

文章编号:1007-9629(2023)01-0014-07

# 碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究

安强<sup>1</sup>, 潘慧敏<sup>1,\*</sup>, 赵庆新<sup>1,2</sup>, 石雨轩<sup>1</sup>

(1.燕山大学 河北省土木工程绿色建筑与智能运维重点实验室,河北 秦皇岛 066004;

2.燕山大学 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室,河北 秦皇岛 066004)

**摘要:**采用(NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)溶液、电石渣和粉煤灰来稳定赤泥,制备了碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料.通过力学和微观性能测试,分析了复合材料的强度形成和发展机理,并通过重金属浸出试验评价了复合材料的安全性.结果表明:复合材料的强度随着赤泥掺量的降低和养护龄期的延长而提高,掺40%赤泥的复合材料在28d龄期时的抗压强度最高可达20.1MPa,致密的水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)的形成及赤泥颗粒的物理结合是复合材料强度增长的主要原因;赤泥中的重金属在养护28d后形成了化合物而被固化在复合材料中,在浸泡28d后的浸出液中未检测到重金属,证明使用强碱激发剂、电石渣和粉煤灰稳定赤泥是安全可行的.

**关键词:**碱激发复合材料;赤泥;粉煤灰;电石渣;强度;微观结构

中图分类号:TU526

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.003

## Properties of Alkali-Activated Red Mud-Fly Ash-Carbide Slag Composites

AN Qiang<sup>1</sup>, PAN Huimin<sup>1,\*</sup>, ZHAO Qingxin<sup>1,2</sup>, SHI Yuxuan<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Green Construction and Intelligent Maintenance for Civil Engineering of Hebei Province,

Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. State Key Laboratory of Metastable Materials Science and

Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Red mud was stabilized by using (NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) solution, carbide slag and fly ash. Alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composite was prepared. The strength formation and development mechanism of the composite were analyzed by mechanical and microscopic property tests. The safety of the composite was evaluated by heavy metals leaching test. The results show that the strength of the composite increases with the decrease of red mud content and the increase of curing age. The composite containing 40% red mud reaches a maximum compression strength value of 20.1 MPa at the curing age of 28 d. The formation of dense calcium silicate hydrate(C-S-H) and calcium aluminate hydrate(C-A-H), and the physical combination of red mud particles are the main reasons for the increase in strength. The heavy metals in red mud formed compounds and are solidified in the composite after curing for 28 d. No heavy metals are detected in the leachate after immersion for 28 d, which proved the safety of stabilizing red mud with strong alkali activator, carbide slag and fly ash.

**Key words:** alkali-activated composite; red mud; fly ash; carbide slag; strength; microstructure

赤泥是精炼氧化铝过程中产生的一类有害高碱性工业废物,直接排放到环境中将导致土壤碱化并引

起地下水污染,严重威胁周边居民健康<sup>[1-2]</sup>.赤泥因氧化铁含量较高而呈现红色,同时还含有铝、钠、铬、钨

收稿日期:2021-11-16; 修订日期:2022-01-22

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078450, 51608469);河北省重点研发计划项目(19211505D)

第一作者:安强(1994—),男,河北昌黎人,燕山大学硕士生.E-mail:447100159@qq.com

通讯作者:潘慧敏(1978—),女,河北卢龙人,燕山大学教授,博士生导师,博士.E-mail:panhuimin@ysu.edu.cn

等多种有价值元素<sup>[3-4]</sup>.在对铝的利用方面,Wang等<sup>[5]</sup>采用钙化-碳化等工艺从赤泥中提取了氧化铝,并将处理后的残渣用于水泥生产.赤泥在建筑材料中的应用也是目前研究者青睐的方向之一.如丁崧等<sup>[6]</sup>研究了以赤泥为原料所制备的透水混凝土的净水机理,发现掺入20%赤泥能显著提高其对重金属离子的吸附作用.赤泥具有颗粒比表面积大、黏粒含量和压实度高的特点,在路基材料应用方面具有一定优势.Chandra等<sup>[7]</sup>使用8 mol/L NaOH和Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>溶液作为碱激发剂,制备了满足路基强度要求的赤泥-粉煤灰复合材料.此外,赤泥还被广泛用于土壤修复<sup>[8-9]</sup>、废气和污水处理<sup>[10-11]</sup>等方面.电石渣是乙炔工业产生的一种碱性废料,其主要化学成分为Ca(OH)<sub>2</sub><sup>[12]</sup>,可以作为粉煤灰的碱性激发剂.

基于以上研究,本文以5 mol/L NaOH和Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>溶液作为碱激发剂,利用电石渣和粉煤灰来稳定赤泥,以减少强碱用量,制备了赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料,探索了该复合材料在3、7、28 d龄期的强度发展,通过X射线衍射(XRD)、热

重-差示扫描量热(TG-DSC)、扫描电镜-能谱分析(SEM-EDS)等方法测试了水化产物的微观形貌和化学组成,分析了复合材料的微观结构形成过程,并通过重金属浸出试验对复合材料的安全性进行了分析.

## 1 试验

### 1.1 原材料

经过压滤处理的赤泥由山东新发集团提供,试验前将其烘干并研磨成粒径小于0.16 mm的粉末,其SEM照片和XRD图谱如图1所示;电石渣浆体由河北唐山三友集团提供;I级粉煤灰来源于河北秦皇岛市政集团;洁净天然河砂,细度模数为2.40,粒径范围为0.16~2.36 mm;NaOH和Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>由国药集团生产,分析纯.由图1可见,赤泥具有颗粒细小和比表面积大的特点,包含的晶体化合物主要为赤铁矿石(hematite)和沸石(zeolite).赤泥、电石渣和粉煤灰的化学组成(质量分数,文中涉及的组成、液固比等特殊说明外均为质量分数或质量比)如表1所示.

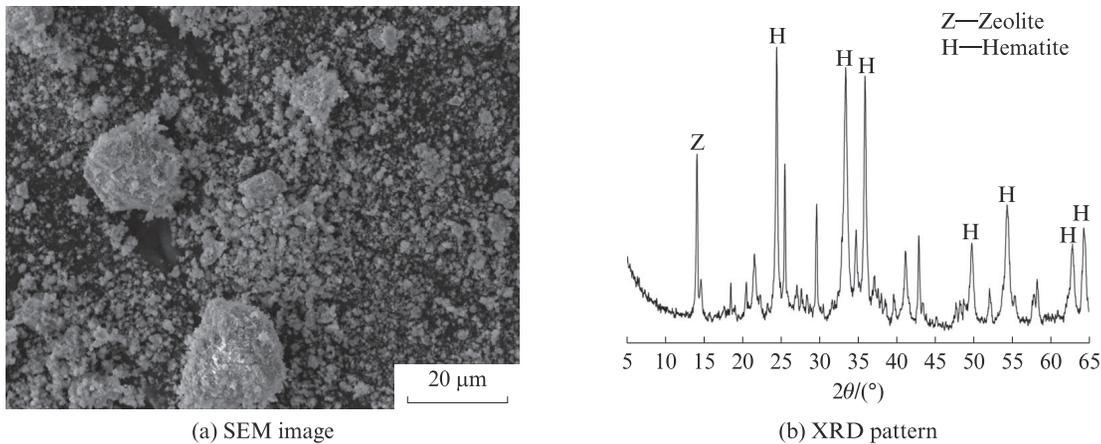


图1 赤泥的SEM照片和XRD图谱

Fig. 1 SEM image and XRD pattern of red mud

表1 赤泥、电石渣和粉煤灰的化学组成

Table 1 Chemical compositions of red mud, carbide slag and fly ash

Material	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	Cl	w/%
Red mud	0.95	25.10	31.98	18.90	0.10	5.28	0.10	0.34	16.50	—	
Carbide slag	87.80	4.71	3.22	0.23	0.39	0.13	0.11	0.78	0.43	2.08	
Fly ash	5.77	43.90	39.80	4.66	0.54	1.64	1.12	0.92	0.72	—	

### 1.2 试验方法

复合材料的配合比如表2所示,选取液固比为0.65,砂胶比为3.00.电石渣浆体自然风干处理后测定其含水率,保持含水率为45%~55%,将满足液固比的电石渣上清液作为溶剂,将NaOH溶液浓度配置为5 mol/L,并保持NaOH与Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>

质量比为2.5.需要说明的是,激发粉煤灰基复合材料的最佳NaOH浓度为10 mol/L<sup>[13]</sup>,考虑到NaOH在实际应用中成本较高,为降低NaOH用量,本试验尝试引入工业废料电石渣作为碱性激发剂,将NaOH的浓度减至5 mol/L.制备尺寸为20 mm×20 mm×80 mm的净浆试样用于微观测

试,同时固定砂胶比为3.00;成型尺寸为40 mm×40 mm×160 mm的砂浆试件用于强度试验.两者均在标准养护条件下养护3、7、28 d.复合材料的抗压强度测试根据GB/T 17671—1999《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》进行,每组取3个试件的平均值作为测试结果.

将养护28 d的复合材料净浆试样在异丙醇中浸泡72 h以终止水化反应,之后在60℃下干燥48 h除去水分.为确保结晶的随机取向性和水化产物的热解特性能够更好地发挥,在进行XRD和TG-DSC

测试前,将试样研磨成粒径小于0.075 mm的粉末.XRD测试使用型号为D/MAX-2500/PC的X射线衍射仪,Cu靶辐射,扫描速率为1(°)/min,测试范围为10°~80°,步长为0.03°.使用STA449F5型综合热分析仪对水化产物热解特性进行分析,升温速率为10℃/min,温度区间为30~1 000℃.同时,提供连续的氩气流以防止样品在升温过程中被碳化.将终止水化并充分干燥的净浆试样敲成碎片,表面经过喷金处理后用于SEM(型号Hitachi-3400N)测试,以观察其微观形貌.

表2 复合材料的配合比  
Table 2 Mix proportions of composites

Sample No.	Red mud	Carbide slag	Fly ash	w/%
40RM	40	20	40	
50RM	50	20	30	
60RM	60	20	20	

## 2 结果与讨论

### 2.1 试件强度发展

考虑到复合材料的强度发展受胶凝材料和碱性激发剂间反应程度,以及养护龄期和温度等的影响,本试验将养护龄期和赤泥掺量作为变量,养护温度保持在(20±2)℃,同时使各组试件的碱激发剂用量保持一致.图2为不同赤泥掺量的复合材料砂浆试件在不同养护龄期的抗压强度.由图2可见:当养护龄期相同时,复合材料的抗压强度随着赤泥掺量的降低而提高,说明合适的原材料掺量可以提高复合材料抗压强度;当赤泥掺量相同时,复合材料抗压强度随着养护龄期的延长而提高,但当赤泥掺量增加时,复合材料的抗压强度增幅趋缓.由图2还可见,复合材料早期强度发展较快,各组砂浆试件养护3 d后抗压强度均高

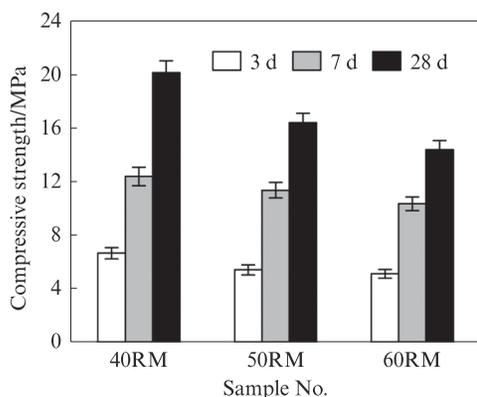
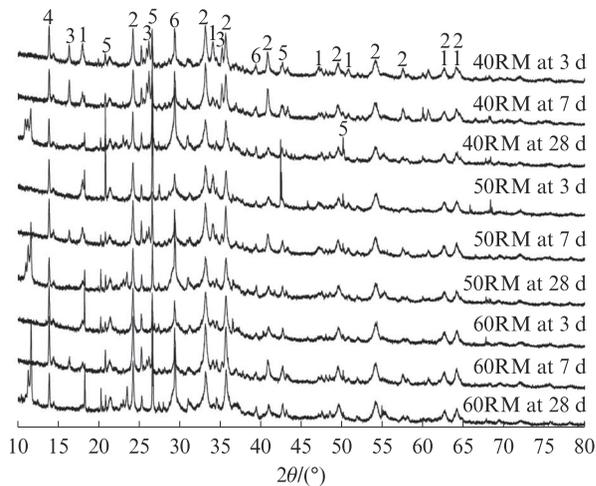


图2 养护3、7、28 d复合材料砂浆试件的抗压强度  
Fig. 2 Compressive strengths of composite mortar specimens cured for 3, 7, 28 d

于5.0 MPa,养护7 d后抗压强度超过10.0 MPa,养护28 d后抗压强度最高可达20.1 MPa,可满足多数实际工程应用的需求,说明使用强碱、电石渣和粉煤灰来稳定赤泥的方法是可行的.

### 2.2 XRD分析

养护3、7、28 d复合材料净浆试样的XRD图谱见图3.粉煤灰中含有的大量活性SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与Ca(OH)<sub>2</sub>反应,可形成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)<sup>[14-15]</sup>.由图3可见,复合材料净浆试样的XRD图谱谱线以弥散峰为主,且在25°~35°处显示凸包,反映出水化产物中存在非晶态凝胶相,说明养护28 d复合材料水化产物中的凝胶类物质可能为C-S-H.由于在水化过程中Ca(OH)<sub>2</sub>不断被消耗,导致复合材料抗压强度随着养护龄期的延长而提高.由图3还可见:图谱中出现了波特兰石(Portlandite, Ca(OH)<sub>2</sub>)衍射峰,表明NaOH、Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>及电石渣为水化反应提供了充足的碱性反应物;图谱中可观察到来源于赤泥的赤铁矿石(hematite)和沸石(zeolite)衍射峰,且强度变化不大,说明赤泥颗粒难以被碱性环境激发而发生水化反应,其在水化产物中的存在方式主要为物理结合.比较不同养护龄期下,各组复合材料水化产物的XRD图谱,可以观察到:(1)养护28 d的试样在10°~12°处出现了3、7 d时均未出现的衍射峰.通过Jade 6软件进行物相分析可知,这是由重金属元素形成的包含有H、O、N、P等的化合物衍射峰,来源于赤泥的重金属Cu、Fe、Cr、Sb、Zn等.(2)在养护3、7 d的水化产物XRD图谱中同等范围内没有



1—Portlandite; 2—Hematite; 3—Mullite; 4—Zeolite; 5—Quartz; 6—Calcium carbonate

图3 养护3、7、28 d复合材料净浆试样的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of composite paste samples cured for 3, 7, 28 d

衍射峰,说明此时还未形成重金属化合物。(3)复合材料中粉煤灰的水化反应生成了富含硅铝元素的莫来石(mullite)。(4)图谱中还可以辨别出石英(quartz)和碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )的衍射峰, $\text{CaCO}_3$ 的存在是由于样品在养护和取样过程中发生了碳化。XRD分析结果还需要结合TG-DSC、SEM-EDS及浸出试验等测试方法进行进一步的论证和完善。

### 2.3 TG-DSC分析

为了解养护28 d复合材料水化产物的组成,采用TG-DSC分析水化产物的热解特性,结果如图4所示。由图4可见:C-S-H在较大温度范围(50~600 $^{\circ}\text{C}$ )加热时因水分散失导致质量减少,TG-DSC曲线中在800 $^{\circ}\text{C}$ 处出现的1个小的脱羟基峰与C-S-H分解为硅灰石( $\text{CaSiO}_3$ )有关<sup>[16]</sup>;在50~150 $^{\circ}\text{C}$ 和200~400 $^{\circ}\text{C}$ 处出现了2个吸热峰,结合XRD分析可知,这与水化产物C-S-H有关;由于C-A-H在300 $^{\circ}\text{C}$ 左右发生脱水<sup>[17]</sup>,DSC曲线出现了因C-A-H脱水产生的吸热峰,证明其也存在于水化产物中; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 $\text{CaCO}_3$ 的失重温度区间较为单一、明确且易于辨识,由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的分解,TG曲线在400~500 $^{\circ}\text{C}$ 内出现下降,另外, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 作为水化反应的碱性反应物,其含量随着养护龄期的增加而减少,当温度升至600 $^{\circ}\text{C}$ 以上时,水化产物中的所有结合水均被释放出来,同时 $\text{CaCO}_3$ 在600 $^{\circ}\text{C}$ 以上分解也导致复合材料发生质量损失<sup>[18]</sup>。

### 2.4 SEM-EDS分析

通过SEM-EDS分析来确定复合材料中水化

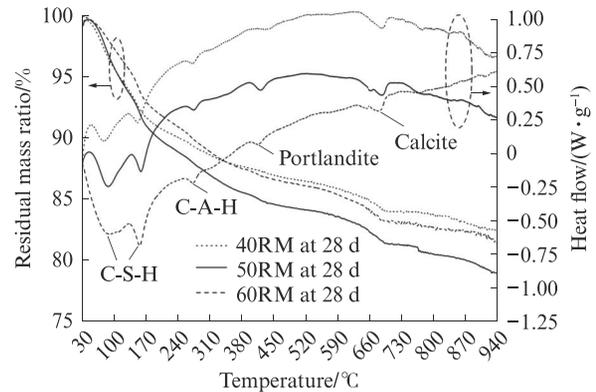


图4 养护28 d复合材料净浆试样的TG-DSC曲线  
Fig. 4 TG-DSC curves of composite paste samples cured for 28 d

产物的微观形貌和化学组成。养护28 d净浆试样的SEM照片和各标记点位(点A、B、C)元素组成的EDS图谱如图5所示。由图5可见,粒径为1~4 $\mu\text{m}$ 的赤泥颗粒、致密的无定形凝胶、玻璃微珠,以及呈不规则片状和块状的晶体等共同形成了胶结体系,这是复合材料抗压强度形成的主要原因。比表面积大的赤泥颗粒不易被强碱激发而发生水化反应,其在水化产物中大部分属于物理结合。电石渣作为碱激发剂的同时也为水化反应提供了大量的Ca,消耗的 $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 碱性激发剂与粉煤灰中的活性 $\text{SiO}_2$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 发生反应,生成了C-S-H和C-A-H。文献<sup>[19]</sup>研究表明,C-S-H凝胶的钙硅比(摩尔比)通常为0.8~1.7。图5中点A和点C标记区域中无定形凝胶的钙硅比均在此范围内,表明该无定形凝胶为C-S-H;另外在这2处均检测来自于赤泥的较高含量的Fe,说明赤泥颗粒与C-S-H凝胶可以紧密结合;Al可以部分取代Si进入C-S-H凝胶而形成水化硅铝酸钙(C-A-S-H)<sup>[20]</sup>,点A处Al含量较高,说明此处生成了C-A-S-H凝胶;点B处代表了来源于粉煤灰的玻璃微珠的元素组成。

### 2.5 重金属浸出试验

为确保复合材料的使用安全性,将各组试件置于水中进行了长达28 d的重金属浸出试验,测试结果见表3。由表3可以看出,复合材料中所有有毒重金属均未在浸出液中检出,表明使用强碱激发剂( $\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$ )溶液、湿基电石渣和粉煤灰来稳定赤泥的方法是安全可靠的。复合材料水化产物中已形成含有重金属元素的复杂化合物,这一点在XRD分析中已被证实,本文的重金属浸出试验结果也佐证了XRD分析,并证明了碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料的安全性。

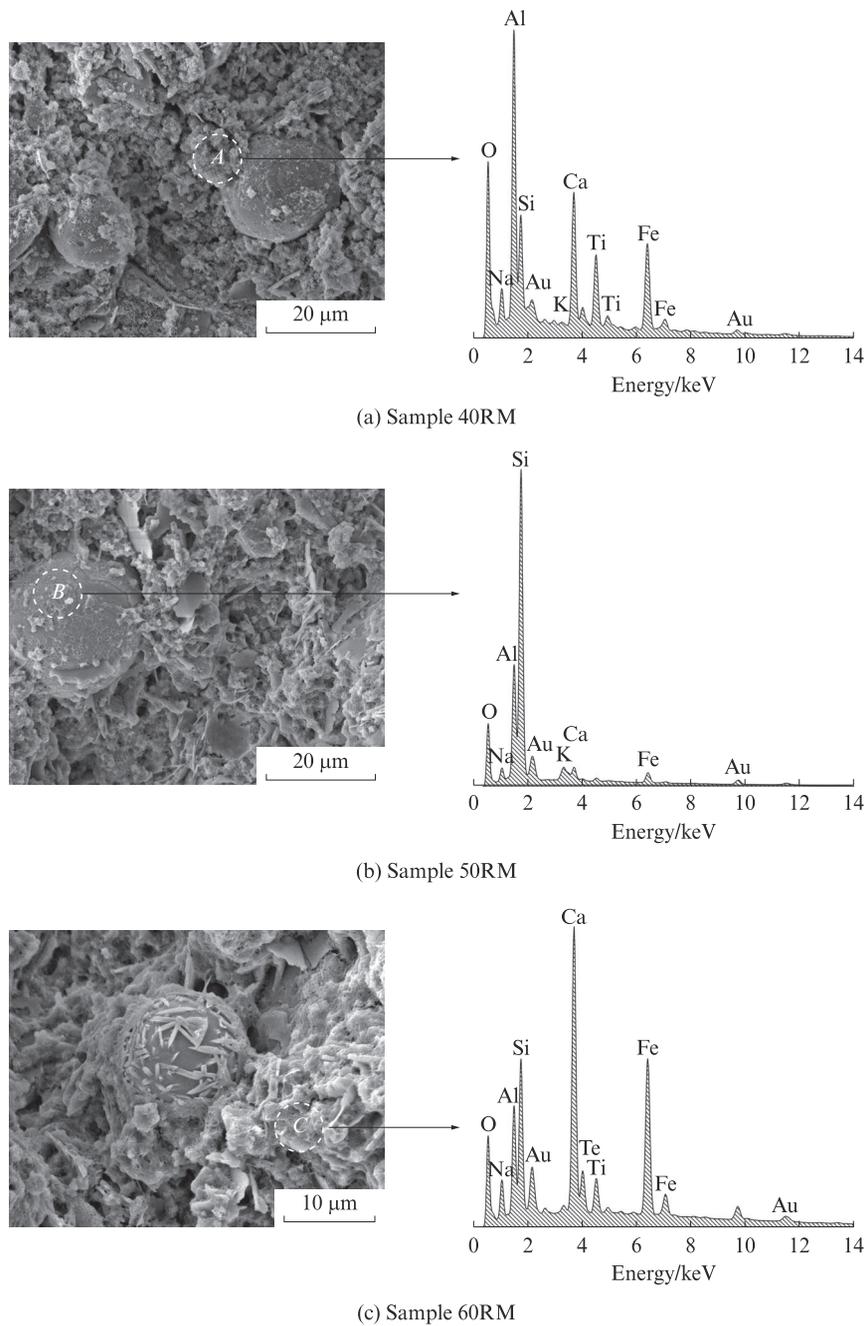


图5 养护28 d复合材料净浆试样的SEM照片和EDS图谱  
Fig. 5 SEM images and EDS spectra of composite paste samples cured for 28 d

表3 复合材料和渗滤液中重金属分析  
Table 3 Analysis of heavy metals in composite and leachate

Heavy metal	Composite		Leachate	
	Content/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Measuring the limit of content/( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	Content/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Measuring the limit of content/( $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )
Cr	200.00	1.00	—	0.10
Ni	17.60	1.90	—	0.02
Cu	16.20	1.20	—	0.04
Pb	14.70	0.10	—	0.10
Sb	0.89	0.01	—	0.05
Zn	17.70	2.00	—	0.06

### 3 结论

(1)碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料的抗压强度随着赤泥掺量的降低和养护龄期的延长而提高.使用20%电石渣、5 mol/L NaOH和NaSiO<sub>3</sub>溶液作为碱激发剂制备的复合材料养护7 d后抗压强度超过10.0 MPa,养护28 d后抗压强度最高可达20.1 MPa.这说明使用电石渣作为碱性激发剂可以减少强碱用量,兼具经济和环境效益.

(2)复合材料抗压强度的主要来源为致密的C-S-H和C-A-H的形成,以及赤泥颗粒的物理结合,其与玻璃微珠、呈片状和块状的晶体等共同形成了胶结体系.养护28 d后,来源于赤泥的重金属形成了含有H、O、N、P等元素的化合物而被固化在复合材料中.

(3)复合材料28 d浸出试验表明,原材料中包含的有毒重金属均未在浸出液中检出,表明使用强碱激发剂(NaOH+Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>)溶液、电石渣和粉煤灰来稳定赤泥的方法是安全可行的.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王晓,张磊,罗忠涛,等.赤泥对道路硅酸盐水泥性能和矿物组成的影响[J].建筑材料学报,2017,20(5):774-779.  
WANG Xiao, ZHANG Lei, LUO Zhongtao, et al. Effect of red mud on properties and mineral composition of Portland cement for road[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(5):774-779. (in Chinese)
- [ 2 ] 南相莉,张延安,刘燕,等.我国赤泥综合利用分析[J].过程工程学报,2010,10(增刊1):264-270.  
NA Xiangli, ZHANG Ting'an, LIU Yan, et al. Analysis on comprehensive utilization of red mud in China[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(Suppl 1):264-270. (in Chinese)
- [ 3 ] 李彬,张宝华,宁平,等.赤泥资源化利用和安全处理现状与展望[J].化工进展,2018,37(2):714-723.  
LI Bin, ZHANG Baohua, NING Ping, et al. Present status and prospect of red mud resource utilization and safety treatment[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(2):714-723. (in Chinese)
- [ 4 ] 常军,邵延海,李硕,等.赤泥中有价金属元素综合回收研究现状及进展[J].矿冶,2017,26(3):59-63,77.  
CHANG Jun, SHAO Yanhai, LI Shuo, et al. Current situation of comprehensive recovery and utilization of valuable metal elements in red mud[J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(3):59-63,77. (in Chinese)
- [ 5 ] WANG Y X, ZHANG T A, LYU G Z, et al. Recovery of alkali and alumina from bauxite residue (red mud) and complete reuse of the treated residue[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 188:456-465.
- [ 6 ] 丁崧,陈潇,夏飞跃,等.净水型赤泥-矿渣基地聚合物透水混凝土的研究[J].建筑材料学报,2020,23(1):48-55.  
DING Song, CHEN Xiao, XIA Feiyue, et al. Study on red mud-slag based geopolymer pervious concrete with function of water purification[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(1):48-55. (in Chinese)
- [ 7 ] CHANDRA K S, KRISHNAIAH S, REDDY N G, et al. Strength development of geopolymer composites made from red mud-fly ash as a subgrade material in road construction [J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2021, 25(1):04020068.
- [ 8 ] 黄嵩霞,许超,吴启堂,等.赤泥对重金属污染红壤修复效果及其评价[J].水土保持学报,2012,26(1):267-272.  
HUANG Aixia, XU Chao, WU Qitang, et al. Remediation effects and their evaluation of red mud amendment in heavy metal polluted red soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1):267-272. (in Chinese)
- [ 9 ] 史力争,陈惠康,吴川,等.赤泥及其复合钝化剂对土壤铅、镉和砷的稳定效应[J].中国科学院大学学报,2018,35(5):617-626.  
SHI Lizheng, CHEN Huikang, WU Chuan, et al. Effects of red mud and the combinations on lead, cadmium, and arsenic availability in contaminated soil [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2018, 35(5):617-626. (in Chinese)
- [ 10 ] 高建阳,高方舟.赤泥PAFC协同混凝印染污水试验研究[J].中国有色冶金,2018,47(5):52-55.  
GAO Jianyang, GAO Fangzhou. Experimental study of collaborative coagulation of printing and dyeing wastewater with red mud PAFC[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018, 47(5):52-55. (in Chinese)
- [ 11 ] NIE Q K, HU W, HUANG B S, et al. Synergistic utilization of red mud for flue-gas desulfurization and fly ash-based geopolymer preparation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 369:503-511.
- [ 12 ] 邵丹娜,刘学敏,姚娜,等.电石渣资源化利用分析[J].中国资源综合利用,2013,31(3):30-34.  
SHAO Danna, LIU Xuemin, YAO Na, et al. Recycling utilization of calcium carbide slag: Approaches difficulties and countermeasures[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(3):30-34. (in Chinese)
- [ 13 ] HOY M, HORPIBULSUK S, ARULRAJAH A. Strength development of recycled asphalt pavement-fly ash geopolymer as a road construction material [J]. Construction and Building Materials, 2016, 117:209-219.
- [ 14 ] 徐文,武小雷.钙硅比对水热合成水化硅酸钙实验的影响研究[J].硅酸盐通报,2018,37(4):1294-1298.  
XU Wen, WU Xiaolei. Influence research of the calcium silicon ratio on the synthesizing hydrated calcium silicate [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(4):1294-1298. (in Chinese)
- [ 15 ] PHOO-NGERNKHAMLA T, PHIANGPHIMAI C, INTARABUT D, et al. Low cost and sustainable repair material

- made from alkali-activated high-calcium fly ash with calcium carbide residue[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 247:118543.
- [16] SHAW S, HENDERSON C M B, KOMANSCHEK B U. Dehydration/recrystallization mechanisms, energetics, and kinetics of hydrated calcium silicate minerals: an in situ TGA/DSC and synchrotron radiation SAXS/WAXS study [J]. *Chemical Geology*, 2000, 167(1/2):141-159.
- [17] 潘国耀, 毛若卿, 袁坚. 水化铝酸钙( $C_3AH_6$ )脱水相及其水化研究[J]. *武汉工业大学学报*, 1997(3):27-29,39.  
PAN Guoyao, MAO Ruoqing, YUAN Jian. Research of dehydrated calcium aluminate hydrates and its hydration [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 1997(3):27-29,39. (in Chinese)
- [18] MO L W, ZHANG F, PANESAR D K, et al. Development of low-carbon cementitious materials via carbonating Portland cement-fly ash-magnesia blends under various curing scenarios: A comparative study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: 252-261.
- [19] HAN F H, LIU R G, YAN P Y, et al. Influence of slag on microstructure of complex binder pastes[J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2014, 33(1):40-45.
- [20] 杨军, 张高展, 丁庆军, 等. 铝掺杂水化硅酸钙分子结构和力学性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(6):565-571,584.  
YANG Jun, ZHANG Gaozhan, DING Qingjun, et al. Molecular structure and mechanical properties of aluminum substituted C-S-H[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(6):565-571, 584. (in Chinese)