

引文格式:刘冲,郭家栋,梁民,等. 基于煤气化细渣的辅助胶凝材料对砂浆性能影响及水化行为研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 758-765.

LIU Chong, GUO Jiadong, LIANG Min, et al. Influences of auxiliary cementitious materials based on coal gasification fine slag on mortar performance and hydration behavior [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 758-765.

基于煤气化细渣的辅助胶凝材料对砂浆性能影响及水化行为研究

刘 冲^{1,2}, 郭家栋², 梁 民², 杨浩泉³, 孔少奇¹

(1. 太原理工大学 矿业工程学院, 山西 太原; 2. 山西新元煤炭有限责任公司, 山西 晋中;

3. 山西省应急管理厅, 山西 太原)

摘 要:【目的】煤气化细渣是煤气化过程中形成的固体废弃物, 提高其利用率已成为煤化工行业的研究重点。【方法】通过煤气化细渣取代部分水泥, 对复合砂浆的凝结时间、流动性性能和力学性能进行实验研究, 结合水化热、XRD、扫描电子显微镜和热力学模拟对煤气化细渣-水泥复合胶凝材料的水化机理进行分析。【结果】随着煤气化细渣含量增加, 水泥净浆的凝结时间延长, 砂浆的流动性逐渐降低; 煤气化细渣掺量为10%时, 砂浆28 d抗压强度可达对照组水平。在水泥基材料中掺入适量(不超过10%)的煤气化细渣可在不显著影响水泥基材料各性能指标的情况下, 降低水化热, 减少水泥用量, 从而提高煤气化细渣利用率。

关键词: 煤气化细渣; 水泥基材料; 力学性能; 水化行为; 热力学模拟

中图分类号: TD853.34 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240238

文章编号: 1007-9432(2026)04-0758-08

Influences of Auxiliary Cementitious Materials Based on Coal Gasification Fine Slag on Mortar Performance and Hydration Behavior

LIU Chong^{1,2}, GUO Jiadong², LIANG Min², YANG Haoquan³, KONG Shaoqi¹

(1. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China;

2. Shanxi Xinyuan Coal Co., Ltd., Jinzhong, Shanxi, China; 3. Emergency Management Office of Shanxi Province, Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract: 【Purposes】Coal gasification fine slag is a solid waste formed during the coal gasification process. 【Methods】To improve its utilization rate, in this research, the substitution of part of cement with coal gasification fine slag was conducted. The setting time of paste, workability, and mechanical properties of the mortar were investigated. Besides, the hydration mechanism of the coal gasification fine slag-cement composite was analyzed by using isothermal calorimetry, XRD, scanning electron microscopy, and thermodynamic simulation. 【Results】The results indicate that as the content of coal gasification fine slag increasing, the setting time of pure cement paste is prolonged, and the workability of the mortar gradually decreases. When the coal gasification fine slag content is 10%, the

收稿日期: 2024-04-04; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 山西省基础研究计划(2022SX09301223073)

第一作者: 刘冲, 高级工程师, (E-mail) liuchong.871010@163.com

通信作者: 孔少奇, 博士, 副教授, 主要从事页岩气、煤层气与致密砂岩气共采等研究, (E-mail) kongshaoqi@tyut.edu.cn

28 d compressive strength of the mortar reaches the level of the control group. Adding an appropriate amount (not exceeding 10%) of coal gasification fine slag into cement-based materials reduces heat of hydration of cement, decreases cement consumption, and improves the utilization rate of coal gasification fine slag without significantly affecting the performance indicators of cement-based materials.

Keywords: coal gasification fine slag; cement-based materials; mechanical properties; hydration behavior; thermodynamic simulation

水泥制造业是高碳排产业之一,全球约有 7% 的碳排来自于水泥生产,在“双碳”政策下水泥行业的低碳发展已迫在眉睫^[1-2]。用矿渣、粉煤灰、钢渣、硅灰等大宗工业副产品作为辅助胶凝材料,降低水泥产品中高碳排熟料的用量,是降低水泥碳排放的有效途径之一^[3]。然而近年来,随着传统行业的绿色转型升级,以及市场对优质辅助胶凝材料的需求不断增加,上述常见的辅助胶凝材料已出现明显缺口,导致假粉煤灰、假矿渣等劣质产品的出现,对商品水泥的质量构成严重威胁^[4-6]。

煤气化细渣是由原煤与气化剂不完全反应形成的固体废弃物,我国煤气化细渣的产量超过 3 000 万 t^[7-8]。然而,目前缺乏有效手段处理或利用这类固废,大部分的煤气化细渣仍被堆存或填埋处理,对周边生态环境构成潜在威胁^[9-11]。因此,煤气化细渣的资源化利用已成为煤化工行业的研究重点。煤气化细渣主要是由残碳和活性硅铝酸盐组成,残碳含量不低于 30% 时可以直接将其作为燃料使用^[12-13]。然而,这种利用方式存在明显的弊端。由于残碳并不是煤气化细渣的主要成分,其在燃烧过后会形成大量的灰渣,这些灰渣主要是由煤气化细渣中的硅铝酸盐组成,在经过高温煅烧后原本具有活性的硅铝酸盐重结晶形成活性较差的惰性矿物,导致其利用难度进一步增加^[14]。合理利用其中的活性硅铝酸盐是提高煤气化细渣资源利用率的关键。已有研究证明煤气化细渣具有制备水硬性胶凝材料的潜力^[14-15]。将煤气化细渣作为辅助胶凝材料使用有望同时解决煤气化细渣利用率低和优质辅助胶凝材料缺失的问题。

基于此,本文研究了煤气化细渣作为辅助胶凝材料对水泥基材料性能、水化行为和水化产物的影响,通过宏观、微观实验与模拟相结合,阐明了煤气化细渣对砂浆性能、水泥水化的影响与作用机理。

1 实验

1.1 原材料

使用的水泥为硅酸盐 PI42.5 基准水泥,密度为

3.15 g/cm³、比表面积为 356.38 cm²/g;煤气化细渣来自山西某化工公司。将煤气化细渣在 105 ℃ 下烘干至恒重,使用 180 目的筛网进行筛分,得到实验使用的煤气化细渣,其密度为 2.13 g/cm³、比表面积为 681.17 cm²/g、碳质量分数约为 23.41%;使用的砂为产自厦门艾思欧标准砂公司的标准砂;拌合水为普通自来水。水泥、煤气化细渣的化学成分、粒径分布及矿物成分分别如表 1、图 1 及表 2 所示。利用 XRD Rietveld 法获得了水泥和煤气化细渣中的矿物成分及无定型相含量,如图 2 所示。

表 1 原材料的化学成分	
Table 1 Main chemical compositions of raw materials	
材料	质量分数/%
	SiO ₂ Al ₂ O ₃ CaO Fe ₂ O ₃ K ₂ O SO ₃ Na ₂ O MgO
水泥	21.65 4.53 64.29 3.29 2.81 2.51 0.54 2.76
煤气化细渣	36.53 28.17 13.21 11.69 2.89 2.77 1.41 0.79

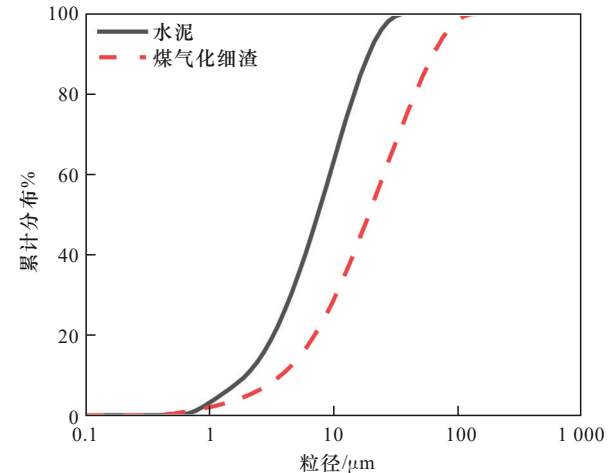


图 1 原材料的粒径分布曲线
Fig. 1 Particle size distribution curves of raw materials

表 2 原材料的矿物成分		
Table 2 Mineral compositions of raw materials		
矿物成分	w(水泥)/%	w(煤气化细渣)/%
石英	—	4.14
C ₃ S	58.57	—
C ₂ S	21.62	—
C ₃ A	7.43	—
C ₄ AF	12.38	—
无定型相	—	95.86

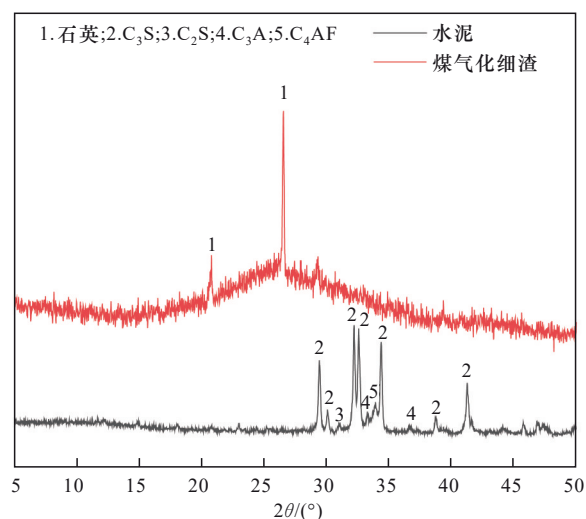


图2 原材料的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of raw materials

1.2 实验方案

为了研究煤气化细渣作为辅助胶凝材料对砂浆性能的影响,设置了4组实验,其中C1-C3为煤气化细渣-水泥试验组,分别用煤气化细渣替代了10%、30%、50%的水泥,C0为纯水泥对照组,详细配合比如表3所示。按照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》^[16]进行制样与养护。按照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》^[17]制备了复合水泥净浆,用于水泥凝结时间的测定和水化产物分析。

表3 砂浆配合比设计

Table 3 Mix proportions of mortar samples

样品	水泥	煤气化细渣	标准砂	水
C0	450	—	1 350	225
C1	405	45	1 350	225
C2	315	135	1 350	225
C3	225	225	1 350	225

1.3 测试方法

砂浆流动度按照GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》^[18]进行测试;水泥净浆的凝结时间按照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》^[17]进行测试;砂浆的力学性能按照GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》^[16]进行测试,测试结果包括抗折和抗压强度,试样尺寸为40 mm×40 mm×160 mm。

称取10 g水泥样品、5 g去离子水制备水泥膏体,并转移到安瓿瓶中。然后将安瓿瓶密封,放置在TAM Air八通道等温微量热仪中,并测定水泥浆体在水化72 h的放热速率和放热量。将到达养护龄期的水泥净浆块破碎,浸泡在异丙醇中12 h,然后

在40℃下将试样烘干至恒重。部分试样被进一步磨细并过200目筛用于XRD分析。将粉末状的样品均匀铺展放置在XRD样品托盘中,确保表面平整。测试XRD使用的设备为SmartLab 3 kW X射线衍射仪(日本理学公司),采用CuKα辐射(40 kV, 40 mA),以5(°)/min的扫描速率测试样品在2θ为5°~50°范围内的XRD图谱。另一部分块状样品被用于SEM测试,为获得清晰的扫描电镜图片,对样品拍摄表面进行喷金处理,使用的拍摄设备为德国蔡司公司的Gemini 300。

2 结果与讨论

2.1 浆体流动性能

2.1.1 流动性

图3显示了砂浆的流动度测试结果。煤气化细渣的加入显著降低了砂浆的流动性能,C1、C2、C3的流动度相对于C0分别下降了27.71%、52.96%、61.03%。这是由于煤气化细渣中存在大量的比表面积较大的多孔碳,这些多孔碳吸附了大量的自由水导致砂浆中可用于润滑的自由水含量减少。此外,煤气化细渣中还含有大量有机质导致砂浆中水的黏度增加^[19],因此随着煤气化细渣的含量增加砂浆的流动度显著降低^[20]。

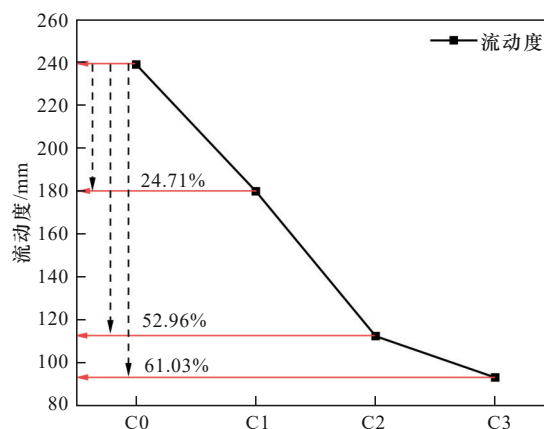


图3 砂浆流动度

Fig. 3 Mortar fluidity results

2.1.2 凝结时间

图4显示了净浆的凝结时间测试结果。煤气化细渣的加入延长了净浆的凝结时间,C1、C2、C3的初凝时间相对于C0分别增加了4.61%、14.47%、25.33%,其终凝时间分别增加了6.14%、15.50%、30.07%。由于早期净浆的硬化主要依赖水泥水化,煤气化细渣替代水泥后导致水泥被稀释,因此净浆的凝结时间增加^[21]。10%掺量的煤气化细渣

对净浆的凝结时间影响不大,这是因为煤气化细渣的掺量较少,且煤气化细渣吸附了大量的自由水导致浆体中的“有效水灰比”降低,可以起到加速水泥凝结的作用^[22]。随着煤气化细渣含量进一步增加,水泥进一步被稀释,其中的有机质也会抑制水泥水化^[20],因此净浆的凝结时间显著延长。

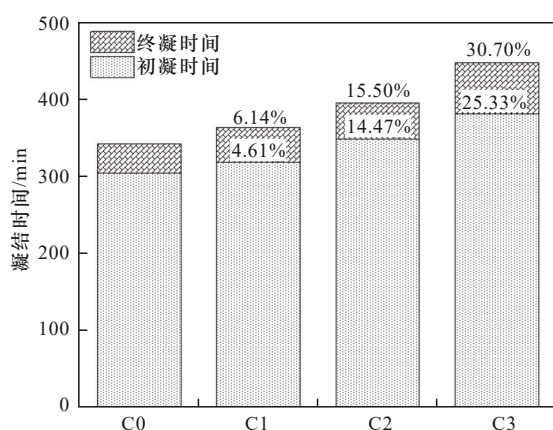


图4 净浆凝结时间

Fig. 4 Setting time of pastes

2.1.3 力学性能

图5显示了砂浆在龄期为3、7、14、28 d的抗折强度。可知,随着养护龄期的增加,砂浆的抗折强度逐渐增大;但随着煤气化细渣掺量增加,砂浆的抗折强度逐渐降低。C1的抗折强度相较于C0下降了3.9%~8.0%;C2的抗折强度相较于C0下降了25.4%~27.3%,下降幅度明显增大;C3的抗折强度相较于C0下降了45.4%~54.3%,降幅甚至超过50%。

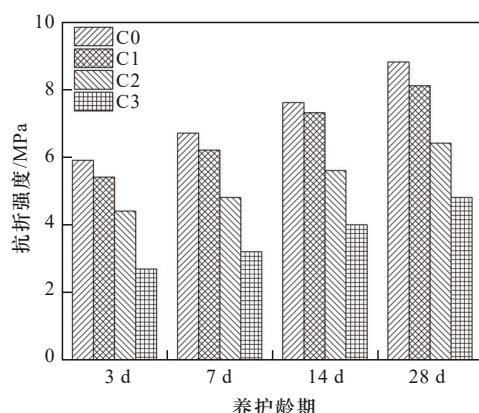


图5 砂浆抗折强度

Fig. 5 Flexural strengths of mortar

图6显示了砂浆在相同龄期的抗压强度。与抗折强度类似,随着养护龄期的增加,砂浆的抗压强度逐渐增大;随着煤气化细渣掺量增加,砂浆的抗压强度逐渐降低。不同的是,随着养护龄期的增

加,C1的抗压强度十分接近C0。在3 d时,C1的抗压强度相较于C0下降幅度最大,达到12.42%;在养护28 d后,二者差距仅为0.3%。C2的抗压强度相较于C0下降了24.3%~29.4%;C3的抗压强度相较于C0下降了47.6%~60.5%。可见,高掺量的煤气化细渣对砂浆的抗压强度影响更加显著。

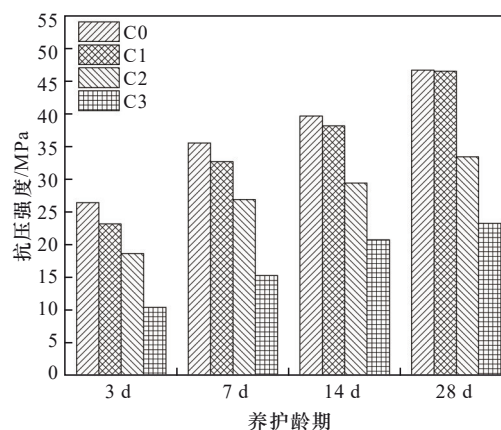


图6 砂浆抗压强度

Fig. 6 Compressive strengths of mortar

在水化早期,砂浆的强度发展主要与水泥水化有关。使用煤气化细渣替代水泥后导致水泥被稀释,因此砂浆的早期力学性能下降幅度更大^[23]。随着养护时间的延长,煤气化细渣中的无定型相逐渐与水泥水化形成的氢氧化钙发生火山灰反应,并形成了额外的水化产物,弥补水泥稀释和有机质抑制水化带来的不利影响,从而减小了试验组与对照组之间的差距^[24]。此外,煤气化细渣的粒径和比表面积都大于水泥颗粒,能起到一定的物理充填作用和成核作用^[25-26]。因此,煤气化细渣掺量为10%时,养护28 d后的砂浆强度与纯水泥相当。但是由于煤气化细渣中的无定型相的活性较差,在其掺量超过10%时发生火山灰反应、充填作用和成核作用,不能弥补水泥稀释引起的负面影响。由此可见,煤气化细渣在水泥中的掺量不应超过10%。

2.2 水化动力学

图7显示了净浆的水化放热速率和累计放热量。由于C3的力学性能较差,因此在后续测试中未考虑C3。从放热速率曲线上可以观察到净浆的放热速率在两个位置出现峰值。第一个峰值是由水泥和煤气化细渣颗粒的湿润、溶解及表面能的释放引起的,在水与水泥、煤气化细渣接触后立刻发生^[27]。第二个峰值出现在4~16 h左右,这一阶段的快速放热与水化产物的沉淀有关,因此也可以反映净浆在水化早期的水化产物生成量^[28]。由图7可

知,随着煤气化细渣掺量的增加,第二峰峰值逐渐降低,C1、C2的第二峰峰值相较于C0分别下降了约9%和20%。这说明净浆早期的水化产物生成量降低,同时解释了砂浆早期力学性能较差的原因。此外,随着煤气化细渣掺量增加,净浆的诱导期明显被延长,由于诱导期通常与净浆的凝结时间相关,所以煤气化细渣的加入延缓了水泥的凝结硬化^[29]。

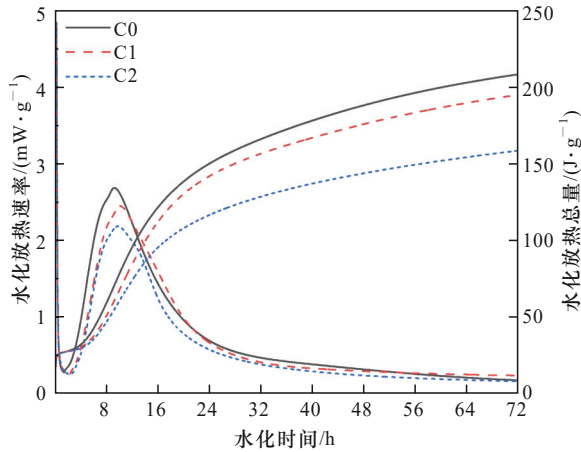


图7 水泥净浆的放热速率与累计放热曲线

Fig. 7 Heat release rate and cumulative heat release curves of cement paste

随着煤气化细渣掺量增加,净浆的累计放热量也逐渐降低,C1、C2的累计放热量相较于C0分别下降了约6%和24%。随着煤气化细渣的掺量增加,累计放热量的下降幅度明显,说明高掺量的煤气化细渣对水泥水化反应有强烈的抑制作用。

利用 Krstulovic-Dabic 水化动力学模型,结合水化热数据进一步分析净浆的水化过程^[28]。水化过程分为三个阶段:成核和晶体生长(NG)、相边界反应(I)和扩散(D),每个阶段被认为是相互独立的,计算过程如下。

$$\text{NG:} [-\ln(1-\alpha)]^{\frac{1}{n}} = K_{\text{NG}}(t-t_0) = K'_{\text{NG}}(t-t_0). \quad (1)$$

$$\text{I:} [1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]^1 = K_{\text{I}}R^{-1}(t-t_0) = K'_{\text{I}}(t-t_0). \quad (2)$$

$$\text{D:} [1-(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]^2 = K_{\text{D}}R^{-2}(t-t_0) = K'_{\text{D}}(t-t_0). \quad (3)$$

$$\text{NG:} \frac{d\alpha}{dt} = F_{\text{NG}}(\alpha) = K'_{\text{NG}}n(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{\frac{n-1}{n}}. \quad (4)$$

$$\text{I:} \frac{d\alpha}{dt} = F_{\text{I}}(\alpha) = 3K'_{\text{I}}(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}. \quad (5)$$

$$\text{D:} \frac{d\alpha}{dt} = F_{\text{D}}(\alpha) = 3K'_{\text{D}}(1-\alpha)^{\frac{2}{3}}/[2-2(1-\alpha)^{\frac{1}{3}}]. \quad (6)$$

式中, n 、 K_{NG} 、 K_{I} 、 K_{D} 为水化动力学参数,由式(1)~(3)曲线拟合得到; α 表示水化程度,用下式计算:

$$\alpha(t) = \frac{Q(t)}{Q_{\text{max}}}. \quad (7)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{dQ}{dt} \times \frac{1}{Q_{\text{max}}}. \quad (8)$$

式中, Q_{max} 为理论累计放热量,用下式计算:

$$\frac{1}{Q(t)} = \frac{1}{Q_{\text{max}}} \times \frac{t_{50}}{Q_{\text{max}}(t-t_0)}. \quad (9)$$

式中, $Q(t)$ 为浆体从水化加速期到 t 时放出的热量; t_{50} 为累积放热量达到理论累计放热量一半的时间; t_0 是诱导期结束或加速期开始的时间。

图8给出了净浆的水化速率曲线及模拟结果。模型能准确模拟C0的水化过程,说明本研究使用的水泥适用于该模型。同时,模型准确模拟了C1的NG和D过程,但在I过程中出现了明显误差。模型对于C₂S的任何过程的模拟效果都较差,这说明高掺量煤气化细渣下的净浆的水化行为与纯水泥表现出明显差异。表4为净浆的水化动力学参数。其中, n 反映了水化产物结晶成核与晶体生长情况。随着煤气化细渣掺量的增加, n 逐渐增大,说明煤气化细渣有助于提高水化产物成核与晶体生长,这得益于煤气化细渣的成核效应。净浆的 K'_{NG} 的值约为 K'_{I} 的4倍,约为 K'_{D} 的20倍,说明净浆的水化反应主要受NG过程控制。 K'_{I} 随着煤气化细渣掺量增加而减小,这是因为煤气化细渣掺量增加,氢氧化钙的浓度降低,煤气化细渣的火山灰反应速率被降低。随着煤气化细渣掺量为10%时, K'_{D} 增大,掺量增加到30%时, K'_{D} 减小。在加入少量煤气化细渣后,由于净浆中水化产物数量减小,离子扩散阻力降低;对于高掺量煤气化细渣的净浆,煤气化细渣显著改变了净浆的水化放热行为,水化动力学参数可能存在较大误差,另一方面,煤气化细渣中大量的有机质也可能阻碍离子扩散。

2.3 水化产物

由于C1中煤气化细渣的掺量较低,对其进行水化产物分析时可能观察不到显著变化,因此对C0和C2进行了XRD测试,结果如图9所示。由图9可知,净浆中主要的水化产物为钙矾石、单硫酸盐、半碳酸盐、单碳酸盐和氢氧化钙。随着养护时间增加,C₂S、C₃S的衍射峰强度下降,说明水泥水化在养护期间持续进行。在C0的水化产物中,钙矾石和半碳酸盐的结晶度较高,这是因为纯水泥中有丰富的硫酸盐,能够与铝酸盐反应形成钙矾石。而对于

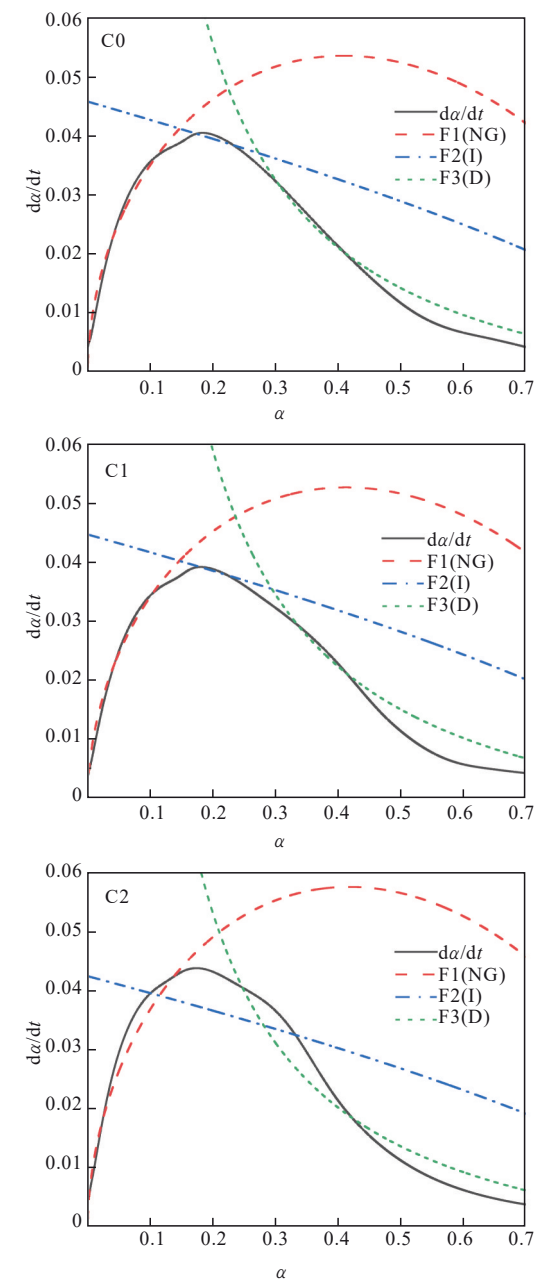


图 8 水泥净浆的反应速率曲线拟合结果
Fig. 8 Reaction rate curve fitting results of cement paste

表 4 水泥净浆的水化动力学参数
Table 4 Kinetic parameters of hydration of cement paste

样品	<i>n</i>	<i>K</i> ' _{NG}	<i>K</i> ' _I	<i>K</i> ' _D
C0	2.106 9	0.060 2	0.015 2	0.003 1
C1	2.131 6	0.058 8	0.014 8	0.003 3
C2	2.170 1	0.063 4	0.014 1	0.002 9

C2,由于煤气化细渣中 Al_2O_3 的含量较高,而 SO_3 的含量与水泥类似,这会导致净浆中铝酸盐过量而硫酸盐不足,从而诱发钙矾石向单硫酸盐的相变^[27]。因此,C2中钙矾石的衍射峰几乎不可见。

对于C0,氢氧化钙的衍射峰随着养护时间的增加逐渐增大,这是由于氢氧化钙是 C_2S 和 C_3S 的水

化产物之一^[30]。纯水泥体系下的水化反应并不会消耗氢氧化钙,因此随着养护时间的延长,氢氧化钙衍射峰强度逐渐增强。与C0不同,C2中除了上述反应之外,煤气化细渣中的活性硅会与氢氧化钙反应形成额外的CSH凝胶^[31],因此随着养护时间的增加,C2中氢氧化钙的结晶度逐渐下降。

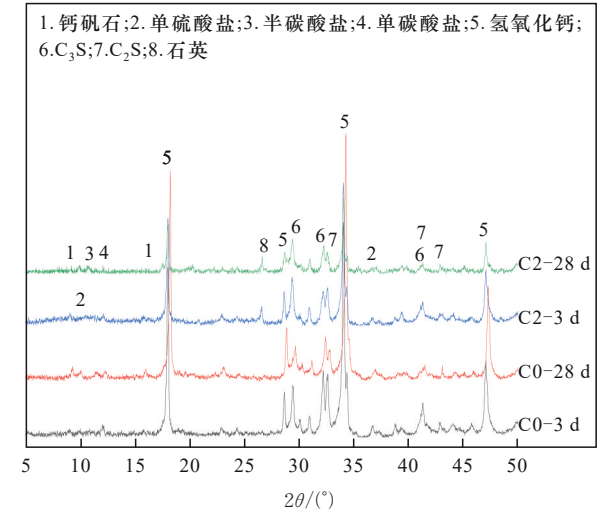


图 9 C0和C2养护3 d和28 d后的XRD图谱
Fig. 9 XRD patterns of C0 and C2 after curing for 3 and 28 d

图 10 显示了养护 28 d 后的 C0 和 C2 的 SEM 图像。在 C0 中可以观察到由 C_2S 和 C_3S 水化形成密集的片状氢氧化钙,且 C0 的微观结果明显更加致密。在 C2 中可以观察到大量的未水化的煤气化细渣颗粒和不能参与水化反应的多孔碳。此外,这些颗粒与多孔碳不能与水化产物紧密贴合,导致形成了大量的孔隙和裂隙。孔隙、裂隙较多也是高煤气化细渣掺量砂浆力学性能较差的主要原因之一。

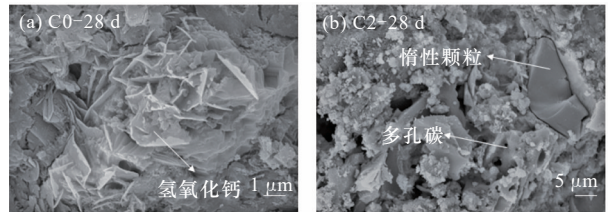


图 10 C0和C2养护28 d后的SEM图像
Fig. 10 SEM images of C0 and C2 after curing for 28 d

2.4 热力学模拟

为深入了解煤气化细渣掺量对水泥净浆水化产物的影响,使用GMES软件对净浆的水化产物进行分析,根据XRD Rietveld结果建立了水泥相和煤气化细渣相,模拟了除惰性物质外其他成分完全反应时样品的水化产物,结果如图 11 所示^[32]。当煤气化细渣掺量为 0% 时,主要水化产物为 CSH 凝胶、氢氧化钙、钙矾石、单硫酸盐和水滑石。除水滑石

外,其余水化产物与 C0 养护 28 d 后的 XRD 结果一致,说明建立的水泥相是可靠的。未观察到水滑石可能是因为水泥中 MgO 的含量较低,导致水滑石的结晶度较差。煤气化细渣相是根据其化学成分、矿物成分和碳含量建立的,其中约有 28% 完全无法参与水化反应。随着煤气化细渣掺量增加,氢氧化钙的含量逐渐减小,CSH 凝胶和钙矾石的含量均逐渐减小,这与 XRD 中观察到的一致。在完全反应的情况下,当煤气化细渣掺量为 30% 时,可以完全消耗水泥水化形成的氢氧化钙,因此 30% 可以被认为是理论上最佳的煤气化细渣掺量。然而,完全水化需要较长的反应时间,养护 28 d 远不能满足完全水化的要求。此外,煤气化细渣中的有机成分会阻碍水泥水化,影响水化产物的生成和结晶,因此,在 XRD 中仍观察到氢氧化钙的衍射峰。虽然模拟结果与实测值存在差异,但仍表明,煤气化细渣能够消耗氢氧化钙并引发钙矾石相变。当煤气化细渣掺量达到 50% 时,体系中会存在大量未反应的煤气化细渣颗粒,诱发孔隙和裂隙形成,且此时 CSH 凝胶的含量显著降低,因此其力学性能大幅下降。

3 结论

本文使用煤气化细渣作为辅助胶凝材料替代水泥,通过对其流动度、凝结时间、力学性能等进行实验,研究煤气化细渣对水泥基材料性能的影响;通过水化热、XRD、SEM 研究了净浆的水化动力学、水化产物和微观结构,最后通过 GEMS 软件验证了相关实验现象,得到以下三点结论:

1) 煤气化细渣的掺入会显著降低砂浆的流动性,且掺量越大,流动性下降幅度越大;在凝结时间

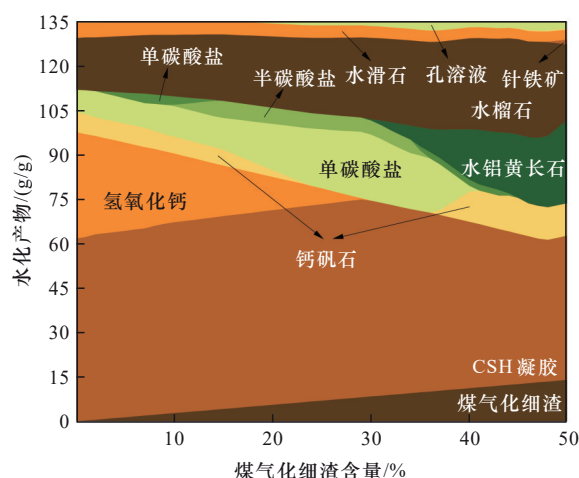


图 11 煤气化细渣掺量对净浆水化产物影响的热力学模拟
Fig. 11 Thermodynamic simulation of the effect of coal gasification fine slag content on hydration products

方面,掺入煤气化细渣会延长净浆的凝结时间,但掺量较小时(10%)影响不显著;在力学性能方面,煤气化细渣的掺入显著降低了砂浆的早期抗折/抗压强度,养护 28 d 后,掺 10% 煤气化细渣砂浆的抗压强度与纯水泥相当。

2) 煤气化细渣的掺入降低了净浆的水化热,且对水泥水化有明显的延迟作用;煤气化细渣有利于水泥的结晶成核与晶体生长过程,但不利于相边界反应和扩散过程;当煤气化细渣掺量为 50% 时,其水化机理略微发生改变,对 Krstulovic-Dabic 水化动力学模型的适用性较差。

3) 净浆中主要的水化产物为钙矾石、单硫酸盐、半碳酸盐、单碳酸盐和氢氧化钙;煤气化细渣的加入消耗了氢氧化钙,增加了体系中 CSH 凝胶的含量;此外,煤气化细渣还诱发了钙矾石的相变;煤气化细渣的理论最优掺量为 30%。

参考文献:

- [1] 朱哲,王胜杰,刘帅,等.水泥行业碳达峰碳中和标准体系建设研究[J].水泥,2024(2):17-19.
- [2] Zhao Y, Qiu J, Ma Z, et al. Eco-friendly treatment of coal gangue for its utilization as supplementary cementitious materials[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 285: 124834.
- [3] Skibsted J, Snellings R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 124: 105799.
- [4] 高峰.粉煤灰质量鉴别及对混凝土性能的影响[J].铁道建筑,2023,63(3):159-163.
- [5] 范英富,朱雨磊,李骏航,等.不同来源粉煤灰品质对混凝土性能的影响[J].中国建材科技,2021,30(6):43-46.
- [6] 李彦昌,刘斐,齐文丽,等.北京市预拌混凝土矿物掺合料应用问题分析及解决问题的思路[J].中国建材科技,2022,31(4):65-68.
- [7] 吴彬,刘春.煤气化灰渣综合利用研究进展[J].陕西煤炭,2024,43(3):104-108.
- [8] 朱菊芬,李健,闫龙,等.煤气化渣资源化利用研究进展及应用展望[J].洁净煤技术,2021,27(6):11-21.
- [9] Yan S, Xuan W, Cao C, et al. A review of sustainable utilization and prospect of coal gasification slag[J]. Environmental Research, 2023, 238: 117186.
- [10] Su S, Tahir M H, Cheng X, et al. Modification and resource utilization of coal gasification slag-based material: A review[J].

- Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(2):112112.
- [11] 雷云裕,刘哲语.改性煤气化细渣精选炭吸附废水中苯酚性能研究[J].煤炭转化,2024,47(6):67-76.
- [12] Dai G, Zheng S, Wang X, et al. Combustibility analysis of high-carbon fine slags from an entrained flow gasifier[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 271:111009.
- [13] 宁永安,段一航,高宁博,等.煤气化渣组分回收与利用技术研究进展[J].洁净煤技术,2020,26(S1):14-19.
- [14] Zhao J, Zhang X, Sheng J, et al. Utilization of coal gasification fine ash for construction material: From physical and chemical properties to the hydration activity of thermally modified CGFA[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(6):111137.
- [15] Yamanaka Y, Fujiwara H, Maruoka M, et al. Experimental study on properties of mortar containing molten slag as fine aggregate[J]. Special Publication, 2018, 326:1-49.
- [16] 全国水泥标准化技术委员会(SAC/TC 184). 水泥胶砂强度检验方法(ISO法):GB/T 17671—2021[S/OL]. [2024-04-03]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=SCSF&dbname=SCSF&filename=SCSF00080290&v=>.
- [17] 全国水泥标准化技术委员会(SAC/TC 184). 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法:GB/T 1346—2011[S/OL]. [2024-04-03]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=SCSF&dbname=SCSF&filename=SCSF00080242&v=>.
- [18] 全国水泥标准化技术委员会(SAC/TC 184). 水泥胶砂流动度测定方法:GB/T 2419—2005[S/OL]. [2024-04-03]. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=SCSF&dbname=SCSF&filename=SCSF00023028&v=>.
- [19] Miao Z, Chen L, Chen K, et al. Physical properties and microstructures of residual carbon and slag particles present in fine slag from entrained-flow coal gasification[J]. Advanced Powder Technology, 2020, 31(9):3781-3789.
- [20] Liu J, Qiu J, Wu P, et al. Calcined oil shale residue as a supplementary cementitious material for ordinary Portland cement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 306:124849.
- [21] Liu J, Zhao J, Zhao Y, et al. Resource utilization of solid waste from steel industries in cement-based cementitious materials: Mechanical properties, hydration behaviors, and environmental impact[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3):109882.
- [22] 张铨,王振地,史鑫宇,等.超吸水树脂对高性能水泥基复合材料收缩和水化的影响[J].材料导报,38(22):196-202.
- [23] Ye F, Qiao H, Feng Q, et al. Study on multi-performance optimization of basalt stone powder supplementary cementitious materials[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 80:108018.
- [24] 王新泉,孙强,李泉.偏高岭土对泡沫混凝土物理力学性能及微观结构的影响[J].功能材料,2024,55(3):3009-3016.
- [25] 贺高乐,崔雯雯,杨振,等.矿渣-硅灰在碱激发作用下固化赤泥的基本工程性能研究[J].太原理工大学学报,2025,56(2):207-215.
- [26] 常瑞祺,张建波,李会泉,等.煤基固废制备胶凝材料研究进展及应用[J].洁净煤技术,2024,30(2):316-330.
- [27] Zhao J, Liu J, Wu Y, et al. Application of an industrialized ultrafine composite powder in cement-based materials: Hydration characteristics, microstructure, and corrosion resistance[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411:134629.
- [28] 韩方晖,王栋民,阎培渝.含不同掺量矿渣或粉煤灰的复合胶凝材料的水化动力学[J].硅酸盐学报,2014,42(5):613-620.
- [29] 丁正,廖国胜,廖宜顺,等.搅拌站废浆对水泥水化硬化的影响机理[J].硅酸盐通报,2024,43(3):1039-1047.
- [30] 梁玉强,张雷,李德,等.水泥/粉煤灰碱改性对废弃粉质土砂配制盾构壁后注浆性能的影响[J].科学技术与工程,2023,23(35):15171-15179.
- [31] 李方,杨健,李粒琿.废玻璃粉作为辅助胶凝材料对砂浆性能影响及作用机理[J].硅酸盐通报,2022,41(9):3208-3218.
- [32] Kulik D A, Wagner T, Dmytrieva S V, et al. GEM-Selektor geochemical modeling package: revised algorithm and GEMS3K numerical kernel for coupled simulation codes[J]. Computational Geosciences, 2013, 17(1):1-24.

(编辑:赵树庆)