



陶瓷制品 造型设计 与成型模具

杨裕国 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心



陶瓷制品造型设计与成型模具

杨裕国 编著



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

陶瓷制品造型设计与成型模具/杨裕国编著. —北京:
化学工业出版社, 2006. 2
ISBN 7-5025-8259-2

I. 陶… II. 杨… III. ①陶瓷-造型设计②陶瓷-
模具-成型 IV. TQ174. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 007745 号

陶瓷制品造型设计与成型模具

杨裕国 编著

责任编辑: 龚浏澄 窦 臻

文字编辑: 王 琳

责任校对: 战河红

封面设计: 张 辉

*

化 学 工 业 出 版 社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 25½ 字数 637 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8259-2

定 价: 49.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

《陶瓷制品造型设计与成型模具》一书系统阐述了陶瓷概论、陶瓷制品的造型与构型、结构与材料设计、陶瓷坯料（浆料和粉料）的成型性能、陶瓷成型方法、成型机械、成型模具的结构和型腔设计以及应用实例等内容，将陶瓷制品的造型、设计、成型和模具4个方面的内容融汇于一体，力求写出较高的学术水平。

陶瓷所涉及的领域十分广阔。传统陶瓷（日用陶瓷、陈设陶瓷、包装陶瓷、建筑卫生陶瓷、绝缘陶瓷、化工陶瓷、多孔陶瓷等）是人民生活、工业和基础建筑必需的基础材料和制品；新型陶瓷（结构陶瓷、功能陶瓷、金属陶瓷、陶瓷基复合材料、陶瓷纤维、陶瓷薄膜、纳米陶瓷等）制品更是现代新技术、新兴产业和传统工业技术改造的物质基础，也是发展现代军事技术、空间技术和生物医学的必要物质条件。

本书取材丰富，引用了前人的总结，更多的是国内外的研究成果及应用，而所有的实例均来自生产第一线，力求内容新颖，层次分明，理论联系实际，反映当代陶瓷制品的造型、设计、成型领域的先进理论和新技术及新设备，相信能为读者提供一些有益的借鉴。

全书共分8章。第1章简要概述陶瓷与中华文明、陶瓷在现代化建设中的作用。第2章首先按陶瓷原料将陶瓷分成传统陶瓷和新型陶瓷两类，再对它们进行细分，并进行较为详细的概述，其次按陶瓷功能简要概述纯审美型陶瓷、纯实用型陶瓷和赏用结合型陶瓷，然后介绍陶瓷材料的组织结构、结合键和组成相等内容，最后介绍陶瓷材料的物理性质、力学性质和化学性质等知识，这些内容共同构成了内容丰富且较为全面的陶瓷概论这一章。第3章为陶瓷造型和构型，分为艺术陶瓷造型、赏用结合型陶瓷造型、实用型工业陶瓷和新型陶瓷构型3部分，重点是赏用结合型陶瓷造型，主要讨论陶瓷造型、造型的基本要点、造型与人和环境、造型中的人机工程学、造型要素等造型理论，美的陶瓷形体所涉及的基本形体、单纯、变化、统一和美的形体特征，以及日用陶瓷造型，有助于读者研究陶瓷造型的规律，并很好地掌握，以指导实践。第4章为传统陶瓷设计，涵盖了日用陶瓷设计、建筑卫生陶瓷设计、绝缘陶瓷设计、化工陶瓷设计和陶瓷坯料配方设计。第5章为新型陶瓷设计，就设计依据、以强度为关键性能的设计、金属陶瓷组成设计以及设计方法做了论述。第6章为陶瓷制品成型，第1部分为陶瓷坯料成型性能的研究，包括可塑坯料的成型性能（流变性、可塑性、瘠性料的塑化），陶瓷粉末注射成型流变学（粉料流变学、黏结剂对流变行为的影响），注浆浆料的成型性能（流动性、黏度、触变性、渗透性、稳定性、固化、注浆速度和吸浆速度、与模具间的相互作用、影响成型的因素）和压制粉料（流动性、成型性、工艺性能）；第2部分为成型方法的选择和分类，赞同将成型方法分为塑性成型法、胶态成型法、粉料成型法和特种成型法4大类，但为了阐述的方便和人们的习惯，仍按可塑法成型、注浆成型、压制成型、特种成型和纳米陶瓷坯体成型分类，详细介绍了8种可塑法成型、7种注浆成型、5种压制成型以及27种特种成型；第3部分为8种纳米陶瓷坯体成型法；最后部分为成型机械。第7章为陶瓷制品成型模具，简述成型模具的分类、设计原则和模种制作，重点介绍可塑法成型模（阴模、阳模、旋坯刀和旋压模、滚压头），注浆成型模（双合模、多合模、多块复合模、多层次结构模、崩毁性模），热压铸成型模，压制成型模（单向压模、双

向压模、摩擦芯杆压模、组合压模、精整模), 等静压成型模, 真空练泥工装等结构设计与算法以及模腔尺寸的计算, 还着重介绍了石膏模和其他材料的成型模具以及石膏模的使用、寿命与质量控制。最后一章(即第8章)介绍成型模具设计实例, 可供读者参考, 也可供一些工厂借鉴。

在本书的编写过程中, 除参阅了大量的参考文献外, 还得到了喻惠琴等人的鼎力相助, 在此本人表示深切的谢意。同时, 限于本人的学术水平, 本书可能会存在一些不妥乃至错误之处, 欢迎广大读者批评指正。

最后, 还要特别感谢化学工业出版社的有关人员, 有他们的支持, 本书才能顺利问世。

杨裕国

2005年12月, 上海

目 录

| | | | |
|-----------------------------|----|------------------------------------|-----|
| 第 1 章 中国陶瓷发展简史 | 1 | 第 3 章 陶瓷造型和构型 | 84 |
| 1.1 陶瓷与中华文明 | 1 | 3.1 艺术陶瓷造型 | 84 |
| 1.2 陶瓷在现代化建设中的作用 | 2 | 3.2 赏用结合型陶瓷造型 | 85 |
| 第 2 章 陶瓷概论 | 4 | 3.2.1 陶瓷造型 | 85 |
| 2.1 陶瓷分类 | 4 | 3.2.2 造型的基本要点 | 86 |
| 2.1.1 传统陶瓷简介 | 4 | 3.2.3 造型与人和环境 | 87 |
| 2.1.2 新型陶瓷简介 | 5 | 3.2.4 陶瓷造型中的人机工程学 | 88 |
| 2.1.3 纯审美型陶瓷 | 6 | 3.2.5 陶瓷造型要素 | 89 |
| 2.1.4 纯实用型陶瓷 | 6 | 3.3 美的陶瓷形体 | 93 |
| 2.1.5 赏用结合型陶瓷 | 6 | 3.3.1 基本形体 | 95 |
| 2.2 传统陶瓷 | 6 | 3.3.2 单纯 | 96 |
| 2.2.1 粗陶 | 14 | 3.3.3 变化 | 96 |
| 2.2.2 普陶 | 14 | 3.3.4 统一 | 99 |
| 2.2.3 精陶 | 15 | 3.3.5 美的形体特征 | 99 |
| 2.2.4 细陶 | 15 | 3.4 日用陶瓷造型 | 102 |
| 2.2.5 炻器 | 16 | 3.4.1 日用陶瓷造型的法则 | 103 |
| 2.2.6 瓷器 | 17 | 3.4.2 日用陶瓷造型的命名 | 105 |
| 2.2.7 建筑卫生陶瓷 | 23 | 3.4.3 日用陶瓷形体的处理 | 105 |
| 2.2.8 绝缘陶瓷 | 28 | 3.4.4 日用陶瓷形体的变形与防止 变形的的方法 | 106 |
| 2.2.9 化工陶瓷 | 30 | 3.5 实用型工业陶瓷和新型陶瓷构型 | 111 |
| 2.2.10 多孔陶瓷 | 32 | 3.5.1 实用型工业陶瓷和新型陶瓷的 合理构型 | 111 |
| 2.3 新型陶瓷 | 33 | 3.5.2 压制成型制品结构工艺性 | 111 |
| 2.3.1 结构陶瓷 | 35 | 3.5.3 基于工艺过程的新型陶瓷制品 结构设计 | 115 |
| 2.3.2 功能陶瓷 | 45 | 第 4 章 传统陶瓷设计 | 119 |
| 2.3.3 金属陶瓷 | 47 | 4.1 日用陶瓷设计 | 119 |
| 2.3.4 陶瓷基复合材料与制品 | 49 | 4.1.1 陶瓷器物本体和构件的结构 | 119 |
| 2.3.5 陶瓷纤维 | 53 | 4.1.2 套叠和摞叠的结构 | 120 |
| 2.3.6 陶瓷薄膜 | 55 | 4.1.3 制品的形状和壁厚 | 120 |
| 2.3.7 陶瓷强化和增韧 | 56 | 4.1.4 日用陶瓷尺寸精度 | 120 |
| 2.3.8 纳米陶瓷 | 56 | 4.2 建筑卫生陶瓷设计 | 121 |
| 2.4 陶瓷材料组织结构 | 59 | 4.2.1 建筑陶瓷设计 | 121 |
| 2.4.1 长石质瓷的组织结构 | 59 | 4.2.2 卫生陶瓷设计 | 131 |
| 2.4.2 陶瓷材料的结合键 | 62 | 4.3 绝缘陶瓷设计 | 143 |
| 2.4.3 陶瓷材料的组成相 | 62 | 4.3.1 绝缘件结构工艺性 | 143 |
| 2.5 陶瓷材料性质 | 68 | 4.3.2 胶装结构、卡台和棱伞 | 143 |
| 2.5.1 物理性质 | 68 | | |
| 2.5.2 力学性质 | 76 | | |
| 2.5.3 化学性质 | 81 | | |

| | | | | | |
|------------|-------------------|-----|---------|----------------|-----|
| 4.3.3 | 壁厚 | 146 | 6.5 | 压制粉料的成型性能 | 196 |
| 4.3.4 | 绝缘子头部结构设计 | 148 | 6.5.1 | 粉料的流动性 | 196 |
| 4.4 | 化工陶瓷设计 | 149 | 6.5.2 | 粉料的成型性 | 197 |
| 4.4.1 | 塔类容器 | 149 | 6.5.3 | 压制成型对粉料和添加剂的要求 | 197 |
| 4.4.2 | 贮槽、真空过滤器和吸收器 | 152 | 6.5.4 | 等静压成型用粉料的工艺性能 | 198 |
| 4.4.3 | 其他化工陶瓷制品 | 153 | 6.6 | 成型方法的选择和分类 | 199 |
| 4.5 | 陶瓷坯料配方设计 | 153 | 6.6.1 | 成型方法的选择 | 199 |
| 4.5.1 | 坯料配方设计原则 | 153 | 6.6.2 | 成型方法的分类 | 200 |
| 4.5.2 | 坯料配方设计程序 | 154 | 6.7 | 可塑法成型 | 200 |
| 第5章 | 新型陶瓷设计 | 156 | 6.7.1 | 雕塑、印坯与拉坯成型 | 200 |
| 5.1 | 新型陶瓷设计的依据 | 156 | 6.7.2 | 旋压成型 | 201 |
| 5.2 | 以强度为关键性能的设计 | 158 | 6.7.3 | 滚压成型 | 202 |
| 5.3 | 金属陶瓷组成设计 | 160 | 6.7.4 | 挤压成型 | 206 |
| 5.3.1 | 陶瓷相和金属相的选择 | 160 | 6.7.5 | 车坯成型 | 207 |
| 5.3.2 | 性能与浓度的关系 | 160 | 6.7.6 | 塑压成型 | 208 |
| 5.3.3 | 性能与显微组织的关系 | 162 | 6.7.7 | 轧膜成型 | 210 |
| 5.4 | 设计方法 | 162 | 6.7.8 | 注射成型 | 211 |
| 5.4.1 | 经验设计 | 162 | 6.8 | 注浆成型 | 216 |
| 5.4.2 | 定量性设计 | 162 | 6.8.1 | 空心注浆 | 216 |
| 5.4.3 | 概率设计 | 163 | 6.8.2 | 实心注浆 | 216 |
| 第6章 | 陶瓷制品成型 | 165 | 6.8.3 | 强化注浆 | 217 |
| 6.1 | 陶瓷坯料的成型性能 | 165 | 6.8.4 | 热压铸成型 | 220 |
| 6.2 | 可塑坯料的成型性能 | 167 | 6.8.5 | 流延成型 | 223 |
| 6.2.1 | 可塑坯料的流变性 | 167 | 6.8.6 | 电泳成型 | 228 |
| 6.2.2 | 可塑坯料的可塑性 | 169 | 6.8.7 | 原位凝固胶态成型 | 228 |
| 6.2.3 | 瘠性料的塑化 | 170 | 6.9 | 压制成型 | 231 |
| 6.3 | 陶瓷粉末注射成型流变学 | 172 | 6.9.1 | 湿压、半干压和干压成型 | 231 |
| 6.3.1 | 陶瓷粉末混合料(喂料、混料)流变学 | 172 | 6.9.2 | 捣打成型法 | 233 |
| 6.3.2 | 黏合剂对流变行为的影响 | 175 | 6.9.3 | 等静压成型 | 233 |
| 6.3.3 | 氧化铝陶瓷混合料流变行为 | 176 | 6.9.4 | 热压烧结成型 | 238 |
| 6.3.4 | 氮化硅陶瓷混合料流变行为 | 177 | 6.9.5 | 热等静压烧结成型 | 240 |
| 6.4 | 注浆浆料的成型性能 | 179 | 6.10 | 特种成型法 | 242 |
| 6.4.1 | 注浆浆料的流动性 | 179 | 6.10.1 | 压滤成型法 | 242 |
| 6.4.2 | 传统陶瓷浆料应具备的条件 | 181 | 6.10.2 | 纸带浸渍成型法 | 244 |
| 6.4.3 | 浆料的黏度 | 181 | 6.10.3 | 轧滚成型法 | 244 |
| 6.4.4 | 泥浆的触变性(稠化性) | 183 | 6.10.4 | 浆料浸渍成型法 | 245 |
| 6.4.5 | 泥浆的渗透性 | 186 | 6.10.5 | 印刷成型法 | 246 |
| 6.4.6 | 浆料的稳定性(悬浮性) | 187 | 6.10.6 | 熔体浸透成型法 | 246 |
| 6.4.7 | 浆料的固化 | 189 | 6.10.7 | 化学气相浸透成型法 | 247 |
| 6.4.8 | 注浆速度和吸浆速度 | 189 | 6.10.8 | 拉丝成型法与挤压拉丝成型法 | 247 |
| 6.4.9 | 泥浆与模具间的相互作用和脱模 | 190 | 6.10.9 | 喷吹成型法 | 247 |
| 6.4.10 | 影响注浆浆料成型的因素 | 192 | 6.10.10 | 甩丝成型法 | 248 |
| | | | 6.10.11 | 电弧等离子喷涂成型法 | 248 |

| | | | | | |
|------------|---------------------|------------|------------|-----------------------|------------|
| 6.10.12 | 火焰粉末喷涂成型法 | 248 | 7.4.5 | 崩毁性模 | 312 |
| 6.10.13 | 火焰棒材喷涂成型法 | 249 | 7.5 | 热压铸成型模 | 312 |
| 6.10.14 | 比例喷射成型法 | 250 | 7.5.1 | 热压铸成型工艺性分析 | 312 |
| 6.10.15 | 离子束沉积成型法 | 250 | 7.5.2 | 模具结构分析 | 313 |
| 6.10.16 | 真空蒸发成型法 | 251 | 7.5.3 | 模具结构设计 | 313 |
| 6.10.17 | 液相急冷成型法 | 251 | 7.6 | 压制成型模 | 316 |
| 6.10.18 | 物理气相沉积成型法 | 251 | 7.6.1 | 单向压模 | 316 |
| 6.10.19 | 化学气相沉积成型法 | 253 | 7.6.2 | 双向压模 | 318 |
| 6.10.20 | 等离子体化学气相沉积成型法 | 256 | 7.6.3 | 摩擦芯杆压模 | 319 |
| 6.10.21 | 激光选区烧结成型法 | 256 | 7.6.4 | 组合压模 | 319 |
| 6.10.22 | 熔融沉积成型法 | 257 | 7.6.5 | 精整模 | 320 |
| 6.10.23 | 喷墨打印成型法和三维打印 成型法 | 257 | 7.6.6 | 压制模主要零件设计 | 321 |
| 6.10.24 | 叠层添加成型法 | 258 | 7.7 | 等静压成型模 | 324 |
| 6.10.25 | 立体光刻成型法 | 258 | 7.8 | 真空练泥机工装设计 | 326 |
| 6.10.26 | 爆炸烧结成型法 | 259 | 7.8.1 | 机头、机嘴与铁芯的尺寸 | 327 |
| 6.10.27 | 电火花烧结成型法 | 260 | 7.8.2 | 结构设计 | 328 |
| 6.11 | 纳米陶瓷坯体(素坯)的成型 | 260 | 7.9 | 模腔尺寸计算 | 330 |
| 6.11.1 | 冷等静压成型法 | 261 | 7.9.1 | 放尺 | 330 |
| 6.11.2 | 超高压成型法 | 262 | 7.9.2 | 热压铸模型腔尺寸 | 332 |
| 6.11.3 | 橡胶等静压成型法 | 263 | 7.9.3 | 松装粉料的装料比与模腔高度 尺寸 | 333 |
| 6.11.4 | 气相蒸发沉积加等静压成型法 | 263 | 7.9.4 | 压制模型腔尺寸 | 334 |
| 6.11.5 | 离心注浆成型法 | 263 | 7.10 | 石膏模和其他材料模 | 336 |
| 6.11.6 | 凝胶直接成型法 | 264 | 7.10.1 | 石膏模 | 336 |
| 6.11.7 | 凝胶浇注成型法 | 264 | 7.10.2 | 改性石膏模 | 346 |
| 6.11.8 | 渗透固化成型法 | 264 | 7.10.3 | 人工合成石膏模 | 351 |
| 6.12 | 成型机械 | 265 | 7.10.4 | 新型多孔模 | 352 |
| 6.12.1 | 挤压成型机 | 265 | 7.10.5 | 陶瓷基模 | 355 |
| 6.12.2 | 其他成型机械技术规范 | 269 | 7.10.6 | 橡塑模 | 355 |
| 第7章 | 陶瓷制品成型模具 | 290 | 7.10.7 | 金属孔模 | 358 |
| 7.1 | 成型模具分类 | 290 | 7.10.8 | 金属模 | 359 |
| 7.2 | 模具设计原则和模种制作 | 290 | 7.11 | 石膏模的使用、寿命与质量控制 | 370 |
| 7.2.1 | 成型模具设计原则 | 290 | 7.11.1 | 石膏模的使用 | 371 |
| 7.2.2 | 日用陶瓷石膏模的模种制作 | 291 | 7.11.2 | 提高滚压新模具陶瓷坯体合格 率的对策 | 372 |
| 7.3 | 可塑法成型模 | 294 | 7.11.3 | 把好模具质量关的一些做法 | 373 |
| 7.3.1 | 阴模设计 | 294 | 7.11.4 | 模具的表面处理与装配 | 375 |
| 7.3.2 | 阳模设计 | 299 | 7.11.5 | 模具的管理 | 376 |
| 7.3.3 | 旋坯刀和旋压模 | 299 | 7.12 | 采用先进的CAD/CAM技术 | 378 |
| 7.3.4 | 滚压头 | 301 | 第8章 | 陶瓷成型模具设计实例 | 380 |
| 7.4 | 注浆成型模 | 305 | 8.1 | 日用陶瓷制品滚压模 | 380 |
| 7.4.1 | 双合模 | 306 | 8.2 | 1200mL桶形壶注浆成型模 | 380 |
| 7.4.2 | 多合模 | 308 | 8.3 | 工字形磁芯热压铸模 | 381 |
| 7.4.3 | 多块复合模 | 310 | 8.4 | 电极支架热压铸模 | 382 |
| 7.4.4 | 多层次结构模 | 311 | | | |

| | | | |
|----------------------|-----|--|-----|
| 8.5 铁氧体磁体湿法压制模 | 384 | 8.7.3 压制 | 389 |
| 8.5.1 磁体成型方法 | 384 | 8.7.4 脱模 | 389 |
| 8.5.2 模具结构 | 384 | 8.8 磁芯模 CAD系统 | 390 |
| 8.6 电瓷半干压成型模 | 386 | 8.9 基于CAD/CAM技术的陶瓷花瓶造型 及模具设计与制造技术 | 392 |
| 8.7 偏转磁芯压制模 | 387 | 参考文献 | 396 |
| 8.7.1 压坯松装高度 | 387 | | |
| 8.7.2 装粉 | 389 | | |

第 1 章 中国陶瓷发展简史

1.1 陶瓷与中华文明

陶瓷是我国古代的伟大发明之一。它以起源的久远、种类的丰富、工艺的精湛、造型的美学意蕴和千姿百态，比任何其他器物都更为完整、系统地从一个重要方面充当着社会发展的见证物，凝固着历史的足迹，印证着中华文明的步伐。

中国陶瓷制品是中华文明的一种十分特殊的载体，作为最普通、最实用、最贴近人类生产和生活的用具，长期与人类相伴，与人类的历史相伴。它以其不可替代的特性适应着人类广泛而又恒定的种种需要，其经久不衰的奥秘在于它最广泛地普及与不断地更新，从而也不断地蕴蓄进人的创造意识和文化精神。与其他器物如石器、青铜器、玉器、金器、银器等相比，陶瓷制品一直与人们的日常生活有着最为密切的联系，它易碎但价格低廉，材料来源丰富，更新速度快，与人们的日常生活不可脱离。因此可以说，陶瓷制品同人类是“与生俱来”，又“相依为命”。其中，中国瓷器曾经是中国人重要的生活用具、重要的宗教信仰用品，也是重要的艺术作品，后来又曾经是重要的出口产品，以至于在外国人眼里中国与瓷器等同。中国瓷器之所以能在历史上以鲜明的特色著称于世，是因为有其独具风姿的造型和特定的文化内涵，不论从技术到工艺，还是从器形到装饰，都具有浓郁的东方地域特征，并世代流传，不断发展，是物质和精神文化的交融渗透、民族智慧的凝结。

陶器是随着史前人类进入新石器时代而出现，制陶的发明与人类开始定居生活以及与火的使用有密切的关系，泥土或黏土经火焙烧后变硬，促使原始先民有意识地用泥土制作并焙烧成他们所需要的器物。泥条盘筑法是陶器古老的制作法：将拌好的黏土搓成泥条，从器底依次盘筑成器壁，直至器口，经拍打并抹平器壁盘筑时留下的沟缝，然后入窑烧制。历史上虽无陶器时代的名称，但其对中华文明的贡献是不可估量的。

据考证，已知的我国最早的彩陶制品的年代大约距今 7000 多年，从那时起到铜石并用时代的商代，彩陶制品经历了几千年的从诞生、发展、繁荣、流变到衰落的漫长历史过程。而这个过程的大半时间内，中国历史文化还不能用真正意义上的文字来记载。程金城指出^[1]：中国彩陶不仅是中华民族有文字记载以前最重要的艺术创造，而且其本身从产生到衰落的历史也超过了有文字记载的文明史。彩陶可以说是综合着数千年原始社会状况和人的生存情境，浓缩着精神世界的一本独特的“史书”。

彩陶之后，陶器炆器进一步发展，到瓷器的诞生，这时陶瓷虽然不再具有原始时期彩陶那样鲜明的原始宗教、图腾崇拜、族类标识等精神方面的色彩，但它始终伴随着中华民族历史的特殊文化，书写着中华民族的精神历史。新石器时代可以说是陶器的时代，商周出现原始瓷器，开始从陶到瓷的过渡；东汉至六朝时期，真正意义上的瓷器烧成并迅速发展；隋唐五代，陶瓷业有了新的发展；到宋代，制瓷业达到了空前的水平；元代，出现了瓷都景德镇，中国陶瓷业无论是在数量还是质量上都有了突飞猛进的发展；这种势头在明代得到保持，形成了全国陶瓷业中心；清代，陶瓷在工艺上达到了巅峰；进入现代，特别是当代，随

着物质和精神文明的巨大发展，陶瓷业出现了全新的局面。当今，陶瓷制品不仅广泛应用于日常生活、工艺美术、环境陈设、建筑装饰等方面，还在化工、电力、机械等工业领域有很大的用途。此外，用人工合成原料和黏土以外的天然原料制成的新型陶瓷制品已应用于半导体、原子能、火箭等领域。总之，陶瓷的发展经历了一个漫长的历史时期。

从历史进程来看，陶瓷的发展大致可分为以下 3 个阶段^[2]。

第一阶段：从陶、瓷器到近代的传统陶瓷。我们的祖先利用黏土的可塑性将其加工成型为所需的形状，然后在火堆中烧制成坚硬的陶器。陶器的出现、发展和广泛应用是社会生产力的一个飞跃，同时也大大方便和丰富了人类的生活。此后的陶器经历了漫长的发展和演变过程。随着金属冶炼技术的发展，人类掌握了通过鼓风提高燃烧温度的技术，采用了含铝量较高的瓷土，发明了釉。由于这 3 个方面因素的促进，陶器发展到了以洁白细腻、轻巧美观、材质精美和具有得天独厚的资源优势的瓷器，成为陶瓷发展史中的一次重大飞跃，也是陶瓷发展史的第 1 个里程碑。它标志着人类完成了从蒙昧时代进化到野蛮时代，进而过渡到文明时代，具有划时代的意义。近代，由于对陶瓷的原料、配比、成型、制作工艺进行精选优化和严格控制，不仅提高了陶瓷制品的质量，增加了花色品种，而且随着科学技术的发展和需求，在日用陶瓷等的基础上又衍生出了许多种类的陶瓷，如电力工业用的绝缘陶瓷、建筑工业用的建筑陶瓷和卫生陶瓷、冶金工业用的耐火材料、化学工业用的耐腐蚀的化工陶瓷和多孔陶瓷等。由于这些陶瓷的主要成分是硅酸盐化合物，人们将这类陶瓷称为传统陶瓷。

第二阶段：从传统陶瓷到新型陶瓷。这一阶段起源于 20 世纪 40~50 年代，是陶瓷发展史上的第 2 次重大飞跃。电子工业、电力工业的迅速发展和宇宙开发，原子能工业的兴起，以及激光技术、传感技术、光电技术等新技术的出现，对陶瓷材料提出了很高的要求，而传统陶瓷无论在性能、品种和质量等方面都不能满足需求，这便促使人们从原料、成型和烧结工艺方面进行改进和创新：①原料方面，由高纯的人工合成原料代替天然的硅酸盐矿物原料，制得了一系列不含硅酸盐的陶瓷材料；②原料制备工艺的重要革新；③成型和烧结的新工艺、新技术。加上陶瓷科学与相邻学科的交融和创新突破，对陶瓷的发展起到了极大的促进作用，大约只经历了近半个世纪人类就实现了传统陶瓷到新型陶瓷的飞跃。该阶段存在的问题是陶瓷的脆性和高温高强等问题远未彻底解决。

第三阶段：从新型陶瓷到纳米陶瓷。这一阶段起源于 20 世纪 90 年代，陶瓷发展正面临着第 3 次重大飞跃。人们预期 21 世纪初叶陶瓷科学将会在这方面取得重大突破，生产出许多不同于新型陶瓷的纳米陶瓷材料与制品。

综上所述，中国作为举世公认的陶瓷王国，在其漫长的历史发展过程中，陶瓷与中华文明发展有着十分密切的联系，它从诞生、发展、演变、创新……，从一个侧面反映着中华文明的进程和中国各个时代的特征，同时也在相当程度上反映了中华民族各个历史时期的技术发展水平。

1.2 陶瓷在现代化建设中的作用

陶瓷材料是人类最早使用的材料之一，直至现在，它仍是人类生活中不可缺少的一种材料。陶瓷制品除作为集实用与美感于一体的人造物供人类享用外，还以独特的方式提供了中华文明和人类的历史发展进程中的特殊信息，这些信息不仅包括陶瓷的种类、材料组织结构和性质、陶瓷造型与构型、传统陶瓷设计、新型陶瓷的材料设计、陶瓷坯料的成型性能和成

型方法、纳米陶瓷坯体成型、成型设备、成型模具设计与管理等物质方面的信息，而且也蕴含着人的精神和文化方面的信息。人们日常生活中不能没有陶瓷制品，就是工业生产、科学研究中也同样不能缺少陶瓷制品。传统陶瓷（日用陶瓷、陈设陶瓷、包装陶瓷、建筑卫生陶瓷、绝缘陶瓷、化工陶瓷、多孔陶瓷等）是人民生活、工业和基础建设必需的基础材料和制品，种类繁多，造型千姿百态，成型方法有数十种，其发展与中华文明、科学技术的发展和人类的生存发展息息相关。新型陶瓷（结构陶瓷、功能陶瓷、金属陶瓷、陶瓷基复合材料、陶瓷纤维、陶瓷薄膜、纳米陶瓷等）制品更是现代新技术、新兴产业和传统工业技术改造的物质基础和先导，也是发展现代军事技术、空间技术和生物医学的必要的物质条件。

陶瓷所涉及的领域十分广泛，这是因为陶瓷特有的物质（技术功能、使用功能）和精神（审美功能、象征功能）的双重性。陶瓷具有良好的物理性质、力学性质、化学性质、成型性能以及经济性，其中有着许多其他材料和制品无法比拟的优异性能，如耐磨损、耐腐蚀、耐高温高压、硬度高、不会老化等，能够在其他材料无法承受的恶劣环境条件下正常工作。但是，陶瓷有一个最大的弱点，就是脆性，具体表现为在外力作用下不发生显著变形即告破坏。这一严重弱点在陶瓷的实际使用过程中在很大程度上限制了其应用的范围。如何克服陶瓷的脆性，提高陶瓷的韧性，便成为长期以来科技人员的一个努力方向。

除了脆性这一最大的弱点外，陶瓷还存在可加工性差的弱点，这也是科技人员长期以来试图解决但一直未能解决的问题。为此，本书避开可加工性差的难题，着重论述陶瓷造型、陶瓷结构和材料设计、坯料成型性能、成型方法和成型模具设计，以便有助于读者从理论和实践两方面提高陶瓷的造型水平和成型质量以及成型后的制品精度，达到少无切削加工即精确成型的目的。

21世纪会给陶瓷的材料科学、造型理论、结构和材料设计、坯料成型性能研究、成型方法、成型模具与设备等领域的发展带来新契机和新挑战，其中以提高陶瓷制品的质量和探索新的陶瓷，适应现代化建设的需要尤为重要。这就要求广大陶瓷科技工作者既要认真学习陶瓷方面的理论知识，深入到原子、电子一级的层次中，掌握陶瓷组成、结构、化学键与性质和性能的关系，又要认真学习国外的先进技术和前沿的科研成果，认真实践，不断创新，以期能按预定性能改进传统陶瓷和设计，并成型加工出更多的新型陶瓷以及纳米陶瓷，完成现代化建设中这个艰巨而重要的任务。

第 2 章 陶 瓷 概 论

陶瓷是指以粉状天然或人工合成的无机非金属物质为原料，经成型和高温烧结制成的无机非金属固体材料和制品^[3]。人们常说的“陶瓷”就有以上两种含义。在不特定指为材料的情况下，本书称陶瓷为陶瓷制品，将陶瓷（制品）作为一种集功能、形式、寓意、色彩和体积感于一身的物质制品，围绕着它的造型、设计、成型和模具 4 个方面进行论述。

2.1 陶瓷分类

陶瓷按原料不同分为传统陶瓷和新型陶瓷 2 类；按功能不同分为纯审美型陶瓷、纯实用型陶瓷和赏用结合型陶瓷 3 类。

2.1.1 传统陶瓷简介

传统陶瓷是主要利用天然硅酸盐矿物（如黏土、石英、长石等）为原料制成的陶瓷，又称普通陶瓷。传统陶瓷的天然矿物原料在化学组分和构成物相上变化幅度大，因而对陶瓷材料和陶瓷制品的性能影响很大。传统陶瓷大致包括日用和工业用两类（见图 2-1）。日用陶瓷一般要求有良好的白度、光泽度、透光度、热稳定性和机械强度，主要为瓷器。

工业陶瓷主要为炆器及陶器，包括建筑陶瓷、卫生陶瓷、绝缘陶瓷、化工陶瓷和多孔陶瓷等。

为改善各种工业陶瓷的特殊性能，生产中通常通过加入 MgO、ZnO、BaO、Cr₂O₃ 等氧化物或者增加莫来石晶体相（3Al₂O₃ · 2SiO₂）来提高陶瓷的机械强度和耐碱抗力，加入 Al₂O₃、ZrO₂ 等可提高机械强度和热稳定性，加入滑石或镁砂可降低热膨胀系数，加入 SiC 可提高导热性和机械强度。表 2-1 列出了几种传统陶瓷的基本性能^[4]。

表 2-1 传统陶瓷的基本性能

| 陶瓷种类 | 日用陶瓷 | 建筑陶瓷 | 绝缘陶瓷 | 化工陶瓷 |
|--|---------|-------------|-------------------|-------------------|
| 密度/(g/cm ³) | 2.3~2.5 | 约 2.2 | 2.3~2.4 | 2.2~2.3 |
| 气孔率/% | — | 约 5 | — | <6 |
| 吸水率/% | — | 3~7 | — | <3 |
| 抗拉强度/MPa | — | 10.8~51.9 | 23~35 | 8~12 |
| 抗压强度/MPa | — | 568.4~803.6 | — | 80~120 |
| 抗弯强度/MPa | 40~65 | 40~96 | 70~80 | 40~60 |
| 冲击韧性/(kJ/m ²) | 1.8~2.1 | — | 1.8~2.2 | 1~1.5 |
| 线膨胀系数/10 ⁻⁶ ℃ ⁻¹ | 2.5~4.5 | — | — | 4.5~6.0 |
| 热导率/[W/(m·K)] | — | 约 1.5 | — | 0.92~1.04 |
| 介电常数 | — | — | 6~7 | — |
| 损耗角正切 | — | — | 0.02~0.04 | — |
| 体积电阻率/Ω·m | — | — | ≥10 ¹¹ | — |
| 莫氏硬度 | 7 | 7 | — | 7 |
| 热稳定性/℃ | 220 | 250 | 150~200 | (2 ^①) |

① 试样由 220℃ 急冷至 20℃ 的次数。

2.1.2 新型陶瓷简介

新型陶瓷是采用高纯度的人工合成原料制成的具有各种独特的力学、物理或化学性能的陶瓷，又称现代陶瓷或特种陶瓷。按照化学组成不同，可分为氧化物陶瓷（氧化铝瓷、氧化锆瓷、氧化镁瓷）、氮化物陶瓷（氮化硅瓷、氮化铝瓷、氮化硼瓷）、碳化物陶瓷（碳化硅瓷、碳化硼瓷）、金属陶瓷以及纳米陶瓷等。它们都是在传统硅酸盐陶瓷基础上发展起来的新一代无机非金属材料。新型陶瓷的化学组成和杂质含量一般都可以有效地控制，所得的材料及制品的性能一致性得以保证。新型陶瓷的分类见图 2-2。

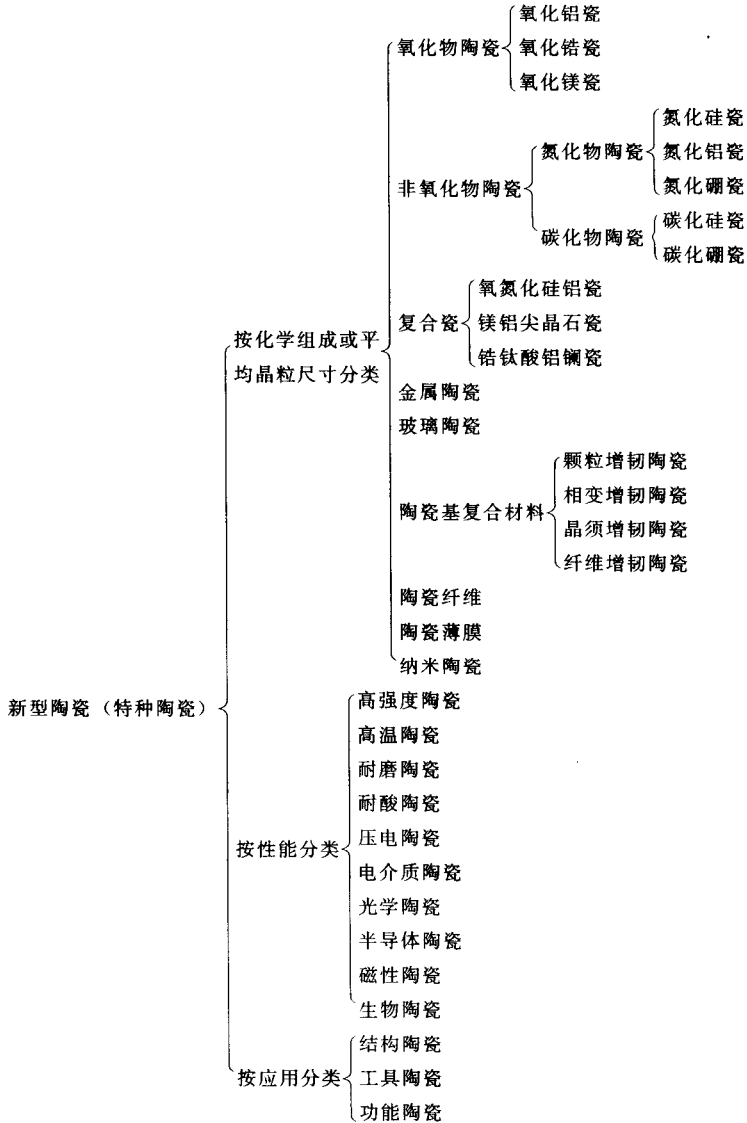


图 2-2 新型陶瓷的分类

就陶瓷制品的功能而言，有的追求纯粹的审美功能，有的以纯实用为目的，更多的则介于两者之间，即以实用和审美双重需要为目的^[5]。

2.1.3 纯审美型陶瓷

纯审美型陶瓷又称艺术陶瓷，主要有雕塑、壁画、壁饰、挂盘、纪念品等。

艺术陶瓷的创作也称陶艺，主要是借助于独具特质的陶瓷材料，从创作者个人的理念、视角和手法等出发，强化艺术的概念，淡化或取消其使用功能，并赋予它多元化的意义和结构形式，以表现出特定历史条件下人类的审美意境。就现代陶艺创作者而言，可分为两大类：第1类是观念上与实用相分离，取向于纯粹的艺术形式；第2类是自觉融入特定环境的设计者。

2.1.4 纯实用型陶瓷

纯实用型陶瓷主要是指传统陶瓷中的绝缘陶瓷、化工陶瓷、多孔陶瓷等和新型陶瓷。

2.1.5 赏用结合型陶瓷

赏用结合型陶瓷可细分为日用陶瓷、陈设陶瓷、包装陶瓷、卫生陶瓷和建筑陶瓷。

人们日常生活中必不可少的日用陶瓷有餐具、茶具、咖啡具、酒具、冷水具、冰箱用具、烤箱用具、厨房用具以及微波炉用具等。

侧重于满足人的其他生活与工作需要的陈设陶瓷有灯具、花器、文具、饰物、礼品以及工艺品等。

具有文化内涵、用于遮光及保存的包装陶瓷有酒瓶、化妆品和食品以及药品的容器等。体现居室风格、档次和生活方式的卫生陶瓷有洗面盘、坐便器、洁具、水池、浴盆等。

方兴未艾的建筑装修用建筑陶瓷有内外墙面砖、地砖、琉璃制品、陶管和饰面瓦等。

赏用结合型陶瓷设计^[6]可按生产方式不同分为现代机械大生产的制品设计和手工制品设计两类，还可按销售方式不同分为以大量消费为目的的一般设计和为特定场合所做的定向设计。两种分类中前者面对市场，以大众为对象；后者面向雇主，以特殊的环境和具体消费者为对象。无论何种陶瓷设计，设计者将面临两种性质的设计，即自选设计项目的“自发性设计”和被限定设计项目的“指定性设计”。

就审美而言，它涉及到设计师个人的价值标准、审美观念和艺术素质。然而，设计本身所要求的美不仅仅是设计师个人主观判断的美，而且是要符合时代的要求，为消费者欣赏水平所认可的美，就是说必须立足于时代性和社会性。

就实用而言，设计内容应考虑陶瓷制品在一定的环境中与人的生理、心理、生活习惯及生活方式等多方面的关系，不仅要发现并选择与功能和构造相吻合的形态，还要尽可能巧妙地利用材料和工艺手段，在方便生产、包装、运输、存放诸因素方面精心考虑和处理，从而使设计合理、经济和适用。

本书重点论述的对象为赏用结合型和纯实用型陶瓷制品的设计 [包括造型 (含构型)、结构及组成]、成型技术以及模具设计。

2.2 传统陶瓷

将陶瓷原料和辅助材料以及水分等经过配料和加工得到具有成型性能的多组分混合物，称之为陶瓷坯料 (含浆料、粉料)。

传统陶瓷的主要原料分为可塑性和非可塑性两种类型^[6]。可塑性原料有高岭土、耐火黏土、难熔黏土及易熔黏土，其中也包括增塑剂，如膨润土等。非可塑性原料根据作用特性不同又分为瘠性原料 (由耐火黏土和高岭土制得的熟料、碎瓷粉、石英砂等) 和熔剂原料 (长石、伟晶花岗岩、滑石、白云石、白垩等)。有时为了调节可塑坯料和泥浆的成型性质，

引入少量的辅助材料，如水玻璃、纯碱、氢氧化钡、亚硫酸酒精废液、石蜡等。

传统陶瓷原料的主要成分是天然存在的石英、黏土和长石。

(1) 石英 石英是一种结晶状 SiO_2 的天然矿物，地球上到处可见，其主要成分^[7]为 SiO_2 ，并在成矿过程中由夹杂矿物带入少量杂质成分，如 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 TiO_2 等（见表 2-2）。夹杂矿物主要是指碳酸盐中的方解石、白云石、菱镁矿等，以及长石、云母、金红石、板钛矿、铁的氧化物等。

表 2-2 石英化学成分

| 原料名称 | 产地 | 化 学 成 分 / % | | | | | | | | |
|------|-------|----------------|-------------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------|----------------|--------------|--------------|------|
| | | SiO_2 | Al_2O_3 | K_2O | Na_2O | Fe_2O_3 | TiO_2 | CaO | MgO | 灼减 |
| 石英 | 山东泰安 | 99.48 | 0.36 | — | — | 0.10 | — | — | — | 0.03 |
| 石英 | 河南铁门 | 98.94 | 0.41 | — | — | 0.19 | — | 痕量 | 痕量 | — |
| 石英砂 | 江苏宿迁 | 91.90 | 4.64 | — | — | 0.21 | — | 0.20 | 0.10 | 0.24 |
| 石英 | 湖南湘潭 | 95.31 | 1.93 | — | — | 0.26 | — | 0.39 | 0.40 | 1.74 |
| 石英 | 广东桑甫 | 99.53 | 0.19 | — | — | — | — | 痕量 | 0.04 | — |
| 石英 | 江西星子县 | 97.95 | 0.53 | 痕量 | 0.44 | 0.19 | — | 0.33 | 0.63 | 0.29 |
| 石英 | 江西景德镇 | 98.24 | — | — | — | — | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 广西 | 99.24 | — | — | — | 1.02 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 山西五台 | 98.71 | 0.65 | — | — | 0.16 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 四川青川 | 98.89 | 1.03 | — | — | 0.032 | — | 0.17 | — | 微量 |
| 石英 | 贵州贵阳 | 98.23 | 0.18 | — | — | 0.02 | — | — | — | 微量 |
| 石英砂 | 贵州普定 | 96.77 | 0.46 | — | — | 0.57 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 新疆尾亚 | 98.4 | 0.18 | — | 0.02 | 0.80 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 云南昆明 | 97.07 | — | — | — | 0.56 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 陕西凤县 | 97.0 | 1.41 | — | — | — | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 山西闻喜 | 98.05 | — | — | — | 0.10 | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 北京 | 99.02 | 0.024 | — | — | — | — | — | — | 微量 |
| 石英 | 内蒙古包头 | 98.08 | 0.84 | — | — | 0.34 | — | 0.19 | — | 微量 |

石英是一种具有耐热性、抗蚀性的高硬度的物质，构成陶瓷制品的骨架。石英在加热过程中会发生多种晶格类型的变化。晶型转化的结果，引起陶瓷体积、密度、强度等一系列的变化。其中对制品质量影响较大的是体积变化，例如从 α -石英转变为 α -鳞石英时体积要膨胀 12.7%，说明石英在高温下晶型转化时的体积膨胀可以部分抵消坯体烧成收缩所产生的影响。另外，石英是一种瘠性原料，它在坯料中可降低干燥收缩，调节成型工艺性能。

石英原料的熔融温度范围取决于二氧化硅的形态及纯度。一般而言，熔融温度范围随杂质的增多而降低，例如脉石英、石英岩和砂岩的熔融温度约为 1750~1770℃，当杂质含量达 3%~5% 时即降为 1690~1710℃，当 Al_2O_3 含量达 5.5% 时则降至 1595℃。

石英在陶瓷生产中的作用^[8]：①是瘠性料，可降低可塑性，减少收缩变形，加快干燥；②在高温时可部分熔于长石中，增加液相的黏度，减少高温时坯体变形；③未熔石英与莫来石一起构成坯体骨架，增加强度；④在釉料中增加石英含量可提高釉的熔融温度和黏度，提高釉的耐磨性和抗化学腐蚀性。

(2) 黏土 黏土是自然界中硅酸盐岩石（如长石、云母）经过长期风化作用形成的一种土状矿物混合物，它的主要化学组成为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 TiO_2 、 H_2O 等，是一种含水的铝硅酸盐矿物，具有独特的可塑性和黏结性，调水后易塑造成型，烧成后变得致密坚硬。它是成型能够进行的基础，也是黏土质陶瓷成瓷的基础^[9]。

黏土以其独特的工艺性能和烧成特性（见表 2-3），成为陶瓷不可缺少的基本原料，起

表 2-3 我国部分黏土原料的主要工艺性能

| 原料名称 | 密度 /(g/cm ³) | 可塑性 | | | 干燥抗折强度 /MPa | 线收缩率/% | | 烧结温度 /℃ |
|----------------|-----------------------------|-------|-------|------|----------------|--------|-------|------------|
| | | 水分/% | 指数 | 指标 | | 干燥 | 烧成 | |
| 苏州 2# 土 | 2.52~2.57 | — | 18.2 | 2.0 | 0.98 | 7.20 | 未测 | — |
| 湖南界牌土(桃红泥) | 2.59 | — | 16.75 | 3.3 | 1.45 | 6.40 | 4.83 | — |
| 山西大同砂石 | 2.70 | — | 6.90 | 1.45 | 1.22 | 6.70 | 17 | — |
| 江西星子高岭(红色) | 2.62 | 30.66 | — | 1.64 | 0.97 | 6.37 | 8.69 | — |
| 江西景德镇明砂高岭(不子) | 2.60 | 29.55 | — | 0.41 | 0.43 | 4.10 | 13.10 | — |
| 河北唐山紫木节 | 2.76 | — | 17.3 | 2.44 | 2.41 | 7.80 | 13.70 | — |
| 河北唐山碱石 | 2.44 | — | 3.95 | 1.44 | 1.48 | 5.19 | 8.33 | — |
| 山东焦宝石 | — | — | 未测 | 3.22 | 1.80 | 6.25 | 9.50 | — |
| 河北徐水土 | 2.63 | — | 10.7 | 1.73 | — | 5.06 | 未测 | — |
| 广东飞天燕洗泥 | 2.67 | — | — | 3.98 | 0.64 | 4.58 | 12.35 | — |
| 辽宁黑山膨润土 | — | — | 80.6 | 2.4 | 4.7 | 16 | 9.29 | 1350℃/1h |
| 河北章村硬质土 | 2.85 | — | 2.3 | 1.45 | 0.15 | 1.6 | 6.0 | — |
| 河北章村软质土 | 2.85 | — | 3.7 | 1.17 | 0.39 | 3~3.5 | 3.5~4 | — |
| 宜兴紫砂泥 | — | — | 17.5 | — | 2.94 | 3.8 | 5.76 | — |
| 江西景德镇柳家湾瓷石雷蒙粉 | 2.66 | 23.4 | — | 2.16 | 1.79 | 5.6 | 8.26 | 1260~1270 |
| 江西景德镇南港瓷石(不子) | 2.64 | 26.58 | — | 2.69 | 1.22 | 5.4 | 10.52 | 1260 |
| 江西景德镇三宝蓬瓷石(不子) | 2.67 | 20.73 | — | 2.73 | 0.71 | 3.2 | 9.3 | 1180~1200 |
| 吉林水曲柳黏土 | 未测 | — | 23 | 3.40 | 3.92~8.53 | 8~9 | 9.30 | — |

着以下极为重要的作用。

① 坯体成型 陶瓷坯料依靠黏土原料特有的可塑性能、结合性能以及泥浆的悬浮稳定性能获取所需的成型性能，以便使陶瓷坯体得以成型。

② 使坯体具有一定的干燥强度 保证坯体在修粘、施釉、搬运及装钵各道工序中不致引起破损。

③ 构成坯体的骨架 在烧成过程中，黏土经过一系列物理化学反应转化为莫来石晶相，而成为坯体的主要骨架。莫来石晶体的骨架作用不仅有效地增加了制品抵抗烧成变形的能力，拓宽了烧成温度范围，而且使烧成后的制品具有较高的机械强度与良好的热稳定性及化学稳定性。

④ 收缩性 指黏土经干燥后自由水以及吸附水相继排出，黏土颗粒间距离缩短而产生的干燥收缩，以及干燥后黏土经高温煅烧，因产生脱水分解作用和液相填充在空隙中并将颗粒黏合起来，还有某些结晶物质使体积进一步收缩的烧成收缩。干燥收缩和烧成收缩构成黏土质制品的总收缩。

我国陶瓷常用黏土的化学组成列于表 2-4^[7]。

表 2-4 我国主要黏土原料的化学组成

| 产地名称 | 化学组成/% | | | | | | | | | | |
|-------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------|------|------------------|-------------------|-------|--------|
| | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | MnO | CaO | MgO | K ₂ O | Na ₂ O | 烧失 | 总量 |
| 高岭石类 | | | | | | | | | | | |
| 江西明砂高岭土(精泥) | 47.69 | 36.01 | 0.99 | 0.04 | 0.14 | 0.40 | 0.25 | 2.51 | 0.95 | 11.12 | 100.10 |
| 江西马鞍山碱石 | 44.23 | 38.29 | 0.72 | 2.38 | 痕量 | 痕量 | 0.26 | 0.35 | 0.21 | 14.13 | 100.57 |
| 江西星子高岭土(精泥) | 54.60 | 41.30 | 1.46 | — | 0.16 | 0.15 | 0.22 | 2.01 | 0.19 | — | 100.09 |
| 河北开滦 | 45.55 | 36.38 | 3.29 | 1.24 | — | 0.31 | 0.14 | — | — | 14.18 | 101.72 |
| 河北唐山碱干 | 43.50 | 40.09 | 0.63 | 0.30 | — | 0.47 | — | 0.49 | 0.22 | 14.28 | 99.98 |
| 河北唐山紫木节 | 46.15 | 32.58 | 1.32 | 1.32 | — | 1.27 | 0.43 | 0.70 | 0.74 | 16.16 | — |