



iCourse·教材

# 陶瓷工艺学

主 编 于 岩

副主编 黄晓巍 任 强



高等教育出版社



iCourse · 教材

# 陶瓷工艺学

主 编 于 岩

副主编 黄晓巍 任 强

## 内容提要

本书是与“爱课程”网上由福州大学于岩教授主讲的“陶瓷工艺学 MOOC”配套使用的教材,全书共 10 章,主要包括绪论,陶瓷原料,坯料的类型与组成计算,釉的性质与釉料组成计算,坯料与釉料的制备,成形与模具,干燥与施釉,陶瓷的烧成、显微结构与性质,陶瓷的装饰,陶瓷的加工与封接。全书注重对陶瓷生产的原料、常用方法、主要设备和基本原理的介绍,并融入了最新的陶瓷生产工艺技术。

本书可供高等院校材料科学与工程及相关专业学生使用,可作为有关科研和工程技术人员参考用书,也可供社会学习者学习“陶瓷工艺学 MOOC”时参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

陶瓷工艺学/于岩主编. -- 北京:高等教育出版社,2017.2

iCourse·教材

ISBN 978-7-04-046626-3

I. ①陶… II. ①于… III. ①陶瓷-工艺学-高等学校-教材 IV. ①TQ174.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 252373 号

## Taoci Gongyixue

策划编辑 曹 瑛      责任编辑 沈晚晴      封面设计 于文燕      版式设计 马敬茹  
插图绘制 杜晓丹      责任校对 胡美萍      责任印制 毛斯璐

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 国防工业出版社印刷厂  
开 本 787mm × 1092mm 1/16  
印 张 20.25  
字 数 490 千字  
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598  
网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2017 年 2 月第 1 版  
印 次 2017 年 2 月第 1 次印刷  
定 价 37.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 46626-00

# 前 言

从旧石器时代到新石器时代,从钻木取火到渔猎耕种,从原始人类到现代文明,陶瓷的发展在中国历史上从未中断过,从普通的作为日用品使用的陶器到兼具艺术价值的瓷器,从传统陶瓷到具备特殊力学、热学、磁学、声学、光学、电学、化学、核性能及各种特殊功能的特种陶瓷,可以说陶瓷的发展史就是一部现代材料发展史。陶瓷材料在国民经济领域中具有重要的地位和作用。

本书顺应材料科学与工程专业人才培养的需求,在参考国内外现有同类教材的基础上,结合多年的教学实践经验编写而成。在编写时,对现有教材的内容进行了科学的重新整合,按陶瓷生产工艺流程来编排主要章节内容,做到知识体系不重复,并注重融入最新的陶瓷生产工艺技术,使全书的内容体系更完整、更合理,力求使本书具有科学性、先进性和实用性。全书主要内容包括陶瓷原料,坯料的类型与组成计算,釉的性质与釉料组成计算,坯料与釉料的制备,成形与模具,干燥与施釉,陶瓷的烧成、显微结构与性质,陶瓷的装饰,陶瓷的加工与封接等,着重对陶瓷生产的原料、常用方法、主要设备和基本原理进行介绍,使读者掌握相关的基础理论和工艺技术,为以后从事相关工作提供必要的理论和技术支撑,并实现对一般无机非金属材料知识的融会贯通,从而具备研究和设计新材料的能力。本书既可作为高等学校材料科学与工程及相关专业的教材使用,也可作为有关科研和工程技术人员的参考用书。

本书由福州大学于岩教授主编,参编人员主要有福州大学黄晓巍副教授和陕西科技大学任强教授。清华大学谢志鹏教授对本书进行了审阅,提出了宝贵的修改意见,对本书内容的充实和体系的完善给予了极大的支持和帮助,特此表示衷心的感谢。

由于编者的能力和水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请各位读者和专家给予批评指正。

于岩

2016年5月于福州大学

# 目 录

<b>第 0 章 绪论</b> .....	1	1.2 石英 .....	38
0.1 陶瓷的概念与分类 .....	1	1.2.1 石英的种类和一般性质 .....	38
0.1.1 按陶瓷的概念和用途分类 .....	1	1.2.2 石英的晶型转化 .....	40
0.1.2 按所用原料及坯体致密程度 分类 .....	2	1.2.3 石英在陶瓷生产中的作用 .....	42
0.1.3 特种陶瓷的分类 .....	3	1.3 长石 .....	43
0.2 陶瓷发展概述 .....	3	1.3.1 长石的种类和一般性质 .....	43
0.2.1 陶器的起源和演变 .....	3	1.3.2 长石的熔融特性 .....	44
0.2.2 由陶到瓷的发展过程和瓷器的 发明 .....	5	1.3.3 长石在陶瓷生产中的作用 .....	46
0.2.3 我国历代瓷器的成就 .....	7	1.4 其他原料 .....	47
0.2.4 制瓷技术的外传及其对世界陶瓷 的影响 .....	9	1.4.1 硅酸盐类原料 .....	47
0.3 陶瓷工业发展及其在国民经济 中的地位 .....	10	1.4.2 碳酸盐类原料 .....	50
0.3.1 陶瓷工业的发展 .....	10	1.4.3 磷酸盐类原料 .....	52
0.3.2 陶瓷工业在国民经济中的地位 .....	12	1.4.4 长石的代用品 .....	53
<b>第 1 章 陶瓷原料</b> .....	14	1.4.5 高铝矾土 .....	54
1.1 黏土 .....	14	1.4.6 熟料和瓷粉 .....	55
1.1.1 黏土的成因 .....	15	1.4.7 工业废渣 .....	56
1.1.2 黏土的分类 .....	16	1.5 陶瓷原料的标准化 .....	58
1.1.3 黏土的组成 .....	16	<b>第 2 章 坯料的类型与组成计算</b> .....	59
1.1.4 黏土的工艺性质 .....	29	2.1 坯料组成的表示方法 .....	59
1.1.5 黏土的加热变化 .....	36	2.1.1 化学组成表示法 .....	59
1.1.6 黏土在陶瓷生产中的作用 .....	38	2.1.2 实验式表示法 .....	60
		2.1.3 示性矿物组成表示法 .....	60
		2.1.4 配料量表示法 .....	61
		2.2 坯料的类型 .....	61
		2.2.1 长石质瓷坯料 .....	61

2.2.2 绢云母质瓷坯料 .....	69	4.2.2 生料釉 .....	152
2.2.3 磷酸盐质瓷坯料 .....	71	4.2.3 熔块釉 .....	153
2.2.4 镁质瓷坯料 .....	74	<b>第5章 成形与模具</b> .....	155
<b>2.3 坯料组成的计算</b> .....	76	5.1 成形方法的分类与选择 .....	155
2.3.1 基本项目的计算 .....	76	5.2 可塑成形 .....	155
2.3.2 实验式的计算 .....	77	5.2.1 可塑坯料的成形性能 .....	156
2.3.3 示性矿物组成的计算 .....	79	5.2.2 旋压成形 .....	161
2.3.4 坯料配方的计算 .....	82	5.2.3 滚压成形 .....	162
<b>2.4 坯料性能的计算</b> .....	91	5.2.4 挤压成形 .....	165
2.4.1 酸度系数的计算 .....	91	5.2.5 车坯成形 .....	166
2.4.2 烧成温度的计算 .....	92	5.2.6 注塑成形 .....	166
<b>2.5 坯料配方的设计原则</b> .....	92	5.3 注浆成形 .....	169
<b>第3章 釉的性质与釉料组成计算</b> .....	94	5.3.1 注浆坯料的成形性能 .....	169
3.1 釉料组成的表示方法 .....	94	5.3.2 基本注浆方法 .....	175
3.2 釉的分类与性质 .....	95	5.3.3 强化注浆方法 .....	177
3.2.1 釉的分类 .....	95	5.3.4 热压铸成形 .....	177
3.2.2 釉的性质 .....	96	5.3.5 电泳注浆 .....	178
3.3 制釉氧化物 .....	105	5.4 压制成形 .....	179
3.3.1 釉熔体的网络化学基础 .....	105	5.4.1 压制坯料的成形性能 .....	179
3.3.2 各氧化物在釉中的作用 .....	107	5.4.2 干压成形 .....	182
3.4 釉料组成的计算 .....	110	5.4.3 等静压成形 .....	184
3.4.1 生料釉 .....	110	5.5 成形模具 .....	185
3.4.2 熔块釉 .....	111	5.5.1 模具的放尺 .....	185
3.4.3 确定釉料配方的依据 .....	119	5.5.2 石膏模具 .....	186
3.5 坯釉适应性 .....	123	5.5.3 新型多孔模具 .....	191
3.5.1 热膨胀系数的影响 .....	123	5.5.4 压制成形用金属模 .....	191
3.5.2 中间层的影响 .....	126	5.5.5 挤压成形用模具 .....	192
3.5.3 釉的弹性、抗张强度的影响 .....	127	5.5.6 等静压成形模具 .....	193
3.5.4 釉层厚度的影响 .....	127	<b>第6章 干燥与施釉</b> .....	194
<b>第4章 坯料与釉料的制备</b> .....	129	6.1 干燥机理 .....	194
4.1 坯料制备 .....	129	6.1.1 坯体中水分的类型 .....	194
4.1.1 可塑坯料的制备 .....	129	6.1.2 干燥过程 .....	195
4.1.2 注浆坯料的制备 .....	141	6.1.3 影响干燥速度的因素 .....	196
4.1.3 压制坯料的制备 .....	143	6.2 干燥方法与设备 .....	197
4.1.4 调整坯料性能的添加剂 .....	147	6.2.1 热空气干燥 .....	197
4.1.5 水质对坯料及制品性能的影响 .....	150	6.2.2 电热干燥 .....	200
4.2 釉料制备 .....	151	6.2.3 辐射干燥 .....	202
4.2.1 品质要求及控制 .....	151	6.2.4 综合干燥 .....	205

6.3 施釉 .....	206	8.2 彩绘 .....	264
6.3.1 釉浆施釉 .....	206	8.2.1 釉上彩 .....	264
6.3.2 静电施釉 .....	209	8.2.2 釉下彩 .....	267
6.3.3 干法施釉 .....	210	8.2.3 釉中彩 .....	269
<b>第7章 陶瓷的烧成、显微结构与性质</b> .....	211	8.3 颜色釉 .....	269
7.1 烧成原理 .....	211	8.3.1 主要配釉方法 .....	269
7.1.1 坯体烧成过程中的物理化学变化 .....	211	8.3.2 颜色釉的制备工艺 .....	270
7.1.2 釉层形成过程的物理化学变化 .....	216	8.3.3 典型的颜色釉 .....	271
7.1.3 釉熔体的析晶 .....	222	8.4 艺术釉 .....	274
7.1.4 烧成制度 .....	224	8.4.1 结晶釉 .....	274
7.2 烧成工艺 .....	234	8.4.2 砂金釉 .....	276
7.2.1 低温快速烧成 .....	234	8.4.3 无光釉 .....	276
7.2.2 热压烧成 .....	236	8.4.4 碎纹釉 .....	277
7.2.3 真空烧成 .....	239	8.4.5 变色釉 .....	278
7.2.4 气氛烧成 .....	239	8.4.6 金属光泽釉 .....	279
7.2.5 活化烧成 .....	240	8.4.7 荧光釉 .....	279
7.2.6 活化热压烧成 .....	240	8.5 贵金属装饰 .....	280
7.3 烧成设备 .....	240	8.5.1 亮金 .....	280
7.3.1 隧道窑 .....	240	8.5.2 磨光金 .....	281
7.3.2 辊道窑 .....	242	8.5.3 腐蚀金 .....	281
7.3.3 推板窑 .....	243	8.6 其他装饰方法 .....	281
7.3.4 倒焰窑与梭式窑 .....	244	8.6.1 坯体装饰 .....	281
7.4 窑具与装窑 .....	245	8.6.2 综合装饰 .....	283
7.4.1 窑具种类 .....	245	8.7 釉料、颜料中铅镉离子的溶出 .....	284
7.4.2 性能要求 .....	246	8.7.1 溶出原因 .....	285
7.4.3 窑具材质 .....	246	8.7.2 影响因素 .....	285
7.4.4 装窑要求 .....	247	8.7.3 降低铅镉溶出量的方法 .....	287
7.5 陶瓷的显微结构和性质 .....	248	<b>第9章 陶瓷的加工与封接</b> .....	289
7.5.1 陶瓷的显微结构 .....	248	9.1 陶瓷的机械加工方法 .....	289
7.5.2 陶瓷的性质 .....	251	9.1.1 陶瓷的切削加工 .....	290
<b>第8章 陶瓷的装饰</b> .....	258	9.1.2 陶瓷的磨削加工 .....	290
8.1 陶瓷颜料 .....	258	9.1.3 陶瓷的研磨加工和抛光加工 .....	293
8.1.1 陶瓷颜料的分类 .....	259	9.2 陶瓷的特种加工技术 .....	294
8.1.2 陶瓷颜料的发色机理 .....	261	9.2.1 电火花加工 .....	294
8.1.3 陶瓷颜料的制备工艺 .....	263	9.2.2 电子束加工 .....	296
		9.2.3 激光加工 .....	297
		9.2.4 超声波加工 .....	298

9.3 陶瓷表面金属化 .....	299	9.4.1 玻璃焊料封接 .....	306
9.3.1 陶瓷表面金属化的用途 .....	299	9.4.2 烧结金属粉末法封接 .....	309
9.3.2 陶瓷表面金属化的方法 .....	300	9.4.3 活性金属封接法 .....	310
9.4 陶瓷-金属封接技术 .....	306	9.4.4 封接的结构形式 .....	311





# 第 0 章 绪 论

## 0.1 陶瓷的概念与分类

传统陶瓷是指所有以黏土与其他天然矿物为主要原料,经过粉碎、混炼、成形、煅烧等过程制成的各种制品。如日用陶瓷、建筑陶瓷、电瓷等都属于传统陶瓷。由于传统陶瓷的主要原料是取之于自然界的硅酸盐矿物,所以可归属于硅酸盐类材料和制品。陶瓷工业与玻璃、水泥、搪瓷、耐火材料等工业同属“硅酸盐工业”的范畴。

随着近代科学技术的发展,需要充分利用陶瓷材料的物理与化学性质,近百年来出现了许多新的陶瓷品种,如各种高温结构陶瓷和功能陶瓷。它们已不再或很少使用黏土等传统陶瓷原料,而是使用化工原料和合成矿物,组成范围也得到极大的延伸,并且涌现了许多新的工艺。因此,广义的陶瓷是指用陶瓷生产方法制造的无机非金属固体材料和制品的通称。

陶瓷制品种类繁多,为了便于掌握各种制品的特征,需要进行分类。从不同的角度出发,可以有不同的分类方法,有的按材料的结构和基本物理性能来分类,有的按所用原料、组成或用途来分类。以下介绍几种常见的分类方法。

### 0.1.1 按陶瓷的概念和用途分类

按陶瓷的概念与用途,可将陶瓷制品分为两大类,即普通陶瓷和特种陶瓷。

普通陶瓷即为陶瓷概念中的传统陶瓷,这一类陶瓷制品是人们生活和生产中最常见和最常使用的陶瓷制品。根据其使用领域的不同,又可分为日用陶瓷(包括艺术陈列陶瓷)、建筑卫生陶瓷、化工陶瓷、化学瓷、电瓷及其他工业用陶瓷。这类陶瓷制品所用的原料基本相同,生产工艺技术亦相近,是典型的传统陶瓷生产工艺,只是根据需要制成适于不同使用要求的制品。

普通陶瓷以外的广义陶瓷概念中所涉及的陶瓷材料和制品即为特种陶瓷。特种陶瓷是应用于各种现代工业和尖端科学技术的陶瓷制品,所用原料和生产工艺技术已与普通陶瓷有较大的不同。特种陶瓷根据其性能及用途的不同,可细分为结构陶瓷和功能陶瓷。结构陶瓷主要作为工程结构材料使用,具有高强度、高硬度、高弹性模量、耐高温、耐磨损、耐腐蚀、抗氧化、抗热震等特性;

功能陶瓷是指具有电、磁、光、声、超导、化学、生物等特性,且具有相互转化功能的一类陶瓷。

普通陶瓷与特种陶瓷的分类比较见表 0-1。

表 0-1 普通陶瓷与特种陶瓷的分类比较

生产工序	普通陶瓷	特种陶瓷
原料	天然矿物原料(黏土、长石、石英)	人工精制合成原料(氧化物和非氧化物两大类)
成形	可塑、注浆、压制为主	压制、热压铸、注射、轧膜、流延、等静压为主
烧成	温度一般在 1 350℃ 以下,燃料以煤、油、气为主	结构陶瓷常需要 1 600℃ 左右高温烧成,功能陶瓷需精确控制温度,以电、气、油加热为主
加工	一般不需加工	常常需切割、打孔、研磨和抛光等
用途	主要用于日用陶瓷、艺术陈设陶瓷、建筑卫生陶瓷、化学化工陶瓷、电瓷等	结构陶瓷、功能陶瓷

### 0.1.2 按所用原料及坯体致密程度分类

普通陶瓷按所用原料及坯体致密程度的不同分为两大类:陶器和瓷器。陶器的坯体烧结程度差,断面粗糙而无光泽,机械强度较低,吸水率较大,无半透明性,敲击时声音粗哑、沉浊。瓷器的坯体致密,玻璃化程度高,吸水率小(基本上不吸水),有一定的透光性,断面细腻呈贝壳状或石状,敲击时声音清脆。

陶器和瓷器根据其性能及特征的差别还可进一步细分,见表 0-2。

表 0-2 普通陶瓷按所用原料及坯体致密程度分类

类别	陶器			瓷器		
	粗陶器	普通陶器	精陶器	炆器	普通瓷器	细瓷器
特征	坯体未烧结,粗松多孔,吸水性大,有色,不施釉	坯体未烧结,粗松多孔,但较土器致密,釉色,施釉或不施釉	坯体未烧结或只部分烧结,有孔隙,一般呈白色,施釉	坯体烧结,致密,接近瓷器,但多呈色,施釉或不施釉,不受酸侵蚀	介于精陶器与瓷器之间,仍有一定吸水率	坯体完全烧结,有半透明性,断面致密,呈贝壳状,色白,施釉,耐酸碱
使用原料	易熔黏土	可塑性高的难熔黏土、石英、熟料等	可塑性高的难熔黏土、石英、熟料等	同精陶器	高岭土、瓷石、可塑性高的难熔黏土、石英、长石等	同普通瓷器
烧成温度 /℃	850~1 000	900~1 200	素烧 1 100~1 300 釉烧 1 000~1 200	1 200~1 300	1 250~1 320	1 320~1 450 1 250~1 320 1 120~1 250 1 200~1 300

续表

类别	陶器			瓷器		
	粗陶器	普通陶器	精陶器	炆器	普通瓷器	细瓷器
颜色	黄色、红色、青色、黑色	黄色 红色 灰色	白色 浅色	乳黄色 浅褐色 灰色 紫色	白色	白色
吸水率 /%	>15	>15	<12	<3	<1	<0.5
用途	砖、瓦、盆、罐	日用器皿、美术陶、紫砂陶			日用器皿、建筑制品	日用器皿、艺术瓷、电瓷、化学瓷

### 0.1.3 特种陶瓷的分类

特种陶瓷分为结构陶瓷和功能陶瓷。将具有机械功能、热功能和部分化学功能的陶瓷列为结构陶瓷,而将具有电、磁、光、化学和生物体特性,且具有相互转换功能的陶瓷列为功能陶瓷。由于许多特种陶瓷不止具备单一的功能,因此很难确切地进行划分和分类。

新型陶瓷的分类情况见表 0-3。

表 0-3 特种陶瓷的分类

大类	系列	细类
结构陶瓷	氧化物	氧化铝、氧化镁、氧化锆、氧化铀、氧化铍等
	非氧化物	碳化物、氮化物、硼化物、硅化物等
功能陶瓷	电功能陶瓷	绝缘陶瓷、介电陶瓷、铁电陶瓷、压电陶瓷、半导体陶瓷等
	磁功能陶瓷	铁氧体
	光功能陶瓷	透明陶瓷、透明铁电陶瓷
	生物与化学功能陶瓷	湿敏陶瓷、气敏陶瓷、载体用陶瓷、生物陶瓷

## 0.2 陶瓷发展概述

### 0.2.1 陶器的起源和演变

陶器是人类最早的手工业制品,陶器的产生与人类从游猎生活逐步过渡到定居生活并从事

农业生产有着密切的关系。恩格斯曾对陶器的发明作如下叙述：“可以证明，在许多地方，甚至在一一切地方，陶器都是由于用黏土涂在编制或木制的容器上而发生的，目的在于使其能耐火。因此，不久以后，人们便发现成形的黏土，不要内部的容器，也可以用于这个目的。”陶器的出现也标志着人类文化开始从旧石器时代跨入了新石器时代。

我国陶器起源于何时，随着新石器时代文化遗址的不断发现而众说纷纭，到目前为止，我国最早陶器在北方和南方都有发现。北方中原地区1977年发现的裴李岗遗址中的陶器，根据 $^{14}\text{C}$ 测定年代，为公元前 $5\,935\pm 480$ 年，距今约8 000年；1976年发现的磁山遗址中的陶器，距今约7 300年之久。南方的浙江余姚河姆渡村遗址中的陶器，根据测定也距今约7 000年之久。这些最早出现的陶器大都是泥质和夹砂红陶、灰陶和夹炭黑陶。河姆渡的夹炭黑陶使用的是含 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 量较低(1.5%~1.8%)的绢云母质黏土，烧成温度为 $800\sim 900^\circ\text{C}$ 。

随着陶器制作的不断发展，到新石器时代的晚期，已发展到以彩陶和黑陶为其特色的史前文化。1921年在河南渑池县仰韶村，首先发现了红黑花纹的彩陶片与磨制过的石器共存。考古学家称这一时代的文化为“仰韶文化”，又称“彩陶文化”。仰韶文化的陶器分布很广，陶器壁厚薄相当均匀，造型端正，色彩大部分为灰红色，上面画有红色、黑色或紫色花纹。河南仰韶村夹砂红陶器孔隙度27%，莫氏硬度4，氧化气氛烧成。与中原仰韶文化同时的，还有西北地区的甘肃仰韶文化，鲁中南和苏北地区的大汶口文化，太湖流域的马家浜文化，以及华中地区的大溪文化。大汶口文化发掘于山东泰安大汶口，大约开始于公元前4000年，早期以红陶为主，均用手制，彩陶有红、白、黑、赭数种，至中后期使用了陶车，晚期以灰陶为主。马家浜文化是河姆渡文化的直接继承者，其年代为公元前4750—公元前3700年，陶器以夹砂和泥质红陶为主，并有部分泥质灰陶及少量黑陶，早期仍用手制，器表多施红色陶衣，到晚期则出现轮制。

到新石器时代晚期，长江以北已从仰韶文化过渡到龙山文化，长江以南则从马家浜文化进入到良渚文化。从公元前2000年到青铜时代，陶器的制作已有较大发展，并有明显的时代风貌，其中最突出的为龙山文化的陶器。1928年在山东历城县龙山镇城子崖，发现了许多黑色的陶器，考古学家称之为“黑陶”，并称这一时期的文化为“龙山文化”，又称“黑陶文化”。龙山文化分布在黄河中下游及东部沿海的广大地区，它是继大汶口文化发展而来的东方古老文化。龙山黑陶在烧制技术上有了显著进步，它广泛采用了轮制技术，因此器形浑圆端正，器壁薄而均匀。黑陶中最精致的制品，表面打磨光滑，乌黑发亮，薄如蛋壳，厚度仅1 mm，人称“蛋壳陶”。山东城子崖龙山文化薄胎黑陶，孔隙度15%，莫氏硬度3，通体墨黑，烧成温度 $1\,000^\circ\text{C}$ 左右。黑色是用烟熏法渗碳造成的。龙山文化时期，除黑陶外，也有灰陶、红陶、黄陶和白陶，但数量不多。以上是我国史前时期陶器的演变情况，距今约3 500年。

进入有文字记载的殷商时代，在河南安阳曾发掘出距今约3 000年的商代刻纹白陶，后在郑州和辉县都有发现。郑州二里冈殷代硬陶，颜色土红带黄，烧成温度 $1\,180\pm 20^\circ\text{C}$ ，说明陶器的烧成温度不断提高。应特别提及的是商代除出现白陶外，极少量的釉陶在郑州早期遗址和安阳晚期遗址中发现，安阳殷代晚期釉陶，其孔隙度0.26%，莫氏硬度6，釉色浅黄，坯色土黄带红，氧化气氛烧成，釉层厚0.01 mm，石灰釉。商代陶器从无釉到有釉，在技术上是一个很大的进步，是制陶技术上的重大成就，为从陶过渡到瓷创造了必要条件，这一时期釉陶的出现可以看成是我国陶瓷发展过程中的“第一次飞跃”。

周代在釉陶方面继承了殷商时代的传统，出土的釉陶数量很多，器形均为豆式，釉色略呈青

色。西周张家坡陶碎片中  $\text{KNaO}$  含量较高,达 4.79%,烧成温度  $1\ 200\pm 30^\circ\text{C}$ ,气孔体积分数 7.22%;山西侯马东周釉陶的孔隙度为 0.14%,烧成温度  $1\ 230\pm 30^\circ\text{C}$ ,胎内结构较细,孔隙较少。从这些碎片的显微结构来看很接近陶器的结构,但在原料处理和坯泥炼制上还比较原始。周代在陶器应用方面的一个重要发展是把陶器的应用扩大到建筑方面,砖瓦已开始成为建筑中的重要材料,烧制砖瓦也成了陶业中的重点业务。尤其至秦代(公元前 221—公元前 207 年)用大量砖瓦修长城和阿房宫,说明建筑陶瓷材料已大量使用。1975 年在陕西临潼秦始皇陵墓东侧出土的巨型兵马俑,其尺寸类同真人真马,造型生动,工艺精巧,是罕见的古代巨型雕塑品,说明秦代陶工在陶俑成形和烧造方面的完美无缺,这是我国陶瓷工艺发展史上辉煌的成就。

两汉(公元前 202—公元 220 年)是我国陶器制造很发达的时代,这时各地已设置制陶工场,大量生产陶器,尤其是釉陶,已发展到很高的水平。汉代釉陶的釉色有翠绿、赭黄、铜绿、灰青等,基本上都属于铅釉,只是含有不同含量的氧化铜或氧化铁。铅釉的熔融温度低,较适宜于烧成温度不高的陶器。硬陶上的灰青釉是一种高钙石灰釉, $\text{CaO}$  含量在 15%~20%。随着使用原料的选择和精制、烧成温度的提高,又使用了石灰釉,使汉代末期的釉陶已向胎质更致密,釉层更光亮、透明而均匀,胎釉结合更好的瓷器过渡。

汉代以后,釉陶逐渐发展成瓷器,无论从釉面和胎质来看,瓷器的出现无疑是釉陶的一大飞跃。但作为致密度和光泽度都不及瓷器的陶器来说,并没有因为瓷器的出现而逐渐消失。陶器由于其密度较小,很少变形,易于制造大件器物,脆性相对较小等特点,加之原料易得,烧成温度低,工艺技术要求不高,日用陶器在民间需要量大,故陶器虽然经过若干曲折,但一直经久不衰,与瓷器并存到现在。历代在陶器的品种上也不断出现新的品种,如唐代的三彩陶很负盛名,成为唐三彩,唐三彩系发展了汉代的低温铅釉,用绿(以  $\text{Cu}^{2+}$  着色)、黄褐(以  $\text{Fe}^{3+}$  着色)、蓝(以  $\text{CoO}_4^{2-}$  着色)和紫(主要色剂为  $\text{Mn}$ ,而  $\text{Fe}$ 、 $\text{Co}$  起调色作用)的釉色施在雕塑制品及实用器物上,变化多端,堂皇华丽。宋代以后在江苏宜兴地方兴盛起来的紫砂陶器等,都是曾经在历史上煊赫一时,至今声名不衰的著名陶器。

陶器的发展,不仅在釉和装饰上有不断的发展,同时在原料的选择、烧成温度、加工处理、胎釉结合等方面也日益精作,生产出外表上可与细瓷器媲美的现代细陶器(精陶器)。另外,陶器的多孔结构具有过滤性和吸附性,也具有隔热隔音等优良性能,在现代陶瓷工业中出现的称为多孔陶瓷的新种类,充分利用了多孔结构材料的特性,在多种工业上得到了广泛的应用。可以看出,陶器作为陶瓷发展史上的早期制品,经过演变与发展,直到现在,仍不失为具有其特色的一大系列陶瓷制品,它对人民生活 and 工业建设从古到今都起到了应有的积极作用,作出了不可磨灭的贡献。

### 0.2.2 由陶到瓷的发展过程和瓷器的发明

中国科学院上海硅酸盐研究所李家治等,较全面地总结了自新石器时代遗址到明、清近 7 000 年我国陶瓷工艺的发展过程,科学地指出:我国之所以能够由陶过渡到瓷,主要是由于我国古代劳动人民,经过长期的实践,在制陶工艺取得辉煌成就的基础上,又逐步提高认识,积累经验,在原料的选择和精制、窑炉的改进和烧成温度的提高、釉的发明和使用等方面有了新的突破。远在 3 000 多年前的商、周时代,即创造了釉陶或原始瓷器。又经过 1 000 多年的过渡时

期,使原始瓷器的工艺更为成熟,遂在魏晋时期或更早一些的汉代,完成由陶向瓷的过渡,使我国成为世界上最早发明瓷器的国家。这里提出了我国陶瓷工艺发展的三个重大突破和我国陶瓷发展的三个阶段。三个重大突破即原料的选择和精制、窑炉的改进和烧成温度的提高、釉的发明和使用。前一个突破是陶向瓷发展的内因根据,后两个突破是陶向瓷发展的外因条件。三个阶段即陶器、原始瓷器(过渡阶段)、瓷器。同时指出,在化学组成中起相当重要作用的 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,由陶器中含量为6%以上,降到原始瓷器的3%左右,再降到瓷器1%左右。正是由于 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量的降低,才使烧成温度有提高的可能。

我国学者刘秉诚从传统陶瓷的表观结构出发,认为我国陶瓷的发展历程,经历了三个重大飞跃:商、周时代的釉陶是陶器的第一个飞跃;从釉陶发展到具有半透明的釉,而胎还是欠致密的瓷器,是又一个飞跃;在此基础上发展成为具有半透明的胎的瓷器,是第三个飞跃。同时指出,自新石器时代到商代,陶器开始有釉,发展为釉陶,尽管釉陶的釉还不够好,但由无釉到有釉,而且胎也比较易烧结,应当算是一个大的飞跃。如安阳殷代晚期釉陶的孔隙度为0.26%,釉层浅黄,坯土黄带红。山西侯马东周釉陶的孔隙度为0.14%,烧成温度 $1230\pm 20^\circ\text{C}$ ,釉层浅黄,釉浅土黄。胎内结构较细,孔隙较少,釉层中有若干气泡。西周张家坡陶瓷碎片 $\text{KNaO}$ 含量较高,达4.79%,烧成温度 $1200\pm 30^\circ\text{C}$ ,矿物组成为石英13.0%、莫来石17.4%、玻璃69.6%,气孔体积分数7.22%,从这些碎片的显微结构看来已非常接近瓷器的结构,但在原料处理和坯泥炼制上还比较原始。

第二个飞跃是做出了比较美观的釉面。在早期,釉陶的釉层还比较薄( $<0.01\text{ mm}$ ),光泽也不够好。自商代经汉魏以至北宋,尤以汉魏南方青瓷为代表,釉面“晶莹明彻,光润如玉”,釉层厚度由0.01 mm增长到0.1 mm左右,并进行通体敷釉,似可称为第二个飞跃。在此阶段主要着重于釉的发展,由极薄的釉发展到形成一定厚度并且表面致密光润具有近代瓷感的釉。由于其观感上已与釉陶有很大的不同,发生了突变和飞跃,使当时人们意识到无法再以一个“陶”字继续混称下去,遂创造了“瓷”字来称呼这些当时有所发展的釉陶,从而逐渐发明了瓷器。但应明确,当时的瓷器着重于釉面的“晶莹明彻,光润如玉”,而不注重瓷胎,这种“重釉轻胎倾向”一直贯穿到宋代以来的五大名窑(汝、定、官、哥、钧)。许多釉面呈现光润如玉的传世作品,其胎质则处于生烧或微生烧状态,尤以北方为甚,这是由于未注意到加入适量熔剂,使其胎质烧结,达到瓷化所致。同时也可能是有意识地为了防止窑和制品变形。

第三个飞跃是瓷器由半透明釉发展到半透明胎。宋代景德镇湖田、湘湖窑的胎的白度和半透明度都很高,已接近现代细瓷的水平,可作为标志。景德镇一带的陶瓷原料有其地质特点,不仅具有高岭村附近的白土(相当于片状高岭石和管状埃洛石的混合物),并且主要矿物为石英和水云母类矿物,以及部分高岭石或长石的各种瓷石。故景德镇瓷器的配方不同于目前的长石质瓷器,而属于水云母质系统,即以水云母作熔剂的高岭石-石英-水云母质瓷胎和石灰石-石英-水云母质瓷釉的瓷器。于是,为具有半透明釉的瓷发展到具有半透明胎的瓷创造了条件。

近年航天飞机外壳上所用的陶瓷耐热耐磨绝缘材料,以及近代材料科学领域内出现的各种结构和功能陶瓷,其用料和制作工艺已超出传统陶瓷的范畴,则可看作是陶瓷发展的第四个飞跃。

瓷器是我国古代的伟大发明,但是关于我国瓷器起源的具体年代,历来各家说法颇不一致,产生分歧的原因主要是衡量古代瓷器的标准不同,或者对瓷器的含义理解不同。再加上我国地下文物陆续出土,不断地改变着人们的认识。中国科学院上海硅酸盐研究所李家治等全面总结

了我国由陶到瓷的工艺发展,并结合近年来在浙江上虞龙泉塘出土的西晋越窑青釉瓷片和上虞小仙坛出土的东汉越窑青釉瓷片的有关研究,指出:无论在组成上或工艺上,这些瓷片都已达到近代瓷器的标准,它的组成除  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  的含量较高,而使瓷胎呈较深的灰白色外,其烧成温度已达  $1\ 300\sim 1\ 310^\circ\text{C}$ ,吸水率为  $0.42\%$  和  $0.28\%$ ,孔隙度为  $0.92\%$  和  $0.62\%$ ,在光学显微镜下,可看到瓷胎里有发育较好的莫来石晶体,石英颗粒较细,还可看到它的熔蚀边,有较多的玻璃态,烧结程度较好,微透光。因而进一步认为我国在公元 1—2 世纪的东汉时代即已出现瓷器。

也有人指出,我国传统“瓷器”这个概念主要是以釉为主来确定和划分的,瓷胎方面既包括致密烧结和完全瓷化的,也包括未充分烧结和瓷化程度差些的。在东汉到五代这段历史时期内,南北方青瓷胎的瓷化程度并不与时代发展成正比关系。从商周到唐宋,我国陶瓷器只是釉层厚度有较明显的增长,至于胎质的孔隙度和烧成温度,并未看到明显或突出发展的趋势。因而,不能用现代成瓷标准对当时的制品进行内外通体衡量。从出土的三国至晋时代南方的青瓷来看,这些传世魏晋间的完整瓷器,其釉层由薄而厚,已增至  $0.10\ \text{mm}$  左右,并进行了通体敷釉,胎质也逐渐趋向致密,不吸水,瓷化程度较高,这时已普遍选用优质黏土矿物原料作成坯体,在釉料中存在铁质,于还原焰中烧成泛青色调,大大改善了以往粗糙晦暗的观感。由此表明,东汉末至三国,是中国陶瓷发展史上一个极为重要的时期。由于考虑到现存完整瓷器如东汉(公元 25—220 年)的青瓷四系罐,表面上看来还明显地逊于西晋初期(公元 266—280 年)的青釉瓷羊和三国时期吴国(公元 229—280 年)的青瓷卧羊。同时,东汉到西晋时间跨度较大,如何为中国瓷器的始期界限,值得商榷。若考虑 5:① 已经出土的魏晋完器釉面具有明显瓷化质感的表现特征表征;② 现存典籍中的“瓷”字开始出现于魏晋;③ 国外著名的科学技术史料(李约瑟《中国科学技术史》)也承认,在瓷器方面,西方落后于中国 11~13 个世纪。不妨暂定为魏晋或汉晋,待掌握更多的有关实物和研究成果后再进行推敲论证。

### 0.2.3 我国历代瓷器的成就

我国瓷器在汉、晋时期完成由陶向瓷过渡以后,进入了普遍发展时期。在南北朝(公元 420—589 年)青釉瓷器大量生产,不仅在南方,同时在北方青瓷生产也有极大的进展。到了隋唐时期(公元 581—907 年)瓷器的发展进入了成长阶段。当时的经济、文化颇为发达,由于生活的需要和禁用铜器的结果,陶器制造业有了更大的发展,瓷器的使用已很普遍,瓷器生产已普遍使用高温烧成,胎质更为坚致。隋代已出现白釉瓷器。唐代瓷器产区已分布很广,并正式出现“窑”的专称。其中以越窑(浙江余姚)的青瓷和邢州的白瓷齐名全国。古人有诗云:“邢客与越人,皆能造瓷器,圆似月魂堕,轻如云魄起”,人评“邢瓷类银、类雪”,“越瓷类玉、类冰”。到五代江西景德镇胜梅亭窑的白瓷,其白度达  $70\%$ ,孔隙度为  $0.81\%$ ,已接近现代细瓷的水平。

宋代(公元 960—1279 年),我国南北各地的窑业,继承唐代传统,得到了极大发展,造瓷地区逐渐扩大,当时有官、越、定、钧、汝五大名窑。官窑北宋时在河南开封,南宋时在浙江临安(杭州),北宋官窑一说是汝窑的贡器,釉色主要是粉青。越窑在浙江余姚,继承唐代越窑的传统,以秘色著称。定窑有北定、南定两处,北定在河北曲阳,南定在江西景德镇,定窑继承了邢窑制瓷传统,以白釉为主,兼出红、紫、黑、绿定,花纹加工有划花、刻花、印花三种。钧窑在河南禹县神垕镇,钧窑是应用铜红釉最早的窑,其釉色丰富多彩,并创造出窑变花釉,著名的釉色有茄波紫、

朱砂红、胭脂斑、鸡血红、雨过天晴、葱翠青等，钧窑的铜红釉和窑变花釉对以后的国际上著名的景德镇铜红釉和窑变影响极大。据研究，所有的钧窑系釉都是液-液相釉，蓝钧釉的乳光蓝色和官钧紫红色窑变釉中的蓝色斑纹都是釉中的分相液滴引起的光散射效应。汝窑在河南临汝，汝窑制品以卵青色为主，器物通体有极细纹片，其釉青色是我国烧瓷技术采用铁还原着色的一个划时代发展。

此外，陕西的耀州窑，福建的建窑，江西的吉州窑，浙江的哥窑、弟窑、象州窑，河北的磁州窑，北宋和辽对峙时期的辽瓷，南宋和金对峙时期的金钧窑，也都是当时比较著名的窑场。耀州窑以青釉为主，近似汝窑制品，装饰多用凸雕与印花，如串枝莲、莲瓣碗等，简朴壮美，为其他各窑所不及。建窑中最著名的是黑釉瓷，人称黑建，釉黑而滋润，并半透出银色白波纹如兔毫状，有兔毫、油滴、玳瑁斑等名贵铁系花釉。吉州窑在今江西省吉安县永和镇，品种相当丰富，釉色有青釉、绿釉、黑釉和白釉等，其中油滴、兔毫、玳瑁、鹧鸪斑和木叶、剪纸等釉色最为著名。浙江的哥窑、弟窑相传皆为龙泉窑系，龙泉窑继承唐代越窑的优良传统，制造青瓷，誉满海内外。龙泉青瓷有两种主要类型，即黑胎青瓷和白胎青瓷，相传为章姓兄弟二人所主之窑，黑胎青瓷为哥窑型龙泉青瓷，白胎青瓷为弟窑型龙泉青瓷。哥窑青瓷土脉细紫，质颇薄，色青，浓淡不一，有紫口铁足，多断纹，号百圾碎，冠绝当时；弟窑青瓷质厚，用白土造器，外涂幻水翠浅，纯粹如美玉，影露白痕，无纹片，是整个龙泉窑系的主流。龙泉瓷釉在五代北宋属石灰釉，南宋元明属石灰—碱釉，其高温黏度较高，釉面光泽柔和，应看作是一个创造性的进步。磁州窑在今河北彭城镇，有白器和黑器，其装饰以黑白色彩对比为主要特点，在白釉上用黑色、赭色、茶色等色调作画，还有黑底褐彩等，开创了用笔彩绘装饰的新途径，为宋以后的青花和五彩瓷奠定了基础。与此同时，广东、山西、山东、甘肃、安徽、四川、云南等省也普遍开始生产陶瓷。

景德镇自汉代生产陶器开始，唐初已能烧造瓷器，宋以“景德年制”置镇，习称景德镇，后正式命名，大量生产“色白花青”的影青瓷。所谓影青瓷是指当时以景德镇为代表的一些窑场所生产的釉面呈色青白的瓷器，而“色白花青”特指有刻印花纹的青白釉瓷器。北宋末年间有红釉器制作。至南宋年间，则仿定窑生产白釉瓷器。南宋以后，特别是从明代开始，江西景德镇成为我国瓷业的中心，逐渐成为我国瓷器的代表，对世界各国有很大的影响。

元代（公元1271—1368年）初期，南北瓷窑很多遭到破坏，独有景德镇在原有基础上继续获得发展。当时蒙古帝国横跨欧亚，中西交往频繁，在一定程度上刺激了景德镇的瓷业生产。景德镇除继续烧造青白瓷外，又创烧了卵白釉、黑釉等，并绘制了红绿彩与金彩等釉上彩绘瓷器。特别是青花与釉里红两种釉下彩绘瓷器的烧造成功，使我国瓷器的装饰艺术别开生面，进入了一个崭新的时代。除景德镇瓷器外，龙泉的青瓷也大量出口。

明代（公元1368—1644年）以来景德镇逐渐成为全国瓷业的中心，景德镇的制瓷工艺继承了历代的优秀传统，在技术上和艺术上都有了极大的发展。从原料的开采、精选、胎釉配方的改进、成形、干燥、烧成和装饰等一系列的工艺过程都有显著的进步。如当时已能烧制“半脱胎”和“大龙缸”等大型制品。当时四方名工巧匠集聚景德镇，除发展本地地区的优良传统外，还吸取和继承了国内外著名瓷区的工艺特点，仿制过宋代窑场的各种色釉，如汝、官、钧、龙泉，釉色逼真，甚至超过原物，有的派生出新，更有发挥，基本上可以代表我国这一时代传统制瓷工艺的综合成就。当时有名的制品有永乐时创制的白釉脱胎瓷，宣德时期用低锰高铁的钴料为着色剂青花，用铜为着色剂的霁红釉和釉里红，成化时的五彩和斗彩等。尤其是宣德青花，幽茜明艳，被



称为“开一代未有之奇”。除景德镇外,河北彭城、浙江处州(龙泉)、福建德化、江苏宜兴、广东石湾等地都有各具一格的发展。

清代(公元1636—1912年)初叶,我国的制瓷工艺进入了十分成熟的阶段。此时仍以景德镇为中心,选瓷规模更大,制瓷技术达到历史上的空前水平,制品种类更为丰富。除继承前人之外,又接受了一些外来的影响,釉彩由五彩、斗彩发展到粉彩与珐琅彩,并创造了各种低温和高温颜色釉,康熙、雍正、乾隆三朝制品尤其精巧华丽。它是我国劳动人民在工艺美术方面卓越的成就之一,不但在我国陶瓷史上永远闪烁着光辉,而且在世界陶瓷史上也占有灿烂的一页。清代名窑除景德镇外,还有石湾、宜兴、德化、博山等地,至清末湖南醴陵瓷业一鸣惊人,成为后起之秀。

#### 0.2.4 制瓷技术的外传及其对世界陶瓷的影响

中国瓷器对世界各国的影响很大,在文化发展和瓷器制造技术方面都有过直接与间接的影响。远在唐代,中国瓷器即以新兴的商品进入国际市场,东销日本,西销印度、波斯及埃及。两宋时对外通商范围和贸易数量都超过唐代,瓷器仍是主要出口商品之一。当时来中国通商的有大小50余国,对外贸易中心逐渐由广州扩展到泉州,荷兰商人由泉州贩运瓷器至欧洲,取得很大利润。

明代郑和七次下西洋,所经各国在政治上、贸易上、文化上都和中国发生了密切关系,从而互市不绝。每次使节往来,中国政府的“赏赍品”中必有瓷器。外国人对中国瓷器视如奇珍异宝,纷纷到中国大量采购。所输出的瓷器,绝大部分是景德镇所产,以青花瓷器居多,其次是龙泉青瓷。清代初期到中叶,中国瓷器除在欧洲有广大市场外,其他如美、非、大洋各洲也都直接或间接来购买中国瓷器。

中国瓷器自7世纪初传到世界各国后,各国竞相仿造。埃及人从法蒂玛王朝(公元909—1171年)开始仿制。13世纪波斯人仿造的瓷器中有中国式凤凰图案。伊拉克、叙利亚、土耳其等国所制瓷器的风格,均能不同程度地看出一些中国的影响。1470年前后,意大利威尼斯人从阿拉伯人学会中国制瓷技术,造出了半透明瓷器。17世纪中叶(1677年)法国首先仿制中国瓷器,制成青花软瓷。1634年,荷兰的德尔夫特学会了制造软质瓷方法,至此仿造的中国瓷器都属于软质瓷。直到1708年,德国迈森国家瓷厂的鲍特盖尔制成第一批硬质瓷,这是欧洲仿造中国瓷器之最先成功者。当时,他能仿制中国白瓷、宜兴紫砂器和宜钧。然后英国于1750年,法国于1760年,瑞典在1758年,丹麦于1760年相继生产出硬质瓷,而美国瓷器于1890年始在特伦顿出现。值得一提的是在1712年和1722年法国人传教士殷弘绪神父,曾两次将景德镇制造瓷器的实况,详细地向法国报告。当时,他以神父身份搜集了景德镇制瓷工艺的详细材料,对欧洲瓷器的制造有过很大的作用。

在东方,梁贞明四年(公元918年)朝鲜学会了中国的制瓷技术并在康津设窑厂烧造瓷器,能仿制越窑、汝窑、磁州窑、龙泉窑等各窑的制品,到15世纪也能仿制景德镇的青花白瓷。以后中国的制瓷技术由朝鲜传到日本。南宋嘉定十六年(公元1223年)日本人加藤四郎左卫门氏随道元禅师到我国福建学习制陶技术六年,回国后在濑户地烧制黑釉炻瓷器,后人称之为“濑户物”,称加藤氏为日本的“陶祖”。明正德时期,日本又派人来中国景德镇学习制作青花白瓷,归