

文章编号:1007-9629(2024)10-0887-08

煤制天然气残渣-水泥复合胶凝材料流变与力学性能

沙东¹, 黄聪¹, 王宝民², 潘宝峰^{2,*}

(1. 宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 大连理工大学
建设工程学院, 辽宁大连 116024)

摘要:以煤制天然气残渣(CSNGS)为辅助胶凝材料,采用旋转流变仪、抗折与抗压试验、X射线衍射仪(XRD)、扫描电镜-能谱仪(SEM-EDS)、傅里叶变换红外光谱(FTIR)、热重分析(TG)等测试技术及方法,系统研究CSNGS对水泥复合胶凝材料流变性能、力学性能及微观结构的影响规律和作用机理。结果表明:掺入适量CSNGS可改善复合胶凝材料净浆的流变性能,当CSNGS掺量为10.0%时,净浆的屈服应力和塑性黏度分别降低27.2%和35.0%;掺入CSNGS有助于提升复合胶凝材料砂浆的抗折强度,当CSNGS掺量为20.0%时,复合胶凝材料砂浆28 d抗折强度为8.9 MPa,较水泥砂浆提高13.8%;当CSNGS掺量为0%~30.0%时,复合胶凝材料砂浆28 d抗压强度可达水泥砂浆的88%以上。掺入CSNGS后反应产物中的凝胶和Ca(OH)₂含量减少,凝胶中 $n(\text{Ca})/n(\text{Al}+\text{Si})$ 、 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 及 $n(\text{Si})/n(\text{Al})$ 降低,钙矾石(Aft)含量增加,反应产物中有水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶生成。

关键词:煤制天然气残渣;辅助胶凝材料;流变性能;力学性能;微观结构

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.10.003

Rheological and Mechanical Properties of Coal-Based Synthetic Natural Gas Slag-Cement Composite Cementitious Materials

SHA Dong¹, HUANG Cong¹, WANG Baomin², PAN Baofeng^{2,*}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Coal-based synthetic natural gas slag (CSNGS) was used as supplementary cementitious material, and the influence rule and mechanism of incorporating CSNGS on the rheological properties, mechanical properties and microstructure of cement composite cementitious materials were systematically investigated using rotational rheometer, flexural and compressive tests, X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope-energy dispersive spectrometer (SEM-EDS), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), and thermogravimetric analysis (TG). The results show that the rheological properties of composite cementitious materials can be improved by mixing appropriate amount of CSNGS, and the yield stress and plastic viscosity of the slurry can be reduced by 27.2% and 35.0% respectively when the CSNGS content is 10.0%. The incorporation of CSNGS helps to improve the flexural strength of the composite cementitious material mortar, The 28 d flexural strength was 8.9 MPa when the CSNGS content is 20.0%, representing an increase of 13.8% compared with that of the cement mortar. In addition, the 28 d

收稿日期:2024-04-17; 修订日期:2024-05-18

基金项目:宁夏重点研发项目(引才专项)(2023BSB03023);国家自然科学基金资助项目(U20A20324, 52272016);中央高校自主基金资助项目(DUT19ZD212);大连市科技创新基金资助项目(2023JJ12SN036)

第一作者:沙东(1990—),男,甘肃平凉人,宁夏大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail: shadong@nxu.edu.cn

通讯作者:潘宝峰(1967—),男,内蒙古赤峰人,大连理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail: panbf@dlut.edu.cn

compressive strength of composite cementitious material mortar can reach more than 88% of cement mortar when CSNGS is mixed in 0%–30.0%. The results also show that with the incorporation of CSNGS, the gels and $\text{Ca}(\text{OH})_2$ content decrease, $n(\text{Ca})/n(\text{Al}+\text{Si})$, $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$, and $n(\text{Si})/n(\text{Al})$ in the gels decreases, the content of ettringite (AFt) increases, and calcium silicaluminate hydrates (C-A-S-H) are generated in the reaction products.

Key words: coal-based synthetic natural gas slag(CSNGS); supplementary cementitious material; rheological property; mechanical property; microstructure

在“双碳”目标下,利用辅助胶凝材料替代部分硅酸盐水泥,降低混凝土中的水泥含量是建筑行业实现节能减排的有效途径^[1-2].辅助胶凝材料是指与硅酸盐水泥一起使用时通过水硬性或火山灰活性提升水泥性能的材料,主要反应机理为:存在于辅助胶凝材料中的活性 Al_2O_3 、 SiO_2 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,形成硅铝酸盐凝胶,细化了基体微观结构,改善了其力学性能^[3-4].此外,部分辅助胶凝材料颗粒的成核效应有助于水泥早期水化,产生更多硅酸盐;其形态效应和填充效应对混凝土新拌浆体工作性能、后期强度和耐久性有益^[5-6].

部分工业废渣因具有较高的反应活性、良好的经济及环境效益成为辅助胶凝材料的主要来源.常用的辅助胶凝材料为粉煤灰^[7]、矿渣^[8]、钢渣^[9]、煤矸石^[10] 和水泥窑灰^[11] 等.煤制天然气残渣(coal-based synthetic natural gas slag, CSNGS)是煤与气化剂、氧和水蒸气等在高温(约 1 200 ℃)和高压(约 4.1 MPa)条件下进行反应,生成煤制天然气后的反应残留物,为煤制天然气工业的副产品.目前,中国 CSNGS 年产量已超过 300 万 t.前期研究^[12-14] 表明,CSNGS 富含活性硅、铝等物质,具有较高的反应活性,满足充当辅助胶凝材料的要求.然而,目前以 CSNGS 作为辅助胶凝材料的研究较少,且掺入 CSNGS 对水泥流变及力学性能的影响机理有待探讨.

鉴于此,本文采用机械球磨方式对 CSNGS 进行活化,研究 CSNGS 掺量(质量分数,文中涉及的掺量、水胶比等均为质量分数或质量比)对 CSNGS-水泥复合胶凝材料流变性能、力学性能及微观结构的影响规律和作用机理.

1 试验

1.1 原材料与配合比

CSNGS 来源于内蒙古大唐国际克什克腾旗煤制天然气公司,经机械球磨 45 min 后备用(球料比为 1.00:0.25、球磨机转速为 350 r/min、球磨 45 min 的 CSNGS 反应活性最高^[12-13]);水泥为大连小野田水泥有限公司产 P·O 42.5R 普通硅酸盐水泥;砂为厦门

ISO 水泥试验标准砂.水泥和 CSNGS 的化学组成如表 1 所示,两者的 X 射线衍射(XRD)图谱见图 1.由表 1 和图 1 可见,CSNGS 以硅铝酸盐为主,钙含量较低,其主要矿物晶体为石英(SiO_2)、赤铁矿(Fe_2O_3)、钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)、水钙沸石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)和钙黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)等,并包含一定数量的无定形物质.表 2 为水泥的主要物理性能指标.图 2 为水泥和 CSNGS 的粒径分布曲线.图 2 显示,CSNGS 粉末粒径小于水泥颗粒.CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆配合比如表 3 所示,CSNGS-水泥复合胶凝材料砂浆配合比与净浆相同,水胶比(m_w/m_b)为 0.5,砂胶比为 3.0.

表 1 水泥和 CSNGS 的化学组成
Table 1 Chemical compositions (by mass) of cement and CSNGS
Unit: %

Material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	MgO	K_2O	SO_3	Other
Cement	20.6	7.1	3.7	60.8	0.2	1.9	0.7	4.2	0.8
CSNGS	52.0	20.1	11.6	6.5	3.1	2.8	1.5	0.2	2.2

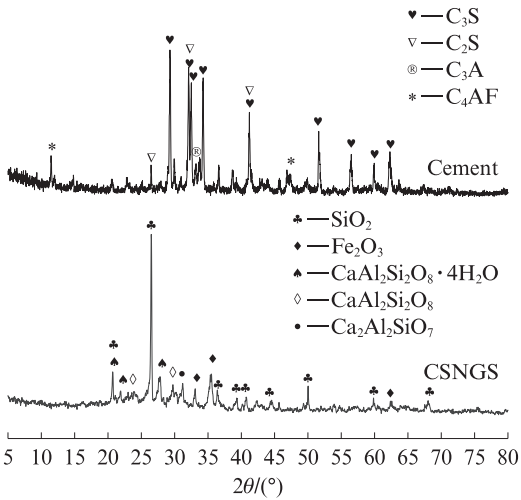


图 1 水泥和 CSNGS 的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of cement and CSNGS

表 2 水泥的主要物理性能指标
Table 2 Main physical property indices of cement

Setting time/min		Flexural strength/MPa		Compressive strength/MPa	
Initial	Final	3 d	28 d	3 d	28 d
168	229	5.5	7.7	28.1	51.7

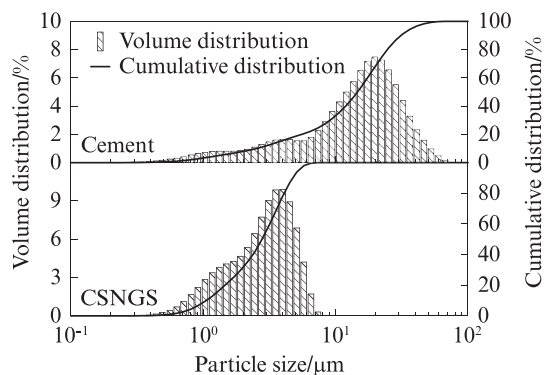


图2 水泥和CSNGS的粒径分布

Fig. 2 Particle size distributions of cement and CSNGS

表3 净浆配合比

Table 3 Mix proportion of slurry

Specimen code	w(cement)/%	w(CSNGS)/%	m_w/m_B
Cement	100.0	0	0.5
CSNGS2.5%	97.5	2.5	0.5
CSNGS5%	95.0	5.0	0.5
CSNGS10%	90.0	10.0	0.5
CSNGS20%	80.0	20.0	0.5
CSNGS30%	70.0	30.0	0.5
CSNGS40%	60.0	40.0	0.5
CSNGS50%	50.0	50.0	0.5
CSNGS75%	25.0	75.0	0.5

1.2 试验方法

本研究制备尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的砂浆试件,先置于(20±2)℃、相对湿度不小于90%的养护箱内养护24 h后脱模,再在室温下水养护至7、28、90 d,用于抗折、抗压强度试验;制备尺寸为40 mm×40 mm×40 mm的净浆试样,养护至28 d,用于微观分析。采用Brookfield RST-SST型旋转流变仪测试净浆的流变特性;采用D/Max 2400型XRD分析反应产物组成;采用Nova NanoSEM 450型场发射扫描电镜-能谱仪(SEM-ESD)研究反应产物的微观形貌和元素组成;采用EQUINOX55型傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试仪分析产物的官能团与化学键;采用SDTA851E型热重/差热同步热分析仪分析产物受热后的质量损失。

2 复合胶凝材料净浆的流变特性

Bingham流体模型是水泥等胶凝材料最常用的流变模型^[15-16],其表达式为:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

式中: τ 为剪切应力,Pa; τ_0 为屈服应力,Pa; η 为塑性黏度,Pa·s; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, s^{-1} 。

图3为CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的流变曲线。由图3可见:(1)复合胶凝材料的流变曲线与Bingham流体模型拟合度较高。(2)随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料净浆的屈服应力和塑性黏度先减后增,当CSNGS掺量为10.0%时,复合胶凝材料净浆的屈服应力和塑性黏度较未掺CSNGS的水泥净浆分别降低27.2%和35.0%,表明掺入适量CSNGS有助于减少新拌浆体的内摩阻力,提升其流动性。这可能与CSNGS的微集料效应有关:一方面,相比水泥颗粒,球磨后的CSNGS粒径更小,平均粒径约为水泥颗粒的1/5,当受到剪切应力时,CSNGS可以作为水泥颗粒流动的润滑剂;另一方面,CSNGS对水泥颗粒之间的孔隙能够有效填充,使得水泥中的孔隙水含量减少,自由水含量增加。(3)当CSNGS掺量大于20.0%时,复合胶凝材料净浆的屈服应力大于未掺CSNGS的水泥净浆;当CSNGS掺量大于30.0%时,复合胶凝材料净浆的塑性黏度大于未掺CSNGS的水泥净浆。这可能是多孔结构的CSNGS具有较强吸水性,当其掺量较大时,浆体中自由水含量下降,导致浆体摩阻力增加^[17]。

3 复合胶凝材料砂浆的力学性能

图4为CSNGS-水泥复合胶凝材料砂浆的抗折强度和抗压强度。

由图4可见:(1)当养护龄期为7 d时,随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料砂浆的抗折强度逐渐减小。(2)当养护龄期为28、90 d时,除CSNGS掺量为75.0%的试件外,其余各复合胶凝材料砂浆试件的抗折强度较未掺CSNGS的水泥砂浆均有一定程度提升,其中当CSNGS掺量为20.0%时,试件28 d抗折强度最大,较未掺CSNGS的水泥砂浆提高13.8%;当CSNGS掺量为30.0%时,试件90 d抗折强度最大,较未掺CSNGS的水泥砂浆提高11.6%。这表明,在水泥中掺入适量CSNGS有利于试件抗折强度的提升。

由图4还可见:(1)随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料砂浆抗压强度呈先增后减趋势。抗压强度增加可能是因为相比水泥颗粒,CSNGS粒径较小,更细的微粉可以对复合胶凝材料的孔隙进行有效填充。(2)复合胶凝材料砂浆的抗压强度变化趋势为基本持平(CSNGS掺量为0%~10%)、缓慢下降(CSNGS掺量为10%~50%)及快速下降(CSNGS掺量大于50%)。总体而言,当CSNGS掺量为0%~30%时,复合胶凝材料砂浆的28 d抗压强度能够达到未掺CSNGS水泥砂浆的88%以上。

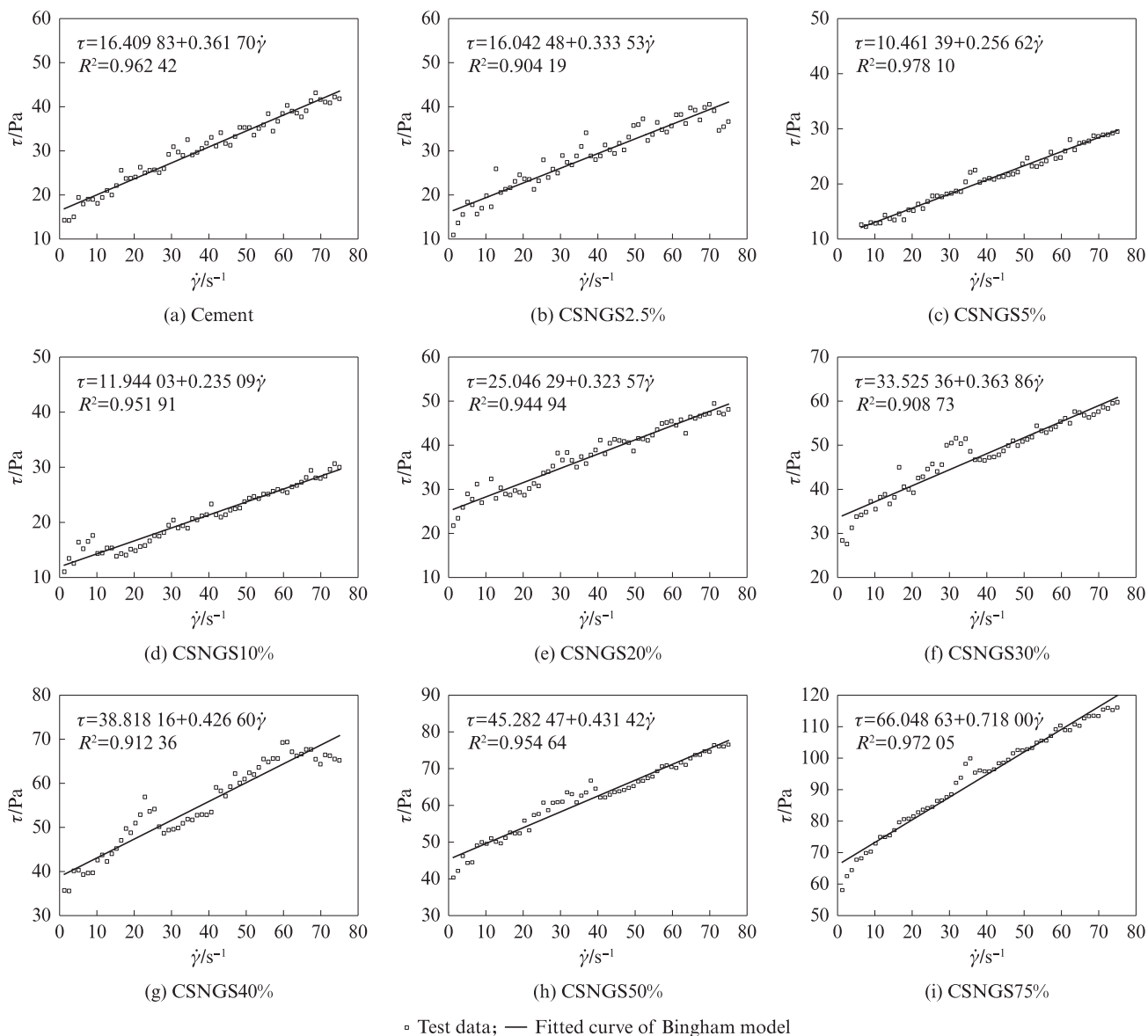


图3 CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的流变曲线

Fig. 3 Rheological curves of CSNGS-cement composite cementitious material slurry

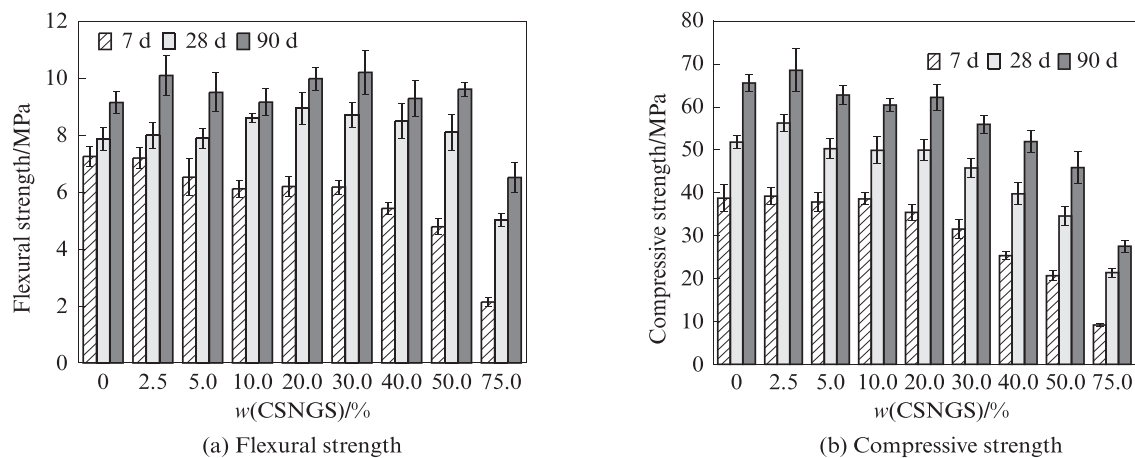


图4 CSNGS-水泥复合胶凝材料砂浆的抗折强度和抗压强度

Fig. 4 Flexural strength and compressive strength of CSNGS-cement composite cementitious material mortar

4 复合胶凝材料的微观性能

4.1 X射线衍射图谱分析

图5为养护龄期为28 d的CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的XRD图谱。由图5可见:(1)随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料试样中的石英(SiO_2)、钙矾石(Aft)、钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)、赤铁矿(Fe_2O_3)和钙黄长石($\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$)等结晶峰强度逐渐增加,表明掺入CSNGS有助于Aft生成。(2) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶峰强度逐渐降低,这是由于一方面, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 是水泥水化产物之一,掺入CSNGS后,水泥含量降低势必导致 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量降低;另一方面,随着CSNGS掺量的增加,在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作用下,反应体系中Al的含量增加,Al与 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 结合生成Aft,也降低了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量。由图5还可见,XRD图谱中 2θ 为 $20^\circ\sim 38^\circ$ 处有1个“馒头峰”,这是非晶态凝胶的特征峰^[12],随着CSNGS掺量的增加,该峰的面积逐渐减小,表明反应产物中凝胶含量减少,这主要是水泥含量降低所致。

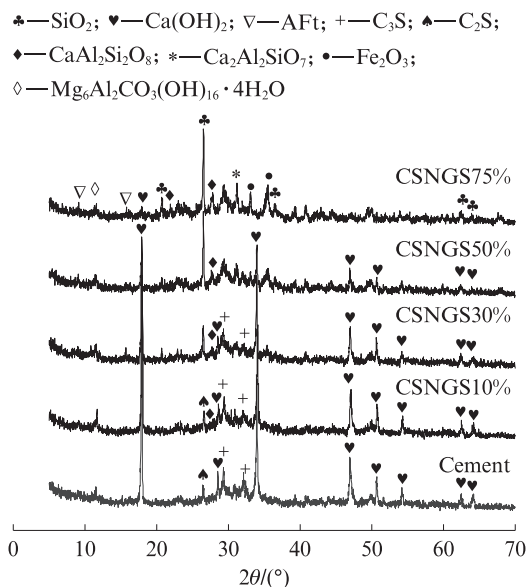


图5 CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的XRD图谱
Fig. 5 XRD patterns of CSNGS-cement composite cementitious material slurry

4.2 傅里叶变换红外光谱分析

图6为CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的FTIR光谱。由图6可见:(1)在 $455\sim 800\text{ cm}^{-1}$ 范围内的峰主要与 $\text{Si}(\text{Al})\text{—O}$ 平面外、平面内弯曲振动及 Si—O—Al 的伸缩振动有关^[18]。(2)与水泥净浆试样相比,复合胶凝材料净浆试样在 630 cm^{-1} 附近出现1个新峰,在 713 cm^{-1} 处峰强增加,以上2个位置的峰分别对应四配位的 AlO_4 的弯曲振动模式和Si被四配位Al(IV)

取代后 Si—O—Al 的弯曲振动模式,表明包含Al的水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶骨架已经形成^[19]。(3) $876, 1430\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰分别为 CO_3^{2-} 基团的面外弯曲振动模式和不对称伸缩振动模式^[18]。随着CSNGS掺量的增加,以上2处峰的强度降低,这表明虽然复合胶凝材料在水化过程中存在一定的碳化现象,但是随着CSNGS对 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消耗,反应产物中碳酸盐含量降低。(4)位于 $970\sim 980\text{ cm}^{-1}$ 附近的峰与 $\text{Si—O—Si}(\text{Al})$ 不对称伸缩振动有关^[20]。随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料在该处峰的位置有向高波段移动的趋势,这是因为反应产物中有C-A-S-H凝胶形成,导致凝胶体中的Al含量发生变化。(5)在 1110 cm^{-1} 附近的峰是 S—O 键伸缩振动模式的特征峰,与水泥中石膏及反应生成的Aft有关。(6)在 3644 cm^{-1} 处的峰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 有关^[21]。随着CSNGS掺量的增加,该峰的强度逐渐降低,与XRD分析结果相一致。

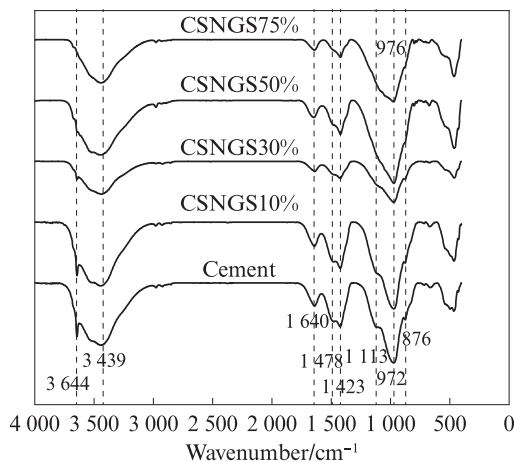


图6 CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的FTIR光谱
Fig. 6 FTIR spectra of CSNGS-cement composite cementitious material slurry

4.3 微观形貌和能谱分析

图7为CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的SEM照片及能谱分析(EDS)结果。由图7可见:随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料反应产物中凝胶含量逐渐减少,整体结构致密性降低;与未掺CSNGS的水泥净浆相比,复合胶凝材料净浆中Aft含量显著增加,与XRD分析结果一致。Aft可以对试件强度起到一定补强作用。这是因为:一方面,Aft对凝胶具有较好的连接作用,且随着Aft含量的增加,该连接作用逐渐增强;另一方面,存在于孔隙中的Aft可以对孔隙进行有效支撑和填充,降低材料基体的孔隙率。

由图7中的EDS结果可知:水泥净浆中凝胶的

主要组成元素为Ca、Si和O,表明反应产物中的凝胶主要为水化硅酸钙(C-S-H)凝胶;随着CSNGS掺量的增加,反应产物中凝胶的主要组成元素为Ca、Si、Al和O,与未掺CSNGS的水泥净浆相比,复合胶凝材料净浆中凝胶的 $n(\text{Ca})/n(\text{Al}+\text{Si})$ 、 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 、 $n(\text{Si})/n(\text{Al})$ 均有所降低,Al含量增加,这表明复合胶凝材料中的C-A-S-H凝胶含量增加.综上所述,AFt对凝胶的连接作用及C-A-S-H凝胶与C-S-H凝胶的相互填充作用,使得复合胶凝材料砂浆的抗折强度得以提升,且在大比例降低水泥含量的情况下,依然具备较高的抗压强度.

4.4 热重分析

图8为CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆在50~1 000 °C的热重-微商热重分析(TG-DTG)曲线.由图8可见:(1)在温度 t 为50~1 000 °C,CSNGS掺量为0%、10.0%、30.0%、50.0%和75.0%的复合胶凝材料总失重率分别为23.0%、22.1%、20.7%、19.4%和15.6%.5组试样的总失重率随着CSNGS掺量的增加而降低,表明掺入CSNGS使复合胶凝材料水化产物含量下降.(2)在50~250 °C,CSNGS掺量为0%、10.0%、30.0%、50.0%和75.0%的复合胶凝材料失重率分别为9.25%、9.30%、9.24%、8.72%和

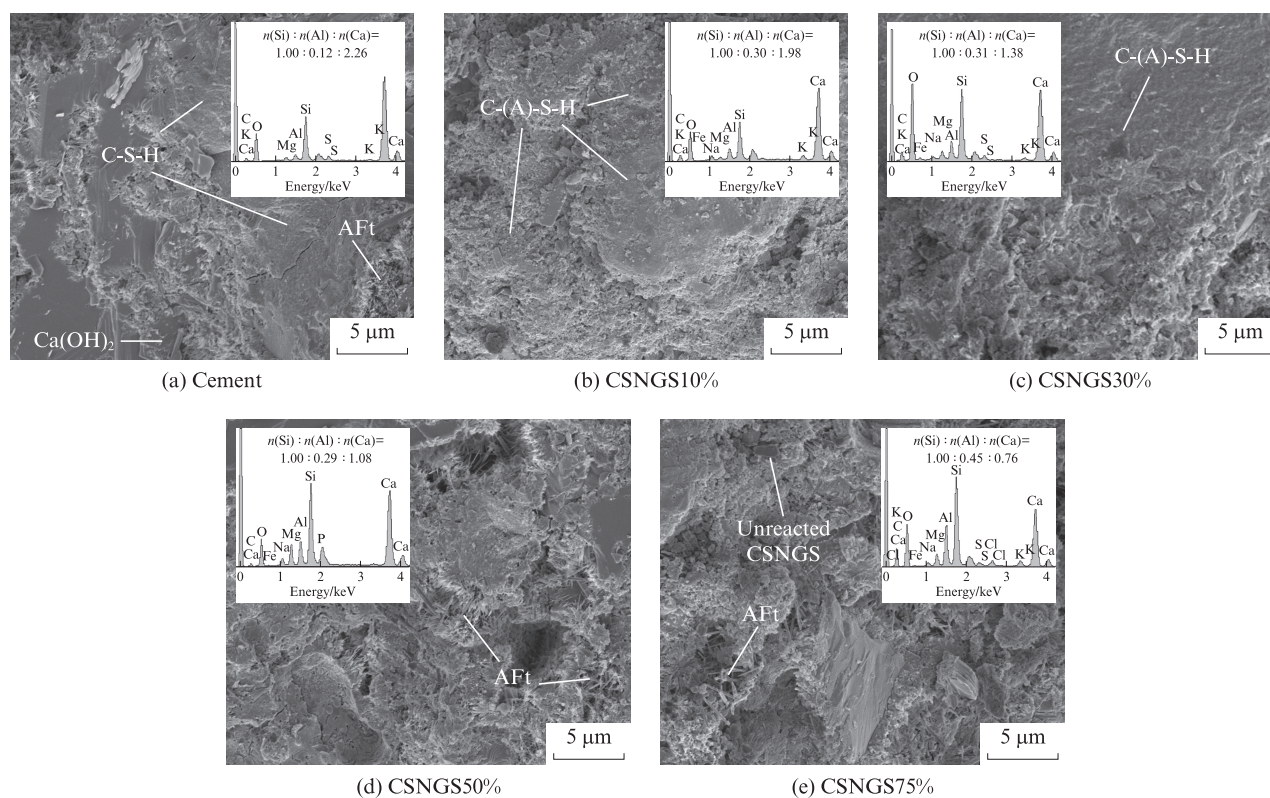


图7 CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆SEM照片和EDS分析

Fig. 7 SEM images and EDS analysis of CSNGS-cement composite cementitious material slurry

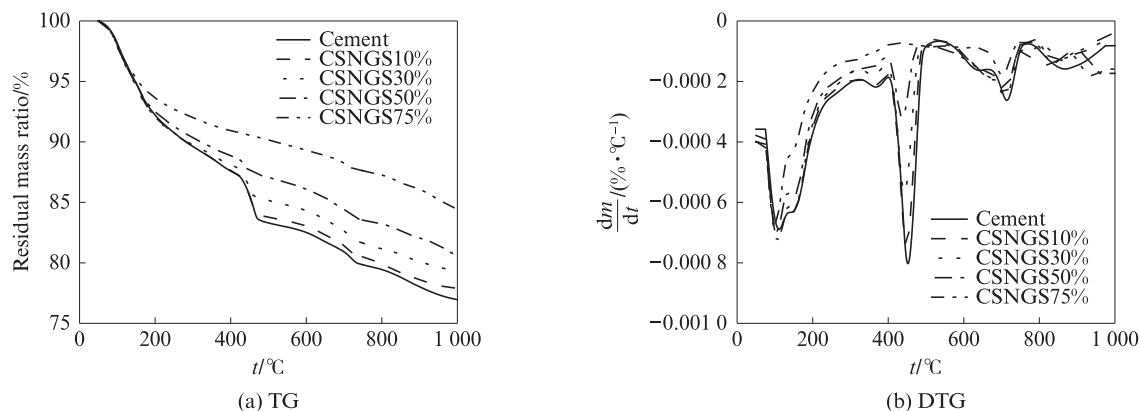


图8 CSNGS-水泥复合胶凝材料净浆的TG-DTG曲线

Fig. 8 TG-DTG curves of CSNGS-cement composite cementitious material slurry

7.30%。5组试样的失重率随着CSNGS掺量的增加先增大后减小,这是因为,CSNGS掺量增加后复合胶凝材料中水泥水化反应所生成的AFt和C-A-S-H凝胶含量增加^[22]。(3)在250~600℃,复合胶凝材料的质量损失与结构水、SiO₄四面体和AlO₄四面体中羟基的蒸发有关^[13]。其中,在250~400℃,各试样的TG曲线下下降趋势随着温度的升高变得较为平缓;在400~500℃,试样存在明显的质量损失,与Ca(OH)₂分解有关,5组样品失重率分别为4.29%、3.87%、2.95%、1.79%和0.77%。5组试样的失重率随着CSNGS掺量的增加而降低,与水泥含量的减少及CSNGS火山灰反应有关,该结论与XRD及FTIR结果一致。(4)5组试样在710℃附近存在较为明显的质量损失,与碳酸盐的分解有关^[22]。

5 结论

(1)煤制天然气残渣(CSNGS)-水泥复合胶凝材料净浆的流变曲线与水泥净浆流变曲线相似,均符合Bingham流体模型。掺入适量CSNGS有助于改善复合胶凝材料的流变性能。随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料净浆的屈服应力和塑性黏度先减小后增大。0%~20.0% CSNGS掺量对复合胶凝材料净浆的流变性能具有正效应。

(2)掺入适量CSNGS有助于提升复合胶凝材料砂浆的抗折强度。当CSNGS掺量为20.0%时,复合胶凝材料砂浆的28 d抗折强度为8.9 MPa,较未掺CSNGS的水泥砂浆增加13.8%;当CSNGS掺量为0%~30.0%时,复合胶凝材料砂浆的28 d抗压强度可达未掺CSNGS水泥砂浆的88%以上。

(3)随着CSNGS掺量的增加,复合胶凝材料反应产物中的凝胶和Ca(OH)₂含量逐渐减少,凝胶中 $n(\text{Ca})/n(\text{Al}+\text{Si})$ 、 $n(\text{Ca})/n(\text{Si})$ 、 $n(\text{Si})/n(\text{Al})$ 降低,钙矾石(AFt)含量显著增加,反应产物中有水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶生成。AFt对凝胶的连接作用及水化硅酸钙(C-S-H)凝胶与C-A-S-H凝胶的相互填充作用使复合胶凝材料强度得到一定保障。

参考文献:

- [1] 胡亚茹,杜永康,杨少锋,等. 煅烧凝灰岩对水泥水化产物和硬化体孔结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(1): 67-75.
HU Yaru, DU Yongkang, YANG Shaofeng, et al. Effect of calcined trass on the hydrates of cement and pore structure of hardened paste[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(1): 67-75. (in Chinese)
- [2] 刘心中, 邹冬冬, 丘琛辉, 等. RSM优化焚烧底灰胶凝材料及安性评价[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(2): 161-166, 173.
LIU Xinzong, HUAN Dongdong, QIU Chenhui, et al. RSM optimization of incineration bottom ash cementitious material and safety evaluation[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(2): 161-166, 173. (in Chinese)
- [3] MOHAMMADI A, RAMEZANIANPOUR A M. Investigating the environmental and economic impacts of using supplementary cementitious materials (SCMs) using the life cycle approach[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 79: 107934.
- [4] WANG T, ISHIDA T, GU R, et al. Experimental investigation of pozzolanic reaction and curing temperature-dependence of low-calcium fly ash in cement system and Ca-Si-Al element distribution of fly ash-blended cement paste[J]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121012.
- [5] SORIANO L, PAYA J, MONZO J, et al. High strength mortars using ordinary Portland cement-fly ash-fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC) [J]. Construction and Building Materials, 2016, 106: 228-235.
- [6] 汪保印, 张洁, 熊金伟, 等. 废弃石粉对混凝土的性能影响及碳排放分析[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(11): 1151-1157, 1206.
WANG Baoyin, ZHANG Jie, XIONG Jinwei, et al. Influence of waste stone powder on properties and carbon emissions of concrete [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(11): 1151-1157, 1206. (in Chinese)
- [7] 韩笑, 冯竟竟, 孙传珍, 等. 50℃养护下超细粉煤灰-水泥复合胶凝材料的性能研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3): 473-482.
HAN Xiao, FENG Jingjing, SUN Chuazhen, et al. Research on properties of ultrafine fly ash and cement cementitious materials under curing at 50℃[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 473-482. (in Chinese)
- [8] HE X Y, MA M Y, SU Y, et al. The effect of ultrahigh volume ultrafine blast furnace slag on the properties of cement pastes[J]. Construction and Building Materials, 2018, 189: 438-447.
- [9] CARVALHO V R, COSTA L C B, ELÓI F P D F, et al. Performance of low-energy steel slag powders as supplementary cementitious materials[J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 131888.
- [10] 程海丽, 杨飞华, 马保国, 等. 高铝煤矸石复合活化及其火山灰效应分析[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 248-254.
CHENG Haili, YANG Feihua, MA Baoguo, et al. Composite activation of high alumina coal gangue and analysis on its pozzolanic effect[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(2): 248-254. (in Chinese)
- [11] ALHARTHI Y M, ELAMARY A S, ABO-EL-WAFA W. Performance of plain concrete and cement blocks with cement partially replaced by cement kiln dust[J]. Materials, 2021, 14: 1-15.
- [12] SHA D, PAN B F, SUN Y R. A novel raw material for geopolymers: Coal-based synthetic natural gas slag[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121238.
- [13] SHA D, PAN B F, SUN Y R. Investigation on mechanical properties and microstructure of coal-based synthetic natural gas

- slag (CSNGS) geopolymer [J]. Construction and Building Materials, 2020, 259:119793.
- [14] SHA D, WANG F, WANG B M, et al. Microstructural and mechanical properties of a high-strength geopolymer based on coal-based synthetic natural gas slag cured at ambient temperature [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 430:139657.
- [15] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test from mini-cone test to Abrams cone test: Measurement of cement-based materials yield stress using slump tests[J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35(5):817-822.
- [16] WALLEVIK J E. Rheological properties of cement paste: Thixotropic behavior and structural breakdown[J]. Cement and Concrete Research, 2009, 39(1):14-29.
- [17] 沙东, 潘宝峰, 李亚超, 等. 碱激发煤制气残渣地质聚合物的制备及性能[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10):234-244.
SHA Dong, PAN Baofeng, LI Yachao, et al. Study on preparation and performance of alkali-activated coal-based synthetic natural gas slag geopolymer [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):234-244. (in Chinese)
- [18] XIANG J C, QIU J, P ZHAO Y Q, et al. Rheology, mechanical properties, and hydration of synergistically activated coal gasification slag with three typical solid wastes[J]. Cement and Concrete Composites, 2024, 147:105418.
- [19] ZHOU W, YAN C J, DUAN P, et al. A comparative study of high- and low- Al_2O_3 fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature [J]. Materials and Design, 2016, 95:63-74.
- [20] ISHWARYA G, SINGH B, DESHWAL S, et al. Effect of sodium carbonate/sodium silicate activator on the rheology, geopolymerization and strength of fly ash/slag geopolymer pastes [J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 97:226-238.
- [21] ZHANG W, HAO X S, WEI C, et al. Synergistic enhancement of converter steelmaking slag, blast furnace slag, Bayer red mud in cementitious materials: Strength, phase composition, and microstructure[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60:105177.
- [22] SOIN A V, CATALAN L J J, KINRADE S D. A combined QXRD/TG method to quantify the phase composition of hydrated Portland cements[J]. Cement and Concrete Research, 2013, 48:17-24.

(上接第 886 页)

- [34] TONGLY, XIONG Q X, ZHANG Z D, et al. A novel lattice model to predict chloride diffusion coefficient of unsaturated cementitious materials based on multi-typed pore structure characteristics[J]. Cement and Concrete Research, 2024, 176:107351.
- [35] MENG Z Z, LIU Q F, XIA J, et al. Mechanical-transport-chemical modeling of electrochemical repair methods for corrosion-induced cracking in marine concrete[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2022, 37(14):1854-1874.
- [36] KADDAH F, RANAIVOMANANA H, AMIRI O, et al. Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates: Investigation on the microstructure and transport properties at cement paste and mortar scales[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2022, 57:101885.
- [37] XIONG Q X, TONG L Y, ZHANG Z, et al. A new analytical method to predict permeability properties of cementitious mortars: The impacts of pore structure evolutions and relative humidity variations[J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 137:104912.
- [38] XIONG Q X, TONG L Y, MEFTAH F, et al. Improved predictions of permeability properties in cement-based materials: A comparative study of pore size distribution-based models[J]. Construction and Building Materials, 2024, 411:133927.
- [39] REN F Z, CHEN X Y, ZENG Q, et al. Effects of pure carbonation on pore structure and water permeability of white cement mortars[J]. Cement, 2022, 9:100040.
- [40] HREN M, BOKAN BOSILJKOV V, LEGAT A. Effects of blended cements and carbonation on chloride-induced corrosion propagation[J]. Cement and Concrete Research, 2021, 145:106458.