

陶瓷烧成过程中裂纹与变形的控制方法研究

张岩

青岛城市学院, , 山东省青岛市, 266100;

摘要: 陶瓷烧成过程中的裂纹与变形是影响产品质量的重要问题。本文探讨了材料特性、烧成温度、升温速率、窑炉气氛等因素对缺陷的形成机理及其特征影响, 明确了裂纹与变形的成因和对产品性能的影响。在此基础上, 提出了通过优化原料配方、改进烧成工艺、调整窑炉结构及采用辅助支撑等技术方法进行控制的思路。同时, 结合智能化监测与控制技术, 实现裂纹与变形的实时检测与过程优化, 为提升陶瓷质量及改进烧成工艺提供了技术支持。

关键词: 陶瓷烧成; 裂纹控制; 变形抑制; 智能化监测

DOI: 10.69979/3029-2735.25.07.084

引言

陶瓷烧成过程中裂纹与变形是影响其质量的关键因素, 本文通过分析材料特性、烧成温度、升温速率、窑炉气氛等因素的作用机制, 结合智能化监测与控制技术的应用, 为陶瓷生产提供科学的理论指导和实践参考, 以提高陶瓷产品的烧成质量和生产效率。

1 陶瓷烧成过程中裂纹与变形的形成机理

陶瓷的烧成过程伴随着显著的物理、化学及微观结构变化。裂纹通常来源于热应力、相变应力和制件内部的残余应力。而变形则往往与坯体的非均匀收缩、材料软化时的自重效应及制件内部微观结构的分布不均有关^[1]。因此, 研究陶瓷烧成过程中裂纹与变形的形成机理, 需要从材料特性、烧成工艺参数以及窑炉环境三方面入手进行深入分析。

1.1 材料特性对裂纹与变形的影响

陶瓷坯体材料的化学成分和微观结构是决定烧成过程中裂纹与变形行为的关键因素。首先, 不同成分材料的热膨胀系数的差异会引发不均匀的热应力。例如, 铝硅系材料与纯氧化铝材料的热膨胀系数通常有较大差距, 混合使用可能在界面处产生残余应力, 这种应力在烧成冷却阶段往往转化为微裂纹。此外, 氧化锆、氧化铝等材料的晶相转变温度以及烧结活性也会显著影响裂纹与变形的发生。高温下材料的黏度、流动性和软化点也决定了烧成中坯体抗变形的能力。例如, 高铝材料在高温阶段通常具有更高的软化温度和更小的塑性变形, 但如果配方设计不当, 可能会导致局部区域的应

力集中, 最终形成裂纹。

1.2 烧成温度与升温速率的作用机制

烧成温度和升温速率直接影响陶瓷坯体内部的应力分布及其微观结构的演变。升温速率过快容易在坯体内部产生较大的温度梯度, 这种温差会导致坯体表层膨胀与内部膨胀不同步, 产生热应力, 最终形成裂纹。研究表明, 在 10° C/min 的快速升温条件下, 氧化锆基陶瓷的裂纹形成概率比升温速率为 3° C/min 时高出约 40%。而升温速率过慢, 尽管热应力较小, 但可能导致材料晶相长时间停留在不稳定的高温状态, 从而加剧烧结阶段的收缩不均, 最终形成显著的形状变形。

此外, 烧成温度的峰值及其维持时间(即保温时间)也至关重要。过高的烧成温度会导致材料过烧, 晶相异常生长或液相过多, 从而降低坯体的抗变形能力。而过低的烧成温度则可能导致烧结不足, 使坯体的强度和均匀性较差, 在冷却过程中易于产生裂纹。研究发现, 对于氧化铝陶瓷, 烧成温度如果从 1550° C 提高至 1650° C, 裂纹发生率会增加 20% 以上, 因为材料的微观结构发生了过度晶粒增长, 内部残余应力增大。

1.3 窑炉气氛与应力分布对烧成质量的影响

窑炉内的气氛和温度均匀性同样是影响裂纹和变形的关键因素。在还原气氛下, 许多材料的氧化还原反应会改变其晶相组成及烧结行为。例如, 氧化锆材料在还原气氛中可能发生氧化锆-氧化铈相变, 这种相变会释放体积应力, 从而增加裂纹的发生概率。而在氧化气氛下, 如果材料表层发生较强的氧化反应, 则可能导致

表层与内部的热膨胀行为差异增大，最终形成表面裂纹。此外，窑炉内的气氛分布不均会导致坯体的热梯度增加，热应力加剧，形成裂纹和不规则变形^[2]。

对于应力分布的影响，窑炉内温场的均匀性尤为重要。窑炉温差若控制在±5°C 以内，坯体的变形率可降低 30% 左右。这是因为温场均匀性较高时，坯体各部分的膨胀收缩趋于一致，从而减少了内应力的积累。此外，通过调节窑炉气氛，例如采用适量的惰性气体保护，可以减少坯体表面氧化反应，从而在一定程度上降低裂纹和变形的风险。

2 裂纹与变形的常见类型与特征分析

裂纹与变形是陶瓷烧成过程中的两大主要缺陷类型。这些缺陷不仅直接影响产品的外观质量和使用寿命，还会对其物理性能和机械性能产生深远的影响。通过系统分析裂纹与变形的常见类型及其特征，有助于明确问题成因，为改进工艺和提升产品质量提供依据。

2.1 裂纹的主要表现形式及其成因分析

裂纹是陶瓷材料在热应力或外力作用下，因局部应力超过材料强度而产生的失效现象。根据裂纹的空间分布和形成阶段，常见的裂纹类型包括表面裂纹、内部裂纹、边缘裂纹以及贯穿性裂纹。

(1) 表面裂纹：

表面裂纹通常出现在坯体的外表面区域，主要由外层与内部温度梯度过大导致的热应力引起。当烧成升温速率较快时，表层膨胀显著，而内部温度相对较低，导致表面张应力集中，从而形成裂纹。此外，烧成气氛不均或局部过烧也可能导致表面脆弱部位出现裂纹^[3]。

(2) 内部裂纹：

内部裂纹是指在坯体内部形成的不可见裂纹。这类裂纹往往与原料配比不均、烧结过程中的相变应力及窑炉气氛分布不均有关。例如，在氧化锆陶瓷中，四方相向单斜相的转变过程中，由于伴随体积膨胀，会引发显著的内部应力，从而形成隐蔽的内部裂纹。

(3) 边缘裂纹：

边缘裂纹常见于制件的棱角或薄弱部位，通常是由边缘部位冷却速度快、应力集中较大造成的。这类裂纹还可能由装烧方式不当引起，例如坯体与支撑件接触过紧，导致局部受力不均，从而在冷却阶段形成裂纹。

(4) 贯穿性裂纹：

贯穿性裂纹一般发生在坯体厚度较大的制品中，通常是多种因素共同作用的结果，包括坯体厚度不均、烧成温差较大、相变应力剧烈等。这种裂纹一旦形成，不仅显著降低制品强度，还可能导致后续使用中的结构失效。

2.2 变形的典型类型及影响因素探讨

陶瓷坯体的变形是在烧成过程中由于材料软化、收缩及内部应力分布不均等原因而发生的形状偏离现象。常见的变形类型包括弯曲、翘曲、扭曲和塌陷等。

(1) 弯曲：

弯曲是指坯体沿某一方向发生整体弯折，通常与坯体厚薄不均或烧成过程中受热不均有关。例如，当坯体下部因与窑具接触受热较慢，而上部受热较快时，上下层的收缩速率不同，导致弯曲变形。

(2) 翘曲：

翘曲通常发生在大面积薄片制品中，表现为边缘向上或向下翘起。这种变形常由不均匀的烧结收缩、坯体配方中不同组分的收缩率差异、或者装烧方式不当引起。实验表明，在某种氧化铝陶瓷片材的烧成过程中，若坯体含有微量的硅酸盐杂质，其收缩行为会与纯氧化铝基体产生差异，从而导致翘曲。

(3) 扭曲：

扭曲变形是指坯体沿中心轴线发生扭转，通常与烧成温度场的非对称性或坯体几何形状的不规则有关。例如，某些复杂形状的陶瓷制品在烧成过程中，由于内部各方向的收缩不一致，会出现整体扭曲。

(4) 塌陷：

塌陷主要发生在坯体高温软化阶段，由于自重或过多的液相出现，导致结构无法维持原有形态而下垂。这种变形通常与配方设计、烧成温度过高、保温时间过长等因素相关。

2.3 各种缺陷对陶瓷产品性能的影响评估

裂纹和变形的存在会直接削弱陶瓷制品的力学性能、气密性、绝缘性能及抗热震性能。裂纹尤其会降低产品的抗弯强度和韧性。例如，某研究显示，含有显微裂纹的氧化铝陶瓷，其抗弯强度可能比无裂纹制品下降约 30%~50%。裂纹还可能成为热震过程中应力集中点，显著降低制品的使用寿命^[4]。

变形则主要影响陶瓷制品的装配性能和尺寸精度。

例如,翘曲变形可能导致产品无法正确嵌装或结合,扭曲变形可能造成组件配合失效。此外,严重变形还可能影响产品的电气绝缘性和密封性,降低其在工程应用中的可靠性。

3 裂纹与变形控制的主要技术方法

3.1 优化坯体原料配方与颗粒分布

坯体原料配方的合理性和颗粒分布的均匀性,是降低烧成缺陷的重要前提。通过调整原料组成及其配比,可以实现烧结过程中的均匀收缩。例如,适当增加低膨胀系数材料的比例,可以有效缓解热应力的积累,从而减少裂纹的形成风险。此外,优化颗粒分布,尤其是控制细颗粒和粗颗粒的比例,有助于改善坯体的密实度和均匀性。研究表明,在某种氧化铝基陶瓷中,采用双峰颗粒分布(以大颗粒作为骨架,小颗粒填充空隙)可以显著降低烧成收缩率的不均匀性,从而减少变形现象。

3.2 改进烧成工艺参数

烧成工艺参数的优化直接影响坯体的受热均匀性和烧结行为。合理设置升温速率、保温时间及降温曲线可以有效降低裂纹与变形的发生概率。

(1) 升温速率的调整

通过降低升温速率,尤其是在材料的临界相变温区,可以减少热应力的积累。例如,在氧化锆陶瓷烧成中,采用 $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率比 $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率能减少裂纹发生率约30%。

(2) 保温时间的控制

适当延长保温时间,确保材料内部的完全烧结,有助于均匀化内部应力分布。例如,高岭土基陶瓷在高温阶段保温30分钟,内部残余应力显著降低,同时成品率提高15%。

(3) 降温曲线的优化

缓慢降温可以避免快速冷却引起的表层与内部的温差过大,从而减轻冷却应力导致的裂纹。此外,设置分段降温的方式,可以进一步减小热应力峰值,防止翘曲与弯曲变形的产生。

3.3 窑炉结构与气氛的改良措施

(1) 改进窑炉内部温场分布

使用多区温控技术,通过增加窑炉内部的热交换装置或调整烧嘴的布置,可以使坯体表面和内部的温差缩小。例如,在隧道窑中优化风道结构后,温场均匀性提

高了20%,裂纹率降低了约25%。

(2) 控制窑炉气氛

窑炉内氧化性或还原性气氛对材料的相变与应力分布有直接影响。通过增加惰性气体或微调氧气浓度,可以控制材料表面的反应速率,减少界面应力集中^[5]。此外,在还原气氛下烧制某些氧化锆陶瓷时,适当的气氛调整可以使相变应力减小,裂纹发生率显著降低。

3.4 使用辅助支撑和夹具减少变形风险

(1) 辅助支撑的设计

根据坯体的几何特征,采用耐高温材料制成的支架或衬垫,可以均匀分布应力。例如,在大尺寸板状陶瓷的烧成中,采用高强度支撑板,能将变形率降低至1%以下。

(2) 夹具的选择与布置

对于薄壁或中空制品,使用特制夹具夹持关键部位,可以避免其在高温下受自重作用而下沉。此外,某些复杂形状的坯体可以利用弹性夹具在烧成过程中动态调整支撑点,确保烧成后尺寸精度更高。

4 智能化监测与控制技术的应用

智能化监测与控制技术在陶瓷烧成领域的应用主要体现在实时监控、数据分析和自动调整方面。通过部署高精度的温度传感器、应力检测装置以及气氛监控系统,窑炉内的温场分布、坯体受力状况和烧成气氛可以得到全面实时的跟踪^[6]。结合先进的数据采集与分析平台,这些监测设备所提供的大量数据得以快速处理,从中提取出关键参数变化规律。基于这些规律,智能控制系统能够自动调整升温速率、气体流量、保温时间等工艺参数,确保坯体在整个烧成过程中保持最佳状态,显著降低裂纹和变形的发生概率。此外,智能控制还具备自学习和预测功能,能够提前预判可能出现的异常状况并及时修正,进一步提升生产效率和产品合格率。智能化监测与控制技术的应用不仅提高了生产过程的稳定性与可控性,还为陶瓷工业的高质量发展提供了技术支撑。

5 结语

本文围绕陶瓷烧成过程中裂纹与变形的形成机理,系统分析了材料特性、烧成参数、窑炉环境等关键因素,明确了不同缺陷的成因及其对陶瓷产品性能的影响。在此基础上,结合优化原料配方、改进工艺参数、调整窑

炉条件及辅助支撑等技术方法,提出了行之有效的控制策略,同时探讨了智能化监测与控制技术在实时调控和质量提升方面的潜力。

参考文献

- [1] 王丹妮. 清代至民国时期淄博窑陶瓷研究 [D]. 景德镇陶瓷大学, 2024.
- [2] 戚泽清. 纺织纤维在当代陶瓷雕塑中的应用研究 [D]. 景德镇陶瓷大学, 2024.
- [3] 赵梦冉. 邢窑陶瓷烧制技艺恢复与传承研究 [D]. 河北大学, 2024.

[4] 黄晓芳. AlN 陶瓷各向异性变形行为及其在精密磨削中的应用 [D]. 华南理工大学, 2022.

[5] 房永超. 钆酸镧基陶瓷热防护涂层的多元稀土高熵化改性研究 [D]. 哈尔滨工程大学, 2022.

[6] 张凤明. 选区激光熔化成形生物陶瓷的抑制裂纹工艺研究 [D]. 苏州大学, 2022.

作者简介: 张岩 1989, 男, 汉, 青岛城市学校艺术与设计学院, 青岛市城阳区铁骑山路, 中级, 硕士研究生, 陶瓷艺术研究。