

复掺铁尾矿和粉煤灰掺量对混凝土性能和微观结构性的影响

杨琼¹, 李悦²

(1. 浙江长征职业技术学院建筑工程系, 浙江 杭州 310023; 2. 东南大学土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。采用不同掺量作用下混凝土的电阻率、抗压强度和氯离子迁移系数的变化规律, 来评价混凝土的耐久性能。对不同铁尾矿掺量和不同粉煤灰掺量作用下混凝土的抗渗性能、力学性能、抗氯离子侵蚀性能进行了研究, 以及分析了同时掺加不同比例铁尾矿砂和粉煤灰对混凝土性能的影响。结果表明: 铁尾矿和粉煤灰掺量为 30% 时混凝土的抗压强度达到极大值。而粉煤灰掺量比例越大、铁尾矿掺量比例越小, 混凝土的抗压强度、抗渗性能和抗氯离子侵蚀性能就越差, 故在实际制备混凝土时应该采用大掺量铁尾矿砂、少掺量粉煤灰的配合比。随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 在同一水化时间作用下铁尾矿的水化放热速率和总放热量也呈现出不断减小的趋势, 这说明了掺加铁尾矿和粉煤灰很大程度上降低了混凝土的水化放热速率和总放热量。随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 混凝土孔径分布曲线峰值点对应的孔径值也是不断增大的, 但是增大的幅度却越来越小。

关键词: 陶瓷及复合材料; 抗渗性能; 抗氯离子侵蚀性能; 抗压强度; 水化放热速率; 总放热量; 孔径分布

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.02.011

中图分类号: TD985;TU421 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 02-0067-08

引用格式: 杨琼, 李悦. 复掺铁尾矿和粉煤灰掺量对混凝土性能和微观结构性的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(2): 67-74.

YANG Qiong, LI Yue. Effect of mixed iron tailings and fly ash content on the performance and microstructure of concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(2): 67-74.

混凝土结构的耐久性能较好, 被广泛应用在建筑工程、水电工程、道路工程、桥隧工程中, 且随着我国基础设施的大量建设, 每年水泥、砂石以及其他掺料的消耗量也与日俱增^[1-2]。虽然混凝土结构推动了我国经济发展、基础设施快速建设和极大满足了人民的生活需要, 但是混凝土结构消耗了大量的天然砂石材料, 这给自然环境带来了极大的危害和造成了巨大的能源危机, 且这也不符合我国现在提出的“绿色可持续发展”的战略方针^[3-4]。原来混凝土的制备都消耗大量的天然砂石材料, 为了满足混凝土结构“绿色”发展方向, 开始采用矿渣、尾矿、粉煤灰和其他工业、矿物固体废弃物, 来代替砂石材料作为混凝土的

骨料^[5]。

国内外学者已经将铁尾矿砂作为骨料掺入到混凝土材料的制备中取得了一定的成果, 但是对于同时掺加粉煤灰和铁尾矿砂对混凝土的耐久性和力学特性影响的研究较少。因此, 本文将研究不同掺量铁尾矿砂和粉煤灰对混凝土的耐久性和力学特性影响, 以及两者之间比例对混凝土的耐久性和力学特性影响, 进而得到铁尾矿砂和粉煤灰的较佳掺量。

1 原材料

1.1 铁尾矿的化学成分和矿物成分

制备混凝土所需的铁尾矿取自河北唐山滦县

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 浙江省成人教育与职业教育基金 (2021-33)

作者简介: 杨琼 (1980-), 女, 副教授, 从事土木工程施工、改性混凝土性能、工程经济与管理研究。

铁矿, XRF 测定其主要成分为 SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 和 TiO_2 , 含量分别为 70.21%、18.46%、7.08%、3.34%、0.31%、0.39% 和 0.21%。其含有的矿物主要有石英、磁铁矿、辉石、钾长石、钠长石和角闪石等。

1.2 铁尾矿的粒径分布

采用筛分法对铁尾矿砂的粒径分布情况进行测定, 所选用的筛子孔径为 20、10、5、2、1、0.5、0.25 和 0.075 mm, 经过筛分法后得到该铁尾矿级配曲线见图 1。

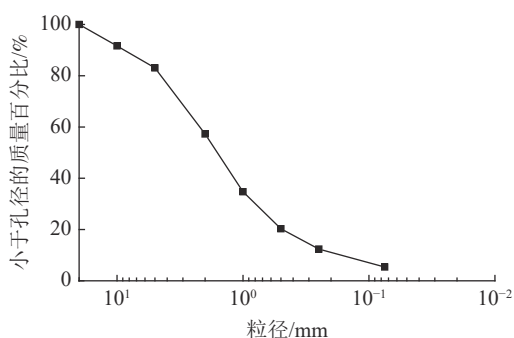


图 1 滦县铁矿区铁尾矿砂级配曲线

Fig.1 Gradation curve of iron tailings in Luanxian iron mine

从粒径角度来分析: 该尾矿不宜作建筑砂使用, 那么可以考虑细化处理后用于胶凝材料使用。

1.3 其他材料的性质

选用的粉煤灰购买自当地热电厂, 该粉煤灰经过测定主要包括了 SiO_2 、 CaO 、 SO_3 和 Fe_2O_3 等几种化学物质, 且二氧化硅和氧化硅的含量占粉煤灰总质量的 70% 以上; 其中, 该粉煤灰的含水量为 0.21%, 烧失量为 3.55%, 细度为 91.02% 和 SO_3 含量为 0.98%。水泥采用当地产的普通硅酸盐水泥 (型号为 PO 32.5), 该水泥的基本性质如下: 28 d 抗压强度为 33.6 MPa, 28 d 抗折强度为 5.89 MPa, 初凝时间为 1.08 h, 终凝时间为 4.05 h, 烧失量为 2.35% 和细度为 3.50%。石子购买自当地的采石场, 经过破碎后石头的粒径在 5~15 mm 之间, 压碎指标为 5.62%, 表观密度 2795 kg/m^3 。

经过筛分后铁尾矿颗粒粒径较大且铁尾矿自身活性较低, 需要采用机械粉磨的方法来激活铁尾矿的活性以及使得铁尾矿颗粒粒径更小。采用激光粒度仪对粉磨后的铁尾矿、水泥和粉煤灰进行粒度分析, 得到粉磨后的铁尾矿、水泥和粉煤灰粒度分布曲线见图 2。

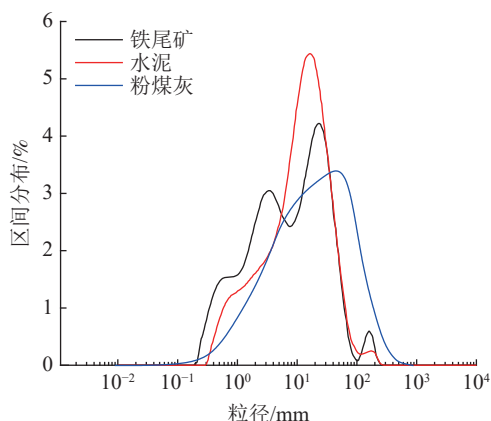


图 2 粉磨后的原料粒度分布

Fig.2 Particle size distribution curve of the materials

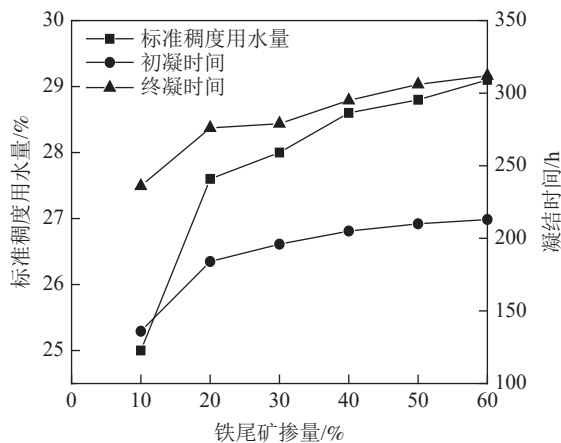
2 实验结果分析

2.1 混凝土砂浆的凝结时间和标准稠度用水量

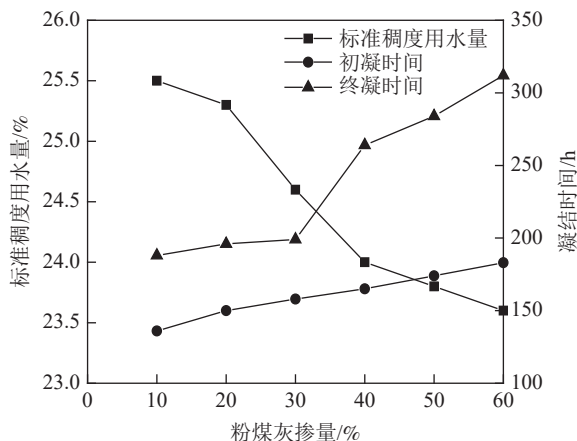
本文所制备混凝土的水泥含量为 430.00 kg/m^3 , 砂的含量为 855.00 kg/m^3 。将铁尾矿砂和粉煤灰分别作为混凝土掺料, 制备出铁尾矿砂和粉煤灰掺量为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 的混凝土砂浆, 对不同掺量铁尾矿和粉煤灰对混凝土砂浆的凝结时间、标准稠度用水量变化规律的影响曲线^[6]见图 3。

由图 3a 可知, 随着铁尾矿掺量的不断增大, 混凝土砂浆的凝结时间和标准稠度用水量均呈现出不断增大的变化趋势, 且在铁尾矿掺量为 30% 时混凝土砂浆的标准稠度用水量的增大幅度开始减小, 这是由于所掺入水泥颗粒要大于铁尾矿颗粒, 故水泥颗粒的比表面积要远远小于铁尾矿颗粒自身的比表面积, 掺入混凝土砂浆中的铁尾矿越多, 使得混凝土砂浆内部颗粒的比表面积也大幅度增大, 进而消耗的标准稠度用水量也不断增多。而造成混凝土砂浆凝结时间不断增大的原因是铁尾矿内部的活性物质要小于水泥的, 铁尾矿内部非活性物质只能起到充填混凝土空隙的作用, 随着铁尾矿掺量的不断增大, 使得混凝土砂浆进行水化反应后产生的水化产物较少, 进而有效地延长了混凝土砂浆的凝结时间。由图 3b 可知, 随着粉煤灰掺量的不断增大, 混凝土砂浆的凝结时间呈现出不断增大的变化趋势, 这是由于随着粉煤灰掺量的不断增大, 使得混凝土实际水灰比增大, 进而导致了混凝土砂浆的较佳水化反应被干扰, 最终粉煤灰起到了缓凝的效果; 同

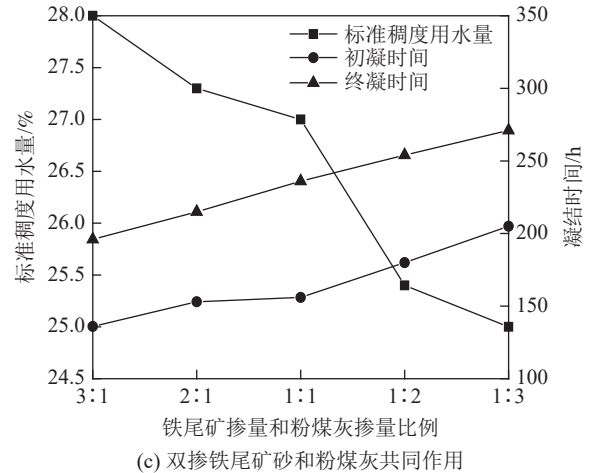
时, 粉煤灰颗粒的粒径要小于水泥颗粒的粒径, 且粉煤灰颗粒为圆形的光滑球面, 使得混凝土砂浆内部水泥颗粒与粉煤灰颗粒接触后减少了颗粒之间的摩擦力, 也使得混凝土砂浆的流动性变好。随着粉煤灰的不断增大, 混凝土砂浆的标准稠度用水量均呈现出不断减小的变化趋势, 这主要是由于粉煤灰颗粒较小, 大掺量的粉煤灰可以充填到混凝土内部的空隙中, 占据了原本充填水分的空隙, 进而随着粉煤灰掺量的增大标准稠度用水量却不断减小。由 3c 可知, 随着铁尾矿掺量比例不断减小、粉煤灰掺量比例不断增大, 混凝土砂浆的标准稠度用水量呈现出不断减小的变化趋势, 这主要是铁尾矿会使得用水量增多, 而粉煤灰使得用水量减小, 故随着粉煤灰掺量的增多、铁尾矿掺量的减小, 故标准稠度用水量呈现出不断减小。随着铁尾矿掺量比例不断减小、粉煤灰掺量比例不断增大, 混凝土砂浆的凝结时间呈现出不断增大的变化趋势。



(a) 单掺铁尾矿砂



(b) 单掺粉煤灰



(c) 双掺铁尾矿砂和粉煤灰共同作用

图3 混凝土砂浆的凝结时间、标准稠度用水量变化规律

Fig.3 Setting time of concrete mortar and the change law of water consumption for standard consistency

2.2 混凝土的7 d和28 d的抗压强度

将铁尾矿砂和粉煤灰分别作为混凝土掺料, 制备出铁尾矿砂和粉煤灰掺量为10%、20%、30%、40%、50%和60%的混凝土试样, 在单掺量铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土7 d和28 d的抗压强度变化规律可知, 混凝土的抗压强度均在掺量为30%时达到极大值, 故将铁尾矿和粉煤灰的总掺量设定为30%。而铁尾矿掺量和粉煤灰掺量比例设定为3:1、2:1、1:1、1:2和1:3五种, 制备出不同铁尾矿掺量和粉煤灰掺量比例作用下的混凝土。将混凝土试样分别养护7 d和28 d后, 采用万能实验机测定不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土7 d和28 d的抗压强度变化规律见图4。

由图4a可知, 随着铁尾矿砂掺量的不断增大, 混凝土7 d和28 d的抗压强度均呈现出先增大后减小的变化趋势, 且在铁尾矿掺量为30%时取得极大值, 这是由于铁尾矿中的活性氧化物与水泥和水产生水化反应的产物进行二次化学反应, 产生的水化硅酸钙和钙矾石等产物会充填在混凝土空隙中, 混凝土孔隙完全被填充, 使得混凝土的孔隙结构得到了较好地改善, 进而有效地提升混凝土的抗压强度; 但是随着铁尾矿掺量的持续增大, 在混凝土内部孔隙被完全充填之后, 过量的铁尾矿和水化产物就会破坏孔隙结构, 使得混凝土孔隙结构整体性能下降, 进而导致了混凝土的强度开始降低^[6]。由图4b可知, 而随着粉

煤灰掺量的不断增大,混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度也呈现出先增大后减小的变化趋势以及在粉煤灰掺量为 30% 时取得极大值,这是由于粉煤灰中的二氧化硅等物质会与水化产物氢氧化钙发生化学反应,产生的物质充填在混凝土空隙结构中提升了混凝土的强度;同时,粉煤灰中的玻璃微珠会对不规则的水泥颗粒起到“润滑”作用,使得水泥浆液在混凝土中分布更加均匀,这也有利于提升混凝土的整体强度;但是随着粉煤灰掺量的持续增大,在混凝土内部孔隙被完全充填之后,过量的铁尾矿粉煤灰和水化产物就会破坏孔隙结构,使得混凝土孔隙结构整体性能下降,进而导致了混凝土的强度开始降低^[7]。由图 4c 可知,随着铁尾矿掺量比例不断减小、粉煤灰掺量比例不

断增大,混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度变化规律呈现出逐渐减小的趋势,这是由于粉煤灰的水化活性要低于铁尾矿砂的水化活性(通过计算水化活性指数来对比粉煤灰和铁尾矿两者之间的活动大小),铁尾矿掺量比例越小在水泥水化早期时的水化反应速率就越慢,进而混凝土的抗压强度也就越低;但是随着水化反应不断进行,大量粉煤灰也开始参加水化反应,产生的水化产物和未反应的粉煤灰充填在混凝土内部空隙中,使得混凝土的抗压强度有所提升,而后期水化产物填充提升的强度值仍未弥补水化前期混凝土强度的降低幅度,故粉煤灰掺量比例越大、铁尾矿掺量比例越小,混凝土的抗压强度值就越小。

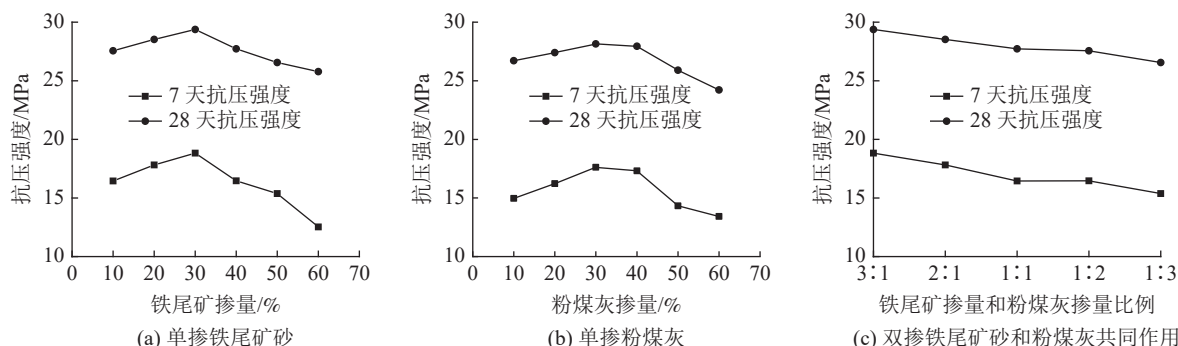


图 4 不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度变化规律

Fig.4 Changes in compressive strength of concrete at 7 d and 28 d under different contents of iron tailings and fly ash

2.3 混凝土的抗渗性能分析

混凝土的抗渗性能一般可以采用电阻率来评价。对不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土电阻率进行测定,绘制出不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土电阻率的变化规律见图 5。

由图 5a 可知,随着铁尾矿砂掺量不断增大,混凝土电阻率的变化规律呈现出不断增大的趋势,这是由于水泥发生水化反应后产生氢氧化钙的碱性物质,使得混凝土浆液处于碱性环境下,而铁尾矿砂内部矿物与氢氧化钙发生二次化学反应后产生的物质充填在混凝土空隙中,使得混凝土内部的孔隙率逐渐降低;同时,铁尾矿砂具有良好的级配,未发生化学反应的铁尾矿砂也会充填在混凝土空隙中,进而降低了混凝土的孔隙率,故混凝土的电阻率会不断增大(混凝土的抗渗性能增大)。由图 5b 可知,随着粉煤灰掺量的不断增大,混凝土电阻率的变化规律也呈现出不断增大的趋势,但是电阻

率的增大幅度却远远小于铁尾矿的。由图 5c 可知,随着铁尾矿掺量比例不断减小、粉煤灰掺量比例不断增大,混凝土电阻率的变化规律也呈现出不断增大的趋势,但是电阻率的增大幅度却越来越小,这是由于粉煤灰和铁尾矿同时加入时,使得混凝土内部颗粒级配更好、混凝土内部更加密实;同时,粉煤灰与铁尾矿砂具有不同的火山灰效应(两者形成互补),进而使得混凝土的电阻率增大(表现出良好的抗渗性能)。粉煤灰的水化活性(通过计算水化活性指数来对比粉煤灰和铁尾矿两者之间的活动大小)要低于铁尾矿砂的水化活性^[8],铁尾矿掺量比例越小,在水泥水化早期时的水化反应速率就越慢,导致了粉煤灰掺量越多、铁尾矿掺量越少时,混凝土内部与水化反应产生氢氧化钙进行二次反应产生物质就越少,进而混凝土的孔隙率降低幅度降低,也就是随着粉煤灰掺量的增大,混凝土电阻率的增大幅度越来越小。

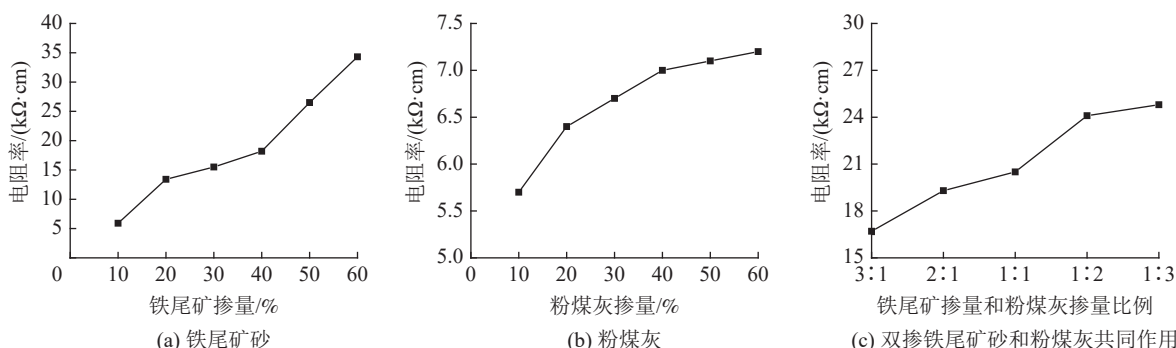


图5 混凝土电阻率的变化规律
Fig.5 Changing law of concrete resistivity

2.4 混凝土抗氯离子侵蚀性能分析

本文将采用氯离子迁移系数来评价混凝土的抗氯离子侵蚀性能。按照行业标准《混凝土氯离子扩散系数测定仪》中的方法对混凝土的氯离子迁移系数进行测定。测定方法：(1) 将混凝土试样套上橡胶筒，安装在设备上实验槽中；(2) 在橡胶筒阳极端和设备的实验槽中阴极端，放入一定量的氢氧化钠溶液和氯化钠溶液，且测定出两种溶液此时的温度；(3) 在混凝土的轴向施加电势，使得电荷负极 Cl^- 向混凝土内部中迁移；(4) 在实验时需要测定氢氧化钠溶液的温度和电流；

(5) 将混凝土试样取出后用清水清洗表面，并沿混凝土的轴向方向，将混凝土试样分割成两半后，在混凝土分割表面喷涂 0.1 mol/L 带的 AgNO_3 溶液；(6) 待到时间 15 min 后，将均等分的

10 份混凝土试样进行显色分界线离试件底面距离的测定。按照式 (1) 计算混凝土的氯离子迁移系数，即

$$D = \frac{0.0239 \times (273 + T)L}{(U - 2)t} \times \left[Xd - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \times Xd}{U - 2}} \right] \quad (1)$$

式中： U 为电压的绝对值； T 为氢氧化钠溶液温度的初始值和最终值的平均值； L 为混凝土厚度； Xd 为渗透深度的平均值； t 为实验时间。

对不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土氯离子迁移系数进行测定，绘制出不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土氯离子迁移系数的变化规律见图 6。

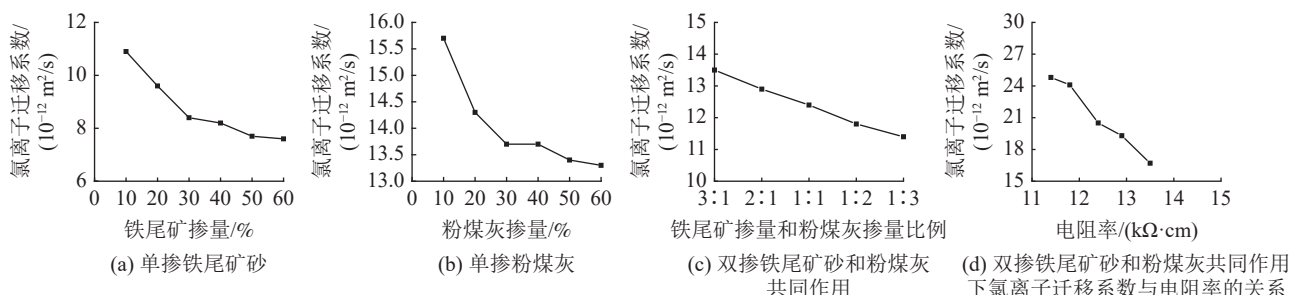


图6 混凝土氯离子迁移系数的变化规律

Fig.6 Changing law of chloride ion migration coefficient of concrete

由图 6a 可知，随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大，混凝土氯离子迁移系数的变化规律呈现出不断减小的趋势，但是粉煤灰混凝土的减小趋势要小于铁尾矿混凝土的减小趋势，这是由于铁尾矿砂具有很好的水化活性，使得水泥的水化反应发生迅速，进而铁尾矿砂内部矿物与水化产物氢氧化钙的化学反应也较为迅速，化学产物充填在混凝土孔隙中阻断了氯离子的迁移、增加了混凝土的自密实性。由图 6b 可知，粉煤灰使得前期

水化反应较慢、产生的水化产物氢氧化钙也就越少。因此，与铁尾矿砂混凝土相比，粉煤灰混凝土的孔隙率和自密实性都较弱，故粉煤灰混凝土的抗氯离子性能要差于铁尾矿砂混凝土的抗氯离子性能。由图 6c 可知，随着铁尾矿掺量比例不断减小、粉煤灰掺量比例不断增大，混凝土电氯离子迁移系数的变化规律呈现出不断增大的趋势，这也说明了粉煤灰抗氯离子侵蚀性能弱于铁尾矿砂抗氯离子侵蚀性能，故在实际制备混凝土时应

该采用大掺量铁尾矿砂、少掺量粉煤灰的配合比。造成上述现象的原因是铁尾矿砂越少,混合掺料的水化活性就越弱,最终混凝土的水化反应较慢、产生的水化产物氢氧化钙也就越少。由图 6d 可知,随着电阻率的不断增大,氯离子迁移系数的变化规律呈现出不断减小的趋势。

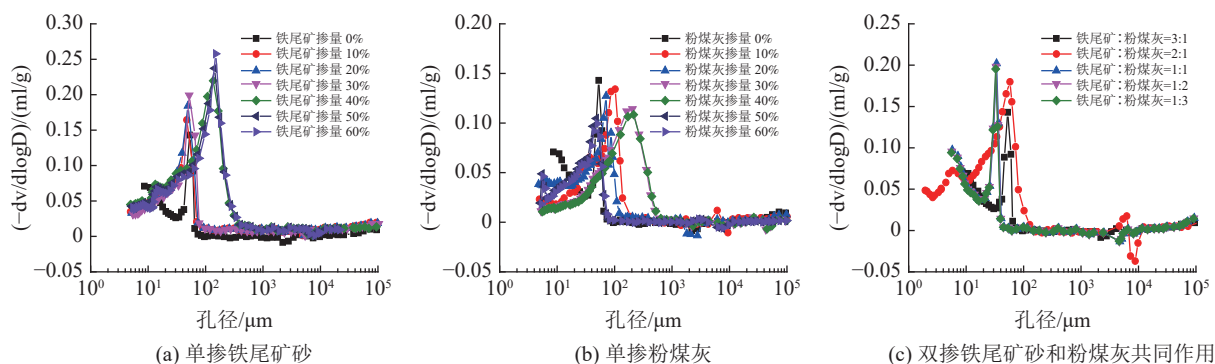


图 7 混凝土孔径分布的变化规律

Fig.7 Changing law of concrete pore size distribution

由图 7a 可知,随着铁尾矿掺量的不断增大,混凝土孔径分布曲线峰值点对应的孔径值也是不断增大的,混凝土的最可几孔径范围也是不断增大的,但是混凝土内部整体孔隙率却是不断降低的,这是由于铁尾矿中活性成分会参加水化反应,进而产生水化产物,而非活性成分主要填充在混凝土空隙内部,进而使得混凝土的孔隙率不断降低。由图 7b 可知,随着粉煤灰的不断增大,混凝土内部胶凝成分的最可几孔径逐渐增大,且混凝土最可几孔径也是不断减小的,但是混凝土内部胶凝成分的平均孔径却在不断增大,这主要是由于粉煤灰颗粒的粒径要远小于水泥颗粒的粒径,除了少部分粉煤灰参与水化反应,大量的粉煤灰颗粒都是起到填充的作用,较小粒径的粉煤灰充填在孔隙中,使得混凝土内部存在孔隙的孔径向着较小孔径范围内不断缩小。由图 7c 可知,随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大,混凝土孔径分布曲线峰值点对应的孔径值也是不断增大的,但是增大的幅度却越来越小,这是由于铁尾矿和粉煤灰掺量比例变化导致的。

3.2 混凝土的水化特性分析

水化热的测试方法按照 GB/T 12959-2008《水泥水化热测定方法》中的方法,水化热测试设备采用型号为 TAM Air 的八通道热导式等温微量量热仪。测试步骤如下:(1)设置仪器测试温度为 20℃,待仪器温度稳定后进行下一步操作;(2)在

3 混凝土材料的微观结构特性的分析

3.1 混凝土的孔径特性分析

对不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土孔径分布进行测定^[9],绘制出不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土孔径分布的变化规律见图 7。

搅拌前需尽量保证胶凝材料和拌合用水的温度与设置仪器的温度相近;(3)各组浆体在搅拌均匀后再称取一定量放入等温量热仪的通道中,整个过程需要保证时效性以减小各组浆体拌合和放置的过程带来时间浪费引起的实验误差,通过仪器自带的传感器和连接的计算机不间断测试水化放热数据。

对不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土水化放热速率和放热量进行测定^[10],绘制出不同铁尾矿砂和粉煤灰掺量作用下混凝土水化放热速率和放热量的变化规律见图 8。

由图 8a、b 可知,随着铁尾矿掺量的不断增大,在同一水化时间作用下铁尾矿的水化放热速率和总放热量均呈现出不断减小的趋势,这是由于铁尾矿掺量的增多会使得水泥掺量的减少,铁尾矿内部矿物成分可发生水化反应的量较少,且水化反应产生的热量也少。由图 8c、d 可知,对粉煤灰混凝土的水化放热速率曲线而言,随着粉煤灰掺量的不断增大,在水化放热速率曲线的诱导期和加速期水化放热速率呈现出不断减小的趋势,这可能是由于粉煤灰的活性要小于水泥的活性,在水化诱导期和加速期参加水化反应的物质主要以水泥为主,随着粉煤灰的掺量的增大水泥掺量就减小,进而导致在诱导期和加速期水化放热速率较为缓慢;但是进入到水化减速期时,不同粉煤灰掺量作用下的混凝土均会出现一个较大

的水化放热速率峰值，这主要是由于水化减速期混凝土内部的钙矾石会进一步发生化学反应，在分解的过程中会放出大量的热量，促使水化放热速率开始增大，而水化放热速率的峰值会随着粉煤灰掺量的增大而延后，这可能是由于粉煤灰中含有一定量的硫化物质，粉煤灰掺量越多，在混凝土内部中的三氧化硫就越多，就会使得钙矾石分解反应就会适当的延迟，进而产生的放热速率

峰值也会适当的延后；而在水化稳定期时，水化放热速率却趋于稳定的变化趋势，这是由于此时水化产物的进行二次水化会受到扩散速率控制，使得水化反应的放热速率有所减缓。而在同一水化反应时间作用下，混凝土的水化过程中的放热总量却呈现出不断下降的趋势，这是由于粉煤灰的活性要小于水泥的活性，在水化诱导期和加速期参加水化反应的物质主要以水泥为主，水泥产

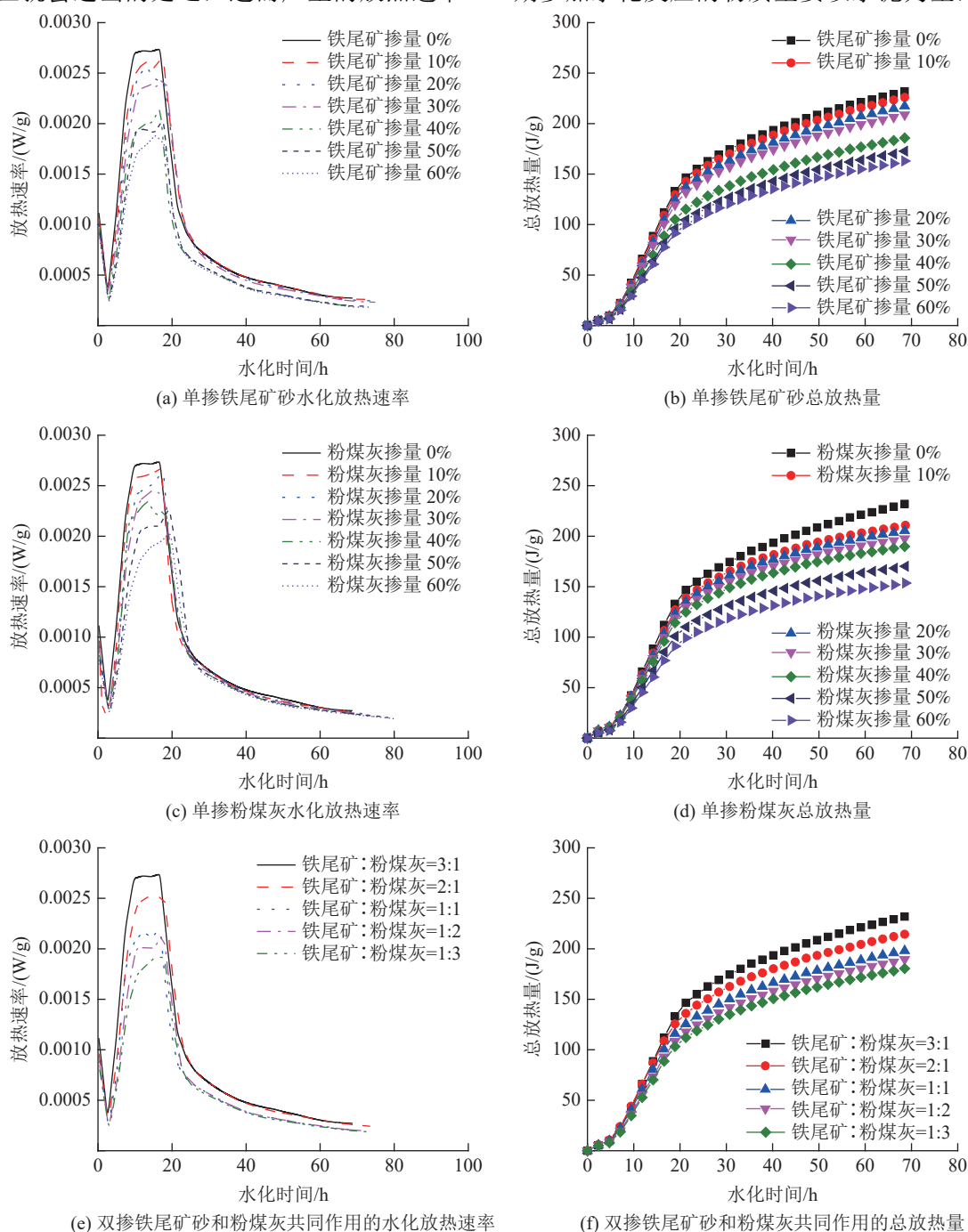


图8 混凝土水化放热速率和放热量的变化规律

Fig.8 Changing law of concrete hydration heat release rate and heat release

量越少导致水化反应的放热总量就减小^[11]。由图 8e、f 可知, 随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 在同一水化时间作用下铁尾矿的水化放热速率和总放热量也呈现出不断减小的趋势, 这说明了掺加铁尾矿和粉煤灰很大程度上降低了混凝土的水化放热速率和总放热量。

4 结 论

(1) 该铁尾矿所含有的矿物主要有以下几种: 磁铁矿、赤铁矿和假象赤铁矿, 石英和绿泥石等。

(2) 随着铁尾矿砂和粉煤灰掺量的不断增大, 混凝土 7 d 和 28 d 的抗压强度均呈现出先增大后减小的变化趋势, 且在铁尾矿和粉煤灰掺量为 30% 时取得较大值; 随着铁尾矿砂和粉煤灰掺量不断增大, 混凝土电阻率的变化规律呈现出不断增大的趋势; 随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 混凝土氯离子迁移系数的变化规律呈现出不断减小的趋势, 但是粉煤灰混凝土的减小趋势要小于铁尾矿混凝土的减小趋势。

(3) 粉煤灰掺量比例越大、铁尾矿掺量比例越小, 混凝土的抗压强度、抗渗性能和抗氯离子侵蚀性能就越差, 故在实际制备混凝土时应该采用大掺量铁尾矿砂、少掺量粉煤灰的配合比。

(4) 随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 在同一水化时间作用下铁尾矿的水化放热速率和总放热量也呈现出不断减小的趋势, 这说明了掺加铁尾矿和粉煤灰很大程度上降低了混凝土的水化放热速率和总放热量。

(5) 随着铁尾矿掺量和粉煤灰掺量的增大, 混凝土孔径分布曲线峰值点对应的孔径值也是不断增大的, 但是增大的幅度却越来越小, 这是由于铁尾矿和粉煤灰掺量比例变化导致的。

参考文献:

- [1] 徐风广, 杨凤玲, 李红伟, 等. 低活性钢渣在地面用水泥基自流平砂浆中的应用研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):85-88.
- XU F G, YANG F L, LI H W, et al. Research on application of cement-based self-leveling floor mortar using low active steel slag[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):85-88.
- [2] 庞华果, 向晓东, 江新卫, 等. 以钢渣水洗生泥为原料制取泡沫混凝土砌块试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):87-90.
- PANG H G, XIANG X D, JIANG X W, et al. Experimental research on preparation of foam concrete block with steel-slag

sludge as material[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):87-90.

[3] 刘俊杰, 梁钰, 曾宇, 等. 利用铁尾矿制备免烧砖的研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(5):136-141.

LIU J J, LIANG Y, ZENG Y, et al. Preparation of baking-free bricks by iron tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(5):136-141.

[4] 唐加俊, 邹春霞, 薛慧君, 等. 双掺合料模袋混凝土的孔隙特征研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(7):2274-2280.

TANG J J, ZOU C X, XUE H J, et al. Study on pore evolution characteristics of double-doped molded bag concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(7):2274-2280.

[5] 胡耀文, 李镜培, 谢峰. 再生混凝土抗渗性能实验研究[J]. *结构工程师*, 2020, 36(3):160-166.

HU Y W, LI J P, XIE F. Experimental research on impermeability of recycled concrete[J]. *Structural Engineers*, 2020, 36(3):160-166.

[6] 罗小博, 宋戎, 郭启明, 等. 粉煤灰掺量对混凝土力学性能影响的实验研究[J]. *混凝土*, 2021(8):88-90+95.

LUO X B, SONG Y, GUO Q M, et al. Experimental study of influence of the mechanical behavior about fly ash content on concrete[J]. *Concrete*, 2021(8):88-90+95.

[7] 李萌, 周庆立, 白丽梅, 等. 机械力化学效应提高铁尾矿活性实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):179-185.

LI M, ZHOU Q L, BAI L M, et al. Experimental study on improving the activity of iron tailings by mechanochemical effect[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):179-185.

[8] 金珊珊, 林睿颖, 郑桂萍, 等. 低硅灰水泥砂浆孔隙结构及分形维数的演变特征[J]. *混凝土*, 2021(4):109-112.

JIN S S, LIN R Y, ZHENG G P, et al. Evolution of pore structure and fractal dimension of silica fume cement mortar[J]. *Concrete*, 2021(4):109-112.

[9] 王丹丹. 金尾矿混凝土力学及耐久性能研究[D]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2021.

WANG D D. Study on mechanics and durability of gold tailings concrete [D]. Zhangjiakou: Hebei University of Architecture, 2021.

[10] 胡立志, 代飞, 李伟青, 等. 搅拌站废浆对水泥水化的影响[J]. *矿产综合利用*, 2019(5):102-106.

HU L Z, DAI F, LI W Q, et al. Study on effect of the slurry of concrete mixing plant upon cement hydration[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(5):102-106.

[11] 毛奎, 蔡亮, 吴小文, 等. 几种典型铁尾矿制备加气混凝土性能及水化机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(12):3719-3725.

MAO K, CAI L, WU X W, et al. Hydration mechanism and properties of aerated concrete prepared by several typical iron tailings[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(12):3719-3725.

(下转第 95 页)

properties and durability of iron tailings concrete after being subjected to the dry-wet cycle of sodium sulfate solution, the compressive test, chloride ion corrosion test, frost resistance test and hydration characteristics test of the concrete eroded by sodium sulfate solution are carried out. The effects of different iron tailings content, number of dry and wet cycles, and solution concentration on the mechanical properties and durability of concrete are analyzed. The results show that when the iron tailings content is 30%, the number of dry and wet cycles is 60 times, and the sodium sulfate concentration is 5%, the mass loss rate of concrete is the smallest and the compressive strength and corrosion resistance coefficient is the largest. As the content of iron tailings continues to increase, the better the corrosion resistance and frost resistance of concrete will be and the heat of hydration reaction decreases.

Keywords: Ceramics and composites; Iron tailings; Number of wet and dry cycles; Mass loss rate; Resistance to chloride ion erosion; Hydration reaction

////////////////////////////////////
(上接第 74 页)

Effect of Mixed Iron Tailings and Fly Ash Content on the Performance and Microstructure of Concrete

YANG Qiong¹, LI Yue²

(1.Department of Architectural Engineering, Zhejiang Changzheng vocational and Technical College, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2.School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. The changes of resistivity, compressive strength and chloride ion migration coefficient of concrete under different dosages are used to evaluate the durability of concrete. The impermeability, mechanical properties, and chloride ion corrosion resistance of concrete under the action of different iron tailings content and different fly ash content are studied. The effect of adding different proportions of iron tailings and fly ash on the performance of concrete is analyzed. The results show that the compressive strength of concrete reaches the maximum when the content of iron tailings and fly ash is 30%. However, the larger the proportion of fly ash and the smaller the proportion of iron tailings, the worse the compressive strength, impermeability and resistance to chloride ion corrosion of concrete. Therefore, in the actual preparation of concrete, a mixing ratio of a large amount of iron tailing sand and a small amount of fly ash should be used. With the increase in the content of iron tailings and fly ash, the hydration heat release rate and total heat release of iron tailings also show a decreasing trend under the same hydration time. This shows that the addition of iron tailings and fly ash greatly reduces the hydration heat release rate and total heat release of concrete. With the increase in the amount of iron tailings and fly ash, the pore size value corresponding to the peak point of the concrete pore size distribution curve is also increasing, but the increasing amplitude is getting smaller and smaller.

Keywords: Ceramics and composites; Impermeability; Resistance to chloride ion erosion; Compressive strength; Hydration heat release rate; Total heat release; Pore size distribution