

生活垃圾焚烧飞灰-底渣协同制备充填体力学性能研究*

刘音¹, 房昊¹, 闵令冉¹, 王春春¹, 杜玉娇¹, 陈姝蓉²

(1. 山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛市 266590;

2. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛市 266590)

摘要:为妥善处理生活垃圾焚烧产物(焚烧飞灰和焚烧底渣),从固体废弃物协同利用的角度出发,探究焚烧飞灰与焚烧底渣替代部分水泥应用于矿山充填领域的可行性。将生活垃圾的焚烧飞灰与焚烧底渣混合制备充填体,对养护龄期为3,7,28 d的充填体开展单轴抗压强度测试,基于混料试验设计建立抗压强度回归模型,结合响应面法分析不同掺量的焚烧飞灰和焚烧底渣对充填体力学性能的影响规律,并得出掺量最优配比。研究表明:当焚烧飞灰为35.3%、焚烧底渣为40.4%、水泥为24.3%,质量浓度为70%时,充填体的力学性能指标达到最优。掺入适量的焚烧飞灰和焚烧底渣可以延长水化反应过程,显著提高胶凝体系的水化反应程度,根据XRD测试和SEM观测得出,主要水化产物为水化硅酸钙和钙矾石,使充填体内部形成致密网状结构,进而提高充填体力学性能。

关键词:充填体;焚烧飞灰;焚烧底渣;优化配比;水化机理

中图分类号:TD803 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)06-0095-09

0 引言

煤炭工业是国民经济和社会平稳发展的有力支撑,同时也带来诸多问题,如煤炭开采所形成的大量采空区,容易引发地表下沉、矿震等一系列问题^[1-4]。根据国家“十四五”规划要求,提高矿产资源开发保护水平,发展绿色矿业,是目前亟需解决的重大问题^[5],膏体充填开采技术是实现矿山绿色开采的重要代表性技术^[6-8]。在膏体充填开采工艺中,水泥是矿井充填使用率较高的胶凝材料^[9],使用水泥的充填成本占采矿成本的25%以上^[10]。寻找水泥的替代材料,降低充填成本,是当今充填开采技术亟需解决的难题^[11-12]。

近年来,随着生活垃圾数量不断攀升,焚烧成为

处理生活垃圾的主要方式^[13-15],产生了大量的生活垃圾焚烧产物(包括焚烧飞灰与焚烧底渣^[16])。焚烧飞灰是生活垃圾焚烧过程中形成的固体颗粒物,其中细小的颗粒物随烟气进入烟气净化系统,与随后添加的石灰石或活性炭被除尘器共同捕集。焚烧底渣是炉排尾端排出的不可燃物,一般为无机物质,主要成分为金属氧化物、碳酸盐、硅酸盐等。焚烧飞灰与焚烧底渣的组成成分中均包括二氧化硅、氧化钙、氧化铝、氧化铁等,具有潜在的胶凝活性^[17]。焚烧飞灰和焚烧底渣具有成本低,材料来源充足的特点,使得二者制备的辅助胶凝材料具有良好的应用前景。国内外学者在矿山充填方向,对焚烧飞灰与焚烧底渣制备辅助胶凝材料进行了研究。王珂等^[18]利用焚烧飞灰、矿渣粉和脱硫石膏等作为胶凝材料,混合铁矿尾砂骨料,得到了满足我国矿山实际胶结充填强度要求的充填材料。YIN等^[19]制备了一种基于焚烧飞灰与磷石膏的充填材料,在焚烧飞灰质量占充填体总质量的3%时,充填体有最佳的力学性能,随着焚烧飞灰掺量的增加,充填体的强度出现折减。席壮民^[20]对焚烧底渣进行处理后,用于替换部分水泥制备超高性能混凝土,研究表明,焚烧底渣掺量为40%时,超高性能混凝土表面具有较大的孔洞与裂隙,但抗压强度仍高于100 MPa。石东升等^[21]将生活垃圾焚烧灰渣高温熔融后水淬处理制成水淬渣,而后进行快速水硬性试验,研究碱含量、压力、蒸压温度和时间对抗压强度的影响,结果表明,碱含量对水淬渣棱柱体强度的影响最为显著,在碱含量为10%时,抗压强度达到峰值。王志娟等^[22]研究了焚烧底渣-硅酸盐水泥体系的物化性能、强度和水化规律,结果表明,焚烧底渣吸附大量

* 收稿日期:2023-12-14

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2021ME138);国家创新创业计划项目(2021110424163)。

作者简介:刘音(1973—),女,陕西西脂人,博士,副教授,主要从事矿山环境保护与矿山充填材料技术方面的研究,E-mail:liuyin-73@163.com。

减水剂,且随着焚烧底渣掺量的增加,该体系需水量增加,水泥水化进程减缓。ABDULMATIN 等^[23]将焚烧底渣与电石残渣作为混凝土中的新型胶结材料,将两种材料按质量比为 7:3 进行混合研磨,得到了与传统混凝土具有相同耐磨性与力学性能的环保胶结材料。INRAHIM 等^[24]综合评估了粉煤灰、高炉渣、赤泥等固体废弃物作为低强度胶结料的胶凝活性,研究表明,粉煤灰由于其球状形态表现出最佳胶凝性,且两种或两种以上的固废混合使用可以极大地提高胶凝性。

上述研究表明,焚烧飞灰与焚烧底渣具有不同物化特性,且均具有潜在的胶凝活性,但焚烧飞灰的过量掺入会导致充填体的抗压强度出现折减;焚烧底渣的应用受制于其孔隙率过大,因此难以大量替代骨料或水泥生料。低掺量的焚烧飞灰和焚烧底渣的单独使用会对充填体的力学性能有所改善,但对飞灰与底渣的利用率较低。为实现生活垃圾焚烧产物的高效资源化,节约充填胶凝材料中水泥的使用,研究将焚烧飞灰、焚烧底渣与水泥混合制备焚烧飞灰-底渣胶凝材料(Fly Ash Slag Products Cementitious Material,简称 FASPCM),探究 FASPCM 对充填体的力学性能的影响,揭示其水化机理,为煤炭资源充

填开采的经济性、安全性提供技术支持。

1 试验原料与方法

1.1 试验原料

试验所用焚烧飞灰与焚烧底渣均来自周边县城炉排炉型焚烧炉处理的生活垃圾。采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)对焚烧飞灰和焚烧底渣的化学成分进行分析,结果见表 1。焚烧飞灰中氯盐(Cl^-)和三氧化硫(SO_3)等易溶于水的组分含量较高,会极大地影响焚烧飞灰资源化利用。本文为激发焚烧飞灰的胶凝活性,对其进行粉磨以释放胶凝活性物质,粉磨时间为 20 min。焚烧底渣为深灰色混合物,质地松散,主要由粉渣、玻璃碎渣、瓷片及金属块料组成。将焚烧底渣置于(85 ± 5) $^\circ\text{C}$ 的真空干燥箱中进行干燥,干燥后对其进行磁选,以去除其中的金属块料。试验过程中利用粉磨破碎机将焚烧底渣进行粉磨,粉磨后过 180 目筛网,将筛网下焚烧底渣收集备用。

试验所用水泥为 P·F 32.5 粉煤灰硅酸盐水泥,煤矸石来自山东某煤矿,为满足煤矿对充填材料制备的要求,将煤矸石进行破碎筛分,保证煤矸石最大粒径小于 25 mm。

表 1 生活垃圾焚烧飞灰和焚烧底渣的主要化学成分占比

Table 1 Main chemical composition and content of incineration fly ash and incineration bottom slag from domestic waste %

焚烧产物	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	SO_3	Cl^-	Na_2O	K_2O	MgO
焚烧飞灰	2.64	0.63	1.43	54.22	6.61	22.89	1.55	6.89	—
焚烧底渣	42.62	9.62	5.25	18.73	1.82	1.77	—	—	2.04

1.2 样品制备及试验设计

1.2.1 充填体制备

本次试验以 30% 水 + 14% FASPCM + 56% 煤矸石制备充填体。将充填材料按照比例混合,然后倒入搅拌机中,搅拌 300 s,将搅拌均匀的料浆浇筑于 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm 的模具中,置于恒温恒湿的养护箱中(温度为 20 $^\circ\text{C}$,湿度为 90%),24 h 后进行脱模,然后将脱模充填膏体试块放回养护箱中进行养护。

1.2.2 试验方案设计

混料试验设计是试验设计中重要的配方优化方法。基于混料试验设计理论,选用试验次数较少且模型简单的混料单纯形重心设计法设计试验,单纯形重心设计数学模型为:

$$y = \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i < j < k} b_{ijk} x_i x_j x_k \quad (1)$$

式中, x_i 为材料占比,即试验因子; k 为混料中材料数量; b 为回归系数; y 为试验指标。

利用 Design-Expert 软件对 FASPCM 配比进行混料设计,分析 FASPCM 各部分掺量对充填体不同养护龄期抗压强度的影响,并从充填体的基本性能对其配比进行优化。根据混料设计原则,以 FASPCM 质量为 100%,确定水泥、焚烧飞灰和焚烧底渣的掺量范围,见表 2,试验方案见表 3。为使试验更加灵活,提高回归模型的准确度,增加 1 组重复试验点以及 1 组 3 个三角形内部棱边中心试验点,共计 11 组试验。

表 2 FASPCM 各组分掺量范围

Table 2 Content range of each component of FASPCM

材料	掺量下限/%	掺量上限/%
水泥 x_1	5	25
焚烧飞灰 x_2	35	55
焚烧底渣 x_3	40	60

表3 FASPCM 配比试验方案

Table 3 FASPCM proportioning experiment scheme

方案	水泥掺量/%	焚烧飞灰掺量/%	焚烧底渣掺量/%
1	5	35	60
2	5	45	50
3	5	55	40
4	8.4	38	53.6
5	8.4	48	43.6
6	11.7	41.6	46.7
7	15	35	50
8	15	45	40
9	18.4	38	43.6
10	25	35	40
11	25	35	40

2 试验结果与讨论

2.1 试验结果分析

FASPCM 配比试验结果见表 4。将试验结果输入 Design-Expert 软件,参照式(1)的数学模型分别对充填体性能进行分析,确定各分项系数,构建数学模型,充填体单轴抗压强度数学模型见式(2)至式(4)。

$$y_{3d} = 33.67x_1 - 2.71x_2 - 2.41x_3 - 36.58x_1x_2 - 16.95x_1x_3 + 10.60x_2x_3 - 104.21x_1x_2x_3 - 75.33x_1x_2(x_1 - x_2) - 37.83x_1x_3(x_1 - x_3) \quad (2)$$

$$y_{7d} = 46.58x_1 - 1.71x_2 + 3.11x_3 - 235.62x_1x_2 + 41.25x_1x_3 - 4.25x_2x_3 + 177.18x_1x_2x_3 - 263.59x_1x_2(x_1 - x_2) + 163.91x_1x_3(x_1 - x_3) \quad (3)$$

$$y_{28d} = -83.92x_1 - 33.52x_2 - 34.11x_3 + 757.72x_1x_2 + 376.02x_1x_3 + 138.43x_2x_3 - 2327.06x_1x_2x_3 - 42.22x_1x_2(x_1 - x_2) - 484.72x_1x_3(x_1 - x_3) \quad (4)$$

表4 FASPCM 配比试验结果

Table 4 Results of the FASPCM proportioning experiment

方案	3 d 强度/MPa	7 d 强度/MPa	28 d 强度/MPa
1	0.33	0.41	1.01
2	0.37	0.47	0.96
3	0.29	0.36	0.92
4	0.41	0.60	1.49
5	0.44	0.79	1.07
6	0.51	0.87	1.83
7	0.57	0.93	2.66
8	0.61	1.10	2.87
9	0.55	1.12	2.31
10	0.68	1.27	3.07
11	0.66	1.24	3.18

2.2 FASPCM 对充填体力学性能影响分析

2.2.1 抗压强度影响规律分析

根据回归方程式(2)绘制充填体 3 d 单轴抗压强度交互作用等高线图与响应面图,如图 1 所示。

由图 1 可以看出,当焚烧飞灰掺量一定时,随着焚烧底渣掺量的减少与水泥掺量的提高,充填体 3 d 抗压强度增长速度由快减慢后又增快,其中水泥掺量为 11.9%~16.9% 与焚烧底渣掺量为 42%~45.2% 时,强度增长最为平缓。当焚烧底渣掺量不变时,随着水泥掺量与焚烧飞灰掺量的改变,充填体 3 d 抗压强度变化并不明显。在水泥掺量高于 15% 时,随着焚烧底渣掺量的提高,焚烧飞灰掺量的减少,抗压强度呈现小幅上升趋势。焚烧飞灰和焚烧底渣本身胶凝活性较弱,水泥作为激发剂可提高二者胶凝活性。

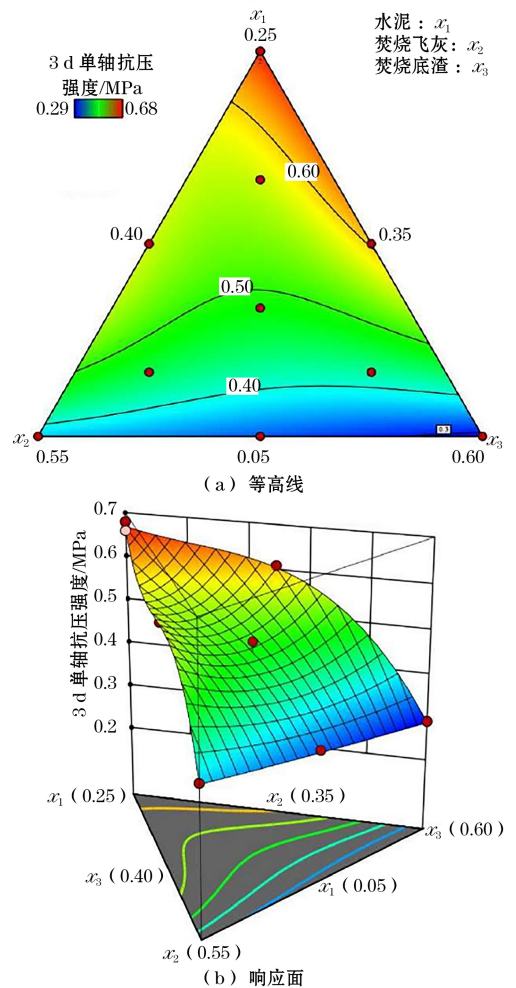


图1 3 d 单轴抗压强度等高线与响应面

Fig.1 3 d uniaxial compressive strength contour and response surface

根据回归方程式(3)绘制充填体 7 d 单轴抗压强度交互作用等高线图与响应面图,如图 2 所示。由图 2 可知,当焚烧飞灰掺量低于 38.3%、且水泥掺量高于 15% 时,充填体 7 d 抗压强度迅速提高。当焚烧飞灰掺量高于 38.3% 时,充填体 7 d 抗压强度先增大后减小。当焚烧底渣掺量低于 51.2% 时,充

填体 7 d 抗压强度随着水泥掺量的降低和焚烧飞灰掺量的提高先增大后减小最后又增大;当焚烧底渣掺量高于 51.2% 时,充填体 7 d 抗压强度随着焚烧飞灰掺量的降低与水泥掺量的提高不断增大。焚烧飞灰中含有大量 CaO 与 SO₃,二者与水混合后生成大量的氢氧化钙(CH)与石膏(CaSO₄ · 2H₂O),在充填体内部产生膨胀应力,造成充填体开裂,使其强度下降^[25]。高掺量的焚烧飞灰与焚烧底渣可以消耗更多的氢氧化钙,降低膨胀应力,且生成水化产物填补孔隙,提高充填体强度。

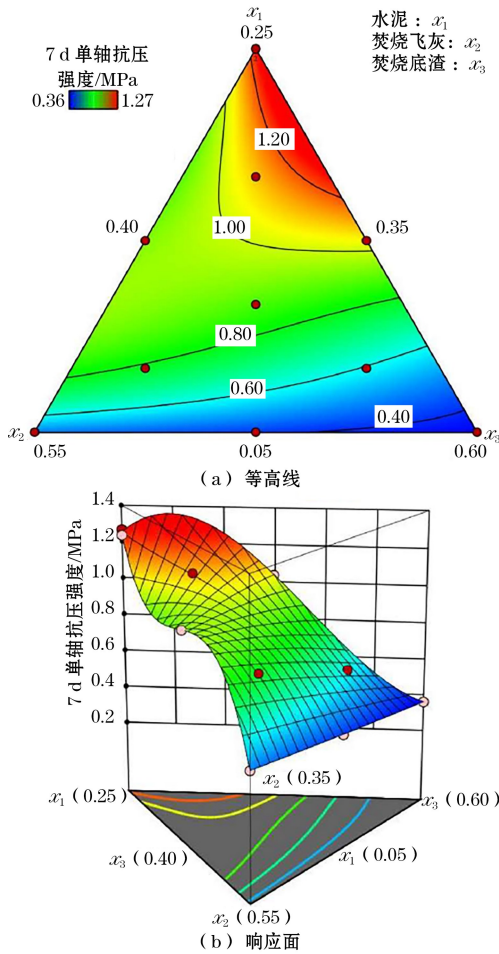


图 2 7 d 单轴抗压强度等高线与响应面
Fig.2 7 d uniaxial compressive strength contour and response surface

根据回归方程式(4)绘制充填体 28 d 单轴抗压强度交互作用等高线图与响应面图,如图 3 所示。由图 3 可以看出,当焚烧飞灰掺量一定时,随着焚烧底渣掺量的减少和水泥掺量的提高,充填体 28 d 强度呈上升趋势。改变相同幅度的水泥掺量,焚烧底渣掺量越高,充填体强度的涨幅越大。当水泥掺量一定时,随着焚烧飞灰掺量的提高和焚烧底渣掺量的降

低,充填体 28 d 抗压强度先降低后升高。焚烧底渣掺量高于 53.3% 时,内部胶凝物质更多地参与二次水化反应,为充填体提供了更高的后期强度,焚烧底渣掺量低于 53.3% 时,充填体后期强度主要由水泥水化提供。

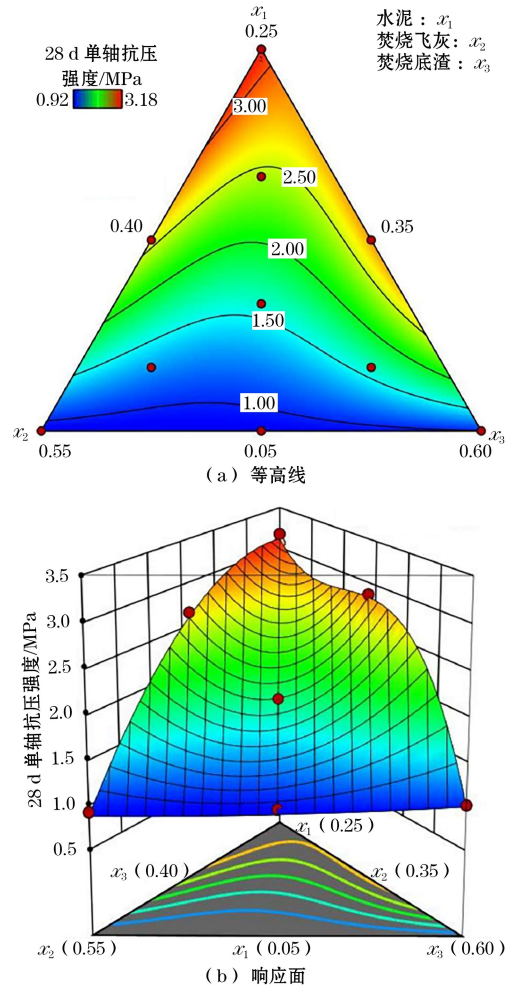


图 3 28 d 单轴抗压强度等高线与响应面
Fig.3 28 d uniaxial compressive strength contour and response surface

2.2.2 焚烧产物胶凝充填体配比多目标优化

对充填体 3 d、7 d、28 d 抗压强度数学模型求解,以达到多目标配比优化的效果。为满足充填体力学性能的同时,尽可能地减少充填体的成本,在本试验中所设定的区间范围内设置选取标准:水泥掺量为 5%~25%,在满足充填体性能的同时尽可能地取最小;焚烧飞灰掺量为 35%~55%,焚烧底渣掺量为 40%~60%,焚烧飞灰和焚烧底渣在满足充填体性能的同时尽可能地取最大。设定配比优化目标值见表 5,多目标配比优化结果见表 6。

由于水泥价格较高,为尽可能地降低充填的成本,选择水泥掺量较少的第 1 组配比进行验证试验。

试验结果显示,水泥掺量为 24.3%,焚烧飞灰掺量为 35.3%,焚烧底渣掺量为 40.4%时,充填体 3 d、7 d、28 d 单轴抗压强度分别为 0.638 MPa、1.242 MPa、3.071 MPa,满足目标值要求,且与预测值相近。充填体优化配比为:30%水+56%煤矸石+14%FASPCM,其中 FASPCM 由 24.3%水泥,35.3%焚烧飞灰,40.4%焚烧底渣组成。

表 5 配比优化目标值

Table 5 Target value for proportion optimization

3 d 单轴抗压强度/ MPa	7 d 单轴抗压强度/ MPa	28 d 单轴抗压强度/ MPa
>0.6	>1.2	>3

表 6 多目标配比优化结果

Table 6 Multi objective proportion optimization results

序号	材料占比/%			单轴抗压强度预测值/MPa		
	水泥	焚烧飞灰	焚烧底渣	3 d	7 d	28 d
1	24.3	35.3	40.4	0.655	1.249	3.049
2	24.8	35.2	40.0	0.661	1.226	3.118

3 水化产物物相组成分析

为探究 FASPCM 的水化机理,对 3 d、7 d 和 28 d 的最优配比 FASPCM 硬化净浆试块进行 XRD 分析,各养护龄期 FASPCM 硬化净浆试块的 XRD 衍射图谱如图 4 所示。由图 4 可知,FASPCM 净浆的物相主要为钙矾石(Aft)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、氧化铝(Al_2O_3)、硅酸二钙(C_2S)、硅酸三钙(C_3S)和氢氧化钙(CH)。

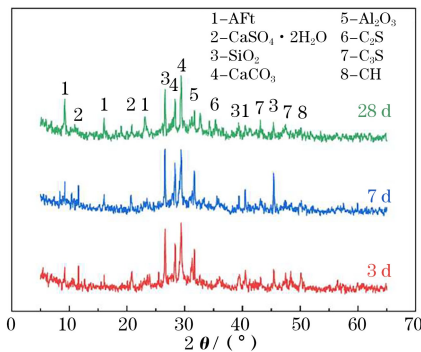


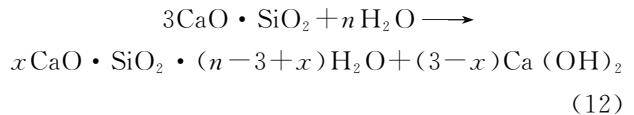
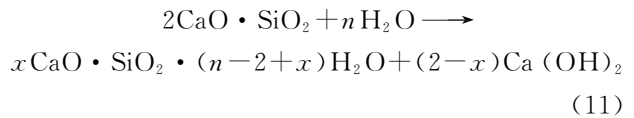
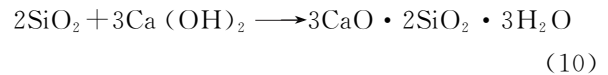
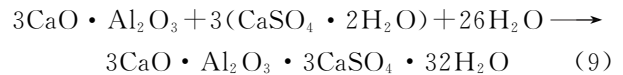
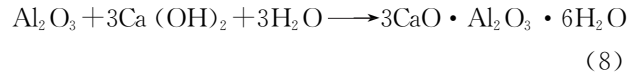
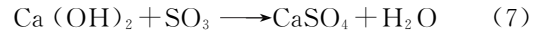
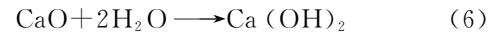
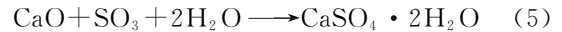
图 4 不同养护龄期 FASPCM 净浆试块 XRD 图谱

Fig.4 XRD patterns of FASPCM slurry specimens at different curing ages

对比不同养护龄期的 FASPCM 净浆试块的物相衍射峰强度可知,随着养护龄期的增长, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 与 Al_2O_3 衍射峰强度显著降低; SiO_2 、 C_2S 与 C_3S 衍射峰强度降低但不明显;Aft 衍射峰强度显著

提高;CH 衍射峰强度在 3~7 d 呈上升趋势,7~28 d 逐渐降低,28 d 几乎未见 CH 衍射峰。

分析上述现象产生的原因为:焚烧飞灰中含有较高含量的 CaO 与 SO_3 ,二者发生化学反应生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (见式(5)至式(7)),具有一定的强度。 Al_2O_3 为焚烧底渣中的主要成分,其在 CH 的碱性活化激发下会产生铝酸三钙(C_3A)^[26] (见式(8)),因此 Al_2O_3 衍射峰强度显著降低。二次水化生成的 C_3A 与水泥中原有的 C_3A 在 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量充足的情况下生成 AFt (见式(9)),使 AFt 衍射峰强度显著提高,其为强度的主要来源。胶凝体系中的 SiO_2 主要来自焚烧飞灰与焚烧底渣, SiO_2 在 CH 的作用下生成 C_2S (见式(10)),与水泥中原有 C_2S 、 C_3S 共同与水发生水化反应,生成水化硅酸钙(C-S-H)^[27] (见式(11)至式(12))。3~7 d CH 碱性活化作用较低,石灰熟化反应与水泥水化反应剧烈,CH 生成量大于消耗量,衍射峰强度增强,7~28 d 水化过程中所发生的反应主要为式(8)与式(10),CH 大量消耗,衍射峰强度减弱。



4 微观形貌分析

为验证 XRD 试验结果,分析 FASPCM 的水化产物形貌随养护龄期的变化,对不同养护龄期的最优配比 FASPCM 硬化净浆试块进行 SEM 观测分析。图 5 为养护龄期为 3 d 时 FASPCM 净浆试块微观结构,其中含有大量未反应原材料,如 CaCO_3 方形颗粒,焚烧飞灰球形颗粒。也可见反应生成物,如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、Aft、 C-S-H 。 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

含量增多,在养护龄期 3 d 时, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 含量充足的情况下, C_3A 反应活跃生成 AFt, AFt 交错生长,为此阶段强度的主要来源^[28]。焚烧飞灰表面的 AFt 短且细小,表明此时焚烧飞灰内的 Al_2O_3 的胶凝活性得到初步释放,而 CH 含量较少未充分激发其胶凝活性,整体结构松散,孔洞数量较多。

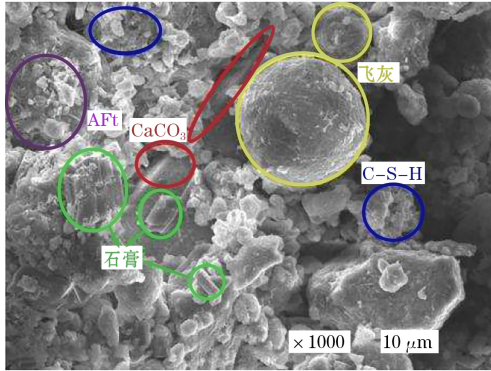
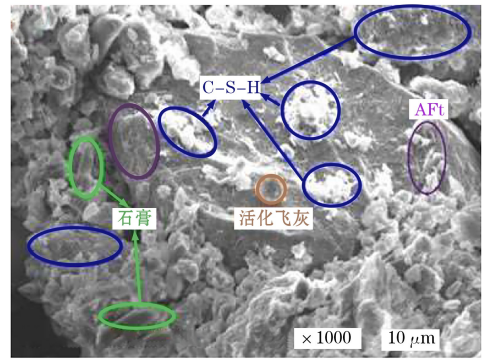


图 5 养护龄期为 3 d FASPCM 净浆试块微观结构

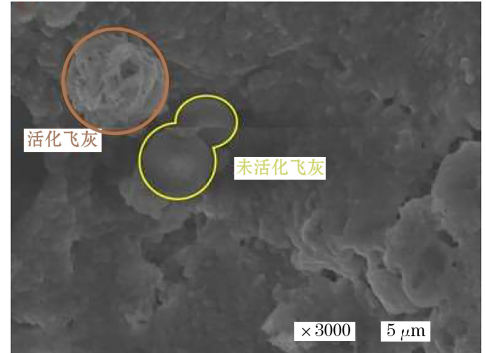
Fig.5 Microstructure of FASPCM slurry specimens at a curing age of 3 d

图 6 为养护龄期为 7 d 时 FASPCM 净浆试块微观结构,其中焚烧底渣的表面生成大量絮状 C-S-H 与针状 AFt,焚烧底渣的胶凝活性进一步释放,生成的 C-S-H 团絮增大了颗粒间的相互作用力,从而提高了抗压强度。将活化焚烧飞灰放大至 3000 倍观测,如图 6(b) 所示,养护龄期为 7 d 时,活化焚烧飞灰表面发育良好,被针状 AFt 完全覆盖,焚烧飞灰中的 Al_2O_3 胶凝活性得到了较为充分的激发。虽然焚烧飞灰中 Al_2O_3 含量较少,但其相较于 SiO_2 更容易释放胶凝活性。

图 7 为养护龄期为 28 d 时 FASPCM 净浆试块微观结构,其中随处可见 C-S-H,这表明养护龄期为 28 d 时,水泥中的 C_2S 与 C_3S 水化较为完全,并且焚烧底渣中的 SiO_2 在 CH 的作用下发生二次水化^[29],所有焚烧飞灰表面均遍布 C-S-H 与 AFt,这表明焚烧飞灰中 SiO_2 与 Al_2O_3 的均已被活化激发。将水化产物放大至 3000 倍观察,如图 7(b) 所示,AFt 交错生长,搭建了致密的网状结构,C-S-H 呈层絮状分布,与 AFt 相互搭接形成整体结构,两者结合紧密^[30]。养护龄期 28 d 时,由于水化,焚烧飞灰与焚烧底渣的网络结构被破坏,大量硅酸盐离子、铝酸盐离子析出并附着于颗粒表面,聚集至一定浓度后,将会发生水化反应,生成低钙硅比的 C-S-H 层,随着激发作用由表及里,促进了水化产物的大量形成。



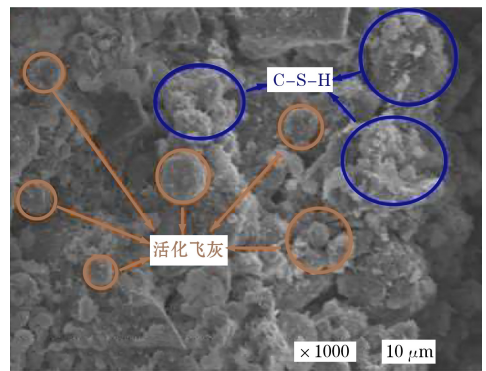
(a) 1000 倍



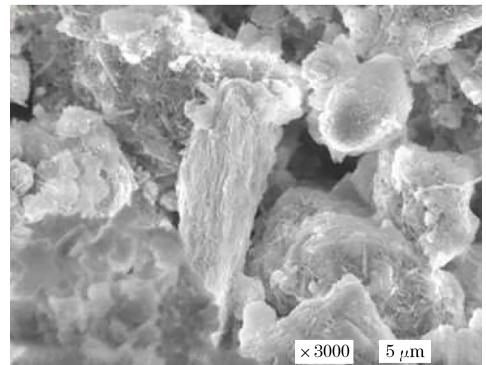
(b) 3000 倍

图 6 养护龄期为 7 d 时 FASPCM 净浆试块微观结构

Fig.6 Microstructure of FASPCM slurry specimens at a curing age of 7 d



(a) 1000 倍



(b) 3000 倍

图 7 养护龄期为 28 d 时 FASPCM 净浆试块微观结构

Fig.7 Microstructure of FASPCM slurry specimens at a curing age of 28 d

根据以上试验与分析,总结 FASPCM 水化机理,如图 8 所示。FASPCM 与水混合后,可溶性矿物开始溶解,向水中释放了大量的阴、阳离子。焚烧飞灰、焚烧底渣与水泥中的 CaO 与水反应生成 CH,整个胶凝体系处于碱性环境中,加速了各类矿物的溶解速度,推进了水化反应的进程。 OH^- 与焚烧飞灰与焚烧底渣中的 SiO_2 与 Al_2O_3 反应,使其表面逐渐被侵蚀,生成的 $[\text{H}_3\text{SiO}_4]^-$ 与 $[\text{Al}(\text{OH})_6]^{3-}$ 部

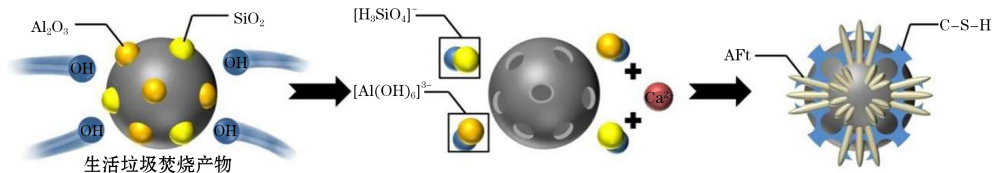


图 8 FASPCM 水化机理

Fig.8 Hydration mechanism of FASPCM

5 结论

本文提出将 FASPCM 作为胶凝材料制备充填体,并通过试验分析验证其作为充填材料的可行性,具体结论如下。

(1) 分析焚烧飞灰与焚烧底渣的物理化学性质,焚烧飞灰表面粗糙且附着大量碎屑状物质,具有较弱的潜在胶凝活性与较强的水化反应活性;焚烧底渣表面有大量大小不一的孔洞,孔洞内部充满碎屑颗粒,具有较强的潜在胶凝活性与较强的水化反应活性;二者均具有作为膏体充填胶凝材料的物质基础,相较于单独使用焚烧飞灰或焚烧底渣,将二者混合使用可获得更强的胶凝活性。

(2) 将焚烧飞灰与焚烧底渣混合使用可实现生活垃圾焚烧产物的高效资源化,并且其制作的充填体有较强的力学性能。采用响应面法进行多目标配比优化,得到充填体优化配比为:30%水、56%煤矸石、14%FASPCM,其中 FASPCM 由 24.3%水泥,35.3%焚烧飞灰,40.4%焚烧底渣组成,此时的充填体 3, 7, 28 d 单轴抗压强度分别为 0.638, 1.242, 3.071 MPa。

(3) FASPCM 前期水化过程会提供大量 OH^- , OH^- 可克服钙相的水解活化能,侵蚀生活垃圾焚烧飞灰与焚烧底渣的玻璃体惰性表面层,使生活垃圾焚烧产物内部的胶凝活性物质得以释放,并成为成核点,生成的 $[\text{H}_3\text{SiO}_4]^-$ 与 Ca^{2+} 结合生成 C-S-H 与 AFt。初期生活垃圾焚烧产物二次水化反应生成物较少且颗粒细小,后期反应生成物遍布

分附着于焚烧飞灰与焚烧底渣颗粒表面,部分逐渐进入到胶凝水溶液中,两种离子以自身为成核点,结合 Ca^{2+} 生成 C-S-H 与 AFt。此过程通过 SEM 观测可发现焚烧飞灰与焚烧底渣表面出现细小针状 AFt 与絮状 C-S-H。随着附着的产物增多,水化产物层变得致密,溶液中的 OH^- 难以透过 C-S-H、AFt 与硅铝无定形玻璃体发生反应,致使成核点数量下降,水化反应延缓,整个胶凝体系进入稳定状态。

充填体内部,搭接形成致密网状结构,使抗压强度大幅提高。

参考文献(References):

- [1] 何荣兴,韩智勇,周颜军,等.金属非金属矿山采空区灾害特征分析及预防措施[J].矿业研究与开发,2020,40(9):33-38. HE Rongxing, HAN Zhiyong, ZHOU Yanjun, et al. Analysis on disaster characteristics and preventive measures of goaf in metal and non-metal mines[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(9): 33-38.
- [2] 王双明,孙强,乔军伟,等.论煤炭绿色开采的地质保障[J].煤炭学报,2020,45(1):8-15. WANG Shuangming, SUN Qiang, QIAO Junwei, et al. Geological guarantee of coal green mining [J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 8-15.
- [3] 谢和平,鞠杨,高明忠,等.煤炭深部原位流态化开采的理论与技术体系[J].煤炭学报,2018,43(5):1210-1219. XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources [J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210-1219.
- [4] 钱鸣高,许家林.煤炭开采与岩层运动[J].煤炭学报,2019,44(4):973-984. QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973-984.
- [5] 袁亮,张平松.煤炭精准开采地质保障技术的发展现状及展望[J].煤炭学报,2019,44(8):2277-2284. YUAN Liang, ZHANG Pingsong. Development status and prospect of geological guarantee technology for precise coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2277-2284.
- [6] 胡炳南,郭文砚.采煤沉陷区损害防治对策与技术发展方向[J].煤炭科学技术,2022,50(5):21-29.

- HU Bingnan, GUO Wenyan. Counter measures and technical development direction of damage prevention in coal mining subsidence area[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(5): 21-29.
- [7] 刘永飞.现阶段我国煤矿充填开采技术及其发展趋势[J].内蒙古煤炭经济, 2022(2): 127-129.
- LIU Yongfei. At present, China's coal mine filling mining technology and its development trend[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(2): 127-129.
- [8] 刘建功,李新旺,何团.我国煤矿充填开采应用现状与发展[J].煤炭学报, 2020, 45(1): 141-150.
- LIU Jianguo, LI Xinwang, HE Tuan. Application status and prospect of backfill mining in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 141-150.
- [9] 王立国.建筑材料对混凝土结构工程质量的影响[J].智能城市, 2020, 6(11): 202-203.
- WANG Ligu. The influence of building materials on the quality of concrete structure engineering[J]. Intelligent City, 2020, 6(11): 202-203.
- [10] 李茂辉,杨志强,王有团,等.粉煤灰复合胶凝材料充填体强度与水化机理研究[J].中国矿业大学学报, 2015, 44(4): 650-655+695.
- LI Maohui, YANG Zhiqiang, WANG Youtuan, et al. Experiment study of compressive strength and mechanical property of filling body for fly ash composite cementitious materials[J]. Journal of China University of Mining &. Technology, 2015, 44(4): 650-655+695.
- [11] 张海军,李英,赵永贤.粉煤灰替代部分水泥的膏体充填技术[J].有色金属(矿山部分), 2009, 61(3): 1-2+18.
- ZHANG Haijun, LI Ying, ZHAO Yongxian. Study on paste filling using fly ash to replace few cement[J]. Nonferrous Metals (Mine Section), 2009, 61(3): 1-2+18.
- [12] 吕昌刚,戚洋,于光耀.膏体充填开采实施粉煤灰等强替代水泥研究[J].山东煤炭科技, 2017(11): 173-174.
- LYU Changgang, QI Yang, YU Guangyao. Study on the application to fly ash to the replacement to full-strength cement in paste filling [J]. Shandong Coal Science and Technology, 2017(11): 173-174.
- [13] 张乃仁.生活垃圾焚烧处理的环境危害[J].生态经济, 2023, 39(11): 5-8.
- ZHANG Nairen. Environmental hazards of municipal solid waste incineration [J]. Ecological Economy, 2023, 39(11): 5-8.
- [14] 别如山,宋兴飞,纪晓瑜,等.国内外生活垃圾处理现状及政策[J].中国资源综合利用, 2013, 31(9): 31-35.
- BIE Rushan, SONG Xingfei, JI Xiaoyu, et al. Status and policy of domestic waste treatment at home and abroad[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(9): 31-35.
- [15] 沙之杰.低碳经济背景下的中国节能减排发展研究[D].成都:西南财经大学, 2011.
- SHA Zhijie. Study on the development of China's energy conservation and emission reduction based on a low carbon economy[D]. Chengdu: Southwest University of Finance and Economics, 2011.
- [16] LAM C H, BARFORD J P, MCKAY G. Utilization of municipal solid waste incineration ash in Portland cement clinker[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2011, 13(4): 607-615.
- [17] 魏卫东,王革陈.碱激发矿渣-粉煤灰胶凝材料研究进展[J].粉煤灰综合利用, 2008(3): 52-54.
- WEI Weidong, WANG Gechen. Research progress of alkali activated fly ash slag cementing materials [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2008(3): 52-54.
- [18] 王珂,倪文,张思奇,等.垃圾焚烧飞灰-矿渣基胶凝体系及固结研究[J].有色金属工程, 2018, 8(5): 119-123.
- WANG Ke, NI Wen, ZHANG Siqi, et al. MSWI Fly ash-slag cementing system and cadmium solidification [J]. Nonferrous Metal Engineering, 2018, 8(5): 119-123.
- [19] YIN L L, GUO Q, WANG X, et al. Environmental filling materials based on phosphogypsum powder with municipal solid waste incineration ash [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 47.
- [20] 席壮民.垃圾焚烧废弃物在超高性能混凝土中的应用与研究[D].郑州:河南工业大学, 2022.
- XI Zhuangmin. Application and research of waste incineration in ultra high performance concrete [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2022.
- [21] 石东升,黄元,韩佳彤.水淬垃圾焚烧灰渣料性质与水硬性正交试验[J].混凝土, 2022(4): 89-92.
- SHI Dongsheng, HUANG Yuan, HAN Jiatong. Properties of water quenched waste incineration ash and orthogonal test on hydraulic[J]. Concrete, 2022(4): 89-92.
- [22] 王志娟,宋远明,陈学海,等.生活垃圾焚烧底渣用作水泥混凝土掺和料研究[J].烟台大学学报(自然科学与工程版), 2016, 29(1): 51-54.
- WANG Zhijuan, SONG Yuanming, CHEN Xuehai, et al. Utilization of MSWI bottom ash as cement admixture[J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2016, 29(1): 51-54.
- [23] ABDULMATIN A, KHONGPERMGOSON P S, JATURAPITAKKUL C, et al. Use of eco-friendly cementing material in concrete made from bottom ash and calcium carbide residue[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(4): 1617-1626.
- [24] INRAHIM M, RAHMAN M K, NAJAMUDDIN S K, et al. A review on utilization of industrial by-products in the production of controlled low strength materials and factors influencing the properties [J]. Construction and Building Materials, 2022, 325: 126704.
- [25] 刘云强,左晓宝,黎亮,等.硫酸盐侵蚀下硬化水泥浆体微结构演变及膨胀过程的数值模拟[J].硅酸盐通报, 2022, 41(12): 4128-4138.

- LIU Yunqiang, ZUO Xiaobao, LI Liang, et al. Numerical simulation on microstructure evolution and expansion process of hardened cement paste under sulfate attack[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(12): 4128-4138.
- [26] 王雪. 钢渣碳化潜能评估及脱硫石膏激发钢渣碳化建材的制备[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
WANG Xue. The carbonation potential evaluation on steel slag and the preparation of desulfurization-gypsum-stimulated carbonation-cured steel slag building material [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [27] 肖珊珊. 原材料理化性质对碱激发粉煤灰/矿渣复合体系的影响[D]. 广州: 广州大学, 2019.
XIAO Shanshan. Effect of physical and chemical properties of raw materials on alkali-activated fly ash/slag blended system [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2019.
- [28] 张娜, 刘晓明, 孙恒虎. 赤泥-煤矸石基胶凝材料水化过程 XPS 分析[J]. 金属矿山, 2014(3): 171-176.
ZHANG Na, LIU Xiaoming, SUN Henghu. XPS analysis on hydration process of red mud-coal gangue based cementitious materials[J]. Metal Mines, 2014(3): 171-176.
- [29] 岳彩昊. 三元早强剂/聚合氯化铝复合粉煤灰水泥封孔材料性能研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2023.
YUE Caihao. Study on the properties of three-component early strength agent/polyaluminum chloride composite fly ash cement sealing material [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2023.
- [30] REN C Z, HUA D L, BAI Y H, et al. Preparation and 3D printing building application of sulfoaluminate cementitious material using industrial solid waste[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132597.

Research on the Mechanical Properties of Filling Body Prepared by Mixing Incineration Fly Ash with Bottom Slag of Municipal Solid Waste

LIU Yin¹, FANG Hao¹, MIN Lingran¹, WANG Chunchun¹, DU Yujiao¹, CHEN Shurong²

(1. Collage of Safety and Environment Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China; 2. Collage of Earth Science and Engineering,

Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: In order to handle the municipal waste incineration products (incineration fly ash and incineration bottom slag), the feasibility of using incineration fly ash and incineration bottom slag as a substitute for part of cement in the field of mine filling was studied from the perspective of collaborative utilization of solid waste. Incineration fly ash and incineration bottom slag of municipal waste were mixed to prepare filling body, and then uniaxial compressive strength tests on filling body with curing ages of 3, 7, and 28 d were carried out. A compressive strength regression model was established based on mixture experiments design, and the influence of different dosages of incineration fly ash and incineration bottom slag on the mechanical properties of the filling body was analyzed using response surface methodology, and the optimal mixing proportion was obtained. The research results indicate that when the incineration fly ash is 35.3%, the incineration bottom slag is 40.4%, the cement is 24.3%, and the mass concentration is 70%, the mechanical property indicators of the filling body reach the optimal value. Adding an appropriate amount of incineration fly ash and incineration bottom slag can prolong the hydration reaction process and significantly improve the degree of hydration reaction in the cementitious system. According to XRD test and SEM observation, the main hydration products are hydrated calcium silicate and ettringite, which form a dense network structure inside the filling body and improve the mechanical properties of the filling body.

Key words: Filling body, Incineration fly ash, Incineration bottom slag, Proportion optimization, Hydration mechanism