

文章编号:1007-9629(2025)01-0050-08

锡尾矿基高强陶粒制备及其性能

龙雨欣, 鲍银珠, 黄小凤*, 朱 风, 刘嘉鑫

(昆明理工大学 环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:以锡尾矿(T)、湖泊底泥(L)、粉煤灰漂珠(F)为原料,水玻璃为黏结剂,制备高强陶粒,利用正交试验、单因素优化试验探究热处理制度及水玻璃掺量对陶粒性能的影响.结果表明:在原料配比为 $m(T):m(L):m(F)=65:25:10$ 、水玻璃掺量为325 mL/kg、预热温度为600℃、烧结温度为1 120℃、烧结时间为15 min时,可制备1 h吸水率为0.41%、筒压强度为8.53 MPa、密度等级为600级的高强陶粒;随烧结温度升高,陶粒中物相存在 $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow MgFe_2O_4$ 的转化;添加的水玻璃为陶粒提供了部分Si—O键,生成透长石、霞石等晶相,提高了基体强度.

关键词:陶粒;锡尾矿;热处理;物相组成

中图分类号:TU528.04

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.01.007

Preparation and Properties of Tin Tailings Based High Strength Ceramsite

LONG Yuxin, BAO Yinzh, HUANG Xiaofeng*, ZHU feng, LIU jiaxin

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The high strength ceramsite was prepared by using tin tailings(T), lake sediment(L) and fly ash floating beads(F) as raw materials and sodium silicate as binder. The effects of heat treatment system and sodium silicate content on the properties of ceramsite were investigated by the orthogonal experiment and single factor optimization experiment. The results show that when the raw material ratio of T, L, F by mass is 65:25:10, the sodium silicate content is 325 mL/kg, the preheating temperature is 600℃, and the sintering temperature is 1 120℃ for 15 min, the obtained high strength ceramsite with a density grade of 600 shows the following performance parameters: the 1 h water absorption is 0.41%, the cylinder compressive strength is 8.53 MPa. With the increase of sintering temperature, the phase transformation of $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow MgFe_2O_4$ exists in the ceramsite. The addition of sodium silicate provides part of the Si—O bond to form crystal phases such as sanidine, nepheline, which improve the strength of the ceramsite.

Key words: ceramsite; tin tailings; heat treatment; phase composition

锡尾矿是锡矿开发处理后的主要废弃物,中国贮存量约3亿 m^3 ^[1].锡尾矿长期堆存不仅占用大量土地,且其中的重金属元素会对周边环境及人类健康造成危害^[2].中国国家发改委等十部委联合发布的《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》^[3],提倡利用尾矿制备砂石骨料、陶粒等砂源替代性材料,与建筑、环保等产品应用领域融合^[4-5].因此,

依据锡尾矿特点对其进行整体资源化,既可统筹兼顾环境和经济效益,又是解决其堆存问题和实现无害化的研究方向之一.

陶粒因轻质、高强等优点,在建筑、农业等领域有良好的应用^[6-7].目前,传统陶粒多使用页岩、黏土等天然资源进行制备,造成对自然资源的破坏.同时,诸多固体废弃物已体现出替代天然原料的优异

收稿日期:2023-12-26; 修订日期:2024-02-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52260017)

第一作者:龙雨欣(2000—),女,湖南益阳人,昆明理工大学硕士生.E-mail:474489515@qq.com

通讯作者:黄小凤(1972—),女,广西桂林人,昆明理工大学教授,博士生导师,博士.E-mail: hxfkmust@163.com

性^[8-9].锡尾矿作为采矿废弃物,含有制备陶粒所需的 SiO_2 、 Al_2O_3 等成分,且其中 MgO 、 CaO 等碱金属氧化物含量较高,有利于降低陶粒的熔融温度^[10],因而具有制备高性能陶粒的潜力,但目前以其为原料制备陶粒的研究较少.

本文以锡尾矿、湖泊底泥、粉煤灰漂珠为原料制备高强陶粒,通过正交试验、单因素优化试验探究热处理制度对陶粒性能的影响规律,确定最佳制备条件并深入探讨水玻璃对陶粒性能的影响机理.本研究可在有效提高锡尾矿消纳量的同时,实现多源固废协同制备高性能陶粒,推动大宗固废在建筑及道路工程中的应用,促进建筑工业的可持续发展.

1 材料和方法

1.1 原材料

锡尾矿(T)取自云南省个旧市某尾矿库的氧化型锡尾矿,自然晾干后经研磨并过 $75\sim 150\ \mu\text{m}$ 筛后备用.湖泊底泥(L)取自昆明市滇池疏浚工程,干燥后经研磨并过 $150\ \mu\text{m}$ 筛后备用.粉煤灰漂珠(F)购自河南某材料公司,粒径为 $75\sim 150\ \mu\text{m}$.黏结剂采用水玻璃,模数为2.25.锡尾矿、湖泊底泥、粉煤灰漂珠的X射线荧光光谱仪(XRF)测试结果如表1所示,X

射线衍射仪(XRD)测试结果如图1所示.由表1可知,3种原料均含有制备陶粒所需的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 、 Fe_2O_3 、 CaO 等成分.由图1可知,3组原料的主晶相均为石英(SiO_2),其中,锡尾矿中还含有堇青石($\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$)、镁钠闪石($(\text{Na},\text{Ca})_2(\text{Mg},\text{Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$)等;湖泊底泥中包括少量具有可塑性的高岭土($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$);粉煤灰漂珠中含有莫来石($\text{Al}_{4.56}\text{Si}_{1.44}\text{O}_{9.72}$).

1.2 陶粒制备

将锡尾矿、湖泊底泥、粉煤灰漂珠利用V型搅拌机均匀混合后加入水玻璃充分搅拌,制成直径为 $9\sim 10\ \text{mm}$ 的生料球,自然干燥至恒重后,将生料球放入电阻炉中通过预热、煅烧两道工序进行烧结,烧结完成随炉冷却至室温,取出烧制好的陶粒样品备用.

1.3 分析方法

1.3.1 物理性能测定方法

陶粒的物理性能,包括堆积密度、表观密度、1 h吸水率等的测定参考GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法 第2部分:轻集料试验方法》进行.为解决试验室制备样品量难以达到国标中测定筒压强度所需试样量的问题,本文在国标筒压强度测试方法基础上,提出陶粒的小筒筒压强度测定方法,对测

表1 原料的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of raw materials

Raw material	SiO_2	Al_2O_3	MgO	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	TiO_2	ZnO	P_2O_5	Na_2O	Other
T	38.41	12.38	18.25	12.06	8.53	3.29	1.78	1.19	1.18	0.28	0.13	2.52
L	49.40	26.19	1.96	14.01	1.28	2.58	0.30	3.46	0.02	0.33	0.19	0.28
F	58.08	34.55	0.60	2.06	0.90	1.21	0.34	1.20	0.01	0.10	0.69	0.26

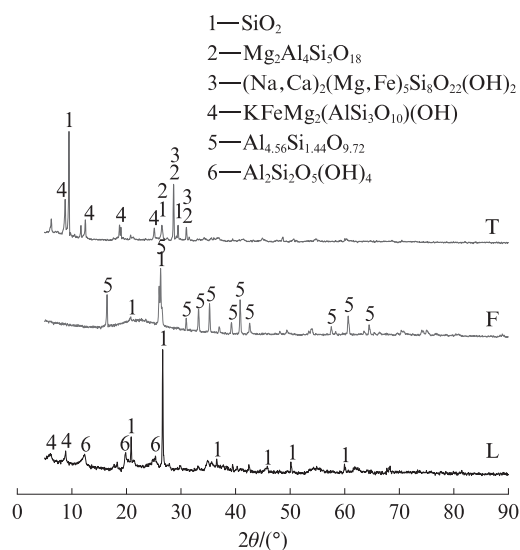


图1 原料XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of raw materials

定陶粒筒压强度的承压筒进行改良,在如图2所示.通过单颗粒抗压强度^[11]、比强度^[12]、小筒筒压强度综合评价陶粒的强度.

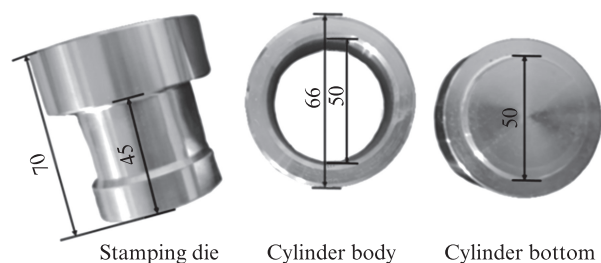


图2 承压筒

Fig. 2 Pressure cylinder(size:mm)

1.3.2 表征方法

采用ZSX100e型XRF对原料进行化学组成检测;采用Ultima IV型XRD对原料及陶粒矿物相进行测试和分析;采用HCT-3型微机差热天平对生料球粉末料进行热重分析(TG-DTA).

2 结果与讨论

2.1 热分析

前期以锡尾矿-湖泊底泥为原料烧制陶粒预试验结果表明,湖泊底泥中含有的有机成分能促进陶粒造孔,确定湖泊底泥的掺量为25%.为获得良好的生料球成型塑性,水玻璃添加量为300~350 mL/kg,锡尾矿-湖泊底泥-粉煤灰漂珠配方如表2所示.TLF65生料球粉末料的TG-DTA曲线如图3所示.由图3可知,在0~1 200℃之间,TLF65生料球粉末料呈现明显的3段式质量损失,分别对应水分蒸发、预热处理、烧结处理3个阶段.第1阶段为25~145℃,对应的DTA曲线存在吸热峰,混料发生自由水和吸附水的蒸发^[13].第2阶段为145~660℃,对应DTA曲线出现吸放热峰,表明该阶段发生物质晶相转变、熔融等变化,且发生快速质量损失时对应DTA曲线出现明显吸热峰,此时物质发生快速分解.第3阶段为660~1 200℃,TG曲线平稳下降且在1 040℃以后出现不同程度的轻微上浮,对应DTA曲线持续下降,且在1 180℃左右呈现轻微上升趋势,

表2 锡尾矿-湖泊底泥-粉煤灰漂珠配方
Table 2 Raw material formulation of tin tailings-lake sediment-fly ash floating beads

Raw material	Unit: %		
	TLF75	TLF65	TLF55
T	75	65	55
L	25	25	25
F	0	10	20

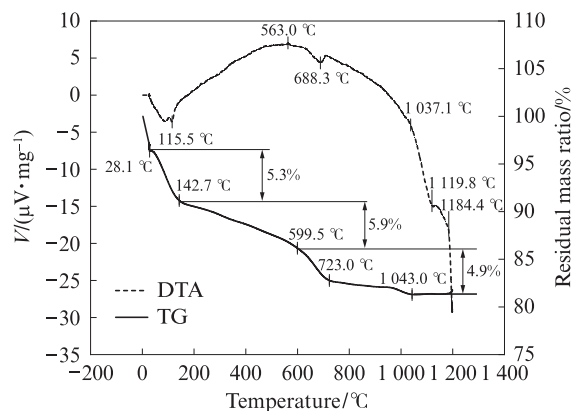


图3 TLF65生料球粉末料的TG-DTA曲线

Fig. 3 TG-DTA curve of TLF65 raw material ball powder

此阶段存在物质分解并有新物质生成.

2.2 正交试验分析

根据原料的XRF与TG-DTA分析,设计4因素3水平 $L_9(3^4)$ 正交试验,其试验表设计及陶粒物理性能如表3所示.由表3可知,所制得陶粒的密度等级介于400~700级之间;1 h吸水率介于0.27%~3.95%之间;小筒筒压强度介于5.6~8.5 MPa之间.为了进一步明确对陶粒性能的最大影响因素,对表3所述性能指标测试结果开展极差分析,结果如表4(表中 R 为因素极差值, $\bar{K}$ 为某因素某水平时试验数据求和后的平均值)所示.由表4可知,对陶粒4个考察指标影响最大的热处理因素为烧结温度,其次是预热温度和烧结时间,表明陶粒产生气孔、实现轻质高强需要一定的温度条件.综合分析陶粒烧制的最佳配比为 $m(T):m(L):m(F)=65:25:10$,最佳热处理条件为:预热温度550℃,烧结温度1 120℃,烧结时间20 min.

2.3 热处理制度对陶粒性能的影响

2.3.1 预热温度对陶粒性能的影响

根据正交试验结果,选择原料配比为 $m(T):m(L):m(F)=65:25:10$,水玻璃添加量为325 mL/kg,并结合其TG-DTA曲线分析(图3(b)),在最佳热处理条件下,拟定预热温度为400、450、500、550、600、650℃,制备出的陶粒性能如图4所示.

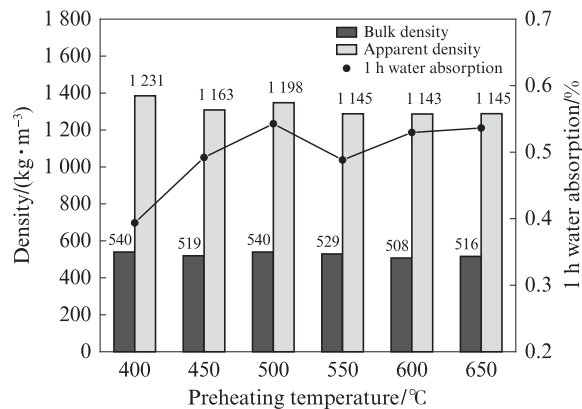
由图4可知,预热温度对陶粒密度影响较小,对陶粒强度和吸水率影响较大.随着预热温度的升高,陶粒吸水率整体呈现上升趋势;陶粒小筒筒压强度和比强度的整体变化趋势均为先上升后下降.陶粒的单颗粒抗压强度与小筒筒压强度、比强度的变化趋势不一致,原因是:受堆积密度的影响,陶粒单颗粒与堆积状态测试的强度差异性较大,但陶粒堆积密度对筒压强度的影响较小.所得陶粒密度等级均为500级,600℃预热时,陶粒的小筒筒压强度和比强度最大,单颗粒抗压强度良好,确定最佳预热温度为600℃.

表3 $L_9(3^4)$ 陶粒正交试验设计及陶粒物理性能
Table 3 $L_9(3^4)$ orthogonal experiment design and physical properties of ceramsite

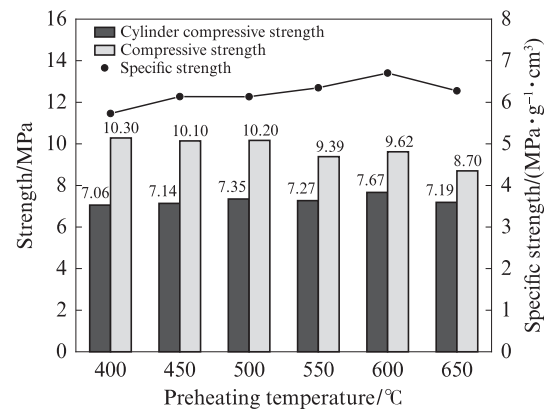
No.	A	B	C	D	Results			
	$m(T):m(L):m(F)$	Preheating temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Sintering temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Sintering time/min	Bulk density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	Apparent density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 h water absorption/%	Cylinder compressive strength/MPa
1	75:25:0	350	1 100	10	660.83	1 497.64	0.27	7.6
2	75:25:0	450	1 120	15	608.60	1 375.65	0.32	6.7
3	75:25:0	550	1 140	20	538.17	1 185.53	3.16	5.7
4	65:25:10	350	1 120	20	558.09	1 244.48	0.44	8.5
5	65:25:10	450	1 140	10	484.71	1 111.89	1.80	5.7
6	65:25:10	550	1 100	15	592.82	1 319.33	0.27	7.7
7	55:25:20	350	1 140	15	385.61	890.51	3.95	5.6
8	55:25:20	450	1 100	20	497.16	1 161.40	0.37	7.0
9	55:25:20	550	1 120	10	468.45	1 071.16	0.41	7.1

表4 正交试验分析结果
Table 4 Analysis of the orthogonal experimental results

Property	Factor	Average			R	Rank of influence
		$\bar{K}_{1j}$	$\bar{K}_{2j}$	$\bar{K}_{3j}$		
Bulk density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A	602.54	545.21	450.41	152.13	1
	B	534.84	530.16	533.15	4.68	4
	C	583.61	545.05	469.50	114.11	2
	D	538.00	529.01	531.14	8.99	3
Apparent density/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	A	1 352.94	1 225.23	1 041.02	311.91	1
	B	1 210.88	1 216.31	1 192.00	24.31	4
	C	1 326.12	1 230.43	1 062.64	263.48	2
	D	1 226.89	1 195.16	1 197.14	31.73	3
1 h water absorption/%	A	1.25	0.83	1.58	0.74	2
	B	1.55	0.83	1.28	0.72	3
	C	0.30	0.39	2.97	2.66	1
	D	0.83	1.51	1.32	0.69	4
Cylinder compressive strength/MPa	A	6.67	7.32	6.56	0.76	3
	B	7.26	6.45	6.83	0.80	2
	C	7.44	7.44	5.66	1.79	1
	D	6.79	6.69	7.06	0.37	4



(a) Density and 1 h water absorption



(b) Strength

图4 预热温度对陶粒性能的影响

Fig. 4 Effect of preheating temperature on properties of ceramsite

为进一步探究预热温度对陶粒的影响,对性能差异较大的400、500、600℃陶粒进行XRD分析,如图5所示.由图5可见:(1)陶粒的主要矿物成分有透长石(KAlSi_3O_8)、镁铁尖晶石(MgFe_2O_4)、霞石($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)、镁橄榄石(Mg_2SiO_4)、磁铁矿(Fe_3O_4)

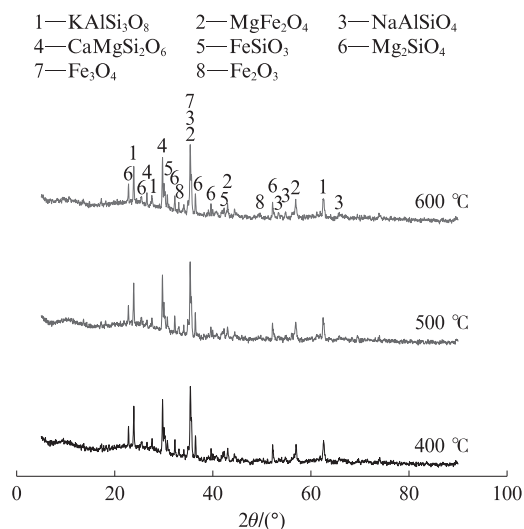


图5 不同预热温度下陶粒XRD图

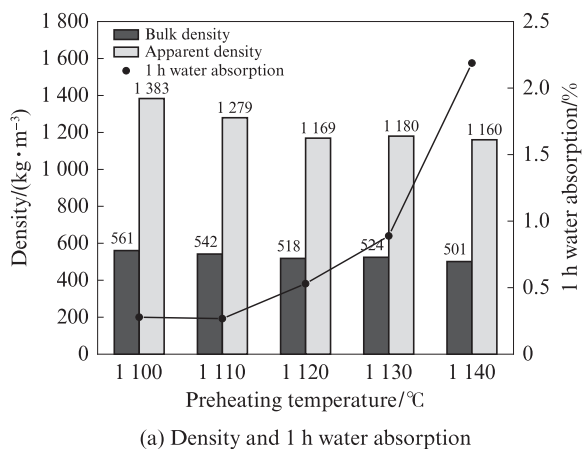
Fig. 5 XRD spectra of ceramsite at different preheating temperatures

等.(2)预热温度改变对陶粒的矿物组成影响较小,主晶相成分基本不变,但镁橄榄石、透长石的衍射峰呈轻微下降趋势,镁铁尖晶石、霞石、磁铁矿的衍射峰强度呈轻微增强趋势,初步判断含Mg和Fe元素的矿物相之间存在相互转化关系.

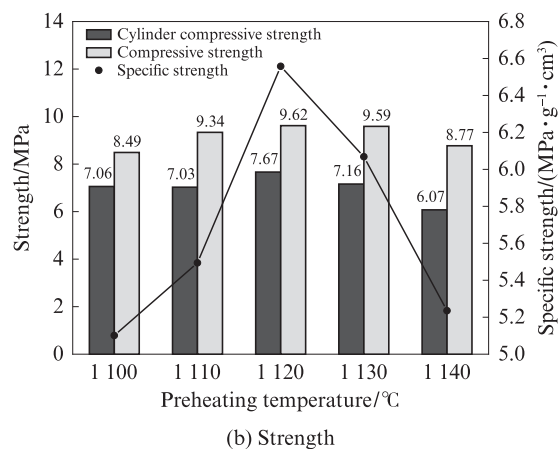
2.3.2 烧结温度对陶粒性能的影响

烧结温度过低会使体系液相熔融程度过低而无法制备出陶粒,烧结温度过高会使体系熔融过度而破坏陶粒的结构^[14].设定烧结温度为1100、1110、1120、1130、1140℃,制备的陶粒性能如图6所示.

由图6可见,烧结温度对陶粒性能的影响程度大于预热温度.烧结温度与密度成反比,所得陶粒密度等级均为500级.烧结温度与吸水率成正比,烧结温度高于1120℃时,吸水率上升明显,1140℃烧结时吸水率最大.结合不同烧结温度下陶粒的宏观形貌(见图7,图中上图为陶粒表面形貌,下图为陶粒断面形貌)发现:陶粒表面生成的釉质在外壳形成良好支撑作用,且阻碍了水分的进入;随着温度的升高,陶粒内部孔隙变多,出现开孔、大孔,因此表面釉质越少、内部孔径越大,陶粒的吸水率越高.随烧结温度



(a) Density and 1 h water absorption



(b) Strength

图6 烧结温度对陶粒性能的影响

Fig. 6 Effect of sintering temperature on the properties of ceramsite

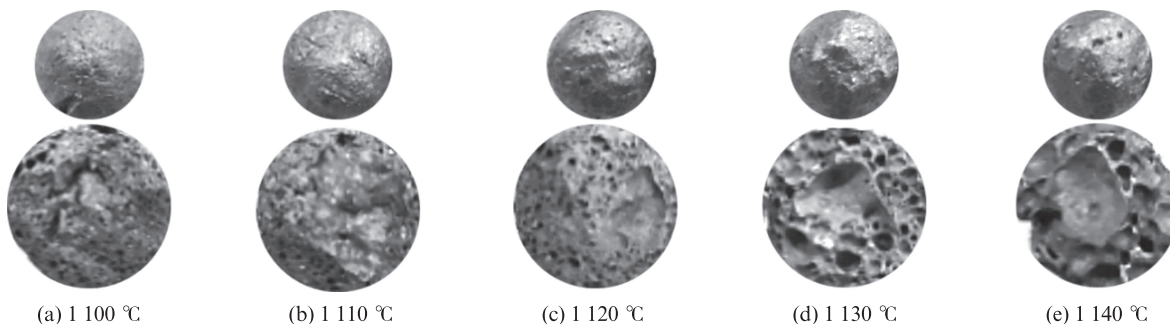


图7 不同烧结温度下陶粒的宏观形貌

Fig. 7 Macromorphology of ceramsite at different sintering temperatures

的升高,3个强度指标的变化趋势基本一致,表明烧结膨胀区间内,单颗粒状态强度与堆积状态强度差异较小;当烧结温度为1120℃时,陶粒的单颗粒抗压强度、小筒筒压强度、比强度均为最大,而且此时陶粒的密度和吸水率均为良好(见表3),确定最佳烧结温度为1120℃。

为进一步探究烧结温度对陶粒的影响,对所得陶粒进行XRD分析,如图8所示。由图8可见:不同烧结温度下所得陶粒矿物组成几乎不变;随烧结温度升高,透长石(KAlSi_3O_8)衍射峰减少且峰强降低,表明其发生分解;赤铁矿(Fe_2O_3)的衍射峰逐渐消失,而磁铁矿(Fe_3O_4)与镁铁尖晶石(MgFe_2O_4)衍射峰明显增强,可能是赤铁矿在高温下逐渐转化为磁铁矿^[15],或与含Mg元素物质结合形成镁铁尖晶石。结合烧结温

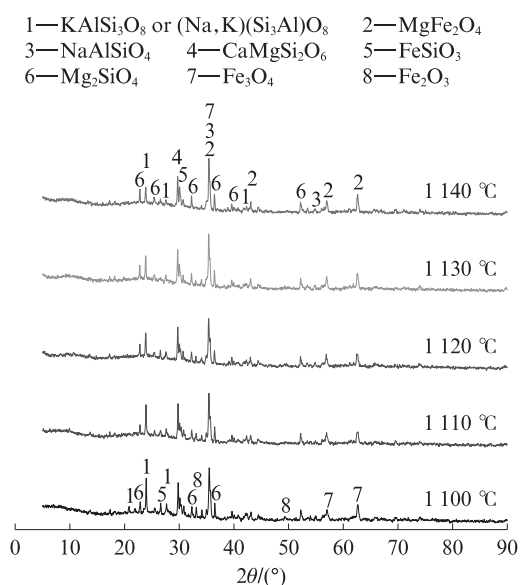
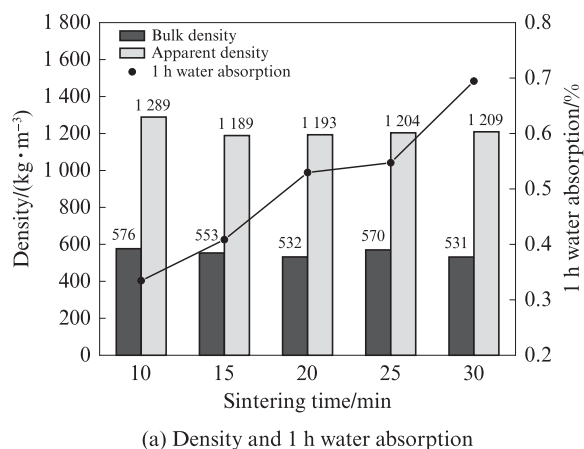


图8 不同烧结温度下陶粒的XRD图谱

Fig. 8 XRD spectra of ceramsite at different sintering temperatures



(a) Density and 1 h water absorption

度为1100℃下陶粒的磁铁矿以及1140℃下镁铁尖晶石的峰强较高,进一步判断赤铁矿、磁铁矿和镁铁尖晶石存在 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{MgFe}_2\text{O}_4$ 的转化规律。

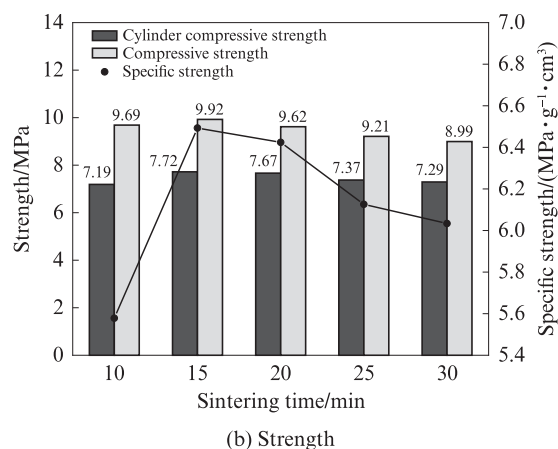
2.3.3 烧结时间对陶粒性能的影响

拟定烧结时间为10、15、20、25、30 min,制备陶粒的性能如图9所示。由图9可见:(1)不同烧结时间所制得陶粒的密度等级均为500级,表观密度在1188.82~1288.71 kg/m³之间,烧结15 min时陶粒的表观密度最小;随烧结时间延长,陶粒吸水率升高;(2)3个强度指标整体均呈先增加后降低的趋势,当烧结时间为15 min时,陶粒的单颗粒抗压强度、小筒筒压强度、比强度均为最大,确定陶粒的最佳烧结时间为15 min。

2.4 水玻璃对陶粒性能的影响

在最佳热处理条件下,分别用水玻璃添加量为0、275、325、375 mL/kg烧制陶粒,所制备陶粒的性能测试结果如图10所示。

由图10可见,添加水玻璃后,陶粒的密度等级下降为600级,陶粒的吸水率均小于0.5%。结合图10(b)中陶粒直观图可知水玻璃添加量为0 mL/kg时制备的陶粒外表面无釉质、内部无细密气孔、料球无颜色变化,表明添加水玻璃有利于促进陶粒实现高温膨胀从而有效降低陶粒密度,促进陶粒发生液相熔融、提高釉质化,从而降低吸水率。考虑陶粒的膨胀性,以比强度作为强度指标进行对比,当水玻璃添加量为325 mL/kg时,陶粒的比强度最大,为6.38 MPa/(g·cm⁻³),并根据GB/T 17431.2—2010标准测得筒压强度为8.53 MPa。综合得出水玻璃添加量为325 mL/kg时,混料粉末颗粒的黏结性最好,所制备的陶粒性能最佳。



(b) Strength

图9 烧结时间对陶粒性能的影响
Fig. 9 Effect of sintering time on the properties of ceramsite

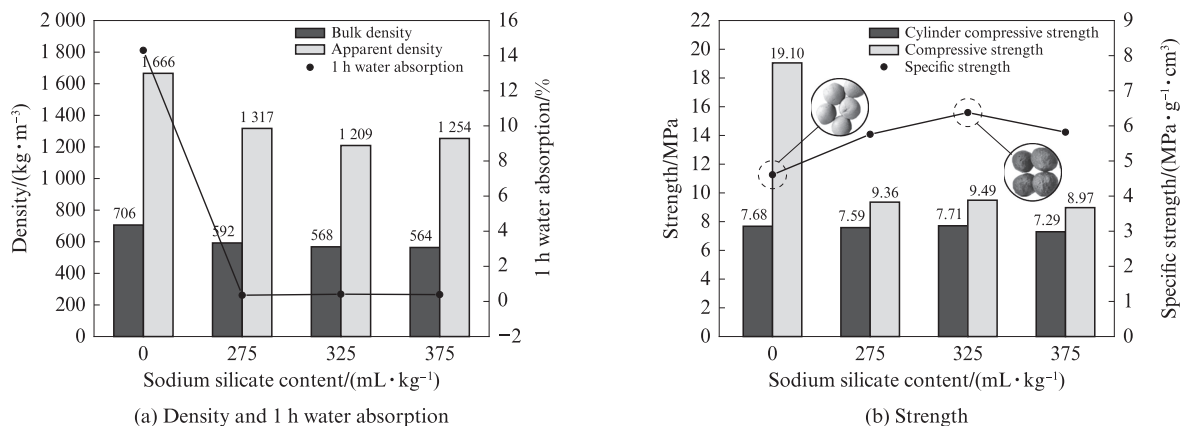


图10 水玻璃添加量对陶粒性能的影响

Fig. 10 Effect of sodium silicate content on the properties of ceramsite

进一步探究添加水玻璃对陶粒性能的影响,对不同水玻璃添加量的陶粒进行XRD分析如图11所示.由图

11可见,水玻璃的加入会改变陶粒的晶相生成和晶体变化,添加水玻璃制成的陶粒的主要矿物成分基本一致.

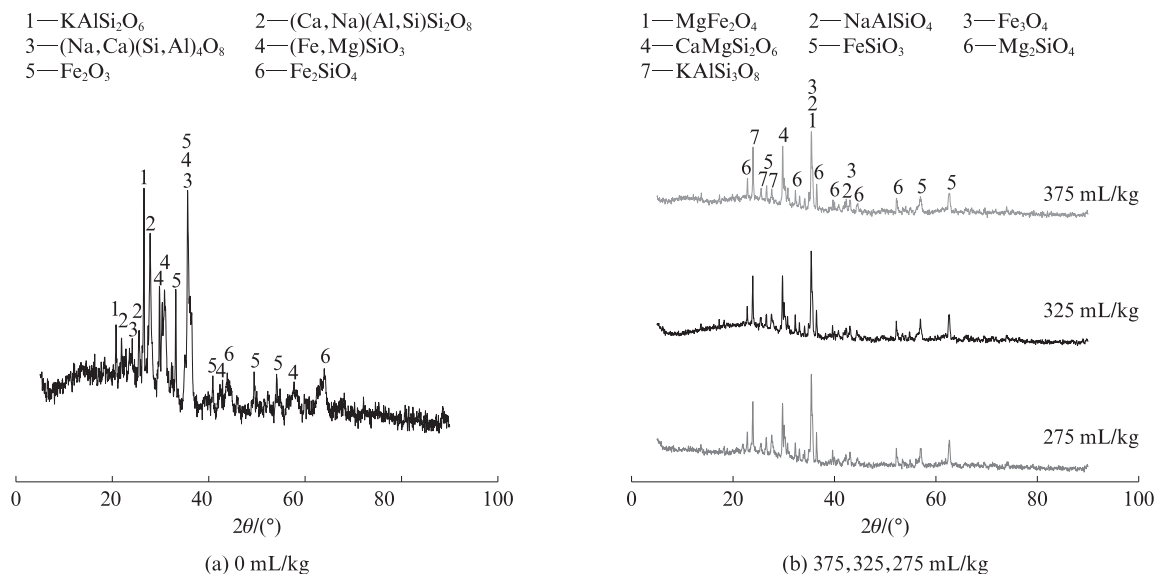


图11 不同水玻璃添加量下陶粒的XRD图谱

Fig. 11 XRD patterns of ceramsite at different sodium silicate contents

水玻璃对陶粒晶相的影响如图12所示.由图12可见,本研究加入的水玻璃主要成分是Na₂SiO₃,其

中NaO含量占比13.75%,SiO₂量占比29.99%,加入水玻璃后为陶粒提供部分Si—O键,使陶粒物质反应更完全,晶相更单一.未添加水玻璃制成的陶粒,其生成的白榴石(KAlSi₂O₆)晶相在引入充足的含Si—O键物质后,在高温作用下转变为透长石(KAlSi₃O₈);由多元素组成的钙长石((Ca,Na)(Al,Si)Si₂O₈)和钠长石((Na,Ca)(Si,Al)₄O₈)在引入含Na₂O和SiO₂的水玻璃后在高温下转变为组成元素较单一的霞石(NaAlSiO₄)和透辉石(CaMgSi₂O₆),同时分解出其他含Si—O键的物质,作用于其他晶相的转化、形成过程;铁辉石((Fe,Mg)SiO₃)、铁硅酸盐尖晶石(Fe₂SiO₄)和赤铁矿(Fe₂O₃)在高温下转化为镁铁尖晶石(MgFe₂O₄)、斜铁辉石(FeSiO₃)和磁铁矿(Fe₃O₄),同时富镁铁辉石将含Mg元素的物质分解,

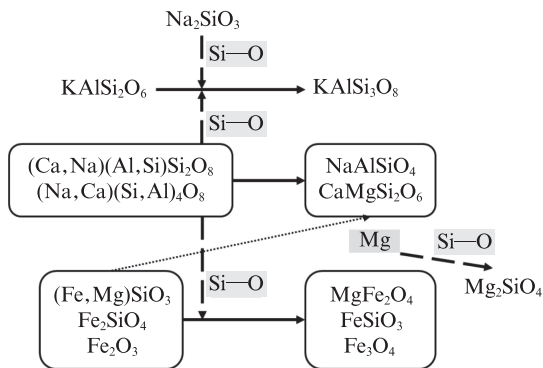


图12 水玻璃对陶粒晶相的影响

Fig. 12 Effect of sodium silicate on the crystal phase of ceramsite

该物质与含Ca元素物质和含Si—O键物质形成透辉石和镁橄榄石(Mg_2SiO_4)。

3 结论

(1)当锡尾矿、湖泊底泥、粉煤灰漂珠的质量分数分别为65%、25%、10%,水玻璃掺量为325 mL/kg,预热温度为600℃,烧结温度为1 120℃,烧结时间为15 min时,可制得1 h吸水率为0.41%、筒压强度为8.53 MPa的烧结陶粒。

(2)热处理制度对陶粒物理性能的影响程度由强到弱依次为烧结温度、预热温度、烧结时间。随烧结温度与烧结时间的变化,单颗粒陶粒抗压强度、小筒筒压强度和比强度变化趋势一致。

(3)水玻璃对陶粒物相组成的影响体现在其为陶粒物质反应提供部分Si—O键,使其生成更多含有玻璃特质的透长石、霞石等晶相,从而提高了陶粒的强度。

参考文献:

- [1] 张靖,朱连明.锡尾矿库重金属污染特征分析[J].矿冶,2022,31(4):122-126.
ZHANG Jing, ZHU Lianming. Analysis on heavy metal pollution characteristics of tin mine tailings pond[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(4):122-126. (in Chinese)
- [2] WANG G, XIAO H Z, LIANG G C, et al. Leaching characteristics and stabilization of heavy metals in tin-polymetallic tailings by sodium diethyl dithiocarbamate intercalated montmorillonite (DDTC-Mt)[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 344:131041.
- [3] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.关于“十四五大宗固体废弃物综合利用的指导意见”[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2021.
The National Development and Reform Commission. Guidance on comprehensive utilization of bulk solid wastes during the “14th Five Year Plan”[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2021. (in Chinese).
- [4] 安树好,刘娟红,张月月,等.硅铝型铁尾矿粉的无熟料固结性能及水化机理[J].建筑材料学报,2023,26(2):172-178.
AN Shuhao, LIU Juanhong, ZHANG Yueyue, et al. Non-clinker consolidation performance and hydration mechanism of silicon aluminum iron tailing powder[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):172-178. (in Chinese)
- [5] 卢佳涛,孔丽娟,樊子瑞,等.铁尾矿砂-地聚物复合材料的界面与性能[J].建筑材料学报,2022,25(6):585-590,606.
LU Jiatao, KONG Lijuan, FAN Zirui, et al. Interface and performance of iron tailings-geopolymer composites[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6):585-590,606. (in Chinese)
- [6] 王小娟,刘路,贾昆程,等.陶粒泡沫混凝土的力学性能及吸能特性[J].建筑材料学报,2021,24(1):207-215.
WANG Xiaojuan, LIU Lu, JIA Kuncheng, et al. Mechanical properties and energy absorption characteristics of ceramsite foam concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):207-215. (in Chinese)
- [7] 郑伍魁,赵丹,朱毅,等.陶粒工程应用的趋势分析及研究进展[J].材料导报,2023,37(7):102-113.
ZHENG Wukui, ZHAO Dan, ZHU Yi, et al. Trend analysis and research progress of ceramsite engineering application [J]. Materials Reports, 2023, 37(7):102-113. (in Chinese)
- [8] 赵洪,谢友均,龙广成,等.陶粒对SC-SCC黏结界面的劈裂破坏特性的影响[J].建筑材料学报,2024,27(4):350-358.
ZHAO Hong, XIE Youjun, LONG Guangcheng, et al. Effect of ceramsite on splitting failure characteristics of SC-SCC bonding interface[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4):350-358 (in Chinese)
- [9] 张磊,张鸿飞,荣辉,等.700~900密度等级渣土陶粒的研制及其性能[J].建筑材料学报,2018,21(5):803-810.
ZHANG Lei, ZHANG Hong fei, RONG Hui, et al. Fabrication and performance of 700~900 density grade muck ceramsite[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(5):803-810. (in Chinese)
- [10] LI P W, LUO S H, ZHANG L H, et al. Study on preparation and performance of iron tailings-based porous ceramsite filter materials for water treatment [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 276:119380.
- [11] GESOĞLU M, ÖZTURAN T, GÜNEYİSİ E. Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(9):1869-1878.
- [12] 吴涛,杨雪,刘喜.钢-聚丙烯混杂纤维自密实轻骨料混凝土性能[J].建筑材料学报,2021,24(2):268-275,282.
WU Tao, YANG Xue, LIU Xi. Properties of self-compacting lightweight concrete reinforced with hybrid steel and polypropylene fibers[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2):268-275,282. (in Chinese)
- [13] SHAO Y Y, SHAO Y Q, ZHANG W Y, et al Preparation of municipal solid waste incineration fly ash-based ceramsite and its mechanisms of heavy metal immobilization [J]. Waste Management, 2022, 143:54-60.
- [14] SHANG S, FAN H H, LI Y X, et al. Preparation of lightweight ceramsite from solid waste using SiC as a foaming agent [J]. Materials, 2022, 15(1):325.
- [15] 刘明伟,许国仁,李圭白. Fe_2O_3 对污泥与底泥制备轻质陶粒性能的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2012,44(10):18-21.
LIU Mingwei, XU Guoren, LI Guibai. Effect of Fe_2O_3 on the characteristics of lightweight aggregate made from sewage sludge and river sediment[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(10):18-21. (in Chinese)