新石器时代红衣陶恢复及红衣陶板包装材料应用研究

李庆德[1]，桑同慧[2]，程万里[3]
（1.佛山科学技术学院，佛山 528000；2.马来西亚吉兰丹大学，万捷 16100；
3.东北林业大学，哈尔滨 150040）

摘要：目的 通过对嫩江流域出土的新石器时代末期红衣陶片进行表征等实验分析，得到陶片的成分与质量配比。**方法** 利用 SEM、能谱等实验仪器分别对陶片进行分析。按照已经得到的成分与质量配比，制备出了新的陶土。把陶土和泥土拉模成型，在 800 ℃电炉高温环境下恢复烧制红衣陶器。**结论** 对陶器进行了红衣陶形貌表征及其机理分析，开展了红衣陶三足陶壶的快速分析实验与白度检测实验，进行了红衣陶三足陶壶的 SEM 分析和 XRD 的检测分析，比较分析了红衣陶板与瓦楞纸板的力学性能，分析了环保包装材料的选择与应用因素。验证了其与出土陶片的相符性。同时将制得的红衣陶板与瓦楞纸板进行了力学性能等方面的比较分析，得出红衣陶板完全具备作为新型绿色环保包装材料的性能。

关键词：红衣陶片；烧制；力学性能；环保包装材料
中图分类号：TB472　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2021)16-0042-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.16.007

The Restoration of Red Pottery from the Neolithic Age and the Application of Red Pottery Boards as Packaging Materials

LI Qing-de[1], *SANG Tong-hui*[2], *CHENG Wan-li*[3]
(1.Foshan University, Foshan 528000, China; 2.University Malaysia Kelantan, Bachok 16100, Malaysia;
3.Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

ABSTRACT: The composition and mass ratio of the red pottery fragment from the Neolithic Age unearthed in the Nenjiang River basin were obtained through characterization and other experimental analysis by means of laboratory apparatuses such as SEM and energy dispersive spectrometer. The new clay was prepared according to the obtained composition and mass ratio, and then molded with soil. The mold was fired in the electric furnace at the high temperature of 800 ℃ for a new piece of red pottery. The following study was conducted: the red pottery morphology characterization and mechanism analysis, the rapid analysis experiment, whiteness detection experiment, as well as SEM and XRD analysis of the three-legged red pottery pot, the comparative analysis of the mechanical properties of both the red pottery board and the corrugated cardboard, and the analysis of the selection and application factors of environment-friendly packaging materials. The new red pottery clay is verified to be consistent with the unearthed pottery fragment. The comparative analysis of the mechanical properties of both the red pottery board and the corrugated cardboard shows that the red pottery board is fully capable of being a new green packaging material.

KEY WORDS: red pottery fragment; fire; mechanical properties; environment-friendly packaging material

红衣陶是新石器时代出现的一种器表呈红色的陶器，是中国最早的陶器品种之一。红衣陶在新石器时代的各种文化中最为普遍[1-2]。陶土是一种很好的环保型材料[3-4]，由于黏土里含有 Fe 的成分，焙烧时

收稿日期：2021-05-16
基金项目：佛山科学技术学院实验室开放创新基金一般项目“高等教育包装实验室体制改革和创新创业实践研究”
作者简介：李庆德（1977—），男，黑龙江人，博士，佛山科学技术学院讲师，主要研究方向为现代设计与材料科学。
通信作者：程万里（1965—），男，四川人，博士，东北林业大学教授、博士生导师，主要研究方向为材料科学及其研发。

氧化成 Fe_2O_3，陶器就呈现出土红、砖红或红褐色，故此得名红衣陶[5]。比较相关的历史资料得出，我国北方的嫩江流域，以及黑龙江省齐齐哈尔市境内被挖掘的青铜时代至早期铁器时代的墓葬超过 40 个[6]。北方嫩江平原由河水长期冲刷而成，泥土硬度低，水系丰富，是种植作物和捕鱼打猎的理想场所，孕育的陶文化也具有悠久的传统文化艺术魅力[7-8]。因此在许多文化遗址里都发现了红衣陶。红衣陶的发现对中国陶历史的研究具有巨大的积极意义，有必要对红衣陶艺术材料进行考证、再现、制备及应用。

一些学者提出由红衣陶制备的陶板是很好的绿色包装材料，也是强度较好的可降解生物性复合材料[9]。陶板不仅降低了材料对环境危害的程度，而且发挥了材料的可回收性[10]。由红衣陶土制成的陶板，可以被应用于建筑、装饰、现代艺术和产品包装等各个领域，例如古时候的人们常用陶器盛酒，陶器也成为了日常生活器皿。在选择包装的外包装材料时，从可持续应用层面出发，红衣陶板有望在更高标准上契合使用标准，最大程度降低材料污染，减少材料损耗，使自然生态和社会生态均得到保护，使包装材料向循环可再生型转化。近年来，出现了聚合物—陶土纳米复合材料，引起了工业界和学术界的极大兴趣[11-13]。通过氧化剂与陶土的复合反应，制备出复合材料，如以$(NH_4)_2S_2O_8$为氧化剂，$C_6H_5NH_2\cdot HCl$ 固相聚合，制备出聚苯胺/蒙脱土复合材料等。这些反应均说明，在添加了一定量的陶土条件下，材料性能常常表现出比原始的纯聚合物或常规复合材料更引人注目的改善与提升[14-15]。

红衣陶是嫩江流域出土的新石器时代末期的重要文物，对红衣陶的考证与再现具有重要的价值。通过对红衣陶配方的研究，对红衣陶片实验样品进行成分分析（白度检测、XRD 衍射实验），力求寻找出红衣陶的大致配方，并进行红衣陶样品的烧制。最后与实物样品进行比较，确定最终方案。红衣陶的性能主要取决于 Fe_2O_3 的含量。在本研究工作中，主要利用扫描电子显微镜（Scanning Electronic Microscopy，简称 SEM）及能谱分析，获得红衣陶片的成分与配比，并进行形貌和结构等表征及其机理分析。然后制备出红衣陶，并进行材料性能研究。

1　实验设计

1.1　实验原料

1）红衣陶土：通过表征嫩江流域出土的新石器时代末期红衣陶片获得成分比例，然后配制出红衣陶土。

2）瓦楞纸板：样品 1 为双瓦楞纸板，厚度为 6.82 mm，克重为 1 100 g/m^2，型号为 D-2.2，瓦楞纸板纸箱的外观尺寸为 500 mm×330 mm×300 mm，折叠形成包装的质量为 18 kg。

3）红衣陶板：样品 2 为自制红衣陶板，厚度约为 6 mm，克重为 7 195 g/m^2。

1.2　实验仪器

采用 6 种实验仪器：（1）SSX-1600 型高温箱式炉；（2）GKF 型非金属材料化学成分快速分析仪；（3）ADCI 型全自动白度仪；（4）RGT-20A 电子万能力学试验机；（5）YQ-2B-1 型电动粉碎机；（6）YDW/YAW 型压力测试机。

1.3　实验方法

1）红衣陶恢复：对嫩江流域出土的新石器时代末期红衣陶片，通过 SEM、能谱表征及其成分分析得出陶片成分质量比。根据表征结果配制出红衣陶土，经加水、搅拌、浸泡 48 h，在真空练泥机中炼制 8 遍后，在水池中进行省泥，一周后备用。然后采用拉坯等方法，将陶泥拉制成红衣陶器，并于暗房中阴干 48 h，再放入炉窑中烧制。启动电炉，采取间歇式升温方法，每升温 200 ℃，恒温 30 min，近 12 h 电炉焙烧后达到 800 ℃，关闭电炉，等温度降到室温后，开炉取出成品。

2）微观形貌分析：借助 SEM 观察样品的表面微观形貌。实验时用刀具将样品制备成体积较小的块状物，朝上的切面力求平整，将其放置在样品托上，并用导电碳胶在样品两侧黏牢，然后放入真空镀膜仪中蒸发喷金膜。实验过程按《GB/T 19267.6-2008 刑事技术微量物证的理化检验 第 6 部分：扫描电子显微镜/X 射线能谱法》进行测试，采用 FEI QUANTA200 型扫描电子微镜，在加速电压为 30 kV 的条件下观察其形貌特征。

3）能谱分析：通过 SEM 脉冲幅度的能量刻度，得到计数率随粒子能量的分布曲线，进行试件表面元素的定量分析。测试试件的原则性质的不同，决定其产生不同的特征 X 射线。当电子束照射在试件表面时，电子束穿透了试件表面，但穿透的只是很浅的一层，因此电子束只能对试件表面元素进行定性分析，即鉴定除 H、He 以外的所有元素和原子的含量或相对浓度。

4）非金属材料化学成分分析：取适量红衣陶土样品，经孔径为 0.088 mm 的筛子筛选，称取 5 g 试件平摊在称量瓶（直径为 50 mm）中，在 105 ℃~110 ℃烘箱中烘烤 2 h 以上，然后从干燥器里取出，尽快称取，称取试件精确至 0.000 2 g。借助非金属材料化学成分快速分析仪对制备的样品进行成分分析，分析标准参照《GB/T 16399-1996 黏土化学分析方法》。

5）白度检测：称取红衣陶土样品 5 kg，放置在粉末器内，然后用玻璃板压平红衣陶土。具体参数：标准观察者处在 10°视场；测量口孔径为 15 mm；试件尺寸不小于 15 mm；厚度不超过 40 mm；示值精度

图 1 已出土的红衣陶片
Fig.1 Red pottery fragment

为 x、y±0.000 1，其余±0.01；稳定度为零点漂移≤0.1 示值漂移≤0.2；测量准确度为（白度）W≤1；测量重复性为（白度）ΔW≤0.2；工作温度为 0~40 ℃，相对湿度不超过 85%；电源电压为 220 V±10%，频率为 50 Hz；尺寸为 300 mm×330 mm。

6）X 射线衍射表征：借助日本理学 D/max2200 型 X 射线衍射仪对烧制完成的红衣陶制品进行表征，分析红衣陶片的主要成分，以及改性前后木纤维结晶度的变化。实验前，将样品平整地置于载物台上并压密压实。样品扫描范围为 5~40°，扫描速度为 5°/min。实验标准执行《GB/T 5225-1985 金属材料定量相分析 X 射线衍射 K 值法》，木纤维结晶度：

$$Cr=\frac{I_{002}-I_{am}}{I_{am}} \tag{1}$$

其中，Cr 为相对结晶度，I_{002} 为结晶区的衍射强度，I_{am} 为 2θ=18°时非结晶的散射强度。

7）万能力学：实验室湿度为(50±5)%，温度为(23±2) ℃。检测仪器内部湿度为 50%，温度为 23 ℃，将红衣陶板与瓦楞纸板制备成标准试样，试样尺寸为 6 mm×8 mm×270 mm。实验标准为《GB/T 6546-1998 瓦楞纸板边压强度的测定法》《GB/T 6548-1998 瓦楞纸板粘合强度的测定法》《GB/T 6545-1998 瓦楞纸板耐破强度的测定法》《GB/T 6544-1992 瓦楞纸板力学性能的测定法》。

2 实验结果与讨论

2.1 红衣陶恢复研究

2.1.1 红衣陶形貌表征及其机理分析

红衣陶作为嫩江流域出土的新石器时代末期历史文物，具有很高的艺术价值和人文价值。被齐齐哈尔博物馆馆藏的几个红衣陶有明显的损坏情况，通过对红衣陶艺术材料的考证与再现对已经损坏的红衣陶进行修补。已出土的红衣陶片见图 1。

通过 SEM 图片可以看出，红衣陶片表面颗粒细

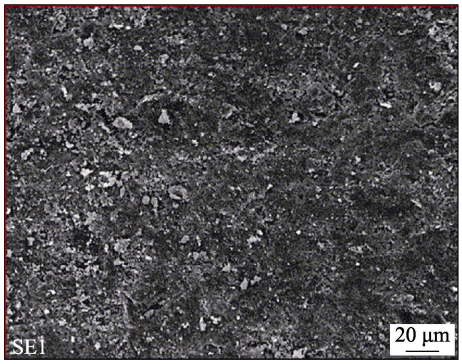

图 2 SEM
Fig.2 Scanning electronic microscopy

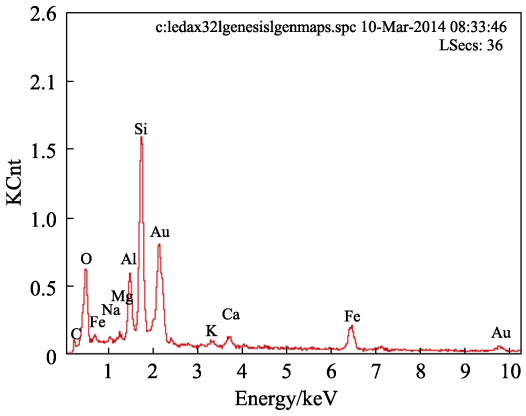

图 3 能谱
Fig.3 Energy spectrum

表 1 红衣陶片的成分
Tab.1 Composition of red pottery fragment

成分	占比/%
MgO	1.54
Al_2O_3	17.65
SiO_2	58.42
K_2O	2.58
CaO	6.30
Fe_2O_3	11.53
Na_2O	1.98

腻且分布均匀，见图 2。通过能谱分析可知陶片的成分情况，见图 3 和表 1。

2.1.2 炼制陶泥

根据能谱表征结果（表 1），最终配制出红衣陶土。将制备的红衣陶土放入盛桶中，并向盛桶加入一定量的水，搅拌成浆糊状，浸泡 48 h。经过浸泡后，用真空练泥机处理红衣陶泥，需要 8 次的真空炼制过程，制备目的是提高红衣陶泥的韧劲属性特征。将制备好的陶土置于水池中省泥一周，使陶土具有更强可塑性，然后密封保存备用即可。

在制备陶泥时应注意的事项：（1）加入的水不宜过多，使陶泥达到黏稠浆糊状即可，水与土的比例为

图 4　红衣陶泥制备的三足陶壶
Fig.4　Three-legged red pottery pot

图 5　电炉
Fig.5　Electric furnace

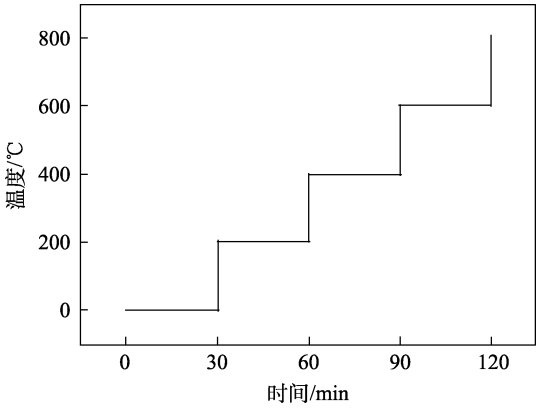

图 6　陶壶烧制温度与时间曲线
Fig.6　Curve of temperature and time of pottery pot firing

图 7　三足陶壶
Fig.7　Three-legged pottery pot

1∶1，否则会破坏红衣陶土的可塑性；（2）在搅拌时一定要仔细检查，切勿出现结团现象；（3）在制备陶泥的过程中，应该保证盛用器皿的整洁性，以免制备的陶泥受到污染影响实验结果；（4）制备完成的陶泥需要密封保存，以免由于水分流失材性发生改变。

2.1.3　拉制陶器

通过制备红衣陶泥得到了实验材料，将其放入备好的塑料袋中，进行 24 h 省泥。将省好的陶泥利用拉坯机制成红衣陶器，主要包括 6 个环节：（1）揉制，先将红衣陶泥进行揉制，然后放在拉胚机的中间圆心部位，并用双手用力将红衣陶泥泥团扶正；（2）推泥，双手反复推泥，压泥 5~6 次，保证泥团在辘轳的圆心部位，同时调整泥坯的可塑性；（3）开孔，双手扶泥团，右拇指在泥团中心部位向下开孔，由于辘轳转动的惯性因素，所以开孔的力度、深度掌握要谨慎，若是初次尝试垃胚最好调慢拉胚机转速，便于掌握要领，也不至于将胚拉扁；（4）制壁，左手继续保持扶泥状态，右手拇指和其余四指将碗壁撑开，拇指、食指、中指夹住泥坯使碗壁变薄；（5）塑型，借助塑料薄膜或动物皮使碗口漂亮美观；（6）注意拉制时手形的变化和造型时指尖移动的速度力量对造型的影响。制备成型的三足陶壶，见图 4。

将拉制好的红衣陶瓷置于暗房中阴干 48 h，然后放入炉窑中烧制，烧制时不能使温度升温过快，采取间歇式升温方式，以免烧制的陶罐发生破裂。

2.1.4　陶罐的焙烧

将在暗房中已经阴干的红衣陶罐——三足陶壶放入电炉，见图 5。启动电炉，采取间歇式升温方法控制电炉内的温度，即每升温 200 ℃，恒温 30 min，然后再继续升温，见图 6。在烧制三足陶壶时，工作人员要将电炉按要求升温，防止烧制品因升温不当被损坏，影响实验的进行。

三足陶壶烧制完成后，不能立即取出，应正常降温，待电炉温度自然降低达到常温时，方可从电炉中拿出三足陶壶烧制品，三足陶壶见图 7。烧制品颜色呈现砖红色，非常美观，这表明其中的 Fe_2O_3 起到了很大的作用。

从图 7 可以明显看出，陶土成分中大量的 Fe_2O_3 使得烧制后的三足陶壶呈现出了红色，与出土的新石器时代末期嫩江流域红衣陶片十分接近。

2.1.5 红衣陶三足陶壶的快速分析实验与白度检测实验

红衣陶三足陶壶的非金属材料化学成分快速分析实验结果，见表 2。对比可知，这些非金属材料化学成分与出土的红衣陶片成分相符。

通过比对出土红衣陶片与烧制红衣陶三足陶壶的非金属材料化学成分，分析 K 值、参比浓度、空白读数、参比读数、A 读数和 A 含量等参数，结果表明参数值十分接近，证明试件成分基本一致。通过比对出土红衣陶片白度检测结果与烧制红衣陶三足陶壶白度检测结果，可知两表中的 X 值和 Y 值十分相似，表明两者的颜色十分接近，见表 3—4。从 CIE 色品图的对比分析得出，红衣陶三足陶壶烧制后呈现出的颜色为微紫粉红色，这与出土红衣陶片相符。

2.1.6 红衣陶三足陶壶的 SEM 分析

出土的嫩江流域新石器时代末期红衣陶片与烧制的红衣陶三足陶壶 SEM 显示画面，见图 8—9。在同为 200 X 的观察倍数下，两块陶片均呈现相似的片絮状，里面均夹杂着 SiO_2 颗粒。在片絮的间隙均分布着相同的空隙。这说明烧制的红衣陶三足陶壶与出土的嫩江流域新石器时代末期红衣陶片在 200X SEM 下观察时，表面形貌十分相符。

2.1.7 XRD 的检测分析

将烧制后的红衣陶三足陶壶样品进行 XRD 检测，并得到检测结果，红衣陶土 XRD 图谱见图 10。

对图谱进行分析，红衣陶三足陶壶中的主要成分为 Al_2O_3 和 SiO_2，并且 SiO_2 的含量明显较多。图像出现峰值的地方跟嫩江流域出土的新石器时代末期

表 2 非金属材料化学成分快速分析结果

Tab.2 Results of rapid analysis of chemical composition of non-metallic materials

元素	MgO	Al_2O_3	SiO_2	K_2O	CaO	Fe_2O_3	Na_2O
K 值	3.50	1.50	0.50	0.33	0.80	0.00	0.00
参比浓度/%	5.00	80.00	200.00	3.00	9.00	10.00	4.00
空白读数	202	323	6 041	149	356	3 021	26
参比读数	812	2 220	2 485	157	445	3 965	1 345
A 读数	523	856	956	187	312	3 240	234
A 含量/%	0.26	7.23	18.5	0.03	0.07	2.56	0.42

表 3 出土红衣陶片的白度检测结果

Tab.3 The whiteness detection of the unearthed red pottery fragment

样品名称	蓝光白度	陶瓷白度	甘茨白度		X	Y
出土红衣陶片	Wr=16.11	Wy=20.05	Wg=–58.84	Tw=–18.05	0.353 7	0.359 31

表 4 红衣陶三足陶壶的白度检测

Tab.4 The whiteness detection of the three-legged pottery pot

样品名称	蓝光白度	陶瓷白度	甘茨白度		X	Y
红衣陶原价	Wr=16.07	Wy=16.03	Wg=–59.98	Tw=–18.01	0.360 3	0.361 3

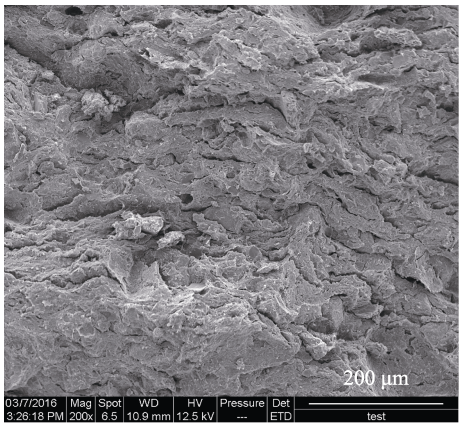

图 8 出土陶片

Fig.8 Unearthed pottery fragment

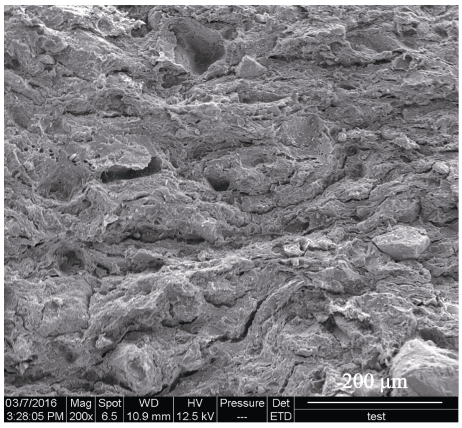

图 9 烧制红衣陶三足陶壶

Fig.9 Three-legged red pottery pot

表 5　力学性能测试结果

Tab.5　Test results of mechanical properties

种类	边压强度/N·m^{-1}	粘合强度/N·m^{-1}	耐破强度/kPa	相对密度/%	抗弯强度/MPa	抗压强度/MPa	含水率/%
红衣陶板	113 896.45	25 134.90	22 680.38	96.1	278.34	1 148.62	3
瓦楞纸板	8 164.62	1 795.35	1 296.83	21.4	14.08	64.53	12

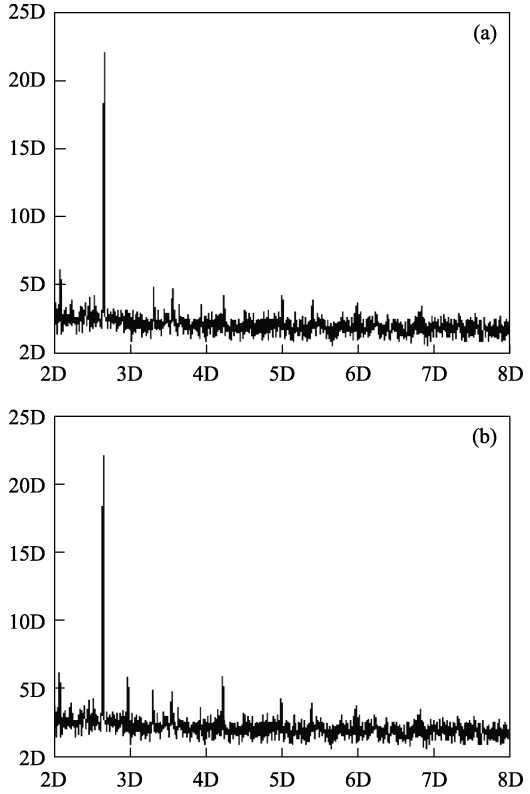

图 10　红衣陶土 XRD 图谱

Fig.10　The XRD of red pottery clay

的红衣陶片的 XRD 图像有明显的相似之处，因此确定烧制红衣陶三足陶壶的配比方案与出土红衣陶片的成分相符。

2.2　红衣陶板与瓦楞纸板力学性能比较分析

按上述研究所得配比方案制备红衣陶土，将红衣陶土制备成红衣陶板。红衣陶板是很好的包装材料，可被广泛应用于酒包装及一些高档品的包装上，是极好的绿色环保包装材料。在将红衣陶板作为包装材料应用之前，还需考察使用时是否符合人体工程学特性及承重方面的要求[16-17]。对包装材料而言主要研究库存条件和库存时间对其的影响[18-19]。为此，对红衣陶板与瓦楞纸板进行了力学性能比较研究与分析。

2.2.1　式样制备

称量 30 g 的红衣陶泥，将陶泥拍打成方形，尺寸略大于 6 mm×8 mm×270 mm，见图 11。将制得的红衣陶板样品放到电炉中烧制，烧制温度为 800 ℃，采取间歇式升温的方式，每升温 200 ℃，恒温 30 min 后再继续升温，以保证烧制红衣陶板样品不发生爆裂。将烧制好的红衣陶板与瓦楞纸板锯切成标准试

图 11　烧制红衣陶板样品

Fig.11　Sample of the fired red pottery board

样，试样尺寸为 6 mm×8 mm×270 mm。红衣陶板试样锯切后需要进一步打磨，直至符合标准试样。

2.2.2　力学性能分析

红衣陶板与瓦楞纸板的边压强度、粘合强度、耐破强度等材料性能测试结果，见表 5。

结果表明红衣陶板的边压强度、黏合强度、耐破强度等各项材料性能均高于瓦楞纸板 1 倍以上，红衣陶板更适用于包装材料。红衣陶板的含水率为 3%，远低于瓦楞纸板，表现出了一定的防潮、防霉的特点，但也导致红衣陶板具有较大的脆性。这在其作为包装材料应用时，会受到一定限制。研究结果显示红衣陶板的抗弯强度达到了 278.34 Mpa，是瓦楞纸板的 19.77 倍。抗压强度达到了 1 148.62 MPa，是瓦楞纸板的 17.80 倍。

2.3　环保包装材料的选择与应用主要因素分析

红衣陶板造型古朴且肌理感强，能表现出中国悠久的文化历史、浓郁的中国传统文化风格和民族气息，其独有的艺术欣赏价值被越来越多的人认可[20]。红衣陶板作为环保包装材料具有可持续发展性、生态性、生命周期拓展性、效益性、功能性等特点。其成分是陶土，易得且价格低廉，取自地质自然环境，用后可被粉碎回炉重制，对自然环境的危害小，同时保温、隔音、抗风压、抗震、可自洁等，其功能性远大于瓦楞纸板，是很好的绿色环保包装材料。

3　结语

通过对嫩江流域出土的新石器时代末期红衣陶片的考证、再现与应用研究，得出以下结论。

1）通过对嫩江流域出土的新石器时代末期红衣陶片进行表征等实验分析，利用 SEM 和能谱分别对陶片进行了分析，得到了陶土的成分与质量配比；并烧制出了红衣陶三足陶壶；通过非金属材料化学成分

快速分析、白度检测、X 射线衍射表征、SEM 分析，验证了红衣陶三足陶壶与出土陶片的相符性。

2）按研究所得成分配比方案，制备出红衣陶土，并烧制出了红衣陶板，确定了红衣陶的烧制方法；将红衣陶板与瓦楞纸板进行力学性能等方面的比较分析，得出红衣陶板的抗弯强度和抗压强度分别是瓦楞纸板的 19.77 倍和 17.80 倍，说明红衣陶板完全具备作为新型绿色环保包装材料的性能。

参考文献：

[1] 徐滢, 周媛. 陶瓷元素在现代艺术设计中的创新应用路径探析[J]. 包装工程, 2020, 41(8): 319-322.
XU Ying, ZHOU Yuan. Analysis of the Innovative Application Path of Ceramic Elements in Modern Art Design[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(8): 319-322.

[2] ORLOV N K, PUTLAYEV V I, EVDOKIMOV P V, et al. Composite Bioceramics Engineering Based on Analysis of Phase Equilibria in the Ca3(PO4)2–CaNaPO4–CaKPO4 System[J]. Inorganic Materials, 2019, 55(5): 516-523.

[3] DEEPAK K, VATTIKUTI S, VENKATESH B. Experimental Investigation of Jute Fiber Reinforced Nano Clay Composite[J]. Procedia Materials Science, 2015, 10(2): 238-242.

[4] DEEPAK K, REDDY N S, NAIDU T. Thermosetting Polymer and Nano Clay Based Natural Fiber Bio-Composites[J]. Procedia Materials Science, 2015, 10(4): 626-631.

[5] 徐滢. 日用陶瓷产品的多元化设计探究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 308-310.
XU Ying. Diversified Design of Daily Ceramic Products[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 308-310.

[6] 范青青. “融”语境下陶瓷家具发展策略研究[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 326-334.
FAN Qing-qing. Development Strategy of Ceramic Furniture in the Context of “Fusion”[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 326-334.

[7] 王洪新. 搅釉瓷的艺术魅力与酒器酒瓶装饰创新[J]. 工艺与实践, 2011, 45(12): 4-7.
WANG Hong-xin. The Artistic Charm of Stir-glazed Porcelain and the Innovation of Wineware and Wine Bottle Decoration[J]. Crafts & Practice, 2011, 45(12): 4-7.

[8] 方李莉. 艺术人类学视野下的新艺术史观——以中国陶瓷史的研究为例[J]. 艺术探索, 2013, 4(3): 50-62.
FANG Li-li. The New View of Art History from the Perspective of Art Anthropology: a Case Study of the History of Chinese Ceramics[J]. Art Exploration, 2013, 4(3): 50-62.

[9] STIPNIECE L, KONDRATJEVA A, SALMA-ANCANE K. Influence of Precursor Characteristics on Properties of Porous Calcium Phosphate-Titanium Dioxide Composite Bioceramics[J]. Ceramics International, 2020, 46(1): 243-250.

[10] HÚLAN T, TUBŇA I, ONDRUKA J, et al. The Influence of Fly Ash on Mechanical Properties of Clay-Based Ceramics[J]. Minerals, 2020, 10(10): 930.

[11] 朱永康. 聚合物-陶土纳米复合材料的制备及表征[J]. 包装工程, 2014, 35(24): 10-26.
ZHU Yong-kang. Preparation and Characterization of Polymer-Clay Nanocomposites[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(24): 10-26.

[12] VVSAB C, A.V. FROLOVA B C, IVS D. Dielectric Properties of Nanocomposite Ceramics Al_2O_3/Graphene Processed by Spark Plasma Sintering[J]. Ceramics International, 2020, 46(5): 6920-6925.

[13] SWATSITANG E, PROMPA K, PUTJUSO T. Ni~(2+)-doped CaCu_3Ti_4O_(12)/TiO_2 Nanocomposite Ceramics with High Temperature Stability Dielectric and Nonlinear Electrical Properties for X9R Capacitors[J]. Applied Surface Science, 2019, 484(1): 925-932.

[14] YU Y, LIN F, ZHENG Y, et al. High-density Nanoprecipitation Mechanism and Microstructure Evolution of High-Performance Al_2O_3/ZrO_2 Nanocomposite Ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 41(18): 1-15.

[15] TONG J, CHEN P, ZHAO J, et al. Fracture Test of Nanocomposite Ceramics under Ultrasonic Vibration Based on Nonlocal Theory[J]. Ceramics International, 2019, 45(16): 20945-20953.

[16] KARAGEDOV G R, SHUTILOV R A, KOLESOV B A, et al. The Effect of Carbon Nanotubes Introduction on the Mechanical Properties of Reaction Bonded Boron Carbide Ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2021, 42(2): 5-15.

[17] SIMBA B G, RIBEIRO M V, ALVES M, et al. Effect of the Temperature on the Mechanical Properties and Translucency of Lithium Silicate Dental Glass-Ceramic [J]. Ceramics International, 2020, 47(10): 6-15.

[18] POSPIECH P, OLEJNIK K, MIZERSKA U, et al. Influence of Polysiloxane Microspheres on Hydrophobicity, Structure and Mechanical Properties of Paper Materials[J]. Cellulose, 2021, 28(3): 1-16.

[19] BHARDWAJ S, BHARDWAJ N K, NEGI Y S. Enhancement of Processability, Surface and Mechanical Properties of Paper Based on Rice Straw Pulp Using Biopolymers for Packaging Applications[J]. Tappi Journal, 2019, 18(7): 431-440.

[20] 张书涛, 任自林, 苏建宁, 等. 基于情景故事法的陶瓷版画意象设计[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 40-45.
ZHANG Shu-tao, REN Zi-lin, SU Jian-ning, et al. Image Design of Ceramic Prints Based on Situational Story Method[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 40-45.