

文章编号:1007-9629(2025)03-0252-09

矿物掺合料对泡沫混凝土性能的影响

刘柏君^{1,2}, 张国防^{1,2,*}, 郑薇³, 应灵慧³, 陆小培³

(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; 3. 上海伟星新材料科技有限公司, 上海 201401)

摘要:开展了粉煤灰(FA)、矿渣微粉(GBFS)、提钛尾渣(TS)等 3 种矿物掺合料对泡沫混凝土性能影响的研究。结果表明:3 种掺合料均能在一定程度上提高泡沫混凝土的体积密度,其中 TS 的影响尤为明显;GBFS 会降低泡沫混凝土的流动度,但 TS 和低掺量 FA 能提高其流动度;3 种矿物掺合料在低掺量时均能提高泡沫混凝土的体积吸水率和毛细吸水率,但在较高掺量时,又降低了其体积吸水率和毛细吸水率,其中 TS 和 GBFS 的降低作用尤为明显;3 种矿物掺合料在高掺量时均能明显提高泡沫混凝土的抗压强度,其中 TS 的提升效果最好;FA 和 GBFS 提高了泡沫混凝土的 28 d 干燥收缩率,TS 则显著降低其 28 d 干燥收缩率;综合而言,FA 和 GBFS 最佳掺量范围均为 10%~15%,TS 为 5%~15%。

关键词:泡沫混凝土;粉煤灰;矿渣微粉;提钛尾渣;性能;最佳掺量

中图分类号:TU528.2

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.008

Influence of Mineral Admixtures on Performance of Foam Concrete

LIU Baijun^{1,2}, ZHANG Guofang^{1,2,*}, ZHENG Wei³, YING Linghui³, LU Xiaopei³

(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; 3. Shanghai Weixing New Materials Technology Co., Ltd., Shanghai 201401, China)

Abstract: A study was conducted to investigate the effects of three mineral admixtures—fly ash (FA), ground granulated blast furnace slag (GBFS), and titanium-extracted tailings (TS)—on the properties of foam concrete. The results indicated that all three admixtures could increase the bulk density of foam concrete to some extent, with TS showing the most significant effect. GBFS reduced the fluidity of foam concrete, while TS and low dosages of FA improved it. At low dosages, all three mineral admixtures increased the volumetric water absorption and capillary water absorption of foam concrete. However, at higher dosages, they reduced these properties, with TS and GBFS showing particularly notable reductions. At high dosages, all three admixtures significantly enhanced the compressive strength of foam concrete, with TS providing the most improvement. FA and GBFS increased the 28 d drying shrinkage of foam concrete, whereas TS significantly reduced it. Overall, the optimal dosage ranges for FA and GBFS were found to be 10%–15%, and for TS, 5%–15%.

Key words: foam concrete; fly ash; granulated blast furnace slag; titanium-extraction tailing slag; property; optimal content

泡沫混凝土具有水泥用量低、体积密度低、保温性能好等优点,是一种具有低碳足迹的轻质多孔水

收稿日期:2024-04-08; 修订日期:2024-04-26

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2018YFD1101003);上海市住房和城乡建设委员会科研项目(2020-001-009, 2023-005-001)

第一作者:刘柏君(1999—),男,吉林长春人,同济大学硕士生.E-mail:a19821240945@163.com

通讯作者:张国防(1977—),男,河南鹿邑人,同济大学副教授,博士生导师,博士.E-mail:zgftj@sina.com

泥基材料^[1-2]. 由于具有较高的经济效益和环境效益^[3-4],粉煤灰、矿渣微粉、硅灰等矿物掺合料已广泛用于泡沫混凝土,并起到优化性能的作用^[5-7]. 研究表明,粉煤灰能提高泡沫混凝土的流动度及28 d抗压强度^[8],但其掺量较大也会使得流动度和抗压强度有所降低^[9];矿渣微粉能提高泡沫混凝土的体积密度和流动度,但会降低其强度和体积稳定性^[10]. 提钛尾渣是含钛高炉矿渣提钛后的残渣,具有较高的潜在胶凝活性,对水泥早期水化具有促进作用^[12-13];但由于氯离子含量较高,难以用于水泥混凝土尤其是钢筋混凝土^[11],因此,已有研究也很少涉及其在泡沫混凝土中的应用. 硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-石膏三元胶凝体系具有硬化快、早期强度高、流动性好等优势,已用于制备泡沫混凝土^[14-15]. 然而已有研究主要聚焦于矿物掺合料对硅酸盐水泥基泡沫混凝土性能的影响,鲜有研究报道矿物掺合料对该三元胶凝体系泡沫混凝土性能的影响.

鉴于此,本研究以硅酸盐水泥-硫铝酸盐水泥-脱硫石膏三元胶凝体系为胶凝材料,掺入发泡剂、稳

泡剂及减水剂,基于物理发泡法制备泡沫混凝土;同时研究了粉煤灰、矿渣微粉和提钛尾渣等3种矿物掺合料及其掺量(质量分数,文中涉及的掺量、比值等均为质量分数或质量比)变化对该三元胶凝体系泡沫混凝土关键性能的影响规律,以期为其在该三元胶凝体系泡沫混凝土中的应用提供一定的理论和技术支撑.

1 试验

1.1 原材料

胶凝材料包括P·O 42.5 硅酸盐水泥(OPC)、52.5 级硫铝酸盐水泥(CSA)和半水脱硫石膏(FDG). 矿物掺合料包括粉煤灰(FA)、矿渣微粉(GBFS)和提钛尾渣(TS). 上述原材料的化学组成及平均颗粒尺寸如表1所示,颗粒尺寸分布如图1所示. 化学添加剂包括高分子复合发泡剂SDK(pH值为8.5,稀释40倍时的发泡倍数为22,1 h泌水率为24.5%)、稳泡剂CE(黏度为40 000 mPa·s)和聚羧酸减水剂PCE. 拌和水为自来水.

表1 胶凝材料和矿物掺合料的化学组成与平均粒径
Table 1 Chemical compositions (by mass) and mean particle size of binders and mineral admixtures

Sample	Chemical composition/%										Mean particle size/ μm
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	TiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	
OPC	18.24	3.99	67.72	2.98	3.31	0.20	2.17	0.74	0.10		19.25
CSA	8.74	33.91	43.42	1.64	7.92	1.49	1.77	0.48	0.06		9.70
FDG	1.24	0.62	42.20	0.23	54.28	0.04	0.44	0.07	0.02		21.04
FA	42.50	31.80	9.04	3.78	1.52	1.13	0.76	0.60	0.50	0.37	30.05
GBFS	28.70	11.90	43.40	0.24	1.93	0.61	6.36	0.30	0.01		7.54
TS	40.30	29.00	9.44	3.96	1.59	1.19	0.73	0.60	0.47	0.36	34.95

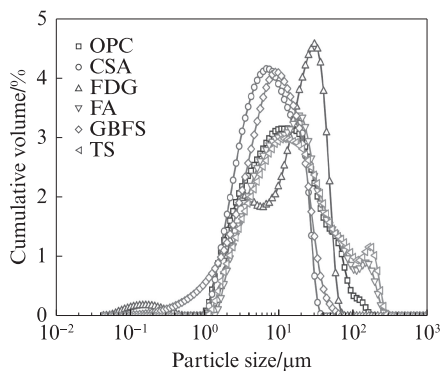


图1 胶凝材料和矿物掺合料的颗粒分布
Fig. 1 Particle size distributions of binders and mineral admixtures

1.2 配合比

泡沫混凝土的配合比如表2所示. 3种矿物掺合料分别以5%、10%、15%及20%等质量替代OPC;

发泡剂、稳泡剂和减水剂掺量分别为1.60%、0.16%和0.40%(以三元胶凝体系质量计);水胶比为0.76. 未掺矿物掺合料的泡沫混凝土为基准组.

1.3 样品制备

按照如下步骤制备泡沫混凝土:(1)向搅拌桶中加入胶凝材料、发泡剂、稳泡剂、减水剂等粉料,低速搅拌60 s得到干混粉料;(2)向干混粉料中加水,先低速搅拌2 min,然后高速搅拌发泡4 min,得到泡沫混凝土浆体;(3)浇筑泡沫混凝土浆体至不同模具中进行成型.

1.4 试验方法

泡沫混凝土拌和物的流动度测试参照JC/T 985—2017《地面用水泥基自流平砂浆》“7.3流动度”试验进行,表观密度(以下简称新拌体积密度)测试参照JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》

表2 泡沫混凝土的配合比
Table 2 Mix proportions of foam concrete

Sample No.	OPC	CSA	FDG	FA	GBFS	TS
Blank	2 380	85	35	0	0	0
FA05	2 261	85	35	119	0	0
FA10	2 142	85	35	238	0	0
FA15	2 023	85	35	357	0	0
FA20	1 904	85	35	476	0	0
GBFS05	2 261	85	35	0	119	0
GBFS10	2 142	85	35	0	238	0
GBFS15	2 023	85	35	0	357	0
GBFS20	1 904	85	35	0	476	0
TS05	2 261	85	35	0	0	119
TS10	2 142	85	35	0	0	238
TS15	2 023	85	35	0	0	357
TS20	1 904	85	35	0	0	476

“5 表观密度试验”进行。泡沫混凝土的干密度(或称干体积密度)和抗压强度测试按照 JG/T 266—2011《泡沫混凝土》进行;硬化体积密度参照 GB/T 9966.3—2020《天然石材试验方法 第3部分:吸水率、体积密度、真密度、真气孔率试验》进行。泡沫混凝土的软化系数和体积吸水率测试分别参照 GB/T 20473—2021《建筑保温砂浆》“6.9 软化系数”和“6.10 体积吸水率”试验进行。干燥收缩率测试参照 GB/T 29417—2012《水泥砂浆和混凝土干燥收缩开裂性能试验方法》“8 收缩应力试验”进行。毛细孔吸水率测试参照 ISO 15148—2002 *Hygrothermal Performance of Building Materials and Products-Determination of Water Absorption Coefficient by Partial Immersion* 进行,样品尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm;测试时将样品 4 个侧面用石蜡密封,并于室温下将样品成型面浸入水中,浸没深度为 2~5 mm,在规定时间点称重记录总毛细吸水质量,计算得到毛细孔吸水率。

泡沫混凝土的硬化体积密度、干密度、吸水率、抗压强度测试用样品均在 (23±2)℃、相对湿度 (95±5)% 的条件下养护至试验龄期。

2 结果与讨论

2.1 矿物掺合料对泡沫混凝土体积密度的影响

3 种矿物掺合料对泡沫混凝土体积密度(包括新拌体积密度、硬化体积密度和干密度)的影响如图 2 所示。由图 2 可见,就体积密度而言,新拌体积密度最大,其次是硬化体积密度,干密度最小;且随着矿物掺合料掺量的增大,3 种体积密度的变化趋势一致。

因此,以干密度为例,分析了矿物掺合料掺量变化对体积密度的影响。

基准组泡沫混凝土的干密度为 457 kg/m³。随着 FA 和 GBFS 掺量的增大,泡沫混凝土干密度呈现出先微降而后逐渐增大的趋势(图 2(a)、(b))。相较于基准组,FA 和 GBFS 掺量为 5% 时,泡沫混凝土的干密度分别降低了 10、38 kg/m³;之后随着二者掺量的增大,干密度逐渐增大;当掺量增至 20% 时,干密度分别增大了 92、40 kg/m³。总体而言,FA 和 GBFS 对泡沫混凝土干密度的影响相对较小。

TS 使得泡沫混凝土的干密度显著增大,且干密度随其掺量增大而增大(图 2(c))。相较于基准组,TS 掺量 10% 的泡沫混凝土干密度增大了 69 kg/m³,TS 掺量 20% 时干密度剧增了 529 kg/m³。以上分析表明,矿物掺合料的种类和掺量对泡沫混凝土干密度的影响存在明显差异,粉煤灰和矿渣微粉的影响相对较小,提钛尾渣高掺量时导致干密度显著增大。

2.2 矿物掺合料对泡沫混凝土拌和物流动度的影响

矿物掺合料对泡沫混凝土拌和物流动度的影响如图 3 所示。由图 3 可见:(1)随着 FA 掺量的增大,泡沫混凝土流动度先增大后降低(图 3(a)),在 FA 掺量为 10% 时达到最大值 172 mm,在 20% 时降至 120 mm,显著低于基准组(流动度为 152 mm)。这一现象的主要归因于 FA 颗粒的滚珠效应,使泡沫混凝土流动度增大^[16];同时,FA 颗粒也能提供大量固相位点,有利于提升泡沫稳定性及内聚力,降低其流动度^[9,17-18]。由此可知,低掺量时,FA 颗粒的滚珠效应大于固相位点作用,使得泡沫混凝土流动度增大;高掺量时,正好相反,导致泡沫混凝土流动度降低。(2)泡沫混凝土的流动度随 GBFS 掺量的增大而逐渐降低,且降幅逐渐增大(图 3(b))。相较于基准组,掺 10% GBFS 的泡沫混凝土其流动度降低了 8 mm,掺 20% GBFS 时则降低了 48 mm,达到最低值(104 mm)。这一规律可能与 GBFS 的颗粒形貌和粒径大小有关。GBFS 颗粒为多面体^[19],且其粒径很小(本试验中 GBFS 的平均粒径尺寸仅为 7.54 μm),因此颗粒润湿所需水量较大,从而导致泡沫混凝土在水胶比固定的情况下流动度降低。(3)掺入 TS 显著提高了泡沫混凝土的流动度(图 3(c)),但 TS 掺量的变化对流动度的影响较小,流动度保持在 185 mm 以上。TS 能显著改善泡沫混凝土的流动度,这可能是由于 TS 颗粒较大(具有最大的平均粒径尺寸),使得颗粒润湿需水量较小,从而在水胶比固定的情况下流动度显著提高;同时,TS 高掺量时泡沫混凝土的泡沫含量减少,这也会使得泡沫内聚力降低,进而提升泡沫混凝土的流动度。但 TS 颗粒具有

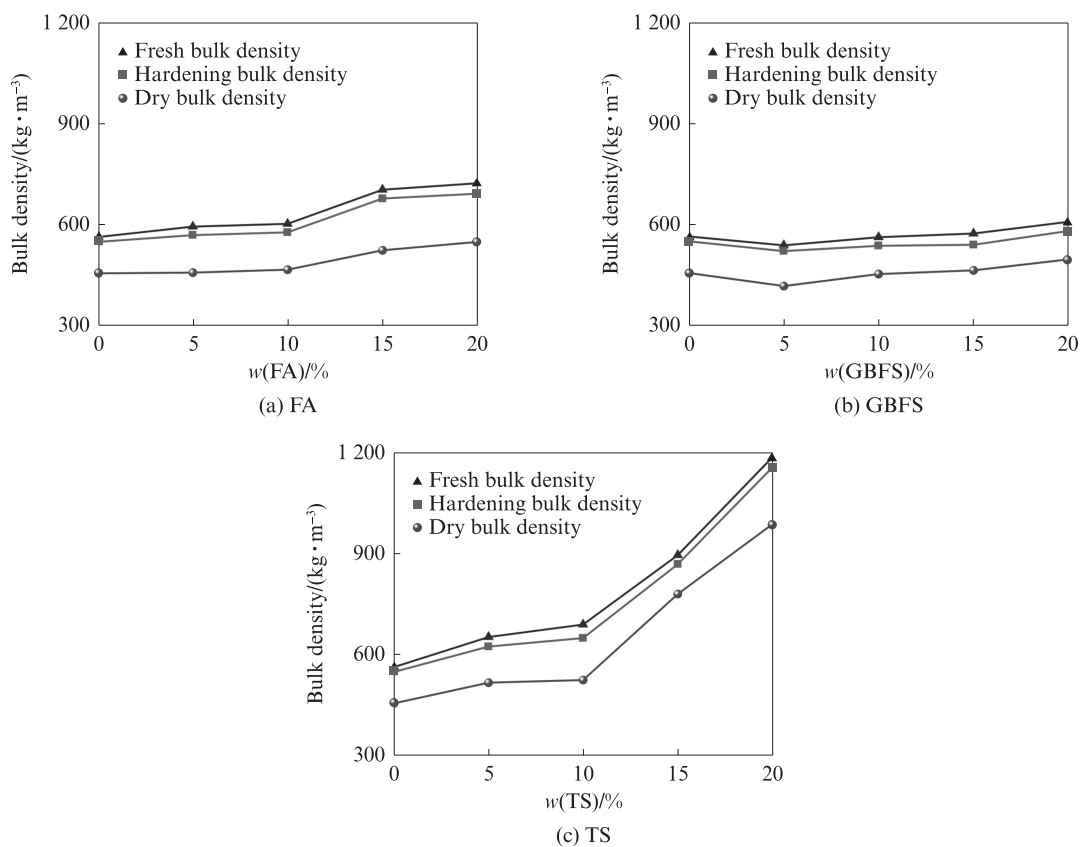


图2 矿物掺合料对泡沫混凝土体积密度的影响

Fig. 2 Effect of mineral admixtures on bulk density of foam concrete

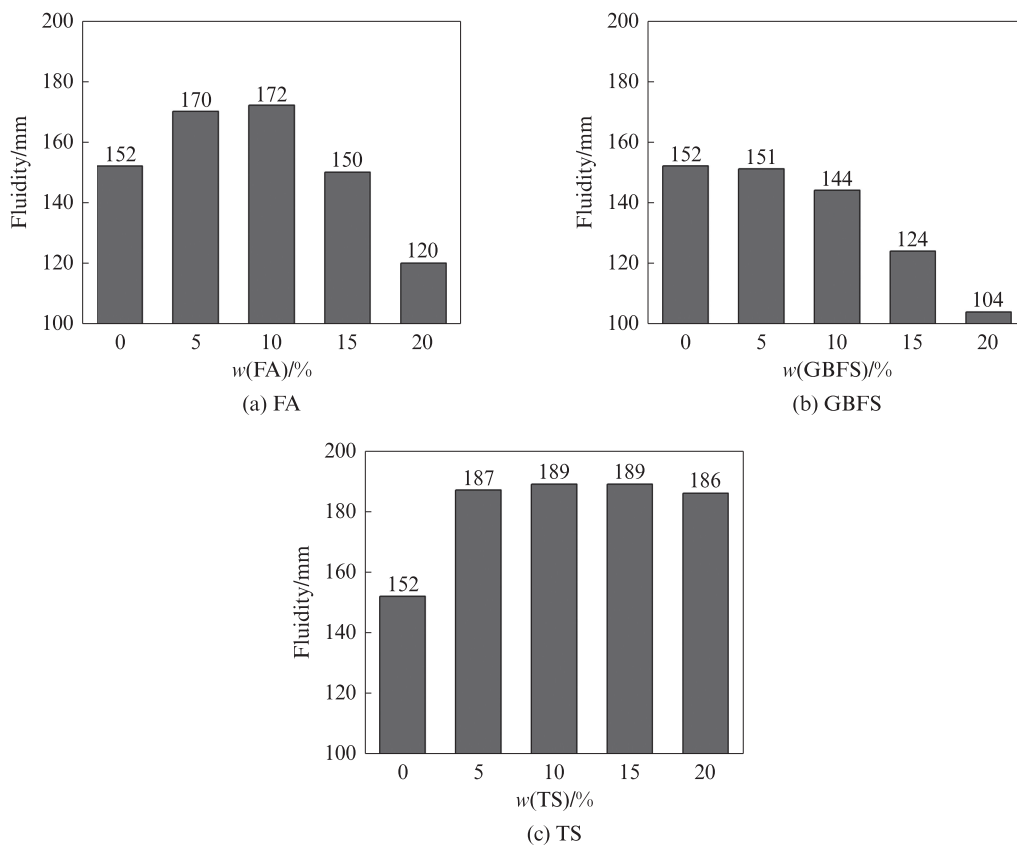


图3 矿物掺合料对泡沫混凝土流动度的影响

Fig. 3 Effect of mineral admixtures on fluidity of foam concrete

粗糙多孔结构,掺量较大时可能会提高其与其他组成颗粒之间的摩擦阻力^[12],从而阻碍泡沫混凝土流动度进一步增大.以上分析表明,矿物掺合料种类和掺量对泡沫混凝土流动度的影响存在显著差异;低掺量的粉煤灰有利于提高泡沫混凝土的流动度;随着掺量的增大,矿渣微粉能显著降低泡沫混凝土的流动度;提钛尾渣能显著增大泡沫混凝土的流动度,但其掺量变化的影响很小.

2.3 矿物掺合料对泡沫混凝土体积吸水率及软化系数的影响

矿物掺合料对泡沫混凝土体积吸水率和软化系数的影响如图4所示.由图4(a)可见:随着矿物掺合料掺量的增大,泡沫混凝土体积吸水率均呈现出先增大而后降低的趋势;同掺量情况下,掺加FA的泡

沫混凝土体积吸水率最大.具体而言,对于FA,掺量为10%时体积吸水率达最大值(为41.1%),FA掺量增至20%时,体积吸水率略低于基准组(为25.2%);对于GBFS,掺量为5%时,体积吸水率高于基准组,之后随GBFS掺量增大而逐渐降低,GBFS掺量为10%时与基准组相当,GBFS掺量为20%时降至仅16.4%;掺加TS的泡沫混凝土体积吸水率最小,TS掺量为10%以内时体积吸水率略高于基准组,TS掺量为15%和20%时体积吸水率显著降低(TS掺量为20%时仅为13.7%).以上分析表明,矿物掺合料的种类和掺量对泡沫混凝土体积吸水率的影响也存在显著差异:粉煤灰能提高其体积吸水率,掺量在10%以上时矿渣微粉能降低体积吸水率,提钛尾渣能降低体积吸水率,尤其是高掺量情况下.

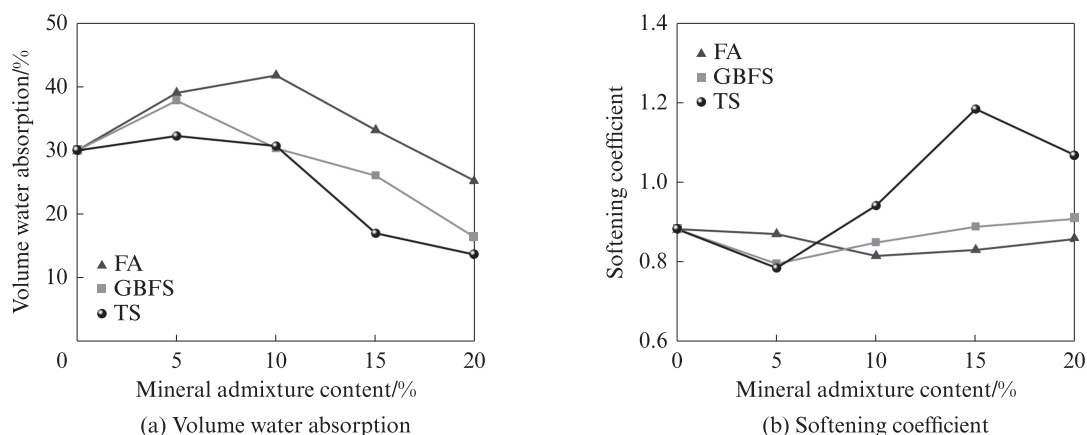


图4 矿物掺合料对泡沫混凝土体积吸水率和软化系数的影响

Fig. 4 Effect of mineral admixtures on volume water absorption and softening coefficient of foam concrete

软化系数能表征泡沫混凝土的耐水性,软化系数越高,耐水性越好,反之亦然.由(图4(b))可见:(1)基准组软化系数为0.88.低掺量时,FA和GBFS均一定程度上降低了泡沫混凝土的软化系数,其中FA掺量10%和GBFS掺量5%时软化系数分别降至0.81和0.79;但随二者掺量增大,软化系数有所提高,FA和GBFS掺量均为20%时分别提高至0.85和0.91.分析表明,掺加FA的泡沫混凝土软化系数始终低于基准组,FA一定程度上降低了泡沫混凝土耐水性;GBFS在低掺量时也降低了泡沫混凝土软化系数和耐水性,但在高掺量时能略微提高其耐水性.(2)TS掺量5%时软化系数明显降低,之后随其掺量增大,软化系数显著提高,TS掺量为15%和20%时软化系数均超过1.0.这表明,低掺量TS不利于提高泡沫混凝土耐水性,掺量10%以上时TS能显著提高泡沫混凝土耐水性.TS在较高掺量时能显著提高泡沫混凝土的耐水性,这可能归因于泡沫混凝土在TS高掺量时具有较

高的密实程度和较低的孔隙率.

2.4 矿物掺合料对泡沫混凝土毛细吸水率的影响

矿物掺合料对泡沫混凝土毛细吸水率的影响如图5所示.由图5可见:(1)低掺量(5%)时,3种矿物掺合料均提高了泡沫混凝土的毛细吸水率;随着3种矿物掺合料掺量的增大,毛细吸水率逐渐降低,这与体积吸水率的变化趋势类似.(2)当FA、GBFS、TS的掺量分别超过20%、10%、15%时,泡沫混凝土毛细吸水率已低于基准组.(3)在掺量相同的情况下,矿物掺合料对泡沫混凝土毛细孔吸水率影响的大小顺序是FA>TS>GBFS.毛细孔吸水率反映了连通毛细孔数量,毛细孔吸水率越大,连通毛细孔越多,反之亦然^[20].以上分析表明,矿物掺合料的种类和掺量对泡沫混凝土毛细孔吸水率和连通毛细孔数量的影响存在着显著差异:低掺量时,3种矿物掺合料导致泡沫混凝土毛细孔吸水率和毛细孔数量增大;高掺量时,3种矿物掺合料有利于降低毛细孔吸水率和连通毛细孔数量.

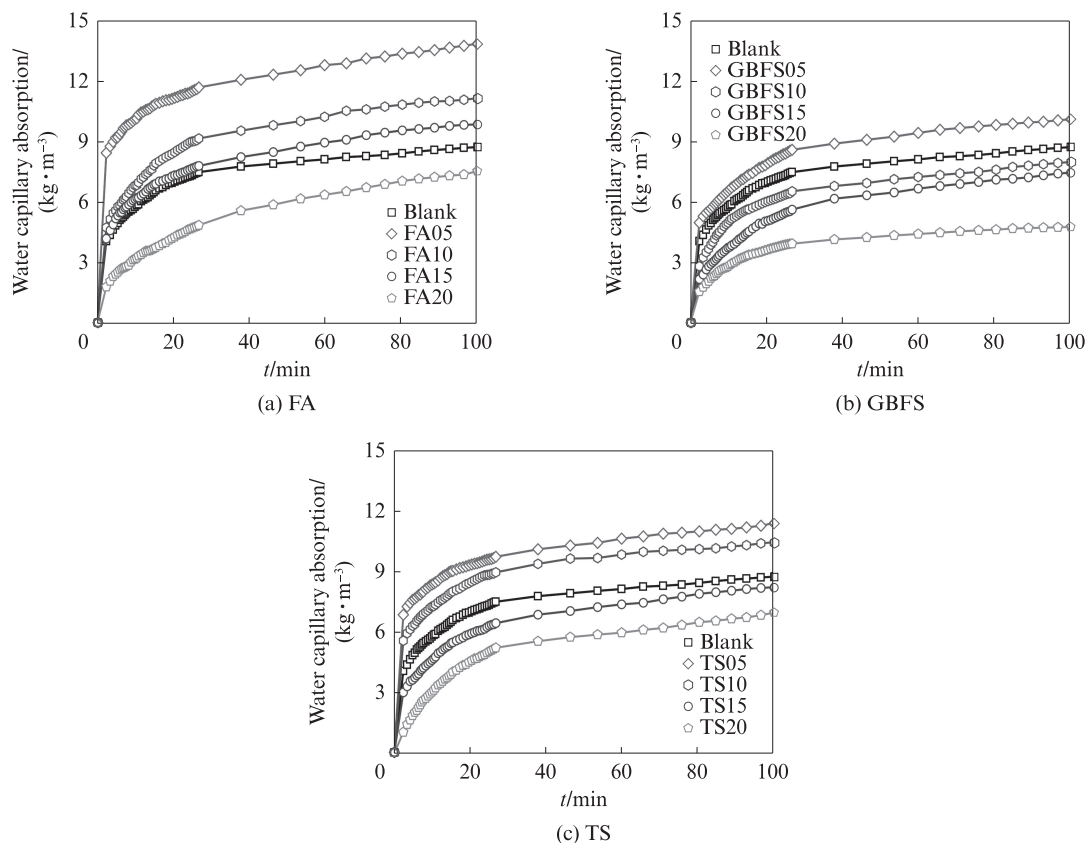


图5 矿物掺合料对泡沫混凝土毛细吸水率的影响

Fig. 5 Effect of mineral admixtures on water capillary absorption of foam concrete

2.5 矿物掺合料对泡沫混凝土抗压强度的影响

矿物掺合料对泡沫混凝土抗压强度的影响如图6所示.由图6(a)可见,基准组1、3、7、28 d抗压强度分别为0.17、0.5、0.71、0.88 MPa.掺入FA提高了泡沫混凝土的早期抗压强度,且强度随FA掺量的增大而增大.但随着养护龄期的延长,FA掺量5%和10%的泡沫混凝土7、28 d抗压强度增长相对缓慢,且低于基准组.FA掺量在15%以上时,泡沫混凝土各龄期的抗压强度均明显高于基准组,FA掺量20%时28 d抗压强度已达1.58 MPa.FA能显著提升泡沫混凝土抗压强度,这可能与FA颗粒的填充效应^[17],以及FA提供固相位点稳定泡沫进而改善孔隙结构有关^[22].一般而言,掺入FA会降低水泥基材料早期水化反应程度和抗压强度^[21].

由图6(b)可见,随着GBFS掺量的增大,泡沫混凝土各龄期抗压强度呈现先降低后增大的趋势.相较于基准组试件,GBFS掺量为5%和10%的各龄期试件抗压强度均略有降低.其中,GBFS掺量5%时的3、7、28 d抗压强度分别降低了0.17、0.16、0.14 MPa.GBFS掺量增至15%时,泡沫混凝土各龄期抗压强度与基准组基本持平.GBFS掺量增至20%时,泡沫混凝土各龄期抗压强度已明显高于基准组.这

表明,GBFS在高掺量情况下有利于提高泡沫混凝土抗压强度.研究^[23-24]表明,GBFS在水泥基材料中能生成钙硅比较低的水化硅(铝)酸钙(C-(A)-S-H),且具有颗粒填充效应,有利于提高抗压强度.因此,高掺量GBFS能提高泡沫混凝土的抗压强度.

由图6(c)可见,TS显著提升了泡沫混凝土的抗压强度,且随着TS掺量的增大,抗压强度增长尤为显著.相较于基准组,TS掺量为5%、10%时1 d抗压强度增幅分别达0.31、0.43 MPa.但TS掺量为5%和10%时泡沫混凝土体积密度未发生明显提升,由此可推断低掺量TS能提升抗压强度可能与TS对孔隙结构的优化有关.当TS掺量20%时,28 d抗压强度剧增至4.22 MPa,这应与泡沫混凝土体积密度剧增有关.水泥基材料体积密度增大意味着孔隙率降低,从而有利于提高抗压强度^[25-26].

2.6 矿物掺合料对泡沫混凝土干燥收缩率的影响

矿物掺合料对泡沫混凝土干燥收缩率的影响如图7所示.由图7可见:(1)掺入FA增大了泡沫混凝土的干燥收缩率,且随着FA掺量的增大,干燥收缩率呈现先增大后降低的趋势.其中,FA掺量为15%时干燥收缩率最大(28 d时达0.693%).(2)随着GBFS掺量的增大,泡沫混凝土的28 d干燥收缩率也

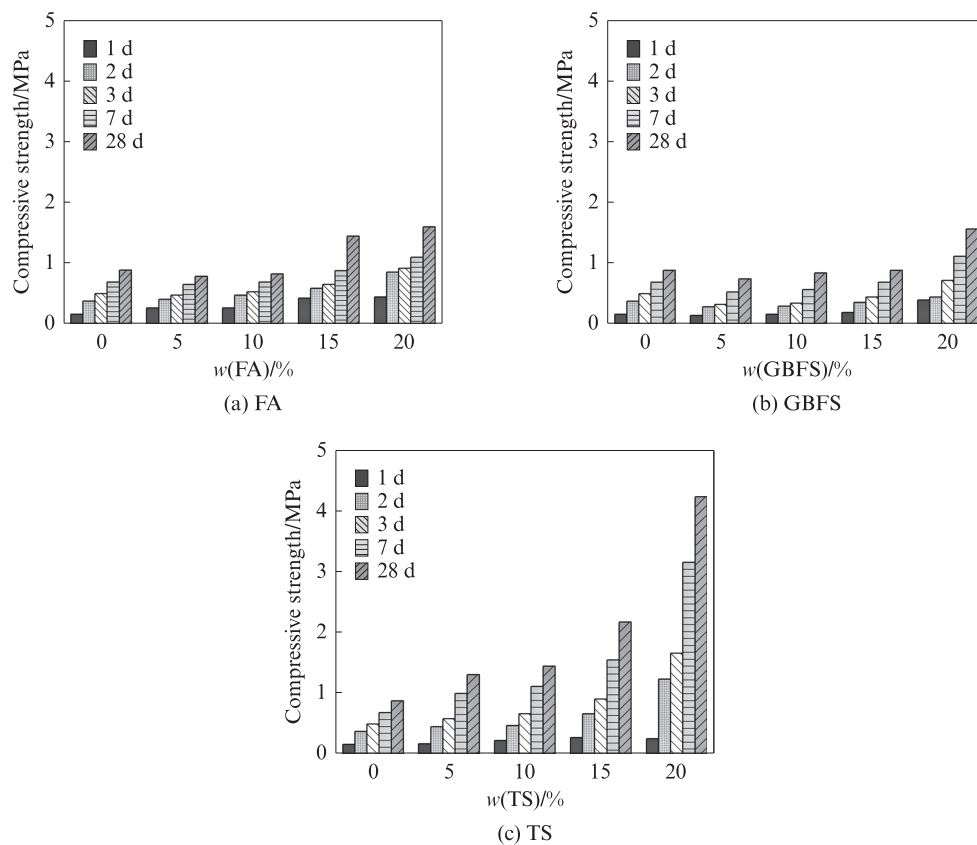


图6 矿物掺合料对泡沫混凝土抗压强度的影响

Fig. 6 Effect of mineral admixtures on compressive strength of foam concrete

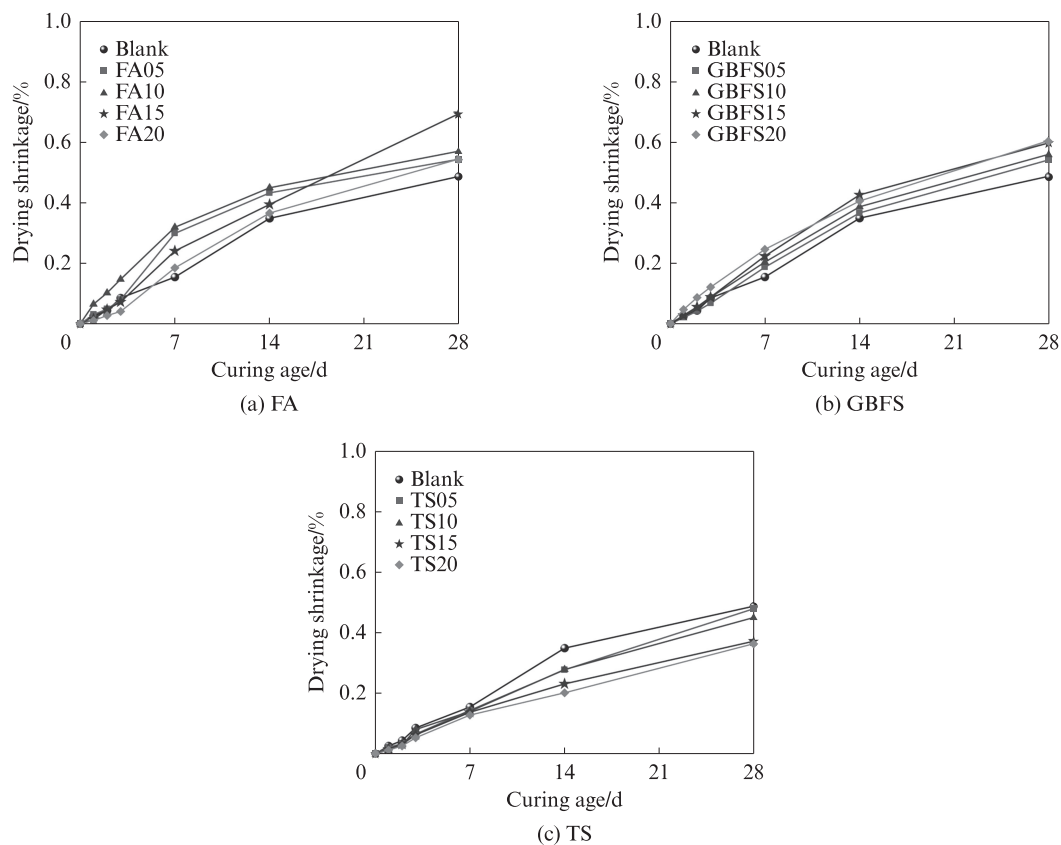


图7 矿物掺合料对泡沫混凝土干燥收缩率的影响

Fig. 7 Effect of mineral admixtures on drying shrinkage of foam concrete

逐渐增加,但整体增幅较小.相较于基准组,GBFS掺量20%时28 d干燥收缩率仅增大了0.11%.(3)TS的掺入降低了泡沫混凝土的干燥收缩率,且干燥收缩率随其掺量增大而逐渐降低.相较于基准组,TS掺量5%和10%时泡沫混凝土28 d干燥收缩率分别降低了0.01%和0.03%,掺量20%时28 d干燥收缩率降幅达0.12%.这说明,TS在低掺量时对干燥收缩率的影响相对较小,高掺量TS则有利于降低干燥收缩率.

水泥基材料的干燥收缩率与毛细孔失水速率密切相关^[27],毛细孔失水速率越快,干燥收缩率就越大.前面的毛细孔吸水率测试结果表明,FA和GBFS使得泡沫混凝土连通毛细孔增多,这会导致毛细孔失水速率增大,从而导致干燥收缩率增大.TS使得干燥收缩率降低,除了与毛细孔失水速率降低有关,还与泡沫混凝土体积密度显著增大所致密实度提高有关.

综上所述,3种矿物掺合料均不同程度地影响到泡沫混凝土的性能.FA掺量5%~10%会使得泡沫混凝土具有较低的体积密度和较高的流动度,但掺量5%时体积吸水率和毛细吸水率过高,抗压强度偏低;FA掺量15%~20%使得泡沫混凝土具有较低的体积吸水率、毛细吸水率和干燥收缩率,以及较高的抗压强度和软化系数,但FA掺量为20%时流动性能较差.因此,FA在泡沫混凝土中的最佳掺量为10%~15%.

GBFS掺量增大使得泡沫混凝土的体积密度略微提升,流动度逐渐降低,抗压强度先降低后增大;GBFS掺量10%时,泡沫混凝土能维持较高的流动度和抗压强度,具有较低体积吸水率和毛细吸水率;GBFS掺量增至15%时,泡沫混凝土体积吸水率和毛细吸水率进一步降低,但流动度偏低.综合来看,GBFS在泡沫混凝土中的最佳掺量也为10%~15%.

TS能够显著增大泡沫混凝土的流动度,且掺量变化对流动度影响较小;TS掺量5%~10%使得泡沫混凝土具有较低体积密度,较高的抗压强度,但体积吸水率和毛细吸水率也较高;TS掺量15%~20%虽能降低体积吸水率和毛细吸水率,但会使得体积密度显著增大,尤其是20%时.综合而言,TS最佳掺量为5%~15%.

3 结论

(1)粉煤灰(FA)、矿渣微粉(GBFS)及提钛尾渣(TS)对泡沫混凝土的性能具有显著而不同的影响.FA和GBFS未明显改变泡沫混凝土的体积密度,而TS使其体积密度明显增大;TS和低掺量FA能提高泡沫混凝土的流动度,而GBFS和高掺量FA明显降

低其流动度.

(2)FA、GBFS和TS掺量增大使得泡沫混凝土的体积吸水率和毛细吸水率先增大而后降低,但3者影响程度不同:FA使得泡沫混凝土具有最高的体积吸水率和毛细吸水率,最低的软化系数和耐水性;高掺量的GBFS使得体积吸水率和毛细吸水率显著降低,软化系数和耐水性显著提升;高掺量的TS使得泡沫混凝土具有最低的体积吸水率和毛细吸水率,以及最优的耐水性.

(3)随着FA掺量的增大,泡沫混凝土的抗压强度尤其是早期抗压强度明显提高;低掺量GBFS会降低其抗压强度,但随其掺量增大,抗压强度有所提升;TS能显著提升泡沫混凝土抗压强度,且随其掺量增大而迅速提升.FA和GBFS均使得泡沫混凝土干燥收缩率有所提高,且掺量增大将加剧干燥收缩现象;TS能降低泡沫混凝土的干燥收缩率,且随着其掺量的增大,泡沫混凝土干燥收缩率逐渐降低,并具有良好的体积稳定性.

(4)3种矿物掺合料在泡沫混凝土中的最佳掺量范围分别为FA 10%~15%、GBFS 10%~15%、TS 5%~15%.

参考文献:

- [1] WU K, SHAO Z S, QIN S. A solution for squeezing deformation control in tunnels using foamed concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2020, 257:119539.
- [2] RAJ A, SATHYAN D, MINI K M. Physical and functional characteristics of foam concrete: A review [J]. Construction and Building Materials, 2019, 221:787-799.
- [3] CHEN S C, ZENG W, GU L S, et al. Effects of combining binary mineral admixtures and manufactured basalt sand on the microscopic properties of mortar [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66:105873.
- [4] DENG X, LI J, LU Z Y, et al. Recycled mineral admixtures based on recycled clay brick [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76:107193.
- [5] XIONG Y L, HU Z S, LIU C, et al. Unveiling the role of Portland cement and fly ash in pore formation and its influence on properties of hybrid alkali-activated foamed concrete [J]. Construction and Building Materials, 2024, 411:134336.
- [6] RAJ S, RAMAMURTHY K. Physical, hydrolytic and mechanical stability of alkali-activated fly ash-slag foam concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 142:105223.
- [7] LI M G, TAN H B, HE X Y, et al. Enhancement in compressive strength of foamed concrete by ultra-fine slag [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 138:104954.
- [8] GOPALAKRISHNAN R, SOUNTHARARAJAN V M,

- MOHAN A, et al. The strength and durability of fly ash and quarry dust light weight foam concrete [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 22:1117-1124.
- [9] CHEN Y G, GUAN L L, ZHU S Y, et al. Foamed concrete containing fly ash: Properties and application to backfilling [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 273:121685.
- [10] BAYRAKTAR O Y, KAPLAN G, GENCEL O, et al. Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 288:123128.
- [11] LI X Y, LI J, LU Z Y, et al. Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234:117342.
- [12] HE K, DENG Y E, CAO Z Q, et al. Engineering performance and microscale structure of activated high titanium slag-soil-cement-bentonite (HTS-SCB) slurry backfill [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 373:130766.
- [13] LIU Z, LAI Z Y, LUO X Z, et al. Effect of titanium slag on the properties of magnesium phosphate cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 343:128132.
- [14] GE Z, YUAN H Q, SUN R J, et al. Use of green calcium sulphoaluminate cement to prepare foamed concrete for road embankment: A feasibility study [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 237:117791.
- [15] WAN K T, ZHU H G, YUEN T Y P, et al. Development of low drying shrinkage foamed concrete and hygro-mechanical finite element model for prefabricated building facade applications [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165:939-957.
- [16] NGUYEN T B T, CHATCHAWAN R, SAENGSOY W, et al. Influences of different types of fly ash and confinement on performances of expansive mortars and concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209:176-186.
- [17] GÖKÇE H S, HATUNGIMANA D, RAMYAR K. Effect of fly ash and silica fume on hardened properties of foam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 194:1-11.
- [18] SIVA M, RAMAMURTHY K, DHAMODHARAN R. Development of a green foaming agent and its performance evaluation [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 80:245-257.
- [19] OREN O H, GHOLAMPOUR A, GENCEL O, et al. Physical and mechanical properties of foam concretes containing granulated blast furnace slag as fine aggregate [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238:117774.
- [20] WANG S X, WANG Z J, HUANG T Y, et al. Mechanical strengths, drying shrinkage and pore structure of cement mortars with hydroxyethyl methyl cellulose [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 314:125683.
- [21] 郭伟娜, 张鹏, 鲍玖文, 等. 粉煤灰掺量对应硬化水泥基复合材料力学性能及损伤特征的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(6):551-557.
- GUO Weina, ZHANG Peng, BAO Jiuwen, et al. Effect of fly ash content on mechanical properties and damage characteristics of strain-hardening cementitious composites [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(6):551-557. (in Chinese)
- [22] 李响, 阎培渝. 粉煤灰掺量对水泥孔溶液碱度与微观结构的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(6):787-791, 835.
- LI Xiang, YAN Peiyu. Influence of fly ash content on alkalinity of pore solution and microstructure of cement pastes [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(6):787-791, 835. (in Chinese)
- [23] ZHANG S L, QI X Q, GUO S Y, et al. A systematic research on foamed concrete: The effects of foam content, fly ash, slag, silica fume and water-to-binder ratio [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 339:127683.
- [24] WANG S D, SCRIVENER K L. ^{29}Si and ^{27}Al NMR study of alkali-activated slag [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33(5):769-774.
- [25] 李升涛, 陈徐东, 张锦华, 等. 不同密度等级泡沫混凝土的单轴压缩破坏特征 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(6):1146-1153.
- LI Shengtao, CHEN Xudong, ZHANG Jinhua, et al. Failure characteristics of foam concrete with different density under uniaxial compression [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(6):1146-1153. (in Chinese)
- [26] SHANG X Y, QU N, LI J S. Development and functional characteristics of novel foam concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 324:126666.
- [27] LI H X, XU C, DONG B Q, et al. Enhanced performances of cement and powder silane based waterproof mortar modified by nucleation C-S-H seed [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 246:118511.