



高职高专材料工程技术专业项目式课程丛书

陶 瓷

TAOCI SHAOCHENG JISHU
烧成技术



陆小荣 主编



中国轻工业出版社

全国百佳图书出版单位

高职高专材料工程技术专业项目式课程丛书
“十二五”江苏省高等学校重点教材
工学类：第一类（编号 2013-2-029）

陶瓷烧成技术

陆小荣 主 编
朱永平 主 审

常州大学图书馆
藏书章

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷烧成技术/陆小荣主编. —北京: 中国轻工业出版社, 2014. 1

高职高专材料工程技术专业项目式课程丛书

“十二五”江苏省高等学校重点教材 (编号 2013-2-029)

ISBN 978-7-5019-9445-8

I. ①陶… II. ①陆… III. ①陶瓷—烧成 (陶瓷制造) —高等教育—教材 IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 208858 号

陆小荣 主 编
宋振全 主 审

责任编辑: 李建华 责任终审: 滕炎福 封面设计: 锋尚设计
版式设计: 宋振全 责任校对: 吴大鹏 责任监印: 张可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印刷: 三河市万龙印装有限公司

经销: 各地新华书店

版次: 2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 15.75

字数: 363 千字

书号: ISBN 978-7-5019-9445-8 定价: 39.50 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

120728J2X101ZBW

前 言

近年来,我们通过市场调研与人才需求分析,针对陶瓷企业岗位职业能力的要求,遵循职业教育规律,创新人才培养模式,优化人才培养方案,重新构建了材料工程技术专业的课程体系,参照行业职业标准,组织教学内容,以就业为导向,能力培养为目标,采用项目式教学,组织教师与企业生产一线的工程技术人员一起,编写了高职高专材料工程技术专业项目式课程丛书。本套丛书包括陶瓷原料分析技术、陶瓷坯釉料制备技术、陶瓷成型技术、陶瓷烧成技术、陶瓷装饰技术、陶瓷生产检测技术等。

“陶瓷烧成技术”课程的任务是使学生具备陶瓷生产一线的烧成工岗位所必需的基本知识与基本技能。本书按照实际工作任务、工作过程和工作情景组织教学内容,同时体现以职业能力发展为目标,以工作任务为线索,以职业能力为依据,以典型产品为载体的职业教育课程开发理念,以典型任务引领项目教学。

通过本课程的教学,学生应掌握陶瓷烧成的基本原理与基本过程;掌握隧道窑、辊道窑、梭式窑、电窑等窑炉的操作与控制方法;学会排除烧成过程中的故障;熟悉烧成缺陷的分析和处理;能进行各种窑炉的热工测量。

全书分七个部分,从陶瓷烧成技术基础、隧道窑、辊道窑、间歇窑、电窑、窑炉的热工测量、窑炉用耐火材料等方面,对陶瓷烧成的基本原理与主要设备操作等做了系统介绍。为了便于教学,每部分内容前面有学习目标、知识要求和技能要求,后面配有思考题。

本书适合高职高专材料工程技术专业的教学使用,也可作为中等专业学校和陶瓷企业职工培训的教材。

本书由无锡工艺职业技术学院陆小荣任主编,江西陶瓷工艺美术职业技术学院朱永平任主审。项目1由德化陶瓷职业技术学院池致铎编写,项目4由淄博职业学院杨增玲编写,项目5由四川工商职业技术学院邱春丽编写,项目6由无锡工艺职业技术学院徐利华编写,其余内容由陆小荣编写。江苏省陶瓷研究所有限公司沈培根、安徽含山瓷业有限公司舒小山等参与了本书的编写工作,并提供了许多宝贵的资料和意见。

由于作者水平有限,书中不当之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

编 者
2013年8月

目 录

110	知识点二 重质耐火材料	218
127	知识点三 轻质耐火材料	220
130	知识点四 保温材料	223
134	知识点五 陶瓷纤维	228
141	任务 常用耐火材料主要物理性能测试	232
项目 1 陶瓷烧成技术基础		1
121	知识点一 陶瓷坯体的烧成过程	2
132	知识点二 陶瓷的烧成制度	7
134	知识点三 快速烧成与烧成节能	15
137	知识点四 陶瓷烧成用窑炉	18
127	知识点五 坯体装车与入窑	21
160	任务一 观察原料或坯体烧成前后的各种变化	24
162	任务二 陶瓷企业窑炉情况调研	25
162	思考题	25
项目 2 陶瓷烧成用隧道窑		26
169	知识点一 隧道窑的工作系统与窑体结构	27
169	知识点二 隧道窑预热带结构	32
169	知识点三 隧道窑烧成带的结构	37
173	知识点四 隧道窑冷却带的结构	40
177	知识点五 隧道窑其他结构	43
181	知识点六 现代轻型隧道窑	48
181	知识点七 隧道窑窑内的气体流动	54
182	知识点八 隧道窑窑内的传热	59
186	知识点九 隧道窑的烘烤与调试	62
186	知识点十 隧道窑的操作控制	65
187	知识点十一 隧道窑初步设计计算	68
188	任务一 隧道窑烧成缺陷分析	81
190	任务二 隧道窑烧成常见故障及排除	85
192	任务三 隧道窑的维护与保养	88
202	思考题	90
项目 3 陶瓷烧成用辊道窑		92
210	知识点一 辊道窑的工作系统	93
211	知识点二 辊道窑的窑体结构	95
212	知识点三 辊道窑的燃烧系统	103

知识点四	辊道窑的排烟通风系统	107
知识点五	辊道窑的传动系统	112
知识点六	辊子的性能与选用	119
知识点七	辊道窑的烘烤与调试	127
知识点八	辊道窑的操作控制	130
知识点九	辊道窑初步设计计算	134
任务一	辊道窑烧成缺陷分析	144
任务二	辊道窑常见故障及排除	150
任务三	辊道窑的维护与保养	154
思考题		155
项目 4	陶瓷烧成用间歇窑	157
知识点一	间歇窑的工作过程	157
知识点二	梭式窑	160
知识点三	钟罩窑	165
任务一	梭式窑的装窑操作	165
任务二	梭式窑的操作控制	166
思考题		168
项目 5	陶瓷烧成用电热窑炉	169
知识点一	电热窑炉的特点与分类	169
知识点二	常用电热元件	173
知识点三	电热窑炉的操作与维护	177
知识点四	电阻炉功率的调节	181
任务一	硅碳棒的更换	184
任务二	电炉烧成操作控制	185
思考题		186
项目 6	陶瓷窑炉的热工测量	187
知识点一	温度测量	188
知识点二	压力测量	196
知识点三	流速流量测量	199
知识点四	烟气成分分析	203
知识点五	热工测量报告的编制	208
任务一	使用测温锥或测温环进行温度测定	210
任务二	使用微压计进行压力的测量	210
任务三	使用奥氏气体分析仪进行烟气分析	211
思考题		211

项目7 陶瓷窑炉用耐火材料	213
知识点一 耐火材料的种类与性能	213
知识点二 重质耐火材料	218
知识点三 轻质隔热耐火材料	220
知识点四 窑具材料	223
知识点五 陶瓷纤维	228
任务 常用耐火材料与保温材料的识别	232
思考题	233
附录1 常用燃料的特性	234
附录2 《陶瓷烧成工》国家职业标准(摘录)	239
参考文献	244

知识要求

1. 了解陶瓷制品烧成的基本过程
2. 掌握陶瓷制品在烧成过程中各阶段的物理化学变化
3. 掌握烧成时温度制度、气氛制度、压力制度的制定方法
4. 了解陶瓷生产用窑炉的分类与特点
5. 掌握低温烧成、快速烧成等烧成技术

技能要求

1. 能正确进行装车装车操作
2. 能正确制定烧成制度,绘制烧成曲线

烧成是指陶瓷坯体在相应的窑炉中进行加热处理,使其发生一系列的物理化学变化,形成预期的矿物组成和显微结构,从而形成固定的外形并获得所要求的工序。烧成时坯体将发生脱水、分解、化合等物理化学变化。烧成后制品具有一定的机械强度及使用性能。

陶瓷烧成的窑炉主要有隧道窑、辊道窑、梭式窑等。烧成时的温度制度、气氛制度、压力制度等与产品的质量有直接关系。因此,烧成过程是陶瓷生产中重要的工序之一。



变化与坯体的化学组成有关，但坯料的化学分析只能提供坯料性质的大致情况，不能完全说明问题的本质，因为化学分析是将泥料的化学组成或氧化物表示出来，实际泥料的成分绝大部分不是以氧化物表示的，更准确地说，坯体在烧成过程中的物理化学变化，和许多水高岭土，它们的晶体结构基本相似，但是同一氧化物，在两种不同的矿物组成中所起的作用也不一定相同。

项目1 陶瓷烧成技术基础

学习目标

1. 掌握陶瓷制品在烧成过程中各个阶段的物理化学变化
2. 学会制定陶瓷产品的烧成制度（温度制度、气氛制度、压力制度）
3. 掌握一次烧成、二次烧成、低温快速烧成等烧成技术
4. 了解陶瓷生产常用窑炉情况

知识要求

1. 了解陶瓷制品烧成的基本过程
2. 掌握陶瓷制品在烧成过程中各阶段的物理化学变化
3. 掌握烧成时温度制度、气氛制度、压力制度的制定方法
4. 了解陶瓷生产用窑炉的分类与特点
5. 掌握低温烧成、快速烧成等烧成技术

技能要求

1. 能正确进行装车装窑操作
2. 能正确制定烧成制度，绘制烧成曲线

烧成是将陶瓷坯体在相应的窑炉中进行加热处理，使其发生一系列的物理化学变化，形成预期的矿物组成和显微结构，从而形成固定的外形并获得所要求性能的工序。烧成时坯体将发生脱水、分解、化合等物理化学变化，烧成后制品具有一定的机械强度及使用性能。

陶瓷烧成的窑炉主要有隧道窑、辊道窑、梭式窑等。烧成时的温度制度、气氛制度、压力制度等与产品的质量有直接关系。因此，烧成过程是陶瓷生产中重要的工序之一。

这种烧成形成过多，高温对产品品质有较大的影响。

2. 中温阶段（氧化分解与晶型转变期）

中温阶段是陶瓷烧成过程中最重要的阶段，也是坯体发生物理化学变化的主要阶段。在这一阶段，坯体中的水分蒸发，有机物分解，氧化物开始分解，晶型开始转变，坯体发生收缩，气孔开始形成。这一阶段对坯体的物理化学变化起着决定性的作用。



知识点一 陶瓷坯体的烧成过程

(一) 烧成过程的阶段划分

陶瓷坯体烧成时, 根据不同温度区间的主要作用与主要变化反应可分为如下几个阶段, 见表 1-1。

表 1-1 坯体烧成的四个阶段

烧成过程	主要变化	主要作用	备注
低温阶段	质量降低 孔隙率增加	排除坯体中残余水分	室温 ~ 300℃
中温阶段	结构水被排除 有机物、碳素的氧化 碳酸盐、硫酸盐的分解 铁化合物的氧化 晶型转变	分解与氧化	300 ~ 950℃
高温阶段	氧化分解反应的继续 形成液相、溶解固体 形成新结晶和晶体长大 铁的还原反应 釉的熔融	玻化成瓷	950℃ ~ 烧成温度
冷却阶段	液相过冷凝固 液相结晶 晶型转变	冷却	烧成温度 ~ 室温

在整个烧成过程中, 制品在窑内经历了不同的温度变化和气氛变化, 既有氧化、分解、新的晶体生成等复杂的化学变化, 也伴随有脱水、收缩、密度、颜色、强度与硬度的改变等物理变化。并且这些变化总是相互交错地一起进行。

(二) 影响坯体烧成时物理化学变化的主要因素

影响坯体烧成时物理化学变化的主要因素有坯料的化学组成与矿物组成、坯料的物理状态等。

1. 坯料的化学组成与矿物组成

根据坯料的化学组成, 可以推断坯体在烧成过程中产生膨胀或气泡的可能性, 可以估计坯体耐火度的高低, 也可以推断坯体烧后的呈色等。坯体在烧成过程中的物理化学

变化与坯体的化学组成有关,但坯料的化学分析只能提供坯料性质的大致情况,不能完全说明问题的本质,因为化学分析是将泥料的化学组成用氧化物表示出来,实际泥料的成分绝大部分不是以游离氧化物形式存在,而是各式各样的化合物。更准确地说,坯体在烧成过程中的物理化学变化是取决于泥料的矿物组成。如高岭土和多水高岭土,它们的晶体结构基本相似,但在加热过程中的脱水反应是不相同的。即使是同一氧化物,在两种不同的矿物组成中所起的作用也不一定相同,如游离石英与黏土或长石中的氧化硅,所起作用的性质就不一样。同样是氧化硅,在以不同的晶态(石英、鳞石英、方石英)存在时,会表现出不同的特性。滑石和白云石中的氧化镁,同是一种氧化物,其作用也不一样。

2. 坯料的物理状态

坯体在烧成过程中的变化,很大程度上还决定于坯料的物理状态,如粉碎的细度、混合的均匀性和接触的密切程度等。要获得良好的陶瓷制品,必须充分粉碎,正确配料以及混合均匀。

(三) 坯体在烧成过程中的物理化学变化

1. 低温阶段(水分蒸发期)

坯体在低温阶段主要是排除在干燥中没有排除的残余水分。

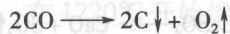
(1) 水分排除 陶瓷坯体的入窑水分一般控制在2%以下,主要是残余水分。这时坯体的气孔率高达25%~40%。入窑水分低时,升温速度可以较快,残余水分容易被排除。日用瓷制品一般体小壁薄,在这一阶段可以快速升温而不至于使产品开裂。

坯体入窑水分较高时,升温速度要严格控制。因为当坯体的温度高于120℃时,坯体内的水分发生强烈汽化,有可能引起过大的破坏应力使制品开裂,这对大型厚壁制品尤其突出。

坯体入窑水分较高所引起的另一弊端是易在坯体表面产生“白霜”缺陷。坯体中的水分往往与窑炉内烟气中的SO₂发生反应,使坯体内的钙盐在其表面生成钙的硫酸盐。硫酸钙的分解温度较高,使瓷器釉面蒙上了一层“白霜”,降低了釉层的表面光泽度。硫酸钙在高温时分解可能造成釉层中严重的气泡缺陷。这一点对含有高可塑性黏土的坯料,由于坯体吸附力强而更为突出。

低温阶段要求加强通风,使饱和了水蒸气的烟气得到及时排除,不致因其温度继续下降至露点,从而使一部分水汽凝聚在制品表面上使制品局部胀大,造成“水迹”或“开裂”等缺陷。

(2) 低温吸碳反应 在低温阶段,由于残余水分的排除,气孔率的增加,烟气中的CO分解时析出的碳素会吸附在气孔表面,其反应为:



这种碳素形成过多,高温时对产品质量有较大的影响。

2. 中温阶段(氧化分解与晶型转变期)

中温阶段坯体发生的物理化学变化主要有黏土中的结构水被排除,有机物、碳素和硫化物被氧化,碳酸盐、硫酸盐发生分解,石英发生晶型转变等。这些变化与温度、升

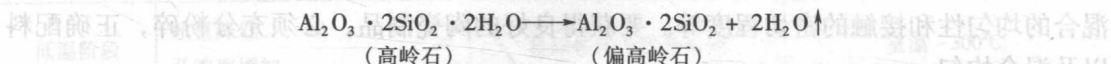


温度、窑内气氛等因素有关。

(1) 黏土矿物结构水的排除 黏土及其他含水矿物的结构水（化学结合水）排除的温度范围随着泥料的矿物组成与矿物结晶完整程度不同而有所不同，几种含水矿物的脱水温度范围如下：高岭石 450 ~ 650℃，珍珠陶土 500 ~ 700℃，蒙脱石 700 ~ 900℃，伊利石 550 ~ 650℃，叶蜡石 600 ~ 750℃，瓷石 450 ~ 700℃。

脱水温度范围与加热速度的快慢有关，在快速烧成时，脱水温度范围特别是脱水的起点要往后推迟。脱水温度还与原料的分散程度有关，原料越细则脱水起点的温度就越低。

陶瓷坯体中含水矿物以高岭石为主，温度在 450 ~ 650℃ 时结晶水激烈排除，失重迅速增加，黏土晶体结构遭到破坏，逐渐失去可塑性，脱水后生成偏高岭石。反应如下：



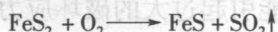
(2) 碳素、硫化物及有机物的氧化 坯体中的有机杂质和碳素，有的来自于原料，有的则来自低温焙烧时未燃尽、沉积在坯体表面上的碳粒。碳素的氧化开始于 400℃ 左右，但在 900℃ 以前很难烧掉，一般要至 900℃ 以上时才能彻底烧清。



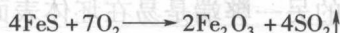
在此阶段如果不将有机物和碳素彻底烧清，到釉层熔融将坯体气孔封闭后，就很难再烧掉，容易形成烟熏、气泡等缺陷。

坯体中也有些硫化物、铁的化合物等杂质，它们在一定的温度下氧化放出 SO₂ 等气体。

如：FeS₂ 在 350 ~ 450℃ 时分解：

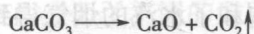


至 500 ~ 800℃ 时进一步反应：

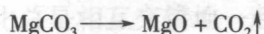


(3) 碳酸盐、硫酸盐的分解 坯体中或多或少都夹杂一些碳酸盐、硫酸盐矿物如石灰石 (CaCO₃)、白云石 (MgCO₃ · CaCO₃) 等。碳酸盐、硫酸盐必须在此阶段分解，分解产物 CO₂ 在釉层封闭之前应逸出完毕，不然将会引起坯泡等缺陷。

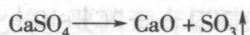
CaCO₃ 的分解始于 550 ~ 600℃，终于 960 ~ 1050℃：



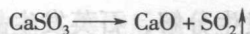
MgCO₃ 的分解始于 400 ~ 500℃，终于 700 ~ 900℃：



CaSO₄ 除在低温 (300℃ 以下) 发生脱水变化外，在氧化气氛下，要近 1300℃ 才大量分解：



如果在还原气氛下，则在 910℃ 开始还原为亚硫酸钙，然后在较高温度下再分解为氧化钙：



(4) 石英的晶型转变 石英在 573℃ 发生晶型转变, 由 β -石英转化为 α -石英, 同时伴有 0.82% 的体积膨胀, 使坯体的体积膨胀, 相对密度下降。此阶段坯体的气孔率较高, 可部分抵消因石英晶型转变所引起的破坏应力。随着温度的升高, 坯体的机械强度也得到提高, 具有一定的强度来抵抗膨胀应力。对于体小壁薄的坯体来说, 石英的晶型转变所引起的破坏应力很小, 但是, 对于大件厚壁制品必须加以重视, 应适当降低升温速度。

3. 高温阶段 (玻化成瓷期)

坯体在高温阶段发生的物理化学变化有结构水的继续排除、氧化分解反应的继续进行、铁的还原与分解、液相生成、新晶相的形成与晶体长大。

(1) 继续排除结构水、继续进行氧化分解反应 某些黏土矿物随着升温速度的提高, 最后一些结构水的排除往往推迟, 甚至 1000℃ 以上才能排完。产生这种现象的主要原因, 一方面是这部分水的 OH^- 与黏土结合较紧密, 另一方面是在加热时, 排出的结构水部分地被吸附在坯体的空隙内, 从而有可能溶解在新生成的液相中, 使其很难排除。在坯体较厚、升温速度较快的情况下, 黏土矿物的脱水温度范围变得很宽。

坯体在氧化分解期的氧化分解实际上是不完全的。由于水汽及其他气体的急剧排除, 在坯体周围有一层气膜, 妨碍氧气继续向坯体内部渗透, 从而使坯体气孔中的沉积碳难以烧尽。

(2) 铁的还原与分解 在 1000 ~ 1100℃ 时, 氧化铁在还原气氛中被还原为氧化亚铁, 呈青白色。其化学反应为:



Fe_2O_3 在氧化气氛中于 1250℃ 开始分解, 至 1370℃ 大量分解:



(3) 生成液相 陶瓷坯釉料中均含有少量的 K_2O 、 Na_2O 、 CaO 、 MgO 、 Fe_2O_3 等熔剂氧化物, 它们在不同的温度下, 能与 SiO_2 、 Al_2O_3 形成各种低共熔物, 例如:

$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ (二硅酸钠), 熔点为 874℃;

$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ (偏硅酸钠), 熔点为 1088℃;

$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ (正硅酸钠), 熔点为 1188℃;

$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (钠长石), 熔点为 1100℃;

$\text{K}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2$ (四硅酸钾), 熔点为 765℃;

$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ (偏硅酸钾), 熔点为 976℃;

$\text{K}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$ (二硅酸钾), 熔点为 1045℃;

$\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ (钾长石), 在 1220℃ 开始熔融;

$\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ (硅酸亚铁), 熔点为 1150℃。

由上可以看出, 坯体在 750℃ 左右开始生成少量的液相。随着温度的升高, 长石等原料熔融, 坯体中的液相逐渐增多。这种液相物质具有溶解石英和黏土颗粒及其他晶体的能力。温度越高, 时间越长, 溶解的量也越多。液相量越多, 冷却后制品中的玻璃相



也越多，透明度就高。长石质瓷中的玻璃相可达一半以上。

(4) 新晶相的形成与晶体长大 高岭土在前一阶段脱水生成偏高岭石后，至 900℃ 以上时分解成游离 Al_2O_3 与 SiO_2 ，至 1100 ~ 1200℃ 时又开始重新结晶为莫来石。



过剩的 SiO_2 则转变为方石英，再与结晶的莫来石晶体一起形成坯体的骨架，而玻璃态的液相则起到胶合作用，并填充所有的空隙，使制品形成一个整体，此时制品达到了瓷化。

所以液相能促使新的硅酸盐结晶形成，能降低再结晶和重结晶的温度，促使坯体较早地瓷化。但如在烧成过程中生成的液相过多，则会引起制品耐火度的降低而增加变形。因此必须控制好坯料中熔剂和杂质的数量、烧成的最高温度以及在此温度下保温的延续时间，以保证坯体在高温中既有足够的液相促进坯体的瓷化，又不会因液相量过多而导致坯体软化变形。

4. 冷却阶段

冷却阶段主要发生液相中的再结晶、液相的过冷凝固和冷却过程中的晶型转变等。

(1) 液相中的再结晶 在冷却过程的开始期间，即由烧成温度冷至 800℃ 左右，瓷坯中处于黏滯状态的液相随着温度的降低而黏度不断增大，此时如果冷却速度缓慢，则液相的黏度变化将不明显。一方面，黏度较小的液相会通过溶解与析晶作用逐渐溶解微细的晶体并在较大晶体上析晶，使细小晶体减少而粗晶体增多。另一方面，釉层也会因冷却速度过于缓慢而引起析晶失透。

(2) 液相的过冷凝固 由烧成温度至 800℃ 左右，在冷却期间如冷却速度加快，则可得坯体中的液相处于黏滯的塑态，对快速冷却引起的应力起缓冲作用，同时克服坯釉析晶的产生，提高釉面光泽。至 800℃ 以下后，坯体中黏滯的液相将随着温度的下降由塑态逐渐转变为固态形成玻璃相。

(3) 晶型转变 冷却过程中也存在晶型转变。其中由 800℃ 冷至 400℃ 是冷却的危险时期。在 573℃ 时， α -石英转化为 β -石英，同样伴有较大的体积变化，并且转化速度相当快。如果冷却过快，极易造成温度不均，不仅形成较大的结构应力，而且瓷坯内部和表面也将出现较大的热应力，从而瓷坯出现炸裂缺陷。

因此，在冷却阶段，从烧成温度冷至 800℃ 左右，只要能保证窑内温度的均匀性及在窑具能承受急冷应力的前提下，冷却速度应尽可能加快。在 800℃ 冷至 400℃ 时，冷却速度必须缓慢，防止制品炸裂。由 400℃ 冷至室温时，瓷坯中的玻璃相已经全部固化，瓷坯内部结构也已定型，承受热应力作用减小，冷却速度可适当加快。

5. 烧成过程中的物理变化

烧成过程中的物理变化主要有坯体质量减轻、体积收缩、气孔率改变、颜色变化及强度与硬度的变化。

(1) 坯体质量减轻 在低温阶段，随着温度的升高，坯体的机械吸附水被排除，坯体质量减轻，坯体的失重等于排出的机械吸附水的质量。至中温阶段由于化学结晶水的排除而急剧失重。此外由于有机物和矿物杂质的氧化与分解并放出大量的气体，也要失去一定的质量。坯体失重的多少，视各种坯料的组成不同而不同，日用瓷坯体在烧成

过程中失重为3%~8%。

(2) 体积的收缩 在低温阶段,由于残余水分的蒸发,体积微有收缩,以后就几乎维持不变。到573℃时, β -石英转化为 α -石英。这种转变将使石英的相对密度降低,体积膨胀,从而影响坯体的体积。但在日用陶瓷坯料中因石英的含量不多,且由于坯体其余部分的收缩而相互抵消,因而危害不大。到900℃以后,坯体内液相逐渐形成,结晶颗粒由于表面张力而互相靠近,因而收缩逐渐加剧,直至烧成时达到最高峰。此时如再继续升温,则又变为膨胀,而使坯体产生过烧。一般日用陶瓷烧成收缩为8%~14%,陶器的烧成收缩为6%~8%。

(3) 气孔率的改变 坯体的气孔率由低温阶段起逐渐增加,到氧化阶段末期达最高峰。随着温度的进一步升高,由于液相的形成和体积的收缩而使气孔率逐渐降低,到达烧成温度时气孔率为最低。如温度继续升高,有过烧现象,气孔率又随着坯体的膨胀而增加。

(4) 颜色的变化 未烧前坯体的颜色决定于坯体中的杂质,有大量有机物存在时呈灰色甚至黑色,有铁质存在时呈浅黄色。到中温阶段,由于有机物的挥发,只有铁质被氧化为 Fe_2O_3 ,所以一般呈粉红色或肉红色。经高温烧成,如果是氧化焰烧成,则随着含铁量的多少呈色从浅黄、奶黄以至红色;如果是还原焰烧成,由于 Fe_2O_3 被还原为 FeO 并生成硅酸亚铁,使颜色变为微微泛青的白色或青色。若坯体过烧,或在高温保火阶段气氛控制不当,则易使 FeO 再次氧化成 Fe_2O_3 而造成制品发黄。

(5) 强度与硬度的变化 随着机械吸附水的消失,坯体强度略有提高。结晶水的排除阶段,强度无显著变化。573℃石英晶型转变时,强度略有下降。750℃以后,强度逐渐增加。在良好烧成情况下,坯体的机械强度应为最高,但如过烧时强度又要下降。

坯体在750℃之前都是非常脆弱的,750℃以后,由于长石-石英玻璃质及莫来石晶体开始形成,硬度逐渐提高,在良好的烧成情况下冷却后,陶瓷的硬度可达莫氏7~8级。

知识点二 陶瓷的烧成制度

陶瓷的烧成制度包括温度制度、气氛制度和压力制度三个主要内容。温度制度和气氛制度是根据不同产品的不同要求来确定的,而压力制度是保证温度制度和气氛制度实现的条件,三者是互相影响相辅相成,共同影响着烧后产品的质量和烧成工艺。

(一) 温度制度

温度制度常用烧成温度曲线来表示,烧成曲线上描述了坯体烧成时由室温加热升温到烧成温度、以及由烧成温度冷却至室温时的温度与时间的变化情况。烧成曲



线的内容包括各阶段的升温速度、最高烧成温度（止火温度）、保温时间和冷却速度。

1. 各阶段的升温速度

通常升温速度与烧成所需的全部时间成反比，而各阶段时间的长短又与窑炉的种类、装窑容量、坯体的性质、坯体的厚度及其所含杂质的种类与数量等有密切关系。

低温阶段实际上是坯体干燥的延续，升温速度主要取决于进窑坯体的含水量、坯体厚度、窑内实际温差和装坯量。当坯体进窑水分高、装坯量大或坯体较厚时，升温太快将引起坯体内部水蒸气压力增高，易产生开裂或炸裂现象。

中温阶段的升温速度主要取决于原料的纯度和坯体的厚度，也与气体介质的流速与火焰性质有关。原料纯且分解物少、制品较薄时，则升温可快些；如坯体内杂质较多且制品较厚，氧化分解费时较长或窑内温差较大，升温速度不宜过快；当温度尚未达到烧成温度以前，结晶水及分解的气体产物排除是自由进行的，而且没有收缩，因而制品中不会产生应力，故升温速度可加快。随着温度升高，坯体中开始出现液相，应注意使碳素等在坯体烧成和釉层熔融前燃尽，不致产品产生气泡。

高温阶段的升温速度取决于窑的结构、装窑密度以及坯体收缩变化的程度和烧成范围宽窄等因素。当窑的容积较大时，升温过快则窑内温差大，将引起高温反应不均匀。坯体中的玻璃相出现的速度和数量对坯体的收缩产生不同程度的影响，应根据不同收缩情况决定升温速度。在高温阶段的主要现象是收缩大，但如能保证坯体受热均匀，收缩一致，则升温较快也不会产生应力而使制品开裂或变形。

2. 最高烧成温度（止火温度）

最高烧成温度是指制品在烧成过程中所经受的最高温度。考虑到各种物理化学反应的进行是一个渐变过程，加上窑内温差、制品内外部的温差及传热过程需要时间，烧成温度实际上是指一定的温度范围。

对于致密陶瓷制品，烧成温度应选定在烧成温度范围之内。达到烧成温度后，制品致密度最大，收缩率最大，气孔率与吸水率最小。因此，烧成温度通常可通过测定试样的相对密度、气孔率或吸水率等来确定。对于多孔陶瓷制品，因不要求致密烧成，达到一定的气孔率及强度后即可终止加热，所以其烧成温度低于其烧成温度。在烧成过程中达到烧成温度的上限后，如果继续升温称为过烧。过烧后坯体的气孔率又会增大，致密度下降，制品的其他性能也发生变化。烧成温度与气孔率、收缩率的关系如图 1-1 所示。

烧成温度的高低取决于坯料的组成、坯料所要求达到的物性指标、坯体开始软化的温度和烧成速度的快慢等因素。对于烧成温度范围宽的坯料，可选择在上限温度和以较短的时间进行烧成；对于烧成温度范围窄的坯料，则宜选择在下限温度并以较长的时间进行烧成。

3. 保温时间

保温是指在烧成过程中达到某一温度范围后保持一段时间，这段时间称为保温时间。

一般在氧化阶段结束将要转入还原之前进行一次保温（中火保温）。在接近止火时

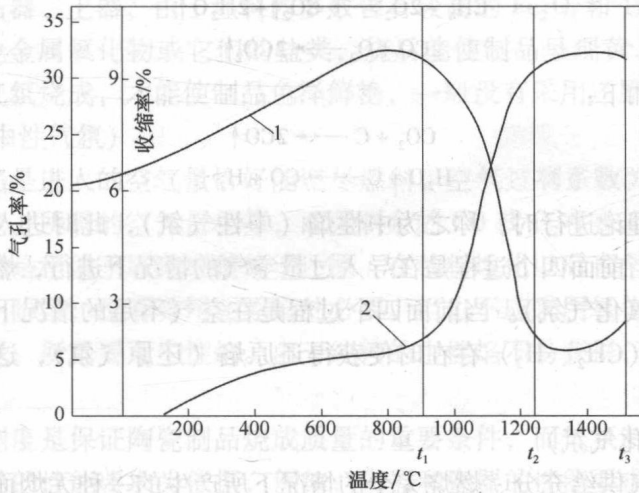


图 1-1 烧成温度与气孔率、收缩率的关系曲线
1—温度-气孔率曲线 2—温度-收缩率曲线

又须进行一次保温（高火保温）。保温的目的是拉平窑内温差，使全窑产品的高温反应均匀一致。保温时间的长短取决于窑的结构、大小、窑内温差情况、坯件厚度及大小、制品所要求达到的玻化程度。通常容积较大的窑，因升温速度较慢，为使全窑坯体达到同一玻化程度，其止火温度可以比操作小窑时稍低，而保温时间必须较长。

4. 冷却速度

冷却是把坯体从高温时的可塑状态降至常温呈岩石般状态的凝结过程。冷却制度是否正确，对制品性能同样有很大的影响。对于厚而大的坯体，如冷却太快，由于内外散热不均匀，会造成应力而引起开裂。一般日用瓷体小胎薄，有较多液相，在高温阶段尚呈可塑状态，高温下的热应力大部分可为液相的弹性和流动性所补偿，加快冷却并无危险。高温快速冷却不仅可以缩短生产周期，提供大量余热，还可以增加釉的透明度与光泽度，也能防止冷却过程中大量冷空气进入窑内而引起已还原的铁质重新氧化，对提高釉面白度有利。

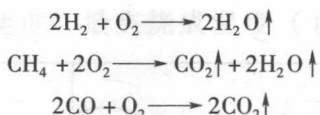
一般瓷器中玻璃相的转变温度为 830 ~ 800℃，低于此温度时塑性消失，并将发生残余石英的晶型转化。无论是液相由塑性状态转变为弹性状态，或是晶型转变，都会使坯体内产生应力。因此，在 800℃ 以下至 400℃ 的冷却时应小心谨慎，适当放慢冷却速度，以防出现惊裂。至 400℃ 以下，热应力变小，冷却速度又可适当加快。

(二) 气氛制度

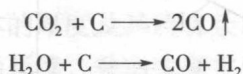
燃料燃烧是一个较复杂的过程，往往同时产生氧化与还原过程：

氧化过程反应如下：





还原过程反应如下：



前四个过程按理论进行时，称之为中性焰（中性气氛），此时进入的空气正好能烧尽所提供的燃料。当前面四个过程是在导入过量空气的情况下进行，燃烧后还残存氧气时便得到氧化焰（氧化气氛）。当前面四个过程是在空气不足的情况下进行，燃烧后还有未燃尽的可燃物（ CH_2 、 H_2 ）存在时便获得还原焰（还原气氛），这时出现后面两个还原过程。

1. 氧化焰（氧化气氛）

氧化焰是在空气供给充分、燃烧完全的情况下所产生的一种无烟而透明的火焰。空气过剩系数大于1，燃烧产物的主要成分是 CO_2 与剩余氧气，不含可燃物质。氧含量在弱氧化焰时为2%~5%，强氧化焰时大于5%。

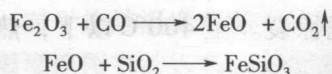
陶瓷制品烧成时，在低温阶段对气氛没有特殊要求，从400~1000℃，要求氧化气氛，而且是由弱到强，到临近大火阶段要以强氧化焰平烧一个时期（称为中火保温），其作用在前期是使坯体内水分蒸发，后期是使有机物与碳酸盐氧化分解完全，使坯体得到正常收缩，为进入还原期打好基础。

在充分供给空气时，如过剩空气量过多，会使升温停滞或温度下降，从而浪费燃料，理想的方法应该是使燃料得到完全燃烧，又尽可能地限制导入过剩空气，但这是很不容易做到的。特别是使用固体燃料时，如不供给过剩空气就很难燃烧充分。一般总是或多或少有一点过剩空气，才能获得完全燃烧。

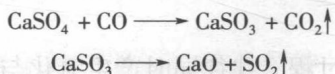
2. 还原焰（还原气氛）

还原焰是在空气供给不充分、燃烧不完全的情况下所产生的一种有烟而混浊的火焰。此时空气过剩系数小于1，为0.7~0.9，燃烧产物内含有的CO和 H_2 在2%~7%（弱还原焰取下限，强还原焰取上限），且无游离 O_2 存在（至多不大于1%）。

还原焰的作用主要使坯釉内所含 Fe_2O_3 （黄色或红色，熔点1560℃）绝大部分还原成FeO（青色，熔点1420℃），在较低温度下与 SiO_2 结合为淡青色的、易熔的低铁硅酸盐，从而促进坯体在较低温度下烧结，并消除了由于 Fe_2O_3 的存在而形成的黄色，使白度得到了提高。反应式如下：



还原焰还可以促使硫酸盐提早分解成 SO_2 与其他气体一起逸出。反应如下：



还原焰对含铁量高的瓷器坯体来说是必不可少的过程，但在坯体含铁量低时也可不用还原焰，始终用氧化焰烧成到底。有时在坯料中加入微量钴盐（0.02%），使钴的青