

锂离子电池正极材料承烧用匣钵制备及其研究进展

谢芳 王素敏

西安工业大学, 陕西西安, 710021;

摘要: 锂离子电池正极材料承烧用匣钵是影响正极材料性能和生产效率的关键材料, 其需满足耐高温、抗腐蚀、高力学强度等多重核心要求。本文系统地阐述了匣钵的性能需求, 对原料预处理、成型、干燥脱脂、烧结和后处理等关键技术进行了详细的阐述, 并对氧化物陶瓷基、氮化物陶瓷基、碳基复合材料的特点和研究进展进行了分析, 针对原料配比、成型缺陷、显微结构调控及性能强化等关键技术问题提出解决方案。研究表明, 通过材料体系的创新和制备工艺的优化, 可以显著提高匣钵的服役性能, 为锂离子电池正极材料的高效、高质量生产提供支撑。

关键词: 锂离子电池; 承烧匣钵; 正极材料

DOI: 10.64216/3080-1508.26.01.058

锂离子电池具有高能量密度和长循环寿命等优点, 被广泛应用于新能源领域, 其中正极材料的烧结质量直接决定了电池的核心性能。承烧用匣钵作为正极材料烧结工艺的核心承载件, 其性能直接关系到材料的纯度、均匀性和生产稳定性。目前, 随着正极材料向高镍和高压方向发展, 对匣钵的耐高温、耐腐蚀性和尺寸精度提出了更高的要求。本文围绕匣钵的性能需求、制备工艺、材料体系和关键技术展开综述, 以期高性能匣钵材料的研发和应用提供参考。

1 锂离子电池正极材料承烧对匣钵的性能要求

1.1 耐高温与热稳定性要求

三元材料、磷酸铁锂等锂离子电池正极材料的烧结温度一般为700–1000℃, 部分高温改性工艺温度超过1200℃, 匣钵需要长时间在该温度区间稳定服役^[1]。其耐高温性能需满足不发生软化、变形或熔融; 热稳定性要求在反复升、降温循环过程中维持晶体结构和宏观形貌的稳定性, 避免因热膨胀系数不匹配产生内应力导致开裂, 保证材料在几百次甚至上千次烧结循环后仍能保持承载功能, 不影响正极材料批量生产的连续性^[2]。

1.2 化学惰性与抗腐蚀性能要求

正极材料在烧结过程中会产生锂挥发性物质、微量酸性或碱性气氛, 同时其自身所含的过渡金属元素也有可能发生扩散, 因此对匣钵的化学惰性要求非常高, 以避免与这些物质发生反应^[3]。既要防止材料本身被腐蚀

而破坏结构, 又要防止元素间的互扩散引入杂质, 从而影响正极材料的容量、循环稳定性等电化学性能^[4]。此外, 还必须能抵御烧结气氛中可能存在的水汽、氧气等介质的侵蚀, 保证材料在长时间服役过程中不发生剥落和成分迁移, 保持良好的使用状态^[5]。

1.3 力学强度与结构稳定性要求

匣钵在装载正极材料后, 不仅要承受自身重量和材料重量的叠加, 而且在搬运、堆叠和烧结过程中还会受到机械碰撞和热应力的影响, 因此需要有足够的常温和高温力学强度^[6]。常温下的抗压强度和抗弯强度需要满足仓储堆叠和运输的要求, 在高温条件下还需要防止强度下降而导致的变形或倒塌^[7]。结构稳定性要求匣钵整体无裂缝、无气孔缺陷, 且几何形状规整, 以保证长期服役过程中不会因结构失效造成物料溅落和烧结环境破坏, 保证生产安全性和产品质量^[8]。

1.4 导热性与热震稳定性要求

良好的导热性能可以保证匣钵内部和承载的正极材料受热均匀, 避免因局部温度差异而引起的烧结程度差异, 从而影响产品性能的均匀性。匣钵需要具有合理的热导率, 以促进热量在炉内快速传递和均匀分布^[9]。同时, 烧结过程升降温速率(5–15℃/min)对匣钵的热震稳定性提出了更高的要求, 即在一定温度范围内能够承受这种温度突变而不会出现热震裂纹; 同时, 其热膨胀系数要与正极材料、炉内环境相匹配, 以缓解因温度

波动而产生的内应力，从而保证每次烧结过程都能平稳地进行^[10]。为进一步明确量化标准与测试规范，补充关键技术参数如表 1 所示。

表 1 关键技术参数

性能维度	补充指标	量化标准	测试/验证方式
导热性能	热导率测试规范	适配烧结温度区间热导率 $\geq 15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$	激光闪射法（非接触式，避免材料损伤）
热震耐受	循环抗裂次数	$1200^{\circ}\text{C}\leftrightarrow\text{室温}$ 循环 ≥ 100 次无开裂	高温急冷急热循环测试
热膨胀控制	热膨胀系数上限	$\leq 3.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （ $25\text{--}1200^{\circ}\text{C}$ ）	高温热膨胀仪测试，匹配正极材料特性
导热适配性	电阻率阈值	$\leq 12\mu\Omega\cdot\text{m}$	四探针法测试，保障辊道炉传热效率

1.5 低污染与尺寸精度要求

正极材料对杂质含量非常敏感，匣钵需满足低污染要求，其自身组分中不能含有锂、铁、铜等有害杂质元素，高温服役过程中无挥发性污染物释放，避免对材料的电化学性能产生不可逆转的影响^[11]。在尺寸精度上，需要对匣钵的长度、宽度、高度和壁厚进行严格控制，使其偏差在 $\pm 0.5\text{ mm}$ 以内，保证装载容量一致、堆叠间隙均匀，在保证炉膛空间有效利用的同时，又能使每个匣钵内的材料获得相同的烧结环境，提高正极材料批量生产合格率^[12]。

2 承烧用匣钵的主要制备工艺

2.1 原料选择与预处理工艺

原料的选择要围绕匣钵的核心性能要求，选择高纯度的氧化物陶瓷粉、氮化物粉末或者高品质的碳基材料，其中氧化物粉末的纯度 $\geq 99.5\%$ ，氮化物粉末的粒径控制在 $1\text{--}5\mu\text{m}$ ，碳基材料须具备低杂质、高结构稳定性^[13]。预处理环节包括粉碎、提纯和混合等工序，利用气流粉碎技术将原料磨细到规定的粒度，再通过酸洗、碱洗结合高温煅烧（ $800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ ）除去杂质和挥发性成分^[14]。在此基础上，采用机械搅拌和超声波分散相结合的方法，实现多组分均匀混合，并加入适量的分散剂和粘结剂来调控浆料的流动性，保证原料混合体系不发生团聚和偏析，为后续成型和烧结过程提供均匀、稳定的物质基础^[15]。

2.2 成型工艺

成型工艺需要根据匣钵的尺寸、形状和性能要求来选择合适的成型方法，常见的有干压成型、注浆成型、流延成型及 3D 打印成型^[16]。干压成型适用于简单形状匣钵，是用液压机对粉料进行 $15\text{--}30\text{ MPa}$ 的压力挤压而

成，成形效率很高，但是要把粉料的含水量控制在 $3\%\sim 5\%$ 以内，以避免缺陷^[17]；注浆成型适合复杂结构制品，是将配制好的浆液注射到模具中，通过毛细管作用将水分排出以达到固化目的，对浆液粘度要求严格控制在 $500\sim 1500\text{ Pa}\cdot\text{s}$ ^[18]；流延成型可制备薄壁匣钵，用刮刀控制浆料的厚度，然后烘干得到均匀的坯体^[19]；3D 打印成型技术适合定制和异型结构，采用层层堆叠的方式实现精确成形，达到 $\pm 0.1\text{ mm}$ 的精度，满足特殊场景的需要^[20]。

2.3 干燥工艺与脱脂处理

干燥工艺的目的是除去坯体中的游离水分与结合水分，防止烧结过程中因水分蒸发过快而引起的开裂^[21]。采用梯度干燥的方法，首先在室温下进行 $4\sim 6$ 小时的通风干燥，然后逐渐升温到 $80\text{--}120^{\circ}\text{C}$ 的恒温干燥 $12\sim 24$ 小时，控制升温速度 $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ ，保证内部水分缓慢地向表面迁移和挥发^[22]。脱脂处理是针对成型过程中加入的有机成分如粘结剂、分散剂等，通过程序升温到 $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$ ，保温 $2\sim 4$ 小时，让有机物充分分解和挥发，在脱脂过程中要控制好氧含量和升温速度，以防止坯体因有机物快速分解而产生孔隙和变形，从而保证坯体脱脂后的结构完整性和致密度^[23]。

2.4 烧结工艺

烧结工艺是决定匣钵显微结构与性能的关键环节，需要根据原料体系选择相应的烧结方法，包括常压烧结、气氛烧结、热压烧结等^[24]。常压烧结适用于氧化物陶瓷基匣钵，烧结温度为 $1300\text{--}1600^{\circ}\text{C}$ ，保温 $2\sim 6$ 小时，利用原子扩散作用实现粒子间的连接^[25]；气氛烧结主要应用于氮化物陶瓷基或碳基匣钵中，其烧结温度在 $1600\text{--}1800^{\circ}\text{C}$ ，需要在惰性气体如氮气和氩气的保护下进行，避免原料氧化^[26]。热压烧结利用 $20\text{--}50\text{ MPa}$ 的压

力和高温协同作用,使坯体致密化,烧结温度降低100~200℃,从而有效提高坯体的致密度和力学性能,致密度可达到理论密度的95%以上。

2.5 后处理与性能优化工艺

后处理工艺包括整形、打磨、表面改性和性能测试等步骤。采用精密磨削设备对已烧结的匣钵进行整形,对其尺寸偏差进行校正,使其表面粗糙度达到 $Ra \leq 0.8 \mu m$ ^[27];为满足耐蚀要求,利用等离子喷涂技术在表面制备 Al_2O_3 、 ZrO_2 等耐磨抗蚀涂层,涂层厚度控制在50~100 μm ;对于碳基匣钵,可以通过表面碳化处理来提高其抗氧化性能^[28]。性能优化还包括二次烧结、热处理等手段,进一步消除残余应力,调控显微结构^[29]。最后,对匣钵进行高温强度测试、抗热震性测试、化学腐蚀试验等测试,以保证匣钵的各项性能指标达到使用要求^[30]。

3 承烧用匣钵的常用材料体系及研究进展

3.1 氧化物陶瓷基匣钵

氧化物陶瓷基匣钵是目前使用最为广泛的一类体系,主要包括 Al_2O_3 基、 ZrO_2 基、 MgO 基及复合氧化物材料^[31]。 Al_2O_3 基匣钵具有优良的耐高温和化学稳定性,长期使用温度可达1400℃,但其热震稳定性有待提高,研究热点集中在添加 ZrO_2 、 TiO_2 等改性剂降低热膨胀系数,采用纳米复合工艺优化材料显微结构,将热震次数提高到50次以上^[32]。 ZrO_2 基匣钵具有优异的抗热震和耐腐蚀性能,适合高温烧结场景,目前采用稳定化(添加氧化钇、氧化铈等)抑制相变开裂,结合烧结工艺优化,其高温抗弯强度可达300MPa以上。 MgO 基匣钵抗锂腐蚀性能突出,但易吸潮水化,近年来采用表面包覆和复合改性的方法有效提高了材料的耐水性,拓展了其应用范围^[33]。

3.2 氮化物陶瓷基匣钵

氮化物陶瓷基匣钵主要由 Si_3N_4 基、 AlN 基组成,具有高强度、高导热性和优良化学惰性,是一种理想的烧结高端正极材料^[34]。 Si_3N_4 基匣钵耐高温可达1800℃,热导率为20~40W/(m·K),抗热震性与抗腐蚀性能远超氧化物陶瓷,研究方向聚焦于低成本制备工艺开发,采用原位反应烧结技术,降低烧结助剂的用量,

同时优化粉体表面改性工艺,提高材料的致密性和力学性能^[35]。 AlN 基匣钵导热性更为优异,热导率可达100~200W/(m·K),能显著提升烧结均匀性,但抗氧化性能不足,目前通过添加 SiC 、 TiN 等复合相,在表面形成致密氧化膜,增强高温抗氧化性,使其在1200℃空气氛围下可稳定服役^[36]。

3.3 碳基复合材料匣钵

碳基复合材料匣钵包括石墨基、碳纤维增强碳基(C/C)及碳-陶瓷复合体系,具有低密度、高导热性与良好的抗热震性^[37]。石墨基匣钵材料价格低廉、可加工性好,但在高温下容易氧化且耐腐蚀能力较差,研究重点在于表面抗氧化涂层制备,采用 SiC 涂层、玻璃陶瓷涂层将抗氧化温度提高到1500℃以上^[38]。C/C复合材料匣钵的力学强度和结构稳定性明显好于石墨基,经碳纤维三维编织增强后的高温抗压强度达到200MPa,目前主要采用界面改性技术改善碳-基体结合状态,提升抗锂挥发物腐蚀性能^[39]。碳-陶瓷复合体系兼具碳材料和陶瓷材料各自的优点,通过碳基体与 Al_2O_3 、 Si_3N_4 等陶瓷相复合,在保持高导热性能的前提下,大幅度提高其耐腐蚀和抗氧化性能,已成为高端应用场景的研究热点。不同的材料体系和制备工艺有各自的优势和不足,氧化物陶瓷基陶瓷钵体材料成本可控,工艺成熟,但其热冲击稳定性和耐腐蚀性较差;氮化物陶瓷具有优异的综合性能,但其制备成本高,烧结过程复杂;碳基复合材料具有优异的导热和抗热冲击性能,但存在易氧化和耐腐蚀等问题^[40]。在制备工艺上,干压成型效率高,适合批量生产,但很难满足复杂的结构要求;注浆成形技术可以制造异型件,但成形时间长,密度不均匀;3D打印可以满足客户的个性化需求,但效率很低,成本也很高。热压烧结虽然可以改善材料的性能,但受限于设备,很难实现规模化应用。对各种工艺进行优化时,需要充分考虑材料性能和实际应用环境,在性能和成本之间进行权衡。

4 匣钵制备过程中的关键技术问题与解决策略

4.1 原料配比优化与均匀分散技术

原料配比不当易引起匣钵性能不平衡,而分散不均匀又会引起显微结构缺陷。解决策略以性能需求为导向,

采用正交试验确定各组分最优配比,并引入复合粉末协同提高材料综合性能^[41]。采用“机械搅拌+超声分散”的复合工艺,控制超声功率80~120W、搅拌转速300~500r/min,加入适量的分散剂降低颗粒间的相互作用力^[42]。同时,利用激光粒度分析仪对物料的粒度分布进行实时监控,以保证原料混合系统不发生团聚和偏析,从而为后续工艺打下坚实的基础。

4.2 成型缺陷控制与致密度提升技术

在成型过程中易出现裂纹、孔隙、尺寸偏差等缺陷,严重影响匣钵结构的稳定性^[43]。对不同的成型工艺进行优化,即干压成型时粉料水分含量控制在3%~5%,压力梯度加载15~30 MPa;注浆成型调整浆液粘度500~1500 mPa·s,并对模具排气结构进行优化^[44]。为了提高坯体的致密度,引入温压成型、等静压成型等先进技术。成型后,利用无损检测方法对坯体内部缺陷进行检测,对不合格坯体进行修补,使坯体致密度达到理论密度85%以上^[45]。

4.3 烧结过程中显微结构调控技术

不适当的烧结参数会引起晶粒异常长大、孔隙率过高,从而导致匣钵的性能降低^[46]。通过精准控制烧结温度、升温速率及保温时间,氧化物陶瓷基匣钵采用1300~1600℃常压烧结,氮化物基采用1600~1800℃惰性气氛烧结,升温速率控制5~10℃/min。在烧结过程中加入适量的助熔剂促进粒子的扩散,并通过热压烧结和微波烧结来缩短烧结时间,抑制晶粒的过度生长^[47]。

4.4 抗腐蚀与抗热震性能强化技术

匣钵在服役过程中容易受到化学腐蚀和热冲击的破坏,需要进行针对性的强化。抗腐蚀方面,采用表面包覆 Al_2O_3 、 ZrO_2 等耐磨涂层,或者采用高惰性的 Si_3N_4 材料。抗热震性能的提升主要通过优化组分设计,添加低膨胀系数粉体降低整体热膨胀系数,引入纤维增强相缓解材料的热应力。同时,优化烧结工艺,消除残余应力,通过反复热震试验优化配方与工艺,确保匣钵在5~15℃/min升降温速率下,热震次数可达50次以上且无开裂。

5 锂离子电池正极材料承烧用匣钵未来发展方向

未来锂离子电池正极材料承烧用匣钵的发展将聚焦于高端需求适配与全生命周期性能升级,以匹配正极材料高镍化、高压化及规模化生产的核心诉求^[48]。在材料体系上,开展多组元复合改性研究,实现氧化物与氮化物、碳材料的交叉融合,实现耐高温、耐腐蚀和低膨胀的协同优化;探索新型低成本、高性能的陶瓷粉体和纤维的应用,降低原材料成本和制备能耗^[49]。在制备工艺方面,推广3D打印和智能成形技术,结合实时监控和闭环控制,实现复杂结构件的高精度、高效率制造;通过大规模应用热压烧结和微波烧结等先进工艺,进一步提高材料的致密性和性能稳定性。在功能强化方面,重点研究多功能复合涂层和表面修饰技术,实现耐腐蚀、耐氧化和低污染的一体化提升;通过组分设计和工艺优化,延长钵体使用寿命,促进钵体的循环再利用^[50]。在此基础上,针对极端烧结环境,研制出个性化的钵体材料,建立性能预测模型,完善其标准化检测体系,促进该产业高质量发展的重要方向。

6 结论

锂离子电池正极材料承烧用匣钵的性能提升需依托材料体系创新与制备工艺的协同优化。氧化物陶瓷基匣钵仍是目前的主流,氮化物陶瓷基与碳基复合材料匣钵在高端场景具有明显的优势。通过优化原材料配比、控制成型缺陷、烧结显微结构精准调控及抗腐蚀与抗热震性能强化等技术手段,可有效解决匣钵在服役过程中的关键难题。未来,需进一步推动低成本、长寿命、多功能匣钵的研发,助力锂离子电池正极材料产业的高质量发展。

参考文献

- [1] 朱子硕,王义龙,苏钰滔,等. 锂离子电池三元正极烧成用氧化物匣钵研究进展[J/OL]. 耐火材料,1-7[2025-11-06].
- [2] 刘鑫,孟红涛,马龙斌. 锂电池正极材料烧成用匣钵的研究进展[J]. 耐火与石灰,2025,50(05):30-37+46.
- [3] 刘伟正,李亚伟,徐义彪,等. 尖晶石-镁橄榄石复相骨料制备匣钵复合层材料性能研究[J/OL]. 武汉科技大学学报,1-7[2025-11-06].
- [4] 陈子豪,冯青,陆琳,等. 中国明代葫芦窑码窑方式

的研究及数值模拟[J/OL]. 中国陶瓷, 2025, (10): 68-76[2025-11-06].

[5] 任科成, 向忠. 基于深度学习的电阻片产线匣钵容器自适应检测研究[J]. 软件工程, 2025, 28(09): 29-33.

[6] 张百程. 不同匣钵烧结对合成LiFePO₄的影响[J]. 世界有色金属, 2025, (14): 17-19.

[7] 吴琳琳, 孙振华, 王晨晔, 等. 含锂侵蚀产物对莫来石-刚玉质匣钵性能的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025, (07): 59-67.

[8] 庆达, 王义龙, 杨连弟, 等. 锂离子电池正极材料承烧用匣钵制备及其研究进展[J]. 陶瓷学报, 2025, 46(03): 465-477.

[9] 彭金琦, 雷辉聪, 黄潇阳, 等. 锂电池正极用匣钵耐火材料研究进展[J/OL]. 耐火材料, 1-7[2025-11-06].

[10] 胡安生, 李路, 李锋铎, 等. 锂电正极材料生产中含锂废旧匣钵浸出工艺研究[J]. 广东化工, 2025, 52(07): 11-13.

[11] 刘伟正, 李亚伟, 徐义彪. 单质硅粉对堇青石-莫来石匣钵孔结构和抗侵蚀性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2025, 44(03): 1152-1162.

[12] 梁向京, 陈男. 匣钵收尘罩流场特性分析与结构优化[J]. 黄冈职业技术学院学报, 2025, 27(01): 98-102.

[13] 姚丽君, 王官煜, 尹致远, 等. 锂离子电池正极材料用CA6匣钵的改性研究[J]. 耐火材料, 2025, 59(04): 311-316.

[14] 战令浩, 王锦坤, 谢乐琼, 等. 锂离子电池正极材料烧结用匣钵研究进展[J]. 电池工业, 2024, 28(06): 340-345.

[15] 王建波, 郑翰, 相宇博, 等. 氮化硅结合碳化硅匣钵在合成锂离子三元正极材料上的应用[J]. 中国陶瓷, 2024, 60(12): 25-30.

[16] 桑月侠, 吴钊, 刘威, 等. 后司岙窑址出土粗颗粒匣钵损坏机理的研究[J]. 中国陶瓷, 2024, 60(10): 80-85.

[17] 王爱芳, 吴咏梅. 韦奇伍德引进景德镇制瓷工艺及其对英国骨瓷发明的影响研究——以匣钵购置为中

心的考察[J]. 景德镇学院学报, 2024, 39(03): 75-80.

[18] 贾耀疆, 罗婷, 吴军明, 等. 北朝至唐邢窑支钉和匣钵的化学组成分析及配方研究[J]. 陶瓷科学与艺术, 2024, 58(05): 119-121.

[19] 赵寒笑. 基于匣钵土材料的陶瓷产品设计研究[D]. 景德镇陶瓷大学, 2024.

[20] 段健健, 沈宏芳, 马聪聪, 等. 锂电池正极材料承烧用匣钵材料及其性能研究进展[J]. 现代技术陶瓷, 2024, 45(Z1): 110-129.

[21] 鞠茂奇, 程水明, 夏昌勇, 等. 锂离子电池正极材料用莫来石溶胶结合匣钵材料的性能研究[J]. 耐火材料, 2023, 57(06): 495-499.

[22] 山日钦, 袁琦, 吴军明, 等. 越窑秘色瓷匣钵装烧工艺的实验考古学研究[J]. 文物保护与考古科学, 2023, 35(06): 78-86.

[23] 招俊杰, 肖伟平. HYPX1500 匣钵压机常见故障报警分析处理[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(12): 47-48+60.

[24] 段健健, 沈宏芳, 马聪聪, 等. 锂电池正极材料LiNi_xCo_yMn_zO₂ 承烧用莫来石-堇青石质匣钵的研制[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(10): 3769-3777.

[25] 彭可, 张志成, 胡有章, 等. 基于有限元的热力耦合场匣钵运动分析与优化[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(02): 634-642.

[26] 马沛莹, 韩日飞, 张鑫, 等. 锂电池正极材料烧结用匣钵防护涂层制备与性能研究[J]. 热喷涂技术, 2023, 15(03): 91-98.

[27] 张丽芬, 万洪强, 王奉刚, 等. LiCoO₂ 烧结用匣钵侵蚀机制研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(04): 144-146+153.

[28] 陈雨芊. 地域文化视角下产业类历史地段景观更新研究[D]. 东南大学, 2023.

[29] 周会俊, 陈子豪, 王龙光, 等. ZnO 压敏陶瓷烧结用匣钵侵蚀机理研究[J]. 中国陶瓷, 2023, 59(05): 39-42.

[30] 孙子恒. 锂离子电池正极材料烧结用匣钵的损毁机理及优化[D]. 武汉科技大学, 2023.

[31] 刘启运. 锂电正极材料用匣钵β-Al₂O₃ 基复相材料的制备及性能研究[D]. 中国地质大学(北京), 2023.

- [32]周如仙. 锂电正极匣钵用镁铝尖晶石-氧化锆复相材料制备及性能[D]. 中国地质大学(北京), 2023.
- [33]甘存强. 六铝酸钙-堇青石质匣钵烧结性能及抗锂电正极材料侵蚀机理研究[D]. 武汉科技大学, 2023.
- [34]张丽芬, 万洪强, 王奉刚, 等. $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ 正极材料合成对匣钵的侵蚀过程[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023, (04): 83-88.
- [35]赵寒笑. 匣钵土在陶瓷综合材料艺术创作中的应用研究[J]. 陶瓷, 2023, (03): 51-52+71.
- [36]何思瑶, 魏闯, 康鑫, 等. 锂辉石含量对煅烧钴酸锂正极材料用匣钵材料性能的影响[J]. 材料导报, 2023, 37(22): 5-10.
- [37]谭志成, 林祖锐, 魏文静, 等. 洛阳市甘泉村废旧匣钵用作墙体材料探析[J]. 中外建筑, 2023, (01): 126-130.
- [38]梁超寰, 苏龙保, 招俊杰, 等. HYPX1500 匣钵压机的技术特点分析[J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(01): 55-56.
- [39]谢礼飞, 段红松, 何易鹏, 等. 基于机器视觉的匣钵缺陷检测系统[J]. 电子工业专用设备, 2022, 51(06): 58-62.
- [40]王英男, 孙辉. 正极材料烧结过程产生匣钵结晶的研究[J]. 电源技术, 2022, 46(11): 1249-1252.
- [41]郑翰, 马昭阳, 曹会彦, 等. 匣钵材料抗氢氧化锂侵蚀性研究[J]. 耐火材料, 2023, 57(02): 125-130.
- [42]万治清. 锂电池正极材料承烧用堇青石-莫来石复合匣钵材料的制备及其抗侵蚀性能研究[D]. 北方民族大学, 2022.
- [43]曹会彦, 郑翰, 钱凡, 等. SiO_2 微粉加入量对 $\beta\text{-SiAlON-SiC}$ 材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2023, 57(02): 121-124.
- [44]吴军明, 桑月侠, 郑乃章, 等. 后司忒匣钵工艺特征及其对青瓷釉面呈色的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(07): 2082-2091.
- [45]桑月侠, 山日钦, 吴军明, 等. 瓷质匣钵对秘色青瓷呈色影响及机理研究(英文)[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(03): 393-400.
- [46]郭冰. 利用煤矸石生产堇青石系锂电池正极材料承烧用匣钵材料研发及产业化. 宁夏回族自治区, 宁夏劲远达新材料科技有限公司, 2021-09-10.
- [47]王立旺. 制备工艺对匣钵质量的影响[C]//中国金属学会耐火材料分会, 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司, 先进耐火材料国家重点实验室, 耐火材料杂志社. 2021年全国耐火原料学术交流会论文集. 浙江锦诚新材料股份有限公司; , 2021: 182-184.
- [48]段雪珂. 锂电池三元正极材料合成用耐火材料抗侵蚀性能研究[D]. 中钢集团洛阳耐火材料研究院, 2020.
- [49]单峙霖. 锂离子电池阳极材料焙烧用匣钵的研究[D]. 武汉科技大学, 2020.
- [50]丁达飞. 抗三元正极材料侵蚀的 KA1Si2O6 -铝硅质匣钵材料制备与性能研究[D]. 郑州大学, 2020.