

Ca/Si 比对赤泥-固硫灰基免烧砖性能的影响研究

李 勇¹, 赵庆朝¹, 宋厚彬², 李伟光¹, 李学亮¹, 朱阳戈¹, 张艳平², 杨 浩²

(1. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;

2. 黑龙江紫金铜业有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161041)

摘 要:针对赤泥、固硫灰成分复杂、产量大等限制其难以有效利用的关键问题,提出以赤泥、固硫灰等固体废弃物为主要原料制备赤泥-固硫灰基免烧砖的技术研究。通过改变赤泥和固硫灰用量调节免烧砖的 Ca/Si 比,对其力学性能、耐久性能和微观结构进行分析。结果表明,随着 Ca/Si 比的增加,免烧砖的强度呈现先增加后减小的趋势,当 Ca/Si 比为 1.2 时,免烧砖强度最高值 26.63 MPa,达到 MU25 标准,具有较好的力学性能;经过耐水测试和抗冻测试后强度损失较小,具有较好耐久性;免烧砖的水化产物为 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶和钙矾石,对强度的发展起积极的促进作用,促进了力学性能和耐久性能的提升。该研究为赤泥、固硫灰等固废的综合利用提供了新的思路。

关键词:固体废弃物;免烧砖;Ca/Si 比;力学性能;耐久性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1671-4172(2023)06-0163-08

Effect of Ca/Si ratio on the properties of red mud CFB fly ash-based non-fired bricks

LI Yong¹, ZHAO Qingchao¹, SONG Houbin², LI Weiguang¹, LI Xueliang¹, ZHU Yangge¹,
ZHANG Yanping², YANG Hao²

(1. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;

2. Heilongjiang Zijin Copper Industry Co., Ltd., Qiqihaer Heilongjiang 161041, China)

Abstract: In response to the key problem that red mud and CFB fly ash have complex compositions and large production volumes that limit their effective utilization, this study proposes technical research on the preparation of red mud CFB fly ash-based non-fired bricks using solid waste such as red mud and CFB fly ash as the main raw materials. By changing the amount of red mud and CFB fly ash to adjust the Ca/Si ratio of non-fired bricks, the mechanical properties, durability, and microstructure of the non-fired bricks with different Ca/Si ratios were analyzed. The results show that with the increase of the Ca/Si ratio, the strength of unburned bricks shows a trend of first increasing and then decreasing. When the Ca/Si ratio is 1.2, the maximum strength of non-fired bricks is 26.63 MPa, which reaches the standard of MU25 and has good mechanical properties. After the water resistance test and frost resistance test, the non-fired bricks have less strength loss and better durability. The hydration products of non-fired bricks are C-S-H gel, C-A-S-H gel, and ettringite, which positively contribute to the development of strength and promote mechanical properties and durability. This research provides novel ideas for the comprehensive utilization of solid waste such as red mud and CFB fly ash.

Key words: solid waste; non-fired bricks; Ca/Si ratio; mechanical properties; durability

收稿日期: 2023-04-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFE0202800); 矿冶科技集团有限公司重点基金项目(02-2101)

作者简介: 李 勇(1994—), 男, 硕士, 主要从事固废资源化利用研究, E-mail: xkliyong@bgrimm.com。

赤泥是氧化铝生产过程中产生的工业固体废弃物, 由于其粒度细、碱含量高导致其难以资源化利用, 随着氧化铝行业快速发展, 赤泥的产生、堆存量也越来越大, 赤泥的堆存占用了大量的土地资源, 造

成了十分严峻环境污染风险^[1-2]。固硫灰为燃煤副产物,主要是从循环流化床锅炉中排出,相比于传统的燃煤技术,循环流化床燃煤技术具有成本低、原料适用性广、低污染排放、热转换效率高等特点,自问世以来被广泛应用,从而也导致了固硫灰的排放堆存量迅速增加^[3-5]。如何规模化消纳处置赤泥和固硫灰是亟需解决的关键问题。

目前,墙体材料是建筑行业中最主要的建筑材料。随着社会的不断发展,人类在资源、环境等问题上遇到了巨大的挑战。因此,在提倡生态环保和资源循环利用的今天,人们对墙体材料有了更高的要求。免烧砖是墙体材料中的一种,又名非烧结黏土砖,它是以劣质黏土、沙土、花岗岩、红壤土和粉煤灰、炉渣、煤矸石等为原料,加入少量胶结材料,如水泥、石灰以及部分砂子、炉渣等,经计量、搅拌、压制成型、自然养护而制成的一种新型墙体材料^[6-7]。和传统烧结砖相比,免烧砖具有高强、轻质、节地、节能和环境污染小,更加符合我国基本国策的特点。因此,如能将赤泥和固硫灰的资源化利用与新型墙体材料免烧砖的制备相结合,不仅能变废为宝,还能减轻环境压力,是一个非常有意义的研究方向。

赤泥和固硫灰中含有大量的氧化硅和氧化铝等组分,赤泥还具有较高的碱性,利用赤泥和固硫灰制备免烧砖满足基本的钙质材料和硅质材料的组成要求,在赤泥中碱的激发下,氧化钙和二氧化硅等发生水化反应,为基体提供强度^[8]。因此,免烧砖中的氧

化钙与二氧化硅的配合比会对免烧砖产生较大影响^[9]。本研究中通过改变赤泥和固硫灰的添加量进而调整免烧砖体系的 Ca/Si 比,并对不同 Ca/Si 比免烧砖样品的力学性能、耐久性能以及微观形貌结构进行分析,探究 Ca/Si 比对免烧砖性能的影响规律,为固废基免烧砖的制备提供技术思路,有效解决固体废弃物尤其是赤泥和固硫灰的资源化利用难题,为可持续发展提供一种有效途径,且有效降低免烧砖的制备成本,大大推动经济发展。

1 试验原料与研究方法

1.1 试验材料

赤泥由山西铝业有限责任公司提供,含水率为 28.7%,粒度细、质软,有较好的塑性。分别利用 XRF 和 XRD 对赤泥的化学成分和物相组成进行分析,结果如表 1 和图 1 所示,从表 1 中可以看出赤泥的化学成分为 SiO_2 、 CaO 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 Na_2O ,物相组成主要为赤铁矿、钙铝榴石等水硬性矿物。利用 SEM 对赤泥的微观形貌进行了分析,结果如图 2 所示,赤泥以结构比较密实的不规则多边形块状晶体为主。对赤泥的放射性进行分析,结果表明,赤泥中天然放射性核素镭-226、钍-232、钾-40 的放射性比活度内照射指数 I_{Ra} 为 1.7,外照射指数 I_{r} 为 2.3,满足《GB 6566—2010 建筑材料放射性核素限量》中 C 类装饰装修材料只可用于建筑物的外饰面及室外其他用途要求。固硫灰外观呈棕灰色,粉状,含水率

表 1 赤泥和固硫灰的化学成分

Table 1 Chemical composition of red mud and CFB fly ash

原料	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	SO_3	Na_2O	烧失量
赤泥	20.02	23.68	24.26	13.50	0.74	0.62	2.77	9.45	8.84
固硫灰	37.60	28.40	15.00	6.86	0.75	1.28	8.18	0.10	6.12

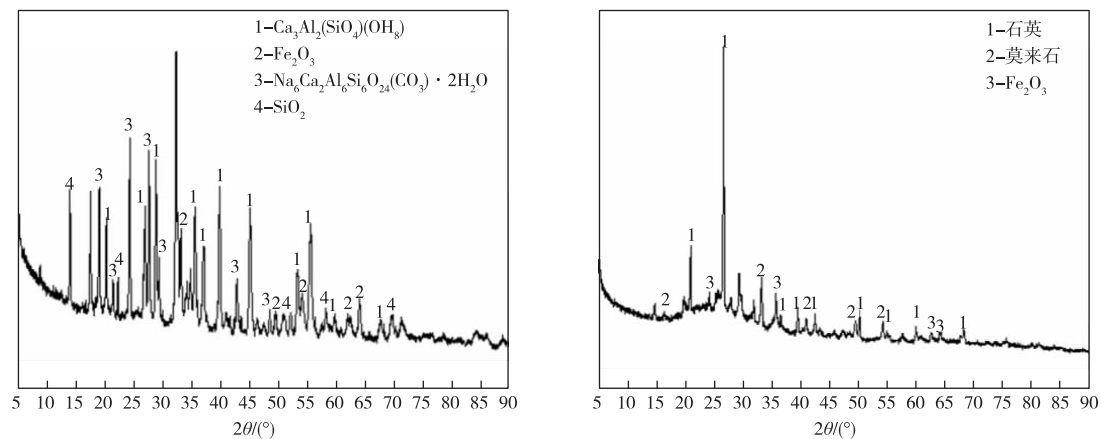


图 1 赤泥和固硫灰的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of red mud and CFB fly ash

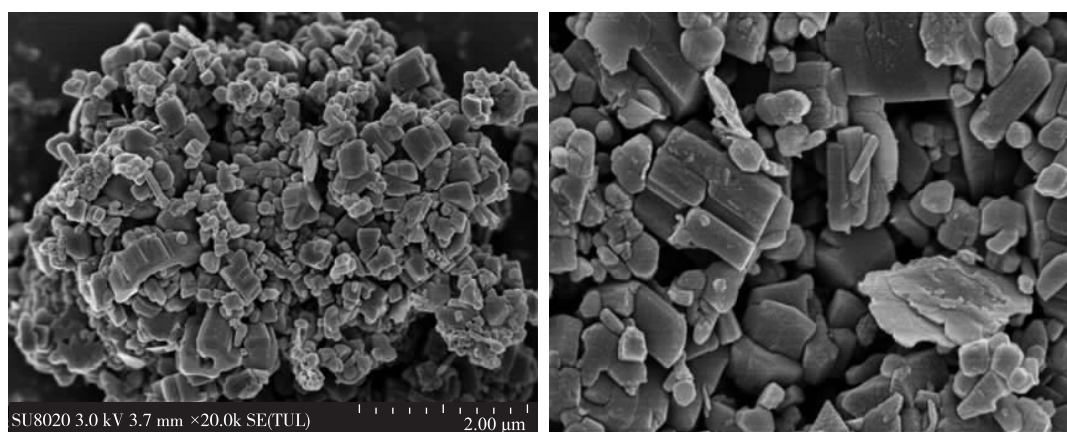


图 2 赤泥的 SEM 图像

Fig. 2 SEM images of red mud

为 18.9%，其烧失量为 6.12%。通过 XRF 分析可知固硫灰主要化学成分为 SiO_2 与 Al_2O_3 ，分别占总量的 37.60% 与 28.40%，其次为 CaO ，占了总量的 15.00%。通过 XRD 分析可知固硫灰的物相组成为石英、莫来石等。本实验采用的矿粉为普通市售 S95 矿粉。外加剂为实验室自制，其主要成分为二水石膏、石英等，主要用来调整免烧砖的凝结过程。骨

料为普通市售标准石英砂。

1.2 研究方法

1.2.1 原料配比

本次实验主要研究赤泥-固硫灰基免烧砖中 Ca/Si 比对其力学性能、耐久性能影响。基于前期的试验基础，通过固定矿粉、外加剂和骨料掺量，调整赤泥、固硫灰掺量，调节 Ca/Si 比，配合比见表 2。

表 2 免烧砖配比设计

Table 2 Design of non-fired bricks ratio

编号	赤泥/%	固硫灰/%	外加剂/%	矿粉/%	骨料/%	Ca/Si
R1	30	25	3	15	22	1.16
R2	33	22	3	15	22	1.20
R3	36	19	3	15	22	1.25
R4	39	16	3	15	22	1.30

1.2.2 试样的制备及养护

试验采用 60 mm×60 mm×53 mm 的钢制试验模具和 20 mm×20 mm×20 mm 模具成型，按照表 2 所述实验配比。将赤泥和固硫灰放入水泥砂浆搅拌机中，加入一定量的水慢搅至成泥浆状，再将矿粉、添加剂等混合好的粉料加入搅拌机中搅拌 3~5 min 至混合均匀成粉状，最后加入骨料快速搅拌 2~3 min，将拌和好的浆料装入试模中并在一定成型压力下保压 30 s 压制成型。脱模放入养护箱养护。

1.2.3 性能测试方法

参照 GB/T 21144—2007《混凝土实心砖》^[10] 与 GB/T 4111—2013《混凝土砌块和砖试验方法》^[11] 进行性能检测。

1) 抗压强度测试

抗压强度计算公式如下：

$$R_p = \frac{P}{LB} \quad (1)$$

式中： R_p —抗压强度，MPa； P —最大破坏载荷，N； L —受压面（连界面）的长度，mm； B —受压面（连界面）的宽度，mm。

2) 抗冻性

取养护相同期龄的 10 个试块，分为两组每组 5 个试块。将冻融实验组的试块浸水 4 d 后取出放入 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温冰箱中 4 h 后取出放入 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水箱中，此为一次循环，每五次循环记录试块开裂、缺棱、掉角、剥落情况，对照组则在温度 $(20\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 $(50\pm 15)\%$ 的环境下养护。完成规定循环后按照抗压实验方法测试两组试块抗压强度。

3) 软化系数

取养护相同期龄的 10 个试块，分为两组每组 5 个试块。其中任意一组浸入 $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水中（水面要高于试块 20 mm 以上），4 d 后取出在铁丝网架上滴水 1 min 并用拧干的湿抹布擦拭外表面水。另一组则在温度 $(20\pm 5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相对湿度 $(50\pm 15)\%$ 的环

境下养护,采用抗压强度实验方法测试对比两组试样抗压强度并计算软化系数。

软化系数计算公式如下:

$$K_f = \frac{R_f}{R} \quad (2)$$

式中: K_f —材料的软化系数; R_f —5 个饱和面干砖试件的平均抗压强度, MPa; R —5 个气干状态对比砖的平均抗压强度, MPa。

2 结果与讨论

2.1 Ca/Si 比对免烧砖力学性能的影响

Ca/Si 比对免烧砖抗压强度的影响如图 3 所示,从图 3 可以看出,不同 Ca/Si 比对免烧砖的力学性能产生了较为明显的影响,随着养护时间的增加,免烧砖的抗压强度持续增加,在 28 d 时免烧砖的抗压强度超过 20 MPa,达到了 MU20 级别。此外,随着 Ca/Si 比的增加免烧砖样品的抗压强度呈现先增加后降低的趋势,当 Ca/Si 为 1.20 力学性能最优,3 d 强度约 15.76 MPa,7 d 强度约 18.26 MPa,28 d 强度达到了 25.56 MPa,满足 MU25 级别要求,当 Ca/Si 比超过 1.20 之后,免烧砖的抗压强度逐渐降低。

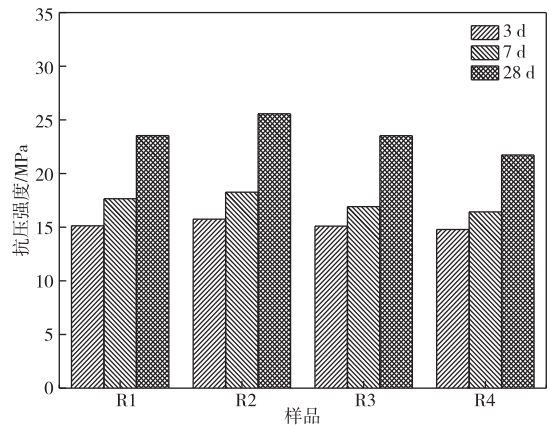


图 3 Ca/Si 比对免烧砖抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of Ca/Si ratio on compressive strength of non-fired bricks

2.2 Ca/Si 比对免烧砖软化系数的影响

经测试饱水前不同 Ca/Si 比免烧砖样抗压强度和泡水后免烧砖的抗压强度,并且根据 GB/T 21144—2007 的要求计算每组实验配方的软化系数,结果如图 4 所示,不同 Ca/Si 比免烧砖软化系数的试验结果均满足大于 0.8 的要求。耐水性是材料抵抗水破坏能力的大小,表 3 为不同 Ca/Si 的样品 28 d 期龄耐水性试验结果。

表 3 免烧砖的耐水性能试验结果

Table 3 Water resistance test results of non-fired bricks

编号	Ca/Si	未浸水强度/MPa	浸水强度/MPa
R1	1.16	24.44	20.29
R2	1.20	26.63	23.97
R3	1.25	24.31	20.18
R4	1.30	22.87	18.50

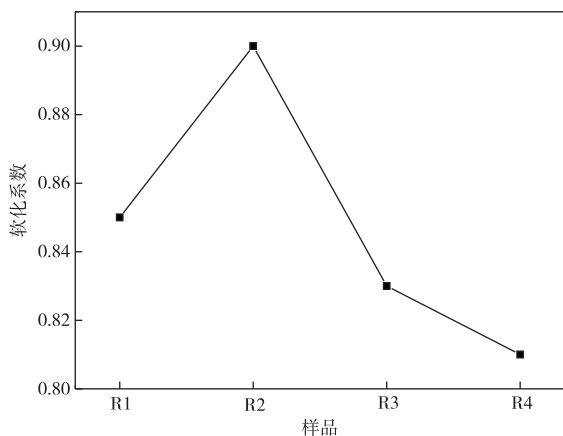


图 4 Ca/Si 比对软化系数的影响

Fig. 4 Effect of Ca/Si ratio on softening coefficient

从图 4 可以看出,免烧砖的软化系数随着 Ca/Si 比的增加呈现出先增加后降低的倒 V 型变化趋势,

在 Ca/Si 比为 1.20 时,免烧砖达到最高的软化系数为 0.9,免烧砖的抗压强度只损失了 2.66 MPa,但是当 Ca/Si 比超过 1.20 时,其软化系数逐渐降低,由此说明适当提高 Ca/Si 比有利于增加免烧砖的软化系数,能够提高免烧砖的耐久性能。本实验的四组实验软化系数均大于 0.8,这说明赤泥-固硫灰基免烧砖具有良好的软化性能,这主要是由于赤泥具有粒径小、易吸水的物理特性,试块浸泡在水中毛细孔吸水不断渗入砖块内部直至饱和,长时间浸水后的赤泥自身容易膨胀粉化变软导致微孔结构应力集中产生变形使孔径变大对试块强度造成危害使强度损失耐水性能减弱。

2.3 Ca/Si 比对免烧砖抗冻性能的影响

抗冻性是材料经过冻融循环后抵抗冻融破坏保持自身性能良好不变的一种性质是表征材料耐久性

的重要指标之一。由于样品在饱水后进行冻融循环试样毛细孔中的水在低温冷冻下结冰体积膨胀导致空隙变大结构受损如此反复循环导致试样结构疏松密实度降低从而导致强度降低^[12]。

根据抗冻性能标准完成相应次数冻融循环质量损失不能超过 2%, 强度损失不能超过 25%。由表 4 可以看出, 不同 Ca/Si 比样品在冻融循环后, 样品的质量均有所降低, 在 20 次冻融循环之后, Ca/Si

比为 1.20 的免烧砖的冻融循环质量损失最小, 其质量损失率为 0.95%, 其余样品的质量损失率则分别为 1.06%、1.09% 和 1.13%。由表 5 可以看出, 不同 Ca/Si 比免烧砖样品在 20 次冻融循环之后, 抗压强度均有所降低, Ca/Si 比为 1.20 的免烧砖在 20 个冻融循环之后的抗压强度损失率最少, 其抗压强度损失率为 15%, 其余样品的抗压强度损失率组在 20 个冻融循环之后分别为 18%、20%、22%。

表 4 冻融循环后质量损失

Table 4 Quality loss after freeze-thaw cycle

/%

编号	不同循环次数后的质量损失			
	第 5 次循环	第 10 次循环	第 15 次循环	第 20 次循环
R1	0.36	0.62	0.83	1.06
R2	0.29	0.58	0.81	0.95
R3	0.38	0.70	0.86	1.09
R4	0.40	0.71	0.90	1.13

表 5 20 次冻融循环后强度损失

Table 5 Strength loss after 20 freeze-thaw cycles

编号	冻融前强度/MPa	冻融后强度/MPa	强度损失率/%
R1	24.44	20.04	18
R2	26.63	22.64	15
R3	24.31	19.45	20
R4	22.87	17.84	22

不同 Ca/Si 比免烧砖样品冻融前后吸水率的实验结果如图 5 所示, 从图 5 可以看出, 冻融前后试块的吸水率均有所增加, 由此说明冻融前后免烧砖的孔隙结构发生变化, 随着冻融循环的增加, 其孔隙结构变大导致吸水率增加。在 20 次冻融循环之后, Ca/Si 比为 1.20 的免烧砖的冻融前后吸水率变化最小, 冻融前后吸水率变化为 5.5%, 其余免烧砖样品的冻融前后吸水率变化分别为 7.3%、6%、6.5%, 这表明随着 Ca/Si 比的增加, 免烧砖冻融后

的吸水率变化呈现降低趋势, 当 Ca/Si 比达到 1.20 时, 冻融前后吸水率差值达到最低值, 随着 Ca/Si 比的增加吸水率差值逐渐增加。

通过冻融前后质量损失率、强度损失率以及冻融前后吸水率差值变化来看, Ca/Si 比为 1.20 的免烧砖抗冻性能最好。由此可以得出, 适当增加 Ca/Si 比有利于降低免烧砖的孔隙率, 使得其在饱水过程中吸水率更小, 从而在冻融过程中其膨胀率更小, 有利于提高免烧砖的抗冻性能。

2.4 不同 Ca/Si 比免烧砖物相组成分析

为了探究免烧砖的强度形成机理, 利用 XRD 对免烧砖的物相组成进行了分析。不同 Ca/Si 比的净浆块养护至 28 d 的 XRD 图谱如图 6 所示, 从图 6 可以看出免烧砖的主要水化产物为 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶、钙矾石等。样品 R2 的 C-A-S-H 凝胶、C-S-H 凝胶和钙矾石 (AFt) 衍射峰的强度最高, 样品 R3 中 C-A-S-H 凝胶、C-S-H 凝胶和钙矾石衍射峰的强度次之, 样品 R1 的衍射峰强度相对最低。这说明样品 R2 与其他两组相比, 在同样的养护条件下水化反应进行的更加彻底, 生成了相对数量最多的水化产物, 与力学、耐久性能的分析结果一致^[13]。这主要是由于随着 Ca/Si 比的增加, 体系中 Ca^{2+} 含量

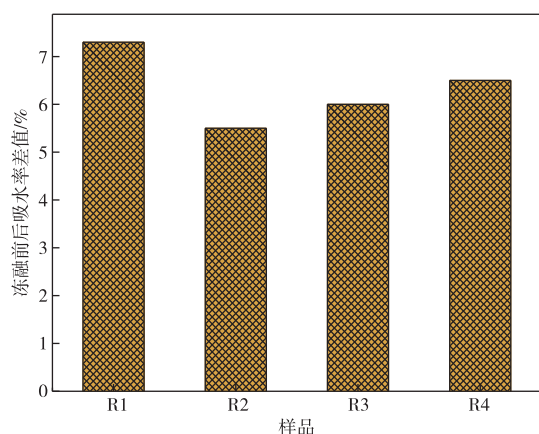


图 5 不同 Ca/Si 在冻融前后的吸水率差值

Fig. 5 Water absorption difference of different Ca/Si before and after freeze-thaw

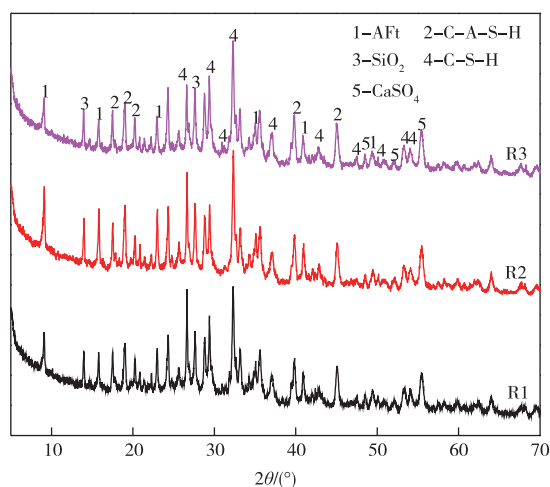


图6 不同Ca/Si比样品的XRD图谱

Fig. 6 XRD patterns of samples R1, R2 and R3

逐渐增加,并与原料中的硅氧化物与铝氧化物生成更多的C-S-H凝胶、C-A-S-H凝胶与钙矾石。但是随着Ca/Si比不断增加,免烧砖体系中大量Ca未能被有效利用,混合料中过剩的 Ca^{2+} 会阻碍C-A-S-H凝胶、C-S-H凝胶与AFt的生成^[14]。根据此前性能测试以及XRD分析可以得出,C-A-S-H凝胶、C-S-H凝胶与钙矾石的生成量越高越有助于提高免烧砖的抗压强度。

2.5 不同Ca/Si比免烧砖微观形貌分析

图7分别为样品R1、R2、R3的微观形貌结构图,从图7可以看到,在样品表面存在许多针棒状的钙矾石和絮状的C-S-H凝胶和C-A-S-H凝胶,絮状的凝胶相互交织在一起包裹在未反应原料颗粒和针棒状钙矾石的表面,减少孔隙结构,增加致密性,为

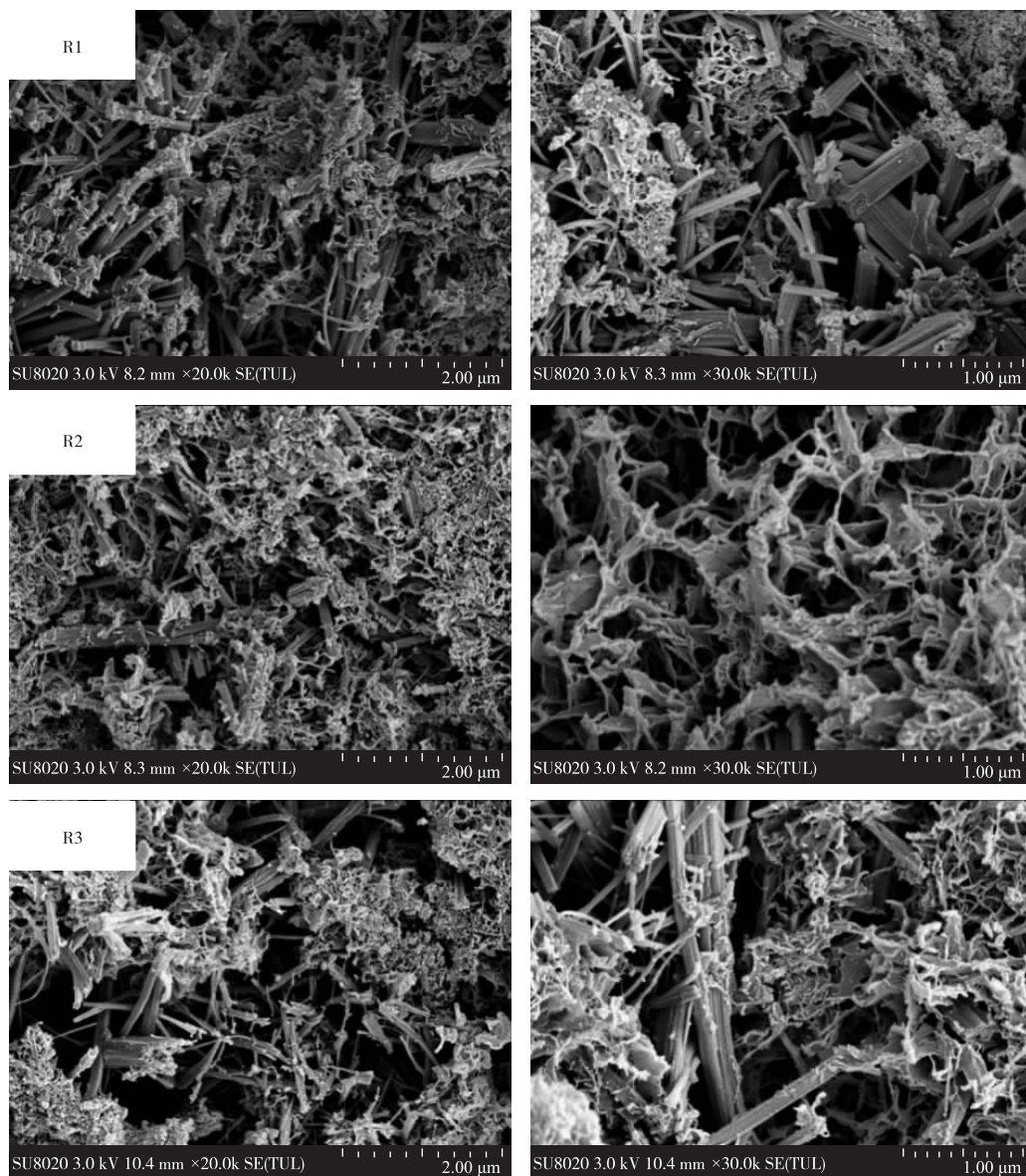


图7 样品R1、R2、R3的SEM像

Fig. 7 SEM images of samples R1, R2, and R3

免烧砖提供强度支持^[15]。通过对比样品 R1、R2、R3 的微观形貌可以看出,样品 R1 水化反应生成的针棒状的钙矾石被絮状的 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶围绕,形成了较为致密的网状结构,钙矾石长度较短数量较少分布稀疏。样品 R3 表面絮状的 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 凝胶相对较少钙矾石与其他两组相比较细长。样品 R2 中钙矾石生长相对粗壮,数量较多,凝胶数量更多,交错生长分布密集,形成更为致密的结构,在孔洞处细长的钙矾石交织成网状填充空隙。孔洞内部被针棒状的钙矾石和少量絮状凝胶团填充从而减少了有害孔的影响,对其强度和耐久性能的提升具有促进作用。

3 结论

1)免烧砖的力学性能随 Ca/Si 比增加呈先增加后减小的趋势,当 Ca/Si 比为 1.2 时,免烧砖的抗压强度达到最优,可达 26.63 MPa,满足国标 GB/T 21144—2007《混凝土实心砖》中 MU25 的要求。

2)Ca/Si 比在 1.16~1.25 内免烧砖的软化系数均大于 0.8,具有良好的耐水性能。且 Ca/Si 比在 1.16~1.25 内,软化系数呈先升高后降低的趋势,当 Ca/Si 为 1.2 时,软化系数达到最大值为 0.9,拥有最佳的耐水性能,免烧砖经 20 次循环后,抗压强度损失小于 25%,质量损失小于 2%,具有良好的抗冻性能。

3)免烧砖水化产物主要为 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶和钙矾石等。C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶等与钙矾石相互交织在一起形成网络结构并填充孔隙,随着水化龄期的增长 C-S-H 凝胶、C-A-S-H 凝胶与钙矾石也会相互增长,其网络结构也会更加密实,对其强度和耐久性能的提高起到积极作用。

参考文献

- [1] 王春林,闫振国,钱云云,等.赤泥基充填体力学和水化动力学研究[J].有色金属(矿山部分),2023,75(1):26-33,38.
WANG Chunlin, YAN Zhenguo, QIAN Yunyun, et al. Experimental study on mechanics and hydration kinetic of red mud-based cemented paste backfill [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2023, 75(1): 26-33, 38.
- [2] LI Y, LIU X, LI Z, et al. Preparation, characterization and application of red mud, fly ash and desulfurized gypsum based eco-friendly road base materials [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 284: 124777. DOI: 10. 1016/j. jclepro. 2020. 124777.
- [3] 张瑞,刘文欢,张浩,等.废弃砖粉协同固硫灰制备新型路基稳定材料的性能研究[J].材料导报,2022,36(12):116-122.
ZHANG Rui, LIU Wenhuan, ZHANG Hao, et al. Performance research on new subgrade stabilized materials prepared by waste brick powder and sulfur fixing ash [J]. Materials Reports, 2022, 36(12): 116-122.
- [4] 韩东霄,阎蕊珍,李倩,等.不同养护条件下掺循环流化床固硫灰硬化水泥浆的膨胀性能[J].Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(12): 4332-4341.
HAN Dongxiao, YAN Ruizhen, LI Qian, et al. Expansion performance of hardened cement paste with circulating fluidized bed fly ash under different curing conditions [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(12): 4332-4341.
- [5] 李艳梅,郭鹏飞.大掺量赤泥-固硫灰制备砌筑水泥的试验研究[J].建材技术与应用,2019, 212(6):6-8.
YU Yanmei, GUO Pengfei. Experimental study on the preparation of masonry cement with large amount of red mud and sulfur fixing ash [J]. Research & Application of Building Materials, 2019, 212(6): 6-8.
- [6] 高健,王晓磊,李军,等.高炉矿渣制备免烧砖强度的试验研究[J].新型建筑材料,2022,49(11):165-168.
GAO Jian, WANG Xiaolei, LI Jun, et al. Experimental study on preparation of baking-free bricks from blast furnace slag [J]. New Building Materials, 2022, 49(11): 165-168.
- [7] HU Y X, YANG D, LI S S, et al. Preliminary study on preparation of unfired bricks using filter cake from tunnel muck [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 60: 105175. DOI: 10. 1016/j. jobe. 2022. 105175.
- [8] 覃丽芳,曲波,史才军,等.钙硅比对铝硅酸盐凝胶形成与特性的影响[J].材料导报,2020,34(12):12057-12063.
QIN Lifang, QU Bo, SHI Caijun, et al. Effect of Ca/Si ratio on the formation and characteristics of synthetic aluminosilicate hydrate gels [J]. Materials Reports, 2020, 34(12): 12057-12063.
- [9] KAPELUSZNA E, KOTWICA L, ROZYCKA A, et al. Incorporation of Al in C-A-S-H gels with various Ca/Si and Al/Si ratio: microstructural and structural characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM analysis [J]. Construction & Building Materials, 2017, 155(30): 643-653.
- [10] 全国墙体屋面及道路用建筑材料标准化技术委员会.混凝土实心砖:GB/T 21144—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
National Technical Committee for Standardization of Building Materials for Walls, Roofs, and Roads. Concrete solid bricks: GB/T 21144—2007 [S] Beijing: China Standards Publishing House, 2007.
- [11] 全国墙体屋面及道路用建筑材料标准化技术委员会.混凝土砌块和砖试验方法:GB/T 4111—2013[S].北京:中国国家标准化管理委员会,2013.
National Technical Committee for Standardization of Building Materials for Walls, Roofs, and Roads. Test methods for concrete blocks and bricks: GB/T 4111—2013 [S] Beijing: Standardization Administration of China, 2013.
- [12] 胡彪,曾亮,姜建松.锂渣免烧砖研究[J].江西建材,2021(6):

- 16-18.
HU Biao, ZENG Liang, JIANG Jiansong. Study on lithium slag unburned brick[J]. Jiangxi Building Materials, 2021(6):16-18.
- [13] ZHANG H. Acceleration effect of synthesised calcium silicate hydrate with different morphologies and Ca/Si on cement hydration[J]. Advances in Cement Research, 2019, 31(9): 423-434
- [14] LI Y, YANG H, ZHANG Y, et al. Steel slag-red mud-based multi-solid waste pavement base material: preparation, properties and microstructure study[J]. JOM, 2022, 74(2): 429-438.
- [15] 吴红, 卢香宇, 罗忠竞, 等. 活化煤矸石免烧砖制备及机理分析[J]. 非金属矿, 2018, 41(1):30-33.
- WU Hong, LU Xiangyu, LUO Zhongjing, et al. Preparation and mechanism analysis of activated coal gangue unburned bricks[J]. Non-Metallic Mines, 2018, 41(1):30-33.
- (编辑:周叶)

(上接第 155 页)

- [16] BARTON N, LIEN R, LUNDE J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support [J]. Rock Mechanics, 1974, 6(4):189-236.
- [17] SINGH S P. Technical note: burst energy release index[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1988, 21(2):149-155.
- [18] KIDYBINSKI A. Bursting liability indices of coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1981, 18(6):295-304.
- [19] RICHARD S. Analysis of fault-slip mechanisms in hard rock mining[D]. Montreal: McGill University, 1999.
- [20] AFRAEI S, SHAHRIAR K, MADAM S H. Developing intelligent classification models for rockburst prediction after recognizing significant predictor variables, Section 1: literature review and data preprocessing procedure[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83:324-353.
- [21] 袁明礼, 侯克鹏, 孙华芬, 等. 某深竖井围岩岩爆倾向性预测研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(5):69-74.
- YUAN Mingli, HOU Kepeng, SUN Huafen, et al. Research on rockburst tendency prediction of surrounding rock of a deep shaft[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(5): 69-74.
- [22] 文兴, 黄聪, 覃敏, 等. 基于模糊数学法的阿舍勒铜矿深部岩体岩爆倾向性预测[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(4): 72-79.
- WEN Xing, HUANG Cong, QIN Min, et al. Prediction of rockburst propensity based on fuzzy mathematics in deep rock masses of the Ashele copper mine [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(4):72-79.
- [23] 李准, 苗勇刚, 夏志远. 深部矿山巷道岩爆倾向性预测及防治技术研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2021, 73(3):41-47, 60.
- LI Zhun, MIAO Yonggang, XIA Zhiyuan. Study on rockburst tendency prediction and prevention technology of deep mine roadway [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2021, 73(3):41-47, 60.
- (编辑:周叶)