料面有效风量和烧结机漏风率计算新方法

曹欣川洲，刘自民，周劲军，唐嘉瑞，饶 磊，黄琼玲
（马鞍山钢铁股份有限公司，安徽 马鞍山 243000）

摘 要： 烧结机漏风是关系烧结能耗、产量及成本等的重要技术指标。为了能更精准地测定烧结机漏风率，在新型料面风速法的基础上，考虑料面风量波动情况，使用曲线积分法代替算数平均值法，减少时间段 ΔT 对有效风量计算值的影响，使得有效风量计算值更接近实际值；并将新方法在某 380 m^2 烧结机上进行验证。测试结果表明：料面有效风量和烧结机漏风率计算方法准确可靠，能帮助现场工作人员掌握系统的漏风情况，为生产提供指导。

关键词： 烧结机；漏风率；有效风量；测试
中图分类号： TF3；TH113；TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2020)04－0018－04
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.04.049

A new method of calculating effective air volume of material surface and air leakage rate of sintering machine

Cao Xinchuanzhou，Liu Zimin，Zhou Jinjun，Tang Jiarui，Rao Lei，Huang Qiongling
(*Ma'anshan Iron & Steel Co.,Ltd.,Ma'anshan* 243000,*Anhui*)

Abstract Air leakage of sintering machine is an important technical index related to sintering energy consumption,output,cost,etc. To measure the air leakage rate of the sintering machine more accurately,based on wind speed method of new material surface,the fluctuation of the air volume of the material surface is considered,the arithmetic mean method is replaced by the curve integral method,the influence of ΔT on the calculated value of the effective air volume is reduced to make the calculated value of effective air volume is closer to the actual value,and a test is made in a 380 m^2 sintering machine. The result shows that the calculation method of calculating effective air volume of material surface and air leakage rate of sintering machine is accurate and reliable,which can help field staff grasp the air leakage of the system and provide guidance for production.

Key words sintering machine; air leakage rate; effective air volume; test

烧结机漏风是影响烧结能耗、产量及成本等的重要技术指标。通过测试掌握烧结机漏风情况，有针对性地开展烧结机漏风治理及生产调整，从而使烧结机达到最佳的生产状态，能够提升烧结经济技术指标及降低生产成本等[1-4]。

用于测量烧结机漏风率的方法有很多，目前应用较为广泛的是料面有效风量法。该方法能够直接测量烧结过程的有效风量，对烧结生产调整有较大的指导意义，且该方法操作简单、不影响现场生产，但该方法对料面有效风量的测试及计算要求严格，若有效风量测试不准确，则会导致计算结果与实际的漏风率之间存在较大差异[5-8]。为了能更精准、便捷地测定烧结机的漏风率，考虑到料面风量波动情况，在对有效风量计算时，使用曲线积分法，减少时间段 ΔT 对有效风量计算值的影响。

1 漏风率计算方法

料面风速法[9]计算漏风率：采用热球式风速仪测量料面各点风速，估算通过料面的风量，将其作为有效风量(Q_E，m^3)；伴随物料烧结过程的进行，生成的烟气量(Q_S，m^3)通过固定 C

收稿日期： 2019－07－18
作者简介： 曹欣川洲(1995—)，男，助理工程师，主要从事烧结节能减排方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

燃烧，以及混合料水分、原料碳酸盐中 CO_2 的质量分数、S 的质量分数等进行计算得出，并将其和生产时的主抽风机风量(Q_C，m^3) 结合进行校核。漏风率(Q_L，%) 可由式(1) 计算得出。

$$Q_L = (Q_S - Q_E) / Q_S \times 100\% \quad (1)$$

新型料面风速法[10] 在原方法的基础上进行了优化，在对有效风量计算时考虑了混合料中的水由液态转变为气态的量(Q_W，m^3) ，使其能够更准确地体现烧结系统的漏风率情况，降低测定误差。漏风率(Q_L,%) 可由式(2) 计算得出。

$$Q_L = (Q_S - Q_E - Q_W) / (Q_S - Q_W) \times 100\% \quad (2)$$

在新型料面风速法的基础上，运用网格划分和曲线积分的原理，对料面有效风量(Q_E) 进行优化计算。新方法总体思路：在对烧结机进行漏风测试时，记录整个烧结过程中的风速变化，将检测装置的记录时间间隔设为 ΔT，台车运行速度设为 v；对烧结机的料面进行网格划分，先以每个检测装置为纵向网格线，将其划分为 n 列，再等间距画出横向网格线，形成交叉网格；使用检测装置记录烧结全过程风速的变化情况，以两侧的纵向网格线的风速波动结果拟合出当前列网格的风速波动曲线 $F(t)$，对波动曲线 $F(t)$ 进行积分就能得到该列网格在单位时间内通过的有效风量。

使用该种方法计算得到的有效风量，能反映出烧结过程中各段的风量变化情况，其与均值法计算有效风量的结果相比更为准确。

2　烧结机漏风率的测试及计算

2.1　料面有效风量的测定

使用叶轮式风速仪在烧结料面测定有效风速，测量时设置横向测点数为 5 个(不少于 3 个) [11] 。由于烧结过程中，烧结料层的进风量与烧结料层的透气性相关，因此对料面进行区域划分，划分时按以下原则：以每个测点位置为边界(对于两侧边缘区域，以台车栏板和边缘测点为边界) 将料面划分为若干个区域，对单个区域在时间轴上进行纵向划分(图 1) 。

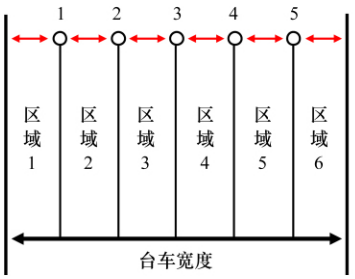


图 1　料面区域划分示意

在数据处理时，单个网格风速按网格两侧测点的风速所确定(边缘网格风速使用边缘测点风速代替) ，根据网格风速计算出通过单个网格的流量，根据两侧测点风速曲线，拟合出单个区域内风速波动曲线 $F(t)$。对单个网格内的流量可通过对曲线积分得到，其可由式(3) 计算得出。

$$Q_n = \sum_{i=1}^{a} S_i \int_{t_{i-1}}^{t_i} F(t)\,dt \quad (3)$$

式中：其中 S_i 为第 i 个网格的面积，m^2；$t_i - t_{i-1}$为第 i 个网格的测试时间，s；$F(t)$ 为单个区域在烧结过程中的流速拟合函数；a 为区域网格总数；Q_n 为第 n 个区域在整个烧结过程中通过的总风量，m^3。

整个料面的有效风量按式(4) 计算：

$$Q_E = \sum_{i=1}^{n} Q_n \quad (4)$$

式中：Q_E 为料面的总风量，m^3；Q_n 为第 n 个区域在整个烧结过程中通过的有效风量，m^3。

2.2　烟道总风量测定

烟道总风量使用全自动烟气分析仪测量，即：通过测量烟气成分，使用皮托管测量烟气的动、静压，从而计算得出大烟道总风量。具体测试方法[12]：测点应选择在管道垂直处，避免选择在烟道拐弯处和断面变化急剧的部位(采样位置应当设置在离阀门、弯头、变径管的下游方向，且大于等于 6 倍直径位置；或离上述位置上游方向大于等于 3 倍直径位置) ；测试时将烟道分成若干数量的等面积同心环，测点应当选在环内等面积中心线与其垂直相交的两条直径线的交点上，至少有 1 条直径线应在预测质量浓度变化最大的平面内。测点采样分布如

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图2所示。

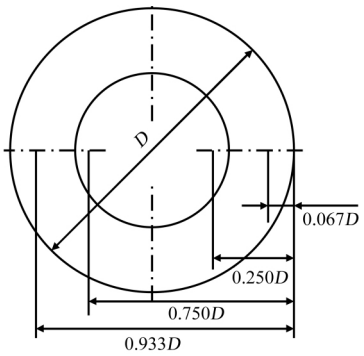


图2 烟道测点分布示意

烟道总风量(Q_S，m^3)按式(5)进行计算:

$$Q_S = 3\ 600FK_p\sqrt{0.2H_d}\sqrt{13.6gR_sT_s/B_s} \quad (5)$$

式中: F 为烟道截面的面积，m^2; K_p 为皮托管系数; g 为重力加速度，m/s^2; H_d 为烟气动压，Pa; R_s 为烟气气体常数，$m^2/(kg\cdot K)$; T_s 为烟气的绝对温度，K; B_s 为烟气的绝对压力，Pa。

2.3 水蒸气总量的测定

测量混合料中水的质量分数[13]和混合料的堆密度后，将其带入公式(6)可以确定烧结料中水蒸气的量。

$$Q_w = \frac{22.4SH\rho\alpha}{18} \quad (6)$$

式中: Q_w 为气态水的总量，m^3; S 为烧结料面的总面积，m^2; H 为烧结料层的厚度，m; ρ 为测量得出的混合料堆密度，kg/m^3; α 为混合料中水所占的质量分数，%。

将上述所有测量值换算为标准值(即标准状态下的风量: $Q_{S标}$、$Q_{W标}$、$Q_{E标}$)，带入式(7)，即可得到烧结系统的漏风率(K，%)。

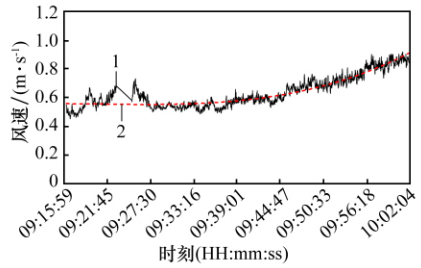
$$K = \frac{Q_{S标} - Q_{W标} - Q_{E标}}{Q_{S标} - Q_{W标}} \times 100\% \quad (7)$$

3 结果与讨论

3.1 料面有效风量的计算结果

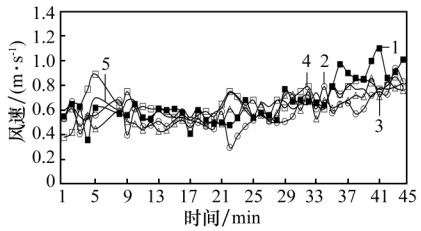
采用改进后的新型漏风率测试方法对某380 m^2烧结机进行漏风率测试，将料面划分为6个部分(图1)，对数据进行整理，得到单个区域和烧结机的风速变化如图3、4所示。

由图3可知: 单个区域的料面风速波动情况较为复杂; 随着烧结过程的进行，料面风速变化在整体上呈上升趋势，其在烧结终点处达到最大值。烧结过程中各段存在明显的风速波动，因此在对有效风量进行计算时，若一味采用平均值法，则会造成计算结果与实际有效风量之间存在较大的误差。使用对拟合曲线积分的方法，能够更好地反映各段的风速波动特性，使得计算结果更贴近实际有效风量，可以降低计算误差，提高漏风率测试的准确度。



1—料面风速线; 2—料面风速趋势线。

图3 单个区域料面风速变化情况



1—测点1; 2—测点2; 3—测点3; 4—测点4; 5—测点5。

图4 烧结机料面风速变化情况

由图4可知: 在烧结过程中，横向料面的风速波动较为剧烈，在烧结前、中、末期均存在离散较大的位置。该离散现象表明，在同一时刻，横向料面风速存在较大的波动。若排除料面自身的透气性的影响，则造成此现象的主要原因可能是该位置的风箱漏风、台车漏风、风门开度大等。若采用其他方法测量料面风速时，不能直观反映烧结过程中横向料面的漏风情况，而本文介绍的方法在数据处理时可以直接观察到风速的波动情况，为烧结生产、漏风治理提供指导性建议。

烧结料面各区域的有效风量和有效总风量如表1所示。由表1可知: 沿台车长度方向，料面的有效风量分布大体上呈现中间高两头低的趋势。造成该现象的主要原因是在测试过程

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中进行区域划分时，区域 1 和区域 6 的总面积相对较小，而其他区域的面积均相等。此外，使用曲线积分法计算出的烧结机料面有效总风量为 8.98×10^5 m^3/h，若对测量数据使用平均值法进行处理，则料面的有效总风量为 7.98×10^5 m^3/h。这两种方法计算的料面有效总风量计算结果相差约为 1.0×10^5 m^3/h，误差率达到 11.09%。结合现场主抽风机负载及烧结机现场生产情况，并对计算结果进行对比可知，使用曲线积分法的计算结果较平均值法更符合现场实际情况。

表 1　采用曲线积分法计算的烧结料面各区域的风量　　m^3/h

区域 1	区域 2	区域 3	区域 4	区域 5	区域 6	有效总风量
1.12×10^5	1.77×10^5	1.74×10^5	1.66×10^5	1.63×10^5	1.06×10^5	8.98×10^5

3.2　漏风率的计算结果

对烟道测试数据、水分等进行整理分析，将工况风量换算为标准状况下的风量带入式(7)中就可计算出烧结系统的漏风率，结果分别如表 2、3 所示。

表 2　烟道测试数据

烟道编号	烟气密度 /(kg·m^{-3})	烟气温度 /℃	烟气静压 /kPa	烟气动压 /Pa	烟道截面积 /m^2	烟道工况风量 /(m^3·h^{-1})	烟道标况风量 /(m^3·h^{-1})
1 号烟道	0.75	144.25	−12.46	132.25	22.06	1.254×10^6	7.30×10^5
2 号烟道	0.77	129.75	−13.52	86.75	22.06	1.003×10^6	5.98×10^5

表 3　水分及其他测试数据和漏风率计算

混合料堆密度 /(kg·m^{-3})	混合料水分质量分数/%	有效烧结面积/m^2	标准水蒸气量 /(m^3·h^{-1})	料面总风量 /(m^3·h^{-1})	料面标况风量 /(m^3·h^{-1})	漏风率 /%
1 673.76	7.09	380	6.43×10^4	8.98×10^5	8.15×10^5	35.51

由表 2 可知：测试的 380 m^2 烧结机有高 S(1 号)和低 S(2 号)两条烟道，因此烟道总风量是两条烟道风量之和，其值为 2.257×10^6 m^3/h；烧结系统的漏风率为 35.51%。结合烧结机主抽变频运行变化情况看，测试结果与现场烧结机设备状况较为符合。漏风率较低的主要原因：在测试前不久刚完成烧结机检修计划，并且在烧结机漏风治理方面开展了一些工作，因此漏风率较低。

4　结　论

(1) 计算料面有效风量时，对现有的料面风速法进行改进，使用曲线积分法代替平均值法，减少时间段 ΔT 对有效风量计算值的影响，使得有效风量计算值和实际值更接近。

(2) 对同一组测试数据分别采用平均值法和曲线积分法进行计算，使用积分法计算得到料面的有效风量为 8.98×10^5 m^3/h，而使用平均值法计算得出的料面有效风量为 7.98×10^5 m^3/h，这两种方法的料面有效风量计算结果相差约为 1.0×10^5 m^3/h，误差率达到 11.09%。对比结果表明，使用曲线积分法计算的结果更符合实际情况，且使用曲线积分法较平均值法的计算结果准确度提升约 11%。

(3) 采用改进后的新型料面风速法对某 380 m^2 烧结机漏风率进行测试，测试结果显示烧结机漏风率为 35.51%，其与现场烧结机运行的状况吻合，证明该测试方法准确可行。

参考文献

[1] 龙红明. 铁矿石烧结过程热状态模型的研究与应用[D]. 长沙：中南大学，2007.

[2] 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.

[3] 宋新义，李文辉. 烧结机系统漏风率测定技术的研究[J]. 能源与节能，2013(8)：51－53.

(下转第 34 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

辊磨进行预处理。在膨润土用量仅为1.5%的条件下，不同配矿方案均可制备出强度高、热稳定性好的合格生球。在一定范围内，配加细磨轻烧白云石和焦化除尘灰均能改善生球落下强度，但会导致生球爆裂温度降低。

(2) 针对上述生球，适宜的热工制度：鼓风干燥温度为240～300 ℃，干燥时间为6 min，风速为1.2 m/s；抽风干燥温度为200～240 ℃，干燥时间为8 min，风速为1.2 m/s；预热温度为850～950 ℃，预热时间不少于12 min，风速为2.2 m/s；焙烧温度为1 150～1 200 ℃，焙烧时间不少于10 min，风速为2.2 m/s；均热温度为950～1 000 ℃，均热时间为3～5 min，风速为1.8 m/s。在此条件下，焙烧球团强度达到大型高炉冶炼要求，结合其冶金性能，推荐75% MK+25% XNK或50% MK+25% XNK+25% AMC两个配矿方案。提高MgO质量分数和焦化除尘灰占比均对成品球团强度不利，因此MgO质量分数应小于2.0%，不建议添加焦化除尘灰。

(3) 考虑到现有配矿方案在多数情况下不能很好地兼顾冷态强度和冶金性能，建议后续进一步增加原料种类，优化球团原料结构，改善产品质量，充分发挥球团矿产品强化高炉冶炼的优势。

参考文献

[1] Zhu Deqing. Improving the pelletization of Brazilian hematite by HPGR [C]//3rd Symposium on Iron Ore Pelletizing. Quebec: COREM,2013.

[2] 王维新. 提高高炉炉料中球团矿配比、促进节能减排[J]. 冶金管理,2018,355(9):55－60.

[3] 杨晓东,张丁辰,刘锟,等. 球团替代烧结——铁前节能低碳污染减排的重要途径[J]. 工程研究－跨学科视野中的工程,2017,9(1):44－52.

[4] 许满兴. 论我国高炉炉料结构的未来与高品质球团矿生产[N]. 世界金属导报,2019－12－03(B08).

[5] Oja K. Straight grate vs rotary kiln [C]//3rd Symposium on Iron Ore Pelletizing. Quebec: COREM,2013.

[6] 朱德庆,黄伟群,杨聪聪,等. 铁矿球团技术进展[J]. 烧结球团,2017,42(3):42－49.

[7] 韩志国. 大型带式焙烧机球团技术的研究与应用[N]. 世界金属导报,2013－08－27(B16).

[8] 潘建,王硕,甘牧原,等. 带式焙烧机制备镁质球团的工艺及机理研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):27－33.

[9] 任伟,韩基祥. 带式焙烧机球团技术开发与应用[N]. 世界金属导报,2017－06－20(B07).

[10] 马成伟,郑朋超,陈艳波. 首钢京唐焦化除尘灰的回收利用[J]. 河北冶金,2015(10):79－82.

[11] 李晓芹. 内配碳在赤铁矿氧化球团制备中的行为研究[D]. 长沙:中南大学,2009.

[12] 沈文俊. 燃料与熔剂在巴西赤铁矿氧化球团中的行为及机理研究[D]. 长沙:中南大学,2011.

(上接第21页)

[4] Fan X H,Jiang L J,Chen X L. Air leakage online monitoring and diagnosis model for sintering [C]//3rd International Symposium on High－Temperature Metallurgical Processing. New Jersey: John Wiley & Sons,Inc.,2012.

[5] 吴颖,金永龙. 烧结机本体漏风率在线测量技术及应用[J]. 烧结球团,2008,33(4):9－12.

[6] 高彦,么占坤,孙长征,等. 烧结机漏风治理技术方案[J]. 烧结球团,2004,29(1):38－42.

[7] 金永龙,徐南平,邬士英,等. 烧结机分区段漏风测试技术研究及应用[J]. 钢铁,2003,38(3):1－3.

[8] 刘波,叶恒棣,卢兴福,等. 烧结机低漏风综合密封技术及其在宝钢湛江的应用[J]. 烧结球团,2018,43(2):48－53.

[9] 王涛,王勇. 浅谈料面风速法则漏风的原理与方法[J]. 酒钢科技,2004(2):36－40.

[10] 王素平,李军. 采用新型料面风速法测定烧结系统漏风率[C]//中国计量协会冶金分会2014年会暨能源计量与绿色冶金论坛. 宜昌:中国计量协会冶金分会,2014.

[11] 夏建芳,封溢,刘继佼,等. 烧结机漏风率测点布局方案研究[J]. 计算机仿真,2014(7):212－215.

[12] 国家环境保护局. 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996.

[13] 方景林,王燕,张国德. 烧结混合料水分测量方法的研究[J]. 传感器与微系统,2000,19(1):36－38.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net