

粉煤灰对超轻泡沫混凝土性能的影响试验研究

Experimental Study on the Influence of Fly Ash on the Performance of Ultra Light Foam Concrete

李国荣¹, 刘玉芝²

(1. 杨凌职业技术学院, 杨凌 712100; 2. 杨凌工业园区投资创业服务有限公司, 杨凌 712100)

摘要: 为有效降低超轻泡沫混凝土的材料成本, 采用 I 级、II 级和 III 级三种不同等级粉煤灰等量替代超轻泡沫混凝土中的高贝利特硫铝酸盐水泥, 研究不同等级粉煤灰在不同取代率下的超轻泡沫混凝土物理力学性能。结果表明: 掺入粉煤灰后可以进一步降低超轻泡沫混凝土的干密度和导热系数, 起到良好的减重和隔热效果, 但同时也会降低超轻泡沫混凝土的强度, 增加收缩变形量; 采用 II 级粉煤灰、取代率为 15% 时, 超轻泡沫混凝土的力学性能较佳, 干密度、比强度、导热系数、拉伸黏结强度和 28 d 收缩值分别为 302.9 kg/cm³、1 276.6 N·m/kg、0.079 1 W/m·k、0.128 MPa 和 2.93 mm/m。

关键词: 超轻泡沫混凝土; 高贝利特硫铝酸盐水泥; 粉煤灰; 取代率

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 01-0029-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.01.006

LI Guorong¹, LIU Yuzhi²

(1. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China;

2. Yangling Industrial Park Investment Venture Service Co., Ltd., Yangling 712100, China)

Abstract: In order to effectively reduce the material cost of ultra light foam concrete, three different grades of fly ash, Grade I, Grade II and Grade III, were used to replace the high belite sulphoaluminate cement in ultra light foam concrete equally, and the physical and mechanical properties of different grades of fly ash under different replacement rates of ultra light foam concrete were tested. The results show that the addition of fly ash can further reduce the dry density and thermal conductivity of ultra light foam concrete, playing a good role in weight reduction and heat insulation, reduce the strength of ultra light foam concrete, while increasing the shrinkage deformation; When Grade II fly ash is used and the substitution rate is 15%, the mechanical properties of ultra light foam concrete are better, with dry density, specific strength, thermal conductivity, tensile bond strength and 28 day shrinkage values of 302.9 kg/cm³, 1276.6 N·m/kg, 0.0791 W/m·k, 0.128 MPa and 2.93 mm/m.

Key words: ultralight foam concrete; high belite sulphoaluminate cement; fly ash; substitution rate

0 引言

建筑领域的能源消耗占到了总能源消耗的 40%

以上, 尤其是混凝土和红砖的生产消耗了大量的不可再生资源, 而且传统混凝土和红砖并没有起到良好的保温隔热效果, 在此背景下, 有必要推行节能建材和新型墙体材料^[1]。

聚苯乙烯板、聚氨酯发泡保温制品、挤塑聚苯板、矿棉、玻璃棉等有机材料均具有良好的保温隔热效果^[2-5], 但是也存在易燃烧、燃烧后释放有毒气体、成本高、原材料来源有限等缺点, 因而传统保

材料科学

温材料的发展和推广受到一定的限制。超轻泡沫混凝土是一种新型的多孔轻质水泥基材料,不仅具有良好的保温隔热效果,而且还具有吸声和消能减震作用,在装配式建筑领域作为保温夹层材料得到较为广泛的应用^[6-8]。超轻泡沫混凝土的制备一般会用到高贝利特硫铝酸盐水泥,此种水泥成本较高,且这几年的价格一直呈上升趋势,而粉煤灰作为一种工业废料,来源广且数量多,如果在保证超轻混凝土基本物理性能满足规范的前提下,将粉煤灰等量替代高贝利特硫铝酸盐水泥,不仅能够降低超轻泡沫混凝土的材料成本,而且还能节约矿物资源,改善生态环境^[9-10]。夏艳梅等^[11]以普通硅酸盐水泥为胶凝材料,通过掺入粉煤灰、硅灰等掺合料,制备了一种超轻质泡沫混凝土,并将其作为填充料填充入烧结页岩空心砌块中,相比传统烧结页岩空心砌块,保温性能提高了42.5%;祁会军等^[12]在制备超轻混凝土时,加入了粉煤灰陶粒和粉煤灰,通过优化设计,得出粉煤灰陶粒的最佳体积掺量为40%,粉煤灰的最佳掺量为25%;蒋俊等^[13]研究了粉煤灰与矿粉取代水泥后,对超轻泡沫混凝土气孔结构及性能的影响,发现粉煤灰和矿粉的最佳取代率为20%。

综上所述,系用Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级三种不同等级粉煤灰等量替代超轻泡沫混凝土中的高贝利特硫铝酸盐水泥,并进行了干密度、单轴抗压强度、导热系数、拉伸黏结强度、收缩变形、SEM微观结构等多种试验,研究不同等级粉煤灰在不同取代率下的超轻泡沫混凝土性能。

1 试验概况

1.1 原材料

超轻泡沫混凝土主要原材料由:水泥、粉煤灰、发泡剂、减水剂、水等组成。水泥为高贝利特硫铝酸盐水泥,强度等级为42.5,平均烧失量为0.38%,主要矿物成分为 C_4A_3S (35.8%)、 $\beta-C_2S$ (36.1%)和 CS (14.1%);粉煤灰包括Ⅰ级、Ⅱ级和Ⅲ级三种不同等级,主要化学成分和性能参数见表1、表2;发泡剂为淡黄色液体,平均密度为 1.107 kg/m^3 ,分解温度为 $100\text{ }^\circ\text{C}$,有效物质含量为35%,pH值为8.2;

减水剂棕褐色,固含量为94.55%,净浆流动度为241.82 mm,硫酸钠含量为8.7%,氯离子含量为0.42%;水为自来水。

表1 三种等级粉煤灰化学成分

等级	SiO ₂	Al ₂ O ₂	Fe ₂ O ₂	CaO	MgO	SO ₂	f-CaO
Ⅰ级	61.0	24.5	6.70	4.9	0.7	0.5	0.6
Ⅱ级	60.8	23.7	7.0	3.8	0.6	0.6	0.4
Ⅲ级	60.5	23.2	6.8	3.1	0.2	0.8	0.4

表2 三种等级粉煤灰性能参数

等级	细度(45 μm方孔筛余量)/%	需水量比/%	含水率/%	平均烧失量/%	微珠粒径/μm
Ⅰ级	11	94	0.5	2.01	<5
Ⅱ级	20	99	0.3	6.92	5~10
Ⅲ级	39	112	0.7	9.13	>10

1.2 试验方案

超轻泡沫混凝土的基本配合比为:胶凝材料总掺量为 384.5 kg/m^3 ,发泡剂掺量为 6.5 kg/m^3 ,减水剂掺量为 1.5 kg/m^3 ,水胶比为0.5。发泡剂的稀释比为1:30,发泡剂的吸液阀角度为 60° ,制得的泡沫密度为 40 kg/m^3 ,泡沫掺量为胶凝材料掺量的15%,减水剂掺量为0.5%。利用不同等级粉煤灰分别等质量取代高贝利特硫铝酸盐水泥,取代量分别为5%、10%、15%、20%和30%五种,探讨粉煤灰对超轻泡沫混凝土性能的影响。

1.3 测试方法

测试超轻泡沫混凝土的干密度、单轴抗压强度、导热系数、拉伸黏结强度和收缩变形五个性能指标。

干密度值试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,将制备养护完成的试件放入真空干燥箱中(温度 $50\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$),每次干燥时间4 h,直至前后两次质量差不超过1 g为止,每组测试3个试件,取平均值。

单轴抗压强度试件尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$,测试仪器为DYE-300型全自动水泥抗压抗折试验机,荷载加载速率为 0.1 kN/s 。

导热系数测试试件尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times 35\text{ mm}$,冷板和热板的温度分别为 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $35\text{ }^\circ\text{C}$,开始测试时间为加热后120 min,记录总时长为30 min,得到平均热导率,然后计算得到试件的导热系数。

拉伸黏结强度试件尺寸为 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,利用环氧树脂将钢制拉把与试件黏结起来,然后在自

然状态下放置 1 d, 再利用 WDW-50 型万能试验机以 10 mm/min 的速率进行拉伸试验。

收缩变形参照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》进行试验。

对部分试件进行了 SEM 微观扫描, 观察微孔结构特征进行了。

2 试验结果分析

2.1 干密度

由图 1 可知, 掺入粉煤灰可以降低混凝土干密度, 整体上随着取代率增大呈逐渐减小趋势, 但是三种等级粉煤灰对混凝土干密度的影响却出现了不同的变化规律。当掺入 I 级和 III 级粉煤灰时, 干密度呈先减小后增大特征, 当取代率均为 15% 时, 干密度最小; 掺入 II 级粉煤灰时, 则是呈逐渐减小特征。这是因为 I 级粉煤灰中含有大量粒径小于 5 μm 的球形微珠, 当掺量较多时, 粉煤灰除了参与水化作用外, 有很大一部分只起到填充作用, 使得混凝土结构孔隙更加致密, 因而干密度反而增大。II 级粉煤灰的粒径较为均匀, 会更有利于发挥自身的滚珠效应, 且比表面积较大, 使得需水量较小, 可蒸发自由水含量增加, 故而干密度随取代率增大而逐渐减小。III 级粉煤灰的颗粒粒径尺寸较大 (块状含碳焦渣属于轻质多孔物质), 大部分大于 10 μm , 颗粒与颗粒之间的间隙较大, 掺入较少时, 可以起到降低干密度的作用; 当掺量过多时, 会吸收消耗大量的水分, 混凝土中可蒸发自由水含量降低, 故而干密度也随之增加。

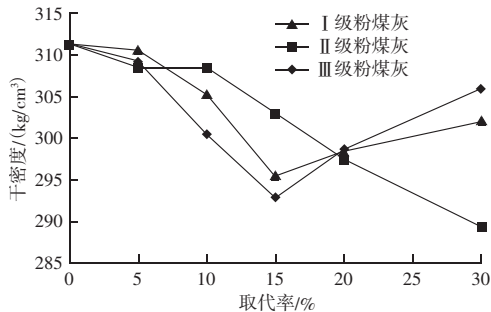


图 1 干密度随粉煤灰取代率的变化曲线

Fig. 1 Change curve of dry density with replacement rate of fly ash

2.2 比强度

由图 2 可知, 比强度随着粉煤灰取代率的增大整体上呈逐渐减小的趋势, 这主要是因为粉煤灰等量

取代水泥后, 参与水化反应的水泥量减少, 导致水化产物降低, 故而混凝土强度会逐渐减小, 尤其是当粉煤灰取代率超过 20% 以后, 混凝土强度降低趋势更加明显, 故粉煤灰取代率建议不超过 20%。在粉煤灰取代率小于 20% 的情况下, 混凝土比强度排序大致为: I 级 > II 级 > III 级, 且 I 级和 II 级之间相差不大。

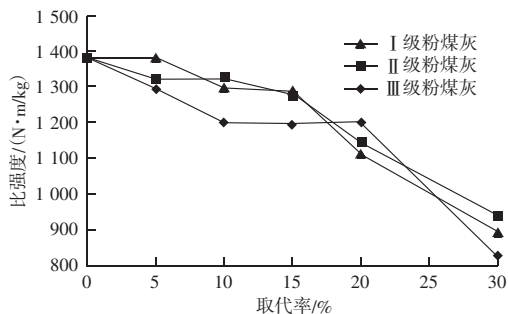


图 2 比强度随粉煤灰取代率的变化曲线

Fig. 2 Change curve of specific strength with replacement rate of fly ash

2.3 导热系数

由图 3 可知, 随着粉煤灰取代率的增加, I 级粉煤灰和 III 级粉煤灰取代下的混凝土导热系数呈先减小后增大的趋势。当取代率为 15% 时, 导热系数最小, III 级粉煤灰取代下混凝土导热系数呈逐渐减小特征。混凝土导热系数的变化特征与干密度变化趋势基本保持一致, 混凝土密实度越高, 导热性能越好。从整体上来讲, 当粉煤灰取代率小于等于 10% 时, 粉煤灰等级对混凝土导热系数影响不大, 相同取代率下, 混凝土导热系数排序为: III 级 > I 级 > II 级。粉煤灰微珠为中空结构, 数量越多, 隔热性能越好, I、II 级粉煤灰的微珠数量多于 III 级粉煤灰, 故而导热系数较低, 但是 II 级粉煤灰微珠更加均匀, 粉煤灰连通孔结构更少, 孔壁结构更加致密, 故而相比 I 级而言, II 级粉煤灰的导热系数更小。

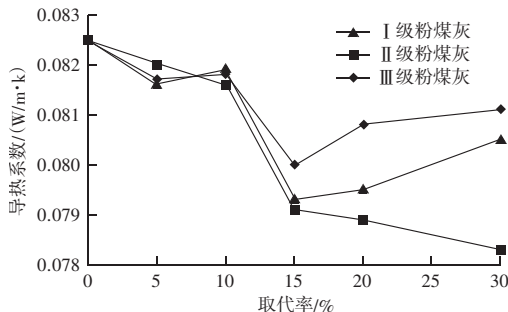


图 3 导热系数随粉煤灰取代率的变化曲线

Fig. 3 Change curve of thermal conductivity with replacement rate of fly ash

材料科学

2.4 拉伸黏结强度

由图4可知,随着粉煤灰取代率的增加,拉伸黏结强度呈逐渐减小的变化特征。这是因为粉煤灰等量取代水泥后,混凝土中水化产物减少,水化产物在孔壁分布的均匀性降低,故而在拉力作用下的承载性减小。当粉煤灰取代率小于等于10%时,混凝土拉伸黏结强度排序为:Ⅰ级>Ⅱ级>Ⅲ级;当取代率大于10%后,拉伸黏结强度排序为:Ⅱ级>Ⅰ级>Ⅲ级,Ⅰ、Ⅱ级粉煤灰的微珠数量较多,未参与水化反应的粉煤灰微珠具有填充效应,混凝土的孔结构更加致密,故而抗拉能力更强。

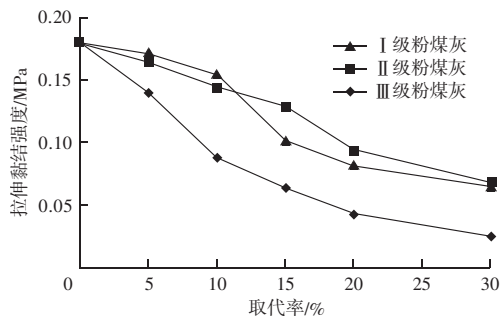


图4 拉伸黏结强度随粉煤灰取代率的变化曲线
Fig.4 Change curve of tensile bond strength with replacement rate of fly ash

2.5 收缩值

选取15%和30%两种取代率下的试件收缩变形变化特征进行对比。由图5可知,随着养护时间的增加,混凝土收缩值呈快速增大、减速增大和匀速增大的三阶段变化特征。快速增大阶段的时间很短,一般为0~18h;减速增大的持续时间较长,一般为185~168h;当养护时间超过168h后,混凝土收缩变形进入匀速增大阶段,且增长幅度很小。相同养护时间内,未掺粉煤灰的收缩变形量最小,养护28d后收缩变形量为1.792mm/m;掺入Ⅲ级粉煤灰、取代率为30%时的收缩变形量最大,养护28d后收缩变形量达到4.342mm/m,是未掺粉煤灰试验组的2.4倍。这主要是因为Ⅲ级粉煤灰的活性较低,大部分只起到填充作用,混凝土中生成的凝胶物质较少,微膨胀性较弱,故而混凝土干缩变形较大,其他替代率试验组的收缩变形相差不大,但均比未掺的试验组大,说明采取粉煤灰替代水泥的方法不利于混凝土的干燥抗裂性能,需要控制粉煤灰的掺量。

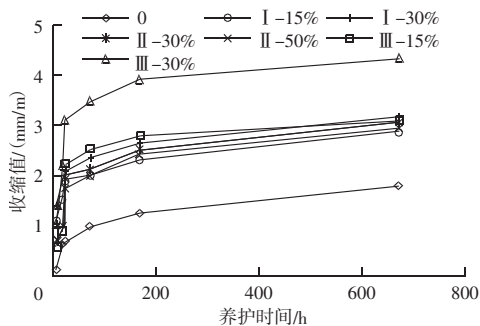


图5 收缩值随粉煤灰取代率的变化曲线
Fig.5 Change curve of shrinkage value with replacement rate of fly ash

3 微观结构分析

由图6可知,当未掺粉煤灰时,混凝土中含有大量的针棒状AFt,在AFt上面覆盖了大量C-S-H凝胶,使得结构比较致密,故而强度较高;当掺入15%的粉煤灰时,混凝土中仍是以针棒状的AFt为主,但是数量和粗细度均比未掺粉煤灰时小,这是导致其强度降低的主要原因,对比掺入15%的不同试验组可知,掺入Ⅲ级粉煤灰的混凝土中C-S-H凝胶覆盖很少,C-S-H凝胶覆盖最多的是掺Ⅱ级粉煤灰的混凝土,掺Ⅰ级粉煤灰的混凝土居中;当掺入30%的粉煤灰时,混凝土中只能观测到少量的AFt,此时粉煤灰的微集料效应已经不能弥补因水化产物减少所带来的强度损失。

通过各项物理力学性能指标试验和微观结构观测结果,认为掺入15%的Ⅱ级粉煤灰时效果最好,在此掺量情况下,超轻泡沫混凝土的干密度进一步减小,起到了良好的减重效果,干密度、比强度、拉伸黏结强度、导热系数和28d收缩值分别为302.9kg/cm³、1276.6N·m/kg、0.128MPa、0.0791W/m·k和2.93mm/m,相比未掺入粉煤灰时,干密度、比强度、拉伸黏结强度、导热系数分别降低了2.7%、7.7%、28.0%、4.0%,收缩变形量增大了63.5%,均在规范要求之内。通过粉煤灰替代高贝利特硫铝酸盐水泥可以减少超轻泡沫混凝土的生产成本。

4 结论

为降低超轻泡沫混凝土的生产成本,采用三种不同等级粉煤灰等量取代高贝利特硫铝酸盐水泥,对不同等级粉煤灰、不同取代率下的超轻泡沫混凝

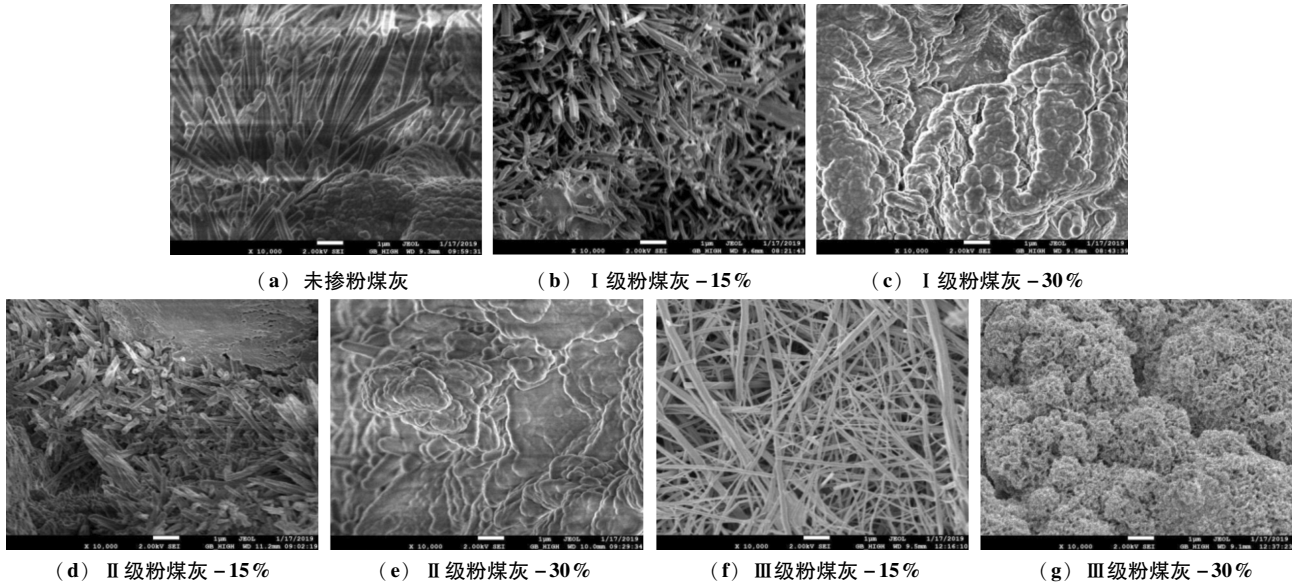


图 6 SEM 结构对比

Fig. 6 SEM structure comparison

土性能进行试验研究，得出如下结论：

(1) 随着粉煤灰取代率的增大，掺入 I 级和 III 级粉煤灰的混凝土干密度、导热系数呈先减小后增大变化特征，掺入 II 级粉煤灰的混凝土干密度、导热系数呈逐渐减小的变化特征。

(2) 随着粉煤灰取代率的增大，混凝土的比强度和拉伸黏结强度呈逐渐减小的变化特征，且在不超过 20% 相同掺量下排序为：I 级 > II 级 > III 级。

(3) 掺入粉煤灰会使混凝土中 AFt 数量逐渐减少，导致混凝土抵抗收缩变形能力降低，不利于混凝土干燥抗裂性能，需要严格控制粉煤灰的取代率。

(4) 经综合对比，采用 II 级粉煤灰、取代率为 15% 时，超轻泡沫混凝土的力学性能较佳，干密度、比强度、导热系数、拉伸黏结强度和 28 d 收缩值分别为 302.9 kg/cm^3 、 $1\ 276.6 \text{ N} \cdot \text{m/kg}$ 、 $0.079 \text{ W/m} \cdot \text{k}$ 、 0.128 MPa 和 2.93 mm/m 。

参 考 文 献

- [1] 董小丽, 成雄蕾, 付铮. 基于多目标的寒冷地区近零能耗建筑优化设计方法与应用 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (12): 205–212.
- [2] 郝硕, 谢浩, 李爽, 等. 稻秸增强酚醛泡沫保温材料的制备与

性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40 (10): 5630–5640.

- [3] 刘延金, 钟曦. 碳纤维/环氧树脂复合保温材料的制备及性能研究 [J]. 功能材料, 2022, 53 (12): 12157–12161.
- [4] 刘彩玲, 刘杰. 节能保温材料在农村建筑设计中的应用研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51 (6): 135–137, 149.
- [5] 曹玉柱, 李晓梅. 新型防火保温装饰一体板在建筑外墙保温中的应用研究 [J]. 建筑节能 (中英文), 2022, 50 (11): 94–97, 117.
- [6] 张钰. 短切纤维超轻泡沫混凝土性能及机理研究 [J]. 新型建筑材料, 2021, 48 (5): 126–130.
- [7] 刘迪, 王玲, 王振地, 等. 超轻质混凝土耐久性试验方法探索 [J]. 混凝土, 2022 (7): 151–154.
- [8] 朱蓓蓉, 黎志, 马一平, 等. 聚丙烯纤维对超轻泡沫混凝土收缩开裂的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2015 (4): 3–7.
- [9] 李小龙, 李珠, 赵林, 等. 普通粉煤灰制备超轻陶粒的工艺探究 [J]. 新型建筑材料, 2019, 46 (3): 143–147.
- [10] 吴丽曼, 孙勇, 张晓莉, 等. 粉煤灰对超轻发泡混凝土孔结构及吸声性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2014, 33 (9): 2387–2392.
- [11] 夏艳梅, 马立. 超轻质泡沫混凝土与烧结页岩复合保温砌块的制备及性能 [J]. 西南科技大学学报, 2022, 37 (2): 44–51.
- [12] 祁会军, 张慧爱, 段瑞斌. 聚苯颗粒陶粒超轻混凝土的试验研究 [J]. 混凝土, 2023 (9): 173–177, 183.
- [13] 蒋俊, 李军, 牛云辉, 等. 矿物掺合料对超轻泡沫混凝土气孔结构及性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2019 (6): 59–63.