

文章编号:1007-9629(2025)01-0082-07

清华园出土古墓砖力学性能与微结构的关系

韩建国

(清华大学 土木工程系, 北京 100084)

摘要:对清华园出土的跨越 1 600 年历史的古墓砖,进行了形貌、力学性能和孔隙率等宏观性能测试,以及化学组成、矿物组成等微观性能测试,全面剖析了不同朝代古墓砖的异同.结果表明:自晋朝至清朝,中国民间制砖工艺和制砖质量无显著变化;中国自秦朝就掌握了红砖和青砖 2 种制砖工艺;相较于红砖,青砖的体积密度更小,孔隙率更大,强度更高,这是因为烧成过程中,附加的焖烧阶段提升了青砖的烧结程度,产生了更程度的碳酸钙分解和伊利石结晶水的汽化,促进了钙长石和玻璃相的生成.

关键词:古墓砖;清华园;力学性能;化学组成;矿物组成

中图分类号:TU522.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.01.011

Relationship between Mechanical Properties and Microstructure of Ancient Tomb Bricks Unearthed from Tsinghua Garden

HAN Jianguo

(Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Macro and micro performance of ancient tomb bricks unearthed from Tsinghua Garden covering a history of 1 600 years, including appearance, mechanical properties, porosity, chemical and mineral composition, were analyzed. The results show that from the Jin Dynasty to the Qing Dynasty, there is no significant change in the brick-making technology and brick quality. From the Qin Dynasty, red brick and blue brick was produced universally in China. Compared with red brick, the blue brick has smaller volume density, larger porosity and higher strength, resulted from the increased degree of sintering, higher degree of calcium carbonate decomposition and illite crystal water vaporization, and the increased amount of anorthite and glass phase formation.

Key words: ancient tomb brick; Tsinghua Garden; mechanical strength; chemical composition; mineral composition

北京是一座有 3 000 余年历史的古城,自公元前 1046 年周武王克商之后,封召公于燕都正式进入记载,随着明成祖于 1420 年迁都北京进入极盛时期^[1].清华园是清华大学所在地,2019 年 4 月在清华大学新土木馆工程现场发现了 95 座古墓,北京市文物局组织文物研究所的专家对古墓进行了考古发掘^[2].北京市文物研究所在考古发掘后认为,这些墓葬都属于平民墓.在发掘过程中出土了大量墓室砌筑用烧结砖,隶属于不同朝代,有青砖和红砖 2 种类别,尺寸上

也有显著差异.

中国烧结砖的制作历史悠久,在秦朝就开始用烧结砖来建造城墙和宫殿^[3].在秦兵马俑坑中发现了 25 万余块烧结砖,多数为青砖,少数为红砖^[4].同时,在俑坑中还发现了用烧结砖砌筑的砖墙.周朝的烧结砖尺寸较薄,主要用来铺设地面和装饰墙面,类似于当今的瓷砖^[5].因此可以说,砌筑用途的烧结砖,其历史可以追溯至秦朝,且在秦朝就出现了红砖和青砖 2 种类型.之后,烧结砖作为建筑材料,其制作和应

收稿日期:2024-01-27; 修订日期:2024-03-21

第一作者(通讯作者):韩建国(1974—),男,河北邯郸人,清华大学正高级工程师,博士. E-mail:hanjg@tsinghua.edu.cn

用贯穿了秦朝至当代的所有历史阶段^[6-7]。

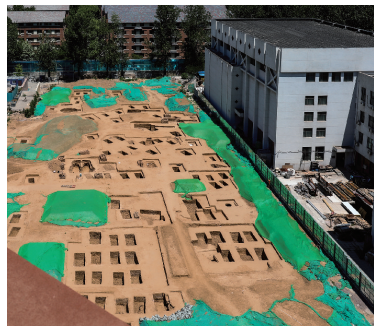
如能对中国历史上不同朝代的烧结砖进行取样并研究,则可全面探究中国烧结砖的发展史和性能发展历程.本次清华园考古过程中所发掘的古墓跨越了从晋朝到清朝的广袤历史区间(公元266年~1912年,跨度约1600年).考古发掘完成后,作者请文物研究所的专家对遗弃在发掘现场的古墓砖进行了断代,分别提取了晋朝、北朝、隋朝、唐朝和清朝5个朝代的古墓

砖,并针对这些古墓砖,从土木工程材料的角度进行了性能测试和分析,研究结果可以为中国烧结砖的制砖工艺和性能发展历程研究提供借鉴.

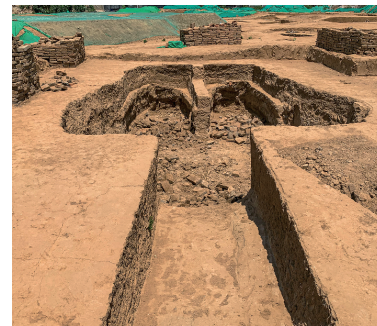
1 古墓砖样品与分析方法

1.1 试验样品

考古现场如图1所示.5个朝代古墓砖的类型、数量和尺寸如表1所示,外观形貌如图2所示.



(a) Excavation scenario



(b) Burial form of ancient tomb

图1 清华园古墓考古发掘现场

Fig. 1 Archaeological excavation in Tsinghua Garden

表1 5个朝代古墓砖的类型和尺寸

Table 1 Type and size of ancient tomb bricks from five dynasties

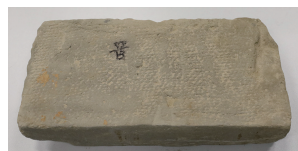
Dynasty	Brick type	Number	Size/(mm×mm×mm)
Jin	Blue	1	307×150×60
Northen	Red	9	290×150×56
	Blue	4	287×150×55
Sui	Red	5	290×150×58
	Blue	9	290×150×50
Tang	Blue	1	360×175×55
Qing	Red	2	325×145×55
	Blue	10	317×160×60

结合表1和图2可见:

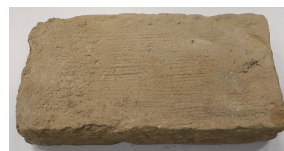
(1)外观 由于古代采用模具填充和手工成型

的方法制作砖坯,受模具规整度差和泥坯含水率(质量分数,文中涉及的含水率、含量等除特别说明外均为质量分数)高的影响,古墓砖的外观不规整,有缺边、掉角、翘曲和疤痕等现象.

(2)类型 综合5个朝代古墓砖的类型信息可见,红砖和青砖在中国的制砖历史上长期并存,晋朝就出现了青砖,说明中国很早就掌握了青砖的烧成工艺^[8].即,在砖的烧成过程中,通过封闭进气口和从排气口向煅烧窑中喷淋水分,在高温作用下使水汽化并产生水蒸气,隔绝外部空气向燃烧区域的供给而使燃烧区产生还原气氛,使得烧结砖中的氧化铁由氧化态(三氧化二铁,红色)转变为还原态(氧化亚铁,青色).本文将青砖的烧成工艺称为“焖烧”.



(a) Blue brick of Jin Dynasty



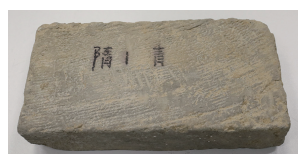
(b) Red brick of Northen Dynasty



(c) Blue brick of Northen Dynasty



(d) Red brick of Sui Dynasty



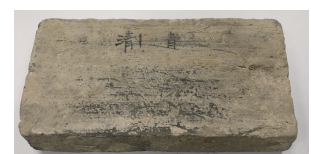
(e) Blue brick of Sui Dynasty



(f) Blue brick of Tang Dynasty



(g) Red brick of Qing Dynasty



(h) Blue brick of Qing Dynasty

图2 5个朝代古墓砖的外观形貌

Fig. 2 Appearances of ancient tomb bricks from five dynasties

(3)质地 5个朝代所制作的烧结砖,均有1个大面上出现了沿长度方向的平行纹理,这是在制砖过程中,制砖工用耙具清除模具上口多余的泥坯所致,反映了这5个朝代在制砖工艺上的传承和一致性。

(4)尺寸 5个朝代所制作的烧结砖,在厚度方向上基本一致,均处于55~60 mm之间。在长度和宽度方向上,不同朝代的砖有差异。唐朝的砖尺寸较其余的4个朝代明显偏大,其长度为360 mm,宽度为175 mm。晋朝、北朝、隋朝和清朝4个朝代的砖,长度均处于290~320 mm之间,宽度均处于145~160 mm之间。

1.2 试验方法

在进行性能测试之前,对采集到的古墓砖进行预处理:先用软毛刷小心地扫除砖表面附着的泥土,再将砖放置到105 °C的鼓风干燥箱中干燥直至恒重。

砖的力学性能测试采用如图3所示的德国 Toni Technik 2071(弯折)和2031(压缩)型材料试验机进

行。砖的抗弯强度(σ_f)测试使用原尺寸的砖,采用三点弯曲的加载方式(见图3(a)),下部2个支点的跨距为250 mm,恒位移加载,加载速率为1 mm/min。抗弯强度用式(1)进行计算。

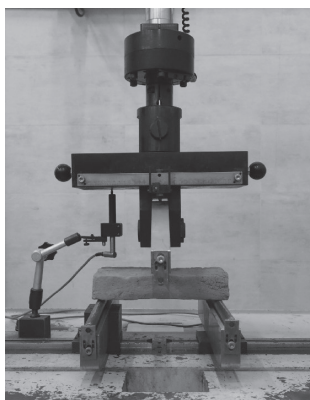
$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (1)$$

式中: F 为砖断裂时的荷载,N; L 为砖下部2个支点的跨距,mm; b 为砖的宽度,mm; h 为砖的高度,mm。

砖的抗压强度(R_p)测试使用沿砖宽度方向切割出的棱柱体试样进行。该棱柱体试样从古墓砖抗弯强度测试后的断裂部分中切割而出,切割面之间的距离为50 mm(见图3(b)),加载方式采用恒位移加载,加载速率为1 mm/min。抗压强度用式(2)进行计算。

$$R_p = \frac{F_{\max}}{bh} \quad (2)$$

式中: F_{\max} 为砖压缩破坏时的极限荷载,N。



(a) Flexural strength measurement



(b) Compressive strength measurement

图3 古墓砖的力学性能测试

Fig. 3 Mechanical strength measurement of ancient tomb brick

砖的孔隙率(P)采用表观密度(ρ_s)与体积密度(ρ_v)联合测试的方法进行测试,该方法得到的孔隙率为试样中封闭孔隙率和开放孔隙率的总和。

砖的表观密度测试方法:将105 °C干燥至恒重的烧结砖块体用玛瑙研钵进行研磨,待研磨后的粉末可全部通过孔径边长为0.160 mm的方孔筛后,使用250 mL的容量瓶,用无水乙醇作分散剂,采用排液法测试砖的表观密度。

砖的体积密度采用切割后棱柱体的质量与体积的比值计算出。砖的表观密度和体积密度测试完成后,采用式(3)计算砖的孔隙率。

$$P = \frac{\rho_s - \rho_v}{\rho_s} \times 100\% \quad (3)$$

砖的微结构使用具有微距功能的数码相机对烧

结砖内部的切面进行成像,化学组成使用美国 Thermo Scientific ARL PERFORM'X 型 X 射线荧光光谱仪(XPS)进行元素种类鉴定和氧化物丰度分析^[9],矿物组成使用德国 Bruker D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪(XRD)进行烧结砖中晶体种类鉴定和晶体矿物含量定量分析,晶体矿物含量的定量分析使用 Rietveld 方法进行^[10]。

2 结果与讨论

2.1 砖的力学性能分析

5个朝代古墓砖的力学性能如表2所示,其中给出了古墓砖抗弯强度和抗压强度的平均值(Mean)、标准差(Std.)和变异系数(CV)。由表2可见:

(1)从力学性能的角度来看,由晋朝至清朝的

1600年间,无论是青砖还是红砖,并无显著的改进和提升,反而是历史较久远的北朝和隋朝相对于历史较近的唐朝和清朝,所制备烧结砖的力学性能更优。

(2)这些古墓砖的力学性能波动(用变异系数来衡量)较大,抗弯强度的最大波动为49.4%(隋朝的青

砖),抗压强度的最大波动为39.7%(唐朝的青砖)。这是由古代手工制砖工艺以及简单的煅烧装置所致,前者使得土坯的含水率高、成型不密实且缺陷含量高,后者使得煅烧窑内的煅烧温度低且温度场不均匀。同时,在相同的朝代,青砖的强度要高于红砖。

表2 古墓砖的力学性能

Table 2 Mechanical strength of ancient tomb bricks

No.	Dynasty	Type	Flexural strength				Compressive strength			
			Mean/MPa	Std./MPa	CV/%	Number	Mean/MPa	Std./MPa	CV/%	Number
JQ	Jin	Blue	0.92	0	0	1	4.45	0.24	5.5	2
BH	Northen	Red	2.53	0.90	35.4	3	8.00	2.09	26.2	6
BQ	Northen	Blue	2.22	0.71	31.9	3	9.26	2.89	31.2	6
SH	Sui	Red	2.53	1.23	48.5	3	7.38	2.78	37.7	6
SQ	Sui	Blue	2.35	1.16	49.4	3	8.06	2.03	25.1	6
TQ	Tang	Blue	2.91	0	0	1	7.06	2.80	39.7	2
QH	Qing	Red	1.42	0.08	5.5	2	6.05	0.83	13.7	4
QQ	Qing	Blue	2.79	1.20	43.0	3	7.70	2.32	30.1	6

2.2 砖的孔隙率分析

5个朝代古墓砖的表现密度、体积密度和孔隙率如表3所示。由表3可见:

(1)5个朝代的古墓砖,无论红砖或青砖,其表现密度非常接近,均在 $2.64\sim 2.65\text{ g/cm}^3$ 之间。这是因

为砖这种建筑材料,所包含的化学元素均隶属于硅酸盐体系,且元素含量相对一致。

(2)5个朝代古墓砖的体积密度和孔隙率并不一致。同一朝代的红砖与青砖相比,青砖的体积密度更低,孔隙率更大。

表3 古墓砖的表现密度、体积密度和孔隙率

Table 3 Apparent density, volume density and porosity of ancient tomb bricks

No.	Dynasty	Type	Apparent density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Volume density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Porosity(by volume)/%
JQ	Jin	Blue	2.65	1.61	39.21
BH	Northen	Red	2.64	1.70	35.61
BQ	Northen	Blue	2.65	1.66	37.43
SH	Sui	Red	2.64	1.67	36.87
SQ	Sui	Blue	2.65	1.65	37.69
TQ	Tang	Blue	2.64	1.67	36.75
QH	Qing	Red	2.65	1.66	37.52
QQ	Qing	Blue	2.64	1.63	38.24

2.3 砖的微观性能分析

图4为古墓砖内部切片的形貌。由图4可见,这些古墓砖的内部均含有大量的杂质、气孔等缺陷,这是由当时的练泥工艺和手工成型方法所致,使得制砖用黏土中混入了石块、砖屑等杂质,还使得土坯的含水率升高,成型不密实,形成了大量的气孔。这些随机分布的缺陷,降低了砖的力学性能(抗弯强度、抗压强度等),并使得砖的力学性能测试结果产生了显著波动,如表2所示。

表4为古墓砖的化学组成。由表4可见,这些古墓砖的组成元素均主要为Si、Al、Fe、Ca、Mg、O、K、Na和Ti等9种元素。将元素以氧化物的形式表示后,

各种氧化物的含量也相当一致。这也是5个朝代古墓砖表现密度非常接近的原因。

图5为古墓砖的XRD图谱。由图5可见,5个朝代的古墓砖,无论红砖还是青砖,所包含的晶体种类基本相同,都含有方解石(calcite)、伊利石(illite)、钙长石(anorthite)、石英(quartz)、锐钛矿(rutile)和磁铁矿(magnetite)等6种矿物。

使用全谱拟合Rietveld方法,对图5中的XRD图谱进行定量分析,计算5个朝代古墓砖中方解石、伊利石、钙长石、石英、锐钛矿和磁铁矿6种矿物的组成,结果如表5所示。

用于制备烧结砖的黏土类矿物是具有层状构造

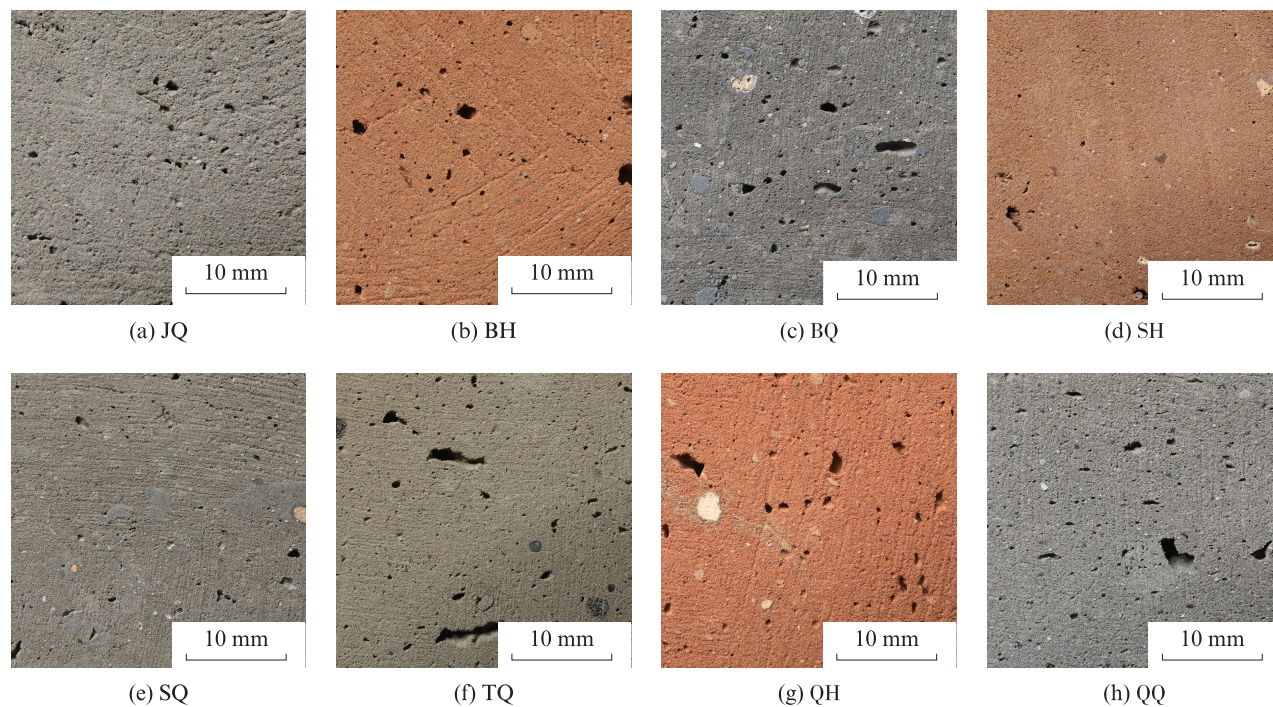


图4 古墓砖内部切片的形貌

Fig. 4 Morphology of cutting section of ancient tomb bricks

表4 古墓砖的化学组成

Table 4 Chemical compositions (by mass) of ancient tomb bricks

No.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	TiO ₂	Na ₂ O	Total
JQ	60.94	15.82	10.68	2.77	3.87	2.11	1.39	1.37	98.95
BH	51.71	15.76	12.36	10.40	3.78	2.54	1.33	0.95	98.83
BQ	53.86	15.78	11.98	8.30	3.73	2.66	1.34	1.20	98.85
SH	54.32	15.58	12.05	8.10	3.85	2.56	1.32	1.03	98.81
SQ	54.43	15.52	12.07	8.01	3.78	2.51	1.34	1.23	98.89
TQ	60.76	16.38	10.90	3.07	3.59	1.72	1.38	1.15	98.95
QH	58.88	16.90	11.54	3.42	3.83	2.00	1.36	1.17	99.10
QQ	59.73	16.41	10.90	3.74	3.86	1.85	1.34	1.20	99.03

Unit: %

表5 古墓砖的矿物组成

Table 5 Mineral compositions (by mass) of ancient tomb bricks

No.	Anorthite	Illite	Quartz	Calcite	Rutile	Magnetite
JQ	28.53	11.24	59.18	0.24	0.06	0.75
BH	18.70	20.54	51.87	5.96	0.90	2.02
BQ	41.84	9.04	44.82	1.54	1.62	1.15
SH	24.89	16.82	52.91	3.18	1.65	0.55
SQ	37.40	8.75	50.15	1.65	1.33	0.73
TQ	24.52	14.25	58.48	0.45	1.99	0.31
QH	20.30	17.88	57.42	1.30	0.86	2.24
QQ	28.67	13.58	54.84	0.60	0.99	1.32

Unit: %

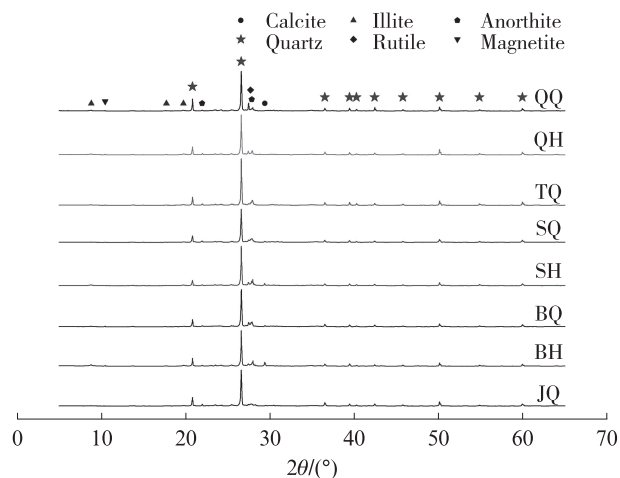


图5 古墓砖的XRD图谱

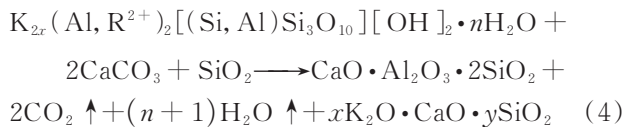
Fig. 5 XRD patterns of ancient tomb bricks

的含水铝硅酸盐矿物,如伊利石、高岭土、蒙脱石等,具体的矿物种类和含量与原岩种类、环境作用历程有关.本文中用于制备不同朝代烧结砖的黏土类矿物的主要成分是伊利石,同时含有方解石、石英、钙钛矿、磁铁矿等杂质.黏土类矿物在高温煅烧过程中,随着温度的上升依次会经历脱水(100℃左右失去自由水、400~600℃左右失去结晶水)、分解(600~900℃有机物的燃烧、850℃左右碳酸钙的分解)、相变(900~1 000℃,伊利石与碳酸钙和石英反应生成钙长石、高岭土转变为莫来石和石英)、熔融(1 000~1 200℃,钾钠长石类矿物熔融生成玻璃相)和烧结(高温煅烧后的冷却阶段,煅烧过程中生成的晶体或玻璃相对其余颗粒之间的搭接和黏结作用)过程,从

而实现了黏土类矿物的高温烧结^[11-12]. 烧结砖的制备就是基于该煅烧过程.

由表5可见,同一朝代的红砖和青砖相比,青砖中的方解石、石英和伊利石的含量降低,而钙长石的含量升高.这是因为在青砖的焖烧阶段,在持续的高温作用下,伊利石、方解石和石英之间发生化学反应生成了钙长石和玻璃相^[13-14],如式(4)所述的化学反应式.并通过钙长石自身的强度,以及钙长石和玻璃相对砖中颗粒物之间的胶结作用提升了砖的强度.这解释了表2中,在相同朝代,青砖强度要高于红砖强度的原因.高衡等的研究结果也表明,明代用于军事工程的烧结青砖,其中也含有钙长石组分^[12].

同时,青砖相对于红砖所经历的附加焖烧阶段,在煅烧过程中由于方解石热分解后释放二氧化碳、伊利石热分解后释放水蒸气而导致单位体积内的质量缩减,降低了青砖的体积密度并提升了其孔隙率.这解释了表3中,同一朝代的青砖与红砖相比,青砖体积密度低、孔隙率大的原因.



式中: $K_{2x}(Al, R^{2+})_2[(Si, Al)Si_3O_{10}][OH]_2 \cdot nH_2O$ 为伊利石,其中的 R^{2+} 代表二价金属阳离子,主要为 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} ; $CaCO_3$ 为方解石; SiO_2 为石英; $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ 为钙长石; $CO_2 \uparrow$ 和 $H_2O \uparrow$ 为煅烧过程中释放出的二氧化碳和汽化的结晶水; $xK_2O \cdot CaO \cdot ySiO_2$ 为钾玻璃.

3 结论

(1)从晋朝至清朝,中国民间的制砖工艺均为模具填充和手工成型,制砖工艺和制砖质量一直无显著变化,北朝和隋朝砖的强度较高.

(2)红砖和青砖2种制砖工艺,从晋朝至清朝的1600年间一直在应用,说明中国很早就掌握了青砖的烧成方法,意识到并利用了青砖的优点(颜色古朴、强度高特点).中国自秦朝就开始制作红砖和青砖2种烧结砖,这2种烧结砖的制作和应用一直延续到现在.

(3)与红砖相比,青砖的孔隙率更高,强度更大.其原因是由红砖转变为青砖的焖烧阶段,持续的煅烧促进了由伊利石、方解石、石英生成钙长石和玻璃相的化学反应,提升了砖的烧结程度、以及钙长石和玻璃相对砖中颗粒物的胶结作用,使得青砖的强度提升;同时,焖烧阶段碳酸钙分解和伊利石结晶水的

汽化使得青砖的质量缩减,导致青砖的体积密度降低、孔隙率增大.

参考文献:

- [1] 文摘报. 北京的历史沿革[EB/OL]. (2015-05-16)[2024-01-16]. https://epaper.gmw.cn/wzb/html/2015-05/16/nw.D110000wzb_20150516_1-07.htm. Digest. The history of Beijing [EB/OL]. (2015-05-16)[2024-01-16]. https://epaper.gmw.cn/wzb/html/2015-05/16/nw.D110000wzb_20150516_1-07.htm. (in Chinese)
- [2] 清华新闻. 清华大学校园内发现95座古墓[EB/OL]. (2019-06-01)[2024-01-16]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/49972.htm>. Tsinghua News. Ninety-five ancient tombs were discovered in the campus of Tsinghua University [EB/OL]. (2019-06-01)[2024-01-16]. <https://www.tsinghua.edu.cn/info/1182/49972.htm>. (in Chinese)
- [3] 佚名. 秦砖汉瓦,古代建筑的历史渊源[J]. 建筑装饰材料世界, 2007(7): 24-25. Anonymous. Qin bricks and Han tiles, the historical origin of ancient architecture [J]. The World of Building Decoration Materials, 2007(7):24-25. (in Chinese)
- [4] 西部网. [秦俑百问微讲堂]秦兵马俑坑中出土的秦砖[EB/OL]. (2020-12-29)[2024-01-16]. <http://news.cnwest.com/sxxw/a/2020/12/29/19398272.html>. Western Net. [Qin Warriors Baiwen Micro Lecture Hall] Qin bricks unearthed in the Terracotta Warriors pit [EB/OL]. (2020-12-29)[2024-01-16]. <http://news.cnwest.com/sxxw/a/2020/12/29/19398272.html>. (in Chinese)
- [5] 周宜吉,吴新民,刘书生.“秦砖汉瓦”还是“周瓦秦砖”?[J]. 江苏地质, 2004, 28(1):64. ZHOU Yiji, WU Xinmin, LIU Shusheng. Qin brick Han tile or Zhou tile Qin brick?[J]. Jiangsu Geology, 2004, 28(1):64. (in Chinese)
- [6] 沈毅秀. 我国烧结砖应用工程的历史演变[J]. 砖瓦, 2011(11): 95-97. SHEN Yixiu. Historical evolution of sintered brick application engineering in China[J]. Brick and Tile, 2011(11):95-97. (in Chinese)
- [7] 沈毅秀,兰文江. 砖的历史文化点滴[J]. 砖瓦, 2004(2):47-48. SHEN Yixiu, LAN Wenjiang. The historical and cultural moments of bricks[J]. Brick and Tile, 2004(2):47-48. (in Chinese)
- [8] 李家治.“秦砖汉瓦”的历史作用[J]. 建筑材料学报, 1998, 1(1): 26-29. LI Jiazhi. Influence of Qing brick and Han tile in history[J]. Journal of Building Materials, 1998, 1(1):26-29. (in Chinese)
- [9] BECKHOFF B, KANNGIEBER B, LANGHOFF N, et al. Handbook of practical X-ray fluorescence analysis[M]. Berlin: Springer, 2006.
- [10] GLUSKER J P, TRUEBLOOD K N. Crystal structure analysis: A primer[M]. Oxford: Oxford University Press, 2010.

(下转第94页)