

钢渣-页岩渣发泡陶瓷材料的制备及其性能研究

姜鸿¹, 张学武², 徐泽波³

(1. 辽东学院城市建设学院 辽宁 丹东 118000; 2. 东华大学材料科学与工程学院纤维材料改性国家重点实验室 上海 201620; 3. 东华大学功能材料研究所 上海 201620)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。利用钢渣和页岩渣为主要原料, 添加碳化硅、硼砂作为发泡剂和助熔剂, 采用高温发泡法成功制备出发泡陶瓷材料。本文重点研究了钢渣含量、SiC添加量、硼砂添加量及发泡温度对发泡陶瓷的气孔结构和性能的影响。实验结果表明, 当钢渣含量为20%, 页岩渣为80%, 额外添加0.5%的SiC, 4%的硼砂, 在发泡温度1090℃, 保温时间40min的条件下得到的发泡陶瓷材料性能较优。该条件下发泡陶瓷的体积密度为0.468 g/cm³, 抗压强度为3.265 MPa, 导热系数为0.121 W/(m·K), 其性能符合建筑保温材料的要求, 主晶相为辉石相、石英相和透辉石相。

关键词: 钢渣; 页岩渣; 发泡陶瓷; 气孔结构; 综合性能

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.03.016

中图分类号: TD983;TQ174.7 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2023)03-0093-07

发泡陶瓷是经高温焙烧发泡制备而成的一种多孔材料^[1], 它具有质轻、强度高、保温、防火、隔音等特点^[2-3], 是一种性能优异的建筑外墙保温材料。除此之外, 发泡陶瓷还具有耐腐蚀、耐高温、抗热震性等优点, 被广泛应用于冶炼合金、过滤环保、环境生物及化学、催化剂载体等多个领域^[4-5]。

钢渣是钢铁工业炼钢时排出的一种工业固体废弃物, 其化学成分较复杂, 主要是由CaO、MgO、Al₂O₃、SiO₂、Fe₂O₃等氧化物组成^[6]。目前我国钢渣综合利用率较低, 大部分钢渣通过堆积和填埋方式进行处理, 这不仅占用了大量的土地面积, 同时还会损坏当地的生态环境。页岩渣是矿山开采或工程施工过程中产生的一种剥离页岩废弃物^[7], 其矿物组成复杂, 掺杂着长石、石英的碎屑以及其他化学物质。若能使用钢渣、页岩渣等大宗工业固体废弃物作为生产发泡陶瓷的主要原料, 不但能解决发泡陶瓷成本高的问题, 同时还能提高固体废弃物的综合利用率。

本研究以钢渣和页岩渣为主要原料, 额外添

加碳化硅(SiC)作为发泡剂, 硼砂作为助熔剂, 采用高温发泡法成功制备出了发泡陶瓷材料。重点研究了钢渣含量、SiC添加量、硼砂添加量及发泡温度对发泡陶瓷的气孔结构和性能的影响, 为综合利用固体废弃物制备性能优异的发泡陶瓷保温材料提供一种可行的方法。

1 实验

1.1 实验原料

实验主要原料为钢渣(攀枝花市)和页岩渣(赤峰市), 采用制样机将两种块状废渣粉碎磨细至-0.125mm。两者的化学成分见表1, 钢渣的主要化学成分依次为CaO、Fe₂O₃、SiO₂、Al₂O₃, 其中CaO的含量高达42.18%。页岩渣的主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃, 用于补充钢渣中硅, 铝氧化物的含量。钢渣和页岩渣的XRD结果见图1, 钢渣的主要晶相为原硅酸钙、钙铁石、石英和赤铁矿。页岩渣的主要晶相为由钙长石、石英和赤铁矿组成。

表1 钢渣和页岩渣的化学组成/%

Table 1 Chemical composition of steel slag and shale slag

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	IL
钢渣	15.02	6.14	22.58	0.51	42.18	8.94	0.14	0.12	4.37
页岩渣	63.17	18.21	6.14	0.76	5.09	1.95	2.84	0.21	1.63

收稿日期: 2021-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(51672147)

作者简介: 姜鸿(1975-), 女, 硕士研究生, 讲师, 研究方向为建筑材料和工程造价。

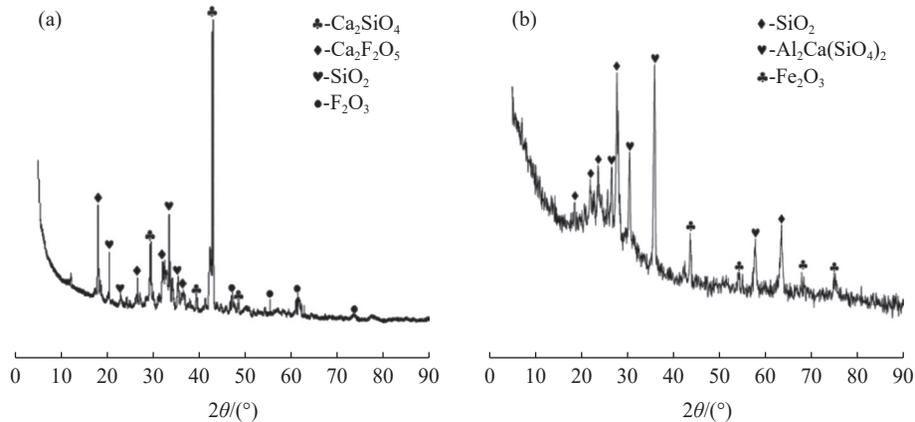


图 1 钢渣 (a) 和页岩渣 (b) 的 XRD

Fig.1 XRD patterns of steel slag (a) and shale slag (b)

1.2 实验方法

依据发泡陶瓷化学成分范围，并结合钢渣、页岩渣化学成分设计配方，钢渣和页岩渣作为主要原料，其利用量为 100%。此外，将碳化硅 (SiC) 和硼砂分别用作发泡剂和助熔剂额外添加到主原料中。本研究的实验配方见表 2，按照实验配方进行配料，使用球磨机将混合料湿磨混匀 2 h (料:球:水=1:1.6:0.8)，接着将混合料浆放入 120 °C 烘箱中干燥 12 h。用粉碎机将干燥后的料浆磨碎至-0.125 mm，然后将粉体平铺到模具中，采用压力机进行干压成型，成型压力为 10 MPa，最后将模具置入马弗炉中进行焙烧发泡。本实验的热处理工艺制度：由室温以 8 °C/min 的速率升到 1000 °C，再以 4 °C/min 的速率升到发泡温度，保温 30~60 min，保温结束后随炉自然冷却至室温。

表 2 实验配方/%

Table 2 Experimental formula				
配方编号	钢渣	页岩渣	碳化硅	硼砂
A1	10	90	0.5	4
A2	15	85	0.5	4
A3	20	80	0.5	4
A4	25	75	0.5	4
A5	30	70	0.5	4
B1	20	80	0.1	4
B2	20	80	0.3	4
B3	20	80	0.5	4
B4	20	80	0.7	4
B5	20	80	0.9	4
C1	20	80	0.5	0
C2	20	80	0.5	2
C3	20	80	0.5	4
C4	20	80	0.5	6
C5	20	80	0.5	8

1.3 性能测试与分析

实验采用数码相机观察发泡陶瓷试样截面的气孔结构。样品的结晶相由 MPDDY2094 型多晶

X 衍射仪进行测试 (2θ 角为 5~90°, 扫描速度为 3°/min)。采用阿基米德排水法测量试样的体积密度。根据保护量热法的原理，使用 TC2000 热导仪测量发泡陶瓷试样的导热系数。使用万能材料试验机 (AG-XPLUS250KN) 检测试样的抗压强度，压头的下降速率为 0.5 mm/min，按照公式 (1) 计算样品的抗压强度。

$$\sigma = \frac{P}{S} \quad (1)$$

其中： σ —试样的抗压强度，MPa；

P —试样在破碎前的最大承受压力，N；

S —试样的受压面积，mm²；

2 结果与讨论

2.1 钢渣对发泡陶瓷的影响

通过改变钢渣含量来探究其对发泡陶瓷气孔结构及性能的影响。钢渣含量分别为 10%、15%、20%、25%、30%，并额外加入 0.5% 的 SiC，4% 的硼砂，试样的发泡温度为 1090 °C，保温时间为 40 min，得到五组发泡陶瓷配方，依次编号为 A1、A2、A3、A4、A5。

图 2 展示了钢渣含量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响，由图 2 可知，当钢渣含量由 10% 增加到 30% 时，试样的体积密度由 0.824 g/cm³ 减小到 0.356 g/cm³，抗压强度由 5.127 MPa 减小到 1.026 MPa，导热系数由 0.321 W/(m·K) 减小到 0.102 W/(m·K)。当钢渣含量为 20% 时，此时发泡陶瓷的综合性能较优，其体积密度、抗压强度和导热系数分别为 0.468 g/cm³、3.265 MPa 和 0.121 W/(m·K)。图 3 展示了不同钢渣含量下发泡陶瓷试样的气孔结构，从图 3 中可知，钢渣含量对发泡陶瓷的气孔尺寸及气孔壁的厚度有较大

的影响，随着钢渣含量的增加，发泡陶瓷的气孔尺寸逐渐增大，气孔壁的厚度逐渐减小，其平均

孔径由 0.8 mm 增大至 4.8 mm，平均孔径的增大直接导致试样体积密度降低。

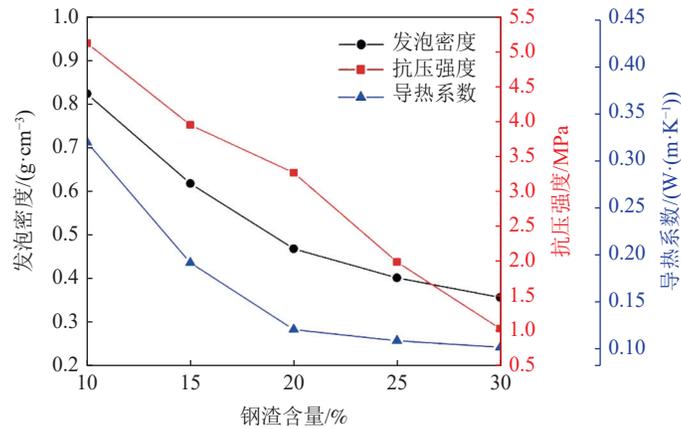


图2 钢渣含量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响

Fig.2 Effect of steel slag content on the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics

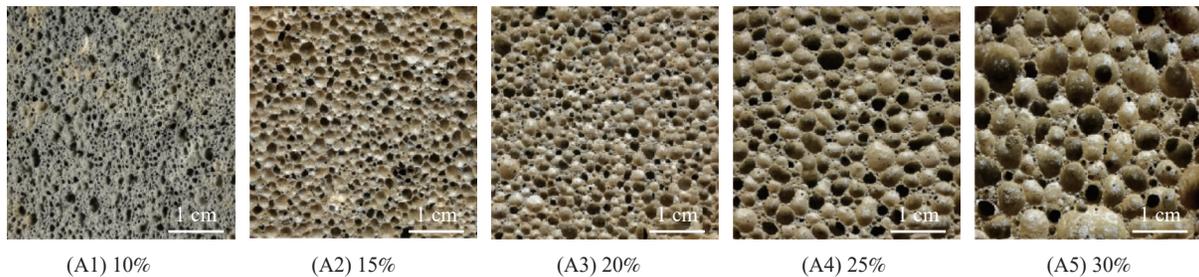


图3 不同钢渣含量下发泡陶瓷的气孔结构

Fig.3 Pore structure of foamed ceramics with different steel slag content

产生上述实验结果的原因如下：钢渣含量较低时，混合料中 SiO₂、Al₂O₃ 等化合物含量较高，其在发泡温度下产生的硅酸盐熔体中包含大量的 [SiO₄] 和 [AlO₄] 四面体，这些四面体通过桥氧连接在一起，形成了较稳定的网络结构，进而使得熔体粘度增大，此时由 CO₂ 气体产生的气孔不能冲破熔体的表面张力而长大，因此试样 A1 的气孔孔径较小，气孔壁较厚。当试样 A1 受到外界压力作用时，每单位面积的实际承受面积较大，所以只有在较高的压力下才能将其破坏，因此试样 A1 具有最大的抗压强度。同时由于试样 A1 气孔壁较厚，使得热传导介质增加，因此其具有较高的导热系数^[8]。随着钢渣含量的增加，混合料 SiO₂、Al₂O₃ 的含量逐渐降低，CaO、MgO 等化合物的含量逐渐增加，在高温下 Ca²⁺和 Mg²⁺会夺取网络结构中的氧原子，导致桥氧键断裂，使得该结构的稳定性下降，进而降低熔体粘度。当钢渣含量为 20% 时，此时气孔所产生的压力与高温熔体的粘度相匹配，所以试样 A3 拥有较好的孔结构，平均孔径约为 1.8 mm，使其具有较低的体积密度和导热系数的同时，还具有较高的抗压强

度。随着钢渣含量继续增加，熔体的粘度越来越低。当钢渣含量为 30% 时，硅酸盐熔体的粘度太低，导致试样 A5 的气孔尺寸过大，气孔壁变薄，虽其具有最低的体积密度和导热系数，但抗压强度过低限制了其应用于建筑保温材料。综上所述，结合发泡陶瓷的气孔结构和性能可知，最佳的钢渣含量为 20%。

2.2 SiC 添加量对发泡陶瓷的影响

在高温下，SiC 能够与 O₂ 发生反应产生 CO₂ 气体，进而使得试样中形成气孔^[9]。本节通过改变 SiC 添加量来探究其对发泡陶瓷气孔结构及性能的影响。钢渣含量为 20%，页岩渣含量为 80%，硼砂的添加量为 4%，SiC 添加量分别为 0.1%、0.3%、0.5%、0.7%、0.9%，试样的发泡温度为 1090 °C，保温时间为 40 min，得到五组发泡陶瓷配方，依次编号为 B1、B2、B3、B4、B5。

图 4 展示了 SiC 添加量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响，由图 4 可知，当 SiC 添加量由 0.1% 增加到 0.9% 时，试样的体积密度由 0.816 g/cm³ 减小到 0.304 g/cm³，抗压强度由 5.261 MPa 减小到 1.004 MPa，导热系数先由

0.294 W/(m·K) 减小到 0.103 W/(m·K)，然后再增大到 0.115 W/(m·K)。当 SiC 添加量为 0.5% 时，发泡陶瓷的综合性能较优。图 5 展示了不同 SiC 添加量发泡陶瓷试样的气孔结构，从图 5 中可知，随着 SiC 添加量的增加，发泡陶瓷的气孔尺寸逐渐增大，尺寸分布变得不均匀，气孔壁的厚度逐渐减小，其平均孔径由 0.7 mm 增大至 5.6 mm，平均孔径的增大和气孔壁厚度的减小直接导致试样体积密度和抗压强度降低。

产生上述实验结果的原因如下：SiC 的添加量会直接影响发泡陶瓷的气孔结构，当 SiC 添加量少时，试样中生成的 CO₂ 量较少，此时气孔中产生

的压力不能克服熔体的粘度而长大，所以样品 B1 的气孔尺寸较小，气孔壁较厚，因此其具有较高的体积密度、抗压强度和导热系数。随着 SiC 添加量的增加，试样中 CO₂ 的生成量不断增加，此时气孔中产生的压力增大，气孔逐渐长大。当 SiC 添加量为 0.5% 时，试样 B5 与 A3 相似，具有优异的气孔结构和性能，其体积密度、抗压强度和导热系数分别为 0.468 g/cm³、3.265 MPa 和 0.121 W/(m·K)。当 SiC 添加量达到 0.9% 时，此时试样中 CO₂ 的生成量过多，气孔之间容易相互融合形成大气孔或连通孔，使得热量在传导过程中出现了热对流现象，进而导致试样 B5 的导热系数大于 B4。

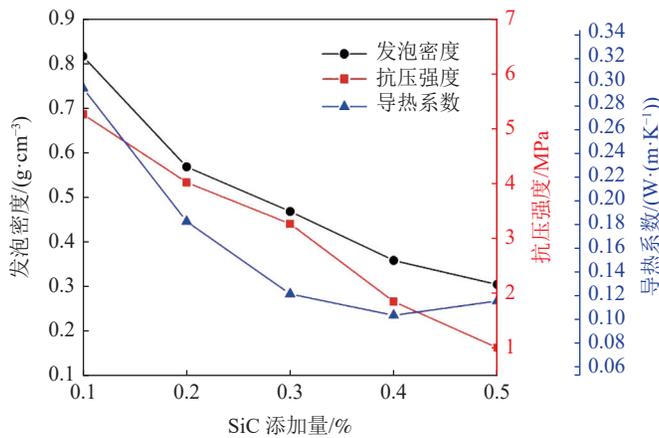


图 4 SiC 添加量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响

Fig.4 Effect of SiC addition on the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics

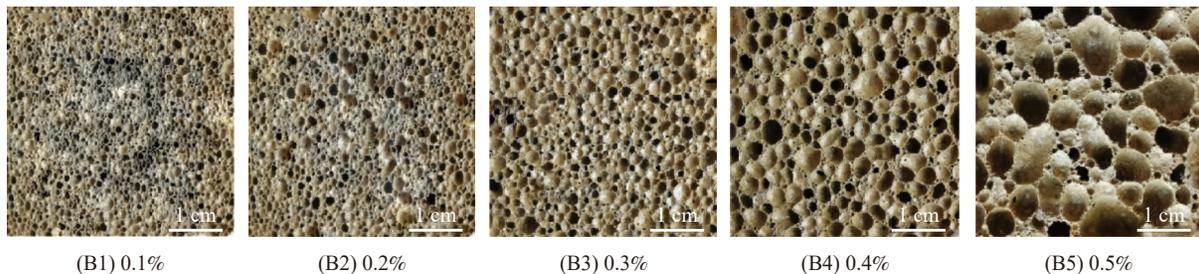


图 5 不同 SiC 添加量发泡陶瓷的气孔结构

Fig.5 Pore structure of foamed ceramics with different SiC addition

2.3 硼砂添加量对发泡陶瓷的影响

硼砂是制备发泡陶瓷常用的助熔剂，它不仅能降低陶瓷基料的熔点，还能降低高温熔体的粘度。本节通过改变硼砂添加量来探究其对发泡陶瓷气孔结构及性能的影响。钢渣含量为 20%，页岩渣含量为 80%，SiC 添加量为 0.5%，硼砂添加量分别为 0、2%、4%、6%、8%，试样的发泡温度为 1090 °C，保温时间为 40 min，得到五组发泡陶瓷配方，依次编号为 C1、C2、C3、C4、C5。

图 6 展示了硼砂添加量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响，由图 6 可知，

当硼砂添加量由 0 增加到 8% 时，试样的体积密度、抗压强度和导热系数均呈现出先减小后增大的变化。图 7 展示了不同硼砂添加量发泡陶瓷试样的气孔结构，从图 7 中可知，当硼砂添加量为 0 时，试样 C1 发泡失败，其外观表现为一种未完全烧结体。原因是硼砂添加量过低，混合料的熔点过高，其在发泡温度下不能形成充足的硅酸盐熔体，此时发泡剂产生的气体将会通过试样中的固体颗粒间的缝隙逸出，最终导致试样未能成功发泡膨胀，因此 C1 具有较高的体积密度、抗压强度和导热系数。随着硼砂添加量的增加，发泡陶

瓷的气孔尺寸先增大后减小。当硼砂添加量为4%时，其助熔作用充分，适宜粘度的熔体能将CO₂气体全部包围形成大量结构性较好的气孔，因此试样C3综合性能优异。当硼砂添加量为6%时，混合料的熔点较低，熔体粘度小，较小的熔体粘度使得试样C4中气孔长大所需要克服的阻力减小，导致其气孔尺寸最大，气孔壁数量最少

且薄，因此试样C4具有最低的体积密度、抗压强度和导热系数，其抗压强度值仅为1.589 MPa，不符合建筑保温材料的强度要求。当硼砂添加量为8%时，过多的硼砂使得熔体粘度过小，熔体流动性增强，试样内部分大气孔会被熔体所填充^[10]，因此相比于C4，试样C5的气孔尺寸增大，气孔壁数量增多，所以其性能值增高。

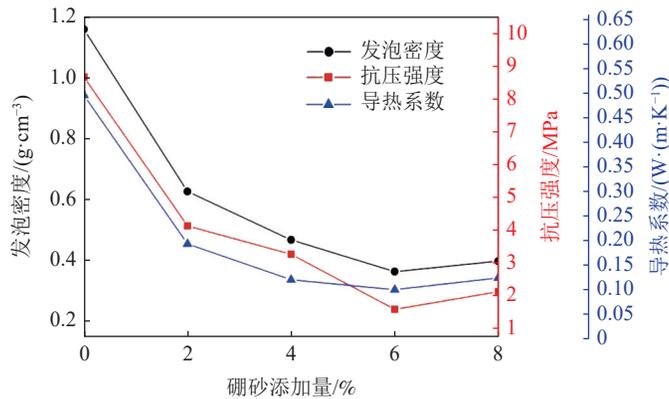


图6 硼砂添加量对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响

Fig.6 Effect of borax additions on the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics

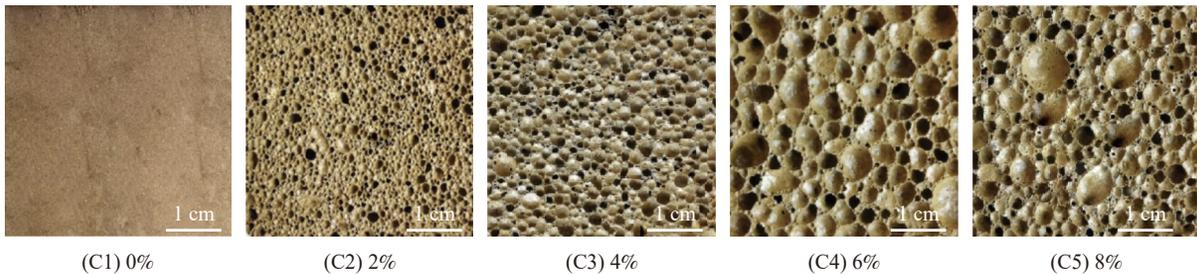


图7 不同硼砂添加量下发泡陶瓷的气孔结构

Fig.7 Pore structure of foamed ceramics with different borax additions

2.4 发泡温度对发泡陶瓷的影响

发泡温度主要影响高温液相熔体的产生量和粘度，熔体粘度不同导致气孔长大所需克服的阻力不同。本节通过改变发泡温度来探究其对发泡陶瓷气孔结构及性能的影响。钢渣含量为20%，页岩渣含量为80%，SiC添加量为0.5%，硼砂的添加量为4%，发泡温度分别设定为1080℃、1090℃、1100℃、1110℃，保温时间为40 min，得到四组发泡陶瓷配方，依次编号为T1、T2、T3、T4。

图8展示了发泡温度对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响，由图8可知，当发泡温度由1080℃增加到1110℃时，试样的体积密度由0.651 g/cm³减小到0.293 g/cm³，抗压强度由5.341 MPa减小到0.987 MPa，导热系数先由0.245 W/(m·K)减小到0.113 W/(m·K)，然后再增大到0.128 W/(m·K)。图9展示了不同发泡温度下

发泡陶瓷的气孔结构，从图9中可知，当发泡温度为1080℃时，试样T1发泡效果较差，气孔尺寸较小，气孔壁较厚。原因是发泡温度较低，高温熔体产生量较少，CO₂气体不能完全被包裹住，部分气体会通过缝隙逸出，导致试样T1具有较差的气孔结构和性能。随着发泡温度不断升高，熔体的产生量增加，粘度降低，此时气孔长大所要克服的阻力降低，因此气孔尺寸不断地增加。当发泡温度为1090℃时，气孔压力和熔体粘度相匹配，因此试样T2中形成了许多尺寸适中且分布均匀的气孔，此条件下发泡陶瓷的综合性能较优。当发泡温度为1100℃时，试样T3的气孔尺寸较大，较低的抗压强度阻碍了其应用。当发泡温度升高至1110℃时，此时熔体粘度过小，小气孔不断地长大或合并，所以试样T4中出现了异常大孔^[11]，因此使其导热系数增加。

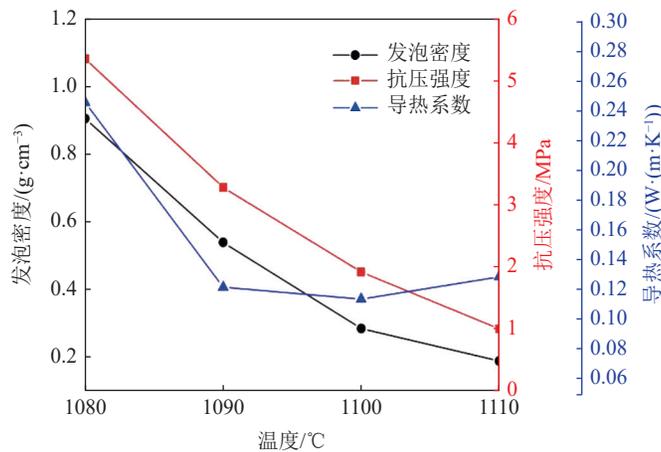


图 8 发泡温度对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响

Fig.8 Effect of foaming temperature on the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics

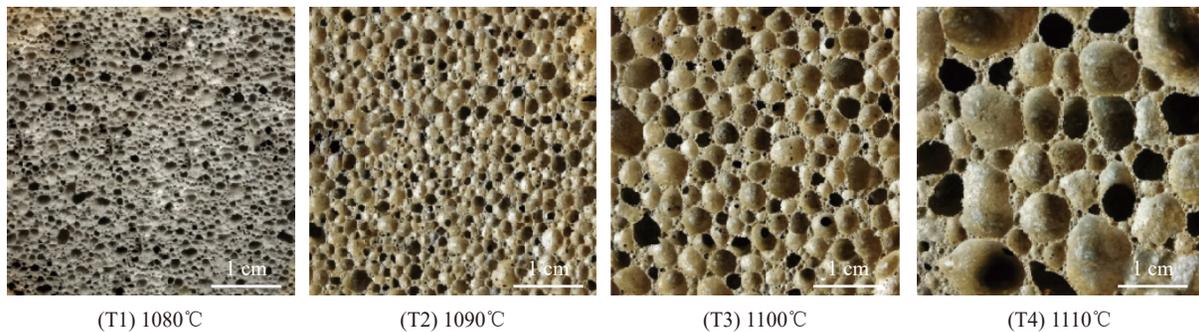


图 9 不同发泡温度下发泡陶瓷的气孔结构

Fig.9 Pore structure of foamed ceramics with different foaming temperature

2.5 保温时间对发泡陶瓷的影响

保温阶段是气孔长大的过程，保温时间较短时，气孔长大时间短，样品中的气孔尺寸较小；保温时间过长时，样品中的气孔容易相互融合形成异常大孔。本节通过改变保温时间来探究其对发泡陶瓷气孔结构及性能的影响。钢渣含量为 20%，页岩渣含量为 80%，SiC 添加量为 0.5%，硼砂的添加量为 4%，发泡温度为 1090℃，保温时间分别设定为 30 min、40 min、50 min、60 min 得到四组发泡陶瓷配方，依次编号为 D1、D2、D3、D4。

图 10 展示了发泡温度对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响，由图 10 可知，当保温时间由 30 min 增加到 60 min 时，试样的体积密度由 0.604 g/cm³ 减小到 0.306 g/cm³，抗压强度由 4.032 MPa 减小到 1.381 MPa，导热系数由 0.183 W/(m·K) 减小到 0.116 W/(m·K)。图 11 展示了不同保温时间下发泡陶瓷的气孔结构，从图 11 可知，随着保温时间的增加，发泡陶瓷中的气孔尺寸逐渐增大。当保温时间为 30 min 时，试样 D1 的气孔尺寸较小，气孔壁较多。原因是保温时间较短，发泡过程不充分，熔体内大部分气孔没

有充足的时间长大，所以试样 D1 的体积密度、抗压强度和导热系数较高。当保温时间为 40 min 时，试样 D2 中的气孔有较充足的时间长大，试样中产生的熔体量较多，熔体流动性较好且粘度较均匀，因此试样 D2 的气孔结构较好，其综合性能较优。随着保温时间继续增加至 60 min 时，试样 D4 的气孔尺寸过大且出现了部分连通孔，这是因为保温时间过长，熔体内的小气孔容易相互融合或吞并形成大气孔，气孔壁变少，其抗压强度仅有 1.381 MPa，不符合建筑保温材料的强度要求。

2.6 较优条件下发泡陶瓷的 XRD 分析

由单因素实验结果可知，当钢渣含量为 20%，页岩渣为 80%，额外添加 0.5% 的 SiC，4% 的硼砂，在发泡温度 1090℃，保温时间 40 min 的条件下得到的发泡陶瓷材料性能较优。该条件下钢渣-页岩渣发泡陶瓷的体积密度、抗压强度和导热系数分别为 0.468 g/cm³、3.265 MPa、0.121 W/(m·K)。图 12 展示了较优条件下钢渣-页岩渣发泡陶瓷的 XRD 谱图，由图 12 可知，样品的结晶相主要为辉石、石英和透辉石，多种晶体的析出有利于提升发泡陶瓷的抗压强度。

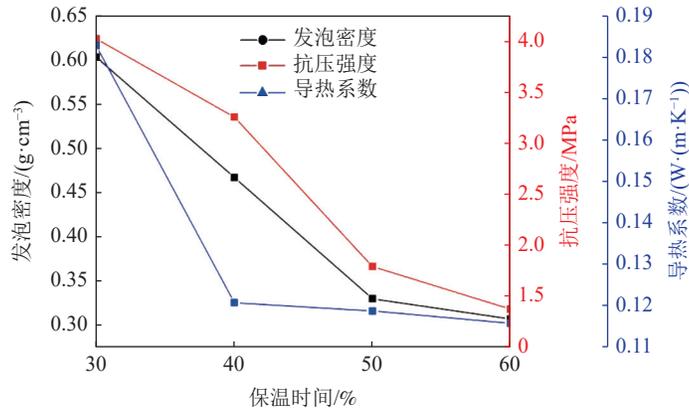


图 10 保温时间对发泡陶瓷体积密度、抗压强度和导热系数的影响

Fig.10 Effect of holding time on the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of foamed ceramics

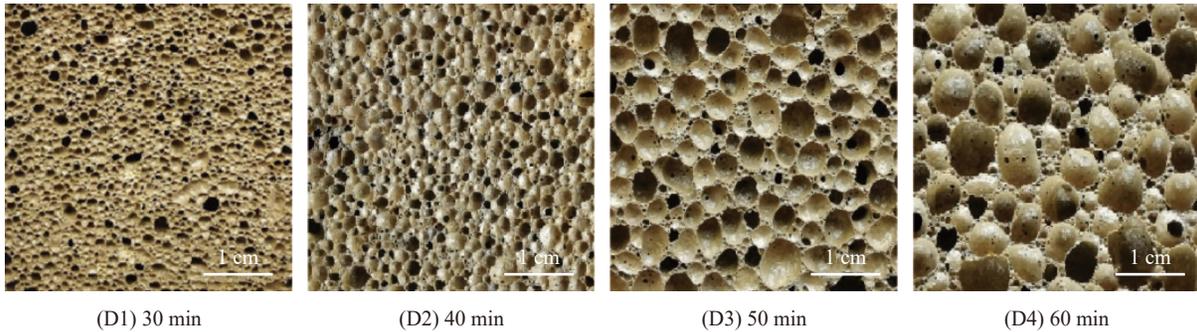


图 11 不同保温时间下发泡陶瓷的气孔结构

Fig.11 Pore structure of foamed ceramics with different holding time

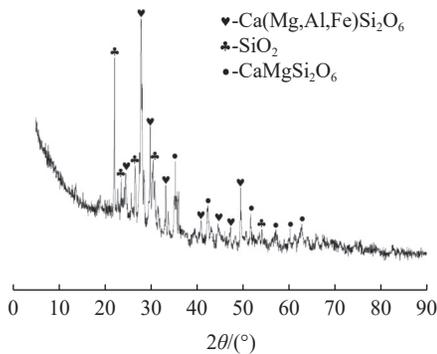


图 12 较优条件下发泡陶瓷的 XRD

Fig.12 XRD pattern of foamed ceramics under optimal conditions

3 结 论

(1) 利用钢渣和页岩渣为主原料制备发泡陶瓷，由单因素实验结果可知：钢渣含量、SiC添加量、硼砂添加量及发泡温度对发泡陶瓷的气孔结构和性能均有较大的影响。

(2) 当钢渣含量为 20%，页岩渣为 80%，额外添加 0.5% 的 SiC，4% 的硼砂，在发泡温度 1090 ℃，保温时间 40 min 的条件下得到的发泡陶

瓷材料性能较优，其体积密度为 0.468 g/cm³，抗压强度为 3.265 MPa，导热系数为 0.121 W/(m·K)，达到了建筑保温材料的性能要求。

(3) 较优条件下钢渣-页岩渣发泡陶瓷的结晶相主要由辉石相、石英相和透辉石相组成。

参考文献：

- [1] 邓坚勇, 胡丽芳, 罗淑芬, 等. 发泡剂在发泡陶瓷保温板中发泡原理的研究[J]. 佛山陶瓷, 2017, 27(1):34-36.
DENG J Y, HU L F, LUO S F, et al. Research of foaming mechanism of foaming agent in foam ceramic insulation board[J]. Foshan Ceramics, 2017, 27(1):34-36.
- [2] Huo W L, Zhang X Y, Chen Y G, et al. Novel mullite ceramic foams with high porosity and strength using only fly ash hollow spheres as raw material[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 38(4): 2035-2042.
- [3] 刘欣, 李家科, 程凯. 蛇纹石尾矿资源化制备发泡陶瓷的研究[J]. 陶瓷学报, 2013, 34(4):461-466.
LIU X, LI J K, CHEN K. Preparation of the foamed ceramic with serpentine tailings[J]. Journal of Ceramics, 2013, 34(4):461-466.
- [4] Jiang C C, Huang S F, Li G Z, et al. Formation of closed-pore foam ceramic from granite scraps[J]. Ceramics International, 2018, 44(3): 3469-3471, 44(3):3469-3471.

(下转第 106 页)

(School of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Material Manufacture, Tangshan, Hebei, China)

Abstract: This is a paper in the field of ceramic materials for metallurgy. Magnesia chrome refractory is widely used in copper industry due to its excellent high temperature strength, fine slag corrosion resistance and good performance. In this paper, the research status of corrosion mechanism of magnesia chrome refractories for copper metallurgy is summarized theoretically, and the effect and action mechanism of factors on the service life of metallurgical furnace was clarified, such as slag temperature, grade, Cr_2O_3 content and additives in magnesia chrome bricks. Finally, according to the research status, the main ways to improve the service life of magnesia chrome refractories are summarized, which will provide guidance and help for the structural design and performance control of magnesia chrome refractories in the future.

Keywords: Copper metallurgy; Magnesia chrome ceramic refractory; Slag corrosion resistance; Damage mechanism

(上接第 99 页)

[5] 杨赞中. 抛光砖废渣复合发泡法制备闭孔泡沫陶瓷[J]. 材料导报, 2017, 20(31):122-126.

YANG Z Z. Preparation of closed pore foamed ceramics through complex foaming method by using porcelain tile residues[J]. Materials Reports, 2017, 20(31):122-126.

[6] 庞才良, 杨雪晴, 宋杰光, 等. 钢渣综合利用的研究现状及发展趋势[J]. 砖瓦, 2020, 387(3):79-82.

PANG C L, YANG X Q, SONG J G, et al. Research status and development trend of comprehensive utilization of steel slag[J]. Brick-Tile, 2020, 387(3):79-82.

[7] 丁力. 利用页岩制作发泡陶瓷的研究[J]. 陶瓷, 2015(4):23-27.

DING L. Research on making foamed ceramics from shale[J]. Ceramics, 2015(4):23-27.

[8] Liu T Y, Li X Y, Guan L M, et al. Low-cost and environment-friendly ceramic foams made from ead-zinc mine tailings and red mud: Foaming mechanism, physical,

mechanical and chemical properties[J]. Ceramics International, 2016, 42(1):1733-1739.

[9] Wang H, Chen Z W, Liu L L, et al. Synthesis of a foam ceramic based on ceramic tile polishing waste using SiC as foaming agent[J]. Ceramics International, 2018, 44(9):10078-10086.

[10] 张优. 铝灰发泡建筑陶瓷材料的制备及其发泡机理的研究[D]. 景德镇: 景德镇陶瓷大学, 2019.

ZHANG Y. Research on the preparation and foaming mechanism of foamed architectural ceramic materials by aluminum ash[D]. Jingdezhen: Jingdezhen Ceramic Institute, 2019.

[11] 池跃章, 沈光银, 吴子荣, 等. 发泡剂对利用废渣和尾矿制备闭孔发泡陶瓷的影响[J]. 新型建筑材料, 2008(7): 80-82.

CHI Y Z, SHEN G Y, WU Z R, et al. Influence of foaming agent on producing closed porosity ceramics using solid residue and tailings[J]. New Building Materials, 2008(7): 80-82.

Study on Preparation and Properties of Steel Slag-Shale Slag Foamed Ceramics Material

Jiang Hong¹, Zhang Xuewu², Xu Zebo³

(1.Urban Construction College, Eastern Liaoning University, Dandong, Liaoning, China; 2.State Key Laboratory of Fiber Materials Modification, School of Materials Science and Engineering, Donghua

University, Shanghai, China; 3.Institute of Functional Materials, Donghua University, Shanghai, China)

Abstract: This is a paper in the field of ceramics and composites. High-temperature foaming method has been successfully applied to prepare foamed ceramics material by using steel slag and shale slag as the main raw materials. Silicon carbide and borax were used as the foaming agent and fluxing agent, respectively. This paper focused on the influence of steel slag content, SiC addition, borax addition and foaming temperature on the pore structure and properties of foamed ceramics. The experimental results showed that when the steel slag content is 20%, the shale slag is 80%, SiC of 0.5% and borax of 4% are additionally added, the foaming temperature is 1090 °C and the holding time is 40 min, the foamed ceramics material has the best properties. Under optimal conditions, the bulk density, compressive strength and thermal conductivity of the foamed ceramics are 0.468 g/cm³, 3.265 MPa and 0.121 W/(m·K), which meets the property requirements of building insulation materials. The main crystal phases are augite phase, quartz phase and diopside phase.

Keywords: Steel slag; Shale slag; Foamed ceramics; Pore structure; Comprehensive properties