双膛石灰窑富氧燃烧过程煅烧特性数值模拟

李宏鹏[1]，周浩宇[2]，朱蓉甲[2]，伍东玲[3]，王志奇[1]，杨胡娅[1]
(1. 湘潭大学 机械工程与力学学院，湖南 湘潭 411105；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，
湖南 长沙 410205；3. 中南大学 能源科学与工程学院，湖南 长沙 410083)

摘要： 作为钢铁行业碳减排的重要环节，石灰窑生产工序以空气助燃为主，尾气中 CO_2 浓度偏低，难以实现低成本碳捕集。富氧燃烧是一种有效的碳富集技术，但是采用该技术时石灰窑内高体积分数 CO_2 气体辐射会影响窑内温度分布及碳酸钙的分解特性。为此，本文以双膛石灰窑为研究对象，建立石灰窑生产过程的数值仿真模型，研究富氧燃烧下气体辐射对石灰石煅烧特性的影响，并比较不同 O_2/CO_2 配比下窑内的温度、组分及碳酸钙质量分数变化。结果表明：考虑气体辐射后，石灰窑内 CO_2 组分浓度没有明显改变，但窑内最高温度降低约 60 ~ 100 K，同时最高气相温度随着 O_2 体积分数的增大而升高；考虑气体辐射后，石灰窑内煅烧区气相及碳酸钙的平均温度升高，窑内碳酸钙的分解速率加快，其气相平均温度升高约 30 ~ 90 K，碳酸钙平均温度升高约 30 ~ 130 K，且随着 O_2 体积分数的增大而升高，窑内碳酸钙的分解速率也随 O_2 体积分数的增大而加快。本文研究成果可为石灰窑内温度及碳酸钙分解特性的准确模拟提供理论支撑，同时也为富氧燃烧技术在双膛石灰窑内的应用提供参考。

关键词： 双膛石灰窑；富氧燃烧；气相辐射；数值模拟
中图分类号： TQ114.4；O242.1 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000－8764(2025)06－0101－09
doi： 10.13403/j.sjqt.2025.06.101

Numerical simulation of calcination characteristics of oxygen-enriched combustion process in double-chamber lime kiln

LI Hongpeng[1], ZHOU Haoyu[2], ZHU Rongjia[2], WU Dongling[3], WANG Zhiqi[1], YANG Huya[1]
(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: As an important link in carbon emission reduction in the steel industry, the production process of lime kiln is mainly air-fueled combustion, and the CO_2 concentration in the exhaust gas is low, making it difficult to achieve low-cost carbon capture. Oxygen-enriched combustion is an effective carbon enrichment technology, but the high volume fraction CO_2 gas radiation in the lime kiln will affect the temperature distribution and decomposition characteristics of calcium carbonate in the kiln. Therefore, the double-chamber lime kiln is taken as the research object to establish a numerical simulation model of the lime kiln production process, study the effect of gas radiation on the calcination characteristics of limestone under oxygen-rich combustion, and compare the changes of temperature, composition and calcium carbonate content in the kiln under different O_2/CO_2 ratios. The results show that the CO_2 component concentration in the lime kiln does not change significantly after considering the gas radiation, but the maximum temperature in the kiln decreases by about 60 ~ 100 K, and the maximum gas phase temperature increases with the increase of O_2 volume fraction. After

收稿日期： 2025－04－15；**修回日期：** 2025－06－05
基金项目： 湖南省自然科学基金资助项目(2024JJ7544)；中冶长天科研开发基础研究基金资助项目(2023JCY106)
作者简介： 李宏鹏(2002—)，女，硕士研究生，从事热力设备建模及仿真方面的研究。
通信作者： 王志奇(1979—)，男，博士，教授，从事热工过程数值模拟及优化方面的研究。

中国知网 https://www.cnki.net

considering the gas radiation, the average temperature of the gas phase and calcium carbonate in the calcination area in the lime kiln is increased, and the decomposition rate of calcium carbonate in the kiln is increased, and the average temperature of the gas phase is increased by about 30 ~ 90 K, and the average temperature of calcium carbonate is increased by about 30 ~ 130 K increasing with the increase of O_2 volume fraction, and the decomposition rate of calcium carbonate in the kiln also is accelerated with the increase of O_2 volume fraction. The results can provide theoretical support for the accurate simulation of temperature and calcium carbonate decomposition characteristics in lime kilns, and also provide a reference for the application of oxygen-rich combustion technology in double-chamber lime kilns.

Key words: double-chamber lime kiln; oxygen-rich combustion; gas-phase radiation; numerical simulation

“十四五”以来，国家部委下发多项钢铁行业规划指导意见，要求钢铁行业加快推广绿色低碳技术应用，降低 CO_2 排放强度。石灰是一种重要的工业原料，被广泛用于多个行业中。在钢铁行业中生石灰作为炼钢过程中的添加剂和造渣材料，能有效脱除 P、S 等有害元素。当前，我国冶金石灰产量达到 1.2 亿吨，且每生产 1 t 石灰排放 CO_2 约 1.6 t[1]。由此可见，石灰工序是实现钢铁行业减碳的重要环节。然而，目前国内石灰窑以空气助燃为主，尾气中 CO_2 浓度偏低，难以实现低成本碳捕集。据统计，CO_2 体积分数每提高 2%，回收成本可降低 10 元/t[2]。因此，提高尾气中 CO_2 体积分数是降低石灰工序成本的必经之路。富氧燃烧通过烟气再循环提高尾气中 CO_2 体积分数，其理论干烟气的 CO_2 体积分数可超过 80%，且具有成本低、易规模化、适于存量机组改造等优点[3]，是一种有效的碳富集技术。

石灰窑生产过程中存在工作温度高、停炉成本高、数据测量困难等问题，难以通过试验手段获取窑内石灰石的煅烧特性。近年来，国内外许多研究人员对石灰窑内温度、组分及煅烧特性开展了数值模拟研究。如刘国辉等[4-5]以并流蓄热式双膛竖窑为对象，研究燃烧过程中的关键参数分布特性；崔春等[6]研究了窑体总高度对窑内温度的影响；KANG 等[7]模拟分析了窑内温度、气固相场及石灰石分解率等情况；宗宁等[8]研究了石灰石粒度和料床高度对窑内压力特征的影响。在此基础上，周浩宇等[9]对石灰窑生产过程中 NO_x 的排放特性进行了研究，并提出几种供煤方案；ZHANG 等[10]对石灰回转窑一次风和二次风烟气再循环进行了数值模拟，研究其对煅烧特性、NO_x 生成及石灰石煅烧程度的影响；王跃等[11]分析了石灰窑粉尘排放特性并提出两种粉尘控制方案。

然而，上述研究都是针对空气助燃条件下煅烧过程，其传热传质特性与富氧燃烧方案存在显著差异。研究表明，石灰石分解速率受 CO_2 浓度影响较大，高浓度 CO_2 条件下碳酸钙的分解受到抑制[12]；O_2/CO_2 气氛条件下，随着含氧率的提高燃烧火焰长度缩短，窑内热负荷降低[10]。相比传统空气燃烧，富氧燃烧的烟气成分及物性参数发生显著变化，需要在更高炉温下才能获得相近的壁面传热量[13]。同时，随着烟气循环倍率的增加，炉内温度及传热量降低[14]。500 MW 燃煤锅炉在 70% 烟气循环倍率下，可以实现与空气燃烧相近的温度及传热量[15]。但是，已有富氧燃烧研究主要针对燃煤锅炉，其炉型结构与工艺参数都与双膛石灰窑存在显著差异。此外，已有研究都忽略了气相组分辐射传热对石灰窑内温度及分解特性的影响，导致模拟结果的可靠性受到影响。为此，本文以并流蓄热式双膛石灰窑为对象，采用数值模拟方法研究气体辐射对石灰窑煅烧过程温度、组分及煅烧特性的影响，为富氧燃烧技术在石灰窑中的应用提供理论支撑。

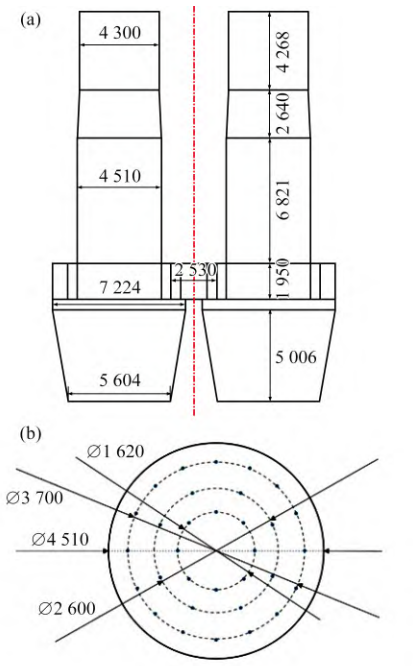
1 仿真模型

1.1 双膛石灰窑物理模型

双膛石灰窑单膛按照同心圆形式共分布 33 支 60 mm 的喷枪，两个圆周上的喷枪交叉排布，炉膛的整体结构尺寸及喷枪分布如图 1 所示。

考虑到炉膛结构的对称性及模型网格数量，选取整体炉膛的 1/8 为研究对象。该区域为图 2 中红色线条(虚线)所围部分。由图 2 可以看出，烟气出口截面上部区域选取的高度为 9.4 m，下部高度为 5.5 m，整体炉膛高度为 14.9 m。

中国知网 https://www.cnki.net



（a）石灰窑结构；（b）燃料喷口

图 1　石灰窑结构及燃料喷口布置示意　　mm

Fig. 1　Schematic diagram of lime kiln structure and fuel nozzle layout

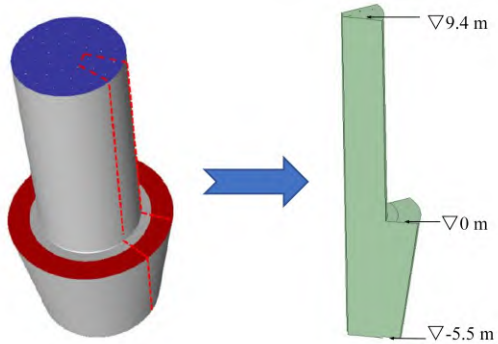
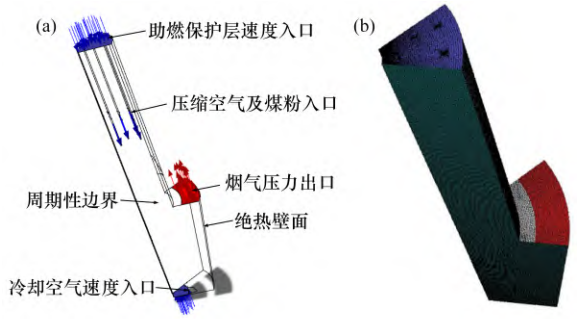


图 2　石灰窑选取的计算区域

Fig. 2　Calculation area selected for lime kiln

在选取的计算区域中，炉膛顶部为助燃空气的速度入口。整个区域包括 4 个煤粉喷枪，喷枪底部为压缩空气及煤粉入口；底部扇形区域为冷却空气入口，标高为 0 m 平面的红色环形区域为炉膛与环形通道的交界面，为烟气出口。在此基础上，选用六面体结构化网格对上述 1/8 炉膛区域进行网格划分，整体炉膛的网格数量为 170 万个，具体网格划分如图 3 所示。

石灰竖窑内充满了石灰石颗粒，气体与煤粉在颗粒之间的空隙内流动。将整个炉膛区域的石灰石近似处理为静态的多孔介质。多孔介质以石灰石为固体骨架，其内构成空隙空间的孔洞相互连通。



（a）几何模型结构及边界设置；（b）网格划分

图 3　模型边界设置与网格划分示意

Fig. 3　Schematic diagram of model boundary and mesh

1.2　数学模型

1.2.1　控制方程

描述石灰竖窑内气体流动过程的控制方程如下。

（1）连续性方程：

$$\frac{\partial(\gamma\rho_g)}{\partial t}+\frac{\partial(\gamma\rho_g u_{g,j})}{\partial x_j}=\gamma S_m \tag{1}$$

式中：t 为时间，s；ρ 为密度，kg/m^3，下标 g 表示气相；u_j 分别表示在 x、y、z 方向上的流速，m/s；γ 为石灰石堆积的孔隙率，%；S_m 为煤粉燃烧生成的气相质量源项，kg/(m^3·s)。

（2）动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho_g u_{g,i})+\frac{\partial}{x_j}(\gamma\rho_g u_{g,i}u_{g,j})=-\gamma\frac{\partial p_g}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\gamma\mu_{eff}\left(\frac{\partial u_{g,i}}{\partial x_j}+\frac{\partial u_{g,j}}{\partial x_i}\right)\right]-\gamma\rho_g g_i+\gamma S_i \tag{2}$$

式中：p 为压力，Pa；μ_{eff} 为有效黏度，Pa·s，包括分子黏度 μ 与湍流黏度 μ_t 两个部分；g_i 为重力加速度，m/s^2；u_i、u_j 为 i、j 方向上的分速度，m/s；S_i 为流体流经多孔介质区域所受到的阻力源项，其表达式可由 Ergun 方程确定。

Ergun 方程[16]：

$$S_i=\frac{150\mu_g}{d_s^2}\frac{(1-\gamma)^2}{\gamma^3}u_g+\frac{1.75\rho_g}{d_s}\frac{(1-\gamma)}{\gamma^3}u_g^2 \tag{3}$$

式中：d_s 为石灰石的平均粒径，m。

（3）能量方程：

$$\frac{\partial(\gamma\rho_g c_{p,g}T_g)}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}[u_g(\rho_g c_{p,g}T)]=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\gamma\lambda_g\frac{\partial T_g}{\partial x_j}\right)+S_g^h+h_{gs}A_{gs}(T_s-T_g) \tag{4}$$

中国知网　https://www.cnki.net

式中：c_p为定压比热，J/(kg·K)；T为温度，K；λ为导热系数，W/(m·K)；S_g^h为煤粉燃烧放热源项，W/m³，该放热源项由 Fluent 燃烧计算得到；h为对流换热系数，W/(m²·K)；A_{gs}为气固单位体积的换热面积，m⁻¹，下标 s 表示固相碳酸钙。

(4) 湍流模型。本文采用标准 $k-\varepsilon$ 模型[17]描述窑内气体的三维湍流运动，该模型中 k 和 ε 是两个基本未知量，其表达式为

$$\frac{\partial(\rho_g k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g k u_{g,i})}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu_g+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho_g\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial(\rho_g \varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho_g \varepsilon u_{g,i})}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu_g+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho_g\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

式中：σ_k为湍动能 k 对应的 Prandtl 数，数值为 1.0；σ_ε为耗散率 ε 对应的 Prandtl 数，取为 1.3；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$为经验常数，无量纲常数，分别取为 1.44 与 1.92；G_k为平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项。

1.2.2 石灰石分解模型

石灰石的分解反应速率模型采用 KRAUSE 等[18]提出的速率方程。

$$\frac{\partial m_{CaCO_3}}{\partial t}=-A_{rf}\cdot M_{CaCO_3}\cdot k_{r,CaCO_3}\cdot(C_{CO_2}-C_{CO_2,\infty}) \tag{7}$$

式中：m_{CaCO_3}为 $CaCO_3$ 单位体积的质量，kg；M_{CaCO_3}为 $CaCO_3$ 摩尔质量，kg/mol；A_{rf}是反应前沿面，m²；$(C_{CO_2}-C_{CO_2,\infty})$是石灰窑中 CO_2 浓度与对应温度下的平衡浓度差，mol/L；$k_{r,CaCO_3}$为化学反应速率常数，m/s。

1 mol $CaCO_3$ 的分解吸热量为[19]

$$\Delta H_{T_s}^0=\Delta H_{298}^0+\int_{T=298}^{T_s}(c_{p,CO_2}\cdot M_{CO_2}+c_{p,CaO}\cdot M_{CaO}-c_{p,CaCO_3}\cdot M_{CaCO_3})\,dT \tag{8}$$

式中：CO_2、$CaCO_3$、CaO 的比热容均随温度变化。

1.2.3 固相控制方程

高温烟气与石灰石固体颗粒之间的辐射换热，有可能对温度场及碳酸钙分解特性产生影响。因此，固相能量方程考虑了气体辐射特性：

$$\frac{\partial[(1-\gamma)\rho_s c_{p,s}T_s]}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left((1-\gamma)\lambda_s\frac{\partial T_s}{\partial x_j}\right)+S_s^h+h_{gs}A_{gs}(T_g-T_s)+S_{rad} \tag{9}$$

式中：$c_{p,s}$为固体比热容，J/(kg·K)；λ_s为固相的导热系数，W/(m·K)；S_s^h为石灰石分解吸热源项，W/m³；S_{rad}为辐射换热源项，W/m³。

根据热量守恒定律，气体与石灰石辐射换热的热流密度可表示为

$$q_r=C\left[\varepsilon_g\left(\frac{T_g}{100}\right)^4-\varepsilon_a\left(\frac{T_s}{100}\right)^4\right] \tag{10}$$

式中：C为热辐射黑体常数，为 5.76 W/(m²·K⁴)；ε_g、ε_a分别为气体辐射系数与吸收系数，无量纲。

在计算辐射换热源项时，假定参与固相表面辐射传热的面积与对流传热面积 A_{gs} 相同，由此可得到辐射源项表达式：

$$S_{rad}=q_r A_{gs} \tag{11}$$

石灰窑内烟气的主要成分是 N_2、CO_2及 H_2O，其中双原子气体 N_2 对辐射传热没有贡献。因此，实际上在石灰窑烟气的辐射传热中，CO_2及 H_2O 是主要的辐射传热源。

根据辐射传热理论，当气体中同时存在水蒸气和二氧化碳时，气体发射率及吸收系数由下式计算：

$$\varepsilon_g=C_{H_2O}\varepsilon_{H_2O}^*+C_{CO_2}\varepsilon_{CO_2}^*-\Delta\varepsilon \tag{12}$$

$$\varepsilon_a=C_{H_2O}\alpha_{H_2O}^*+C_{CO_2}\alpha_{CO_2}^*-\Delta\alpha \tag{13}$$

式中：$\varepsilon_{H_2O}^*$、$\varepsilon_{CO_2}^*$是在一定温度和压力下得到的发射率，无量纲；C_{H_2O}、C_{CO_2}是在给定条件下的修正系数，这些参数可以通过查表获得，无量纲；$\Delta\varepsilon$为修正量，无量纲。

1.3 边界条件

在材料选择上，气相材料通过 injection 在煤粉入口面上释放煤粉颗粒，固相材料添加石灰石固体；在多孔介质设置中，根据公式计算出不同孔隙率下的黏性阻力系数以及惯性阻力系数。竖窑顶部为助燃空气入口，条件设为速度边界，流速由供风量及入口面积计算得到；煤粉喷枪的下方设为煤粉入口，两个炉膛连接区域的环形通道烟气出口设为压力边界，压力值设为 0 Pa；窑底冷却空气入口设为速度边界，流速由冷却风量及底部入口面积计算得到。计算区域半径方向的边界设为周期性边界，其余表面设为绝热壁面。不同边界上气流的具体参数根据实际情况设定。

模拟分析时，选取 2 个 O_2/CO_2 配比作为计算工况。具体参数设置如表 1 所示。

中国知网 https://www.cnki.net

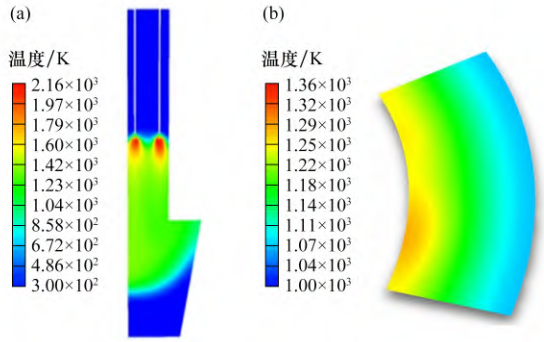
表 1　模拟的参数及边界设置

Table 1　Parameters and boundary settings for simulation

方案编号	助燃气体组成	气体入口速度/(m·s^{-1})	助燃空气温度/K	冷却空气速度/(m·s^{-1})	冷却空气温度/K	喷枪煤粉流量/(kg·s^{-1})	烟气出口压强/Pa
1	0.24O_2/0.76CO_2	0.57	420	0.49	300	0.09	0
2	0.36O_2/0.64CO_2	0.38	420	0.49	300	0.09	0

2　模型验证

根据企业现场实际运行数据确定模型相关边界条件，对石灰窑内温度及煅烧特性进行模拟。结果如图 4 所示。由图 4 可以看出，生产工况下石灰窑内最高温度约为 2 100 K，位于煤粉喷枪出口下方火焰锋面处。煅烧段的高温区主要集中在喷嘴附近。除喷嘴附近区域外，其余区域同一截面的温度分布较均匀。同时，出口截面的内侧烟气温度较高，而外侧温度相对较低，这主要是由于底部冷却空气的作用所致。出口截面的平均温度为 1 168 K，这与实际生产中环形通道检测温度 1 220 K 较为接近，相对误差为 4.5%，这表明仿真模型具有较好的可靠性。



(a) 纵截面；(b) 出口截面

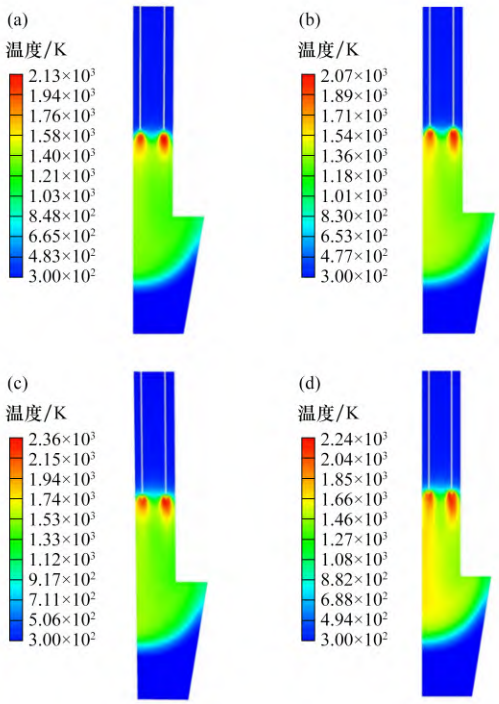
图 4　实际工况下的温度分布

Fig. 4　Temperature distribution under actual operating conditions

3　结果与讨论

3.1　温度分布

根据表 1 中的设定参数，对忽略及考虑气体辐射条件下石灰窑内温度分布进行分析。结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，考虑气体辐射后，不同 O_2/CO_2 配比下纵截面温度的分布规律与忽略气体辐射时相一致。然而，考虑气体辐射下窑内最高温度存在一定程度降低，方案 1、2 温度分别降低 60 K 与 100 K。这主要是因为煅烧区的烟气具有一定的吸收系数，考虑辐射换热后，高温区火焰向炉膛内低温烟气以及石灰石的传热会增强，导致气相最高温度有所降低。同时，0.36O_2/0.64CO_2 配比条件下烟气最高温度的降低幅度更大，这是因为该工况下更高的含氧量强化了煤粉燃烧，使高温区的温度更高，气体辐射能力增强。



方案 1：(a) 忽略辐射；(b) 考虑辐射。
方案 2：(c) 忽略辐射；(d) 考虑辐射

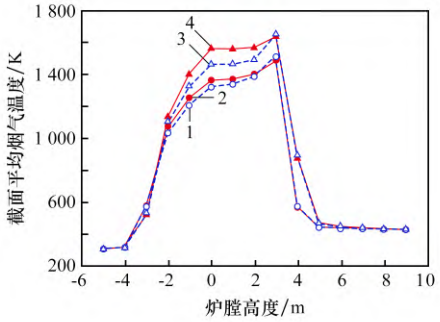
图 5　不同方案下的温度分布

Fig. 5　Temperature distribution under different cases

不同方案下窑高度方向截面平均烟气温度如图 6 所示。由图 6 可见，气相辐射对入口段及冷却段截面平均温度的影响基本可以忽略，这主要是冷却段及入口段温度较低，气相辐射能力较弱所致。在 −2 ~ 2 m 高度的煅烧段，考虑气相辐射后各个截面的平均烟气温度更高。分析原因认为，气体中 CO_2 及 H_2O 体积分数较高，气体具有较大

中国知网　https://www.cnki.net

的发射率与吸收率，在向低温固体及烟气辐射能量的同时，也吸收高温气体传递的热量，使得这些截面的整体温度更高。同时，0.36O_2/0.64CO_2配比下气相辐射对煅烧区温度升高幅度的影响更高。相比忽略气相辐射工况，考虑气相辐射工况的煅烧区烟气截面平均温度升高 70 ~ 90 K，比 0.24O_2/0.76CO_2配比下的气相温度升高约 40 K。这主要是由于含氧量升高后，煅烧区内 CO_2 体积分数更高，从而提高了气体辐射能力，导致窑内整体温度增大。此外，气体辐射主要影响窑内煅烧区的温度分布，这是由于该区域的整体温度超过 1 000 K，根据辐射定律可知高温下气体辐射能力更强。



方案 1：1—忽略辐射；2—考虑辐射。

方案 2：3—忽略辐射；4—考虑辐射

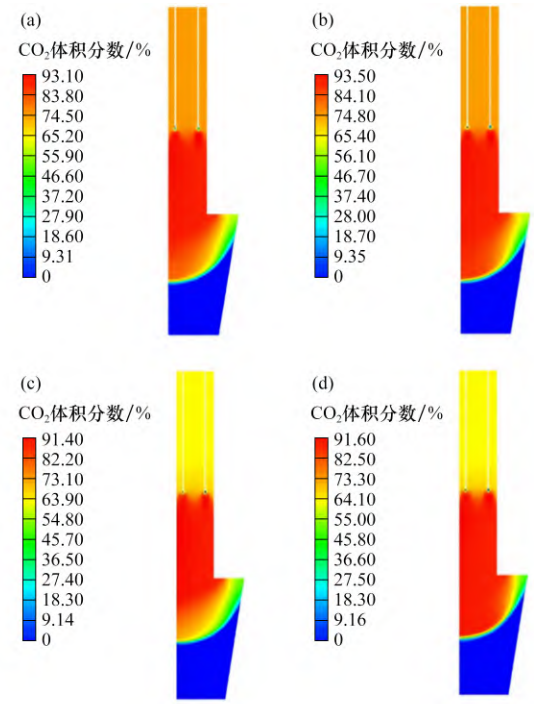
图 6 不同方案下窑高度方向截面平均烟气温度

Fig. 6 Average gas temperature in the kiln height direction cross-section under different cases

3.2 组分变化

根据表 1 中的设定参数，对忽略及考虑气体辐射下石灰窑内组分变化进行分析，得到喷枪所在纵截面的 CO_2 体积分数分布模拟结果如图 7 所示。由图 7 可以看出，气体辐射对石灰窑内 CO_2 体积分数分布规律的影响不大。分析原因认为，石灰窑内煤粉已经完全燃烧，石灰石也基本煅烧完全，且不同工况下过量空气系数相同，这使得窑内 CO_2 体积分数分布差异较小。整个石灰窑内，中间煅烧段由于燃烧反应及碳酸钙分解，CO_2 体积分数最高约为 93%，说明富氧燃烧能有效实现烟气 CO_2 富集。顶部入口段 CO_2 体积分数则与助燃气体中的 CO_2 体积分数有关。底部冷却段由于采用空气冷却，CO_2 体积分数为 0。

不同方案下窑高度方向截面平均CO_2体积分数如图 8 所示。由图 8 可见，不同 O_2/CO_2 配比下石灰窑内相同高度截面的 CO_2 体积分数相差不大。分析原因认为，气体辐射主要影响固相及气相温度，而对不同横截面的 CO_2 体积分数数值影响较小，同时煅烧段内燃烧反应及分解反应较为完全，因此气相温度不会对组分体积分数产生明显影响。同时，0.36O_2/0.64CO_2 配比下 CO_2 高体积分数区域更靠近煅烧区上部。这是由于该工况下煅烧区

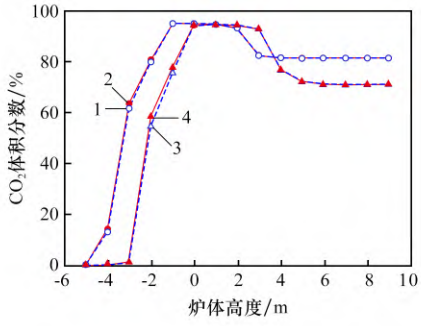


方案 1：(a) 忽略辐射；(b) 考虑辐射。

方案 2：(c) 忽略辐射；(d) 考虑辐射

图 7 不同方案下的窑内 CO_2 分布

Fig. 7 CO_2 distribution in the kiln under different cases



方案 1：1—忽略辐射；2—考虑辐射。

方案 2：3—忽略辐射；4—考虑辐射

图 8 不同方案下窑高度方向截面平均 CO_2 体积分数

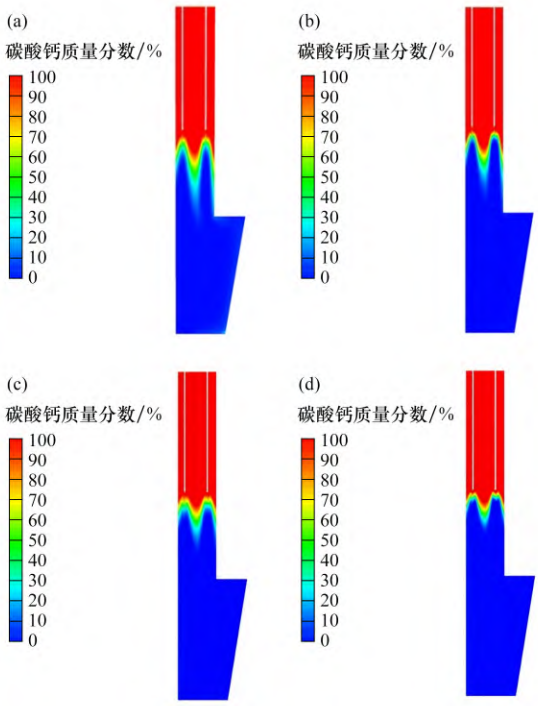
Fig. 8 Average CO_2 fraction in the kiln height direction cross-section under different cases

中国知网 https://www.cnki.net

的整体温度更高，使得碳酸钙更快分解，导致在更高位置处 CO_2 的体积分数更高。

3.3　碳酸钙分解特性

根据表 1 中的设定参数，得到不同方案下的窑内碳酸钙分布如图 9 所示。由图 9 可以看出，在顶部入口段由于气体温度较低，碳酸钙并未发生分解，进入煅烧段后，碳酸钙在高温烟气的作用下迅速发生分解反应。在喷枪下方，由于存在局部高温区，碳酸钙首先分解，但在喷枪之间区域仍存在部分未分解的碳酸钙。然而，随着碳酸钙的不断下移，其在高温气流作用下进一步分解，并在气流出口所在的截面基本分解完全。同时，考虑气体辐射情况下，距离喷嘴较远纵截面的碳酸钙分布特性与忽略辐射情况基本一致，碳酸钙在煅烧段得到较充分的分解。考虑烟气辐射后，煅烧段气相温度整体有所升高，加快了碳酸钙的分解反应，因此距喷枪较近纵截面处的碳酸钙分解更为充分。



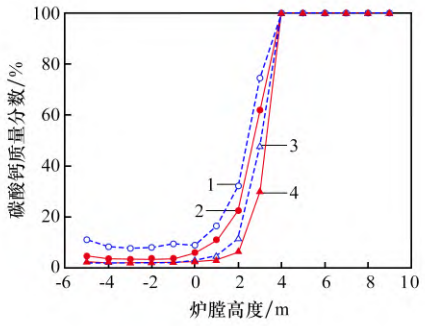
方案 1：(a) 忽略辐射；(b) 考虑辐射。

方案 2：(c) 忽略辐射；(d) 考虑辐射

图 9　不同方案下的窑内碳酸钙分布

Fig. 9　Distribution of calcium carbonate in the kiln under different cases

不同方案下窑高度方向截面平均碳酸钙质量分数变化如图 10 所示。由图 10 可以看出，不考虑气相辐射时，$0.24O_2/0.76CO_2$ 配比下石灰窑出口的碳酸钙质量分数约为 10%，存在分解不完全情况。考虑气体辐射时，不同 O_2/CO_2 配比下石灰窑出口的碳酸钙质量分数都很低，表明碳酸钙在窑内的分解完全。这说明考虑气相辐射有助于提高石灰窑内煅烧特性模拟结果的准确性。同时，由于窑内整体温度升高，考虑辐射下煅烧段内碳酸钙质量分数曲线更为陡峭，这说明碳酸钙的分解速率更快。此外，随着含氧量的提升，煅烧区整体温度升高，也加快了碳酸钙的分解速率。



方案 1：1—忽略辐射；2—考虑辐射。

方案 2：3—忽略辐射；4—考虑辐射

图 10　不同方案下窑高度方向截面平均碳酸钙质量分数

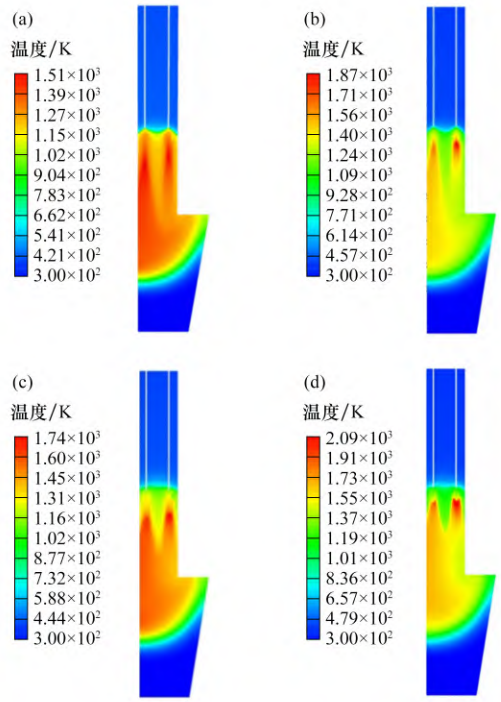
Fig. 10　Average calcium carbonate mass fraction in the kiln height direction for different cases

不同方案下的窑内固相温度分布如图 11 所示。由图 11 可见，考虑气体辐射时喷枪所在纵截面碳酸钙温度分布规律与忽略气体辐射时相同，但考虑辐射下的整体温度更高。这是由于碳酸钙主要受气相对流与辐射传热的影响，在入口边界相同条件下，自身温度与气相温度线性相关。相比忽略辐射工况，考虑辐射下冷却段及入口段的碳酸钙温度相同，但是在 −2 m 到 3 m 高度范围内碳酸钙温度更高，这与煅烧段气相温度更高这一规律相一致。

不同方案下窑高度方向截面平均碳酸钙温度如图 12 所示。由图 12 可见，在两种配比下，考虑气体辐射使碳酸钙的截面平均温度更高，比忽略气体辐射下分别高 30 ~ 50、70 ~ 130 K。这主要因为气体辐射增强了气相温度，从而提高了固体的吸热量，使得固相温度有一定程度的升高。同

中国知网　https://www.cnki.net

时，随着含氧量的提升，气相辐射对碳酸钙温度的影响也相应增大，这与气相温度的变化规律相一致。

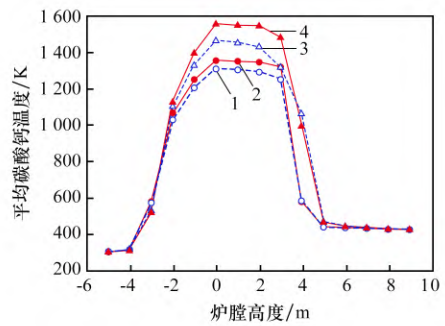


方案 1：(a) 忽略辐射；(b) 考虑辐射。

方案 2：(c) 忽略辐射；(d) 考虑辐射

图 11 不同方案下的窑内固相温度分布

Fig. 11 Solid phase temperature distribution in kiln under different cases



方案 1：1—忽略辐射；2—考虑辐射。

方案 2：3—忽略辐射；4—考虑辐射

图 12 不同方案下窑高度方向截面平均碳酸钙温度

Fig. 12 Average calcium carbonate temperature in kiln height direction for different cases

4 结 论

(1) 考虑气体辐射后，高温区火焰向炉膛内低温烟气以及石灰石的传热作用增强，导致石灰窑内的最高温度呈现降低趋势，降低幅度约 60 ~ 100 K，但煅烧后石灰窑内 CO_2 体积分数没有发生明显变化。

(2) 石灰窑煅烧过程中，窑内 CO_2 及 H_2O 体积分数较高，烟气具有较大的发射率与吸收率，增强了气相内部及气相与固相的辐射传热。考虑辐射条件下，石灰窑内纵截面的气相与固相平均温度有一定程度的升高，气相温度升高约 30 ~ 90 K。随着含 O_2 量的升高，气体辐射能力增强，石灰窑内气相与固相平均温度增大。

(3) 气相辐射对石灰窑内石灰石煅烧特性存在一定影响。考虑气相辐射后，窑内整体温度升高，石灰石的分解速率加快。在富氧燃烧模拟过程中需要考虑气体辐射以提高石灰石分解特性的计算精度。

参考文献:

[1] 贾楠楠，李晓. 我国钢铁与冶金石灰生产形势与发展[J]. 耐火与石灰，2023，48(4)：1－4.
JIA Nannan，LI Xiao. Situation and development of iron and steel and metallurgical lime production in China[J]. Refractories & Lime，2023，48(4)：1－4.

[2] 吉立鹏，张丙龙，曾卫民. 基于石灰窑回收 CO_2 用于炼钢的关键技术分析[J]. 中国冶金，2019，29(3)：49－52.
JI Lipeng，ZHANG Binglong，ZENG Weimin. Analysis on key technologies of CO_2 recovery from lime kiln for steelmaking[J]. China Metallurgy，2019，29(3)：49－52.

[3] 刘建华. 国内燃煤锅炉富氧燃烧技术进展[J]. 热力发电，2020，49(7)：48－54.
LIU Jianhua. Research and development of oxy-fuel combustion for coal-fired boiler in China[J]. Thermal Power Generation，2020，49(7)：48－54.

[4] 刘国辉，崔国民，谢斌，等. 并流蓄热式双膛石灰窑煅烧过程数值模拟研究[J]. 热能动力工程，2019，34(6)：100－108.
LIU Guohui，CUI Guomin，XIE Bin，et al. Numerical simulation study on the calcination process of a dual-chamber lime kiln with parallel heat storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2019，34(6)：100－108.

[5] 刘国辉，崔国民，马尚策，等. 气烧石灰竖窑的数值模拟及优化研究[J]. 能源工程，2017，37(4)：57－63.

中国知网 https://www.cnki.net

LIU Guohui，CUI Guomin，MA Shangce，et al. Study on numerical simulation and optimization of gas burning lime kiln [J]. Energy Engineering，2017，37(4)：57－63.

[6] 崔春，陈永范，王云波. 气烧石灰竖窑内温度场的数值模拟 [J]. 辽宁科技大学学报，2014，37(3)：247－251.
CUI Chun，CHEN Yongfan，WANG Yunbo. Numerical simulation of temperature field in gas burning shaft lime kiln [J]. Journal of University of Science and Technology Liaoning，2014，37(3)：247－251.

[7] KANG Z，SU F Y，FANG L F，et al. DEM-CFD coupled simulation of limestone calcination and fuel combustion in beam type lime shaft kiln [J]. Applied Thermal Engineering，2023，231：120935.

[8] 宗宁，于浩淼，郑敬先，等. 梁式石灰窑内灰石粒度与压力特征关系研究 [J]. 冶金设备，2023(4)：1－3；100.
ZONG Ning，YU Haomiao，ZHENG Jingxian，et al. Study on the relationship between limestone particle size and pressure characteristics in beam type lime kiln [J]. Metallurgical Equipment，2023(4)：1－3；100.

[9] 周浩宇，伍东玲，陈梅洁，等. 基于数值模拟的石灰双膛竖窑 NO_x 控制技术 [J]. 工业炉，2023，45(1)：1－5.
ZHOU Haoyu，WU Dongling，CHEN Meijie，et al. NO_x control technology of lime double chamber shaft kiln based on numerical simulation [J]. Industrial Furnace，2023，45(1)：1－5.

[10] ZHANG Y，WANG S M. Numerical simulation of flue gas recirculation in a lime rotary kiln [J]. Energy，2024，297：131098.

[11] 王跃，周浩宇，刘前，等. 双膛石灰竖窑粉尘排放特性及控制技术研究 [J]. 耐火与石灰，2024，49(2)：22－26.
WANG Yue，ZHOU Haoyu，LIU Qian，et al. Research on dust emission characteristics and control technology of TSR lime kiln [J]. Refractories & Lime，2024，49(2)：22－26.

[12] 张星. 高浓度 CO_2 气氛下石灰石分解动力学及微观形态研究 [D]. 唐山：华北理工大学，2023.
ZHANG Xing. Study of limestone decomposition kinetics and micromorphology under high CO_2 concentration atmosphere [D]. Tangshan：North China University of Science and Technology，2023.

[13] 杨泽萌，庞森. 石灰窑富氧低碳技术分析与设计 [J]. 工业炉，2022，44(6)：26－29.
YANG Zemeng，PANG Sen. Analysis and design of lime kiln oxygen enrichment and low carbon technology [J]. Industrial Furnace，2022，44(6)：26－29.

[14] 谢妍，王赫阳，赵军，等. 炉内烟气成分对富氧燃烧锅炉传热特性的影响 [J]. 燃烧科学与技术，2022，28(3)：283－291.
XIE Yan，WANG Heyang，ZHAO Jun，et al. Influence of flue gas composition on the heat transfer characteristics of oxy-fired boiler [J]. Journal of Combustion Science and Technology，2022，28(3)：283－291.

[15] YIN C G，YAN J Y. Oxy-fuel combustion of pulverized fuels：Combustion fundamentals and modeling [J]. Applied Energy，2016，162：742－762.

[16] EDGE P J，HEGGS P J，POURKASHANIAN M，et al. A reduced order full plant model for oxyfuel combustion [J]. Fuel，2012，101：234－243.

[17] 朱飞，周浩宇，刘前，等. 双膛石灰窑非稳态煅烧烟气内循环数值模拟 [J]. 耐火与石灰，2022，47(6)：29－35.
ZHU Fei，ZHOU Haoyu，LIU Qian，et al. Numerical simulation of inner circulation of flue gas from unsteady state calcination in double-shaft lime kiln [J]. Refractories & Lime，2022，47(6)：29－35.

[18] KRAUSE B，LIEDMANN B，WIESE J，et al. Coupled three dimensional DEM-CFD simulation of a lime shaft kiln：Calcination，particle movement and gas phase flow field [J]. Chemical Engineering Science，2015，134：834－849.

[19] 马尚策，崔国民，刘国辉. 竖式石灰窑煅烧过程动态建模及特性分析 [J]. 热能动力工程，2018，33(7)：70－79.
MA Shangce，CUI Guomin，LIU Guohui. Dynamic modeling and characteristics analysis for vertical lime kiln [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2018，33(7)：70－79.

中国知网　https://www.cnki.net