

# 烧结砖隧道窑冷却带温度场数值模拟研究

王晓伟, 王海洋, 陈庆照

(山东建筑大学机电工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:** 深入分析烧结砖窑烧过程中冷却带的温度场分布, 对墙材行业实现烧结砖优质高产及节能减排具有重要意义。首先以某烧结砖生产企业的坯垛单元为研究对象, 分析冷却带中坯垛单元的传热机理, 并建立相应的数学模型及几何模型; 然后对模型进行多面体网格划分, 结合企业数据设置初始参数、边界条件; 最后利用Fluent对隧道窑冷却带传热进行数值模拟仿真研究, 分析风速及孔洞形状等因素对烧结砖温度场的影响。结果表明, 选用最佳冷却风速能够有效减小砖坯的内外表面温度差; 合理的孔洞形状可以提高坯垛温度分布的均匀性; 适当加大各砖坯间的气流通道宽度可进一步提高冷却效果。研究结果为企业在窑烧过程中优化冷却段生产工艺以及生产高品质烧结砖提供了理论依据与技术指导。

**关键词:** 隧道窑; 冷却带; 传热; 温度场; 数值模拟

**DOI:** 10.11907/jjdk.231598

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1672-7800(2023)010-0131-08

## Numerical Simulation of Temperature Field in Cooling Zone of Sintered Brick Tunnel Kiln

WANG Xiaowei, WANG Haiyang, CHEN Qingzhao

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China)

**Abstract:** Deeply analyzing the analysis of temperature field distribution in the cooling zone during the firing process of sintered brick kilns is of great significance for the wall material industry to achieve high-quality and high-yield sintered bricks, as well as energy conservation and emission reduction. Firstly, take the stack unit of a certain sintered brick production enterprise as the research object, analyze the heat transfer mechanism of the billet stack unit in the cooling zone, and establish the corresponding mathematical model and geometric model. Then, the model is divided into polyhedral grids, and initial parameters and boundary conditions are set based on enterprise data. Finally, Numerical simulation research on heat transfer in the cooling zone of the tunnel kiln were conducted using Fluent software. The influence of factors such as wind speed and hole shape on the temperature field of sintered bricks was analyzed. The results show that selecting the optimal cooling wind speed can reduce the temperature difference between the inner and outer surfaces of the brick; appropriate hole shape can improve the uniformity of stack temperature distribution; properly increasing the width of the airflow channel between each brick billet can further improve the cooling effect. The research results provide theoretical basis and technical guidance for enterprises to optimize the production process of the cooling section and produce high-quality sintered bricks during the kiln firing process.

**Key Words:** tunnel kiln; cooling zone; heat transfer; temperature field; numerical simulation

### 0 引言

“十四五”阶段是我国加速实现“双碳”目标的重要时期, 随着隧道窑智能化水平的逐渐提高, 在烧结墙材行业

实现绿色节能及优质高产的目标刻不容缓。烧结砖进入隧道窑冷却是砖坯生产过程中至关重要的工艺环节, 对烧结砖生产效率和窑烧质量起着决定性作用。其中, 冷却风速对坯垛单元温度分布以及坯垛间传热等有着重大影响, 孔洞形状更决定了烧结砖的热工性能<sup>[1-2]</sup>。装载坯垛的多

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1383)

作者简介: 王晓伟(1971-), 男, 山东建筑大学机电工程学院教授、硕士生导师, 研究方向为新型墙材、智能制造; 王海洋(2000-), 男, 山东建筑大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向为新型墙材; 陈庆照(1996-), 男, 山东建筑大学机电工程学院硕士研究生, 研究方向为新型墙材。本文通讯作者: 王晓伟。

列窑车依次进入隧道窑预热、烧成和冷却带,同时常温空气从隧道窑窑尾进入,流经窑车卸载的高温坯垛,两者发生传热<sup>[3-4]</sup>。坯垛在隧道窑冷却带急剧降温过程中,使砖坯内出现较大的温度差,进一步导致砖坯内部结构变化而出现表面裂纹等问题。

国内外学者采用计算机数值模拟等方法对隧道窑窑烧过程展开了大量研究<sup>[5-9]</sup>。李昊奇<sup>[10]</sup>基于Fluent研究隧道窑冷却带不同急冷风速和温度对发泡陶瓷温度场的影响,以确定合理的急冷工况;王雪峰等<sup>[11]</sup>利用Fluent模拟烧结砖在隧道窑烧成过程中的氮氧化物含量,以及在不同空气速率作用下快速型NO和热力型NO的浓度变化;钟斌等<sup>[12]</sup>在隧道窑预热带窑顶设置逆吹风管,并对窑内气体流动进行数值模拟,研究在不同逆吹气流的角度下速度矢量和温度分布情况;Refaey等<sup>[13]</sup>通过设置不同坯垛单元的结构,分析烧结砖隧道窑冷却带的对流传热及流体流动状况。目前多数学者都是针对隧道窑整体进行简化处理来开展仿真研究,而对烧结砖坯垛单元内的温度变化研究较少。

本文运用Fluent软件对空气和烧结砖坯垛传热进行数值模拟,研究风速、孔洞形状等因素对坯垛冷却效果的影响。根据模拟结果分析各坯垛单元温度场分布及砖坯内外截面温度差,为提高烧结砖冷却带降温效果及窑烧产品质量提供参考。

## 1 坯垛传热数学模型及分析

了解烧结砖焙烧过程中的传热机理对于提高热利用率和节能环保有着重要意义。依据传热方式建立坯垛和空气传热的数学模型,为数值模拟仿真提供了理论支撑。

### 1.1 冷却带砖垛传热机理

从窑尾供风处进入冷却带的室温空气,遇到窑内高温烧结砖,两者的温度差产生热量传递的动力,在温度梯度的作用下,发生固体与气体之间的对流热交换。两者之间的对流传热会不断地进行,高温砖将热量传递给空气,使两者温度趋于相等。同时,砖体本身进行着传导传热,砖表面温度下降,与砖内部形成的温度差使砖产生传导传热的条件,砖内部不断通过传导传热将热量传给砖表面,使内部与表面温度趋于一致。

### 1.2 控制方程

空气进入冷却带后与烧结砖坯垛进行换热,其过程应满足质量、动量、能量守恒定律<sup>[14-16]</sup>。

质量方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \quad (4)$$

能量方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u} T) = \operatorname{div}\left(\frac{k}{c_p} \operatorname{grad} T\right) + S_T \quad (5)$$

式中, $\rho$ 为空气密度,单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $t$ 为空气流过冷却带的时间,单位为 $s$ ;  $\vec{u}$ 为速度矢量; $u, v, w$ 为速度矢量的分量; $p$ 为流体微元体上的压力; $\tau_{ij}$ 为流体微元体上的粘性切向应力 $\tau$ 的分量; $F_x, F_y, F_z$ 为流体微元体上的体力; $c_p$ 为比热容; $T$ 为温度; $k$ 为流体的传热系数; $S_T$ 为流体内热源及在粘性作用下流体机械能转换为热能的两部分能量之和。

### 1.3 湍流模型

假设隧道窑冷却带空气为不可压缩的湍流流动,在不考虑用户自定义的源项时,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型简化为:

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (6)$$

耗散方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

式中, $k$ 为湍流动能,单位为 $J$ ;  $\varepsilon$ 为湍流动能耗散率,单位为 $\%$ ;  $\mu_t$ 为湍动黏度,单位为 $\text{Pa} \cdot s$ ;  $\mu$ 为动力黏度,单位为 $\text{Pa} \cdot s$ ;  $G_k$ 为速度梯度造成的湍动能 $k$ 的增加项;  $C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 为常数<sup>[17]</sup>,  $C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。

## 2 坯垛模型及参数设定

每节窑车砖坯数量众多,且每块砖坯均有矩形孔洞,会加大网格划分难度以及增加计算机模拟时长,故本文选择烧结砖坯垛单元进行分析。

### 2.1 几何建模

以山东某企业的两种烧结砖码坯形式(三压二坯垛、四压三坯垛)为研究对象,生产产品为 $240 \text{ mm} \times 115 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$  DP型烧结多孔砖。空气在坯垛内各砖坯间流动过程中,坯垛上下层砖坯之间应受力均匀、接触平稳。码坯形式应遵循坯垛上下层砖坯整齐划一和交错压缝的码坯原则。相邻砖坯之间也应留有一定宽度的气流通通道,使砖坯之间有空气流通。砖坯之间的通道宽度根据边密中稀原则灵活设置,砖坯间通道尺寸如图1所示。

三压二、四压二坯垛均遵循交错压缝、边密中稀等码坯原则,以保证坯垛上下层砖坯之间有良好的稳定性。两种坯垛单元模型如图2所示。

### 2.2 流场边界确定

为了模拟坯垛模型在隧道窑冷却带的传热情况,在

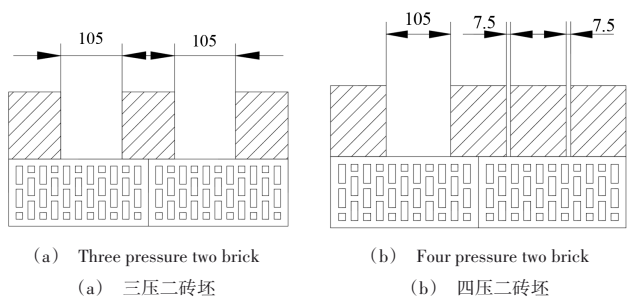


Fig. 1 Schematic diagram of brick blank spacing  
图 1 砖坯间距示意图

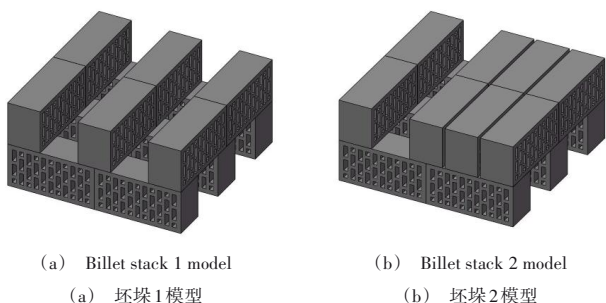


Fig. 2 Geometric modeling of billet stack element  
图 2 坯垛单元几何模型

Ansys Scdm 中建立坯垛模型的外流场空间,设置合理的壁面距离。坯垛与两侧窑墙之间留有一定宽度的通道为“侧隙”和“顶隙”,侧隙及顶隙的合理取值范围为 50~80 mm<sup>[18]</sup>。该企业侧隙、顶隙均为 60 mm,坯垛分析单元沿空气流动方向的四周表面至流场壁面距离为 60 mm。在不考虑砖坯因焙烧发生收缩而对侧隙和顶隙大小产生影响的情况下,空隙系数应不超过 0.5。根据公式(8)计算,坯垛前后表面至流场前后壁面距离为 450 mm。

$$K_{空} = \frac{F_{侧} + F_{顶}}{F_{孔} + F_{侧} + F_{顶}} \quad (8)$$

式中, $K_{空}$ 为空隙系数, $F_{侧}$ 为坯垛与隧道窑两侧墙之间形成的空隙面积, $F_{顶}$ 为坯垛与隧道窑窑顶之间形成的空隙面积, $F_{孔}$ 为坯垛断面上可通过气体的孔道面积总和。

坯垛模型流场空间如图 3 所示。

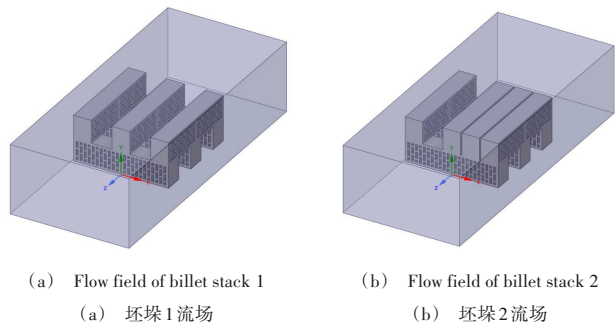


Fig. 3 Space for the flow field outside the billet stack  
图 3 坯垛外流场空间

### 2.3 网格划分

多面体网格生成网格的数量较少,而且具有良好的适

应能力<sup>[19]</sup>。本文利用 Fluent Meshing 分别对坯垛模型的固体域和流体域进行尺寸控制以及网格划分,需保证 minimum volume 不为负数,并检查网格质量。网格划分如图 4 所示。

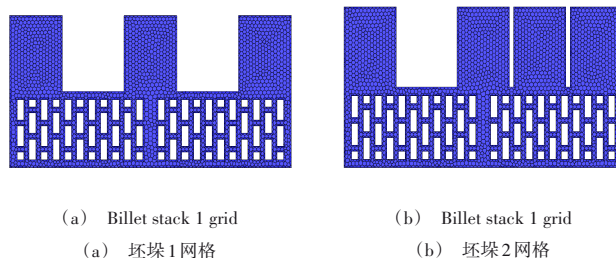


Fig. 4 Grid division of billet stack  
图 4 坯垛网格划分

### 2.4 参数设定及边界条件设置

对砖坯关键冷却阶段即从 200 °C 至 25 °C 的降温过程进行仿真计算,设置冷空气为粘性不可压缩气体,初始温度为 200 °C,密度为 1.169 kg/m<sup>3</sup>;DP 型烧结砖坯密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>,比热容为 750 J/(kg·K),导热系数为 0.69 W/m·K,砖坯的对流换热系数为 1.2 W/(m<sup>2</sup>·K),流场壁面的传导换热系数为 15.54 W/(m<sup>2</sup>·K)。假设流场空间的四周壁面为绝热壁,将窑尾风机简化为速度入口,流体速度方向与入口截面垂直,将出口边界条件定义为自由出流<sup>[20-21]</sup>。把流体域和固体域交界面设置为一对 interface,保证流体和固体可以进行耦合传热,如表 1 所示。

Table 1 Boundary condition settings  
表 1 边界条件设置

边界名称	边界类型	模型位置
气体入口	Velocityinlet	前侧壁面
气体出口	Outflow	后侧壁面
窑壁	wall	四周壁面
固体域	interface	坯垛单元
流体域	interface	流场空间

本文采用有限体积法对控制方程进行离散,对每个体积单元上离散后的控制方程组进行求解,求解过程中采用二阶迎风格式及 Simple 算法<sup>[22]</sup>,最后利用 Fluent 软件开展数值模拟计算研究工作。

## 3 数值模拟结果与分析

基于 Fluent 软件,分析烧结砖坯从 200 °C 到 25 °C 降温过程的温度场分布。不同风速的常温空气与烧结砖坯(三压二)进行耦合传热,通过瞬态仿真分析不同风速对坯垛温度场的影响;常温空气与方形孔、圆形孔烧结砖坯(四压二)进行传热,分析矩形孔和圆形孔烧结砖在降温过程中的差异。

### 3.1 冷却风速对坯垛温度场的影响

从窑烧生产效率考虑,冷却风速越大,坯垛平均温度下降至稳定状态越快,则隧道窑窑烧产量越高。结合窑烧

质量综合考虑,如果冷却风速过大,坯垛温度迅速下降导致砖坯表面很快收缩,内外部较大的温度差造成内部收缩与表面收缩有滞后现象,产生热应力。当砖坯强度小于应力集中值,会导致砖坯出现冷却裂纹。因此,隧道窑的冷却风速必须加以控制,用砖坯内外表面温差最小的冷却风速代替最大冷却风速。

### 3.1.1 坯垛温度场整体分析

高温烧结砖进入冷却带后,需从 1 100℃冷却至常温 25℃。为减少计算机仿真时长以及提高运算效率,对砖坯的关键冷却阶段即从 200℃至 25℃的降温过程进行模拟分析。以该企业烧结砖窑烧过程冷却阶段的风速为参考,在 200℃至 25℃的降温过程中,该企业采用低速冷却,速度为 2~4 m/s。设置坯垛初始温度为 200℃,分别以 5 种不同速度(2 m/s、2.5 m/s、3 m/s、3.5 m/s、4 m/s)吹入 25℃空气。高温坯垛在空气吹动下逐渐降温,直至平均温度基本稳定,并监测各坯垛单元的降温过程曲线及温度场分布,如图 5、图 6 所示。

由坯垛平均温度降温曲线可以看出,在起始阶段,高温坯垛与冷空气存在较大的温度差,使坯垛平均温度迅速下降,5 种风速所用时间接近;在过渡阶段,坯垛到达一定温度后呈下降趋势,但相对平缓很多,随着风速逐渐变大,所用时间明显缩短;在最后阶段,坯垛平均温度变化很小,温度场趋于平稳,在风速增大的同时,所用时间逐渐减少。随着风速逐渐增大,坯垛从初始温度冷却到稳定状态的时间缩短,所用时间依次为 3 695 s、3 189 s、2 862 s、2 532 s、2 284 s。因此,冷却带中风速越快,烧结砖降温效率越高。

由坯垛温度分布图可以看出,当风速低于 3 m/s 时,坯垛整体温差逐渐变大;风速达到 3 m/s 时,坯垛整体温差最小;风速高于 3 m/s 后,坯垛整体温差又逐渐加大。这是由于空气与坯垛相互传热时,坯垛附近产生较强的湍流作用,湍流和风速相互制约,影响着烧结砖坯垛的温差。由此可见,在冷却过程中,即使增大风速来提高砖坯生产效率,仍可能影响砖坯生产质量。因此,冷却风速必须加以控制。

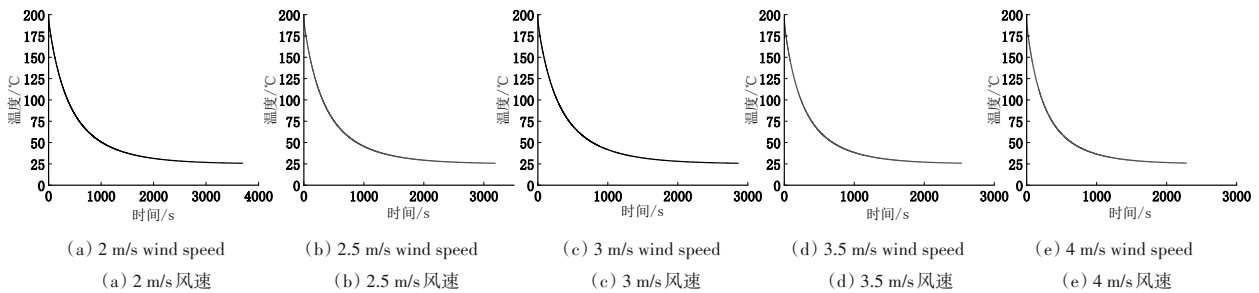


Fig. 5 Cooling curve of billet stack under different wind speeds

图 5 不同风速下的坯垛降温曲线

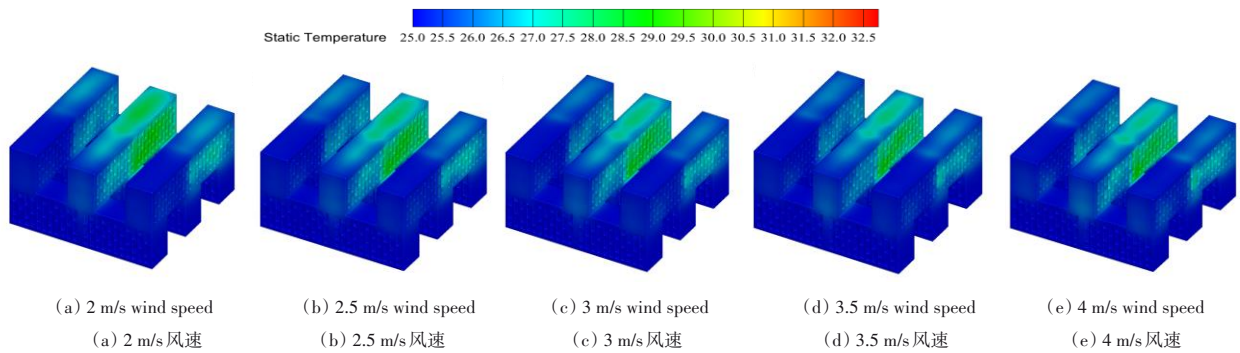


Fig. 6 Temperature distribution of billet stack under different wind speeds

图 6 不同风速下的坯垛温度分布

### 3.1.2 坯垛温度场截面分析

在坯垛温度随着空气持续流动而逐渐降低的过程中,由于坯垛中各砖坯受不同风速及湍流作用的影响,导致冷却后砖坯内部和表面温度差异较大,各砖坯又因位置摆放不同导致降温效果存在差异。其中,第二层后侧 3 个砖坯内外部存在明显温差,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,随着风速增大,砖坯的内外表面平均温度逐渐降低,但温差还受冷却风湍流流动的影响。当风速过低时,湍流作用较弱,两者温差逐渐减小;当风速到

达 3 m/s 时,湍流强度为最优值,砖坯内外表面温差最小,此时空气和砖坯传热效果最佳。随着风速继续增加,湍流强度也随之增强,导致内外表面温差继续变大。因此,若要在隧道窑坯垛冷却过程中同时兼顾砖坯的生产质量和效率,应选用最佳冷却风速而非最快冷却风速。

### 3.2 烧结砖孔洞对坯垛温度场的影响

烧结砖的孔洞形状与砖坯热工性能及生产质量紧密相关,选择合理的孔型可以提升烧结砖使用阶段的保温隔热效果。国内生产的烧结砖孔洞形状主要为矩形孔、圆形

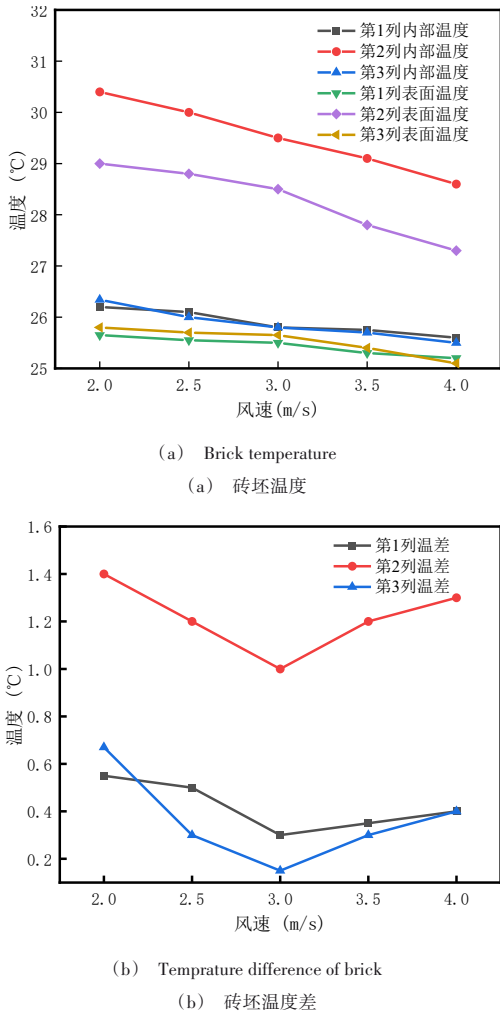


Fig. 7 Rear brick billet temperature  
图7 后侧砖坯温度

孔等,矩形孔容易与空气形成长路对流,而圆形孔倾向于形成短路对流。不同孔型的烧结砖坯在冷却带降温过程中,由于空气始终吹入砖坯孔洞,并且其导热性能存在明显差异,导致孔洞形状对坯堆的温度场分布影响显著。

3.2.1 坯堆温度场整体分析

矩形孔洞、圆形孔洞的烧结砖坯初始温度均为 200 °C, 25 °C 常温空气以 3 m/s 的速度吹入流场空间,使坯堆的平均温度达到稳定状态。坯堆单元平均温度降温过程曲线及温度分布图如图 8 所示。

砖坯冷却的理想状态是在一定时间内使坯堆整体平均温度下降到常温空气的温度,且坯堆内部温差较小。但在实际的窑烧过程中很难实现,烧结砖生产企业为提高生产效率,在砖坯冷却阶段只需坯堆平均温度基本冷却到常温温度,即可认为其温度场基本稳定。

由坯堆降温曲线可以看出,矩形孔坯堆从起始阶段到温度场稳定所用时间为 2 998 s,而圆形孔坯堆降温时间接近 4 000 s。无论起始阶段、过渡阶段、稳定阶段,矩形坯堆的时间都明显少于圆形坯堆。由坯堆单元温度分布图来看,各坯堆单元温度分布图中颜色越浅,代表其温度越低,

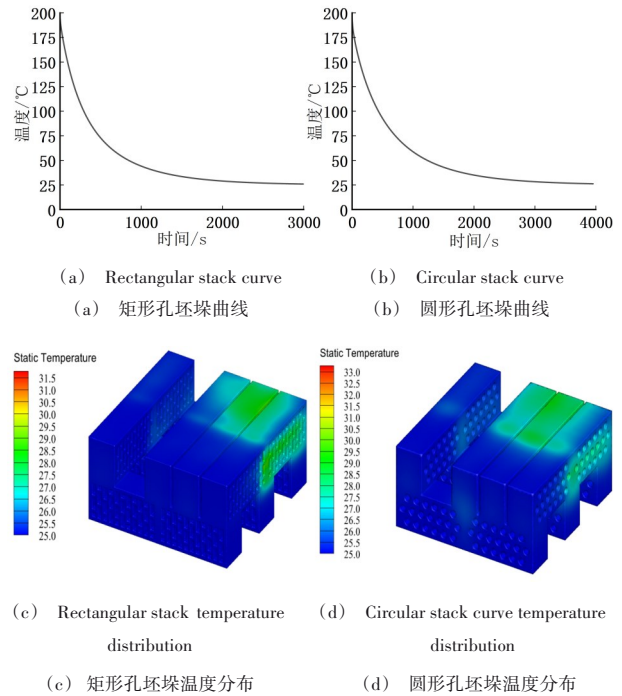


Fig. 8 Temperature field of billet stack  
图8 坯堆温度场

矩形坯堆整体温度相对较低。矩形坯堆的最高温度为 31.5 °C,圆形孔砖坯堆的最高温度为 33 °C,矩形坯堆的温度均匀性较好。综上分析,从烧结砖生产产量考虑,矩形孔坯堆冷却效果优于圆形孔坯堆。

3.2.2 坯堆温度场截面分析

沿常温空气流动方向即 X 截面方向,圆形孔和矩形孔坯堆有 4 列,分别选取相同位置的截面;沿流场空间宽度方向即 Z 截面方向同理,坯堆截面温度分布情况如图 9、图 10 所示。

由坯堆各截面的温度分布图可以看出,沿着空气流动方向,从坯堆前侧到后侧砖坯温度逐渐升高。前侧砖坯降温效果最佳,已基本冷却到常温空气温度;后侧砖坯靠近出口,温度分布仍然不均匀。X 方向截面的高温区域主要集中在两块砖坯连接面处以及靠近出口砖坯的中心位置。这是由于 X 截面平行于空气流动方向,且砖坯连接面的厚度最大,造成该处传热速度较慢。此外,砖坯的冷却过程是从砖坯边缘逐渐向中心冷却,因此后侧砖坯的中心温度高。Z 方向截面高温区域主要集中在两侧为狭窄通道的砖坯中间区域,并且高温区域存在于第二层砖坯,第一层砖坯基本冷却至常温。这是由于第一层砖坯为迎风面,而第二层砖坯孔洞与风方向平行导致。由图中等温线数值可以看出,温度以高温区域为中心向边缘区域层层递减,矩形孔砖坯的每层温度都明显低于圆形孔砖坯温度。由此可见,矩形坯堆冷却质量较好。

由于各截面的最低温度都接近 25 °C,分析坯堆的温度均匀性,只需考虑截面最高温度。坯堆各截面温度分布情

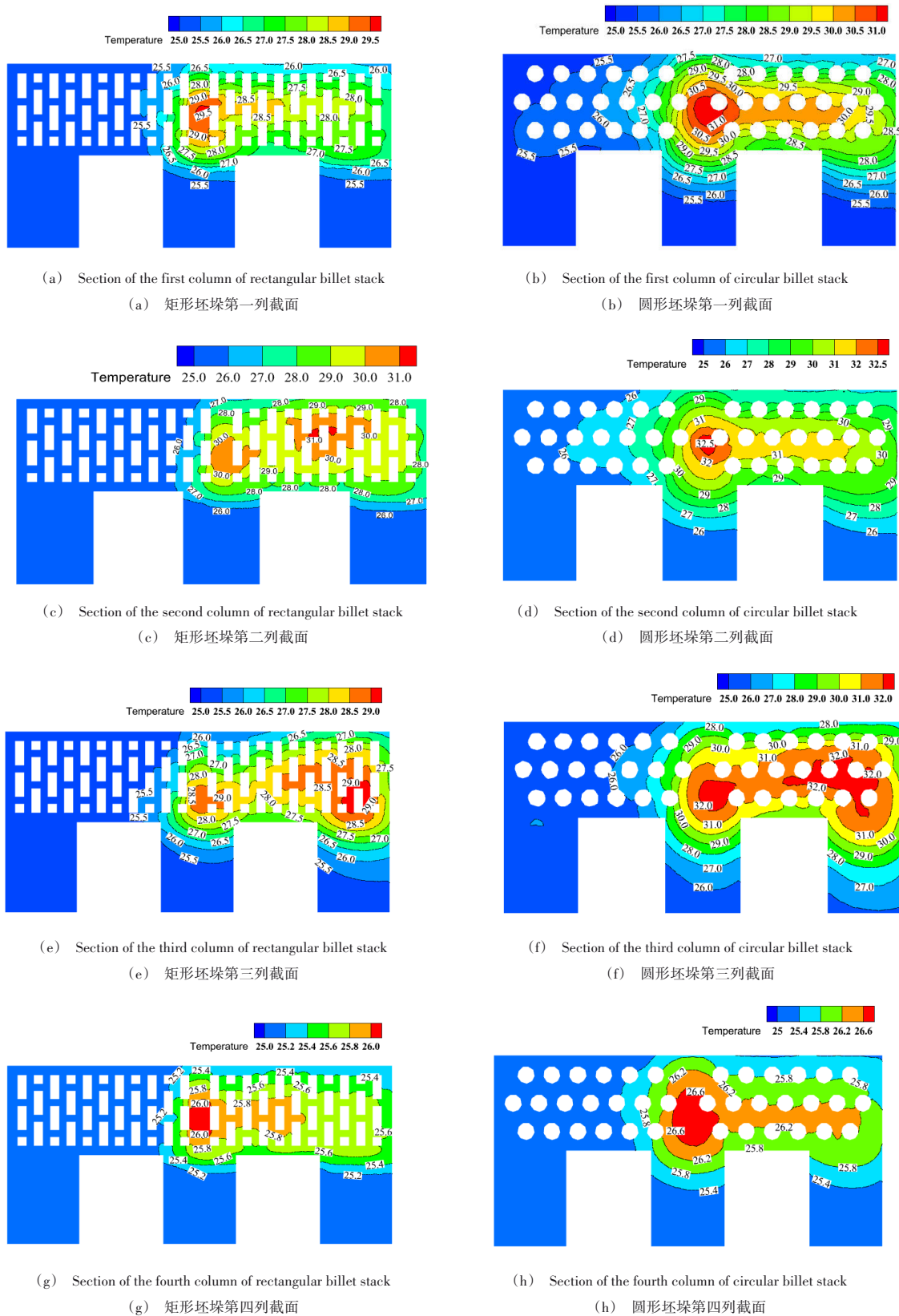


Fig. 9 Temperature distribution of cross sections in X direction of billet stack

图9 坯垛X方向各列截面温度分布

况如表2所示,圆形孔坯垛各个截面的最高温度都高于矩形孔坯垛,最大温差达到3℃,矩形孔坯垛截面的温度均

匀性较好。此外,两侧通道较狭窄的砖坯温度最高,温度均匀性较差,而两侧通道宽度较大的砖坯温度均匀性较

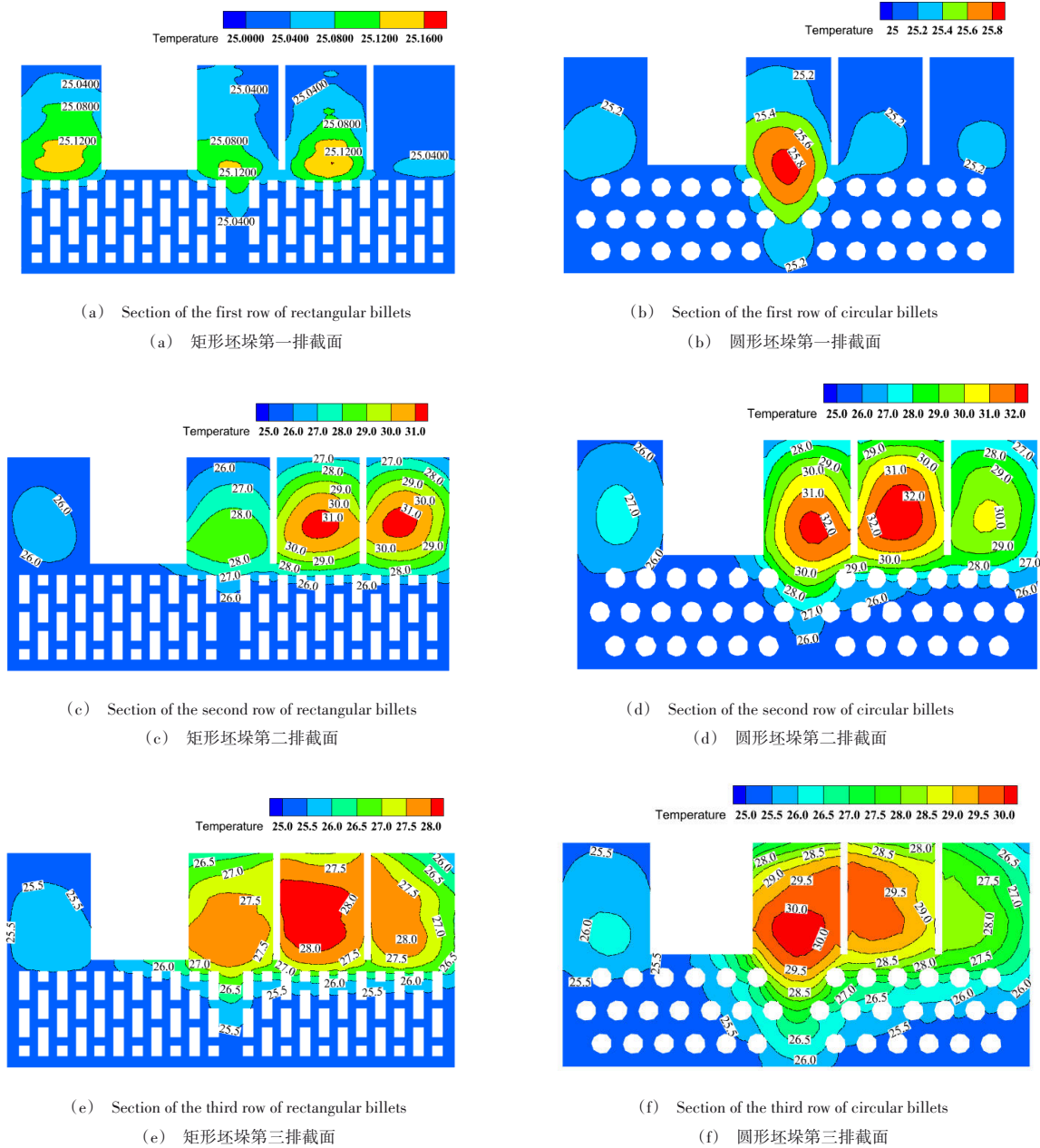


Fig. 10 Temperature distribution of cross sections in Z direction of billet stack

图 10 坯垛 Z 方向各列截面温度分布

好。因此,在烧结砖生产过程中选用方孔砖代替圆孔砖,并且适当加大各砖坯间的气流通道宽度,可以有效提高烧结砖的生产质量,减少裂纹砖坯的次品率。

### 4 结论

结合山东某烧结砖厂的实际生产情况,对隧道窑冷却带烧结砖坯垛进行传热数值模拟。经模拟分析得到如下结论:

(1)在冷却带降温过程中,随着风速逐渐增大,烧结砖的产量提高。但过大的冷却风速会导致烧结砖迅速降温,使砖坯表面和内部存在较大温度差,甚至产生冷却裂纹。

Table 2 Maximum temperature of billet stack

表 2 坯垛最高温度

坯垛单元截面	方孔坯垛最高温度 /°C	圆孔坯垛最高温度 /°C	温差 /°C
X 第一列	29.5	31	1.5
X 第二列	31	32.5	1.5
X 第三列	29	32	3
X 第四列	26	26.2	0.2
Z 第一排	25.16	25.8	0.64
Z 第二排	31	32	1
Z 第三排	28	30	2

在实际生产中,若要同时保证砖坯窑烧质量和生产效率,应选择最佳冷却风速代替最快冷却风速,以提高冷却

质量。

(2)矩形孔坯垛的冷却效果优于圆孔形坯垛,烧结砖孔型对坯垛内部温度场分布及温度均匀性影响显著,不合理的孔型会导致冷却后的砖坯出现温差大、强度低甚至开裂等现象。因此,在实际的烧结砖生产过程中,在遵循各项窑烧原则的前提下,应选择合适的孔型,且适当加大各砖坯间的通道宽度,以减小坯垛内温差,进一步提高烧结砖的生产效率及质量,实现优质高产。

#### 参考文献:

- [1] XU N, WANG X F, ZHANG Z Y, et al. Numerical simulation of fluid solid coupling heat dissipation in tunnel kiln cooling belt[J]. China Ceramic Industry, 2016,23(2): 26-30.  
许宁,王雪峰,张柱银,等. 隧道窑冷却带流-固耦合散热数值模拟[J]. 中国陶瓷工业,2016,23(2):26-30.
- [2] ZHAO T G, ZOU Y, GAO C C, et al. Optimization design and thermal analysis of energy-saving and environmentally friendly porous bricks based on ANSYS[J]. Silicate Bulletin, 2019,38(6): 1719-1726.  
赵桃干,邹昀,高传超,等. 基于ANSYS的节能环保多孔砖优化设计与热工分析[J]. 硅酸盐通报,2019,38(6):1719-1726.
- [3] ZHANG Z, DANG X Q, WANG H M, et al. Numerical simulation of brick and tile tunnel kiln for smoke and heat separation system and analysis of factors affecting oxygen content in smoke[J]. Journal of Environmental Engineering, 2022,16(1): 208-219.  
张震,党小庆,王红梅,等. 烟热分离系统砖瓦隧道窑的数值模拟及烟气含氧量影响因素分析[J]. 环境工程学报,2022,16(1):208-219.
- [4] REFAEY H A, ALI A A, ALI R K, et al. Augmentation of convective heat transfer in the cooling zone of brick tunnel kiln using guide vanes: an experimental study[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2017, 122: 172-185.
- [5] JABER H A, MOSAB A A, ISSA F A, et al. Effect of fluid channels on flow uniformity in complex geometry similar to lattice brick setting in tunnel kilns[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 134: 28-40.
- [6] SINEM K, KURTUL K, EBRU M, et al. Model-based optimization of heat recovery in the cooling zone of a tunnel kiln[J]. Applied Thermal Engineering, 2008,5(28): 633-641.
- [7] GUAN C W. Numerical simulation of converting arch tunnel kiln to flat roof Workbench[J]. Brick and Tile, 2022(9): 34-36.  
关长武. 拱顶隧道窑改平顶 Workbench数值模拟[J]. 砖瓦,2022(9): 34-36.
- [8] WANG Y F, WANG W X, WANG X Y. Three dimensional numerical simulation of the roasting section of an electric tunnel kiln based on the roasting arsenic removal process [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022,43(4): 1028-1033.  
王逸飞,王文祥,王晓阳. 基于焙烧脱砷工艺的电热式隧道窑焙烧段三维数值模拟[J]. 工程热物理学报,2022,43(4):1028-1033.
- [9] NGOM M, THIAM A, BALHAMRI A, et al. Transient study during clay bricks cooking in the traditional kiln CFD numerical study[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021,28: 101672.
- [10] LI H Q. Research and numerical simulation on the structure of the quench section of a three-layer foam ceramic tunnel kiln [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2020.  
李昊奇. 三层发泡陶瓷隧道窑急冷段结构研究与数值模拟[D]. 景德镇:景德镇陶瓷大学,2020.
- [11] WANG X F, ZHANG Z Y, XU N, et al. Numerical simulation of NO<sub>x</sub> in the firing zone of a 3.3m wide sintered brick tunnel kiln [J]. Brick and Tile, 2015(6): 18-21.  
王雪峰,张柱银,许宁,等. 3.3m宽烧结砖隧道窑成带NO<sub>x</sub>数值模拟[J]. 砖瓦,2015(6):18-21.
- [12] ZHONG B, FENG Q, GONG X L. Numerical simulation of the influence of reverse blowing angle on temperature and velocity fields in the preheating zone of tunnel kiln[J]. Chinese Ceramics, 2021,57(9): 83-90.  
钟斌,冯青,宫小龙. 隧道窑预热带窑顶逆吹角度对温度场和速度场影响的数值模拟[J]. 中国陶瓷,2021,57(9):83-90.
- [13] REFAEY H A, ALHARTHI M A, SALEM M R, et al. Numerical investigations of convective heat transfer for lattice settings in brick tunnel kiln: CFD simulation with experimental validation [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2021, 24: 100934.
- [14] TANG P, ZHANG C G, YANG H Y. Simulation of temperature field in a closed space heated by a heating rod [J]. Software Guide, 2021, 20(10): 159-163.  
唐鹏,张春富,杨昊宇. 加热棒加热的封闭空间温度场仿真[J]. 软件导刊,2021,20(10):159-163.
- [15] LI C, ZHU H M, NING G Y, et al. Numerical simulation study on airtightness detection of heat exchangers based on fluent [J]. Journal of Hangzhou University of Electronic Science and Technology, 2023, 43(3): 47-53.  
李诚,祝红梅,宁光远,等. 基于Fluent的换热器气密性检测数值模拟研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2023,43(3): 47-53.
- [16] NAHED S, WASSIM K, HATEM M, et al. Reduction of the energy consumption of a tunnel kiln by optimization of the recovered air mass flow from the cooling zone to the firing zone [J]. Applied Thermal Engineering, 2017,124: 382-1391.
- [17] TAN L B, YUAN Y J. CFD numerical simulation and performance optimization of engine cooling water pump [J]. Journal of Sichuan University of Light Industry and Technology (Natural Science Edition), 2023, 36(1): 41-47.  
谭礼斌,袁越锦. 发动机冷却水泵CFD数值模拟及性能优化[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版),2023,36(1):41-47.
- [18] CAO S P. Quality control during the process of sintering brick palletizing [J]. Wall Material Innovation and Building Energy Efficiency, 2016(11): 46-47.  
曹世璞. 烧结砖码坯过程中的质量控制[J]. 墙材革新与建筑节能, 2016(11):46-47.
- [19] LIU Q. Research on the quality of polyhedral meshes based on finite volume method [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2022.  
刘茜. 基于有限体积分法的多面体网格质量研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2022.
- [20] WANG G Z, DUAN H P, JIANG T T, et al. Numerical simulation of transfer function in wind turbine engine room based on CFD [J]. Energy Saving Technology, 2022,40(5): 416-419,443.  
王呆展,端和平,姜婷婷,等. 基于CFD的风电机组机舱传递函数数值模拟[J]. 节能技术,2022,40(5):416-419,443.
- [21] WANG X W, REN M B, LIN D D, et al. Analysis of fluid-solid coupling heat transfer in sintered bricks based on vode blank process [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(5): 97-104.  
王晓伟,任孟斌,林朵朵,等. 基于码坯工艺的烧结砖流固耦合传热分析[J]. 山东建筑大学学报,2022,37(5):97-104.
- [22] LI C T. Research and numerical simulation of the structure of the Ming dynasty gourd kiln in China [D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic University, 2018.  
李长塔. 中国明代葫芦窑结构研究及数值模拟[D]. 景德镇:景德镇陶瓷大学,2018.

(责任编辑:黄健)