带式焙烧机均匀布料研究与应用

智 谦[1,3]，张福明[2]，韩志国[1]，张全申[1]
（1. 北京首钢国际工程技术有限公司，北京 100043；2. 首钢集团有限公司，北京 100041；
3. 北京市冶金三维仿真设计工程研究中心，北京 100043）

摘要：为适应绿色低碳钢铁冶炼目标，球团大型化生产成为必然需求。由于带式焙烧机料层较厚，且焙烧过程球团处于静态，为保证成品球质量，生球的均匀布料就显得尤为重要。本文通过研究带式焙烧机布料原理和布料工艺设备参数，确定其合理的布料方式。研究结果表明：梭车和摆头皮带机布料均存在生球落下次数多、布料不均匀等问题；往复式布料器布料能够减少生球落下次数，且能够实现单向布料，快速换向，从而保证均匀布料。通过参数计算，得出 504 m^2 带式焙烧机合理的布料方式为往复式布料器 + 宽皮带机布料，卸料小车移动速度和皮带运行速度均应控制在 0.65 m/s，宽皮带机运行速度应控制在 0.12 m/s。生产实践表明在该布料方式下，布料轨迹整齐，台车料面平整，成品球强度均匀，达到了预期的研究目标。

关键词：球团；带式焙烧机；均匀布料；梭车；摆头皮带机；往复式布料器
中图分类号：TF046.6；X757 **文献标识码**：A **文章编号**：1000 - 8764(2024)04 - 0057 - 06
doi：10.13403/j.sjqt.2024.04.058

Research and application on uniform distribution of straight grate

ZHI Qian[1,3], ZHANG Fuming[2], HAN Zhiguo[1], ZHANG Quanshen[1]
(1. Beijing Shougang International Engineering Technology Co., Ltd., Beijing 100043, China; 2. Shougang Group Co., Ltd., Beijing 100041, China; 3. Beijing Metallurgical 3-D Simulation Design Engineering Technology Re-search Center, Beijing 100043, China)

Abstract: In order to meet the goal of green and low-carbon steel smelting, large-scale pellets production has become an inevitable demand. Due to the thick material layer of the straight grate and the static pellets during the roasting process, in order to ensure the quality of the finished pellets, the uniform distribution of fresh pellets is particularly important. After the distribution principle and distribution process equipment parameters of the straight grate are studied, the reasonable distribution method is determined. The results show that the distribution of the shuttle and the swing head belt conveyor has such problems as numbers of fresh pellets falling and the uneven distribution. The distribution of reciprocating distributor can reduce the number of fresh pellets falling, and can realize one-way distribution and fast reversing, so as to ensure uniform distribution. Through the parameter calculation, it is concluded that the reasonable distribution method of the 504 m^2 belt roaster is reciprocating distributor + wide belt conveyor distribution, the moving speed of the unloading trolley and the running speed of the belt should be controlled at 0.65 m/s, and the running speed of the wide belt conveyor should be controlled at 0.12 m/s. The production practice shows that under this distribution method, the distribution trajectory is neat, the material surface of the trolley is smooth, and the strength of the finished pellets is uniform, which achieves the expected research goal.

Key words: pellets; straight grate; uniform distribution; shuttle; swing head belt conveyor; reciprocating distributor

收稿日期：2023 - 11 - 27；**修回日期**：2023 - 12 - 18
基金项目：国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304300)
作者简介：智 谦(1986—)，男，高级工程师，从事烧结、球团方面的研究和设计工作。

近几年，在碳达峰、碳中和的重大战略背景下，钢铁行业的绿色低碳发展已经成为业内共识。球团矿生产过程的工序能耗和 CO_2 排放仅为烧结矿的 50%，甚至更低[1-2]。在炼铁生产中提高高炉球团矿入炉比例，还可以显著降低高炉渣量和燃料比，进一步降低 CO_2 排放[3]。因此，推动球团生产的大型化，进一步提高球团矿入炉比例，是实现绿色低碳钢铁的重要技术途径[4]。

相比链算机—回转窑工艺，带式焙烧机具有设备简单、单机生产能力大、工序能耗低、作业率高等优点[5]。但由于带式焙烧机集干燥、焙烧和冷却于一体，球团在生产过程中与主机一直处于相对静止状态。且带式焙烧机料层较厚，烧嘴火焰布置在料层上方，容易引起球团受热不均，导致成品球质量不够均匀[6-7]。因此，研究合理的布料系统，保证带式焙烧机的均匀布料就显得尤为重要。

本文以 504 m^2 带式焙烧机的布料系统为例，介绍了带式焙烧机布料系统的布置种类，并通过研究布料设备的工作原理，调整设备工艺参数，实现了生球在带式焙烧机台车上的科学分布，保证了料层的透气性及成品球质量的均匀性。

1 布料系统原理分析

目前，用于生球布料的设备组合主要有 3 种，分别适用于不同的工艺布置[8]。总体来说，3 种布料形式是随着球团技术的发展逐渐创新和进步的。

1.1 生球皮带 + 梭车布料

生球皮带 + 梭车的布料形式是最先得到应用的一种布料系统，其既能用于烧结机布料，也能用于生球布料[9]。布料系统原理如图 1 所示。由图 1 可知，生球通过造球盘下的生球带式输送机卸到梭车上，梭车是一条可移动皮带机，通过梭车的往复运动将生球分布到宽皮带上。

料条在宽皮带上的布料轨迹如图 2 所示。由图 2 可知，料层在宽皮带上呈现“盆地”形状，导致布料不均匀。这主要是由于梭车切换方向时需要较长的制动时间，而皮带在换向过程中持续下料，宽皮带又一直在向前运行，为避免料条之间出现空白地带，需要控制宽皮带的带速较慢，这就造成宽皮带两端出现堆料情况。

采用该布料方式，生球需要落下 2 次才能送到后续的辊式布料器上，多次倒运易造成生球的破碎，使返矿增加，维持在 25% 左右。且梭车需要在运行到最右端时还能接到上游带式输送机来料，导致梭车长度远远大于宽皮带机宽度，占地面积大。

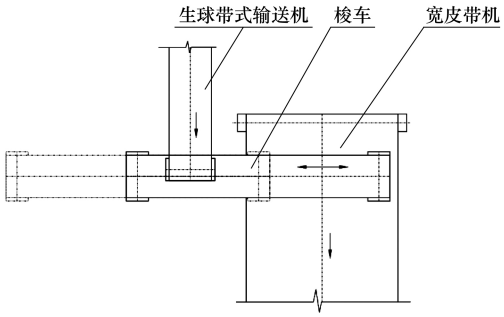


图 1 生球皮带 + 梭车布料原理

Fig. 1 Principle of of green pellet belt and shuttle distribution

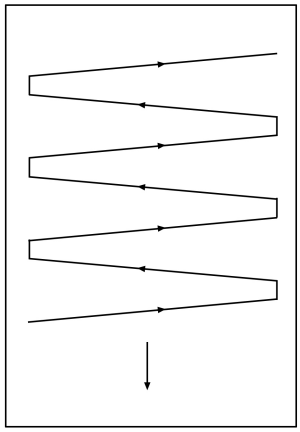


图 2 梭车布料轨迹

Fig. 2 Track of shuttle distribution

1.2 生球皮带 + 摆头皮带布料

生球皮带 + 摆头皮带机的布料形式是随着链算机—回转窑球团工艺的发展而出现的。王代军等[10]研究了该布料系统的原理，如图 3 所示。由图 3 可知，生球通过造球盘下的带式输送机卸到摆头皮带尾部，摆头皮带依靠自身摆动盘的转动，带动头部卸料点在宽皮带宽度方向做弧形的往复运动，从而将生球分布到宽皮带上。

料条在宽皮带上的布料轨迹如图 4 所示。由于摆头皮带卸料路径沿皮带中心线呈弧形往复，料条轨迹在每个掉头的地方呈“V”形扩散状。如

果宽皮带机速度过快，会导致料条过度分散，造成布料的真空地带；如果宽皮带机速度过慢，又会导致料条在每次掉头后的前半程轨迹趋近重合，造成一边料多，另一边料少，形成高低不平的布料效果。因此该布料组合下，也难以实现均匀平整布料。

该布料方式下，生球也需要落下 3 次才能送到后续的辊式布料器上，易增加碎球率，导致湿返料增多，维持在 25% 左右，增加系统运行负荷。

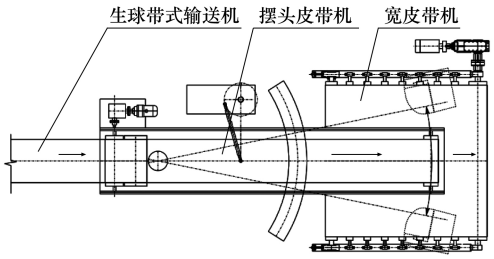


图 3　生球皮带 + 摆头皮带原理

Fig. 3　Principle of green pellet belt and swing head belt distribution

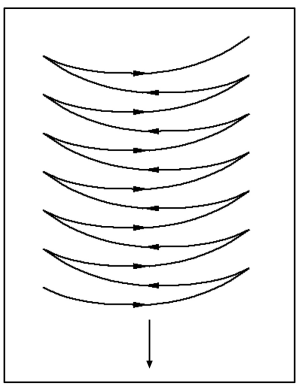


图 4　摆头皮带布料轨迹

Fig. 4　Track of swing head belt distribution

1.3　往复式布料器布料

往复式布料器是为 504 m^2 带式焙烧机专门开发的先进布料装置。往复式布料器外形结构如图 5 所示。该装置将造球盘下的生球皮带头轮安装在移动小车上，利用液压缸驱动小车在机架上往复运动实现均匀布料[11]。

往复式布料器布料轨迹如图 6 所示。在生球皮带上增设了往复运动的小车，其在皮带头部向前移动时，通过液压缸控制移动速度，保证生球与皮带机相对静止，即前进时不卸料。当头轮到达最前端设定位置，开始向生球皮带尾部运动，同时由于皮带机相对滚筒的转动，使生球在小车回程中卸料，到达尾端极限位置时，开始下一个循环。这样就实现了在宽皮带上的单向布料，且料条间距是固定值，料条布置整齐有序，避免了换向时的重叠布料。另外，由于移动小车通过液压缸 + 长液压缸驱动，可以在 0.5 s 之内完成布料皮带的换向和停止卸料，最大程度减少了宽皮带机两端的积料问题，宽度方向料面高度基本平整。

与上述梭车和摆头皮带机的布料方式相比，该布料方式将生球皮带和布料装置合二为一，减少了一次生球倒运，节省了一台设备，工艺布置更加紧凑简单；且皮带机驱动从头部滚筒调整到了皮带机下部，同时将头轮直径由传统的 630 mm 减小到 325 mm，从而将布料器头部与宽皮带机带面落差降低到 870 mm。与其他布料方式相比，该方式大幅降低了生球落下高度，从而降低了生球返矿率。另外，由于采用了液压缸和变频调速皮带机驱动，头部移动小车和胶带机速度分别可调，可根据需要灵活调整布料宽度和布料厚度。

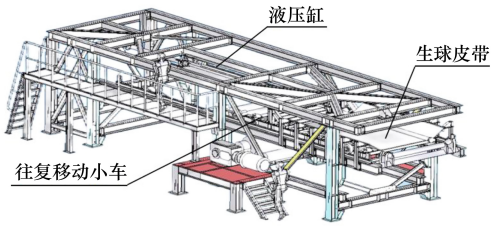


图 5　往复式布料器结构

Fig. 5　Design structure of reciprocal feeder

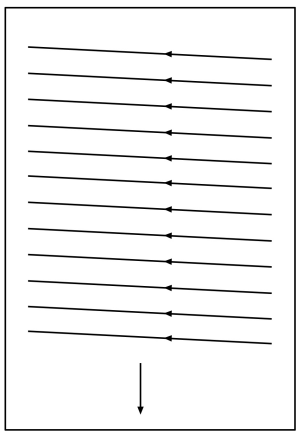


图 6　往复式布料器布料轨迹

Fig. 6　Track diagram of reciprocal feeder

2 均匀布料参数研究

2.1 往复式布料器参数

为了实现均匀布料，往复式布料器速度需要满足运量要求。按照 504 m^2 带式焙烧机年产 400 万 t 球团矿，作业率 90.4%，采用式(1)、(2)、(3)计算往复式布料器的带速。

$$Q = Q_1 t \tag{1}$$

$$Q_1 = 3\ 600 Q_2 (1 - K)/(1 - w) \tag{2}$$

$$Q_2 = \rho v H W \tag{3}$$

式中：Q 为带式焙烧机年产量，取 400 万 t；Q_1 为带式焙烧机小时产量，t/h；t 为带式焙烧机年生产时间，按作业率取 7 920 h；Q_2 为往复式布料器设计生球运量，t/s；K 为生球湿返率，取 15%；w 为生球水分，取 10%；ρ 为生球堆密度，取 2.2 t/m^3；v 为往复式布料器带速，m/s；H 为往复式布料器料层厚度，取 0.08 m；W 为往复式布料器上料面宽度，取 1.6 m。

通过以上计算，得出往复式布料器的皮带运行速度应控制在 0.65 m/s。为实现单向布料，使生球皮带头部向卸料起点方向移动时不卸料，液压缸驱动往复式布料器卸料小车的移动速度也应控制在 0.65 m/s。如湿返率大于设定的 15%，则皮带和小车运行速度应相应提高。

2.2 宽皮带机参数

宽皮带机的带速要与往复式布料器的卸料速度相匹配，理想状态是实现每两个料条之间无缝搭接。这就需要同时考虑布料宽度和移动速度。504 m^2 带式焙烧机台车宽度为 4 m，考虑到边缘效应，宽皮带机有效宽度设定为 4.2 m。而往复式布料器的单次布料宽度为 1.6 m，则宽皮带机的运行速度应按照式(4)、(5)计算：

$$L = 2 v_1 t_1 \tag{4}$$

$$W_1 = t_1 v \tag{5}$$

式中：L 为单次布料料条宽度，取 1.6 m；v_1 为宽皮带机运行速度，m/s；t_1 为往复式布料器单次卸料时间，s；W_1 为单次布料宽度，取 4.2 m。

通过以上计算，得出宽皮带机运行速度为 0.12 m/s。在该速度下，宽皮带可以与往复式皮带机形成良好的协同布料效果，得到均匀的“梳形”料条。

3 均匀布料系统工程设计及生产实践

3.1 均匀布料系统工程设计

504 m^2 带式焙烧机布料系统，由造球盘下的大小球辊筛、往复式布料器、宽皮带机、单层辊筛构成，经过大小球辊筛筛分后的合格生球，落到往复式布料器的皮带上，经过在宽皮带机上的均匀布料，送到单层辊筛上，再均匀地布到带式焙烧机台车内，台车料层厚度为 400 mm。

为减少生球落差和落下次数，保证工艺设计的紧凑性，采用 BIM 技术对带式焙烧机进行三维设计，图 7 是带式焙烧机的三维 BIM 设计图。由图 7 可见，往复式布料器位于造球系统和焙烧冷却系统之间，处于承上启下的关键位置。由于减少了一台生球转运设备，厂房高度可降低 3.5 m，布料区占地面积也显著减小。通过精准科学工艺计算，结合自主研发的往复式布料器，保证了带式焙烧机料层的均匀布料。往复式布料器的头部机架本体完全坐落在带式焙烧机厂房内，布料器尾部的皮带受料段完全布置在造球室内的造球盘下方，因此可以根据造球室和带式焙烧机主厂房的不同距离，灵活调整往复式布料器皮带长度。

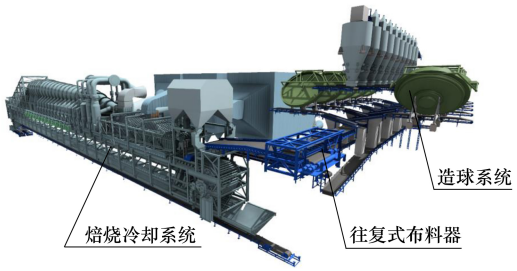


图 7 带式焙烧机布料系统 BIM 效果

Fig. 7 BIM effect of travelling grate machine distribution system

3.2 布料均匀性检测

为检测往复式布料器布料的均匀性，对布料后的宽皮带机料面进行了均匀性检测。宽皮带机料面宽度为 4.2 m，水平段布料长度为 8.5 m。在该区域内沿宽皮带机运行方向、分别间隔 1 m 检测布料厚度，共检测 40 个点。其中平行于宽皮带运行方向检测 5 列，分别编号为 $Y_1 \sim Y_5$ 列；平行于宽皮带宽度方向检测 8 行，分别编号为 $X_1 \sim X_8$

行，检测点位于交点位置。检测点位分布如图 8 所示，检测结果分别如图 9、图 10 所示。

经过对料层厚度统计，检测区域料层的平均厚度为 91.38 mm。从图 9 可以看出，沿宽皮带机运行方向，料层厚度在平均值上下 7 mm 范围内波动。相邻料条衔接处因散料堆积角作用，会有轻微波谷现象出现。相对总料厚，总体波动幅度在 8% 以内，说明在宽皮带机运行方向布料厚度总体均匀平整。从图 10 可以看出，沿宽皮带机宽度方向，料层厚度在平均值上下 5 mm 范围内波动。宽皮带机两侧因散料堆积角作用，料层厚度略薄，相对总料层厚度，总体波动幅度在 6% 以内，说明在宽皮带机宽度方向布料厚度更为均匀平整。

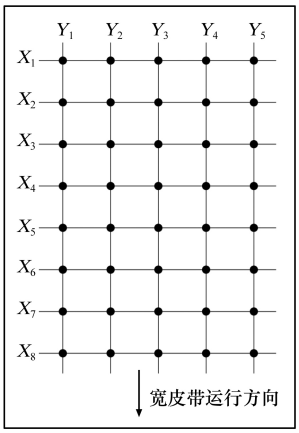


图 8　宽皮带机料层厚度检测点位分布

Fig. 8　Detection point destribution in the wide belt conveyor

3.3　均匀布料生产实践

按照设计参数和工艺布置，即往复式布料器卸料小车的移动速度和皮带运行速度控制在 0.65 m/s，宽皮带机运行速度控制在0.12 m/s，

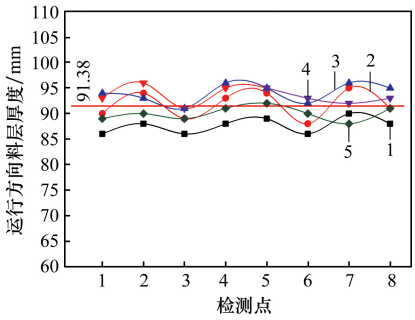


图 9　宽皮带机运行方向料层厚度

Fig. 9　Thickness of the green pellets in the running direction of the wide belt conveyor

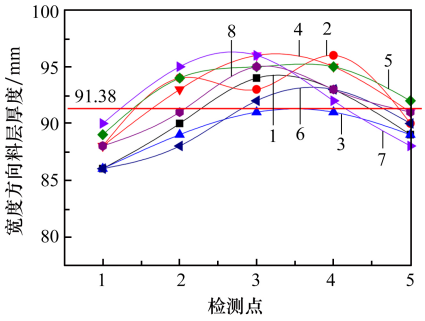
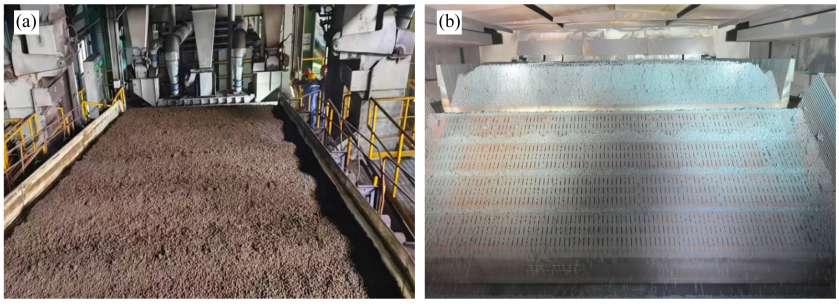


图 10　宽皮带机宽度方向料层厚度

Fig. 10　Thickness of green pellets in the width direction of the wide belt conveyor

带式焙烧机台车运行速度为 3.45 m/min，带式焙烧机生产现场的布料和台车焙烧后料面情况如图 11 所示。由图 11(a)可见，宽皮带机上的布料轨迹与设计轨迹基本一致，料面平整，料条间距均匀，且料条之间无空白区域，有效保证了后续给台车布料的连续性和均匀性。且布料区域的湿返率稳定控制在 15% 以内，远小于采用梭车和摆头皮带机布料平均 25% 的湿返率。

由图11(b)可以看出，带式焙烧机焙烧后的



（a）宽皮带机生球布料效果；（b）成品球台车卸料断面

图 11　带式焙烧机生产布料效果

Fig. 11　Distribution effect of straight grate production

料面十分平整。采用纯磁铁矿原料，检测成品球抗压强度，平均强度为2 731 N/P，其中抗压强度<2 000 N/P占比为8.2%，与链算机—回转窑工艺生产球团矿结果相差不大。料面布局和检测结果说明生球在台车上布料平整，能够保证料层在垂直方向受热均匀，从而改善成品球质量的均匀性。

4 结 论

（1）梭车布料和摆头皮带布料，设备较多，生球落下次数多，布料不均匀；往复式布料器布料，可减少一台设备，生球落下高差小，落下次数减少，能实现单向布料，料层均匀平整，且能根据设计要求实现动态精准布料。

（2）504 m^2 带式焙烧机合理的布料参数：往复式布料器卸料小车移动速度和皮带运行速度均控制在0.65 m/s；宽皮带机运行速度控制在0.12 m/s。在设定布料形式和布料参数下，宽皮带机料层厚度的波动幅度可控制在8%以内，料面平整，焙烧后的成品球团矿质量均匀。

参考文献：

[1] 姜涛. 铁矿造块学[M]. 长沙:中南大学出版社,2016.
JIANG Tao. Principle and technology of agglomeration of iron ores[M]. Changsha:Central South University Press,2016.

[2] 许满兴,张玉兰. 新世纪我国球团矿生产技术现状及发展趋势[J]. 烧结球团,2017,42(2):25-30.
XU Manxing, ZHANG Yulan. Analysis of pellet technology and production of China in 21st century[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(2):25-30.

[3] 张福明. 炼铁系统低碳技术发展前景与途径[J]. 钢铁,2022,57(9):11-14.
ZHANG Fuming. Development prospects and methods on low-carbon technology in ironmaking system[J]. Iron & Steel,2022,57(9):11-14.

[4] 王海风,裴元东,张春霞,等. 中国钢铁工业烧结/球团工序绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁,2016,51(1):1-5.
WANG Haifeng,PEI Yuandong,ZHANG Chunxia,et al. Green development of sintering/pellet procedure in China iron and steel industry[J]. Iron & Steel,2016,51(1):1-5.

[5] 张福明,张卫华,青格勒,等. 大型带式焙烧机球团技术装备设计与应用[J]. 烧结球团,2021,46(1):66-69.
ZHANG Fuming, ZHANG Weihua, QING Gele, et al. Design and application on pelletizing technologies and equipments in large-scale belt type roasting machine[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(1):66-69.

[6] 胡长松. 首钢高炉新炉料结构下球团技术的探索与应用[J]. 中国冶金,2021,31(6):54-60.
HU Changsong. Exploration and application of pelletizing technology under new burden structure of blast furnace in Shougang[J]. China Metallurgy,2021,31(6):54-60.

[7] 余海钊,廖继勇,范晓慧. 带式焙烧机球团技术的应用及研究进展[J]. 烧结球团,2020,45(4):47-54.
YU Haizhao,LIAO Jiyong,FAN Xiaohui. Application and research progress of pelletizing technology of belt roaster[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(4):47-54.

[8] 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.
CHEN Ziluo, HAN Jixiang, REN Wei. Research on segregation and screening of traveling grate machine[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(6):45-49.

[9] 范晓慧. 烧结球团厂设计原理[M]. 长沙:中南大学出版社,2016.
FAN Xiaohui. Principle of design for sintering and pelletizing plant of iron ores[M]. Changsha: Central South Uni-versity Press,2016.

[10] 王代军,吴胜利,李林. 链算机布料系统的均匀布料[J]. 钢铁,2013,48(1):24-29.
WANG Daijun,WU Shengli,LI Lin. Uniform distributing of grate feeder[J]. Iron & Steel,2013,48(1):24-29.

[11] 智谦,韩志国,易毅辉,等. 包钢624 m^2 大型带式球团焙烧机设计创新与应用[J]. 中国冶金,2017,27(4):61-65.
ZHI Qian, HAN Zhiguo, YI Yihui, et al. Design innovation and application of 624 m^2 travelling grate machine at Baogang[J]. China Metallurgy,2017,27(4):61-65.