带式焙烧机球团技术的应用及研究进展

余海钊[1,2]，廖继勇[1]，范晓慧[2]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙，410205；2. 中南大学 资源加工与生物工程学院，湖南 长沙，410083)

摘 要： 随着赤铁矿、褐铁矿等进口矿种使用占比的加大，以及国内工业、经济、科技等的快速发展，带式焙烧机球团生产工艺在国内将迎来快速发展。本文对带式焙烧机球团工艺及生产线情况、物质流和能量流进行了介绍和分析，重点阐述了该生产工艺中涉及的高压辊磨原料预处理、新型球团黏结剂、优化配矿、镁质球团制备、焙烧热工制度及温度控制、数值模拟与预测等技术的发展状况，以期为带式焙烧机球团技术的进一步应用和钢铁企业决策提供参考。

关键词： 带式焙烧机；物质流；能量流；原料预处理；黏结剂；优化配矿；热工制度；数值模拟
中图分类号： TF046.6　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2020)04－0047－08
doi： 10.13403/j.sjqt.2020.04.054

Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster

Yu Haizhao[1,2], Liao Jiyong[1], Fan Xiaohui[2]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan*; 2. *Shool of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha* 410083, *Hunan*)

Abstract With the increase of the proportion of hematite, limonite and other imported minerals, as well as the rapid development of domestic industry, economy, science and technology, the pelleting production of belt roaster will usher in a rapid development in China. The technology and production line of belt roaster, the material flow and energy flow are introduced and analyzed, while the development of the pretreatment technology of raw materials for high pressure roller mill, the new type of pelletizing binder, the optimization of ore proportioning and the preparation of magnesium pelletizing, the calcination thermal regulation and temperature control, as well as the numerical simulation and prediction are described in detail. In addition, the corresponding technologies are summarized and prospected in order to provide reference for further application of pelletizing technology of belt roaster and decision making for iron and steel enterprises.

Key words belt roaster; material flow; energy flow; pretreatment of raw materials; binder; optimization of ore proportioning; thermal regulation; numerical simulation

据统计，目前世界氧化球团生产总量约为 4.47 亿 t/a，其中带式焙烧机生产能力占比约为 62%(约 2.77 亿 t)，链箅机－回转窑生产能力占比约为 28.5%，竖炉生产能力占比约为 9.5%[1]。在高炉炉料结构中，欧美国家焙烧球团矿的占比可达 80%～90%，而我国球团矿的使用占比仅为 15%左右[2]；此外，我国目前普遍采用以高碱度烧结矿为主的炉料结构，由于其基于烧结矿渣相链接的固结机理，使高炉入炉成品矿的含铁品位维持在 55%～56%，造成高炉炼铁渣铁比高、利用系数低、燃料比高。因此，大力发展高品质球团矿对我国高炉炼铁节能减排和高质量发展有重要意义[3]。

长期以来，我国带式焙烧机球团产量在全国球团生产总量中的占比均低于 15%，这与 62%的世界水平差距较远。综合来看，其主要

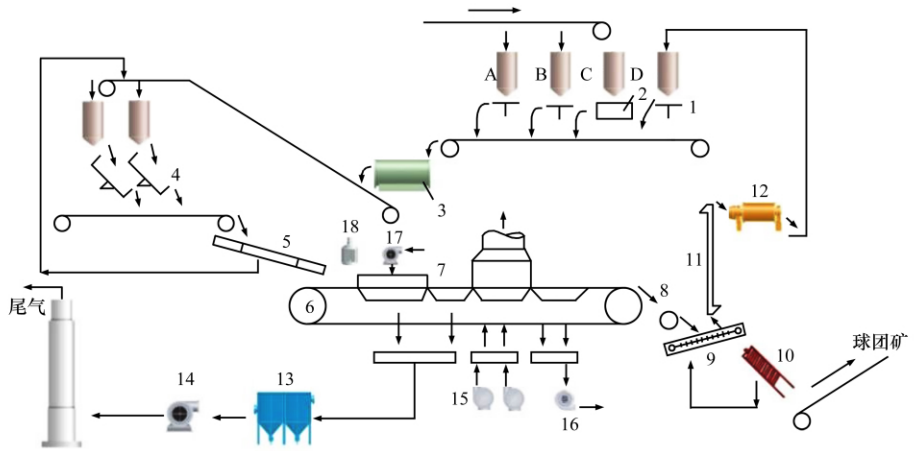
收稿日期： 2019－08－11
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51474237)；湖南省科技创新平台与人才计划(2018TP1033)
作者简介： 余海钊(1985—)，男，博士研究生，编辑，主要从事铁矿烧结球团相关技术研究及论文编审工作。

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

原因[4]：①带式焙烧机对铁矿粉的品质和粒度要求较高，而我国铁矿资源多为贫矿且价格低；②需要更多高热值的燃油或燃气，而我国高炉炼铁普遍采用的是价格低廉的煤粉、焦炉煤气或高炉煤气；③对带式焙烧机台车的铸造材料和工艺要求较高，而过去国内铸造产品普遍存在质量不过关、寿命短、维护成本高等问题。目前链算机－回转窑球团工艺由于结圈问题、工艺流程较长、热效率低、赤铁矿焙烧温度制度调控不灵活等原因，实际产能发挥也遇到了一定“瓶颈”。而带式焙烧机球团工艺具备如下优点：①由于干燥、预热、焙烧、冷却等可以在一个设备上完成，具备占地面积小、建造施工方便、能耗低等优势；②单机产能可以达到 500 万 t/a 以上；③对矿种的适用性强。随着赤铁矿、褐铁矿等进口矿种使用占比的加大，以及国内工业、经济、科技等的快速发展，带式焙烧机球团生产在国内即将迎来快速发展。本文主要概述了带式焙烧机球团工艺和当前的生产线情况，对球团过程物质流、能量流进行了分析，并对相关工艺、装备及技术等的应用及研究现状作了一定梳理、总结和展望，以期可为带式焙烧机球团技术的进一步应用和钢铁企业决策提供参考。

1 带式焙烧机球团工艺及生产线情况

带式焙烧机用于球团矿生产始于 20 世纪 50 年代，其实现方法有固体燃料鼓风法、麦基法和鲁奇－德腊伏法，而鲁奇－德腊伏法是目前运用最为广泛的带式焙烧机法[5]。其工艺流程如图 1 所示。



A—精矿；B—消石灰；C—煤粉；D—返矿；1—圆盘给矿机；2—螺旋给矿机；3—圆筒混合机；4—圆盘造球机；5—辊轴筛和辊式布料机；6—带式焙烧机；7—焙烧炉；8—齿式单辊破碎机；9—链板运输机；10—振动筛；11—斗式提升机；12—双室管磨机；13—多管除尘器；14—抽风机；15—鼓风冷却风机；16—抽风冷却风机；17—助燃风机；18—边料、底料槽。

图 1 鲁奇－德腊伏型带式焙烧机法工艺流程

带式焙烧机工艺流程一般包括 6 个步骤：①布料，先在台车上铺 100 mm 厚的底料，再开始布生球，同时需在台车两侧铺边料；②生球干燥，一般将生球干燥分为鼓风干燥段、抽风干燥段，以强化干燥过程；③预热，使球团由干燥状态向高温焙烧状态顺利过渡，促进结晶水、碳酸盐分解，使磁铁矿氧化完全，并避免球团结构破坏；④焙烧，一般温度为 1 250～1 340 ℃，主要完成固相反应、颗粒再结晶以及形成少量液相；⑤均热，一般不再进行外部供热，主要由冷却段热风由球层上部向下部导热；⑥冷却，一般采用两段鼓风进行冷却，第一段冷却风(750～800 ℃)用于均热带球团保温及二次助燃，第二段冷却风(300～400 ℃)用于抽风干燥段加热及一次助燃。

近 10 年国外大型带式焙烧机生产线的建设情况如表 1 所示[6-7]，而我国带式焙烧机生产线情况如表 2 所示。

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

表 1　近 10 年国外大型带式焙烧机生产线的建设情况

钢铁企业	地点	国别	年份/年	原料	规模/m^2	产量/($Mt \cdot a^{-1}$)
JSW	Dolvi	印度	2018	红矿	816	7.00
Samarco 4	Ponta de Ubú	巴西	2011	红矿	816	9.25
Vale	Tubarao	巴西	2014	赤铁矿	768	7.50
Stoilensky GOK	StaryOskol	俄罗斯	2011	磁铁矿	768	6.00
BIMISCO	Bafgh，Yazd	伊朗	2015	混合矿	720	5.00
GoharZamin	Sirjan	伊朗	2013	混合矿	624	5.00
Gol-e-Gohar 2	Sirjan	伊朗	2012	混合矿	624	5.00
Sail Gua	Jharkand	印度	2014	混合矿	504	4.00
Ternium	Porto do Acu	巴西	2010	红矿	504	3.85

表 2　我国带式焙烧机生产线情况

钢铁企业	投产时间	规模/m^2	产量/($Mt \cdot a^{-1}$)
包钢	1973 年 6 月	162	1.1
鞍钢	1989 年	321	2.1
首钢京唐	2010 年	504	4.0
包钢	2015 年 12 月	624	5.0
首钢京唐(2#)	2019 年 5 月	504	4.3
首钢京唐(3#)	2019 年 6 月	504	4.3
福建三钢闽光	2019 年 12 月	315	2.0
河钢乐亭(2 条)	建设中	760	4.8
柳钢防城港	建设中	504	4.0

由表 1、2 可知：目前国内带式焙烧机的总产量约为 2 170 万 t，其在世界带式焙烧机球团矿总产量中的占比较小，约为 8.2%。随着新建带式焙烧机的陆续建成投产，及其在马钢矿业、太钢矿业、首钢矿业、六安钢铁、山西建邦钢铁青岛邦拓、山钢日照二期、新疆哈密等的陆续规划筹建，带式焙烧机球团的生产技术将更成熟、生产经验将更丰富；此外，随着带式焙烧机设计、施工和装备制造水平的不断提高和相关科研成果的应用，我国带式焙烧机球团产量预计将会有快速提升。

2　球团焙烧过程物质流、能量流分析

对带式焙烧机的物质流、能量流进行分析，可以指导其工艺设计，包括炉窑内各分段长度设置、能量流供给、耐火材料和机架钢材材质选择，以及相关干燥、焙烧和冷却制度。

与烧结过程类似，带式机球团焙烧过程中的风也起着传热载体、提供助燃 O_2 和污染物析出等功能[9]，不过其循环过程更复杂，不仅包括自下而上的鼓风干燥风和冷却风、自上而下的预热风和焙烧风，还包括一冷段的循环均热风。以某 321.4 m^2 带式焙烧机为例，其风流循环(0 ℃、101 325 Pa 下的设计值) 如图 2 所示。

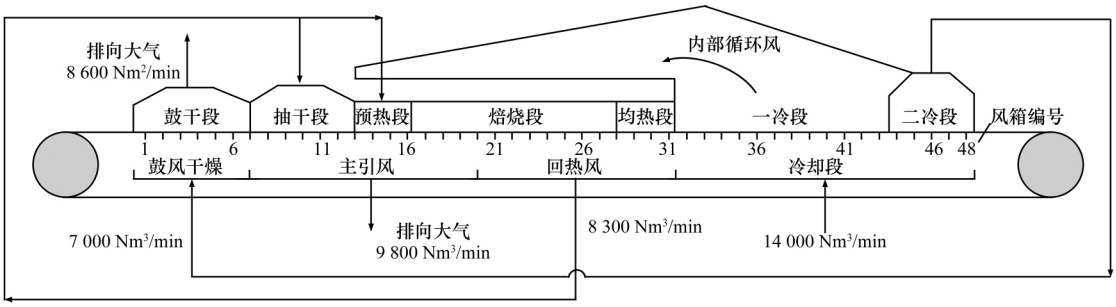
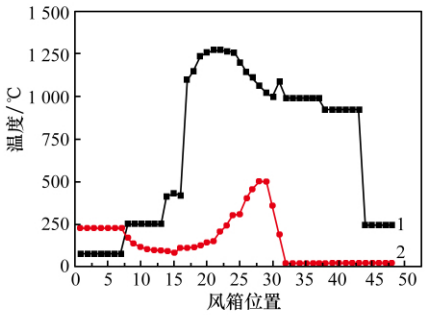


图 2　某 321.4 m^2 带式焙烧机风流循环

由图 2 可知：将带式焙烧机按上部烟罩分为 7 个段，鼓干段为第 1 ~ 7 个风箱位置，抽干段为第 8 ~ 13 个风箱位置，预热带为第 14 ~ 16 个风箱位置，焙烧段为第 17 ~ 28 个风箱位置，均热段

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

为第 29 ~ 31 个风箱位置，一冷段为第 32 ~ 43 个风箱位置，二冷段为第 44 ~ 48 个风箱位置；将下部风箱分为 4 段，第 1 ~ 7 个风箱为鼓风干燥段，第 8 ~ 20 个风箱为主引风段，第 21 ~ 31 个风箱为回热风段；第 32 ~ 48 个风箱为冷却段；整个系统的输入风量为冷却段的 14 000 Nm^3/min，输出风量为主引风段的 9 800 Nm^3/min和鼓干段的 8 600 Nm^3/min；其他风量则用于内部循环利用，如回热风(8 300 Nm^3/min)用于抽干段和预热段的球团干燥和预热，二冷段热风(7 000 Nm^3/min)用于球团鼓风干燥，一冷段热风则直接在烟罩内循环利用。各段风的温度分布如图 3所示。



1—上部烟罩；2—下部风箱。

图 3 带式焙烧机的上部烟罩和下部风箱温度

参考《钢铁行业带式焙烧机焙烧球团热平衡测试与计算方法》(GB/T 34191—2017)，带式焙烧机球团生产的物料收入包括生球、边底料、鼓风冷却气体、气体燃料和漏风等，物料支出包括成品矿、边底料、除尘灰、鼓风干燥气体、引风机排出气体等。以某带式焙烧机的实际生产数据为依据，绘制的物流平衡如图 4 所示。

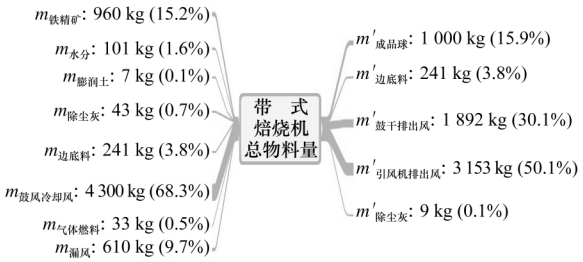


图 4 带式焙烧机物流平衡

焙烧过程中物质和能量转换如式(1)所示，其能量流还包括 S、FeO 氧化放热和碳酸盐分解吸热、水分蒸发热等，据此可得到带式焙烧机球团生产的能量收支情况如图 5 所示。

$$Q_1 = c_{p,s} \cdot G \cdot t_1$$
$$Q_2 = c_{p,g} \cdot V \cdot t_2 \quad (1)$$

式中：Q_1、Q_2 分别为固体、气体介质热量，kJ；$c_{p,s}$为固体介质定压比热容，kJ/(kg·℃)；$c_{p,g}$为气体介质定压比热容，kJ/(m^3·℃)；G 为质量，kg；V 为体积，m^3；t_1、t_2 分别为相应介质温度，℃。

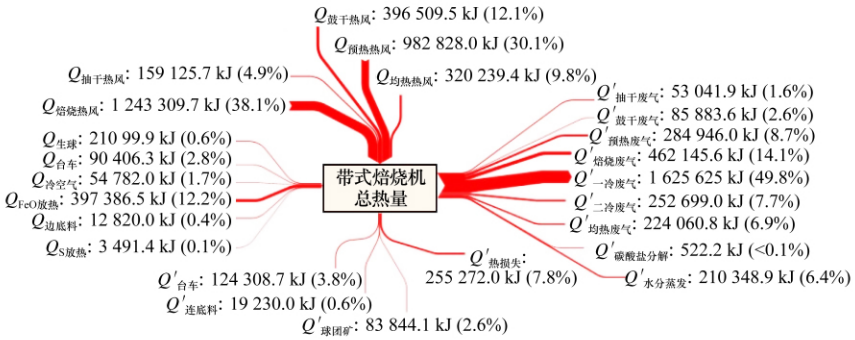


图 5 带式焙烧机能量收支情况

在此基础上，周浩宇等[9]开发了可以适用于多种原料的带式焙烧机热工数学模型，该模型依据矿种、磁铁矿占比、含水量和年产量等输入数据，快速计算各段长度、风量和球温等数据，模型计算误差率 < 10%，其对带式焙烧机的设计和生产具备一定指导意义；解海波[10]分别计算了带式焙烧机 7 个段的能量收支情况，得出鼓风干燥段供风能力欠缺、抽风干燥能量富余、主引风机存在 34% 富余风量等结论，可为后续的换料焙烧、扩容增产及节能改造等提供借鉴参考；叶匡吾采用㶲效率分析方法对过程节能进行了相关研究[11]，提出设备大型化是

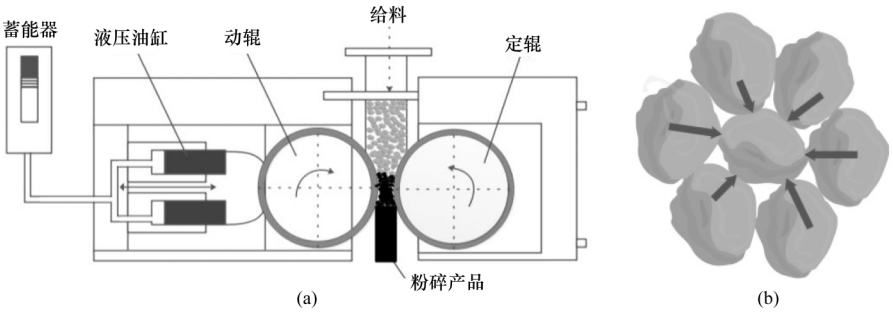
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

提高能效、绿色生产的发展方向。目前带式焙烧机球团生产过程物质流、能量流的相关研究不多，该领域的研究方向：通过建立相关能耗数学模型，科学客观地评价过程能源消耗状况，寻找用能薄弱环节，通过最优化调整过程参数或有针对性地提出能耗优化策略来实现过程节能[12]。

3　相关工艺、装备及技术进展

3.1　高压辊磨原料预处理

高压辊磨机用于铁矿球团的原料预处理始于 20 世纪 90 年代初，其结构如图 6(a) 所示。

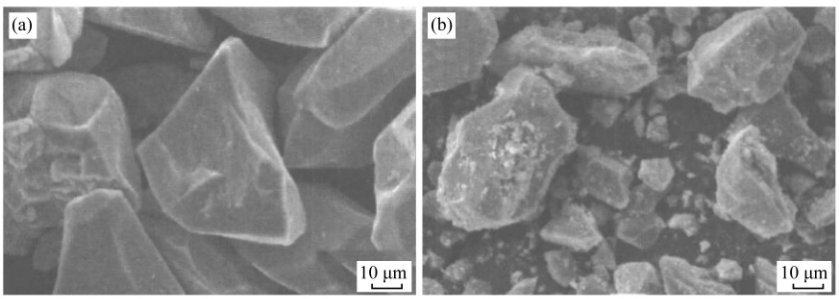


(a) 高压辊磨机结构；(b) 物料颗粒受力情况

图 6　高压辊磨机结构及辊磨物料受力情况

由图 6(a) 可见：物料进入高压辊磨机的粉碎室后，其在两个相向旋转的辊子和自重的压力下，逐渐被压实和预粉碎，随着物料的下沉，各颗粒之间发生不同程度的粉碎或变形，其受力情况如图 6(b) 所示。高压辊磨原料预处理工艺可以提高颗粒比表面积，起到增大颗粒表面能和表面活性的作用，可进一步促进球团焙烧过程的固相扩散反应，从而强化球团固结。

朱德庆等[13]采用高压辊磨技术对巴西镜铁矿进行了预处理，结果表明：单一镜铁矿和镜铁矿与磁铁矿的混合料的 −0.074 mm 粒级占比显著提高，分别由 70.89%、70.79% 增长至 87.10%、83.50%；颗粒比表面积也由原来的 565、785 cm^2/g 提高至 1 755、1 526 cm^2/g。其原因：磨细后的颗粒的新生表面增加，以及颗粒形貌发生较大改变，表面产生了许多裂纹，如图 7 所示。宋文武等[14]对秘细粉的成球性能进行了试验，并将研究成果应用于首钢球团原料供料系统，预处理后原料的平均比表面积提高了 219 cm^2/g，原料成球性得到明显改善。朱德庆等[15]研究了在福建三钢带式焙烧机现有原料条件下，采用高压辊磨原料预处理工艺，获得了最佳的配矿结构、MgO 质量分数、焦化除尘灰配比及热工制度，为优化原料结构、改善球团质量提供了参考。相较于常规的润磨及球磨工艺，高压辊磨原料预处理能节省 20%～50% 的磨矿总能耗，且预处理后的颗粒细粒级占比更高、比表面积更高，在降低膨润土用量的同时，能显著提高生球强度和球团预热焙烧性能。



(a) 未辊磨；(b) 辊磨处理后

图 7　高压辊磨预处理对颗粒形貌的影响

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

3.2 新型球团黏结剂

为提高入炉原料的TFe质量分数，越来越多的学者致力于研究如何降低球团生产中的膨润土用量或不用膨润土。嵇建国等[16]开发了一种新型无土有机黏结剂，该黏结剂在高温下大部分烧损，因此能提高球团矿中的铁品位、降低SiO_2质量分数，同时具备良好的冶金性能。百凯凯等[17]在固定膨润土配比为2%时，研究了有机添加剂对巴润精矿球团矿强度及还原行为的影响，结果表明：随着有机添加剂配比的增加，生球落下强度和生球、干球抗压强度均增大，这主要是由于有机添加剂低温吸水，其黏度及吸附力得到提高，并且加强了颗粒之间的凝聚力；有机添加剂在高温下分解产生气体，试样孔隙率由35.08%增大至60.23%，使球团内部组织结构进一步疏松，球团能够承受的载荷减小，导致成品球抗压强度降低；而孔隙率增大导致还原性气体充分接触球团的内部颗粒，使还原过程FeO_x晶体的膨胀和铁晶须生长受到抑制，故球团矿还原膨胀率降低、还原度增加。谢小林等[18]采用羧甲基纤维素钠(CMC)和醋酸钠对膨润土进行改性，可将黏结剂用量从1.6%降低至1.2%，而生球性能、预热器强度和焙烧球强度均良好。这一系列研究表明，采用有机黏结剂部分替代膨润土，在保证球团性能满足高炉炼铁需求的同时能够降低黏结剂使用成本。

刘杰等[19]进行了有机黏结剂替代膨润土的实验室研究，并在鞍钢带式焙烧机上进行了可行性验证。结果表明：在实验室研究中，随着有机黏结剂配比的提高，生球落下和抗压强度、成球率、成品球抗压强度都有不同程度地改善，其中成品球的全铁品位上升、SiO_2质量分数下降，如表3所示；工业试验期间，在使用有机黏结剂时的成品球抗压强度较基准期提高了50 N/P，高温膨胀率显著下降，但+6.3 mm的低温还原粉化率有所变差，转鼓指数较为接近，如表4所示。经过测算，当有机黏结剂价格低于887.5元/t时，采用0.8%的有机黏结剂替代1.5%的膨润土，球团矿的生产成本将降低。

表3 有机黏结剂与成品球全铁品位及SiO_2质量分数的关系 %

项目	膨润土配比		有机黏结剂配比	
	1.4	1.5	0.6	0.8
全铁品位	64.82	64.79	65.05	65.08
SiO_2质量分数	6.46	6.91	5.73	5.72

表4 带式焙烧机工业试验结果

试验时间	生球指标		成品球指标			
	抗压强度/(N·P^{-1})	落下强度/(次·(0.5 mm)$^{-1}$)	抗压强度/(N·P^{-1})	转鼓指数/%	膨胀率/%	$RDI_{+6.3\ mm}$/%
基准期	11.42	4.86	2 416	93.49	13.20	94.90
试验期	11.40	4.99	2 464	93.55	11.77	90.86

3.3 优化配矿及镁质球团制备

3.3.1 优化配矿

对不同球团原料进行配合使用，具备如下优势：①合理使用廉价矿，节省原料成本；②改善难冶原料的成球性及焙烧性能；③对原料性质进行优劣互补，减少磨矿或不磨矿，降低磨矿能耗和生产成本。刘周利[20]采用优化配矿方法研究了包钢自产精矿的最佳配比，结果表明：在不添加熔剂、添加镁质熔剂两种条件下，自产精矿配比最高可分别达到35%、40%，且球团矿强度以及还原膨胀率均可以达到高炉入炉要求。李新宇等[21]设计了8组配矿方案，采用球团综合评价指标(式(2))对球团性能进行综合评价，得出最优配矿方案为方案2(即：70%秘鲁磁铁矿粉+30%地方磁铁矿粉)，其球团综合评价指标值为98.26。

$$\rho = \sum_{i=1}^{4} x_i\delta_i + \sum_{i=1}^{4} \frac{|y_i - x_i|}{\varepsilon} \quad (2)$$

式中：ρ为综合评价指标数值，其值越高，代表该配矿方案最优；i代表球团矿品位、SiO_2质量分数、抗压强度和还原膨胀率对应的指标项；x_i、y_i、δ_i、σ_i分别为相应指标项的基准值、实

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

测值、权重比和影响系数；ε 为指标变化幅度。

3.3.2　镁质球团制备

实践表明，目前采用链算机－回转窑工艺制备镁质球团时由于预热球强度较低，容易导致球团破碎粉化，使回转窑结圈严重，而带式焙烧机制备镁质球团能解决此问题。潘建等[22]设计了可以模拟干燥、预热、焙烧、均热和冷却全过程的带式焙烧机模拟装置，对镁质球团的制备机理进行了研究，结果表明：随着 MgO 质量分数的提高，成品球抗压强度和还原膨胀率下降，软化温度区间和软熔温度区间有所提高。王代军等[23]以蛇纹石作为含镁添加剂，研究了 MgO 对赤铁矿球团成球性能、预热和焙烧性能的影响，结果表明：由于 MgO 比铁矿粉的吸水性好，导致生球水分质量分数和抗压强度上升、爆裂温度下降；当蛇纹石质量分数为 1.4% 时，预热球抗压强度最高；最佳焙烧时间为 12 min，焙烧温度为 1 280 ℃。廖凯[24]同样采用蛇纹石进行镁质球团试验研究，得出蛇纹石对球团原料的还原膨胀抑制作用很明显，并降低了铁品位，因此建议蛇纹石配比为 1.5%。总体而言，采用带式焙烧机生产镁质球团调整周期短、经济效益显著[25]，且生产的球团矿能够满足高炉需求。

3.4　热工制度优化

3.4.1　焙烧热工制度

研究带式焙烧机热工制度可以在适宜原料条件下得到最佳的工艺参数，从而起到稳定生产、提高球团矿产量和质量的作用。李国玮等[26]在全进口矿粉搭配 1.5% 膨润土的原料条件下，分别进行了总焙烧时间为 42、39、35、35 min 的 4 组焙烧杯试验，结果表明：在最高焙烧温度为 1 280 ℃、总焙烧时间为 35～39 min 时，成品球的抗压强度可达 2 500 N/P 以上。进一步地，夏雷阁等[27]在 80% 秘鲁矿粉＋20% 地方矿粉＋1.5% 膨润土，生球水分为 9.6% 的条件下，进行了干燥制度、焙烧制度对球团矿影响的一系列试验，结果表明：在干燥温度≥230 ℃，风速为 1.76 m/s，鼓风干燥为 3 min 时，料层透气性和生球焙烧质量显著提高；随焙烧温度和时间、风速的提高和料层厚度的降低，球团矿抗压强度相应提高；最佳的焙烧制度：料层厚度为 300 mm，预热风速为 1.7 m/s，焙烧风速为 1.5 m/s，焙烧温度为 1 270 ℃，焙烧时间为 35 min。目前对带式焙烧机热工制度的研究不多，下一步对不同原料条件下相应最优热工制度的研究将是重点。

3.4.2　焙烧温度控制

实际生产中，通过调整各烧嘴温度，使球团焙烧过程各工艺段达到所需的温度及温度梯度。因此，准确和稳定控制焙烧机温度是提高焙烧工艺效果和球团矿质量的关键。煤气压力和流量、进出料的变化会影响焙烧炉温度的控制，系统存在严重的一次及二次扰动[28]，如图 8 所示。朱丛笑[28]研究了影响焙烧机温度控制的主要因素，采用串级控制思想对温度进行控制：①在主回路中，主变量选择能直接影响成品球质量的变量(热电偶可以直接检测)；②在副回路中，副变量选择能够直接影响主变量的变量(煤气流量及压力控制)。经过焙烧温度控制系统的 PID 参数整定后，系统运行具备较好的抗干扰性和自适应特性。刘丕亮等[28]采用 SPSS 的相关性分析和 Matlab 的回归分析对焙烧温度相关量进行数据挖掘，确定烟罩温度和风箱温度对焙烧温度的影响较大，可为带式焙烧机温度优化控制打下基础。影响带式焙烧机温度的众多参数具备较强耦合性、复杂性和多变性，下一步研究可以在温度控制过程的快速、精准和稳定，以及最优化温度控制策略等方面开展。

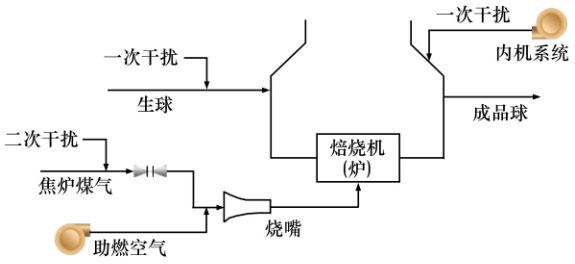


图 8　焙烧温度控制系统中的干扰

3.5　数值模拟与预测

根据传热学、多孔介质传热传质学和流

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

体力学等理论模型，采用计算流体动力学(computational fluid dynamics，CFD)模拟仿真技术，对带式焙烧机内部的流场、温度场和燃烧反应进行求解(图9)。其求解过程[30]：①利用有限个离散点上变量值的集合来替代空间域上的连续物理量的场(如速度场、温度场)；②按照一定方式建立场变量之间关系的代数方程组(质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程)；③通过求解代数方程组获得场变量的近似值，最终得到复杂问题基本物理量(如速度、压力、温度、浓度等)在流场内各个位置的分布。实际应用中，可以通过流场模拟，计算出气流损失较大的区域，用于指导设备结构设计；通过温度场计算，指导耐火材料的选择及结构设计；而燃烧火焰的计算则有助于控制料层上方的温度，为提高球团矿产、质量提供依据。如：刘德胜等[31]通过仿真手段模拟出了生产过程中燃烧室内的速度场和温度场分布，将燃烧室二次风进风方式由竖直进风改为旋流进风，显著改善了燃烧室中的流场分布，同时增强了气体间的传热、传质过程；陈子罗等[32]采用离散元模型对带式焙烧机布料筛分系统的布料和筛分性能进行仿真研究，得出了筛辊的最佳转速。

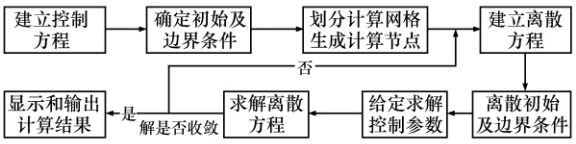


图9 CFD求解流程

一般神经网络预测模型有两类模式[12]：①多输入单输出模式(MISO模型)；②多输入多输出模式(MIMO模型)。刘丕亮等[33]采用k-means聚类算法建立索引结构，用最近邻法检索相似案例，建立了基于案例推理的预测模型；以入炉生球量、主引风机流量、煤气流量、2个烟罩温度、2个风箱温度和烧嘴温度等8个性能指标作为输入，预测了球团矿FeO质量分数、转鼓指数和抗压强度，该模型相对误差均较多元线性回归模型低。崔桂梅等[34]提出了一种基于主成分分析的球团矿综合评价方法，对24个球团矿质量指标进行降维和缩减处理，得到综合品质特性指标(F_1)、综合熔融特性指标(F_2)、综合软化特性指标(F_3)，通过计算其权重，得到球团矿综合性能(F)评价模型如式(3)所示。该模型可以提前预判球团质量并及时做出调整，对带式焙烧机球团生产过程的运行优化控制具有指导意义。

$$F = -0.52F_1 + 0.31F_2 + 0.17F_3 \quad (3)$$

4 结 语

本文主要综述了带式焙烧机球团技术的应用和研究进展，对带式焙烧机生产线情况、物质流、能量流进行了概述和分析，重点介绍了与该工艺相关的高压辊磨原料预处理技术、新型黏结剂、优化配矿及镁质球团制备、焙烧热工制度及温度控制、数值模拟与预测等的发展。得出如下结论：①带式焙烧机球团矿产量将持续增加并在未来有一个很大的提升空间；②通过研究带式焙烧机球团生产过程物质流、能量流，寻找用能薄弱环节，可实现过程节能；③高压辊磨原料预处理工艺可以强化球团固结，并且能耗更低；④采用有机黏结剂部分替代膨润土，在保证球团性能满足高炉炼铁需求的同时能够降低黏结剂使用成本；⑤采用优化配矿方法可以合理使用廉价矿，节省原料成本，改善难冶原料的成球性及焙烧性能，实现不同原料优劣互补；⑥采用带式焙烧机生产镁质球团调整周期短、经济效益显著，且生产的球团矿能够满足高炉需求；⑦寻求不同原料条件下相应最优热工制度，以及最优化温度控制策略是下一步的研究重点；⑧通过数值模拟与预测方法，提前预判球团质量并及时做出调整，对带式焙烧机球团生产过程的运行优化控制具有指导意义。

参考文献

[1] 周浩宇，贺新华，刘前. 带式焙烧机设计用热工数学模型技术的研究与验证[J]. 工业炉，2018，40(5)：36－39.

[2] 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.

[3] 许满兴. 大力推进我国高品质球团矿生产与发展[C]//2020年全国烧结球团技术交流年会(第44届)论文集. 长沙：全国烧结球团信息网，2020.

(下转第70页)

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

采用“两段磨矿，一段磁选，二段反浮选－磁选”的工艺流程，获得铁精矿的Fe品位为62.84%，Fe回收率为70.04%的选矿指标。

参考文献

[1] 廖祥. 鄂西某高磷鲕状赤铁矿提铁降磷试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2015.

[2] 许满兴. 中国鲕状赤铁矿资源的特征与开发利用[J]. 烧结球团,2011,36(3):24－27.

[3] 刘太合,徐大波. 关宝山铁矿石工艺矿物学分析[J]. 现代矿业,2018,34(6):136－139.

[4] 彭海辉,陈泰年. 安徽霍邱刘寺铁矿反浮选试验工艺研究[J]. 安徽地质,2019,29(3):231－234;240.

[5] 吴师金,潘峰岗,陈昊庆. 江西某低品位铁矿主要矿物特征和选矿试验研究[J]. 中国金属通报,2019(10):65－66.

[6] 钟乐乐. 中东某鲕状赤铁矿选矿工艺试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[7] 杨大兵,吴明,刘曙,等. 反浮选工艺对程潮铁精矿球团质量的影响[J]. 烧结球团,2009,34(6):29－31.

[8] 高文义. 吉林临江羚羊铁矿石分选基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2010.

[9] 王亚琴. 河北某铁尾矿工艺矿物学研究[J]. 现代矿业,2018,34(6):134－135;139.

[10] 邓小龙. 从山东某铁尾矿中回收铁精矿的试验研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2018.

[11] 焦科诚. 国外某高磷硅鲕状铁矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(4):65－68.

(上接第54页)

[4] 利敏,王纪英,李祥. 带式焙烧机为何在我国发展缓慢[N]. 中国冶金报,2011－12－15(B02).

[5] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2014.

[6] 叶恒棣,范晓慧. 烧结球团节能减排先进技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.

[7] 刘瑚. 缔造高效智能球团工厂的最先进球团技术[R]. 上海:2019年全国烧结球团技术交流年会(第43届),2019.

[8] 周浩宇,贺新华,向锡,等. 氧化球团带式焙烧机热工数学模型的研发与应用[J]. 世界有色金属,2017(9月下):59－60.

[9] 叶恒棣,王兆才,刘前,等. 烧结烟气及污染物减量化技术研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):60－67.

[10] 解海波. 504 m^2 带式焙烧机设计理论模型的分析论证[J]. 中国冶金,2015,25(2):21－28.

[11] 叶匡吾. 烧结过程、球团过程的能量流和优化选择[J]. 烧结球团,2010,35(10):1－6.

[12] 王海东,余海钊,范晓慧,等. 铁矿烧结过程能耗数学模型的研究进展[J]. 钢铁,2018,53(10):1－7.

[13] 朱德庆,唐艳云,Vinicius Mendes,等. 高压辊磨预处理强化巴西镜铁矿球团[J]. 北京科技大学学报,2009,31(1):30－35.

[14] 宋文武,朱辛洲,刘福来,等. 秘细粉高压辊磨预处理研究与实践[J]. 烧结球团,40(5):32－34.

[15] 朱德庆,杨聪聪,潘建,等. 福建三钢带式焙烧机球团工艺研究[J]. 烧结球团,2020,45(4):27－34.

[16] 嵇建国,杨群,谢永生. 新型有机黏结剂在球团生产中的应用[J]. 烧结球团,2011,36(5):30－32.

[17] 白凯凯,罗果萍,王永斌,等. 有机添加剂对包钢巴润精矿球团矿冶金性能的影响[J]. 烧结球团,2017,42(3):54－57.

[18] 谢小林,段婷,郑富强,等. 改性复合黏结剂制备磁铁矿氧化球团研究[J]. 金属矿山,2018(1):79－83.

[19] 刘杰,宫作岩,周明顺,等. 鞍钢球团生产配加有机黏结剂的研究[J]. 烧结球团,2015,40(5):28－31.

[20] 刘周利. 包钢带式焙烧机提高自产精矿配比试验研究[J]. 包钢科技,2018,44(2):41－44.

[21] 李新宇,张建良,刘依然,等. 带式焙烧机生产磁－赤型球团矿焙烧试验研究[J]. 烧结球团,2015,40(4):28－32.

[22] 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.

[23] 王代军,吴胜利. 赤铁矿制备镁球团矿的研究与应用[J]. 钢铁,2015,50(10):19－25.

[22] 廖凯. 包钢不同生产工艺的镁质球团矿试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2014.

[25] 邬虎林,薛向欣,陈革,等. 含氟氧化镁球团矿的研究与实践[J]. 钢铁,2005,40(7):9－12;16.

[26] 李国玮,夏雷阁,青格勒,等. 京唐带式焙烧机原料方案及热工制度研究[J]. 烧结球团,2011,36(2):20－24.

[27] 夏雷阁,苏步新,李新宇,等. 首钢504 m^2 带式焙烧机热工制度的试验研究[J]. 矿冶工程,2014,34(3):69－75.

[28] 朱丛笑. 球团焙烧机温度控制的设计与实现[D]. 沈阳:东北大学,2014.

[29] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 带式焙烧机焙烧温度分析研究[J]. 烧结球团,2018,43(2):29－32;36.

[30] 陈子罗,韩基祥,任伟. 数值模拟在带式焙烧机球团工艺上的应用[J]. 世界金属导报,2019－4－16(B07).

[31] 胡德胜,刘前,张家元,等. 带式焙烧机燃烧室二次风道结构仿真优化研究[J]. 烧结球团,2017,42(3):50－53;58.

[32] 陈子罗,韩基祥,任伟. 带式焙烧机布料筛分系统离散元仿真研究[J]. 烧结球团,2019,44(6):45－49;78.

[33] 刘丕亮,臧日浩,崔桂梅,等. 基于案例推理的球团质量预测模型研究[J]. 烧结球团,2019,44(3):22－26;57.

[34] 崔桂梅,徐朝伟,陈智辉. 基于主成分分析法的球团矿质量综合评价[J]. 烧结球团,2017,42(5):29－34;50.

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