

复合掺合料对混凝土的改性试验

张延年,王众新,李志军,杜松岩,刘文亮

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 解决单一掺合料不利于固废有效资源化利用以及单掺性能提升单一等问题。方法 将铁尾矿、磷渣、锂渣制成复合掺料替代部分水泥制备混凝土,测试其抗压性能及电通量。通过扫描电镜法、电通量法和压汞法,探究其界面过渡区形貌以及混凝土微观孔结构。结果 磷渣可提高混凝土早期强度,锂渣对混凝土中后期强度提升更加明显。通过电通量法得出,复合掺料掺量一定时随着 NaOH 质量分数的增加,混凝土电通量值和氯离子扩散系数降低。结论 在铁尾矿、锂渣、磷渣质量比为 2:3:1 的情况下,可以得到不同龄期下混凝土较优抗压强度。NaOH 和 TIPA 的加入均可使固废混凝土的早中期抗压强度提高,锂渣掺量为 15% 时比掺量 5% 能更有效地降低电通量。

关键词 铁尾矿;锂渣;磷渣;三元体系;抗压强度

中图分类号 TU528

文献标志码 A

Experiment on Modification of Concrete with Compound Admixture

ZHANG Yannian, WANG Zhongxin, LI Zhijun, DU Songyan, LIU Wenliang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: Solve the problems of single blending material being not conducive to the effective utilization of solid waste resources and the lack of performance improvement in single blending. The iron tailings, phosphorus slag, and lithium slag are used to prepare composite blending materials to replace some of the cement in concrete. The compressive strength and electrical flux of the concrete are tested. The morphology of the interface transition zone and the micro-pore structure of the concrete are investigated using scanning electron microscopy, electrical flux method, and mercury intrusion porosimetry. Phosphorus slag can improve the early strength of concrete, while lithium slag has a more significant effect on the strength enhancement in the later stages of concrete. According to the electrical flux method, with the increase of NaOH mass fraction, the electrical flux value and chloride ion diffusion coefficient of concrete decrease when the dosage of composite blending materials is constant. Under the mass ratio of iron tailings,

收稿日期:2022-05-29

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2019YFC1907202)

作者简介:张延年(1976—),男,教授,博士,主要从事结构工程和固废资源化等方面研究。

lithium slag, and phosphorus slag at 2:3:1, superior compressive strength of concrete can be achieved at different ages. The addition of NaOH and TIPA can both improve the early and mid-term compressive strength of solid waste concrete. When the dosage of lithium slag is 15%, it can effectively reduce the electrical flux more than when the dosage is 5%.

Key words: iron tailings; lithium slag; phosphate slag; ternary system; compressive strength

混凝土因其卓越的性能,成为建筑材料中不可或缺的材料^[1]。我国土木业发展迅速,混凝土等建筑材料需求量巨大。混凝土的制备离不开水泥和骨料,水泥的生产会对环境产生负面影响;与此同时固体废弃物的堆积同样对环境形成了巨大压力^[2],其中最具代表性的固体废弃物就是铁尾矿。根据《中国资源综合利用年度报告》,2020—2021年尾矿年产量 16.49 亿 t,其中铁尾矿占 51%,其化学组成为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 和 MgO 等^[3-4]。

混凝土面临的关键问题之一是如何提高耐久性,由于氯离子渗透导致钢筋锈蚀是耐久性中值得关注的问题,矿物掺合料在混凝土中具有微骨料填充效应和火山灰作用效应,适当加入可改善混凝土微观结构,进而提高混凝土质量^[5-6]。周岳等^[7]研究调整掺合料用量及不同质量比对混凝土抗氯离子渗透性的影响,得出粉煤灰掺量为 10% 且矿渣粉掺量为 10%~20% 时,或单掺 20%~30% 矿渣粉时,混凝土具有良好的抗氯离子渗透性能。由于粉煤灰和矿渣价格昂贵,以及产量逐渐减少,因此需要寻求新材料代替。DUAN Yajing 等^[8]将铁尾矿粉代替粉煤灰掺入混凝土中,得出铁尾矿粉混凝土早期强度高于粉煤灰混凝土。但是全铁尾矿混凝土所用材料单一,既不利于多种固废的有效资源化利用,也会因材料单一使铁尾矿活性指数较差。HE Zhihai 等^[9]研究了含锂渣混凝土的力学性能、干缩性能等,得出掺量 20% 的锂渣在降低混凝土干燥收缩方面效果最好。但锂渣的火山灰效应不能被有效激发,因此过多的锂渣含量会对混凝土的孔隙结构

产生负面影响。张敏等^[10]研究了磷渣在水泥、混凝土中的应用,研究得出磷渣的加入能够明显改善水泥和混凝土的工作性能和耐久性,但当磷渣掺量过高时,其潜在活性不能得到有效激发,反而不利于强度的发展。

将铁尾矿单独掺入时由于其活性较差,对混凝土性能提升有限^[11],而掺入多种固废材料,不仅可以减少水泥用量,还能实现固废的充分利用,起到保护环境的目的。基于此,笔者以铁尾矿、锂渣、磷渣制备成复合掺合料,以 30% 取代率取代部分水泥后制备混凝土,对其进行抗压试验,并通过电通量法、压汞法和扫描电镜法研究复合掺合料在不同种类、不同比例及不同活性激发剂下对混凝土抗压强度及抗氯离子渗透性能的影响规律。

1 试验

1.1 试验材料

试验选用沈阳山水工源水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥(P·O42.5)。铁尾矿来自于辽宁壹立方公司,在使用前经过机械活化 1.5 h。锂渣是由广西鑫能源材料有限公司提供,且经过 1.5 h 研磨。磷渣由云南昆明海弗商贸有限公司生产。细骨料采取铁尾矿砂。粗骨料选取公称粒径为 5~20 mm 级配连续的铁矿废石,符合《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2019)中的规定。水泥、铁尾矿、磷渣、锂渣的化学成分见表 1,铁尾矿、锂渣、磷渣的比表面积及粒径见表 2,铁尾矿砂物理指标见表 3。铁尾矿、锂渣、磷渣经过机械活化后的微观形貌如图 1 所示。减水剂采用引气型羧酸系减水剂。化学激发剂有氢氧化钠

(NaOH)和三异丙醇胺(TIPA)。试验用水 采用自来水。

表1 水泥、铁尾矿粉、锂渣和磷渣的化学成分

Table 1 Chemical composition of cement, iron ore tailings powder, lithium slag and phosphorus slag %						
化学成分	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(SO ₃)	w(Fe ₂ O ₃)
水泥	20. 84	5. 2	62. 52	1. 59	2. 45	3. 5
铁尾矿粉	62. 2	4. 78	7. 76	6. 33	0. 47	14. 37
锂渣	54. 55	25. 38	6. 44	0. 60	10. 14	1. 41
磷渣	39. 08	3. 94	47. 45	2. 90	1. 22	1. 14

表2 铁尾矿、锂渣和磷渣的比表面积及粒径分布

Table 2 Specific surface area and particle size scores of iron ore tailings, lithium slag and phosphorus slag				
材料	比表面积/(m ² · kg ⁻¹)	D ₁₀ /μm	D ₅₀ /μm	D ₉₀ /μm
铁尾矿	1 343	1. 81	18. 6	57. 7
锂渣	13 627	1. 56	13	81
磷渣	1 070	2. 81	22	79. 8

注: D₁₀表示一个样品的累计粒度分布数达到10%时所对应的粒径;D₅₀表示一个样品的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径;D₉₀表示一个样品的累计粒度分布数达到90%时所对应的粒径。

表3 铁尾矿砂物理指标

Table 3 Physical indicators of iron ore tailings						
细度模数	石粉质量分 数/%	泥块质量分 数/%	堆积密度/ (kg · m ⁻³)	表观密度/ (kg · m ⁻³)	质量损失/%	压碎指标/%
2. 0	4. 9	0	1 620	2 560	4	22

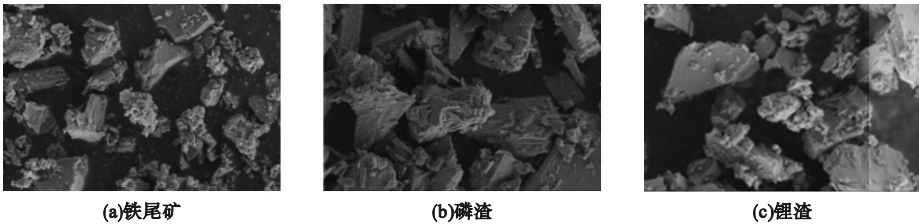


图1 原材料的微观形貌

Fig. 1 Microscopic morphology of raw materials

1.2 试验方法

复合掺合料以30%取代率取代部分水泥,按照水泥420 kg/m³,尾矿碎石1 110 kg/m³,铁尾矿砂740 kg/m³,水胶质量比为0.42,化学活化剂的使用量以占掺合料质量的百分比进行表示,减水剂为4.5 kg/m³,砂率为40%。混凝土配合比见表4。

根据上述配合比制备混凝土立方体试块,为保证所有粗、细骨料具有相同的含水率以减少误差,先将粗、细骨料置于温度为

105℃的烘箱中烘干24 h,然后将烘好的粗、细骨料投入到搅拌机中干拌1 min,之后加入相应质量的水泥、掺合料继续搅拌1 min,再将水与减水剂混合均匀后全部倒入搅拌机内搅拌2 min,最后将搅拌均匀的混凝土拌合物移至100 mm × 100 mm × 100 mm的模具中,在振实台上振动30 s后将其表面刮平,静置24 h后将试块脱模并送至养护室养护,养护温度为(20 ± 2)℃,相对湿度95%以上。在标准养护室分别养护7 d、14 d和

28 d,按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081—2019)测其抗压强度。

表4 混凝土配合比

Table 4 Concrete mix

试件编号	体积质量/(kg·m ⁻³)					化学活化剂
	铁尾矿	锂渣	磷渣	水泥	水	
C-1	42	42	42	294	176.5	1% NaOH
C-2	42	21	63	294	176.5	1% NaOH
C-3	42	63	21	294	176.5	1% NaOH
C-4	42	63	21	294	176.5	2% NaOH
C-5	42	63	21	294	176.5	0.1% TIPA
C-6	42	63	21	294	176.5	0.1% TIPA + 1% NaOH
C-7	42	63	21	294	176.5	无

耐久性测试试件模具为 Φ100 mm × 50 mm圆柱体模具,参考《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T 50082—2019),测试抗氯离子渗透性能。通过对试件进行抗压试验,并通过电通量法、压汞法和扫描电镜法研究其力学性能、抗氯离子渗透性能及微观结构。

2 试验结果与分析

2.1 试件抗压强度分析

图2为不同龄期时,混凝土抗压强度随锂渣与磷渣掺量变化分布情况。从图中可以看出,7 d时,C-2组抗压强度最高,为34.9 MPa,此时锂渣与磷渣的质量分比为1:3;14 d及28 d时,C-3组抗压强度最高,分

别为40.9 MPa和51.8 MPa,此时锂渣与磷渣质量比为3:1。表明增加锂渣掺量,有助于提高混凝土的后期抗压强度,但是损失了混凝土的早期抗压强度。

锂渣根据生产工艺可分为酸法锂渣和碱法锂渣,酸法锂渣主要化学成分为硅铝氧化物,碱法锂渣主要化学成分为氧化钙^[12]。本次试验所用的锂渣为酸法锂渣,含有大量的活性二氧化硅及氧化铝,通过与水泥产生的二氧化钙发生火山灰反应,提高了混凝土的后期抗压强度。磷渣由于取代部分水泥导致水泥用量减少,也减少生成的水化产物,导致混凝土抗压强度降低,这为磷渣的“负效应”。另一方面,由于磷渣中含有大量的二氧化硅、可溶性磷等活性物质,其与水泥的产物发生二次水化生成了更多的水化产物,使混凝土结构更加密实,体现了磷渣的“正效应”^[13]。因此,控制好锂渣与磷渣的比例,是协调混凝土早期与后期抗压强度的关键。

图3为不同活化剂种类和比例下抗压强度随龄期分布结果。从图中可以看出,7 d时C-4组抗压强度最高,为32.2 MPa,化学活化剂为质量分数2%的NaOH;14 d时C-6组抗压强度最高,为43.1 MPa,化学活化剂为质量分数0.1%的TIPA + 质量分数1%的NaOH;28 d时C-3组抗压强度最高,为51.8 MPa,化学活化剂为质量分数1%的NaOH。

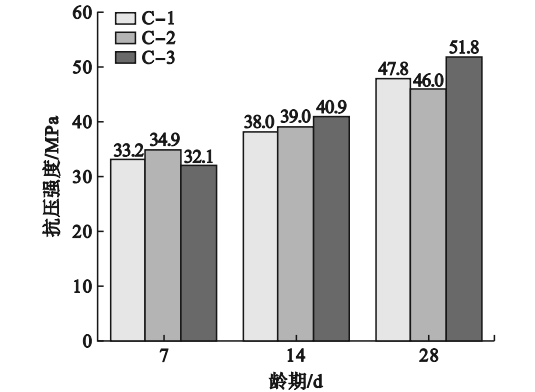


图2 不同掺合料掺量下抗压强度随龄期分布结果
Fig.2 The distribution of compressive strength with age under different dosages of different admixtures

这表明添加化学活化剂组抗压强度均优于未添加化学活化剂组。增加 NaOH 含量可增加早期强度,但是不利于中后期抗压强度的提升。TIPA 含量不变时,加入质量分数 1% 的 NaOH 可提高中后期强度。

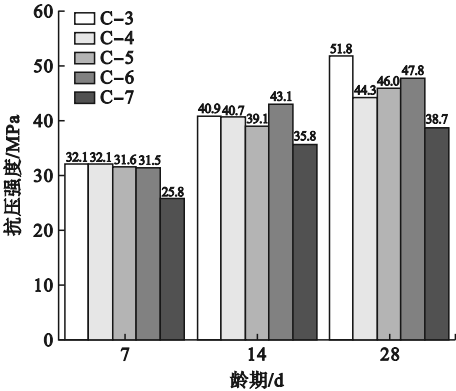


图 3 不同活化剂种类和比例下抗压强度随龄期分布结果

Fig. 3 The distribution of compressive strength with age under different types and proportions of activators

碱性环境和 TIPA 共同作用破坏了材料的表面结构,TIPA 可以促进铝离子、铁离子、硅离子在溶液中的溶解,进而促进掺合料的二次水化反应^[14]。TIPA 可以提高熟料中铁离子的溶出度,孔隙溶液中添加的 Fe^{3+} 会与溶液中的氢氧化物发生反应,引起沉淀,导致氢氧化钙的量减少。因此可以通过调整化学活化剂的掺量与种类影响混凝土早期强度和后期强度。

2.2 电通量分析

采用直径 100 mm、高度 50 mm 的圆柱体混凝土试件,标准养护 28 d 后进行电通量试验。图 4 为混凝土电通量随锂渣与磷渣掺量变化结果。从图中可以看出,C-3 组电通量最小为 398.8 C。表明复掺中,固定铁尾矿的掺量后,随着锂渣掺量的减少、磷渣掺量的增加,电通量从 398 C 逐渐增加至 748 C。锂渣与水泥水化物 $Ca(OH)_2$ 之间产生火山灰效应,促使更多的 C-S-H 凝胶生成,使试件孔结构更加细化,胶凝材料孔隙溶液中 pH 值降低,使混凝土吸附氯离子能力提高,这可

能是由于锂渣的掺入改善了混凝土的微观结构,或掺入锂渣后混凝土结合氯离子的能力发生改变,因而降低了氯离子的扩散能力,随着锂渣的增多,抗氯离子渗透性越好^[15]。

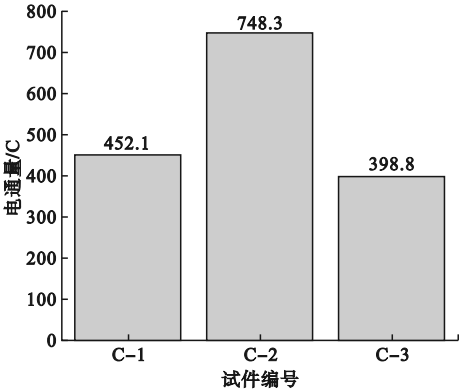


图 4 不同锂渣与磷渣掺量下混凝土电通量结果

Fig. 4 The results of concrete electrical flux under different dosages of lithium slag and phosphorus slag

图 5 为混凝土电通量随化学活化剂种类及掺量的变化结果。从图中可以看出,C-4 电通量比 C-3 有所下降,说明混凝土在 NaOH 掺量为 2% 时比掺量 1% 时的条件下对抗氯离子渗透效果更好。碱环境对固废混凝土的抗氯离子渗透性起到了积极作用。无化学激发剂的 C-7 组与其他同掺量组相比电通量最大,扩散系数最高,为 553.2 C。固废混凝土体系中加入 NaOH 后,为铁尾矿、锂渣、磷渣的水化提供了碱性环境,破坏了其玻

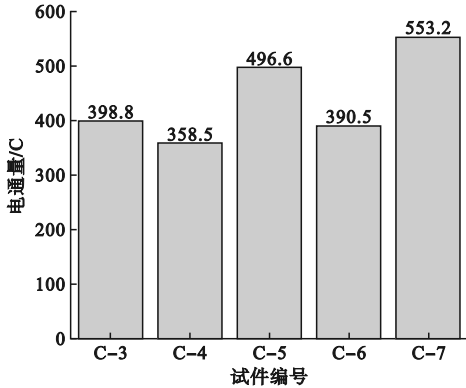


图 5 不同活化剂种类及掺量下混凝土电通量结果

Fig. 5 The results of concrete electrical flux under different types and dosages of activators

璃体网络结构,促进了硅氧四面体与铝氧四面体的解聚,加快了水化过程的速度。说明在同组没有化学活化剂激发的混凝土抗氯离子渗透性最差,增加活化剂掺量或者两种活化剂复合可明显改善混凝土抗氯离子渗透性能。说明 NaOH 的加入对多固废混凝土的抗氯离子渗透性能有更良好的表现。

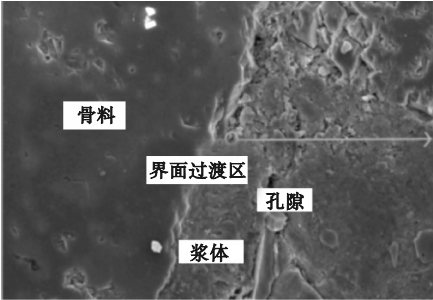
2.3 扫描电镜分析

从微观的角度分析,混凝土结构可视为三相材料,即骨料、水泥浆体和孔隙结构,研究重点是混凝土骨料与水泥浆体的界面过渡区和孔隙结构,骨料不和其他物质进行反应,所以不考虑骨料的影响^[16]。图6为水胶质量比0.42、养护龄期为7d、铁尾矿、锂渣

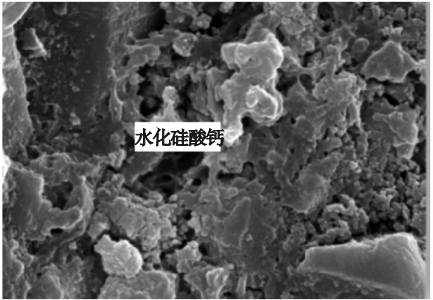
和磷渣质量比为2:3:1时,以30%取代率取代部分水泥后界面扫描电镜结果。

从图6(a)中可以看出,混凝土界面过渡区较为密实,过渡区与水泥浆体联系紧密。从图6(b)可以看到,在放大10 000倍后,早期没有明显的六方体CH晶体,更多的是四面体的CH,已经存在大量C-S-H凝胶覆盖在片状的CH晶体表面。在普通混凝土中掺入固废材料,锂渣中大量石膏和碳酸盐的存在加速了水泥的水化,加速了锂渣火山灰在碱性环境中的反应,产生了更多的C-S-H凝胶,C-S-H凝胶可以堵塞孔结构,提高密实性,消耗了界面过渡区的CH。从图6(c)中可以看到,大量的氢氧化钙晶体聚集在骨料临近处,没有形成紧密联系。与未掺化学活化剂相比,C-5组宏观表现为抗压强度的提升。

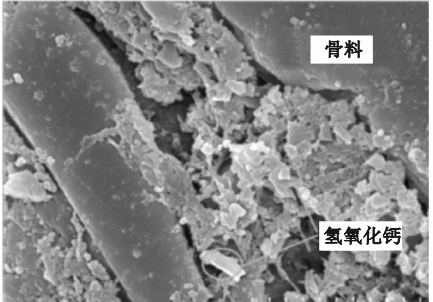
图7为固定铁尾矿、锂渣和磷渣复掺比例下,养护28 d时固废混凝土界面过渡区微观形貌。从图7(a)可以看出,C-5组混凝土较为细致,而C-7组较为粗糙。从图7(b)可以观察到有大量凝胶状聚集体,未水化颗粒较少。将图7(a)和图7(c)对比,在放大倍



(a)试件C-5放大1000倍



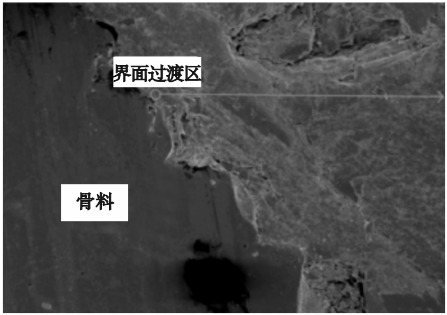
(b)试件C-5放大10000倍



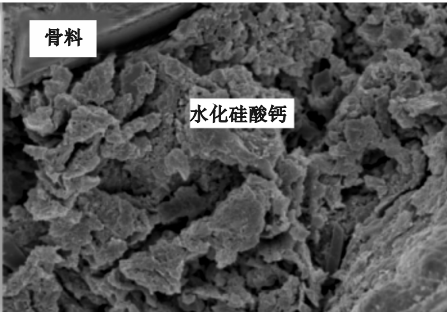
(c)试件C-7放大10000倍

图6 7d复掺混凝土界面过渡区微观形貌

Fig.6 Microstructure of interface transition zone of 7d mixed concrete



(a)试件C-5 放大1000倍



(b)试件C-5放大10000倍

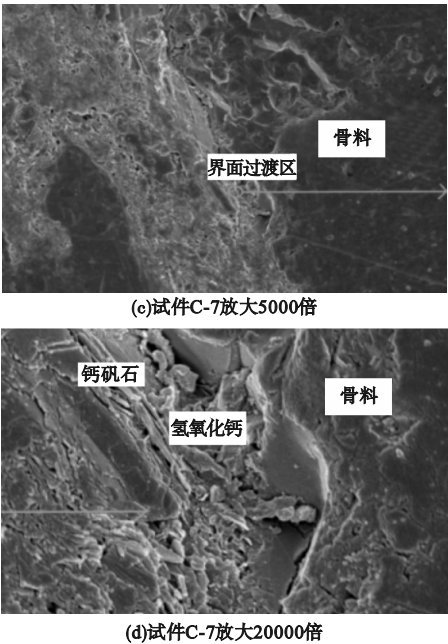


图7 28d复掺混凝土界面过渡区微观形貌

Fig.7 Microstructure of interface transition zone of 28D mixed concrete

表5 固废混凝土微观孔结构

Table 5 Micropore structure of solid waste concrete

龄期/d	编号	孔隙率/ %	平均孔 径/nm	最可几孔 径/nm	临界孔 径/nm	凝胶孔径	小毛细孔径	大毛细孔径	非毛细孔径
						5~12 nm 占比/%	12~100 nm 占比/%	100~1 000 nm 占比/%	1 000~10 000 nm 占比/%
28	C-3	11.91	22.66	32.4	40.2	28.6	38.2	15.9	6.8
	C-7	11.85	25.52	40.8	50.3	24.7	38.5	16.3	9.9
7]	C-3	9.54	23.09	32.4	40.2	27.4	41.8	14.2	7.4
	C-7	9.71	23.53	32.4	50.3	26.9	41.1	11.3	6.9

从表中可以得出,相同养护龄期的孔隙率较为接近,C-3组28d时的平均孔径较7d时下降了0.43nm;C-7组28d时的平均孔径较7d时增加了1.99nm。C-3组28d时凝胶孔隙率较7d时增加了1.2%,而未添加化学活化剂的C-7组28d时的凝胶孔隙率较7d时减低了2.2%。

说明在碱性环境下,促进了C-S-H凝胶的生成,通过加入比表面积大的锂渣可以明显改善多固废混凝土的孔径结构,提高混凝土的密实度和抗氯离子渗透能力。

加入化学活化剂可以明显减小非毛细孔和增大凝胶孔的比例,从而改善多固废混凝

土数较小时,添加化学活化剂的C-5组混凝土表面较细致,而C-7组的混凝土表面有许多裂缝和孔隙,表面较粗糙。从图7(b)中可以看到有大量凝胶状聚集体,未水化颗粒较少。图7(d)中由于没有添加化学活化剂,混凝土孔隙溶液的碱含量低,固废材料的活性没有得到很好的激发,二次水化程度较低,很大部分充当微集料填充孔隙,界面过渡区存在CH富集的情况,没有形成大量的凝胶状紧密结构。在靠近骨料表面的区域相互结合形成的CH晶体会定向排列,导致界面过渡区较松散,宏观特征表现为抗压强度较弱。

2.4 孔结构分析

将复掺固废混凝土分别在有化学活化剂和无化学活化剂条件下养护7d和28d进行对比,结果见表5。

土的抗氯离子渗透性能。从孔结构的角度来看,复掺三种固废的混凝土微观结构更加细化,加入化学活化剂可以优化孔结构,减少非毛细孔的比例,提高混凝土的抗氯离子渗透能力。

3 结 论

(1)在利用铁尾矿、锂渣、磷渣制备复合掺合料代替部分水泥的情况下,增加磷渣掺量可提高混凝土早期强度,锂渣掺量的改变对混凝土中后期强度提升更加明显。当铁尾矿、锂渣、磷渣质量比在2:3:1情况下,可以得到各龄期下较优抗压强度的混凝土。

(2) 在掺合料复掺比例相同情况下, NaOH 和 TIPA 均可使固废混凝土的早中期抗压强度提高,但掺入质量分数 2% 的 NaOH 相比于质量分数 1% 的 NaOH,混凝土后期的抗压强度有所降低。

(3) 通过电通量试验可以看出,在固废掺量确定后随着 NaOH 掺量的增加可以降低复掺固废混凝土电通量值和氯离子扩散系数。在化学活化剂相同情况下,锂渣掺量为 15% 比掺量为 5% 可有效降低电通量和氯离子扩散系数。

参考文献

- [1] 王元战,许元晨,赵宇鹏,等.矿物掺合料混凝土的性能与环境效益综合评价方法[J].环境工程,2022,40(8):197-205.
(WANG Yuanzhan, XU Yuanchen, ZHAO Yupeng, et al. Comprehensive evaluation method for performance and environmental benefits of mineral admixture concrete [J]. Environmental engineering, 2022,40(8):197-205.)
- [2] 顾晓薇,艾莹莹,赵昀奇,等.铁尾矿资源化利用现状[J/OL].中国有色金属学报,2022;1-29 [2022-01-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.
(GU Xiaowei, AI Yingying, ZHAO Yunqi, et al. Status quo of resource utilization of iron ore tailings [J/OL]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2022;1-29 [2022-01-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1238.TG.20220112.1844.002.html>.)
- [3] 杨亚东,刘新亮,张冰,等.铁尾矿资源综合利用现状研究[J].化工矿物与加工,2021,50(1):28-32.
(YANG Yadong, LIU Xinliang, ZHANG Bing, et al. Research on status of comprehensive utilization of iron tailings [J]. Industrial minerals & processing, 2021,50(1):28-32.)
- [4] 梁艳涛,赵振兴.铁尾矿资源综合利用现状及意义[J].现代矿业,2020,36(11):156-157.
(LIANG Yantao, ZHAO Zhenxing. Status and significance of comprehensive utilization of iron tailings resources [J]. Modern mining, 2020,36(11):156-157.)
- [5] 朱亚鹏,余亮,吕健,等.粉煤灰与矿渣对混凝土物理力学性能及耐久性能的影响[J].武汉大学学报(工学版),2018,51(增刊1):130-134.
(ZHU Yapeng, YU Liang, Lü Jian, et al. Effect of fly ash and slag on physic-mechanical property and durability behavior of concrete [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2018,51(S1):130-134.)
- [6] 朱伟豪,姜景山,黄鑫,等.矿物掺合料混凝土性能研究现状及其应用[J].江苏建材,2019(2):21-23.
(ZHU Weihao, JIANG Jingshan, HUANG Xin, et al. Research status and application of mineral admixture concrete performance [J]. Jiangsu building materials, 2019(2):21-23.)
- [7] 周岳,周健,唐孟雄,等.粉煤灰和矿渣粉对混凝土抗氯离子渗透和抗碳化性能的影响[J].混凝土,2021(7):60-64.
(ZHOU Yue, ZHOU Jian, TANG Mengxiong, et al. Influences of fly ash and slag powder on the chloride penetration resistance and carbonation resistance of concrete [J]. Concrete, 2021(7):60-64.)
- [8] DUAN Yajing, SUN Jianheng, DUN Chenyang, et al. Mix design and strength properties of full iron tailings concrete [J]. Journal of physics: conference series, 2020,1637:012028.
- [9] HE Zhihai, LI Longyuan, DU Shigui. Mechanical properties, drying shrinkage, and creep of concrete containing lithium slag [J]. Construction and building materials, 2017,147:296-304.
- [10] 张敏,马倩敏,郭荣鑫,等.磷渣在水泥混凝土中的资源化利用[J].硅酸盐通报,2019,38(8):2464-2469.
(ZHANG Min, MA Qianmin, GUO Rongxin, et al. Utilization of phosphorous slag in cement concrete [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2019,38(8):2464-2469.)
- [11] HAN F, LUO A, LIU J, et al. Properties of high-volume iron tailing powder concrete under different curing conditions [J]. Construction and building materials, 2020,241:1-18.
- [12] 苏慧,朱兆武,王丽娜,等.矿石资源中锂的提取与回收研究进展[J].化工学报,2019,70(1):10-23.
(SU Hui, ZHU Zhaowu, WANG Li'na, et al. Research progress in extraction and recovery of lithium from hard-rock ores [J]. CIESC Journal, 2019,70(1):10-23.)
- [13] 陆生发.磷渣混凝土的力学和抗冻性试验研究[J].新型建筑材料,2017,44(9):26-28.
(LU Shengfa. Experimental study on mechanics and frost resistance of concrete with phosphorus slag [J]. New building materials, 2017,44(9):26-28.)
- [14] 张挺. TIPA 的铝相促溶机理及其对水化及氯离子固化的影响机制[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
(ZHANG Ting. TIPA promotes the dissolution mechanism of aluminum phase and its effect on the mechanism of hydration and chloride ion binding [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.)
- [15] 韩国旗,温勇,王晨,等.锂渣对混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响研究[J].混凝土与水泥制品,2017(7):22-26.
(HAN Guoqi, WEN Yong, WANG Chen, et al. Effect of lithium slag on chloride ion corrosion resistance of concrete [J]. China concrete and cement products, 2017(7):22-26.)
- [16] 王华,韩松,安明喆,等.活性粉末混凝土材料微观结构的研究现状[J].材料导报,2014,28(7):95-98.
(WANG Hua, HAN Song, AN Mingzhe, et al. Development of microcosmic study on reactive powder concrete materials [J]. Materials reports, 2014,28(7):95-98.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)