烧结矿竖冷炉结构优化研究现状

祁腾飞，张永杰
(东北大学 冶金学院，辽宁 沈阳 110819)

摘要： 竖冷炉是烧结矿显热竖式回收工艺的核心冷却装置，其炉型结构合理与否对高温烧结矿与冷却风的高效换热具有重要影响。文章在简述该工艺的基础上，从布料方式、炉身尺寸、排料装置和布风制度等方面介绍了竖冷炉炉型结构在工业试验过程中所采取的优化措施；然后从推进烧结矿呈“整体流”流动、烧结矿粒度分级冷却以及强化烧结矿料层中心区供风的角度汇总了一些优化竖冷炉炉型结构的新思路；最后指出竖冷炉炉型结构的优化，要兼顾烧结矿和冷却风的换热和流动，既要保证炉内高温烧结矿和冷却风在炉内分布的均匀性，又要保证烧结矿在炉内下移的顺畅性。

关键词： 烧结矿；竖冷炉；结构优化；气固换热；整体流
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)05－0009－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.05.065

Research status on improving vertical cooling furnace structure of sinter

QI Tengfei, ZHANG Yongjie
(School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: The vertical cooling furnace is the core cooling device of the sensible heat vertical recovery process of sinter, and whether the furnace structure is reasonable or not has an important impact on the efficient heat exchange between high-temperature sinter and cooling air. On the basis of a brief description of the process, the optimization measures taken in the industrial test process of vertical cooling furnace structure are introduced from such aspects as distribution method, furnace size, discharge device and air distribution system. Then, some new ideas for optimizing the structure of the vertical cooling furnace are summarized from such perspectives as promoting the "bulk flow" flow of sinter, graded cooling of sinter particle size, and strengthening the air supply in the central area of the sinter layer. It is necessary to ensure the uniformity of the distribution of high-temperature sinter and cooling air in the furnace, and to ensure the smooth downward movement of sinter in the furnace.

Key words: sinter; vertical cooling furnace; structure improvement; gas-solid heat exchange; bulk flow

随着我国“3060”双碳政策的出台，钢铁行业设定了2025年前实现碳达峰、2030年碳排放量较峰值减少30%的行业初步碳达峰目标。这对我国钢铁行业未来发展带来机遇的同时也提出了巨大挑战，而能效提升减碳具有快捷、经济、可行的特点，因此成为钢铁行业应对碳达峰碳中和的重要方向。烧结作为长流程钢铁联合企业的重要工序之一，具有高能耗、高污染的特点[1]。据统计，烧结工序的能耗约占钢铁行业总能耗的11%~16%[2]，仅次于炼铁工序。因此，提高烧结工序能效对钢铁企业降低碳排放具有重要意义。研究表明，在烧结工序总能耗中，有近50%的热能转

收稿日期：2022－12－05；修回日期：2023－02－09
作者简介：祁腾飞(1990—)，男，博士研究生，从事烧结余热回收方面的研究。
通信作者：张永杰(1970—)，男，正高级工程师，从事钢铁行业能效提升方面的研究。

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

化为烧结烟气和烧结矿显热[3]。因此，实现烧结余热资源的高效回收利用是烧结工序能效提升的重要途径。烧结烟气显热属于低温余热资源，利用渠道较为狭窄；而烧结矿显热温度较高、品质较好且易于被空气携带，因此成为烧结余热资源回收的重点[4]。目前，在我国大多数钢铁企业中，高温烧结矿通过环冷机实现冷却，其显热并未得到有效回收，而且环冷工艺还存在耗风量大、漏风率高、粉尘逸出多等弊端。为克服上述不足，国内学者借鉴干熄焦技术提出了烧结矿显热竖式回收工艺[5]。但该工艺在工程应用过程中仍然存在问题，使得显热的回收效果并未达到设计值。竖冷炉作为该工艺中完成气固逆流换热的核心设备，其炉型结构设计合理与否对矿－气能否实现充分接触换热具有重要影响。文章综述了现行的烧结矿竖冷炉结构优化措施以及若干优化新思路，以期为探索合理的竖冷炉结构提供参考和帮助。

1 烧结矿显热竖式冷却回收工艺概述

烧结矿显热竖式冷却回收工艺主要由竖冷炉、除尘系统、余热锅炉和发电系统等构成(图1)，其工艺流程[6]：高温烧结矿首先填充在竖冷炉腔内部，然后在重力的作用下缓慢下移，并与冷却风接触进行热交换，从而实现烧结矿的冷却；冷却风与烧结矿热交换后温度升高，形成热烟气，并从环形烟道排出。热烟气经过一次除尘后进入余热锅炉，用于生产过热蒸汽。过热蒸汽随后进入汽轮机发电；热烟气则降温至110～150 ℃，并经二次除尘后由循环风机送入省煤器，重新循环至竖冷炉中。

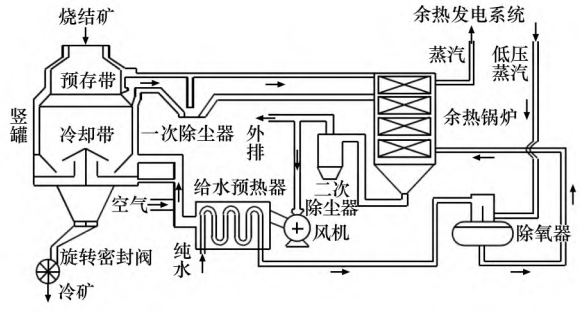


图1 烧结矿显热竖式冷却回收工艺流程

Fig. 1 Process flow recycle sensible heat of sinter using vertical cooling

2 现有烧结矿竖冷炉结构优化措施

烧结矿显热竖式回收工艺的提出借鉴了干熄焦技术，但由于烧结矿与焦炭的理化性质存在较大差异，适用于焦炭的干熄炉并不完全适用于烧结矿。因此相关研究人员对干熄炉进行了优化，从而形成能够用于烧结矿的竖冷炉。这些优化主要集中在布料方式、炉身尺寸、排料装置和布风制度等方面。

2.1 布料方式优化

竖冷炉入炉烧结矿粒度范围达到0～150 mm，容易在炉内产生粒度偏析。为能够调整烧结矿在竖冷炉内的分布，实现上部调节，竖冷炉通常会将预存带和冷却带分离，并在两者之间增设布料装置。天津天丰钢铁和梅山钢铁使用多根布料管布料，从而形成多点布料形式[7](图2)。该布料形式下，烧结矿在进入缓冲仓之后，通过缓冲仓底部的6根布料管进入竖冷炉腔，从而形成6个下料点。下料点的增多意味着偏析源得到了分散，散料的滚动距离发生改变，使得烧结矿的偏析分布得到缓解。经过现场进一步的技术改造，6根布料管的末端再细分成4根相互垂直的布料支管[8]，形成24个下料点，进一步改善了炉内烧结矿的偏析情况。此外，鞍钢采用了旋转溜槽布料器进行布料。该装置为一种独特的水平式布料装置，能够最大限度减少烧结矿偏析现象[9]，但该布料器的细节目前尚未见报道。

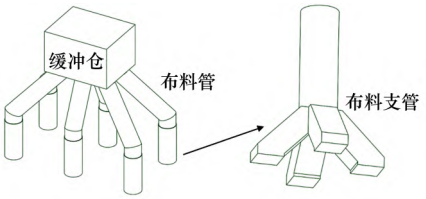


图2 竖冷炉多布料管布料装置

Fig. 2 Distribution device of vertical cooling furnace multiple distribution pipe

2.2 冷却带尺寸优化

竖冷炉冷却带是完成气固逆流换热的主要区域，其合理尺寸往往与竖冷炉配套的烧结机产量有关。现有研究中，关于竖冷炉结构优化往往围绕竖冷炉冷却带的高度和直径展开。通常以数值模拟和解析计算为研究方法，以冷却风通过烧结

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

矿料层的阻力损失以及热烟气含有的㶲值为优化目标探寻竖冷炉冷却带适宜的高度和直径。阻力损失的大小决定了竖冷炉所需风机功率的高低，而热烟气的㶲值大小可以反映回收热量品质的优劣。表 1 给出了相关的研究结果。但需要指出的是，上述结果基本都是在假设高温烧结矿能够与冷却气体充分接触换热的基础上得到的，这与竖冷炉的实际生产情况存在一定偏差。

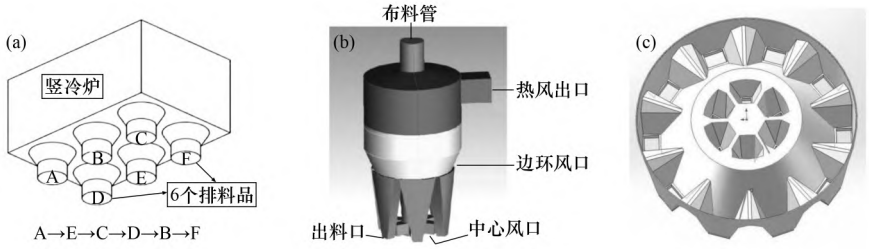
表 1　竖冷炉结构参数优化结果

Table 1　Optimization results of structural parameters of vertical cooling furnace

研究者	研究对象	评价指标	最优结构参数
高建业等[10]	处理量为 40 t/h 的中试竖罐系统	热烟气㶲值和料层阻力损失	冷却段直径为 4.4 m，冷却段高度为 6.6 m
李含竹等[11]	年处理量为 5.5 万吨烧结矿小型竖罐	热烟气㶲值	冷却段高度为 2.0 m，预存段高度为 1.98 m
徐天骄等[12]	某年产为 260 万吨烧结矿对应的竖罐	热烟气㶲值	冷却段直径为 9.0 m，冷却段高径比为 1.0
FENG 等[13]	某 360 m^2 烧结机对应的竖罐	热烟气㶲值	冷却段直径为 9.0 m，冷却段高度为 8.0 m

2.3　排料装置优化

为实现对竖冷炉内烧结矿流动的有效控制，促进烧结矿均匀顺畅的排料，竖冷炉往往采用多排料管交替排料。梅钢竖冷炉在炉底设置了 6 根下料管，采用双排三料口的布置方法，并形成了单个排料口开 10 ~ 20 s、停 5 ~ 10 s 后，切换到下一个排料口，整个循环周期在 2 ~ 3 min，循环顺序为 AECDBF 的排料矩阵[14]，如图 3(a) 所示。温荣耀等[15]设计了配套 115 m^2 烧结机的烧结矿竖冷炉，同样采用 6 根下料管，但是呈周向布置，如图 3(b) 所示。张福林等[16]设计了一套配套 360 m^2 烧结机的烧结矿竖冷炉。炉底共设置 16 个沿周向均匀分布的下料口，其中外围边缘区域均布 10 个下料口，中心区域则均布 6 个下料口，如图 3(c) 所示。



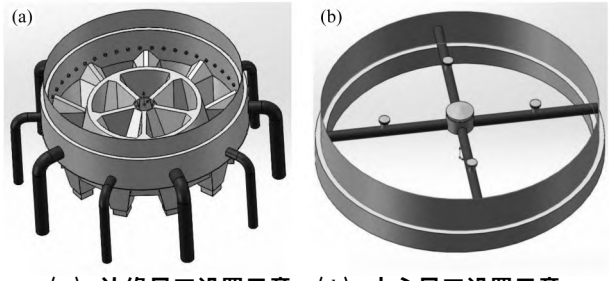
(a) 梅钢竖冷炉；(b) 115 m^2 烧结矿竖冷炉；(c) 360 m^2 烧结矿竖冷炉

图 3　排料装置优化

Fig. 3　Optimization of discharge device

2.4　布风制度优化

竖冷炉的布风制度决定了冷却风的初始分布，是重要的下部调剂手段。目前，竖冷炉通常采用“中心 + 边缘”同时进风的布风模式以加强冷却风在炉内的均匀分布。而且布风制度往往与排料装置密切相关。图 3(a) 中，梅钢竖冷炉分别在 6 个下料管上方的锥形段内部和锥形段之间设置中心风口和边缘风口，而图 3(b) 所示竖冷炉则在炉腔中心和炉身下部分别设置中心和边缘风口。对于图 3(c) 边缘风口设置在边缘排料口上方的炉壁上，如图 4(a) 所示；中心风口设置在相互交叉的中心风道上，高度高于边缘风口，且分别在炉腔中心和中间区域设置，如图 4(b) 所示。实际上，



(a) 边缘风口设置示意；(b) 中心风口设置示意

图 4　竖冷炉布风优化

Fig. 4　Optimization on air distribution of vertical cooling furnace

采用多管排料和多区域布风旨在提高炉内烧结矿下移以及冷却风分布的均匀性，同时也能够实现烧结矿床的分区冷却。由于烧结矿床透气性低于

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

焦炭床，为更好地改善矿－气接触换热，将较大的散料层分割成较小的料层分别冷却并及时排出不失为一种好的冷却方法，但对于竖冷炉整体出口热烟气温度的提升作用有限。

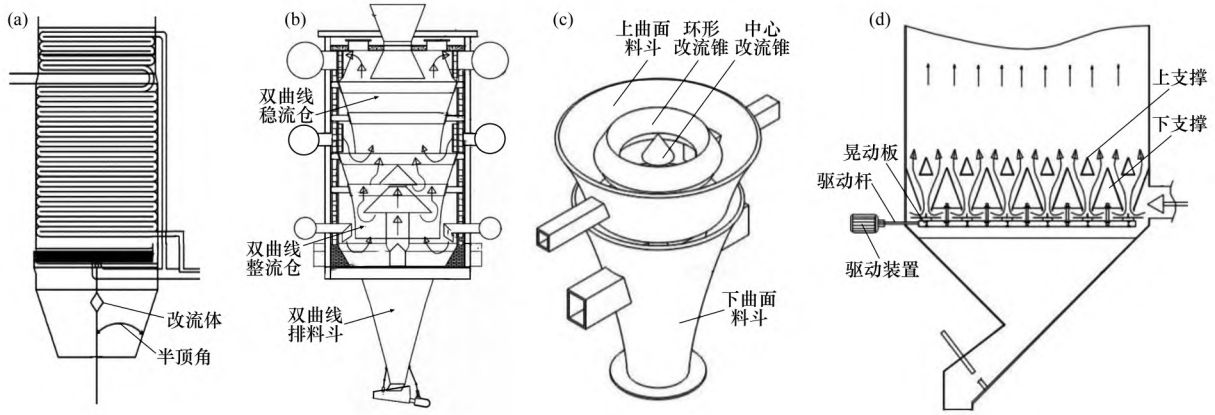
3 烧结矿竖冷炉结构优化新思路

烧结矿显热竖式回收工艺作为一种新型冷却工艺，目前仍处于工程试验阶段。尽管核心设备竖冷炉已在干熄炉的基础上进行了优化，但从工程实践的结果来看，该工艺的烧结矿显热回收率与设计值尚有一定差距，且仍存在出口热烟气温度偏低、排矿温度偏高、物料粒度偏析明显等不足[17]。说明现有竖冷炉结构并未达到最优，从改善气固换热机理出发对现有竖冷炉持续改进仍是必要的。文章汇总了一些烧结矿竖冷装置优化的新思路，以期能够为进一步优化竖冷炉结构提供帮助。

3.1 推进烧结矿呈“整体流”流动

多管排料虽能在一定范围内调节烧结矿的下移运动，但难以从整体上改变炉内烧结矿料层的运动流型。烧结矿在竖冷炉内的运动流型可能呈现“整体流”、“漏斗流”、“中心流”3种。“整体流”的流动特点是在垂直于流动方向截面上的任意位置颗粒均流动，即不存在流动死区，整个流通截面上颗粒的速度近似相等。对竖冷炉而言，“整体流”无流动死区的特点使得整个竖冷炉腔均得以利用，避免了物料堆积，从而保证了气固接触换热面积。除此之外，颗粒的持续更新也有利于消除烧结矿料层局部“管道”区域，有利于改善气体在炉内的分布。最后，“整体流”使高温烧结矿入炉和低温烧结矿出炉能够有序进行，保证了不同高度截面上矿－气温差的稳定，有利于稳定炉况以及提高气固换热效率。“漏斗流”和“中心流”的特点在于存在流动死区。对竖冷炉而言，流动死区内的烧结矿冷却后无法排出，从而构成无效冷却区。不仅浪费了冷却风，而且还减小了有效换热空间，造成冷却风量过剩，进而降低出口热烟气温度。因此，为实现气固高效换热，应使烧结矿保持“整体流”流动。而在烧结矿粒度组成以及竖冷炉壁面性质保持不变的条件下，竖冷炉结构，尤其是风帽和排料口结构尺寸及布置对实现烧结矿“整体流”流动至关重要[18]。

结构优化实现“整体流”的思路主要在于降低中心流速和提高边缘流速。相应的措施主要为在料仓内增设改流体以及降低壁面阻力或增加物料沿壁面的下滑力。王连勇等[19]提出了一种“整体流”分级利用烧结矿余热的竖式装置，如图5(a)所示。该装置的特点在于在卸料口上方插入锥体充当改流体以控制料斗中心区的流速、卸料斗半顶角$\alpha<32.5°$以增加料斗壁面附近物料的下滑分力，冷却带高径比为1.0～2.0，卸料斗的下端排料口大小与排料剪应力按特定公式确定，以保持烧结矿呈“整体流”流动。毕仕辉等[20]提出了一种具有稳流整流特性的竖式冷却装置，如图5(b)所示。该装置的特点在于从上而下连续叠加具有双曲线型结构的稳流仓、整流仓及排料斗。锥形料斗的特点为截面收缩率沿料斗高度降低而逐



(a) 锥体改流体结构；(b) 双曲线结构；(c) 中心改流锥与环形改流体组合结构；(d) 晃板排料结构

图5 烧结矿“整体流”流动优化方案

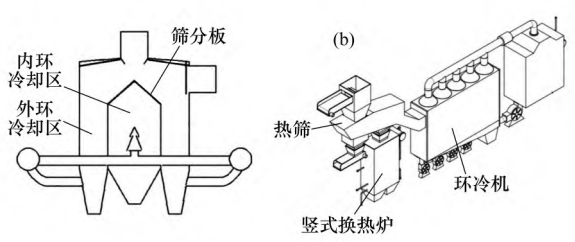
Fig. 5 Optimization scheme on mass flow of sinter

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

渐增大，使其对烧结矿流动阻力随着料斗高度降低而逐渐增大，影响壁面附近烧结矿的流动从而破坏流动的整体性。双曲线料斗具有恒定的收缩率，且倾角随着接近排料口而不断增大。上述特点使双曲线料斗对烧结矿流动阻力逐渐减小，使烧结矿向下流动过程中能够最大限度保证烧结矿流动的整体性。刘治乾等[21]提出了一种高温固体散料改流及布风冷却装置，如图 5(c) 所示。该装置采用中心改流锥和环形改流体组合的结构，可有效解决大容积冷却炉内的物料滞流现象，改善料仓中物料的流动状态。同时采用上下曲面料斗，使物料颗粒重新排布和错动，保持任一高度上界面的总阻力都小于该断面的有效下滑力，令物料运动保持顺畅。彭岩等[22]提出了一种烧结矿竖式冷却炉晃板排料冷却装置，如图 5(d) 所示。该装置的晃动板式排料结构，能够最大限度地增大排料口面积，使大腔体冷却炉截面面积的 30% 左右均为强制排料口。排料面积增加会降低料斗内烧结矿内部及其对壁面的挤压力，从而降低壁面阻力，有利于实现物料整体流动，避免中心流现象。

3.2　烧结矿粒度分级冷却

成品烧结矿经过单辊破碎后通过运输装置送入竖冷炉，使入炉烧结矿粒度范围达到了 0 ~ 150 mm。广粒度分布的特点使烧结矿竖冷炉内同时存在粒径差异较大的大小颗粒。大颗粒滚动性好，在布料时容易从堆尖滚向堆角，从而聚集在炉墙壁面附近，而小颗粒则相反。由此造成烧结矿料层颗粒沿径向偏析分布。此外，小颗粒由于体积小，容易填充于大颗粒间的缝隙中，使颗粒满足最紧密堆积条件而增加颗粒堆积的密实程度。上述现象均会影响料层空隙率径向分布的均匀性，进而影响高温烧结矿与冷却风的接触换热。若能够将入炉烧结矿粒度分级后再冷却，一方面有利于入炉粒度均匀化，减小颗粒粒度分布偏析的影响；另一方面能够改善颗粒堆积条件，增加料层空隙率及其均匀性，进而提高炉内冷却气体的分布，有望从源头上缓解竖冷炉内烧结矿和冷却风因分布不均导致的换热效率较低的问题。贺新华等[23]提出了一种筛分立式烧结冷却机，如图 6(a) 所示。该装置使用中心冷却装置将炉腔分为内环和外环两个冷却区域，通过在中心冷却装置顶部设置筛分板，对大颗粒烧结矿和小颗粒烧结矿分别进行冷却，以保证冷却效果。弋治军等[24]提出了一种烧结分级组合冷却及余热回收装置，如图 6(b) 所示。该装置将烧结矿热筛分设备放在了竖冷炉之外，通过有效筛分，使不同粒级的高温物料进入不同设备，提高了设备的可靠性、连续性和稳定性，同时实现热量的梯级利用，最大限度地实现高温物料的显热回收。



(a)　筛分立式烧结冷却机;
(b)　烧结分级组合冷却及余热回收装置

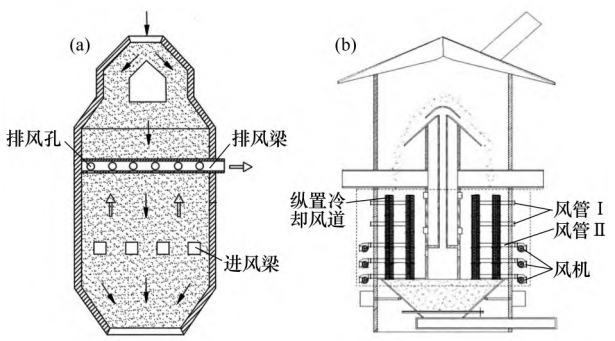
图 6　烧结矿粒度分级冷却优化方案

Fig. 6　Optimization scheme on particle size grading cooling of sinter

3.3　强化烧结矿料层中心区供风

由于边壁效应的存在，烧结矿料层中心区的风量小于炉腔边壁区，使得中心区烧结矿的冷却效果较差。参考 COREX 竖炉在竖炉围管水平面处安装水平气体分布器，将还原煤气直接引入到竖炉中心，进而改善大型竖炉中心供气不足问题的解决思路，亦可在竖冷炉内部设置中心供风梁，从而达到加强料层中心区域供风的目的。供风梁一方面能够承担上部物料的部分压力，使其下方物料堆积密实程度得以改善；另一方面能够在其下方形成近似倒三角形的空区，降低料层阻力，有利于冷却风进入。高静涛等[25]提出了一种基于梁式结构的方形竖冷窑，如图 7(a) 所示。该设备通过在料层内部设置多根水平供风梁，缓解了竖冷炉内中间料层气体不能被送入和抽出的问题，有利于冷却风在料层内部的均匀分布。张志良[26]提出了一种多角多面多层 360°烧结矿冷却塔，如图 7(b) 所示。该装置在炉腔内部布置多根竖直供风梁，增大了供风面积，改善了冷却风的分布，并能够降低冷却风阻力。

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



(a) 方形竖冷窑; (b) 多角多面多层360°烧结矿冷却塔

图7 强化料层中心区供风优化方案

Fig. 7 Optimization scheme for strengthening central air supply of material layer

4 结 论

烧结矿显热竖式回收工艺全程采用密闭的竖式冷却炉体，将气固换热方式由环冷的“错流”变成“逆流”换热，在带来良好的环保效果的同时，理论上亦能提高烧结矿显热的回收率。由于该工艺以干熄焦技术为参考，因此其核心装置竖冷炉亦以干熄炉为基础改进而来。在工程实践中，该工艺虽然在布料方式、冷却带尺寸、排料装置及布风制度方面采取了一定的优化措施，并一定程度上改善了竖冷炉的冷却以及显热回收效果，但热烟气温度偏低、排矿温度偏高、物料粒度偏析明显等问题仍然存在。一些研究人员从推进烧结矿呈“整体流”流动、烧结矿粒度分级后冷却以及加强烧结矿料层中心区供风等新的优化思路出发，提出了一些炉型结构优化方案，但这些方案尚未得到工程试验的验证。烧结矿竖式冷却工艺的核心在于竖冷炉内高温烧结矿与冷却风的高效逆流换热。因此在优化竖冷炉型时，要同时兼顾烧结矿和冷却风的换热和流动。既要保证炉内高温烧结矿和冷却风在炉内分布的均匀性，又要保证烧结矿在炉内下移的顺畅性，使得烧结矿流和冷却气流能够保持有序耦合，从而提高矿－气换热效率。

参考文献:

[1] 李和平. 梅钢烧结低碳减排技术的探索与实践[J]. 烧结球团,2022,47(1):112－118.
LI Heping. Exploration and practice of low carbon mission reduction technologies of Meishan Iron & Steel sintering[J]. Sintering and Pelletizing,2022,47(1):112－118.

[2] 刘文强,李杰,朱金伟,等. 配碳量对烧结烟气排放规律的影响[J]. 烧结球团,2020,45(1):61－66.
LIU Wenqiang,LI Jie,ZHU Jingwei,et al. Effect of carbon addition on emission of sintering flue gas[J]. Sintering and Pelletizing,2020,45(1):61－66.

[3] 祁腾飞,孙俊杰,张永杰. 我国烧结余热回收技术发展与展望[J]. 冶金经济与管理,2021(5):39－42;45.
QI Tengfei,SUN Junjie,ZHANG Yongjie. Development and prospect of sintering waste heat recovery technology in China[J]. Metallurgical Economy and Management,2021(5):39－42;45.

[4] 黄柱成,杨越,钟荣海,等. 热烧结矿竖式冷却过程传热特性[J]. 钢铁,2019,54(11):9－15;26.
HUANG Zhucheng,YANG Yue,ZHONG Ronghai,et al. Heat transfer characteristics in process of hot sinter in vertical cooling[J]. Iron and Steel,2019,54(11):9－15;26.

[5] 董辉,李磊,刘文军,等. 烧结矿余热竖罐式回收利用工艺流程[J]. 中国冶金,2012,22(1):6－11.
DONG Hui,LI Lei,LIU Wenjun,et al. Process of waste heat recovery and utilization for sinter in vertical tank[J]. China Metallurgy,2012,22(1):6－11.

[6] 祁腾飞,黄军,张永杰. 烧结矿竖式冷却工艺应用难点及机制研究进展[J]. 钢铁研究学报,2021,33(7):557－565.
QI Tengfei,HUANG Jun,Zhang Yongjie. Application difficulties and mechanism research progress of sinter vertical cooling process[J]. Journal of Iron and Steel Research,2021,33(7):557－565.

[7] 祁腾飞,黄军,孙俊杰,等. 竖冷炉内烧结矿分布的DEM模拟[J]. 中国冶金,2022,32(7):20－26.
QI Tengfei,HUANG Jun,SUN Junjie,et al. DEM simulation of sinter distribution in vertical cooling furnace[J]. China Metallurgy,2022,32(7):20－26.

[8] 张雪宽,徐骥,孙俊杰,等. 竖冷设备中烧结矿石偏析行为的GPU高性能模拟[J]. 力学学报,2019,51(1):64－73.
ZHANG Xuekuan,XU Ji,SUN Junjie,et al. Segregation behavior of sinter in vertically arranged cooler with high performance GPU simulation[J]. Chinese Journal of The-

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

oretical and Applied Mechanics,2019,51(1):64 – 73.

[9] MICHAEL B,屈鹏飞,PETER P,等. 烧结矿竖冷窑:烧结厂能量回收的新标准[J]. 河北冶金,2018(11):43 – 46.
MICHAEL B,QU Pengfei,PETER P,et al. Sinter shaft cooler-the new standard for energy recovery in sinter plants[J]. Hebei Metallurgy,2018(11):43 – 46.

[10] 高建业,冯军胜,刘靖宇,等. 烧结余热回收竖罐内冷却段高度与冷却风流量解析研究[J]. 工业炉,2016,38(5):58 – 62.
GAO Jianye,FENG Junsheng,LIU Jingyu,et al. Analytical research on cooling section height and cooling flow of vertical tank for sinter waste heat recovery[J]. Industrial Furnace,2016,38(5):58 – 62.

[11] 李含竹,董辉,张晟,等. 烧结矿余热罐式回收小试竖罐系统设计研究[J]. 冶金能源,2018,37(5):30 – 33.
LI Hanzhu,DONG Hui,ZHANG Sheng,et al. Design research of small scale vertical tank system for sinter waste recovery[J]. Metallurgical Energy,2018,37(5):30 – 33.

[12] 徐天骄,张晟,高建业,等. 烧结矿余热回收竖罐热工参数确定方法及其应用[J]. 钢铁,2018,53(11):107 – 112.
XU Tianjiao,ZHANG Sheng,GAO Jianye,et al. Determination method of thermal parameters of vertical tank for sinter waste heat recovery and its application[J]. Iron and Steel,2018,53(11):107 – 112.

[13] FENG Junsheng,ZHAO Liang,ZHANG Sheng,et al. Exergy analysis and parameter optimization of sinter cooling process in vertical moving bed for waste heat recovery[J]. Applied Thermal Engineering,2020,175:115370.

[14] 毕传光,孙俊杰. 竖式冷却回收烧结矿显热工艺在梅钢的应用[J]. 烧结球团,2018,43(4):69 – 72.
BI Chuangguang,SUN Junjie. Application of process to recycle sensible heat of sinter using vertical cooling furnace in Meisteel[J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(4):69 – 72.

[15] 张思平,张震,温荣耀,等. 烧结立式冷却机流场数值模拟研究[J]. 烧结球团,2017,42(6):19 – 21;33.
ZHANG Siping,ZHANG Zheng,WEN Rongyao,et al. The flow field simulation research of sintering vertical cooler[J]. Sintering and Pelletizing,2017,42(6):19 – 21;33.

[16] 张福林. 竖式逆流换热装置整体设计及数值分析[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2020:15 – 19.
ZHANG Fulin. The overall design and numerical analysis of the vertical countercurrent heat exchanger[D]. Ma'anshan:Anhui University of Technology,2020:15 – 19.

[17] 许相波. 梅钢烧结竖冷炉余热利用方案与生产实践[C]//第十届全国能源与热工学术年会论文集. 杭州:中国金属学会,2019:87 – 89.
XU Xiangbo. Waste heat utilization scheme and production practice of vertical cooling furnace in Meishan Steel[C]//The 10th National Energy and Thermal Engineering Annual Meeting. Hangzhou:The Chinese Society for Metals,2019:87 – 89.

[18] 蔡九菊. 钢铁工业的空气消耗与废气排放[J]. 钢铁,2019,54(4):1 – 11.
CAI Jiuju. Air consumption and waste gas emission of steel industry[J]. Iron and Steel,2019,54(4):1 – 11.

[19] 王连勇,刘向宇,田镇岭,等. 一种"整体流"分级利用余热的烧结矿的竖式装置:201910297867.0[P]. 2019 – 04 – 15.
WANG Lianyong,LIU Xiangyu,TIAN Zhenling,et al. A vertical device of sintering ore for "mass flow" classification and utilization of waste heat:201910297867.0[P]. 2019 – 04 – 15.

[20] 毕仕辉,张世煜,谢国威,等. 一种具有稳流整流特性的竖式冷却装置:202010268174.1[P]. 2020 – 04 – 08.
BI Shihui,ZHANG Shiyu,XIE Guowei,et al. A vertical cooling device with steady current rectification characteristics:202010268174.1[P]. 2020 – 04 – 08.

[21] 刘治乾,郭存红,张晔,等. 一种高温固体散料改流及布风冷却装置:202010004220.7[P]. 2020 – 01 – 03.
LIU Zhiqian,GUO Cunhong,ZHANG Ye,et al. A high temperature solid bulk material flow changing and air distribution cooling device:202010004220.7[P]. 2020 – 01 – 03.

[22] 彭岩,郭存红,刘治乾,等. 一种烧结矿竖式冷却炉晃板排料冷却装置:202210169879.7[P]. 2022 – 02 – 24.
PENG Yan,GUO Cunhong,LIU Zhiqian,et al. A cooling device for shaking plate discharge of sinter vertical cooling furnace:202210169879.7[P]. 2022 – 02 – 24.

[23] 贺新华,温荣耀. 一种筛分立式烧结冷却机及烧结矿冷却方法:201710512387.2[P]. 2017 – 06 – 29.

(下转第 42 页)

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

waste heat recovery [J]. Journal of Chemical Engineering,2015,66(11):4418 – 4423.

[7] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热过程及其应用研究 [D]. 沈阳:东北大学,2017.
FENG Junsheng, Gas solid heat transfer process and application research in vertical tank for sinter waste heat recovery [D]. Shenyang: Northeastern University,2017.

[8] TIAN Wanyi,NI Bingyu,JIANG Chao,et al. Uncertainty analysis and optimization of sinter cooling process for waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering,2019,150:111 – 120.

[9] TIAN Wanyi,JIANG Chao,NI Bingyu,et al. Global sensitivity analysis and multi-objective optimization design of temperature field of sinter cooler based on energy value [J]. Applied Thermal Engineering,2018,143:759 – 766.

[10] TIAN Fuyou,HUANG Lianfeng,FAN Liwu,et al. Wall effects on the pressure drop in packed beds of irregularly shaped sintered ore particles [J]. Powder Technology,2016,301:1284 – 1293.

[11] FAN X,YANG H,TINA W,et al. Catalytic oxidation of chlorobenzene over MnO_x/Al_2O_3-carbon nanotubes composites [J]. Catalysis Letter,2011,141(1):158 – 162.

[12] GUO Zehua, SUN Zhongning, ZHANG Nan, et al. Influence of confining wall on pressure drop and particle-to-fluid heat transfer in packed beds with small D/d ratios under high Reynolds number [J]. Chemical Engineering Science,2019,209:115200.

[13] GORMAN J M,ZHENG A,SPARROW E M. Bounding wall effects on fluid flow and pressure drop through packed beds of spheres [J]. Chemical Engineering Journal,2019,373:519 – 530.

[14] MAYERHOFER M, GOVAERTS J, PARMENTIER N, et al. Experimental investigation of pressure drop in packed beds of irregular shaped wood particles [J]. Powder Technology,2011,205(1):30 – 35.

[15] KOEKEMOER A,LUCKOS A. Effect of material type and particle size distribution on pressure drop in packed beds of large particles: Extending the Ergun equation [J]. Fuel,2015,158:232 – 238.

[16] PARK J H,LEE M,MORIYAMA K,et al. Adequacy of effective diameter in predicting pressure gradients of air flow through packed beds with particle size distribution [J]. Annals of Nuclear Energy,2018,112:769 – 778.

[17] SOMA J. Exergy transfer: a new field of energy endeavor [J]. Energy Engineering,1985,82(4):11 – 22.

[18] DUNBAR W R, LIOR N R, GAGGIOLI A. component equations of energy and exergy [J]. Journal of Energy Resources Technology,1992,114(1):75 – 83.

[19] 张四宗,温治,刘训良,等. 不规则烧结矿余热回收竖罐内气体阻力特性 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(6):1963 – 1973.
ZHANG Sizong, WEN Zhi, LIU Xunliang, et al. Gas resistance characteristics in vertical tank with irregular sinter for waste heat recovery [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(6):1963 – 1973.

[20] 张福林. 竖式逆流换热装置整体设计及数值分析 [D]. 马鞍山:安徽工业大学,2020.
ZHANG Fulin. The Overall design and numerical analysis of the vertical countercurrent heat exchanger [D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology,2020.

(上接第15页)

HE Xinhua,WEN Rongyao. A vertical sieving sintering cooler and sintering ore cooling method:201710512387.2 [P]. 2017 – 06 – 29.

[24] 弋治军,王雪原,郑宏,等. 一种烧结分级组合冷却及余热回收装置:202111496561.1 [P]. 2021 – 12 – 09.
YI Zhijun,WANG Xueyuan,ZHENG Hong,et al. A sintering classification combined cooling and waste heat recovery device:202111496561.1 [P]. 2021 – 12 – 09.

[25] 高静涛,白银川. 一种基于梁式结构的方形竖冷窑:202021953317.4 [P]. 2020 – 09 – 07.
GAO Jingtao,BAI Yinchuan. A square vertical cooling kiln based on beam structure:202021953317.4 [P]. 2020 – 09 – 07.

[26] 张志良. 多角多面多层360度送风烧结矿冷却塔:201718064576.6 [P]. 2017 – 09 – 22.
ZHANG Zhiliang. Multi angle, multi sided and multi-layer 360 degree air blast sintering ore cooling tower:201718064576.6 [P]. 2017 – 09 – 22.

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