

熔模铸造废弃型壳再生利用研究

房宇¹, 李家波², 李晓杰³, 高永旺¹, 白晓鹭³, 刘越¹

(1. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 联信铸砂集团, 辽宁彰武 123200;
3. 辽宁祥和农牧实业有限公司, 辽宁阜新 123000)

摘要: 以熔模铸造废弃型壳为原材料, 研究了废弃型壳处理工艺, 可达到100%回收利用。从废弃型壳中提取高价值电熔白刚玉面砂, 并利用废弃型壳剩余粉料, 加入铝矾土、CaO、TiO₂等作为添加剂, 机械球磨、造粒、固态烧结制备陶粒砂, 研究了不同添加剂种类以及加入量对陶粒砂形貌和性能的影响。研究发现, 利用机械球磨有效分离熔模铸造废弃型壳中高价值电熔白刚玉颗粒, 可获得占废弃型壳重量7%~10%, 粒径109~270 μm的高价值电熔白刚玉颗粒。添加TiO₂、CaO作为球形陶粒砂助烧剂, 可通过固溶置换以及形成低温液相分别将烧结温度降低至1 500 ℃和1 375 ℃。单独添加1%TiO₂时, 1 500 ℃烧结保温2~3 h, 陶粒砂堆积密度为1.68 g/cm³, 真密度为3.058 g/cm³, 显气孔率为10.6%, 破碎率为1.58%; 单独添加7%CaO时, 1 375 ℃烧结保温2~3 h, 陶粒砂的基本性能为堆积密度为1.71 g/cm³, 真密度为2.834 g/cm³, 显气孔率降低至6.03%, 破碎率仅为1.47%。

关键词: 熔模铸造; 废弃型壳; 人造球形陶粒砂; 电熔白刚玉

2018年我国铸件年产量已经达到了4 935万吨, 在全球处于领先地位^[1]。铸造工艺种类很多, 一般可以分为砂型铸造和特种铸造两大类。熔模铸造属于以天然矿产砂石为主要造型材料的特种铸造。熔模铸造型壳原材料包括面砂、背砂、浆料等均属于耐火材料, 熔模铸件在生产过程中产生的大量废弃型壳, 据统计每生产1 t铸件会产生1.1~1.5 t废弃型壳^[2], 直接丢弃是对耐火材料的极大浪费, 并且会污染土壤水资源, 对环境造成极大的危害。

国内外学者已开始对熔模铸造废弃型壳资源利用方面进行研究, 并取得了一定的成果。熔模铸造废弃型壳多作为建筑行业混凝土^[3-5]、填料^[6]、建筑切块^[7]等低附加值产品的原材料, 或者用于制备耐火材料如轻质骨料^[8]、粘土砖^[9]以及作为制备陶瓷基复合材料的原材料^[10]。这些产品虽然做到了废弃物再利用, 却依旧不可再生、不环保, 制备的产品附加值低, 没有充分发挥废弃型壳中耐火材料特性, 无法系统化生产。因此急需一种可以充分再利用废弃型壳, 减少污染排放的处理技术。

根据原材料成分的不同, 大致将人造球形陶粒砂分为铝矾土陶粒砂、铝镁尖晶石质陶粒砂、焦宝石陶粒砂和其他类。化学成分体系会影响人造球形陶粒砂物理性能, 如耐火度、热膨胀系数等以及对制备工艺有重要的影响。不同铸件对原砂的要求不同, 可针对铸件特性、工况条件设计陶粒砂组分满足不同产品的要求。

铝矾土是制备人造球形陶粒砂最常使用的原材料之一, 熔融陶粒砂(宝珠砂)采用Al₂O₃>72%的铝矾土制备而成并广泛应用于铸造生产中^[11-12]。此外在铝矾土(Al₂O₃>72%)为原材料的基础上添加氧化镁(MgO>98.5%)可制得铝镁尖晶石质陶粒砂, 并伴随5%~7%的体积膨胀, 铝镁尖晶石质陶粒砂有较高耐火度, 较低破碎率, 密度适中, 表面致密度适合于铸造用砂^[13-15]。焦宝石多产于山东、河南等地, 为Al-Si酸盐系物质, Al₂O₃含量大概在44%左右, 杂质含量少, 成分稳定, 组织结构十分致密^[16]。固体废弃物如粉煤灰、煤矸石等, 尾矿如高岭土、蓝晶石、镍渣等也被

作者简介:

房宇(1995-), 女, 硕士, 主要研究方向为新型造型材料的研究。电话: 15271429081, E-mail: 605292547@qq.com

通讯作者:

刘越, 男, 教授。电话: 024-83682551, E-mail: dbdx555@163.com

中图分类号: TG249.5
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2021)02-0180-09

收稿日期:

2020-04-27 收到初稿,
2020-05-20 收到修订稿。

应用于建筑陶粒的制备中, 此类陶粒通常具有较高强度、较大粒径以及较大的孔隙率^[17-20]。目前陶粒砂制备工艺存在能耗大, 陶粒砂表面质量较差, 耐火度较低的问题。

电熔白刚玉在我国熔模铸造型壳中的使用占比较小, 主要应用于合金钢、高温合金、镁、铝、钛轻质合金铸件等航空航天铸件和精密铸件的成形。其物理化学性能稳定, 废弃型壳成分组成复杂, 回收难度大, 但因其价格昂贵, 性能优良具有很高的回收利用价值。为探索熔模铸造废弃型壳再生利用和陶粒砂制备工艺方法, 达到降低成本, 提高质量性能的目标, 本试验以电熔白刚玉为面砂的熔模铸造废弃型壳为原材料, 研究不同工艺方法对于电熔白刚玉提取效率的影响, 确立最优工艺方案。利用提取后的剩余粉料, 机械造粒成形后固态烧结, 考察添加剂对于陶粒砂表面形貌和性能的影响。此项工作不仅有利于降低废弃型壳填埋排放对环境的影响, 减少对于土壤、水资源的危害, 降低人造球形砂的制造成本, 节约矿产资源, 并且符合绿色铸造理念, 具有重要的理论指导意义和应用价值。

1 试验材料及方法

原材料为电熔白刚玉废弃型壳, 通过机械分离方法提取出部分电熔白刚玉原砂、混合砂直接回用, 剩余粉料作为制备人造球形陶粒砂的原材料。

为提升烧结后陶粒砂莫来石相含量、促进烧结, 原材料按照表1配比掺杂二级乙等铝矾土, 调整铝硅比为 $m_{Al_2O_3}/m_{SiO_2}=2.32$, 调整不同添加剂的加入量配制了8种试验原材料, 各原料的化学成分如表2所示。1[#]~8[#]样品分别添加1%、3%、5%、7%、9%CaO和1%、3%、5%TiO₂。

将电熔白刚玉废弃型壳机械分离后得到的剩余粉料与铝矾土、膨润土、添加剂等混合后球磨至粒径范围 $D_{90} \leq 13 \mu m$, 将原材料置于实验室自制造粒机中机械

造粒成球, 加水量控制在20%~25%, 造粒时间控制在60~90 min。筛分并阴干后置于刚玉匣钵中固态烧结, 烧结温度范围为1 350~1 550 °C, 烧结速率为5 °C/min。采用SK2700VD-S型体式显微镜、Zeiss Ultra Plus型场发射扫描电镜观察表面形貌, 采用X射线光谱仪分析试样的物相组成, 根据铸造用砂和耐火材料标准对陶粒砂的堆积密度、真密度、破碎率、开气孔率等性能检测。

2 试验结果与讨论

2.1 废弃型壳中电熔白刚玉的提取

熔模铸造型壳各组分的分布以及作用关系如图1所示。高温浇注过程中, 受高温作用, 粘结剂、背层砂、面层砂之间相互作用, 产生一系列物理化学变化。900 °C左右硅溶胶即会和原材料中少数Na₂O反应生成液相并固化为玻璃相 $NaAl_{11}O_{17}$, 液相会促进传质生成新相莫来石 $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$, 在与背层相连的一侧二氧化硅粒子也会参与促进二次莫来石化。二氧化硅粒子也会高温烧结生成方石英相, 方石英和非晶相粘结刚玉颗粒形成“架桥”, 提升了连接强度, 使得型壳强度增加^[21]。硅溶胶粘结背砂和面砂, 高温下硅溶胶同高温分解的游离 Al_2O_3 相互作用, 生成莫来石并促进二次莫来石化的进行。比较不同物质的莫氏硬度如表3所示, 可以通过机械磨损法, 利用磨球和废弃型壳

表1 $m_{Al_2O_3}/m_{SiO_2}$ 设计配比
Table 1 Design ratio of $m_{Al_2O_3}/m_{SiO_2}$

项目	$m_{Al_2O_3}/m_{SiO_2}$	刚玉含量/%
废弃型壳	1.38	16.00
铝矾土	2.98	—

表2 原料的主要化学成分
Table 2 Main chemical components of raw materials $w_B/\%$

项目	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	Fe ₂ O ₃
铝矾土	71.95	23.76	-	2.99	-	0.34	0.96
废弃型壳	53.79	39.02	0.47	1.03	0.46	3.85	1.38
钠基膨润土	13.95	66.30	-	0.74	3.19	3.14	1.27

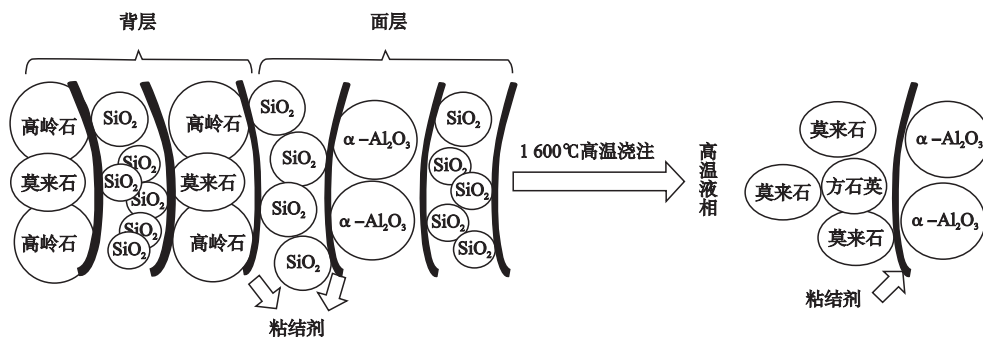


图1 熔模铸造型壳各组分作用关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram showing the relationship between the components of investment casting shell

在高速旋转下的摩擦撞击，破坏彼此的粘结，控制磨料、旋转速度和磨损时间达到部分分离的作用。

废弃型壳中存在15%左右的刚玉，设计按照球料比5:3，物料控制为罐体体积1/5~1/3之间。机械破碎废弃型壳粒径1397 μm 以下，观察不同球磨时间（4 h、6 h、8 h、10 h、12 h、14 h、16 h、18 h、20 h）各粒径范围内物料成分组成、分布情况以及不同粒径范围内刚玉的含量变化，以确定最佳机械分离方案。

由于在电熔白刚玉废弃型壳中，面砂中的电熔白刚玉粒径范围为165~350 μm ，浆料中的电熔白刚玉粒径分布范围为53 μm 左右，电熔白刚玉强度高，难破碎，作为陶粒砂原材料烧结，过多电熔白刚玉会阻隔传质增加烧结难度；适量电熔白刚玉则可作为硬质强化相，提升强度。在综合考虑筛分效率、粉料占比和球磨成本下，取经破碎、粒径小于109 μm 的粉料直接作为制备陶粒砂的原材料，统计比对经球磨工艺处理后粒径大于109 μm 以上粉料表面形貌以及粉料中刚玉占比，如表4所示。随着球磨时间的增加，刚玉占比呈先上升后下降的趋势，球磨4~10 h，可提取占废弃型壳

表3 耐火材料的莫氏硬度

Table 3 Mohs hardness of refractories

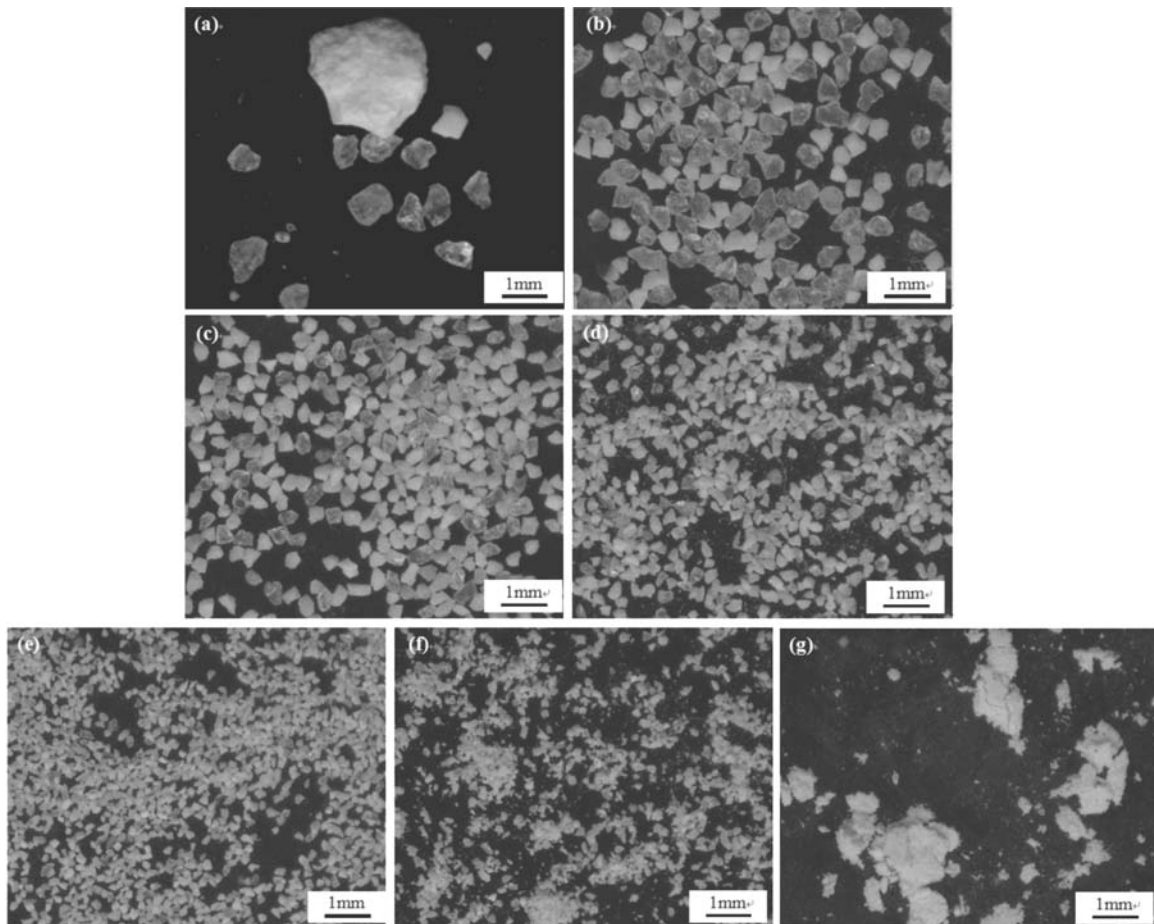
电熔白刚玉	方石英	煤矸石	莫来石
9	7	4.5~5	6~7

表4 粒径在109 μm 以上电熔白刚玉含量占比随时间的变化
Table 4 Change of percentage of corundum in the range of particle size more than 109 μm with ball milling time

球磨时间/h	4	6	8	10	12	14	16	18
刚玉占比 $w_B/\%$	6.87	8.23	7.739	6.83	5.45	5.05	3.56	4.1

中刚玉总重量43.3%~56.7%的电熔白刚玉，能满足面层砂的使用要求，可进行回用。随着球磨时间的延长，物料进一步细化，粒径逐渐集中于75 μm 以下。干磨具有效率较低，破坏粘结层效果较好，减小粒径分布效果不显著的特点。

图2所示为经机械破碎后干磨10 h，不同粒径范围内物料分布情况。不同粒径范围内均可见电熔白刚玉颗粒，粒径在165 μm 以上物料可见较多的透明状电熔白刚玉和少量乳白色颗粒混合物，粒径小于165 μm 的物料中



(a) > 270 μm ; (b) 212~270 μm ; (c) 165~212 μm ; (d) 109~165 μm ; (e) 75~109 μm ; (f) 53~75 μm ; (g) < 53 μm

图2 球磨10 h各粒径范围内粉料形貌

Fig. 2 Morphologies of powder in different particle size ranges after 10 h ball milling

乳白色,棕色颗粒状物质逐渐增多,粒径 $53\ \mu\text{m}$ 以下粉料依靠静电力吸引呈团簇状,进一步分离较为困难。

图3为球磨10 h时不同粒径范围内物料的物相分布。不同粒径分布范围材料均由莫来石、刚玉、方石英三种物相构成,但是三种物相分布的占比具有很大的差异,粒径大于 $109\ \mu\text{m}$ 的粉料中刚玉峰强度高且尖锐,刚玉物相占比大,仅含有少量的莫来石和方石英;粒径小于 $109\ \mu\text{m}$ 以下的粉料中,方石英、莫来石峰强逐渐尖锐,占比逐渐增加。

2.2 球磨方式对于粉料粒径的影响

通过对球磨工艺改进以及优化,确定最佳工艺为先干磨筛分后湿磨,即机械破碎废弃型壳至粒径小于 $1\ 397\ \mu\text{m}$,按球料比5:3干磨5 h后筛分,取 $109\ \mu\text{m}$ 以下粉料湿磨。

湿磨原始粉料即粒径为 $109\ \mu\text{m}$ 以下粉料粒度分布如图4a所示。粒径大于 $212\ \mu\text{m}$ 的粉料占整体粉料40%以上,不同粒径分布范围内均由透明色电熔白刚玉以及乳白色煤矸石和烧结混合物组成。图4b为随时间变化粉料粒径的变化趋势。物料湿磨10 h,90%粉料粒径小于 $13\ \mu\text{m}$,97%粉料粒径小于 $18\ \mu\text{m}$,已经达到陶粒砂粉料粒径标准。粉料粒径先筛分后湿磨的球磨方式可将球磨效率较直接机械破碎后直接湿磨提升44.5%左右。

针对以电熔白刚玉为面砂和粉料的废弃型壳,采用提取部分电熔白刚玉的预处理方法,可以细化物料粒径的同时为进一步造粒做准备,设计球磨、磨损工艺可得到电熔白刚玉提取物,增加经济效益。

2.3 人造球形陶粒砂机械成形

利用废弃型壳筛分、提取电熔白刚玉后的剩余粉料制备人造球形陶粒砂需经历湿磨、混料、造粒烧结、后处理等工序,其中成形后的生球坯如图5所示; $1\ 550\ ^\circ\text{C}$ 固态烧结,保温2~3 h后的球坯如图6所示。

2.4 CaO 添加剂对陶粒砂表面形貌及性能的影响

结合陶粒砂的铸造实际应用情况,陶粒砂表面具有少量开气孔,制备树脂砂、覆膜砂时,增加了粘结剂使用量,浇注时金属液也会进入开气孔造成物理粘砂,因此需要进一步提升陶粒砂表面形貌,改善表面粗糙度。材料在低温和高温保温时间过长,都会导致内部晶粒结构发生异常,从而使材料性能降低,所以改变烧结制度,提高烧结温度和保温时间对于改善陶粒砂表面形貌以及性能是有限的。

Ca^{2+} 作为一种变网阳离子在铝硅酸盐熔体中位于硅氧四面体之间,与氧成四次配位或更高次配位,具有减弱熔体聚合程度的作用,从而降低铝硅酸盐体系的熔点和粘度^[22]。同时 CaO 的引入形成了低熔点液相物质,液相烧结传质较固相烧结传质更加有效率,液相

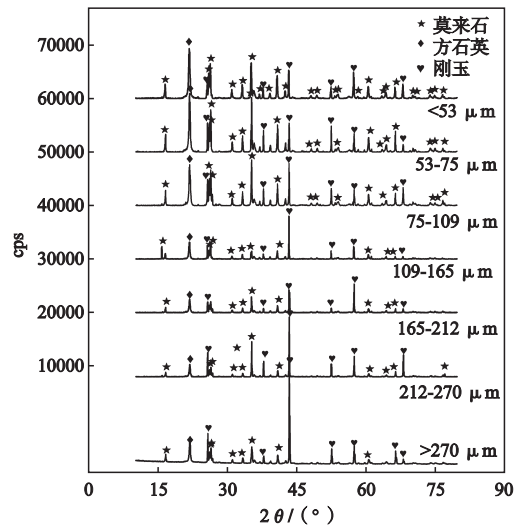
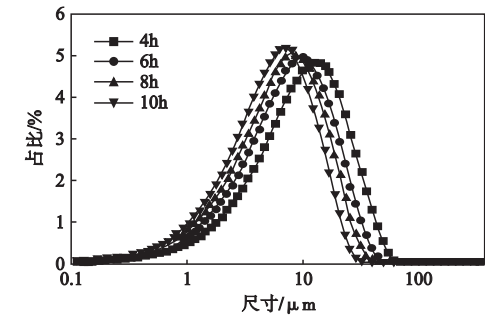
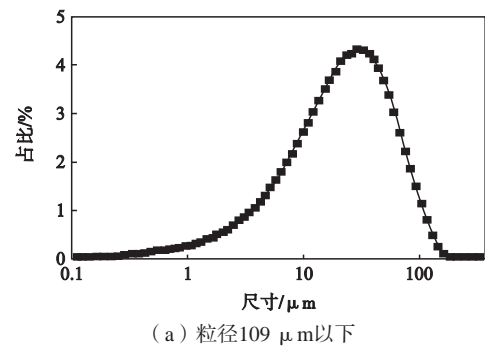


图3 球磨10 h不同粒径范围内的物相变化
Fig. 3 Changes of phase in different particle size ranges



(b) 球磨时间对粒径分布的影响

图4 粉料粒径分布

Fig. 4 Particle size distribution of powder

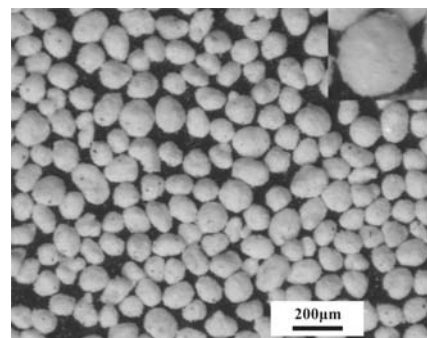


图5 机械造粒生球坯

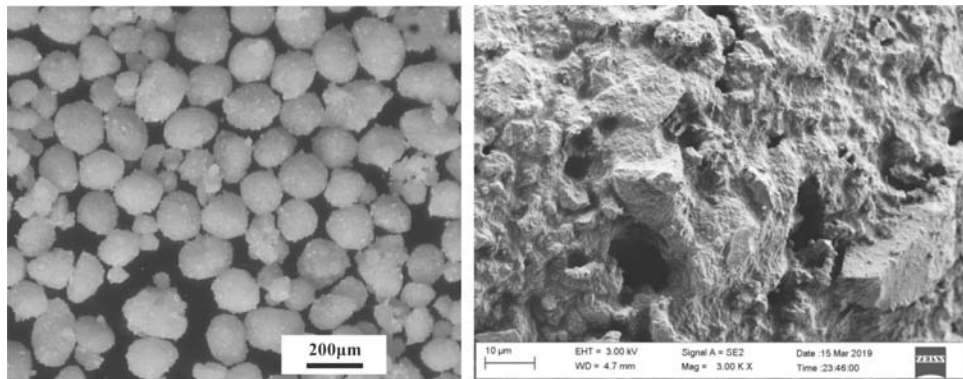
Fig. 5 Raw ceramic sand

可溶解沉淀固相，通过溶解-沉淀而达到进一步致密化过程。

分别添加1%、3%、5%、7%、9%CaO于原材料粉末中混合均匀，机械造粒成形，1 375 °C静态烧结。烧结保温2 h的表面形貌如图7所示。CaO加入量为1%时（图7a），陶粒砂表面较为疏松，有明显的孔隙，烧结致密化程度低，莫来石生长结晶不完全，为短柱状，未形成网络状结构；CaO加入量为3%时（如图7b），莫来石多呈粒状、片状晶型较差，有明显的空穴或空洞，样品结构疏松，气孔率较大；CaO加入量为5%时（图7c），可见明显的针状、短棒状莫来石，晶粒较小，可见交错的生长结构，以及低温液相促进烧结填补了部分空洞，但依旧存在空隙，样品较为疏松；随着CaO添加量不断地增多至7%（图7d），颗粒

晶界变得模糊，样品明显致密化，莫来石晶粒生长为柱状结构，晶粒转变为宽约2 μm ，此时溶解沉淀为主导烧结机制，微晶莫来石在大晶体莫来石上沉淀溶解直至消失，促使莫来石不断长大，莫来石晶粒之间呈交叉网状结构，结构明显致密，表面“空洞”已被液相填充，较为致密。随着CaO添加量增加至9%，粘度逐渐增加，烧结致密化程度增加，莫来石晶粒晶界较为模糊，大量存在的CaO一方面抑制了莫来石的生长，莫来石呈短棒状结构，另一方面生成了较多低温长石相堵塞了孔隙，表面致密。

以5 °C/min升温至1 375 °C烧结，保温2 h，检测堆积密度、开气孔率、破碎率、真密度的数值变化。由图8可见，1 375 °C烧结，陶粒砂的强度较高，破碎率较低为4%以下，陶粒砂破碎率整体呈下降后平稳趋

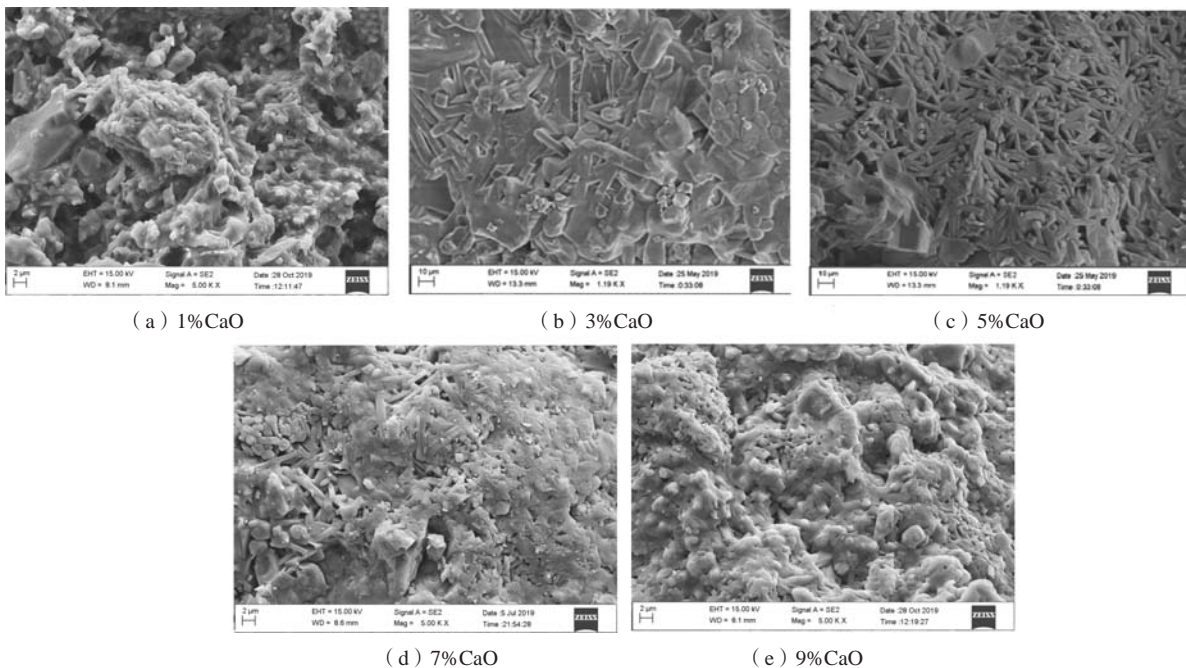


(a) 宏观

(b) 微观

图6 固态烧结球坯

Fig. 6 Solid sintered ceramic sand



(a) 1%CaO

(b) 3%CaO

(c) 5%CaO

(d) 7%CaO

(e) 9%CaO

图7 CaO加入量对于陶粒砂表面形貌的影响

Fig. 7 Effect of CaO addition on surface morphology of ceramsite sand

势,随着CaO加入量的增多,由未添加时破碎率4.76%降低至1.47%。如图8b所示,随着CaO加入量的增多,堆积密度呈先上升后平稳再上升的趋势,加入1%CaO增加了液相含量,促进了烧结,进一步促进了烧结致密化,加入量在3%~5%之间时,堆积密度并没有较大的变化,CaO加入形成的低温液相促进莫来石的生长,使其由短板状、疏松结构生长为长棒状交叉网络状结构,加入量为7%时堆积密度有明显的提升,达到 1.71 g/cm^3 ,烧结致密化效果明显,较多的液相促进莫来石的生长,包裹莫来石使陶粒砂表面光滑。加入量为9%时堆积密度即呈下降的趋势。真密度体现了样品的真实密度,排除了内部闭孔以及表面开气孔的干扰,是评价一个物质纯度以及性能的主要手段。如图8c所示,随着CaO加入量的增加,真密度呈缓慢下降后急速下降的趋势;未添加物质时,陶粒砂83.25%以上主要物质为莫来石,其余含有少量的刚玉以及非晶液相,莫来石的密度为 3.16 g/cm^3 ,刚玉的密度为 3.95 g/cm^3 ,玻璃相的密度约为 2.5 g/cm^3 ,三种物质的共同存在使得未添加的陶粒砂密度达到 2.99 g/cm^3 ;添加剂为1%时生成的非晶液相促进了莫来石的生成,原有的非晶液相一部分也形成了莫来石以及刚玉的少量析出,致使真密度增加,随着CaO加入量的增多,真密度逐渐下降,温度上

升至 $1\ 100\text{ }^\circ\text{C}$ 即有非晶液相生成,液相填充了孔隙,非晶液相的密度较低导致真密度下降。添加9%CaO时真密度为 2.767 g/cm^3 。表面开气孔的变化可以进一步反应烧结致密化的过程;未添加助熔剂时,烧结致密化程度低,如图9d所示;未加入添加剂时,表面有大量的开气孔可达35.9%;随着CaO加入量的增多,开气孔率逐渐降低,CaO添加量为7%时达到最低6.03%。烧结本身便是致密化的过程,在液相传质增加,晶粒形核长大更加完全以及非晶液相不断填补孔隙的同时,陶粒砂表面气孔消失,但是添加量为9%时,开气孔率稍微上升,液相的不断增多并不会不断地填补孔隙,在高温莫来石晶体膨胀的作用下,收缩率增加。

2.5 TiO_2 添加剂对陶粒砂表面形貌及性能的影响

废弃物原材料以及铝矾土中均含有一定量的 TiO_2 ,但是极微量。 TiO_2 在莫来石中的固溶量为2%~4%^[23], Ti^{4+} 属离子键结合,键能较强可提供游离氧降低液相粘度从而降低莫来石相形成温度,导致各向异性莫来石增加。图9所示为分别添加1%、3%、5% TiO_2 ,造粒成形, $1\ 500\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结保温2 h陶粒砂的表面形貌。添加量为1%时(9a所示),莫来石呈交叉网络状生长,呈长棒状, TiO_2 的存在促进了莫来石的生

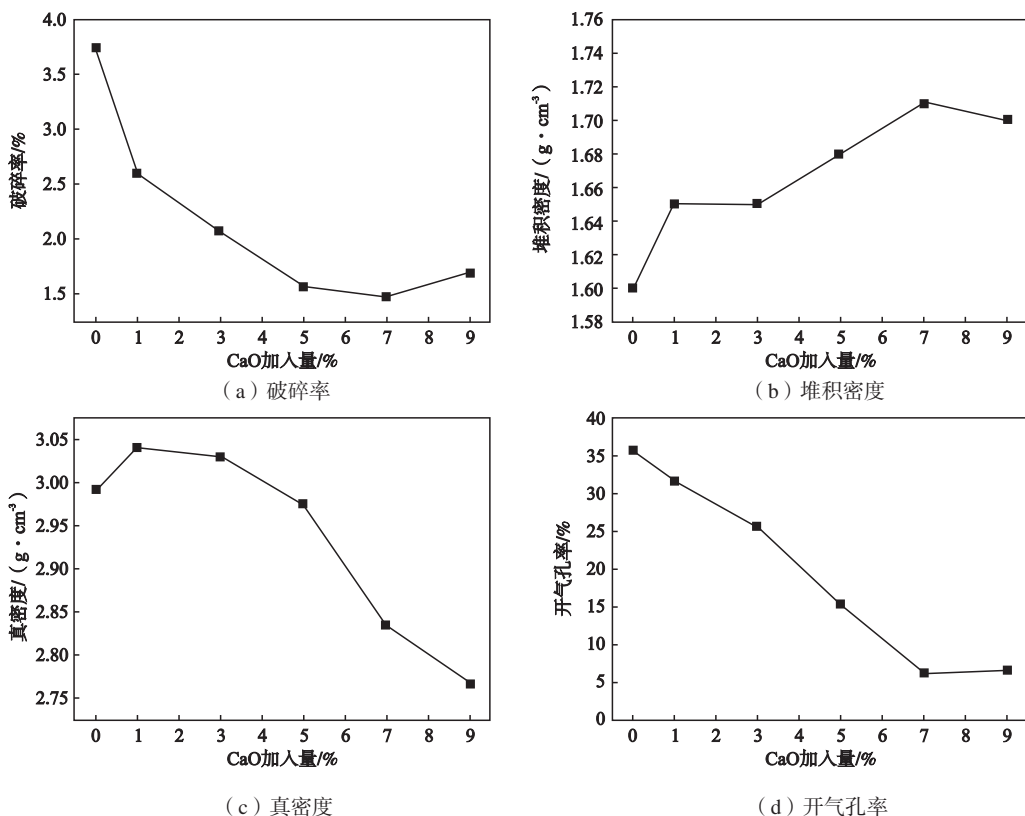


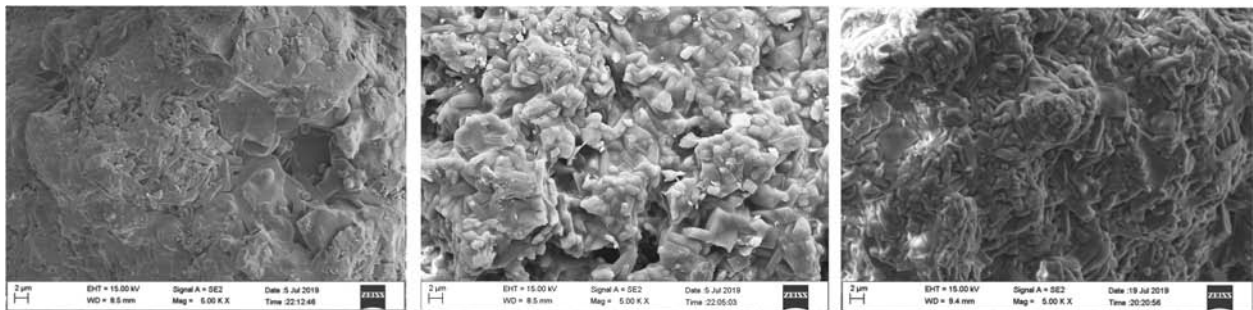
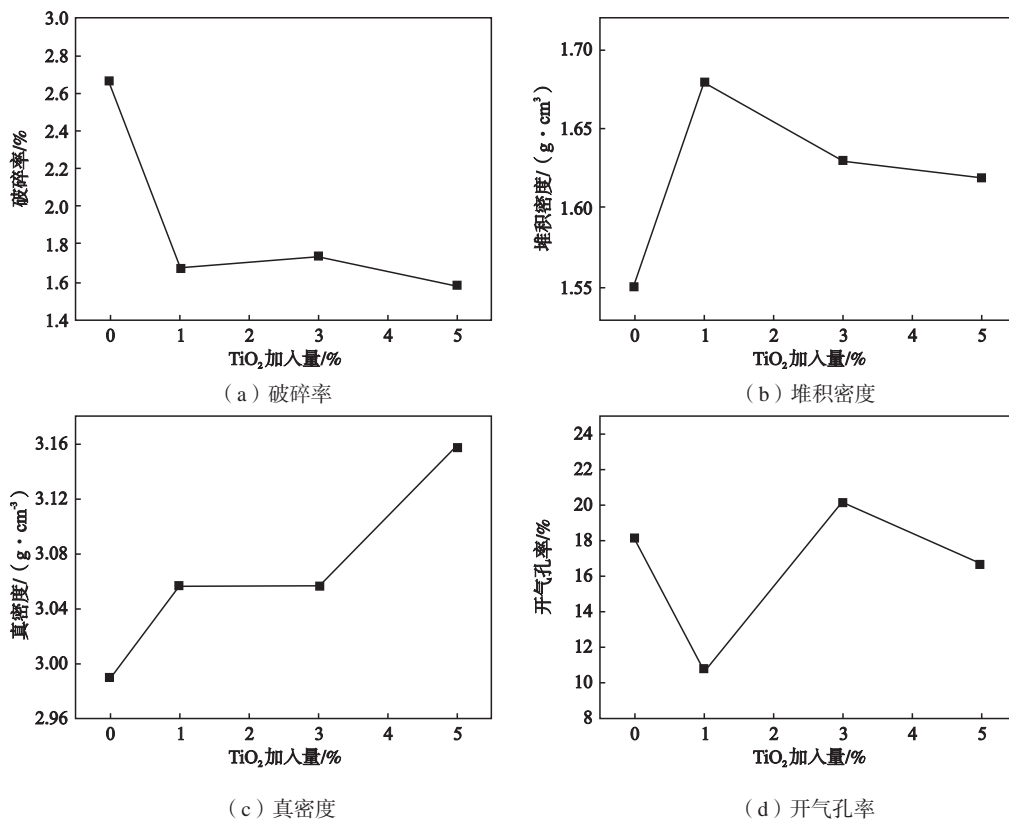
图8 CaO加入量对于陶粒砂性能的影响

Fig. 8 Effect of CaO addition on performance of ceramsite sand

长,非晶液相填补了孔洞,表面较为致密;添加量为3%时(9b所示),莫来石呈交叉网络状生长,晶界明显,表面致密没有明显的空隙;添加量为5%时(9c所示),莫来石呈短棒状,晶界不明显并有少许开气孔,莫来石被液相填充和包裹。

以5℃/min升温至1500℃烧结,保温2h,检测堆积密度、开气孔率、破碎率、真密度的数值变化。由图10a可见,陶粒砂在1500℃烧结下均可保持较高的强度,破碎率随着TiO₂添加量的增多整体呈先下降后向

上波动后平缓下降的趋势,未添加时破碎率为2.67%,添加5%TiO₂后达到最低值1.58%。由于陶粒砂主要由交叉网络状莫来石构成,对于冲击有很好的吸收扩散能力。图10b所示为TiO₂添加量对于堆积密度的影响,随着TiO₂添加量的增多堆积密度呈先升高后降低的趋势,在加入量为1%时到达峰值1.68 g/cm³,未添加时陶粒砂堆积密度为1.55 g/cm³,添加3%和5%也可以达到1.63 g/cm³、1.62 g/cm³,可见,添加TiO₂提升堆积密度具有良好的效果,添加3%时,结合表面形貌可知,此

(a) 1% TiO₂(b) 3% TiO₂(c) 5% TiO₂图9 TiO₂加入量对于陶粒砂表面形貌的影响Fig. 9 Effect of TiO₂ addition on surface morphology of ceramsite sand

(c) 真密度

(d) 开气孔率

图10 TiO₂加入量对于陶粒砂性能的影响Fig. 10 Effect of TiO₂ addition on performance of ceramsite sand

时表面生成了大量孔洞,产生了膨胀,导致了堆积密度稍有下降。试验中所添加的 TiO_2 密度为 4.23 g/cm^3 ,在 Ti^{4+} 置换固溶的同时,以及 TiO_2 物质存在反应的同时,人造球形陶粒砂真密度会逐渐增加,如图10c所示,真密度值随着 TiO_2 添加量的增加呈先平缓后明显上升的趋势。由未添加时的 2.99 g/cm^3 ,最高增长至 3.158 g/cm^3 。由于非晶液相、少量刚玉相以及方石英相的存在,加入量为1%和3%时其真密度分别为 3.058 g/cm^3 和 3.056 g/cm^3 。图10d所示为 TiO_2 添加量对于开气孔率的影响,未添加时开气孔率为18.2%,随着 TiO_2 添加剂含量的增加,开气孔率呈先下降后上升再下降的趋势,在加入量为1%时可将其降低至10.6%, TiO_2 在烧结过程中通过置换固溶,提升活化能推动烧结, TiO_2 在莫来石中的溶解度是有限的,没有很有效地解决人造球形陶粒砂表面存在的烧结气孔问题。

废弃型壳制备人造球形陶粒砂再生工艺中,需进行筛分、机械球磨(湿磨、干磨)、筛分、烘干、造粒、烧结以及性能测试等步骤,制备得到的高性能人造球形陶粒砂成本约为3 000~4 000元/吨,低于目前市场的人造球形陶粒砂和特种用砂,尤其经机械球磨分

离得到的电熔白刚玉面砂可直接回用,具有很高的经济价值。

3 结论

(1) 利用机械球磨有效分离熔模铸造废弃型壳中高价值电熔白刚玉颗粒,获得占废弃型壳重量7%~8%,粒径109~270 μm 高价值的电熔白刚玉颗粒。先干磨筛分后湿磨的方式可提升湿磨效率44.5%。

(2) 未加入添加剂时,陶粒砂经1 550 $^\circ\text{C}$ 烧结,保温2~3 h性能为:堆积密度 1.36 g/cm^3 ,真密度 3.05 g/cm^3 ,显气孔率9.5%,破碎率为1.48%;添加 TiO_2 、CaO作为助烧剂可有效降低烧结温度,改善表面粗糙度,减少表面开气孔,提高堆积密度;单独添加1% TiO_2 时,烧结温度降低至1 500 $^\circ\text{C}$,保温2~3 h,陶粒砂的基本性能为:堆积密度 1.68 g/cm^3 ,真密度 3.058 g/cm^3 ,显气孔率10.6%,破碎率为1.58%;单独添加7% CaO时,烧结温度降低至1 375 $^\circ\text{C}$ 保温2~3 h,陶粒砂的基本性能为:堆积密度 1.71 g/cm^3 ,真密度 2.834 g/cm^3 ,显气孔率6.03%,破碎率1.47%。

参考文献:

- [1] 郭景杰,李新中.中国铸造行业发展现状及未来[J].特种铸造及有色合金,2008(51):1-5.
- [2] 魏旭.环保砂铸造工艺性能的基础研究[D].上海:东华大学,2017.
- [3] 沈淑霞.铸造废砂、尾矿砂用作水泥胶凝材料细集料的研究[D].济南:山东大学,2014.
- [4] 刘日鑫,孙可伟,林志伟.铸造水玻璃废砂在混凝土中的应用[J].铸造,2006(11):107-109.
- [5] 陈奕.铸造废砂在沥青混合料中的应用研究[D].天津:河北工业大学,2015.
- [6] NAIK T R, KRAUS R N, CHUN Y M. Properties of field manufactured cast-concrete products utilizing recycled materials [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2003, 15(4): 400-407.
- [7] 马春梅.铸造废砂资源化研究分析[J].煤炭技术,2003,22(6):96-97.
- [8] 向若飞.熔模铸造废弃型砂耐火材料资源化利用研究[D].武汉:武汉科技大学,2017.
- [9] QUIJORNAN, COZA, ANDRES A. Recycling of waelz slag and waste foundry sand in red clay bricks [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2012(65):1-10.
- [10] ALONSO S R, COZA, VIGURI J R, et al. Recycling of foundry by-products in the ceramic industry: Green and core sand in clay bricks [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):97-106.
- [11] LIU W. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China [J]. Intern. J. Mineral Processing, 2009, 93(3-4):220-231.
- [12] 丁富才,耿国芳,伍启华,等.宝珠砂在防止砂芯断芯中的应用[J].铸造,2016,65(5):466-469.
- [13] TRIPATHI H S, BANERJEE G. Effect of chemical composition on sintering and properties of Al_2O_3 - SiO_2 system derived from sillimanite beach sand [J]. Ceramics International, 1999, 25(1):19-25.
- [14] PARK H C, LEE Y B, OH K D, et al. Grain growth in sintered MgAl_2O_4 , spinel [J]. Journal of Materials Science Letters, 1997, 16(22):1841-1844.

- [15] 蔺玉红, 田玉明, 马晓娟. 烧结温度对镁铝尖晶石质陶瓷球形铸造砂性能的影响 [J]. 铸造设备与工艺, 2014 (6): 28-30.
- [16] 孙清洲, 毕昶锋, 王晋槐. 金刚烧结陶瓷铸造砂及其应用 [J]. 铸造技术, 2017 (8): 1965-1967.
- [17] 李亮. 粉煤灰陶粒制备试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (5): 1577-1581.
- [18] LI G, MA H, TIAN Y. Feasible recycling of industrial waste coal gangue for preparation of mullite based ceramic proppant [C] //Materials Science & Engineering Conference Series. Materials Science and Engineering Conference Series, 2017.
- [19] 周敏. 外加剂对轻质高强高岭土尾矿-煤矸石-粉煤灰陶粒影响的研究 [C] //亚洲粉煤灰及脱硫石膏综合利用技术国际交流大会, 2014.
- [20] YUE Z X, CHEN J N. Study on preparation of ceramsite by kyanite tailings [J]. Advanced Materials Research, 2013 (4): 753-755.
- [21] MADER D. Hydraulic proppant fracturing and gravel packing [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1989 (19): 101-159.
- [22] ARAMAKI S, ROY R. Mullite-corundum boundary in the systems $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ and $CaO-Al_2O_3-SiO_2$ [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 42 (12): 644-645.
- [23] NOEMÍ M, SERRANO F J, MARÍA M R, et al. Effect of TiO_2 on the mullite formation and mechanical properties of alumina porcelain [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2010, 30 (4): 839-846.

Study on Recycling of Waste Mold Shell from Investment Casting

FANG Yu¹, LI Jia-bo², LI Xiao-jie², GAO Yong-wang¹, BAI Xiao-lu³, LIU Yue¹

(1. School of Material Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Zhangwu County Lianxin Foundry Silica Co., Ltd., zhangwu 123200, Liaoning, China; 3. Liaoning xianghe Animal Hushangry Industry Co., Ltd., Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract:

In this work, the recycling technology of the waste mold shell from investment casting was studied, which can achieve 100% recycling. High value fused white corundum surface sand was firstly extracted from the waste mold shell, and then the residual powder of the waste mold shell was mixed with bauxite, CaO and TiO_2 as additives and the mechanical ball milling, granulation and solid-state sintering were carried out to prepare the ceramsite sand. The effects of different additives and their amounts on the morphology and properties of the ceramsite sand were studied. It was found that the high-value fused white corundum particles could be separated out from the waste shell of investment casting, up to 7%-10% of the weight of the waste shell, with the particle size of 109-270 μm , by the mechanical ball milling. Adding TiO_2 and CaO as the sintering aids could reduce the sintering temperature to 1 500 $^{\circ}C$ and 1 375 $^{\circ}C$, respectively, by solid solution replacement and forming low temperature liquid phase. When 1% TiO_2 was added alone, the sintering temperature was kept at 1 500 $^{\circ}C$ for 2-3 h, the bulk density of ceramsite sand was 1.68 g/cm^3 , the true density was 3.058 g/cm^3 , the apparent porosity was 10.6%, and the crushing rate was 1.58%. When 7% Cao was added alone, the basic properties of ceramsite sand were 1.71 g/cm^3 of bulk density, 2.834 g/cm^3 of true density, 6.03% of apparent porosity and 1.47% of crushing rate.

Key words:

investment casting; waste shell; artificial spherical ceramsite sand; electric melting white corundum