https://doi.org/10.1016/j.joei.2018.03.002>
- [34] 贾丽娣, 张晓光, 丁丽华, 等. 蓄热式钢包烘烤流动与传热过程数值模拟[J]. 治金能源, 2010, 29(5): 18-21.