

景德镇陶瓷学院科技艺术学院

本科生毕业论文

题目：中温裂纹釉的研制

学 号： 201030451323

姓 名： 叶 超

所 在 系： 工 程 系

专 业： 无机非金属材料工程

指导教师： 董 伟 霞

完成日期： 2014.5.25

摘 要

以钠长石、石英、硅灰石、方解石、龙岩高岭土、白云石为原料，采用氧化气氛在 1200-1230℃之间制备了一种中温裂纹釉。研究了配方组成、制备工艺、烧成制度等对中温裂纹釉的影响，通过研究不同配方组成和工艺制度探讨其开裂的工艺原理和规律，优化出制备工艺完善，发色稳定、裂纹效果良好的中温裂纹釉的配方。

当配方组成 (wt%) : 钠长石 58 石英 21 方解石 10 龙岩高岭土 6 白云石 5
在中温氧化气氛下烧成，获得裂纹修饰纹路良好、粗拙的中温裂纹釉配方。

关键字： 中温裂纹釉 工艺制度 膨胀系数 配方组成

Abstract

With sodium feldspar, quartz, wollastonite, calcite, longyan kaolin, dolomite as raw materials, adopting oxidizing atmosphere between 1200-1230 °C was prepared by a kind of medium temperature glaze cracks. Studied the formula composition, preparation and sintering system on the influence of the temperature cracks in the glaze, by studying the composition of different formulation and process system to explore its process principle and law of crack, to optimize the preparation technology is perfect, hair color stability, medium temperature crack glaze formula of the crack effect is good.

When the formula: sodium feldspar 58% ,quartz 21%, calcite 10%, Longyan kaolin 6 %,dolomite 5% In the firing temperature oxidation atmosphere, decorate good, coarse grain of crack in the temperature crack.

Keyword: The temperature crack glaze,Process system,Expansion coefficient
Formula composition

目 录

摘 要	I
Abstract.....	II
目 录	III
1 前言	1
2 文献综述	2
2.1 裂纹釉简述	2
2.2 裂纹釉的历史与艺术	3
2.3 裂纹釉的工艺	4
2.3.1 施釉方法	5
2.4 裂纹釉中各氧化物的影响	5
3 实验部分	7
3.1 实验的主要原料	7
3.2 实验的主要仪器	7
3.3 实验目的及方案	7
3.4 研究过程及方法的介绍	8
3.4.1 钠长石变化对裂纹釉的影响	9
3.4.2 石英变化对裂纹釉的影响	9
3.4.3 硅灰石变化对裂纹釉的影响	10
3.4.4 高岭土变化对裂纹釉的影响	10
3.4.5 釉料配方的正交实验	11
3.5 坯、釉的热膨胀系数测定	12
4 实验结果分析及讨论	13
4.1 单因素考察实验结果与分析	13
4.1.1 钠长石对裂纹效果的影响	13
4.1.2 石英对裂纹效果的影响	14
4.1.3 硅灰石对裂纹效果的影响	16
4.1.4 龙岩高岭土对裂纹效果的影响	18
4.2 正交实验的结果与分析	19
4.3 工艺条件对裂纹釉的影响	24
4.3.1 球磨时间对裂纹釉釉面效果的影响	24
4.3.2 烧成温度对裂纹釉的影响	25
4.3.3 高火保温时间对裂纹釉的影响	26
4.3.4 釉层厚度对裂纹釉的影响	27

5 结论	28
6 经济分析	29
6.1 单位样品的原材料成本核算	29
6.2 能耗、水电设备折扣	29
6.3 税收与利润	29
致 谢	30
参考文献	31

景德镇陶瓷学院毕业设计任务书

院（系） 科技艺术学院工程系

2013 年 10 月 21 日

专业	无非	班级	10 级（3）
学生姓名	叶超	指导老师	董伟霞
题目	中温裂纹釉的研制		
主要研究内容和设计技术参数：			
1，配方组成对中温裂纹釉效果的影响。			
2，制备工艺对中温裂纹釉效果的影响。			
3，烧成制度对中温裂纹釉效果的影响。			
基本要求（含成果要求）：			
1，通过研究不同的配方组成和工艺制度，获得良好的中温裂纹釉。			
2，通过调整坯釉膨胀系数差，获得良好的中温裂纹釉。			
3，通过显微结构分析，解释中温裂纹釉与工艺因素间的关系。			
工作进度计划：			
第 1-2 周：研讨实验安排，查找资料，准备实验用料及工具			
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			
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			
第 7-10 周：工艺实验结束，总结工艺实验数据与结果分析			
第 11-12 周：样品结构分析（光学显微镜分析、晶相分析、膨胀系数分析）			
第 13-14 周：论文撰写			
第 15-16 周：论文审核打印、递交			

1 前言

裂纹釉最早出现在宋代哥窑，其纹路交错，形成许多细眼者，称“鱼子纹”，其纹路繁密，较为细碎者，称“百圾碎”，“纵有家财万贯、不如汝瓷一片”，可见裂纹釉在人们心目中的地位之高。

裂纹釉的产生，象窑变花釉一样最初也是偶然的。而且釉面龟裂原是烧成中的一种缺陷，但当某些制品的釉面龟裂很特别，纹路均匀、清晰，布满器面，给人一种特别的美感，于是人们就从中得到了启发，从而总结经验，有意识地去造成这种釉面的裂纹，这样就逐渐创造出了裂纹釉。

目前裂纹釉陶瓷釉裂深达坯体，浑厚笨重，但机械强度高，无法长期在墙地砖应用，并且裂纹釉缝隙中容易沉积污垢，难以清理裂纹细小，难以轻易识别；花色简单，除了部分釉（窑变釉）外，难有多重花色。

本文受到启发，在查阅、参考大量资料后，采用钠长石、硅灰石（方解石）、石英、龙岩高岭土、白云石等原料，在中温环境下，复制出当时这种名贵且观赏性颇高的艺术釉，还原这种釉裂的精妙所在。

2 文献综述

为了试验的流畅进行,帮助确定符合要求的中温裂纹釉配方组成,我们参照了以下相关的文献资料,分述如下部分:

2.1 裂纹釉简述

作为陶瓷形态意义的完善和补充,作为艺术釉的裂纹釉在最大限度上提升了作品自身的观赏价值。艺术釉先天具备的独特审美的价值,使其在文化传统中有增添了一部分多表现、多层次的观赏功能,它用恰当的手法让人与自然之间达成了特有的沟通,在本质上实现了统一的结合。

釉面开裂是裂纹釉的基本表现,根据釉面裂纹形态的不同,有百圾碎、冰裂纹、鱼子纹、牛毛纹、流水纹、叶脉纹、蟹爪纹等多种样式。一件产品上只有单独一种裂纹,在现代人眼中,这不免会觉得美中不足,如今琳琅满目的艺术釉家族中各种创新型的艺术釉不断涌现,单一的裂纹釉已经不再能满足现代人吹毛求疵般苛刻的审美要求。

2.1.1 实验的原理解释

1、釉的热膨胀系数大于坯的热膨胀系数 ($\alpha_{\text{釉}} > \alpha_{\text{坯}}$)

当 $\alpha_{\text{釉}} > \alpha_{\text{坯}}$ 时,在坯釉冷却过程中,釉层的缩小大于坯体的缩小,坯体受到了釉层的压缩,受到压应力;而釉受到了坯体的拉伸受到了张应力。当张应力超过了釉的抗张强度,就出现釉层断裂的网状裂纹。热膨胀系数相差越大,龟裂度就越大。当应力较小时,出窑后几天才会产生大的网状裂纹。利用这一性能,可以通过调整釉的配方,使得 $\alpha_{\text{釉}} > \alpha_{\text{坯}}$,从而制得开片良好的裂纹艺术釉。

2、釉的热膨胀系数小于坯的热膨胀系数 ($\alpha_{\text{釉}} < \alpha_{\text{坯}}$)

当 $\alpha_{\text{釉}} < \alpha_{\text{坯}}$ 时,在冷却过程中,坯的收缩大于釉,则釉受到坯体的收缩作用,在釉中产生压应力,如果这种应力,当高于釉的抗压强度时,则容易在釉中产生圈状的裂纹,甚至引起釉层的脱落。换另一个角度,如果这种应力不是非常大的情况下,可以抵消一些由于热应力或外加的机械力产生的张应力,从而提高釉面的抗张强度和热稳定性。因为普通釉面的耐压强度很高,通常大于其抗张强度 50 倍左右,因此,只有当坯釉热膨胀系数相差很大,出现了相当大的压力下才会出现剥落现象。因此,当坯釉的热膨胀系数相差适当大的情况下,也可以制得裂纹釉。

综合上述,坯釉的热膨胀系数差值恰当时,就会产生裂纹釉,由于本实验意在烧制中温裂纹釉,并研究在中温下用裂纹釉进行修饰其他釉面,所以本实验主要探讨第一种机制,而不再考虑第二种机制。

2.2 裂纹釉的历史与艺术

中国是世界上发明瓷最早的国家。瓷器的生产和发展,有着由初级到高级、由生疏到成熟的发展过程。在公元前 16 世纪的商代中期左右,我国古代劳动人民在烧白陶瓷和印纹硬陶器的实践时,不断地改变原料选择与加工,以及提升提高烧成温度和容器表施釉的基准上,就创造了原始的瓷。

宋代是我国陶瓷发展历史上一个繁盛时期。陶瓷史家通常用不同瓷窑体系的形成来概括宋代瓷业的发展形式。宋代瓷器在其配料、制胎、制釉、施釉和锻烧工艺上都有新的提升,并且大多数名窑在釉色、花纹修饰方面形成了特立的风格,造瓷技术基本到达一个完善的地步。根据各窑产品制作工艺、釉色、塑型和修饰的同异,可以大概产生了六大瓷窑体系:北方地域的定窑系、耀州窑系、钧窑系、磁州窑系,南方地域的龙泉青瓷系、景德镇的青白瓷系。

从盛唐时期,汝州所辖临汝、宝丰、鲁山等地有着丰沛的陶土和茂密的树林,从蟒川坡上的严和店到东南的罗圈、桃沟、清凉寺一直到鲁山断店,方圆百里之遥,丰富的方解石、钾钠长石、长石砂岩、叶腊石、莹石、硬质高岭土,软质高岭土、石英等主要原料分布地区广泛,独特不寻常的资源优势,为这里的陶瓷生产提供了快速便捷条件。勤劳睿智的汝州百姓在用泥制作陶器生活容器时,由于火候过高烧制出了不同于以前的陶器产品,表面透彻细腻,色彩诱惑迷人,为世上少见。启发了汝州制陶艺人们的聪颖技能,在不断的摸索和创新中,使这一发现越来越成熟完善。

物产丰沛的汝州本是商人集聚之地,文化积淀由来已久,贞观盛世使汝州经济达到了史无前例的繁荣。汝州陶器的发展促进了陶瓷业的繁荣,由汝州瓷业的兴盛,便可充分说明汝州早在远古时代,造瓷工艺就已经较为先进了。

汝瓷在我国宋代已位居于汝、钧、官、哥、定五大名窑之首,产于河南临汝,隋炀帝大业初年(即公元 605 年),置临汝为汝州,“汝瓷”因此而得名。

汝瓷以名贵玛瑙为釉,色泽天然独特之极,有“玛瑙为釉古相传”的圣誉。随光变幻,观其釉色,犹如“雨过天晴云破处”之奇妙,婉约古朴。器表呈蝉翼纹细小开片,有“梨皮蟹爪芝麻花”之称。北宋时汝瓷器表常攥刻“奉华”二字,京畿大臣蔡京曾刻姓氏“蔡字”以作荣记。宋、元、明、清以来,宫廷汝瓷用器,内库所藏,视若珍宝、与商彝周鼎比贵。被赞誉有“纵有家财万贯、不如汝瓷一片”。

根据古陶瓷学者陈万里推论:“从宋徽宗崇宁五年,上溯到哲宗元祐元年,是汝瓷发展的鼎盛时期。当时,北宋皇室,不惜工本,命汝州制造青瓷,是因定州白瓷有芒,统治者认为不堪用,遂命汝州造青瓷”。汝瓷从此被选为皇室御用珍品,亦称汝官瓷。

北宋时间,北方烧制青瓷中心在汝州(时属直隶州即现今的汝州市),当时(公元 1102—1127 年)汝州辖管郟县、龙兴县(现今宝丰县)、鲁山县、汝阳县(伊阳)、

叶县、襄县等地(据《中国美术史》记载)。汝州四方烧制青瓷器的古窑遗址繁多,形成“汝河两岸百里景观,处处炉火连天”的忙碌景象。南北两大瓷区:北区从北汝河北岸汝州市区张公巷、文庙,大峪乡的东沟、陈家庄至黄窑到临汝镇的坡池;二是以北汝河南岸的严和店起沿东南方向延伸至罗圈、桃木沟和清凉寺、梁洼,一直到段店,方圆 300 多平方公里、上千座窑炉。鼎盛时窑炉超过了 300 多处,影响扩展到内乡、宜阳、新安及黄河以北等地,是汝窑生产历史上的繁荣时期。

作为五大名窑之一的哥窑,伴随着文献资料的不断探索和考古资料的不断补充,对哥窑的认识已逐渐趋于清晰。然而,由于缺乏同一时代文献,并且后代文献经常是一鳞半爪,零星杂碎,有的还自相矛盾,仍无法揭开其神秘面纱,呈现它的原来面目。虽然数十年来关于哥窑相关的考古实物材料不断增加,并且也依据这些实物材料解决了部分悬乎的问题,但在惊喜之后,蓦然回首,人们发现,这些实物材料以及由此而得出的结论往往与文献记录无法一一对应,有些甚至南辕北辙。因此,哥窑问题还是迷雾重重。

现今考证的真正论及哥窑最早的文献资料,要追溯到明代陆深《春风堂随笔》:“哥窑,浅白断纹,号百圾碎。宋时有章生一、生二兄弟,皆处州人,主龙泉之琉田窑,生二所陶青器纯粹如美玉,为世所贵,即官窑之类,生一所陶者色淡,故名哥窑。”陆深,字子渊,上海人,弘治十八年进士,卒于嘉靖二十三年(1545 年)。文章明确表达了哥窑烧造在龙泉的琉田,琉田今名大窑,为龙泉窑的中心产区。

然而,不久后人们发现了一类与哥窑特征相符的,而与龙泉产的哥窑特征有较大区别的器物。这一类器物同样是黑胎开片,紫口铁足,但它的釉色多为炒米黄,亦有灰青;纹线为黑黄相间,俗称“金丝铁线”;用支钉支烧,器型亦不同。由于这一类器物仅故宫博物院、上海博物馆、台湾故宫博物院等有悉数收藏,而不见于墓葬出土,故被称为“传世哥窑”,而称龙泉所产为“龙泉哥窑”。一种观点认为,传世哥窑应为文献所述南宋修内司官窑。其理由是,根据南宋顾之荐《负暄杂录》所述理解,修内司官窑产品质量优于郊坛下官窑,但修内司官窑至今无影无踪,更无从考察其产品面目,而鲜有实物资料仅有传世。

2.3 裂纹釉的工艺

配置裂纹釉的工艺操作,与普通釉基本相同,在进行釉料配方设计时,坯体一定,就应该增大釉的膨胀系数来配料,一般是增加 K_2O 、 Na_2O 或 BaO ,同时减少 Al_2O_3 、 SiO_2 。釉料粒度在万孔筛余 0.01-0.05%;喷釉釉浆比重在 1.45-1.55 波美。施釉厚度 0.8-2mm 为宜。

为了使裂纹清晰可见,可用多种方法着色:

- 1、在施普通釉(也可以是带色的釉)的基础上,再施一层较厚的裂纹釉(可以在普通釉的基础上,添加长石)进行烧成,制品冷却时,上层釉龟裂,而露出下层

釉。

2、在基础裂纹釉中，添加适量着色剂，再经混磨均匀，可制得带色的裂纹釉。

3、将裂纹釉制品浸入钴溶液中，使溶液吸收到裂纹中，然后再烧一次，可制得蓝色的裂纹釉。

4、将砂糖溶液掺入裂纹中，用低温烘烤使之碳化，可制得黑色裂纹的裂纹釉。

2.3.1 施釉方法

一般来说，最为常见的施釉方法有荡釉、喷釉、浸釉、涂刷釉等等。下面简单介绍下：

1、荡釉：主要针对空制品例如壶、花瓶及缸、罐等，对其进行内部施釉，在其他方法无法实现情况下，应采用荡釉法。荡釉操作中，要将一定浓度及量的釉浆注入器皿内部，上下左右摇动，使得釉浆均匀分布在内表面，然后将余浆倒出。荡釉法关键是倒余浆，如釉浆从一边倒出，则釉层厚度不均匀，釉浆流出一边釉层较厚，这样会出现缺陷。因此，在倒浆时要迅速，不摇荡均匀后立刻使瓶口朝下，使釉浆从制品口全圆周均匀流出，釉层才能保持基本均匀。

2、喷釉：喷釉工艺是利用压缩空气将釉浆通过喷枪或喷釉机成雾状。使之粘附于坯体上，坯与喷枪的距离、喷釉压力、喷釉次数及相对密度决定了釉层的厚度。这种方法适用于大型、薄壁及形状复杂的坯体，同样适用于薄壁小件易碎的生坯，如其使用浸釉法，则可能因为坯体吸水过多而出现弱化坍塌。

喷釉的特点：釉层厚度比较均匀，易于控制，与其他方法相比，易于机械化及自动化。

3、浸釉：浸釉法是将坯体浸入釉浆，利用坯体的吸水性或热坯对釉的粘附力而使釉料附着在坯体上，故又叫蘸釉。釉层厚度与坯体的吸水性、釉浆浓度和浸釉时间有关，采用浸釉所用的釉浆浓度比喷釉法稍大。

4、涂刷釉：涂刷釉是指用毛笔或则毛刷浸蘸釉后再刷在坯体表面上。此法多用于在坯体上施几种不同釉料形成特厚层以及补釉工作上。采用此法上釉，釉浆的相对密度通常很大。

2.4 裂纹釉中各氧化物的影响

1、 SiO_2

瓷中的 SiO_2 以“半安定方石英”，“残余石英颗粒”溶解在玻璃相中的“熔融石英”，以及在莫来石晶体和玻璃态物质中的结合状态存在。 SiO_2 是瓷的主要组分，含量很高，直接影响瓷的强度及其他性能。但其含量不能过高，如果超过 70% 接近 80%，瓷器烧后热稳定性变坏，易出现自行炸裂现象，并且会很大程度上降低釉的膨胀系数，不利于坯釉热膨胀系数差值变大，从而不利于产生裂纹。

2、 Al_2O_3

长石和高岭土引入 Al_2O_3 ，该氧化物是成瓷的主要组分，一方面来自于莫来石晶体中，另一方面熔于熔体中以玻璃相存在；同时，它提高了瓷的化学稳定性、物理化学性能、力学性能和白度。含量低于 15%，瓷坯趋于易熔，容易变形。在一段含量范围内有利于提高瓷的烧成温度，降低釉料的热膨胀系数，不利于裂纹产生。

3、 K_2O 与 Na_2O

K_2O 与 Na_2O 大部分由长石引入，它们也是成瓷的主要组成，起到助熔剂的作用，存在于玻璃相中提高釉料的热膨胀系数，加大坯釉之间的热膨胀系数差，更加有利于产生裂纹。一般控制 K_2O 与 Na_2O 含量在 7% 左右，否则不利于保证热稳定性和烧成温度。

2.5 裂纹釉的研究状况

裂纹釉形成具备两个基本原理：第一，在开发釉料配方过程刻意增加碱土金属氧化物，扩大坯釉之间的热膨胀系数差，这样在烧制冷却时，坯釉收缩不一致，产生张应力，张应力超过釉层承受力，釉层出现龟裂，产生裂纹。第二，有意开发干燥收缩大的釉料配方，使生釉层在干燥过程中发生开裂。烧成时，由于表面张力作用，开裂的釉片产生轻度缩釉，形成宽约 0.2-2mm 的裂纹而形成裂纹釉。

传统类的裂纹釉陶瓷釉裂深达坯体，浑厚笨重，但机械强度高，无法长期在墙地砖应用，并且裂纹釉缝隙中容易沉积污垢，难以清理；裂纹细小，难以轻易识别；花色简单，除了部分釉（窑变釉）外，难有多重花色。

新型类的不存在传统中釉层裂缝，产品可以制薄，因为釉层与釉之间结合紧密，是非常适合用于墙地砖生产的。还可在底釉和面釉之间添加色料，通过色料组合获得不同艺术效果。在仿古、艺术系列在建筑行业占据一定地位，裂纹简单易得，减少了研制时间。

3 实验部分

3.1 实验的主要原料

本次实验采用多种原料，釉用原料中高岭土采用龙岩高岭、钠长石、白云石、硅灰石、石英、方解石。

试验中所使用的原料及化学组成如下表：

表 3-1 原料化学组成

Table 3-1 The Chemical composition of raw materials

原料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	I.L
龙岩高岭土	73.74	18.09	-	-	0.14	0.30	0.12	12.30
石英	95.31	1.93	-	-	0.26	0.39	0.40	1.74
钠长石	68.30	19.61	2.50	9.30	0.12	0.28	0.23	0.97
方解石	1.00	0.24	-	-	-	54.66	0.22	43.03
硅灰石	50.43	1.25	-	-	0.13	47.34	0.11	0.43
白云石	1.30	0.32	-	-	0.15	30.42	21.70	46.32

3.2 实验的主要仪器

表 3-2 实验仪器

Table 3-2 The experimental instrument

仪器设备	型号	生产商	备注
电炉	Sx2-12-16	宜兴电炉电器有限公司	
天平	YP202N	上海精密科学仪器公司	感量 0.01 克
恒温干燥箱	NC202-2	江西电热设备厂	最高温度 300 °C
快速球磨机	SFM	山东工业陶瓷机械设备厂	280 转/分
热膨胀仪	KSY-8-16	江苏丁山电炉厂	450 转/分

3.3 实验目的及方案

具体实验方案如下：

实验前期，通过翻阅、浏览有关裂纹釉的相关文献，具体分析裂纹形成的条件、原理以及相关影响因素，考查釉的化学组成、烧成工艺以及实验工艺参数，结合本地域范围内常见原料及实验室具体条件要求，进行试探性的实验，寻找一适宜的坯釉配方及相应的工艺参数。在原料选用过程中，在满足坯釉各工艺性能的前提下，考虑适当的经济因素，尽量选择质量保证、来源稳定、价格低廉的原料，就地取材、适才而用。

实验中期，在已有裂纹釉配方的基础上，通过调整配方，调节各影响因素，控制裂纹釉的具体形态、光泽、呈色及透明状况。在釉层厚度、烧成温度、球磨时间、冷却速率等几个方面，调试出泥浆流动性稳定、触变性良好的中温裂纹釉配方。

对中温裂纹釉的具体要求：釉面裂纹均匀有序、纹路便于染色、染色后釉面各处纹路深浅颜色一致、无不自然裂纹、无针孔气泡、釉面光滑平整、无缩釉、流釉、剥釉、滚釉等明显缺陷，烧成温度控制在 1160–1240℃ 之间。

实验后期，通过对釉有关性能，主要体现在热膨胀系数的测定，结合理论讨论实验中各影响因素的具体作用，获得相对稳定的配方，制备出裂纹效果优良的样品。

3.4 研究过程及方法的介绍

试样的制备工艺流程见下图：

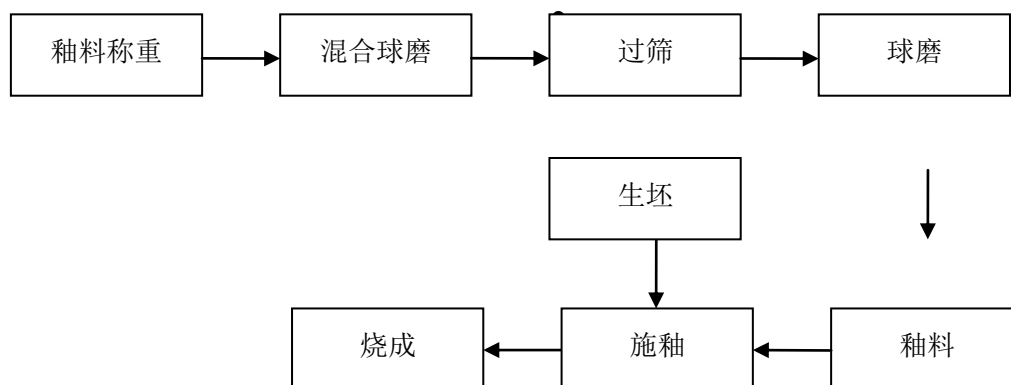


图 2-1 实验工艺流程

Figure 2-1 the experimental flow chart

以上所有配方浆釉比重：1.55-1.65g/cm³

釉浆细度：过 250 目筛

球磨时间：7 分钟

球磨参数：料：球：水=1:2:0.7

施釉方式：浸釉

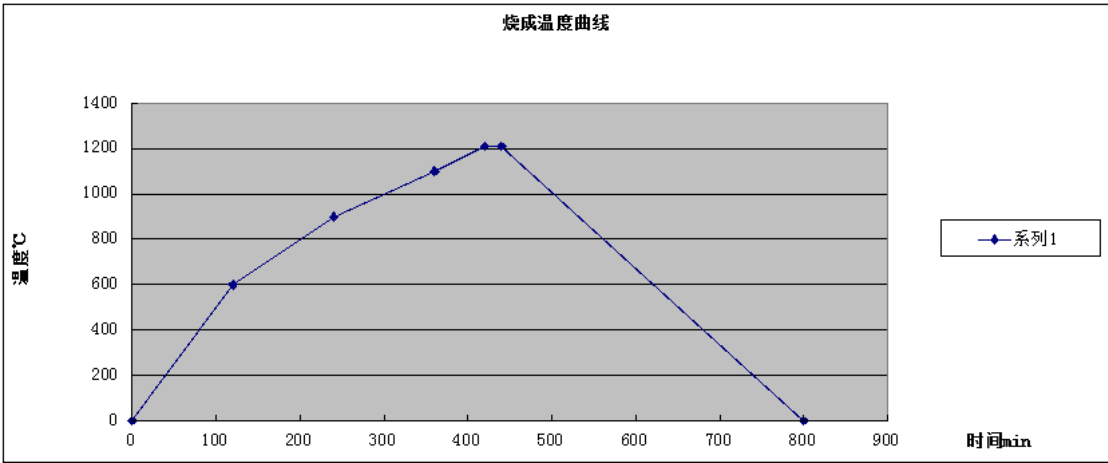
烧成周期：8h

烧成温度：1200℃-1230℃

烧成气氛：氧化气氛

在以下基础配方上进行实验：钠长石 48 石英 25 硅灰石 14 龙岩高岭土 7 白云石 6（以重量百分比为单位 wt%）

烧成曲线见下图：



3.4.1 钠长石变化对裂纹釉的影响

表 4-1 钠长石变化的影响（wt%）

Table 4-1 Effects of sodium feldspar change

实验号	钠长石	石英	硅灰石	龙岩高岭土	白云石
1	48	25	14	7	6
2	52	25	14	7	6
3	56	25	14	7	6
4	60	25	14	7	6
5	64	25	14	7	6
6	68	25	14	7	6

3.4.2 石英变化对裂纹釉的影响

表 4-2 石英变化的影响

Table 4-2 Effect of quartz change

实验号	钠长石	石英	硅灰石	龙岩高岭土	白云石
7	60	13	14	7	6
8	60	15	14	7	6
9	60	17	14	7	6
10	60	19	14	7	6
11	60	20	14	7	6
12	60	23	14	7	6
13	60	24	14	7	6
14	60	27	14	7	6

3.4.3 硅灰石变化对裂纹釉的影响

4-3 硅灰石变化的影响

Table 4-3 Effect of wollastonite change

实验号	钠长石	石英	硅灰石	龙岩高岭土	白云石
15	60	24	8	7	6
16	60	24	9	7	6
17	60	24	10	7	6
18	60	24	11	7	6
19	60	24	12	7	6
20	60	24	13	7	6

3.4.4 高岭土变化对裂纹釉的影响

4-4 高岭土变化的影响

Table 4-4 Effects of kaolin changes

实验号	钠长石	石英	硅灰石	龙岩高岭土	白云石
21	60	25	14	2	6

22	60	25	14	4	6
23	60	25	14	6	6
24	60	25	14	8	6
25	60	25	14	10	6

3.4.5 釉料配方的正交实验

根据实验，釉面的裂纹效果直接与钠长石的含量、方解石的含量、石英的含量三个因素密切相关。因此，选择 $L_9(3^4)$ 正交表来安排工艺试验，每个因素取三个水平，因素水平见下表 3-4-5。

利用 $L_9(3^4)$ 正交表安排试验，试验方案见表 3-4-6。

表 3-4-5 因素水平表

Table 3-4-5 Level of form factors

因素水平	钠长石含量 A	方解石含量 B	石英的含量 C
1	66	12	23
2	68	14	25
3	70	16	27

表 3-4-6 试验方案

Table 3-4-6 experiment scheme

试验号	因 素			
	钠长石含量 A	方解石含量 B	石英含量 C	
	列 号			
	1	2	3	4
正-1	1 (66)	1 (12)	1 (23)	1
正-2	1	2	2	2
正-3	1	3	3	3
正-4	2 (68)	1	2 (25)	3
正-5	2	2 (14)	3	1
正-6	2	3	1	2
正-7	3 (70)	1	3 (27)	2
正-8	3	2	1	3

正-9	3	3 (16)	2	1
-----	---	--------	---	---

3.5 坯、釉的热膨胀系数测定

釉粉压成一定长度的试样后，烧至 1220℃保温 20 分钟后冷却，切割成一定长度的试条。

计算坯釉热膨胀系数的公式：

$$\alpha = \Delta L / L_0(t_1 - t_0) + 0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

公式中：

ΔL — 温度 t_0 — t_1 时试样线性增长量；

L_0 —试样的原始长度；

t_0 —初始温度（25℃）；

t_1 —加热的最后温度

$0.55 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ —玻璃的线性膨胀系数

实验步骤：

- ①将坯粉、釉粉进行压条并烧结。
- ②将烧结的坯条、釉条打磨成长条状。
- ③用游标卡尺对坯条、釉条进行长度及膨胀系数测量

4 实验结果分析及讨论




4.1 单因素考察实验结果与分析

4.1.1 钠长石对裂纹效果的影响

表 4-1 是 不同钠长石含量所制备的样品的釉面效果。

表 4-1 钠长石对裂纹效果的影响

Table 4-1 Effects of sodium feldspar on crack effect

实验号	釉面效果分析	图片
1	光泽度差，没有裂纹出现	
2	光泽度差，没有裂纹出现	
3	光泽度差，有条贯穿釉面的大裂纹，出现部分缩釉	

4	釉面光泽度一般，无裂纹出现，且依然缩釉严重	
5	釉面光泽度一般，有满布釉面的裂纹出现，有缩釉	
6	釉面无光，有布满全部釉面细密的裂纹出现	

由表 4-1 可知从以上 6 组实验中，只有两组出现裂纹效果，釉面主要呈现乳浊、无光效果，并且 3—5 组均出现不同程度的缩釉现象，只有 6 号配方釉面铺展良好，布满细密的裂纹，这说明钠长石在一定范围内有利于裂纹产生，但同时会造成一定程度上的缩釉，导致釉面效果较差，同时，控制施釉厚度一定程度也会帮助减缓这些缩釉现象的发生，综合考虑，我们这里取钠长石为 60wt%。






4.1.2 石英对裂纹效果的影响

在样品号为 5 钠长石含量为 60wt%的基础上，考察了石英含量对釉面效果的影响，其实验结果如表 4-2 所示。

表 4-2 石英对裂纹效果的影响

Table 4-2 Effect of quartz on the crack effect

实验号	釉面效果分析	图片
-----	--------	----

7	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹	
8	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹	
9	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹，小缩釉	
10	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹	
11	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹	

12	釉面光泽度较好，无裂纹，部分缩釉	
13	釉面无光，呈乳浊效果，无裂纹	
14	釉面光泽度较好，无裂纹，部分缩釉	

从以上 8 组实验可知，石英自身单一的变化对裂纹生产，并没有实质上的影响，在小范围内，它对于改善釉面光泽度，控制釉面缩釉起到一定积极的作用，但是对于形成裂纹釉而言，其含量的增加，反而在一定程度上起到阻碍作用，过高的石英会引起釉面小范围缩釉，提高了釉本身的熔融温度，导致釉面生烧，影响配方本身的稳定性。


4.1.3 硅灰石对裂纹效果的影响

在样品号为 5 钠长石含量为 60wt% 的基础上，考察了硅灰石含量对釉面效果的影响，其实验结果如表 4-3 所示。

表 4-3 硅灰石对裂纹效果的影响

Table 4-3 Effects of wollastonite on the crack effect

实验号	釉面效果分析	图片
15	釉面光泽度一般，无裂纹效果	
16	釉面光泽度一般，无裂纹效果	
17	釉面光泽度一般，无裂纹效果	
18	釉面光泽度一般，无裂纹效果，小有缩釉现象	
19	有贯穿全釉面裂纹一条，釉面乳浊	

20	釉面光泽度一般，无裂纹效果	
----	---------------	---


由以上 6 组实验，我们得到的信息：硅灰石这种原料本身不错的弹性模量，对釉面铺展的作用毋庸置疑，但是，它对形成裂纹釉的危害也是非常明显的，除 19 号实验以外，都无裂纹产生（19 号实验裂纹形成的原因有待考证），硅灰石（ $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ）中含有 SiO_2 ，熔融温度明显升高，逐渐偏离我们中温的实验要求。

4.1.4 龙岩高岭土对裂纹效果的影响

表 4-4 龙岩高岭土对裂纹效果的影响

Table 4-4 Effects of Longyan kaolin on crack effect







实验号	釉面效果分析	图片
21	釉面乳浊无光，无裂纹	
22	釉面光泽度一般，无裂纹	




23	釉面光泽度一般，无裂纹	
24	釉面光泽度一般，无裂纹	
25	釉面光泽度一般，无裂纹	

由上表信息，我们发现高岭土的变化对釉面的影响比较小，光泽度方面基本保持不变，在都没有出现裂纹效果的情况下，我们基本判定高岭土含量的变化对于形成裂纹釉的影响时非常小的，它只是在配方中起到粘结和保持泥浆稳定性的作用，含量不宜过高，否则会导致泥浆性降低，在上釉时不容易控制釉层的厚度，对准确判断釉面性质产生负面作用。

4.2 正交实验的结果与分析

配方号	效果分析	图片
-----	------	----

正 1	釉面部分出现不均匀裂纹，裂纹效果一般	
正 2	釉面效果光滑，有稀疏的小范围裂纹	
正 3	釉面光泽，釉面一线出现较粗大裂纹一条	
正 4	釉面光滑无明显裂纹	
正 5	釉面光泽，有稀疏的大裂纹效果	
正 6	釉面光滑明显无裂纹	

正 7	釉面光泽度一般，釉面有少量裂纹	
正 8	釉面光泽度一般，有贯穿釉面的大裂纹出现	
正 9	釉面光泽度良好，釉面出现蛛网状裂纹	

为便于计算，评分公式为：

$$\text{综合评分} = \text{釉面光泽} \times 3 + \text{裂纹大小} \times 3 + \text{裂纹明显程度} \times 4$$

公式中有四个评分指标现规定每个指标的满分为 10 分，然后请 3 位同学根据四个指标对各组实验结果试片打分取其平均值作为综合评分，计算结果写在表上最后一列，如表 4-5 所示。

表 4-5 正交实验施釉实验样本外观

Table 4-5 Orthogonal experimental glaze samples appearance

实验号	钠长石含量 A	石英含量 B	硅铝比 C	方解石含量 D	釉面光泽	裂纹大小	裂纹明显程度	综合评分
Z1	1(66)	1(23)	1(9.2781)	1(12)	4	5	6	51
Z2	1	2(25)	2(10.189)	2(14)	4	3	4	37
Z3	1	3(27)	3(11.355)	3(16)	4	3	3	33
Z4	2 (68)	1	2	3	5	1	1	17

Z5	2	2	3	1	7	7	8	74
Z6	2	3	1	2	6	3	3	39
Z7	3(70)	1	3	2	6	3	3	39
Z8	3	2	1	3	7	7	6	66
Z9	3	3	2	1	6	8	6	66
K_1	121	107	156	191				
K_2	130	177	120	115				
K_3	171	138	146	116				
$\overline{K_1}$	40.3	35.7	52	63.7				
$\overline{K_2}$	43.3	59	40	38.3				
$\overline{K_3}$	57	46	48.7	38.7				
R	16.7	23.3	12	25.4				

为了得出各个因素对油滴釉综合得分的影响，根据各个因素的 $\overline{K_1}$ $\overline{K_2}$ $\overline{K_3}$ 值绘制各因素对综合指标的影响图如图 4-6：

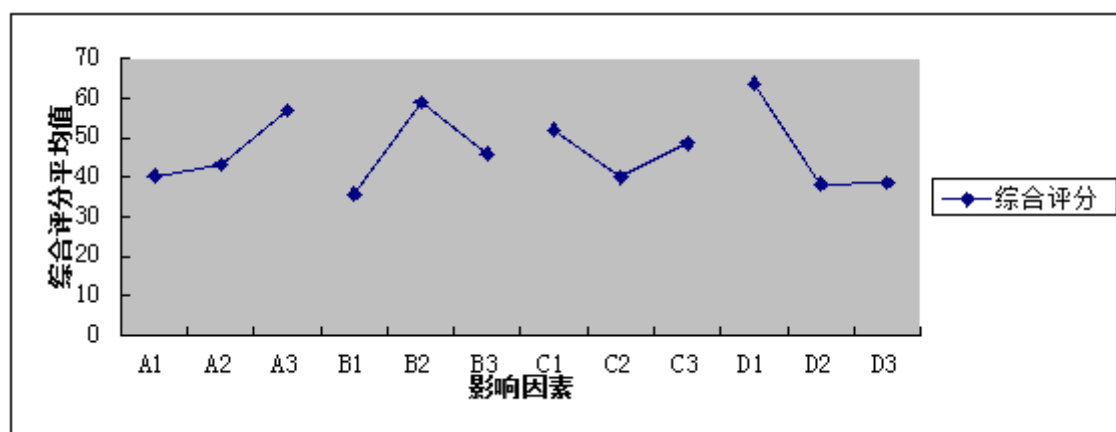


图 4-6 各因素对综合指标的影响

Fig. 4-6 Influence of factors on comprehensive index

各因素对釉面综合效果的影响如下：

石英：通过以上大量实验，在确定其他组分含量不改变的情况下，单独改变石英含量，考察石英含量的变化对釉的热膨胀系数的影响。参考理论原理，我们了解到，石英在釉中转变成玻璃态时具有最小的热膨胀系数，因而 SiO_2 含量高的釉必定具有较低的热膨胀系数。因此，釉的热膨胀系数随着玻璃态二氧化硅量的增加而减小。此外，随着石英含量的上升，釉本身的熔融温度釉一定提高（在本次实验时，

釉面出现生烧, 石英含量为 27%), 釉面出现生烧的情况。并且, 随着 SiO_2 含量的上升, 釉的析晶倾向越来越明显, 这是 SiO_2 和 Al_2O_3 在较高温度时反应生成莫来石晶体造成的。

硅铝比: 硅铝比是影响釉面效果的重要因素, 当硅铝比控制是当时可以促进釉的光泽度, 光泽度对于裂纹的观赏性有一定帮助, 光泽度越好越利于裂纹效果的形成。由图 4-6 可知当硅铝比为 9.2781 时釉面综合得分最高。

K_2O 与 Na_2O 对裂纹釉的影响: K_2O 与 Na_2O 主要是由长石引入的, 它们也是成瓷的主要组分, 起助熔剂的作用, 存在于玻璃相中提高釉料的热膨胀系数, 一定程度上扩大了坯釉之间的热膨胀系数差, 更加有利于产生裂纹。一般 K_2O 与 Na_2O 的总量控制在 5% 以下为宜, 否则会急剧地降低瓷的烧成温度与热稳定性。在本次实验中, 通过改变长石的含量来考察 K_2O 与 Na_2O 对釉料热膨胀系数的直接影响。

从第一批实验样品可以看出: 随着钠长石含量由 48% 增加到 68%, 釉面从无裂纹变化到有裂纹, 但不均匀, 再变化到有均匀、密集的裂纹出现, 到出现裂纹但产生流釉。

产生上述情况的分析: K_2O 与 Na_2O 可以很大程度上提高釉的热膨胀系数, 使釉的热膨胀系数大于坯的热膨胀系数, 通过扩大釉层和坯体之间的热膨胀系数差值, 使釉层产生张应力, 当应力达到一定程度时, 由于釉层承受张应力的能力远远小于承受压应力的能力, 便会开裂, 釉层产生的张应力越大, 釉面产生的裂纹越均匀, 越密集。

CaO 对裂纹釉的影响: 在本次实验中, 主要是通过改变硅灰石(方解石)的含量, 来考察 CaO 对釉层热膨胀系数的影响。从第一批实验 4 号配方可以看出, 当硅灰石含量为 14%, 釉面析出细小的钙长石晶体。析晶在相当大的程度上决定于釉层的成分, 碱土金属氧化物 CaO 等越高, 釉层析晶越强烈。因此, 裂纹釉在调制配方中, 应当在一定程度上减少硅灰石的含量, 转而使用方解石进行部分替代。

综上可知各因素最佳组合为: $\text{D}_1\text{B}_2\text{A}_3\text{C}_1$, 热膨胀系数结果如下: 坯条: $L_0=37.92\text{mm}$, $t_1-t_0=795^\circ\text{C}$, $\alpha=6.52\times 10^{-6}$ 釉条: $L_0=32.64\text{mm}$, $t_1-t_0=795^\circ\text{C}$, $\alpha=7.29\times 10^{-6}$, 各因素主次关系为: 方解石>石英>钠长石>硅铝比。为了验证分析的正确性, 进行下一步的验证性试, 就是按照最佳因素组合出来的配方与正交试验中综合效果最好的配方作对比, 进而得到验证。实验结果如下图所示:

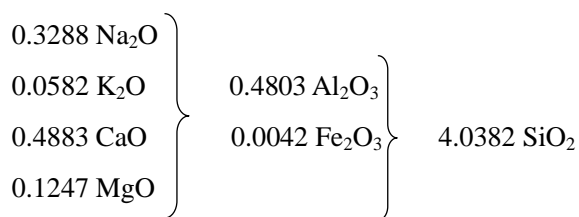
从而得出裂纹釉的最佳配方表如下：

表 4-7 最佳配方表

Table 4-7 table of the best formula

原料名称	钠长石	石英	方解石	白云石	高岭土
所称重量 (Wt%)	58	21	10	5	6

基础釉式为：



其化学组成为：

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
64.219	12.954	1.450	5.394	7.249	1.332	0.1809

4.3 工艺条件对裂纹釉的影响

4.3.1 球磨时间对裂纹釉釉面效果的影响

釉料的颗粒度适宜时，各组分易溶解于釉中，进而均匀分布在釉浆中，有利于产生理想的裂纹效果。在本次实验中，将釉料球磨时间的不同来反映颗粒度对釉面质量及裂纹性质的影响，如图下表：

表 4-7 釉料颗粒度的影响

Table 4-7 the effect degree of fineness

球磨时间	釉面状况
5min	施釉过程中，釉浆较粘稠，易出现小颗粒沉淀，需要不停搅拌
9min	施釉时，釉浆效果较良好，适当搅拌即可，悬浮性良好，组分分布均匀
15min	釉料相对较细，釉浆呈悬浮态，施釉后，迅速干燥釉面出现开裂

由表 4- 表信息可知：当釉料过粗时，釉中各种不同硬度的原料颗粒度相差较大，尤其是原料中的石英，其硬度较其他原料大的多，不容易粉碎，颗粒度大就会造成颗粒迅速沉淀，并直接造成釉料成分不均匀；当釉料过细时，釉浆呈现悬浮状态，施釉后，干燥迅速且出现釉面开裂；釉料颗粒度相对适宜时，施釉时釉浆的悬浮性良好，各个组分易溶解在釉中，保证其均匀分布于釉浆中，有利于形成效果良好的裂纹。

4.3.2 烧成温度对裂纹釉的影响

裂纹釉的烧成时一个比较纷杂的过程，也是裂纹产生的一个影响因素。在烧成阶段，从高温到低温主要的反应涉及碳酸盐的分解、有机物的挥发、碱金属离子与 SiO_2 形成硅酸盐，高温下低粘度的融体与残留混合物颗粒不断作用，石英、长石不断向融体溶解融化，同时釉层不断玻化。在烧成过程中，如果烧成温度稍高于釉的成熟温度时，釉中各个组分充分反应、溶解、玻化程度较高，有利于釉面的光滑和透明，并且有利于中间层的良好发育，形成层次感较好的釉面效果。当烧成温度低于釉成熟温度时，釉中各个组分来不及充分反应、釉层还没有完全玻化、釉面失透、粗糙不平、裂纹较少而且不明显；当温度过高时，釉层粘度小、容易形成气泡、裂纹层次感比较差。

在本次实验烧成温度影响时，分别取烧成温度 1190°C 、 1220°C 两个温度点进行实验，具体结果见下表：

表 4-8 烧成温度的影响

Table 4-8 the effect of the firing temperature

烧成温度 ($^\circ\text{C}$)	釉面状况
1170-1190	釉面无光，粗糙不平，裂纹稀少，纹理不清
1200-1220	釉面光泽晶莹，釉面裂纹效果较好，大小适宜，纹理清晰
1240 以上	流釉严重，釉面光滑几乎没有裂纹

从上表可知：烧成温度为 $1170\text{--}1190^\circ\text{C}$ 时，低于釉的成熟温度，釉中各组分还没来得及充分反应，釉层还没完全玻化，因此，釉面无光，粗糙不平，裂纹稀少且纹路

很不清晰；烧成温度在 1200–1220℃ 之间时，烧成温稍高于釉的成熟温度，釉中各个组分充分反应、溶解、玻化程度比较高，因此釉面光泽晶莹剔透，层次感较好；烧成温度在 1240℃ 以上时，釉面极易产生气泡，坯体和釉层过分反应下，釉中石英颗粒融的较为彻底，使釉中网路形成体增多，结构紧密因而热膨胀系数下降，使得釉面不宜产生裂纹。

在本次实验中，确定釉的烧成温度为 1200–1220℃。

4.3.3 高火保温时间对裂纹釉的影响

在考察保温时间对裂纹釉的影响时，分别取保温时间为 10 分钟、20 分钟、50 分钟三个水平，实验结果参考如下表 4- 所示

表 4-9 保温时间的影响

Table 4-9 the effect of the temperature retention time

保温时间（min）	釉面效果分析
10	釉面裂纹粗大稀少，不均匀
20	釉面裂纹有序排布，均匀有致
50	釉面裂纹细小且稀少

根据实验中保温时间对裂纹效果影响的结果，一定程度上对裂纹产生也具有一定的作用。实验中，当温度升高至最高温度时，保温 10 分钟左右时切断电源，关闭炉门任其自然冷却，结果釉面裂纹稀少、粗大；保温 50 分钟以上时，裂纹同样稀少、粗大；保温时间 20 分钟左右时，釉面有均匀的理想裂纹出现。

由实验可知：保温时间不足，釉中溶解的石英少，析出的方石英的量少，釉层的热膨胀系数减小，坯釉之间的热应力相对较小，釉裂倾向减少。

高火保温时间过长，釉中的方石英量增加，但同时由于坯釉过分反应，降低了

釉层的热膨胀系数，缓和了坯釉之间的热应力作用，从而不宜产生裂纹；保温时间合适时，坯釉之间的热应力可以使得釉面开裂，从而产生均匀有序的裂纹。

综上所述，本实验选择高火保温再 20 分钟，可以获得效果令人满意的裂纹。

4.3.4 釉层厚度对裂纹釉的影响

釉层厚度也是制备裂纹釉的重要工艺条件，釉层厚度同样对釉面龟裂起到重要影响。为探明釉层厚度对裂纹釉的影响，使用浸釉法为主通过浸釉的时间来控制釉层厚度，实验结果表 4- 所示

表 4-10 釉层厚度的影响

Table 4-10 the effect of the glaze thickness

浸釉时间（）	釉面状况
1-2	部分区域有干釉现象
4-5	裂纹均匀、釉面平整
10-15	粗大，直贯穿制品的裂纹

根据实验可知：釉层过薄，液相容易被坯体吸收，使釉面干枯而无光，也就得不到裂纹釉；釉层适宜时，会使釉层内产生微弱应力，减弱釉的弹性，易使釉层开裂；但若釉层过厚，降低了釉的弹性，坯釉之间应力过大，容易出现粗大且直贯的纹路，如胎体强度不够大的话，很有可能出现胎裂，成为废品。

5 结论

通过裂纹釉的试制实验,得到以下结论:

- 1、当钠长石 58%、方解石 10%、白云石 5%、石英 21%、高岭土 6%,烧成温度 1230℃,保温 20min,获得了釉面呈现大开片,开片呈立体状。
- 2、通过实验发现:适量的硅灰石可降低裂纹釉的烧成温度,当硅灰石含量为 8%时釉面开片效果较好,但是当硅灰石的含量为 10%时容易导致釉面不透明。
- 3、钾、钠长石等膨胀系数大的原料是开裂的主要因素,但同时要看配方原料是否搭配合理,是否符合中温要求,因此实验中钾长石就不宜加入。
- 4、要求施釉的釉层厚度适宜易于染色,当浸釉时间为 4s-5s 时,釉面铺展良好,呈现大片开裂。
- 5、坯、釉的膨胀系数差值到达一定要求,是使釉面开裂的重要影响因素。经过实验表明,当坯体的膨胀系数固定为 6.52×10^{-6} 时,坯釉热膨胀系数差达到 0.77×10^{-6} 时,可获得效果良好的裂纹釉。

6 经济分析

6.1 单位样品的原材料成本核算

根据市场价格的了解，我们对实验优先选出的较好的裂纹釉配方中各个原料的成本价格、销售价格及其利润率做一个大概的估算。

表 6-1 原料的价格表

Table 6-1 the price of raw materials

原料	单价（元/吨）	原料	单价（元/吨）
龙岩高岭土	550	钠长石	430
石英	400	方解石	580
硅灰石	860	白云石	460

裂纹釉配方如下：

龙岩高岭土：6 石英：21 钠长石：58 方解石：10 白云石：5

一吨釉料的成本为： $0.06 \times 550 + 0.58 \times 430 + 0.21 \times 400 + 0.1 \times 580 + 0.05 \times 460 = 447.4$

6.2 能耗、水电设备折扣

成本核算中以一吨产品的生产成本为单位，水电费、人工费、折扣费占总费用的 20%，估算出生产每吨裂纹釉的价格（包括能耗、水电设备折扣）为：

$$447.4 / (1 - 20\%) = 559.25$$

6.3 税收与利润

成本核算中以一吨产品的生产成本为单位，税收占总费用的 30%，估算出生产每吨裂纹釉的价格（包括能耗、水电设备折扣、税收等）为：

$$559.25 / (1 - 30\%) = 798.93$$

在目前市场上，性能较好的裂纹釉的价格为 1500 元/吨，计算出所得利润为：

$$1500 - 798.93 = 701.08$$

由于此裂纹釉的生产成本低，利润大，并且具有广阔的市场前景，因而具有一定的市场竞争力。

致 谢

历时将近两个多月的时间终于将这篇论文写完，在论文的写作过程中遇到了无数的困难和障碍，都在同学和老师的帮助下度过了。尤其要强烈感谢我的论文指导老师—董伟霞老师和包启富老师，她对我进行了无私的指导和帮助，不厌其烦的帮助进行论文的修改和改进。另外，在校图书馆查找资料的时候，图书馆的老师也给我提供了很多方面的支持与帮助。在此向帮助和指导过我的各位老师表示最衷心的感谢！

感谢这篇论文所涉及到的各位学者。本文引用了数位学者的研究文献及相关期刊，如果没有各位学者的研究成果的帮助和启发，我将很难完成本篇论文的写作。

感谢我的同学和朋友，在我写论文的过程中给予我了很多你问素材，还在论文的撰写和排版灯过程中提供热情的帮助。

由于个人学术水平和学术修养有限，所写论文难免有不足之处，恳请各位老师和学友批评和指正。

参考文献

- [1] 武同青.苏 敏 中温炻瓷冰裂纹釉的研制 2005 年第 10 期
- [2] 洪兆凯 中温裂纹釉的研究 2008 年第 6 期
- [3] 江 阔.王海滨.吕淑珍 原料对釉面砖膨胀系数的影响 2001 年 6 月 第 2 期
- [4] 胡志强 陶瓷坯釉结合的热膨胀系数计算 1988 年 第 1 期
- [5] 雷丽霞 浅谈裂纹釉的艺术魅力
- [6] 陈坤怀 浅谈开片釉形成的机理 1998 年第 3 期
- [7] 李家驹.缪松兰.马铁成等 陶瓷工艺学. 中国轻工业出版社 2003 年 7 月
- [8] 周玉所.金艳 一种高翘曲性裂纹釉的试制 山东陶瓷.2004 年 6 月 第 27 卷 第 3 期
- [9] 商超兵 浅谈裂纹釉的制备工艺 广东建设报 2004 年 11 月 16 日
- [10] 桑建华.韩红英.石汝军 无光纹片釉试验总结 山东陶瓷 1995 年 第 18 卷 第 3 期
- [11] 陆佩文.无机材料科学基础.武汉理工大学出版社.2003 年 6 月
- [12] 黄家伟.徐建华.张留生.氧化焰烧制纹片釉的研究.江苏陶瓷 1987 年 2 月
- [13] 马铁成.侯雷.马春.陶瓷坯体膨胀系数调节方法的研究 大连轻工业学院学报 1992 年 12 月 第 11 卷 第 3,4 期
- [14] 董伟霞.包启富.陈聪 低成本无光高白裂纹釉的研究 佛山陶瓷 2009 年第 1 期（第 147 期）
- [15] 李家科.刘欣 裂纹釉的研究及残余应力有限元分析 《陶瓷学报》 2011 年 3 月 第 32 卷 第 1 期