

高温烧结矿气—固换热过程数值模拟及参数分析

张 欣 温 治[✉] 楼国锋 刘训良 郑坤灿

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083

[✉] 通信作者, E-mail: wenzh@meustb.edu.cn

摘 要 在详细分析了高温烧结矿冷却过程传热机理的基础上, 根据能量守恒定律建立了高温烧结矿气—固换热过程的一维非稳态热过程数学模型, 并利用现场实测数据对所建立的数学模型进行了验证. 结果表明: 所建立的数学模型是正确可信的. 在此基础上, 重点研究了冷风风速和台车移动速度等主要热工参数对环冷机内冷却过程的影响, 并针对某环冷机的实际生产情况提出了具体的操作建议.

关键词 烧结矿; 冷却; 传热; 数学模型; 数值分析

分类号 TK124

Numerical simulation and parameters analysis on the gas-solid heat transfer process of high temperature sinter

ZHANG Xin, WEN Zhi[✉], LOU Guo-feng, LIU Xun-liang, ZHENG Kun-can
School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
[✉] Corresponding author, E-mail: wenzh@meustb.edu.cn

ABSTRACT Based on carefully analyzing the heat transfer mechanism of the cooling process of high temperature sinter, a one-dimensional unsteady mathematical model was established for the gas-solid heat transfer process of high temperature sinter according to energy conservation. The mathematical model was verified to be correct and reliable by real data. Lastly, the model was used to investigate the effects of main operation parameters such as the velocity of cooling air and the moving speed of the trolley on the cooling process of the annular cooler, and some proposals were put forward for operations of the annular cooler.

KEY WORDS sinter; cooling; heat transfer; mathematical models; numerical analysis

近几年随着钢铁行业的迅速发展, 我国已成为世界钢铁生产大国. 钢铁产业是一个高耗能、高污染的产业, 据统计^[1-2], 烧结工序的能耗约占整个钢铁企业能耗的 10%, 是仅次于炼铁的第二大耗能工序. 在烧结工序中约有 50% 的热能被烧结烟气和冷却机废气带走 (其中烧结机主烟道烟气余热占烧结工序能耗的 13% ~ 23%、冷却机 (包括环冷机和带冷机等) 废气余热占烧结工序能耗的 19% ~ 35%), 这样不仅浪费了大量的高温烟气余热, 同时也对环境造成了污染. 冷却机作为影响整个工艺系统热效率的关键设备之一, 国内外的研究者对此做了较多研究. 陈春霞将某一环冷机按时间划分单元, 以环冷机每分钟处理的烧结矿作为一个单元, 并将各单元视为逆流式换热器模型, 再利用传热单元数法进

行计算, 最后依据烧结余热回收原理提出对环冷机的改造^[3]; 孙志斌以某环冷机为研究对象, 利用 Fluent 软件对环冷机内的流动、传热等进行数值模拟, 得到了环冷机内流场、温度场和压力分布等^[4]; Jiang 等通过数值模拟和实验方法研究了烧结矿冷却过程中三维非稳态流体流动与传热问题, 详细分析了孔隙率和颗粒当量直径对 Nu 数的影响, 并提出了适合其模拟对象的 Nu 数经验公式^[5]; Caputo 等通过移动床进行热量回收的动态仿真瞬态建模, 利用 VisSim 计算机数值仿真语言环境开发了仿真软件, 并在烧结矿冷却机上证明了其可行性^[6-7]. 前面的研究主要分为两类情况: 一类基于连续介质假设, 采用三维多孔介质模型, 利用 CFD 等商业软件研究其内部流动换热机理; 另一类则采用过于简化的热

平衡模型, 对工程应用精度较低, 难以适应目前余热梯级利用的更高要求. 因此, 本文通过对环冷机内烧结矿冷却机理的研究, 认为其冷却过程可以采用基于连续介质假设的一维非稳态传热过程数学模型. 该模型应用在某公司的环冷机上, 模拟结果表明模型假设合理且精度较高, 能够满足工程应用的要求. 在此基础上, 本文还对该环冷机的工艺参数进行了分析, 提出了工艺参数合理的操作建议.

1 高温烧结矿气-固换热过程物理数学模型

1.1 基本假设

考虑到实际问题比较复杂, 在建立数学模型前特对环冷机系统作如下假设^[8-9]: (1) 整个冷却机系统的运转状态稳定, 冷却机内物料分布均匀; (2) 高温烧结矿近似认为是大小不一的球形颗粒, 与气体之间的传热为稳态; (3) 环冷机内的高温烧结矿水平运动, 无沉降, 气流垂直向上运动; (4) 环冷机内部沿长度和宽度方向的导热可忽略不计; (5) 空气与高温烧结矿间的相对速度为空气速度; (6) 忽略热弥散和气相导热.

1.2 物理模型

环冷机的三维渲染图见图 1. 在上述假设条件下, 高温烧结矿冷却过程的物理模型见图 2. 高温烧结矿水平运动, 冷却风垂直向上运动, 它们之间主要通过对流方式换热, 使烧结矿温度降低, 达到冷却的效果, 同时冷却风由于吸收热量温度升高, 被再次利用.

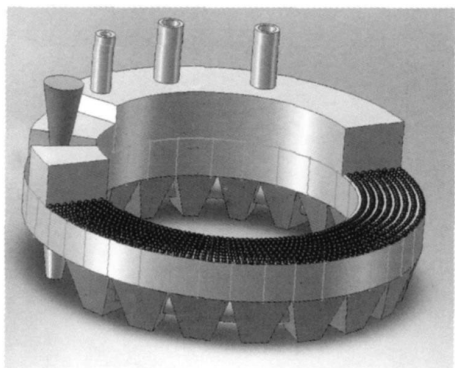


图 1 某环冷机示意图

Fig 1 Schematic diagram of an annular cooler

1.3 数学模型

根据能量守恒原理, 高温烧结矿冷却过程其三维非稳态传热过程数学模型如下^[10].

(1) 气体控制方程.

$$\epsilon_b \rho_g \frac{\partial (C_g T_g)}{\partial \tau} + \text{div}(\omega_g \gamma C_g \rho_g T_g) =$$

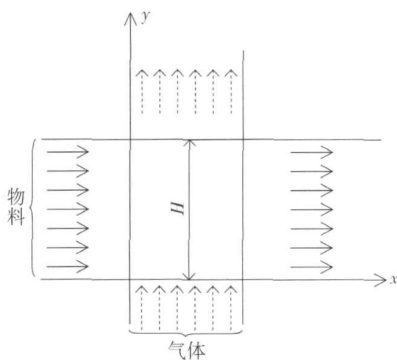


图 2 物理模型

Fig 2 Physical configuration

$$\text{div}(\lambda_g \text{grad} T_g) + S_{v\alpha} (T_m - T_g) \quad (1)$$

(2) 固体控制方程.

$$(1 - \epsilon_b) \rho_m \frac{\partial (C_m T_m)}{\partial \tau} + \text{div}(\omega_m C_m \rho_m T_m) =$$

$$\text{div}(\lambda_m \text{grad} T_m) + S_{v\alpha} (T_g - T_m) \quad (2)$$

式中: ϵ_b 为孔隙率; ρ_g 为气体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; τ 为时间, s ; C_g 为气体比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; $S_{v\alpha}$ 为单位体积内的换热面积, $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$; λ_g 和 λ_m 分别为气体和固体热导率, $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; T_g 和 T_m 分别为气体和固体的温度, $^\circ\text{C}$; ω_g 和 ω_m 分别为气体和固体的表观速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; α 为综合换热系数, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$; ρ_m 为固体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_m 为固体比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

由于环冷机的台车宽度较宽, 一般为 $3 \sim 4 \text{ m}$, 台车宽度方向上烧结矿温差较小, 可忽略其沿台车宽度方向上的换热, 现场测试也证实了这一假设. 另外, 沿烧结矿运动方向 (x 方向) 上, 可以用时间维来代替有效冷却长度. 因此, 根据上述假设, 高温烧结矿冷却过程其控制方程可用一维非稳态传热过程数学模型来描述^[7, 11-12].

(3) 气体控制方程.

$$\epsilon_b \rho_g \frac{\partial (C_g T_g)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial y} (\omega_g \gamma C_g \rho_g T_g) = S_{v\alpha} (T_m - T_g) \quad (3)$$

(4) 固体控制方程.

$$(1 - \epsilon_b) \rho_m \frac{\partial (C_m T_m)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial y} \right) + S_{v\alpha} (T_g - T_m) \quad (4)$$

式中, y 为料层高度方向上的坐标, m .

孔隙率 ϵ_b 采用萨斯科夫和洛别斯卡娅^[13]提出的经验公式计算, 见下式:

$$\epsilon_b = 0.0005 \times (15.5 q_1 + 11.3 q_2 + 9.1 q_3 +$$

$$7.6\varphi_4+6.7\varphi_3+6.3\varphi_0) \tag{5}$$

式中, $\varphi_1 \sim \varphi_6$ 为筛级组成, 相应的当量直径分别大于 80、80~60、60~40、40~25、25~10和 10~0 mm。

1.4 定解条件

(1) 初始条件. $\tau=0$ 时, $T_m = T_{m0}$, $T_g = T_{g0}$. 在烧结矿落入环冷机入口处, 假设此时高度方向上固体温度为烧结矿落入环冷机的初始温度, 气体温度为环境温度。

(2) 边界条件. $y=0$ 时, $T_g = T'_{g0}$. 在环冷机底部进口, 空气温度为环境温度。

1.5 数值计算方法

本文采用外节点法对计算区域进行离散化, 如图 3所示, 在 y 方向上共划分 150个节点, 在 x 方向上设置 $\Delta x=1$ s, 共 5 217个节点. 利用有限差分技术, 将控制方程转化为各个离散节点的代数方程组, 根据定解条件, 采用 TDMA法和迭代法求出空间离散点上高温烧结矿和气体温度随时间的变化规律. 在进行气体迭代计算时, 当满足本次计算与上一次计算相对误差小于 0.01%时迭代结束. 本文通过计算, 在 $\varepsilon \leq 0.01\%$, $\Delta x \leq 1$ s时, 在增加网格数量(如加密 50%)和减小时间步长(如缩短 50%)时, 其计算结果相对误差均小于 0.1%, 可认为在该条件下获得的为网格无关解。

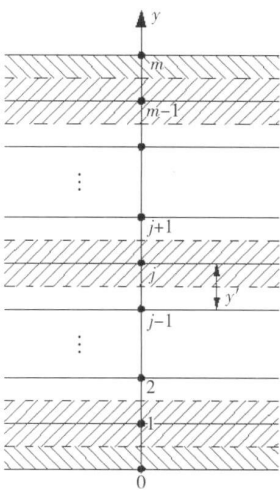


图 3 网格划分
Fig 3 Mesh Generation

2 数学模型的实验验证

数学模型计算结果的正确与否必须经过实验验证, 本文根据某公司烧结厂的现场实际生产数据对环冷机内烧结矿冷却过程进行了数值计算, 并与现场实测数据进行了对比分析. 表 1为模型计算所用的主要参数, 表 2为模型计算结果和烧结矿上表面实测温度的对比. 从表 2可以看出, 烧结矿上表面

表 1 计算中环冷机的主要参数
Table 1 Main parameters of the annular cooler used in the calculation

参量	环冷机 中径 /m	台车 宽度 /m	有效冷却 面积 /m ²	布料层 厚度 /m	环冷机产量 / (t h ⁻¹)	台车移动速度 / (m min ⁻¹)	鼓风机额定流量 / (m ³ h ⁻¹)	烧结矿进 口温度 /℃	冷却空气 温度 /℃
具体数据	42	3.5	396	1.2	570	2	484 000	650	10

表 2 烧结矿上表面实测温度和模型计算结果的对比
Table 2 Comparison of computed and measured sinter temperatures on the upper surface

距入料口 位置 /m	现场实 测值 /℃	模型计 算值 /℃	绝对 误差 /℃	相对 误差 /%
0.10	650	649	1	0.15
13.80	532	545	13	2.44
38.64	374	370	4	1.07
55.20	297	285	12	4.04
60.72	254	255	1	0.39
69.00	231	221	10	4.33
85.56	160	162	2	1.25
93.84	146	139	7	4.79
102.12	117	119	2	1.71
107.64	105	107	2	1.90
120.00	82	85	3	3.66

的模型计算温度和实测温度规律吻合得很好, 最大相对误差为 4.79%. 表明所建模型是正确可信的, 可以利用该模型进行数值计算。

3 数值模拟结果及其参数分析

利用验证后的数学模型, 本文对冷却风风速、台车移动速度、高温烧结矿颗粒粒径和孔隙率等单因素的变化对高温烧结矿冷却过程的影响程度进行了数值计算。

3.1 数值计算结果及其分析

图 4中得到的是烧结矿上表面温度沿环冷机周向方向上的变化规律. 从图中可以看出, 随着离烧结矿下料口距离的增大, 烧结矿上表面温度逐渐降低, 这是因为烧结矿在跟台车移动过程中一直被冷却风冷却, 到冷却终点处其温度低于 150℃, 这与烧

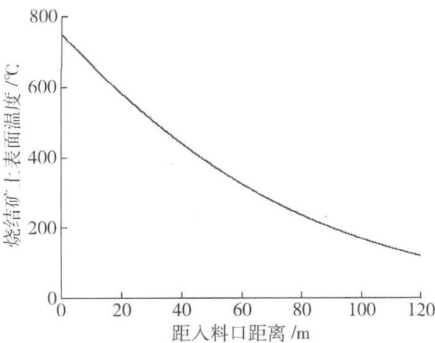


图 4 烧结矿上表面温度沿环冷机周向方向上的变化
Fig 4 Change of sinter temperature on the upper surface along the circumferential direction of the annular cooler

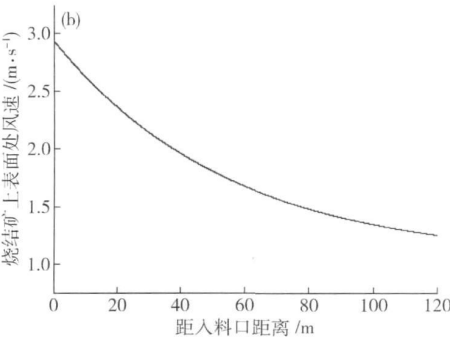
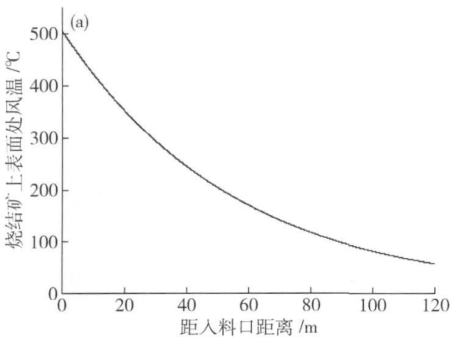


图 5 烧结矿上表面处风温 (a) 和风速 (b) 沿环冷机周向方向上的变化
Fig 5 Changes of air temperature (a) and air velocity (b) on the upper surface along the circumferential direction of the annular cooler

3.2 操作参数对高温烧结矿冷却过程的影响

3.2.1 冷却风风速对高温烧结矿冷却过程的影响

从图 6 和图 7 可以看出: 随着冷却风风速的增大, 烧结矿出口温度呈下降趋势; 150℃对应的等温线提前, 靠近入料口处. 这是因为冷却风与烧结矿主要通过对流方式换热, 风速增大时, 它们之间的换热效果增强, 即熟料冷却效果更好, 使 150℃对应的等温线提前, 即烧结矿出口温度下降. 在实际生产时, 烧结矿出口温度一般控制在 150℃以下, 从图 6 看出风速应控制在 0.9 m/s 以上; 现场的环冷机由五台相同性能的鼓风机并联供风, 每台鼓风机的最大风量是 484 000 m³·h⁻¹, 当时只开四台鼓风机, 故最大风速为 1.358 m/s, 取冷却风量有效系数为 90%, 可得到风速为 1.2 m/s. 因此, 冷却风风速宜控制在 0.9~1.2 m/s.

3.2.2 台车移动速度对高温烧结矿冷却过程的影响

从图 8 和图 9 可以看出: 随着台车移动速度的增大, 烧结矿出口温度升高; 150℃对应的等温线后移, 靠近出料口处. 这是因为台车移动速度增加后, 导致物料被冷却的时间减少, 冷却效果下降; 在同样

结矿冷却规律相符.

图 5 显示烧结矿上表面处风温和风速沿环冷机周向方向上的变化规律. 从图 5(a) 和图 5(b) 中可以看出, 随着离烧结矿下料口距离的增大, 烧结矿上表面处的风温和风速都逐渐降低. 其原因是冷却风通过与烧结矿换热, 使烧结矿温度降低而自身温度升高, 图 4 中显示烧结矿温度逐渐降低, 所带显热少, 故冷却风风温逐渐降低; 在初始标态风速相同的情况下, 烧结矿上表面处实际风速由风温决定, 风温逐渐降低, 故风速逐渐降低.

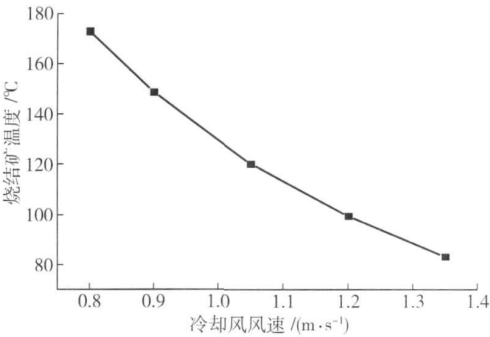


图 6 冷却风风速对烧结矿出口温度的影响
Fig 6 Effect of the velocity of cooling air on the outlet temperature of sinter

产量下料层变薄会导致其冷却效果增强. 从模拟结果可知前者是主要的, 即随着台车移动速度的增大, 其冷却效果下降, 从而使 150℃对应的等温线后移, 即烧结矿出口温度升高. 在实际生产时, 烧结矿出口温度一般控制在 150℃以下, 从图 8 看出台车移动速度应控制在 0.028 m/s 以下; 当台车移动速度减小时, 同样产量下料层会升高, 现场环冷机的台车高度为 1.5 m, 烧结矿料层高度不能超过它, 故存在最小台车移动速度, 图 9 中的四个图中的 y 轴表示

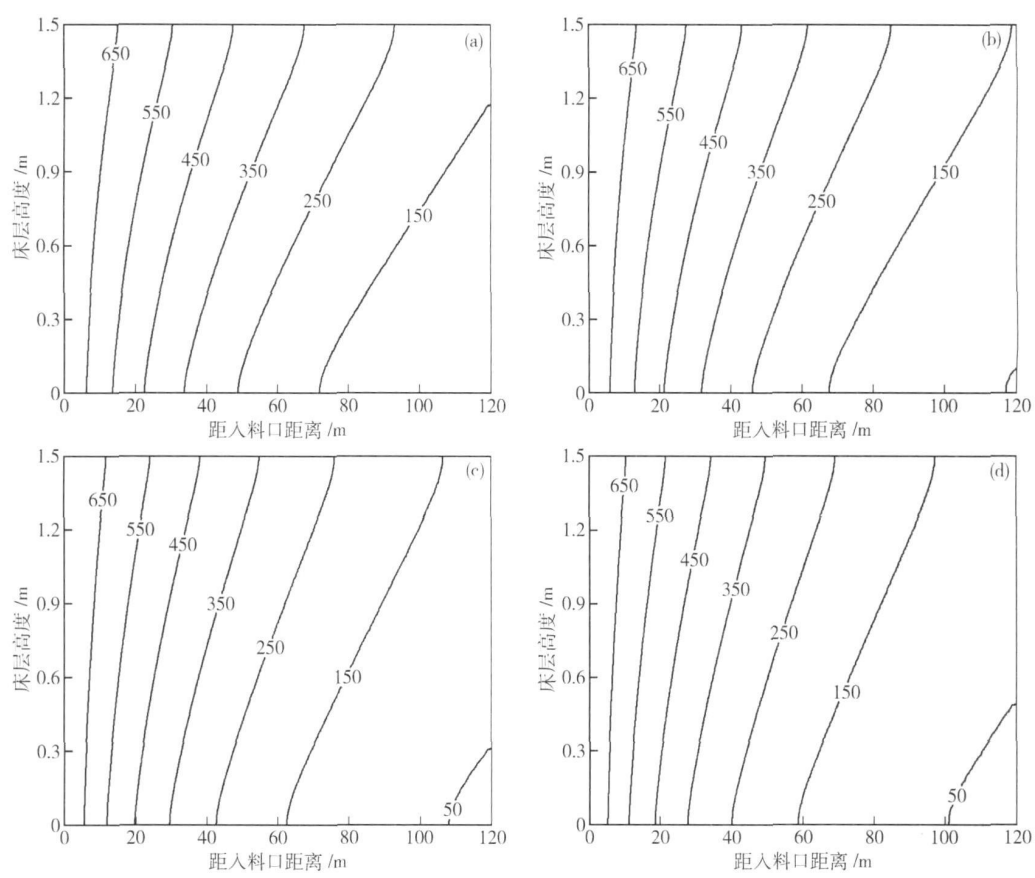


图 7 不同冷却风风速时的床层内熟料等温线分布 (单位: $^{\circ}\text{C}$). (a) $0.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.90\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $1.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $1.20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig 7 Isotherm distribution in $^{\circ}\text{C}$ of sinter in the bed at different velpcities of cooling air (a) $0.80\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.90\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $1.05\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $1.20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

的是对应不同台车移动速度时的料层高度, 由台车高度可知料层最高为 1.5 m , 此时对应的台车移动速度为 $0.023\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 为最小速度. 因此, 台车移动速度控制在 $0.023\sim0.028\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 比较合适.

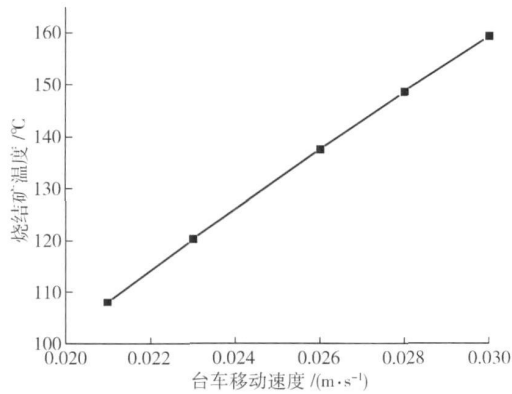


图 8 台车移动速度对烧结矿出口温度的影响
Fig 8 Effect of the trolley's moving speed on the outlet temperature of sinter

图 10 显示的是当烧结矿出口最高温度设定为

$150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时对应的冷却风风速和台车移动速度关系图. 从图 6 ~图 9 所示规律可知, 在该条曲线以下的任意冷却风风速和台车移动速度的组合, 都可以使烧结矿出口最高温度低于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, 符合工程实际要求. 根据前面的分析可知, 在该曲线和虚线组成的空间内的任意冷却风风速和台车移动速度的组合都能满足工程实际要求.

3.3 颗粒粒径及其堆积状态对高温烧结矿冷却过程的影响

3.3.1 高温烧结矿粒径对高温烧结矿冷却过程的影响

从图 11 可以看出, 随着颗粒粒径的增大, 烧结矿出口温度升高. 这是因为高温烧结矿与冷却风主要通过对流换热, 随着颗粒粒径的增大, 其比表面积减小, 对流换热量降低, 导致换热效果下降, 从而使烧结矿出口温度升高.

3.3.2 高温烧结矿孔隙率对高温烧结矿冷却过程的影响

从图 12 可以看出, 随着孔隙率的增大, 烧结矿

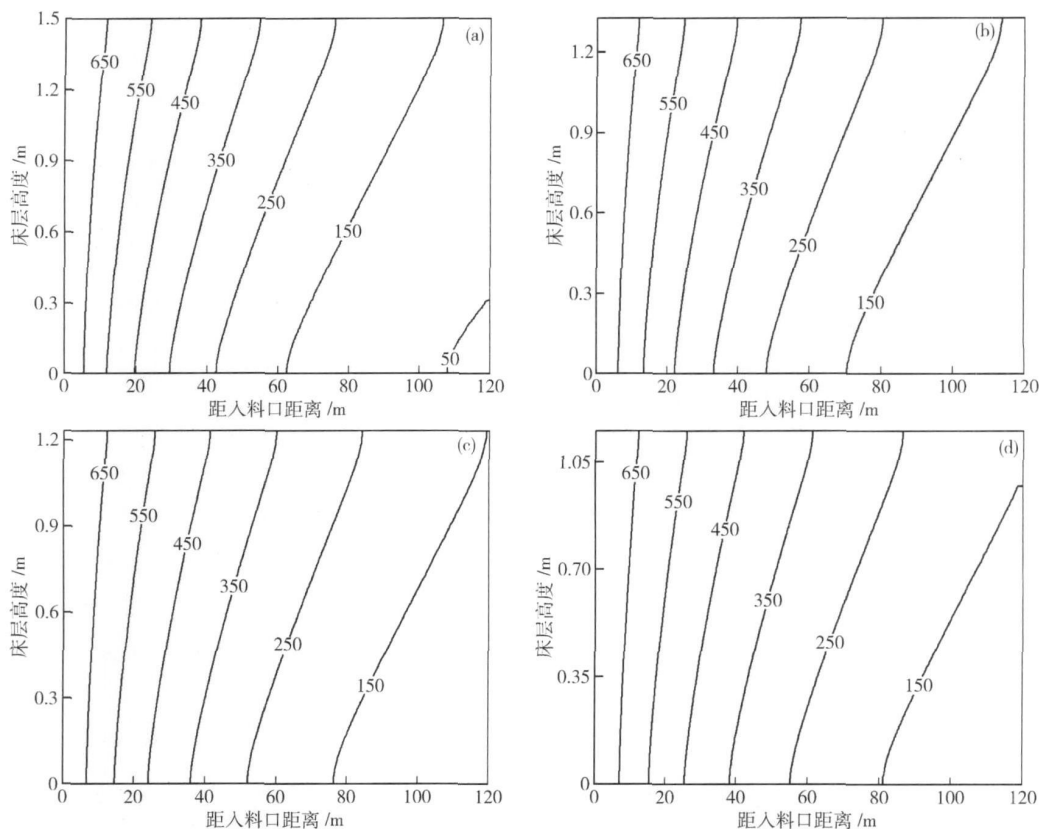


图 9 不同台车移动速度时的床层内熟料等温线分布 (单位: °C). (a) $0.023\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.026\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $0.028\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $0.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
Fig 9 Isotherm distribution in °C of the sinter in the bed with different trolley moving speeds (a) $0.023\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (b) $0.026\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (c) $0.028\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$; (d) $0.03\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

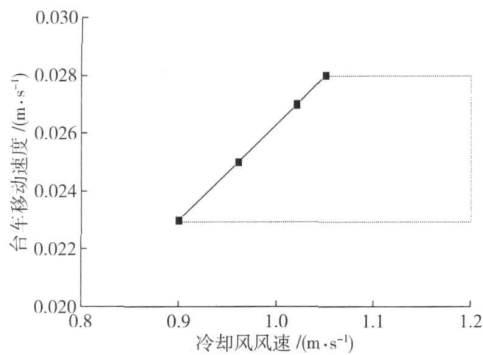


图 10 烧结矿出口温度为 150 °C 时对应的冷却风风速和台车移动速度关系
Fig 10 Relation between the velocity of cooling air and the moving speed of the trolley when the outlet temperature of sinter is 150 °C

出口温度升高. 这是因为高温烧结矿与冷却风主要通过对流方式换热, 当烧结矿孔隙率增大时, 其比表面积减小, 对流换热量降低, 导致换热效果下降, 从而使烧结矿出口温度升高.

4 结论

(1) 随着冷却风风速的增大, 烧结矿出口温度

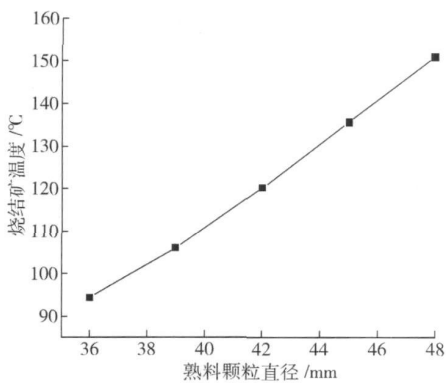


图 11 高温烧结矿颗粒粒径对烧结矿出口温度的影响
Fig 11 Effect of sinter size on the outlet temperature of sinter

- 降低, 风速每增加 $0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度降低约 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (2) 随着台车移动速度的增大, 烧结矿出口温度升高, 移动速度每增加 $0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度升高约 $12\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (3) 随着烧结矿粒径的增大, 烧结矿出口温度升高, 其粒径每增加 3 mm , 温度升高约 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- (4) 随着烧结矿孔隙率的增大, 烧结矿出口温

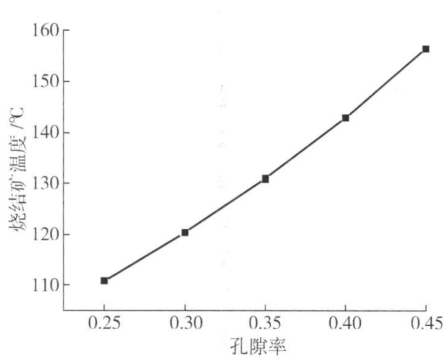


图 12 高温烧结矿孔隙率对烧结矿出口温度的影响
Fig 12 Effect of void fraction on the outlet temperature of sinter

度升高,孔隙率每增加 0.05 温度升高约 11℃.

(5) 在同时满足工艺要求、现场实际情况和经济性前提下,对所研究对象而言,冷却风风速宜控制在 $0.9 \sim 1.2 \text{ m s}^{-1}$,台车移动速度宜控制在 $0.023 \sim 0.028 \text{ m s}^{-1}$.

参 考 文 献

[1] Wu Y S Sintering waste heat recovery technology. Energy Conserv Technol. 1990(4): 44
(吴亦三. 烧结机余热回收利用技术. 节能技术, 1990(4): 44)

[2] Wang Z P, Hu X M. About the status and development trend of sintering waste heat power generation. Sintering Pelletizing, 2008, 33(1): 31
(王兆鹏, 胡晓民. 烧结余热回收发电现状及发展趋势. 烧结球团, 2008 33(1): 31)

[3] Chen C X. Recovery of Residual Heat Resource in Steel Producing Process[Dissertation]. Liaoning: Northeastern University, 2008
(陈春霞. 钢铁生产过程余热资源的回收与利用[学位论文]. 辽宁: 东北大学, 2008)

[4] Sun Z B. The Study of the Pellets Heat Process in Annular Cooler [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2007
(孙志斌. 环冷机内球团热过程的研究[学位论文]. 北京: 北

京科技大学, 2007)

[5] Jang J Y, Chiu Y W. 3-D transient conjugated heat transfer and fluid flow analysis for the cooling process of sintered bed. Appl Therm Eng, 2009, 29: 2895

[6] Caputo A C, Cardarelli G, Pelagagge P M. Analysis of heat recovery in gas-solid moving beds using a simulation approach. Appl Therm Eng, 1996, 16: 89

[7] Caputo A C, Pelagagge P M. Heat recovery from moving cooling beds: transient modeling by dynamic simulation. Appl Therm Eng, 1999, 19: 21

[8] Jin Z, Wen Z, Si J L. Research and analysis of numerical simulation system for sintering heat process. Metall Ind Autom, 2008, 32(5): 38
(金周, 温治, 司俊龙. 烧结热过程数值仿真系统的研究与分析, 冶金自动化, 2008 32(5): 38)

[9] Feng S H, Xu D L, Li H, et al. Simulation study on heat transfer between clinker and gas of the grate cooler. J Xi'an Univ Archit Technol, 2007, 39(2): 224
(冯绍航, 徐德龙, 李辉, 等. 篦冷机中气固两相换热过程的模拟研究. 西安建筑科技大学学报, 2007, 39(2): 224)

[10] Si J L. Modeling of Layered Transmission Process in Heterogeneous Porous Media and Its Application [Dissertation]. Beijing: University of Science Technology Beijing, 2009
(司俊龙. 非均质多孔介质层状传输过程模型及应用[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2009)

[11] Long H M, Fan X H, Mao X M, et al. Sintering bed temperature distribution model based on heat transfer. J Cent South Univ Sci Technol, 2008, 39(3): 436
(龙红明, 范晓慧, 毛晓明, 等. 基于传热的烧结料层温度分布模型. 中南大学学报: 自然科学版, 2008 39(3): 436)

[12] Gong Y B, Huang D B, Yang T J. Temperature field model of the sinter bed and its common analytical solution. J Univ Sci Technol Beijing, 2002, 24(4): 395
(龚一波, 黄典冰, 杨天钧. 烧结料层温度分布模型解析解及其统一形式. 北京科技大学学报, 2002, 24(4): 395)

[13] дебритси М Г. Dry Coke Quenching. Translated by Li Z H. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981
(捷波里特斯基 М Г. 干法熄焦. 李哲浩译. 北京: 冶金工业出版社, 1981)