

# 一种粉煤灰制备蒸养陶粒的工艺浅谈

杜旭升<sup>1</sup> 许哲<sup>2</sup> 张志远<sup>3</sup>

1. 西安建筑科技大学设计研究总院有限公司 陕西 西安 710055
2. 西安建筑科技大学粉体工程研究所 陕西 西安 710055
3. 西安建筑科技大学粉体工程研究所 陕西 西安 710055

**摘要：**本文提出了一种基于粉煤灰制备蒸养陶粒的创新工艺，通过科学配比、精细加工和蒸压养护等关键步骤，制备出具有优良性能的粉煤灰蒸压陶粒。该工艺不仅提高了粉煤灰的资源化利用率，还推动建材、园林绿化及污水处理等多领域的绿色发展。文章详细阐述了工艺流程、设备用途及陶粒的性能指标，并探讨了其广泛应用领域和未来的发展趋势。

**关键词：**粉煤灰；制备蒸养陶粒；工艺

引言：粉煤灰作为燃煤电厂的副产物，具有活性材料的特性，能与氢氧化钙反应生成具有胶结作用的硅酸盐等物质。因此，粉煤灰在建筑材料中的应用潜力巨大。近年来，随着粘土、页岩等传统陶粒生产原料的日益枯竭，利用粉煤灰等工业固废制备陶粒成为研究热点。

## 1 粉煤灰蒸养陶粒制备工艺概述

粉煤灰蒸养陶粒制备工艺是一种创新的固废资源化利用技术，旨在将燃煤电厂产生的粉煤灰通过科学配比、精细加工及蒸压养护等步骤转化为高性能的轻质陶粒产品。该工艺充分利用了粉煤灰的活性特性，通过与适量钙质无机材料、混合材及添加剂的混合，形成具有潜在胶结能力的混合物。第一，粉煤灰作为主要原料，经过分选、粉磨等预处理过程，确保原料粒度均匀，有助于提高后续成球效果。同时，根据配方需求，选择并破碎、计量加入适量的钙质无机材料（如水泥熟料、钢渣、矿渣等）和其他辅助材料（如密度调节剂、强度调节剂、颜料等）。第二，在混合阶段，预处理后的粉煤灰与添加剂、胶结材料等组分在高效的搅拌机中充分混合，形成均匀的湿混合料。随后，湿混合料通过造粒机进行成球处理，形成具有一定强度和粒径的湿生料球。为了提高生料球的性能，部分预处理后的粉煤灰还被用于对生料球进行包膜处理，形成致密的壳层结构。第三，成球后的生料球需要经过一段时间的静养，以初步增强其内部结构的稳定性。之后，生料球被送入蒸压釜中进行高温高压的蒸压养护。在这个过程中，生料球中的胶结材料与粉煤灰中的活性成分发生化学反应，生成硅酸盐、铝酸盐等胶凝物质，从而使陶粒获得优异的力学性能和耐久性；同时，蒸压养护还能使陶粒内部结构更加致密，提高其抗压强度和保温性

能<sup>[1]</sup>。第四，经过蒸压养护的陶粒在出釜后需进行筛分分级处理，以去除不合格品并满足不同粒径的市场需求。最终，合格的粉煤灰蒸养陶粒将被储存、包装并运往下游应用领域。

## 2 粉煤灰与炉渣基免烧轻质陶粒生产工艺及性能指标

免烧轻质陶粒生产以粉煤灰/炉渣为主要原料，并掺入部分钙质无机材料、混合材及添加剂。粉煤灰、炉渣来自燃煤电厂。钙质无机材料可结合当地原材料供货条件和技术经济指标，选择水泥熟料、钢渣、矿渣、镁渣等。配料添加剂视生产工艺及产品指标需求自研或外购。

免烧法制备粉煤灰陶粒，其技术路线为：采用活性固废粉煤灰渣为主要原材料，加入适量胶结材料、少量外加剂（如粘结剂、成孔剂、激发剂等）以及其他辅助材料（密度调节剂、强度调节剂、颜料等），经混合、成球、养护（蒸汽养护、蒸压养护等）制成人造陶粒轻骨料。其中胶结材料主要赋予产品强度，外加剂可激发固废原料的活性，并改善产品性能，赋予产品多孔结构，达到轻质高强效果。

具体的生产方法为：

原料粉磨：采用粉磨系统对炉渣进行粉磨；

原料预处理：采用超细球磨系统对配合物料进行细化均化处理；

搅拌及成球系统：采用搅拌、造粒机和包膜机等进行高效均化混合成球制粒；

蒸压系统：采用蒸压工艺进行养护赋予产品强度；

成品发送：采用袋装和散装结合的模式对物料进行发送<sup>[2]</sup>。

产品指标如下表：

项目	指标值
堆积密度 (kg/m <sup>3</sup> )	800~1100
表观密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1600~2100
筒压强度 (MPa)	6~15
导热系数 (W/(M·K))	0.144~0.368
含泥量 (%)	< 0.8
软化系数	> 0.85
1h吸水率 (%)	7~10
坚固性 (%)	< 5

### 3 蒸养陶粒制备工艺流程

#### 3.1 原料储存及输送

粉煤灰由电厂输送至厂区粉煤灰储库。来自电厂的炉渣由自卸车运输至全密封卸车间卸车, 喂料粒度 < 20mm, 送入粉磨系统粉磨, 合格细粉 (成品细度200 $\mu$ m筛筛余 < 3%) 送入储灰库储存。粉煤灰 (及粉磨后的炉渣粉) 由库底卸出后输送至预处理车间磨头仓暂存。胶凝材料等辅料由散装自卸车卸入联合堆棚。取用时由铲车分别取料, 卸入各自的受料钢斗经计量卸料后, 经破碎机初破后转运至原料预处理工段的磨头仓内暂存。

#### 3.2 原料预处理

来自储灰库的粉煤灰 (及粉磨后的炉渣粉)、辅料配合料经磨头仓底卸料计量后入超细球磨系统粉磨, 合格的物料分别送入预处理灰仓暂存。活化剂/添加剂经仓底卸料计量后配入配液池, 经搅拌系统搅拌充分水溶后, 由泵送至成球液存放池待用。

#### 3.3 原料搅拌及成核

经计量的粉料和经计量后雾化喷入的成球液在搅拌机腔体内搅拌均匀为湿混合物料, 并形成微小球核。出高效搅拌机的湿生料进入均化设备进一步均化打散, 由输送设备送至下游成球包膜车间。

#### 3.4 生料成球及包膜

来自搅拌及成核系统的微小球核料喂入成球机, 在成球盘内连续滚动并二次喷成球液, 使微小球核的粒径逐渐增大, 最终形成合格生料球。生料球的大小, 可通过调整成球盘的转速和倾斜度控制。预处理灰仓下另设置一路计量卸料输送系统, 用于将部分预处理灰给生料球包膜, 形成壳层结构。预处理灰与出成球机的生料球与在包膜机内完成料球包膜后, 输送送至静养系统。

#### 3.5 静养及蒸压

生料球在静养设施内静养至具有一定强度后, 卸出送入生料筛分工段; 筛分后的合格料球喂入蒸压釜进行养护, 少量超径料球及粉料经收集转运作为原料回用; 蒸压工段设置多组蒸压釜, 采用蒸汽进行养护。养护完

成的成品陶粒输送入成品筛分工段进一步筛分分级。养护过程产生的冷凝水经收集后用于成球液配液。

#### 3.6 成品筛分、储存及散装包装

成品混合物料通过筛分设备连续筛分, 筛出多种按需粒径的成品物料, 分别转运入对应的成品库储存, 库底设置散装通道和包装通道。成品可经散装发运销售, 也可经大袋包装后外销。视市场需求的不同, 可通过调整筛网尺寸调整成品种类及级配范围。

### 4 粉煤灰蒸压陶粒在各领域的应用

#### 4.1 建材方面

(1) 轻骨料混凝土。粉煤灰蒸压陶粒能够部分或全部替代砂石, 在建筑工程中配制结构轻骨料混凝土; 在建筑中使用粉煤灰蒸压陶粒混凝土, 能够在保证混凝土高强度的同时, 减轻混凝土建筑的总重量, 有利于降低工程造价。由于自重轻, 粉煤灰蒸压陶粒混凝土生产过程中的材料运费和产品的运输成本大约可比生产普通碎石混凝土低20%, 从而为工程节约更多成本<sup>[1]</sup>。

(2) 节能保温工程。粉煤灰蒸压陶粒混凝土的导热系数小于普通碎石混凝土的一半, 因而至少比普通混凝土建筑物节约建筑能耗约25%。可广泛应用于楼地面保温工程, 提高民用建筑围护结构热工性能。同时可用于生产多种新型保温隔热制品, 如粉煤灰蒸压陶粒轻质隔墙板、空心砌块、加气混凝土砌块等。

(3) 装配式建筑。粉煤灰蒸压陶粒混凝土以其重量轻、强度高、隔热保温等优势, 可广泛运用于装配式建筑, 如轻质隔墙板、外墙围护材料、叠合楼板、预制楼梯、构造梁柱等装配式构件, 其良好的内养护性能有效延长了预制构件的寿命。

(4) 地坪装饰材料。以水泥为胶凝材料, 粉煤灰蒸压陶粒为骨料, 经机械搅拌, 摊铺养护成粉煤灰蒸压陶粒混凝土地坪材料, 由于粉煤灰蒸压陶粒粒形圆整饱满, 因而具有观赏价值。球形颗粒可以提高混凝土自流平性能, 而且混凝土抛光面呈现随机分布的不同尺寸圆周断面具有特殊的装饰效果。粉煤灰蒸压陶粒在水泥制品中的应用, 在保持轻质的同时大大提升了构件的强度, 外表颜色与水泥相似, 具有工业风的美观。

(5) 超高性能混凝土及高延性混凝土。粉煤灰蒸压陶粒可应用于超高性能混凝土及高延性混凝土。超高性能混凝土, 是近三十年内发展起来的一种新型水泥基复合材料, 具有超高的力学性能和耐久性, 并兼具良好的韧性、黏结性能和抗冲击、抗疲劳性能。粉煤灰蒸压陶粒配置超高性能混凝土, 可用于桥梁工程、建筑工程、市政工程, 以及装饰、加固、快修、铺装、接缝填注等。

## 4.2 园林绿化

粉煤灰蒸压陶粒具有一定的机械强度，吸水、透气、持肥能力强，不仅能够反复吸水和释水，促进土壤微生物的发育，增加土壤养分，促进植物生长，同时也满足了透气的要求，能够作为无土基床材料，用于园林绿化领域；由于其无粉尘、质轻的特点，该产品已经越来越多地应用到室内观赏植物的养殖中。

## 4.3 污水处理

粉煤灰蒸压陶粒作为一款新型滤料产品，符合《城镇水处理用滤料和承托料》（T/CAMIE 05-2021）标准。其外观为圆球型颗粒，表面毛细孔密集，与内部毛细孔相互贯通、毛细孔之间呈纳米级网状结构、机械强度高、比表面积大，适合微生物挂膜及生长。具有良好的物理吸附、化学吸附及生物相容性，能简化污水处理中的工艺流程、节约运行成本。可以广泛应用于人工湿地，市政污水、工业废水、生活污水、河道黑臭水体处置治理，景观水质净化。

## 5 粉煤灰蒸养陶粒制备工艺的未来发展

### 5.1 工艺技术创新及趋势

#### 5.1.1 智能制造技术

随着智能制造技术的发展，粉煤灰蒸养陶粒的生产线将逐步实现智能化和自动化。通过引入先进的传感器、控制系统和机器人技术，可以大幅提升生产效率和产品质量稳定性。自动化生产线不仅能够减少人力成本，还能通过实时监控和调整工艺参数，确保每一批次产品的均匀性和一致性。

#### 5.1.2 节能降耗技术

针对传统焙烧法能耗高的问题，未来应重点研发更加节能的蒸养技术。例如，优化蒸压釜的设计，提高蒸汽利用率；开发新型节能材料，降低能源消耗；以及研究余热回收技术，将生产过程中产生的热能进行循环利用。

#### 5.1.3 绿色环保技术

在制备过程中，应更加注重环保措施的应用。例如，采用无污染或低污染的添加剂，减少生产过程中的污染物排放；研究废水、废气和固体废弃物的综合利用技术，实现资源的最大化利用；以及开发可降解的包装材料，减少产品包装对环境的负担。

### 5.2 粉煤灰蒸养陶粒制备工艺在可持续发展中的作用

利用燃煤电厂排放的粉煤灰制备陶粒，实现了工业废弃物的资源化利用。这不仅可以减少粉煤灰对环境的污染，还能节约天然矿产资源，符合可持续发展的理念；相比于传统建筑材料，粉煤灰蒸养陶粒在生产和应用过程中具有较低的能耗和碳排放。其轻质特性使得建

筑结构的自重减轻，从而降低建筑能耗和运输成本。同时，作为保温隔热材料，粉煤灰蒸养陶粒还能有效减少建筑物的能耗需求；粉煤灰蒸养陶粒在建筑中的应用广泛，包括轻骨料混凝土、节能保温工程、装配式建筑等。这些应用不仅提升了建筑性能和质量，还推动了绿色建筑的发展。绿色建筑以其低碳环保、节能减排的特点成为未来建筑行业的发展趋势；粉煤灰蒸养陶粒制备工艺的创新和发展将带动相关产业链的升级<sup>[4]</sup>。通过引进新技术和新设备，提高生产效率和产品质量，将推动整个行业的健康发展。同时，随着市场需求的增长和应用领域的拓展，粉煤灰蒸养陶粒行业将迎来更广阔的发展空间。

### 5.3 未来研究方向

研究新型添加剂和粘结剂对粉煤灰蒸养陶粒性能的影响；探索更加高效、节能的制备工艺；以及研究不同工艺参数对产品质量的影响规律；通过优化原料配比和工艺条件，提高粉煤灰蒸养陶粒的强度、耐久性、吸水率等性能指标；同时研究其在实际应用中的表现和适应性；深入挖掘粉煤灰蒸养陶粒在建筑材料、园林绿化、污水处理等领域的应用潜力；研究其与其他材料的复合使用效果；以及加强市场推广和品牌建设力度；研究粉煤灰蒸养陶粒制备工艺对环境的影响程度及改善措施；制定科学合理的环保标准和政策法规；以及加强环保技术的研发和应用。

### 结束语

粉煤灰蒸养陶粒制备工艺的创新与发展，为粉煤灰等大宗固废的综合利用提供了新的思路。未来，随着智能化、自动化、节能降耗及绿色环保技术的不断进步，粉煤灰蒸养陶粒的生产效率和产品质量将得到进一步提升。其在建筑、园林绿化及污水处理等领域的广泛应用，不仅推动了相关产业链的升级，也为可持续发展贡献了重要力量。

### 参考文献

- [1]姚帅锋.许红亮.孙俊民.苗文博.利用高铝粉煤灰制备多孔陶瓷工艺研究[J].人工晶体学报,2019,48(04):687-692.
- [2]丁海萍.侯泽健.张怀宇.褐煤粉煤灰泡沫陶瓷材料应用前景分析[J].粉煤灰综合利用,2019(01):91-94.
- [3]左绪俊.费乾锋.王臣.杨本宏.陈钊.黄智锋.粉煤灰基多孔陶瓷膜的制备工艺研究[J].佳木斯大学学报(自然科学版),2020,36(06):925-928.
- [4]宗燕兵.张学东.李飞.粉煤灰陶瓷的制备及致密化过程探讨[J].环境工程,2021,37(04):148-152.