新型液密封环冷机结构温度场及热变形有限元分析

刘隆健[1]，王 巧[2]，丁怀平[1]，尹晓春[1]，陈传庆[1]，廖鹏飞[1]
(1. 南京理工大学 理学院，江苏 南京 210094；2. 内蒙古北方重工业集团有限公司，内蒙古 包头 014030)

摘要： 环冷机作业过程中产生不均匀热变形而导致的运行不平稳、卡轨等一系列问题，严重影响环冷机作业效率和企业经济效益。为准确预测环冷机不均匀的空间温度和热变形分布，本文采用有限元方法，分别在 Ansys 温度模块和耦合模块中对环冷机的温度场和热变形场进行分析研究，并对设备运行现场温度进行测量以佐证本文仿真结果的准确性和可靠性。结果显示：设备栏板上的温度梯度明显，从上部至下部呈递减趋势，环冷机温度场按圆周方向可分为高、中、低温区三个区域；环冷机热变形明显，栏板呈现向外壁方向弯曲的趋势，侧轨道变形沿圆周方向呈起伏波动状态，于高温区达到最大值。现场实验数据与仿真结果吻合度较高，表明本文所采用的有限元分析方法可准确预测设备运作过程中结构的空间温度效应，可为新型环冷机的安装指导提供可靠的理论支撑。

关键词： 有限元法；环冷机；Ansys；温度分布；热变形
中图分类号： TF046.4 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2022)03－0008－07
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.033

Finite element analysis of structural temperature field and thermal deformation of new liquid-sealed ring cold machine

LIU Longjian[1], WANG Qiao[2], DING Huaiping[1], YIN Xiaochun[1], CHEN Chuanqing[1], LIAO Pengfei[1]
(1. *School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Jiangsu* 210094, *Nanjing, China*; 2. *Inner Mongolia North Heavy Industries Group Corp., Ltd., Baotou* 014030, *Inner Mongolia, China*)

Abstract: The uneven thermal deformation generated during the operation of ring cold machine leads to a series of problems such as unstable operation and jammed rails, which seriously affect the operational efficiency of ring cold machine and the economic benefits of the enterprise. In order to accurately predict the uneven spatial temperature and thermal deformation distribution of ring cold machine, the finite element method is used to analyze and study the temperature field and thermal deformation field of ring cold machine in Ansys temperature module and coupling module respectively, and the temperature of the equipment operation site is measured to support the accuracy and reliability of the simulation results. The results show that: the temperature gradient on the breast board of the equipment is obvious and decreasing from the upper part to the lower part, and the temperature field of ring cold machine can be divided into three areas according to the circumferential direction: high temperature region, medium temperature region and low temperature region according to the circumferential direction; the thermal deformation of ring cold machine is obvious, and the breast board shows a tendency to bend in the direction of the outer wall, and the side track deformation is undulating and fluctuating along the circumferential direction and reaches the maximum value

收稿日期： 2021－09－24；**修回日期：** 2021－11－12
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(12002164)；江苏省自然科学基金资助项目(BK20190432)
作者简介： 刘隆健(1996—)，男，硕士研究生，从事工程力学方面的研究。
通讯作者： 丁怀平(1989—)，男，博士，讲师，从事固体力学方面的研究。

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

in the high temperature region. The field experimental data and simulation results are in good fitness，indicating that the finite element analysis method adopted in this paper can accurately predict the spatial temperature effect of the structure during the operation of the equipment，and can provide reliable theoretical support for the installation guidance of the new ring cold machine.

Key words: finite element method; ring cold machine; Ansys; temperature distribution; thermal deformation

在炼铁过程中，为保护后续炼铁设备安全运作，需要对经烧结机焙烧的高温烧结矿进行冷却处理，冷却过程中会产生大量余热。当前国内对于烧结矿的冷却及余热回收工艺主要依靠环状冷却机(环冷机)实现[1-2]。高温烧结矿由加料口进入环冷机，由底部风机鼓风冷却，同时环冷机沿圆形轨道逆时针向出料口运行，高温烧结矿逐步冷却[3-4]。环冷机运作过程中，由于体积较大、工作环境温度较高，会产生不均匀的热变形，从而导致环冷机出现运行不平稳、卡轨等现象，准确计算出热变形有利于消除一系列不利影响。由于环冷机的变形主要受热载荷影响[5]，为了准确计算热变形，需要准确预测出环冷机结构不均匀的空间温度分布(包括结构表面和结构内部)，故需对三维空间温度场进行数值模拟，在此基础上进行结构热变形计算分析。同时将温度场数值模拟结果与现场实际测得的结构表面温度场进行验证，确认模型结果的准确性。目前国内尚未对环冷机整体结构空间温度场有相应的分析，导致在环冷机安装过程中间隙调整方面主要靠经验摸索，甚至环冷机表面温度的测量尚未见报告。另外，环冷机结构温度场的计算对于环冷机冷却效率以及余热回收效率的研究分析也具有重大意义[6-7]。

针对环冷机运作过程中的温度分布的影响，多位学者对环冷机温度场采用理论简化、数值分析等方法进行研究。张欣等[8]根据能量守恒定律建立了烧结矿气固换热的一维非稳态数学模型，分析了风机鼓风速度和台车移动速度对环冷机冷却过程的影响，并通过现场实测数据对理论结果进行了验证。张晟等[9]在多孔介质模型和局部非热力学平衡理论的基础上，选取环冷机的一到二段为研究对象，建立了环冷机的二维稳态数值模型，确定了某型号环冷机的适宜热工参数。张小辉等[10]基于多孔介质模型，对动量方程源项加以修正，采用了局部非热力学平衡的双能量方程模型，建立了环冷机内烧结矿冷却过程的数学模型。张家元等[11]采用直接热力耦合的方法，研究了环冷机台车车体的温度、应力和位移分布，分析了环冷机作业过程中热膨胀和热应力对结构所造成的影响。目前关于环冷机内温度场的研究主要局限于环冷机内烧结矿与气体的温度场分析，对环冷机结构温度场的研究也局限于一小节被选取的机体，未考虑对环冷机整体结构的温度场研究。因此，研究难以有效描述、分析环冷机结构整体的热载荷影响。

某钢厂烧结矿环冷机投入生产距今已满 11 年，长时间的高温环境导致设备老化严重，零件变形大，致使环冷机无法正常作业，严重影响了生产效率和企业经济效益。对该钢厂拟引进的新型环冷机温度场和热载荷引起的热变形进行数值模拟分析，对设备的安装以及后期的安全运行具有重要意义。本文基于有限元仿真的方法，以环状冷却机为研究对象，研究了拟引进的新型环冷机作业过程中设备温度场及热变形的分布，并对引进后的新型环冷机作业现场进行温度实测对比，以期结果可为环冷机设备的安装指导提供理论支撑。

1　三维结构模型

某钢厂拟引进的新型液密封环冷机占地面积为 460 m^2，直径为 48 m，由 80 节台车环形串联而成，如图 1、2 所示。该液密封环冷机主要包括双层栏板、侧轨道、筋板、固定轴、旋转通轴、算板、回转框架、支撑辊系、底部轨道、保温层等众多部件。其中保温层材料为硅酸铝，其余部件材料为钢材，材料属性如表 1 所示[12-13]。烧结矿初入环冷机时温度达 700 ℃，出料温度为 80 ℃，由 3 台 250 kW 和 2 台

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

1 000 kW风机由底部向上鼓风冷却。为了精确计算新型液密封环冷机的温度场，需要建立高精度三维结构模型，充分考虑环冷机各部分之间的传热性能。本文使用三维建模软件Solidworks按照1∶1比例建立三维实体模型，实现了各个部件的精确建模。

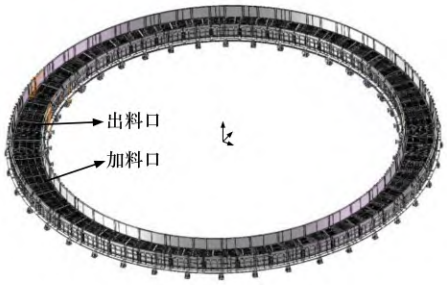
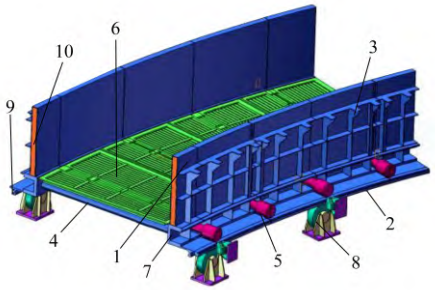


图1 新型液密封环冷机主体结构模型

Fig. 1 Whole structure model of the new liquid seal circular cooler



1—双层栏板；2—侧轨道；3—筋板；4—固定轴；5—旋转通轴；6—算板；7—回转框架；8—支撑辊系；9—底部轨道；10—保温层。

图2 新型液密封环冷机局部模型

Fig. 2 A local model of the new liquid seal circular cooler

表1 材料参数表

Table 1 Table of material parameters

材料	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/Pa	泊松比	导热系数/[W·(m·K)$^{-1}$]	热膨胀系数/℃
钢结构	7 800	2×10^{11}	0.30	0.30	1.25×10^{-6}
硅酸铝保温棉	500	7×10^{5}	0.27	0.12	—

2 有限元模型及计算

2.1 有限元传热理论

针对一般情况下的三维热传导问题，根据热平衡原理，建立出温度场$T(x,y,z,t)$满足的微分方程：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial t}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial t}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial t}{\partial z}\right)+q_v=c\rho\frac{\partial t}{\partial t} \tag{1}$$

式中：c为材料比热容，J/(kg·K)；ρ为材料密度，kg/m^3；q_v为内部热源，W/kg；λ_x、λ_y、λ_z分别为x、y、z三个方向的导热系数，W/(m·K)；t为时间，s。

将第一类边界条件作为强制边界条件，在加权余量的伽辽金方法基础上，得到变分原理中的泛函表达式：

$$\Pi(T)=\int_\Omega\left\{\frac{1}{2}\left[\lambda_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\lambda_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\lambda_z\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right]-q_vT\right\}\mathrm{d}\Omega+\int_{S_2}qT\mathrm{d}S+\int_{S_3}h(T^2/2-T_cT)\,\mathrm{d}S \tag{2}$$

式中：Ω为计算域；S_2为热流边界面；S_3为对流边界面；q为热流密度，W/m^2；h为对流换热系数，W/(m^2·K)；T_c为环境温度，K。将整个环冷机结构进行离散，总体的泛函等于各个单元的泛函之和：

$$\Pi(T)=\sum_e\Pi^e$$

单元泛函的表达式如下：

$$\Pi^e=\int_{\Omega^e}\left\{\frac{1}{2}\left[\lambda_x\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2+\lambda_y\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2+\lambda_z\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2\right]-q_vT\right\}+\int_{S_2^e}qT\mathrm{d}S+\int_{S_3^e}\beta(T^2/2-T_cT)\,\mathrm{d}S \tag{3}$$

环冷机结构被离散成有限个单元体，在任一单元当中，各个点的温度可以表示为[14]

$$T=[N_1\cdots N_m]\ [T_1\cdots T_m]^T=NT^e \tag{4}$$

式中：m为单元节点数；N为形函数矩阵；T^e是单元节点温度向量。

将式(4)的插值温度表达式带入离散形式的单元泛函公式(3)，令$\delta\Pi=0$，可得稳态热传导问题的控制方程：

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

$$KT = P \tag{5}$$

式中：T 为整体节点温度向量；K 为热传递矩阵；P 为温度载荷向量。K 和 P 的表达式如下：

$$K = \int_{\Omega}\rho c\{N\}\ [N]\ \mathrm{d}\Omega + \int_{\Omega}[B]^{\mathrm{T}}\ [\lambda]\ [B]\ \mathrm{d}\Omega + \int_{\sum_{i=1}^{n} Sci} h\{N\}\ [N]\ \mathrm{d}S + \int_{Sr} k\{N\}\ [N]\ \mathrm{d}S$$

$$P = \int_{\Omega} q\{N\}\ \mathrm{d}\Omega + \int_{\sum_{i=1}^{n} Sci} h\varphi_{\mathrm{e}}\{N\}\ \mathrm{d}S + \int_{Sr} k\varphi_{\mathrm{r}}\{N\}\ \mathrm{d}S \tag{6}$$

式中：$\{N\}$ 为计算域的方向向量；$[N]$ 和 $[B]$ 分别为单元的形函数和应变矩阵；k 为辐射系数，单位为 1；φ_{e} 和 φ_{r} 分别为对流温度和辐射温度，K；n 是接触面的对数；Sr 和 Sci 分别为边界上的非接触面和接触面。

根据热弹性应力应变关系（如下）计算热变形[15]：

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - D\{\varepsilon_0\} = [D]\{\varepsilon\} - \{\sigma_{\Delta T}\} \tag{7}$$

式中：$\{\varepsilon\}$ 为热应变；$\{\varepsilon_0\}$ 为初始热应变；$\{\sigma_{\Delta T}\}$ 为对应的初始热应力；$\{\sigma\}$ 为结果热应力；$[D]$ 为弹性矩阵。

2.2　有限元模型的建立

新型液密封环冷机的三维整体结构复杂，局部区域刚度变化大，为了保证新型液密封环冷机温度场计算结果的可靠性，需采用精确建模的方式，建立温度传导符合实际使用工况的力学模型。

本文使用 Hypermesh 软件对已建立的新型液密封环冷机三维结构模型进行网格划分，获得有限元离散模型如图 3、4 所示。为了保证有限元计算的准确性，本文根据结构的复杂程度、计算的重点位置、连接部位，对整个结构使用六面体实体单元（Solid185）进行手动离散，以达到网格划分的疏密有致、过渡有序、层次分明的目标。整个结构共划分为 242 986 个单元，合计 352 820 个节点；通过二维接触网格建立出面—面接触，在车体底部轨道与支撑辊之间建立 80 对接触，在旋转框架与旋转通轴之间建立 160 对接触。

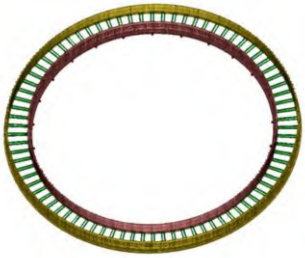


图 3　新型液密封环冷机有限元模型

Fig. 3　Finite element model of the new liquid seal circular cooler

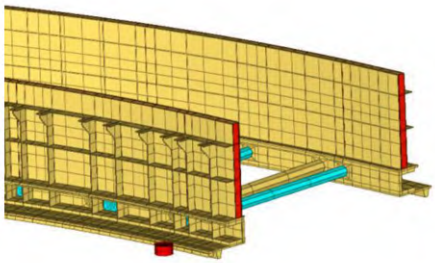


图 4　新型液密封环冷机网格剖面

Fig. 4　A cross-sectional view of the mesh of the new liquid seal circular cooler

2.3　温度加载

新型环冷机处于待安装状态，本文通过对烧结矿的冷却过程模拟来对环冷机进行温度加载。新型液密封环冷机回转中径为 48 m，料层厚度为 1.5 m，台车宽度为 3.6 m。取一节台车的烧结矿部分划分有限元模型，总计网格数 54 万个，将烧结矿区域简化为多孔介质模型，于 fluent 软件中模拟空气与烧结矿的对流换热过程。

底部空气入口温度为常温（293 K），由风机风量与入口面积得到空气入口速度为 6.7 m/s，计算域顶部边界设置为压力出口。烧结矿初始温度为 923 K，烧结矿材料参数见表 2。

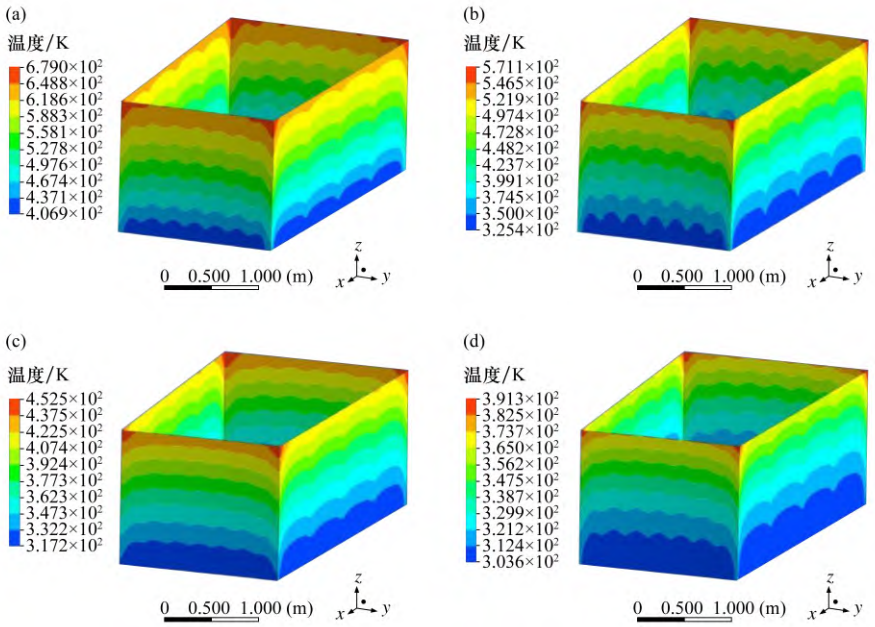
表 2　烧结矿材料参数表

Table 2　Table of sinter material parameters

密度/（kg·m^{-3}）	比热容/［J·（kg·K）$^{-1}$］	导热系数/［W·（m·K）$^{-1}$］	孔隙率
1700	600	8	0.4

不同时刻下的温度场结果如图 5。根据环冷机的旋转速度以及烧结矿的冷却时间，将台车侧壁的温度场作为温度载荷施加于对应位置的环冷机栏板与回转框架内壁，环冷机与空气

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



烧结时间/s：(a) 360；(b) 600；(c) 2 400；(d) 3 000

图 5 不同时刻烧结矿温度场

Fig. 5 Temperature field diagram of sinter at different time

接触部分设为空气对流界面，对流系数为 12.5[16]。

根据生产实际结合图 5 分析可知：由于栏板当中设有保温棉结构，栏板内壁和外壁的温度值相差较大，可达 180 ℃，隔温效果十分显著；由于风机的鼓吹、冷却作用，新型液密封环冷机在逆时针旋转作业过程中会逐步经历高、中和低温区，并于低温区趋于温度稳定，栏板外壁温度由 50 ~ 85 ℃逐步降低至 35 ~ 42 ℃，环冷机冷却效果明显；由于风机自下向上鼓风，环冷机整体结构温度场从下至上呈现温度递增的趋势，局部区域内高度方向上温差最大可达 35 ℃，同一高度下温度值大致相同，但由于筋板结构及栏板间伸缩缝的散热作用，会引起温度场的不连续，靠近筋板处温度值会比周围低 15 ~ 25 ℃。

3 计算结果及分析

3.1 温度场模拟分析及试验对比

为验证仿真结果的可靠性，对安装的新型环冷机作业现场进行温度实测，不同位置的温度数据可由红外图精确读取。部分中温区栏板红外测温数据与结构图及对应的有限元数值仿真结果如图 6 所示。分析图 6 可知，所选取部分上半段的现场实测温度数据范围为 37 ~ 47 ℃，有限元计算结果为 37 ~ 42 ℃，数值计算结



(a) 现场实测；(b) 有限元结果。

图 6 中温区温度场实验测试与有限元结果对比图

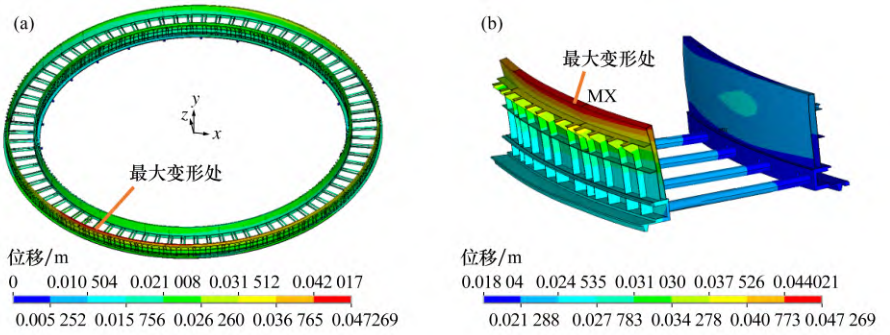
Fig. 6 Comparison of temperature field test and finite element results in medium temperature area

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

果与现场实测结果误差保持在 8% 以内。温度场数值模拟结果与实验结果吻合较好，说明本文对拟引进安装的新型环冷机结构温度场的分析预测方法具有较高的准确性与可靠性。

3.2　环冷机热变形分析

运行过程中，环冷机结构热变形位移检测如图 7 所示 [图 7(a) 为环冷机整体结构热变形计算结果，图 7(b) 为最大变形处局部放大图(变形放大 10 倍)]。由图 7 可知，由温度载荷引起的热变形最大处发生于高温区栏板上沿，位移可达 47.2 mm，由于内外壁温差影响，内壁热膨胀程度大于外壁热膨胀程度，环冷机结构呈现向外壁方向弯曲的趋势。



(a)　整体变形；(b)　局部变形。

图 7　环冷机结构热变形位移场

Fig. 7　Thermal deformation displacement field of circular cooler

在环冷机安装过程中，侧挡辊的间隙调整尤为重要。侧挡辊的安装主要受环冷机侧轨道的变形影响，不均匀的温度场导致环冷机侧轨道发生不均匀变形，依靠经验调整侧挡辊间隙将变得困难。图 8 为侧轨位置示意，图 9 为侧轨道变形前后的位置对比(变形放大 1 000 倍) ，其中 1 ~ 10 号为位移标记点，1 号为进料口处。图 10 为侧轨道的径向热变形线，图 11 为侧轨道的周向热变形线，其标记点与图 11 中的标记点一一对应。由图 8 ~ 10 可知：侧轨最大径向位移为 19.1 mm，发生在 3 号标记点附近；侧轨最大周向位移为 6.4 mm，发生在 7 号标记点附近。标记点位移见表3。在环冷机安装过程中，应根据侧轨道的变形值对侧挡辊间隙预留量进行调整。

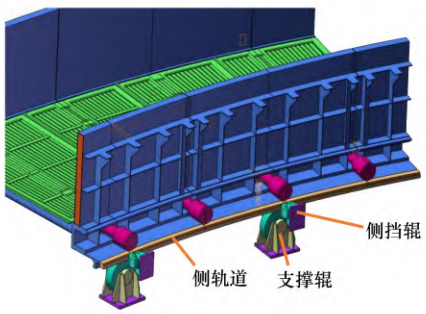


图 8　侧轨位置示意

Fig. 8　Side rail position diagram

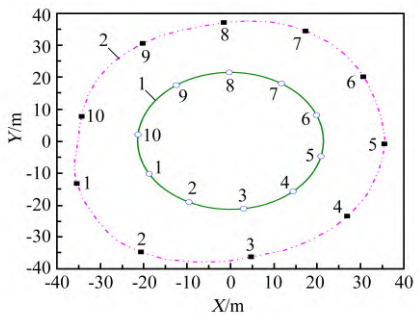


图 9　侧轨道变形前后轮廓对比

Fig. 9　Contour comparison of side track before and after deformation

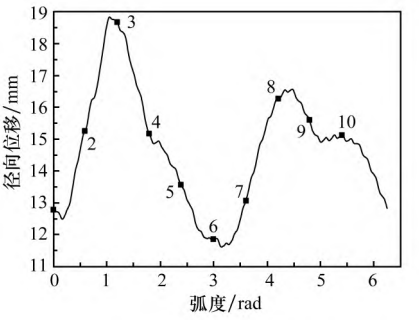


图 10　侧轨道径向位移

Fig. 10　Radial deformation diagram of side track

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

表3 标记点径向及周向位移

Table 3 Radial and circumferential displacement table of marker points mm

位移方向	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
径向	12.8	15.3	18.7	15.2	13.6	11.9	13.1	16.3	15.6	15.1
周向	4.20	5.10	2.90	0.44	3.90	6.20	6.30	4.20	1.00	1.30

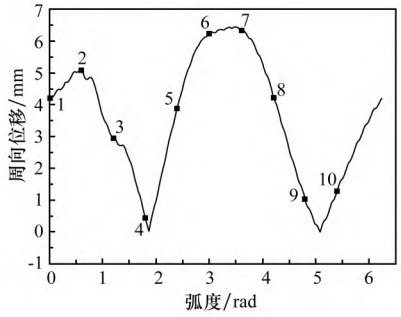


图11 侧轨道周向位移

Fig. 11 Circumferential deformation diagram of side track

4 结 论

(1) 环冷机内壁和外壁温差大，隔温效果明显，高温区内外壁温差可达180 ℃以上。

(2) 由于风机鼓吹冷却效应，环冷机结构温度场沿逆时针方向逐步降低，于低温区趋于稳定，外壁温度由高温区的50～85 ℃逐步降低至低温区的35～42 ℃；随着环冷机侧壁高度增加，栏板温度随之上升，栏板上部和下部温差最大可达35 ℃左右。

(3) 由于筋板和伸缩缝等结构的存在，会导致同一高度拦板的温度场并不完全相同，出现起伏波动的情况，且靠近筋板处温度会偏低，高温区筋板散热作用更为明显，比周围低15～25 ℃左右。

(4) 热变形最大处发生于高温区栏板上沿，达47.2 mm，环冷机结构呈现向外壁方向弯曲的趋势。

(5) 环冷机侧轨道呈现不均匀热变形，安装过程中应根据侧轨道变形量对侧挡辊间隙作出适宜调整。

有限元温度预测结果与现场实测数据误差整体在10%以内，局部最大误差不超过20%，二者吻合度较高，表明环冷机温度场的有限元数值计算方法具有较高的准确性和可靠性，可为环冷机结构的热变形分析提供准确的温度场数据，为环冷机设备的安装指导提供理论支撑。

参考文献:

[1] 张寿荣,于仲洁. 中国炼铁技术60年的发展[J]. 钢铁,2014,47(7):8－14.
ZHANG Shourong, YU Zhongjie. Development of ironmaking technology in the past 60 years [J]. Iron and Steel, 2014, 47(7): 8－14.

[2] 李宗平,范晓慧,孙英,等. 烧结环冷机余热发电的风量优化配置[J]. 烧结球团,2016,41(1):52－56.
LI Zongping, FAN Xiaohui, SUN Ying, et al. Optimization of air flow rate within circular cooler for waste heat power station [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(1): 52－56.

[3] 郭圣敏. 液密封环冷技术在烧结中的应用现状及展望[J]. 低碳世界,2015,12(36):167－168.
GUO Shengmin. Application status and prospect of liquid sealing ring cooling technology in sintering [J]. Low Carbon World, 2015, 12(36): 167－168.

[4] 邓志宏,高万良,东升,等. 浅谈烧结环冷机的跑偏与调整[J]. 烧结球团,2016,41(4):20－23.
DENG Zhihong, GAO Wanliang, DONG Sheng, et al. Analysis on running deviation and adjustment of sinter cooler [J]. Sintering and Pelletizing, 2016, 41(4): 20－23.

[5] 项宝胜,李建雄. 京唐烧结厂580 m² 环冷机跑偏分析及处理措施[J]. 中国冶金,2016,26(8):52－55.
XIANG Baosheng, LI Jianxiong. Deviation analysis and treatment of 580 m² ring cooler in Jingtang sintering plant [J]. China Metallurgy, 2016, 26(8): 52－55.

[6] 伏启让,石国庆. 烧结环冷机余热回收工程实践[J]. 烧结球团,2019,44(4):79－83.
FU Qirang, SHI Guoqing. Engineering practice of waste heat recovery of circular cooler for sintering machine [J]. Sintering and Pelletizing, 2019, 44(4): 79－83.

[7] 夏建芳,喻向阳,赵先琼. 基于环冷机冷却能耗最小目标的工艺参数优化[J]. 钢铁研究学报,2016,28(1):13－19.
XIA Jianfang, YU Xiangyang, ZHAO Xianqiong. Optimization of process parameters based on minimum target of cooling energy consumption of sinter cooler [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(1): 13－19.

(下转第82页)

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

中的应用[J]. 烧结球团,2003,27(6):47-50.
LIU Xinbing,DU Ye. Application of artificial sodium bentonite containing organic binder in pellet production [J]. Sintering and Pelletizing,2003,27(6):47-50.

[11] ARKOSKA D,SANKEY E,ANDERSON R. Application of organic binders in iron ore pelletizing and iron making [J]. Iron Making Conference Proceedings,1995.

[12] LA Hass,JA Aldinger. Effectiveness of organic binders for iron ore pelletization [J]. Report of Investigations United States, bureau of Mines,1998,52(5):81-84.

[13] NIKOLASK E L. New methods of application of Polyacrylate resins as binder [J]. Materials Chemistry and Physics,2002,3(12):169-172.

[14] 聂华荣,柳明珠. 羧甲基纤维素钠水凝胶的制备及其生物降解性研究[J]. 功能高分子学报,2003(4):553-556.
NIE Huarong,LIU Mingzhu. Study on preparation and biodegradability of sodium hydrogel of hydroxymethyl cellulose [J]. Journal of Functional Polymers,2003(4):553-556.

[15] MURR D L,EEGLAND D J. Development and production of organic-limestone pellets [J]. 48th Ironmaking Conf,1989:715.

[16] HASS L A. Effectiveness of organic binders for iron ore palletization [J]. U S Bur,Mines Rep,1989:21.

[17] 吴玉东. MHA黏结剂有机功能组分与铁、钛、硅天然氧化矿物表面的作用研究[D]. 中南大学,2014.
WU Yudong. Research on the interaction of the two component parts of MHA binder onto natural iron,titanium and silica oxide ores [D]:Central South University,2014.

[18] XIAO Qi. Briquett ore theory and practice [M]. Changsha:Central South University Industry Press,1989:56.

[19] 李建,付晓恒,李军,等. 基于偏移活化能对SiC球团干燥进行动态分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(4):753-761.
LI Jian,FU Xiaoheng,LI Jun,et al. Dynamic analysis of SiC pellets drying based on apparent warp activation energy [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2019,50(4):753-761.

(上接第14页)

[8] 张欣,温治,楼国锋,等. 高温烧结矿气—固换热过程数值模拟及参数分析[J]. 北京科技大学学报,2011,33(3):339-345.
ZHANG Xin,WEN Zhi,LOU Guofeng,et al. Numerical simulation and parameters analysis on the gas-solid heat transfer process of high temperature sinter [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(3):339-345.

[9] 张晟,董辉. 环冷机内气固传热过程仿真及优化[C]//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京:中国金属学会,2017:236-241.
ZHANG Sheng,DONG Hui. Simulation and optimization of gas-solid heat transfer in sinter annular cooler [C]//The 11th CSM Steel Congress. BeiJing:The Chinese Society for Metals,2017:236-241.

[10] 张小辉,张家元,戴传德,等. 烧结矿冷却过程数值仿真与优化[J]. 化工学报,2011,62(11):3081-3087.
ZHANG Xiaohui,ZHANG Jiayuan,DAI Chuade,et al. Optimization and simulation of sinter cooling process [J]. CIESC Journal,2011,62(11):3081-3087.

[11] 张家元,李子蝶,赵玮忠,等. 环冷机台车热结构耦合分析[J]. 昆明理工大学学报:自然科学版,2017,42(3):60-65.
ZHANG Jiayuan,LI Zidie,ZHAO Weizhong,et al. Thermal-structural coupling analysis of circular cooler trolley [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science Edition),2017,42(3):60-65.

[12] 李呈顺. 硅酸铝绝热材料最新研究动态及发展方向[C]//工业用无机绝热材料标准宣贯及应用技术研讨会会议报告. 杭州:全国绝热材料标准化技术委员会,2018:71-108.
LI Chengshun. The latest research trends and development direction of aluminum silicate insulation materials [C]//Report of the workshop on the promulgation and application of industrial inorganic thermal insulation standards. Hangzhou:Thermal Insulation Materials,2018:71-108.

[13] 杨静,曹瑜,王正,等. 基于轻型木结构墙体两种保温棉传热系数的测定[J]. 林产工业,2020,45(2):30-34.
YANG Jing,CAO Yu,WANG Zheng,et al. Determination of heat transfer coefficient of two insulated cotton based on light wood frame construction wall [J]. China Forest Products Industry,2020,45(2):30-34.

[14] 陈国荣. 有限单元法原理及应用[M]. 北京:科学出版社,2009.
CHEN Guorong. Principle and application of finite element method [M]. Beijing:Science Press,2009.

[15] 吴林峰,尹晓春,吴凯,等. 复杂多接触面托圈热—机械耦合三维有限元分析[J]. 机械强度,2008,30(3):61-66.
WU Linfeng,YIN Xiaochun,WU Kai,et al. Numerical simulations of thermal-mechanical stress of converter loop with complication multi-contact surfaces by 3-D nonlinearing finite element [J]. Journal of Mechanical Strength,2008,30(3):61-66.

[16] 程宇,张巨伟. 基于ANSYS的管道外自然对流换热系数的确定[J]. 当代化工,2015,44(11):2720-2722.
CHENG Yu,ZHANG Juwei. Determination of natural convection heat transfer coefficient outside pipe based on ANSYS [J]. Contemporary Chemical Industry,2015,44(11):2720-2722.

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