

文章编号:1007-9629(2026)03-0325-08

不同烧结温度下污泥基陶粒的孔隙特征 及演化规律

韩茗丞^{1,2}, 吴凯^{1,2}, 于龙^{1,2}, 徐玲琳^{1,2}, 杨正宏^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要:基于海岛模型提出了陶粒特征孔径演化预测方法,通过试验揭示了烧结制度对陶粒孔隙结构及力学性能的影响机制。结果表明:理论模型能定性反映陶粒孔隙率的变化趋势,结合初始孔隙、冷却气泡融合等因素可进一步提高模型的准确性;温度升高和时间延长会提高陶粒的孔隙率,导致其抗压强度下降;尽管高温烧结促进了珍珠石、钙长石等骨架矿物的生成,但孔隙率增加对陶粒强度的负面效应更为显著。研究结果可以为污泥基陶粒的孔隙调控和性能优化提供一定的理论依据。

关键词:污泥;陶粒;孔隙特征;理论模型;力学性能;矿物组成

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2026.03.006

Evolution of Pore Characteristics in Sludge Based Ceramsite under Different Sintering Temperatures

HAN Mingcheng^{1,2}, WU Kai^{1,2}, YU Long^{1,2}, XU Linglin^{1,2}, YANG Zhenghong^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the island model, a predictive method for the evolution of pore characteristic in ceramsite was proposed and the influence mechanism of sintering regimes on the pore structure and mechanical properties of ceramsite was revealed through experimental work. The results indicate that the theoretical model can qualitatively reflect the trend of porosity variation, and its accuracy can be furtherly improved by incorporating factors such as initial pores and the fusion of cooling bubbles. Increasing temperature and prolonging sintering time increases porosity, leading to a decline in compressive strength. Although high-temperature sintering promotes the formation of skeletal minerals such as margarite and anorthite, the negative effect of increased porosity on strength is more pronounced. The research findings provide a theoretical basis for pore regulation and performance optimization of sludge based ceramsite.

Key words: sludge; ceramsite; pore characteristic; theoretical model; mechanical property; mineral composition

陶粒作为一种轻质多孔材料^[1],具有优异的物理力学性能,包括低密度、高抗压强度和良好的化学稳定性^[2-4],已经被广泛应用于建筑和水处理领域之中^[5-8]。目前对陶粒孔结构的预测大多停留在经验层

面,在实际生产中需要依赖从业者的经验来对产物孔隙进行定性预测^[9]。这一过程不但要求陶粒制备者具备丰富的经验,而且费时费力。因此,建立一个能够从理论上描述陶粒烧结工艺与孔隙结构关系的

收稿日期:2025-05-30; 修订日期:2025-07-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52172022)

第一作者:韩茗丞(1999—),男,四川广元人,同济大学硕士生。E-mail:2130640@tongji.edu.cn

通讯作者:杨正宏(1967—),男,安徽六安人,同济大学教授,博士生导师,博士。E-mail:yzh@tongji.edu.cn

模型显得尤为重要。此外,传统陶粒生产依赖天然黏土,不仅大量消耗自然资源,还会造成碳排放问题^[10-12]。随着固废资源化利用技术的发展^[13],含有二氧化硅和钠长石的河流污泥展现出作为陶粒制备原料的潜力^[14-15]。

陶粒作为建筑材料使用时,常被用作轻质骨料。在实际应用中,陶粒的吸水率和力学强度等性能是主要关注点^[3]。对于轻质陶粒而言,其孔隙结构特征是影响这些性能的关键因素。目前,对陶粒孔结构形成的认识大多停留在烧结过程中气体向外膨胀与高温液相因表面张力向内收缩达到平衡这一机制^[9,16]。然而,关于制备工艺中具体影响膨胀和收缩的关键因素,研究尚不深入。因此,建立一个能够从理论上描述陶粒烧结工艺与孔隙结构关系的模型显得尤为重要。

本文在以污泥为主要原料制备陶粒的基础上,研究了烧结温度和烧结时间对陶粒力学性能、孔隙结构及物相组成(质量分数,文中涉及的组成、含水率等除特别说明外均为质量分数)的影响,结合海岛模型,深入分析不同烧结温度下污泥基陶粒的孔隙特征及演变规律。

1 试验

1.1 原材料

污泥来自市政自来水处理污泥,初始含水率为80%,经压滤、烘干处理后球磨制成75 μm粉末。采用X射线荧光光谱仪(XRF)分析污泥粉末的化学组成,结果如表1所示。此外,本研究使用分析纯Fe₂O₃作为助熔剂。

表1 污泥的化学组成

Table 1 Chemical composition (by mass) of sludge

Unit: %								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	IL
59.31	20.72	5.87	1.58	5.04	2.39	4.16	0.48	0.45

1.2 组成设计

适宜成陶的化学组成为:SiO₂含量53%~79%,Al₂O₃含量10%~25%,助熔剂(如Fe₂O₃、CaO、MgO等)含量13%~26%。结合表1中污泥的化学组成,本研究额外加入Fe₂O₃作为助熔剂。此外,烧结时间和烧结温度是影响陶粒性能及孔隙结构的重要因素,基于预试验结果和陶粒成型要求,本研究设计烧结温度分别为1 150、1 200 °C,烧结时间分别为15、20 min。具体的配合比及烧成制度如表2所示。

1.3 陶粒制备

为了得到具备一定可塑性的原料,将污泥和

表2 陶粒原料配合比及烧成制度

Table 2 Mix proportion of ceramsite and calcination regime

Code	w(sludge)/ %	w(Fe ₂ O ₃)/ %	Sintering temperature/°C	Sintering time/min
C-1150-15	95	5	1 150	15
C-1200-15	95	5	1 200	15
C-1200-20	95	5	1 200	20

Fe₂O₃充分混合并加入35%(质量分数)水,搅拌3 min后采用圆盘造粒机制备直径约10 mm左右的生球。陶粒生球在400 °C马弗炉中预热30 min后进一步提高到相应烧结温度煅烧。

1.4 性能测试

1.4.1 力学性能

陶粒单粒抗压强度(S)采用KY-20型颗粒强度测定仪进行测试,加载速率为100 N/s。每组试验测试10个平行样品,结果取其平均值,计算式为:

$$S = \frac{2.8P_c}{\pi r^2} \quad (1)$$

式中:P_c为骨料破碎时的最大荷载,N;r为陶粒半径,μm。

1.4.2 孔结构

使用VMS 3020型光学显微镜观察陶粒截面的微观结构;使用GE Vtomex型高分辨率三维X射线CT扫描仪分析陶粒内部的孔隙结构,扫描电压为80 kV,电流为120 μA,分辨率为5.5 μm。通过VG studio MAX 3.1软件得到陶粒的孔隙率、孔隙分布和三维孔隙图像等信息。

1.4.3 物相组成

将陶粒样品粉碎研磨制成粉末,采用日本Rigaku公司D/Max2550型X射线衍射仪(XRD)测试其矿物组成。测试采用连续扫描方法,扫描范围(2θ)为5°~75°,扫描速率为2(°)/min。测试结果使用MDI Jade 6.0软件进行分析。

1.4.4 微观结构

样品经真空干燥并喷金处理后使用德国Carl Zeiss公司ZEISS Sigma 300 VP型扫描电子显微镜(SEM)观察其微观形貌,加速电压为2 kV。采用能量色散X射线光谱(EDS)分析掺杂陶粒中元素的分布情况。

2 结果与讨论

2.1 孔结构特征

陶粒C-1150-15、C-1200-15和C-1200-20的颗粒密度分别为1.20、0.96、0.99 g/cm³。图1为烧结温度及时间对陶粒孔隙结构的影响。由图1可见,在

1 150 °C烧结条件下,孔隙主要分布在500 μm以上,而在1 200 °C烧结条件下,陶粒的孔径分布集中在100~500 μm范围内。这种差异可归因于2种作用力的平衡变化:在1 150 °C时,液相黏度较高,难以填充空隙,导致孔隙集中于500 μm以上;在1 200 °C下,液相黏度的降低使得收缩张力显著减小,导致整体孔隙率增大,分布更广。

随着烧结温度的升高,陶粒坯体中硅酸盐熔体(主要来源于污泥灰分)的结构发生显著变化,熔体中硅氧四面体网络结构的解聚程度增加,自由体积增大。这种熔体结构的解聚和弱化是导致其流动性增强、黏度(η)显著下降的根本原因。基于式(2)所示的Arrhenius方程,熔体黏度随着温度的升高呈指数型下降。温度升高,更多粒子获得足够能量克服活化能(E_a),流动单元的有效尺寸减小,结构更松散,从而导致黏度急剧降低。

$$\eta = Ae^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

式中: A 为指前因子; R 为理想气体常数; T 为绝对温度。

在相同烧结温度(1 200 °C)下,陶粒C-1200-15的孔隙体积占比在孔径(d)100~200、200~300 μm范围内最大,均约25%。当 d 超过300 μm时,孔隙体

积占比随着 d 的增大呈明显下降趋势,其中 d 为900~1 000 μm的孔隙占比最小(低于2.5%)。对比陶粒C-1200-20的孔径分布发现,烧结时间延长5 min后,小孔隙($d=100\sim 500\ \mu\text{m}$)体积占比整体增加,大孔隙($d>500\ \mu\text{m}$)占比总体降低。

图2为烧结温度及时间对陶粒孔形态影响。对比图1(a)的三维孔隙分布与图2的陶粒截面光学显微图像可见,烧结温度升高导致孔隙形态发生显著变化,1 150 °C烧结陶粒C-1150-15的孔隙多呈细长形,1 200 °C烧结陶粒C-1200-15和C-1200-20的孔隙更接近球形。这是因为高温下液相黏度降低,气泡受力更均匀,促使孔隙形态趋于规则化。由此可见,提高烧结温度不仅能改善孔隙分布的均匀性,还能有效调控孔径大小并优化孔隙形态。

2.2 陶粒物相组成

图3为不同试验组陶粒的XRD图谱。由图3可见:

(1)陶粒的主要成分为珍珠石、钙长石和钠长石。当烧结温度从1 150 °C升至1 200 °C时,珍珠石的衍射峰强度显著增强,钙长石的衍射峰强度也有所提高,而钠长石的衍射峰强度变化不明显。钠长石和钙长石构成陶粒的骨架结构,是陶粒强度的主

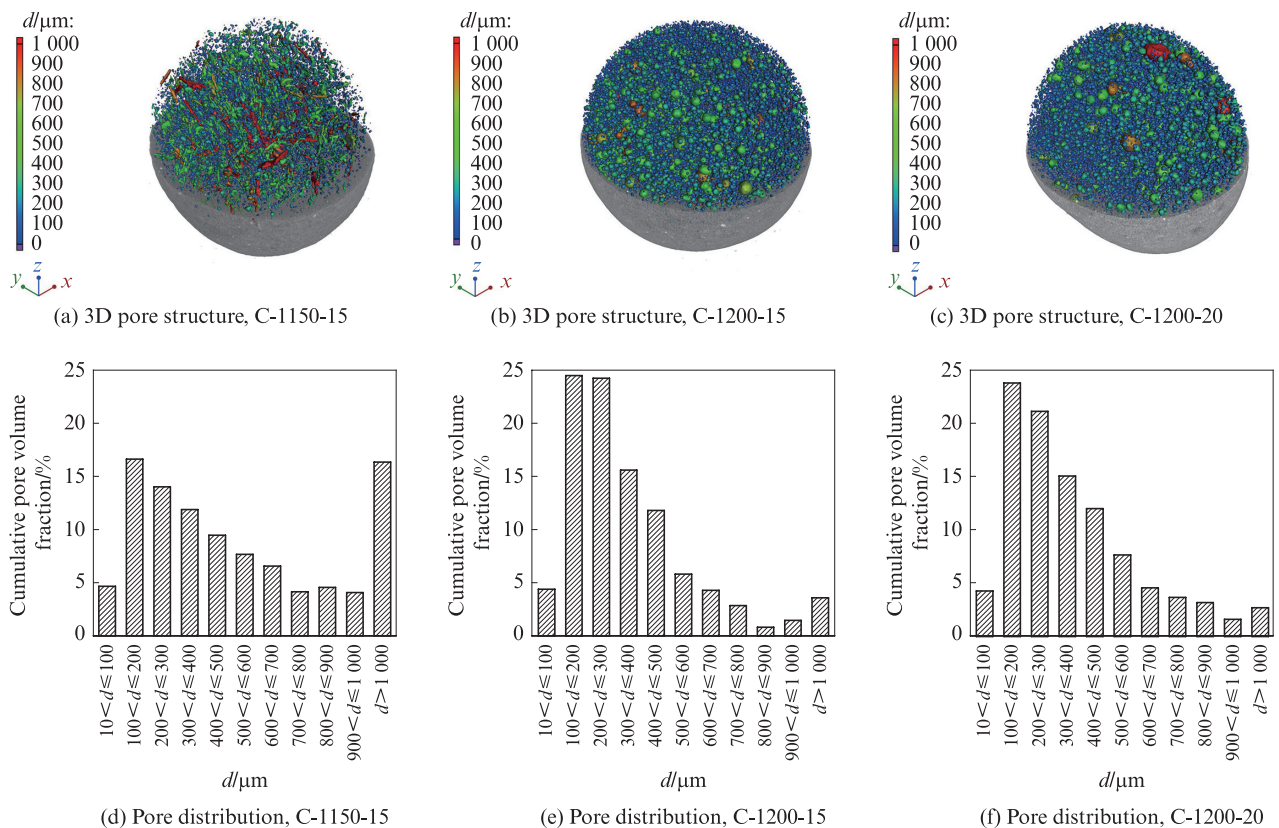


图1 烧结温度及时间对陶粒孔隙结构的影响

Fig. 1 Pore characteristics of ceramsite in different test groups

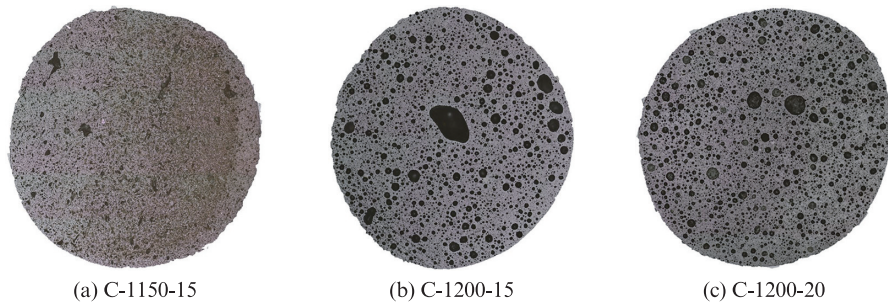


图2 烧结温度及时间对陶粒孔形态的影响

Fig. 2 Effect of sintering temperature and time on shape of ceramsite

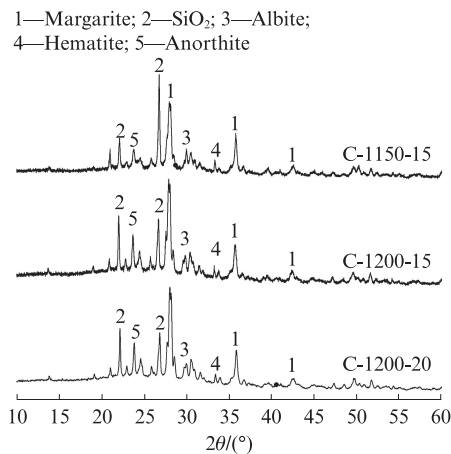


图3 不同试验组陶粒的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of ceramsite in different test groups

要来源。钙长石含量的增加本应使1 200 °C烧结的陶粒具有更高强度^[15],但实际强度测试结果与之不符。这种差异的原因是烧结温度升高导致孔隙率增加,表明孔隙结构对陶粒力学性能的影响大于骨架成分的影响。烧结温度升高导致孔隙率增加的主要原因在于:1)高温气体膨胀效应。当温度从1 150 °C升至1 200 °C时,原料中的碳酸盐及有机质分解加速,释放的CO₂、H₂O等气体在熔融液相中的溶解度降低,气泡生成量显著增加^[17]。2)晶相转变作用。珍珠石相在1 200 °C时大量生成,其针状晶体生长会挤压熔体,进一步促进孔隙连通。

(2)延长烧结时间对物相组成的影响相对较小。这表明在1 200 °C烧结15 min后,陶粒中的物相反应和转化已基本完成。

2.3 SEM-EDS分析

图4为陶粒的微观结构及EDS分析。由图4可见:

(1)与光学显微图像类似,烧结温度升高使得孔隙形态发生显著变化,1 150 °C烧结陶粒C-1150-15的孔隙形状不规则,1 200 °C烧结陶粒C-1200-15和C-1200-20的孔隙形状大多为球形。

(2)Fe元素骤降与Ca、Al元素激增使得高温下

的熔体黏度降低,导致孔隙形态从1 150 °C烧结陶粒的细长不规则孔向1 200 °C烧结陶粒的球形孔转变。同时,Ca的剧增源于碳酸盐分解和钙长石结晶,前者释放气体增大孔隙率,后者形成骨架支撑小孔分布;Al、Si的同步上升(XRD图谱显示珍珠石和钙长石的衍射峰增强)促使针状晶体生长,挤压熔体并连通孔隙,解释了1 200 °C烧结陶粒孔隙率升高的矛盾。延长烧结时间至20 min后,钙铝摩尔比进一步升高,驱动液相充分填充大孔并分裂为小孔,使孔径分布优化至100~300 μm为主,印证了SEM、CT与显微图像中孔隙均匀化和球化的现象。

2.4 陶粒孔隙结构形成趋势

陶粒孔隙结构的形成本质是:在高温烧结过程中,原料(SiO₂、Al₂O₃等氧化物)熔融形成液相,同时组分反应生成气体并被熔体包裹形成气泡,液相应保持适宜黏度,防止气体逸出。随着烧结时间的延长,气泡相互融合,最后在冷却阶段液相固化,气泡留下形成孔隙结构^[18]。孔结构的大小是由生成气体向外的膨胀力和熔融态氧化物向内的收缩力相互平衡所产生的结构^[9]。图5所示的海岛模型可有效描述高温熔融体系中气泡的形成过程^[19],最初用于金属材料研究。本研究引入该模型,旨在运用模型原理来定性分析观察到的孔隙结构演化规律。

利用海岛模型描述陶粒孔结构的形成需要2个流体动力学方程:一是其连续性方程,二是其运动方程。将2个方程联立进行求解就可得到陶粒孔结构形成方程,如式(3)所示。

$$\rho_l \left(R_0 \ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) = P_g - \frac{2\sigma}{R_0} - P_s - 4\eta \frac{\dot{R}}{R_0} \quad (3)$$

式中: ρ_l 为液相密度; R_0 为气泡的半径; \dot{R} 为气泡半径增长速率; \ddot{R} 为气泡成长加速度; P_g 为气泡内的压强; P_s 为模型外壳处压强; σ 为表面张力。

将不同试验条件下得到的液相密度、表面张力、液相黏度以及内外压强差参数代入式(3)中,得到气

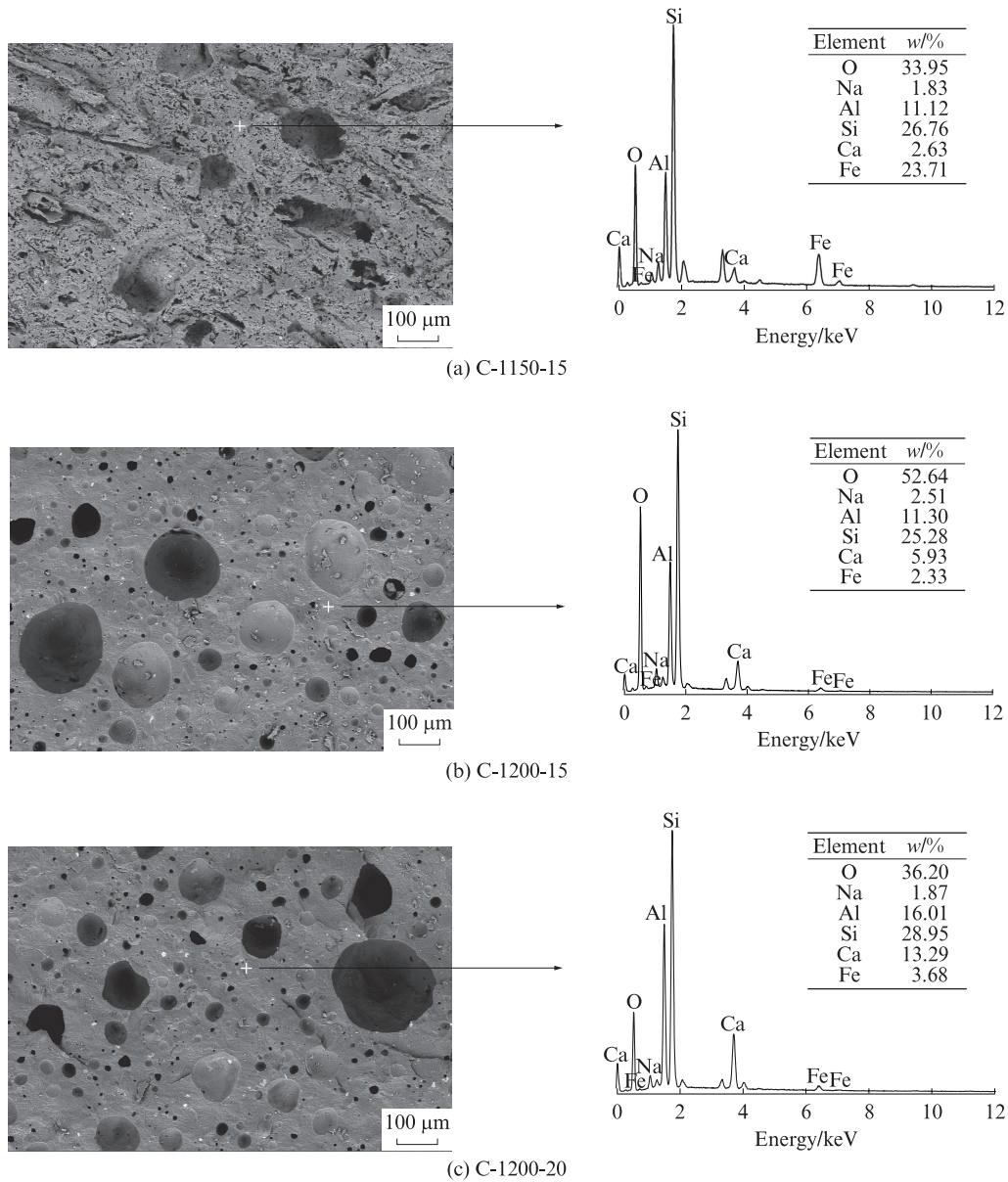


图4 陶粒微观结构及EDS分析
Fig. 4 Microstructure and EDS analysis of ceramsite

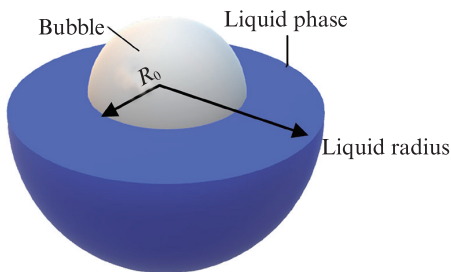


图5 海岛模型示意图
Fig. 5 Schematic diagram of island model

泡半径的微分方程,求解该微分方程可得到气泡特征半径关于时间的函数。

液相密度是陶粒原料各成分处于熔融状态下均匀混合时的密度。根据对 $Al_2O_3-SiO_2-CaO-MgO-FeO/Fe_2O_3$ 体系熔融态密度的研究,该类型混合氧化物的

密度(ρ)可以通过(4)进行计算^[20]。

$$\rho = \frac{\sum(x_i M_i)}{V_m} \quad (4)$$

式中: x_i 为某一种物质的摩尔比; M_i 为某一种物质的摩尔质量; V_m 为混合物的摩尔体积。

V_m 可以由不同组分的摩尔体积根据式(5)计算得到。

$$V_m = \sum(x_i V_i) + V^{EX} \quad (5)$$

式中: V_i 为某一种物质摩尔体积关于温度的函数; V^{EX} 为一个只与体系中物质种类及其摩尔比相关的量,与温度无关。

表面张力与液相密度类似,基于对 $Al_2O_3-SiO_2-CaO-MgO-FeO/Fe_2O_3$ 的研究发现,混合物的表面张力也由不同组分的摩尔比以及各物质的温度表面张

力曲线决定,如式(6)所示^[21]。

$$\sigma = \sum(x_i \sigma_i) + \sigma^{\text{EX}} \quad (6)$$

式中: σ_i 表示某一种物质的温度表面张力曲线; σ^{EX} 为一个由物质成分和其摩尔分数所组成的参数,不随温度变化。

采用Factsage软件中的Equilib模块计算 η ,并调用FToxide数据库。该数据库包含各种氧化物的黏度-温度曲线,同时也覆盖了陶粒原料所涉及的各种氧化物数据。

内外压强差是气泡形成过程中气泡外部流体的压强减去气泡内部产生的压强。本研究假设中外部流体不流动,外部流体流动产生的压强可视为一个常数。由于本研究中生成气泡时处于高温状态,该状态下的气体视为理想气体,其中 P_g 可用式(7)进行计算。

$$\rho_g = \frac{M_g}{RT} P_g \quad (7)$$

式中: ρ_g 为气相密度; M_g 为气相的摩尔质量。

由于外部压强视为常数,内部压强与温度成正比,内外压强差可以视为一个与温度相关的参数,如式(8)所示。

$$P_g - P_s = KT \quad (8)$$

式中: K 为与气体种类相关的常数。

值得注意的是,在建立微分方程模型时候只考虑了单一气泡的成长,而实际上陶粒内部有一系列不同半径和形状的孔结构。因此,计算获得的特征半径(r_i)仅代表陶粒的特征半径,用来代表陶粒整体孔结构发展趋势。特征半径的数值解通过MATLAB求解式(3)获得,结合上述参数的计算结果(如表3所示)得到特征半径关于时间的函数。

表3 不同温度下陶粒液相密度、表面张力和液相黏度的数值

Table 3 Value of liquid phase density, surface tension and viscosity under different test temperatures

Group	Temperature/°C	Liquid phase density/(g·cm ⁻³)	Surface tension/(mN·m ⁻¹)	Viscosity/(Pa·s)
1	1 150	2.63	415	23 518
2	1 200	2.62	411	6 702

图6为不同烧结温度下陶粒烧结过程中孔结构的特征半径与烧结时间的关系。由图6可见:烧结温度1 150、1 200 °C下,特征半径随着烧结时间变化的趋势相同;整体上,特征半径随着烧结时间的增长而变大,整体孔隙率的增长速率逐渐降低;对比同一时间不同温度下的特征半径值,可以发现随着温度的上升,特征半径变大,这与大多实际烧结陶粒的结果一致^[22]。

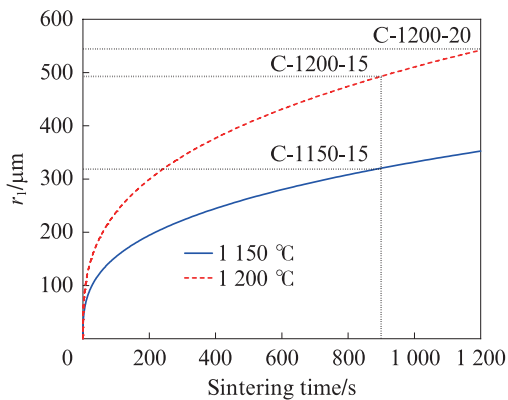


图6 不同烧结温度下陶粒烧结过程中孔结构的特征半径与烧结时间的关系

Fig. 6 Relationship between characteristic radius of pore structure and sintering time during sintering process of ceramsite at different sintering temperatures

2.5 模型验证

为了验证理论模型计算结果准确性,图7对比了

不同试验组的陶粒单粒抗压强度、孔隙率和特征半径。由图7可见:

(1)陶粒的孔隙率与特征半径的整体变化趋势一致,且陶粒抗压强度随着特征半径的增大而减小,这表明理论模型可以表征不同烧结温度和烧结时间条件下陶粒孔隙和力学强度的整体变化趋势。对比陶粒C-1150-15和C-1200-15,随着烧结温度的提高,孔隙率增长了21.2%,陶粒的抗压强度下降了3.3%;随着烧结过程的延长,孔隙率增长了38.5%,陶粒的抗压强度下降了5.7%。

(2)对于理论模型,陶粒C-1200-15的特征半径相比于陶粒C-1150-15提高了56.4%,而陶粒C-1200-20的特征半径相比于陶粒C-1200-15仅提高了7.2%。以上数据说明,特征半径模型能够反映温度影响的定性趋势,且抗压强度随着特征半径和孔隙率的升高而下降。

对于陶粒来说,孔隙主要由2部分构成:1)在陶粒烧结过程中,生成气体被熔化的液相包覆形成孔;2)陶粒在制备过程中,会因为原料和搅拌等因素引入初始孔洞,这些孔结构会在烧结过程中随着陶粒骨架的熔化,部分被液相细分为更小孔,这一部分的孔结构无法通过模型进行计算。此外,陶粒在冷却过程中,因为陶粒外部冷却速度大于内部冷却速度,为了维持更低的能量,气泡出现融合现象。这部分

也是利用理论模型计算陶粒孔隙变化所未考虑的。因此,后续研究应考虑以实际孔隙结构参数对理论模型进行修正,建立更精确的性能预测模型。

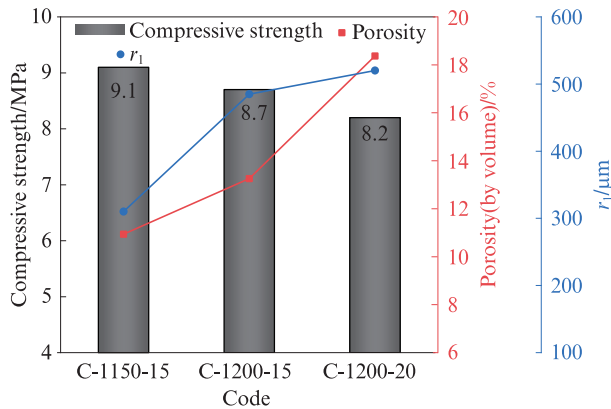


图7 不同试验组的陶粒单粒抗压强度、孔隙率和特征半径
Fig. 7 Compressive strength, porosity and characteristic radius of single ceramsite in different test groups

2.6 讨论

本研究主要聚焦于1 150、1 200 °C这两个典型烧结温度点,虽然能够反映孔隙特征随温度升高的变化趋势,但若要建立更普适的孔隙演化模型,仍需在更宽温度范围内开展系统研究。后续工作将考虑增加1 050、1 100、1 250 °C等温度点,以获取更全面的孔隙率-温度关系曲线。不同原料配比陶粒在相同烧结制度下可能呈现差异化的孔隙特征。本研究所用污泥基陶粒的孔隙演化规律主要适用于类似成分体系(如高钙、高铁含量的固废基陶粒),对于其他类型陶粒(如黏土基、粉煤灰基等),其孔隙形成机制可能受原料矿物组成影响而存在差异。在实际应用中应根据具体原料特性调整烧结工艺参数。

本研究中的海岛模型主要作为定性解释工具,用于揭示污泥基陶粒烧结过程中孔隙演化的一般规律和主要趋势,而非追求高精度的定量预测。我们充分认识到,将初始孔洞的统计分布特征纳入模型,以及建立能够准确描述冷却阶段气泡融合行为的修正机制,是未来提升模型预测精度、更真实反映复杂体系烧结行为的关键研究方向。这些改进将依赖于更深入的机理研究、更精细的原位表征技术以及更全面的实验数据支撑。

3 结论

(1)烧结温度从1 150 °C升至1 200 °C,显著降低了熔体黏度,导致陶粒孔隙形态由不规则细长孔向更规则的球形孔转变,且整体孔隙率显著增加。在1 200 °C下,延长烧结时间至20 min,小孔径($100 \mu\text{m} <$

$d < 500 \mu\text{m}$)孔隙体积占比进一步优化,但整体孔隙率继续增加,孔径分布范围增大。

(2)尽管1 200 °C烧结促进了珍珠石和钙长石等骨架矿物的生成,理论上应有利于陶粒强度的提升,但实测抗压强度随着温度的升高和时间的延长显著下降。孔隙率的大幅增加是导致陶粒抗压强度下降的主导因素,其负面影响超过了骨架矿物生成带来的强度增益。

(3)基于熔体黏度、表面张力等参数建立的海岛模型,可以预测特征半径随着烧结温度的升高和时间的延长而增大的趋势,验证了模型在描述污泥基陶粒烧结过程中气体膨胀与熔体收缩平衡导致孔隙演化方面的适用性。理论模型未考虑原料混合和成型过程引入的初始孔洞在烧结过程中的演变,以及冷却阶段因内外温差导致的气泡融合现象。未来研究需结合初始孔洞统计特征和冷却行为修正模型,以更精确地预测复杂实际体系中的孔隙演化。

参考文献:

- [1] 熊鑫, 吴智, 姜鹏程, 等. 轻质高强黄土陶粒的制备及性能研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(7):637-644.
XIONG Xin, WU Zhi, JIANG Pengcheng, et al. Preparation and properties of lightweight and high-strength loess ceramsite[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(7):637-644. (in Chinese)
- [2] 马军涛, 谭云飞, 付豪, 等. 污泥气化渣骨料回填混凝土的制备与性能[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(6):520-527.
MA Juntao, TAN Yunfei, FU Hao, et al. Preparation and performance of sludge gasification slag backfill concrete [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6):520-527. (in Chinese)
- [3] 刘红玉, 宋翔宇, 何芳, 等. 污泥基多孔轻质陶粒对氨氮废水吸附性能研究[J]. 能源与环境, 2025(1):108-111, 115.
LIU Hongyu, SONG Xiangyu, HE Fang, et al. Adsorption of ammonia nitrogen from wastewater by sludge-base porous lightweight ceramsite [J]. Energy and Environment, 2025(1): 108-111, 115. (in Chinese)
- [4] PEI J N, PAN X L, WANG Y B, et al. Effects of alkali and alkaline-earth oxides on preparation of red mud based ultra-lightweight ceramsite[J]. Ceramics International, 2023, 49(11):18379-18387.
- [5] XIAO T T, FAN X Y, WANG H R, et al. Removal of phosphorus from water bodies using high-performance ceramsite prepared from solid wastes [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 342:126962.
- [6] 丰铭, 吉国荣, 高云峰, 等. 赤泥质低密高强陶粒支撑剂的制备及性能研究[J]. 中国陶瓷, 2025, 61(4):31-37.
FENG Ming, JI Guorong, GAO Yunfeng, et al. Preparation and properties of low density and high strength ceramic proppants base

- on red mud[J]. *China Ceramics*, 2025, 61(4):31-37. (in Chinese)
- [7] 龙雨欣, 鲍银珠, 黄小凤, 等. 锡尾矿基高强陶粒制备及其性能[J]. *建筑材料学报*, 2025, 28(1):50-57.
LONG Yuxin, BAO Yinzhu, HUANG Xiaofeng, et al. Preparation and properties of tin tailings based high strength ceramsite[J]. *Journal of Building Materials*, 2025, 28(1):50-57. (in Chinese)
- [8] 杨正宏, 高双双, 于龙, 等. 养护温度对陶粒内水分向水泥浆体中迁移行为的影响[J]. *建筑材料学报*, 2020, 23(1):138-144.
YANG Zhengong, GAO Shuangshuang, YU Long, et al. Effect of curing temperature on migration of water from ceramsite to cement paste[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(1):138-144. (in Chinese)
- [9] 齐元峰. 超轻多孔污泥固废陶粒研制及膨胀机理探讨[D]. 济南:山东大学, 2012.
QI Yuanfeng. Development of ultra-lightweight porous sludge-based solid waste ceramsite and investigation of its expansion mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [10] KHANNA R, KONYUKHOV Y V, IKRAM-UL-HAQ M, et al. An innovative route for valorising iron and aluminium oxide rich industrial wastes: Recovery of multiple metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 295:113035.
- [11] 宋晓聪, 杜帅, 邓陈宁, 等. 污泥陶粒与粉煤灰陶粒碳足迹对比研究[J]. *中国环境科学*, 2025, 45(1):583-592.
SONG Xiaocong, DU Shuai, DENG Chenning, et al. Comparative study on carbon footprint of sludge ceramsite and fly ash ceramsite[J]. *China Environmental Science*, 2025, 45(1):583-592. (in Chinese)
- [12] MENG J P, CUI Z X, CHANDRASEKAR S, et al. Preparation of porous ceramsite from municipal sludge and its structure characteristics[J]. *Advances in Applied Ceramics*, 2023, 122(5-8):322-335.
- [13] 史建新, 孙星海, 周林邦, 等. 赤泥基全固废矿井充填材料的制备与性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(10):946-954.
SHI Jianxin, SUN Xinghai, ZHOU Lingbang, et al. Fabrication and performance of mine filling materials derived from red mud based full solid wastes[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(10):946-954. (in Chinese)
- [14] 崔彦发, 王世雄, 王珣, 等. 城市污泥建材化利用研究进展[J]. *新型建筑材料*, 2025, 52(2):114-120.
CUI Yanfa, WANG Shixiong, WANG Xun, et al. Research progress on the utilization of municipal sewage sludge in building materials[J]. *New Building Materials*, 2025, 52(2):114-120. (in Chinese)
- [15] WANG H X, XU J L, LIU Y Q, et al. Preparation of ceramsite from municipal sludge and its application in water treatment: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 287:112374.
- [16] ZHAO S K, WU J J, XU J Q, et al. Structure and properties of high-strength lightweight ceramsite prepared by synergistic sintering of iron tailings, inorganic sludge, and recycled micro-powder[J]. *Materials Today Communications*, 2025, 48:113598.
- [17] LIU Y F, HUANG J H, ZHANG X Y. Progress of lightweight and robust ceramsite from solid waste: Preparation, properties and applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2025, 482:141601.
- [18] CHENG Y, LI J R, QIN C, et al. Template-free route to fabricate extra-lightweight ceramsite with a single large pore structure[J]. *Ceramics International*, 2023, 49(22):36446-36457.
- [19] 左孝青, 潘晓亮, 高芝. 泡沫铝气泡长大动力学[J]. *中国有色金属学报*, 2006, 16(12):2040-2046.
ZUO Xiaoping, PAN Xiaoliang, GAO Zhi. Bubble growth dynamics of aluminum foam[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2006, 16(12):2040-2046. (in Chinese)
- [20] XIN J J, GAN L, WANG N, et al. Accurate density calculation for molten slags in $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ systems[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50(6):2828-2842.
- [21] XIN J J, WANG N, CHEN M. Surface tension calculation of molten slag in $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO-FeO-Fe}_2\text{O}_3$ systems based on a statistical modelling approach[J]. *ISIJ International*, 2019, 59(5):759-767.
- [22] 姚国明, 王鑫, 李响, 等. 基于微波烧结工艺的赤泥陶粒性能及应用研究[J]. *新型建筑材料*, 2025, 52(3):70-74.
YAO Guoming, WANG Xin, LI Xiang, et al. Research on the properties and application of red mud ceramsite based on microwave sintering technology[J]. *New Building Materials*, 2025, 52(3):70-74. (in Chinese)