

铁尾矿粉对石灰石粉混凝土力学性能和氢氧化钙含量的影响

张巨璟¹, 花东申²

(1. 陕西职业技术学院, 陕西 西安 710038; 2. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063210)

摘要: 这是一篇陶瓷及复合材料领域的论文。本文研究了复掺铁尾矿粉和石灰石粉的掺量和比例对混凝土性能的影响。结果表明: 随着复掺矿粉比例的不断增大, 复掺矿粉混凝土强度均呈现出先增大后减小的变化规律, 并在复掺矿粉比例为 1:2 时取得较大值。在同一冻融循环次数作用下, 混凝土质量损失率随着复掺矿粉比例的增大呈现出先减小后增大的趋势, 而混凝土的相对动弹性模量却呈现出先增大后减小的变化趋势。在同一测定位置处, 随着复掺矿粉比例的不断增大, 复掺矿粉混凝土氯离子含量均呈现出不断减小, 且在比例为 1:2 时复掺矿粉混凝土氯离子含量的下降变快。综合实验结果得到, 石灰石粉掺量为 20% 时混凝土的强度特性较佳, 复掺矿粉比例为 1:2 时混凝土的强度和耐久性均达到较佳。

关键词: 陶瓷及复合材料; 铁尾矿粉; 石灰石粉; 质量损失率; 相对动弹性模量; 氯离子含量; 强度

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.025

中图分类号: TD981 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0176-08

引用格式: 张巨璟, 花东申. 铁尾矿粉对石灰石粉混凝土力学性能和氢氧化钙含量的影响[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 176-183+203.

ZHANG Jujing, HUA Dongshen. Effect of iron tailings powder on the mechanical properties and calcium hydroxide content in limestone powder concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 176-183+203.

随着新一轮基础设施建设, 大量构筑物的修建消耗大量的混凝土材料, 而混凝土材料的制备需要用到砂石、水泥、水和其他掺合料^[1]。近些年, 越来越多的构建筑也修建在环境较为极端的地域, 这就对混凝土的性能有了较高的要求, 也对掺合料提升混凝土性能有了更高的要求^[2]。一般情况下, 采用矿渣或者粉煤灰等固体废弃物作为混凝土的掺合料, 虽然利用上述材料可以代替天然砂石材料和解决固体废弃物二次利用的问题, 但是经过大量实验研究表明, 掺入粉煤灰和矿渣并不能很好地提升混凝土结构在环境较为极端地段的适用性和力学性能, 且粉煤灰和矿渣等材料运输到现场的成本也较高, 急需寻找一种在极端条件可以提升混凝土力学性能和适用性的掺合

料, 且生产成本低和分布范围较为广泛^[3]。石灰石广泛分布在我国各地, 可以就地取材后采用粉碎机将开采石灰石产生的尾矿粉磨成适合混凝土掺合料要求, 不仅解决了尾矿堆积占用土地资源的问题, 而且可以通过机械粉磨激发尾矿粉的活性, 使得粉磨后高性能尾矿粉可以代替水泥, 减少了生产水泥过程中对环境造成的污染, 并能提升制备的高性能尾矿粉混凝土的力学性能和耐久性, 进而使得混凝土结构更容易适应极端环境^[4]。

国内外学者采用石灰石粉制备混凝土, 在尾矿粉对混凝土性能研究上取得了较为丰硕的成果。例如, 侯云芬等^[5]研究铁尾矿粉掺量和比表面积对混凝土性能的影响, 发现了适当掺量为 20%, 且铁尾矿粉末细时, 混凝土的各项性能指标

收稿日期: 2021-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51974134)

作者简介: 张巨璟 (1980-), 女, 硕士研究生, 副教授, 研究方向为土木建筑、建筑材料和改性混凝土。

较佳。黄晓燕等^[6]对所采用矿粉的矿物成分和粒径范围进行了确定后，研究了矿粉掺量对水泥基复合材料性能的影响，得到了矿粉掺量为40%时水泥基复合材料性能较佳。吴凯等^[7]开展了集料对矿粉混凝土性能的影响实验，发现了矿粉掺量的增大会大量消耗混凝土内部的氢氧化钙，降低混凝土抵抗硫酸盐腐蚀的能力。上述研究成果主要集中在研究了各类矿粉掺量对混凝土力学性能方

面的影响，较少地研究铁尾矿粉对石灰石粉混凝土力学性能和内部氢氧化钙含量的影响，故本文将着重研究铁尾矿粉和石灰石粉掺量比例对混凝土力学性能和内部氢氧化钙含量的影响。

1 原材料

水泥采用从石家庄灵寿县购买的P·O 42.5普通硅酸盐水泥，经过厂家提供的信息见表1。

表1 水泥的性质
Table 1 Properties of cement

名称	初凝时间/h	终凝时间/h	3 d		28 d		比表面积/(m ² /kg)
			抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	
水泥	2.48	3.12	25.02	4.77	44.93	8.41	360.23

石灰石粉采用河北恒聚牌石灰石粉，该石灰石粉密度2.6 g/cm³。铁尾矿粉取自唐山某铁矿，采用XRF衍射仪测得该石灰石粉和铁尾矿粉的矿物成分见表2。

表2 石灰石粉(A)和铁尾矿粉(B)的矿物成分/%
Table 2 Mineral composition of limestone tailings powder (A) and iron tailings powder (B)

名称	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	其他	烧失量
A	5.68	1.35	2.32	56.68	0.96	0.59	32.42
B	68.21	5.21	4.68	9.87	7.35	2.75	1.93

而采用激光粒度仪器测定石灰石粉和铁尾矿粉的粒径分布，结果见图1。

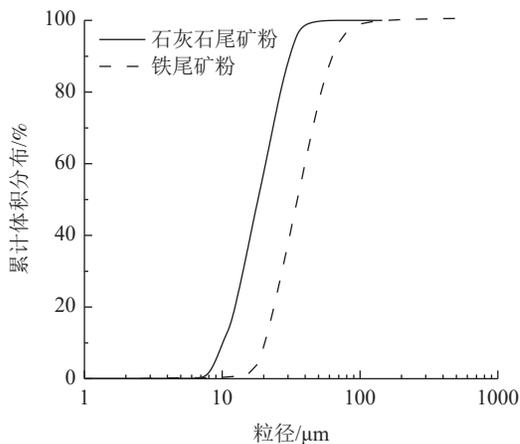


图1 石灰石粉和铁尾矿粉的粒径分布

Fig.1 Particle size distribution of limestone tailings powder and iron tailings powder

所用的砂子购买自当地砂石厂生产的机制砂，该机制砂的性能如下：石粉含量为5.89%，堆积密度为1 585 kg/m³，表观密度为2 715 kg/m³，

含泥量为0.09%。石子也购买自当地的砂石厂，石子粒径范围为5~20 mm，经过检测得到该石子的性能如下：含泥量为0.28%，针片状颗粒含量为3.54%，压缩指标为14.65，堆积密度为1 545 kg/m³，表观密度为2 725 kg/m³。

2 实验设备和方法

混凝土的抗压强度和抗折强度可以采用万能实验机来进行实验^[8]，而凝结时间的测定具体步骤可以参考《混凝土结构工程施工规范》。

根据《水工混凝土试验规程》可知，制备出边长为100 mm的标准正方体试样，将五个面采用环氧树脂密封，只剩余一个面用来氯离子侵蚀。本文采用的氯离子侵蚀溶液为浓度为0.5%的氯化钠溶液，在溶液中浸泡5 d取出后放置在标准条件下静置5 d，以此循环往复，测定循环周期50和100次下混凝土的氯离子含量的变化规律。

一般情况下，可以采用TG-DTA测试方法来测定混凝土内部氢氧化钙的含量。测试原理是：在温度为100~400 °C之间时混凝土内部可以认为只有C-S-H凝胶中的自由水会挥发；在温度为400~550 °C时，混凝土内部氢氧化钙会发生热分解，可以认为在该温度范围之间挥发的水分全部是氢氧化钙热分解产生的水；在温度为600~750 °C时，混凝土中挥发的水分是由碳酸钙热分解产生的水分，故可以通过测定温度为400~550 °C区间挥发水分的质量和氢氧化钙热分解化学公式来测定出氢氧化钙的质量。采用同步热分析仪对不同

铁尾矿粉和石灰石粉比例作用下混凝土的差热法和热重法进行测试，得到混凝土的 TG-DTA 曲线。

根据文献^[9]中的方法计算出不同石灰石粉和铁尾矿粉比例作用下混凝土内部氢氧化钙的含量，得到混凝土内部氢氧化钙含量与石灰石粉和铁尾矿粉比例的关系。

3 石灰石粉掺量对混凝土性能的影响

将石灰石粉的掺量定为 0、10%、20%、30% 和 40%，来代替混凝土中水泥的含量，其他材料的掺量固定不变，且设定水灰比为 0.40。

3.1 混凝土的抗压强度和抗折强度

绘制出不同石灰石粉掺量下混凝土的抗压强度和抗折强度的变化规律见图 2。

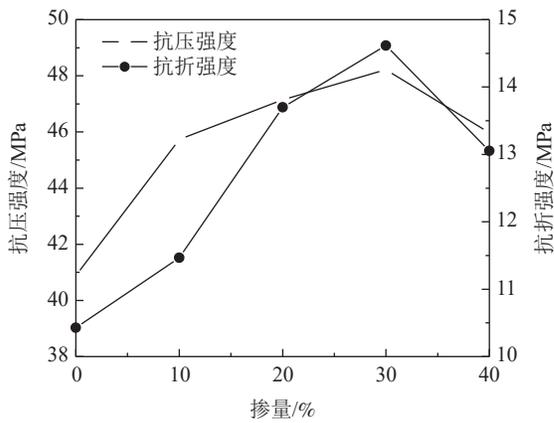


图 2 混凝土的抗压强度和抗折强度的变化规律
Fig.2 Change rules of compressive strength and flexural strength of concrete

由图 2 可知，随着石灰石粉掺量的不断增大，石灰石粉混凝土强度均呈现出先增大后减小的变化规律，且在石灰石粉掺量为 20% 时取得最大值，这是由于石灰石粉具有一定的活性，可以与混凝土中其他材料发生化学反应生成铝酸盐，进而对提升混凝土的强度具有一定的贡献作用；同时，石灰石粉颗粒较小，可以作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，提升了混凝土微观孔隙结构，使得混凝土的整体性更好，进而混凝土的强度有所提升。但是随着石灰石粉掺量的持续增大，使得混凝土内部水泥含量不断减少，导致了具有胶凝性的水化产物含量减少，最终使得混凝土的强度有所下降；同时，过量的石灰石粉作为充填物也会破坏已经平衡的孔隙结构，使得混凝土的强度开始下降。

3.2 混凝土的凝结时间

通过实验测定出不同单掺石灰石粉掺量下混凝土凝结时间^[10]，并绘制出不同石灰石粉掺量下混凝土凝结时间的变化规律见图 3。

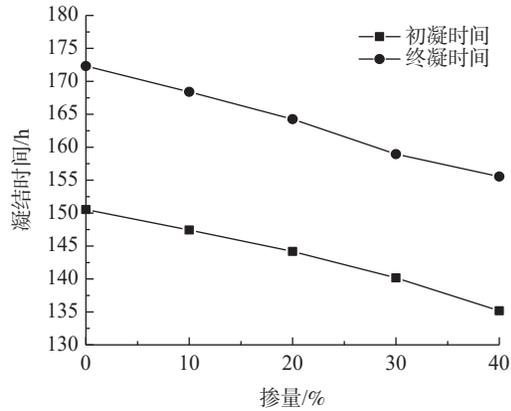


图 3 混凝土凝结时间的变化规律
Fig.3 Change rules of concrete setting time

由图 3 可知，随着石灰石粉掺量的不断增大，石灰石粉混凝土凝结时间均呈现出不断缩短，这是由于随着石灰石粉掺量的增大，混凝土内部水泥含量不断减小，在水灰比不变的前提下，水泥含量的降低会使得混凝土内部掺入的水量也不断减小，混凝土内部水泥的水化反应进行更快，且石灰石粉颗粒粒径小于水泥颗粒粒径，细小的颗粒能更好地使得凝聚混凝土的孔隙结构，最终使得混凝土更快地失去可塑性。

3.3 混凝土的抗氯离子侵蚀性能

绘制出混凝土的氯离子含量的变化规律见图 4。其中，测定混凝土的氯离子含量的位置设定为距端面距离 10、30、50、70 和 90 mm^[11]。

由图 4 可知，对于混凝土内部氯离子含量的变化规律分析如下：在同一测定氯离子含量的位置处，其含量的变化规律随着石灰石粉掺量的增大先减小后增大，这是由于石灰石粉颗粒较小，可以作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，提升了混凝土微观孔隙结构，使得混凝土内部的孔隙数量不断减少，且剩余孔隙之间的连接也被阻断，这就导致了氯离子不能更好地向混凝土深部迁移，故此时混凝土内部氯离子的含量也开始减少。但是随着石灰石粉掺量的持续增大，过量的石灰石粉作为充填物也会破坏已经平衡的孔隙结构，使得混凝土内部的裂隙数量不断增多，这为氯离子的传输提供了通道，故此时混凝土内部氯离子的含量也开始增大。在同一石灰石粉掺量作

用下，随着循环周期的不断增大，混凝土内部氯离子含量的变化规律呈现出不断增大的趋势，这是由于循环周期越大，混凝土在氯化钠溶液中浸泡时间就长，提供给氯离子迁移的时间就越多，故混凝土内部氯离子的含量不断增大。在同一石灰石粉掺量作用下，随着测定位置的不断增大，混凝土内部氯离子含量的变化规律呈现出不断减小的趋势，这是由于石灰石粉颗粒较小，可以作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，增加了氯离子向混凝土深部迁移的难度，故测定混凝土内部氯离子的含量不断减小。

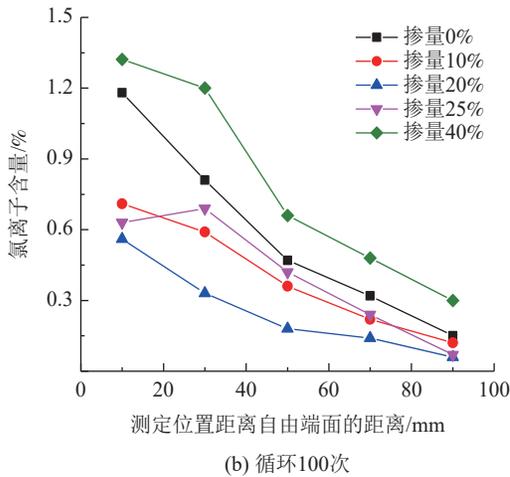
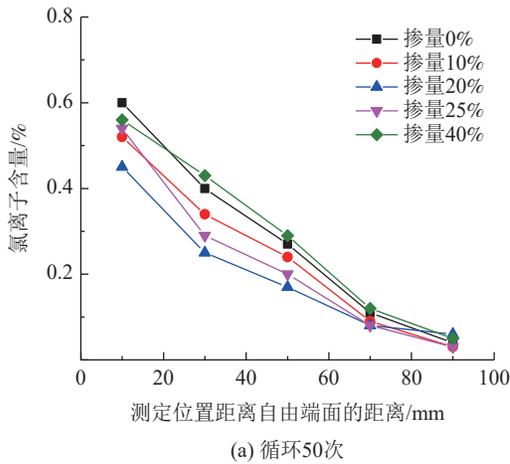


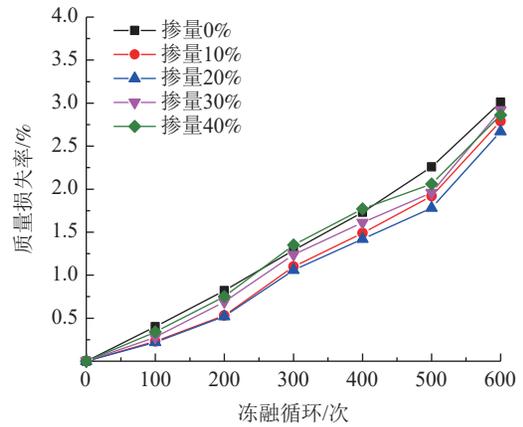
图4 循环周期50和100次下混凝土的氯离子含量的变化规律

Fig.4 Change rules of chloride ion content in concrete at 50 and 100 cycles

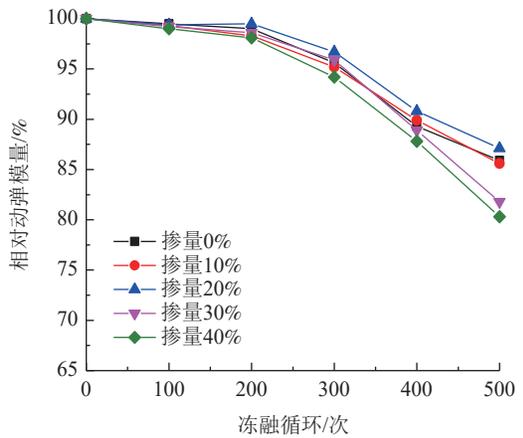
3.4 混凝土的抗冻性能

为了更好地描述混凝土的抗冻性能，现采用质量损失率和相对动弹模量两个指标对其抗冻性进行评价^[12]，测定并绘制混凝土抗冻性能指标的变化规律见图5。其中，混凝土的冻融循环次数设

定为0、100、200、300、400、500和1000次。



(a) 质量损失率



(b) 相对动弹模量

图5 混凝土抗冻性能指标的变化规律

Fig.5 Change rules of concrete frost resistance index

由图5可知，在同一石灰石粉掺量作用下，混凝土质量损失率随着冻融循环次数的不断增大呈现出不断增大的趋势，而混凝土的相对动弹模量却呈现出不断减小的变化趋势，这是由于混凝土内部孔隙中存在一定量的自由水，在冻结过程中混凝土内部的自由水就会发生冻结成固体冰，使得混凝土内部孔隙结构被液体水转化固体冰的膨胀力破坏，而在消融过程中，固体冰又会转化为液态水，这就使得孔隙中的液态水在迁移过程中产生了一定的孔隙水压力，在该孔隙水压力作用下混凝土孔隙结构被进一步破坏，进而在冻融循环反复过程中混凝土表面会不断脱落，导致了混凝土的承载力也会下降，故混凝土质量损失率会增大，相对动弹模量也会减小。在同一冻融循环次数作用下，混凝土质量损失率随着石灰石粉掺量不断增大呈现出先减小后增大的趋

势，而混凝土的相对动弹性模量却呈现出先增大后减小的变化趋势，这是由于石灰石粉颗粒较小，可以作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，提升了混凝土微观孔隙结构，使得混凝土微观结构更加致密，进而在宏观上表现为脱落混凝土质量减少且混凝土的承载力增强。

4 铁尾矿粉对石灰石粉混凝土性能的影响

为了减少过量石灰石粉对混凝土性能的影响，本文将在复掺石灰石粉和铁尾矿粉时，来分析两者之间比例的变化对混凝土性能的影响，设定石灰石粉和铁尾矿粉为 3:1、2:1、1:1、1:2 和 1:3；石灰石粉的掺量为 20%，铁尾矿粉是经过碱性激发剂激活的铁尾矿粉。

4.1 抗压强度和抗折强度

绘制出复掺矿粉混凝土的抗压强度和抗折强度的变化规律见图 6。

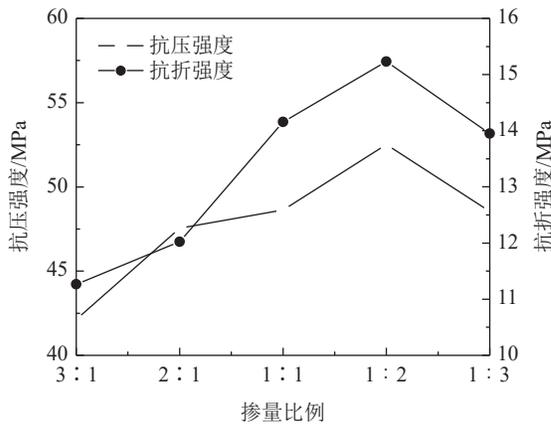


图 6 复掺矿粉混凝土的抗压强度和抗折强度的变化规律

Fig.6 Change rules of compressive strength and flexural strength of concrete mixed with slag powder

由图 6 可知，随着复掺矿粉比例的不断增大，复掺矿粉混凝土强度均呈现出先增大后减小的变化规律，以及在复掺矿粉比例为 1:2 时取得最大值，这是由于碱性激发铁尾矿粉的活性要远远大于石灰石粉的活性，这就使得铁尾矿粉的掺量越多，复掺矿粉就可以与混凝土中其他材料更好地发生化学反应生成具有胶凝性能的产物，该化学产物不仅会提升混凝土的强度，也可以作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，提升了混凝土微观孔隙结构，进而提升了混凝土整体强度。但

是随着复掺矿粉掺量的持续增大，过量的复掺矿粉作为充填物也会破坏已经平衡的孔隙结构，使得混凝土的强度开始下降，但是总体上铁尾矿粉掺量比例越大，混凝土的强度性能越好。

4.2 混凝土的凝结时间

复掺矿粉混凝土凝结时间的变化规律见图 7。

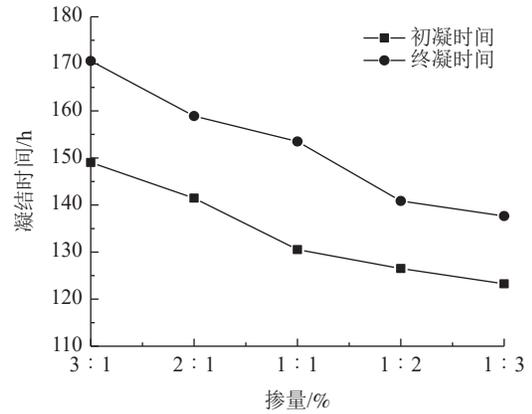


图 7 复掺矿粉混凝土凝结时间的变化规律

Fig.7 Change rules of setting time of mixed slag powder concrete

由图 7 可知，随着复掺矿粉比例的不断增大，复掺矿粉混凝土凝结时间均不断缩短，且比单掺石灰石粉混凝土凝结时间下降速率要快，这是由于随着复掺矿粉掺量的增大，混凝土内部水泥含量不断减小，在水灰比不变的前提下，水泥含量的降低会使得混凝土内部掺入水的用量也不断减小，且铁尾矿粉中活性物质发生化学反应时也会消耗混凝土内部的自由水分；同时，复掺矿粉颗粒粒径都要小于水泥颗粒粒径，细小的颗粒能更好地使得凝聚混凝土的孔隙结构，最终导致复掺矿粉混凝土内部水分含量下降更快，混凝土也更快地失去可塑性。

4.3 混凝土的抗氯离子侵蚀性能

以循环周期 50 次，测定位置距离自由端面的 30 mm 为例，复掺矿粉混凝土的氯离子含量^[13]的变化规律见图 8。

由图 8 可知，在同一测定位置处，随着复掺矿粉比例的不断增大，复掺矿粉混凝土氯离子含量均呈现出不断减小，且在比例为 1:2 时复掺矿粉混凝土氯离子含量的下降变快，这可能是由于在复掺矿粉比例为 1:2 之前，活性铁尾矿粉与混凝土内部材料发生化学反应，生成的化学产物充填在孔隙和裂隙中，使得混凝土内部留给氯离子

迁移的通道数量减少，进而在测点处测得氯离子含量要比单掺矿粉混凝土在测点处测得氯离子含量要少；在复掺矿粉比例为1:2之后，活性铁尾矿粉与混凝土内部材料发生化学反应生成化学产物的量要比单掺石灰石粉的量多，这就导致了过量的复掺矿粉作为充填物对混凝土孔隙结构的破坏更严重，使得混凝土内部产生新的裂隙等缺陷增多，增加了更多氯离子迁移的通道数量，进而使得在测点处测得氯离子含量要比单掺矿粉混凝土在测点处测得氯离子含量要多。

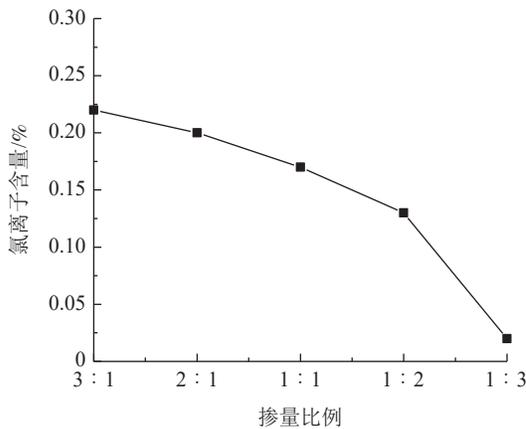


图8 复掺矿粉混凝土的氯离子含量的变化规律
Fig.8 Change rules of chloride ion content of mixed slag powder concrete

4.4 混凝土的抗冻性能

以冻融循环次数100次为例，复掺矿粉混凝土质量损失率和相对动弹模量的变化规律见图9。

由图10可知，在同一冻融循环次数作用下，混凝土质量损失率随着复掺矿粉比例的增大呈现出先减小后增大的趋势，而混凝土的相对动弹模量却呈现出先增大后减小的变化趋势，且在比例为1:2时混凝土的质量损失率最小，相对动弹模量最大，这是由于活性铁尾矿粉与混凝土内部材料发生化学反应生成化学产物，该化学产物具有较好的胶凝性，可以起到联结混凝土内部颗粒的作用，使得表面的混凝土更不容易发生脱落，且该化学产物作为充填物充填在混凝土内部孔隙中，提升了混凝土微观孔隙结构，进而提升了混凝土的整体强度，在宏观上表现为脱落混凝土质量减少且混凝土相对动弹模量增大。但是随着复掺矿粉比例的持续增大，活性铁尾矿粉与混凝土内部材料发生化学反应生成化学产物的量要比单掺石灰石粉的量多，这就导致了过量的复掺矿

粉作为充填物对混凝土孔隙结构的破坏更严重，最终表现为脱落混凝土质量增多且混凝土相对动弹弹性模量减小。

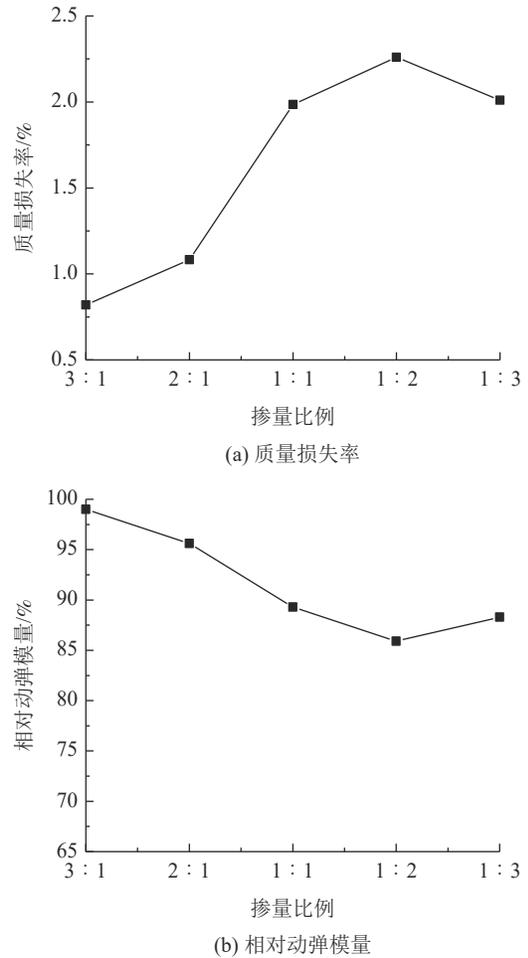


图9 复掺矿粉混凝土质量损失率和相对动弹模量的变化规律

Fig.9 Change rules of mass loss rate and relative dynamic modulus of mixed slag powder concrete

5 铁尾矿粉对石灰石粉混凝土氢氧化钙含量的影响

5.1 混凝土的TG-DTA曲线

复掺矿粉混凝土的TG-DTA曲线见图10。

由图10可知，不同铁尾矿粉和石灰石粉比例作用下混凝土的TG曲线和DTA曲线的变化规律基本一致。混凝土的TG指标都是随着温度的增大呈现出不断减小的趋势，而混凝土的DTA指标都是随着温度的增大呈现出减小、增大、减小、增大、减小、增大的变化趋势，且都有三个较为明显的吸热峰。其中，179℃所对应吸热峰

出现的原因是由于混凝土内部水化产物钙矾石热分解失水造成的，468 °C 所对应吸热峰出现的原因是由于氢氧化钙热分解失水造成的，761 °C 所对应吸热峰出现的原因是由于混凝土内部碳酸钙和少量水化产物热分解失水造成的，但是整体上随着石灰石粉和铁尾矿粉比例不断增大，在同一温度作用下混凝土的 DTA 呈现出不断增大的趋势且 TG 呈现出先减小后增大的趋势，这说明了铁尾矿的掺入和掺量对混凝土的 DTA 具有较大的影响，以及铁尾矿的掺入可能会改变混凝土内部水化产物的组分和产量。

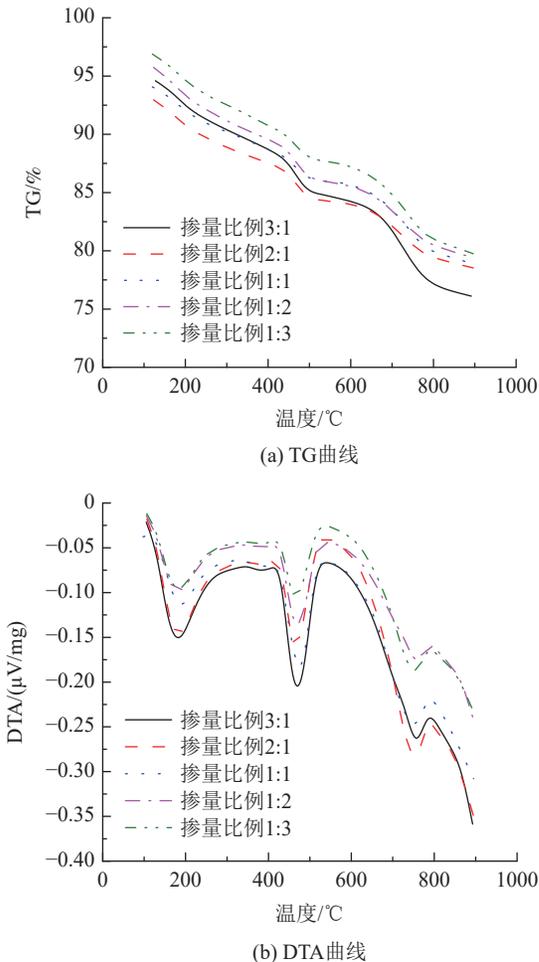


图 10 复掺矿粉混凝土的 TG-DTA 曲线
 Fig.10 TG-DTA curves of mixed slag powder concrete

5.2 氢氧化钙含量的测定

氢氧化钙含量与石灰石粉和铁尾矿粉比例的关系见图 11。

由图 11 可知，随着石灰石粉和铁尾矿粉比例不断增大，混凝土内部氢氧化钙含量呈现出不断减小的变化规律，且在比例为 1:2 时混凝土的氢

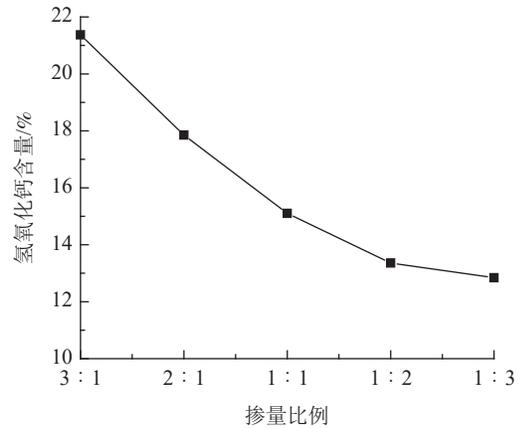


图 11 氢氧化钙含量与石灰石粉和铁尾矿粉比例的关系

Fig.11 Relationship between calcium hydroxide content and the ratio of limestone powder and iron tailings powder

氧化钙含量的降低幅度有所减缓，这是由于石灰石粉内部含有大量的氧化钙，氧化钙遇水也会变成氢氧化钙，和在混凝土内部进行水化反应时会产生氢氧化钙，使得此时混凝土内部氢氧化钙含量最大，但是当掺量比例的增大，铁尾矿粉含量增多、石灰石含量减小，这就导致了氧化钙遇水变成氢氧化钙的含量减少，且铁尾矿粉会与氢氧化钙发生二次化学反应，会消耗混凝土内部大量氢氧化钙，进而导致混凝土内部氢氧化钙含量不断降低。当石灰石粉和铁尾矿粉掺量比超过 1:2 时，此时石灰石粉遇水产生的氢氧化钙含量较低，且大量铁尾矿会消耗大量的氢氧化钙，使得残留在混凝土内部的氢氧化钙含量很少，故此时混凝土的氢氧化钙含量的降低幅度有所减缓。

6 结 论

(1) 综合实验结果得到，石灰石粉掺量为 20% 时混凝土的强度特性较佳，复掺矿粉比例为 1:2 时混凝土的强度和耐久性均达较佳。

(2) 在同一冻融循环次数作用下，混凝土质量损失率随着复掺矿粉比例的增大呈现出先减小后增大的趋势，而混凝土的相对动弹性模量却呈现出先增大后减小的变化趋势。

(3) 在同一测定位置处，随着复掺矿粉比例的不断增大，复掺矿粉混凝土氯离子含量均呈现出不断减小，且在比例为 1:2 时复掺矿粉混凝土氯离子含量的下降变快。

(4) 整体上随着石灰石粉和铁尾矿粉比例不

断增大，在同一温度作用下混凝土的 DTA 呈现出不断增大的趋势，且 TG 呈现出先减小后增大的趋势。

(5) 随着石灰石粉和铁尾矿粉比例不断增大，混凝土内部氢氧化钙含量呈现出不断减小的变化规律，且在比例为 1:2 时混凝土的氢氧化钙含量的降低幅度有所减缓。

参考文献：

[1] 马卫华, 孟庆娟, 康洪震, 等. 铁尾矿砂混凝土梁受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(S1):322-329.
MA W H, MENG Q J, KANG H Z, et al. Experimental study on shear behavior of iron tailings concrete beams[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(S1):322-329.

[2] 宁波, 闫艳, 左夏伟, 等. 铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(4):159-164.
NING B, YAN Y, ZUO X W, et al. Experimental study on mechanical properties of iron tailings concrete[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):159-164.

[3] 陈振富, 蔡双阳, 陶秋旺, 等. 铅锌尾矿砂混凝土抗压强度及屏蔽性能试验研究[J]. 混凝土, 2021(2):68-71+76.
CHEN Z F, CAI S Y, TAO Q W, et al. Experimental study on compressive strength and shielding performance of lead-zinc tailings concrete[J]. Concrete, 2021(2):68-71+76.

[4] 徐金金, 杨树桐, 刘治宁. 碱激发矿粉海水海砂混凝土与 CFRP 筋粘结性能研究[J]. 工程力学, 2019, 36(S1):175-183.
XU J J, YANG S T, LIU Z N. Study on the bond performance between alkali-activated mineral powder seawater sand concrete and CFRP reinforcement[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(S1):175-183.

[5] 侯云芬, 刘锦涛, 赵思儒, 等. 铁尾矿粉对水泥砂浆性能的影响及机理分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5):1149-1157.
HOU Y F, LIU J T, ZHAO S R, et al. Effect of iron tailings powder on cement mortar performance and mechanism analysis[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2019, 27(5):1149-1157.

[6] 黄晓燕, 倪文, 李克庆. 铁尾矿粉制备高延性纤维增强水泥基复合材料[J]. 工程科学学报, 2015, 37(11):1491-1497.
HUANG X Y, NI W, LI K Q. Preparation of high ductility fiber reinforced cement-based composites with iron tailings

powder[J]. Journal of Engineering Science, 2015, 37(11):1491-1497.

[7] 吴凯, 施惠生, 徐玲琳, 等. 集料对含矿粉混凝土抗硫酸镁侵蚀性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(3):442-448.

WU K, SHI H S, XU L L, et al. Effect of aggregate on magnesium sulfate resistance of concrete containing mineral powder[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(3):442-448.

[8] 管俊峰, 鲁猛, 王昊, 等. 几何与非几何相似试件确定混凝土初度及强度[J]. 工程力学, 2021, 38(9):45-63.

GUAN J F, LU M, WANG H, et al. Determination of concrete toughness and strength by geometric and non-geometric similar specimens[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9):45-63

[9] 韩宇栋, 王振波, 刘伟康, 等. 不同强度海水珊瑚骨料混凝土断裂性能对比研究[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(4):881-886.

HAN Y D, WANG Z B, LIU W K, et al. Comparative study on fracture performance of seawater coral aggregate concrete with different strength[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(4):881-886.

[10] 陈超, 孙振平. 硅灰对掺有无碱速凝剂水泥浆体性能的影响[J]. 材料导报, 2019, 33(14):2348-2353.

CHEN C, SUN Z P. Effect of silica fume on the performance of cement paste with or without alkali accelerator[J]. Material Guide, 2019, 33(14):2348-2353.

[11] 王胜年, 曾俊杰, 范志宏. 基于长期暴露试验的海工高性能混凝土耐久性分析[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10):82-89.

WANG S N, ZENG J J, FAN Z H. Durability analysis of marine high-performance concrete based on long-term exposure test[J]. Journal of Civil Engineering, 2021, 54(10):82-89.

[12] 申爱琴, 杨景玉, 郭寅川, 等. SAP 内养生水泥混凝土综述[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4):1-31.

SHEN A Q, YANG J Y, GUO Y C, et al. Overview of curing cement concrete in SAP[J]. Journal of Transportation Engineering, 2021, 21(4):1-31.

[13] 张登祥, 蒋晓明. 大流动性高强轻集料混凝土约束收缩及抗裂性能研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(5):190-196.

ZHANG D X, JIANG X M. Research on restrained shrinkage and crack resistance of high strength lightweight aggregate concrete with large fluidity[J]. Journal of Railway, 2021, 43(5):190-196.

(下转第 203 页)

2.Department of Architecture and Civil Engineering, Lyuliang University, Lyuliang 033001, Shanxi, China)

Abstract: This is an article in the field of ecological restoration of mines. The characteristics of soil heavy metals in bauxite mining areas are of great significance for the optimization of land reclamation methods. Taking the soil of Shanxi bauxite reclamation area as the research object, a five-step extraction method was used to extract and measure the characteristics of soil heavy metal content in deep and shallow reclamation areas. The results show that there is a big difference in the content of heavy metals in the soil of the deep and shallow reclamation methods. The deep reclamation area is generally higher than the shallow reclamation area, and the content of heavy metal Zn is 5.93 times than that of the shallow reclamation area, the heavy metal Zn in the deep reclamation area has the most serious pollution to the soil, followed by Ni, the heavy metal content in the shallow reclamation area is obviously lower than its standard value, and does not exceed the minimum limit value specified in the standard. The coefficient of variation of soil Zn in the deep reclamation area is the largest, reaching 62.58%, and the content of heavy metal Zn is greatly affected by the outside world. The RSP value of the heavy metal Pb in the soil of the deep and shallow reclamation areas is the largest, which has the greatest impact on the environment, and the other three heavy metals have no pollution. The content of heavy metals Zn and Pb in the bauxite waste rock decreases with the increase of particle size, which has a significant accumulation and migration to the surrounding soil, and its reclamation has a certain impact on the environment.

Keywords: Metal mines; Heavy metals; Soil pollution; Reclamation areas; Morphological distribution

////////////////////////////////////
(上接第 183 页)

Effect of Iron Tailings Powder on the Mechanical Properties and Calcium Hydroxide Content in Limestone Powder Concrete

ZHANG Jujing¹, HUA Dongshen²

(1.Shaanxi Vocational and Technical College, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2.School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: This is an article in the field of ceramics and composites. Influence of the mixed mineral powder content and proportion on the performance of concrete were studied. The results show that with the continuous increase of the proportion of mixed slag powder, the strength of the mixed slag powder concrete shows a change rule that first increases and then decreases. And the maximum value is achieved when the ratio of compound ore powder is 1:2. Under the effect of the same number of freeze-thaw cycles, the mass loss rate of concrete shows a trend of first decreasing and then increasing with the increase of the proportion of mixed mineral powder. However the relative dynamic elastic modulus of concrete shows a trend of first increasing and then decreasing. At the same measuring position, as the proportion of compound slag powder increases, the chloride ion content in the compound slag powder concrete shows a continuous decrease. And when the ratio is 1:2, the chloride ion content of the mixed slag powder concrete decreases faster. The comprehensive test results show that the strength characteristics of limestone tailings concrete are the best when the content of limestone tailings is 20%. The strength and durability of concrete reach the best when the ratio of mixed mineral powder is 1:2.

Keywords: Ceramics and composites; Iron tailings powder; Limestone tailings powder; Mass loss rate; Relative dynamic modulus of elasticity; Chloride ion content; Strength