

铁尾矿 - 钢纤维双掺混凝土制备及性能研究*

Preparation and Performance Research of Iron Tailings - steel Fiber Double - mixed Concrete

宁 波

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

摘 要: 铁尾矿长期堆积在尾矿库造成资源浪费和环境破坏, 研究铁尾矿 - 钢纤维混凝土力学性能对开发利用铁尾矿具有重要意义。在混凝土中掺入铁尾矿和钢纤维, 研究不同材料配比下混凝土的抗压强度变化。结果表明: 铁尾矿掺量过低, 生成的胶状聚合物较少, 黏结作用较弱, 铁尾矿掺量过高会导致混凝土含水量过高, 均会降低混凝土抗压强度; 钢纤维对混凝土抗压强度具有提升作用; 氢氧化钠掺量与水胶比主要影响胶状聚合物的形成, 分布均匀、充足的胶状聚合物可有效连接水泥基体和钢纤维, 增强混凝土抗压强度; 铁尾矿 - 钢纤维混凝土最优配比为铁尾矿掺量 40%、45 mm 长度钢纤维体积掺量 2%、氢氧化钠掺量 40%、水胶比 0.2。

关键词: 铁尾矿; 钢纤维; 混凝土; 最佳配比; 力学性能

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2024) 03-0016-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.03.004

NING Bo

(Shaanxi Railway Institute, Weinan 714000, China)

Abstract: The long-term accumulation of iron tailings in tailings ponds causes resource waste and environmental damage. Studying the mechanical properties of iron tailings steel fiber concrete is of great significance for the development and utilization of iron tailings. Add iron tailings and steel fibers to concrete to study the changes in compressive strength of concrete under different material ratios. The results show that if the content of iron tailings is too low, less gel like polymers are generated and the bonding effect is weak. If the content of iron tailings is too high, it will lead to a high water content in the concrete, which will reduce the compressive strength of the concrete; Steel fibers have an enhancing effect on the compressive strength of concrete; The dosage of sodium hydroxide and the water cement ratio mainly affect the formation of gel like polymers. A uniformly distributed and sufficient gel like polymer can effectively connect the cement matrix and steel fibers, enhancing the compressive strength of concrete; The optimal ratio of iron tailings to steel fiber concrete is 40% for iron tailings, 2% for steel fiber volume of 45 mm length, 40% for sodium hydroxide, and 0.2 for water cement ratio.

Keywords: iron tailings; steel fiber; concrete; optimum ratio; mechanical properties

0 引言

在铁矿开采中, 经过选矿工艺将铁精粉从铁矿石内提取, 大量废弃的尾矿堆积在尾矿库, 不但造成资源浪费, 而且占据大量的土地面积, 破坏周边的生态环境, 人工砌筑的库体也会威胁附近居民的生命安全, 铁尾矿再利用成为铁矿开采和环境保护

* 基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目 (18JK0179)

作者简介: 宁 波 (1979—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 混凝土材料及桥隧检测方面工作。

收稿日期: 2023-08-13

的关键问题^[1-3]。铁尾矿内含有大量硅酸盐，在碱溶液激发作用下可作为胶凝材料应用于建筑行业^[4]，但是由于铁尾矿强度不足，单独使用会导致混凝土抗压强度无法满足工程要求，而掺入钢纤维可有效改善混凝土的力学性能^[5]。研究铁尾矿-钢纤维双掺混凝土不同材料配比下力学性能的变化规律对工程现场配制具有指导意义^[6]。目前混凝土相关研究主要集中在铁尾矿单掺、钢纤维单掺与其他纤维混掺方面^[7-8]。孙雪伟等^[9]将不同体积的钢纤维掺入混凝土，发现钢纤维混凝土开裂的关键是钢纤维与混凝土之间的黏结性，首先发生断裂的是钢纤维附近的水泥基体，当钢纤维与胶凝水泥之间有效黏结时，混凝土的抗压强度随钢纤维掺入量的增加而升高。关于铁尾矿-钢纤维双掺混凝土力学性能的研究较少^[10-11]，因此，采用铁尾矿和碱溶液作为胶凝材料，端勾型钢纤维作为加强材料，研究不同材料配比下混凝土的抗压强度变化，根据材料最佳比对某铁矿采空区充填，对采空区充填选取材料配比具有指导意义。

1 混凝土制备与试验

1.1 原材料

铁尾矿采自某铁矿矿区，其组分构成见表1；钢纤维采用端勾型，直径为0.75 mm，长度为40 mm，密度为7.8 g/cm³，抗拉强度为1150 MPa；水泥采用海螺牌P·O 42.5普通硅酸盐水泥，密度为3.15 g/cm³；铁尾矿和天然黄河河砂作为细骨料，河砂最大直径为2.0 mm，细度模数为2.5，直径为5 mm至10 mm的碎石作为粗骨料；采用氢氧化钠、氢氧化钾、水玻璃作为激发剂，氢氧化钠含量为99%以上；水玻璃模数为2.3；拌和水为自来水。

表1 铁尾矿组分构成

Table 1 Composition of iron tailings /%

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O
75.63	2.16	10.05	5.04	0.53	1.28	5.31

1.2 试件制备与试验

改变铁尾矿掺量、钢纤维长度、钢纤维掺量、碱溶液种类、碱掺量、水胶比，分析双掺混凝土的力学性能。铁尾矿掺量变化范围为10%~80%，钢纤维长度变化范围为30~60 mm，钢纤维体积掺量变化范围为0~3%，碱掺量变化范围为10%~50%，水胶

比变化范围为0.1~0.4。受到控制变量试验方法的限制，将铁尾矿掺量为40%、钢纤维体积掺量为1%、钢纤维长度为40 mm、氢氧化钠掺量为30%和水胶比为0.3作为基础配比，改变单一变量研究混凝土力学性能。按照GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行混凝土试件的配制，水泥、河砂与铁尾矿总量、碎石按照2:3:5比例加入搅拌器搅拌均匀，按照比例加入钢纤维再次进行搅拌，得到干料混合物。将固体碱和铁尾矿按照铁尾矿掺量和碱掺量比例混合搅拌均匀，按照水胶比加入一定质量的水配制成胶凝材料，搅拌浸泡0.5 h使碱激发剂与铁尾矿充分反应。将胶凝材料加入干料混合物搅拌均匀，分三次加水得到混凝土浆料。将搅拌均匀的混凝土浆料浇筑入模，试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm，通过振动台振动成型。自然凝固4 d后放入养护箱内养护28 d。采用液压万能试验机对混凝土进行力学性能测试。

2 铁尾矿-钢纤维双掺混凝土力学性能

2.1 铁尾矿掺量对混凝土抗压强度的影响

钢纤维体积掺量为1%，长度为40 mm，氢氧化钠掺量为30%，水胶比为0.3，改变铁尾矿掺量得到铁尾矿-钢纤维混凝土抗压强度变化曲线，如图1所示。

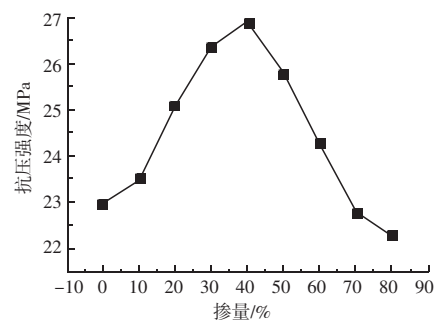


图1 铁尾矿掺量对铁尾矿-钢纤维混凝土抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of iron tailings content on the compressive strength of iron tailings steel fiber concrete

随着铁尾矿掺量增加，混凝土抗压强度先升高再降低。当铁尾矿掺量为40%时，混凝土抗压强度最大；未掺铁尾矿混凝土抗压强度为23 MPa，铁尾矿掺量为10%、20%、30%、40%、50%、60%时，混凝土抗压强度分别为23.5、25.1、26.4、26.9、25.8、24.3 MPa，相比未掺铁尾矿混凝土抗压强度

材料科学

升高了 2.2%、9.1%、14.7%、16.9%、12.2% 和 5.6%；铁尾矿掺量为 70% 以上时，混凝土抗压强度反而低于未掺铁尾矿的混凝土。铁尾矿相比天然河砂颗粒粒径更小，掺入后可有效填充钢纤维与水泥物料、河砂与河砂之间的空隙，加强不同物料的黏结性，提高了混凝土的密实度，使混凝土抗压强度增大。另外，铁尾矿比表面积较大，水化反应更强烈，在碱性环境下激发出更多的胶凝物质，也有利于混凝土抗压强度的提高。当铁尾矿掺量高于 40% 继续增加时，大量细度更小的铁尾矿导致细骨料总表面积过大，抗压强度降低。

2.2 钢纤维长度对混凝土抗压强度的影响

铁尾矿掺量为 40%，钢纤维体积掺量为 1%，氢氧化钠掺量为 30%，水胶比为 0.3，改变钢纤维长度得到铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度变化曲线，如图 2 所示。

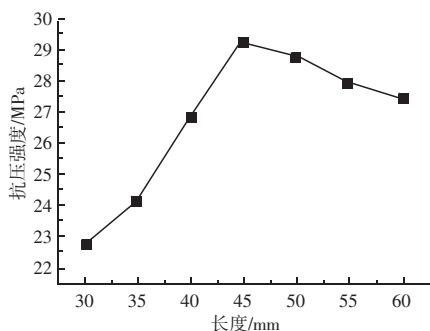


图 2 钢纤维长度对铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度的影响

Fig. 2 Effect of steel fiber length on the compressive strength of iron tailings steel fiber concrete

随着钢纤维长度的增加，混凝土抗压强度先增大后降低，钢纤维长度为 45 mm 时，混凝土抗压强度达到最大值 29.3 MPa；钢纤维长度由 30 mm 增加至 45 mm 时，混凝土抗压强度由 22.4 MPa 增加至 29.3 MPa。更长的钢纤维可相互搭接，形成的网络空间结构更广泛，稳定性更高，对外部压力的支撑能力更强，同时长度更大的钢纤维桥接作用更强，对水泥基体之间的锚固作用更明显，限制裂缝的发展，提高混凝土抗压强度。当钢纤维长度继续增加至 60 mm 时，双掺混凝土抗压强度降低至 27.0 MPa。过长的钢纤维在水泥基体中分布混乱，降低了钢纤维的多向性，仅在某些方向连接水泥基体，反而降低了钢纤维的桥接作用，三维空间中钢纤维数量过少无法形成密实的骨架结构，对外部载荷的承载能

力降低，混凝土抗压强度降低。

2.3 钢纤维体积掺量对混凝土抗压强度的影响

铁尾矿掺量为 40%，钢纤维长度为 40 mm，氢氧化钠掺量为 30%，水胶比为 0.3，改变钢纤维掺量得到铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度变化曲线，如图 3 所示。

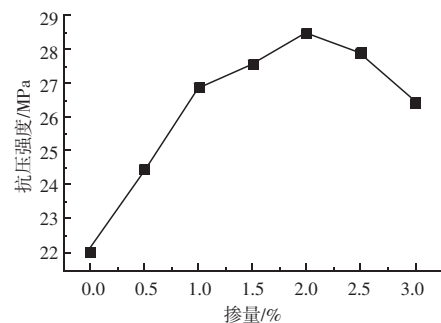


图 3 钢纤维掺量对铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度的影响

Fig. 3 Effect of steel fiber content on the compressive strength of iron tailings steel fiber concrete

混凝土掺入钢纤维后，抗压强度显著增强。钢纤维体积掺量为 2% 时，对混凝土抗压强度的改善作用最明显。当钢纤维体积掺量由 0 升高至 2% 时，混凝土抗压强度由 22.1 MPa 升高至 28.5 MPa。在钢纤维体积掺量较小时，钢纤维的桥接作用促使水泥基体之间连接更加紧密，钢纤维均匀分布在水泥基体内形成稳定的网格状空间结构，在压缩过程中网格结构可起到支撑抗压作用，抑制裂纹的产生与发展，提高混凝土抗压强度。虽然钢纤维表面与水泥基体之间易出现滑移剥离，但细度较小的铁尾矿可有效填充两者之间的空隙，在碱环境激发作用下，铁尾矿生成的聚合物增强了钢纤维与水泥基体的黏附力，钢纤维与铁尾矿的互补作用促使混凝土抗压强度升高。当钢纤维体积掺量由 2% 升高至 3% 时，混凝土抗压强度开始下降，由 28.5 MPa 降低至 26.5 MPa。过量的钢纤维在水泥基体内分布混乱，出现局部聚集，网格状空间结构被破坏，聚集部分易发生应力集中，形成薄弱点，此部位在压缩时首先产生裂纹向外发展，导致混凝土抗压强度降低。

2.4 碱溶液对混凝土抗压强度的影响

铁尾矿掺量为 40%，钢纤维体积掺量为 1%，长度为 40 mm，水胶比为 0.3，采用不同种类的碱溶液及不同掺量得到铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度变化曲线，如图 4 所示。

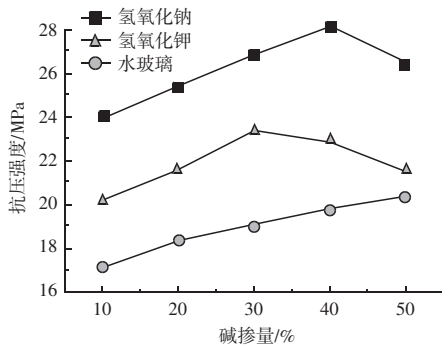


图4 碱溶液对铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度的影响
Fig. 4 Effect of alkaline solution on the compressive strength of iron tailings steel fibers concrete

由图4可知,相比氢氧化钾和水玻璃,氢氧化钠作为碱激发剂对混凝土抗压强度的改善作用最明显。其主要原因是,铁尾矿在氢氧化钠溶液中溶解率较大,硅元素和铝元素在碱性环境中被激发形成的胶状聚合物增多,对水泥基体和钢纤维的胶结作用变强,从而提高混凝土的抗压强度。随着氢氧化钠掺量的增加,混凝土抗压强度先升高后降低,当氢氧化钠掺量为40%时,混凝土抗压强度最大。这是因为,当氢氧化钠掺量较低时,铁尾矿中的硅、铝等物质无法完全溶解,形成的胶状聚合物不足,胶结作用较差,混凝土抗压强度较低;当氢氧化钠掺量过高时,高浓度的碱性环境促进了铁尾矿和水泥的水化反应,缩短了混凝土凝固时间,导致物料和胶状聚合物分布不均形成微裂缝,混凝土抗压强度降低。

2.5 水胶比对混凝土抗压强度的影响

铁尾矿掺量为40%,钢纤维体积掺量为1%,长度为40 mm,氢氧化钠掺量为30%,改变水胶比得到铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度变化曲线,如图5所示。

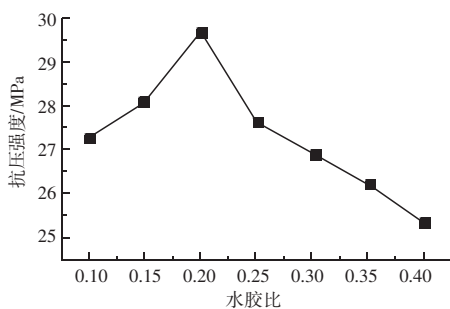


图5 水胶比对铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度的影响
Fig. 5 Effect of water cement ratio on the compressive strength of iron tailings steel fibers concrete

当水胶比升高时,混凝土抗压强度先升高后降低,水胶比为0.2时,混凝土抗压强度最高。当水胶比由0.1升高至0.2时,混凝土抗压强度由27.3 MPa升高至29.7 MPa。在此区间内,水分含量较低,碱激发铁尾矿形成的胶状聚物流动性较差,无法均匀地分布在水泥基体内,影响胶状聚合物在钢纤维和水泥基体内发挥胶凝作用,会出现局部黏结效果较差的现象。当水胶比升高时,有利于铁尾矿在碱溶液内的溶解,提高碱对铁尾矿的激发效果,胶状聚物流动性提升,在钢纤维附近和水泥基体内分布均匀,加强两者的黏结性,减少钢纤维表面附近的空隙。当水胶比由0.2升高至0.4时,混凝土抗压强度由29.7 MPa降低至25.3 MPa。过高的水分会导致碱溶液浓度降低,对铁尾矿的激发作用下降,同时过多的水分蒸发会导致混凝土内存在较多水空隙,混凝土的抗压强度下降。

3 工程应用

某铁矿采用铁尾矿 - 钢纤维双掺混凝土对采空区进行充填,根据研究成果,铁尾矿掺量为40%,钢纤维体积掺量为2%,长度为45 mm,氢氧化钠掺量为40%,水胶比为0.2,制备得到的铁尾矿 - 钢纤维混凝土抗压强度为29.8 MPa,满足采空区充填最低抗压强度要求,充填完成的采空区可有效支撑山体结构,未出现坍塌、失稳等情况。

4 结论

采用铁尾矿和碱溶液作为胶凝材料,端勾型钢纤维作为加强材料,研究不同材料配比混凝土的抗压强度变化,得到以下结论:

(1) 随着铁尾矿掺量、钢纤维体积掺量、钢纤维长度、氢氧化钠掺量和水胶比的增加,混凝土的抗压强度先升高再降低。

(2) 混凝土最优配比为铁尾矿掺量40%、钢纤维体积掺量2%、长度45 mm、氢氧化钠掺量40%、水胶比0.2。

(3) 铁尾矿含量过低,生成的胶状聚合物较少,黏结作用较弱,而铁尾矿含量过高导致混凝土含水量过高,均会降低双掺混凝土的抗压强度。

(4) 钢纤维对混凝土抗压强度 (下转第44页)

材料科学

- [4] 胡骏. 论刚性防水 [J]. 中国建筑防水, 2020 (7): 1-7, 13.
- [5] 颜敬, 王树峰, 贺红星, 等. 武汉滨江核心区地下空间环路工程设计与施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2022, 51 (7): 44-48.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 国家标准第 1 号修改单: GB/T 23439-2017/XG1-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [7] PAN P Y, ZHENG F, PENG J, et al. Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage - compensating concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26 (6): 977-981.
- [8] 阎培渝, 韩建国, 曹丰泽, 等. 补偿收缩混凝土性能的影响因素与质量控制 [J]. 施工技术, 2018, 47 (16): 97-99.
- [9] 徐菊, 王林, 侯维红. 外掺氧化镁膨胀剂对水泥净浆流变特性及胶砂强度的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2017 (6): 15-19.
- [10] MEHTA P K. Magnesium oxide additive for producing selfstress in mass concrete [C]. 7th International Congress on the Chemistry of Cement. Paris: Vol. III, 1980: 6-9
- [11] 宋蕴桥, 丁帅, 郑文才, 等. 氧化镁膨胀剂对大体积混凝土裂缝控制与应用 [J]. 建筑技术, 2024, 55 (7): 783-785. DOI: 10.13731/j.jzjs.2024.07.0783.
- [12] 曹丰泽, 高玉亭, 张慧杰, 等. MgO 膨胀剂在大体积混凝土结构中的抗裂效果研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2021 (8): 24-27. DOI: 10.19761/j.1000-4637.2021.08.024.04.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB50496-2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [14] 杨和礼. 原材料对基础大体积混凝土裂缝的影响与控制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2004.

(上接第 10 页)

型建筑材料, 2024, 51 (2): 83-86.

- [6] 况栋梁, 龙景潭, 张阳, 等. VAE 改性水泥砂浆微观结构及性能研究 [J]. 应用化工, 2020, 49 (9): 2182-2186.
- [7] 宋东方, 刘富强, 罗闯旦, 等. 聚合物改性水泥基材料力学性能研究 [J]. 中国科技论文, 2019, 14 (12): 1311-1316.
- [8] 黄展魏, 陈伟, 李秋, 等. 水性环氧树脂改性水泥砂浆力学性能及微观结构 [J]. 硅酸盐通报, 2017, 36 (8): 2530-2535.
- [9] 买淑芳, 吴怀国, 汪毅. 聚合物改性水泥砂浆试验规程: DL/T 51262-2001 [S]. 中华人民共和国国家经济贸易委员会, 2001.
- [10] 全国化工系统高校数学协作组. 工程数学: 概率统计 [M]. 河南科学技术出版社, 1992.

(上接第 19 页)

具有提升作用, 主要与其形成的空间骨架结构和桥接作用有关, 合适的纤维掺量和长度才会形成稳定支撑骨架。

(5) 氢氧化钠掺量与水胶比主要影响胶状聚合物的形成, 分布均匀、充足的胶状聚合物可有效连接水泥基体和钢纤维, 增强双掺混凝土的抗压强度。

参 考 文 献

- [1] 吴丽萍, 王军. 铁尾矿粉-硅粉矿物掺合料对混凝土性能的影响 [J]. 矿产综合利用, 2023 (2): 184-190.
- [2] 张海军, 李涛, 秦广冲. 铁尾矿砂对混凝土强度及抗硫酸盐冻融的影响 [J]. 矿业研究与开发, 2023, 43 (2): 76-81.
- [3] 万金侠, 孙博一. 铁尾矿粉沥青混凝土胶浆-集料粘附性和 TG-DSC 实验研究 [J]. 矿产综合利用, 2022 (6): 66-72.
- [4] 史波, 何旺. 铁尾矿砂超高性能混凝土的冻融循环耐久性分析 [J]. 金属矿山, 2022 (12): 65-69.
- [5] 吴瑞东. 石英岩型铁尾矿微粉及废石对水泥基材料的性能影响及机理 [D]. 北京: 北京科技大学, 2020.
- [6] 雷翔宇. 铁尾矿砂混凝土梁高温后受弯性能研究 [D]. 唐山: 华北理工大学, 2022.
- [7] 姚鹏飞. 复合石灰石粉-尾矿混合砂混凝土力学性能与微观机理研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [8] 王康. 高强复合矿物掺合料-尾矿机制砂混凝土基本性能与梁力学性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2022.
- [9] 孙雪伟, 张万磊, 仲建军, 等. 钢纤维增强混凝土性能及微观结构研究 [J]. 路基工程, 2023 (2): 85-89.
- [10] 郁浩安. 中高强复合粉煤灰-矿渣-尾矿混合砂混凝土基本性能研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2021.
- [11] 刘益良, 李祥涛, 黄兴鹏, 等. 纤维增强铁尾矿砂水泥基充填材料实验研究 [J]. 北华航天工业学院学报, 2023, 33 (2): 10-12.