

文章编号:1005-1538(2023)04-0001-10
DOI: 10.16334/j.cnki.cn31-1652/k.20220802662

· 研究报告 ·

汉代砖瓦窑的建造使用及数值模拟

温睿^{1,2,3}, 张宜雯^{1,2,3}, 付小龙⁴

- [1. 中国-中亚人类与环境“一带一路”联合实验室(西北大学), 陕西西安 710127;
2. 文化遗产研究与保护技术教育部重点实验室(西北大学), 陕西西安 710127;
3. 西北大学文化遗产学院, 陕西西安 710127; 4. 西安近代化学研究所, 陕西西安 710065]

摘要: 春秋战国以来砖瓦窑业趋于繁荣成熟, 建筑材料需求量的增多促使出现了大量砖瓦窑, 汉代是砖瓦窑结构趋于成熟和稳定的重要时期, 因此研究汉代砖瓦窑的功能结构变化关系对揭示中国古代窑炉结构的发展脉络具有重要的意义。本研究在前人对汉代砖瓦窑的结构变化研究基础上, 使用计算流体软件 FLUENT 模拟砖瓦窑内流场和温度场, 以河南省焦作市苏园村汉代窑址 Y6 和洛阳东周王城十一号窑为例分别进行数值模拟, 从流体力学和热力学的角度分析汉代砖瓦窑内烟气的流动情况。结果表明多烟道窑较单烟道窑更具保温的优势, 解释了汉代砖瓦窑结构变化的逻辑。

关键词: 汉代; 砖瓦窑; 窑炉结构; 数值模拟; 挡火墙

中图分类号: K878.5 **文献标识码:** A

0 引言

新石器时代陶器的出现是中国陶瓷史的重要里程碑之一, 从早期无窑烧制到裴李岗文化时期出现最早的横穴窑, 陶器的质地得到了一定的提升; 随着先民在生产生活上的需要, 对于陶器的器型和使用范围需求不断增加, 促使人们对陶窑的结构进行创新和改造。由于南北方的地理位置特征和原料选择的差异, 南方自商代出现了依坡而建的小型龙窑, 北方则以发展馒头窑为主。窑炉的改进促进了烧成温度的提高, 为我国陶瓷发展提供了重要条件。汉代是制陶业发展的繁荣时期, 砖瓦作为陶质建筑材料在汉代表现出卓越的工艺质量, 这与汉代砖瓦窑结构的改进密切相关。半倒焰窑为汉代烧造陶器的主流窑炉, 目前最早发现于商代^[1], 相较于升焰窑具有升温快、保温时间长、温度分布均匀等优点。经过升焰窑的结构变化和烧制技术改进, 半倒焰窑在汉代发展趋于成熟并被广泛使用。半倒焰窑一般由前操作区、火膛、窑室、烟道

等主要组成部分构成。根据汉代后北方黄河流域的窑址发掘显示, 半倒焰窑的改进仅在规模和结构比例上得到体现, 主要结构变化不大比较稳定。

目前已有学者对汉代陶窑的结构变化进行系统性的梳理研究^[2-3], 包括对汉代陶窑的建造形式、窑形结构、功能性质进行分类和总结概括, 揭示了汉代陶窑结构的发展脉络, 展现了汉代的窑业发展水平, 但是未能深入探讨汉代陶窑性质与结构变化的科学逻辑。近年来, 有学者运用数值模拟的方法复原陶窑内烧制过程中温度场变化的情况, 建立了通过流体力学来研究窑炉结构科学性的方法, 并对景德镇窑开展了研究。颜新华^[4]通过对景德镇三种窑形变化分别进行模拟, 结果表明从葫芦窑发展到蛋形窑温度分布更为均匀合理, 并结合复原的葫芦窑测温实验验证了通过 FLUENT 软件模拟实验的可行性。本研究是在前人的基础上, 采用数值模拟的方法对汉代数量最多的砖瓦窑烧成过程的温度场和流场分布进行模拟, 进而讨论汉代砖瓦窑结构变化背

收稿日期:2022-08-31; 修回日期:2022-11-27

基金项目:国家社会科学基金项目(22BKG023)资助

作者简介:温睿(1980—), 男, 2011年获得牛津大学博士学位, 西北大学文化遗产学院教授, 从事科技考古方面的研究, E-mail: rwen80@163.com

后的科学道理,为从热能利用的角度研究中国陶窑的发展奠定基础。

1 汉代砖瓦窑发现概况和结构特点简述

目前为止见于公开发表资料的汉代陶窑主要发现集中于河南陕西省一带,黄河中下游地区汉代砖瓦窑目前已发现 440 余座,其中已发掘的窑为 230 座。陕西省最多为 107 座,河南省其次为 85 座,河北省发现 22 座,山西省 6 座,山东省 10 座。陶窑按照功能分类可分为日用陶器窑、砖瓦窑、烘范窑、陶俑窑、多功能窑等。其中,汉代砖瓦窑的基本结构包括窑门、火膛、窑室、烟道(图 1),其他部分如操作间、挡火墙、排烟口存在差别。

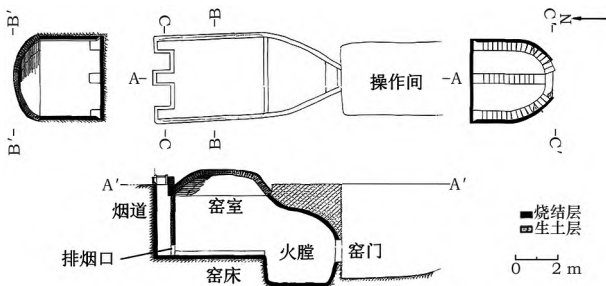


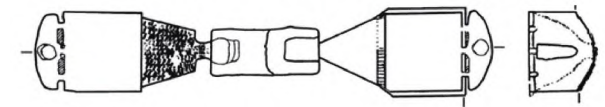
图 1 河南省焦作市苏荫村汉代窑址 Y6 平、剖面图
Fig. 1 Plan and section of Kiln site Y6 of the Han Dynasties at Sulin Village, Jiaozuo, Henan Province

操作间因窑而异,根据发掘情况分为单窑操作间、双窑共用操作间和无操作间三种。单窑操作间是指各窑前的工作平台独立,各窑之间没有空间的联系,大部分砖瓦窑属于单窑操作间类型;双窑操作间是指相邻相对两座窑共用一个操作坑,双窑共用可见于陕西西安曲江春临村窑址 Y2 与 Y6、Y4 与 Y5^[5]、洛阳市东郊东汉砖瓦窑^[6]等(图 2),多窑共用操作间提高了工作效率。

汉代砖瓦窑大部分为单火膛结构,目前仅发现一座陶窑存在双火膛结构。河南省新乡市东干道发掘的一座双火膛对称的西汉陶窑^[7],为半地穴式,窑床平面呈长方形,火膛位于窑室的東西两侧,排烟口和烟道在窑床南北方向各 3 个,中间的排烟口尺寸较大且烟道竖直向上,两侧的排烟口较小且烟道向中间靠拢(图 3)。较单火膛而言,双火膛陶窑具有窑室温度高、分布均匀的优点。比较特殊的是在西安市未央区六村堡窑址发现的两座小规模窑址没有独立的火膛(图 4),火门与窑室相接,窑室底部存在较多白色灰烬的扇形区域^[8]。



(a) 陕西西安曲江春临村窑址



(b) 洛阳市东郊东汉砖瓦窑

图 2 双窑共用操作间砖瓦窑
Fig. 2 Brick and tile kilns with a double kiln – shared operation room

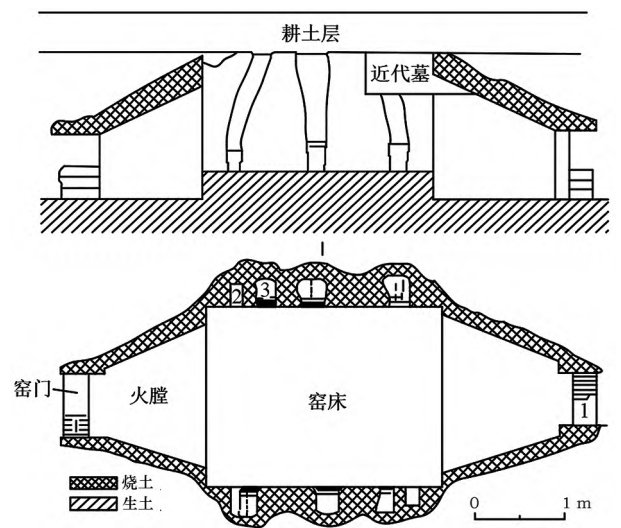


图 3 河南省新乡市东干道西汉陶窑

Fig. 3 Pottery kiln of the Western Han Dynasty at Donggandao, Xinxiang, Henan Province

春秋早期的窑还存有升焰窑的结构,如洛阳东周王城内的古窑址 Y5,窑床和火膛之间架设有窑箄^[9]。战国中晚期至秦汉早期的砖瓦窑形制表现出逐渐统一的趋势,窑室的平面形状以圆形、梨形、卵圆形为主,还存有少量三角形、漏斗形的窑形,烟道则以单烟道为主,三个烟道数量的窑较少^[2]。汉代砖瓦窑的火膛包括梯形、半圆形两种,窑床平面形

状包括方形、长方形、椭圆形、梨形四种,火膛窑床面积比较秦汉早期大。根据汉代各窑址发掘报告和相关总结性研究来看汉代陶窑各结构发展规律如下,汉代砖瓦窑火膛以半圆形、梯形为主;西汉早期的窑室形状以圆形、椭圆形、梨形为主,西汉中晚期至东汉时期以近方形为主,表明烧造规模的扩大导致窑址结构的调整;西汉晚期陶窑的排烟系统则有汇合烟道和多烟道两种形式,其中砌筑方式由砖砌筑隔开形成烟道,早期则以生土掏挖夯实壁面作为烟道。同时烟道数量呈增多的趋势,除去单烟道的窑各个时期都有出现,大部分砖瓦窑烟道数量为3~5个。此外,根据李清临^[10]的统计分析,汉代单烟道窑火膛、窑室、烟道的面积呈现正相关性,大部分多烟道和汇合烟道也呈正相关性。

为进一步研究汉代砖瓦窑结构变化的影响,针对单烟道窑和多烟道窑开展模拟研究,以期得到烟道数量对砖瓦窑的影响变化程度。由于大部分窑址在发掘或者使用时窑顶坍塌不存,甚至火膛、窑顶部均不存,因此选择保存较好具有代表性的两个汉代陶窑进行建模模拟。单烟道以西汉前期的洛阳东周王城十一号窑(图5)为代表^[9],

多烟道以东汉时期的河南省焦作市苏兰村汉代窑址Y6为代表^[11],其中前者由于窑顶部分残存按照后者窑室高度比进行复原(表1)。根据窑内出土遗物多为建筑材料设定两窑均烧制尺寸为320 mm × 140 mm × 50 mm的汉砖,进口烟气物理性质、温度等设为定量参数,不同尺寸结构作为变量进行数值模拟。

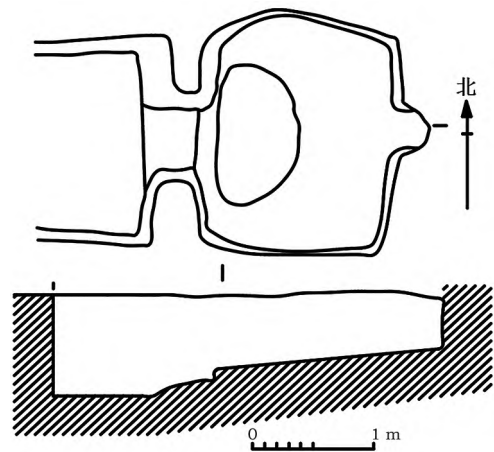


图4 陕西西安汉长安城Y47

Fig.4 Y47 at Han Chang'an City in Xi'an, Shaanxi Province

表1 Y6和十一号窑的尺寸数据

Table 1 Dimensional data of Kiln site Y6 and Kiln No. 11

	火膛/m		窑床/m		烟道 数量	出土遗物
	形状	前宽+长+后宽	形状	横+纵+高		
焦作市苏兰村汉代窑址Y6	梯形	0.84+1.52+2.02	方形	2.06+2.34+2.16	3	砖瓦等建筑材料
洛阳东周王城十一号窑	半圆形	1+2.1	方形	2.1+2.65+1.89	1	陶器、瓦

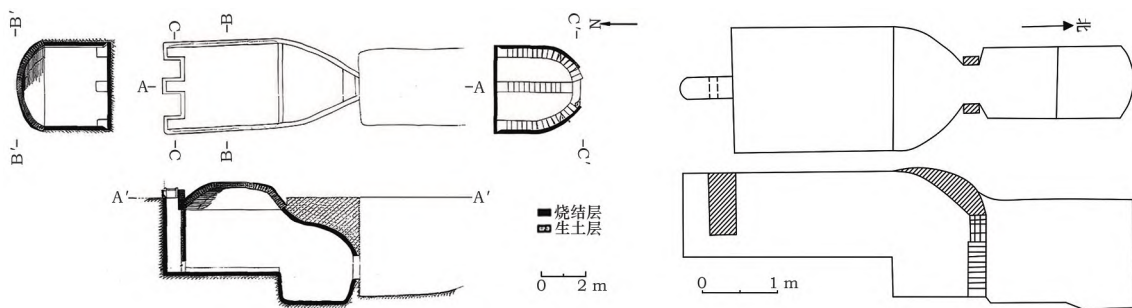


图5 多烟道、单烟道陶窑

Fig.5 Multi-flue, single-flue pottery kilns

2 物理模型的建立及简化

为对汉代砖瓦窑进行复原模拟,首先需要对窑的建造方式、码窑方式、烧成方式进行总结研究,然后在此基础上得到初步的模型。

2.1 建造方式

多个窑址的简报提到了砖瓦窑的建筑方法^[11-12],基本大致相同,为平地或斜坡上建造半地穴式窑,具体方法是先在生土中掏挖出窑室的平面形状如方形、椭圆形、梯形等,并在坑壁外留出一砖大小的边

沿预留砌筑窑顶。然后在窑室前壁沿火膛平面形状如梯形、半圆弧形掏挖出一定深度的火膛,并在火膛前壁掏挖出窑门与操作坑相通。最后修整窑的基本形状夯实内壁,并涂抹草拌泥使其表面光滑,多次烘烤后内壁坚硬耐用。据已有的窑址显示窑门的砌筑方式主要是由土坯或砖券顶砌筑,如图 6 所示,先在生土中掏挖出拱形,再以双层土坯砌成土坯券顶横向平券,窑门下部一般有封火墙与火膛底齐平。根据已发掘的窑如河南省焦作武陟苗庄汉代陶窑等可判断,火膛一般是底部平整直壁掏挖而成,由火门向顶部缓慢延伸成穹窿顶形状至窑室上方地面,东西两壁为直壁。窑室后壁一般掏挖 1~3 个方形的排烟口,再由地面向下垂直掏挖烟道至与排烟口相通,此外还有多个烟道汇合中烟道的实例,掏挖此类烟道需要从中烟道对应地面的位置按照一定弧度向下掏挖,此类的烟道是由夯实的土壁隔开;西汉中晚期的汉墓陶窑中有以青砖隔开烟道的,此类排烟系统需要把烟道部分全部掏挖再以砖隔开砌成三条烟道。



图 6 河南郑州马良寨遗址汉代陶窑 Y3、Y4

Fig. 6 Han Dynasty Pottery kilns Y3 and Y4 at Malianzhai Ruins in Zhengzhou, Henan Province

窑室顶部保存下来的窑数量很少,河南省焦作市苏蔺村汉代窑址中发现一座保存较完整(图 1),为四隅券进式穹窿顶结构(图 7);从汉魏洛阳城东汉烧煤瓦窑 Y1 残存的窑壁顶砌砖来看,窑顶同样是四隅券进式结构^[13],因此此种窑顶结构的窑址年代较晚均为东汉时期,而且目前的考古资料也能证明最早出现此种汉墓封顶方法在东汉时期^[14]。此外西汉时期的窑也可据汉墓封顶方式推测封顶方式,推断为四面结顶式穹窿顶或者券顶结构。

2.2 码窑方式

汉代砖瓦窑窑床的平面较为规整,目前发掘的存有砖坯的窑址如新乡北站区前郭柳村汉代窑址 Y3,窑床上撒有一层薄的草木灰,未经烧过的砖坯

在窑内横立放垒起,窄面上皆沾有草木灰,推测是防止砖坯之间粘连所用,行与行之间摆放距离较密不足 2 cm,砖坯与窑壁之间距离稍大约为 5 cm^[16]。汉魏洛阳城东汉烧煤瓦窑窑床上有一层排列整齐的东西向侧立砖坯(图 8),文中指出这层砖坯是作为窑算使用,行间距为 5~10 cm,说明窑床底部铺设砖可能作为隔火道使用,为其他器物架设所用,河南郑州马良寨遗址 Y1(图 9)出土的窑床砖坯也出现了类似排列方式^[17]。

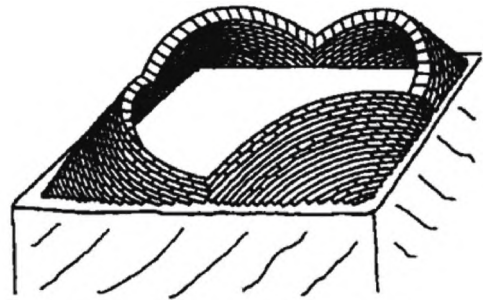


图 7 四隅券进式穹窿砌法示意图^[15]

Fig. 7 Schematic diagram of quadripartite arched domes

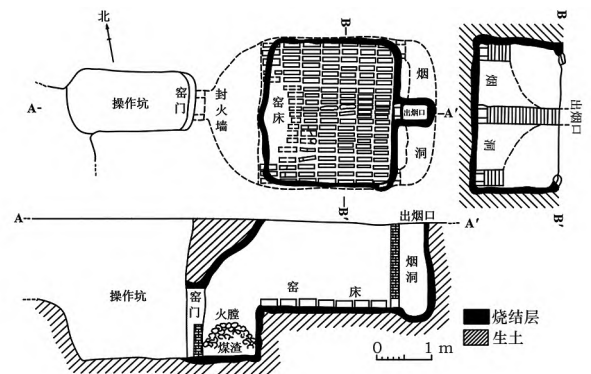


图 8 汉魏洛阳城东汉烧煤瓦窑 Y1

Fig. 8 Coal-fired Tile kiln Y1 of the Eastern Han Dynasty at Han-Wei Luoyang City

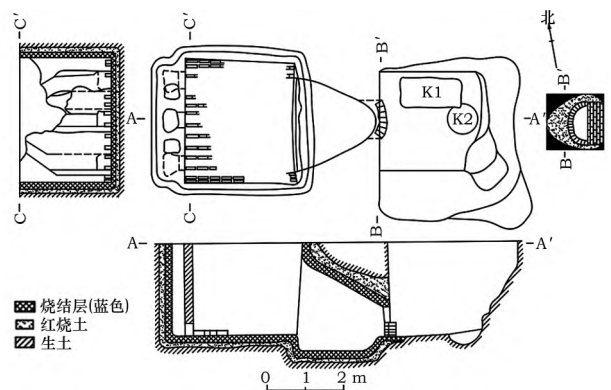


图 9 河南郑州马良寨遗址 Y1

Fig. 9 Malianzhai site Y1, Zhengzhou, Henan Province

以上结合历史文献记载、考古发掘资料及现代工业砖窑的多种码坯方式(图 10)参考复原,即可对两窑模型进行建立,据东汉时期的河南省焦作市苏蔺村汉代窑址 Y6 考古报告显示,该窑窑顶为四隅券进式穹窿顶结构,而洛阳东周王城十一号窑为西汉早期的窑,因此窑顶可假设为四面结顶式穹窿顶,据此两窑建模完成后如图 11 所示。

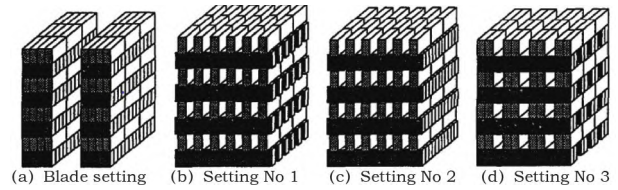


图 10 现代砖窑的部分码窑方式^[18]

Fig. 10 Typical setting ways for modern brick kilns

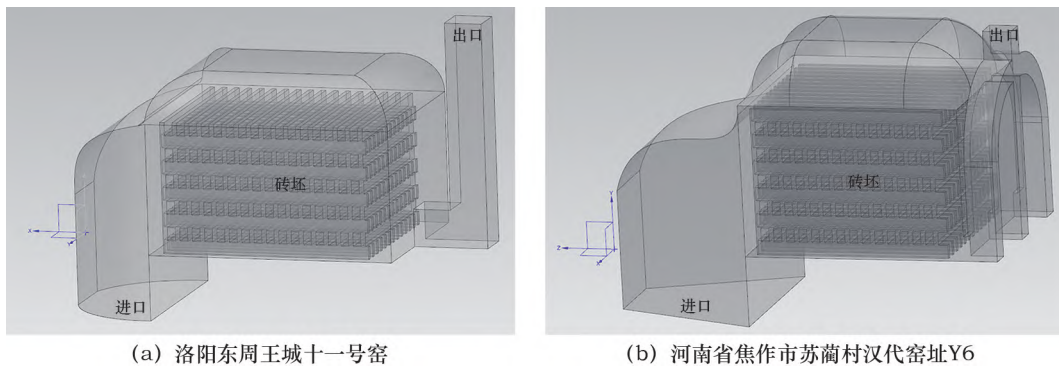


图 11 窑的物理模型

Fig. 11 Physical models of the kilns

2.3 烧成方式

明末宋应星的《天工开物》^[19]中第十一章陶埏记载了砖瓦的制作过程和烧造过程,与汉代砖瓦窑最大的区别在于窑身均位于地表,而非汉代窑身大部分位于地下的结构;西汉中后期后砖窑形状结构逐渐稳定,至今我国部分地区还保存有类似的土窑结构,可见陶窑结构稳定后变化不大。《天工开物》中记载柴窑的烧造方法:“凡窑成坯之后,装入窑中。所装百钧则火力一昼夜,二百钧则倍时而足”“凡柴薪窑巔上侧凿三孔以出烟。火足止薪之候,泥固塞其孔,然后使水转釉。”关于浇水转釉过程的解释“凡转釉之法,窑巔作一平田样,四围稍弦起,灌水其上。砖瓦百钧用水四十石。水神透入土膜之下,与火意相感而成。水火既济,其质千秋矣。”即柴窑烧造后期,用泥封闭添柴入口,在窑顶开平面不断浇水冷却保持还原气氛,通过这种方法烧出来的砖更耐用,同时在窑顶采用浇水转釉的方法也证明了砖瓦窑从半地穴式转向地表式的这一过程。目前考古资料中最早出现这一结构的窑可追溯至战国^[20],沿用至明清并在现代青砖生产中仍被使用。

2.4 模型的简化

本研究中数值模拟方法主要是通过使用 ANSYS 软件中 FLUENT 模拟窑室烟气的瞬态温度场和瞬态速度场,即烧窑后期封闭窑门窑内发生还原反应的阶段。由于仅对窑室进行研究,因此对操作间、窑门

未进行建模,将燃料和火膛简化为带有一定进口速度和温度的烟气进入窑室加热器物制品,并忽略墙体壁厚,将窑壁、窑顶、窑底简化为具有一定热流密度的墙体,查取夯土的物性参数应用模拟;砖尺寸为 320 mm × 140 mm × 50 mm,将其简化为具有一定吸热能力的墙体,查取青砖的物性参数应用模拟。根据火膛内残留的草木灰和时代背景判断燃料化学成分为木柴或秸秆,均属于传统生物质燃料,依据常见生物质燃料的主要元素组成^[21],取木柴的主要化学成分均值作为此次模拟的燃料基本成分(表 2)。本次使用 ICEM CFD 网格划分软件对窑进行非结构化网格划分,网格类型为四面体结构,数量为五百万左右。将生成后的网格文件导入 FLUENT 进行数值模拟,根据相关文献实地烧窑的资料,边界条件选择如下:烟气速度设为 2 m/s,入口温度设为 1 200 °C (1 473 K),烟气的物理性质参数见表 3^[22];通过化学成分和经验公式计算可得入口烟气密度为 1.56 kg/m³,出口边界压力出口,环境温度为 300 K。由于烟气 $Re > 10^5$ 为湍流,湍流模拟方法设置为标准 $k - \epsilon$ 模型,算法设置为二阶迎风格式的 SIMPLE 算法。

表 2 木柴的主要化学元素组成

Table 2 Composition of the main chemical elements

	of firewood (%)				
化学元素	C	H	N	S	O
百分含量	49.5	6.2	0.2	0.1	44

表 3 大气压力下烟气热物理性质

Table 3 Thermophysical properties of flue gas at the atmospheric pressure

$t/^\circ\text{C}$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$C_p/[\text{KJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	$\lambda\times 10^2/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	$\alpha\times 10^6/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$\mu\times 10^6/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	$\nu\times 10^6/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	Pr
1 200	0.240	1.340	12.62	392.4	53	221	0.56

注: C_p 为比热容; λ 为导热系数; α 为热扩散率; μ 为动力粘度; ν 为运动粘度; Pr 为普朗特数。

3 数值模拟结果与分析

FLUENT 仿真模拟完成后,通过后处理得到以下结果。

$$t = T - 273.15 \text{ K} \quad (1)$$

式中, t 为摄氏温度,单位符号为 $^\circ\text{C}$; T 为热力学温度,单位符号为 K。

3.1 洛阳东周王城十一号窑模拟结果与分析

从图 12 中可以看出,洛阳东周王城十一号窑温度分布不均匀但差别不大,烧制砖的温度大致在 1 000 K 至 1 400 K 之间,出口烟气温度为 1 250 K。

从纵剖面的流线图来看,高温烟气由火膛升入窑室并穿过砖之间的空隙,最后汇聚于吸火孔通过烟道排出,符合半倒焰窑的特点;结合温度分布云图来看,高温烟气纵向传播范围由下至上(窑床至窑顶)依次减弱,横向传播范围由左至右(窑室前部至窑室后部)依次减弱,窑室前端受热温度最高热辐射最强,中端次之,后端最弱,但窑室前端烟气扰动最大,中端次之,后端最稳定;其中一部分高温烟气通过窑顶没有为烧成砖提供热量直接倒向吸火孔排出窑外,在单吸火孔部位产生局部高温区,总的来说,半倒焰窑的结构能够发挥很好的保温作用。

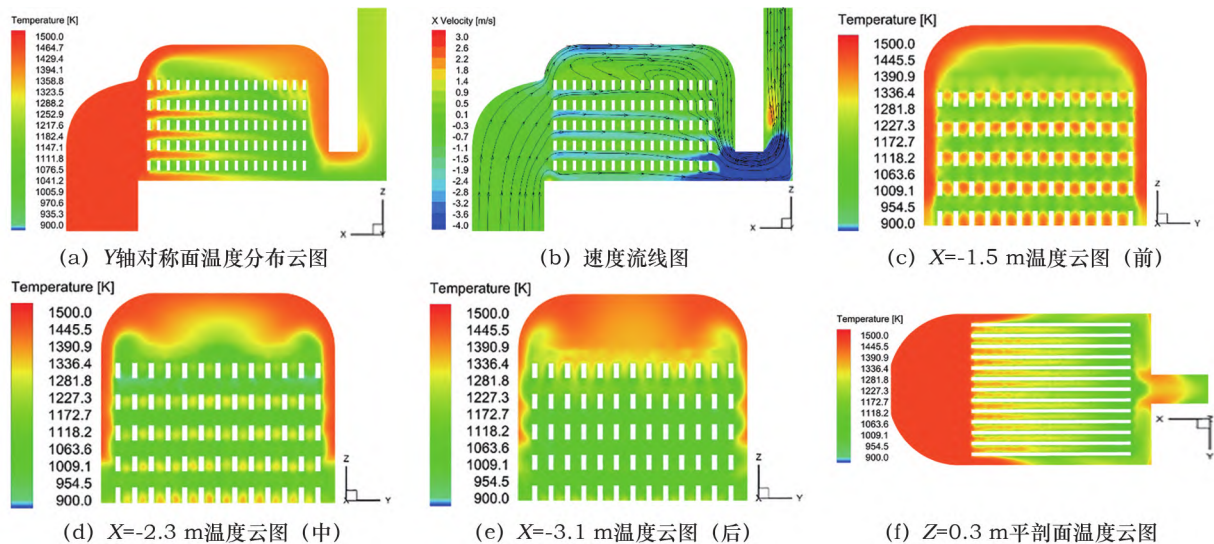


图 12 洛阳东周王城十一号窑模拟结果

Fig. 12 Simulation results of Kiln No. 11 at the Capital City site of the Eastern Zhou Dynasty in Luoyang

3.2 河南省焦作市苏藩村汉代窑址 Y6 模拟结果与分析

从图 13 中看,河南省焦作市苏藩村汉代窑址 Y6 的温度分布场特点与同样作为半倒焰窑的结构洛阳东周王城十一号窑大体上差别不大,但是对比窑的纵向温度分布和同位置的平剖面温度云图,前者的高温烟气传播范围更广,窑室内的温度整体更高更均匀,在 1 200 K 至 1 400 K 之间,出口温度为 1 250 K;由于 Y6 的吸火孔和烟道为三个,高温烟气在多个吸火孔的作用下可以更均匀地将高温烟气排出窑外,并在砖坯和窑顶之间反方向流动形

成旋流,其中旋流能够增加烟气流动阻力、增强烟气扰流程度,从而达到增强烟气与砖坯之间对流换热能力的效果;同时旋流中心能形成低压区,有增加烟气流速的作用,因此 Y6 烟气流动速度比前者快,出口速度比前者慢,保证了砖坯能够充分地、与高温烟气发生对流换热,使窑内温度分布更为均匀。

结合洛阳东周王城十一号窑和河南省焦作市苏藩村汉代窑址 Y6 的模拟结果来看,汉代砖瓦窑的结构变化具有一定的合理性,特别是烟道由一个发展为多个的结构变化,改善了窑室内温度分布不均

匀分布情况和保温效果,提高了砖坯的烧成温度范围和烧成质量,符合西汉中后期砖室墓和大型建筑

兴起的需求,并为后续大规模烧制更高烧成温度条件的陶瓷器奠定了技术基础。

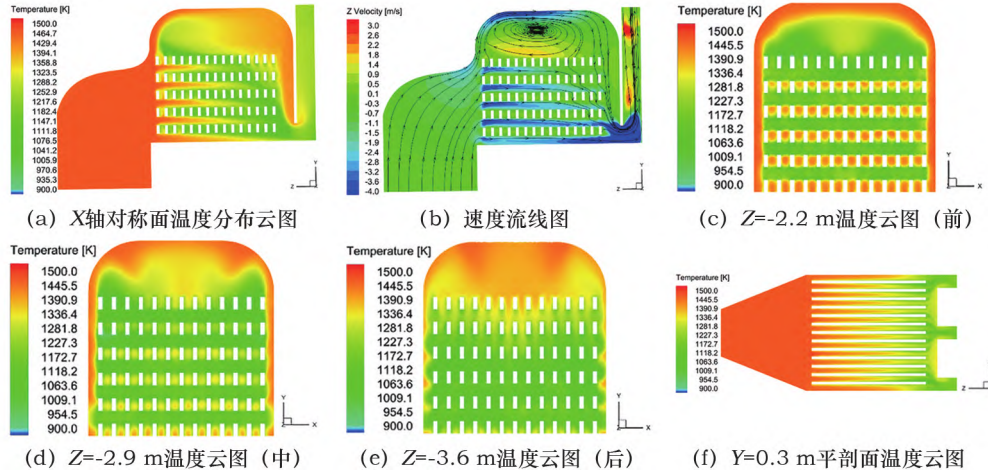


图 13 河南省焦作市苏营村汉代窑址 Y6 模拟结果

Fig. 13 Simulation results of Kiln site Y6 of the Han Dynasties at Sulin Village, Jiaozuo, Henan Province

4 相关问题探讨

4.1 汉代砖瓦烧成温度的探究

砖瓦的生产技术源自陶器,它的坯体制作和烧成技术较陶器更为粗放。在实际生产过程中,由于砖瓦窑的窑室空间较陶窑更大,人们往往选择陶器和砖瓦建筑材料共烧的方式以提高产品生产效率,因此从制作技术和烧成技术层面看,砖瓦和陶器是密不可分的。我国古代陶器的烧成温度一般在 800 ~ 1 000 °C 之间,据我国各时期部分砖瓦样品的烧成温度(表 4)统计显示,砖瓦的烧成温度范围也在此之内。从各时期纵向对比来看,砖瓦的烧成温度在商周至东汉时期逐渐升高,在秦汉时期达到较高值,而后稳定在 1 000 °C 左右。

表 4 我国各时期砖瓦的烧成温度^[23-24]

Table 4 Firing temperatures of bricks and tiles in different periods in China

序号	名称	时代	烧成温度/°C
1	陶水管	商代	920
2	板瓦	西周	860
3	陶作坊铺地砖	战国	860
4	铺地砖	战国	855
5	砖瓦	秦	995
6	砖瓦	秦	1 000
7	筒瓦	西汉	1 000
8	砖瓦	西汉晚期	1 010
9	砖	东汉	1 030
10	砖瓦	唐	1 030
11	砖	北宋	900
12	砖	明	1 050

砖瓦窑的窑形变化规律与其温度变化规律存在一定的相关性。单烟道窑作为商周至西汉早期的主要窑形代表,烧成温度较低,在 850 ~ 1 000 °C 之间。西汉中晚期后,烟道数量增至三个及以上,温度也随之稳定在 1 000 °C 左右,与模拟实验得到的多烟道窑内温度分布更均匀更稳定的结论相吻合。

4.2 挡火墙的初步研究

关于挡火墙的定义,南方窑址较多且与北方馒头窑有较大的区别,龙窑、阶级窑中的挡火墙设在窑室和烟道中间,墙上还开有排烟口,可以防止火焰流速过快使产品受热均匀,阶级窑中挡火墙还可用于分室,而半倒焰窑的挡火墙则设在火膛和窑室中间(图 14)。早在秦陵周围发现的陶窑有此类类似挡火墙的结构,包括下和村 82 下 Y1 的火膛有一道从底部筑起瓦砌的高出窑床约 40 cm 高的挡火墙,80 西 Y2 的火膛后有细绳纹瓦片筑成的工字分火道,主要出土陶器以制陶工具、砖瓦、生活用具为主^[25]。汉长安城西北部窑址中多个陶窑的火膛和窑室之间均有挡火墙,窑室中间纵向分布有分火道隔墙,其中 Y22 装满裸体陶俑坯体,隔火墙现存 5 层砖,宽 0.2 m,残高 0.46 m,通火孔约 0.02 ~ 0.08 m,分火道将窑室南北隔开现存 4 层,残高 0.38 m,通火孔约 0.02 ~ 0.10 m,南北分别填满倒置的陶俑坯,文中据规模推测该窑群作为烧制西汉时期大型墓地的随葬陶俑所用,单窑内一次可装烧近四百个陶俑^[26]。

结合前文模拟实验的结果分析可知,这类结构的半倒焰窑在没有挡火墙的情况下,窑室前部最下端流经烟气温度最高,流速最快,对于烧制大批量的

质量要求较高的器物较难满足要求,因此在下部设立一定高度具有通火孔的隔火墙一方面可以使窑室前部的制品不至于过热烧坏,一方面可以减缓底部烟气的流速不至于过快流出烟道,使更多的烟气往上流动,达到窑内温度更为均匀的效果。关于挡火墙对窑内温度场和流场的具体影响需要更进一步的模拟研究。

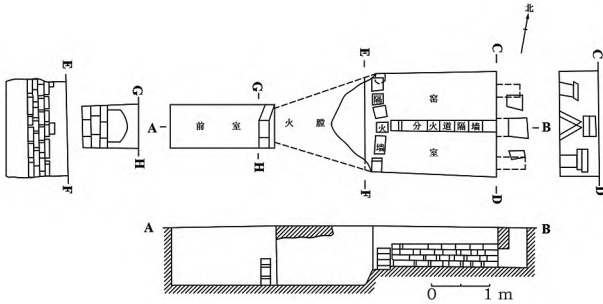


图14 汉长安城西北部窑址 Y22

Fig. 14 Kiln site Y22 in the northwest of Han Chang'an City

5 结论

综上所述,根据前人研究及模拟实验结果可得到以下结论:

1) 汉代砖瓦窑的建造方式为半地穴式,掏挖出平面形状后夯实壁面并涂抹草拌泥,西汉时期窑顶的封顶方式为四面结顶式穹窿顶或者券顶,东汉时期窑顶的封顶方式为四隅券进式穹窿顶或者券顶,码窑方式为生坯侧立排列摆放,砖窑的烧成温度在 1 000 °C 左右。

2) 汉代砖瓦窑的结构变化适应了当时社会对陶质材料和用具的扩大化需求,具有科学的合理性。通过模拟实验验证了半倒焰窑的烟气流动特点,特别是烟道由一个变为多个的结构变化使窑内温度分布更为均匀,提高了砖瓦的烧成温度和烧成质量。

3) 经过初步研究,汉代砖瓦窑在火膛和窑室之间设置挡火墙,起到了隔热和减缓高温烟气流速的作用,该结构对于烧制数量多质量较高的器物如陶俑具有较大的意义。

参考文献:

[1] 张明东. 黄河流域先秦陶窑研究[J]. 古代文明(辑刊), 2004, 3: 115-149.
ZHANG Mingdong. Study on pre-Qin pottery kilns in the Yellow River Basin[J]. Ancient Civilizations, 2004, 3: 115-149.

[2] 李清临. 秦汉时期砖瓦窑研究[J]. 考古与文物, 2014(2): 59-81.
LI Qinglin. Study on brick and tile kiln in Qin and Han Dynasties

[J]. Archaeology and Cultural Relics, 2014(2): 59-81.

[3] 刘尊志. 汉代墓地陶窑及相关问题[J]. 文物, 2019(11): 48-58.
LIU Zunzhi. Pottery kiln in Han Dynasty cemetery and related issues[J]. Cultural Relics, 2019(11): 48-58.

[4] 颜新华, 李长塔, 冯青, 等. 葫芦窑与景德镇窑结构关系的研究[J]. 中国陶瓷, 2018, 54(8): 57-64.
YAN Xinhua, LI Changta, FENG Qing, et al. Study on the relationship between the structure of gourd kiln and Jingdezhen kiln[J]. China Ceramics, 2018, 54(8): 57-64.

[5] 郭永洪, 黄可佳, 谭琛, 等. 陕西西安曲江春临村汉代窑址发掘简报[J]. 文博, 2020(2): 3-11.
GUO Yongqi, HUANG Kejia, TAN Chen, et al. Excavation of Han kiln site at Chunlin Village, Qujiang, Xi'an, Shaanxi Province[J]. Relics and Museology, 2020(2): 3-11.

[6] 李德方. 洛阳市东郊东汉“对开式”砖瓦窑的清理[J]. 中原文物, 1985(4): 13-15.
LI Defang. Excavation of “opposite type” brick and tile kiln in Eastern Han Dynasty in the eastern suburb of Luoyang[J]. Cultural Relics of Central China, 1985(4): 13-15.

[7] 贺惠陆. 河南新乡市东干道发现西汉陶窑[J]. 考古与文物, 1994(4): 107-109.
HE Huilu. Pottery kiln of the Western Han Dynasty discovered at Donggandao, Xinxiang, Henan Province[J]. Archaeology and Cultural Relics, 1994(4): 107-109.

[8] 刘振东. 汉长安城新发现六座窑址[J]. 考古, 2002(11): 92-94.
LIU Zhendong. Six new kiln sites discovered at Han Chang'an City[J]. Archaeology, 2002(11): 92-94.

[9] 洛阳市文物工作队. 洛阳东周王城内的古窑址[J]. 考古与文物, 1983(3): 12-19.
Luoyang Cultural Relics Team. Ancient kiln sites at Eastern Zhou Luoyang City[J]. Archaeology and Cultural Relics, 1983(3): 12-19.

[10] 李清临. 多学科视角下的秦汉砖瓦窑炉工艺技术与交流研究[J]. 四川文物, 2022(3): 53-66.
LI Qinglin. Research on the technology and communication of brick kiln in Qin and Han Dynasties from the multi-disciplinary perspective[J]. Sichuan Cultural Relics, 2022(3): 53-66.

[11] 冯春艳, 张满堂, 皇小够, 等. 南水北调中线工程焦作苏园段汉代窑址发掘简报[J]. 中原文物, 2013(4): 31-35.
FENG Chunyan, ZHANG Mantang, HUANG Xiaogou, et al. Excavation of kilns of Han Dynasty at the river course of Sulin site Jiaozuo City for coordinating the South-to-North Diversion Project[J]. Cultural Relics of Central China, 2013(4): 31-35.

[12] 赵志强, 刘焕龙, 李小龙, 等. 焦作武陟苗庄汉代陶窑发掘简报[J]. 中原文物, 2015(5): 13-17.
ZHAO Zhiqiang, LIU Huanlong, LI Xiaolong, et al. Brief report on the excavation of pottery kilns in the Han Dynasty in Miao Zhuang, Wuzhi, Jiaozuo[J]. Cultural Relics of Central China, 2015(5): 13-17.

[13] 钱国祥. 汉魏洛阳城发现的东汉烧煤瓦窑遗址[J]. 考古, 1997(2): 47-51.

- QIAN Guoxiang. The site of a coal – fired tile kiln discovered in Luoyang City during the Han and Wei Dynasties[J]. *Archaeology*, 1997(2):47 – 51.
- [14] 谢安琪,党丰. 试析汉墓砖砌穹窿顶的分类[J]. *南方文物*, 2020(5):257 – 262.
- XIE Anqi, DANG Feng. An analysis of the classification of the brickly domes of tombs in Han Dynasty[J]. *Cultural Relics in Southern China*, 2020(5):257 – 262.
- [15] 徐永利. 中国古代墓葬四隅券进式穹窿机制与源流研究[M]. 南京:东南大学出版社, 2018:4 – 5.
- XU Yongli. A study about the mechanism and genesis of quadripartite arched domes in ancient Chinese tombs[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2018:4 – 5.
- [16] 贺惠陆. 新乡北 Station 区前郭柳村汉代窑址发掘[J]. *考古*, 1989(5):418 – 422.
- HE Huilu. Excavation of Han kiln site at Qianguli Village, North Station area, Xinxiang[J]. *Archaeology*, 1989(5):418 – 422.
- [17] 杨树刚,林壹,汪翔. 河南郑州马良寨遗址汉代陶窑发掘简报[J]. *华夏考古*, 2018(1):30 – 41.
- YANG Shugang, LIN Yi, WANG Xiang. Excavation of pottery kiln of Han Dynasty at Maliangzhai site, Zhengzhou, Henan Province[J]. *Huaxia Archaeology*, 2018(1):30 – 41.
- [18] DA GRAÇA CARVALHO M, NOGUEIRA M. Improvement of energy efficiency in glass – melting furnaces, cement kilns and baking ovens[J]. *Applied Thermal Engineering*, 1997, 17(8/9/10):921 – 933.
- [19] 宋应星. *天工开物*[M]. 上海:上海古籍出版社, 2008:186 – 194.
- SONG Yingxing. *Tian Gong Kai Wu*[M]. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2008:186 – 194.
- [20] 李清临. 中国古代砖瓦生产中“浇水转釉”技术的起源与发展[J]. *考古与文物*, 2016(1):96 – 104.
- LI Qinglin. The origin and development of “jiaoshui zhuanyou” technology in the production of ancient Chinese bricks and tiles[J]. *Archaeology and Cultural Relics*, 2016(1):96 – 104.
- [21] 林鹏. 秸秆类生物质层燃燃烧特性的试验研究[D]. 上海:上海交通大学, 2008.
- LIN Peng. Experimental study on the biomass combustion character in stoker – fired boiler[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [22] 杨世铭,陶文铨. *传热学*[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:557 – 560.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. *Heat transfer*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:557 – 560.
- [23] 吴隽,王海圣,李家治,等. 南越王宫遗址出土罕见巨型釉砖的科技研究[J]. *中国科学(E辑:技术科学)*, 2007, 37(9):1140 – 1147.
- WU Juan, WANG Haisheng, LI Jiazhi, *et al.* Scientific and technological research on the rare giant glazed tiles unearthed from the Nanyue Palace Site[J]. *Scientia Sinica(Technologica)*, 2007, 37(9):1140 – 1147.
- [24] 李家治. *中国科学技术史:陶瓷卷*[M]. 北京:科学出版社, 1998:68.
- LI Jiazhi. *History of science and technology in China: ceramics volume*[M]. Beijing: Science Press, 1998:68.
- [25] 程学华. 秦芷阳制陶作坊遗址清理简报[J]. *考古与文物*, 1995(5):16 – 27.
- CHENG Xuehua. Brief report on the excavation of Qin Zhiyang pottery workshop site[J]. *Archaeology and Cultural Relics*, 1995(5):16 – 27.
- [26] 刘庆柱,李毓芳,刘振东,等. 汉长安城窑址发掘报告[J]. *考古学报*, 1994(1):99 – 129.
- LIU Qingzhu, LI Yufang, LIU Zhendong, *et al.* Excavation report of Chang’an City kiln site in Han Dynasty[J]. *Acta Archaeologica Sinica*, 1994(1):99 – 129.

Construction and numerical simulation of brick and tile kilns in the Han Dynasties

WEN Rui^{1,2,3}, ZHANG Yiwen^{1,2,3}, FU Xiaolong⁴

- [1. China – Central Asia “the Belt and Road” Joint Laboratory on Human and Environment Research (Northwest University), Xi’an 710127, China;
2. Key Laboratory of Cultural Heritage Research and Conservation (Northwest University), Ministry of Education, Xi’an 710127, China;
3. School of Cultural Heritage, Northwest University, Xi’an 710127, China;
4. Xi’an Modern Chemistry Research Institute, Xi’an 710065, China]

Abstract: Bricks and tiles are ceramic building materials, which have been commonly used for palaces and other high – grade buildings since the Western Zhou Dynasty. During the Qin and Han Dynasties, with unification and centralization and the massive development of civil engineering in various places, the pottery industry tended to mature. In addition, the brick chamber tomb appeared in the late Western Han Dynasty, and quickly became popular nationwide in the Eastern Han Dynasty. All the factors above made pottery products for buildings occupy an important position in the pottery industry (with the name of “Qin bricks and Han tiles”). The Han Dynasties were

a period of prosperity for the pottery industry, with the pottery products more widely used than in the Qin Dynasty, and the structure of brick and tile kilns changing as their functions changed. In order to explore the scientific logic of the changes in the characteristics and structures of Han Dynasty brick and tile kilns, numerical simulation of the flow field and temperature field during firing in Han Dynasty brick and tile kilns with different structures was conducted.

Han Dynasty brick and tile kilns were semi-inverted-flame ones, with the advantages of rapid heating, long holding times and even temperature distribution compared to the earlier horizontal cavity kilns and rising-flame kilns. Through the analyses of archaeological reports and numerical simulations, the functional and structural relationships of Han Dynasty brick and tile kilns were studied. Firstly, based on the previous typological studies of Han Dynasty brick and tile kilns, the kilns were divided into single-flue and multiple-flue ones according to the pattern of change in the structure of each part of the kiln during the Han Dynasties. Then, based on excavations of kiln sites and documentation of the ancient kiln industry, the construction, yarding and firing methods of Han Dynasty brick and tile kilns were summarized. Finally, simulations were modeled based on the above research with the aim of investigating the influence of variation in the number of flues on firing in the brick and tile kilns.

Furthermore, considering such factors as the unearthed relics, age and preservation in the kiln, Han Dynasty Kiln site Y6 at Sulin Village, Jiaozuo, Henan Province and Kiln No. 11 at the Capital City site of the Eastern Zhou Dynasty in Luoyang were selected to carry out numerical simulations respectively. Han bricks were taken as examples of kiln products, the computational fluid software FLUENT was mainly used to simulate the flow field and temperature field in the kiln, and the flow of flue gas in the Han Dynasty kiln was analyzed from the perspective of fluid mechanics and thermodynamics. The results indicate: 1) Han Dynasty brick and tile kilns were built in a semi-cavernous manner, with the walls rammed and coated with grass-mixed mud after excavation to create a flat shape. The roof of the kiln in the Western Han period was capped with a four-sided knotted dome or vault roof, while in the Eastern Han period the roof was capped with a four-cornered vault dome or vault roof. A side-standing arrangement of billets was adopted for yarding in the kiln; the firing temperature of the kiln was around 1 000 °C. 2) The structural changes of brick and tile kilns in the Han Dynasties adapted to the expanding demand for ceramic building materials in society at that time and were scientifically reasonable. In addition, the flue gas flow characteristics of the semi-inverted-flame kiln were verified through simulation experiments, especially the structural change of the flue from one to many making the temperature distribution in the kiln more uniform to raise the firing temperature and improve the quality of bricks and tiles. 3) After preliminary research, it was found that, in Han Dynasty brick and tile kilns, a fire wall was set up between the firing chamber and the kiln chamber, which played a role in insulation and slowing down the flow rate of high-temperature flue gas. This structure was of great significance for firing large numbers of high-quality artifacts such as pottery figurines.

According to this research, the structural changes in Han Dynasty brick and tile kilns are somewhat rational, with multiple-flue kilns having the advantage of being more insulated than single-flue ones, improving temperature distribution and insulation within the kiln chamber, increasing the firing temperature range and firing quality of products. This explains the logic of structural changes in Han Dynasty brick and tile kilns, namely that it corresponded to the needs caused by the rise of brick chamber tombs and large buildings during the mid-to-late-Western Han period. These changes laid a technical foundation for the subsequent large-scale firing of ceramics with higher firing temperature conditions. The results demonstrate the feasibility of numerical simulations in kiln research and provide a scientific basis for further exploration of the production levels of Han Dynasty kilns.

Key words: Han Dynasties; Brick and tile kiln; Kiln structure; Numerical simulation; Fire wall

(责任编辑 谢 燕;校对 张存祖)