

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.136



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



电石渣-脱硫石膏复合激发充填材料 性能及微观结构

高英力¹, 孟浩¹, 冷政², 卜涛¹, 龙国鑫¹, 段开瑞¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114; 2. 中建西部建设湖南有限公司, 长沙 410000)

摘要:针对传统充填材料高碳排放、高成本问题,以“绿色矿山”为理念,选用工业固废电石渣、脱硫石膏和矿渣为胶凝组分,以尾矿砂为骨料制备充填材料。利用 X 射线(XRD)、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)等手段研究充填料水化产物及微观形貌,并开展工作性能、力学性能和重金属固化性能试验。结果表明:所开发的充填材料凝结时间和流动度均满足矿山充填工程要求,充填体 7、28 d 抗压强度可达 4.6、7.9 MPa,充填体浸出液中 Pb、Zn 浓度低于规定限值。电石渣内的氢氧化钙提供碱性环境,脱硫石膏提供硫酸根离子,两者对矿渣内的硅铝质原料复合激发,生成以钙矾石和 C-A-S-H 凝胶为主的水化产物。大量针棒状结构的钙矾石晶体及网状结构的 C-A-S-H 凝胶相互穿插,并且与尾砂颗粒紧密结合,随着龄期延长,结构更加致密,使充填体具有良好的力学性能。

关键词:电石渣;脱硫石膏;矿渣;固体废弃物;绿色矿山;微观结构

中图分类号: TU521.4

文献标志码: A

文章编号: 2096-6717(2023)03-0099-08

Properties and microstructure of backfilling material activated by carbide slag and desulfurized gypsum

GAO Yingli¹, MENG Hao¹, LENG Zheng², BU Tao¹, LONG Guoxin¹, DUAN Kairui¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China; 2. China West Construction Hunan Group Co., Ltd., Changsha 410000, P. R. China)

Abstract: To deal with the high carbon emission and high cost of traditional backfilling materials, taking "green mine" as the concept, industrial solid wastes such as carbide slag, desulfurized gypsum and slag were used as cementitious components, and tailings were used as aggregates for backfilling materials. X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS) were used to examine

收稿日期: 2021-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(U1833127, 51978080); 湖南省研究生科研创新项目(CX20200828); 长沙理工大学校级研究生实践创新项目(SJCX202002)

作者简介: 高英力(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事固体工业废弃物综合利用、先进土木工程材料研究, E-mail: yingligao509@126.com.

Received: 2021-03-13

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. U1833127, 51978080); Hunan Provincial Innovation Foundation for Postgraduate (No. CX20200828); Practical Innovation Foundation for Postgraduate of Changsha University of Science and Technology (No. SJCX202002)

Author brief: GAO Yingli (1977-), PhD, professor, main research interests: solid wastes integrated utilization and advanced civil engineering materials, E-mail: yingligao509@126.com.

the hydration products and microstructure of the backfilling materials, and the working performance, mechanical properties and heavy metal solidification performance tests were carried out. The results show that the setting time and fluidity of the developed backfilling materials met the requirements of mine backfilling project. The maximum compressive strength of the backfilling body can reach up to 4.6 MPa and 7.9 MPa at 7 d and 28 d, respectively, and the concentrations of Pb and Zn in the leaching solution of the backfilling body were lower than the specified limits. Calcium hydroxide in carbide slag provided alkaline environment, and desulfurization gypsum provided sulfate ion. The aluminosilicate material in slag is activated by both, producing the hydration products that mainly consist of ettringites and C-A-S-H gels. A large number of needle like ettringite crystals and reticulated C-A-S-H gels interspersed with each other, and tightly bonded with tailings particles. With extension of age, the structure became more compact, and the backfilling would be of good mechanical properties.

Keywords: carbide slag; desulfurized gypsum; slag; solid waste; green mine; microstructure

中国作为世界第二矿业大国,矿产资源为经济社会发展提供了重要物质基础。在新型工业化的可持续发展理念下,绿色矿山建设成为业内焦点,矿山尾矿大量堆存、综合利用率太低的问题也随备受关注^[1]。大量的尾矿存放不仅造成矿产资源浪费,占用土地资源,尾矿中铅、锌等重金属还会受雨水、径流和风的影响,造成严重的重金属污染和扬尘污染^[2],危害环境。以尾矿砂为骨料制备充填材料可大量消耗尾矿,防止矿山环境污染,降低充填成本^[3-4]。传统充填料选用水泥为胶结材料,不仅材料成本高昂^[5],而且水泥的使用还造成CO₂排放量的增加,给生态环境增加负担^[6]。因此,低成本环保型充填材料的开发成为研究热点,其中矿渣基充填材料因其耐腐蚀、低能耗、后期强度高而成为主流研究方向^[7]。

Behera等^[8]试验证明,以铅锌尾矿砂和高炉矿渣制备的地下矿山充填材料可以有效替代硅酸盐水泥,并显著降低充填成本;Wang等^[9]针对铀尾矿骨料回填体系,以水玻璃溶液及生石灰为激发剂,研究了碱矿渣胶结尾砂充填料的制备方法;杨云鹏等^[10]以强度最优为目标,得到了矿渣基复合充填材料配方,结果表明,在碱性环境及硫酸盐存在情况下,矿渣对尾砂有较强的胶结能力;彭饶^[11]以硫酸钠激发矿渣和水泥,制备出了一种能够处理铅锌尾矿的经济环保型充填体;张少鹏等^[12]试验研究了不同水玻璃模数对矿渣基尾砂胶结充填料浆工作性能及力学性能的影响;张发文等^[13]进行了对矿渣基材料对尾砂固化试验,系统研究了其水化产物及对尾砂的固化效果,结果表明,矿渣基充填材料可以有效替代水泥充填材料。目前,对矿渣基充填材料的研究多以硅酸钠、氢氧化钠等碱溶液为激发剂,然

而碱性溶液黏性大、腐蚀性高,操作危险,成本较高,难以在充填工程中推广应用^[14-15]。在大量堆存的工业固废中寻求可以有效激发矿渣的原料,并以此制备充填材料,不仅具有实际工程意义,还可以实现固废资源化利用,推动工业与生态共赢发展。

笔者以湖南郴州矿山充填为背景,以绿色环保、就地取材为选料原则,考虑矿山充填工程实际需求,采用附近工厂所排放的电石渣和脱硫石膏复合激发矿渣为胶凝组分,对郴州矿山尾砂进行胶结制成充填材料,系统研究了该充填料工作性能、力学性能、重金属固化性能及微观结构。

1 试验

1.1 试验材料

各原料化学成分见表1,物相分析见图1,粒径分析见图2。复合激发剂选用湖南地区电石乙炔气厂排放的电石渣和火电厂排放的脱硫石膏,活性材料选用郴州冶炼厂排放的高炉矿渣。充填骨料为全尾砂,取自于湖南省郴州市铅锌矿场的尾矿库,未进行分级处理。由图1可见,电石渣主要由氢氧化钙和少量碳化形成的碳酸钙组成,脱硫石膏由二水石膏及部分半水石膏组成,矿渣图谱中出现大面积不定型峰,存在大量的玻璃体,潜在活性较高,尾砂由石英及少量云母、方解石等矿物成分组成,化学性质稳定。

表2为浸出试验测定尾砂中重金属浓度,并与《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类水体规定的重金属标准限值进行对比。由表2可见,所用尾砂浸出液中含有较高浓度的铅、锌重金属,且铅的浓度远高于浸出标准。

1.2 试验配合比

表3所示为试验配合比设计,为确定电石渣和

表 1 原材料的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of the raw materials

样品	化学成分/%									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	SO ₃	LOI
电石渣	2.56	1.68	67.20	0.22	0.09	0.35	0.03		0.68	27.19
脱硫石膏	3.94	0.77	32.69	0.70	0.31	0.56		0.98	40.63	19.42
矿渣	32.80	14.30	39.50	9.20	0.88	0.20	0.63	0.07	1.32	1.10
尾砂	60.70	16.20	2.68	0.93	1.55	2.74	5.62	0.11	0.41	9.06

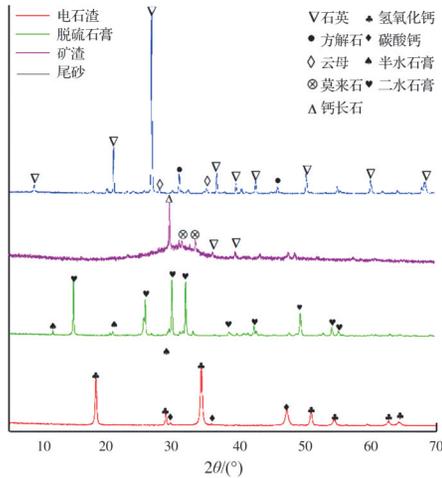


图 1 原材料 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of raw materials

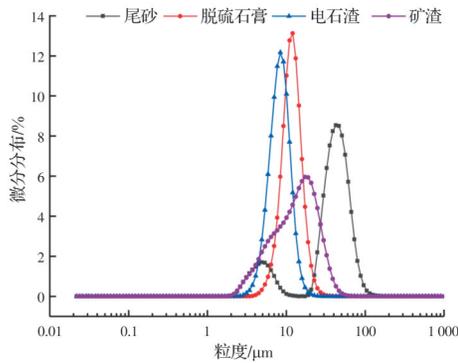


图 2 原材料粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of raw materials

表 2 尾砂重金属浸出浓度

Table 2 Heavy metal leaching concentration of tailings

重金属元素	浸出浓度/(mg·L ⁻¹)	GB/T 14848—2017
		Ⅲ类限值/(mg·L ⁻¹)
Pb	0.272	0.01
Zn	0.309	1.00

脱硫石膏掺量及其对充填料性能的影响,设计 16 组试验配比,各试验组采用相同的胶砂比及同批尾砂,料浆浓度固定为 70%,胶砂比恒定为 1:6。

表 3 试验配合比

Table 3 Mix proportion for experiment

编号	胶凝材料质量分数/%			胶砂比	料浆浓度/%
	电石渣	脱硫石膏	矿渣		
D1T1		2	95	1:6	70
D1T2	3	4	93	1:6	70
D1T3		6	91	1:6	70
D1T4		8	89	1:6	70
D2T1		2	92	1:6	70
D2T2	6	4	90	1:6	70
D2T3		6	88	1:6	70
D2T4		8	86	1:6	70
D3T1		2	89	1:6	70
D3T2	9	4	87	1:6	70
D3T3		6	85	1:6	70
D3T4		8	83	1:6	70
D4T1		2	86	1:6	70
D4T2	12	4	84	1:6	70
D4T3		6	82	1:6	70
D4T4		8	80	1:6	70

1.3 试验方法与试验仪器

试件制备及抗压强度测定参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009),待试件标准养护至 7、28 d 后测定抗压强度,凝结时间和流动度测定参照《水泥基灌浆材料应用技术规范》(GB/T 50448—2015)进行,重金属浸出试验参照中国环境保护标准《固体废物浸出毒性方法水平振荡》(HJ 557—2009)进行。

采用 Rigaku Smart Lab 9KW 型 X 射线衍射仪对原材料及充填材料水化产物进行物相分析;采用 Rise-2020 型干湿两用激光粒度分析仪对原材料粒径特征进行分析;采用 Phenom ProX 台式扫描电子显微镜观察充填材料微观形貌,并采用其配套能谱探测器进行元素分析。

2 结果与讨论

2.1 工作性能

矿山充填工程中充填料经管道输送到地下采

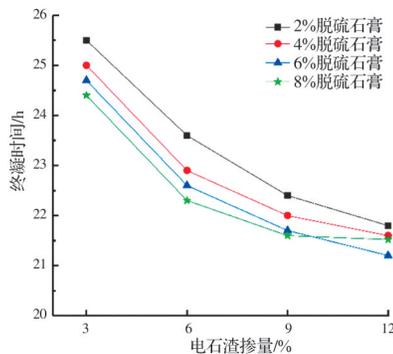
空区,具有连续施工的特点,充填料凝结时间过长、流动性过低都将会严重拖延工程进度,增加成本。因此,需要测定充填料的工作性能。

图3所示为各试验组的初凝时间与终凝时间,从图3可以看出,所有试验组的初凝时间和终凝时间均随着电石渣掺量的增加而缩短。在电石渣掺量由3%提高到6%后,初凝时间和终凝时间分别提前了1.9~2.1 h、1.1~1.4 h,缩短幅度最大,当掺量达到9%后,电石渣则对凝结时间的影响较小。产生这一现象的主要原因是随着电石渣掺量增加,料浆内氢氧化钙及碳酸钙浓度变大,充填料浆pH值上升,碱性环境促进了水化硅铝酸钙或水化硅酸钙的生成,充填料浆快速凝结,与其他碱性激发剂的影响相同^[16],使得凝结时间缩短。当料浆中加入较多电石渣时,可能存在部分氢氧化钙晶体的析出,对水化反应的促进效果不再显著,凝结时间缩短程度也随之减小。

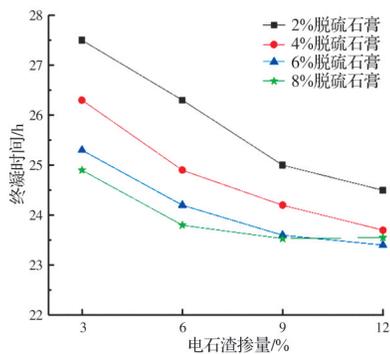
脱硫石膏对凝结时间的影响则不同,在电石渣掺量较低的情况下,凝结时间随脱硫石膏掺量的增

加而缩短,并且对终凝时间的影响尤其显著,使其缩短了0.8~1.5 h;但在电石渣掺量达到9%后,脱硫石膏对凝结时间的缩短效应不再明显,甚至出现凝结时间延长的情况。在低电石渣掺量下,料浆内碱性较弱,脱硫石膏的加入起到硫酸盐激发效应,促进了水化反应,因此,凝结时间缩短;但在高电石渣掺量下,料浆碱性上升,加速了硅酸根离子和铝酸根离子从矿渣玻璃体结构内溶出,而铝酸根离子浓度的提高是加快钙矾石形成的最主要因素^[17],短时间内大量针棒状钙矾石晶体在矿渣颗粒附近形成,抑制了矿渣玻璃体的进一步溶解,延缓了部分水化反应,凝结时间反而延长。

图4所示为各试验组的流动度,脱硫石膏掺量对充填材料的流动度影响较小,仅在脱硫石膏掺量从2%增加至4%后,流动度降低了15~18 mm,继续增加脱硫石膏掺量后流动度变化不大。脱硫石膏粉末比表面积较小,对水的吸附能力较差,仅在半水石膏溶解形成二水石膏过程中消耗少量拌和用水。另外,单一增加脱硫石膏掺量对早期水化反应促进作用不明显,因此对流动度的降低效果较小。



(a) 初凝时间



(b) 终凝时间

图3 各试验组初凝时间和终凝时间

Fig. 3 Initial setting time and final setting time of each test group

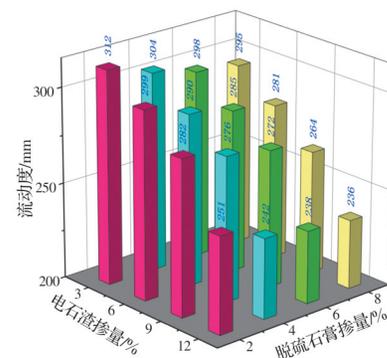


图4 各试验组流动度

Fig. 4 Fluidity of each test group

电石渣掺量对流动度的影响较显著,呈现出流动度随电石渣掺量增加而降低的规律,尤其在电石渣掺量由9%增加至12%时,流动度出现了明显的降低,减少了28~34 mm,且电石渣掺量为12%的试验组充填料流动度均低于260 mm,不再符合矿山充填工程对于流动性的要求。这与传统碱溶液激发使流动度先增大后降低的影响规律不同^[18],试验所用激发剂均为固体粉末,不存在溶剂对流动度的影响。当电石渣掺量较低时,电石渣所提供的氢氧化钙可以使充填料浆碱性增强,在碱激发效应为

主的体系下,加速了矿渣颗粒的溶解和早期水化产物的生成,浆体黏度变大,流动度也随之下落。当掺量达到9%后,电石渣对水化反应的促进作用已趋于饱和,继续增大电石渣掺量使料浆内pH值过高,水化凝胶生成过快而不能有效分散,包裹住部分原料,增大了颗粒间摩擦力从而导致流动度下降;同时,料浆内未反应电石渣颗粒增多,而电石渣颗粒表面为多孔结构,具有较大的比表面积和较高的表面能,在拌和过程中其表面及毛细孔内将吸附更多的液相自由水,使料浆黏度增大,进一步增大了流动度降低的幅度。

2.2 力学性能

与其他工程中所用混凝土不同,矿山充填工程对于固化体的力学性能要求较低,因此,仅以抗压强度来评价固化后充填体的力学性能,矿山充填各部位的力学性能要求如表4所示。考虑充填料的适用性,试验对充填体强度要求为7d龄期不低于3MPa,28d龄期不低于4MPa。

表4 矿山充填力学性能要求

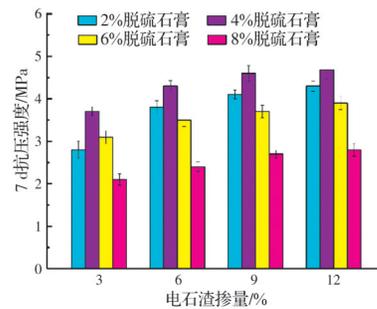
Table 4 Mechanical property requirements of mine filling

矿山充填部位	抗压强度/MPa	
	7 d	28 d
矿井顶部	≥3.0	≥4.0
矿井底部	≥2.5	≥3.5
其余部位	≥2.0	≥3.0

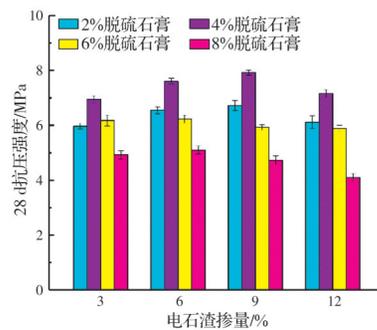
图5所示为各试验组分别在7、28d龄期时的抗压强度。由图5可知,对于不同脱硫石膏掺量的试件,7d抗压强度均随着电石渣掺量增加而增大,特别在电石渣掺量3%增加至6%后,7d抗压强度提高了12.9%~35.7%;而28d抗压强度则随电石渣掺量增加先增大后减小,在电石渣掺量达到9%后,试件28d抗压强度就出现增长延缓甚至降低的现象。7d龄期时,电石渣掺量的增加可以加速水化反应及强度发展,并且在脱硫石膏的硫酸盐激发效应下,碱性的提高会促进钙矾石晶体的发育^[19],使得早期结构更加紧凑致密;而高电石渣掺量时,体系内碱组分较多,碱激发效应下生成更多网状结构的水化硅酸钙或水化硅铝酸钙凝胶,部分未反应原料被水化产物分隔甚至被大量凝胶所包裹,延迟了部分水化反应的进行,不利于后期强度发展。

脱硫石膏掺量对7、28d抗压强度的影响一致,

随着脱硫石膏掺量增加,7、28d抗压强度均表现为先增大后减小。脱硫石膏掺量达到6%后,7、28d抗压强度都出现了不同程度的下降,且降低幅度随脱硫石膏掺量的增加而更明显。在电石渣提供的钙离子及碱性环境下,适量脱硫石膏的加入进一步提升了体系内的钙离子浓度^[20],并为钙矾石的形成提供硫酸根离子,钙矾石的针棒状结构可弥补充填体的自收缩现象,使结构更加密实,强度提高;而过多的脱硫石膏不完全参与早期水化反应,其自身的膨胀应力使充填体早期孔隙增大,未反应的脱硫石膏后期释放多余硫酸根离子,导致延迟膨胀性钙矾石形成,使后期充填体结构孔隙增加、结构松散,导致7、28d抗压强度均出现下降。



(a) 7 d 抗压强度



(b) 28 d 抗压强度

图5 各试验组不同龄期抗压强度

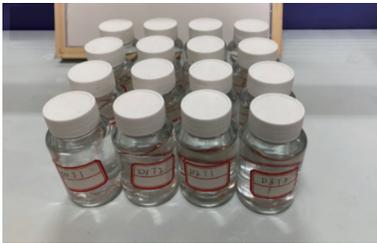
Fig. 5 Compressive strength of each test group at different ages

2.3 重金属固化性能

充填料在进行矿山充填后形成的固结体为多孔介质,并且受到降雨下渗及地下径流的浸泡作用,存在重金属浸出污染水质的风险,因此,重金属固化性能是评价胶结尾砂充填材料必不可少的标准。选取力学性能满足矿山充填要求的8组试件,在其强度稳定期(28d)时进行重金属浸出试验,具体如图6所示。



(a) 水平振动



(b) 试验样品

图 6 重金属浸出试验

Fig. 6 Heavy metal leaching test

图 7 所示为 28 d 龄期时浸出液中重金属浓度及其对重金属的固化效率。由图 7 中可以看出,各组合试件 Pb、Zn 的浸出浓度值均低于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)中Ⅲ类水体规定的标准限值, Pb、Zn 的固化效率分别达到 97% 和 91.9% 以上,表明该充填料对尾砂中重金属具有较好的固化效果。尾矿经开采、风化破坏后,其内部重金属被释放并以弱酸溶解态存在,活性较高且易为生物利用,而电石渣提供的氢氧根离子可以捕捉充填体系内的重金属离子,在碱性环境下生成不溶于水的氢氧化物沉淀^[21],沉淀物吸附在水化凝胶、钙矾石晶体及未反应原料表面,重金属也随之转变为稳定性更高的可还原态,迁移能力降低,这也与电石渣掺量高的试验组拥有更好的固化效果相对应;另一方面,充填料复合激发体系中以碱激发矿渣的高钙体系反应为主,生成的低钙硅比 C-A-S-H 凝胶具有疏松多孔结构及较大的比表面积^[22-23],可以有效吸附大量重金属离子,同时,在 C-A-S-H 凝胶的网格结构形成过程中,可以对重金属氢氧化物沉淀进一步包裹、固封。通过化学沉淀和物理吸附、包裹的复合作用,充填料实现重金属的有效固化。

2.4 微观结构

选取力学性能最优的 D3T2 组充填料进行微观分析,图 8 所示为该组充填料在 7、28 d 时水化产物的 XRD 图谱。除去尾砂中含有的大量石英等杂质外,二水石膏、半水石膏和氢氧化钙的存在是因为

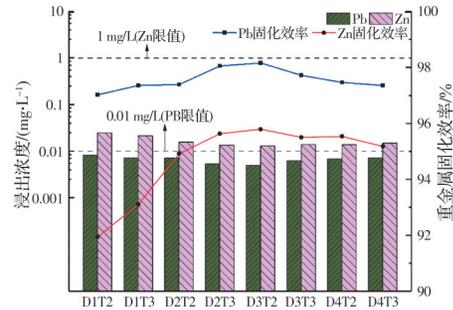


图 7 重金属浸出浓度及固化效率

Fig. 7 Heavy metal leaching concentration and solidification efficiency

部分原料未充分反应,少量的方解石由部分产物碳化而成。其余水化产物主要为钙矾石和水化硅铝酸钙(C-A-S-H)凝胶。在 7 d 龄期时已观测到主要水化产物的衍射峰,并且与 28 d 龄期时相比衍射峰变化不大,这也与试件早期强度较高且后期强度提升不明显相对应。

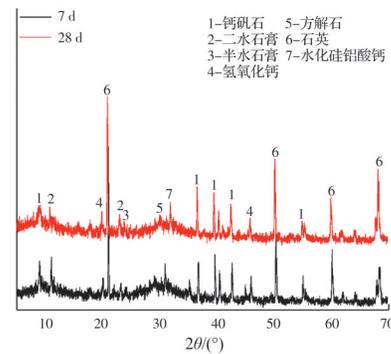
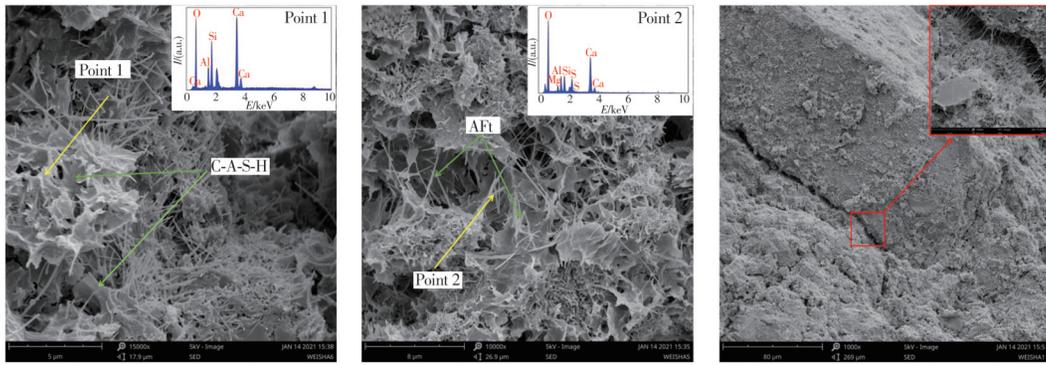


图 8 各龄期水化产物 XRD 图谱

Fig. 8 XRD patterns of hydrated products at different ages

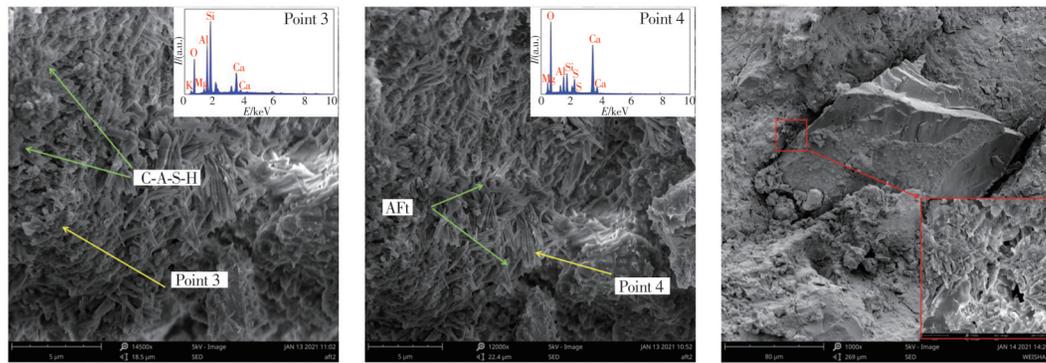
图 9、图 10 分别为 D3T2 组充填料 7、28 d 水化产物的扫描电镜图,并对图中 4 个探测点进行能谱分析。由图 9(a)、(b)中水化产物形貌并结合能谱分析可以看出,在 7 d 水化龄期时就已经生成了大量的针棒状钙矾石,并与网状结构的 C-A-S-H 凝胶相互穿插,与 XRD 图谱分析的结果相吻合;由图 9(c)可以看出,在 7 d 龄期时,尾砂颗粒边缘生长出大量钙矾石晶体,并且表面附着少量 C-A-S-H 凝胶,这也是充填体早期强度的主要来源。由图 10(a)、(b)可看出,在 28 d 龄期时,钙矾石晶体逐渐变得更加粗壮、密集,能量图谱显示, C-A-S-H 凝胶钙硅比降低,形貌表现为逐渐成长得更加密实,与钙矾石晶体紧密结合在一起,并且在图 10(c)中看到,尾砂颗粒附近具有同样致密的结构,是充填体具有较高后期强度的主要原因。



(a) 水化产物微观形貌图 (b) 水化产物微观形貌图 (c) 尾矿颗粒与水化产物界面图

图 9 7 d 水化产物扫描电镜图

Fig. 9 SEM images of 7 d hydrated product



(a) 水化产物微观形貌图 (b) 水化产物微观形貌图 (c) 尾矿颗粒与水化产物界面图

图 10 28 d 水化产物扫描电镜图

Fig. 10 SEM images of 28 d hydrated product

3 结论

1) 综合考虑工作性能和力学性能,得到适宜的充填材料配比方案:胶砂比 1:6,料浆浓度 70%,电石渣掺量范围 6%~9%,脱硫石膏掺量范围 2%~6%,通过调整复合激发剂掺量,可得到满足不同矿山充填工程要求的充填材料。

2) 电石渣-脱硫石膏复合激发矿渣生成以钙矾石和水化硅铝酸钙为主的水化产物,水化产物在早期形成并不断发育,与尾砂颗粒紧密结合形成稳定结构,为充填体提供强度。

3) 充填料采用的电石渣、脱硫石膏和矿渣均为工业固体废弃物,消耗了大量尾矿并有效固化尾矿内重金属离子,实现了以废治废,降低了充填成本。

参考文献

[1] 易龙生,米宏成,吴倩,等.中国尾矿资源综合利用现状[J].矿产保护与利用,2020,40(3):79-84.
YI L S, MI H C, WU Q, et al. Present situation of

comprehensive utilization of tailings resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(3): 79-84. (in Chinese)

[2] 刘文博,姚华彦,王静峰,等.铁尾矿资源化综合利用现状[J].材料导报,2020,34(Sup1):268-270.

LIU W B, YAO H Y, WANG J F, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings [J]. Materials Reports, 2020, 34(Sup1): 268-270. (in Chinese)

[3] ERCIKDI B, CIHANGIR F, KESIMAL A, et al. Utilization of industrial waste products as pozzolanic material in cemented paste backfill of high sulphide mill tailings [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168 (2/3): 848-856.

[4] 周爱民,古德生.基于工业生态学的矿山充填模式[J].中南大学学报(自然科学版),2004,35(3):468-472.

ZHOU A M, GU D S. Mine-filling model based on industrial ecology [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2004, 35 (3): 468-472. (in Chinese)

[5] 饶运章.降低胶结充填成本的途径及应用[J].中国矿

- 业, 1997, 6(5): 34-38.
- RAO Y Z. Ways and their applications for reducing cementing fill cost [J]. *China Mining Magazine*, 1997, 6(5): 34-38. (in Chinese)
- [6] YANG K H, SONG J K, SONG K I. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 39: 265-272.
- [7] 邓晓轩, 纪宪坤, 田均兵, 等. 矿渣在尾砂胶结充填中的应用与研究进展[J]. *材料导报*, 2016, 30(5): 95-100. DENG X X, JI X K, TIAN J B, et al. Application and research progress of slag in cemented filling of tailings [J]. *Materials Review*, 2016, 30(5): 95-100. (in Chinese)
- [8] BEHERA S K, GHOSH C N, MISHRA K, et al. Utilisation of lead-zinc mill tailings and slag as paste backfill materials [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(16): 1-18.
- [9] WANG F L, CHEN G L, JI L, et al. Preparation and mechanical properties of cemented uranium tailing backfill based on alkali-activated slag [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1-7.
- [10] 杨云鹏, 高谦. 尾砂新型复合胶结材料实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(Sup1): 2906-2911. YANG Y P, GAO Q. Experimental study of a new cementing material using tailings [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Sup1): 2906-2911. (in Chinese)
- [11] 彭饶. 硫酸钠激发胶凝材料制备尾矿充填体的设计与性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019. PENG R. Design and properties of the cemented paste tailings using sodium sulfate activated materials [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [12] 张少鹏, 杜翠凤, 戚伟. 碱激发矿渣胶结剂对尾砂充填料浆流动性和抗压强度的影响[J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(3): 87-92. ZHANG S P, DU C F, QI W. Effects of alkali-activated slag binder on the fluidity and compressive strength of cement paste backfill [J]. *Mining Research and Development*, 2020, 40(3): 87-92. (in Chinese)
- [13] 张发文, 杨建涛, 刘文霞, 等. 矿渣胶凝材料固结尾砂的微观实验[J]. *北京科技大学学报*, 2012, 34(7): 738-743. ZHANG F W, YANG J T, LIU W X, et al. Microscopic experiment of consolidating tailings by slag cementing materials [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2012, 34(7): 738-743. (in Chinese)
- [14] LUUKKONEN T, ABDOLLAHNEJAD Z, YLINIEMI J, et al. One-part alkali-activated materials: A review [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 103: 21-34.
- [15] LV W, SUN Z Q, SU Z J. Study of seawater mixed one-part alkali activated GGBFS-fly ash [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 106: 103484.
- [16] LEE N K, JANG J G, LEE H K. Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 53: 239-248.
- [17] 彭家惠, 楼宗汉. 钙矾石形成机理的研究[J]. *硅酸盐学报*, 2000, 28(6): 511-515. PENG J H, LOU Z H. Study on the mechanism of ettringite formation [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2000, 28(6): 511-515. (in Chinese)
- [18] 孙幸福. 碱激发钢渣-矿渣基灌浆材料的制备与性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017. SUN X F. The preparation and properties research on alkali activated steel slag-slag grouting material [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [19] 张文生, 张金山, 叶家元, 等. 合成条件对钙矾石形貌的影响[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(5): 631-638. ZHANG W S, ZHANG J S, YE J Y, et al. Influence of synthesis conditions on morphology of ettringite [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(5): 631-638. (in Chinese)
- [20] ZHANG J J, LI G X, YANG X F, et al. Study on a high strength ternary blend containing calcium sulfoaluminate cement/calcium aluminate cement/ordinary Portland cement [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 191: 544-553.
- [21] CHEN Q Y, TYRER M, HILLS C D, et al. Immobilisation of heavy metal in cement-based solidification/stabilisation: A review [J]. *Waste Management*, 2009, 29(1): 390-403.
- [22] TAILBY J, MACKENZIE K J D. Structure and mechanical properties of aluminosilicate geopolymer composites with Portland cement and its constituent minerals [J]. *Cement and Concrete Research*, 2010, 40(5): 787-794.
- [23] 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 S, CHEN X, XIA F Y, 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)