富氧烧结点火气体混合器结构的数值模拟及参数优化

王水根[1]，周浩宇[2]，刘 前[2]
（1. 湘潭钢铁集团有限公司，湖南 湘潭 411232；2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：富氧烧结点火气体混合器对氧气与空气的混合程度直接影响点火效果，最终影响点火工序的节能降耗。针对烧结富氧点火用空气管道与氧气管道压力和流量差别大，混匀难度高，导致混合气进入燃烧器前空气与氧气混合不均匀、点火效果受影响的问题，本文采用 CFD（计算流体力学）数值模拟的方法，比较不同空气、氧气组织方案的混匀效果，开发针对烧结富氧点火用空气与氧气高效混合器，并对混合器的喷吹流速、钝体间距和钝体形状等关键设计参数进行模拟研究。结果表明：针对富氧点火特殊应用场景，带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器是实现 O_2 与助燃空气快速混匀的最优方案；对于带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器，采用前尖后圆的钝体形状、减小钝体间距以及增大氧气流速可有效提高空气与氧气混合效果。现场应用表明，当钝体形状为前尖后圆、氧气流速为 30 m/s、钝体间距为 10 mm 时，所开发的基于钝体扰流的气体混合器的空气与氧气混匀效率达到 99.5%。本文研究成果可为提高富氧点火效果提供理论和实践指导。

关键词：烧结；富氧点火；气体混合器；钝体；数值模拟
中图分类号：TF046.4；TP391.9 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)05－0117－07
doi：10.13403/j.sjqt.2024.05.083

Numerical simulation and parameter optimization on structure of gas mixers with oxygen-enriched sintering ignition

WANG Shuigen[1], ZHOU Haoyu[2], LIU Qian[2]
(1. Xiangtan Iron&Steel Group Co., Ltd., Xiangtan 411232, Hunan, China; 2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: The gas mixer with oxygen-enriched sintering ignition directly affects the ignition effect to the mixing degree of oxygen and air, and ultimately affects the energy saving and consumption reduction of the ignition process. In order to solve the problems that the pressure and flow of the air pipeline and the oxygen pipeline for sintering oxygen-enriched ignition are very different, and the mixing difficulty is high, resulting in the uneven mixing of air and oxygen before the gas mixture enters the burner, and the ignition effect is affected, the method of CFD (computational fluid dynamics) numerical simulation is used to compare the mixing effect of different air and oxygen organizational programs, a high-efficiency mixer of air and oxygen for sintering oxygen-enriched ignition is developed, and the key design parameters of the mixer, such as the injection flow rate, blunt body spacing and blunt body shape are simulated and researched. The results show that, for the special application scenario of oxygen-enriched ignition, the air and oxygen counterflow mixer with blunt body turbulence is the best solution to achieve rapid mixing of O_2 and combustion air. For air-oxygen counterflow mixers with blunt body turbulence, the blunt body shape with a sharp front and a round back, reducing the blunt body spacing and increasing the oxygen flow rate, can effectively improve the oxygen-enriched mixing effect. The field application shows that, the mixing

收稿日期：2023－07－19；**修回日期**：2023－08－09
基金项目：中冶集团“181 计划”资助项目（ZYKG-CT－2021）
作者简介：王水根（1980—），男，工程师，从事冶金设备、工程建设及节能减排方面的研究工作。
通信作者：周浩宇（1981—），男，正高级工程师，从事烧结球团热能工程方面的研究工作。

efficiency of the air and oxygen of the developed gas mixer based on blunt turbulence reaches 99.5%, when the shape of the blunt body is sharp front and round back, the oxygen flow velocity is 30 m/s, and the blunt body spacing is 10 mm. The results can provide theoretical and practical guidance for improving the effect of oxygen-enriched ignition.

Key words: sintering; oxygen-enriched ignition; gas mixers; blunt body; numerical simulation

钢铁行业是能源消耗和污染物排放大户[1]。据统计，我国钢铁工业中烧结工序能源消耗占流程总能耗的12%左右，而点火能耗约占烧结工序总能耗的10%左右[2-3]。因此，烧结点火工序的节能改造对整个钢铁行业的节能降耗具有积极意义。同时，点火是烧结工序的起点，点火质量直接影响烧结矿的产、质量指标。为将混合料表层固体燃料引燃，并形成一定厚度的初始燃烧带，适宜的料面点火温度一般在1 100 ℃以上。点火温度过低，初始燃烧带过窄，燃烧带核心温度低且高温保持时间短，不利于烧结混合料熔融成矿；而点火温度过高，表层混合料过融造成料层板结，影响烧结料面透气性[4]。目前我国一半以上的钢铁厂采用高炉煤气或混合煤气等热值较低的廉价燃气作为点火燃料，以降低点火工序的能源成本。但高炉煤气等低热值燃料由于燃烧温度低，其用于直接点火难以满足点火温度要求，钢铁厂通常采用对空气或煤气预热等手段来实现较理想的点火效果，这也造成烧结点火过程热能利用效率低，能源消耗高。富氧烧结点火技术可以同时改善低热值燃气点火质量和降低点火能源消耗，正逐渐成为低热值煤气点火工程中的首选技术之一。

富氧点火是在点火炉助燃空气管道内通入一定比例的纯氧，使点火炉内助燃空气含氧量升高，提高低热值燃料燃烧温度、强化料面点火效果的一种辅助点火工艺[5-6]。在该工艺中，氧气与空气需先经过气体混合器混合均匀后，再通入点火炉内。气体混合器直接影响氧气与空气的混合程度，间接影响富氧点火效果。但是，现有普通气体混合器难以满足富氧点火的特殊应用场景[7-8]。这主要是由于富氧点火用混合器中氧气管道与空气管道的压力和流量差别非常大，现有普通混合器无法做到相互匹配，混合效果有限；其次，富氧点火混合器对空气管道压力的损失非常敏感，现有混合器阻力损失大，对空气供应能力要求较高。氧气与空气的混合效果不好会导致点火炉内火焰温度不均匀，降低烧结料面温度的一致性。但是，目前针对富氧点火特殊应用场景的气体混合器的研究未见报道。

本文以富氧点火气体混合器为研究对象，基于数值模拟方法，开发基于钝体扰流的空气与氧气逆流混合装备，对混合器的喷吹流速、钝体间距和钝体形状等关键参数进行研究，以期为提高富氧点火效果提供理论和实践指导。

1 数学模型建立与验证

1.1 模型假设及边界条件

图1为气体混合器的计算区域。混合器主体为一个直径为500 mm、长度为1 500 mm的直管段，空气入口为外径为500 mm、内径为100 mm的圆环面，氧气入口为直径为100 mm的圆面。由于空气与氧气混合过程涉及到流动和传质等物理现象，为简化计算，在建模过程中做如下假设[9]：① 混合过程中将空气和氧气视为不可压缩气体，假定密度为常数；② 设定物理边界和几何结构为轴对称，因此将问题简化为二维轴对称模型；③ 假定空气和氧气的其他物性，如黏度、比热容、热导率等为常数。

基于模型假设条件，将三维问题转换为二维模型，以 x 轴方向作为对称轴，导入Fluent后以Axisymmetric轴对称模型进行计算。网格模型采用ICEM前处理软件进行结构网格划分。基准工况条件下，空气入口速度设定为10 m/s，氧气入口速度设定为25 m/s。

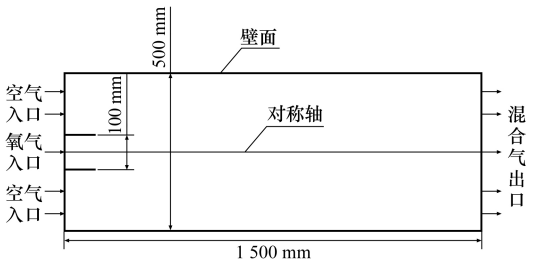


图1 气体混合器计算区域

Fig. 1 Calculation area of gas mixer

1.2　控制方程

流体混合过程由下述控制方程组描述：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i)=0 \tag{1}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；t 为时间，s；x 为空间坐标，m；i 为坐标维数；u 为速度分量，m/s。

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}P_{ij}+g_i-f_i \tag{2}$$

式中：j 为坐标维数；P_{ij} 为流体表面力分量，Pa；g_i 是单位体积流体所受重力在 i 方向上的分量，Pa/m；f_i 是流体所受外部体积力在 i 方向上的分量，Pa/m。

能量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j H)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_{\mathrm{h}}\frac{\partial}{\partial x_j}H\right)+\frac{\partial p}{\partial t} \tag{3}$$

式中：H 为流体总热焓，J/kg；Γ_{h} 为换热交换系数，kg/(m·s)；p 为压力，Pa。

$k-\varepsilon$ 方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G-\rho\varepsilon \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j\varepsilon)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+\frac{\varepsilon}{k}(C_{\varepsilon 1}G-C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon) \tag{5}$$

式中：k 为湍动能，m^2/s^2；μ 为动力黏度，Pa·s；μ_t 为湍流黏性系数，Pa·s；G 为湍动能，Pa/s；ε 为湍动能耗散率，m^2/s^3；$C_{\varepsilon 1}$、$C_{\varepsilon 2}$、σ_k、σ_ε 为 $k-\varepsilon$ 方程的经验常数，取值分别为 1.14、1.92、1.0、1.3。

组分输运方程：

$$\frac{\partial \rho m_s}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j m_s)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left((\Gamma_s\frac{\partial}{\partial x_j}m_s\right)+R_s \tag{6}$$

式中：m_s 为组分 s 的质量分数，为小数；Γ_s 为组分 s 的扩散系数，kg/(m·s)；R_s 为组分 s 的化学反应生成速率，kg/(s·m^3)。

上述控制方程组描述了混合过程中流动与传质的过程。借助相应的前处理、求解器和后处理软件即可对气体混合器的混合过程进行数值模拟。

1.3　模型验证

混合器中气体的混合过程可以近似为平行气流中的自由射流。试验研究表明，对于平行气流中的自由射流，其轴心速度 V_{m} 的衰减规律[10]：

$$\lambda=\frac{V_s}{V_0} \tag{7}$$

$$\frac{x_1}{d_0}=4+12\lambda \tag{8}$$

$$\frac{V_{\mathrm{m}}-V_{\mathrm{s}}}{V_0-V_{\mathrm{s}}}=\frac{x_1}{x} \tag{9}$$

式中：λ 为速度比；V_0、V_{s} 和 V_{m} 分别为中心射流、伴流和轴心流速，m/s；x_1 为核心区长度，m；d_0 为喷口尺寸，m；x 为距离射流入口的距离，m。

模拟结果和根据上述公式计算结果的对比如表 1 所示。由表 1 可以看到，数值模拟结果与理论值的误差较小，不超过 5%。因此，可以认为该模型具有较好的精度。

表 1　理论值与模拟值对比

Table 1　Comparison of theoretical and simulated values

无量纲距离	无量纲速度[$(V_0-V_{\mathrm{s}})/(V_{\mathrm{m}}-V_{\mathrm{s}})$]		误差/%
(x/x_1)	理论值	模拟值	
1.0	1.0	1.03	3.00
1.2	1.2	1.16	3.33
1.4	1.4	1.43	2.14
1.6	1.6	1.59	0.63
1.8	1.8	1.82	1.11

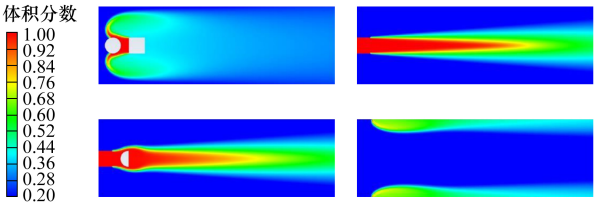
2　结果与讨论

2.1　不同混合方案对气体混合器混合效果的影响

富氧点火工艺中，进入混合气的两股流体的流量和压力等流动参数差异较大。工艺适宜的助燃风氧体积分数(采用小数表示)一般为 0.23 ~ 0.35，在此范围内，需要兑入的氧气量比空气量小 1 个数量级。同时，氧气输送压力为 0.2 MPa 以上，经过一级减压后进入混合器之前的氧气压力一般为 0.1 MPa 左右，由助燃空气送入混合气的压力为 6 kPa 左右，氧气压力较空气压力高出 1 个数量级[11]。针对该特殊混合工况，本文设计了顺喷、带钝体的顺喷、侧喷和带钝体的逆喷 4 种混合方案，并分别考察这 4 种混合方案的混合效果。

多种混合方案下混合器内氧气的体积分数分布如图 2 所示。由图 2 可见：在“顺喷”和“顺喷 +

钝体”的混合方案下，O_2 与主流空气流动方向一致，在空气中的混合效果不佳，导致混合器出口处 O_2 体积分数分布梯度大，呈现“中间高、两端低”的分布趋势；“侧喷”方案效果与以上两者相反。在与速度方向垂直的大流量空气作用下，侧喷氧气在混合器内的分布呈现“中间低、两端高”的分布趋势。在“逆喷 + 钝体”的方案下，O_2 逆向喷出，经由钝体与主流空气的共同作用后，O_2 与空气快速混匀。此外，在混合器出口处 O_2 体积分数的分布较为均一。

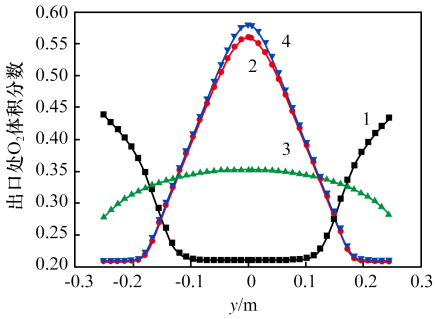


（a）逆喷 + 钝体；（b）顺喷；（c）顺喷 + 钝体；（d）侧喷

图 2 不同混合方案下 O_2 在混合器内的分布

Fig. 2 Distribution nephogram of O_2 in mixer under different mixing schemes

不同混合方案出口处 O_2 体积分数分布曲线如图 3 所示。由图 3 可知，“顺喷”、“顺喷 + 钝体”和“侧喷”方案出口处 O_2 体积分数分布曲线波动幅度较大。“逆喷 + 钝体”方案出口处 O_2 体积分数为 0.25 ~ 0.35，较为均匀。图 4 展示了不同混合方案下出口处 O_2 体积分数的标准差。由图 4 可知，“逆喷 + 钝体”方案下 O_2 体积分数标准差最小，仅为 0.02。因此，混合器采用“逆喷 + 钝体”方案，即带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器是实现 O_2 与助燃空气快速混匀的最优方案。



1—侧喷；2—顺喷；3—钝体 + 逆喷；4—钝体 + 顺喷。

图 3 不同混合方案混合器出口处 O_2 体积分数

Fig. 3 Volume fraction of O_2 at the outlet of mixer with different mixing schemes

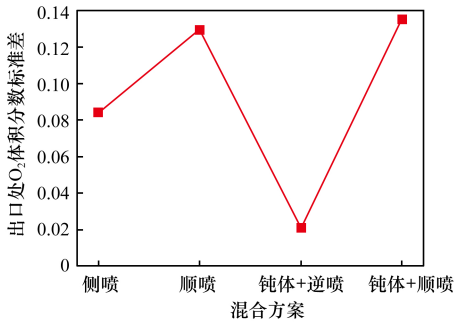


图 4 不同混合方案混合器出口处 O_2 体积分数标准差

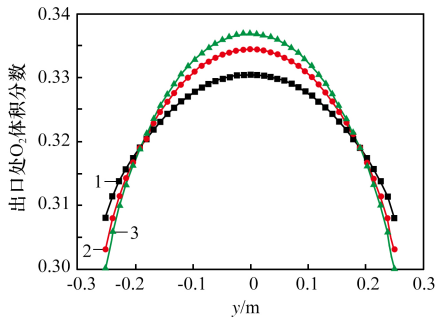
Fig. 4 Standard deviation of O_2 volume fraction at the outlet of mixer with different mixing schemes

2.2 不同工艺参数对逆流混合器混合效果的影响

为进一步增强带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器的混匀效果，采用数值模拟试验的方法，对钝体间距、喷吹流速和钝体形状等三个影响气体混合器混合效果的关键因素进行寻优，以期获得最佳的混合效率。

2.2.1 钝体间距

不同钝体间距（10、30、50 mm）条件下出口处 O_2 体积分数分布曲线如图 5 所示。由图 5 可知，随着钝体间距的降低，出口处 O_2 体积分数分布变得更加均匀。图 6 为 3 种间距下出口处 O_2 体积分数的标准差。由图 6 可知，随着钝体间距由 50 mm 降低 10 mm，出口处 O_2 体积分数标准差从 0.010 5 降低至 0.006 5。因此，减小钝体间距可以有效提高空气与氧气混合效果，本文选择的最优钝体间距为 10 mm。



不同钝体间距/mm：1—10；2—30；3—50。

图 5 不同钝体间距条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数

Fig. 5 O_2 volume fraction at the outlet of countercurrent mixer under different bluff body spacing conditions

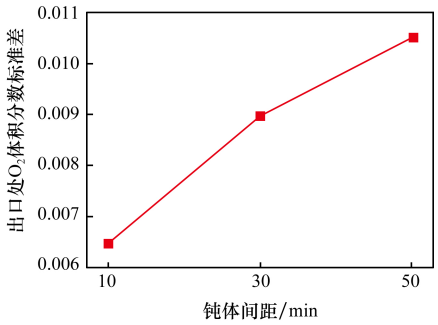
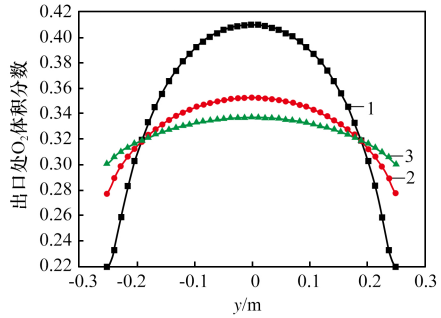


图 6　不同钝体间距条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数标准差

Fig. 6　Standard deviation of O_2 volume fraction at outlet of countercurrent mixer under different bluff body spacing

2.2.2　喷吹流速

不同氧气喷吹流速(10、20、30 m/s)条件下出口处 O_2 体积分数分布曲线如图 7 所示。由图 7 可知，当氧气喷吹流速为 10 m/s 时，出口处 O_2 体积分数分布呈现明显的“中间高、两端低”的变化趋势。随着氧气喷吹流速的增大，出口处 O_2 体积分数分布趋势趋于平缓，空气与氧气的混合效果较大提升。这表明增大氧气喷吹流速可显著提升逆流混合器空气与氧气的混合效果。图 8 为不同氧气喷吹流速下出口处 O_2 体积分数的标准差。由图 8 可知，随着氧气喷吹流速由 10 m/s 提高至 30 m/s，出口处 O_2 体积分数标准差从 0.06 降低至 0.010 5。因此，增大氧气流速可以有效提高空气与氧气的混合效果。综合考虑管道材质要求等因素[12-13]，最优的氧气喷吹流速为 30 m/s。



喷吹流速/(m·s^{-1})：1—10；2—20；3—30。

图 7　不同氧气喷吹流速条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数

Fig. 7　O_2 volume fraction at the outlet of countercurrent mixer under different oxygen injection velocities

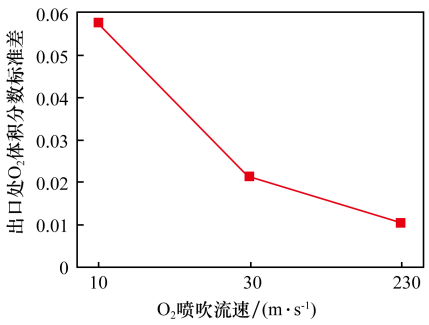


图 8　不同氧气喷吹流速条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数标准差

Fig. 8　Standard deviation of O_2 volume fraction at the outlet of countercurrent mixer under different oxygen injection velocities

2.2.3　钝体形状

为获得最优的钝体形状，分别模拟双三角形、圆形、前圆后尖和前尖后圆 4 种钝体(图 9)条件下混合器的空气与氧气的混合效果。

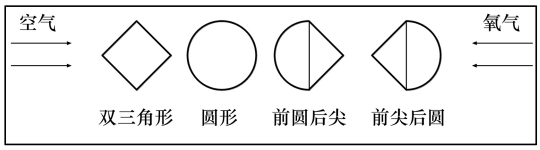


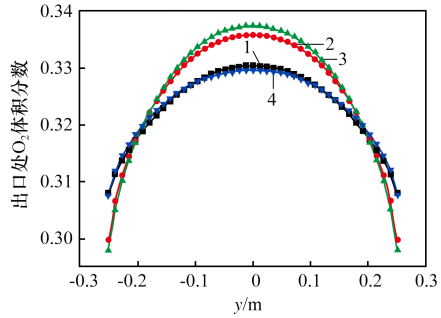
图 9　四种钝体形状

Fig. 9　Four bluff body shapes

图 10 为不同钝体形状条件下出口处 O_2 体积分数分布曲线。由图 10 可知，圆形与前尖后圆两种形状以及双三角形和前圆后尖两种形状在出口处的氧气体积分数分布曲线变化趋势相近。但较前两种情况下，双三角形和前圆后尖两种形状的 O_2 体积分数曲线更陡峭，表明氧气侧采用圆形钝体的混合效果更好。图 11 为不同钝体形状条件下出口处 O_2 体积分数的标准差。由图 11 可知，双三角形钝体的标准差最大，为 0.011，前尖后圆钝体的标准差最小，为 0.005 5。因此，带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器中空气侧采用三角形钝体、氧气侧采用圆形钝体(即前尖后圆钝体形状)的空气与氧气的混合效果最好。

3　应用效果

针对富氧点火工况下空气与氧气混合效果要求高的问题，通过理论设计和数值模拟计算，开发如图12所示的基于钝体扰流的空气与氧气逆流



不同形状：1—圆形；2—尖形；3—前圆后尖；4—前尖后圆。

图 10 不同钝体形状条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数

Fig. 10 O_2 volume fraction at the outlet of countercurrent mixer under different bluff body shapes

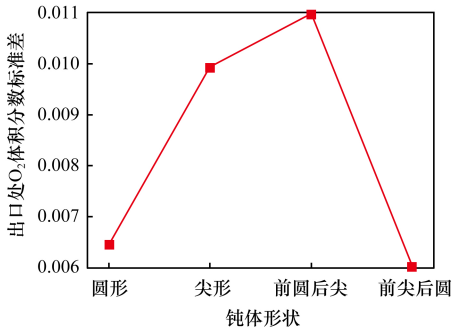


图 11 不同钝体形状条件下逆流混合器出口处 O_2 体积分数标准差

Fig. 11 Standard deviation of O_2 volume fraction at outlet of countercurrent mixer under different bluff body shapes

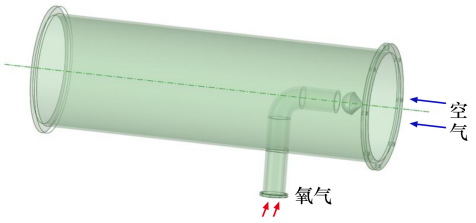


图 12 基于钝体扰流的空氧逆流混合器

Fig. 12 Air-oxygen countercurrent mixer based on bluff body turbulence

混合装备，实现大流量差和大压力差下的空气与氧气高效混合。在某钢铁厂中应用，混合气出口处氧气体积分数标准差由原来的 0.02 降低至优化后的 0.005 5，如表 2 所示，空气与氧气的混匀效率达到 99.5%，实现了混合气出口处氧气体积分数不均匀度低于 1% 的混匀效果。

表 2 参数寻优表

Table 2 Parameter optimization table

项目	氧气流速/(m·s^{-1})	间距/mm	钝体形状	出口方差
原参数	20	50	圆形	0.020 0
寻优结果	30	10	前尖后圆	0.005 5

4 结 论

（1）针对富氧点火过程中大流量差和大压力差下的空气与氧气高效混合的特殊应用场景，带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器是实现 O_2 与助燃空气快速混匀的更优方案。

（2）针对带钝体扰流的空气与氧气逆流混合器，采用前尖后圆钝体形状、减小钝体间距以及增大氧气流速可有效提高空气与氧气的混合效果。

（3）所开发的基于钝体扰流的空气与氧气逆流混合装备，当钝体形状为前尖后圆、氧气流速为 30 m/s、钝体间距为 10 mm 时效果最优，此工况下可实现混合气出口处空气与氧气混匀效率达到 99.5%、氧气体积分数不均匀度低于 1% 的较佳混匀效果。

参考文献：

[1] 仝永娟，蔡九菊，张琦，等. 钢铁生产的水能关系分析[J]. 中国冶金，2019，29(11)：87－92.
TONG Yongjuan，CAI Jiuju，ZHANG Qi，et al. Analysis of water-energy nexus in iron and steel production[J]. China Metallurgy，2019，29(11)：87－92.

[2] 于勇，朱廷钰，刘霄龙. 中国钢铁行业重点工序烟气超低排放技术进展[J]. 钢铁，2019，54(9)：1－11.
YU Yong，ZHU Tingyu，LIU Xiaolong. Progress of ultra-low emission technology for key processes of iron and steel industry in China[J]. Iron & Steel，2019，54(9)：1－11.

[3] 孙敏敏，宁晓钧，张建良，等. 炼铁系统节能减排技术的现状和发展[J]. 中国冶金，2018，28(3)：1－8.
SUN Minmin，NING Xiaojun，ZHANG Jianliang，et al. Research status and progress of energy saving and emission reduction technology for ironmaking[J]. China Metallurgy，2018，28(3)：1－8.

[4] 程峥明，潘文，宁文欣，等. 烧结点火制度研究与应用[J]. 烧结球团，2018，43(6)：54－58.

CHENG Zhengming, PAN Wen, NING Wenxin, et al. Research and application of sintering ignition system [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(6): 54 – 58.

[5] 刘前，周浩宇，裴元东，等. 富氧条件对低热值燃气烧结点火的影响[J]. 中国冶金，2021，31(7)：57 – 62.
LIU Qian, ZHOU Haoyu, PEI Yuandong, et al. Effect of oxygen enriched conditions on sintering ignition of low calorific value gas[J]. China Metallurgy, 2021, 31(7): 57 – 62.

[6] 胡兵，黄柱成，姜涛，等. 铁矿石富氧烧结点火试验研究[J]. 钢铁研究学报，2010，22(12)：17 – 21.
HU Bing, HUANG Zhucheng, JIANG Tao, et al. Experimental study on enrichment oxygen ignition of iron ore sintering[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2010, 22(12): 17 – 21.

[7] 郭风. 煤粉富氧燃烧和新型富氧燃烧器直接点火技术及数值研究[D]. 杭州：浙江大学，2007.
GUO Feng. Experiments and numerical simulation on oxygen-enriched combustion and direct ignition of pulverized coal[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.

[8] 陆绍远. 高炉煤气锅炉富氧燃烧技术应用研究[D]. 长沙：中南大学，2013.
LU Shaoyuan. Application research of oxygen-enriched combustion in blast furnace gas boiler[D]. Changsha: Central South University, 2013.

[9] 成珊. 多段式自预热燃烧器设计、模拟及实验研究[D]. 长沙：长沙理工大学，2012.
CHENG Shan. Design, Simulation and experiment investigation on a multi-stage self-preheating burner[D]. Changsha: Changsha University of Science&Technology, 2012.

[10] 同济大学. 燃气燃烧与应用(第三版)[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2000.
Tongji University. Gas combustion and application (Third Edition)[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000.

[11] 张俊杰，裴元东，龙红明，等. 中天钢铁烧结富氧点火研究与应用[J]. 中国冶金，2021，31(8)：54 – 59.
ZHANG Junjie, PEI Yuandong, LONG Hongming, et al. Research and application of oxygen-enriched ignition in Zenith Iron and Steel Co., Ltd[J]. China Metallurgy, 2021, 31(8): 54 – 59.

[12] 时维康. 基于数值模拟的喷枪结构优化研究[D]. 济南：山东建筑大学，2016.
SHI Weikang. Optimization study on the spray gun structure based on numerical simulation[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016.

[13] 李怀林，史郑斌. 烧结富氧点火生产实践[J]. 烧结球团，1999，24(4)：46 – 47.
LI Huailin, SHI Zhenbin. Production practice of sintering oxygen-enriched ignition[J]. Sintering and Pelletizing, 1999, 24(4): 46 – 47.

本刊编辑部版权许可声明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、万方数据电子出版社、重庆维普资讯有限公司、超星学术期刊“域出版”等第三方平台在其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊编辑出版的文章。本刊不收取版面费、专家审稿费(相关著作权许可使用费与审稿费相抵，不再另行支付)，对优质稿件支付稿酬。作者向本刊提交文章发表的行为视为同意上述许可声明，如有异议请来稿说明，本刊将作适当处理。