球团

转底炉金属化球团滚筒冷却机传热模型研究

史晓北[1,2]，杨慧晨[3]，王 迪[3]，杨海瑞[2]，张 缦[2]，王随林[1]
(1. 北京建筑大学 环境与能源工程学院，北京 100044；2. 清华大学 能源与动力工程系，北京 100084；
3. 江苏新方圆电气设备制造有限公司，江苏 泰州 225500)

摘要： 针对目前冶金行业转底炉工艺中圆筒冷却机无法回收球团显热的问题，本文提出采用在循环流化床锅炉中广泛应用的滚筒冷却机来冷却球团的新方案，并据此建立滚筒冷却机的传热模型，通过计算得到球团终温与冷却水出口温度及冷却机的表观传热系数。结果表明：球团的终温随滚筒转速的升高而降低，随球团流量和冷却水入口温度的升高而升高；冷却水出口温度随金属化球团流量和冷却水入口温度的增大而增大；冷却机的表观传热系数随滚筒转速、球团流量和冷却水入口温度的增大而增大，随冷却水流量的增大而减小。本文引入滚筒冷却机将球团的温度从1 100 ℃降低至70 ℃，同时避免球团内部的氧化问题，符合高温球团的冷却要求，证明了将滚筒冷却机用于转底炉工艺的可行性。

关键词： 转底炉；金属化球团；圆筒冷却机；滚筒冷却机；传热计算
中图分类号： TF046.6；TK124 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)02－0045－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.02.022

Research on heat transfer model of drum cooler for metallized pellets in rotary hearth furnace

SHI Xiaobei[1,2], YANG Huichen[3], WANG Di[3], YANG Hairui[2], ZHANG Man[2], WANG Suilin[1]
(1. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Jiangsu Xinfangyuan Electric Equipment Manufacturing Co., Ltd., Taizhou 225500, Jiangsu, China)

Abstract: In view of the problem that the cylinder cooler cannot recover the sensible heat of pellets in the rotary hearth furnace process in the metallurgical industry, a new scheme of using the drum cooler widely used in circulating fluidized bed boilers to cool the pellets is proposed, the heat transfer model of the drum cooler is established accordingly, and the final temperature of the pellets and cooling water as well as the apparent heat transfer coefficient of the cooler by calculating are obtained. The results show that, the final temperature of the pellets decreases with the increase of drum speed, and increases with the increase of pellet flow and cooling water inlet temperature; the outlet temperature of the cooling water increases with the increase of the metallized pellet flow rate and the cooling water inlet temperature; the apparent heat transfer coefficient of the cooler increases with the increase of drum speed, pellet flow rate and cooling water inlet temperature, and decreases with the increase of cooling water flow rate. The drum cooler is introduced to reduce the temperature of the pellets from 1 100 ℃ to 70 ℃, and at the same time, the oxidation problem inside the pellets is avoided, which meets the cooling requirements of high-temperature pellets and proves the feasibility of using drum cooler in rotary hearth furnace process.

收稿日期： 2022－11－08；**修回日期：** 2022－12－14
基金项目： 国家自然科学基金面上项目(52276124)
作者简介： 史晓北(1997—)，女，硕士研究生，从事转底炉金属化球团冷却研究。
通信作者： 张 缦(1971—)，女，博士，研究员，从事循环流化床燃烧技术研究。

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

Key words: rotary hearth furnace; metallized pellets; cylinder cooler; drum cooler; heat transfer calculation

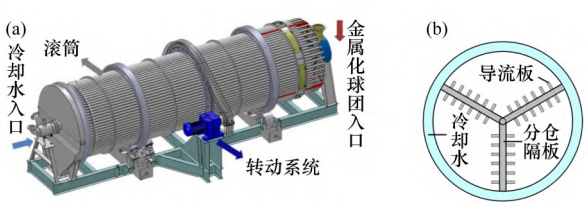
钢铁生产过程会产生大量的粉尘和污泥等固体废弃物，这些废弃物包含铁、碳等有价值的元素，其被充分回收利用具有很高的环境和经济效益[1-2]。转底炉还原工艺由于具有较高的经济性和环保性，是钢铁厂处理尘泥的首选工艺。在转底炉工艺中，球团冷却是重要的工序之一。球团的出炉温度约为1 100 ℃，其需在隔绝空气的环境下被降温至300 ℃以下以防止二次氧化[3]。目前国内采用的冷却设备主要是圆筒冷却机，其冷却原理：高温球团位于转动的圆筒内部，大量的冷却水被喷淋至圆筒外表面，球团热量通过水分蒸发吸热的方式被传递给大气。由于冷却水直接蒸发至大气中，该冷却过程不仅造成大量水资源的浪费和球团显热的能量损失，还对设备所处的生产环境非常不利[4-5]。循环流化床锅炉在运行时会产生大量炽热的灰渣。发电领域一般采用滚筒冷却机对该灰渣进行冷却，以回收灰渣中的显热同时方便运输[6]。滚筒冷却机主要由滚筒、转动系统、进出渣装置及冷却水系统组成。其冷却原理：高温灰渣从渣管进入滚筒端部，然后灰渣随着滚筒的旋转向滚筒出渣端移动；在推进过程中，灰渣与受热面内的冷却水进行换热而被冷却，冷却水在受热面内部流动。该方法避免了圆筒冷却机喷淋水形成的“湿烟羽”现象，同时可以将冷却水吸收的热量进行回收用于冶炼工艺废水处理。

本文借鉴滚筒冷却机在循环流化床锅炉的运行经验，尝试将其应用于转底炉金属化球团工艺的冷却，但是球团与锅炉底渣在粒度、密度和比热容等物理性质上存在差异。为确保滚筒冷却机应用的可行性，本文根据滚筒冷却机工作原理，建立球团在滚筒冷却机内的传热模型，对冷却机性能参数进行预测，并开展工业实践，以期为钢铁厂冷却设备选型提供新思路。

1 传热模型建立与验证

1.1 滚筒冷却机传热过程

滚筒冷却机整体结构和横截面示意如图1所示。由图1可知：从转底炉排出的高温球团通过螺旋出料机进入滚筒冷却机，并在导流板的作用下向前推动；冷却水在管内流动，方向与球团前进方向相反；球团的热量通过管壁传递给冷却水[7]。滚筒冷却机的筒体由沿圆周分布的钢管组成，这些钢管之间通过鳍片焊接；其受热面采用膜式壁设计，内部采用分仓结构。滚筒冷却机的每个腔体可以看作一个小的滚筒冷却机，具有比一般圆筒冷却机更大的受热面；同时三分仓的隔板不仅可以支撑筒体不变形，还可以使物料均匀分布从而降低冷却机的驱动功率[8]。滚筒冷却机入料口采用防漏料设计，密封性较好，有助于防止高温球团被氧化。



(a) 整体结构；(b) 横截面

图1 滚筒冷却机的整体结构和横截面示意

Fig. 1 The overall structure and cross-section of drum cooler

1.2 传热模型

本文建立针对上述三分仓式滚筒冷却机的传热模型。冷却机内的换热主要包括三个部分：球团与覆盖壁面的传热、球团与非覆盖壁面的辐射换热、冷却水与壁面的对流换热。为了方便计算作如下假设：① 传热模型基于一维传热，在每个微元段内部球团和冷却水的温度分别相同；② 冷却机内球团混合均匀，忽略各微元段之间的轴向传热；③ 系统始终处于稳定状态并忽略其散热损失[9]。

1.2.1 能量方程

(1) 每个微元段内的球团满足能量方程：

$$-m_s C_{ps}\frac{dT_s}{dl}dL=(T_s-T_w)\sum_{i=1}^{n}(h_{s-w}\cdot A_{s-w})_{d_i}+h_r A_{s-g}(T_s-T_w) \quad (1)$$

式中：m_s为球团质量流量，kg/s；C_{ps}为球团比热容，J/(kg·K)；T_s、T_w分别为球团和壁面的温度，K；h_{s-w}为球团与覆盖壁面间的换热系数，W/(m²·K)；A_{s-w}为球团与壁面间的换热面积，m²；h_r为球团与非覆盖壁面间的辐射换热系数，

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

$W/(m^2 \cdot K)$；A_{s-g}为球团热辐射面积，m^2；dT_s/dl为球团沿滚筒长度方向的温度变化率，℃/m；dL为微元段长度，m；n为球团粒径分档数；d_i为第i档球团筛分粒径，m。

(2) 每个微元段内的冷却水满足能量方程:

$$-m_f C_{pf}\frac{dT_f}{dl}dL = h_{w-f}A_t(T_w - T_f) \tag{2}$$

式中: m_f为冷却水质量流量，kg/s；C_{pf}为冷却水比热容，J/(kg·K)；T_f为冷却水温度，K；h_{w-f}为冷却水与壁面间的换热系数，W/(m²·K)；A_t为冷却水与壁面间的换热面积，m^2。

1.2.2 传热系数

(1) 球团与覆盖壁面的传热系数h_{s-w}。球团与覆盖壁面的传热热阻主要包括两部分: 球团与壁面间气膜层的接触热阻与球团边界层的非稳态导热热阻。传热系数h_{s-w}可用式(3)表示[10-11]:

$$h_{s-w} = \frac{1}{\beta d_p/\lambda_g + (1/2)\sqrt{\pi\tau_c/\lambda_s\rho_s C_{ps}}} \tag{3}$$

式中: β为气膜厚度，是为了方便计算引入的无量纲参数；d_p为球团颗粒粒径，m；λ_g为球团颗粒间气体的导热系数，W/(m·K)；λ_s为球团的导热系数，W/(m·K)；ρ_s为球团的堆积密度，kg/m^3；τ_c为球团与壁面的接触时间，s。

(2) 球团与非覆盖壁面的辐射换热系数h_r。滚筒冷却机内的辐射发生在一个封闭空间内，该封闭空间由壁面、滚筒两端面、球团表面和内部气体组成。通常情况下可以忽略气体辐射，因此只考虑筒壁与球团表面间的辐射换热[12]。辐射换热系数h_r可用式(4)表示[13]:

$$h_r = \frac{1}{1/\varepsilon_1 + (A_{s-g}/A_{g-w})(1/\varepsilon_2 - 1)}\sigma_0\frac{T_s^4 - T_w^4}{T_s - T_w} \tag{4}$$

式中: ε_1为滚筒壁面的黑度；ε_2为金属化球团的黑度；A_{g-w}为球团未覆盖到的壁面的面积，m^2；σ_0为玻尔兹曼常数，5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)。

(3) 滚筒外壁面与冷却水对流换热系数h_{w-f}。冷却水在管内的换热近似于管内强迫对流换热。根据经验公式，滚筒外壁面与冷却水对流换热系数h_{w-f}可根据式(5)计算[14]:

$$h_{w-f} = 0.012(Re_f^{0.87} - 280)Pr_f^{0.4}\cdot\left[1+\left(\frac{d}{L}\right)^{2/3}\right]\left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0.11}\cdot\frac{\lambda_f}{d} \tag{5}$$

式中: Re_f为冷却水侧的雷诺数；Pr_f为冷却水侧的普朗特数；d为定性尺寸，m；L为水冷壁管管长，m；Pr_w为按管壁平均温度计算的冷却水的普朗特数；λ_f为冷却水导热系数，W/(m·K)。

1.3 模型计算边界条件与验证

以某在运行转底炉为例，在设计工况下，滚筒冷却机的传热计算边界条件如表 1 所示。

表 1　计算边界条件

Table 1　Boundary conditions for calculation

滚筒				球团					冷却水		
长度/m	直径/m	壁面黑度	转速/(r·min⁻¹)	出窑温度/℃	堆积密度/(kg·m⁻³)	流量/(t·h⁻¹)	黑度	比热容/(J·kg⁻¹·K⁻¹)	压力/MPa	入口温度/℃	流量/(t·h⁻¹)
16	2	0.82	0.5~3.6	1 100~1 200	1.4~2.2	21~30	0.4	850	0.6	20~45	35~60

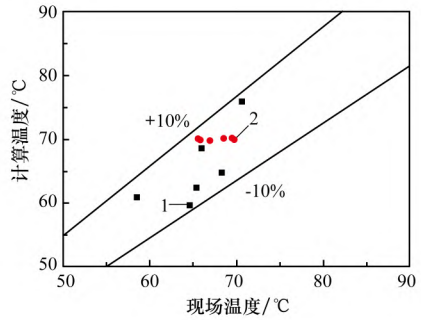
为了进一步验证传热模型的准确性，本文将传热计算值与现场值进行对比，取某钢铁厂转底炉应用上述滚筒冷却机的实际数据为现场值，得到不同滚筒转速下球团出口温度与冷却水出口温度的计算值与现场值的对比情况如图 2 所示。由图 2 可以看出: 计算值与现场值的误差在±10%以内，说明传热模型较为精确，可以用于指导工程实际。

2 模型计算结果与讨论

2.1 设计工况下球团和冷却水温度沿滚筒长度的变化

当滚筒冷却机处于设计工况时，进入滚筒的球团和冷却水在轴向上的温度变化如图 3 所示。由图3可知，初始温度为1 100 ℃的球团经过换热被冷却至69.69 ℃，同时冷却水温度由45 ℃升高至69.85 ℃。在滚筒前半部分球团温度快速降低，

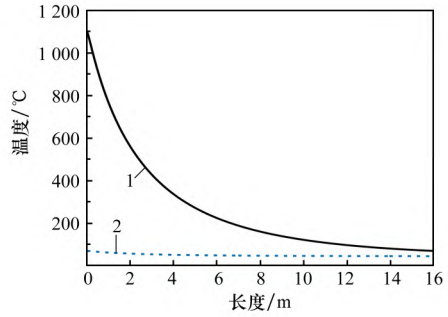
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



1—球团；2—冷却水。

图 2 球团和冷却水出口温度计算值与现场实际值对比

Fig. 2 Comparison of calculated and actual values of outlet temperature of pellets and cooling water



1—球团；2—冷却水。

图 3 球团和冷却水温度沿滚筒长度方向的变化

Fig. 3 Variation of pellet and cooling water temperature along drum length direction

后半部分降温较为缓慢，这是因为在传热过程中沿着球团前进方向，传热温差逐渐降低，换热量也随之降低。

2.2 不同工况下球团和冷却水温度、滚筒冷却机表观传热系数的变化

为了简化计算，实际工程通常采用平均传热系数［h，W/(m²·K)］来表征滚筒冷却机的换热性能，定义如式(6)所示。

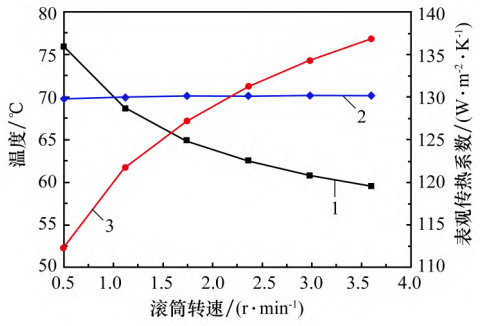
$$h = \frac{Q_w}{A \cdot \Delta T_m} \tag{6}$$

式中：Q_w 为冷却水吸收的热量，W；ΔT_m 为对数平均温差，℃；A 为传热面积，m²。

式(6)由基本传热公式 $Q = hA\Delta T_m$ 变形得到，但由于球团自身存在多种传热类型，所以上述基本传热公式只能用于表观过程[15]。出料温度是表征冷却机性能至关重要的参数[16]。本文计算不同工况下球团冷却后温度、冷却水被加热后温度及滚筒冷却机的表观传热系数，结果如图 4～6 所示。

2.2.1 滚筒转速

滚筒转速对于调整滚筒冷却机的性能起着重要作用[15,17]。在球团流量为 21.61 t/h，冷却水入口温度为 45 ℃，冷却水流量为 50 kg/s 的条件下，球团出口温度、冷却水出口温度和滚筒冷却机表观传热系数随滚筒转速的变化如图 4 所示。由图 4 可知，当滚筒转速为 0.5～3.6 r/min 时，球团的出口温度随滚筒转速增大由 76 ℃降低至 60 ℃，且下降趋势逐渐变缓，冷却水出口温度上升趋势不明显，从 69.79 ℃升高至 70.18 ℃。这是因为冷却水整体流量较大，尽管传热系数有比较明显的下降，但是其对冷却水出口温度的影响不大。冷却机的表观传热系数逐渐增大，从 112 W/(m²·K) 升高至 137 W/(m²·K)。这是因为提高滚筒转速会加强球团在滚筒内的运动，使球团边界层非稳态导热热阻降低，有利于球团的换热。但随着转速的不断增加，球团与滚筒壁面的接触时间变短，导致降温速度逐渐变慢。



1—球团终温；2—冷却水出口温度；3—表观传热系数。

图 4 球团和冷却水出口温度与传热系数随滚筒转速的变化

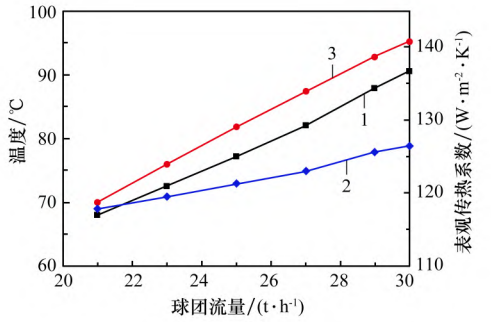
Fig. 5 Variation of pellet and cooling water outlet temperature and heat transfer coefficient with drum speed

2.2.2 球团流量

在滚筒转速为 1 r/min、冷却水入口温度为 45 ℃、冷却水流量为 50 kg/s 条件下，球团流量变化对球团出口温度、冷却水出口温度和滚筒冷却机表观传热系数的影响如图 5 所示。由图 5 可以看出，当球团流量为 21～30 t/h 时，球团终温随流量增大由 68 ℃升高至 90.5 ℃，对应冷却水出口温度由 69 ℃升高至 79 ℃，冷却机表观传热系数由 119 W/(m²·K) 增加至 141 W/(m²·K)。这是因

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

为随着球团流量增加，金属化球团与壁面间的辐射换热增强，导致滚筒冷却机的表观传热系数上升，同时球团流量增加使冷却机内部球团总热量增加，进而使球团向冷却水传递更多热量，使得冷却水出口温度上升，而冷却水所带走的热量远小于球团增加的总热量，因此球团的终温随球团流量的升高而升高。



1—球团终温；2—冷却水出口温度；3—表观传热系数。

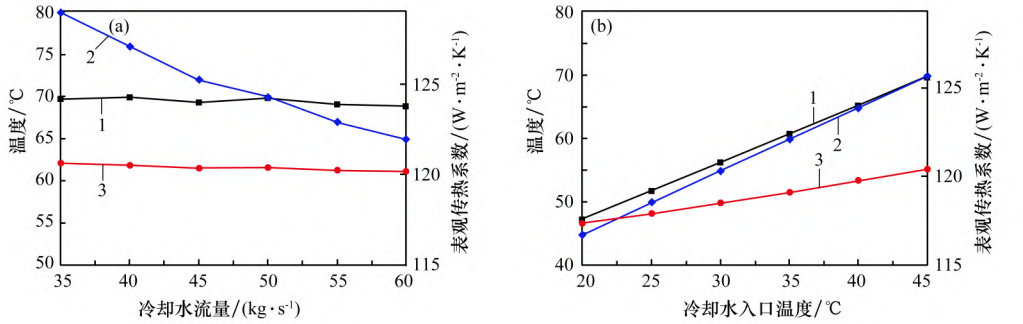
图 5　球团终温和冷却水出口温度与传热系数随球团流量的变化

Fig. 5　Variation of pellet final temperature and cooling water outlet temperature and heat transfer coefficient with pellet flow rate

2.2.3　冷却水的流量和温度

冷却水参数同样影响滚筒冷却机的传热过程。在滚筒转速为1 r/min、球团流量为21.61 t/h、冷却水入口温度为 45 ℃条件下，球团和冷却水出口温度与传热系数随冷却水流量的变化如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知，将冷却水流量从 35 kg/s 增加至 60 kg/s 时，球团终温在 70 ℃左右波动。这表明在图 6(a) 工况中，35 kg/s 的冷却水已足够将 1 100 ℃的球团冷却，因此即使调大水量，冷却机的表观传热系数并不增长；且由于球团与冷却水间的换热量基本不变，随着水量增加，冷却水进出口温差自然呈下降趋势，故冷却水出口温度是逐渐降低的。

在滚筒转速为 1 r/min、金属化球团流量为 21.61 t/h、冷却水流量为 50 kg/s 条件下，球团和冷却水出口温度与传热系数随冷却水入口温度的变化如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知，将冷却水入口温度从 20 ℃增加到 45 ℃后，球团终温由 47 ℃升高至 70 ℃，冷却水出口温度由 45 ℃升高至 70 ℃，这与冷却水温的升高幅度基本一致。这是由冷却水入口温度升高后其冷却能力下降导致的。在此过程中，冷却机的表观传热系数略有升高，约从 117 W/(m²·K) 升高至 120 W/(m²·K)。这是因为随着冷却水入口温度的升高，球团与管壁间存在的气膜层温度同样升高，这促进了球团侧的传热，使表观传热系数最终呈升高趋势。



(a) 冷却水流量；(b) 冷却水入口温度

1—球团终温；2—冷却水出口温度；3—表观传热系数。

图 6　球团终温和冷却水出口温度与传热系数随冷却水流量和入口温度的变化

Fig. 6　Variation of pellet final temperature and cooling water outlet temperature and heat transfer coefficient with cooling water flow rate and inlet temperature

3　结　论

(1) 滚筒冷却机结构相对封闭且滚筒内部为正压，可防止球团被氧化；此外，1 100 ℃的球团经过滚筒冷却机后可被降温至 69.69 ℃，符合冷却温度要求。实践证明，将循环流化床锅炉成熟的冷渣机技术应用于转底炉工艺具备一定可行性。

(2) 建立转底炉金属化球团滚筒冷却机传热模型来计算在不同滚筒转速下球团与冷却水的出口温度。经过与现场实际运行数据进行对比，模

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

型的误差小于10%，在工程应用的允许范围内，可用于滚筒冷却机的设计计算。

(3) 在滚筒冷却机运行过程中，球团与冷却水的换热主要发生在滚筒的前半部分，冷却水流量对球团终温几乎无影响，滚筒转速、球团流量与冷却水入口温度对球团终温影响较大。球团终温随滚筒转速升高而降低，随球团流量和冷却水入口温度升高而升高。冷却水出口温度随球团流量和冷却水入口温度的增大而增大，受滚筒转速和冷却水流量影响较小。

(4) 采用表观传热系数来表征滚筒冷却机的整体换热性能。通过计算可知，滚筒冷却机的表观传热系数约为120 W/(m^2·K)，该值随滚筒转速、球团流量和冷却水入口温度增加而增大，随冷却水流量增大而减小。

参考文献:

[1] 许海川,杨娟,齐渊洪,等. 钢厂尘泥的整体优化处理[J]. 中国冶金,2009,19(12):33-36.
XU Haichuan,YANG Juan,QI Hongyuan,et al. Solution of integrated optimization utilization of dust and sludge from steel plant[J]. China Metallurgy,2009,19(12):33-36.

[2] 王子宏,阮志勇,墙蔷,等. 钢厂含锌尘泥锌铁火法分离研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):86-92;98.
WANG Zihong,RUAN Zhiyong,QIANG Qiang,et al. Research on pyrometallurgical separation zinc and iron from zinc-bearingdust in steel plant[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):86-92;98.

[3] 张鲁芳. 我国转底炉处理钢铁厂含锌粉尘技术研究[J]. 烧结球团,2012,37(3):57-60.
ZHANG Lufang. Study on treatment of Zn-containing dust of iron andsteel plants by rotary hearth furnace process in China[J]. Sintering and Pelletizing,2012,37(3):57-60.

[4] 刘长正. 转底炉处理冶金固废的节能研究与应用[J]. 中国资源综合利用,2022,40(6):180-184.
LIU Changzheng. Research and application on energy saving of metallurgical solid waste treatment in rotary hearth furnace[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2022,40(6):180-184.

[5] 张震,贺新华,温荣耀. 转底炉金属化球团竖式冷却技术气冷方法研究[J]. 烧结球团,2021,46(5):54-59.
ZHANG Zhen,HE Xinhua,WEN Rongyao. Study on the air-cooled method of metalized pelletizing in the rotary-hearth furnace based on vertical cooling technology[J]. Sintering and Pelletizing,2021,46(5):54-59.

[6] 李建锋,于斌,丰斌,等. 循环流化床锅炉底渣余热的高效利用[J]. 电力学报,2021,36(2):95-104.
LI Jianfeng,YU Bin,FENG Bin,et al. Efficient utilization of waste heat from bottom slag of circulating fluidized bed boiler[J]. Journal of Electric Power,2021,36(2):95-104.

[7] 彭程,范建峰. 宝钢转底炉工艺技术发展[J]. 钢铁,2019,54(2):97-100.
PENG Cheng,FAN Jianfeng. Rotary hearth furnace process development in Baosteel[J]. Iron and Steel,2019,54(2):97-100.

[8] 黄中. 循环流化床锅炉优化改造技术[M]. 北京:中国电力出版社,2019:331-335.
HUANG Zhong. Optimization technology of circulating fluidized bed boiler[M]. Beijing:China Electric Power Press,2019:331-335.

[9] 司小东,吕俊复,王巍,等. 滚筒冷渣器传热模型的研究[J]. 动力工程学报,2011,31(5):342-346.
SI Xiaodong,LÜ Junfu,WANG Wei,et al. Research of heat transfer model in rotary ash coolers[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2011,31(5):342-346.

[10] WANG Wei,SI Xiaodong,YANG Hairui,et al. Heat-transfer model of the rotary ash cooler used in circulating fluidized-bed boilers[J]. Energy & Fuels,2010,24:2570-2575.

[11] GRIGULL U,HAHNE E,STEPHAN K,et al. Heat transfer 1982[M]. Washington DC:Hemisphere Publishing Corporation,1982:195-211.

[12] 樊泉桂,阎维平. 锅炉原理[M]. 北京:中国电力出版社,2004:188-205.
FAN Quangui,YAN Weiping. Boiler principle[M]. Beijing:China Electric Power Press,2004:188-205.

[13] 司小东. 滚筒冷渣器传热模型研究[D]. 北京:清华大学,2011.
SI Xiaodong. Research of heat transfer model in rotary ash coolers[D]. Beijing:Tsinghua University,2011.

[14] VOLKER G. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow[J]. Mechanical Engineering,1976(16):359-368.

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

[15] 刘柏谦，张飞龙，谭培来. NACT 滚筒冷渣机工业性能研究[J]. 热能动力工程，2017，32(10)：71－75；83.
LIU Baiqian，ZHANG Feilong，TAN Peilai. Study of the industrial performance of a new ash cooling technology (NACT)-based roller type slag cooler [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power，2017，32(10)：71－75；83.

[16] 谢强. 还原铁球团快速冷却方法及其应用研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2019.
XIE Qiang. Research on rapid cooling method for directly reduced iron pellets and its application [D]. Wuhan：Wuhan University of Technology，2019.

[17] 孙立军，刘柏谦，谭培来，等. 滚筒冷渣机料床温度分布及传热性能研究[J]. 动力工程学报，2015，35(7)：568－573.
SUN Lijun，LIU Baiqian，TAN Peilai，et al. Study on bed temperature distribution and heat transfer performance of rotary drum ash coolers [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2015，35(7)：568－573.

(上接第 44 页)

[6] 杨广庆，杨文康，李小松，等. 钒钛烧结矿与普通烧结矿还原过程中微观结构变化对比研究[J]. 钢铁钒钛，2018，39(2)：102－109.
YANG Guangqing，YANG Wenkang，LI Xiaosong，et al. Comparative study of microstructure changes in vanadium titanium sinter and ordinary sinter during reduction process [J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2018，39(2)：102－109.

[7] LIU H，QIN Y，WU X，et al. Experimental study on oxygen-enriched sintering of vanadium-titanium magnetite [J]. Journal of Chemistry，2018(6)：1－9.

[8] 金明芳，李光森，姜鑫，等. 影响烧结过程最初液相形成的因素分析[J]. 节能，2008(4)：7－9.
JIN Mingfang，LI Guangsen，JIANG Xin，et al. Influence factors on the formation of initial melt during sintering [J]. Energy Conservation，2008(4)：7－9.

[9] MATSUMURA M，HOSHI M，KAWAGUCHI T. Improvement of sinter softening property and reducibility by controlling chemical compositions [J]. ISIJ International，2005，45(4)：594－602.

[10] EIKI Kasai，WU Shengli，YASUO Omori. Factors governing the strength of agglomerated granules after sintering [J]. ISIJ International，1991，31(1)：17－23.

[11] 姜涛. 烧结球团生产技术手册[M]. 北京：冶金工业出版社，2014.
JIANG Tao. The technology enchiridion of sintering and pelletizing [M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2014.

[12] 张建良，苏步新，车晓梅，等. 若干国内外铁矿粉的同化性实验研究[J]. 冶金工程学报，2011(2)：97－102.
ZHANG Jianliang，SU Buxin，CHE Xiaomei，et al. Experimental study on assimilation of iron ores at home and abroad [J]. The Chinese Journal of Process Engineering，2011(2)：97－102.

[13] 姚君豪，杨军，韩冬，等. 添加剂对高 MgO 烧结矿中铁酸钙生成的影响[J]. 钢铁，2015，50(2)：12－16；21.
YAO Junhao，YANG Jun，HAN Dong，et al. Effect of additives on formation of calcium ferrites in magnesiariched sinters [J]. Iron and Steel，2015，50(2)：12－16；21.

[14] HESSIEN M M，KASHIWAYA Y，ISHII K，et al. Sintering and heating reduction processes of alumina containing iron ore samples [J]. Ironmaking and Steelmaking，2008，35(3)：191－204.

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