

混掺垃圾飞灰和二次铝灰活性粉末混凝土性能研究

Research on the Performances of Reactive Powder Concrete with the Assembly Unit of
the Waste Fly Ash and the Secondary Aluminum Dross

杨俊超^{1,2}, 彭玲³, 陈永强³, 汪晖⁴

1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;
2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000;
3. 河北建筑工程学院, 河北 张家口 075000;
4. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 将二次铝灰 (SAD) 与焚烧垃圾飞灰 (WFA) 混掺制备成活性粉末混凝土 (RPC), 研究二次铝灰在两种混合料中的掺量对 RPC 流变性能参数 (扩展度和塑性黏度)、抗折强度、抗压强度以及干燥收缩率的影响, 并测定 RPC 在水中的重金属元素 (Cr 和 Zn) 渗出量; 观察 RPC 的微观形貌, 揭示 RPC 性能的机理。结果表明: 当二次铝灰的掺量为 60% 时, RPC 的扩展度、抗折强度与抗压强度以及干燥收缩率达到最高, 此时 RPC 的塑性黏度值最小; RPC 中 Cr 与 Zn 的渗出量与其渗出时间成正相关, 与 RPC 中二次铝灰的掺量成反相关; 当二次铝灰掺入 60% 时, RPC 的微观结构最密实。

关键词: 二次铝灰; 垃圾飞灰; 流变参数; 强度; 重金属渗出

中图分类号: TU5; U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 01-0039-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.008

YANG Junchao^{1,2}, PENG Ling³, CHEN Yongqiang³, WANG Hui⁴

- (1. Hebei University of Architecture, School of Civil Engineering, Zhangjiakou 075000, China;
2. Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Renovation and Disaster Resistance in Hebei Province, Zhangjiakou 075000, China;
3. Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
4. School of Civil Engineering and Geographical Environment, Ningbo University, Ningbo 315000, China)

Abstract: In this paper, the reactive powder concrete (RPC) is prepared with the assembly unit of secondary aluminum dross (SAD) and incineration waste fly ash (WFA). The influences of the SAD's mass ratio to the total mass of SAD and WFA on the rheological parameters (the slump flow and the plastic viscosity), the flexural strength and the compressive strength are investigated. The immersed heavy metals (Cr and Zn) are measured. The RPC's microscopic morphology obtained by the scanning electron microscope (SEM) is used to reveal the mechanism of RPC's performances. The researching results display that when the mass ratio of secondary aluminum dross is 60%, the slump flow, the flexural strength, the compressive strength and the drying shrinkage rate of RPC are the highest. However, the plastic viscosity of the RPC is the lowest at this moment. The amounts of the leached Cr and Zn are positively

作者简介: 杨俊超 (1982—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 工程材料、力学方面研究。

通信作者: 汪晖 (1987—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土木工程材料方面研究。

收稿日期: 2023-11-26

材料科学

correlated with its immersing time and inversely correlated with the amount of the secondary aluminum dross. When the amount of amount of the secondary aluminum dross is 60%, the microstructure of RPC is the most compact.

Keywords: secondary aluminum dross; waste fly ash; rheological parameters; mechanical strength; leached heavy metal

0 引言

焚烧垃圾飞灰是将生活垃圾高温焚烧后的固体废弃物,其中含有重金属锌、铬、铅和具有毒性的二恶英,这类材料属于危险固体废物^[1]。二次铝灰是一种由废弃铝材料经过再次处理得到的副产品,二次铝灰中含有一定量的重金属和有毒物质^[2]。如果这两类固体废物不经合理处理、随意堆积会引起环境污染。因此,需要对这两类固体废物进行固化处理。

研究得知,垃圾飞灰和二次铝灰中均含有一定的水泥水化活性物质,将这两种材料应用于水泥基材料中可以提高水泥基材料的力学与耐久性能^[3-4]。据报道,水泥基材料中加入垃圾飞灰后的强度较加入等量二次铝灰时高^[5]。然而,水泥基材料加入垃圾飞灰后其渗出的重金属含量比加入二次铝灰后的高^[6-7]。因此有必要将这两种材料混合使用加入水泥基材料中,这样既能提高水泥基材料的性能,又使得渗出的重金属元素在一个较低的范围内,这种处理固体废物方法较为理想。

普通的水泥基材料具有大量的孔隙,如果采用其固化垃圾飞灰与二次铝灰会引起水泥基材料中重金属渗出量较高^[8-9]。活性粉末混凝土(RPC)是通过最大密实度理论制备而成,其密实度高且具有十分优越的力学性能与耐久性能。将RPC用于固化垃圾飞灰与二次铝灰还能有效地减少重金属的渗出^[10-11]。以往研究发现,垃圾飞灰与二次铝灰中的火山灰效应可以有效地提高RPC的抗折强度与抗压强度等力学性能指标。同时,RPC的抗氯离子渗透性能、抗冻性能以及配筋后的耐腐蚀性能也会因二次铝灰与垃圾飞灰的加入而得到改善^[12]。然而,将这两种固体危废混合用于RPC中,并系统探索其性能变化的研究目前鲜有报道。

本文研究垃圾飞灰与二次铝灰混掺后对RPC工作性能(流动性和塑性黏度)、抗折强度、抗压强度、干燥收缩率以及重金属元素渗出的影响,并采用扫描电镜(SEM)观察其微观结构分析其性能机理,为垃圾飞灰和二次铝灰的固化处理以及资源化

利用提供了新的思路。

1 试验材料及试验方法

1.1 原材料性能

水泥采用宝丰河南大地水泥有限公司提供的普通硅酸盐水泥(POC),强度等级为42.5 MPa,密度为3.0 g/cm³,初凝时间为126 min,终凝时间为271 min。郑州河南中闯建筑材料有限公司生产的粒状高炉矿渣粉(BFS)和超细粉煤灰(FA)作为矿物掺合料,FA的比表面积为400 m²/kg,密度为2.2 g/cm³;BFS的密度和比表面积分别为2.8 g/cm³和434 m²/g,烧失率为2.3%。使用的石英砂粒径分别为0.15~0.297、0.35~0.59、0.71~1 mm,三种粒径的石英砂质量比为0.8:1.5:1,石英砂由99.6%的SiO₂和0.02%的Fe₂O₃等成分组成;石英砂与胶凝材料的质量比为1.25,质量比水泥:SF:BFS为1:0.5:0.15。垃圾飞灰(WFA)与二次铝灰(SAD)由江苏欧航环保科技有限公司提供,WFA中的Na₂O、CdO、Cr₂O₃、PbO、CuO和ZnO分别为4.3%、10.2%、0.07%、0.08%、0.09%和0.085%。减水剂采用平顶山河南立创利尔科技有限公司生产的聚羧酸高效减水剂调节新拌RPC浆体的流动性,减水率为40%,减水剂的掺量为胶凝材料总量的1.3%。水胶比为0.2。表1和表2分别为原材料的粒径分布与化学组成。

表1 原材料的累计通过率
Table 1 Particle passing percentage of raw materials /%

材料	粒径/ μm						
	0.3	0.6	1	4	8	64	360
垃圾飞灰	0.13	0.5	2.2	17.2	31.3	97.5	100
水泥	0	0.3	2.7	15	28.8	93.6	100
石英砂	0	0	0	0	0.03	20	100
矿渣粉	0.042	0.13	3.28	19.38	35.17	98.18	100
粉煤灰	31.28	58.49	82.38	100	100	100	100
二次铝灰	0.05	0.21	0.59	1.13	3.93	25.9	87.22

1.2 试件制备

表3为制备RPC的配合比,其中垃圾飞灰与(垃圾飞灰和二次铝灰质量总和)之比分别为0、20%、40%、60%、80%和100%。石家庄路航科技

表 2 原材料的化学组成

Table 2 The chemical composition of cement /%

材料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe _x O _y	MgO	CaO	SO ₃	K ₂ O	烧失率
垃圾飞灰	22.5	4.5	0.9	—	20.3	9.3	6	21.2
水泥	20.9	5.5	3.9	1.7	62.2	2.7	—	3.1
石英砂	99.6	—	0.02	—	—	—	—	—
矿渣粉	33.73	14.78	0.49	9.72	36.60	0.29	—	—
粉煤灰	39.48	28.76	4.25	0.52	3.29	—	0.36	21.11
二次铝灰	4.56	78.67	3.87	5.65	1.49	—	—	—

有限公司生产的 UJZ-15 型搅拌机用于搅拌 RPC。RPC 的制备过程可分为以下几个过程：首先，将水泥、二次铝灰、垃圾飞灰、矿渣粉、粉煤灰和石英砂加入搅拌机中，以 (60±2) r/min 的搅拌速度搅拌 1 min 后，将减水剂与水混合，倒入搅拌机中，先以 (60±2) r/min 速度搅拌 1 min，再用 (80±2) r/min 速度搅拌 2 min，最后浇筑尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 和 100 mm×100 mm×100 mm 的 RPC 试件。试件在标准养护环境 ((20±2)℃，相对湿度 98%±1%) 下养护。

表 3 活性粉末混凝土配合比 / (kg/m³)

Table 3 The mixing proportions of reactive powder concrete

水	水泥	垃圾飞灰	二次铝灰	矿渣粉	粉煤灰	石英砂	减水剂
274	740.7	0	370.30	111.1	148.12	977.9	16.3
274	740.7	74.06	296.24	111.1	148.12	977.9	16.3
274	740.7	148.12	222.18	111.1	148.12	977.9	16.3
274	740.7	222.18	148.12	111.1	148.12	977.9	16.3
274	740.7	296.24	74.06	111.1	148.12	977.9	16.3
274	740.7	370.30	0	111.1	148.12	977.9	16.3

(1) 流变性能的测定。采用河北沧州中新亿达测试仪器有限公司生产的 NLD-3CSA 砂浆流变仪测定新拌 RPC 浆体的塑性黏度，流变仪的转速范围为 0~30 r/min。采用跳桌法测定 RPC 浆体的扩展度，测定过程可参照国家标准 JGJ 70-90。

(2) 抗折和抗压强度的测定。YAW-300C 型全自动压折一体试验机用于测定 RPC 抗折强度和抗压强度。RPC 试件尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm。加载速度分别 2.4 kN/s 和 0.1 kN/s，养护龄期分别为 1 和 28 d。测定方法参照国家规范 GB/T 17671-1999《水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法)》。

(3) 干燥收缩率 (DSR) 的测定。将脱模后尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的试件固定在装有万分表的支架上。试件的初始长度为 L_0 ，当达到计划养护龄期时，再次测试的长度 (L_t)，干燥收缩率 (DSR) 可以通过下式计算：

$$DSR = \frac{L_t - L_0}{L_0} \quad (1)$$

(4) 有毒重金属离子的浸出量测定。将 100 mm×100 mm×100 mm 的试件标准养护 28 d 后在去离子水中浸泡 6 个月，每 1 个月从所浸泡的去离子水中取出液体，采用美国马萨诸塞州沃尔瑟姆市 Thermo Elemental 公司生产的 IRIS Intrepid ER/S ICP 原子发射光谱仪进行元素含量分析，得到 RPC 的有毒重金属元素渗出量。试验每组采用 6 个试件，取 6 个试件的平均值作为最终的试验值。

(5) 扫描电子显微镜 (SEM) 观察。从 RPC 试件内部取出直径为 0.5~3 mm 的样品放置真空干燥室中烘至恒重，再进行真空喷金，然后利用 Zeiss 扫描电子显微镜进行微观结构观察。

2 试验结果及分析

图 1 为不同掺量 SAD 的混掺二次铝灰 (SAD) 与垃圾飞灰 (WFA) 的 RPC 扩展度。从图 1 中可见，当 SAD 的掺量从 0 增加至 60% 时，新拌 RPC 浆体的扩展度由 213.1 mm 增加至 232.6 mm，相应的增长率为 0~9.15%。主要是因为，SAD 的滚珠效应高于 WFA，导致 RPC 浆体的扩展度增加^[13-14]。当 SAD 的掺量从 60% 增加至 100% 时，新拌 RPC 浆体的扩展度由 232.6 mm 降至 224.5 mm，RPC 扩展度的增长率由 9.15% 降至 5.35%。主要是因为 SAD 的比表面积大于 WFA，因此 SAD 的掺量增加后，其吸附的自由水增多，RPC 中自由水的含量降低，从而导致 RPC 的扩展度减小。RPC 浆体扩展度值的误差线均低于

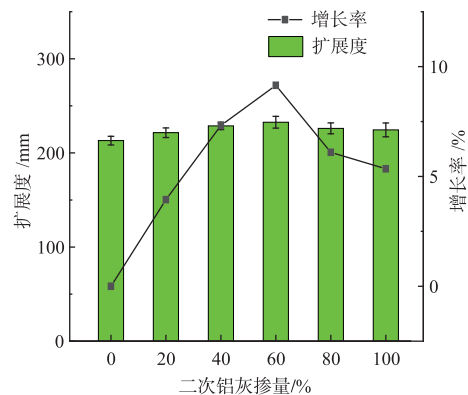


图 1 混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 浆体扩展度
Fig. 1 Slump flow of fresh RPC with the assembly unit of SAD and WFA

材料科学

其实际值的 7.9%，这表明试验的准确性较高。

图 2 为不同掺量 SAD 的混掺 SAD 与 WFA 的 RPC 塑性黏度值。从图中可以发现，新拌 RPC 浆体的塑性黏度随着 SAD 掺量的增加，其变化规律与其扩展度的变化规律恰好相反。SAD 掺量为 60% 时，RPC 塑性黏度降低率达到最高，此时塑性黏度降低率为 10.63%。从以往研究中得出，水泥基浆体的塑性黏度与其扩展度成反相关，因此浆体的扩展度增加引起其塑性黏度降低，浆体的扩展度降低会引起塑性黏度增加^[15]。从图 2 中发现，塑性黏度的误差线均低于实测值的 8.1%，因此试验的准确性高。

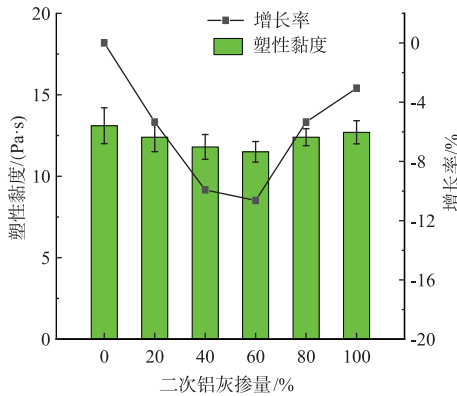
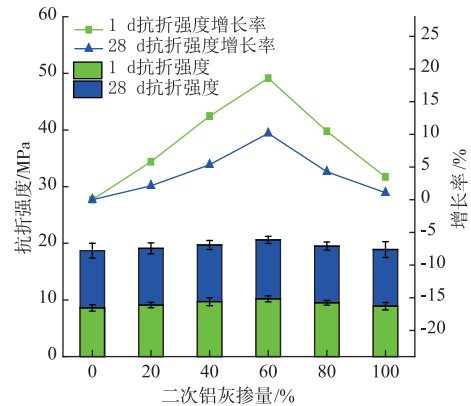


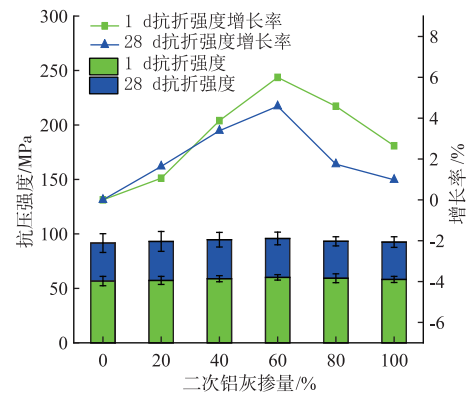
图 2 混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 浆体塑性黏度 Fig. 2 Plastic viscosity of fresh RPC with the assembly unit of SAD and WFA

图 3 为不同掺量 SAD 的混掺 SAD 与 WFA 的 RPC 抗折强度与抗压强度。从图中可以发现，当 SAD 掺量由 0 增加至 60% 时，RPC 养护 1 d 的抗折强度与抗压强度分别由 8.6 MPa 和 56.7MPa 升高至 10.2 MPa 和 60.1 MPa，相应的增长率分别为 0~18.6% 和 0~6%；RPC 养护 28 d 的抗折强度与抗压强度分别由 18.7 MPa 和 91.6 MPa 升高至 20.6 MPa 和 95.8 MPa，相应的增长率分别为 0~10.2% 和 0~4.6%。主要是因为 SAD 的比表面积较 WFA 更高，因此 SAD 吸附更多的自由水从而加速水泥的水化，提高了 RPC 的强度^[16-17]。然而，当 SAD 的掺量由 60% 增加至 100% 时，RPC 养护 1 d 的抗折强度与抗压强度分别由 10.2 MPa 和 60.1MPa 下降至 8.9 MPa 和 58.2 MPa，相应的增长率分别由 18.6% 和 6% 下降至 3.5% 和 2.6%；RPC 养护 28 d 的抗折强度与抗压强度分别由 20.6 MPa 和 95.8 MPa 下降至 18.9 MPa 和 92.5 MPa，相应的增长率分别由 10.2% 和 4.6% 下降至 1.1% 和 0.98%。主要是因为 SAD 的火山灰效应

较 WFA 低，因此增加 SAD 的掺量能降低 RPC 强度^[18-19]。从图中可以得出，RPC 的强度随着养护龄期的增加而增加。主要是因为养护龄期的增大导致其水化程度提高，因此强度上升。从图 3 中发现，RPC 龄期为 1 d 时的强度高于养护 28 d 时强度的 50%，因此可知混掺二次铝灰与垃圾飞灰的 RPC 材料具有较好的早期力学性能。



(a) 抗折强度



(b) 抗压强度

图 3 混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 抗折强度与抗压强度 Fig. 3 The flexural and compressive strengths of RPC with the assembly unit of SAD and WFA

图 4 为不同掺量 SAD 的混掺 SAD 与 WFA 的 RPC 干燥收缩率。从图中发现，RPC 的干燥收缩率随着养护龄期的增加而增大。主要是因为 RPC 的水化程度随着养护龄期的增加而增大，这样就消耗掉较多的自由水，引起 RPC 的干燥收缩率上升。RPC 中 SAD 的掺量为 60% 时，其干燥收缩率达到最大（此时干燥收缩率的增长率为 23.8%）。主要是因为 RPC 中 SAD 的掺量为 60% 时，其水化程度最高，故此时的干燥收缩率最大。RPC 的干燥收缩率的误差线均小于其实际值的

7.2%，说明试验结果的精确度高。

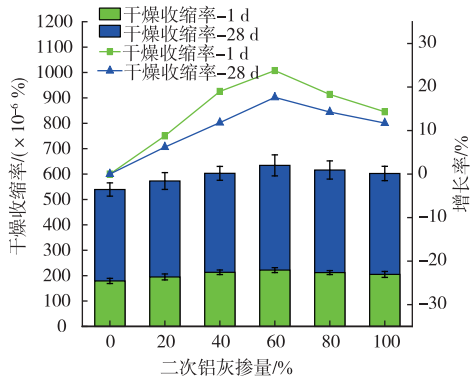
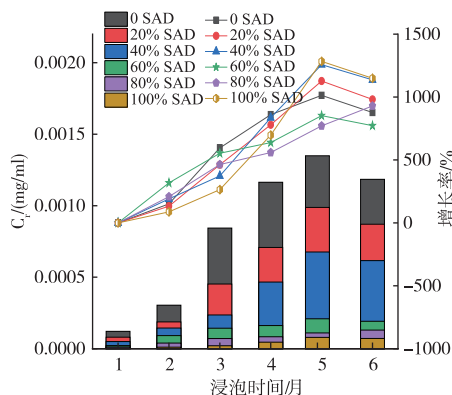


图4 混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 干燥收缩率

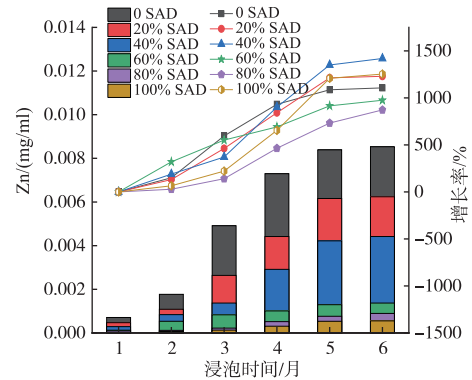
Fig. 4 The drying shrinkage rate of RPC with the assembly unit of SAD and WFA

图5为混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 中重金属元素 (Cr 和 Zn) 的渗出量。从图5中可以发现，RPC 中 Cr 和 Zn 的渗出量与浸泡时间成正相关，但与 SAD 的掺量成反相关。主要是因为 WFA 与 SAD 中均含有一定含量的 Cr 和 Zn，随着浸泡时间的增加，浸出的 Cr 和 Zn 也会因此而增加。SAD 中含有的 Cr 和 Zn 低于 WFA，所以 SAD 含量的增加导致 Cr 和 Zn 降低。图中发现，RPC 中渗出的 Zn 含量高于 Cr。

图6为 SAD 掺量为 20%、60% 和 100%，养护 28 d 的 RPC 微观形貌。从图6中发现，RPC 中含有一定量的絮状水化产物。当 SAD 的掺量由 20% 增加至 60% 时，RPC 的密实度提高，其中絮状水化产物减少；当 SAD 的掺量从 60% 增加至 100% 时，RPC 中观察到的孔隙更明显。由此可以佐证 RPC 中 SAD 的掺量为 60% 时其抗折和抗压强度最高。



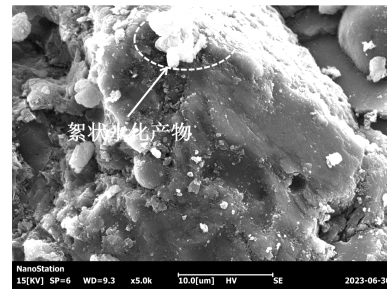
(a) Cr 渗出量



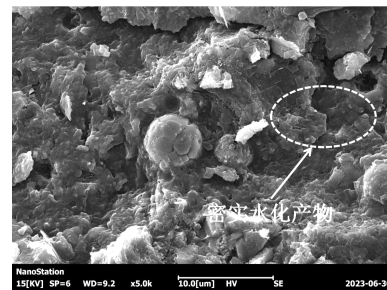
(b) Zn 渗出量

图5 混掺 SAD 和 WFA 的 RPC 渗出重金属元素量

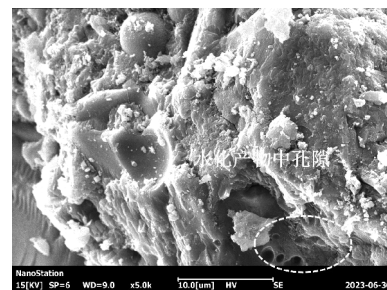
Fig. 5 The leached heavy metal of RPC with the assembly unit of SAD and WFA



(a) 20%



(b) 60%



(c) 100%

图6 RPC 的 SEM 微观形貌

Fig. 6 The SEM Micromorphology of the RPC

3 结论

(1) 二次铝灰掺量为 60% 时，新拌 RPC 浆体的

材料科学

扩展度达到最大、塑性黏度最低，其相应的扩展度增长率与塑性黏度降低率分别为 9.15% 和 10.63%。

(2) 二次铝灰的掺量为 60% 时，RPC 的抗折强度、抗压强度和干燥收缩率达到最高。RPC 养护 1 d 的抗折强度与抗压强度最大增长率为 18.6% 和 6%，养护 28 d 后相应的最大增长率为 10.2% 和 4.6%。

(3) RPC 中渗出的 Cr 和 Zn 与浸泡时间成正比相关，与加入二次铝灰的掺量成反相关；当二次铝灰的掺量为 60% 时，RPC 的微观结构最密实。

参 考 文 献

- [1] CHEN L, WANG Y S, WANG L, ZHANG Y, et al. Stabilisation/solidification of municipal solid waste incineration fly ash by phosphate-enhanced calcium aluminate cement [J]. *Journal Of Hazardous Materials*. 2021, 408: 124404.
- [2] OZERKAN N G, MAKI O L, ANAYEH M W, et al. The effect of aluminium dross on mechanical and corrosion properties of concrete [J]. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2014, 3: 9912-9922.
- [3] 刘星, 李碧雄, 刘月雷, 等. 生活垃圾焚烧飞灰用于水泥混凝土的研究进展 [J]. *混凝土*, 2022 (4): 93-99, 103.
- [4] DAVID O, OPEYEMI J, ADEKUNLE M, et al. Influence of secondary aluminum dross (SAD) on compressive strength and water absorption capacity properties of sandcrete block [J]. *Cogent Engineering*. 2019, 6: 1608687.
- [5] GIREESH M, SUJAY R, SREEDHARA B M, et al. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions [J]. *Resource-Efficient Technologies*. 2016, 2: 68-80.
- [6] ROTANA H, CLAUDIA P O. On utilization and mechanisms of waste aluminium in mitigating alkali-silica reaction (ASR) in concrete [J]. *Journal Of Cleaner Production*. 2019, 212: 864-879.
- [7] MAHINROOSTA M, ALLAHVERDI A. Enhanced alumina recovery from secondary aluminum dross for high purity nanostructured γ -alumina powder production: Kinetic study [J]. *Journal of Environmental Management*. 2018, 212: 278-291.
- [8] ELSEKNIDY M, SALMIATON A. A study on mechanical properties of concrete incorporating aluminum dross, fly ash, and quarry dust [J]. *Sustainability*. 2020, 12 (21): 1-13.
- [9] PEREIRA DA, DE AB, CASTRO F. Mechanical behaviour of Portland cement mortars with incorporation of Al-containing salt slags [J]. *Cement and Concrete Research*. 2000, 30: 1131-1138.
- [10] 李文娟. 基于垃圾焚烧飞灰的超高性能混凝土制备与重金属固化机理研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- [11] 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.
- [12] XU W, WANG H, TIAN X. The Effect of secondary aluminum ash on the properties of reactive powder concrete [J]. *materials*. 2023, 16 (15): 5265.
- [13] 汪潇, 王宇斌, 杨留栓, 等. 高性能粉煤灰混凝土工作性能与收缩性能研究 [J]. *河南城建学院学报*, 2012, 21 (5): 1-4, 16.
- [14] 唐伟军. 掺粉煤灰泵送混凝土的性能及配制技术 [J]. *科技创新与应用*, 2020 (28): 157-158.
- [15] 俞静, 汪晖, 柳俊哲, 等. 胶砂经硫酸盐水泥砂浆修复后的性能研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38 (10): 3367-3372.
- [16] SOCRATES P M P, JUAN M G C. Influence of the secondary aluminum chip on the physical and mechanical properties of concrete [J]. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023, 8, 45.
- [17] POLETTINI A, POMI R, SIRINI P, et al. Properties of portland cement-stabilised mswi fly ashes [J]. *Journal Of Hazardous Materials*. 2001, 88: 123-138.
- [18] 刘秀. 二次铝灰资源化利用现状及展望 [J]. *世界有色金属*, 2023 (11): 109-111.
- [19] 潘一帆, 张玉露, 梁洪滔, 等. 水泥基材料资源化利用二次铝灰的可行性研究 [J]. *工业建筑*, 2023, 53 (S2): 689-693.