DOI: 10.13957/j.cnki.tcxb.2023.01.010

云南建水紫陶的泥料与保湿性能分析

王 坤[1]，何金林[2,3]，刘 静[1,2]，李 峰[1]，吴红梅[1]，纳勤骁[2,3]，
张 鹏[1,2]，单爱党[1,2]，高 濂[1,2]

(1. 上海交通大学 材料科学与工程学院，上海 200240；2. 上海交通大学建水紫陶联合研究中心，
云南 红河 654300；3. 上海交通大学云南(大理)研究院，云南 大理 671000)

摘 要：陶器烧制历史悠久，种类繁多，也是中国文化的重要组成部分。云南建水紫陶作为中国四大名陶之一，有着非常独特的工艺和艺术特色，在储茶和汽锅方面已经有着非常广泛的应用。但是，紫陶的不少特性仍然流于经验传说，缺乏分析数据的支持，其泥料与烧成体性能之间的关系也未有研究。有鉴于此，对建水紫陶在不同环境下的温度、湿度变化的反应情况进行系统研究；同时，通过 X 射线衍射、扫描电子显微镜、热重—示差扫描量热、压汞和粒度测量等方法对建水紫陶的原矿、泥料和成品的物相、粒度、烧成结构进行分析。结果表明，密封的建水紫陶罐内的温度和湿度会随着环境温度和湿度的变化而变化，其保湿性能介于宜兴紫砂与玻璃之间，适合长期保存发酵的茶类。结合陶器煅烧前后的化学组成和微观结构的对比分析，建水紫陶的保湿性能与其泥料的颗粒度以及烧成后的孔隙特点具有紧密关联，并对其相互关系进行了综合讨论。

关键词：建水紫陶；孔隙率；保湿性

中图分类号：TQ174.73 **文献标志码：**A **文章编号：**1000-2278(2023)01-0095-09

Raw Materials and Moisturizing Properties of Yunnan Jianshui Purple Pottery in China

WANG Kun [1], HE Jinlin [2,3], LIU Jing [1,2], LI Feng [1], WU Hongmei [1], NA Qinxiao [2,3], ZHANG Peng [1,2], SHAN Aidang [1,2], GAO Lian [1,2]

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Jiao Tong University Jianshui Purple Pottery Joint Research Center, Honghe 654300, Yunnan, China;
3. Shanghai Jiao Tong University Yunnan Dali Research Institute, Dali 671000, Yunnan, China)

Abstract: Pottery has a long history with various types of ware shapes, which constitutes an important part of Chinese culture. As one of the four famous types of pottery in China, Jianshui purple pottery has unique craftsmanship and artistic characteristics. Although purple pottery has already been widely used in tea storage and steam boilers, many characteristics of purple pottery are based on experience and legend, lacking the support of experience data. The relationship between the clay and the properties of the purple pottery is still unknown. Thus, the responses to temperature and humidity change under different environments were systematically studied. The raw materials, mud and finished products of Jianshui purple pottery, together with their phase, particle size and structure, were also studied by using XRD, SEM, TG-DSC and Mercury Porosimeter. It is found that Jianshui purple pottery's small clay particle size resulted in its low porosity of the finished product. As a result, it has a good moisturizing property, which meets the requirement of long term storage of the tea that requires post fermentation. The relationships among the clay particle size, composition and porosity of the finished product, as well as the humidity maintenance properties, are discussed.

Key words: Jianshui purple pottery; porosity; moisturizing property

收稿日期：2022–07–29。 **修订日期：**2022–09–14。
基金项目：国家自然科学基金(51772190, 51972210, 51779139)。
通信联系人：张 鹏(1976–)，男，博士，教授。

Received date: 2022–07–29. **Revised date:** 2022–09–14.
Correspondent author: ZHANG Peng (1976–), Male, Ph.D., Professor.
E-mail: pengzhang2010@sjtu.edu.cn

0 引 言

陶器烧制历史悠久，已有上万年的历史，是人类历史文化和科技发展的重要组成部分。我国陶器生产历史悠久、种类繁多，其中，江苏宜兴紫砂、重庆荣昌安陶、云南建水紫陶以及广西钦州坭兴陶,由于鲜明的文化特色以及悠久的历史，被称为中国四大名陶。云南建水紫陶产于中国云南省红河州建水县，至今已有 3500 年的历史，其名称来源于产地和颜色[1]。进入 21 世纪，建水的制陶产业进一步发展，现已成为非物质文化遗产[2]。建水紫陶品种丰富、器型精美，主要器具有茶壶、汽锅、花瓶和茶罐等，以阴刻阳填、无釉磨光为其显著工艺特点。建水紫陶在民间享有“花瓶装水不发臭，花盆栽花不烂根，茶壶泡茶味正香郁，餐具存肴隔夜不馊”的盛誉[3]。

建水紫陶的传统原料取自建水县碗窑村的五色土，矿石原料的主要成分为高岭土、石英和氧化铁等。矿石采回后，自然风干，经捣碎，按照粒度大小进行分级，再按制陶的要求把不同的矿石原料根据配比混合。混料完成后加水成浆并搅拌淘洗。淘洗数次后，得到漂浆后干燥成泥[4]。之后，将泥料拉坯成型，通过传统的阴刻阳填的装饰工艺，得到独特的工艺效果。建水陶的烧制温度一般在 1100 ℃ ~ 1180 ℃，分还原焰烧成和氧化焰烧成两种烧制方法。还原焰烧成是当窑内温度升至 900 ℃左右时，减少窑内的氧气，形成缺氧条件，该方法烧制的建水红色泥可呈现黑褐色，白泥则呈现青灰色。氧化焰烧成则是在烧制过程中，确保窑炉内一直有充足的氧气，该方法烧制的建水红泥呈现红色，白泥呈现象牙白[5]。

当前，建水紫陶行业仍然缺乏陶土以及紫陶本身特性的科学数据。为了提高紫陶生产的效率以及研究发展速度，亟需对紫陶的陶泥的化学成分以及物化特性进行分析，对于各种原料配比以及烧制工艺进行探索。为此，本文以建水紫陶作为研究对象，对紫陶原矿、泥料和成品样品进行系统表征，对紫陶罐进行了储茶实验，通过检测贮存过程中温湿度的变化来验证紫陶的性能并揭示其科学原理,进而为未来紫陶的发展提供依据。

1 实 验

1.1 实验原料

实验的原料包括建水原矿(建水县碗窑村)、建水红泥(建水县陶泥厂)、建水白泥(建水县陶泥厂)、建水紫陶罐若干(铭窑昌泰)、宜兴紫砂罐若干(宜兴市海有天文化艺术坊)、玻璃罐(佾美家居专营店)、普洱茶饼若干(每饼 357 g，普洱新华国茶有限公司)。

1.2 实验方法

建水紫陶的陶泥原料主要分白(WS)、青(CS)、黄(YS)、紫(PS)、红(RS)等五种黏土。对这五种黏土进行加水、过滤以及风干处理以清除掉杂质和沙子后，再按照不同比例进行混合搅拌，得到混合泥料。混合泥料大体上分为白泥(WM)和红泥(RM)两种。泥料拉坯成型，干燥并烧结后得到紫陶产品。制备工艺的基本流程见图 1。

将建水陶泥厂的原料矿石以及各种泥料干燥处理后，磨成粉体进行 XRD 的测试。实验选取不同粒度的智文白泥(ZWWM)、柴泥(ZWWM)和德和白泥(DHWM)、柴泥(DHCM)。未烧的泥料命名为 ZTWP(白泥为主)和 ZTRP(红泥为主)。在泥料烧结过程中，均在氧气充足的条件下。其中，白泥的烧结温度达到了 1230 ℃,红泥的烧结温度最高为 1165 ℃，紫砂的最高温度则为 1350 ℃。对烧结后的样品依次使用去离子水、乙醇、丙酮进行清洗后通过 SEM、压汞仪等进行表征。烧结后得到的红泥样品命名为 ZTRC；白泥样品命名为 ZTWC；紫砂样品命名为 ZSC。

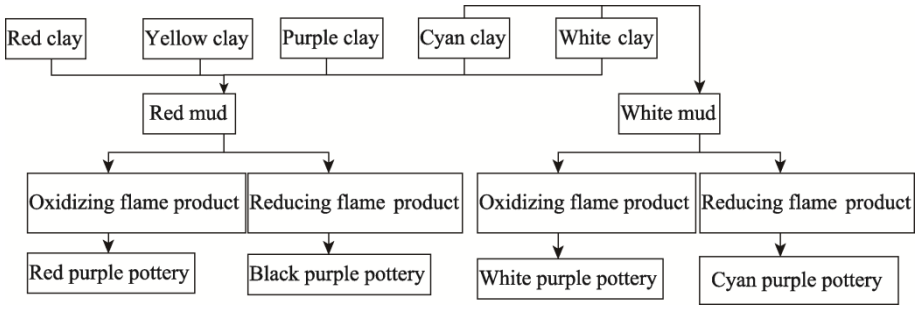


图 1 建水紫陶的制备方式

Fig. 1 Preparation method of Jianshui purple pottery

储茶的性能测试在成都、昆明、上海的实验室进行，分别放置 4 个罐子(白泥紫陶罐 1 个、红泥紫陶罐 1 个、紫砂罐 1 个、玻璃罐 1 个)，在每个罐子内各放置一个温、湿度传感器，并在罐子外也放置一个温、湿度传感器(深圳云塔物联技术有限公司，型号 NB-TH03)。每个罐子放入若干饼普洱茶，记录 7 天内的数据(所有罐子在测试时均保持密封条件)。

1.3　表征和测试

本研究对建水紫陶的矿物原料、泥料和成品进行了取样与制备，并进行 X 射线衍射实验；扫描范围为 10 °~ 90 °。使用生物型扫描电镜对紫陶、紫砂成品进行形貌分析，使用压汞仪对紫陶、紫砂成品进行孔结构分析；采用 TG-DSC 对泥料进行热测试，测试氛围为空气，升温速率为 10 °·min^{-1}；采用激光粒度仪对泥料进行粒径分析。

2　结果与讨论

2.1　陶土的成分晶相分析

图 2 为样品的 XRD 分析结果。从图 2(a)可知，青土、黄土、白土以及五色土的主要晶相为埃洛石，埃洛石属于硅铝酸盐的一种。除了硅铝酸盐外，样品中还存在一些游离的二氧化硅。从图 2(b)和图 2(c)中可知，紫土和红土的主要晶相为钙铁榴石等硅酸盐，表明紫土和红土含有大量的 Fe 元素，这也是它们显色的原因。将不同的黏土按照比例混合处理后得到白泥和红泥。

由图 2(d)、2(e)可知，白泥的主要晶相为埃洛石以及游离的二氧化硅，而红泥由于混入了紫土和红土等原料，除了这两种晶相外，还有很少量的氧化铁相，这是它呈现红色的原因。从图 2(f)和 2(g)可以看出，紫陶与紫砂烧结后均有硅线石以及游离的二氧化硅的晶相。此外，由于它们由红泥烧制而得，还有氧化铁晶相。而紫砂与紫陶相比，多了方石英晶相。而石英晶粒会在 573 ℃时会发生 α-β 相变[6]。在石英相变的过程中，矿物结构发生变化，由六方晶系转变为三方晶系，石英的应力、应变能以及热膨胀系数均会发生变化，造成形貌与结构的变化。

建水白土、青土、建水红泥以及宜兴紫砂泥的元素成分测试结果列于表 1 [7–8]。由表 1 可得：SiO_2 和 Al_2O_3 是四个样品中最主要的成分，SiO_2 的含量均超过了 60 wt.%，Al_2O_3 的含量均超过了 14 wt.%，其中，宜兴紫砂泥中的 Al_2O_3 含量大于建水样品。四个样品中建水红泥和宜兴紫砂泥中的 Fe_2O_3 的含量超过 7 wt.%。这也与 XRD 结果中赤铁矿这一相的出现相对应。此外，在 K、Na、P、Mn 和 Ti 等微量元素中，紫砂泥的 Na 和 P 的元素含量较高，而建水样品的 K 和 Ti 的含量较高。

图 3 为陶泥(以白泥为代表)的高精度热分析(TG-DSC)测试曲线图。从曲线中可以看出，样品的失重主要发生在两个温度区间，分别位于 100 ℃左右与 400℃ ~ 800℃之间。其中，100 ℃左右的失重峰对应泥料本身自由水的失去，这一部分发生物理变化，对应图中 101 ℃左右的吸热峰。而 400 ℃ ~ 800 ℃之间的失重峰则比较复杂，对应在 DSC 曲线中则有 4 个特征峰。其中，在 500 ℃左右发生了高岭石向偏高岭石的相变，失去羟基，导致失重[9]，对应图中 485 ℃的特征吸热峰。而 α-β 相变发生在 573 ℃，对应图中 582 ℃的特征吸热峰，这一相变并不会产生重量变化。700 ℃左右的两个吸热峰对应的是泥料中有机杂质的氧化燃烧，导致失重。此外，超过 800 ℃后，DSC 曲线中还有两个放热峰：一个在 991 ℃，这一阶段为氧化铝的析出；另一个在 1171 ℃，此阶段主要的晶型转变为莫来石相的产生[9]。

2.2　坯体与陶体的结构分析

图 4 为各样品的 SEM 图，表 2 和图 5 为样品的激光粒度仪测试结果。由表 2 可知，宜兴紫砂

表 1　建水红泥、白土、青土以及宜兴紫砂泥的化学成分的 XRF 测试结果(wt.%)[7–8]

Tab. 1 XRF results of Jianshui red mud, white clay, green clay and Yixing-Zisha mud (wt.%) [7–8]

Sample	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	MnO	LOI	Total
JSR	63.45	17.59	7.88	0.43	0.77	2.64	0.08	1.02	0.07	0.04	5.76	100
JSW	75.44	14.59	1.26	0.14	0.57	2.41	0.07	1.26	0.03	0.02	4.21	100
JSC	74.6	15.66	0.94	0.08	0.50	1.79	0.07	1.41	0.03	0.01	4.91	100
ZS	61.62	21.07	7.22	0.46	0.20	0.35	1.66	0.02	0.87	0.06	5.98	100

JSR：建水红泥　JSW：建水白土　JSC：建水青土　ZS：宜兴紫砂泥　LOI：烧矢量

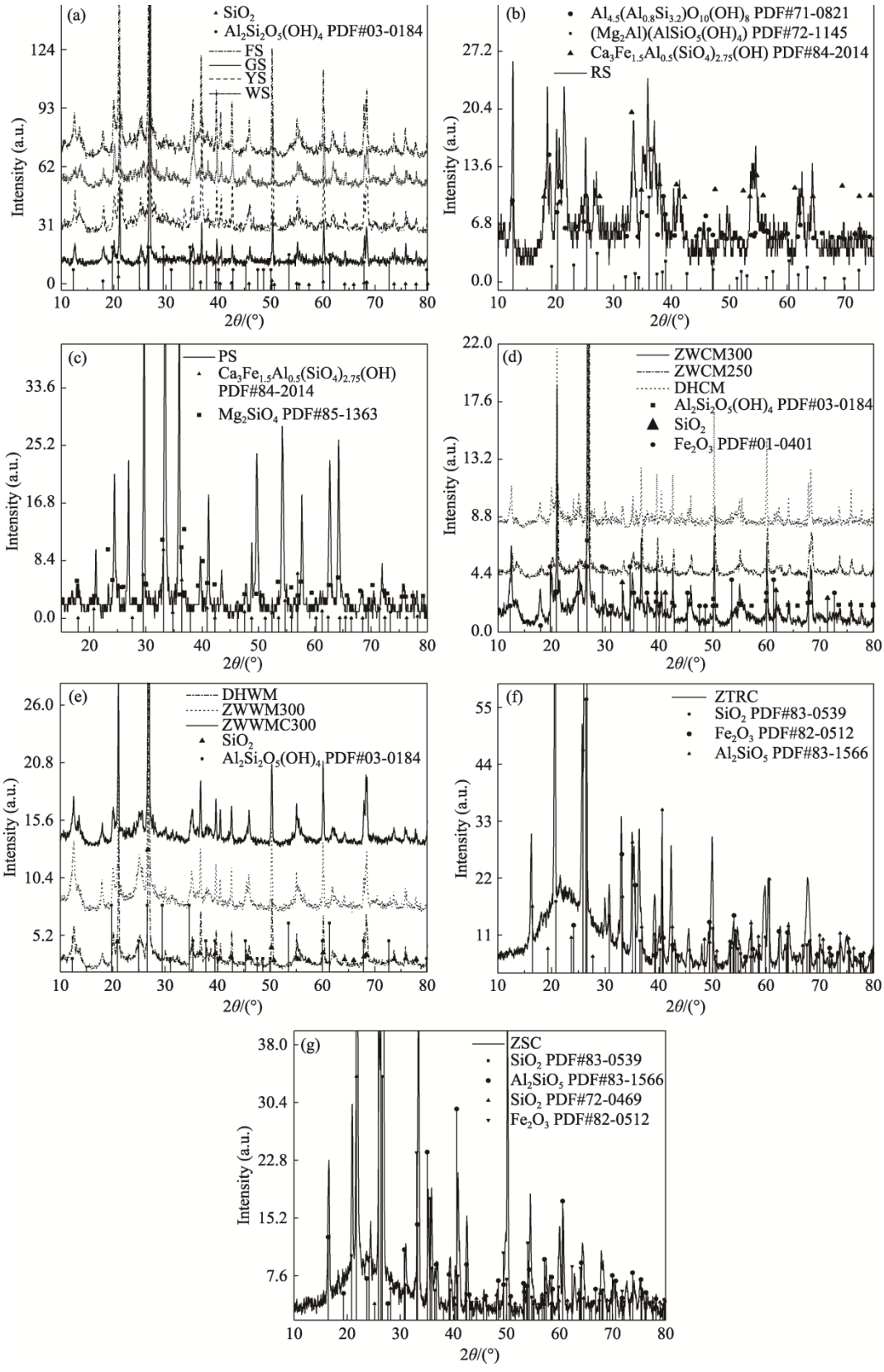


图 2 (a) 建水青土、白土、黄土和五色土；(b) 建水红土；(c) 建水紫土；(d) 建水柴泥；(e) 建水白泥；(f) 建水红泥紫陶煅烧后；(g) 宜兴紫砂煅烧后的 XRD 图

Fig. 2 XRD patterns of different samples: (a) Jianshui cyan clay, white clay, yellow clay and five-colored soil, (b) Jianshui red clay, (c) Jianshui purple clay, (d) Jianshui firewood mud, (e) Jianshui white mud, (f) Jianshui purple pottery and (g) Yixing-Zisha pottery

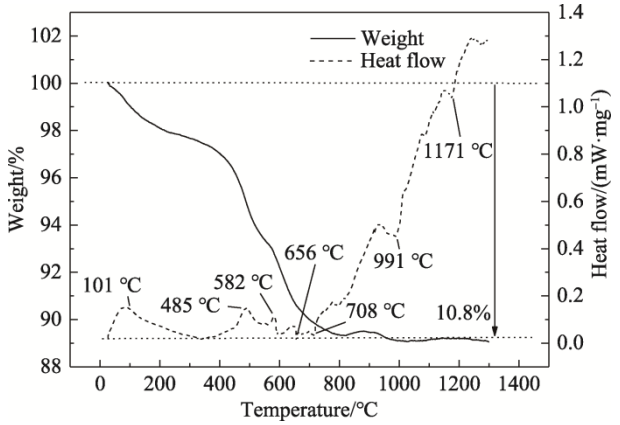


图 3　白泥(ZTWP)的 TG-DSC 曲线(黑线为 TG 曲线，红线是 DSC 曲线)

Fig. 3 TG-DSC curves of the Jianshui white mixture (black line represents TG and red line represents DSC)

表 2　各种泥料的粒径分析结果

Tab. 2 Particle size of different mud

Sample	Average particle size/μm	Median particle size/μm
ZWWM	7.102	4.404
ZWCM	8.081	4.595
DHWM	8.892	4.906
DHCM	8.635	4.485
ZSM	21.050	10.460

泥的颗粒的体积平均粒径达到了 21 μm，而建水泥颗粒的体积平均粒径在 7 μm ~ 8 μm 之间。由图 5 可知，建水泥料的粒径分布较小。原料的颗粒大小会对烧结产生影响，造成不同的孔径与孔隙率。

从图 4(a) ~ (b)分析可得，原料主要为颗粒状，也有部分为片状，边缘呈不规则形状。孔隙和气泡较小但分布较多。这可能是由于红泥为不同的原料土混合制成，通过搅拌，其内部变得比较紧实。

坯体煅烧后，表面变得更加紧实致密，孔和气泡也变得更大，但是也更加稀疏，如图 4(c) ~ (h)所示。各种矿物烧结在一起，尽管不能明确地辨别出各种晶相，但可以看出不同的晶相混在一起。这些气孔的产生是由于在烧结过程中原料中的有机物燃烧生成的气体并没有被排出，也可能是原料在煅烧过程中发生了分解。原料在烧结中会形成新的晶相(如 573 ℃下，石英晶粒发生 α-β 相变)，α 石英晶粒转为 β 晶粒的过程中，体积增大 2%，由相变造成的体积变化而产生的应变能将在周围的基体中产生应力，在冷却过程中，如果冷却速率过快，石英晶粒发生收缩，从而产生一些很小的裂缝[10−11]。从图 4(c) ~ (f)中可以看出，建水红泥烧制成品的孔隙率要比白泥成品的孔隙率低很多。这一方面是因为白泥的烧结温度高于红泥，使得固结过程变快，气体难以排出，导致孔隙率增大[12]；另一方面，是由于红泥中添加了更多的不同原料，经过超细研磨后，粉体的粒度小，颗粒的堆积紧密程度不断增加，导致孔隙率减小。而且，红泥中的铁元素在烧结过程中成为铁氧化物，铁氧化物的出现导致致密度增加[8]。

建水红泥、白泥制成的成品以及宜兴紫砂泥制成的成品的孔隙率和孔径的分析测试结果见表 3 和图 6。与 SEM 的结果相符合，建水红泥成品的孔隙率最低，在 1%左右；其次为宜兴紫砂，孔隙率为 6.7%；而建水白泥成品的孔隙率最高，为 8.8%，略高于紫砂。这是由于烧结温度的不同以及烧结原料的区别所致。紫砂与红泥成品均含有 5 wt.%以上的 Fe_2O_3 使得它们孔隙率低于白泥成品。此外，宜兴紫砂的最高烧结温度为 1350 ℃，高于建水红泥的烧结温度 1165 ℃，使得紫砂的孔隙率高于紫陶。

分析图 6 中的孔径分布可得，建水红泥成品的孔径最小，建水白泥成品次之，紫砂成品的孔径最大。从图 6 可得，红泥成品的孔容极不明显，导致它的孔隙率很低，因此它的孔容也没有明显的分布，很小的孔容就会改变整体的分布。白泥成品的孔径主要分布在 0.1 μm ~ 0.5 μm 之间。而紫砂孔径比白泥成品的大，分布也更不均匀，主要分布在 0.1 μm ~ 10.0 μm 之间。王连星等[13]认为平均孔径随着原料粉体粒径的减小而减小。随着原料粉体的细化，烧结时小颗粒所占比例增大，因此，由小颗粒决定的小孔径所占的百分比增大，导致平均孔径减小。从激光粒度仪的测试结果中(见表 2)明显看出，宜兴紫砂泥的平均粒径大于建水泥料的平均粒径。此外，小颗粒较多时，比表面积较大，烧结时的扩散界面增大，使得扩散作用加强，小颗粒容易扩散至大颗粒间隙，将较大的气孔分成几个较小的气孔[14]。

2.3　温度湿度实验结果

图 7(a) ~ (b)所示为昆明实验室内紫陶罐、紫砂罐和玻璃罐的温湿度随室内温湿度变化关系(在该实验室进行实验时一直使用加湿器)。从图中可以看出，由于加湿器的原因，室内湿度基本保持在一个较高的水平(62% ~ 93%)，相对于外界的高湿度，罐内湿度比较恒定。紫陶罐和玻璃罐

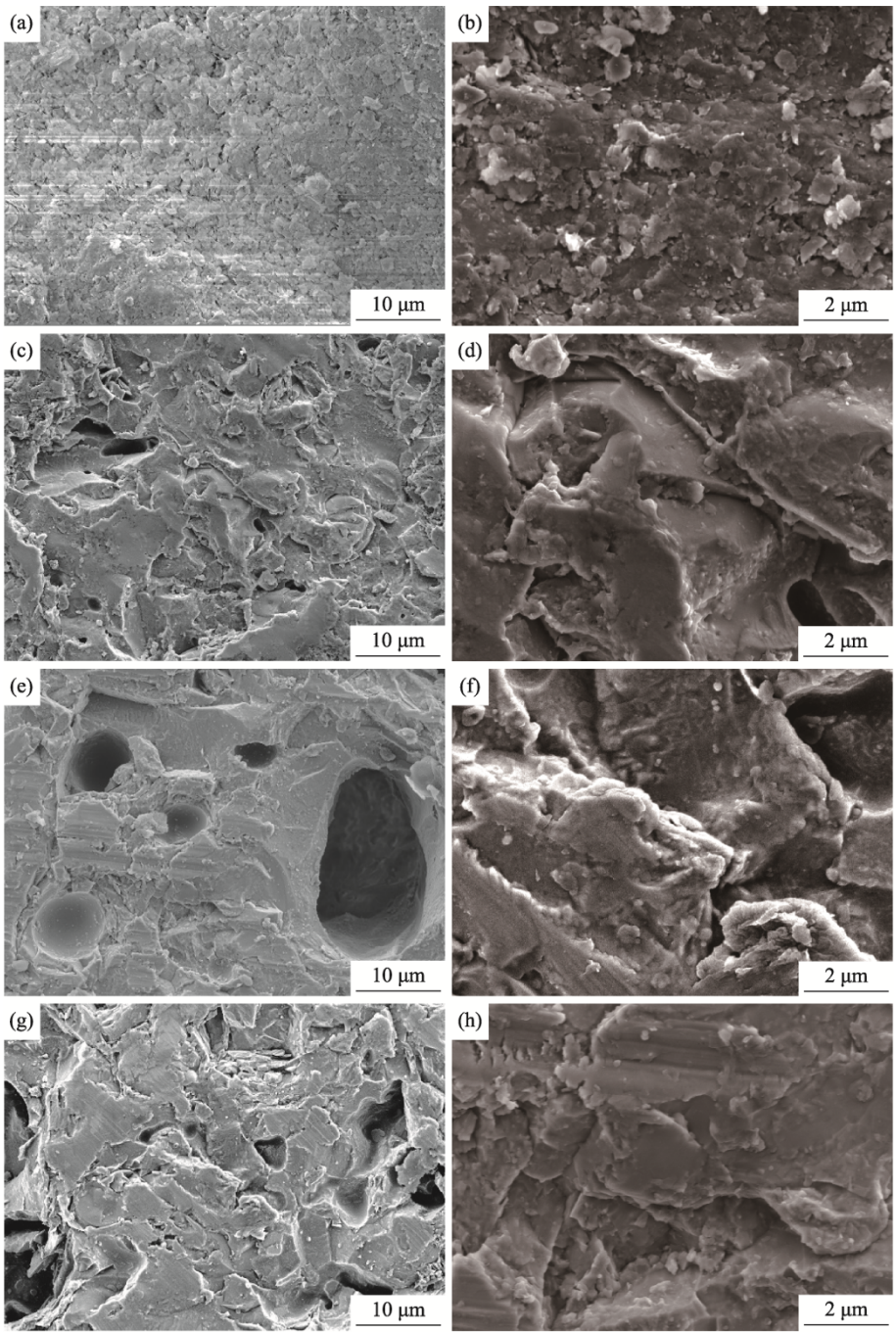


图 4 (a)、(b)建水红泥紫陶生坯；(c)、(d)建水红泥紫陶；(e)、(f)建水白泥紫陶；(g)、(h)宜兴紫砂的 SEM 图
Fig. 4 SEM images of different samples: (a), (b) Jianshui purple pottery green body, (c), (d) Jianshui purple pottery, (e), (f) Jianshui white pottery and (g), (h) Yixing-Zisha

内的湿度处在最低水平(55% ~ 59%)，紫砂罐高于它们却低于室内湿度(62% ~ 70%)。紫陶罐内的湿度的起伏变化的幅度接近玻璃，小于紫砂罐。从图 7(b)温度变化曲线可以看出，所有的罐子与室内温度变化基本保持一致，均保持在 17.5 ℃ ~ 20.5 ℃内。这些罐子的导热性能均不差，并没有保温性。由于昆明实验室内的温度变化不大，为了进行更深的了解，在一些环境变化较大的实验室内也进行了实验。

表 3 样品的压汞测试结果：孔隙率与中间孔径
Tab. 3 Porosity and median pore diameter according to mercury porosimetry:

Sample	ZTRC	ZTWC	ZS
P/%	1.2	8.8	6.7
D_v/nm	71.6	269.7	737.0

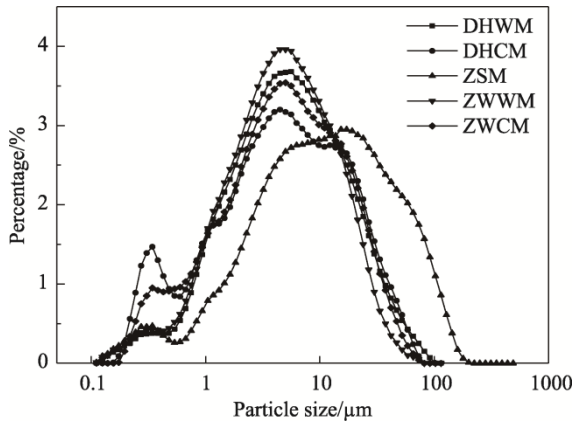


图 5　各种泥料的粒径分布曲线

Fig. 5 Particle size distribution curves of different mud

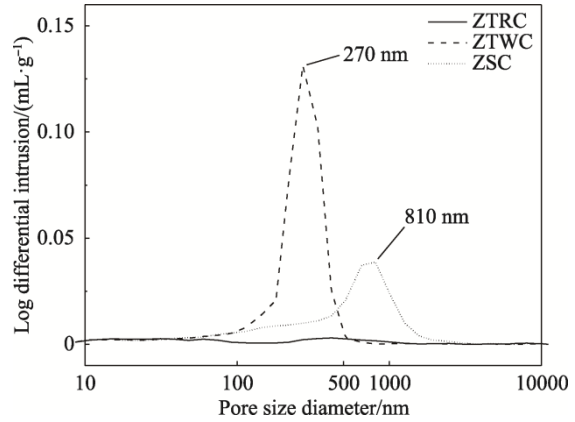


图 6　压汞测试孔径分布图

Fig. 6 Pore size distributions derived from the mercury porosimetry measurement

图 7(c)～(d)所示为成都实验室内紫陶罐、紫砂罐和玻璃罐的温湿度随室内温湿度变化，在该实验室内并没有使用加湿器。相比于昆明实验室，成都实验室内的平均温度低 8 ℃。从图 7(c)可以看出，尽管没有加湿器，成都的湿度最高仍能达到 80%，但最低时为 35%，比昆明实验室要低很多。相对于室内湿度的起伏，所有罐内湿度起伏均比外界小。其中，紫陶罐起伏为 60%～66%，玻璃罐起伏也为 60%～66%，没有很大的湿度变化。而紫砂罐起伏则不同于昆明实验室的微弱起伏，湿度在 45%～74%之间变化。这可能是由于成都实验室内的湿度变化比昆明实验室内更大，因此，外界的较大的湿度变化导致紫砂罐的湿度变化。由此可以看出，在外界湿度变化较大的环境下，三种罐子均有一定的保湿性，其中，紫陶罐的湿度变化大于玻璃罐，但是远小于紫砂罐。从图 7(d)温度变化曲线可得，所有罐内的温度均随外界温度变化而变化，变化范围为 6 ℃～14 ℃，并没有保温性。这说明在低温环境下，所有罐子均不具有保温性。

图 7(e)～(f)所示为上海实验室内紫陶罐、紫砂罐和玻璃罐的温湿度随室内温湿度变化，在该实验室内同样没有使用加湿器。相比于昆明实验室，上海实验室内的温湿度变化更大，实验周期内温差最大为 7 ℃，湿度差为 48%。与成都实验室相比，上海实验室的湿度则要更低一点，但温度要更高。从图 7(e)可以看出由于没有加湿器，实验室内湿度变化较大，最低时为 17%，最高时为 65%，这是由于天气的变化所致。相对于室内湿度的起伏，所有罐内湿度起伏很小，其中，红色紫陶罐起伏为 41.5%～44%，白色紫陶罐在 42%～44%内变化，玻璃罐起伏为 40%～43%，而紫砂罐起伏为 37%～45%。可以看出，在较低的湿度环境下，三种罐子均有较好的保湿性，紫砂罐随外界的变化幅度相对更大一些。从图 7(f)温度变化曲线可得，所有罐内的温度均随外界温度变化而变化，变化范围为 15 ℃～21 ℃，并没有保温性。

通过不同环境下的温湿度测量对比可以看出，紫陶、紫砂、玻璃罐内湿度的保持范围与置入时的初始湿度有关。湿度的变化会随着外界的湿度的变化出现起伏，其中，紫砂的变化幅度相对较大。紫陶罐的湿度变化介于玻璃罐与紫砂罐之间，与玻璃罐更加相近。三者的保湿性与温度无明显的关系。因此，从保湿的角度来看，紫陶罐介于紫砂罐与玻璃罐之间。而无论是低温还是高温环境下，紫陶罐、紫砂罐以及玻璃罐均没有保温性能，这可能与陶瓷以及玻璃材料本身较好的热导性能有关。

3　应用分析

由于使用原料的不同，建水白泥和红泥的成分差别主要是 Fe 元素的含量。因此，从其 XRD 图谱来看，红泥成品相对于白泥成品，增加了 Fe_2O_3 相。在烧结过程中，黏土矿物烧结在一起，产生了许多细小的气孔。一方面由于烧制过程中黏土内部的气体或者有机杂质氧化产生的气体无法排出从而形成气孔；另一方面，一些原料在高温下融化，烧结在一起，也会形成孔隙。从成品的 SEM 图中可以观察到这些孔洞。而红泥相对于白泥，Fe 存在于硅酸盐基质中，并以铁氧化物的形式存在[15]，在高温烧结时，泥土中的少量的

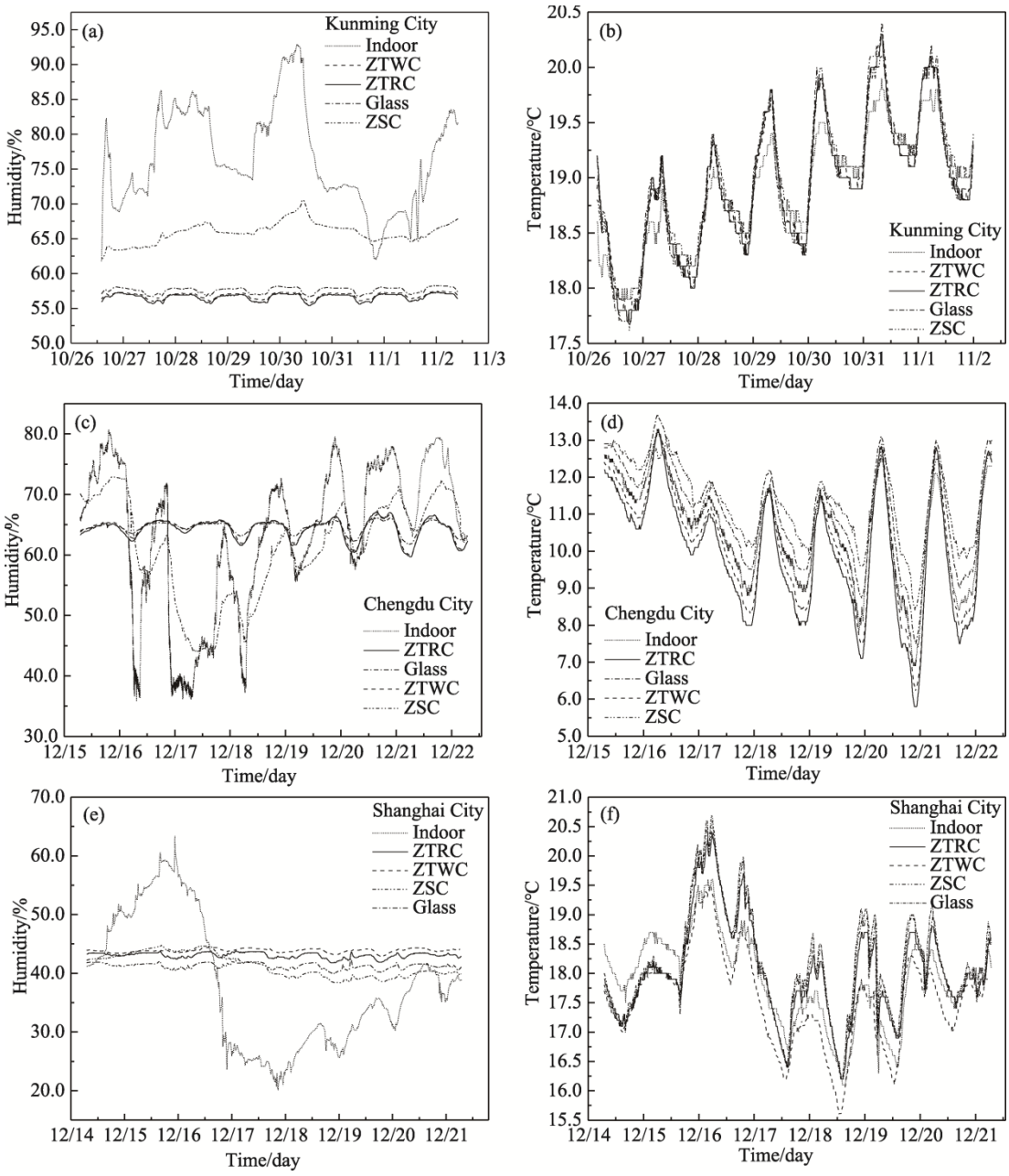


图 7　储茶罐内温度和湿度随外界环境变化曲线图：(a)、(b)**昆明市；**(c)、(d)**成都市；**(e)、(f)**上海市**

Fig. 7 Humidity and temperature curves of pottery pot in different laboratories: (a), (b) Kunming, (c), (d) Chengdu and (e), (f) Shanghai

K_2O、Na_2O 可以起到助熔剂的作用，使得铁氧化物熔化并形成液相。因为液相扩散速率较高，从而使得陶器更加致密，降低孔隙率，同时，致密度的增加也会降低陶器内部的孔径大小。

在成分相同时，陶器孔隙率的大小和原料颗粒的堆积状态以及硅土内部的原始孔洞有关。原料颗粒的堆积状态则和颗粒大小的整体分布有关。吴道政等[16]通过研究表明，在制备陶瓷的过程中，原料粒度分布越窄，烧成后的多孔陶瓷孔径越均匀，孔隙率越高。而经过对红泥紫陶与紫砂的泥料的元素分析(见表 1)以及粒径分布(见表 2)的分析对比可以看出来，紫砂与紫陶的主要化学成分比较接近，区别在于紫砂泥料的颗粒明显大于紫陶的泥料。紫陶的泥料颗粒平均黏度为 7 μm ~ 8 μm，而紫砂的泥料的颗粒平均黏度约 21 μm，这与早期报道的紫砂的颗粒的尺寸主要分布在 10 μm ~ 50 μm 这一结论相符[17]。紫砂泥料较大的颗粒使其烧成以后的坯体内的孔径更大，孔径分布也更宽，在 0.1 μm ~ 10.0 μm 都有分布，峰值位于 0.8 μm，均大于烧成的紫陶的孔径，具有很好的透气性[18]。紫陶陶泥颗粒整体较细、烧成后的孔径也更小、孔径分布更窄，其对水蒸气

的“呼吸”性能介于不透气的玻璃以及大孔的紫砂罐之间。紫陶的这种孔隙特征，使其在储存茶叶方面具有不同于玻璃罐以及紫砂罐的特性，其湿度基本都保持在 ~ 60%或者以下。据国标《GB/T 30375-2013》以及相关报道[19]，普洱茶适合存储于湿度 70%以下的避光环境且需适当的换气，并且普洱茶需要长期存放，对湿度以及透气性有特殊的要求，从这个角度而言，建水紫陶很适合用于保存普洱茶。紫砂与紫陶在颗粒粗细上的不同也各自造就了不同的表观和特色，比如紫砂的粗细颗粒俱存使其呈现出表面略有凹凸的特殊质感以及更大的吸水率，而紫陶的颗粒细腻使其可以通过表面的磨光形成“无釉磨光”的特殊效果。

白泥紫陶的孔隙大于红泥紫陶，但是其保湿性能却与红泥接近。由于白泥的氧化铁含量远低于红泥，其烧制过后的孔隙大于红泥是比较容易理解的。其保湿性能上的接近说明白泥虽然孔隙率远大于红泥，但是由于厚度较厚，其整体的通孔最后表现与红泥很接近。

4　结　论

本研究通过多种表征方式对建水白泥、红泥及其成品以及宜兴紫砂的化学组成以及微观结构进行测定，并与紫陶罐、紫砂罐、玻璃罐随外界温、湿度变化的实验相对照。可以看出，由于红泥中含铁量较高，其高温下的液相烧结导致其烧结体更加致密，孔隙率也更低。建水紫陶的泥料颗粒尺寸较细、分布均匀，成品里面相对孔隙较小，具有良好的湿度保持性能，适合于包括普洱茶在内的茶叶的保存。

参考文献：

[1] 管志荣. 建水紫陶、钦州坭兴陶及荣昌安陶等名陶矿物原料特征研究[D]. 成都理工大学, 2018.

[2] 陈春芬. 建水紫陶发展阶段性特征探析[J]. 文化学刊, 2016(2): 179–182.
CHEN C F. Culture Journal, 2016(2): 179–182.

[3] 郑伟林. 建水紫陶: 中国陶艺奇葩[J]. 红河学院学报, 2015, 13(6): 13–15.
ZHENG W L, Journal of Honghe University, 2015, 13(6): 13–15.

[4] 俞何衍. 云南建水紫陶茶具设计[D]. 昆明理工大学, 2014.

[5] 吴白雨. 建水陶的制作技艺与工艺特色[J]. 中国陶瓷, 2011, 47(3): 74–76, 64.
WU B Y. China Ceramics, 2011, 47(3): 74–76, 64.

[6] VAN GROOS A F K, HEEGE J T. The high-low quartz transition up to 10 kilobars pressure [J]. The Journal of Geology, 1973, 81(6): 717–724.

[7] YANG C R, KONG J Y, YANG J J, et al. The study of crystal-phase composition and pore structure for Dicaoqing-Zisha compared with porcelain and pottery [J]. Ceramics International, 2021, 47(8): 10650–10657.

[8] LIU C, XIE H, NIE L, et al. A study of the composition and dissolution of Jianshui purple pottery in Yunnan, China [J]. Crystals, 2021, 11(9): 1034.

[9] 洪秀成, 邢文忠, 章林, 等. 利用非等温法研究高岭土的热分解动力学[J]. 玻璃纤维, 2020(5): 17–20.
HONG X C, XING W Z, ZHANG L, et al. Fiber Glass, 2020(5): 17–20.

[10] WANG H F, BONNER B P, CARLSON S R, et al. Thermal stress cracking in granite [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1989, 94(B2): 1745–1758.

[11] THÉR R. Identification of pottery firing structures using the thermal characteristics of firing [J]. Archaeometry, 2014, 56(51): 78–99.

[12] 吉利明, 邱军利, 夏燕青, 等. 常见黏土矿物电镜扫描微孔隙特征与甲烷吸附性[J]. 石油学报, 2012, 33(2): 249–256.
JI L M, QIU J L, XIA Y Q, et al. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 249–256.

[13] 王连星, 宁青菊, 姚治才. 多孔陶瓷材料[J]. 硅酸盐通报, 1998, 17(1): 41–45.
WANG L X, NING Q J, YAO Z C. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 1998, 17(1): 41–45.

[14] 周健儿, 张小珍, 李家科, 等. 透气过滤用堇青石蜂窝陶瓷材料的研究[J]. 中国陶瓷, 2006, 42(2): 3–7.
ZHOU J E, ZHANG X Z, LI J K, et al. China Ceramics, 2006, 42(2): 3–7.

[15] MATSUNAGA M, NAKAI I. A study of the firing technique of pottery from Kaman-Kalehöyük, Turkey, by synchrotron radiation-induced fluorescence X-Ray absorption near-edge structure (xanes) analysis [J]. Archaeometry, 2004, 46(1): 103–114.

[16] 吴道政, 周竹发, 王卫君, 等. 微米级多孔 Al_2O_3 陶瓷的研制[J]. 江苏陶瓷, 1995(4): 11–14.
WU D Z, ZHOU Z F, WANG W J, et al. Jiangsu Ceramics, 1995(4): 11–14.

[17] 贺盘发. 宜兴紫砂泥综述[J]. 江苏陶瓷, 1988(1): 30–38.
HE P F. Jiangsu Ceramics, 1988(1): 30–38.

[18] 李珊. 宜兴紫砂矿物原料研究[D]. 成都理工大学, 2018.

[19] 孙雪梅, 邓秀娟, 周红杰, 等. 普洱茶仓储影响因子与品质变化研究进展[J]. 茶叶通讯, 2019, 46(2): 135–140.
SUN X M, DENG X J, ZHOU H J, et al. Journal of Tea Communication, 2019, 46(2): 135–140.

(编辑　王三海)