喷吹神东高钙烟煤对高炉回旋区热状态的影响

王振飞[1]，张翠柳[2]，鲍 俭[2]，徐润生[2]，张建良[2]
（1. 国能集团神东集团有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 719315；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：高炉风口和回旋区的热状态对炉内煤气流的一次分布具有重要影响，进而影响高炉的经济技术指标。为探究喷吹神东高钙烟煤对高炉回旋区热状态的影响，本文通过收集某钢铁企业试烧期间高炉鼓风参数及其他各项操作参数，采用 Fluent 仿真模拟方法，建立风口回旋区的三维燃烧模型，系统分析不同喷吹条件下温度分布、气体分布、速度分布的变化规律，从而确定在风口复杂条件下喷吹神东高钙烟煤对高炉回旋区热状态的影响。模拟计算结果表明：神东高钙烟煤和 ES 无烟煤燃烧后产生的还原气体量最多，生产时有利于矿石的还原；向高炉喷吹神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合煤粉时，燃尽率分别为 72.25%、70.11%、68.87%、67.56%，神东高钙烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹时煤粉的燃尽率最高，这是由于神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的 CaO 质量分数较高，其在风口、回旋区内的燃烧特性最佳；混合喷吹神东高钙烟煤与 ES 无烟煤时，风口、回旋区内的煤气成分和煤粉燃尽率等方面要强于其他三种情况，适宜向高炉喷吹。

关键词：高炉喷吹；回旋区；高钙烟煤；热状态；数值模拟
中图分类号：TF572；TK01⁺9 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)02－0107－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.02.031

Effect of injection of Shendong high-calcium bituminous coal on thermal state of blast furnace raceway

WANG Zhenfei[1], ZHANG Cuiliu[2], BAO Jian[2], XU Runsheng[2], ZHANG Jianliang[2]
(1. CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 719315, Inner Mongolia, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The thermal state of blast furnace tuyere and raceway has an important influence on the primary distribution of gas flow in the furnace, which further affects the economic and technical indexes of the blast furnace. In order to explore the influence of injection of Shendong high-calcium bituminous coal on the thermal state of blast furnace raceway, the blast furnace blast parameters and other operating parameters are collected during the test firing period of a steel enterprise, the Fluent simulation method is used to establish a three-dimensional combustion model of the tuyere raceway, and the variation law of temperature distribution, gas distribution and velocity distribution under different injection conditions is systematically analyzed, so as to determine the influence of injection of Shendong high-calcium bituminous coal on the thermal state of the blast furnace raceway under the complex conditions of the tuyere. The simulation results show that the amount of reducing gas produced by Shendong high-calcium bituminous coal and ES anthracite burning is the largest, which is conducive to the reduction of ore during production, and the burnout rates are 72.25%, 70.11%, 68.87% and 67.56%

收稿日期：2022－10－25；**修回日期**：2022－11－11
基金项目：安徽省重点研究与开发计划(202210700037)；新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A01003)；山西省科技重大专项计划“揭榜挂帅”项目(202201050201011)。
作者简介：王振飞(1987—)，男，高级工程师，从事矿物加工方面的研究。
通信作者：徐润生(1988—)，男，副教授，从事低碳绿色炼铁新技术方面的研究。

respectively when Shendong high-calcium bituminous coal, HX bituminous coal, WN bituminous coal, SG bituminous coal and ES anthracite mixed pulverized coal are injected into the blast furnace, the burnout rate of pulverized coal is the highest when Shendong high-calcium bituminous coal and ES anthracite are mixed and injected, which is due to the higher CaO mass fraction of Shendong high-calcium bituminous coal and ES anthracite, and the best combustion characteristics in the tuyere and raceway; when Shendong high-calcium bituminous coal and ES anthracite are mixed and injected, the gas composition and pulverized coal burnout rate in the tuyere, raceway are stronger than those in the other three situations, which is suitable for blast furnace injection.

Key words: blast furnace injection; raceway; high-calcium bituminous coal; thermal state; numerical simulation

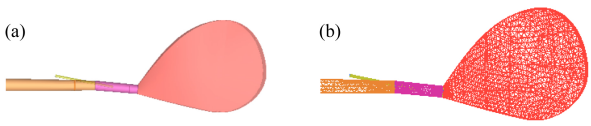
钢铁作为我国国民经济建设的重要基础材料，2023 年粗钢产量约为 10.19 亿吨，销售收入超过 4 万亿元，有力保障了我国经济社会的稳定发展。向高炉喷吹煤粉是炼铁工艺中发展迅速且日趋成熟的一项重要技术，其目的是在高炉炼铁过程中用喷吹煤粉代替日益稀缺和昂贵的冶金焦炭[1]，来减少炼焦过程对环境的影响，优化炼铁系统的能源结构，改善高炉运行状况，为强化冶炼创造条件[2-3]。神东烟煤是一种优质动力煤，具有“三高一低”的特点，即高热值、高挥发分、高反应性、低硫分。除上述优点外，神东烟煤还有一个显著特点是 CaO 含量高，部分神东烟煤灰分中 CaO 质量分数在 30% 以上，因此又称为神东高钙烟煤。如将其应用于高炉喷吹，理论上能够提高煤粉在风口前的燃烧率和有效发热值，对降低高炉冶炼渣量、提高煤焦置换比和降低炼铁生产成本具有积极的意义[4]。在实际生产过程中，采用煤粉代替部分焦炭，会在高炉的回旋区内产生较多的未燃煤粉，其在高炉内大量积累会使料柱的透气性变差，影响高炉的稳定顺行以及煤气流的分布等[5]。因此，需要了解高炉下部煤粉复杂的燃烧情况以及炉内的变化现象。但是，高炉是一个密闭的反应器，操作人员无法直接观察到其内部的反应过程。实际中，可以采用数值模拟的方法，通过改变高炉的运行参数，调节并优化高炉操作条件，在保证煤粉燃尽率的基础上进一步增加煤粉喷吹量。

为此，本文通过收集某钢铁企业工业试烧期间高炉鼓风参数及其他各项操作参数，采用 Fluent 仿真模拟方法，建立风口回旋区三维燃烧模型，系统分析不同喷吹条件下温度、气体、速度分布的变化规律，确定复杂条件下神东高钙烟煤对风口热状态的影响规律。

1 几何模型及模拟条件

1.1 几何模型

为了便于研究，简化模型处理，将高炉风口三维模型分为喷枪、直吹管、风口、回旋区，其示意如图 1(a)所示。该物理模型参数：风口直径为 130 mm，长度为 580 mm；喷煤枪直径为27 mm，与直吹管所成夹角为 8.8°，出口中心位于风口中心线上；设置煤粉输送气体为空气，热风由直吹管进入。对物理模型进行网格划分，得到划分后的模型网格如图 1(b)所示。研究表明，大部分煤粉进入回旋区后沿水平气流方向流动，回旋区末端的燃尽率代表了整个回旋区煤粉的燃尽率。因此，本文主要围绕煤粉在其流股方向上的流动和燃烧来展开研究。



(a) 物理模型；(a) 模型网格

图 1 高炉风口回旋区物理模型和网格划分示意

Fig. 1 Physical model and grid division schematic of blast furnace tuyere and raceway

通过前人研究发现，高炉风口回旋区模型的边界主要分为三类：空气和煤粉入口边界、计算区域出口边界、壁面边界。根据实际高炉运行情况，对模型参数进行如下设置：将直吹管的空气和煤粉入口设置为速度入口边界条件，设置速度方向垂直于入口截面，并输入气体的速度大小、入口压力、水力直径、气体组分等条件[6]；设置出口区域的计算边界条件为压力出口边界条件；将直吹管、风口等的壁面设定为非滑移边界条件；考虑到实际煤粉喷入直吹管，经风口再进入回旋区，其燃烧与气化过程比较复杂，因此初步拟定

直吹管、风口、回旋区以及回旋区边界为计算区域，忽略影响煤粉燃烧特性的次要因素。

1.2　模拟条件

通过与某钢铁企业合作，建立 3 200 m^3 高炉的几何模型，设置模拟条件并确定基于此高炉的实际喷吹参数，具体如表 1 所示。模拟中所用的煤粉取自该钢铁企业高炉正在喷入以及有意向喷吹的煤粉。该煤粉的工业、元素分析结果如表 2 所示。

1.3　模拟方案

各煤粉具有不同的燃烧特性，是影响风口、回旋区内煤粉燃尽率的重要因素[7]。为考察煤粉种类对回旋区内煤粉燃尽率的影响，结合表 1 的实际工况参数，选定风温为 1 150 ℃，煤比为 175 kg/t，热风中氧气体积分数为 26%，煤枪出口在风口中心线上作为标准工况。结合该钢铁企业的用煤情况，选用神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤按照不同比例混合，使混合煤粉的挥发分保持在 18.6% 左右。这是因为该钢铁企业 8# 高炉实际喷吹的混煤挥发分在 18.6% 左右，选择这种混合煤粉配比更加贴合实际高炉的混煤情况，具有很好的理论分析和试验指导价值。然后，模拟研究高炉喷煤过程的气 - 固两相的流动、气相温度、气体含量和煤粉燃烧过程特征。混煤方案如表 3 所示。

2　模拟结果与讨论

2.1　不同喷吹条件下速度场的变化规律

模型中心截面上的气相速度分布如图 2 所示。由图 2 可以看出：当富氧高温空气从直吹管水平进入高炉时，由于喷煤枪的影响，鼓入的风受到挤压，气体速度在该区域略有增加，之后由于风口直径减小，速度继续升高并达到最大值；当煤气进入回旋区后，受空间突然增大的影响，煤气速度逐渐降低，并沿风口方向继续向回旋区内部运动；随后，受到外部料层的阻力作用以及高温气体的浮力影响，部分气体的运动方向发生改变，煤气流在回旋区上部进行循环运动，同时速度降低。气体的流动主要可分为两部分：高

表 1　3 200 m^3 高炉主要操作参数

Table 1　Main operating parameters of 3 200 m^3 blast furnace

风口数量/个	有效容积/m^3	有效利用系数/($t\cdot m^{-3}\cdot d^{-1}$)	风量/($m^3\cdot min^{-1}$)	风压/kPa	氧气体积分数/%	煤比/($kg\cdot t^{-1}$)	煤粉温度/℃	热风温度/℃	载流气体流量/($m^3\cdot h^{-1}$)	载气成分
32	3 200	2.656	5 750	400	26	175	60	1 150	800	空气

表 2　煤粉主要参数(质量分数)

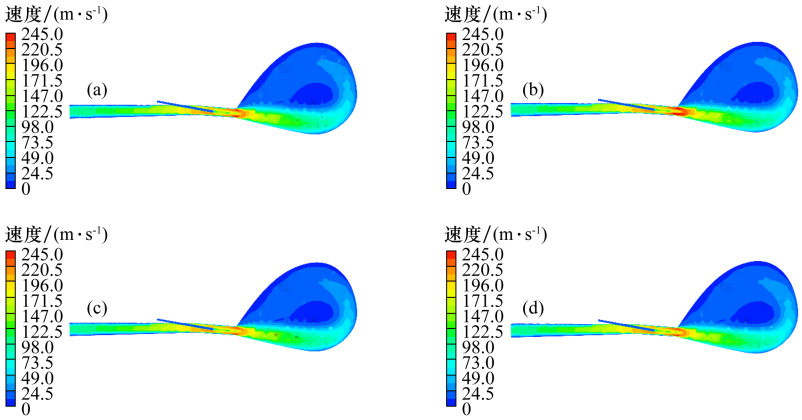
Table 2　Main parameters of pulverized coal　　%

燃料名称	工业分析			元素分析				
	固定碳	挥发分	灰分	C	H	O	N	S
神东高钙烟煤	59.63	34.68	5.69	66.19	5.85	21.08	0.81	0.38
HX 烟煤	56.42	33.50	10.08	67.10	8.73	12.97	0.65	0.47
WN 烟煤	58.49	31.57	9.94	71.43	4.16	13.05	0.87	0.55
SG 烟煤	61.39	32.39	6.22	73.03	4.05	15.51	0.87	0.32
ES 无烟煤	75.29	14.65	10.06	80.39	4.16	3.03	2.02	0.34

表 3　高炉喷煤过程模拟试验的混煤方案(质量分数)

Table 3　Coal blending scheme for simulation experiment of blast furnace coal injection process　　%

试验方案	挥发分	烟煤				ES 无烟煤
		神东高钙烟煤	HX 烟煤	WN 烟煤	SG 烟煤	
1#	18.6	20	—	—	—	80
2#	18.6	—	21	—	—	79
3#	18.6	—	—	24	—	76
4#	18.6	—	—	—	23	77



试验方案：(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(d) 4#

图 2 不同混煤方案下模型中心截面的气相速度分布

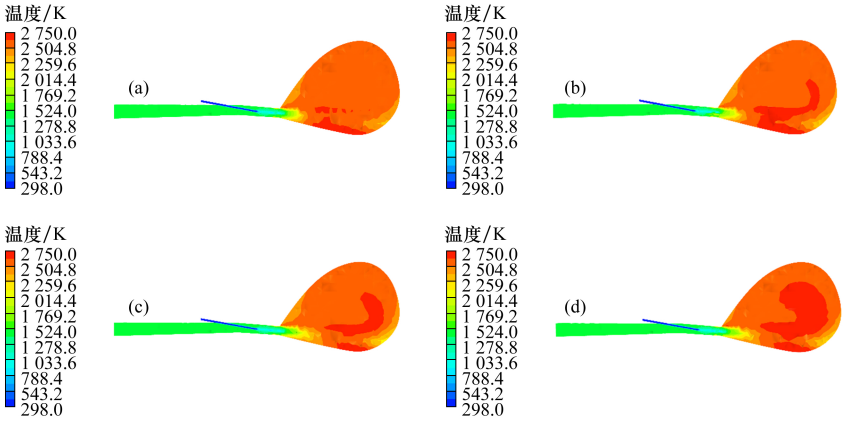
Fig. 2 Gas velocity distribution at the center section of the model under different coal blending schemes

速射流和大规模再循环。煤粉颗粒的速度变化趋势与气体的速度变化趋势相一致。经计算，神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合后通过风口的气体速度约为 230 m/s，在此之后速度降低，4 种情况中风口、回旋区内的速度相差不大。

2.2 不同喷吹条件下温度场的变化规律

在向高炉喷吹煤粉过程中，喷出的煤粉不断与周围的高温气体进行热交换，经过一定的物理化学反应后释放热量，从而提高了回旋区的温度[8-9]。收敛状态下回旋区中心截面上的气体温度分布如图 3 所示，沿风口中心线方向的气体温度变化曲线如图 4 所示。煤粉在高炉内的反应大致可以分为 4 个部分：煤粉的预热、挥发分析出、挥发分和部分残碳燃烧以及残碳的氧化和气化。

煤粉被喷枪喷出来进入高炉下部后，与高温热风混合，由于煤粉和载气的温度远低于风温，所以煤粉被周围热风预热，此外煤粉挥发分的析出需要吸收部分热量，因此离开煤枪出口后风口内一定区域的温度较低。由图 3 也可以看出，在喷出的射流周围，煤粉更易被鼓风加热分解，此外煤粉与鼓风中的氧气接触更加充分，与氧气的接触面积也更大，因此煤粉在此区域很容易剧烈燃烧，并在煤粉流股的周围形成高温区，所以混合喷吹 4 种烟煤和无烟煤都可以在煤粉流股和风口的前端看到火焰状高温区。由于热量不断传递给煤粉射流中心，中心处煤粉随后也燃烧，最高温度可达2 500 K以上。但在高炉内部不同位置，



试验方案：(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(d) 4#

图 3 不同混煤方案下收敛状态回旋区中心截面上的气体温度分布

Fig. 3 Gas temperature distribution on the central section of the convergent state tuyere raceway under different coal blending schemes

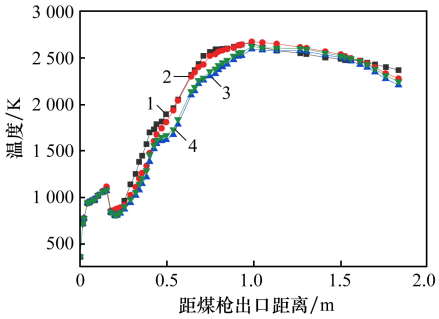
温度相差比较大。高温区主要集中于沿回旋区中下游及上方回旋区域，而在回旋区上游以及风口的前端温度则相对比较低[10]。

在风口的前端及回旋区上游区域煤粉预热、析出挥发分会吸收热量，气体的温度降低；在进入回旋区后，速度下降，挥发分和残碳燃烧，因而出现了高温区域，此区域即为燃烧带。由图 3 还可以发现，回旋区温度在空间分布并不均匀，与回旋区气体的速度场相符。另一方面，因 CaO 质量分数较高，神东高钙烟煤的燃烧加剧，燃烧速度加快，因此，从图 4 可以看出，在 4 种情况中，随着距枪尖距离的增加，4 种混煤开始逐渐燃烧，在同一位置，向高炉混合喷吹神东高钙烟煤和 ES 无烟煤后燃烧产生的温度最高。相较而言，由于 WN 烟煤和 ES 无烟煤混合燃烧后在同一位置处的温度最低，向高炉喷吹 HX 烟煤和 ES 无烟煤混煤的燃烧速度比神东高钙烟煤和 ES 无烟煤混煤慢，但是比 SG 烟煤和 ES 无烟煤混煤的燃烧速度快。

此外，在这 4 种情况中，在回旋区下游可以观察到煤粉流股中心的温度在缓慢下降，神东高钙烟煤和 ES 无烟煤燃烧产生的温度在距枪尖出口 0.99 m 左右的位置开始缓慢下降。这是由于在煤粉射流的末端消耗了大量的 O_2，C 与 CO_2 反应生成 CO，这个反应是吸热反应，使得回旋区的温度降低。在煤粉流股以及整个回旋区，这 4 种情况的温度场极为相似。

2.3　不同喷吹条件下气体的分布变化

整个计算区域 CO_2、O_2、CO、H_2O 和 H_2 等气体成分分布如图 5 ~ 9 所示。由图 5 ~ 9 可见，CO_2、O_2、CO、H_2O 和 H_2 等气体成分分布的轮廓相同，但是在数量上有细微差别。

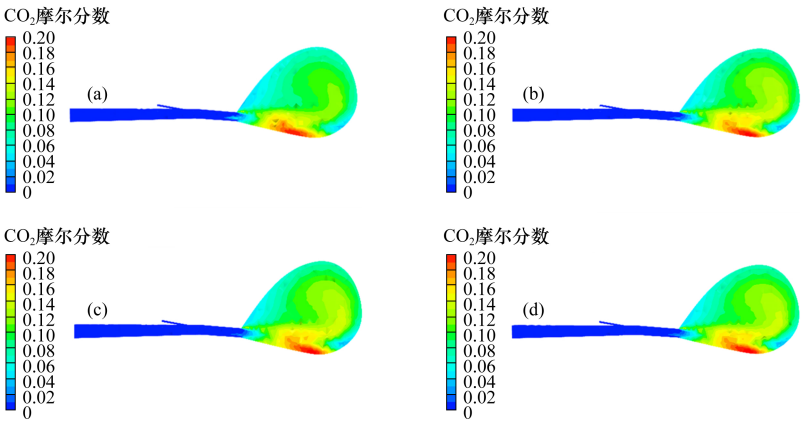


试验方案：1—1#；2—2#；3—3#；4—4#。

图 4　沿煤粉流股中心线回旋区的温度变化

Fig. 4　Temperature change in the raceway along the centerline of the pulverized coal plume

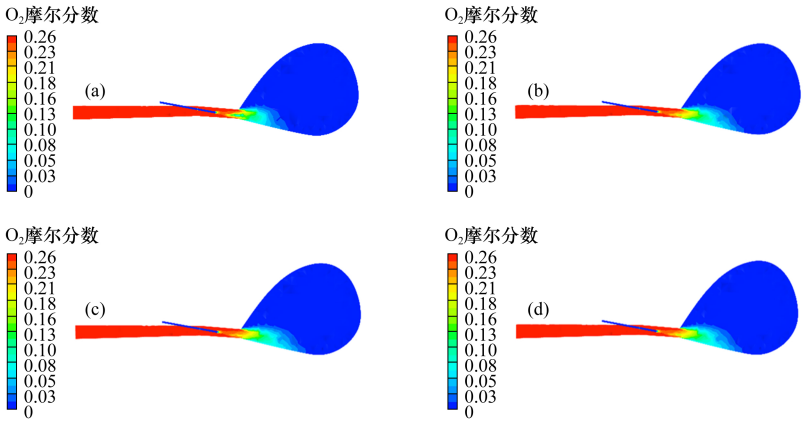
沿煤粉流股中心线气相组分的摩尔分数(摩尔分数即混合物中某物质的量与混合物的总物质的量之比，无量纲)变化曲线如图 10 所示。由图 10 可以看出，氧气从直吹管进入风口后摩尔分数降低，且距离煤枪出口越远，氧气的摩尔分数降低得越明显，距煤枪出口距离越大，有更多的煤粉被加热燃烧，氧气消耗速率也随之增加。神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的混合煤粉消耗氧气的速率较快，这是因为这种情况比其他 3 种混合煤粉含有更多的 CaO，张文辉等[4]研究发现，随着质量分数的增加，CaO 对煤粉燃烧过程的催化效果越显著，所以 CaO 的存在使得反应加快。由图 10 还可以看出，CO_2 的摩尔分数先缓慢增加后快速增加，并且 CO_2 随着氧气的消耗而逐渐增多。由于前期



试验方案：(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(d) 4#

图 5　整个计算区域的 CO_2 分布

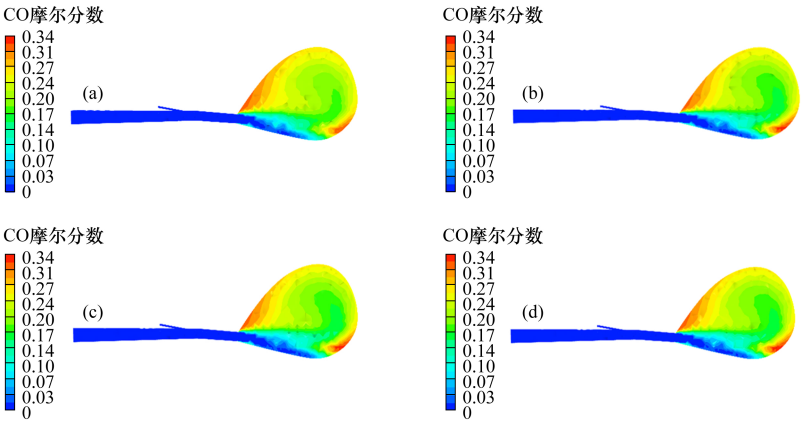
Fig. 5　CO_2 distribution in the entire computing area



试验方案：（a）1#；（b）2#；（c）3#；（d）4#

图 6 整个计算区域的 O_2 分布

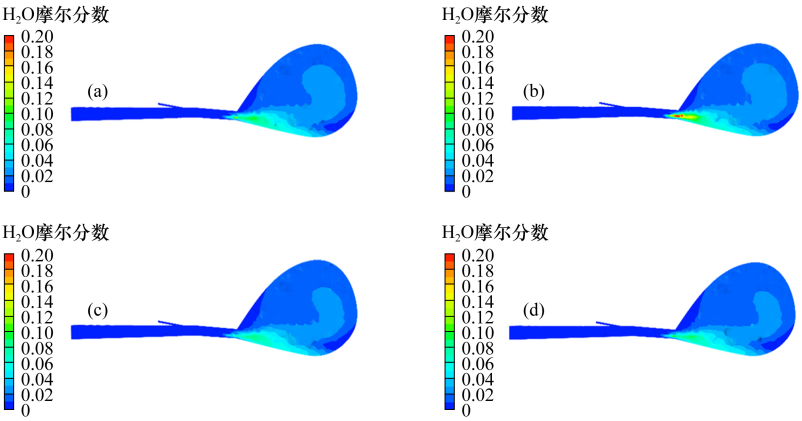
Fig. 6 O_2 distribution in the entire computing area



试验方案：（a）1#；（b）2#；（c）3#；（d）4#

图 7 整个计算区域的 CO 分布

Fig. 7 CO distribution in the entire computing area

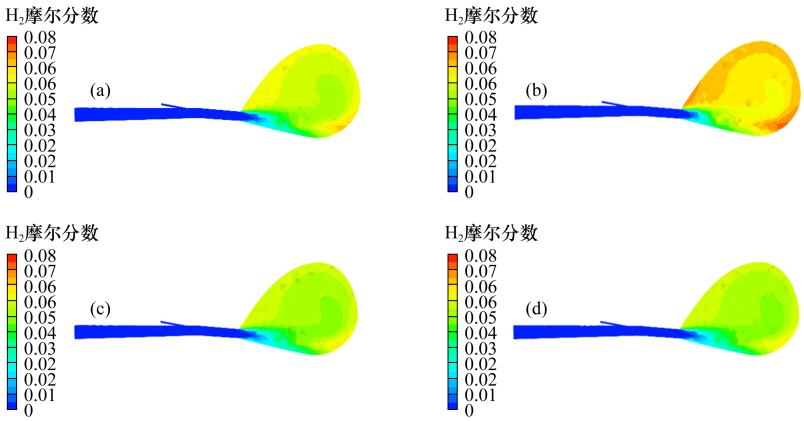


试验方案：（a）1#；（b）2#；（c）3#；（d）4#

图 8 整个计算区域的 H_2O 分布

Fig. 8 H_2O distribution in the entire computing area

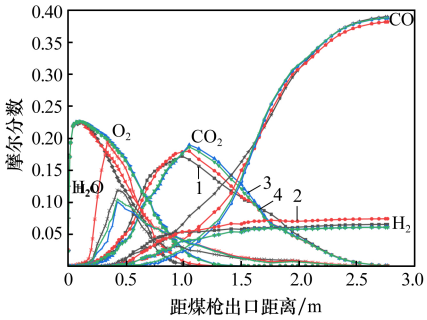
O_2 的含量充足，大多数 CO_2 主要集中分布在煤粉流股以及回旋区的中上游。神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的混合煤粉与 O_2 反应生成 CO_2 的速率要比另 3 种情况要快，而 HX 烟煤的含氢量最高，其在挥发分中的含氢量随之增加，故在前期挥发分燃烧时在4种情况中H_2O的生成速度最快、生成量最



试验方案：（a）1#；（b）2#；（c）3#；（d）4#

图 9　整个计算区域 H_2 分布

Fig. 9　H_2 distribution in the entire computing area



1—神东高钙烟煤 + ES 无烟煤；2—HX 烟煤 + ES 无烟煤；3—WN 烟煤 + ES 无烟煤；4—SG 烟煤 + ES 无烟煤。

图 10　沿风口中心线气相各组分含量变化

Fig. 10　Variation of components in the gas phase along the centerline of the tuyere

大。喷吹 4 种不同的烟煤时，H_2O 的生成速度和生成量呈正相关关系，4 种情况的排序：HX 烟煤和 ES 无烟煤混煤 > 神东高钙烟煤和 ES 无烟煤混煤 > WN 烟煤和 ES 无烟煤混煤 > SG 烟煤和 ES 无烟煤混煤。随后 4 种情况的 CO_2 和 H_2O 摩尔分数开始下降。在回旋区的上游，CO_2、H_2O 与 C 反应会生成 CO、H_2，但是生成量低。随着氧气摩尔分数的降低，CO 和 H_2 摩尔分数逐渐升高。在生成 CO 和 H_2 的速度方面，CaO 的存在催化了煤粉的燃烧，神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的混合煤粉的反应速度最大。

回旋区内还原气体组成（采用体积分数表述）如表 4 所示。由表 4 可以看出：在这 4 种情况中神东高钙烟煤与 ES 无烟煤混合后混煤燃烧性能更好，因为在回旋区内煤粉的脱挥发分和挥发分的燃烧，碳的氧化、气化反应全部都发生；这 4 种情况中模拟喷吹神东高钙烟煤和 ES 无烟煤生成 CO 和 H_2 的体积分数比较高，神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹后在回旋区内 CO 的体积分数分别为 23.21%、21.94%、20.76% 和 20.95%，而在回旋区出口处 H_2 的体积分数分别为 6.52%、7.21%、6.09% 和 6.05%。在这 4 种情况中，模拟结果非常相似，但是神东高钙烟煤和 ES 无烟煤燃烧后产生的还原气体量最多，生产时有利于矿石的还原。

表 4　回旋区内还原气体组成（体积分数）

Table 4　Amount of reducing gas in the raceway　%

混煤方案	CO	H_2	CO + H_2
神东高钙烟煤 + ES 无烟煤	23.21	5.51	28.72
HX 烟煤 + ES 无烟煤	21.94	6.02	27.96
WN 烟煤 + ES 无烟煤	20.76	4.91	25.67
SG 烟煤 + ES 无烟煤	20.95	4.89	25.84

2.4　不同煤种的燃尽率变化情况

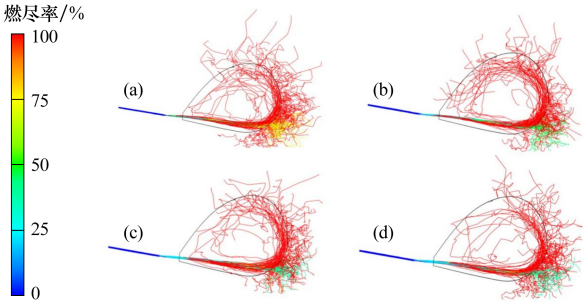
煤粉燃尽率可以表征煤粉的燃烧性能，它表征的是混合煤粉由于脱除挥发分和固定碳燃烧造成的损失。煤粉燃尽率的公式如式（1）所示。

$$\alpha = \frac{1-(m_0/m_a)}{1-m_0} \times 100 \qquad (1)$$

式中：α 为煤粉燃尽率，%；m_0 为初始时刻煤粉中的灰分，%；m_a 是某时刻煤粉中的灰分，%。

不同煤种的燃尽率变化情况如图 11 所示。由图 11 可见：由于煤枪结构和出口位置原因，煤粉颗粒主要集中在回旋区的下部；煤粉流周围的燃尽率较高，这是由于该区域煤粉颗粒充分扩散，

这部分煤粉颗粒可以接触更多的氧气，保证煤粉颗粒能够快速、充分地燃烧；而中心煤粉的燃尽率较低。分析原因认为，煤粉流中心位置集中了大量的煤粉颗粒，氧气被煤粉颗粒包围不能满足完全燃烧条件；此外，低燃尽率区域周围的氧气摩尔分数较高，并且在回旋区上游的主煤粉流周围几乎不消耗氧气，但由于停留时间短，且由于煤粉颗粒的阻挡作用，使得周围的氧气很难扩散到煤粉流的中心，低燃尽率区域的煤粉颗粒无法扩散到氧气摩尔分数高的区域，导致沿煤粉流中心线的煤粉燃尽率较低。



试验方案：(a) 1#；(b) 2#；(c) 3#；(d) 4#

图 11 回旋区出口处煤粉燃尽率

Fig. 11 Burnout rate of pulverized coal at the exit of the roundabout

神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹时回旋区出口处煤粉燃尽率如图 12 所示。由图 12 可知，神东高钙烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹时煤粉的燃尽率最高；高炉喷吹神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合煤粉时，燃尽率分别为 72.25%、70.11%、68.87%、67.56%，神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的 CaO 质量分数较高，其在风口、回旋区内的燃烧特性最佳。

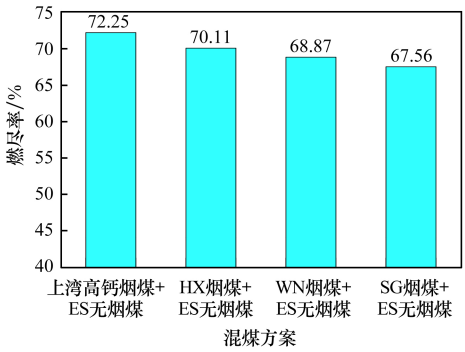


图 12 不同煤种的燃尽率变化

Fig. 12 Variation of burnout rate for different coal types

3 结 论

(1) 经计算，神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合后通过风口的气体速度约为 230 m/s，此后速度降低；4 种情况中风口、回旋区内的速度相差不大。神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹后在回旋区内 CO 体积分数分别为 23.21%、21.94%、20.76% 和 20.95%。而在回旋区出口处 H_2 体积分数分别为 6.52%、7.21%、6.09%、6.05%。在这 4 种情况中，模拟结果非常相似，但是神东高钙烟煤和 ES 无烟煤燃烧后产生的还原气体量最多，生产时有利于矿石的还原。

(2) 通过模拟计算发现，神东高钙烟煤与 ES 无烟煤混合喷吹时煤粉的燃尽率最高。向高炉喷吹神东高钙烟煤、HX 烟煤、WN 烟煤、SG 烟煤与 ES 无烟煤混合煤粉时，燃尽率分别为 72.25%、70.11%、68.87%、67.56%，神东高钙烟煤和 ES 无烟煤的 CaO 质量分数较高，其在风口、回旋区内的燃烧特性最佳。

(3) 向高炉混合喷吹神东高钙烟煤与 ES 无烟煤时，风口、回旋区内的煤气成分和煤粉燃尽率等方面要强于其他 3 种情况，适宜向高炉喷吹。

参考文献：

[1] 张伟. 氧气高炉炼铁基础理论与工艺优化研究[D]. 沈阳:东北大学,2015.
ZHANG Wei. Research on basic theory and process optimization of oxygen blast furnace ironmaking[D]. Shenyang:Northeastern University,2015.

[2] 吕柏炎. 浅谈八钢高炉喷吹烟煤的安全技术问题[J]. 新疆钢铁,1994(2):31－35.
LÜ Baiyan. Safety and technical problems of bituminous coal injection in Bagang blast furnace[J]. Xinjiang Iron and Steel,1994(2):31－35.

[3] 张世鑫. 高炉喷吹煤粉燃烧特性研究以及对燃烧带煤气流分布的影响[D]. 贵阳:贵州大学,2020.
ZHANG Shixin. Study on combustion characteristics of blast furnace injection pulverized coal and its influence on the distribution of coal gas flow in combustion belt [D]. Guiyang:Guizhou University,2020.

(下转第 122 页)

[5] 王子宏,阮志勇,墙蔷,等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):86-92;98.
WANG Zihong, RUAN Zhiyong, QIANG Qiang, et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearing dust in steel plant[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):86-92;98.

[6] 郭培民,潘聪超,庞建明,等. 冶金炉窑共处置危险废物[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
GUO Peimin, PAN Congchao, PANG Jianming, et al. Hazard waste co-treatment in metallurgical furnace[M]. Beijing:Metallurigical Industry Press,2015.

[7] 谢泽强,郭宇峰,陈凤,等. 钢铁厂含锌粉尘综合利用现状及展望[J]. 烧结球团,2016,41(5):53-56;61.
XIE Zeqiang, GUO Yufeng, CHEN Feng, et al. Research status and prospect of comprehensive utilization of zinc-bearing dust in iron and steel plants[J]. Sintering and Pelletizing,2016,41(5):53-56;61.

[8] 王天才. 回转窑处理钢铁含锌粉尘关键技术探析[J]. 中国资源综合利用,2019,37(7):181-184.
WANG Tiancai. Analysis on key technology of treating steel containing zinc dust in rotary kiln[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(7): 181-184.

[9] 王勇,万忠炎. 几种不同类型的回转窑温度检测方法[J]. 山东冶金,2008,30(4):68-69.
WANG Yong, WAN Zhongyan. Several different types of temperature detection methods for rotary kilns[J]. Shandong Metallurgy,2008,30(4):68-69.

[10] 熊果,刘欣,周云花,等. 含锌转炉炼钢泥的理化特性分析研究[J]. 烧结球团,2021,46(3):93-98.
XIONG Guo, LIU Xin, ZHOU Yunhua, et al. Analytical research on physicochemical property of zinc-containing dust from converter steelmaking process[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(3):93-98.

[11] 沈维民,叶恒棣,张志波,等. 钢铁工业含锌尘泥回转窑处置技术的应用进展[J]. 烧结球团,2024,49(1):9-17;55.
SHEN Weimin, YE Hengdi, ZHANG Zhibo, et al. Progress in application of disposal technology for zinc-containing dust sludge rotary kiln iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(1):9-17;55.

(上接第114页)

[4] 张文辉,张建良,王伟,等. 神东烟煤中CaO在高炉喷吹中的作用及有价矸石排放减量化研究[J]. 煤炭加工与综合利用,2021(1):78-80;84.
ZHANG Wenhui, ZHANG Jianliang, WANG Wei, et al. The role of CaO in blast furnace injection and the reduction of valuable gangue emissions in Shendong bituminous coal[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization,2021(1):78-80;84.

[5] 王凯. 高炉内煤粉燃烧的数值模拟与参数优化[D]. 秦皇岛:燕山大学,2018.
WANG Kai. Numerical simulation and parameter optimization of pulverized coal combustion in blast furnace[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2018.

[6] 李永清,张小辉,张家元,等. 喷吹方式对煤粉燃尽率的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2014,45(7):2432-2439.
LI Yongqing, ZHANG Xiaohui, ZHANG Jiayuan, et al. Effect of injection method on burnout rate of pulverized coal[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition),2014,45(7):2432-2439.

[7] 高栋栋. 现代高炉喷吹煤粉燃烧行为的数值模拟[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2013.
GAO Dongdong. Numerical simulation of combustion behavior of modern blast furnace injection pulverized coal[D]. Anshan: Liaoning University of Science and Technology,2013.

[8] 陈天,程树森. 高炉煤粉燃烧[C]//2017年全国高炉炼铁学术年会论文集(下). 北京:中国金属学会,2017:589-595.
CHEN Tian, CHENG Shusen. Blast furnace pulverized coal combustion[C]//Proceedings of the 2017 National Blast Furnace Ironmaking Annual Conference (Part II). Beijing:The Chinese Society for Metals,2017:589-595.

[9] 陈天,程树森. 高炉回旋区喷吹煤粉三维模拟[J]. 过程工程学报,2018,18(2):265-273.
CHEN Tian, CHENG Shusen. Three-dimensional simulation of pulverized coal injection in blast furnace gyration zone[J]. Chinese Journal of Process Engineering,2018,18(2):265-273.

[10] 王子侃. 高炉喷吹中煤粉燃烧过程的数值模拟[D]. 武汉:武汉科技大学,2015.
WANG Zikan. Numerical simulation of pulverized coal combustion process in blast furnace injection[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.