节能环保与综合利用

高掺量半干法烧结脱硫灰制备轻质墙材的研究

张维斯[1]，李井成[2]，左泽明康[1]，王巧稚[1]，雷国元[1]
(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院，湖北 武汉 430081；2. 武汉钢铁有限公司，湖北 武汉 430083)

摘要： 针对半干法烧结脱硫灰因成分复杂且含 $CaSO_3$ 较高，综合利用难度大的问题，本文基于多源固废协同利用思想，在非蒸压养护条件下以半干法烧结脱硫灰和粉煤灰为主要原料制备高附加值的轻质节能墙材，考察了原料配比、粉煤灰细度、初期养护温度、激发剂种类与用量等因素对产品强度性能的影响。结果表明：当粉煤灰、半干法烧结脱硫灰、石灰、水泥熟料间的质量比为 40∶40∶5∶15，玻璃纤维、三乙醇胺用量分别为 1% 和 0.06%，经 40 ℃、7 d 的初期养护及随后的自然养护，得到密度为 803 kg/m^3，28 d 抗压强度可达 8.64 MPa 的轻质墙材，其主要性能指标均满足《建筑隔墙用保温条板》(GB/T 23450—2009) 的要求。该工艺无需对半干法脱硫灰进行预氧化处理，为其简易、高值化利用提供了技术支持。

关键词： 半干法；烧结；脱硫灰；综合利用；激发剂；强度性能
中图分类号： X757；TF046.4；TU526 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－8764(2023)03－0001－06
doi： 10.13403/j.sjqt.2023.03.032

Research on preparation of lightweight wall materials by semi-dry sintering desulfurization ash with high content

ZHANG Weisi[1], LI Jingcheng[2], ZUOZE Mingkang[1], WANG Qiaozhi[1], LEI Guoyuan[1]
(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Wuhan Iron and Steel Co., Ltd., Wuhan 430083, Hubei, China)

Abstract: Aiming at the problem that semi-dry sintering desulfurization ash is difficult to be comprehensively utilized due to complex composition and high $CaSO_3$ content, in this paper, based on the idea of multi-source collaborative utilization of solid wastes, high value-added lightweight and energy-saving wall materials are prepared with semi-dry sintering desulfurization ash and fly ash as the main raw materials under non-autoclaved curing conditions, and the effects of raw material ratio, fly ash fineness, initial curing temperature, type and dosage of activator on the strength and performance of the product are investigated. The results show that when the mass ratio of fly ash, semi-dry sintering desulfurization ash, lime and cement clinker is 40∶40∶5∶15, the amount of glass fiber and triethanolamine is 1% and 0.06%, respectively, after initial curing at 40 ℃ for 7 days and subsequent natural curing, the lightweight wall material with a density of 803 kg/m^3 and a compressive strength of 8.64 MPa for 28 days can be obtained, and the main performance indicators of the material meet the requirements of "Insulation Strips for Building Partition Walls" (GB/T 23450—2009). This process does not require pre-oxidation treatment of semi-dry process desulfurization ash, which provides technical support for its simple and high-value utilization.

Key words: semi-dry process; sintering; desulfurization ash; comprehensive utilization; activator; strength property

收稿日期： 2022－01－25；**修回日期：** 2022－10－14
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(41701624)
作者简介： 张维斯(1995—)，男，硕士研究生，从事固废综合利用及环境工程方面的研究。
通信作者： 雷国元(1964—)，男，教授，博士，从事固体废物处理处置与资源化、环境友好材料方面的研究。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

烧结烟气脱硫是钢铁工业重要的环保措施，目前主要的烟气脱硫工艺有湿法、干法和半干法3种[1]。与其他工艺相比，半干法烟气脱硫具有投资少，占地小，运行费用低等优点，被广泛运用[2]。但随之产生了大量难以资源化利用，易产生二次污染，需付费处置的副产物半干法脱硫灰(简称SDA)，如何将其综合利用是行业亟待解决的问题[3-4]。现有研究成果中，有学者将SDA经低温煅烧改性后用于水泥生产[5]，但预处理会增加水泥的生产成本和工艺难度；若不进行预处理，在高温烧制水泥的过程中易产生二次污染。也有学者将SDA配入烧结混料中循环使用[6]，但该方法掺量较低，无法大量消纳钢铁工业中产量日益增加的SDA。因此，目前迫切需要简单易行、消纳量大、产品附加值高的SDA综合利用技术。

基于钢铁工业多源固废协同利用思想，本研究在非蒸压养护条件下，以SDA、粉煤灰为主要胶凝原料，制备低成本、高附加值的轻质节能墙材，以期解决行业环保难题，获得良好的经济效益和社会效益。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

原料的主要化学成分如表1所示。

表1 原料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of raw materials %

原料	CaO	Fe_2O_3	MgO	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	SO_3	Cl
SDA	57.06	2.30	2.07	0.95	0.51	2.04	0.55	29.36	4.27
粉煤灰	4.97	4.78	0.51	45.83	35.71	0.66	0.25	—	—
水泥熟料	57.25	4.95	3.25	17.72	12.07	—	—	—	—

表1中，SDA取自某钢铁集团烧结烟气旋转喷雾干燥半干法脱硫系统，所含$CaSO_3\cdot0.5H_2O$、$CaSO_4\cdot2H_2O$、$Ca(OH)_2$、$CaCO_3$的质量分数分别为28.35%、25.33%、20.74%、13.5%，累计粒度分布D_{50}、D_{97}分别为15、56 μm；粉煤灰取自于某钢铁公司火电厂，比表面积为(400±10) m^2/kg，主要成分为CaO、Fe_2O_3、SiO_2、Al_2O_3，其中$w(Fe_2O_3+SiO_2+Al_2O_3)\geqslant70\%$，属于低钙粉煤灰；硅酸盐水泥熟料取自于某水泥厂，主要矿物成分为C_3S、C_2S、C_3A和C_4AF，磨细至(400±10) m^2/kg备用。生石灰使用CaO药剂(CaO质量分数≥98%)；发泡剂选用FP-180型动物蛋白质，外观为棕褐色液体，配制成质量浓度为5%的水溶液待用；减水剂选用ZJSS-1型聚羧酸型减水剂；激发剂选用三乙醇胺和工业水玻璃；增强材料选用玻璃纤维(密度为340 kg/m^3)，试验前修剪至长度为3~5 mm备用。

1.2 试验方法

试验将粉煤灰、水泥熟料、SDA、生石灰按比例混合均匀得到混合胶凝材料；按混合胶凝材料质量的20%加入自来水；加入1%减水剂(按条件需要选择加入一定剂量的化学激发剂)；加入泡沫浆体；将充分拌匀的浆体浇筑到30 mm×30 mm×30 mm的模具中，2 d后脱模，按照指定条件养护至规定龄期。养护28 d试件实际密度为(800±20) kg/m^3。最后，试验利用WE-30型液压式万能材料试验机测定各养护龄期试样的抗压强度。

2 结果与讨论

2.1 原料配比对轻质墙材强度性能的影响

原料配比及轻质墙材各养护龄期抗压强度如表2所示(该项试验不添加化学激发剂和增强纤维，样品自然养护至规定龄期)。由表2可知：① 随着水泥熟料掺量的增大，样品初期强度升高，在7~28 d的养护期内强度涨幅较小，说明样品初期强度主要由熟料反应生成的水化产物提供；② 随着SDA掺量的增大，样品初期强度降低，但在7~28 d的养护期内强度涨幅升高，原因是SDA中大量的$CaSO_4$和$CaSO_3$对熟料水化反应产生缓凝作用，但其在后续反应中作为原料与水化铝酸钙凝胶(C-A-H)反应生成钙矾石(AFt)和$C_3A\cdot CaSO_3\cdot11H_2O$等水化产物[7]，使强度增加；③ 以C1、C2、C3组为例，样品7 d强度相近，28 d强度随SDA掺量的增大而增大，说明SDA参与

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

了水化反应而被固化；当 SDA 掺量增加到 40% 时，粉煤灰用量降低，活性 SiO_2、Al_2O_3 量减少，轻质墙材的强度性能显著降低。本文尝试通过适宜的活性激发、纤维增强、优化养护制度等措施，实现高掺量 SDA 工况条件下样品强度性能达标（≥3.5 MPa）。

表 2　原料配合比及各龄期强度性能

Table 2　Mix proportion of raw materials and strength properties of each age

编号	原料配比(质量分数)/%				养护龄期抗压强度/MPa		
	粉煤灰	SDA	生石灰	水泥熟料	7 d	14 d	28 d
A1	55	25	15	5	0.27	0.60	2.09
A2	50	30	15	5	0.26	0.61	2.00
A3	45	35	15	5	0.46	1.03	3.05
A4	40	40	15	5	0.21	0.57	1.83
B1	55	25	10	10	1.28	2.83	4.25
B2	50	30	10	10	0.62	1.46	2.37
B3	45	35	10	10	0.67	1.62	2.47
B4	40	40	10	10	0.56	1.16	2.12
C1	55	25	5	15	1.87	2.07	3.16
C2	50	30	5	15	1.62	3.12	3.82
C3	45	35	5	15	1.83	3.72	5.00
C4	40	40	5	15	1.31	2.63	3.02

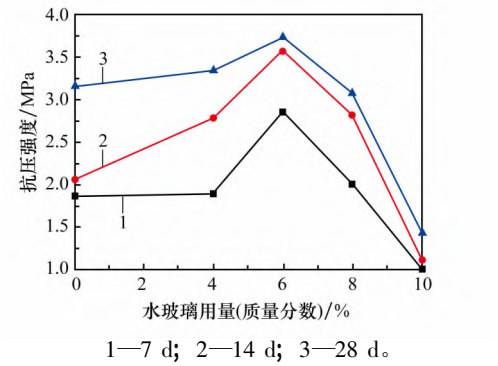
2.2　化学激发剂对轻质墙材强度性能的影响

粉煤灰的火山灰反应和水泥熟料的水化反应生成胶凝产物，决定轻质墙材强度，故选用粉煤灰与水泥熟料占比较大的 C1 组为空白组，考察化学激发剂种类、用量对轻质墙材强度的影响。

2.2.1　水玻璃用量对轻质墙材强度性能影响

试验仅用水玻璃为激发剂，其用量对轻质墙材强度的影响如图 1 所示。

由图 1 可知，当水玻璃用量为 0～6% 时，轻质墙材的抗压强度随水玻璃用量的增加而大致增大，轻质墙材 7、14 和 28 d 抗压强度最高分别为 2.87、3.58、3.74 MPa，较空白组分别提高了 53.48%、72.95%、18.35%，其原因是水玻璃水解生成 NaOH，提高了体系碱度，有利于腐蚀粉煤灰玻璃体结构，使游离态的 SiO_3^{2-}、AlO_3^{3-} 质量浓度增加，其与溶液中的 Ca^{2+} 化合生成水化硅酸钙（C-S-H）和水化铝酸钙（C-A-H），C-A-H进而形成



1—7 d；2—14 d；3—28 d。

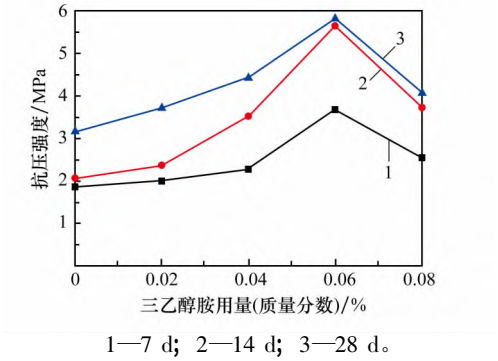
图 1　水玻璃用量对轻质墙材抗压强度的影响

Fig. 1　Effect of sodium silicate dosage on the compressive strength of lightweight walling materials

钙矾石（AFt）等胶凝产物，有利于强度的提高；此外，水玻璃也能水解生成硅胶，与 Ca^{2+} 水化反应生成的产物使轻质墙材内部空间网络结构更加致密，从而提高抗压强度[8]。当玻璃用量超过 6% 时，轻质墙材抗压强度降低，原因在于水玻璃水解产生过多的 OH^- 破坏了轻质墙材内部的水化产物[9]；此外，NaOH 质量浓度过高会抑制钙矾石的形成[10-11]，也不利于强度的增加。因此，水玻璃的适宜用量为 6%。

2.2.2　三乙醇胺用量对轻质墙材强度性能的影响

试验仅用三乙醇胺为激发剂，其用量对轻质墙材抗压强度的影响如图 2 所示。由图 2 可看出，当三乙醇胺用量为 0～0.06% 时，轻质墙材的抗压强度随三乙醇胺用量的增加而逐渐上升，轻质墙材 7、14 和 28 d 抗压强度最高分别为 3.69、5.64、5.80 MPa，较空白组分别提高了 97.33%、172.46%、83.54%，其主要原因在于三乙醇胺



1—7 d；2—14 d；3—28 d。

图 2　三乙醇胺用量对轻质墙材抗压强度的影响

Fig. 2　Effect of triethanolamine dosage on the compressive strength of lightweight walling materials

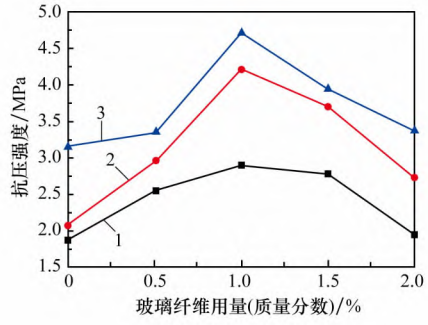
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

络合了粉煤灰中的 Fe、Al 相，促进了粉煤灰颗粒表面腐蚀，释放出更多的活性 SiO_2、Al_2O_3，加速了火山灰反应[11]。当三乙醇胺用量超过 0.06% 时，轻质墙材的抗压强度下降，其原因是体系中迅速生成过多的水化产物，其包裹在未水化颗粒表面，阻碍了水化反应进行。因此，三乙醇胺的适宜用量为 0.06%。

考虑激发剂掺量与成本、各龄期强度提升幅度等因素，选用三乙醇胺为激发剂，适宜用量为 0.06%。

2.3 增强纤维对轻质墙材强度性能的影响

试验以 C1 组为空白组，不添加激发剂，玻璃纤维用量对轻质墙材强度的影响如图 3 所示。



1—7 d；2—14 d；3—28 d。

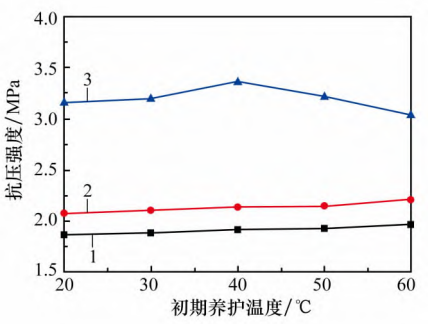
图 3 玻璃纤维用量对轻质墙材抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of glass fiber dosage on the compressive strength of lightweight walling materials

由图 3 可知，当玻璃纤维用量为 0～1% 时，轻质墙材的抗压强度随玻璃纤维用量的增加而增加，轻质墙材 7、14 和 28 d 抗压强度最高分别为 2.90、4.23、4.72 MPa，较空白组分别提高了 55.08%、104.35%、49.37%，其原因是增加纤维用量，有利于逐步形成完整稳定的三维网状结构，使抗压强度增加。但当玻璃纤维用量超过 1% 时，抗压强度下降，其原因是过多的纤维用量会降低其分布的均匀性，使轻质墙材内部孔隙率增大[12]，导致强度降低。在实际生产中，可使用廉价的植物纤维或聚合物纤维来代替玻璃纤维，以获得更好的技术经济指标[13-15]。

2.4 初期养护温度对轻质墙材强度性能的影响

尽管温室养护具有较好的效果，但养护期过长会增加基建投入。因此，初期温室养护与后期的自然养护相结合是一个比较经济可行的措施。考虑厂区太阳能温室温度上限在 60 ℃左右，故初期养护温度试验范围定为 20～60 ℃。不添加激发剂，轻质墙材在不同的初期养护温度下养护 7 d 后，转入自然养护至总龄期 28 d，初期养护温度对轻质墙材强度的影响如图 4 所示。由图 4 可知，当初期养护温度为 40 ℃时，28 d 抗压强度最高。当初期养护温度超过 40 ℃时，大量水化产物短时间内无序、紊乱沉淀与搭接，降低了水化产物及硬化孔隙分布的均匀性，导致强度降低[16]。所以，适宜的初期养护温度为 40 ℃。



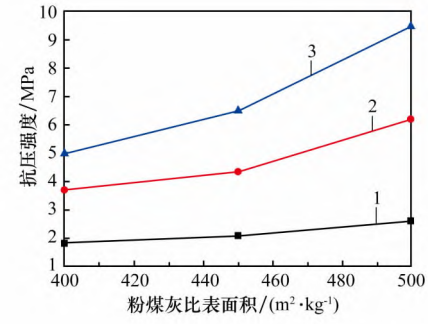
1—7 d；2—14 d；3—28 d。

图 4 初期养护温度对轻质墙材抗压强度的影响

Fig. 4 Effect of initial curing temperature on the compressive strength of lightweight walling materials

2.5 机械活化对轻质墙材强度性能的影响

物理细磨可激发粉煤灰活性，粉煤灰比表面积越高，其活性越强。本文以 C3 组为空白组，粉煤灰比表面积对轻质墙材强度的影响如图 5 所示。



1—7 d；2—14 d；3—28 d。

图 5 粉煤灰比表面积对轻质墙材抗压强度的影响

Fig. 5 Effect of specific surface area of fly ash on compressive strength of lightweight walling materials

由图 5 可知，粉煤灰比表面积越大，轻质墙材抗压强度越高。粉煤灰比表面积对轻质墙材强

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度的影响程度随养护龄期的增加而增加，这说明后期抗压强度的增加主要依赖于粉煤灰的火山灰反应。所以，粉煤灰活性的机械激发是提高轻质墙材强度的有效措施，与化学激发措施相结合有望进一步提高轻质墙材的抗压强度。

2.6　综合条件试验

综合前述试验结果，确定适宜方案：细磨粉煤灰、SDA、石灰、水泥熟料质量比为 40∶40∶5∶15，细磨粉煤灰比表为 500 m^2/kg，减水剂、玻璃纤维和三乙醇胺掺量分别为 1%、1%和 0.06%，轻质墙材经 40 ℃、7 d 的初期养护后转入自然养护至总龄期 28 d，成型产品密度为 803 kg/m^3，7、14、28 d 抗压强度和 28 d 饱和抗压强度分别为 6.56、7.28、8.64 和 7.35 MPa，软化系数为 0.85。本文试验产品的导热系数约为 0.125 W/(m·K)，其主要指标满足《建筑隔墙用保温条板》(GB/T 23450—2009)的要求［抗压强度≥3.5 MPa，软化系数≥0.8，导热系数≤2.0 W/(m·K)］[17]。

3　方案可行性分析

按照综合试验的工况条件初步评估该技术的可行性。粉煤灰、水泥熟料、石灰吨矿成本分别为 150、300、350 元，SDA 不计入成本；对于一条 5×10^5 m^2/a 墙材生产线，年物料成本约为 432.00 万元；发泡剂、减水剂、增强纤维、三乙醇胺年总成本约为 396.72 万元；年人工、水电、折旧、维修费分别为 60.00、100.00、66.70、30.00 万元。墙材每平米售价 95 元，扣除加工增值税后，年可盈利约为3 427.08万元。

原料中的游离氧化钙(*f*-CaO)是体积不稳定性因素之一。通过粉煤灰高效激发和养护制度的优化，来促进活性 SiO_2、Al_2O_3 与 *f*-CaO 的反应，最大限度地降低 *f*-CaO 质量分数，从而克服其引起的体积不稳定性问题。水化产物 AFt 存在体积稳定性问题；C_3A-$CaSO_3$-$11H_2O$ 是否存在体积稳定性问题，尚待研究。轻质墙材中存在大量的封闭孔，孔可以消纳体积膨胀，也可以影响 AFt 形态，消除膨胀[10]；AFt 均匀分布于样品中，具有“各向抵消”效应，也可以消除体积不稳定性；尽管 SDA 掺量较高，但形成的 AFt 量仍比硫铝酸盐水泥要低；AFt 组分的体积膨胀可补偿水泥基材料的收缩，也是消除影响 AFt 体积稳定性的因素。所以，理论上看，样品的体积稳定性是可控的。试验留存样品，放置半年后，未发现裂纹。

4　结　论

(1) 在没有提升轻质墙材抗压强度措施的条件下，SDA 掺量的提升会降低其早期强度，略微提高其后期强度，当掺量达到 40% 时各龄期强度大幅降低。

(2) 在高掺量 SDA 的条件下，添加化学激发剂、增强纤维、优化养护条件、物理磨细粉煤灰等是提高制品强度性能的有效手段。

(3) 当细磨粉煤灰(比表面积 500 m^2/kg)、SDA、石灰、水泥熟料质量比为 40∶40∶5∶15，减水剂、玻璃纤维和三乙醇胺掺量分别为 1%、1%和 0.06% 时，轻质墙材养护 7、14、28 d 抗压强度和 28 d 饱和抗压强度分别为 6.56、7.28、8.64 和 7.35 MPa，软化系数为 0.85。

参考文献:

[1] 李凤臣，王挽平，钟闯，等. 烧结机半干法烟气脱硫塔结垢的原因分析及改进[J]. 烧结球团，2016，41(6)：65－68.
LI Fengchen，WANG Wanping，ZHONG Chuang，et al. Cause analysis and improvement of scaling in semi dry flue gas desulfurization tower of sintering machine[J]. Sintering and Pelletizing，2016，41(6)：65－68.

[2] 康凌晨，卢丽君，李富智，等. 半干法烧结烟气脱硫灰的化学成分分析方法研究[J]. 化学工程与装备，2016(10)：210－212.
KANG Lingchen，LU Lijun，LI Fuzhi，et al. Study on chemical composition analysis method of flue gas desulfurization ash from semi dry sintering[J] Chemical engineering and equipment，2016(10)：210－212.

[3] 廖继勇，何国强. 近五年烧结技术的进步与发展[J]. 烧结球团，2018，43(5)：1－11；19.
LIAO Jiyong，HE Guoqiang. Progress and development of sintering technology in recent five years[J]. Sintering and Pelletizing，2018，43(5)：1－11；19.

[4] 纪光辉. 烧结烟气超低排放技术应用及展望[J]. 烧结球团，2018，43(2)：59－63.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

JI Guanghui. Application and prospect of ultra low emission technology of sintering flue gas [J]. Sintering and Pelletizing,2018,43(2):59 – 63.

[5] 郭斌,高竟轩,任爱玲,等. 利用烧结脱硫灰制备胶凝材料的研究 [J]. 环境工程学报,2009,3(6):1113 – 1117.
GUO Bin, GAO Jingxuan, REN ailing, et al. Study on preparation of cementitious materials from sintered desulfurization ash [J] Journal of environmental engineering, 2009,3(6):1113 – 1117.

[6] 刘杰,马贤国,夏铁玉,等. 烧结烟气脱硫灰烧结再利用的研究与应用 [J]. 烧结球团,2019,44(2):63 – 68.
LIU Jie, MA Xianguo, XIA Tieyu, et al. Research and application of sintering flue gas desulfurization ash reuse [J]. Sintering and pelletizing,2019,44(2):63 – 68.

[7] LAGOSZ A, MALOLEPSZY J. Tricalcium aluminate hydration in the presence of calcium sulfite hemihydrate [J]. Cement & Concrete Research,2003,33(3):333 – 339.

[8] 柯国军,杨晓峰,彭红,等. 化学激发粉煤灰活性机理研究进展 [J]. 煤炭学报,2005(3):366 – 370.
KE Guojun, YANG Xiaofeng, PENG Hong, et al. Research progress on the mechanism of chemically activated fly ash [J]. Journal of coal,2005(3):366 – 370.

[9] 马快乐,王海龙,刘思盟,等. 低模数水玻璃对橡胶轻骨料混凝土力学性能的影响 [J]. 排灌机械工程学报,2021,39(7):685 – 691.
MA Kuaile, WANG Hailong, LIU Simeng, et al. Effect of low modulus water glass on mechanical properties of rubber lightweight aggregate concrete [J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering,2021,39(7):685 – 691.

[10] 钱觉时,余金城,孙化强,等. 钙矾石的形成与作用 [J]. 硅酸盐学报,2017,45(11):1569 – 1581.
QIAN Jueshi, YU Jincheng, SUN Huaqiang, et al. Formation and function of ettringite [J]. Chinese Journal of Silicate,2017,45(11):1569 – 1581.

[11] 汤青青,张丽娟,孙国文,等. 三乙醇胺 – 氢氧化钙对大掺量粉煤灰水泥胶凝体系早期活性激发 [J]. 硅酸盐通报,2018,37(9):2737 – 2742.
TANG Qingqing, ZHANG Lijuan, SUN Guowen, et al. Early activation of triethanolamine calcium hydroxide cement cementitious system with high content of fly ash [J]. Silicate bulletin,2018,37(9):2737 – 2742.

[12] 徐钟,黄真璞. 纤维改性泡沫混凝土研究综述 [J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版),2021,34(1):78 – 88.
XU Zhong, HUANG Zhenpu. Review of research on fiber modified foam concrete [J]. Journal of Sichuan University of Light and Chemical Technology(Natural Science Edition),2021,34(1):78 – 88.

[13] 吴晓艳,刘红飞,张程,等. 稻杆纤维对改善泡沫混凝土抗压强度的研究 [J]. 混凝土与水泥制品,2014(9):56 – 58.
WU Xiaoyan, LIU Hongfei, ZHANG Cheng, et al. Study on improving compressive strength of foamed concrete by rice straw fiber [J]. Concrete and cement products,2014(9):56 – 58.

[14] 王康,陈国新,李建华,等. 棉秆纤维对陶粒泡沫混凝土力学性能影响的研究 [J]. 新型建筑材料,2016,43(7):113 – 116.
WANG Kang, CHEN Guoxin, LI Jianhua, et al. Effect of cotton stalk fiber on mechanical properties of ceramsite foam concrete [J]. New building materials,2016,43(7):113 – 116.

[15] OTHUM A, MOHDZ N, ABDULA N. Experimental data on compressive and flexural strengths of coir fibre reinforced foamed concrete at elevated temperatures [J]. Data in Brief,2019,25(3):1 – 11.

[16] Al-GAHTANI A S. Effect of curing methods on the properties of plain and blended cement concretes [J]. Construction & Building Materials,2009,24(3):308 – 314.

[17] 宋京. 泡沫混凝土的节能保温等效果探析 [J]. 安徽建筑,2021,28(6):71 – 72;74.
SONG Jing. Energy saving and thermal insulation of foam concrete and other effects [J]. Anhui architecture,2021,28(6):71 – 72;74.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net