

景德镇陶瓷学院科技艺术学院

本科生毕业论文（设计）

汝青釉的研制

Development of Ru celadon glaze

学 号： 201030451331

姓 名： 韩雪云

所 在 系： 工程系

专业班级： 无机非金属材料工程（3）班

指导教师： 包启富老师

完成日期： 2014 年 5 月

景德镇陶瓷学院毕业设计（论文）任务书

院（系） 科技艺术学院工程系

2013 年 10 月 10 日

专业	无非	班级	10 级（3）班
学生姓名	韩雪云	指导老师	包启富
题目	汝青釉的研制		
<p>主要研究内容和设计技术参数：</p> <ol style="list-style-type: none">1，配方组成对汝青釉效果的影响。2，制备工艺对汝青釉效果的影响。3，烧成制度对汝青釉效果的影响。			
<p>基本要求（含成果要求）：</p> <ol style="list-style-type: none">1，通过研究不同的配方组成和工艺制度，获得良好的汝青釉。2，通过引入 Fe_2O_3 为发色剂，获得良好的汝青釉。3，通过显微结构分析，解释汝青釉呈色的状况与工艺因素间的关系。			
<p>工作进度计划：</p> <p>第 1-2 周：研讨实验安排，查找资料，准备实验用料及工具</p> <p>第 3-4 周：可行性研讨，针对教师提出的要求开展探索性实验</p> <p>第 5-6 周：根据可行性实验结果，制定出完整的研究方案与计划，开展实验</p> <p>第 7-10 周：工艺实验结束，总结工艺实验数据与结果分析</p> <p>第 11-12 周：样品结构分析（光学显微镜分析、呈色分析、膨胀系数分析）</p> <p>第 13-14 周：论文撰写</p> <p>第 15-16 周：论文审核打印、递交</p>			

摘要

本课题采用钾长石、煅烧后的龙岩高岭土、石英、白云石、方解石、滑石、氧化铝粉、氧化铁等原料制备汝青釉。实验采用了单因素实验法和正交实验法。实验从查找资料的基本配方组成入手，对硅铝的比值、着色剂的添加量、不同配方组成和工艺制度如球磨时间、施釉方式、施釉厚度等因素进行了研究。最终得到釉面效果较好的汝青釉配方。

研究表明：实验在 1280℃~1290℃还原气氛液化气烧梭式窑烧成下，烧成温度为 1280℃可以获得釉面效果较好的汝青釉。其配方组成为（wt%）：钾长石 43.45%、煅烧龙岩高岭土 29.93%、石英 1.74%、白云石 6.34%、方解石 14.52%、滑石 4.02%、氧化铝粉 5.5%、氧化铁 1.2%。利用全自动白度计测量该釉面得出的 Lab 值如下：L 76.50, a -9.82, b 3.65。

关键词： 汝青釉 制备工艺 着色剂 施釉厚度

Abstract

This subject adopts potash feldspar, Longyan Kaolinite after baked, quartz, dolomite, calcite, talc, alumina powder, iron oxide Ru celadon glaze raw material preparation, etc. The experiments using the single factor experiment method and orthogonal experiment method. The experiment starts from the basic formula of finding information, the ratio of silicon aluminum, the amount of colorant, the composition of different formula, and the process system have been studied such as the milling time, glazing method, glazing thickness, etc. Eventually get better Ru celadon glaze recipes.

Research results show that the experiments in 1280°C~1290°C reducing atmosphere liquefied petroleum gas burning under the shuttle kiln firing, the sintering temperature of Ru celadon glaze can obtain better glaze effects is 1280°C. When formula composition (wt %): potash feldspar 43.45%, Longyan Kaolinite after baked 29.93%, quartz 1.74%, dolomite 6.34%, calcite 14.52%, talc 4.02%, alumina powder 5.5%, iron oxide 1.2%. The use of automatic meter measuring the Lab values of white glazed obtained as follows: L 76.50, a -9.82, b 3.65.

Keywords: Ru celadon glaze Preparation technology Colorant Glazing thickness

目录

摘要	I
Abstract.....	II
目录	III
1 前言	1
1.1 本课题的意义和背景	1
1.2 本课题主要解决的问题	1
2 文献综述	2
2.1 釉的相关概念	2
2.1.1 釉的概述	2
2.1.2 坯釉的适应性	4
2.2 青釉的概述	4
2.2 汝青釉的概述	6
2.2.1 汝窑的历史	6
2.2.2 汝窑的分类	6
2.2.3 汝窑的特征	7
2.2.4 汝窑的工艺	8
3 实验内容	10
3.1 实验原料及化学组成	10
3.2 实验所用仪器与设备	11
3.3 坯、釉的工艺流程	12
3.4 实验过程	13
3.4.1 汝青釉的探索性实验.....	13
3.4.2 硅铝比对汝青釉釉面效果的影响.....	13
3.4.3 Fe_2O_3 对汝青釉釉面效果的影响	13
3.4.4 白云石对汝青釉釉面效果的影响.....	14
3.4.5 方解石对汝青釉釉面效果的影响.....	14
3.4.6 滑石对汝青釉釉面效果的影响.....	14
3.4.7 工艺制度对汝青釉釉面效果的影响.....	15
3.5 性能表征	15
4 结果分析与讨论	16
4.1 硅铝比对汝青釉釉面效果的影响.....	16
4.2 Fe_2O_3 对汝青釉釉面效果的影响	16
4.3 白云石对汝青釉釉面效果的影响.....	18
4.4 方解石对汝青釉釉面效果的影响.....	18

4.5 滑石对汝青釉釉面效果的影响	19
4.6 工艺制度对汝青釉釉面效果的影响.....	20
5 结论	23
6 经济分析	24
6.1 实验所用原料成本核算	24
6.2 能耗、水电设备折旧	24
6.3 税收与利润	24
7 致谢	25
8 参考文献	26

1 前言

1.1 本课题的意义和背景

宋代是中国陶瓷史上的鼎盛时期，当时并称的五大名窑“汝、钧、官、哥、定”，其中以汝窑的声名最为卓著，被誉为“宋时窑器第一”。汝窑是北宋后期宋徽宗年间建立的官窑，前后不足百年。

因开窑时间短，传世作品不足百件，所以十分珍贵。据文献记载，汝窑青瓷釉色仅有八种。高濂《遵生八笺》：“其色卵白，汁水莹厚如堆脂，然汁中棕眼隐若蟹爪，底有蘑细小挣针”。宝丰清凉寺汝窑古址发掘出土的青瓷器，釉色确如文献记载所述，有天蓝、月白、天青、豆青、粉青等色，但不脱天青这个基本色调。后人形容汝瓷釉色有“雨过天晴云破处”诗句，天青色调为其正色。其实汝瓷的釉色还有卵青、虾青等，有玉石般的感觉，釉面有很细的开片，有人称之为“鱼子纹”“芝麻花”“蟹爪纹”等。器物均为满釉支烧，面有细小的芝麻钉痕。器形多仿造古代青铜器式样，以洗、炉、尊、盘等为主。汝窑青瓷，釉色青翠华滋，釉汁肥润莹亮，精光内蕴，造型古朴雅致，周身布满纵横交错的纹片，有着开片自然天趣；器物口沿由于上釉时釉汁下流，釉层较薄，釉下黑色胎骨透过半透明的玻璃青釉，呈显紫色，底足部分不上釉，露出黑色胎骨，形成著名的“紫口铁足”特征。

汝青釉还是一种极其独特的结晶釉，其釉质稠如凝脂，溶而不流，含水欲滴，器表有玉石般的质感，被誉为“似玉非玉而胜玉”。现代汝青釉主要用来装饰茶具深受广大消费者的喜爱。

1.2 本课题主要解决的问题

本课题的研究是在 $1280^{\circ}\text{C} \sim 1290^{\circ}\text{C}$ 还原气氛液化气烧梭式窑中烧成，通过相关文献及资料调整原配方中配方组成计算硅铝比获得无光效果，而相应地添加着色剂 Fe_2O_3 的用量从而获得较好的汝青色釉面效果，实验中还采用不同的制备工艺方法，如改变球磨的时间、球磨过程中原料和水的比例、施釉方法以及施釉厚度等。釉中采用的原料均为陶瓷普通原料，价格低廉，而且汝青瓷的市场价格相比同类青瓷价格偏高，所以此次课题的研究具有实际研究意义和发展。

2 文献综述

2.1 釉的相关概念

2.1.1 釉的概述

釉是覆盖在陶瓷坯体表面的一层极薄的玻璃状物质。陶瓷产品表面施釉的目的是为了改善其表面性能，提高产品的技术，增加产品美感。釉面质量是指釉料产品施用于陶瓷坯体表面并于规定的条件下烧成后所获得的表面效果。判断釉面质量的标准有：釉面光泽度，釉面色调，釉面平整度，釉面质感（细腻度），釉面存在的缺陷状况：如针孔、气泡、杂质、黑点、色差等。

2.1.1.1 釉面光泽度

光泽是物体表面的一种物理性能，全部反射光线强度中物体表面镜面反射方向光线的强度所占的比例称为光泽度。陶瓷釉从光泽上分有光泽釉、半无光釉和无光釉三种，而光泽釉本身由于光泽的差异，使其在产品质量和等级上也有一定的区别。釉的组成、显微结构、制备工艺及釉面状况等是影响釉面光泽变化的因素，所以光泽的分析与釉的结构、表面状况、釉面质量和组成、制备工艺、烧成条件等有关^[1]。因为陶瓷釉表面状态各有差异，所以光的照射下，镜面反射的强弱影响了光泽度的大小。当釉层中只有少量的极细小且分布均匀的晶体存在时，则该釉表面通常为光泽表面；当均匀分布在釉层内的晶体尺寸大于光的波长时，釉表面的晶体不会使光线产生镜面反射，从而降低釉面光泽度形成半无光或无光釉面。测定陶瓷釉表面的光泽度一般用光电光泽计。在判定陶瓷釉面光泽度强弱时，以光泽度仪测试的釉面强度大小来判定，釉面强度越大，表明该釉光泽越强；反之，釉面强度越小表明该釉光泽越弱(越无光)。对于光泽釉面，希望测试数据越大越好；对于无光釉面，则希望测试数据越小越好。同时也可以根据^[2]在特定的颜料和遮光剂颗粒的粒度分布来确定釉料的光学特性，使产釉面颜色发生变化。

2.1.1.2 釉面色调

釉面色调即釉面颜色，它包括白釉的釉面白度和颜色釉的釉面颜色。事实上，陶瓷产品几乎每个样品都带有一定的颜色，它在可见光区的反率在 60-75 之间，同一样品对不同波长的光，反射率相差 10% 左右。反射率不高，均匀性又很差，使得评价陶瓷产品的白度实质是评价不同程度地带有不同色调的对象的“白度”。通常测试陶瓷釉面的色调是使用色差仪。利用色差仪测试陶瓷釉面三个表征色调的数据：L、a、b 值。L 值表示釉面的明度值，L 越高，表示釉面越明亮（通常所讲越白）；L 值越低，表示釉面越暗（通常所讲越黑）。a 值表示釉面的红、绿色调，a 值大于 0

时,表示釉面颜色为红色调,且数值越大,表明色调越偏红;反之, a 值小于0时,表示釉面颜色为绿色调,且数值越小(负数),表明色调越偏绿。 b 值表示釉面的黄、蓝色调, b 值大于0时,表示釉面颜色为黄色调,且数值越大,表明色调越偏黄;反之, b 值小于0时,表示釉面颜色为蓝色调,且数值越小(负数),表明色调越偏蓝。

测试白釉色差值的方法是:将烧成的施有待测釉料的陶瓷品试片,于色差仪上测试其色度值 L 、 a 、 b 值,评价时,比较不同釉面测得的 L 、 a 、 b 值的差异,来断定其白度的高低。测试白釉釉层遮盖力的方法是:将待测釉料以一定的、相同的厚度施于有色坯体表面,在同条件下烧成后,比较不同试样间坯色透过的程度(亦可以测试釉面 L 、 a 、 b 值方式来比较)。评价时,以坯色在釉面反映的清晰程度的大小来定性判断其遮盖力的强弱。

2.1.1.3 釉面平整度

实际上的陶瓷釉面并不能像玻璃表面一样平整光滑,造成这样的原因是釉层厚度、坯体表面的光滑程度、釉层形成过程的反应时间的长短等因素制约着釉面的平整度,尤其是低温快烧的陶瓷砖产品釉面,多少都会存在一些波纹。陶瓷釉面平整度只能由目视测试并定性地进行比较判别,并不能通过仪器进行测试,

2.1.1.4 釉面质感

陶瓷釉面的质感和平整度指标一样也是衡量陶瓷釉面平整光滑程度的一样标准,但是在具体应用评判时,却又有细微差别。通常所说的釉面平整度主要是指光泽釉釉面平整光滑程度,而釉面质感则是指釉面细微部分的光滑、细腻程度,如光泽釉釉面皱纹、针孔、气泡等状况,无光釉釉面平整、光滑程度及釉面缺陷状况如针孔、凸点(瘁子)、开口气泡、析晶晶体粗细等,都表示釉面质感。若光泽釉釉面无细小皱纹,也没有细针孔、小气泡等缺陷。无光釉釉面平整光滑、析晶晶体大小均一(细腻)、无针孔、凸点等缺陷,则看上去和摸上去就会感觉到光滑细腻,我们就认为该釉釉面质感细腻。陶瓷釉面质感与平整度指标一样,也是无法用仪器测试并进行量化比较的,只能由目视测试并定性地进行比较评判。

2.1.1.5 釉面缺陷状况

陶瓷产品釉面或多或少会存在一此缺陷,主要是针孔、气泡、杂质、黑点、色差、波纹等。缺陷存在的严重程度大小,是评判釉面质量好坏的重要指标。通常要求釉面缺陷越少越好,尤其是釉面针孔、气泡、杂质、黑点等,最高的是要求釉面不存在这些缺陷。釉面缺陷也是由目视测试检验的,一般以是否存在缺陷的与否和严重与否来判别釉面效果好坏的,客观的说,完全不存在缺陷的釉面是不存在的,比如针孔就是无法完全避免的,所以一般是先选择一个产品做参照物对比,程度较

低的釉面效果要好。釉面缺陷的产生，有众多而又复杂的影响因素；同时，釉面缺陷又是釉料产品所不能容忍的质量缺陷。因此既要判断釉面缺陷，又要分析缺陷产生的原因，以便确定缺陷是否为釉料所致^[3]。

2.1.2 坯釉的适应性

坯釉适应性是指熔融性能良好的釉熔液，冷却后与坯体紧密结合成完美的整体，不开裂也不剥落的能力。陶瓷材料坯釉不相适应，会使产品出现很多缺陷，如变形、炸裂、脱釉、吸釉、后期龟裂、釉泡等。因此对陶瓷材料坯釉适应性的影响因素进行探讨，是提高技术水平和产品质量，降低消耗，提高效益的有效途径。影响坯釉适应性的因素是复杂的，主要有四个方面，即坯、釉二者膨胀系数之差；坯釉中间层；釉坯的弹性和抗张强度以及釉层厚度^[4]。

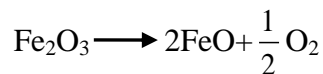
2.2 青釉的概述

青釉是我国历史上最早出现的颜色釉，随着时代的不同，其组成有所不同。早期的青釉为含钙量较高的石灰釉，宋代以后逐渐转变为含钙、钾相近的石灰—碱釉。在不同文化时期，青瓷的胎釉中的钾，钙，钛，铁元素含量会有变化^[5]。青釉中以 FeO 、 Fe_2O_3 为着色氧化物，两者的比例决定釉的青、黄色调的深浅。 Fe_2O_3 含量为0.7%—2.7%。青瓷釉一般表现出玉的质感。这是由其显微结构所决定。文献指出：钧窑青釉含硅量高，含铝量低，含有约1%的磷，高温下磷在高硅质玻璃釉中产生分相，使釉呈现出乳浊且带有乳光；而龙泉哥窑青瓷、汝官窑青瓷和枢府青白瓷的釉中硅含量稍低，铝含量稍高，烧成后釉中有微气泡团存在，聚集堆叠，并有大量的微细钙长石晶体，两者共同形成光的散射源，使釉面乳浊，临汝青瓷釉中的气泡较大，甚至孤立分散于釉中，钙长石品种极少，因而釉是透明的。

青釉的显色与釉中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 在釉中的浓度比例有密切关系，而两者的比例与还原气氛的强弱有关。还原气氛重则 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 比值高，釉色偏蓝；还原气氛轻则 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 比值低，釉色偏黄绿，颜色的深浅也与釉层的厚度有关，在含铁量相近的情况下，釉层越厚，釉的颜色越深。如钧窑天青釉和汝官窑天青色调相近，但前者比后者厚得多，因此尽管钧窑青釉的含铁量近于汝官窑釉，但其颜色的深浅相近。除此之外，呈色的深浅还与铁的浓度、硅铝比、 $\text{CaO}/\text{K}_2\text{O}$ 比、烧成温度及釉的熔融状态等有关。

青釉是以含铁化合物为着色剂，还原烧成的一种高温颜色釉。我国宋代许多名窑的产品大部分施这种釉。由于在还原气氛中部分 Fe^{3+} 离子被还原成 Fe^{2+} ， Fe^{2+} 使釉呈青色，而 Fe^{3+} 使釉呈黄褐色，为此 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 以不同比值可使釉呈现由黄褐到青绿的各种色调，如月白、天青、粉青、梅子青、豆青、豆绿、翠绿、玉青等，胎体的色调对釉的呈色起一定的衬托作用，铁质过多则使釉层发暗，青瓷釉较一般透明釉厚些，釉层越厚则釉色越深，但釉层过厚则会流釉，引起鸡爪纹或开裂，还原气

氛烧成釉中 Fe^{2+} 增多, 会呈深浅不同的青色, 氧化气氛烧成的青釉中 Fe^{3+} 多釉变成黄绿色。故青釉对烧成气氛极为敏感。在高温时铁的氧化物存在下列平衡关系:



提高温度, 上述平衡向生成 FeO 方向移动, 有利于青釉呈色。冷却时高温阶段宜快冷, 以免釉中低价铁二次氧化使釉面冷黄。

青釉的基础釉历来都是用石灰釉或石灰——碱釉。石灰釉的碱性成分以 CaO 为主, 一般含量在 5% 以上, 有的 CaO 含量高达 20%。景德镇传统的石灰釉是以釉果为基础, 以釉灰为主要助溶剂, 属于石灰石—石英—绢云母质釉。石灰釉的白度随釉灰含量的增加而降低, 釉灰多, 则釉色青; 釉灰少则釉色白; 釉的成熟温度随釉灰的增加而减低, 用釉果和釉灰二元配方配制的石灰釉具有很多优点:

1、实用配方原料种类少, 配制工艺简单。

2、釉果具有长石、石英、高岭土三者的作用, 由于绢云母的存在, 使釉浆具有悬浮性和涂挂性。

3、釉灰中含有 90% 的石灰, 具有优良的高温助熔作用。

4、釉的高温黏度较低, 有利于釉中硅酸亚铁青色玻璃相的形成, 使釉中具有白里泛青的特色; 同时釉的透明性好, 非常适合釉下彩装饰, 尤其对釉下青花装饰特别适应。

5、釉的硬度高, 不易擦伤。

6、对着色剂着色有利。

不过上述优点只有在景德镇的柴窑中烧成才能充分发挥出来, 在煤窑、油窑中烧成, 釉面质量较差, 主要缺失是还原后期沉碳、吸烟。石灰—碱釉中 CaO 含量为 7%-12%, $\text{K}_2\text{O}+\text{NaO}$ 含量为 4%-6%, 这种釉的高温黏度比石灰釉要高, 釉面光泽度、透明度比石灰釉稍差, 呈半光亮。宋代龙泉青釉多以石灰—碱釉为基础釉。

以长石代替釉果作主要原料, 以石灰石取代釉灰作助熔原料再以相当于长石用量一半的石英配成的釉, 也具有石灰—碱釉的良好性能, 而且透明度高, 光泽也好。

以长石代替釉果作主要原料, 以石灰石取代釉灰作助熔原料, 再以相当于长石用量一半的石英配成的釉, 也具有石灰—碱釉的良好性能, 而且透明度高, 光泽也好。

以长石、釉果、石英、滑石、石灰石作为原料配制出的白度较高的混合釉, 现已在各瓷厂广泛应用; 有时还加入少量的 ZnO 或 BaCO_3 , 对提高白度效果明显, 同时对釉的发色也有利。如果在上述基础釉中, 加入 1%—3% 的 Fe_2O_3 , 经还原焰烧成, 就可以得到青釉。根据釉青色的深浅程度, 青釉又有粉青、影青、豆青、梅子青等色釉之分。对青瓷发展具有深刻影响的要数龙泉青瓷。龙泉青瓷极盛于宋代, 尤以官窑、哥窑、弟窑烧制的青瓷具有代表性, 在世界上享有盛誉^[6]。

2.2 汝青釉的概述

2.2.1 汝窑的历史

汝窑位于河南省中西部，源于临汝县及其周边地区，临汝县在宋代隶属汝州，窑以地命名，故名汝窑。汝窑是我国宋代五大名窑之一，据记载^[7]：它与钧窑于公元 960-1276 在河南省开始烧成，自南宋起失传，至今已几百年。由于汝瓷在历史上烧造的时间很短，传世品很少^[8]。因地处汝州而得名，以生产青瓷而著称，同时兼烧仿制的其他窑口的产品。它以优质的青瓷产品驰名海内外，与开封官窑、禹县钧台窑、曲阳定窑、浙江哥窑共同引领了宋代的瓷业发展，闻名于世。主要窑址包括临汝严和店窑、宝丰清凉寺汝窑、新安窑、宜阳窑、内乡大窑店窑和禹县钧台窑的汝瓷烧造区等。

汝瓷瓷土土质细腻，胎质坚硬呈香灰色，釉色以天青色为贵，还有粉青、天蓝、卵白、豆青、虾青、葱绿等，釉色润泽。装饰多为印或刻、划的云山禽鸟、海水游鱼及各种缠枝、折枝、团菊等花卉图案。汝瓷器皿多采用外裹足满釉支烧，工艺精湛。宋佚名《百宝总珍集》卷九曾描述：“汝窑土脉滋媚，与高丽器物相类，有鸡爪纹者认真，无纹者尤好”。民国时期许子衡在《饮流斋说瓷》“说窑第二”中记述：“汝窑在河南汝州，北宋时所创设也。土细润如铜，体有厚薄，汁水莹润，厚若堆脂。有铜骨无纹者，有铜骨鱼子纹者，有棕眼隐若蟹爪者尤佳。豆青、虾青之色居多，亦有天青、茶末等色。无釉之处所呈之色，类似羊肝。底有芝麻花细小挣钉，乃真物也。其色纯净深穆”。汝窑瓷器胎土经过精心陶炼后，制成的胎体呈细腻的香灰之色，故称“香灰胎”，成为汝瓷显著特色之一。胎壁轻薄，质坚细腻。台湾刘良佑在其所著《中国历代陶瓷鉴赏》上册中讲述传世汝瓷胎的测试结果是：“其中主要的成分百分比含量，依浓度次序为二氧化硅 65%、三氧化二铝 27%、三氧化二铁 2%、氧化钙 1.6%、氧化钾 1.5%、氧化钛 1.4%、氧化镁 0.6%、氧化钠 0.3%，其他极微量的氧化锰、氧化铜及氧化磷和氧化铅，合计占胎骨总量的 0.6%左右。由于胎土中含有百分之二的三氧化二铁，所以使得胎骨的断面在还原烧后，呈现灰蓝色^[9]”。

2.2.2 汝窑的分类

汝窑可分为两大主要部分：

(1) 汝官窑是北宋晚期专为宫廷贵族烧制御用瓷器，烧造时间短，量少而质精，碗、盘、洗类器皿多采用外裹足满釉支烧，最标准的釉色是天青色，色泽光亮莹润，釉面光素无纹，有鱼鳞状开片。

(2) 临汝窑是以烧制民间日用的青瓷为主，兼烧白地黑花、珍珠地划花、黑釉天目瓷、钧瓷、宋三彩等瓷器。烧造时间长、数量大、产品造型多样，主要器形有碗、盘、洗、盖、瓶、壶、尊、炉、孟、钵、罐、盖等，青瓷釉色有天青、豆青、豆绿、葱绿、天蓝等，釉层匀净，釉面开片细密。

2.2.3 汝窑的特征

汝窑瓷器是在经过一次素烧之后再施釉烧成，而且釉层比胎要薄，且大多数采取整体施釉。论及汝窑瓷器的釉色可细分有天青、粉青、卵青、艾青、豆青、虾青、梅子青、蟹青、葱绿等，有着“天青为贵，粉青为尚”之称。釉色较淡似雨后初晴的万里碧空称为“天青”，有如倒映在清澈湖水的苍穹称为“粉青”，在淡青中微闪绿色，而虾青在呈现出一种青绿粉翠交融的迷人光泽中还略带黄色。但青色是汝窑的主色系，俗称“鸭蛋壳”青色。釉层不厚，随造型的转折变化，呈现浓淡深浅的层次。釉面滋润柔和，纯净如玉，有明显油腻感觉，无光泽的器物较多，有光泽的较少。汝窑青瓷釉还是一种复色釉，这种釉对光极为敏感，在不同的光照下或从不同角度观察，釉面颜色会有不同的变化，在暗光下出现清澈湖水般的翠绿色，在明亮时则会看到如雨过放晴的湛蓝天空，并泛着点点星光，显得流光四溢。

汝窑器瓷质细腻，胎骨坚硬。釉面呈现出一种极其独特的结晶釉，其釉质稠如凝脂，溶而不流，含水欲滴，器表有玉石般的质感，被誉为“似玉、非玉、而胜玉”。这是因为汝窑器的釉料中加入了少量的玛瑙末，增加了游离态的石英，可以提高液相高温黏度，增加釉的机械强度、硬度、耐磨性和耐化学侵蚀性，其中含有的铁等着色元素，能使釉面莹润，光色多变。根据研究，汝官窑青瓷的烧成温度为 1200℃ 左右，偏于熔融范围的下限温度，釉在此温度下处于正烧状态，而胎却属于生烧，气孔率处于 10%~20%，胎中的气泡和釉中钙长石析出的微晶体结合形成主要散射源，使汝官窑青瓷具有很强的玉质感。由于釉面呈色是由于它对不同波长的可见光的吸收和散射作用的结果，因此在釉配方确定的情况下，釉色在很大程度上取决于釉层的厚度，就像单块玻璃呈白色或无色，多层玻璃叠放时呈现绿色一样。从呈色讲，釉层越厚越好，至佳者甚至超过胎体的厚度。汝官窑的烧制工艺是采用两次烧成，釉色与釉料配方、烧成温度、窑内气氛以及冷却阶段的工艺有关。同一种釉料，由于烧成条件不同而分别呈现出月白、淡粉青、粉青、卵青、天青、豆青、虾青等不同的釉色^[10]。

汝窑瓷器另一个显著的特征，是釉面整体布满微细的开片，汝窑瓷器的开片堪称一绝。开片的形成是器物于高温焙烧下由于胎、釉的膨胀系数不一致产生的一种釉表缺陷，但当时的艺术匠师却将这种难以控制的、千变万化的缺陷，通过人为的操作转换为一种自然美妙的装饰，前人称其为“蟹爪纹”。据《格古要论》记载：“有蟹爪纹者真，无纹者尤好。”高濂的《遵生八笺》及张应文《清秘藏》也据此引申说：“汁中棕眼隐起若蟹爪。”对于这种现象，业内也有不同看法，其一是说釉面上因气泡破裂而产生的棕眼犹如螃蟹走过沙滩而留下的爪印。其二是形容瓷器表面开片的长短无序，呈不规则交错尤如蟹爪。其三所谓“蟹爪纹”是在瓷器开片的一条主纹上，另生出一条次纹，形成一个枝杈（即所谓“蟹爪”），然后在次纹上又生出一条次纹，形成又一个小一点的枝杈。有些学者认为，用蟹爪来形容汝窑瓷器的开片略

有不足,认为它只形容了开片的主次及走向,却无法形容釉面上的斜开片,因而有些业内人士在考虑这方面时就用“鱼鳞纹”或“冰裂纹”来形容。其四也有人认为釉面的气泡在窑炉中焙烧时破裂后未经弥合而自然形成的棕眼形如鱼子,应称其为“鱼子纹”。许之衡的《饮流斋说瓷》中记载:“汝窑在河南汝州,北宋时所创设也。土脉细润,如铜体,有厚薄,汁水莹润。有铜骨无纹者,有铜骨鱼子者”,意思是形容釉面中泛起的有异于天青色釉面的色块,好像鱼子漂浮在水面上^[11]。

汝窑瓷器不以装饰纹样为重,主要乃以瓷釉作为美化器物的重要手段。汝窑青瓷由于胎、釉中含铁量的恰当,烧成时还原火焰控制得适度,因而釉色达到了宋人所理想的境界。汝窑青瓷器物的釉色呈一种纯正淡淡的天青色,从故宫博物院、上海博物馆和台湾故宫博物院收藏有数的作品来看,它们的色泽变化不大,只是由于烧成过程中还原气氛的强弱稍有差别,因此色泽上有的显得稍深些、有的稍淡些,即使有粉青、卵青、灰青之分,但总的呈色都比较稳定,离不开天青这个基调。汝窑瓷釉的天青色,在色彩上介乎绿色与蓝色之间,绿色是一种充满静谧的温和色彩,而蓝色则是带有神秘的冷色。汝窑青瓷器物的天青色,它既有蓝色之冷,又带有绿色之暖,是一种冷暖适中、十分谐和的色调^[12]。

2.2.4 汝窑的工艺

汝窑在北宋时期即开始烧造,断断续续一直维持到元末。由于釉中铁等着色元素的作用,在还原气氛烧成后的瓷器呈现青色,若气氛不同,色调上还可偏黄褐色等色泽^[13]。汝窑之所以成为宋代名窑,关键就在于汝瓷具有独特的天青釉。工艺试验证明^[14]:汝窑天青釉确属难于烧制、呈色因素复杂的青瓷釉。釉的色泽是鸭蛋亮似的淡天青色略泛青绿调,釉的光泽不强,呈乳浊状故称乳光釉。

合适的硅铝比是取得好的釉面质量的关键因素;不同的釉色效果取决于 Fe_2O_3 的含量,不同的 CaO 的引入方式对青釉的质量有很大影响,施釉厚度和釉浆细度对汝青釉的烧成效果有较大影响。在陶瓷釉料配方中, CaO 主要由釉灰、方解石、石灰石、白云石、硅灰石等形式引入。 CaO 在不同的矿物中存在的形式不同,从而决定了它使用时以不同的方式引入会对釉料有不同的影响 CaO 在釉中是主要熔剂,它可以降低高硅釉的粘度,提高釉的流动性和釉面光泽度,但用量过高会使釉结晶,导致釉料失透,形成无光釉。 CaO 以方解石和石灰石形式引入,虽能够烧制出釉色较为纯正的青釉,但发色不稳定、重复性差,原因在于方解石和石灰石在还原气氛中烧成时容易吸烟从而影响釉料烧成后的效果,但以方解石引入较石灰石效果稍好,且以方解石引入时釉层中易出现古青釉釉层中的细小气泡。有研究证实^[15]:这类小气泡的存在可以使得汝青釉釉面具有莹润效果; CaO 以白云石引入,虽然稳定性较好,不易吸烟,但白云石引入 CaO 的同时又引入了影响 Fe^{2+} 发色的 MgO ,因此,釉料烧成后出现发色不够纯正的结果;硅灰石是所有含钙矿物中,在还原气氛下最不易造成吸烟的矿物,并且硅灰石的引入更加有利于 Fe^{2+} 的发色,因此通过硅灰石

引入 CaO ，易获得发色稳定且釉色良好的青瓷釉料^[16]。

此外汝瓷的釉是石灰釉，烧成温度不能太高，否则就会严重流釉。汝瓷釉的烧成温度范围极窄，同窑不同窑位稍有温差就呈现不同的颜色，所以烧制御用器时改用小窑炉目的在于减少温差。汝瓷的釉色分为天青、粉青、月白、卵青（俗称鸭蛋青）、豆青、灰青（艾青）、虾青等，不同色调的釉，它们的质感也不相同。汝瓷各种色调的釉均为同一类型的配方。实验表明^[17]：汝瓷釉色调的深浅与烧成温度和烧成气氛密切相关。烧成温度在 1150°C 以下，釉呈月白色，具有完全失透感；烧成温度提高到 $1180\sim 1200^{\circ}\text{C}$ ，釉呈淡天青色或天青色，具玉质感；烧成温度提高到 1200°C 以上，釉呈豆青、灰青或虾青色，具玻璃质感。呈色取决于烧成气氛，气氛的性质则决定釉内所含铁质的价态，还原气氛弱，青釉中的铁大部分为三价铁状态，釉色呈黄色或青中带黄；还原气氛强，铁大部分为二价铁状态，釉色就呈美丽的青色。如果还原程度恰到好处，就呈淡天青色；如果还原不足，就呈豆青色；如果还原过度，就呈灰青或虾青色。而汝青釉的呈色及釉面质量不仅与原料中的铁质含量有关^[18]，而且还与坯釉配方、气氛制度、釉层厚度、釉层均匀度多方面因素有关，特别是釉中铁含量和烧成还原焰强度是主要影响因素^[19]。

3 实验内容

3.1 实验原料及化学组成

本实验采用钾长石、龙岩高岭土、石英等原料配制汝青釉，在保证釉面效果的基础上选用应用性广且价格低廉的原料，减少化工原料的添加，从而减低成本。实验所用原料化学组成如表 3-1 所示

表 3-1 原料的化学组成(wt%)

Table 3-1 Chemical composition of materials (wt %)

原料成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	I.L
钾长石	69.50	17.82	0.32	2.00	0.10	4.71	4.60	0.4
高岭土	48.17	36.2	0.57	0.05	0.16	1.18	0.56	12.43
白云石	—	—	—	30.4	21.7	—	—	45.1
方解石	0.72	0.26	0.02	54.22	2.12	0.12	0.12	43.04
石英	97.3	0.74	0.03	0.01	0.01	0.45	0.76	0.27
滑石	66	1.29	0.15	0.2	31.9	0.08	0.07	5.32

各种原料在釉中的作用

(1) 钾长石

钾长石在釉料中是主要熔剂，高温黏度大、熔融温度范围宽，釉面光泽度好，能降低釉的热膨胀系数，提高釉的弹性，对热稳定性有利，但用量不能太高，用量太高也会增加热膨胀性，引起釉的开裂。

(2) 龙岩高岭土

高岭土在陶瓷中的作用是引入 Al₂O₃，有利于莫来石的生成，提高其化学稳定性和烧结强度，在烧成中高岭土分解生成莫来石，形成坯体强度的主要框架，可防止制品的变形，使烧成温度变宽，还能使坯体具有一定的白度。

(3) 石英

在釉料中二氧化硅是生成玻璃质的主要成分，增加釉料中石英含量能提高釉的熔融温度与黏度，并减少釉的热膨胀系数。同时它是赋予釉以高的力学强度、硬度、耐磨性和耐化学侵蚀性的主要因素。

(4) 方解石

方解石在釉料中是一个重要原料，在釉中能增大釉的折射率，因而提高光泽度，并改善釉的透光性。但在釉料中配合不当，则易出现乳浊现象，使用量过高时，易引起阴黄、吸烟。

(5) 滑石

滑石在陶瓷中一般作为溶剂使用,可降低烧成温度,在较低的温度下形成液相,加速莫来石晶体的生成。同时扩大烧结温度范围,提高白度、透明度、力学强度和热稳定性。在陶瓷釉料中加入滑石可改善釉层的弹性、热稳定性,扩大熔融范围。

(6) 白云石

在高温下白云石是强的活性助熔剂,可提高釉熔体的流动性;可促进坯釉中间层的形成,从而减弱釉面的龟裂,提高釉面硬度和釉面耐磨性。但在慢冷下釉中会析出少量的针状莫来石。

(7) Al_2O_3 粉

Al_2O_3 能改善釉的性能,提高化学稳定性、硬度和弹性,并能降低釉的热膨胀系数。可通过调整 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 摩尔比来控制釉的光泽,在明亮的光泽釉中, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 摩尔比在 6-10 之间;在无光釉中为 3-4 之间。增加的 Al_2O_3 的含量,能获得好的无光效果。

(8) Fe_2O_3

Fe_2O_3 在该实验中用作着色剂,在 Fe_2O_3 低含量范围内,釉色受烧成温度与窑炉气氛影响比较大。随着 Fe_2O_3 含量的增加,釉色色调加深,直至呈现墨绿和墨黑色。

3.2 实验所用仪器与设备

实验所用仪器与设备如表 3-2 所示

表 3-2 实验仪器与设备

Table3-2 Experiment instruments and equipment

仪器设备名称	型号及规格	生产厂家	备注
电子天平	JM-B10002	诸暨市超泽衡器设备有限公司	d=0.01g
搅拌机	JW09A-4	江西微分电机厂	电压 330V
电热鼓风干燥箱	102-2 型	上海无线电一厂	电压 220V
快速球磨机	HHS3P-M	欣灵电气股份有限公司	—
液化汽烧梭式窑	—	中国轻工业陶瓷研究所	—
全自动白度计	WSD-3C	北京康光仪器有限公司	电压 220V

此外还用到石膏模具、小刀、沙纸、海绵、一次性塑料杯、标签纸、量筒(100mL)等工具。

3.3 坯、釉的工艺流程

本实验坯、釉料制备的工艺流程见图 3.1、图 3.2:

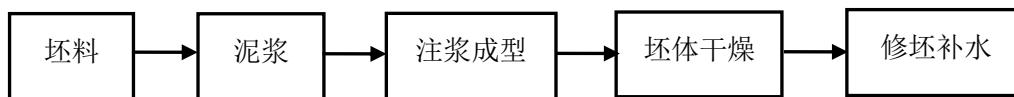


图 3.1 坯体的制备流程

Fig.3.1 blank preparation process

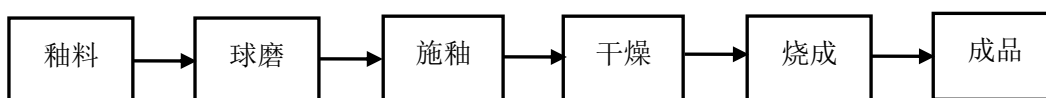


图 3.2 釉料的工艺流程

Fig.3.2 glaze process flow

实验工艺参数

1、料:球:水=1:2:0.7

2、球磨时间: 10min

3、施釉厚度: 0.8mm~1.2mm

4、烧成周期: 14h

5、烧成气氛: 还原气氛

6、施釉方法: 浸釉或淋釉

7、烧成制度: 本课题所有样品均在科院校办工厂内的液化汽烧梭式窑中烧成, 实验中最高烧成温度在 1280℃—1290℃之间, 该梭式窑的烧成周期约为 14h, 烧成曲线如图 3.3 所示:

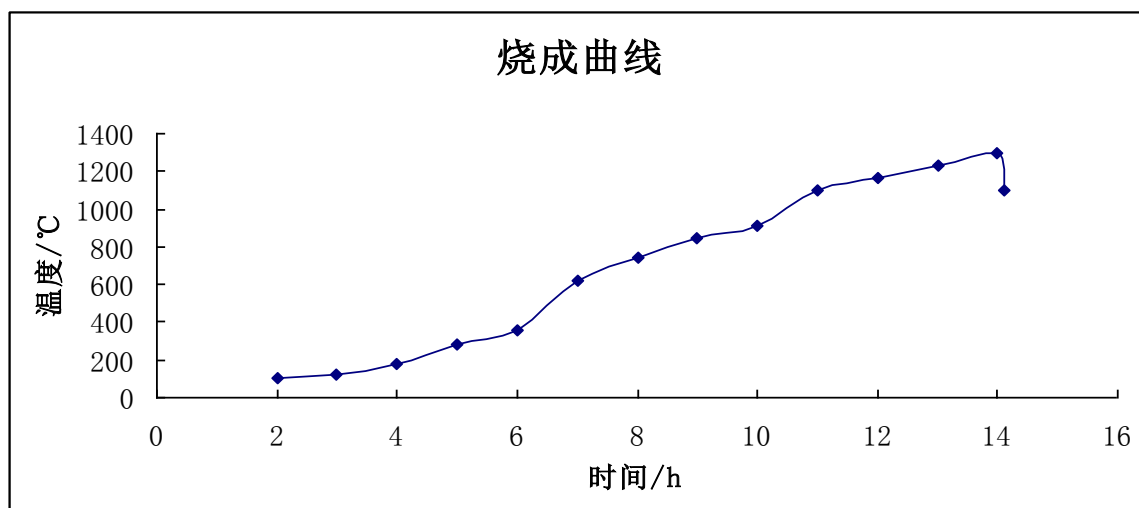


图 3.3 烧成曲线

Fig.3.3 Firing curve

3.4 实验过程

3.4.1 汝青釉的探索性实验

通过查阅相关资料，本课题进行探索性实验配方如表 3-3 所示：

表3-3 探索性实验

Table 3-3 Preliminary exploratory experiment

化学组成	钾长石	高岭土	白云石	方解石	石英	滑石	Al ₂ O ₃ 粉	Fe ₂ O ₃
含量 (wt%)	43.45	29.93	5.34	14.52	1.74	5.02	5.5	0.9

3.4.2 硅铝比对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，考察了不同的硅铝比对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-4 所示：

表 3-4 硅铝比的单因素实验

Table3-4 The single factor experiment of Si/Al

实验编号	硅铝比
G-1	3.0
G-2	4.0

3.4.3 Fe₂O₃ 对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，，考察了 Fe₂O₃ 的加入量对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-5 所示：

表 3-5 Fe₂O₃ 的单因素实验

Table3-5 The single factor experiment of Fe₂O₃

实验编号	Fe ₂ O ₃ (wt%)
T-1	0.9
T-2	1.0
T-3	1.1
T-4	1.2
T-5	1.3
T-6	1.4

3.4.4 白云石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，考察了白云石的加入量对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-6 所示：

表 3-6 白云石的单因素实验

Table3-6 The single factor experiment of dolomite	
实验编号	白云石 (wt%)
B-1	4.34
B-2	5.34
B-3	6.34

3.4.5 方解石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，考察了方解石的加入量对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-7 所示：

表 3-7 方解石的单因素实验

Table 3-7 The single factor experiment of calcite	
实验编号	方解石 (wt%)
F-1	13.52
F-2	14.52
F-3	15.52

3.4.6 滑石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，考察了滑石的加入量对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-8 所示：

表 3-8 滑石的单因素实验

Table3-8 The single factor experiment of talc	
实验编号	滑石 (wt%)
H-1	4.02
H-2	5.02
H-3	6.02

3.4.7 工艺制度对汝青釉釉面效果的影响

根据上述实验调整后的配方，采用正交实验法考察了工艺制度对汝青釉釉面效果的影响，实验安排如表 3-9 和表 3-10 所示：

表 3-9 水平因素实验

Table3-9 levels Factor experiment				
因素	1	2	3	4
水平	球磨时间 (min)	加水量(mL)	Fe ₂ O ₃ (g)	淋釉层数(层)
1	10	65	1.2	1
2	15	70	1.3	2
3	20	75	1.4	3

表 3-10 正交实验

Table3-10 orthogonal experiment				
列号	1	2	3	4
实验编号	球磨时间 (min)	加水量(mL)	Fe ₂ O ₃ (g)	淋釉层数(层)
Z-1	1 (10)	1 (65)	1 (1.2)	1
Z-2	1	2	2	2
Z-3	1	3	3	3
Z-4	2 (15)	1	2 (1.3)	3
Z-5	2	2 (70)	3	1
Z-6	2	3	1	2
Z-7	3 (20)	1	3 (1.4)	2
Z-8	3	2	1	3
Z-9	3	3 (75)	2	1

3.5 性能表征

利用色差仪测试陶瓷釉面三个表征色调的数据：L、a、b 值。L 值表示釉面的明度值，L 越高，表示釉面越明亮（通常所讲越白）；L 值越低，表示釉面越暗（通常所讲越黑）。a 值表示釉面的红、绿色调，a 值大于 0 时，表示釉面颜色为红色调，且数值越大，表明色调越偏红；反之，a 值小于 0 时，表示釉面颜色为绿色调，且数值越小（负数），表明色调越偏绿。b 值表示釉面的黄、蓝色调，b 值大于 0 时，表示釉面颜色为黄色调，且数值越大，表明色调越偏黄；反之，b 值小于 0 时，表示釉面颜色为蓝色调，且数值越小（负数），表明色调越偏蓝。

4 结果分析与讨论

4.1 硅铝比对汝青釉釉面效果的影响

在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下，硅铝比对汝青釉釉面效果的影响所测出的 Lab 值如表 4-1 所示，对应的釉面效果见图 4.1:

表 4-1 硅铝比的单因素实验

Table4-1 The single factor experiment of Si/Al

实验编号	硅铝比	L	a	b
G-1	3.0	77.25	-5.36	2.40
G-2	4.0	81.42	-7.18	2.54



G-1

G-2

图 4.1 样品对比

Fig.4.1 Sample contrast

从图 4.1 和表 4-1 可以看出，随着硅铝比的增大，釉面效果从无光到有光的变化，绿色调的数值在增大。这主要是由于随着硅铝比的增大，釉料中的 SiO_2 含量增多， SiO_2 在高温熔融状态下形成玻璃相，使 G-2 的玻璃相多，使得釉面光泽度增强。另外 G-2 釉的绿色调的数值从 5.36 增加到 7.18，这是因为在 Fe_2O_3 加入量相同的情况下，还原后转化成 FeO ，而 G-2 的玻璃相多，使釉面更显绿色。

4.2 Fe_2O_3 对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 1280℃~1290℃的还原气氛下， Fe_2O_3 的加入量对汝青釉釉面效果的影响所测出的 Lab 值如表 4-2 所示，对应的釉面效果见图 4.2:

表 4-2 Fe_2O_3 的单因素实验Table4-2 The single factor experiment of Fe_2O_3

实验编号	Fe_2O_3 (wt%)	L	a	b
T-1	0.9	77.04	-5.36	2.34
T-2	1.0	71.68	-7.05	2.92
T-3	1.1	69.48	-7.81	3.65
T-4	1.2	70.26	-9.24	4.40
T-5	1.3	68.60	-9.86	5.51
T-6	1.4	68.42	-9.87	5.87

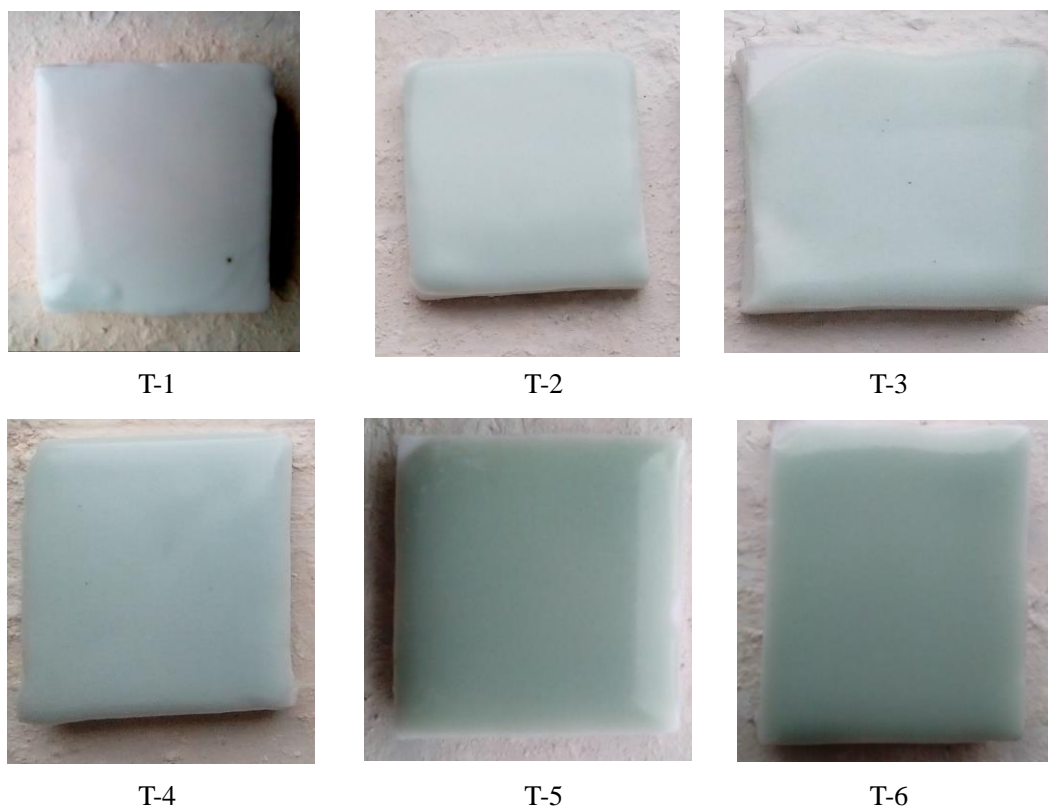


图 4.2 样品对比

Fig.4.2 Sample contrast

从表 4-2 可以看出,随着 Fe_2O_3 含量的逐渐增加, L 值逐渐减小, a 绿色调的数值逐渐增大, b 黄色调的数值逐渐增大;

在还原气氛下 Fe_2O_3 存在反应 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \longrightarrow 2\text{FeO} + 1/2\text{O}_2$, 随着 Fe_2O_3 含量的增加, Fe^{2+} 增加, 而 Fe^{2+} 是强助溶剂, 所以釉的熔融性能增加, 釉面光亮度增强, 绿色调的数值增大。

黄色调的数值增加, 釉面偏黄, 这可能是由于随着 Fe_2O_3 含量的增加, 釉中的

Fe^{3+} 增加。

从图 4-2 釉的效果图中可以看出，釉面颜色也越来越深。这可能是由于随着 Fe_2O_3 含量的增加，釉中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 都增加，影响了釉的呈色。所以当 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{wt}\%)=1.2$ 时釉面效果较好。

4.3 白云石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{wt}\%)=1.2$ ，球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 $1280^\circ\text{C}\sim 1290^\circ\text{C}$ 的还原气氛下，白云石的加入量对汝青釉釉面效果的影响所测出的 Lab 值如表 4-3 所示，对应的釉面效果见图 4.3:

表 4-3 白云石的单因素实验

实验编号	白云石 (wt%)	L	a	b
B-1	4.34	69.83	-9.41	5.76
B-2	5.34	71.22	-9.33	5.24
B-3	6.34	74.42	-9.77	4.94



图 4.3 样品对比

Fig.4.3 Sample contrast

从表 4-3 可以看出随着白云石的含量逐渐增加，L 值逐渐增大，相对应的图 4.3 样品 B-3 的釉面流动性效果较好。

上述产生的现象可能是因为白云石在高温烧成下是强的活性助熔剂，可以提高釉熔体的流动性，所以当白云石 (wt%) =6.34 时釉面效果较好。

4.4 方解石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方，在 $\text{Fe}_2\text{O}_3(\text{wt}\%)=1.2$ ，球磨时间为 10min，料:球:水=1:2:0.7，烧成温度为 $1280^\circ\text{C}\sim 1290^\circ\text{C}$ 的还原气氛下，方解石的加入量对汝青釉釉面效果的影响所测出的 Lab 值如表 4-4 所示，对应的釉面效果见图 4.4:

表 4-4 方解石的单因素实验

Table4-4 The single factor experiment of calcite

实验编号	方解石 (wt%)	L	a	b
F-1	13.52	69.14	-9.24	5.79
F-2	14.52	71.22	-9.33	4.74
F-3	15.52	73.68	-8.62	6.09

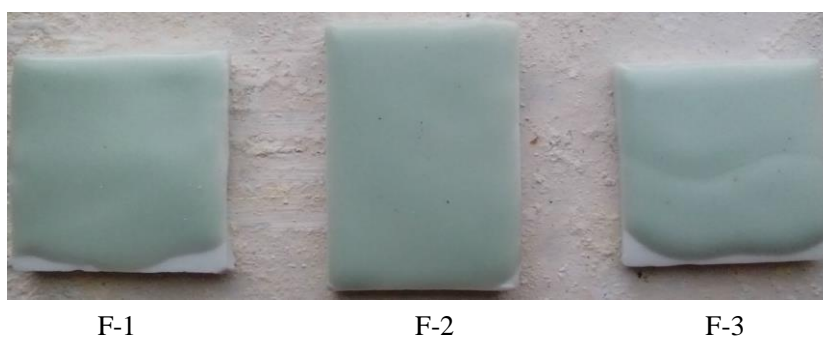


图 4.4 样品对比

Fig.4.4 Sample contrast

从表 4-4 可以看出随着方解石的含量逐渐增加, L 值逐渐增大。

上述产生的现象是因为方解石主要成分是 CaO , CaO 在釉中形成钙长石, 钙长石在高温下熔融, 形成玻璃熔体, 使得釉面光亮度增强。所以当方解石 (wt%)=14.52 时釉面效果较好。

4.5 滑石对汝青釉釉面效果的影响

根据表 3-3 的配方, 在 Fe_2O_3 (wt%)=1.2, 球磨时间为 10min, 料:球:水=1:2:0.7, 烧成温度为 $1280^\circ\text{C}\sim 1290^\circ\text{C}$ 的还原气氛下, 滑石的加入量对汝青釉釉面效果的影响所测出的 Lab 值如表 4-5 所示, 对应的釉面效果见图 4.5:

表 4-5 滑石的单因素实验

Table4-5 The single factor experiment of talc

实验编号	滑石 (wt%)	L	a	b
H-1	4.02	69.68	-9.16	3.95
H-2	5.02	72.22	-9.33	4.74
H-3	6.02	73.35	-8.55	4.48



H-1

H-2

H-3

图 4.5 样品对比

Fig.4.5 Sample contrast

从表 4-5 可以看出随着滑石的含量逐渐增加，L 逐渐增加；但相对应的图 4.5 样品中釉面的光泽度逐渐下降。

上述产生的现象是因为滑石的成分中含有 SiO_2 ，虽然随着 SiO_2 含量增多，在高温熔融状态下形成玻璃相增多，使得釉面光泽度增强。但 SiO_2 同时会影响釉面的无光效果，所以当滑石 (wt%) = 4.02 时釉面效果较好。

4.6 工艺制度对汝青釉釉面效果的影响

根据配方：钾长石 43.45%、煅烧龙岩高岭土 29.93%、石英 1.74%、白云石 6.34%、方解石 14.52%、滑石 4.02%、氧化铝粉 5.5%、氧化铁 1.2%。实验中采用正交实验法探究工艺制度对汝青釉釉面效果的影响如表 4-6 所示：

表 4-6 正交实验

Table4-6 orthogonal experiment

实验编号	球磨时间 (A)	加水量 (B)	Fe_2O_3 (C)	淋釉层数 (D)	青色
Z-1	1 (10)	1 (65)	1 (1.2)	1	6
Z-2	1	2	2	2	7
Z-3	1	3	3	3	6
Z-4	2 (15)	1	2 (1.3)	3	6
Z-5	2	2 (70)	3	1	7
Z-6	2	3	1	2	8
Z-7	3 (20)	1	3 (1.4)	2	6
Z-8	3	2	1	3	8
Z-9	3	3 (75)	2	1	6
K1	6+7+6=19	6+6+6=18	6+8+8=22	6+7+6=19	
K2	6+7+8=21	7+7+8=22	7+6+6=19	7+8+6=21	



图 4.7 最终实验样品图

Fig.4.7 the final experimental sample

5 结论

(1) 本课题汝青釉的研制是要求基础釉面是无光泽的, 所以实验最初应控制 Si/Al 比在 3~4 之间。

(2) 在制备坯体的过程中, 注意坯料与水的比值在 40% 左右, 泥浆搅拌之后确定其流动性。注浆成型的模具应放入低于 80℃ 的烘箱内。

(3) 为防止棕眼的产生, 可以将部分生坯素烧, 让生坯中气体完全排出, 实现二次烧成。再根据实验样品的分析确定最终合适的烧成工艺。

(4) 控制釉料的球磨时间为 20min, 料:球:水=1:2:0.75。为使烧成后的汝青釉釉面平整且流动性较好, 应增大施釉厚度, 厚度以 1mm 左右为佳, 但厚度过高会导致缩釉。

(5) 汝青釉的显色原理与青釉一致, 即釉中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的比例与还原气氛强弱有关, 还原气氛重则 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 比高, 釉色偏蓝, 还原气氛轻则 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 比值低, 釉色偏黄绿。

6 经济分析

6.1 实验所用原料成本核算

本课题汝青的制备中所用原料价格（元/吨）如表 6-1 所示：

表 6-1 原料价格表

Table6-1 Raw material price list

釉用原料	价格（元/吨）
钾长石	1500
龙岩高岭土	2000
白云石	640
方解石	600
石英	1200
滑石	1200
Al ₂ O ₃ 粉	3400
Fe ₂ O ₃	8000

6.2 能耗、水电设备折旧

生产一吨汝青釉（不含水）所需原料的价格为：

$$1500 \times 0.44 + 2000 \times 0.3 + 640 \times 0.06 + 600 \times 0.145 + 1200 \times 0.018 + 1200 \times 0.04 + 3400 \times 0.055 + 8000 \times 0.012 = 1738 \text{ 元}$$

由于料：水的比例是 1：0.75，所以釉浆的成本是：

$$1738 \div (1 + 0.75) \approx 993 \text{ 元}$$

设能耗、水电费、折旧费等共占釉料成本费用的 20%，则每吨釉料的加工费用为：993 × 20% ≈ 200 元

每吨汝青釉料的成本则为：993 + 200 = 1193 元

6.3 税收与利润

通过了解，市场上一般销售的汝青釉价格 50% 水釉 6 元/Kg，大概为 6000 元 / 吨，增值税率为 17%。釉料以 1 吨计算，釉料原料成本为 993（元/吨）：

$$\text{成本费：} 993 + 200 = 1193 \text{ 元}$$

$$\text{毛收入：} 6000 - 1193 = 4807 \text{ 元}$$

$$\text{增值税：} 6000 \div 1.17 \times 0.17 = 872 \text{ 元}$$

$$\text{利润率：} (4807 - 872) / 1193 \times 100\% \approx 330\%$$

7 致谢

本课题是在国家日用及建筑陶瓷工程中心进行，在包启富老师的安排下，我从大四上学期就开始做毕业课题。在前期做课题的时间里，我得到了研究生赵师兄的很多帮助，赵师兄热情的为我提供了一切实验所需的便利条件和他自己宝贵的建议，帮助我顺利地完成了毕业课题的研究工作。

在本次实验中，包启富老师有耐心的给我讲解了该课题的大致实验思路，并在实验的整个过程里老师以一名科研人员的素质来严格要求我，特别是老师的一句：“做实验不是盲目追求结果，更多的是在每次的实验中学会思考”让我现在还记忆犹新，我认为此次课题的完成不仅仅是我个人的成果，当中也凝聚了老师和师兄的心血。在较好地完成了论文课题研究工作的基础上，除了掌握到陶瓷科研的基本方法和研究思路以及传统釉料的制备方法之外，我还学习到专业以外的知识，让我明白不管是在学校还是将要步入社会，都要端正自己的态度，认真严谨的完成每一项任务。借此机会，我想对包启富老师和赵师兄以及所有帮助过我的老师和同学表示最衷心的感谢。

本文仍有不充分、不恰当的地方，望各位老师提出批评并给予指正，谢谢！

8 参考文献

- [1] 杨萍, 刘福田, 周长民.釉面的光泽.山东陶瓷, 1997, 20 (3): 22~25.
- [2] L.M. Schabbach,F. Bondioli,etc.Color in ceramic glazes: Analysis of pigment and opacifier grain size distribution effect by spectrophotometer.Journal of the European Ceramic Society ,2008, 28 :1777 - 1781.
- [3] 李家铎, 戴若冰.陶瓷釉料基本评价系统概述.中国陶瓷工业, 2012, 19 (2): 15~20
- [4] 毛瑞.影响陶瓷材料坯釉适应性的因素分析.广东轻工职业技术学院学报, 2008, 7 (2): 17~23.
- [5] L. Li,S.L. Feng,ect.Study on elemental features of Longquan celadon at Fengdongyan kiln site in Yuan and Ming Dynasties by EDXRF.Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2012, 292 (B) :25 - 29.
- [6] 马铁成 主编.陶瓷工艺学 (第二版).中国轻工业出版社, 2013, 1~485.
- [7] Lin Cheng,Rongwu Li,etc.Analysis of elemental maps from glaze to body of ancient Chinese Jun and Ru porcelain by micro-X-ray fluorescence.Article history,2008,1~4.
- [8] 承焕生, 何文权, 杨福家, 周分廷.宋代汝瓷研究.文物保护与考古科学, 1999, 11 (2): 9~26.
- [9] 马希贵, 马琛.对汝窑的认识.东方博物, 1994, 13~20.
- [10] 许文骏, 王萍.汝官窑青瓷釉工艺研究.中国陶瓷, 2007, 43(8): 73~75.
- [11] 赵小春.对传世汝窑瓷器的几点认识.东方博物, 1994, 14: 51~55.
- [12] 李纪贤.汝瓷之美.文物鉴定与鉴赏, 2011, 5~11.
- [13] 何文权, 熊樱菲.宋代青瓷的胎釉元素成分分析及相关判别.文物保护与考古科学, 2002, 14: 309~318.
- [14] 赵明, 王文奇.恢复汝官窑天青釉瓷的工艺研究.中国陶瓷, 1995, 31 (4) :41~43.
- [15] 叶宏明, 劳法盛, 李国桢等.南宋官窑青瓷的研究.硅酸盐学报, 1983, 11 (1): 19~32.
- [16] 苗立锋, 熊春华, 余雪平等.青釉的组成与制备工艺研究.陶瓷学报, 2013, 34 (4): 455~460.
- [17] 林俊.汝窑与汝瓷艺术.收藏, 2010, 213:43~47.
- [18] 陈全庆, 周宇松, 周少华.宋官窑青瓷釉呈色机理研究.陶瓷学报, 1996, 17 (1): 42~47.
- [19] 金艳, 周玉所.仿宋梅子青釉的研制.山东陶瓷, 2012, 35 (1) :16~18.