烧结主抽风机出口烟道振动分析及控制措施

谭 诚[1]，王兆才[1,2]，周晓青[1]，师本敬[1,2]，陈 宇[1]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；
2. 国家烧结球团装备系统工程技术研究中心，湖南 长沙 410205）

摘要：近年来，不少烧结厂主抽风机出口到脱硫入口之间的烟道出现了振动问题。针对此问题，本文分析了烧结机风箱支管不同的布置形式对大烟道中废气温度、压力及流量的影响，分析了主抽风机出口至脱硫入口之间烟道布置形式对烟道内气流的影响，分析了风机在其性能曲线的非稳定区运行对风流系统的影响，并结合某些烧结机现场调试数据进行了具体的分析及研究。结果表明，主抽风机与脱硫脱硝之间的烟道设计形式，高负压、低风量的烧结操作模式等均可造成主抽风机出口烟道振动。通过优化烟道设计形式、使烧结生产在合适的工况条件下进行可减轻或消除主抽风机出口烟道的振动。

关键词：烧结；厚料层；主抽风机；烟道振动；透气性
中图分类号：TF046.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)03－0040－08
doi：10.13403/j.sjqt.2024.03.039

Vibration analysis and control measures on flue outlet of main exhaust fan of sintering

TAN Cheng[1], WANG Zhaocai[1,2], ZHOU Xiaoqing[1], SHI Benjing[1,2], CHEN Yu[1]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. National Engineering Research Center of Sintering and Pelletizing Equipment System, Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In recent years, many sintering plants have experienced vibration problems in the flue between the main exhaust fan outlet and the desulfurization inlet. In order to solve such problem, the influence of different arrangement forms of the bellow branch pipe of the sintering machine on the temperature, pressure and flow rate of the exhaust gas in the large flue is analyzed; the influence on form of the flue layout between the outlet of the main exhaust fan and the desulfurization inlet on the airflow in the flue is analyzed; the influence of the operation of the fan on the air flow system in the unstable area of its performance curve is analyzed; and combined with the on-site commissioning data of some sintering machines, some specific analysis and research are carried out. The results show that the form of flue design between the main exhaust fan and desulfurization and denitrification, the sintering operation mode with high negative pressure and low air volume can cause the flue vibration at the outlet of the main exhaust fan. By optimizing the flue design form and making the sintering production under suitable working conditions, the vibration of the flue outlet of the main exhaust fan can be reduced or eliminated.

Key words: sintering; deep bed sintering; main exhaust fan; flue vibration; air permeability

厚料层烧结技术是 20 世纪 80 年代基于铁酸钙固结理论和烧结料层自动蓄热作用发展起来的先进烧结技术[1]。近年来，国内大中型烧结机料层厚度基本在 800 mm 以上，湘钢[2]、马钢[3]、

收稿日期：2023－05－04；**修回日期**：2023－05－19
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2023YFC3707001)；长沙市科技重大专项资助项目(kh2301029)
作者简介：谭 诚(1983—)，男，硕士研究生，高级工程师，从事烧结、球团及原料场方面的工程设计、研究及项目管理工作。

宝钢本部、宝钢湛江等部分钢铁企业的烧结机料层厚度均已超过 900 mm，汉钢[4]、龙钢、泰钢、天钢联合特钢[5]等钢铁企业的烧结机已做到超厚料层（≥1 000 mm）烧结。厚料层烧结对料层透气性的要求较高，大多烧结厂采用小风量、低负压的生产模式，而在料层透气性得不到保证的情况下，追求大风量、高负压得到的结果往往是风量小、负压高，造成风机失速甚至管网喘振。此外，随着环保要求越来越严苛，烧结烟气脱硫脱硝设施逐步完善，烧结风流系统增加了脱硫脱硝增压风机、联络管等，越来越多的烧结机风流系统出现了不稳定的情况，其中，烧结主抽风机出口至脱硫入口间的烟道振动问题尤为凸出[6-9]。烟道振幅较大时会导致烟道开裂、烟道钢支架晃动、连接螺栓松动、焊缝开裂等，带来安全隐患。此外，振动严重时，还会使两台主抽风机之间相互影响，造成烧结风流系统不畅，影响烧结生产顺行。

针对烧结主抽风机出口至脱硫入口间的烟道振动问题，本文对引起该问题的诸多因素进行了分析，并结合某烧结厂 330 m^2 烧结机的调试数据进行了具体的分析及研究，揭示了导致烟道振动问题的主要原因，并给出了减轻或消除主抽风机出口烟道振动的建议。

1　大烟道内烟气流量、压力、温度的影响

中小型烧结机（烧结机面积≤220 m^2）一般采用单烟道及单主抽风机的布置形式，烧结机所有风箱内的烟气均进入同一个大烟道及同一台主抽风机，整个风流系统单一。而中大型烧结机（烧结机面积 >220 m^2）一般采用双烟道及双主抽风机的布置形式，烧结风流系统不同的汇集方式可能对两条大烟道内的烟气流量、压力及温度带来影响，从而对并联运行的两台主抽风机造成影响。

1.1　烧结风流系统不同的汇集方式

采用双烟道及双主抽风机布置形式的中大型烧结机，其风箱支管进入大烟道的形式主要有分段式、垂直式及交叉式（图 1），3 种不同的布置形式在国内外烧结机上均有着广泛的应用。

（1）风箱支管分段式。此布置形式是根据烧结过程各风箱中 SO_2 的分布规律，将两条大烟道分为脱硫系烟道及非脱硫系烟道，含 SO_2 高的烟气进入脱硫系烟道，含 SO_2 低的烟气进非脱硫系烟道，并在中部及尾部的风箱支管上设有切换阀，用于调节两条大烟道中的烟气流量、负压及温度平衡。理论上，此种布置形式的风流系统，两条大烟道中的烟气流量、负压及温度可以通过风箱支管切换调节平衡，但调平衡的难度较大[10]，存在阀门被散料卡死或在运行中阀门克服不了系统负压而无法打开的情况。此外，采用该布置形式时，如果两个大烟道分别对应一套脱硫脱硝系统，则两个大烟道内污染物质量浓度的不同会造成两套脱硫脱硝系统脱除负荷的不同。

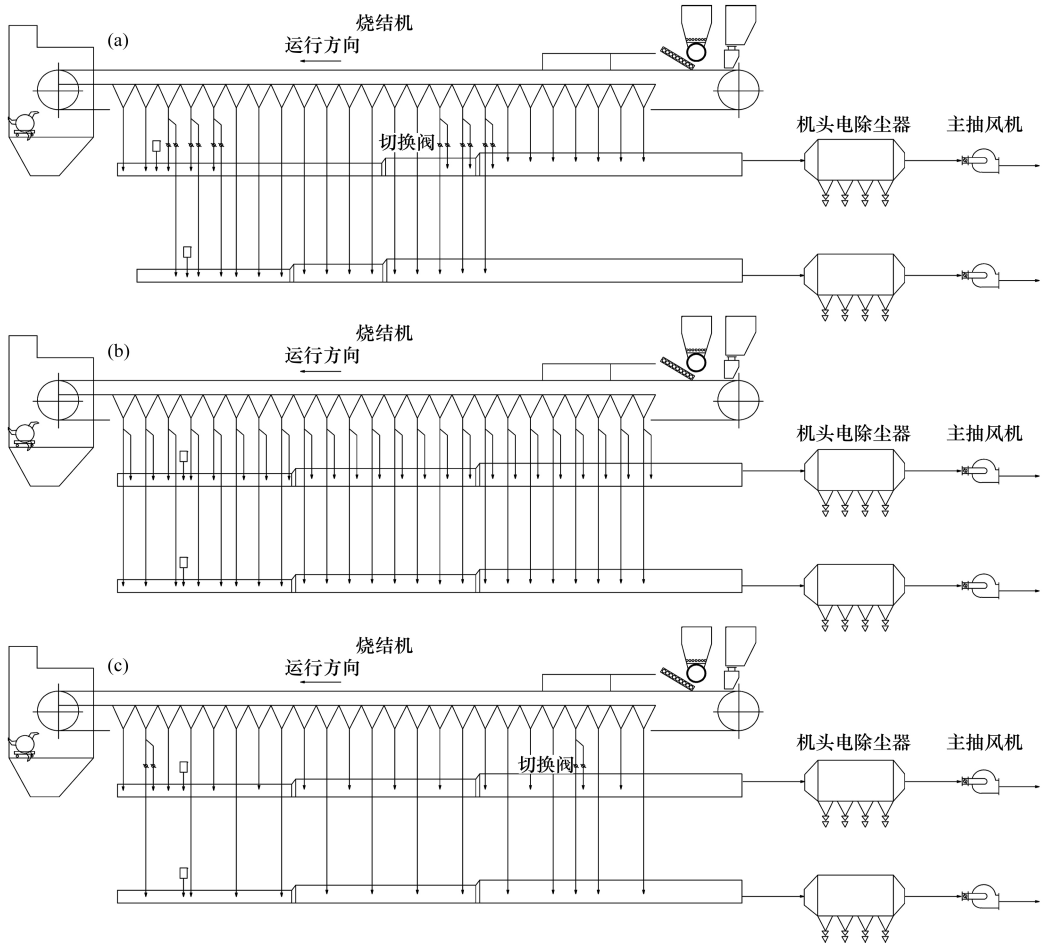
（2）风箱支管垂直式。此布置形式下，同一侧风箱中的烟气进入其正下方的烟道，其风流系统布置简单，两条大烟道中的烟气流量、负压及温度理论上完全平衡，但平衡状态受烧结机在台车宽度方向上的布料不均及点火不均的影响。此外，该布置形式在烧结机限产时无法做到单风机运行。

（3）风箱支管交叉式。此布置形式下，奇数号风箱的烟气进入一条大烟道，偶数号风箱的烟气进入另一条大烟道（从烧结机头起第一个风箱为 1 号风箱，第二个为 2 号风箱，以此类推），如总风箱数为奇数，则最后一个风箱中的烟气分侧垂直进入对应的烟道。此种布置形式的风流系统在烧结系统限产时，可实现在烧结系统单风机运行。在双主抽风机正常运行时，由于随着烧结过程的进行，烧结机从头部至尾部，不同风箱中的烟气流量、负压及温度并不完全相同。因此，两条大烟道中的烟气流量、负压及温度可能存在偏差。

1.2　风箱支管交叉布置对大烟道中烟气流量、负压及温度的影响

基于上述分析，风箱支管分段布置可通过调节手段将两条大烟道中的烟气流量、负压及温度调节平衡，风箱支管垂直布置的两条大烟道中的烟气流量、负压及温度在理论上即可保持平衡，因此，此处仅分析风箱支管交叉布置对大烟道中烟气流量、负压及温度的影响。

为得出烧结机各风箱中的烟气流量、负压及温度，本文以国内某360 m^2 烧结机作为研究对



（a）风箱支管分段式；（b）风箱支管垂直式；（c）风箱支管交叉式

图 1 烧结风流系统不同汇集方式

Fig. 1 Different convergent ways of sintering air flow system

象，对所有通风的支管及两个大烟道内的烟气参数进行了测量。其中，针对烟气流量波动性大、难以准确测量的特点，采用两套测量设备同时测量，通过对比和求平均值获得最终烟气流量值，各风箱烟气温度及压力与现场生产报表的记录值基本吻合，烟气中 O_2 含量和 SO_2 含量与实验室烧结杯试验所得趋势基本一致[11]，测试结果的准确度和可信度较高。所测得的烟气压力、温度及流量数据见表 1。

由于所研究的 360 m^2 烧结机的风箱支管布置形式为分段式，如按风箱支管交叉布置形式，按奇数号风箱进 1 号大烟道，偶数号风箱进 2 号大烟道，则可通过理论计算得出两条大烟道中的烟气压力、温度及流量数据，见表 2。由于奇、偶数号风箱及其支管的散热和阻力损失理论上基本相同，计算未考虑温度损失及阻力损失。

某 360 m^2 烧结机风箱中烟气最高温度出现在倒数第二个风箱(表 1)，即 23 号风箱为烧结终点，该状态为烧结生产的理想状态。最后一个风箱烟气温度急剧下降、烟气流量急剧上升，各风箱烟气按奇、偶汇总后，两条大烟道的负压基本一致，烟气流量及温度有些许偏差(表 2)。1 号大烟道烟气标况流量相比 2 号大烟道少 405.94 Nm^3/min，相差约 4.2%；1 号大烟道烟气温度相比 2 号大烟道低 11.42 ℃，相差约 7.5%。

风箱支管交叉布置的中大型烧结机，两条大烟道内的负压基本不受烧结生产状态的影响，可基本保持一直，但两条大烟道内的烟气流量及温度会受到烧结生产状态的影响，在烧结生产的理想状态，即烧结终点位于倒数第二个风箱时，两条大烟道内的烟气流量及温度偏差均在合理范围，基本不会对两台风机的顺行带来负面影响。但烧

表 1　某 360 m² 烧结机各风箱烟气参数

Table 1　Gas parameters of each wind box on 360 m² sinter machine

风箱编号	对应烧结面积/m²	负压/kPa	温度/℃	工况流量/(m³·min⁻¹)	标况流量/(Nm³·min⁻¹)
1 号	12	13.92	104.77	1 279.86	797.84
2 号	12	13.79	102.10	1 074.11	675.35
3 号	12	13.72	97.42	1 037.47	661.08
4 号	12	13.68	80.55	997.03	665.93
5 号	16	13.68	78.44	1 683.15	1 130.95
6 号	16	13.68	84.55	1 662.34	1 097.88
7 号	16	13.60	76.99	1 020.69	689.30
8 号	16	13.65	83.60	1 327.21	879.18
9 号	16	13.67	81.26	1 276.34	850.88
10 号	16	13.65	75.71	1 178.69	798.47
11 号	16	13.76	75.75	1 307.28	884.36
12 号	16	13.61	76.62	1 264.34	854.65
13 号	16	13.66	75.21	1 155.13	783.54
14 号	16	13.60	80.38	1 300.55	869.87
15 号	16	13.65	93.90	1 179.34	759.30
16 号	16	13.48	115.40	1 215.20	740.51
17 号	16	13.36	143.67	1 212.56	689.71
18 号	16	13.23	168.32	1 269.61	682.83
19 号	16	13.19	224.68	1 573.03	750.55
20 号	16	13.11	256.60	1 449.71	650.61
21 号	16	12.47	297.44	1 536.50	644.84
22 号	16	12.81	401.05	1 690.15	597.99
23 号	12	12.84	437.95	1 999.09	670.36
24 号	12	13.13	319.75	3 006.80	1 205.38

结生产波动时，即烧结终点提前或滞后时，烧结机风箱内的烟气流量及温度会发生变化，尤其是最后几组风箱变化较大，从而造成两条大烟道内烟气流量及温度变化。为避免烧结生产极端状态时，两条大烟道内烟气流量及温度偏差较大，可在烧结机头部及尾部风箱各设 1 组风箱支管切换阀，以便及时做出调整。

2　主抽风机与脱硫脱硝之间烟道设计形式的影响

主抽风机后烟道振动与主抽风机和脱硫系统间烟道路由、烟道中导流板及隔板的设置情况、烟道强度有很大关系。本文通过调研，发现部分烧结厂对烟道加固、增加导流板、加长汇总三通烟道的隔板后，有助于缓解振动或消除振动。此外，主抽出口烟道平缓的振动略小，如某烧结厂两台240 m²烧结机并排布置(图2)。图2 中：烧结机 B 的主抽风机出口至脱硫系统的烟道有较长的直段，利于烟气趋于稳定，其烟道振幅较小；而烧结机 A 的主抽风机出口至脱硫系统的烟道较短，其烟道振动相对较大。

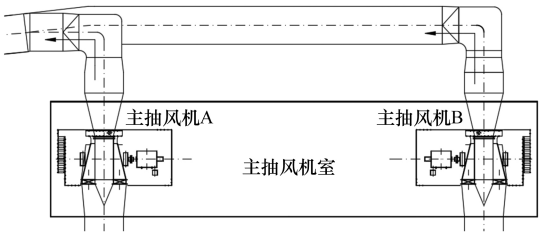


图 2　某 240 m² 烧结机脱硫烟道布置

Fig. 2　Layout of desulphurization duct for 240 m² sintering machine

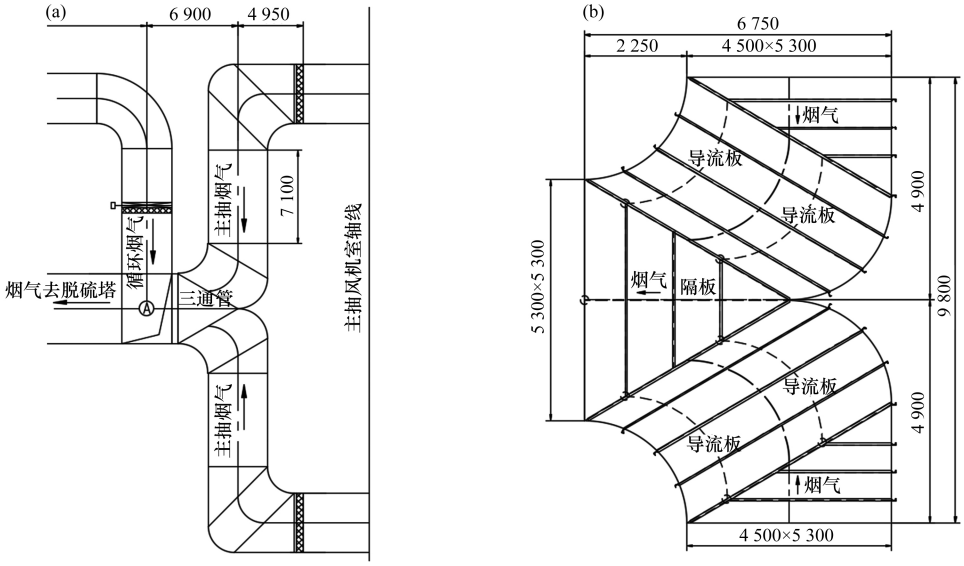
此外，部分烧结厂由于场地受限，往往烧结主抽风机与脱硫脱硝之间的烟道布置会比较紧凑，造成弯头多、弯头半径小、弯头拐弯角度大、直段短、联络管(三通)隔板短等不利于气流畅行的因素，见图3。

由图3(a)可以看出，脱硫烟道布置相对紧凑，弯头均为90°，且弯头半径较小，图示的两台主抽风机烟气汇合前的直段亦为上行的爬坡段，此外，两台主抽风机的烟气跟脱硫循环烟气在 A 点区域汇合，且脱硫循环烟气在垂直方向上由上而下直接进入汇合烟道，此处会对两股主抽烟气形成一定的阻力，一定程度上会造成气流不畅。

表 2　某 360 m² 烧结机大烟道烟气参数

Table 2　Gas parameters of each main duct on 360 m² sinter machine

大烟道	对应烧结面积/m²	总阻力/kN	平均负压/kPa	温度/℃	工况流量/(m³·min⁻¹)	标况流量/(Nm³·min⁻¹)
1 号	180	2 422.40	13.46	140.59	16 269.89	9 312.72
2 号	180	2 420.32	13.45	152.01	17 445.93	9 718.66



（a）总体布置图；（b）三通管详图

图 3 某 330 m² 烧结机脱硫烟道布置（mm）

Fig. 3 Layout of desulphurization duct for 330 m² sintering machine

由图 3(b)可以看出，两台主抽风机烟气汇总的三通管中设置有一定数量的导流板，并且设置有隔板，避免两股烟气对冲，但由于汇总后没有一定长度的直段，隔板设置长度有限，不能完全阻隔两股主抽风机烟气相互之间的影响，一定程度上会造成气流不畅。此外，汇总前，两股主抽烟气烟道均为 4 500 mm×5 300 mm，而为了保证脱硫塔中的烟气流速，烟气汇合后需要提速，汇总烟道的截面积大幅减小，为 5 300 mm×5 300 mm，在该处亦会对气流形成一定的阻力，造成气流不畅。

3 主抽风机运行状态的影响

每台风机均有其相对应的性能曲线，在最佳工况点的左侧为非稳定区，表现为高负压、低流量，在最佳工况点右侧为稳定区，表现为低负压、高流量，具体见图 4。

在非稳定区，当工况出现波动时，风机做功无法找到平衡点。当流量减小到一定程度，叶片进口气流冲角增大到一定程度时，叶片背面出现脱流，引起失速。

当风机处于不稳定区运行时，流量压力的大幅波动会引起管路的剧烈振动。风机喘振是旋转失速的发展，但旋转失速不一定都会发展到风机喘振。管网容量越大，喘振的振幅越高，频率越低，喘振越严重，破坏性越强。

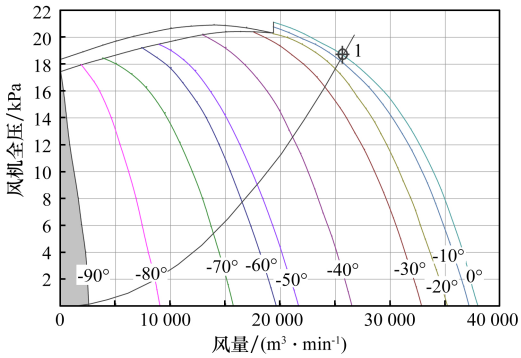
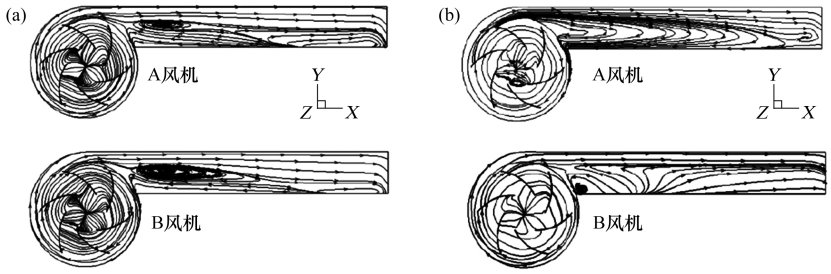


图 4 某 330 m² 烧结主抽风机性能曲线

Fig. 4 Performance curve of main exhausting fan for 330 m² sintering machine

风机失速的直观现象为通风量低于最小流量，根本原因为高负压的情况下，通过系统的风量小，使得风机在非稳定区运行。

当两台风机并联运行时，风机出口通过连通管相接，风机受到管道系统及另一台并联风机的双重作用。当两台风机在相同的频率及风门开度的情况下，系统的负压及风量满足风机在稳定区运行的条件，则两台风机均平稳运行；而当系统的负压及风量满足不了风机在稳定区运行的条件时，一般体现为高负压低流量，则会导致一台风机失速运行而另一台风机在失速的临界点运行，或者两台风机同时失速运行；如果系统工况条件进一步恶化，则可能导致风机本身喘振。具体情况如图 5 所示。



（a）两台风机同时失速运行；（b）A 风机失速运行，B 风机平稳运行

图 5　并联运行离心风机出口气流分布[12]

Fig. 5　Outlet air distribution of centrifugal fan in parallel system

如图 5(a)所示，当系统进入失速工况时，两台风机叶轮流道间均出现了涡流，阻碍流体的流动，且程度近似。同时在蜗壳出口与管道连接的位置也出现了范围较大的涡流，造成管路喘振。随着失速现象的进一步恶化，两台风机流量会有差异，产生误差的原因是风机由未失速状态进入失速的临界态，系统处于不稳定的状态，对外部环境的扰动响应极为灵敏。即便在同等的边界条件下，两台风机的流量也有约 10% 的差距。

对于实际的系统来说，管路特性与风机转速并不可能完全一致。如果一台风机完全进入失速状态，另一台风机平稳运行或在失速临界点运行，系统负荷主要由平稳运行或在失速临界点运行的风机承担，俗称为“抢风”。如图 5(b)所示，B 风机内部流场明显好转，失速运行的 A 风机进口处产生涡流，阻碍流体的流动，同时 A 风机出口管道产生大范围回流现象，气流无法正常流动。而平稳运行的 B 风机，其管路中的气流相对平稳，此情况下两台风机的流量差异变大，A 风机流量小于 B 风机的流量，系统发生明显“抢风”现象。

4　生产操作的影响

针对烧结机主抽风机出口烟道振动的问题，对某 330 m^2 烧结机进行了调试，在料层厚度为 750 mm，烧结机机速为 2.0 m/min 的工况条件下，保持风机风门开度不变，逐步提高主抽风机的运行频率，每一个频率下均保证混合料从机头运行至机尾，约 40 min，调试情况见图 6。

由图 6 可以看出，随着风机频率的提高，风机入口负压及风机电流均逐步提高；风机的风量在风机频率提高到 44 Hz 时达到最大值，随着风机频率继续逐步提高至 48 Hz，风机的风量反而降低。本调试周期，主抽风机出口烟道轻微振动，烧结系统基本平稳运行。在风机频率逐步提升的过程中，主抽风机的功率伴随着风机电流的提高而逐步增大，系统风量不增反而略减，调试过程中，烧结机利用系数一直维持在约 1.45 t/(m^2·h)。因此，增大的风机功率基本用于克服系统阻力，对烧结机增产无明显效果。

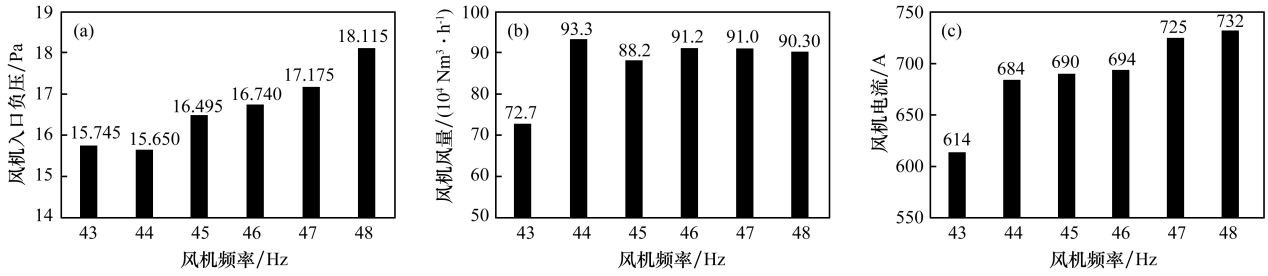
在主抽风机高频率及高负压的工况条件下，测试料层高度、烧结机运行速度及风机频率变化对主抽风机系统参数及出口烟道振动情况的影响，相关参数见表 3。

在调试过程中，脱硫脱硝增压风机的风门开度及电流基本保持不变，其通过调节循环烟道的阀门开度来保证循环流化床内的烟气流量，即烧结烟气量少时，循环烟道风门开度增大，烧结烟气量大时，循环烟道风门开度减小。

调试 1→调试 2，料层高度由 820 mm 提高到 850 mm，风机入口负压增大，风量反而降低，主抽风机出口烟道出现明显振动情况；而调试 2→调试 3，进一步提高料层高度，并降低烧结机机速，风机入口负压进一步增大，风量进一步降低，两台风机均处于高负压、低流量的非稳定工作区，主抽风机出口烟道振动情况加剧。

调试 5→调试 6，调节其中一台风机的频率对另一台风机的运行参数影响较大，两台风机的电流及风量发生反转，即出现“抢风”现象。当“抢风”发生时，被“抢风”的风机不仅电流低、风量低，而且其电流波动大、风量波动大，其对应的出口烟道振幅更为剧烈。

在每台风机对应的出口烟道上开孔，用皮托



(a) 入口负压；(b) 风机风量(两台风机总计)；(c) 风机电流(两台风机总计)

图 6 主抽风机频率变化对入口负压、风量及电流的影响

Fig. 6 Influence of frequency change of main exhausting fan on inlet pressure, air volume and current

表 3 不同操作条件下主抽风机系统参数

Table 5 Parameters of main exhausting system under different operating conditions

调试时间序	料层厚度/mm	上料量/($t \cdot h^{-1}$)	机速/($m \cdot min^{-1}$)	主抽频率/Hz		电机电流/A		风门开度/%		进口负压/kPa		标况风量/(10^3 $Nm^3 \cdot h^{-1}$)	
				1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#	1#	2#
调试 1	820	700	2.2	48	48	330	354	80	80	17.82	17.96	39.0	47.3
调试 2	850	700	2.2	48	48	325	351	80	75	18.04	18.22	37.5	41.8
调试 3	870	700	2.1	48	48	299	330	80	70	18.80	18.91	30.5	33.5
调试 4	870	600	1.9	47	46	310	277	90	80	18.10	17.83	31.6	30.6
调试 5	870	600	1.9	47	46	324	261	80	70	18.01	17.53	33.9	24.0
调试 6	870	600	1.9	47	47	264	303	80	70	18.12	18.24	26.8	35.1
调试 7	870	600	1.8	47	47	280	312	90	80	18.19	18.32	28.2	35.1

注：1#、2#分别表示烧结机的两台主抽风机。

管测量烟道内流场分布(同一个烟道的南、北两侧均开孔测量)，当振动发生时，同一个烟道内烟气流场不均匀，一侧风速大，一侧风速小甚至无风，流场有死区，且同一个烟道的南、北两侧在不同的工况条件下其流场分布又各不相同，即某一工况条件下南侧有风北侧无风，另一工况条件下南侧无风北侧有风。此现象与图 5 所示情况基本吻合。

通过调试可以发现，在适当厚度的烧结料层下，两台主抽风机可以在相对稳定的工作区运行，但风机频率提高到一定程度后，再继续增加频率，风机的风量并不会随之增加，反而会降低，风机入口负压却明显增加；继续提高料层厚度，料层透气性变差，当料层厚度超过适宜值后管网阻力显著提升。这两种情况都会使风机处于高负压、低流量的非稳定区运行，系统对工况变化的敏感性变高，风机出口烟道振动幅度加剧。当管网阻力增大，系统出现振动时，人为打开大烟道冷风阀，风机压头明显下降，风机随即落入稳定区运行，系统振动现象消失。以上现象均说明风机高负压运行取决于良好的料层透气性，仅靠持续提高风机频率和增加压头来提高抽风量会适得其反。

此外，根据热传导原理，烧结所需的理论标况风量(不考虑无效风)为 1 200 Nm^3/t[13]。一般而言，烧结厂的利用系数大多在 1.3 ~ 1.5 $t/(m^2 \cdot h)$，按主抽风机入口负压为 18 kPa，烟气温度为 130 ℃，则单位烧结面积所需的理论工况风量为 46.7 ~ 53.9 $m^3/(m^2 \cdot min)$，考虑到系统漏风，烧结主抽风机的选型远远大于该风量。《烧结厂设计规范》所规定的烧结主抽风机平均工况风量宜取(90 ± 5) $m^3/(m^2 \cdot min)$，亦考虑到了 40% ~ 45% 的系统漏风率。在烧结机投运初期，烧结系统密封性良好，主抽风机的入口阀门开度或频率一般不会全开，而随着烧结机的运行时间越来越长，其密封性能越来越差，主抽风机的入口阀门逐步增大或频率逐步提高。

5　结论与建议

料层的透气性、主抽风机与脱硫脱硝之间的烟道设计、烧结系统的操作等均可造成主抽风机出口烟道振动。

（1）良好的料层透气性是保证抽风系统稳定运行的前提，制粒条件一定的情况下，适宜的料层厚度与原料条件有关。在生产过程中需找到料层高度、风机频率的最佳契合点，以便烧结系统在更高效、更经济的状态下运行。

（2）烟道设计应利于气流顺行，如烟道需有一定的平缓度、设置合适的导流板及隔板等。

（3）烧结系统主抽风机应与脱硫脱硝系统增压风机协同调节，两台风机的运行均需吻合其性能曲线，任何一台风机处于非稳定区运行，都将对整个抽风系统形成阻碍，从而导致另一台风机的异常运行。

（4）当主抽风机出口烟道振动明显时，可通过降低烧结机速度、降低烧结料层厚度、提升混合料制粒效果以及开启冷风阀等降低系统负压或提高系统风量的措施予以缓解或消除。

参考文献：

[1] 贺先新．浅析武钢厚料层烧结的发展[J]．烧结球团，2004，29(3)：1－5.
HE Xianxin. Development of deep-bed sintering in Wugang[J]. Sintering and Pelletizing, 2004, 29(3): 1－5.

[2] 邹凡球，赵改革，梁高铭，等．湘钢 360 m^2 烧结机 920 mm 厚料层烧结生产实践[J]．烧结球团，2019，44(3)：6－9；17.
ZOU Fanqiu, ZHAO gaige, LIANG gaoming, et al. Production practice of 920 mm deep-bed sintering for 360 m^2 sinter machine of Xiangsteel[J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(3): 6－9; 17.

[3] 张群山，郑兴荣，徐冰，等．马钢 380 m^2 烧结机“小风量、低负压、超厚料层”技术创新与实践[J]．烧结球团，2017，42(3)：36－41.
ZHANG Qunshan, ZHENG Xingrong, XU Bing, et al. Practice of decreasing olid fuel consumption of 380 m^2 sintering machines in Maanshan Iron and Steel Co., Ltd[J]. Sintering and Pelletizing, 2017, 42(3): 36－41.

[4] 阚永海．超厚料层烧结技术应用研究[J]．河南冶金，2020，28(5)：1－3；43.
KAN Yonghai. Research on application of sintering technology for super thick material layer[J]. Henan Metallurgy, 2020, 28(5): 1－3; 43.

[5] 阚永海．天钢联合特钢 1 000 mm 超厚料层烧结生产实践[J]．山东冶金，2020，42(3)：9－11.
KAN Yonghai. 1 000 mm deep-bed sintering practice at Tiangang United Special Steel[J]. Shandong Metallurgy, 2020, 42(3): 9－11.

[6] 华旭军，杨鲁光，谢超雄，等．济钢 400 m^2 烧结机抽风系统工艺设备改造[J]．四川冶金，2011，33(5)：62－65.
HUA Xujun, YANG Luguang, XIE Chaoxiong, et al. The manufacturing process equipment of 400 m^2 sintering waste gas system at Jigang[J]. Sichuan Metallurgy, 2011, 33(5): 62－65.

[7] 李忠斌．烧结主抽风机与脱硫风机的喘振分析及改进措施[J]．烧结球团，2016，41(3)：8－12；30.
LI Zhongbin. Analysis of surge problems of main sintering exhauster fan and desulfurization and improvement measures[J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(3): 8－12; 30.

[8] 周景伟，闫武装，崔志广．引起烧结烟气脱硫设备振动的原因及对策建议[J]．工业技术创新，2014，1(1)：61－65.
ZHOU Jingwei, YAN Wuzhuang, CUI Zhiguang. The reason and countermeasures & suggestions for equipment vibration of sintering flue gas desulphurization[J]. Industrial Technology Innovation, 2014, 1(1): 61－65.

[9] 苏睿，林海涛，王小平．基于仿真的烧结生产建模与振动分析[J]．计算机仿真，2009，26(4)：352－356.
SU Rui, LIN Haitao, WANG Xiaoping. Modeling of sintering production and analysis of vibration based on simulation[J]. Computer Simulation, 2009, 26(4): 352－356.

[10] 郭英．400 m^2 烧结机风箱支管风量控制装置的改造[J]．烧结球团，2007，32(2)：43－45.
GUO Ying. Modification of wind volume controlling device of wind box branch pipe[J]. Sintering and Pelletizing, 2007, 32(2): 43－45.

[11] 王兆才，周志安，胡兵，等．烧结烟气循环风氧平衡模型[J]．钢铁，2015，50(12)：53－59.

（下转第 80 页）

2010.

[13] 张福顺,赵增武,冯乃祥,等. 铁铌共生矿冷固结含碳球团成型工艺研究[J]. 烧结球团,2012,37(1):42 – 45.
ZHANG Fushun, ZHAO Zengwu, FENG Naixiang, et al. Study on shaping technology of carbon-containing cld-bound pellet of Fe-Nb associated ores[J]. Sintering and Pelleting,2012,37(1):42 – 45.

[14] 甘胤,王吉坤,包崇军,等. 冷压球团技术在冶金中的研究进展[J]. 矿产综合利用,2014(1):10 – 15.
GAN Yin, WANG Jikun, BAO Chongjun. Research progress of cold-pressing pelletizing technology in metallurgy[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2014(1):10 – 15.

[15] 刘征建,王榕榕,刘依然,等. 冷固结球团用地聚合物黏结剂制备参数优化[J]. 钢铁,2019,54(2):15 – 19.
LIU Zhengjian, WANG Rongrong, LIU Yiran, et al. Preparation parameters optimization of geopolymer binder for cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel,2019,54(2):15 – 19.

[16] 王榕榕,张建良,刘征建,等. 新型黏结剂强化冷固结球团的作用机理[J]. 钢铁,2017,52(11):9 – 14.
WANG Rongrong, ZHANG Jianliang, LIU Zhengjian, et al. Hardening behavior and mechanism of a new type of binder on cold-bonded pellets[J]. Iron and Steel, 2017,52(11):9 – 14.

[17] 张汉泉. 烧结球团理论与工艺[M]北京:化学工业出版社,2018:272.
ZHANG Hanquan. Theory and technology of singtering and pelletizing[M] Beijing: Chemical Industry Press, 2018:272.

(上接第39页)

[15] 陈伟,邢建民,王凯. 澳大利亚FMG粉矿烧结性能的实验研究[J]. 金属世界,2007(2):26 – 27.
CHEN Wei, XING Jianmin, WANG Kai. Experimental study of sinter about Australian FMG fine ore[J]. Metal World,2007(2):26 – 27.

[16] 赵晓文,李荣玲. FMG粉烧结性能研究[J]. 河北冶金,2010(1):30 – 31.
ZHAO Xiaowen, LI Rongling. Research on sintering property of FMG powder[J]. HEBEI Metallurgy, 2010(1):30 – 31.

[17] 刘振林,杨金福,冯根生,等. 高配比褐铁矿的烧结试验研究[J]. 钢铁,2004,39(12):9 – 13.
LIU Zhenlin, YANG Jinfu, FENG Gensheng, et al. Study on sintering test with high ratio of limonite[J]. Iron and Steel,2004,39(12):9 – 13.

(上接第47页)

WANG Zhaocai, ZHOU Zhian, HU Bing, et al. Wind-oxygen balance model of flue gas circulation in sintering [J]. Iron and Steel,2015,50(12):53 – 59.

[12] 赵晓东,王天明,王萌,等. 离心变频风机并联运行的失速特性分析[J]. 现代电力,2013,30(2):48 – 52.
ZHAO Xiaodong, WANG Tianming, WANG Meng, et al. Stalling characteristics analysis of centrifugal frequency conversion fan in parallel system[J]. Modern Electric Power,2013,30(2):48 – 52.

[13] 叶恒棣. 钢铁烧结烟气全流程减排技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2019.
YE Hengdi. Flue gas full-process emission reduction technology for sintering of iron and steel[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2019.