3 200 m^3 高炉供风均匀性模拟研究及其改进方案

农伟民，王 楠，邓晓玲，张晓辉
(东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819)

摘要： 为了改善高炉送风系统的供风均匀性，以某厂3 200 m^3高炉送风系统为研究对象，采用数值模拟方法分析了总鼓风量、风口直径对系统供风均匀性的影响，并给出了具体改善方案。结果表明，在初始风口尺寸条件下，28#和12#风口的鼓风动能明显小于其它风口，鼓风动能最大差值为11.91 kJ/s，整体均匀性指数为2.31，系统的供风均匀性不佳。将28和12#风口调整成130 mm后，整体均匀性指数降为0.87。在此基础上，增大所有风口直径和降低总鼓风量，均能小幅度改善系统供风均匀性，但平均鼓风动能下降较大。将送风系统的28#风口直径调整为127 mm、12#风口直径调整为130 mm、26#和30#风口直径调整为132 mm后，系统供风均匀性得到明显改善，鼓风动能最大差值降为2.27 kJ/s，整体均匀性指数降为0.45。

关键词： 高炉；周向供风；均匀性；风口；鼓风动能；数值模拟
中图分类号： TF544.4；TF573.7 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)06－0116－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.06.092

Simulation research on air supply uniformity of 3 200 m^3 blast furnace and its improvement scheme

NONG Weimin, WANG Nan, DENG Xiaoling, ZHANG Xiaohui
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: In order to improve the air supply uniformity of the blast furnace air supply system, a 3 200 m^3 blast furnace air supply system of a factory is taken as the research object, the influence of the total air supply volume and tuyere diameter on the air supply uniformity of the system is analyzed by a numerical simulation method, and a specific improvement plan is given. The results show that the blast momentum of tuyere No. 28 and No. 12 is significantly smaller than that of other tuyeres under the condition of initial tuyere size, the maximum difference of blast momentum is 11.91 kJ/s, and the overall uniformity index is 2.31, indicating that the air supply uniformity of the system is not good. After adjusting the diameter of tuyere No. 28 and No. 12 to 130 mm, the overall uniformity index is reduced to 0.87. On this basis, increasing the diameter of all tuyeres and decreasing the total air volume can slightly improve the uniformity of air supply of the system, but the average blast momentum is decreased greatly. After adjusting the diameter of tuyere No. 28 to 127 mm, No. 12 to 130 mm, and No. 26 and No. 30 to 132 mm, the air supply uniformity of the system is significantly improved; the maximum difference of blast momentum is reduced to 2.27 kJ/s, and the overall uniformity index is reduced to 0.45.

Key words: blast furnace; circumferential air supply; blast momentum; tuyere; blast momentum; numerical simulation

为了扩大生产规模、提高铁水质量、降低燃料消耗与生产成本、提高生产效率，高炉大型化已然成为现代钢铁工业的重要发展趋势之一[1]。但随着高炉炉缸尺寸增大，风口数目增多，高炉

收稿日期：2022－12－07；修回日期：2023－03－17
基金项目：国家自然科学基金面上项目(52274325)
作者简介：农伟民(1994—)，男，硕士研究生，从事高炉风口供风均匀性方面的研究。
通信作者：王 楠(1968—)，女，教授，从事铁资源绿色冶炼技术、冶金过程传递规律与反应器优化设计等方面的研究。

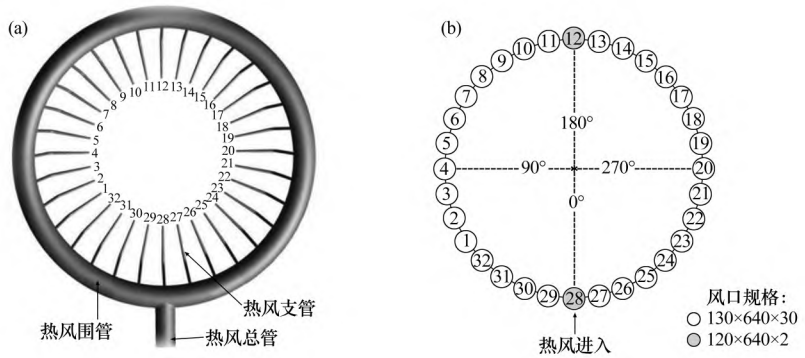
(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

送风系统易产生供风不均匀问题[2]。由于高炉内部监测的复杂性和困难性[3-4]，目前对高炉周向供风均匀性主要采用数值仿真的方法进行评价分析[5]。刘洪升[6]等对鞍钢 2 580 m³ 高炉各风口风量进行数值模拟，结果表明，在相等风口直径条件下，高炉风口风量分配并不均匀，沿围管圆周有 4 个对称方位处风口风量较大。刘红[7]等基于湘钢 2# 高炉，利用计算流体力学方法对热风在总管－围管－支管内的流动过程进行了数值仿真，发现靠近主管与围管交接处的两只支管流量与流速偏大，在围管两侧的第二只至第四只支管流量较小。梅亚光[8]等以三种不同尺寸的高炉为研究对象，研究了风口结构相同时，送风系统内热风流动过程以及缩小风口面积对鼓风参数的影响，结果表明，总风量增加时，风口不均匀性增加，大高炉鼓风动能不均匀性最大。总风量不变时，减小某风口的面积，该风口的风量、鼓风动能并未增加；风口长度的增加对高炉鼓风参数的调节影响不大。李洋龙等[9]建立了风口风量分配的数学模型，发现增加部分风口的长度时，对应风口风量、风速、鼓风动能降低。缩小少数风口的面积，会降低对应风口的风量。刘文鹏等[10]研究了双热风管结构高炉送风系统各风口的风量分配，证明堵塞单、双风口会增大风口风量分布的不均匀性，但影响较小。倪澳等[11]研究了堵塞风口对高炉风口速度分布和压强分布的影响，结果表明，改变风口直径会显著影响支管入口处的压强，进而影响风口速度和鼓风动能。以上学者对影响高炉供风均匀性的因素做了较多的研究，但研究很少给出改善高炉供风均匀性的具体方案。本文在上述研究工作基础上，采用数值模拟方法，针对某钢厂 3 200 m³ 高炉周向供风均匀性开展了深入研究，定量评价了总鼓风量、风口直径等参数对系统供风均匀性的影响，并给出了改善供风均匀性的具体方案。

1　物理模型和数学模型描述

1.1　物理模型

本文涉及的某钢厂 3 200 m³ 高炉送风系统见图 1。为了方便今后开展验证工作，模型的风口编号与该厂对风口的编号保持一致，热风总管正下方风口编号为 28#，按逆时针依次减小。由图 1(a) 可以看出，整个送风系统的主体管路由热风总管、热风围管和热风支管组成。高炉冶炼所需热风由热风总管进入热风围管后，由热风围管进入各热风支管，最后经各风口流出进入高炉炉缸。由图 1(b) 可以看出，热风总管入口正下方为 28# 风口，28# 风口正对面为 12# 风口。28# 和 12# 风口初始直径为 120 mm，其它风口初始直径均为 130 mm，所有风口长度均为 640 mm。送风系统主要参数与尺寸如表 1 所示。建立送风系统的几何模型后，对模型进行网格划分，并进行网格无关性验证。网格数分别为 87 万、175 万、354 万、708 万，最终发现网格数为 354 万时的计算结果与网格数为 708 万时的计算结果误差均在 5% 左右，本文选取计算网格单元数量为 354 万的网格划分方案。网格划分如图 2 所示。



(a) 送风系统几何模型；(b) 各风口编号与规格尺寸(mm)

图 1　3 200 m³ 高炉送风系统示意

Fig. 1　Schematic diagram of 3 200 m³ blast furnace air supply system

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 送风系统主要参数

Table 1 Main parameters and of blast furnace air supply system

高炉容积/m^3	总鼓风量/($m^3 \cdot min^{-1}$)	围管中心圆直径/m	围管内径/m	总管内径/m	风口个数/个	风口长度/m
3 200	5 600	22.50	1.569	1.796	32	0.64

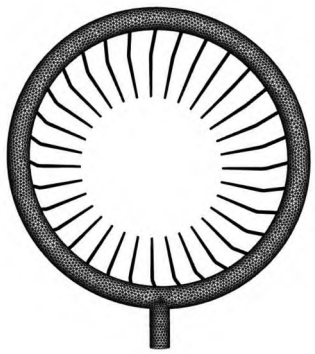


图2 送风系统计算域网格划分

Fig. 2 Grid division of calculation domain of blast furnace air supply system

1.2 数学模型

本文采用数学模型的基本假设：①鉴于送风管路绝热性良好，在1 200 ℃时，当地音速为769 m/s，热风管内的热风速度最大约为227 m/s，热风速度远小于当地音速，故可将热风看作等温不可压缩流体；②炉缸上部压力恒定，即风口出口压力保持恒定；③不考虑化学反应。

数学模型主要方程包括连续性方程、动量守恒方程、湍流 $k-\varepsilon$ 双方程等，如式(1)～(4)所示。

连续性方程：

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

动量方程：

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu_{\text{eff}}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

湍动能 k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}+\mu\right)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]+P_k-\rho\varepsilon \tag{3}$$

湍动能耗散率 ε 方程：

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i}\right)+C_1\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

式中：ρ 为流体密度，kg/m^3；u_i，u_j 分别为流体在 i 和 j 方向上的速度分量，m/s；x_i，x_j 分别为 i 和 j 方向上坐标值，m；i 和 j 为亚指标，分别取1、2、3；P 为压力，Pa；μ_{eff} 为流体有效黏度系数，Pa·s；μ_t 为湍流黏度系数，Pa·s；μ 为层流黏度系数 Pa·s；P_k 为层流速度梯度产生的湍动能，J；k 方程和 ε 方程的普朗特系数分别为 $\sigma_k=1.0$，$\sigma_\varepsilon=1.3$；经验常数 $C_1=1.44$，$C_2=1.92$。

数学模型的边界条件：① 将热风总管入口设置为速度入口，热风速度由总鼓风量和热风总管入口表面积求得；② 风口出口为压力出口，给定恒压0.4 MPa；③ 1 200 ℃条件下，热风密度由理想气体状态方程求得；④ 管道壁面采用无滑移边界条件，壁面附近采用标准壁面函数。

2 系统供风均匀性评价指标

高炉鼓风动能是影响高炉风口回旋区长度的直接因素，决定了风口前燃烧带大小和形状，而燃烧带的大小和形状又是反映高炉下部工作状态的重要参数，对初始煤气分布和炉料下降均有较大影响。因此，研究高炉供风均匀性，主要是研究各风口鼓风动能的均匀性。

2.1 鼓风动能

鼓风动能采用式(5)进行计算：

$$E_i=\frac{1}{2}Q_i\rho v_i^2 \tag{5}$$

式中：E_i 为 i 风口的鼓风动能，kJ/s；Q_i 为单位时间内通过 i 风口的风量，m^3/s；v_i 为 i 风口的平均风速，m/s。

2.2 局部均匀性指数和整体均匀性指数

本文定义了鼓风动能局部均匀性指数[12](U_i)和整体均匀性指数(U)，分别如式(6)、(7)所示。

$$U_i=\sqrt{(E_i-\overline{E})^2} \tag{6}$$

$$U=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(E_i-\overline{E})^2} \tag{7}$$

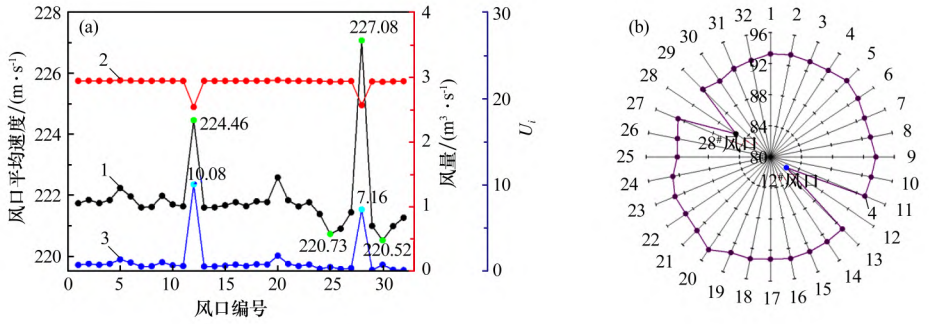
式中：$\overline{E}$ 为所有风口的平均鼓风动能，kJ/s；n 为风口个数。U_i 值越小，表明该风口的鼓风动能越接近平均值；U 值越小，表明各风口的鼓风动能分布越均匀，即系统的供风均匀性越好。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　模拟仿真结果与讨论

3.1　各风口采用初始尺寸时的供风特性

图 3 为总鼓风量为 5 600 m^3/min、各风口均采用初始尺寸时，各风口的平均速度、风量、U_i 以及鼓风动能计算结果。由图 3(a) 可以看出，28#、12#风口的平均速度分别达到 227.08 m/s 和 224.46 m/s，明显大于其它风口；而 25#和 30#风口的平均速度则较小，分别为 220.73 m/s 和 220.52 m/s。同时，结合图 3(a) 与 3(b) 可以看出，28#、12#风口的风量和鼓风动均都明显小于其他风口，这是由于 28#、12#风口的直径和风口面积小于其他风口，从而导致这两个风口的风量和鼓风动能较小。此外，32 个风口中，最大鼓风动能与最小鼓风动能的差值约为11.91 kJ/s，U 为 2.31，鼓风动能差异较大的 12#和 28#风口的 U_{12} 和 U_{28} 分别为 10.08 和 7.16。



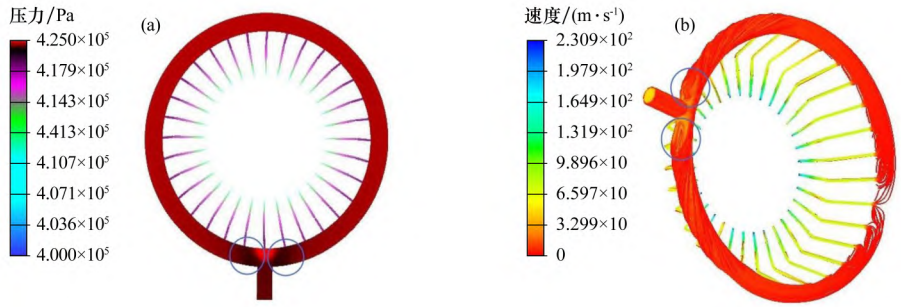
(a) 风口平均速度、U_i、风量；(b) 鼓风动能(kJ/s)

1—风口平均速度；2—风量；3—U_i；4—鼓风动能

图 3　各风口采用初始直径时各参数变化值

Fig. 3　Variation values of various parameters at the initial diameter for each air outlet

热风管圆周方向的压力分布云图和速度分布流线图见图 4。由图 4(a) 可以看出，围管内热风压力先减小后增大，且总管与围管接口附近压力最小。这是因为热风从总管进入送风系统后，在围管与总管接口附近产生局部阻力损失，从而导致该区域压力较小。同时，如图 4(b) 所示，总管与围管接口区域存在两个速度旋涡，造成这两处区域的速度波动较大，导致区域附近风口的平均速度小于其它风口，进而造成供风不均匀。



(a) 压力分布；(b) 速度分布

图 4　热风管周向压力分布云图和速度分布流线图

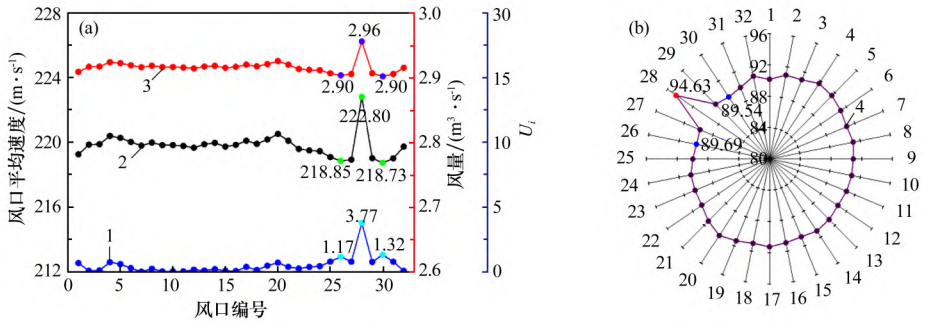
Fig. 4　Pressure distribution contour and velocity distribution streamline in hot bustle pipe

3.2　调整风口直径对系统供风均匀性的影响

为了更全面评价各风口尺寸变化对风口平均速度、鼓风动能等参数的影响，本文首先对所有风口直径保持一致时的供风特性进行了研究。当所有风口直径均为 130 mm 时，各风口的平均速度、风量、U_i 和鼓风动能见图 5。由图 5(a) 可知，28#风口的平均速度最大，达到 222.80 m/s；而 26#和 30#风口的平均速度较小，分别为 218.85、218.73 m/s。同时，28#风口风量最大，为2.96 m^3/s；而 26#、30#风口风量较小，均为2.90 m^3/s。另一方面，各风

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

口鼓风动能分布也表现出类似规律，如图 5(b) 所示。28#风口的鼓风动能最大，为 94. 63 kJ/s，26#和 30#风口鼓风动能则较小，分别为 89. 69 kJ/s 和 89. 54 kJ/s，并且，26#、28#和 30#风口的 U_{26}、U_{28} 和 U_{30} 分别为 1. 17、3. 77 和 1. 32。此外，12#风口的 U_{12} 由原来的 10. 08 降低为 0. 16，表明将 12#风口尺寸由初始的 120 mm 调整为 130 mm 是合理的。28#风口的 U_{28} 降低为 3. 77，最大鼓风动能与最小鼓风动能的差值下降为 5. 09 kJ/s，U 下降为 0. 87。



(a) 各风口的风量、平均速度、局部均匀性指数; (b) 鼓风动能(kJ/s)

1—U_i; 2—风口平均速度; 3—风量; 4—鼓风动能

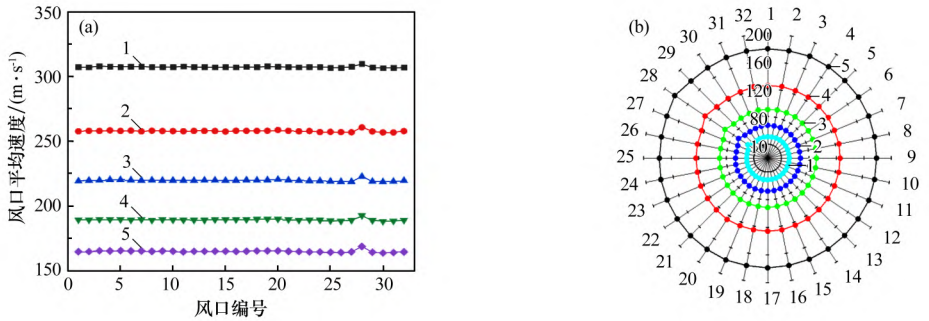
图 5 所有风口直径均为 130 mm 时各参数变化值

Fig. 5 Variation values of various parameters at the diameter of all air vents is 130 mm

图 6 给出了将所有风口直径分别变化为 110、120、130、140、150 mm 时，各风口的平均速度和鼓风动能。由图 6 可以看出，随着所有风口直径增大，风口平均速度迅速下降，且鼓风动能也快速下降。当所有风口直径从 110 mm 增大到 150 mm，26#、28#和 30#风口的 U_{26}、U_{28} 和 U_{30} 分别从 0. 93、4. 12 和 1. 43 降低为 0. 76、3. 56 和 1. 45。图 7 为不同风口直径下的平均鼓风动能和总体均匀性指数。由图 7 可知，随着风口直径增大，U 有减小，但平均鼓风动能迅速下降。由此可见，调整所有风口直径，无法达到有效改善供风均匀性之目的。

3. 3 调整总鼓风量对系统供风均匀性的影响

在所有风口直径均为 130 mm、其它条件与初始尺寸一致的条件下，考察调整供风系统总鼓风量对供风均匀性的影响。图 8 为不同总鼓风量下各风口的平均速度和鼓风动能。由图 8 可以看出，随着总鼓风量增大，各风口的平均速度增大，鼓风动能也迅速增大。因此，调整总鼓风量可作为调整鼓风动能的一种手段，但调整幅度不宜过大，这是由于改变总鼓风量易造成鼓风动能过小或过大。如果鼓风动能过小，会造成初始煤气分布偏向边缘; 而鼓风动能过大，则容易形成顺时针方向的涡流，造成热风向下方堆积而使风口下端易烧坏。当总鼓风量从 6 000 m^3/min 减小到 5 200 m^3/min，26#、28#和 30#风口的 U_{26}、U_{28} 和



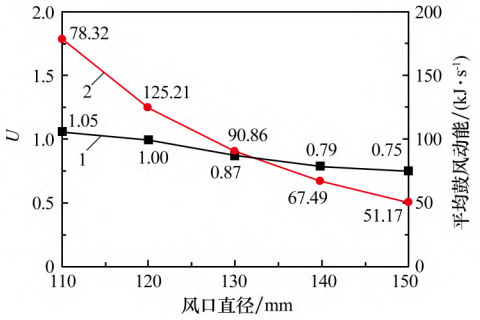
(a) 平均速度; (b) 鼓风动能(kJ/s)

风口直径/mm: 1—110; 2—120; 3—130; 4—140; 5—150。

图 6 所有风口采用相同直径时的平均速度和鼓风动能

Fig. 6 Average velocity and blast kinetic energy for all the tuyeres with the same diameter

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



1—U；2—平均鼓风动能。

图 7　所有风口采用相同直径时(110、120、130、140、150 mm)的平均鼓风动能和总体均匀性指数

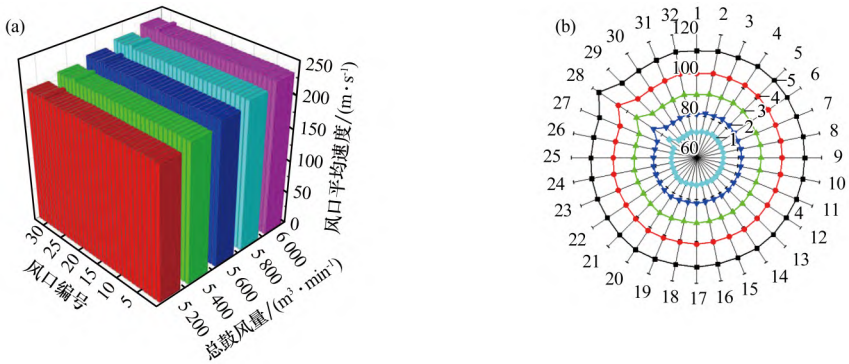
Fig. 7　Average blast kinetic energy and overall uniformity index for all the tuyeres with the same diameter (110、120、130、140、150 mm)

U_{30}分别从 1.47、4.61 和 1.66 减小为 0.90、3.04 和 1.03，U 从 1.07 减小为 0.70，平均鼓风动能从 111.76 kJ/s 减小为 72.75 kJ/s。因此，调整总鼓风量，并不能在保证鼓风动能在合理范围内从而改善系统的供风均匀性。

4　供风均匀性改善方案

由前述 3.2 节可知，当所有风口直径均相同时，28#风口的鼓风动能表现出最大偏差。因此，在其它风口直径保持为 130 mm 时，仅改变 28#风口直径以调整其鼓风动能，进而改善系统供风的均匀性。图 9 为 28#风口采用不同直径条件下，各风口的平均速度和鼓风动能；图 10 为 28#风口采用不同直径时的平均鼓风动能、U、U_{28}。结合图 9 和图 10，可以看出，随着 28#风口直径由 130 mm 减小至 126 mm，该风口平均速度增大但其鼓风动能减小，其它风口的速度和鼓风动能均有所增加。风口的平均鼓风动能在小幅度范围内波动，U 呈下降趋势。

当 28#风口直径为 127 mm 时，U_{28}最小，为 0.51。此时，U为0.56，鼓风动能偏差最大的风口

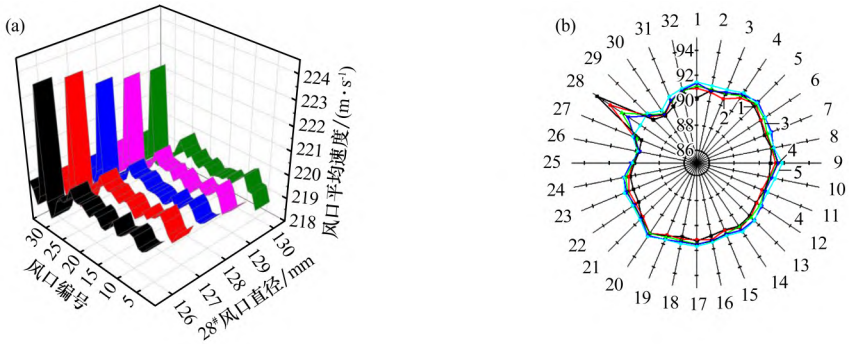


(a)　平均速度；(b)　鼓风动能(kJ/s)

总鼓风量/(m^3·min^{-1})：1—5 200；2—5 400；3—5 600；4—5 800；5—6 000。

图 8　不同总鼓风量条件下各风口的供风特性

Fig. 8　Air supply characteristics of every tuyere with different blast flow rates



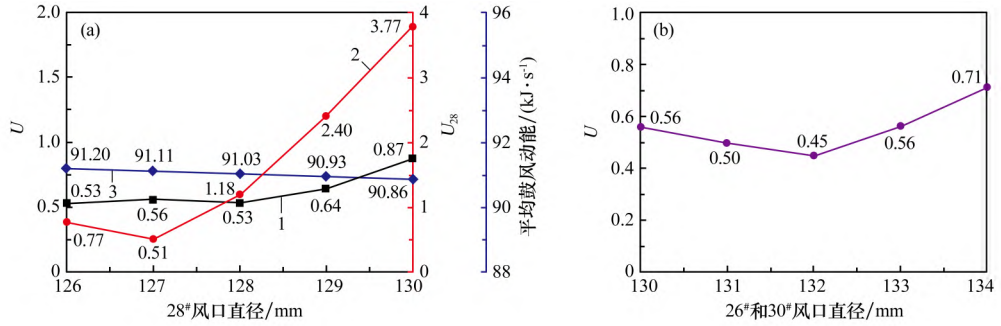
(a)　平均速度；(b)　鼓风动能(kJ/s)

风口直径/mm：1—130；2—129；3—128；4—127；5—126。

图 9　28#风口采用不同直径时所有风口的供风特性

Fig. 9　Air supply characteristics of every tuyere with different diameters of No. 28 tuyere

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



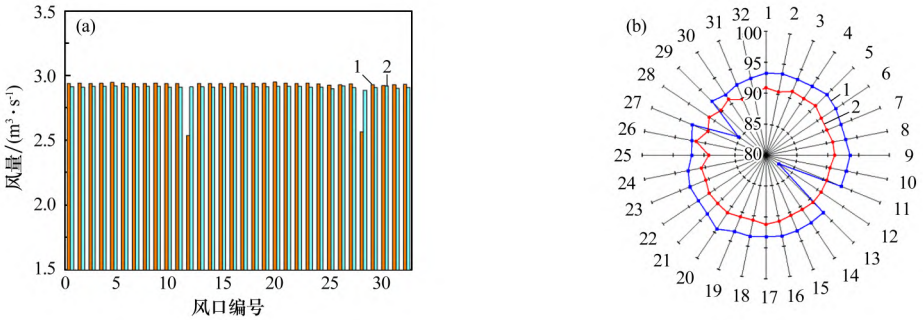
(a) 28#风口直径；(b) 26#和30#风口直径

1—U；2—U_{28}；3—平均鼓风动能。

图 10 调整不同风口直径对供风均匀性的影响

Fig. 10 The influence of adjusting the diameter of different tuyeres on air supply uniformity

为 26#和 30#风口，这两个风口的鼓风动能相较其它风口偏小。在此基础上，通过调整这两个风口的直径，进一步提高系统的供风均匀性。当 26#和 30#风口直径调整为 132 mm 时，U 最小，为 0.45。一般认为，缩小风口面积，风口速度增加，鼓风动能也相应增加[13]，但这是在风口风量不变的条件下所得出的。本文计算发现：总鼓风量不变情况下，缩小一个或几个风口的面积，可减小这些风口鼓风动能，并同时增加其他风口的鼓风动能，从而达到改善系统供风均匀性的目的。因此，本文给出的改善方案：28#风口直径调整为 127 mm、26#和 30#风口直径均调整为 132 mm、12#风口直径调整为 130 mm，其它风口尺寸均与初始时保持不变。图 11 为尺寸优化前后各风口的风量和鼓风动能。由图 11 可以明显看出，调整后的供风均匀性得到较大改善，最大鼓风动能与最小鼓风动能的差值从原来的 11.91 kJ/s 下降为 2.27 kJ/s，整体均匀性指数 U 从原来的 2.31 下降为 0.45。



(a) 风量；(b) 鼓风动能(kJ/s)

1—初始尺寸；2—尺寸优化后。

图 11 尺寸优化前后各风口特性

Fig. 11 Characteristics of each air outlet before and after size optimization

5 结 论

(1) 在初始风口尺寸条件下，28#和 12#风口的鼓风动能明显小于其它风口，鼓风动能最大差值为 11.91 kJ/s，U 为 2.31，系统供风均匀性不佳。

(2) 当所有风口直径均相同时，供风系统整体均匀性指数略有减小，增大所有风口直径，能小幅度改善系统供风均匀性，但改善效果不显著。

(3) 调整总鼓风量虽然可作为调整鼓风动能的手段之一，且降低总鼓风量，能小幅度改善系统供风均匀性，但并不能保证鼓风动能在合理范围内，因而无法有效改善系统供风均匀性。

(4) 将 28#风口直径调整成为 127 mm，26#和 30#风口直径调整为 132 mm，12#风口直径调整为 130 mm，其它风口尺寸保持不变，系统供风均匀性得到较大改善。最大鼓风动能与最小鼓风动能的差值从 11.91 kJ/s 下降为 2.27 kJ/s，U 从 2.31 下降为 0.45。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参考文献:

[1] 朱苗勇．现代冶金工艺学(钢铁冶金卷)第 2 版[M]．北京:冶金工业出版社,2016:2 - 3.
ZHU MiaoYong. Modern metallurgical technology(steel metallurgy volume) 2nd edition [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2016:2 - 3.

[2] 吴狄峰,程树森,赵宏博,等．风口尺寸对高炉操作影响的研究[J]．钢铁,2008(4):18 - 23.
WU Difeng, CHENG Shushen, ZHAO Hongbo, et al. Study on effect of tuyere size on blast furnace operation [J]. Iron and Steel,2008(4):18 - 23.

[3] 郭俊奎,马铁林．高炉风口参数的设计探讨[J]．河南冶金,2012,20(4):27 - 28.
GUO Junkui, MA Tielin. Design and discussion of BF tuyere parameters [J]. Henan Metallurgy,2012,20(4):27 - 28.

[4] 郭艳永,张贺顺,陈川．大型高炉合理鼓风动能的探讨[J]．炼铁,2016,35(2):18 - 23.
GUO Yanyong, ZHUANG Heshun, CHEN Chuan. Study on reasonable blasting kinetic energy of large sized BF [J]. Ironmaking,2016,35(2):18 - 23.

[5] TANG Jue, ZHANG Zedong, SHI Quan, et al. Evaluation and improvement of circumferential uniformity for blast furnace raceway [J]. ISIJ International, 2022, 62(3): 477 - 486.

[6] 刘洪升,史本慧,刘炳南,等．高炉风口风量分配均匀性的数值模拟[J]．材料与冶金学报,2022,21(4):255 - 260.
LIU Hongsheng, SHI Benhui, LIU Bingnan, et al. Numerical simulation of the air volume distribution uniformity in blast furnace tuyere [J]. Journal of Materials and Metallurgy,2022,21(4):255 - 260.

[7] 刘红,但家云,伍东玲．湘钢 2# 高炉风管供风均匀性分析[J]．金属材料与冶金工程,2021,49(4):50 - 53.
LIU Hong, DAN Jiayun, WU Dongling. Analysis on air supply uniformity of No. 2 blast furnace in xiangtan steel [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering,2021,49(4):50 - 53.

[8] 梅亚光,程树森,李洋龙．高炉风口鼓风均匀性及风口参数调节研究[J]．工业炉,2016,38(3):5 - 10.
MEI Yaguang, CHENG Shushen, LI Yanglong. Study on tuyere blast uniformity and tuyere parameters adjustment of blast furnace [J]. Industrial Furnace, 2016, 38(3): 5 - 10.

[9] 李洋龙,程树森,陈川．高炉风口风量分配数学模型[J]．东北大学学报(自然科学版),2016,37(3):357 - 362.
LI Yanglong, CHENG Shushen, CHEN Chuan. Mathematical model of adjusting blast volume of blast furnace tuyeres [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science),2016,37(3):357 - 362.

[10] 刘文鹏,金焱,董晓森．高炉双热风总管结构的风口风量分布模拟[J]．过程工程学报,2017,17(6):1148 - 1155.
LIU Wenpeng, JIN Yan, DONG Xiaoshen. Simulation on blast volume distribution of blast furnace tuyeres with double hot blast main structure [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2017,17(6):1148 - 1155.

[11] 倪澳,李承志,张伟,等．大型高炉风口供风特性数值模拟研究[J]．钢铁研究学报,2022,34(5):411 - 420.
NI Ao, LI Chengzhi, ZHANG Wei, et al. Numerical simulation research on tuyere air supply characteristics of large blast furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(5):411 - 420.

[12] 黄龙生．概率论与数理统计[M]．北京:中国人民大学出版社,2012:105 - 108.
HUANG Longsheng. Probability theory and mathematical statistics [M]. Beijing: Renmin University of China Press,2012:105 - 108.

[13] 吴狄峰,程树森,赵宏博,等．高炉送风系统和下部调剂作用研究[C]//2007 中国钢铁年会论文集．成都:中国金属学会,2007:640 - 641.
WU Difeng, CHENG Shushen, ZHAO Hongbo, et al. Research on blast sending system and the effect of bottom adjustment for blast furnace [C]//Proceedings of the 2007 China Steel Annual Conference. Chengdu: CSM, 2007:640 - 641.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net