

铁尾矿在建筑材料中的应用研究

封孝信 华北理工大学材料科学与工程学院

1 研究背景

据统计，全国尾矿库数量 4919 座（国家矿山安全监察局在四川成都召开尾矿库安全治理工作情况媒体通气会，2024.4）。

据不完全统计，当前我国尾矿和废石累积堆存量已达 700 多亿吨（中国砂石协会，2022.4）。截至 2022 年底，全国尾矿资源总量为 310 亿吨~320 亿吨（主要包括铁、铜、铝、铅、锌、钨、锡、钼、金等 9 种矿产的选矿尾矿，但也有文献介绍，目前全国尾矿堆存总量高达 600 亿吨，估计包括煤矸石及磷、硫、锰等矿产的选矿尾矿）（新浪财经，2024.3）。

河北省是中国最大的铁矿石生产省份，2023 年铁矿石产量达到 4.2 亿吨，连续 27 年位居全国第一。河北省铁矿资源主要分布于三大铁矿产区：冀东铁矿区，包括唐山、承德和秦皇岛，是我国第三大铁矿聚集区；邯邢铁矿区，包括邯郸和邢台；张家口铁矿区。

（1）尾矿堆存的危害

- ①危害环境，危及生命及财产安全；
- ②占用大量土地；
- ③给国家和企业造成经济重负。

（2）建筑用原材料过度采挖的危害

- ①影响了河势的稳定；
- ②破坏了周围生态环境；
- ③危及了行洪安全；
- ④威胁了通航安全；
- ⑤破坏了基础设施。

一方面是大量的尾矿堆放，破坏环境，危及人民生命及财产安全，急需治理；另一方面是天然资源出现匮乏，过度采挖，同样破坏环境，危害社会，急需寻找代替品。

铁尾矿的合理利用就可以解决这两个方面的问题。

2 研究内容及结果

本课题主要是针对迁西、迁安、遵化的尾矿砂和尾矿石进行研究。

2.1 用铁尾矿砂石代替天然砂石制备混凝土

2.1.1 制备普通混凝土

（1）铁尾矿砂石的基本性质研究

①化学成分

化学成分以 SiO_2 为主，尾矿砂中 SiO_2 含量比尾矿石中的含量高。尾矿砂和尾矿石都含有较高的 Fe_2O_3 。

②矿物组成

矿物成分主要为石英、长石类、角闪石、磁铁矿等。

③密度

尾矿砂、石的表观密度略高于天然砂及碎石，但堆积密度低于天然砂及碎石。

④压碎指标及岩石强度

尾矿砂石的压碎指标达到了 I 类砂石的质量要求。

迁安尾矿石岩石抗压强度为 126.5MPa，满足岩浆岩 ≥ 80 MPa 的要求。

⑤杂质及有害成分

亚甲蓝 MB 值、云母含量、硫化物及硫酸盐 (SO_3) 含量、氯离子含量等均符合要求。

⑥碱骨料反应 (AAR) 活性

- 迁安尾矿砂具有碱硅酸反应活性；
- 迁安尾矿石的膨胀率 $<0.1\%$ ，但已很接近 0.1，可能具有潜在碱活性；
- 迁西尾矿砂具有碱硅酸反应活性；
- 遵化尾矿砂具有碱硅酸反应活性。

⑦坚固性指标

质量损失均 $<8\%$ ，符合 I 类砂要求。

⑧放射性检验

均符合建筑主体材料规定的要求，使用范围不受限制。

⑨颗粒形状、表面特性、粗糙度和吸水率

天然砂较浑圆，尾矿砂多棱角，主要为块状，形状不规则。

尾矿砂颗粒表面凸凹不平、棱角尖锐；颗粒表面较粗糙。

迁安天然砂的吸水率为 6.4%，迁安尾矿砂的吸水率为 8.5%。尾矿砂偏高。

⑩级配

尾矿砂的级配与产地有关：迁安尾矿砂的级配较好，迁西尾矿砂的级配尚可，都在级配 2 区；遵化尾矿砂的级配不良。

尾矿石级配偏窄，粒径主要集中在 10~20mm。

(2) 尾矿砂石混凝土的施工性能研究

①对坍落度的影响

在用水量、水灰比、外加剂用量基本相同的情况下，尾矿砂石混凝土的坍落度的影响因强度等级不同而有所差别：低强度等级和高强度等级，小于天然砂石混凝土；中间强度等级，持平或大于天然砂石。

在用水量、水灰比相同的情况下，若要获得相同的坍落度，则需要增加外加剂用量。

②对凝结时间的影响

坍落度相近时，尾矿砂石混凝土初终时间与天然砂石混凝土相近，或略长于天然砂石混凝土。

③对混凝土的泵送性能的影响

配合比相同、坍落度相近时，尾矿砂石混凝土与天然砂石混凝土泵送性能相差无几。

④对保水性、粘聚性和离析的影响

- 对保水性的影响：成型后，表面泌水量比天然砂石混凝土略多，特别是对坍落度要求较大的混凝土更为明显；
- 对粘聚性的影响：尾矿砂石混凝土的粘聚性比天然砂石混凝土略差，中低强度混凝土较明显；
- 对离析的影响：尾矿砂混凝土易产生离析，在水泥用量少的混凝土中较为突出。

⑤对混凝土容重的影响

- 尾矿砂的表观密度比天然砂高出 $50\sim 100\text{ kg/m}^3$ ；
- 尾矿石的表观密度比普通碎石(石灰石质)高出 $80\sim 120\text{ kg/m}^3$ ；
- 尾矿砂石混凝土拌和物容重比天然砂石混凝土稍大，大体上高出 $50\sim 100\text{ kg/m}^3$ 。

⑥尾矿砂石混凝土拌和物流动性研究

尾矿砂石对混凝土的坍落扩展度的影响与混凝土的强度等级有关，对于低强度等级和高强度等级，影响程度大，且明显小于天然砂石混凝土。

(3) 尾矿砂石混凝土的强度研究

- 不论是低强度等级，还是高强度等级的混凝土，尾矿砂石混凝土的抗压强度与天然砂石混凝土的相近，有的甚至超过天然砂石混凝土；
- 在 180d 内，尾矿砂石混凝土的各龄期的抗压强度与天然砂石混凝土相近，有的超过了天然砂石混凝土；
- 尾矿砂石可以用于配制高强度等级的混凝土；
- 尾矿砂石混凝土的抗折强度均不低于天然砂石混凝土。

(4) 尾矿砂石混凝土配合比设计研究

在水灰比和用水量相同的条件下，配制尾矿砂石混凝土时，其砂率相对于天然砂石混凝土总体上高出 2%。

配制尾矿砂石混凝土时，要达到同样的流动度，高效减水剂所需掺量大致比同条件天然砂石混凝土高出 0.2%。

(5) 尾矿砂石混凝土的干缩性能研究

用尾矿砂和尾矿石替代河砂和碎石，对混凝土收缩性的影响因混凝土的强度等级不同而不同。

- 对于 C30 和 C40 强度等级的混凝土，用尾矿砂和尾矿石替代河砂和碎石，其混凝土的收缩率接近或高于河砂和碎石混凝土的收缩率；
- 对于 C50 和 C60 强度等级的混凝土，用尾矿砂和尾矿石替代河砂和碎石，其混凝土的收缩率均低于河砂和碎石混凝土的收缩率。

(6) 尾矿砂石混凝土的耐久性研究

①抗冻性能

- 不论哪一个强度等级的混凝土，当用尾矿砂取代河砂时，对混凝土的抗冻

性没有影响。

- 当用尾矿石取代普通碎石时，以及全部用尾矿砂和尾矿石取代河砂和普通碎石时，混凝土的抗冻性均有不同程度的降低。

②抗水渗透性

- 当用铁尾矿砂取代天然砂时，随着取代率的增加，混凝土的渗透性出现先降低后又升高的趋势。当铁尾矿砂取代率在 25%左右时，铁尾矿砂混凝土的相对渗透系数最小；
- 当用铁尾矿石取代普通碎石时，随着取代率的增加，在整个取代范围内混凝土的渗透性降低；
- 当用铁尾矿砂和铁尾矿石同时取代天然砂和普通碎石时，随着取代率的增加，混凝土的渗透性出现先降低后又升高的趋势。当铁尾矿砂取代率在 50%左右时，铁尾矿砂混凝土的相对渗透系数最小；
- 不论那一种取代方式，取代率对低强度等级混凝土渗透性的影响大于对高强度等级混凝土渗透性的影响；
- 尾矿砂取代天然砂对混凝土渗透性的影响大于尾矿石取代普通碎石。

③抗氯离子渗透性

尾矿砂石混凝土的抗氯离子渗透能力比天然砂石混凝土稍差。

(7) 尾矿砂石对混凝土导热性的影响

用尾矿砂石配制的混凝土面板试样的导热系数小于天然砂石混凝土面板试样，对建筑保温无不利影响。

(8) 混凝土的放射性

依据国家标准《建筑材料放射性核素限量》(GB6566-2001)的规定，用铁尾矿配制的混凝土符合作为建筑主体材料的要求，使用范围不受限制。

(9) 尾矿砂砂浆对无线通讯信号的影响

移动 GSM 网络语音测试合格，即铁尾矿砂石混凝土对无线通讯信号无不利影响。

(10) 尾矿砂石混凝土工程应用研究

- 浇注过程中无泌水、无离析，振捣、抹面等工作性能良好；
- 构件表观与天然砂石混凝土一致；
- 强度发展良好。

2.1.2 制备超高性能混凝土 (UHPC)

以铁尾矿砂代替河砂可以制备超高性能混凝土 (Ultra High Performance Concrete, UHPC)。

铁尾矿砂对河砂的替代率为 90%时，混凝土抗压强度可以达到 120MP 以上，抗折强度可以达到 40MPa 以上。

2.1.3 制备高延性混凝土 (工程水泥基复合材料 ECC)

(1) 纤维掺量的影响

在一定的范围内，随着纤维掺量的增加，铁尾矿砂 ECC 试件的等效弯曲强度和等效弯曲韧性都呈现了上升的趋势。

(2) 砂胶比的影响

存在一个适宜的 S/B，使得试件的弯曲性能最好。

(3) 铁尾矿砂粒径的影响

- 铁尾矿砂粒径对弯曲性能的影响与粉煤灰的掺量有关。
- 当 FA 掺量较大时，增大铁尾矿砂的粒径有利于弯曲性能的提升。

(4) 水胶比的影响

- W/B 对铁尾矿砂 ECC 弯曲性能的影响与 FA 的掺加量有关。
- 当 FA 掺量较大时，适当增加 W/B 对提升 ECC 的弯曲性能有利。

(5) 粉煤灰掺量的影响

- FA 掺量对铁尾矿砂 ECC 弯曲性能的影响与 W/B 有关。
- 在相同 W/B 时，适当增加 FA 掺量，有利于 ECC 弯曲性能的提高。

(6) 矿粉掺量的影响

掺入适量的矿粉可以提高 ECC 的弯曲性能。

结论：以铁尾矿砂完全代替石英砂可以制备出性能良好的高延性混凝土。

2.2 利用铁尾矿制备建筑陶粒

以铁尾矿、粘土、煤矸石为原料，制备了陶粒，研究了配合比、煅烧时间、煅烧温度对陶粒性能的影响。部分试样的性能测试结果如表 1。

表 1 铁尾矿制备陶粒的性能测试结果

S10: 1200℃,15min; S22: 1180℃,15min; 1180℃,15min。

- 利用铁尾矿制备陶粒是可行的；

试样 编号	表观密度 $\rho_{ap} / \text{kg/m}^3$	堆积密度 $\rho / \text{kg/m}^3$	吸水率 $\omega_a / \%$	筒压强度 f_a / MPa	空隙率 $v / \%$	粒型系数 K'_e
S10	1550	783	0.417	5.94	49.5	1.07
S22	1850	890	0.180	7.49	48.1	1.12
S29	1756	897	0.304	7.45	48.9	1.11

- 铁尾矿在煅烧陶粒过程中可以加入适量的粘结成分，例如粘土、煤矸石；
- 以铁尾矿为主要原料烧制陶粒的适宜温度在 1200℃左右，适宜保温时间为 15min 左右。

2.3 利用铁尾矿制备建筑砌块

2.3.1 原材料

铁尾矿，粉煤灰，铝粉（发气剂），生石灰，水泥（P.O42.5），石膏。

2.3.2 配合比及蒸养制度

(1) 不加发气剂

实验方案：

- CaO/SiO₂ 比值：0.69, 0.78, 0.88, 0.93, 0.98, 1.03；
- 养护温度：180℃；
- 养护时间：4h、5h、6h、7h、8h、9h、10h、11h。

(2) 加发气剂（铝粉）

实验方案:

- CaO/SiO₂ 比值: 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6;
- 养护温度: 140℃、160℃、180℃;
- 养护时间: 3h、5h、7h。

2.3.3 实验结果

(1) 不加发气剂

①尾矿粉-粉煤灰-石灰系统

蒸压温度 180℃, 养护时间 9h, C/S 为 0.98 时, 试件的抗压强度达到了 65MPa。

②尾矿粉-粉煤灰-水泥-石灰系统

蒸压温度 180℃, 养护时间 9h, C/S 为 0.98 时, 试件的抗压强度达到了 76MPa。

③尾矿粉-粉煤灰-水泥-石灰-石膏系统

蒸压温度 180℃, 养护时间 8h, C/S 为 0.93 时, 试件的抗压强度达到了 79MPa。

(2) 加发气剂

- 养护制度为 160℃、3h, CaO/SiO₂ 为 1.0 的试件抗压强度 6.6MPa;
- 养护制度为 180℃、3h, CaO/SiO₂ 为 1.0 的试件抗压强度 9.1MPa;
- 养护制度为 180℃、7h, CaO/SiO₂ 为 1.0 的试件抗压强度 9.83MP。

2.4 利用铁尾矿制备地聚合物

以铁尾矿为主要原料, 通过不同的活化方法, 制备了铁尾矿基地聚合物。研究了铁尾矿的细度、活化方式、加热温度等对地聚合物抗压强度的影响。实验结果如下:

(1) 在相同的活化条件下, 铁尾矿磨得越细, 由其制备的地质聚合物的抗压强度也越高;

(2) 热-化学活化能够显著提高铁尾矿的反应活性, 且存在一个较适宜的热-化学活化温度。本研究的较适宜温度为 500℃, 在此条件下制备的地聚合物抗压强度达到了 70.85MPa;

(3) 热-化学活化使铁尾矿中的低活性矿物发生部分转化, 形成了可溶性的硅酸钠及介稳态的不定形物质等高活性矿物;

(4) 热-化学活化铁尾矿制备的地质聚合物, 其反应产物更多, 微观结构更加致密。

3 总结

- 用铁尾矿砂石代替天然砂石制备混凝土是可行的, 能够制备出施工性能良好、强度和耐久性符合要求的混凝土;
- 以铁尾矿为主要原料烧制陶粒的适宜温度在 1200℃左右, 适宜保温时间为 15min 左右;
- 利用铁尾矿, 在适宜的蒸养条件下, 可以制备制备出不同强度、不同密度的加气混凝土砌块;
- 利用铁尾矿经适当的活化处理可以制备出高强度的地聚合物。